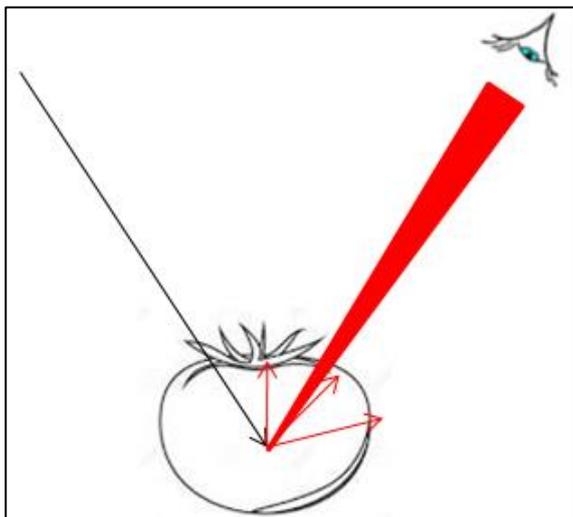


LUZ Y COLOR



En este documento (versión textual del [tema online](#) del mismo título) cubrimos los principales aspectos relativos a la física de los colores que percibimos los seres vivos, desde sus diversos mecanismos de emisión hasta la recepción, pasando por distintos procesos que influyen en él.

Manuel Alonso Orts (manalo01@ucm.es)

Manuel Alonso Sánchez (manoloalonsosanchez@gmail.com)

(22 de diciembre de 2024)

INDICE

Emisión de luz y color

Propagación de la luz en medios no vacíos. Transparencia y opacidad

Colores del arco iris

Colores espectrales de gases atómicos

Colores producidos por incandescencia

Colores producidos por bioluminiscencia y por quimioluminiscencia

Colores pigmento (moléculas orgánicas)

Colores pigmento (moléculas inorgánicas) y materiales inorgánicos

Fluorescencia y fosforescencia

Iridiscencia (Colores obtenidos por interferencias)

Experiencias sobre iridiscencia

Reflectores de Bragg (o cristales fotónicos 1D)

Cristales fotónicos en la naturaleza. Color estructural de algunos animales

Investigación sobre cristales fotónicos. Algunas aplicaciones

Un experimento sencillo para producir colores por interferencias (Disco Láser)

Esparcimiento Rayleigh atmosférico (Color del cielo, del Sol y la Luna eclipsada)

Percepción de los colores (Teoría tricromática)

Obtención de los colores pigmento mediante suma sustractiva

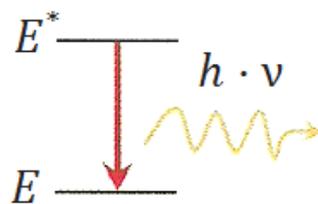
Metamerismo y percepción subjetiva de los colores

Alguna bibliografía utilizada (para personas curiosas que quieran ampliar)

Conferencia y entrevista, relacionadas con algunos contenidos de este tema

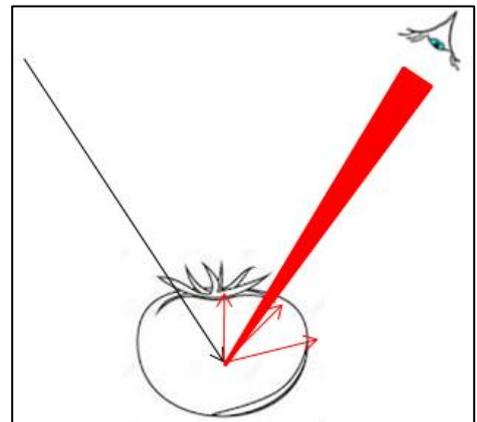
EMISIÓN DE LUZ Y COLOR

Toda emisión de luz se produce como resultado de saltos que tienen lugar desde estados excitados de la materia a estados de menor energía. Para que estas desexcitaciones se produzcan antes se tiene que haber suministrado energía a la fuente. La frecuencia de la luz que esa fuente emite viene determinada por el "gap" (separación) entre los dos estados permitidos de energía entre los que ocurre la des-excitación y se obtiene aplicando la ley Planck: $= (E^* - E)/h$ (siendo $h: 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} = 4,135 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$).



Cuando la emisión se produce en el rango de valores de longitudes de onda a las que es sensible el ojo humano (entre 380 nm y 750 nm aproximadamente), la longitud de onda de la luz emitida define el **color** que se atribuye a la fuente que emite esa luz, y, por extensión, a la luz emitida por ella.

Así, por ejemplo, a los tomates maduros se les asigna un **color rojo**, porque cuando son iluminados con luz blanca, cada punto de ellos absorbe la luz blanca y reemite en todas las direcciones fotones, cuya longitud de onda está mayoritariamente por encima de los 650 nm. Cuando esa luz emitida por el tomate impacta en nuestra retina produce la sensación que nos hace atribuir a dicho tomate su tonalidad rojiza. Por extensión también se llama "luz roja" a luz de esa longitud de onda, aunque lo cierto es que toda luz es completamente invisible para nuestros ojos. Lo que procesa nuestro cerebro es la imagen de cada punto de la materia iluminada (el tomate) que se construye en la retina cuando miramos hacia esa materia y llega a los ojos un haz cónico de la luz procedente de ese punto material del que sale luz en todas las direcciones.



Por otra parte, aunque el proceso de generación de luz es el mismo con independencia de que la fuente sea visible o no, no se suele utilizar el término color para referirse a luz emitida fuera del espectro visible. Por ejemplo, no se dice color ultravioleta, sino solamente luz ultravioleta.

Estrictamente, para describir con la mayor fidelidad posible los procesos físicos involucrados en la producción, la modificación, etc., del color debería usarse la física cuántica. Hay que tener en cuenta que, no únicamente en la emisión, sino también cuando, después de ser emitida, la luz viaja hacia

nuestros ojos, se puede ver involucrada en diversos procesos que requieren a esta teoría para ser perfectamente explicados y que también afectan a "su color", bien sea porque implican interacciones adicionales entre luz y materia (como ocurre, por ejemplo, en la refracción, la dispersión, etc.), y/o porque implican interacciones de la luz consigo misma (como sucede, por ejemplo, en las interferencias). La física cuántica (donde la descripción de la luz se realiza en términos de una onda de probabilidad) es la única teoría capaz de obtener resultados acordes con todos los hechos empíricos relativos al estudio de los procesos luminosos y entre ellos todos los que aquí nos van a ocupar, que tienen que ver con la producción, la modificación y la percepción del color.

Sin embargo, en el desarrollo de este documento se van a usar principalmente dos modelos descriptivos de la luz anteriores a la física cuántica actual, concretamente: 1) La descripción en términos de fotones (cuántica primigenia de Planck), que, tomados como partículas clásicas sin masa, se moverían en el vacío a la velocidad c y siguiendo trayectorias de tiempo mínimo. 2) La descripción ondulatoria que proporciona la teoría electromagnética clásica de Maxwell.

Ninguno de estos dos modelos puede explicar por sí solo todos los fenómenos relativos al comportamiento de la luz (y, entre ellos, los relativos al color), pero veremos que resulta útil acudir a ellos porque cada uno por su parte, sí es capaz de obtener determinados resultados en el estudio de estos fenómenos, que se aproximan mucho a los resultados más correctos (y coherentes entre sí) que proporciona la física cuántica.

Más concretamente, veremos que una descripción de la luz en términos de fotones es muy útil para diseccionar procesos relativos al estudio del color, dando cuenta de interacciones que en dichos procesos tienen lugar a nivel íntimo entre entidades materiales (átomos, moléculas, redes atómicas o moleculares, núcleos, etc.) y esos fotones. Complementariamente, también veremos que la descripción ondulatoria de la luz según la teoría electromagnética de Maxwell constituye una excelente aproximación en todas aquellas situaciones en las que la descripción microscópica detallada de los procesos luminosos se puede reemplazar por una descripción efectiva macroscópica (ello ocurre cuando el número de fotones por unidad de frecuencia es muy grande).



PROPAGACIÓN DE LA LUZ EN MEDIOS NO VACÍOS. TRANSPARENCIA Y OPACIDAD

Una imagen nemotécnica sugerente para interpretar la propagación de la luz en un medio no vacío es la de una "carrera de relevos" en la que los relevistas serían los fotones, constituyentes de dicha luz. Los dibujos adjuntos (debajo) resumen esta metáfora: Dibujo 1: Un fotón viaja a la velocidad c por el vacío existente entre una partícula que lo emitió y otra partícula otra que lo va a absorber. Dibujo 2: Como resultado de esa absorción el fotón desaparece y la partícula salta a un estado excitado (de mayor energía). Dibujo 3: Posteriormente, esa partícula puede "relajarse", emitiendo un nuevo fotón que "prosigue la carrera".



Esta descripción ayuda a entender por qué la luz tiene una velocidad inferior a c en los medios materiales. Aunque en cualquier medio los fotones viajan a la velocidad c entre partícula y partícula, la luz globalmente avanza por ese medio material a una velocidad inferior, porque "en cada relevo" (en cada interacción fotón-materia), se consume tiempo. Cuantas más interacciones se produzcan, más tiempo se consumirá entre todas ellas y menor será la velocidad de la luz en ese medio (mayor el índice de refracción, n , del mismo).

Para completar esta descripción es muy importante tener en cuenta que, a medida que la luz avanza y va interaccionando con algunas partículas del medio, los procesos de desexcitación de esas partículas implican reemisiones de los nuevos fotones en todas las direcciones. Esto no significa que cuando se considera el fenómeno global todas las direcciones tengan la misma probabilidad de indicar el "camino que sigue la luz". Al contrario, existe, para cada proceso, un camino más probable, que predice la física cuántica y que coincide con lo que indican las leyes ordinarias de la óptica, como, por ejemplo, la ley de la reflexión, la ley de la refracción, etc.

Esta descripción fotónica de la propagación de la luz en medios materiales ayuda a entender también por qué podemos "ver rayos luminosos" bajo determinadas condiciones, como, por ejemplo, el rayo de luz láser roja en la fotografía adjunta (tomada en el laboratorio escolar por alumnos del segundo autor de este trabajo) dentro del recipiente. Dicho recipiente contenía agua en la que se habían disuelto unas gotitas de leche, para propiciar la producción de muchas interacciones entre los fotones y las moléculas de la leche disuelta. Como esas moléculas de leche reemiten la luz roja en todas las direcciones (incluyendo las que se dirigen hacia nuestros ojos) podemos "ver el rayo de luz" dentro del recipiente, pero no fuera (antes y

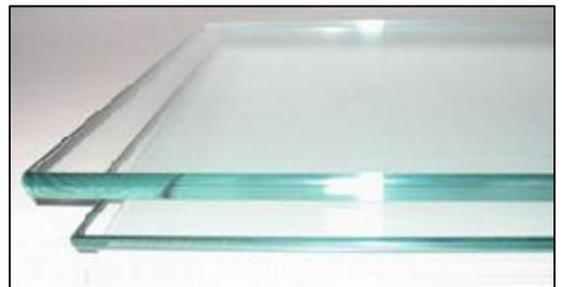


después) porque ahí (en el aire) apenas se producen interacciones entre los fotones y las (escasas) partículas del aire.

Con estos conceptos se puede explicar también la **transparencia** u **opacidad** de los materiales. La transparencia de un material en un determinado rango de frecuencias ocurre cuando la energía de los fotones es significativamente diferente a la de cualquier posible salto energético en ese material. Entonces casi ninguno de los fotones que componen esa luz interacciona con partículas del mismo, y dicha luz atraviesa “de lado a lado” el material. En sentido, la opacidad de un material en un determinado rango de frecuencias ocurre cuando una mayoría de los fotones son absorbidos (con lo que su energía se convierte en energía interna del material, que se calienta) y, entre los que son reemitidos, la mayoría viajan en sentido opuesto o diferente al que tienen cuando inciden, lo que globalmente implica que esa luz no puede atravesar el material.

Ahora bien, puesto que la capacidad de las partículas del medio para absorber y reemitir fotones depende de que la energía de cada uno de esos fotones sea del orden de magnitud de alguno de los saltos de energía permitidos por las partículas de dicho medio, en general los materiales resultan ser transparentes para algunas frecuencias de la luz y opacos para otras. Por ejemplo, el vidrio de una ventana ordinaria es bastante transparente a la luz blanca y, a la vez, bastante opaco a la luz ultravioleta (UV). Por eso vemos lo que hay al otro lado de una ventana, pero no nos ponemos morenos tomando el sol a través de ella.

Hemos dicho que el vidrio es bastante transparente para la luz blanca. No lo es totalmente, porque siempre hay una parte de la energía de esa luz blanca que interacciona con él y es absorbida. Lo podemos comprobar fijándonos en vidrios muy gruesos o, también, apilando varias capas de ellos más delgados. A medida que aumenta el grosor, la luz que se transmite al otro lado va cambiando de blanca a verde (que corresponde a la luz menos absorbida por el vidrio), de verde a verde más y más oscuro y, finalmente, sería negro (no se transmitiría nada). Esta es la razón por la que vemos los bordes de los vidrios de un color **verdoso** o **azulado** (como se observa en la fotografía adjunta). Al mirar hacia el borde, llega a nuestros ojos luz que ha tenido que atravesar longitudinalmente todo el vidrio. Cuando la luz solar incide sobre una ventana, el vidrio se calienta un poco por este motivo, y mucho más porque, además de algo de luz blanca, el vidrio absorbe muy eficientemente luz UV, incrementándose su energía interna.



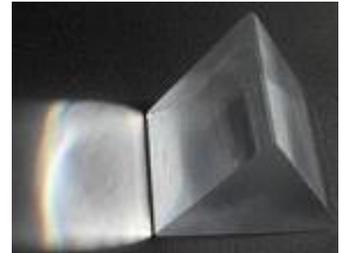
COLORES DEL ARCO IRIS



En un tema de nuestra página web dedicado a la “naturaleza de la luz”, se explica el proceso de **dispersión de la luz**, que ocurre cuando un rayo de luz blanca que viaja por el aire se refracta en algunos medios transparentes (por ejemplo, en agua o en vidrio) y se descompone en un haz de rayos coloreados. Los colores de dicho haz abarcan todo el espectro de la luz a la que el ojo humano es sensible y se pueden observar en varios fenómenos del mundo natural, entre ellos el **arco iris**. En la imagen adjunta se ve uno doble, que observamos el 4 de diciembre de 2024 en la ciudad

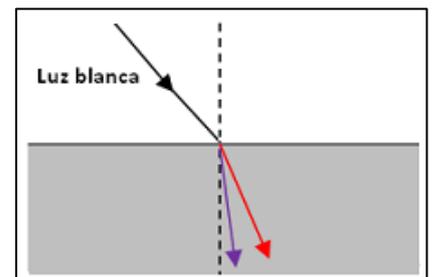
alemana de Bremen (Fotografía tomada por el primer autor de este trabajo).

También se puede obtener esta gama de colores en el laboratorio escolar haciendo incidir oblicuamente un rayo de luz blanca sobre un cuerpo transparente adecuado, como puede ser, por ejemplo, un prisma de vidrio. La imagen adjunta corresponde a esta experiencia. La fotografía la tomaron alumnos del segundo autor de este trabajo en el laboratorio de Física del IES "Leonardo da Vinci" de Alicante.



El modelo ondulatorio clásico sobre la radiación explicó la dispersión partiendo de considerar a la luz blanca como una combinación de campos electromagnéticos, cuyas longitudes de onda abarcan desde unos 380 nm (**luz violeta**) hasta unos 750 nm (**luz roja**).

En el vacío (y, muy aproximadamente, también en el aire) todas estas radiaciones viajan juntas y cuando las recibimos producen en nuestra retina la sensación del color blanco. En cambio, en medios como el vidrio o el agua, el índice de refracción de la luz disminuye paulatinamente al ir aumentando la longitud de onda. De ello se deduce, aplicando el principio de Huygens en la refracción que tiene lugar cuando estas radiaciones transitan desde el aire hacia el vidrio (o hacia al agua), que las que tienen longitud de onda mayor (**rojo**) se desvían menos que las que tienen longitud de onda menor (**violeta**)



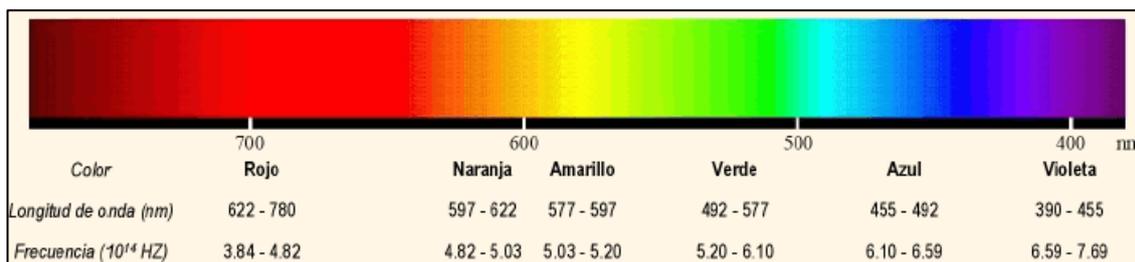
Después de haber interpretado de manera global la dispersión de la luz con la teoría electromagnética clásica, es instructivo diseccionarlo microscópicamente. Nos fijamos entonces en que los fotones que componen la luz que incide sobre, por ejemplo, un vidrio, pueden producir excitaciones de las partículas de dicho vidrio cuando sus frecuencias son próximas a algunas de las transiciones energéticas permitidas en el material. En general, en el vidrio esto es factible en todo el rango de valores de longitud de onda de la luz del espectro visible (también para otras muchas longitudes de

onda fuera de dicho espectro) porque la estructura de su red cristalina es lo suficientemente compleja, como para que sean muchas las transiciones (atómicas, moleculares, etc.) posibles.

La absorción estimulada (por los fotones incidentes) y la reemisión espontánea de nuevos fotones desde las partículas de esa red son los procesos dominantes en la reflexión y la refracción de la luz, que suceden en la interfase o frontera entre el aire y el vidrio. La luz resultante del conjunto de todas las reemisiones de fotones y de la luz incidente es la luz reflejada en el aire y refractada en el vidrio. Respecto a la luz refractada, que es la en la que aparecen los colores, la física cuántica prevé una dirección de salida preferente (la misma que prevé el modelo ondulatorio clásico de la luz) para la mayoría de los fotones reemitidos, que ha de ser distinta para cada longitud de onda. Por eso, se separan los rayos dependiendo de su "color". Por otro lado, como hay reemisiones atómicas de fotones en todas las direcciones, alguna luz no sale en las direcciones indicadas por la ley de la refracción, y ello nos permite ver todos esos "rayos coloreados" al mirar hacia el vidrio. Lo que vemos son partículas del propio vidrio que emiten luz en las direcciones (diferentes a la que tiene globalmente al rayo) que apuntan hacia nuestros ojos.

Conviene tener en cuenta también que las radiaciones visibles no son las únicas que se dispersan en este proceso de refracción aire-vidrio. Siguiendo la misma ley, las radiaciones ultravioletas más cercanas al visible (como hemos visto en el apartado anterior, las más alejadas son absorbidas por el vidrio) se desvían más que las violetas (se acercan más a la dirección normal en el esquema mostrado un poco más arriba) y las radiaciones infrarrojas se desvían menos que las rojas (se alejan más de la dirección normal). Esto se puede comprobar realizando el experimento con la misma luz solar, pero usando detectores que, a diferencia del ojo humano, sí sean sensibles a radiaciones no visibles (se puede utilizar, por ejemplo, un sistema fotográfico, para aprovechar el hecho de que las radiaciones infrarrojas y ultravioletas dejan marca en films de fotografía).

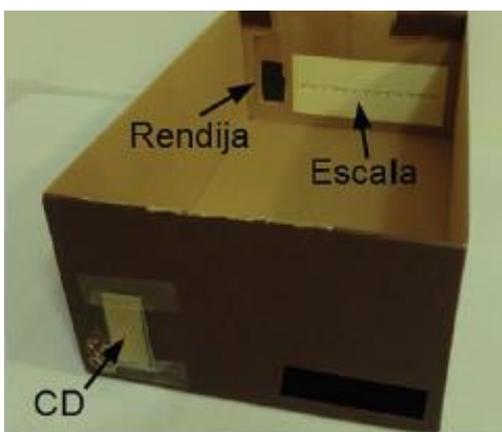
Termina este apartado, con la representación (debajo de este texto) de la gama continua de tonalidades de color que conforman el espectro visible, en paralelo con las longitudes de onda y las frecuencias que les corresponden.



COLORES ESPECTRALES DE GASES ATÓMICOS

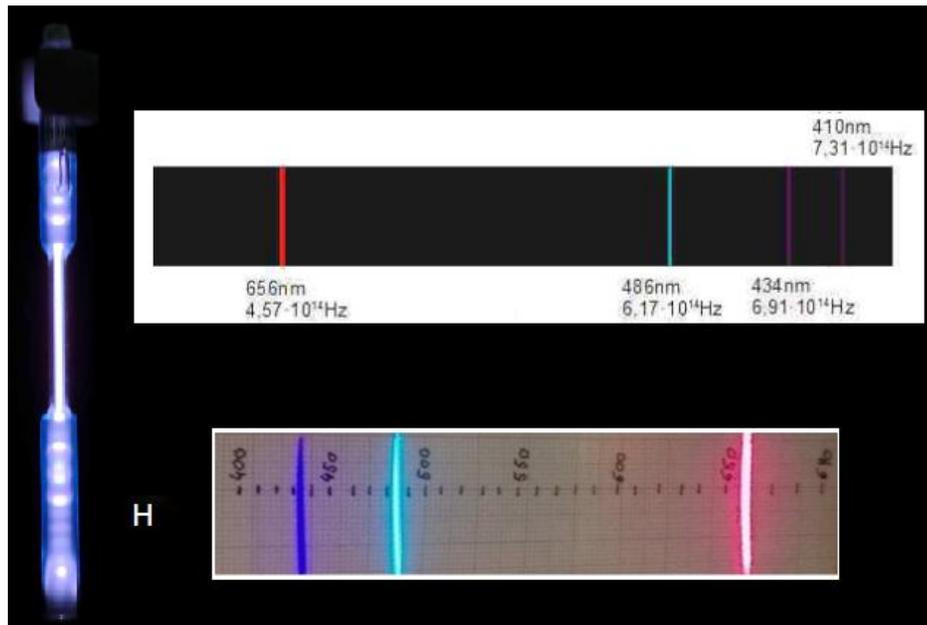
En el siglo XIX se desarrolló el espectroscopio y se utilizó para analizar luz generada en laboratorio por calentamiento de diversas fuentes: gases, metales, sales, etc. Aquellos estudios pusieron de manifiesto por primera vez que cada átomo produce un espectro de emisión característico y discontinuo.

Los laboratorios escolares suelen disponer de electroscopios y puede resultar también muy instructivo para cualquier persona construir uno casero, como el que se muestra en la fotografía adjunta (debajo a la izquierda). Lo construyó en 2014 el profesor Francisco Savall con sus alumnos de Secundaria y usando los siguientes materiales: una caja de zapatos con la que se hizo el receptáculo; un CD del que se obtuvo (cortando un rectángulo) la red de difracción; papel milimetrado, sobre el que se construyó la escala de medida de las longitudes de onda. En Internet se pueden encontrar más modelos para construir un espectroscopio sencillo y eficaz, usando una plantilla recortable, como la que muestra la segunda imagen adjunta (a la derecha).



Sea con un electroscopio de elaboración propia, como alguno de los anteriores, o con los que se puedan tener en la dotación de un laboratorio escolar, se pueden observar muy fácilmente espectros producidos por algunos gases a baja presión cuando se les somete a descargas eléctricas y comprobar de manera inmediata que la parte visible de tales espectros producidos por esos gases atómicos en los procesos de desexcitación que ocurren entonces, tiene unas determinadas líneas coloreadas, únicas e invariables para cada gas.

En la imagen que podemos ver a continuación de este párrafo, se observa un tubo espectral de hidrógeno (H) y su espectro de emisión, doblemente representado: a) Mediante un dibujo típico del mismo (imagen superior); b) A través de la fotografía de un espectro real, que se obtuvo con el espectroscopio casero del profesor Savall (imagen inferior, dependiendo de la estructura del espectroscopio las líneas obtenidas se ordenan como las de la imagen superior o, como en este caso, su simétrica especular).

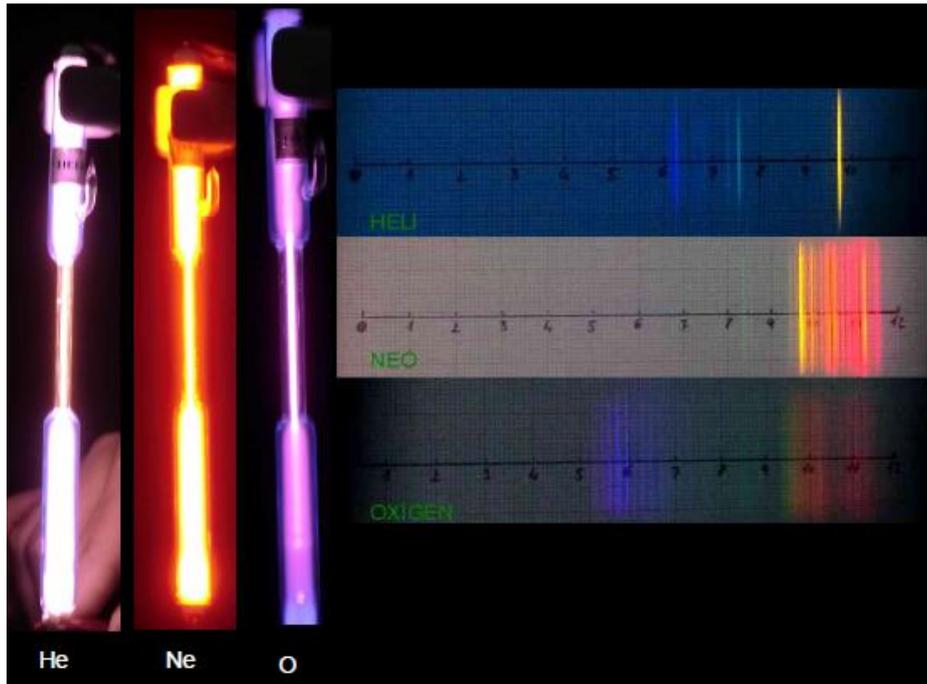


Estudiando espectros como el anterior se constata la cuantificación de los niveles energéticos de la materia y se pueden asignar los colores de las líneas espectrales observadas a las frecuencias (y longitudes de onda) que les corresponden. Recordemos que las emisiones que provocan la obtención de esas líneas se producen porque el gas está siendo excitado (en este caso mediante la aplicación de descargas eléctricas).

Con más detalle, la observación y el análisis de espectros de gases atómicos puede servir para: a) Predecir líneas espectrales de un gas, conocidos los valores de sus niveles energéticos. b) Interpretar el hecho de que las líneas espectrales son siempre las mismas, independientemente de la intensidad de la descarga eléctrica (mientras esa intensidad de la descarga sí influye sobre la intensidad de la luz emitida) c) Relacionar el espesor de las líneas con el principio de incertidumbre (si no, las líneas tendrían que ser totalmente finas, independientemente de su intensidad).

Conviene tener presente al hacer estos análisis que la materia tiene generalmente una estructura más simple cuando se trata de elementos y en estado gaseoso. Por eso, los espectros atómicos de los gases son los más sencillos y revelan un número limitado de niveles de energía. Es el caso también del espectro del Helio gaseoso, que, como vemos en la fotografía siguiente (debajo de este texto) se asemeja al anteriormente mostrado de Hidrógeno gaseoso en el hecho de que ambos tienen sólo unas pocas líneas bastante separadas entre sí. Hidrógeno y helio son los dos elementos de la tabla periódica de menor número atómico, Z , de modo que tienen pocos niveles energéticos, que dan lugar a pocas transiciones electrónicas.

A partir de aquí, al ir aumentando el número atómico, Z , se va multiplicando el número de niveles, lo que tiene la consecuencia de dar lugar a unos espectros cada vez con más rayas y que pueden estar cada vez más juntas. Obsérvense en la misma fotografía, a modo de ejemplo de esto, los espectros de oxígeno gaseoso ($Z=8$) y de neón gaseoso ($Z=10$). También son discontinuos, pero con un aumento notable de la cantidad de líneas espectrales, lo que les provoca estar mucho más juntas.



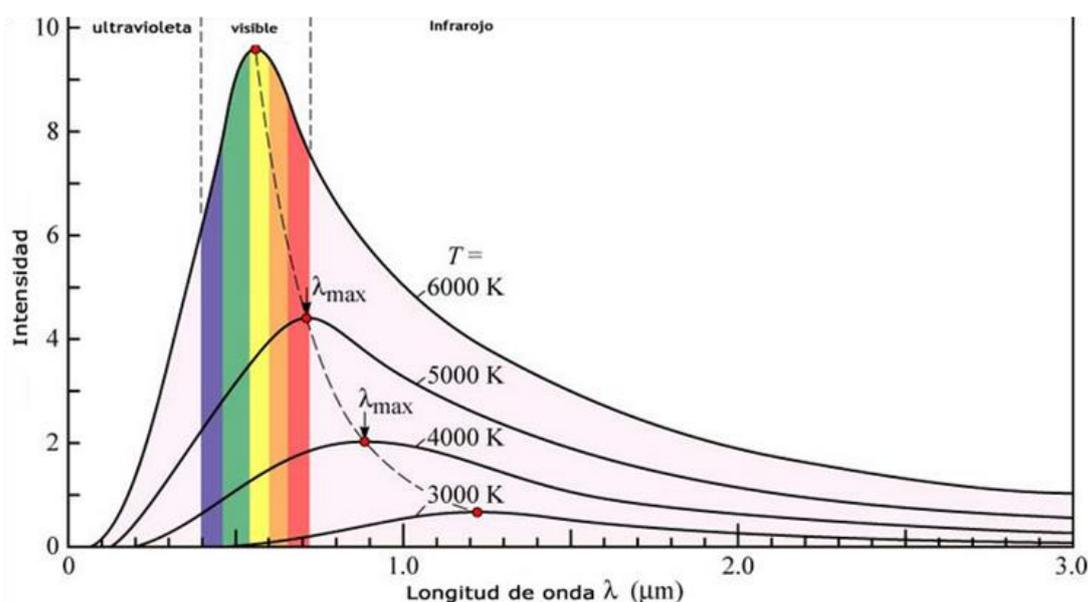
Ordinariamente la materia presenta estructuras mucho más complejas y, por otro lado, las formas de excitarla pueden ser muy variadas (por ejemplo, térmica, eléctrica, química, óptica, etc.). Todo ello abre un amplísimo campo para un estudio de muy variadas formas de producir colores.



COLORES PRODUCIDOS POR INCANDESCENCIA

Se denomina **incandescencia** a la **generación térmica de luz en el rango visible**. Todos los cuerpos emiten radiación térmica (es decir, radiación electromagnética que se genera por el movimiento de las partículas cargadas que poseen), pero generalmente esta radiación no suele ser visible, sino infrarroja, salvo en el caso de cuerpos muy calientes. Cuando un cuerpo emite radiación en equilibrio térmico con su entorno a una determinada temperatura, se denomina cuerpo negro y esa luz emitida presenta un espectro continuo muy característico que depende únicamente de la temperatura del cuerpo emisor (no de su composición). La radiación se produce en este caso como consecuencia de tener una gran cantidad de partículas excitadas, cada una emitiendo en sus frecuencias propias (las correspondientes a las desexcitaciones más probables), lo que implica que, al juntarlas todas, se obtenga ese espectro continuo.

En la imagen siguiente se muestra el espectro de cuerpo negro. Como se ve, alcanza un punto máximo a una determinada frecuencia, la cual se desplaza a valores mayores a medida que aumenta la temperatura del cuerpo emisor (siguiendo la [ley de Wien](#)).

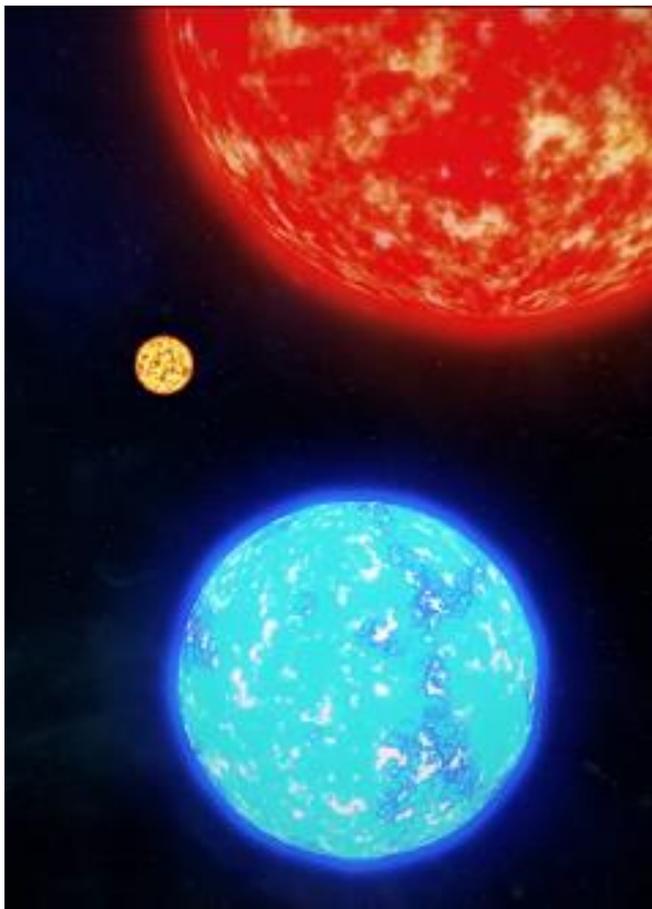


Obsérvese también que la mayor parte de la emisión de radiación del cuerpo negro se encuentra en la región infrarroja del espectro electromagnético, para todas las temperaturas representadas.

Esta es precisamente la razón de que a temperatura ambiente el llamado cuerpo negro sea, efectivamente, **negro** para nuestros ojos en un ambiente iluminado, ya que la energía infrarroja que irradia no puede ser percibida por el ojo humano. A la temperatura más baja y en la oscuridad aparece subjetivamente de **color gris** (estando su pico de radiación en el rango infrarrojo). Si se pone un poco más caliente, lo vemos de color **rojo apagado** y si sigue aumentando su temperatura, se vuelve progresivamente **amarillo**, blanco y, finalmente, **azul-blanco**.

La emisión de radiación por las estrellas se aproxima bastante a la de un cuerpo negro. Su temperatura asociada (la temperatura superficial del astro) se conoce como temperatura efectiva y es una propiedad fundamental, que caracteriza dicha emisión estelar. En el caso del Sol esa temperatura es de unos 6000 K y, por tanto, su espectro se corresponde con el señalado por la línea más alta del gráfico mostrado en la página anterior. Aunque, como se ve en dicho gráfico, la mayoría de la radiación sigue siendo infrarroja a esta temperatura, una parte de ella contiene a toda la luz visible, encontrándose la radiación térmica de mayor intensidad justamente a mitad de dicho espectro visible. Como consecuencia de esto, para nuestros ojos la luz solar es blanca y de ese **color blanco** veríamos al Sol si lo pudiéramos observar sin que interfiera en su camino hacia nosotros la atmósfera, ya que, como muestra también el gráfico anterior, la luz emitida por el Sol tiene su máximo en el color amarillo y el resto radiaciones dentro del rango visible se reparte alrededor de ese máximo decayendo en intensidad en torno a él de manera bastante simétrica (en lo que se refiere a la parte visible del espectro).

El diagrama de emisión del cuerpo negro también enseña que en los espectros de emisión de estrellas más frías que el Sol, el máximo en el rango visible corresponde al color **rojo**. Es el caso de las **enanas**



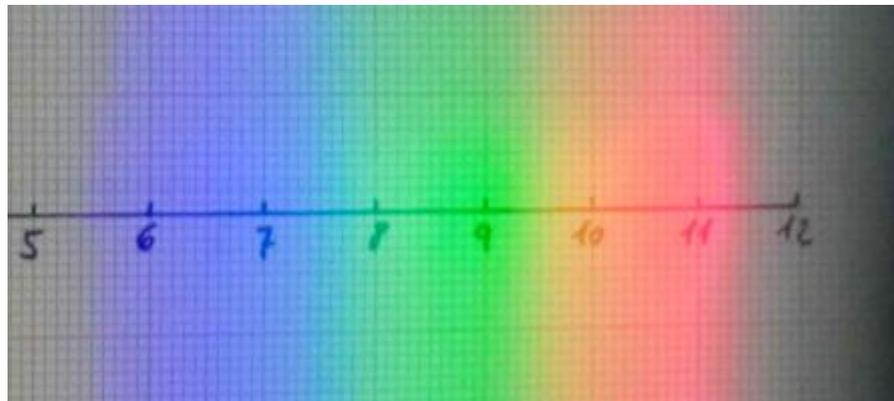
rojas y el de las **gigantes rojas**. Las primeras (**enanas rojas**) son el tipo más común de estrellas. Son pequeñas y relativamente frías, siendo sus valores de masa y diámetro inferiores a la mitad de los del Sol y su temperatura superficial inferior a 4 000 K. Aunque, como acabamos de decir, son la mayoría de, por ejemplo, la Vía Láctea, no pueden ser observadas fácilmente debido a su baja luminosidad. Las segundas (**gigantes rojas**) tienen masas del orden de 8-9 masas solares y están en una fase de su evolución en la que, tras haber consumido el hidrógeno en su núcleo, comienzan a quemar hidrógeno en una cáscara alrededor de ese núcleo de helio inerte. Ello implica un aumento de su volumen y un enfriamiento de su superficie, que propicia que se torne a la tonalidad rojiza. Del mismo modo, el diagrama de emisión del cuerpo negro, enseña que los espectros de emisión de las estrellas mucho más calientes que el Sol se desplazan hacia el azul. Así ocurre con las **gigantes azules**, que son estrellas muy luminosas con una

elevada temperatura superficial (puede superar incluso los 50 000 K), y emiten sobre todo en la región del ultravioleta del espectro. En el espacio, libre de atmósfera, unas y otras ofrecen al ojo humano esas tonalidades (**rojiza** o **blanco-azulada**) porque su emisión sí que decae de manera simétrica y

bruscamente para el resto de colores del espectro visible, en contraposición a lo que ocurre con las estrellas que, como el Sol, tienen el máximo en la zona central del espectro visible.

Un ejemplo de incandescencia generada de manera artificial, que también produce luz blanca, es la bombilla tradicional de filamento. Contiene un hilo metálico de tungsteno que se calienta progresivamente cuando por él circula corriente eléctrica. Siguiendo la ley de Wien, el color de la luz emitida por dicho filamento guarda relación con la temperatura que va adquiriendo cuando circulan por el filamento los electrones.

Primero empieza emitiendo luz **roja**, según va subiendo la temperatura esa luz emitida empieza a tomar tonos **amarillos** y finalmente, cuando se alcanzan unos 2 800 K (unos 2 527 °C) se convierte en **luz blanca** (obsérvese, debajo de este texto, su espectro, obtenido con el electroscopio casero al que nos hemos referido en un apartado anterior). Cuando la bombilla ya emite esa luz blanca es idónea para alumbrar y para iluminar espacios cerrados.



Ahora bien, si nos fijamos en la gráfica de radiación del cuerpo negro, vemos que a la temperatura a la que la bombilla cumple su función de iluminar, la gran mayoría de la luz que emite sigue siendo infrarroja. Por eso, la bombilla incandescente, que ha sido a lo largo de siglos de tanta utilidad, tiene una eficiencia energética bajísima, y hoy está siendo desplazada por otros sistemas de iluminación más eficientes.

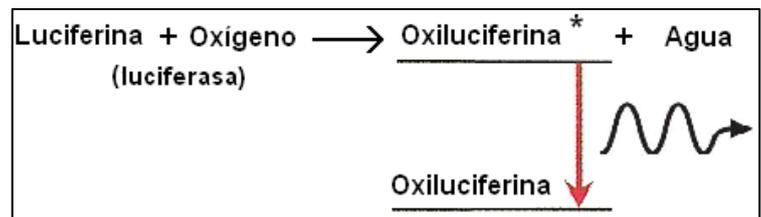
Otros ejemplos de color producido por incandescencia son: metales calentados al rojo vivo, llamas, cohetes, etc.



COLORES PRODUCIDOS POR BIOLUMINISCENCIA Y POR QUIMIOLUMINISCENCIA

Toda emisión de luz por un material que no se deba a un aumento de temperatura (es decir, que no sea incandescencia) se denomina **luminiscencia**, pudiendo distinguir diferentes tipos dependiendo de cuál sea la fuente de excitación de los átomos o de las moléculas, etc., cuya desexcitación posterior produce la emisión de la luz. Cuando se forman productos excitados en una reacción química, el proceso de emisión de luz posterior que genera la desexcitación de esos productos se denomina **quimioluminiscencia** y si la reacción química se produce en un ser vivo se llama **bioluminiscencia**.

En el diagrama adjunto se muestran de manera muy simplificada los procesos que dan lugar a la bioluminiscencia. La luciferina (una proteína que existe en unas células especializadas, llamadas fotocitos) reacciona con oxígeno, en presencia de



luciferasa (una enzima que actúa como catalizador en la reacción, es decir, la propicia y la acelera, pero no participa en ella). Se obtienen: agua y oxiluciferina en un estado de energía excitado. Posteriormente, la oxiluciferina se relaja hacia a un estado de menor energía emitiendo la luz.

En realidad, el proceso que da lugar a la emisión de luz bioluminiscente es bastante más complejo de lo que muestra el esquema anterior simplificado. De hecho, existen muchos tipos de sistemas luciferina-luciferasa, en la reacción pueden intervenir otros catalizadores y la luciferina oxidada sigue un camino algo complejo hasta emitirse la luz: En primera instancia pasa por lo que se denomina un estado de transición (en una reacción química elemental un estado de transición es una configuración particular que se define como el estado que corresponde al máximo de energía a lo largo de la misma), después puede pasar por muchas etapas intermedias hasta un sustrato P* (excitado y activo eléctricamente). Finalmente, este sustrato P* se descompone muy rápidamente (habitualmente en unos pocos nanosegundos) en su sustrato base P y emite los fotones.

La bioluminiscencia es más abundante en la fauna marina que en la terrestre. Varios peces, moluscos, calamares, medusas, corales y otros seres microscópicos subacuáticos producen luz utilizando este mecanismo. Esta luz suele ser de color **azul** y su fuente son bacterias que viven dentro de dichos seres o células especializadas en cuyo interior ocurre la reacción bioluminiscente.

La reacción de oxidación de la luciferina, que inicia la cadena de procesos que da lugar a la bioluminiscencia, se puede activar por diversas causas. En algunos animales puede ocurrir como respuesta al estrés que tienen cuando sufren un ataque y la luz emitida actúa como defensa para asustar al depredador. Otros animales, en cambio, aprovechan la emisión de luz para atraer a una presa. Por ejemplo, algunos peces abren la boca en un ambiente muy oscuro como es el abisal y al hacerlo generan la luz atrayendo a otros peces más pequeños que les sirven de alimento. En el caso

del fitoplancton, en cambio, el proceso se genera por la agitación. Cuando se ve luz en las olas es la misma agitación que provocan los movimientos del agua, lo que propicia la reacción bioluminiscente.

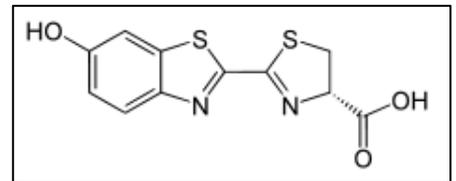


Entre los animales terrestres, probablemente el caso más conocido de bioluminiscencia sean las luciérnagas. Estos insectos no se calientan en el proceso, sino que toda la energía química que se



pone en juego la convierten en luz. Por tanto, tienen una eficiencia máxima cuando emiten esa luz, que suele ser amarilla o amarillo-verdosa (entre 510 y 660 nm). En este caso, el propósito del fenómeno es la reproducción o propagación de la especie, ya que las señales luminosas les sirven a las luciérnagas para comunicarse y atraer a sus parejas.

En cuanto al tipo de estructura atómico-molecular que propicia la bioluminiscencia, de manera bastante general el color producido en las moléculas orgánicas suele deberse a enlaces π conjugados, es decir, enlaces que se alternan entre simples y dobles, como, por ejemplo, los existentes en la molécula de luciferina de las luciérnagas, que se muestra en la imagen adjunta. Esta alternancia entre enlaces simples y dobles, da lugar a posibles saltos de energía que implican absorción y reemisión de luz bioluminiscente.



El desarrollo científico-tecnológico se ha inspirado en la naturaleza para explotar el hecho bioluminiscente y también para fabricar quimioluminiscencia artificial. Por ejemplo, sabiendo que la bacteria marina "Vibrio fischeri" varía su nivel de emisión de luz en presencia de contaminantes, se producen tests biotecnológicos que utilizan esta bacteria para medir la presencia de hidrocarburos en el agua. Otra aplicación, en este caso de la quimioluminiscencia, son las barritas de "luz química".



En una pequeña cápsula de cristal dentro de cada barrita se tiene peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), rodeado de otro líquido, que está formado por un éster de fenil oxalato mezclado con tinte del color deseado. Todo ello está envuelto por un plástico resistente pero flexible. Cuando se dobla la barrita, la cápsula se rompe y todos los componentes se mezclan dando lugar a una reacción química que genera una luz brillante e intensa.

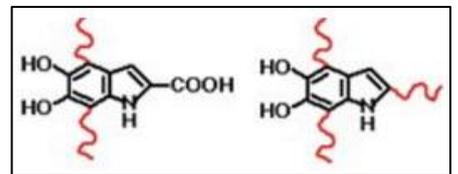


COLORES PIGMENTO (MOLÉCULAS ORGÁNICAS)

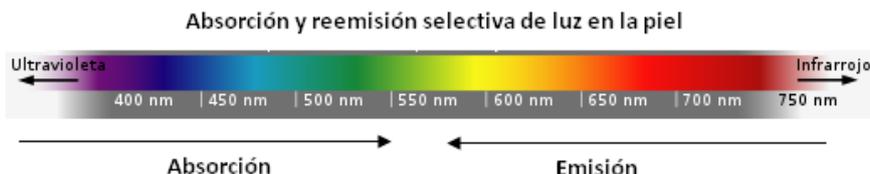
Para una gran cantidad de objetos, el color que les atribuimos es el que nos muestran cuando son iluminados con luz blanca. Fotones de esa luz incidente interactúan con partículas del material y algunas de esas partículas que han sido estimuladas reemiten nuevos fotones dando lugar globalmente a luz reflejada y luz transmitida. Generalmente las longitudes de onda promedio de las luces reflejada y transmitida no coinciden con la longitud de onda incidente y, por eso se habla de **reflexión selectiva y de transmisión selectiva**. Por otro lado, cuando muchos de los fotones reemitidos por las partículas más superficiales son absorbidos por partículas más internas y estas producen nuevas reemisiones de fotones que viajan hacia otras aún más internas, etc., esa luz transmitida puede salir por el lado opuesto al que entró.

El hecho de que en estos procesos se produzca una selección de las longitudes de onda en las luces reemitidas se debe a la presencia de unos compuestos químicos, llamados **pigmentos**, cuya estructura atómico-molecular propicia la absorción de determinadas longitudes de onda (convirtiéndose su energía en energía interna del material) y la reemisión de otras. Como hemos visto al tratar la [bioluminiscencia](#), cuando los colores los producen moléculas orgánicas se pueden deber a la presencia en ellas de enlaces π conjugados, es decir, enlaces que se alternan entre simples y dobles.

Así, por ejemplo, un pigmento de materia orgánica es la melanina, que absorbe una gran parte de la radiación ultravioleta procedente del Sol y protege a nuestro cuerpo del cáncer de piel. La forma más común de melanina en nuestra piel se denomina eumelanina y está conformada por una serie de polímeros entre los cuales están permitidos unos saltos energéticos propicios para la absorción y reemisión selectiva de luz (en el diagrama adjunto se muestran dos ejemplos de moléculas de eumelanina).



La máxima absorción de la eumelanina se produce en longitudes de onda por debajo de los 400 nm (UV), pero la eumelanina también tiene cierta absorción en el azul-verde. Cuando se ilumina nuestra piel con luz solar, parte de la radiación azul-verde es absorbida (contribuye a "calentarnos"). Como resultado, la eumelanina tiene un color **marrón oscuro**, que corresponde al resto de radiaciones visibles que reemite.



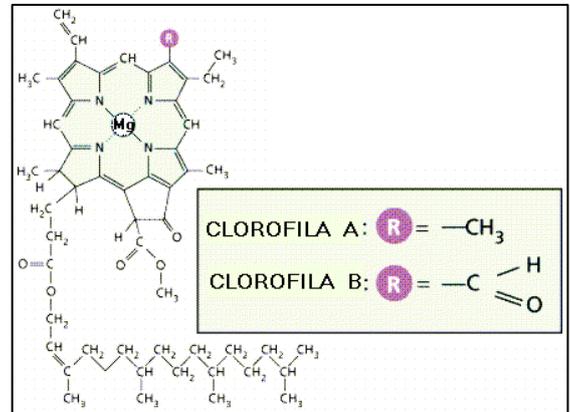
De manera más general, la melanina engloba a una familia de diversos pigmentos naturales con una estructura química muy similar y no sólo determina el color de nuestra piel, sino también el de nuestro pelo, labios, ojos, etc. Refiriéndonos a la piel, su tonalidad puede ser diferente en función de cual o



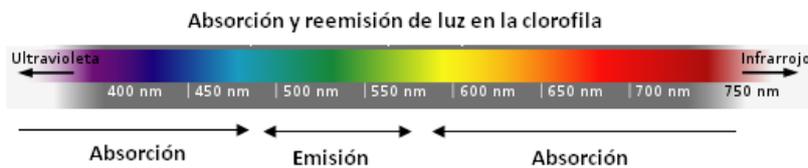
cuales sean las formas de melanina más abundantes en cada individuo, pero, en todos los casos, cuanto más oscura sea esa piel para nuestros ojos está indicando una mayor cantidad de estos pigmentos y un mayor grado de protección de la piel frente a la radiación UV del Sol.

Otro pigmento de materia orgánica muy importante en la naturaleza es la clorofila. La superficie de las hojas y la de otras partes de las plantas verdes contiene dos tipos de ella (clorofila a y clorofila b), que son muy similares químicamente y están basados en un anillo tetrapirrólico con un ion de magnesio en el centro.

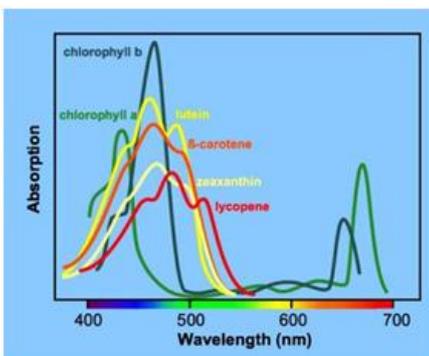
Cuando la clorofila absorbe energía luminosa ocurren tres procesos: 1) Una parte de la energía de esa luz absorbida se convierte en energía química, lo que constituye el proceso de fotosíntesis. 2) Otra parte de esa energía se disipa como calor. 3) Otra parte de la energía se reemite inmediatamente como luz de una menor energía (mayor longitud de onda) que la absorbida (**verde**). En este caso, el mecanismo responsable de la reemisión de dicha luz verde es la fluorescencia, que se trata en un [apartado posterior](#).



Los espectros de absorción de los dos tipos de clorofila (se pueden ver debajo) muestran dos picos de máxima absorción, ubicados en el rango de violeta-azul (400 - 500 nm) y en el naranja-rojo (600 - 700 nm), reflejando por tanto **luz verde**.



Por otra parte, las clorofilas pueden ir acompañadas de otros pigmentos auxiliares (carotenoides, ficobilinas, etc.), que pueden dominar el conjunto y teñir al organismo de otro color. Así ocurre, por ejemplo, en las algas rojas que tienen una tonalidad **rojo púrpura**.



En la figura adjunta se muestran, entre otros, los espectros de absorción de los dos tipos de clorofila a y b, antes comentados, y también los del licopeno (**rojo**) y el β -caroteno (**naranja**). El licopeno y el β -caroteno son dos pigmentos orgánicos que tienen la misma fórmula química C₄₀H₅₆, pero diferente disposición de enlaces. Determinan respectivamente la formación del color de los tomates maduros y de las zanahorias. El licopeno absorbe luz hasta longitudes de onda cercanas a los 600 nm, mientras que el caroteno absorbe hasta ligeramente menor longitud de onda.

Estos dos pigmentos ponen de manifiesto que, para conocer las propiedades de absorción de luz de un compuesto, no solo hay que fijarse en su composición química, sino también y sobre todo en su estructura de enlaces, la cual determina qué niveles de energía son posibles y, en consecuencia, qué desexcitaciones de la estructura se pueden producir inmediatamente después de que la sustancia es iluminada.

El origen químico de los colores pigmento implica, lógicamente, que cuando esa composición química se altera, también cambie el color correspondiente. En el mundo natural, estos colores y sus posibles alteraciones pueden dar lugar a ventajas evolutivas en seres portadores de los mismos. Por ejemplo, los flamencos adultos tienen un llamativo **color rosado** que es producido por otra variedad de caroteno, la cual proviene de su dieta: crustáceos y algas. Este color, no sólo nos gusta a los humanos; los flamencos con mayor intensidad en el mismo son considerados de mejor salud (algo que se corresponde con la realidad, puesto que aquí color y dieta alimenticia van unidos) y tienen la mejor posición social en su grupo.



Ahora bien, las crías de flamenco nacen de color blanco, ya que en el momento de nacer aún no poseen el pigmento. Es muy curioso e interesante saber que son los padres quienes, cuando les alimentan, les nutren por primera vez del caroteno, a través de "leche" roja producida por ellos mismos. De este modo, durante la etapa de crianza los flamencos adultos se destiñen en beneficio de sus hijos.

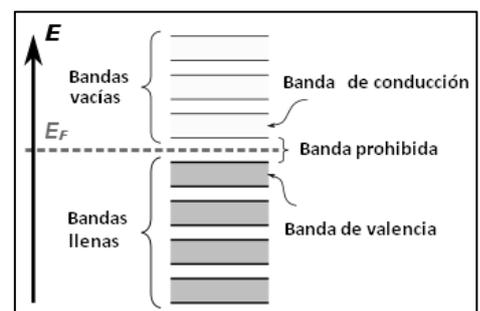


COLORES PIGMENTO (MOLÉCULAS INORGÁNICAS) Y MATERIALES INORGÁNICOS

Además de los [pigmentos de materia orgánica](#), en el medio natural existe una gran cantidad y variedad de **pigmentos de materia inorgánica**. Considerando cuál es la sustancia química que tiene la capacidad de absorber y reflejar selectivamente luz y cuál o cuáles son las tonalidades de luz que refleja, podemos mencionar algunos, como: arsénico (color **verde de París**), carbono (**negro de carbón, negro marfil, negro viña, negro de humo**), cadmio (**verde de cadmio, rojo de cadmio, amarillo de cadmio, naranja de cadmio**), óxidos de hierro (**rojo óxido, ocre, ocre rojo, rojo veneciano**), cromo (**verde de cromo y amarillo de cromo**), cobalto (**azul cobalto, azul cerúleo, violeta de cobalto, amarillo de cobalto**), plomo (blanco de plomo, **amarillo de Nápoles, rojo de plomo**), (**verde de París, verdi gris, azul egipcio**), titanio (blanco de titanio, **amarillo de titanio, negro de titanio**), mercurio (**bermellón**), zinc (blanco de cinc), arcilla (**siena natural, sombra natural, sombra tostada, ocre**).

Los procesos que, a nivel microscópico, pueden dar lugar a la coloración de materiales formados por sustancias inorgánicas son diversos. Uno de los más frecuentes es que fotones de la luz incidente interactúen con electrones que existen entre los átomos o iones del material. Si se trata de un material metálico, dichos átomos presentan una estructura reticular y la interacción luz-materia provoca globalmente saltos hacia estados de energía más excitados de la red. Como dicha red se conforma con una cantidad enorme de átomos, sus niveles de energía se agrupan casi siempre en bandas (el número de orbitales de valencia es tan grande y la diferencia de energía entre ellos tan pequeña que se puede considerar que los niveles de energía forman esas **bandas** continuas en vez de niveles de energía separados). En el caso de materiales semiconductores o aislantes (como, p. e., vidrio, silicio, óxidos, nitruros, y, más en general, casi todos los minerales), teniendo en cuenta que algunos intervalos de energía no contienen orbitales, quedan "gaps" energéticos o bandas prohibidas entre diferentes bandas de energía permitidas. En cambio, en la mayoría de metales puros las bandas se superponen y lo más habitual es que pueda haber reflexión en todas las longitudes de onda.

La figura adjunta esquematiza una distribución típica de bandas de un semiconductor. La de un metal puro sería bastante similar, pero con unas bandas de conducción semillenas en lugar de la banda prohibida que define a los semiconductores y aislantes. A partir de aquí, el color y el brillo de algunos metales puros y conductores, como el oro, la pirita, la plata, el cobre, etc., se debe justamente a transiciones de electrones entre bandas, cuyas energías, como acabamos de decir, se superponen.



También en varios minerales, formados mayormente por materiales semiconductores o aislantes, lo que domina la producción de color son impurezas de metales puros (pequeñas cantidades de estos metales que impregnan al mineral). Por ejemplo, el color **azul** del zafiro se debe a transiciones de electrones entre impurezas de titanio y de hierro, el color **rojo** del rubí se debe a impurezas de cromo, el color **verde azulado** de la esmeralda se debe a impurezas de cromo y, en ocasiones, de vanadio,

etc. Este mismo proceso de transiciones electrónicas da lugar también, por ejemplo, al color **azul** al lapislázuli, el color **verde** a la amazonita, el negro-grisáceo a la magnetita, etc.



En cambio, hay otros muchos minerales, provistos generalmente de metales semiconductores, cuyos colores se deben a transiciones entre bandas separadas (ya que, como hemos dicho, un semiconductor se caracteriza precisamente por la existencia de "gaps" energéticos entre las bandas de energía permitidas). Un ejemplo de ello es el color rojo intenso del sulfuro de mercurio, que impregna al cinabrio, también llamado **bermellón** debido a que, como puede verse en la fotografía adjunta, muestra de manera exuberante esta tonalidad.



Aunque hemos dicho que las estructuras atómico-moleculares de la mayoría de materiales inorgánicos con estructura cristalina da lugar a bandas de energía, también existen algunos que, teniendo esa misma estructura cristalina, muestran estados energéticos estacionarios que recuerdan en gran medida a los estados energéticos de los átomos. Ocurre así con bastantes de las llamadas piedras preciosas.

Además de la transferencia de cargas, entre las moléculas inorgánicas del medio natural también hay bastantes, cuyos estados de energía más o menos excitados a los que pueden saltar cuando son iluminadas, se corresponden con estados vibracionales y/o rotacionales diferentes de esas moléculas. Los estados de vibración y/o de rotación de los enlaces entre los átomos que forman tales moléculas están cuantizados, de modo que siempre que hay un cambio entre dos niveles de energía, se absorbe/emite radiación; da igual que estos niveles sean atómicos, moleculares o de una red de moléculas. En general los saltos entre estados vibracionales o rotacionales dan lugar a emisión de luz que no son visibles al ojo humano, con algunas excepciones. Una de ellas, es el hielo glacial que genera de este modo su espectacular color **azul**.



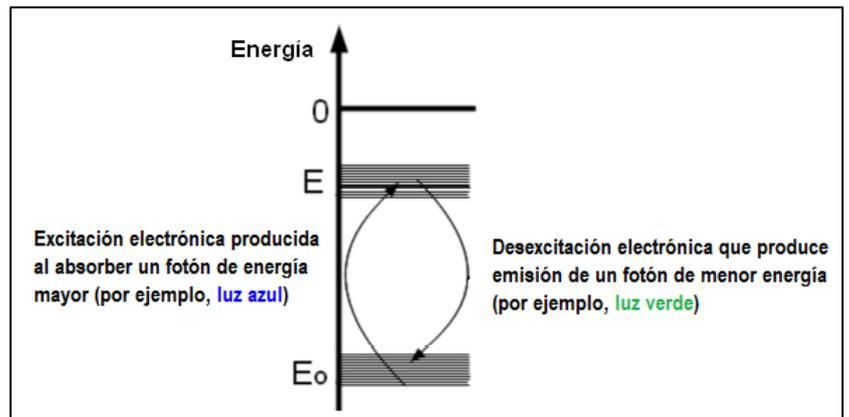
Terminamos refiriéndonos a la gran cantidad de pigmentos, tanto de origen orgánico como inorgánico, utilizados por el ser humano y su papel en el desarrollo de la humanidad. Desde los óxidos de hierro presentes en las pinturas rupestres (el **ocre rojo**, seguramente fue el primer pigmento que se usó deliberadamente con fines artísticos), hasta los pigmentos sintéticos actuales, que se utilizan para teñir pintura, tinta, plástico, textiles, cosméticos, alimentos y otros muchos productos.



FLUORESCENCIA Y FOSFORESCENCIA

De manera general, se llama fluorescencia a toda luminiscencia producida por un material que es capaz de absorber fotones de una determinada longitud de onda e, inmediatamente, emitir nuevos fotones con una longitud de onda diferente, habitualmente mayor que la incidente (es decir, de menor energía). Esta capacidad la tienen algunos de los pigmentos y muchos de los materiales vistos en los apartados anteriores (los minerales, casi todos los semiconductores, etc.) y puede implicar la emisión de luz visible por un material estimulado con luz no visible (por ejemplo, UV, rayos X, etc.).

El diagrama adjunto representa de manera esquemática un mecanismo muy básico para explicar algunos casos de fluorescencia. Al iluminar con luz de frecuencia alta (en este ejemplo **luz azul**) una sustancia que tiene la capacidad de fluorecer, ésta absorbe fotones de esa frecuencia y se excita dándose saltos de energía de algunos de sus electrones de una



banda permitida de energía menor, E₀, a otra banda permitida de energía mayor, E. Inmediatamente después la sustancia se desexcita, retornando algunos de sus electrones de la banda de mayor energía, E, a la banda de menor energía, E₀ y la sustancia emite radiación, pero no lo hace, necesariamente, en la menor de las energías posibles, porque una parte de la energía, que había sido absorbida en el primer paso, se ha liberado mediante procesos no radiactivos y/o a través de emisiones no visibles. Por eso, el resultado que observamos como producto de todos estos procesos es la sustancia se ve de color **verde**, aunque está siendo iluminada por luz de color **azul**.

En el medio natural existen muchos materiales inorgánicos y orgánicos que son fluorescentes. Entre los inorgánicos, podemos citar gemas, minerales, fibras y otros muchos materiales que producen fluorescencia visible cuando se les somete a radiación ultravioleta (UV) de onda corta, a radiación UV de onda larga, y/o a rayos X. Varios tipos de calcita y el ámbar también presentan fluorescencia sometidos a radiación UV de onda corta. Y, por ejemplo, los rubíes, las esmeraldas y algunos diamantes exhiben fluorescencia roja sometidos a radiación UV, y, también, sometidos a rayos X.

Generalmente el color que exhibe un material fluorescente en la oscuridad no tiene por qué coincidir con el que muestra cuando es iluminado con luz blanca. Ello se debe a la excitación electrónica de niveles o bandas de energía más separadas, que da la posibilidad de otros canales de emisión no accesibles en el visible. Así, por ejemplo, el rubí, que es **rojo** cuando se ilumina con luz natural, pasa a tener una **tonalidad rosada** cuando flouresce sometido a radiación UV. Del mismo modo, la

autunina, que es un mineral de uranio, tiene color amarillo con luz natural y fluoresce en un color **verde claro** (también llamado verde radiactivo).



Por los mismos motivos, algunos minerales pueden presentar varios colores fluorescentes diferentes cuando se les somete a radiaciones de diferentes longitudes de onda. Por ejemplo, la kunzina, que es

una variedad gema del mineral llamado espodumena (un silicato de aluminio y litio), bajo la radiación ultravioleta fluoresce con **tonos rosáceo morados** en onda corta y con **tonos anaranjados** en onda larga.

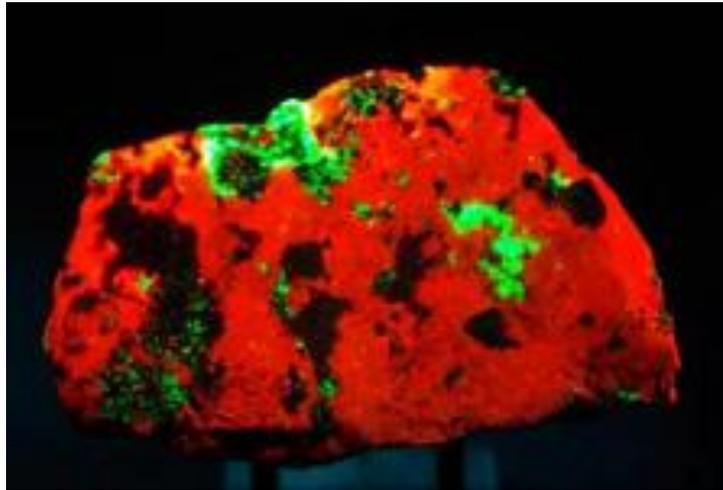


En cuanto a las sustancias orgánicas, algunos líquidos, como las mezclas de antraceno en benceno o tolueno, emiten fluorescencia bajo la acción de radiación UV o rayos gamma. Por su parte, el petróleo emite luz en un rango de colores que va desde el **marrón mate** para aceites pesados y alquitrán hasta el **amarillento** y **blanco azulado** para los aceites muy livianos y condensados (este hecho se usa para la exploración de petróleo permitiendo identificar pequeñas cantidades de crudo en las perforaciones y en los poros de las muestras).

El mismo mecanismo físico que rige la fluorescencia, rige la **fosforescencia**, con la diferencia de que en la fosforescencia hay un retraso temporal entre la absorción de la luz que estimula el proceso y la emisión de luz de otra longitud de onda. Lo que define a los materiales fosforescentes es el hecho de que continúan emitiendo luz durante un tiempo mucho más prolongado, aún después de que cese el estímulo que la provoca. Conviene recordar, a propósito de esto, que todas las transiciones de los procesos de desexcitación que dan lugar a la emisión de la luz son de carácter aleatorio, es decir, un determinado fotón nunca se sabe cuándo va tener exactamente ninguna de ellas (para un número muy alto de fotones, sí se puede dar un tiempo característico de emisión). Lo que sí se puede afirmar es que en las sustancias que llamamos fluorescentes la probabilidad de que se produzcan casi todas las desexcitaciones de manera casi inmediata es muy alta, mientras que en las fosforescentes es altamente probable que esas desexcitaciones se vayan produciendo de manera gradual, dando como resultado que la sustancia siga luciendo durante un periodo largo de tiempo.

Aunque son bastante extraños y difíciles de encontrar, en el medio natural hay varios materiales fosforescentes que lo son por la presencia en su estructura de iones de elementos de las tierras raras. Probablemente el mineral más apreciado entre todos ellos es la willemita, cuya fosforescencia es **verde** y en este caso se debe a la presencia de arsénico. La willemita, además, se puede encontrar

compartiendo una misma pieza con otros minerales fluorescentes y/o fosforescentes, lo que da lugar a piezas que exhiben un conjunto espectacular de zonas coloreadas.



Diremos para terminar este apartado que la fluorescencia y la fosforescencia poseen numerosas aplicaciones prácticas.

Entre los ámbitos de aplicación de la fluorescencia, actualmente el mayor de todos ellos es la producción de lámparas fluorescentes y de ledes, que, como ya hemos visto en un [apartado anterior](#), en las últimas décadas vienen sustituyendo a las lámparas incandescentes, sobre todo porque tienen una muchísima mayor eficiencia energética.

Cabe citar otras muchas aplicaciones no menos importantes de la fluorescencia, por ejemplo: realización de análisis en mineralogía, estudios de gemología, diseño de sensores químicos (espectroscopia fluorescente), producción de pigmentos y tintas, elaboración de detectores biológicos, etc.

En cuanto a la fosforescencia, se aprovecha en aplicaciones tales como la pintura de señalizadores de diversa índole en la oscuridad (como las manecillas de relojes), de juguetes que también se iluminan en la oscuridad, etc.



IRIDISCENCIA (COLORES OBTENIDOS POR INTERFERENCIAS)

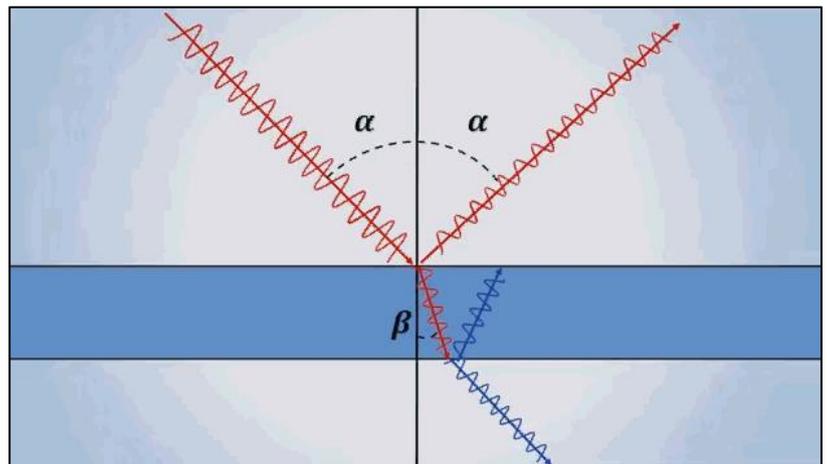
Cuando se derrama aceite usado de motor sobre asfalto húmedo, e, igualmente, cuando se derrama gasolina o cuando se deja una sartén "mal fregada" y queda en ella aceite utilizado previamente, etc., se observan, al mirar oblicuamente a ese suelo asfaltado o a esa sartén "mal fregada", mosaicos de colores, como los que se ven en la fotografía adjunta.



A diferencia de los colores que hemos estado analizando hasta aquí, estos colores no tienen un origen químico (es decir, no se deben a la composición química de la sustancia que los exhibe), ya que el aceite usado no los muestra originalmente, después de derramarse encima del asfalto húmedo está sometido a la misma iluminación que antes (luz blanca), y, por el simple hecho de haberse derramado, no experimenta ningún cambio en su estructura química (como se sabe, el aceite y el agua son inmiscibles).

¿Cómo se obtienen entonces estos colores? La respuesta es que se producen mediante un proceso llamado **iridiscencia**. Para entender cómo se produce este proceso, empezamos analizando la situación que muestra la figura animada

adjunta, en la que partimos de suponer que un rayo de luz blanca (representado en rojo) incide oblicuamente sobre la superficie exterior de una lámina semitransparente (como la del aceite usado en el ejemplo anterior). Ahí se refleja y se refracta, de tal forma que el rayo de luz refractado viaja dentro de la lámina hacia su superficie interior (color rojo), donde se vuelve a reflejar y refractar (color azul). El rayo reflejado regresa hacia la superficie exterior, donde se



[Ver esta figura animada](#)

produce de nuevo una reflexión y otra refracción, que le lleva de vuelta al medio inicial. Por tanto, al final del proceso, tenemos a dos rayos (amarillo y azul atenuado) que regresan por el medio inicial y, que, estando desfasados entre sí, producen interferencias (se indica con el signo +) Tales interferencias pueden ser constructivas o destructivas, y que sean de uno u otro tipo en este proceso depende concretamente de los índices de refracción de los medios involucrados, del ángulo de incidencia, del espesor de la lámina y de la frecuencia de la luz. Para un determinado valor del resto de variables se puede producir interferencia constructiva en torno a una cierta frecuencia de la luz, reforzando el color correspondiente respecto al resto. (**Nota:** Esta explicación y la figura animada anterior se usaron, con permiso concedido por los autores de este trabajo, en un episodio del programa "Orbita Laika" del año 2024, en el que se trató el fenómeno de la iridiscencia)

Quienes estén interesados en los aspectos más formales pueden consultar en [este lugar de la página web](#) un desarrollo operativo que permite obtener, de manera muy sencilla, las expresiones que dan la condición de interferencia constructiva y la de interferencia destructiva en este proceso. El análisis de dichas expresiones pone en evidencia, en primer lugar, el hecho de que para que se observe la iridiscencia, **el espesor de la lámina delgada ha de ser del mismo orden de magnitud del rango de valores de la longitud de onda de la luz que puede interferir** (de hecho, en este ejemplo de la lámina de aceite sucio derramado, el papel que juega el agua es el de "estirar" a dicho aceite obligándole a formar una lámina fina de un espesor igual o menor que las longitudes de onda de la luz visible). Así, por ejemplo, supuesta una lámina de aceite de índice de refracción, $n=1.45$, y con un espesor algo menor que las longitudes de onda de la luz visible (por ejemplo, unos 300 nm), se obtiene, para una incidencia de la luz casi vertical, un único máximo dentro del espectro visible, el cual corresponde a una longitud de onda de 580 nm, que visualmente implica un color **verde-amarillento**. En cambio, en otra lámina del mismo aceite, a la que podemos considerar gruesa en comparación con el rango de longitudes de onda del espectro visible (1 200 nm), se obtienen 4 máximos entre el naranja y el violeta, cuya superposición da lugar a una luz **blanca-grisácea**.

En segundo lugar, estas expresiones constatan que **los colores que podemos ver reforzados o colores iridiscentes cambian si lo hace el punto de observación** (la condición de interferencia constructiva o destructiva depende del ángulo de incidencia, y el observador ve en cada posición de observación el resultado del proceso que es consecuencia de un ángulo de incidencia determinado). Podemos estudiar la observación oblicuamente desde, por ejemplo, un ángulo $\alpha = 45^\circ$. Utilizando la ley de Snell se obtiene una longitud de onda para la interferencia constructiva de 506 nm, correspondiente a un color **verde-azulado**, que contrasta con el color **verde-amarillento** obtenido en incidencia normal.

En tercer lugar, también es importante analizar la **influencia de los índices de refracción**. Si, por ejemplo, se sustituyera el agua del asfalto húmedo por otro medio de índice de refracción que en lugar de ser menor fuera mayor que el del aceite usado, habría un intercambio de papeles de las condiciones de interferencia constructiva e interferencia destructiva y se verían reforzados colores complementarios a los que se producen en la situación planteada anteriormente.

Lógicamente, el fenómeno real de la iridiscencia es más complejo que la situación simplificada que acabamos de analizar en estos desarrollos, adecuados a un nivel de Bachillerato. Algunos posibles factores no tenidos en cuenta en el modelo son que las capas de aceite no son estrictamente plano-paralelas, sino que suelen tener un espesor variable, o que, aunque el aceite es inmiscible en el agua, se pueden formar pequeñas burbujas de ésta en su interior, etc. Estos factores influyen en el mosaico de colores, pero no afectan esencialmente al proceso estudiado. Otra simplificación que se ha hecho ha sido considerar constante para toda luz visible al índice de refracción de la lámina iridiscente. Como se ha evidenciado antes al tratar la [dispersión](#), dicho índice realmente varía (eso sí muy levemente en este caso) dependiendo de la longitud de onda.

Finalmente, diremos que la posibilidad de elegir la sustancia o el material que conforma la lámina iridiscente, resulta útil para conseguir aplicaciones tecnológicas basadas en que una lámina de determinado material refleje un determinado color. Como muestra la tabla adjunta (a la izquierda de este texto), al aplicar las expresiones anteriores a dos láminas del mismo espesor (107 nm), una de óxido de aluminio (Al_2O_3) y la otra de óxido de titanio (TiO_2) (ambas depositadas en una superficie de silicio, Si), se obtiene que sus picos de máxima reflectividad (IC) tengan lugar respectivamente en un color **violeta** ($\lambda_{i,C} = 360 \text{ nm}$) y en un color **verde** ($\lambda_{i,C} = 535 \text{ nm}$).

Material	Índ. refracc.	Espesor [nm]	Pico de $\lambda_{i,C}$ [nm]
Al_2O_3	1.7	107	360
TiO_2	2.5	107	535

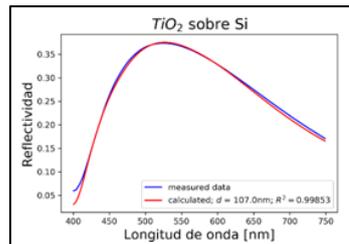
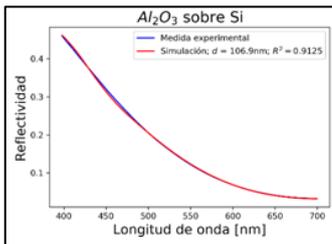
En la fotografía adjunta (a la derecha de este texto) pueden verse dos láminas que fueron obtenidas exactamente así por el primer autor de este trabajo en el Instituto de Física del Estado Sólido de la Universidad de Bremen.



Sus espectros de reflectividad (debajo) constatan que cada una de ellas tiene su pico interferencia constructiva en las longitudes de onda indicada por la tabla anterior, pero, sin embargo, para nuestros ojos la **lámina violeta** (óxido de aluminio) se ve de color **azul oscuro**. Ello se debe, por una parte, a

que a que, aunque tiene la máxima intensidad de luz reflejada (40-50%) para longitudes de onda inferiores iguales o inferiores a 400 nm (violetas), también refleja con menor intensidad luz de longitud de onda mayor. Y, en segundo lugar, a que, como veremos en un [apartado posterior](#), nuestros receptores

(conos y bastones) no tienen la misma sensibilidad para todas las longitudes de onda. La máxima sensibilidad la tienen precisamente al color azul y ello provoca que se distorsione, en este caso, la percepción que tenemos del color de esta lámina.



EXPERIENCIAS SOBRE IRIDISCENCIA

Se pueden plantear diversas experiencias, sencillas y atractivas, para producir iridiscencias. Algunas de ellas se pueden realizar utilizando una disolución jabonosa que, en su versión más sencilla, consta simplemente de un poco de detergente o de jabón líquido, como el que se usa para los lavavajillas, y agua.



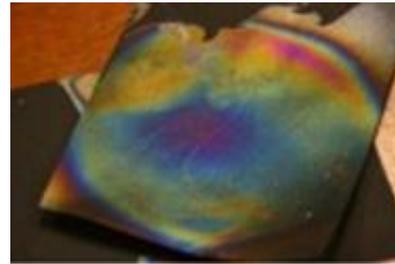
Una vez tenemos formada la solución jabonosa, podemos hacer burbujas de jabón (su espesor resulta ser del orden de magnitud del valor de la longitud de onda de la luz visible). Como su superficie es esférica o casi esférica, la luz que las ilumina, procedente de una determinada fuente, incide con diferente orientación en cada punto de ellas. Por eso, a lo largo de su superficie vemos un mosaico de colores, que, además, cambia si lo hace la orientación de esa superficie iluminada. Sabiendo esto, se puede plantear un bonito espectáculo visual, por ejemplo, iluminando a una burbuja desde diferentes ángulos, confinando varias en un mismo recipiente, o

haciendo viajar a una de ellas por el aire, donde normalmente experimenta expansiones y compresiones, rota sobre sí misma, etc., con lo que los ángulos de incidencia de la luz en cada punto de ella pueden cambiar continuamente.

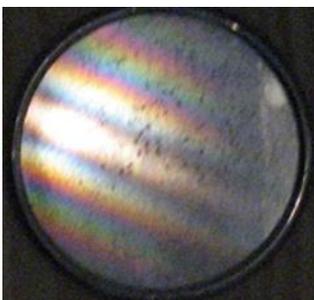
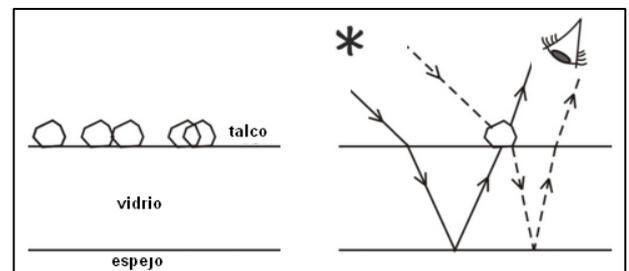
De la solución jabonosa también podemos recoger una lámina fina que se adhiera al borde de un recipiente de plástico negro, como por ejemplo las cajitas que se usan para guardar los carretes de fotografías. En la lámina delgada, así obtenida, se observan con mucha nitidez los colores iridiscentes y, a partir de ello, podemos realizar un experimento muy interesante, que presentó en 2021 el profesor Benito Vázquez Dorrio en el concurso Ciencia en Acción. Consiste en orientar esa lámina en posición vertical, para que, por efecto de la gravedad, se vaya deslizando el jabón de arriba a debajo. Como, durante este proceso la zona superior de la lámina adelgaza paulatinamente y la zona inferior engorda, mientras en la zona delgada (arriba) se mantienen los colores, la zona que engorda (debajo) se va oscureciendo porque al aumentar su espesor el fenómeno de la iridiscencia se va atenuando paulatinamente (se producen cada vez más máximos y más mínimos de interferencia, lo que produce el efecto de anularse globalmente entre sí los colores que refuerzan esos máximos)



Otro experimento notable que se puede realizar permite, no sólo crear iridiscencias, sino además dejarlas impresas en una cartulina, preferiblemente negra (para que no oculte a los colores iridiscente que se van a formar encima de ella). Lo presentaron en el año 2003 los profesores Rafael García Molina y Hugo Pérez García en el concurso Ciencia en Acción. El experimento comienza depositando en un recipiente con agua una gota de esmalte de uñas (el esmalte es una mezcla de una sustancia resinosa con un disolvente). La gota sube a flote y el agua la estira de tal forma que, igual que ocurre en el ejemplo del aceite, mostrado en el [apartado anterior](#), forma una capa flotante muy fina e iridiscente. Esta capa de esmalte se puede recoger con la cartulina. Entonces, el esmalte se adhiere a ella y cuando se seca queda impreso ahí el mosaico de colores.



Nos referimos finalmente a un tercer experimento, que también es muy sencillo e interesante. Está disponible en la magnífica Web "Fenómenos ópticos cotidianos" del profesor Alfredo Luis Aina, la cual, a su vez se puede descargar del blog del mismo título y autor: "[Fenómenos ópticos cotidianos](#)". Para realizar esta experiencia se necesita un espejo (pueden servir los que forman parte de los equipos de óptica del laboratorio) y polvos de talco, que hay que espolvorear en dicho espejo. Tal como indica el esquema adjunto, la interferencia se produce entre los rayos de luz que han pasado por un mismo grano de talco depositado sobre el vidrio que hay sobre la lámina metálica del espejo. Uno de ellos (en línea de trazos en la figura adjunta) pasa primero por el talco y luego se refleja en el espejo. El otro rayo (en línea continua en la figura) primero se refleja en el espejo y luego pasa por el mismo grano de talco (los dos rayos deben pasar por el mismo grano para que se produzca la iridiscencia)



Para ver las interferencias producidas en este experimento se puede usar una linterna y hay que colocarse a una distancia suficiente del espejo (del orden de un metro o dos), procurando que el ojo y la fuente de luz estén lo más próximas entre sí que sea posible y en la dirección perpendicular al espejo. También se

pueden fotografiar las franjas de interferencia obtenidas con una cámara en modo flash, ya que, en estas condiciones, el flash hace de fuente de luz y suele estar cerca del objetivo de la cámara que hace de ojo.



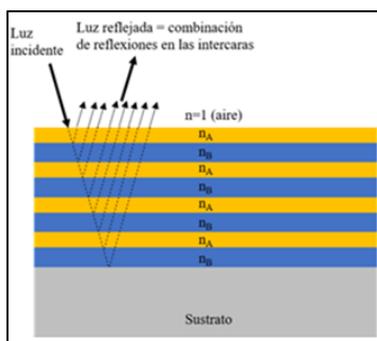
REFLECTORES DE BRAGG (O CRISTALES FOTÓNICOS 1D)

Entre las innumerables aplicaciones de la física de materiales, una es la producción de láminas de espesor nanométrico con alta reflectividad lumínica para una determinada longitud de onda. Para prepararlas se tiene en cuenta que la condición de interferencia constructiva de la iridiscencia tiene lugar cuando el espesor de la lámina, d , es igual al cociente entre la longitud de onda que se quiere reflejar y cuatro veces el índice de refracción del material que forma la lámina ($d = \lambda/4n$). Sabiendo esto, se pueden preparar láminas reflectantes para una longitud de onda deseada (un color que se quiere reflejar) usando materiales diversos.

A modo de ejemplo, vemos en la tabla adjunta, que una lámina de óxido de aluminio (Al_2O_3) ha de tener un espesor de 110 nm para que el pico de interferencia constructiva (reflectividad máxima) tenga lugar para **luz roja** de 750 nm. En la misma tabla vemos que se puede obtener un resultado similar usando otro material, como óxido de titanio (TiO_2), y entonces ha de ser una lámina de 75 nm de espesor (en ambos casos se cumple la condición $d = \lambda/4n$).

Material	Índ. refracc.	Espesor [nm]	Pico de λ_{c} [nm]*
Al_2O_3	1.7	110	750
TiO_2	2.5	75	748

Aunque estas láminas nanométricas tienen la máxima reflectividad para un determinado valor de la longitud de onda, lógicamente no reflejan únicamente la luz de ese color cuando son iluminadas, por ejemplo, con luz blanca. Su espectro de reflectividad tiene el máximo en esa longitud de onda, pero el porcentaje de luz reflejada de ese color buscado puede ser mucho menor del que se desea conseguir. Para hacer que ese porcentaje aumente se utiliza la técnica de apilar varias láminas delgadas, alternando dos materiales de índices de refracción alto (n_A) y bajo (n_B). De este modo, las reflexiones "interlámina" están en fase entre sí y, al interferir todas ellas constructivamente, se puede

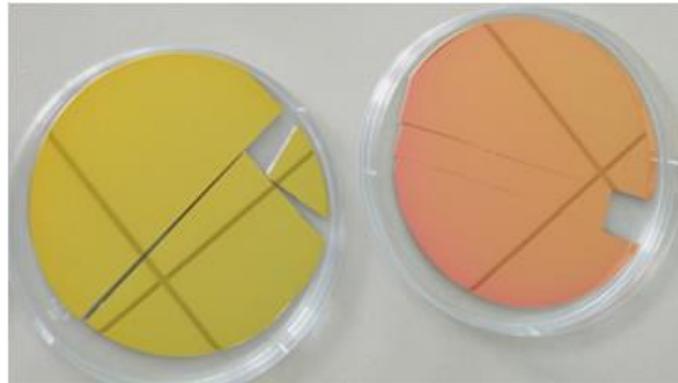


alcanzar, con un número suficiente de repeticiones, una reflectividad global de toda la estructura muy próxima al 100 % para la longitud de onda (el color) que se quiere reflejar. Este es el fundamento de los denominados **reflectores de Bragg**, que son unas estructuras fotónicas, basadas en una repetición periódica de láminas delgadas adecuada para potenciar al máximo la reflectividad de la superficie en torno a una determinada longitud de onda. Dicha longitud de onda se conoce como la longitud de onda de Bragg, por su analogía con la ley de

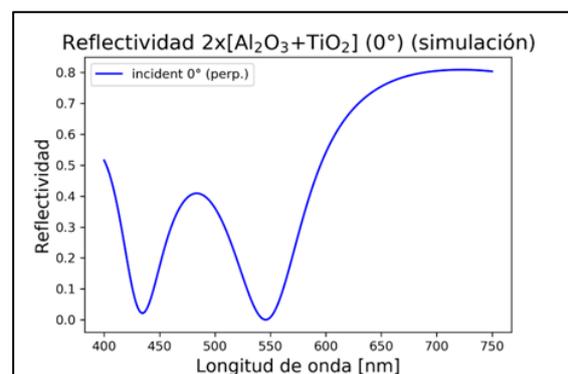
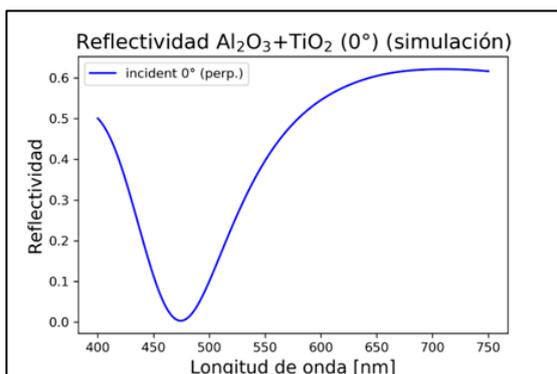
Bragg en difracción de rayos X.

En la fotografía adjunta (debajo de este texto) se pueden ver dos reflectores de Bragg obtenidos por el primer autor de este trabajo en el Instituto de Física del Estado Sólido de la Universidad de Bremen, depositadas sobre una superficie de silicio. Ambas apilan alternándolas láminas de óxido de aluminio (Al_2O_3) y de óxido de titanio (TiO_2), cuyos espesores son los indicados en la tabla mostrada más arriba. Como vemos, aunque estas láminas tienen su máxima reflectividad para **luz roja de 750 nm**, la

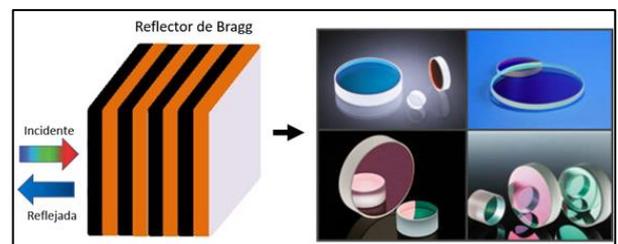
primera de ellas (más a la izquierda) se ve de un **color ocre** y la segunda se ve de un **color rosado rojizo** (más cercano al rojo).



Esto es así, porque en la muestra color ocre únicamente se apiló una lámina de cada uno de los dos materiales. La simulación (debajo, a la izquierda) indica que en esta situación la reflectividad de la bicapa en torno la longitud de onda de 750 nm ha de ser del orden de 0.6 (60 %). Para obtener la muestra de color rosado rojizo se duplicó el número de capas (lo que implica multiplicar por dos las reflexiones parciales de luz que interfieren en el color deseado), y, como indica la segunda simulación (debajo a la derecha), ello elevó la reflectividad (en la longitud de onda de 750 nm) hasta un 80 %.



En el desarrollo científico-tecnológico, los reflectores de Bragg se usan desde hace ya mucho tiempo para producir espejos de colores y para recubrir la superficie externa de diversos dispositivos, consiguiendo que esas superficies reflejen de forma muy eficiente la longitud de onda (o el rango de longitudes de onda) requerida por ellos. Así, por ejemplo, muchos diodos láser utilizan estos recubrimientos desde los años 70 (para confinar luz de determinada longitud de onda) y también se han incorporado a gafas de cristal antirreflejante y a células solares.

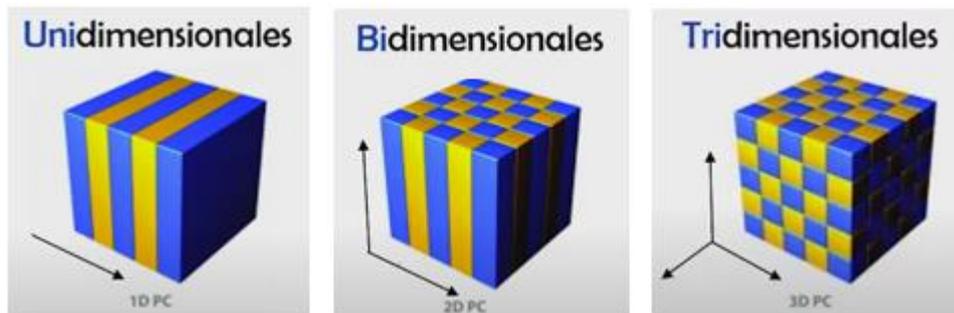


Recientemente han sido empleados en los espejos del interferómetro de detección de ondas gravitacionales Advanced LIGO, contribuyendo eficazmente a que se reduzcan las pérdidas ópticas respecto a diseños anteriores.



CRISTALES FOTÓNICOS EN LA NATURALEZA. COLOR ESTRUCTURAL DE ALGUNOS ANIMALES

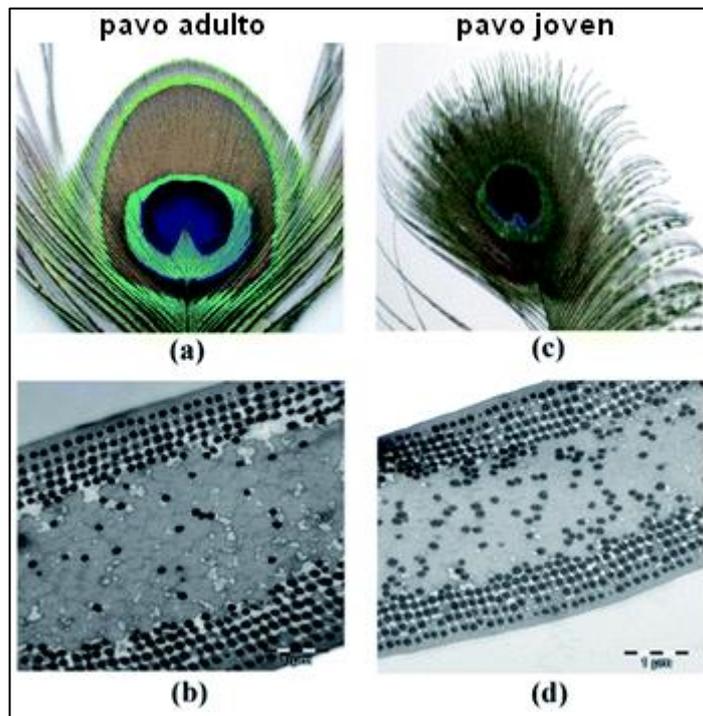
En el [apartado anterior](#) se han visto unas estructuras fotónicas, basadas en una repetición periódica de láminas delgadas, que son idóneas para potenciar al máximo la reflectividad de la superficie en torno a una determinada longitud de onda. Aunque, como hemos dicho, estas estructuras fotónicas se denominan estrictamente reflectores de Bragg, también es adecuado llamarlas “cristales fotónicos de una dimensión”, ya que, de forma más general, un **cristal fotónico** es un material multicapa con un cambio periódico en el índice de refracción, es decir, en el que se combinan, siguiendo un determinado orden, capas de dos o más materiales diferentes. Dependiendo de si el índice de refracción es periódico en una, dos o tres dimensiones, cabe considerar cristales fotónicos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D).



Aunque la propia denominación de los cristales fotónicos, el estudio físico de los mismos, su fabricación y la exploración de sus aplicaciones científico-tecnológicas, etc., son muy recientes, estas estructuras existen en la naturaleza desde siempre y, además de encontrarse en un conocido mineraloide como es el ópalo, producen colores estructurales en varios seres vivos. Se tiene constancia de que estos colores estructurales de la naturaleza ya fueron observados por Hooke (1635-1703) y por Newton (1642-1727), y explicados un siglo después por Young (1773-1829) como resultado de la interferencia de ondas. No obstante, el concepto de cristales fotónicos propiamente dicho fue acuñado en fecha mucho más reciente, concretamente en 1987, cuando lo introdujeron simultáneamente, pero de manera independiente Yablonovitch (1946-) y John (1957-), en el curso de sus respectivas investigaciones, dedicadas a producir localización de la luz.

Un ejemplo de un animal que exhibe unos colores estructurales espectaculares es el pavo real. Las imágenes de sus alas (a y c) tomadas por un microscopio electrónico (b y d) muestran (debajo de este párrafo) la existencia de cilindros de melanina de tamaño nanométrico equidistantes (son los puntos negros de las imágenes b y d), con lo que se conforma un cristal fotónico 2D, en el que los dos medios que se alternan son la melanina que impregna a los cilindros y el aire que ocupa los huecos entre ellas. Por tanto, no es la composición química de la melanina lo que determina el color **verde** y **azul** de las alas del pavo real (como hemos visto, la melanina es un pigmento que sí determina, por ejemplo, el color de nuestra piel, dándole un tono marrón), sino que los vivos colores que exhibe el pavo cuando abre y agita sus alas se deben a las interferencias que tienen lugar entre los rayos de luz reflejados por esta estructura de cristal fotónico bidimensional. Se trata pues de un color estructural,

siendo, en este caso, la separación entre los cilindros lo que determina esos colores **verdes** y **azules** que se alternan en sus alas. Por otra parte, como muestran las imágenes adjuntas (debajo de este texto), esta estructura fotónica evoluciona a lo largo de la vida del pavo real, haciendo que las alas del pavo real adulto (imagen a) muestren colores más vivos y espectaculares, que los que muestran las alas del pavo real joven (imagen c).

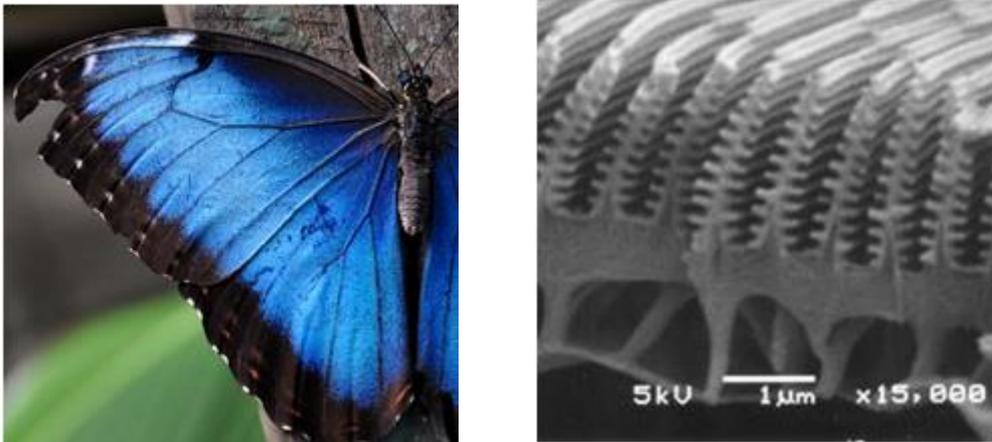


Conviene darse cuenta de que esta estructura a base de cilindros es mucho más idónea para producir las interferencias (con independencia de cuál sea la orientación que la luz que ilumina las alas), que si se tratara, por ejemplo, de cubos. La forma circular que ofrecen dichos cilindros a todas las direcciones transversales hace simétrico al cristal fotónico con respecto a la luz que incide sobre ellos, con lo que resultan equivalentes diferentes ángulos de incidencia de dicha luz. Como veremos en el [apartado siguiente](#), este es un ejemplo en el que la naturaleza ha ayudado a la investigación en cristales fotónicos, enseñando patrones regulares (circulares, laberínticos) que son eficaces para producir las iridiscencias. Por otro lado, como toda característica biológica, los cristales fotónicos presentes en las alas del pavo real no son casuales, sino que ofrecen a este animal ventajas evolutivas: Cuando el pavo real abre y agita sus alas, modifica los ángulos de salida de los rayos que producen las interferencias, y esto le permite exhibirse y atraer a las hembras.

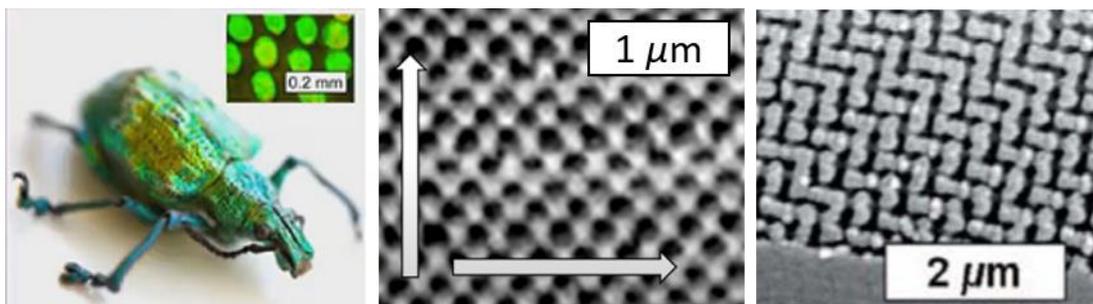


Otro ejemplo de cristal fotónico en animales lo brindan algunas especies de mariposa "Morpho", que llaman mucho la atención por el espectacular brillo azul de sus alas. Las imágenes microscópicas de

las mismas (a continuación de este párrafo) revelan que contienen unas estructuras que también se repiten periódicamente en dos direcciones perpendiculares entre sí, formando un cristal fotónico 2D. Este es el motivo de que dichas alas sean iridiscentes y ofrezcan a la vista una muy intensa y muy poco habitual **coloración azul**. Este rasgo permite a las mariposas Morpho identificarse hasta a medio kilómetro de distancia, y en la mayoría de las especies de esta mariposa solo se presenta en los machos, lo que sugiere que, además de ayudar a la comunicación visual entre los ejemplares de la misma especie y con otros animales, probablemente se use con fines intimidatorios, además de como una manera de atraer a las hembras de su especie.

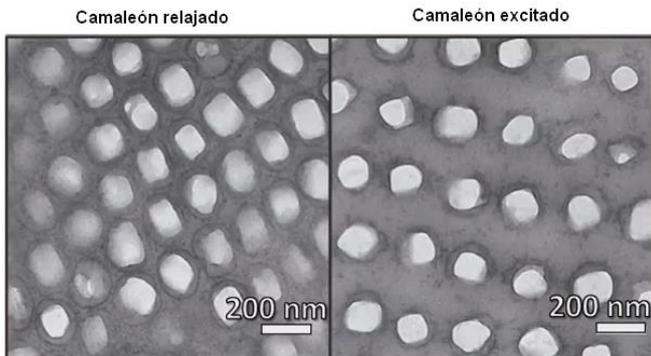


Otro ejemplo destacado de coloración estructural es el del escarabajo "Lamprocyphusaugustus", que exhibe un llamativo **color verde**. En este caso, su caparazón contiene la estructura de un cristal fotónico en tres dimensiones (3D) y casi perfecto, como muestran las dos imágenes situadas a continuación de este párrafo, acompañando a la fotografía del escarabajo: Una imagen microscópica de la superficie del caparazón (dos dimensiones) y otra de una sección transversal de dicho caparazón (una dimensión). Este orden estructural tiene un motivo más allá de lo visual: Permite a estos escarabajos moverse con menor fricción en entornos húmedos y pegajosos.



Una característica muy notable de estas estructuras presentes en algunos seres vivos (además de en animales, también existen, por ejemplo, en las hojas de algunas plantas, en algas marinas, en algunas conchas de moluscos, etc.) es el hecho de que, bajo determinadas circunstancias, pueden cambiar, lo que produce a su vez cambios en el efecto de color estructural, que pueden ser muy útiles para los animales que las portan. Así ocurre con el camuflaje del llamado camaleón pantera ("Furcifer pardalis"), que puede cambiar de color gracias a una red activa de nanocristales de guanina existentes en la superficie de su piel.

Como enseña la imagen adjunta (debajo, a la izquierda), las distancias existentes entre estos cristales son menores cuando el animal está relajado y mayores cuando se excita. Así, al cambiar su grado de excitación, el camaleón modifica la periodicidad del cristal fotónico y regula qué colores de luz se ven reforzados por interferencia constructiva y cuáles se debilitan o desaparecen por interferencia destructiva.

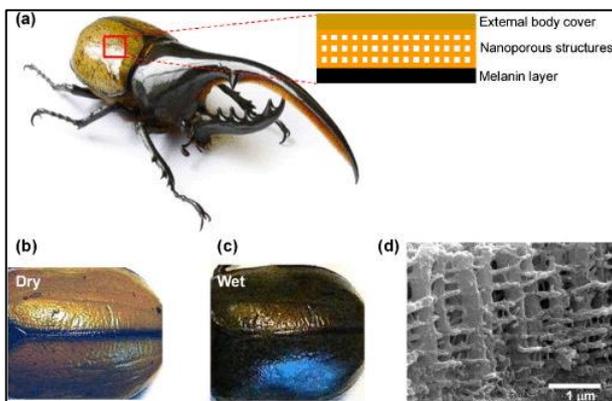


[Ver al camaleón cambiando de color](#)



INVESTIGACIÓN SOBRE CRISTALES FOTÓNICOS. ALGUNAS APLICACIONES

La investigación en cristales fotónicos tiene un gran impacto en la actualidad, debido, tanto a sus implicaciones teóricas en el campo de la física de materiales, como a sus aplicaciones prácticas. Como ya se ha comentado en el [apartado anterior](#), los monodimensionales son utilizados desde hace tiempo como láminas ópticas delgadas, con aplicaciones que van desde recubrimientos de lentes y espejos con baja y alta reflexión hasta pinturas que cambian de color y tintas. Pero son los cristales fotónicos de mayor dimensionalidad (2D y 3D), los que están generando ahora mucho interés y la naturaleza ha ayudado notablemente a la investigación aplicada en ellos, no sólo enseñando patrones exitosos para la alternancia de los medios que pueden componer dichos cristales fotónicos, sino también dando lugar a algunas aplicaciones basadas en ciertas ventajas que aporta en el mundo natural la tenencia de dichas estructuras.



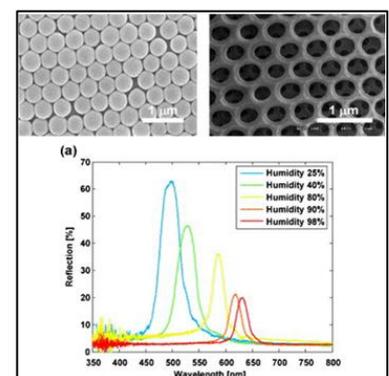
Un ejemplo de esto segundo lo brinda el escarabajo rinoceronte, cuyo caparazón se estructura en tres capas (imagen a): La cubierta externa, una capa intermedia porosa y la capa más interior impregnada de melanina. Las imágenes microscópicas de la capa intermedia porosa revelan que tiene una estructura de cristal fotónico 3D (imagen d), que, además de afectar al color de dicho caparazón, permite a estos insectos moverse con menor fricción en entornos húmedos. Así ocurre que cuando estos escarabajos se desplazan

por lugares secos (imagen b) el color estructural que muestran es uno, mientras que cuando lo hacen por zonas más húmedas (imagen c) dicho color se modifica, porque a medida que aumenta la humedad va cambiando el índice de refracción efectivo en los huecos de su estructura de cristal fotónico (al irse rellenando con agua la zona porosa e iridiscente).

El conocimiento de estos hechos ha ayudado recientemente a que se diseñen sensores de humedad, que se construyen reproduciendo estructuras similares a la del caparazón de este escarabajo y usan el color estructural que reflejan estas estructuras como parámetro indicador de la humedad (del mismo modo que un termómetro de mercurio, por ejemplo, utiliza la altura de la columna de Hg como parámetro indicativo de la temperatura).

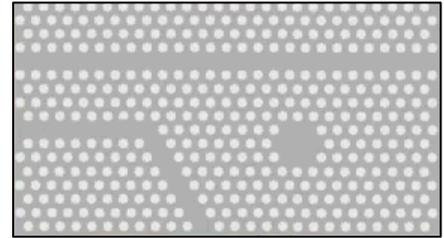
Como vemos en la gráfica adjunta, este tipo de sensor de humedad tiene su máxima reflectividad para un valor diferente de la longitud de onda dependiendo del nivel de humedad de la superficie con la que el sensor entra en contacto: desde un **color azul** con una humedad del 25%, hasta un **color rojo** con una humedad del 98%.

Para terminar este apartado, nos referimos a una aplicación de la que se espera que tenga un gran impacto en el desarrollo científico-



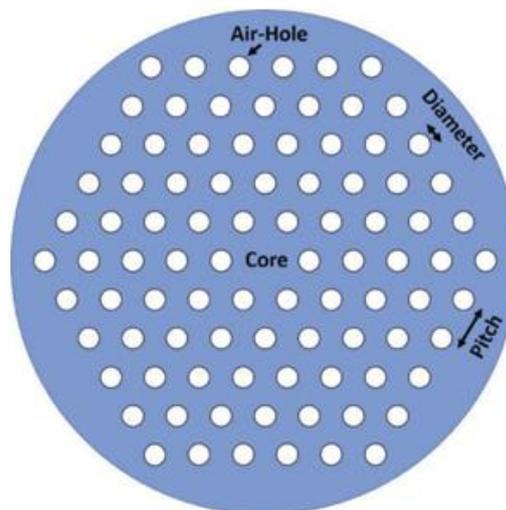
tecnológico, y que está actualmente en pleno desarrollo: El hecho de que estas estructuras tienen unas propiedades ópticas que permiten guiar a la luz cuando viaja a través de ellos.

En la imagen adjunta se representa el corte de un cristal fotónico, cuya estructura se ha roto "tapando" algunos conjuntos ordenados de huecos, que forman caminos. En estas condiciones, la luz que cumple la [condición de Bragg](#) para el diseño periódico no se puede propagar por el resto del cristal fotónico y, por ello, se ve forzada a viajar por esos caminos ([Clic aquí para verlo con la figura animada](#))



Bajo esta idea, se diseña la "fibra óptica de cristal fotónico", para una longitud de onda deseada. A diferencia de una fibra óptica convencional, el guiado no se produce por la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, sino por los efectos de interferencia que estamos viendo en estos apartados.

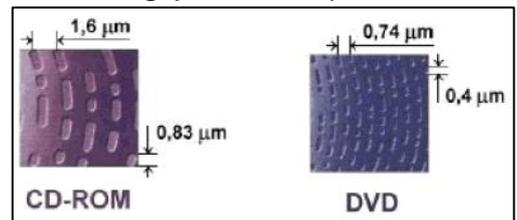
Debajo de este párrafo se muestra un esquema del corte transversal de una fibra de cristal fotónico. El índice de refracción del material, el diámetro de los agujeros (Air-Hole Diameter) y la periodicidad de los mismos (Pitch), son los parámetros de la estructura fotónica que permiten el guiado de la frecuencia o las frecuencias deseadas a lo largo del núcleo (Core) de la fibra. Gracias a las características específicas por las que se produce el guiado, estas fibras son competitivas respecto a las fibras ópticas convencionales en diversas aplicaciones. Además, tienen la gran ventaja de poder guiar luz monomodo, es decir, luz de una determinada longitud de onda concreta. Y, las pérdidas de energía con este sistema de transporte de la luz son mucho menores que las que se tienen al usar las fibras ópticas convencionales.



UN EXPERIMENTO SENCILLO PARA PRODUCIR COLORES POR INTERFERENCIAS (DISCO LÁSER)

El efecto multiplicador que puede tener una red de difracción en la producción de interferencias brinda la posibilidad de plantear diversas experiencias con las que ver mosaicos de colores formados por interferencias. Una de las más sencillas consiste, simplemente, en iluminar con luz blanca y oblicuamente un disco láser, que puede ser tanto un CD, como un DVD.

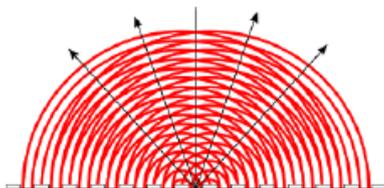
Un soporte de información digital, tipo CD, DVD, etc., posee una pista en espiral que tiene unos agujeros pequeñísimos distribuidos regularmente por su superficie. Por tanto, cuando la luz incide sobre un CD o un DVD, lo hace sobre una superficie rugosa y llena de agujeros. Más precisamente, encuentra líneas reflectantes (los espacios entre pistas) separadas por líneas mucho menos reflectantes (las pistas). Teniendo esta estructura, el CD se puede considerar una "rejilla de difracción" conformada por una lámina oscura y sobre ella largas tiras de espejo colocadas paralelamente unas a otras.



Si el tamaño de los huecos fuera mayor los rayos de luz se reflejarían en los espejos y serían absorbidos por los huecos, tal como se indica en dibujo situado más a la izquierda, debajo de este texto. Pero en realidad el tamaño de las ranuras es muy pequeño y comparable con la longitud de onda de la luz (blanca) que incide sobre ella. Por tanto, la luz ya no se refleja en los espejos siguiendo la ley de la reflexión, sino que cada uno dispersa luz en todas las direcciones de un plano vertical, tal como se indica en el dibujo situado también debajo más a la derecha.



Estas ondas de luz, que emergen de los "micro-espejos", producen fenómenos de interferencia, porque la luz reflejada por cada uno interfiere con la reflejada por los demás (en fase producen



interferencia constructiva y en oposición de fase producen interferencia destructiva). En consecuencia, el CD o un DVD se pueden considerar rejillas de difracción, constituidas por sus múltiples ranuras, y que permiten obtener el espectro de la luz reflejada sobre ellos (cada tipo de fuente luminosa produce un espectro diferente)

La ordenación que tienen las franjas del disco hace que los colores formados por esas interferencias se ordenen del mismo modo que lo están en un arco iris. Se pueden ver cerca del disco oscureciendo el recinto (para evitar que la luz blanca ambiental oculte los colores), también haciendo que la luz reflejada desde él se refleje a su vez en una superficie blanca (como, por ejemplo, un folio), o,

simplemente mirando al propio disco. Dependiendo de la orientación que tenga dicho disco con respecto a la luz blanca que incide sobre él vemos en diferentes posiciones de su superficie partes del patrón circular de interferencia que produce esta red de difracción. Por tanto, al mover el CD e ir cambiando la orientación del disco con respecto a la dirección que lleva luz que lo ilumina, las franjas de colores modifican su posición.



[Ver esta imagen animada](#)

Para terminar, se muestran debajo de este texto dos imágenes bastante espectaculares que nos enseñan unas posibles variantes de este experimento, ambas protagonizadas por el profesor Benito Vázquez Dorrio, de la Universidad de Vigo. La primera de ellas, tomada en 2024 por el autor principal de esta web en una sesión de un curso de formación online (organizado por la RSEF) impartida por este profesor. Vemos en esta imagen que sus manos sujetan un CD en una posición adecuada para que se vea perfectamente el patrón completo (circular) de las interferencias. La segunda imagen procede de su página web ([clickonphysics](#)) y corresponde a una charla impartida por el propio Benito Vázquez, en la que utilizó un montaje sencillo y adecuado para que pueda verse nítidamente y a gran escala un doble arco iris (el arco iris más pequeño y brillante corresponde a la interferencia de orden 0 y el mayor y menos brillante a la segunda interferencia de orden 1) Tal montaje consiste simplemente en colocar el CD a unos 15-20cm enfrente de un proyector (centrando el círculo blanco proyectado).

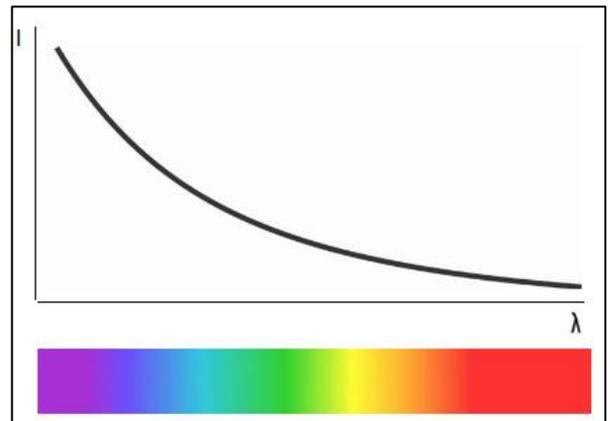


ESPARCIMIENTO RAYLEIGH (COLORES DEL CIELO, EL SOL Y LA LUNA ECLIPSADA)

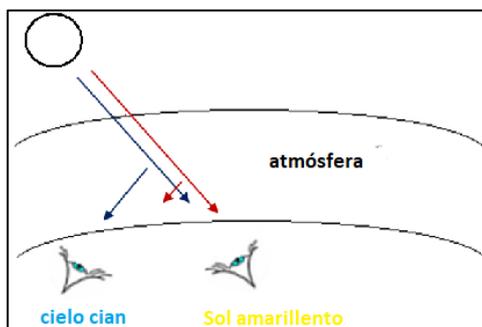
En el apartado dedicado a la [formación de colores por incandescencia](#) se ha explicado el hecho de que la luz emitida por bastantes estrellas, entre ellas, nuestro Sol es **blanca**. Sin embargo, como bien sabemos, no resulta **blanco**, sino, más bien, **amarillento** el color que nos muestra el Sol cuando lo observamos desde la superficie terrestre.

Esto se debe a que cuando la luz solar que nos llega atraviesa la atmósfera, sufre un proceso de dispersión denominado **dispersión de Rayleigh o esparcimiento Rayleigh** (en honor a lord Rayleigh, que fue el primero en explicarlo en 1871). De modo general el esparcimiento Rayleigh es la dispersión de fotones producida por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de tales fotones dispersados. Puede ocurrir cuando la luz viaja tanto por sólidos, como por fluidos transparentes, pero se ve con mayor frecuencia en los gases. Es debido a la polarización eléctrica de las partículas, ya que lo que ocurre es que el campo eléctrico oscilatorio de una onda luminosa actúa sobre las cargas de dichas partículas provocando que oscilen en la misma frecuencia. Entonces esas partículas se convierten en pequeños dipolos que radian la luz dispersada. Globalmente este tipo de dispersión obedece a la ley: $I_{disp} \sim 1/\lambda^4$ (ley de Rayleigh), según la cual la potencia irradiada en la dispersión es proporcional a la inversa de la cuarta potencia de la longitud de onda de la luz incidente dispersada.

En el caso que nos ocupa, sucede que, si la atmósfera "está limpia" (sólo está actuando el ozono y las moléculas usuales de la misma), cuando la luz blanca procedente del Sol la atraviesa, sufre la dispersión Rayleigh por parte de las partículas de dicha atmósfera. Siguiendo la ley de Rayleigh, se tiene el pico de máxima intensidad de la luz solar visible que dispersa la atmósfera en el color **violeta**, y el mínimo en el color **rojo**, tal como muestra el gráfico adjunto.



Como consecuencia de esto, cuando miramos de día hacia el cielo llega a nuestros ojos algo de esa luz dispersada por ella, tal como indica el esquema adjunto. Por este motivo, teniendo en cuenta que,

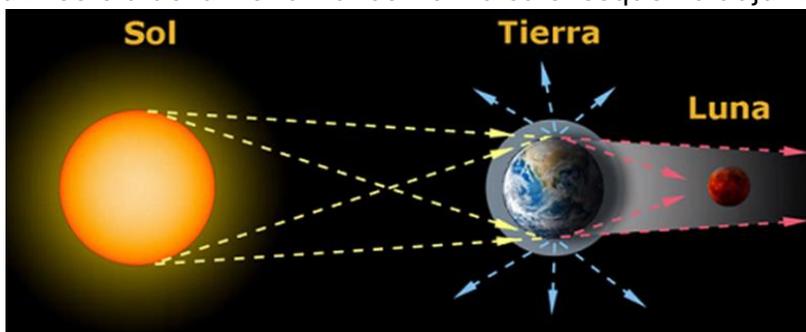


tal como indica el gráfico anterior (situado encima de este texto), algo del resto de longitudes de onda también nos llegan (en mucho menor grado y con menor intensidad cuanto mayor es la longitud de onda), en principio deberíamos ver el cielo con una tonalidad azul. En un [apartado posterior de este tema](#) se explica con más detalle, por qué, aunque es cierto que lo vemos de un tono azul, dicho tono es, de hecho, un azul más claro (**cian**), lo que tiene que ver con que nuestros receptores tienen

una diferente sensibilidad dependiendo de cuál sea la longitud de onda de la luz que reciben.

El esparcimiento Rayleigh explica también el hecho de que cuando miramos hacia Sol lo vemos (durante la mayor parte del día) de **color amarillento**, ya que, como también indica el esquema anterior, entonces llega a nuestros ojos luz solar a la que se ha restado una parte de las radiaciones dispersadas por la atmósfera (de longitudes de onda menores). Al amanecer y en el ocaso el color del Sol torna a **anaranjado** o **rojizo**, porque en esos momentos la posición que ocupa con respecto a nosotros (muy cercana a la línea del horizonte) implica que la luz recibida de nuestra estrella tenga que recorrer una distancia mucho mayor para atravesar la capa atmosférica.

Un fenómeno similar produce las llamadas "lunas de sangre", que se pueden observar cuando ocurre un eclipse total de nuestro satélite. En un eclipse lunar total, toda la Luna pasa dentro de la parte más oscura de la sombra de la Tierra, llamada umbra, pero, a pesar de ello, podemos verla, porque parte de la luz solar que no está bloqueada por nuestro planeta se filtra por una gruesa porción de la atmósfera de la Tierra. Tal como indica el esquema adjunto esta luz que se filtra por la atmósfera es refractada e incide sobre la superficie lunar.



Como en la situación antes descrita, la luz solar que es dispersada por la capa atmosférica es **azulada**, la que la atraviesa es **rojiza** y la que devuelve la Luna suele ser entre **roja** y **roja anaranjada**.

El resultado de todo ello es brindar un acontecimiento astronómico del que podemos disfrutar si estamos atentos, ya que, en promedio, hay alrededor de dos a cuatro eclipses lunares totales por año en cualquier parte del mundo. En el clip de video situado a la derecha de este texto (editado por la [Red Climática Mundial](#)) vemos este bonito espectáculo sobre edificios de Madrid (en 2017)

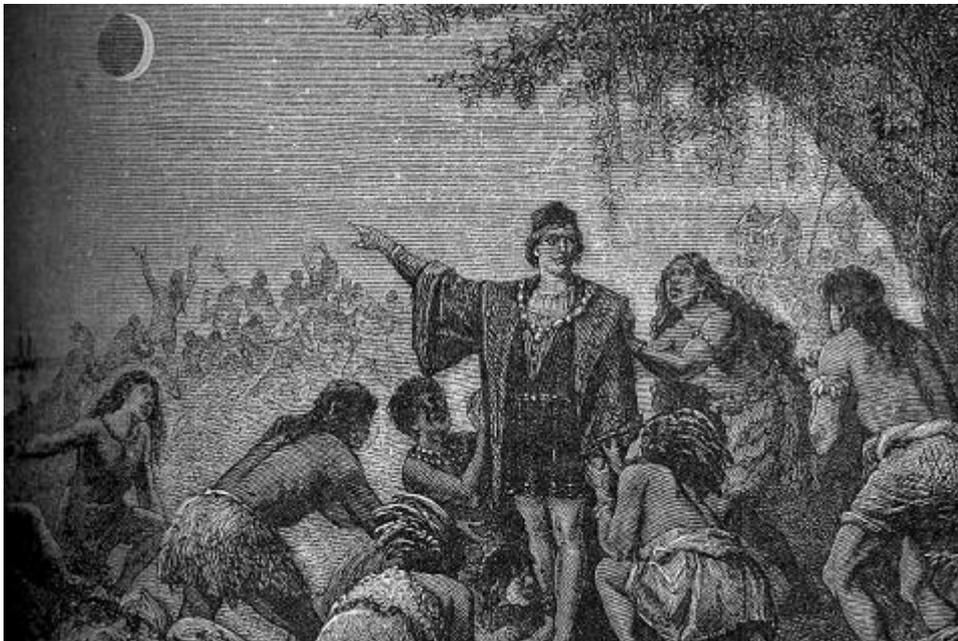


[Ver el clip de video](#)

Termina este apartado comentando el hecho de que la denominación de este fenómeno astronómico como "lunas de sangre" se piensa que procede de un posible acontecimiento que habría sido protagonizado por Colón en 1502 durante su último viaje a América. Lo relató uno de sus colaboradores, [Diego Méndez de Segura](#) (1475-1536) en unas memorias, que reprodujo tres siglos después (en 1825) el historiador [Martín Fernández de Navarrete](#) (1765-1844) dentro el libro titulado: "Colección de los viajes y descubrimientos que hicieron por mar los españoles desde fines del siglo XV".

En aquella expedición hacia América (iniciada en 1502), después de algo más de un año de navegación, se habían perdido dos embarcaciones y las otras dos estaban muy deterioradas, lo que obligó a los conquistadores a quedar varados en el norte de Jamaica. Según el relato de Diego Méndez de Segura, Colón envió entonces en canoa a la isla "La Española" en busca de ayuda, a un grupo comandado por el propio Méndez de Segura. Y mientras esperaban, Colón acordó con los nativos intercambiar algunas de sus posesiones por comida. Pasaron varios meses esperando un rescate que

no llegaba y la relación con los indígenas se fue deteriorando, de tal modo que entre finales de 1503 e inicios de 1504, los indígenas se amotinaron y dejaron de llevar comida a las huestes de Colón. Colón tenía muchos conocimientos de astronomía y presuntamente se aprovechó de su capacidad para predecir que el 29 de febrero de 1504 se iba a producir un eclipse total de Luna, durante el cual él sabía que nuestro satélite se vería de color rojizo. Para atemorizar a los aborígenes les presentó el acontecimiento astronómico como un castigo divino, del que los nativos no podrían escapar. Según el relato de Méndez de Segura, Colón hizo llamar a todos los caciques, les dijo que los conquistadores estaban allí "por mandato de Dios" y, también, que "Dios estaba enojado con ellos, por no darles comida, lo que les mostraría (la noche del eclipse) por señales que haría en el cielo (la Luna "sangrando"). Se dice en el libro de Fernández de Navarrete que los nativos creyeron a Colón, que se fueron que muy espantados y que le prometieron que le traerían siempre de comer. Presuntamente así se salvaron Colón y sus hombres de morir de hambre, hasta que en junio de ese año finalmente llegaron los refuerzos que tanto esperaban.

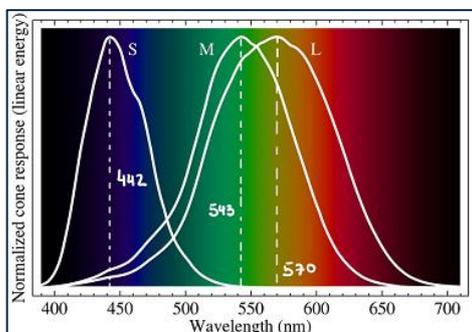


PERCEPCIÓN DE LOS COLORES. TEORÍA TRICROMÁTICA

En un tema de nuestra página web sobre “Naturaleza de la luz” se trata de la gran contribución que hizo Young en sus estudios sobre [interferencias de la luz](#). Otra contribución muy importante de Young, e igualmente apoyada en su modelo ondulatorio, fue sobre la percepción de los colores. Young conocía bien el trabajo de Newton, y, en relación con este tema, replicó de forma expresa el modelo newtoniano en un largo trabajo que presentó en 1802 en la Royal Society de Londres. Según Newton la luz sería una granizada de corpúsculos y cada corpúsculo luminoso que portara un determinado color debía ser diferente al resto (que portarían colores diferentes). Young afirmó que esto era insostenible. Puesto que la gama de tonalidades del espectro visible parecía prácticamente continua, para que fuera correcta la propuesta de Newton tendría que haber un número enorme (casi ilimitado) de corpúsculos de luz de diferente tipo. Entonces, dentro de nuestros ojos, tendríamos que poseer un número extraordinariamente elevado de receptores de distintos tipos, para que cada uno de ellos pudiera detectar o ser sensible a cada uno de esos corpúsculos.

Young mostró que su modelo ondulatorio podía superar esta dificultad. Planteó que cuando varias ondas luminosas de colores diferentes viajan juntas, se perciben como una onda luminosa de un solo color, que resulta de la composición de los colores de esas luces. Partiendo de esta premisa, comprobó empíricamente que los diferentes colores de luz del espectro se pueden obtener combinando adecuadamente tres luces básicas: **verde, roja y azul intenso**. De tal forma que las tres luces superpuestas se ven como luz blanca. Con ello, Young, además de reforzar su modelo ondulatorio, superó brillantemente la dificultad que había observado en la teoría de Newton, y puso de manifiesto que en nuestros ojos solamente sería necesario tener receptores de tres tipos para distinguir todos los colores visibles.

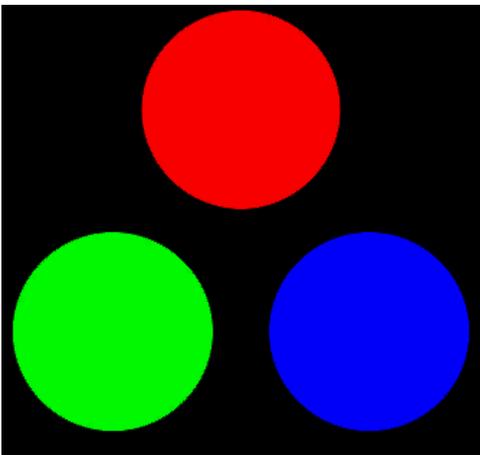
Hoy es bien conocido que en la retina del ojo humano hay unas células foto-receptoras especializadas, llamadas conos y bastones (representados en la imagen de debajo, situada más a la izquierda). La percepción del color se debe a que la probabilidad de absorción por los conos de los fotones que les llegan es distinta, según sea la longitud de onda de dichos fotones. Ello hace que



generen impulsos eléctricos mayores o menores según sea esa longitud de onda. Tal como había predicho Young, y comprobó poco después [Von Helmholtz](#) (1821-1894), existen básicamente tres tipos de conos: unos que "presentan una sensibilidad máxima" (generan un

impulso eléctrico mayor) cuando reciben fotones de longitudes onda más largas ("**conos rojos**", máximo alrededor de 570 nm), otros que tienen esa sensibilidad mayor cuando les llegan fotones de longitudes de onda medias ("**conos verdes**", 543 nm) y otros que la tienen cuando les llegan fotones de longitudes de onda más cortas ("**conos azules**", 442 nm)

El cerebro compara las señales recibidas de al menos dos conos distintos y las procesa como diferencia de color en una gama de tonalidades que abarca todo el espectro visible. Es decir, la combinación de dos en dos, de estas tres luces básicas en una mayor o menor proporción es lo que da lugar a la visión tricromática que poseen la mayoría de las personas y mediante la cual se abarcan todas las tonalidades del arco iris.

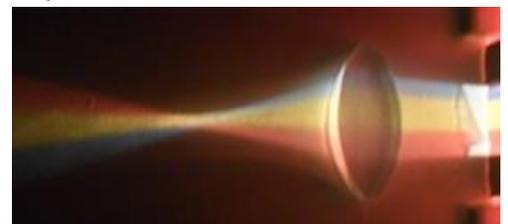


[Ver esta figura animada](#)

La figura animada adjunta procede de una animación de la magnífica web [Educaplus](#) (de Jesús Peñas Cano) con la que se puede practicar la suma aditiva de las tres luces básicas (**roja**, **verde** y **azul**). Como se observa, al combinarlas de dos en dos se obtienen luces de otros tres colores del espectro visible (**amarillo**, **magenta** y **cian**) y combinando las tres luces se obtiene luz blanca. Esto significa que una fuente de luz se ve de cada uno de estos colores, cuando nuestros conos especializados reciben una, dos o las tres luces básicas con la misma intensidad. Cualquier otro color intermedio (por ejemplo, naranja, marrón, gris, etc.) se obtiene siguiendo el mismo procedimiento de suma aditiva de colores de las luces básicas, pero teniendo dichas luces intensidades relativas diferentes. [La animación original está [aquí](#)]

Para poner en evidencia estas combinaciones aditivas de las tres luces primarias, se pueden usar cañones de luz de esos colores con intensidad regulable. Los cañones se han de enfocar hacia una pantalla blanca, como puede ser, por ejemplo, la propia pared de un aula y hemos de dirigir la mirada hacia esa pantalla, porque, como hemos visto en un apartado anterior, el ojo humano no ve ninguna luz (tampoco la luz visible), sino que construye una imagen de los focos (primarios o secundarios) que emiten esa luz. En esta experiencia la pantalla ejerce de foco secundario que emite la suma de las luces recibidas de los cañones. Si, en lugar de mirar a la pantalla, se dirige la mirada hacia esos cañones de luz, lo que se ve son, por separado, cada uno de los focos emisores primarios, es decir, las fuentes con las que cada cañón emite luz (cada una de "su color").

Otra experiencia muy sencilla, que se puede realizar en un laboratorio escolar, consiste en utilizar una lente convergente para sumar en el foco de la misma tres luces previamente obtenidas haciendo pasar luz blanca por un triple filtro. Como vemos en la fotografía adjunta (tomada por alumnos de Bachillerato en clase del segundo autor de este trabajo), si los espectros de las tres luces completan la gama de longitudes de onda de la luz visible, esa resultante obtenida en el foco tiende, efectivamente, al blanco.



Por supuesto que las franjas de colores que se observan tan bien en la fotografía adjunta, tampoco son aquí consecuencia de una observación por la cámara de la luz que, para dicha foto, viaja de derecha a izquierda, sino la imagen que construye dicha cámara del banco óptico, que es iluminado por esa luz. La superficie del banco óptico (de color blanco) la devuelve en todas direcciones, entre ellas la dirección vertical en la que apunta hacia él la cámara.

Como se sabe, los televisores, los monitores de ordenador y bastantes modelos de teléfonos móviles también utilizan las tres luces primarias para producir toda la gama cromática que podemos ver en sus pantallas y, por tanto, son unos buenos ejemplos de aplicación tecnológica de la teoría tricromática del color. En estos aparatos, cada uno de los múltiples focos que emite alguna de las tres luces básicas está contenido en un pixel (“picture element” o menor punto de imagen). En consecuencia, la resolución de la pantalla es tanto mayor (es decir, implica una imagen más nítida) cuantos más pixeles contenga un área determinada de la misma. En la parte más a la izquierda de la

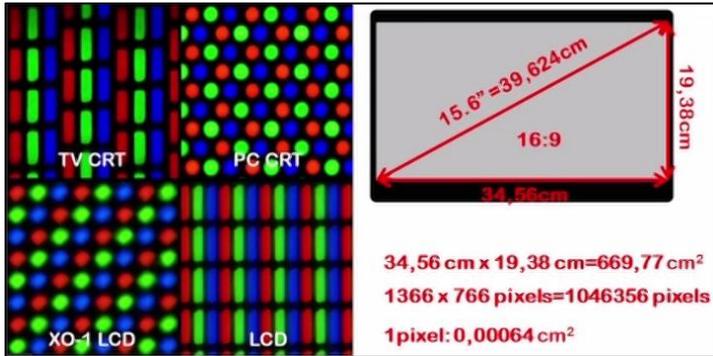
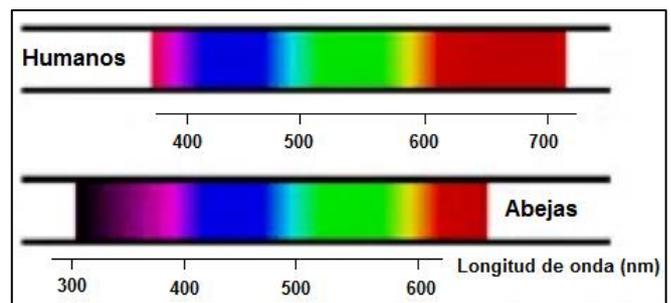


imagen adjunta (fuente: wikipedia) se muestran cuatro ejemplos de conjuntos de pixeles correspondientes a otros tantos tipos de monitores. Como se ve, en todos ellos se alterna de manera homogénea los pixeles emisores de luz de cada uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul). Para formar y dar color a la imagen de un determinado objeto en

la pantalla, cada uno de los muchísimos pixeles que contribuya a la misma, se puede encender o no, con lo que el color de dicha imagen depende finalmente del porcentaje de pixeles de cada luz primaria que estén encendidos. Por otra parte, una vez se conocen las dimensiones de un monitor (el dato que suele proporcionar el fabricante es la longitud de la diagonal en pulgadas) y su resolución en pixels (número de ellos en las dos dimensiones de la pantalla: ancho por alto) podemos calcular el tamaño de los pixels, tal como se muestra, para un ejemplo concreto, en la misma imagen anterior. Es instructivo realizar este tipo de cálculos, para adquirir una idea precisa del orden de magnitud del tamaño de los pixels (el ejemplo que se muestra nos lo enseñó el profesor Benito Vázquez Dorrio).

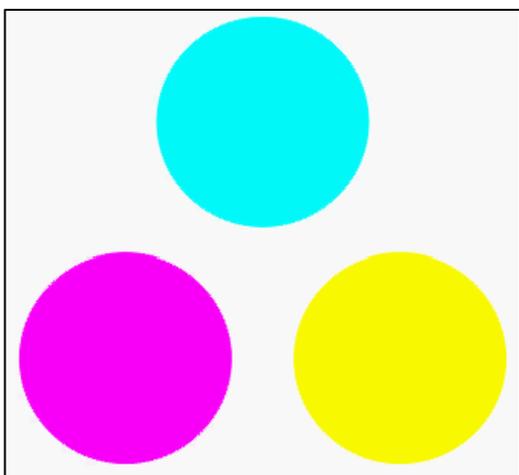
Para terminar este apartado, conviene señalar el hecho de que mecanismo que permite la percepción del color, que, como hemos visto, se basa en la existencia múltiples receptores en la retina (los conos), no es exclusivo de los humanos, sino que, como es lógico, lo tienen también los animales, aunque, eso sí, cada uno de una manera peculiar. El análisis de los conos en la retina permite conocer la percepción particular del color que tiene cada ser vivo (persona o animal). Así se sabe, por ejemplo, que: El espectro visible de algunos animales, como las abejas, se desplaza globalmente con respecto al del ojo humano hacia el violeta, con lo cual, aunque también tienen una visión tricromática, no ven una parte de los rojos que nosotros sí vemos y, sin embargo, si pueden ver la radiación ultravioleta cercana. Otros animales como los perros tienen una visión dicromática y, en este caso, desplazada hacia menor longitud de onda (azules y amarillos), de manera que no distinguen bien las tonalidades rojas y verdes. La mayoría de las especies de murciélago tienen visión monocromática (blanco y negro); Etc.



OBTENCIÓN DE COLORES PIGMENTO MEDIANTE SUMA SUSTRACTIVA

Del mismo modo que para explicar la percepción de los colores hemos recurrido al concepto de suma aditiva de luces, partiendo de las tres luces primarias, para deducir los colores obtenidos cuando se ilumina a objetos que contienen pigmentos (que, recordemos, les hacen absorber parte de la luz que les ilumina y devolver o filtrar la restante), se puede usar una suma sustractiva de colores utilizando filtros de ellos. Así, por ejemplo, podemos pensar en un filtro **rojo**, considerando que absorberá las luces **azul** y **verde**, dejando pasar y/o reflejando la luz roja; similarmente, podemos considerar un filtro **magenta**, que absorberá la luz verde, dejando pasar y/o reflejando las luces **azul** y **roja** (la suma de las luces azul y roja es magenta), etc.

Este proceso de suma sustractiva de colores es utilizado, por ejemplo, en el arte, ya que cuando se mezclan pinturas, se están superponiendo de hecho filtros luminosos, lo que explica el color de la pintura resultante de esa mezcla. Se puede practicar este concepto de suma sustractiva de colores

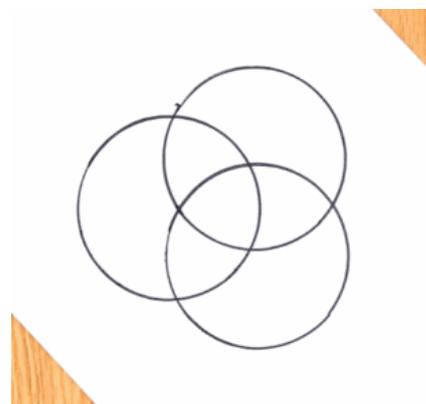


[Ver esta figura animada](#)

superponiendo tres únicos filtros (colores primarios sustractivos), como muestra la figura animada adjunta, disponible en la web [Educaplus](#). Como vemos, al superponer un filtro **magenta** (deja pasar y refleja las luces azul y roja, absorbe la luz verde) a otro filtro **amarillo** (deja pasar y refleja las luces roja y verde; absorbe la luz azul), el resultado es el color **rojo** (única luz primaria no absorbida); al superponer los tres filtros el resultado debería ser la ausencia de color: **negro** (entre los tres filtros deberían absorber las tres luces primarias); etc. [La animación original está [aquí](#)]

Se pueden practicar sumas sustractivas de colores utilizando pinturas y conviene saber que, al utilizar éste y otros procedimientos para obtener colores mediante sumas sustractivas reales, nunca se llega a conseguir un negro puro.

Así lo ilustra la figura animada adjunta (obtenida, con permiso, de la web [exploratorium](#)), que muestra que, mientras los colores, **amarillo**, **magenta** y **cian**, que se pueden obtener superponiendo pinturas de los tres colores primarios, tienen las tonalidades que de ellos se esperan, el negro real obtenido deja, en cambio, bastante que desear, quedándose en una especie de **verde oscuro**. Este hecho denota que sumando las tres capas de pintura realizadas con los colores primarios no se consigue impedir el paso de todas las radiaciones del rango visible (condición necesaria para obtener un **negro puro**). Por este motivo, por ejemplo, las impresoras trabajan ordinariamente con 4 cartuchos: 3 de tinta de color (**amarillo**, **magenta** y **cian**) y un cuarto cartucho específicamente destinado a escribir en **negro**. Este cuarto



[Ver esta figura animada](#)

cartucho es necesario porque lo más que se puede conseguir usando simultáneamente los otros tres es, como acabamos de ver, un verde muy oscuro.

Los equipos de óptica de los laboratorios de Física de los Institutos suelen estar dotados de filtros de varios colores con los que se puede facilitar a los estudiantes la práctica de sumas sustractivas. Por



ejemplo, la fotografía adjunta situada más a la izquierda muestra la superposición de un **filtro cian** (absorbe la luz roja) y un **filtro amarillo** (absorbe la luz azul). El resultado es **verde** (única luz primaria no absorbida). La otra fotografía, situada más a la derecha, muestra la superposición de un **filtro rojo** (absorbe las luces azul y verde) y un **filtro cian** (absorbe la luz roja). El resultado es cercano al **negro** (mirado a simple vista se constata que tampoco es un negro puro) puesto que entre los dos filtros (se acercan a) absorber las tres luces primarias.

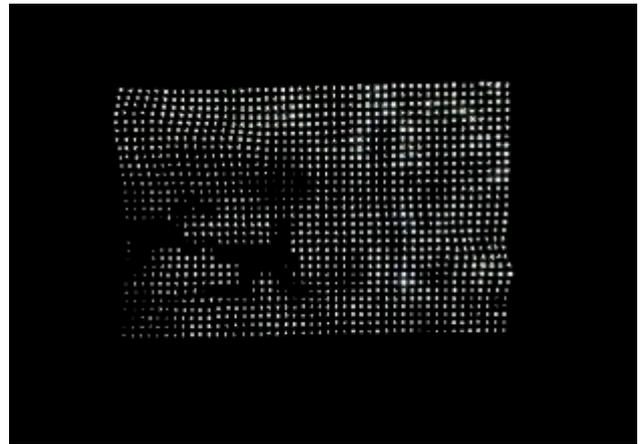
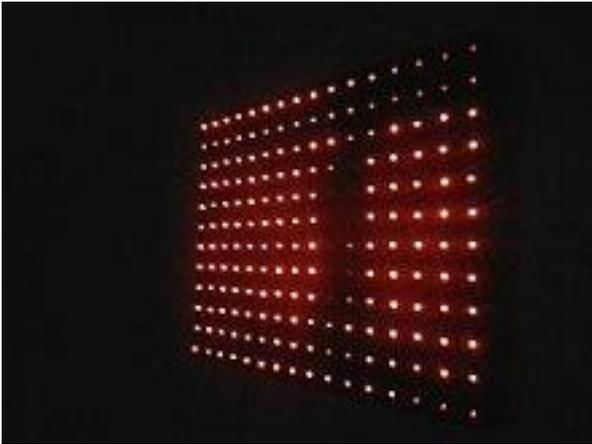
Otra experiencia muy interesante consiste en mostrar los colores obtenidos al restar de la luz blanca cada una de las tres luces básicas haciendo sombra de ellas. La fotografía adjunta, tomada desde arriba, corresponde a este tipo de experimento, que se relata en la web clickonphysics, del profesor Benito Vázquez Dorrio (Universidad de Vigo). Como se ve, para realizar la experiencia se han colocado (arriba en la imagen) tres fuentes de luz de las tres luces básicas: **R** (rojo, red), **G** (verde, green) y **B** (azul, blue) que emiten su luz en todas las direcciones. Esta luz es interrumpida por otros tantos muñequitos, dando lugar a que se obtengan sombras detrás de ellos en las direcciones en las que la luz procedente de esas fuentes se interrumpe. Como el lugar está iluminado con luz blanca, en cada una de esas sombras se está restando de dicha luz blanca la luz primaria interrumpida. Así puede verse con mucha claridad que:

donde se resta es la luz roja, procedente de **R**, la sombra es **cian**; donde se resta la luz verde, procedente de **G**, la sombra es **magenta** y; donde se resta es la luz azul, procedente de **B**, la sombra es **amarilla**.



Para terminar estos desarrollos sobre la visión de los colores pigmento, nos podemos plantear cómo es posible que veamos los llamados "objetos negros", es decir, aquellos que no emiten ni devuelven ninguna luz. La respuesta es que el ojo sí ve al resto de objetos que emiten luz alrededor del objeto negro. La silueta que se "ve" del objeto negro es el hueco que queda.

Este concepto, de restar los objetos luminosos que sí vemos para construir el contorno y la correspondiente silueta de los objetos negros invisibles, es uno de los recursos que utiliza el artista visual [Jim Campbell](#) para crear figuras "negras" en movimiento. Lo hace interrumpiendo a intervalos de tiempo adecuadamente programados, la emisión de luz por algunas de las fuentes, que, conjuntamente, dibujan el fondo (iluminado) de varios de sus "cuadros". Las imágenes (debajo) fueron tomadas por el segundo autor de este trabajo en una exposición del artista que se celebró en Madrid en 2015.

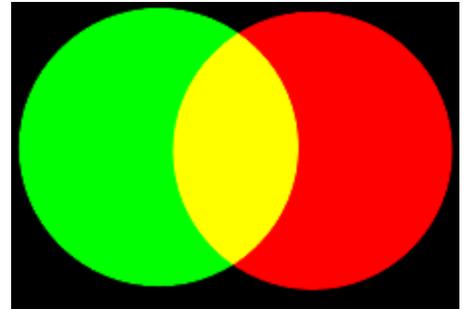


Obras de Campbell: A la derecha se "ven" las siluetas móviles de dos nadadores ([clic aquí para verla animada](#)). A la izquierda una foto estática de la figura de una persona paseando.



METAMERISMO Y SUBJETIVIDAD EN LA INTERPRETACIÓN DE COLORES

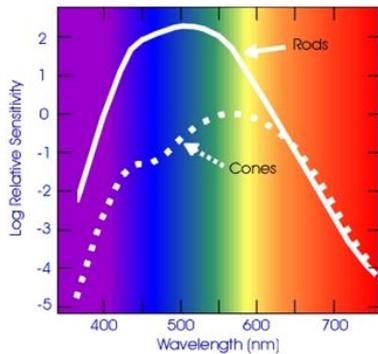
Del proceso descrito en los dos apartados anteriores sobre la percepción de los colores, se deriva la evidencia de que, para nosotros, tales colores son una construcción mental, y, por tanto, dependen, no únicamente de las características de la radiación que reciben nuestros ojos, sino también de la sensibilidad de nuestros receptores (básicamente los conos) y del mecanismo que sigue el cerebro para sumar los estímulos generados en ellos. Una primera consecuencia de esto es lo que se denomina **metamerismo**, que es el fenómeno psicofísico que hace que dos muestras de color coincidan bajo unas condiciones determinadas (fuente de luz, observador, geometría...) pero no bajo otras diferentes. Así, por ejemplo, dos colores pueden ser idénticos para nuestros ojos, aunque la fuente física que los emita sea muy diferente. Si dicha fuente, por ejemplo, emite luz con una longitud de onda de 580 nm, nuestro cerebro le atribuirá "tener" color amarillo, pero, del mismo modo, si proyectamos sobre una pared blanca luces de color rojo y verde de la misma intensidad y de longitudes de onda equidistantes de esos 580 nm, nuestro cerebro también le atribuirá a la zona de la pared que devuelve ambas luces superpuestas "tener" ese mismo color amarillo. Lo mismo ocurre, como hemos visto en la página anterior, mezclando pinturas de diferentes colores, como, en este caso color **rojo** y **verde** (la pintura resultante será **amarilla** para nuestros ojos).



En un [pasaje anterior](#) hemos hablado de espectros de reflectividad de láminas iridiscentes que, aunque tienen su pico interferencia constructiva en determinada longitud de onda, nuestros ojos las ven de un color distinto. Esto puede ocurrir básicamente por dos motivos: a) Porque las radiaciones que dichas estructuras emiten y nuestros conos reciben no se limita a ese pico de interferencia constructiva; b) Porque los receptores humanos de luz (conos y bastones) tienen mayor sensibilidad para unas longitudes de onda que para otras, provocando que, en algunos casos, se distorsione la percepción que tenemos de algunos colores.

Un ejemplo prototípico en el que se combinan ambos motivos es el color **azul cian** del cielo durante las horas diurnas, del que ya hemos hablado en un [apartado anterior](#) donde vimos que la atmósfera produce un esparcimiento Rayleigh sobre la luz solar, de tal modo que el pico de máxima intensidad de la luz dispersada se encuentra (dentro de la zona visible del espectro) en el color **violeta**, y le acompaña luz el resto de longitudes de onda del espectro visible, con cada vez menor intensidad a medida que va aumentando la longitud de onda. Por tanto, todas esas radiaciones activan a los tres tipos de conos de nuestra retina y, podríamos pensar, si sólo hubiera que tener en cuenta estos factores que el color resultante que interpreta el cerebro como consecuencia de todos esos estímulos debería ser justamente el **azul cielo**.

Lo cierto es que hay que tener en cuenta algo más. Concretamente, el hecho de que nuestros receptores no tienen idéntica sensibilidad a todas las longitudes de onda del espectro visible. Cuando



se considera al ojo globalmente, se constata que tiene esta su máxima sensibilidad precisamente en el color **azul** (cercano al **violeta**), tal como se muestra en la figura adjunta, que revela que ambos receptores (conos y bastones) manifiestan la mayor sensibilidad en ese rango de longitudes de onda. Eso sí, conviene aclarar, no obstante, que, si usáramos fotorreceptores que fueran igual de sensibles al azul que al violeta el cielo, en principio tampoco se vería de color violeta, porque a la Tierra le llegan menos fotones azules que violetas del Sol.

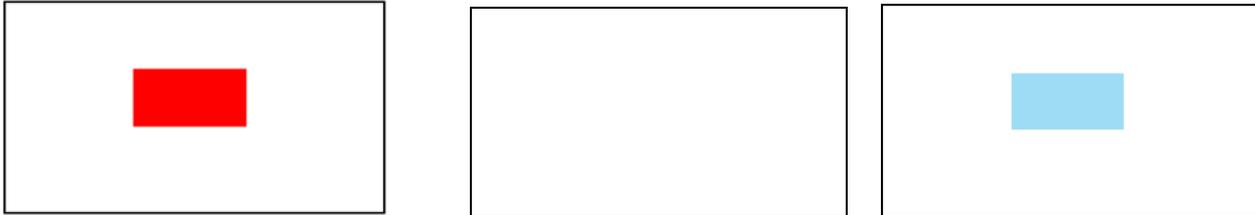
Por tanto, la mayor sensibilidad de nuestros receptores en el color azul, hace que vemos el cielo de un color más azulado de lo que realmente es o, dicho de otro modo, con una tonalidad azulada más alejada al violeta (más **cian** y menos **azul oscuro**), que la nos mostrarían esos fotorreceptores.

Todo esto es así para un ojo humano cuyo funcionamiento se pueda considerar "normal" a estos efectos, es decir, cuyos receptores respondan a los estímulos luminosos correctamente. No siempre ocurre. Como se explica en el tema de nuestra web sobre [luz y visión](#), algunas personas padecen, en mayor o en menor grado daltonismo, una anomalía que les impide distinguir algunos o todos los colores, porque algunos de sus conos (o todos ellos) no funcionan correctamente.

La subjetividad en la percepción de los colores se pone de manifiesto en otras muchas situaciones y puede ser debida, tanto al funcionamiento de los receptores del ojo, como al del cerebro que finalmente registra e interpreta las señales que llegan a esos receptores. En el tema antes citado de nuestra web se puede consultar un apartado dedicado a las llamadas anomalías visuales y, entre ellas, al [daltonismo](#). Las personas daltónicas no distinguen bien los colores por fallo de los genes encargados de producir los pigmentos de los conos, de tal forma que, dependiendo de cuál sea el pigmento defectuoso, la persona confunde unos colores u otros. Así, se llama daltonismo tricromático al que padecen quienes tienen defectos funcionales en uno de los tres tipos de conos (el grupo más abundante y común de los daltónicos), dicromático al que padecen quienes tienen dos tipos de conos afectados y acromático al que padece un número muy reducido de personas a las que no les funciona ningún tipo de cono y sólo tienen visión en blanco y negro.

No es necesario tener una anomalía visual para encontrar dificultades en la interpretación de los colores bajo determinadas circunstancias. Una de ellas puede ser cuando "se fatigan", aunque sea momentáneamente algunos de nuestros receptores. Las tres figuras situadas debajo de este texto siguen la secuencia de actividad muy interesante que podemos realizar para darnos cuenta de esto (disponible en la web [clickonphysics](#) del profesor Benito Vázquez Dorrio). Con la habitación a oscuras y la figura ocupando toda la pantalla del ordenador, hay que mirar durante algo de tiempo a la figura situada más a la izquierda, fijando la vista intensamente en el **cuadrado rojo**. Seguidamente, sin apartar la mirada, se sustituye la figura de la izquierda (la del cuadrado rojo), por la situada en el centro (totalmente blanca). Entonces veremos durante un breve lapso de tiempo, un **rectángulo cian** donde

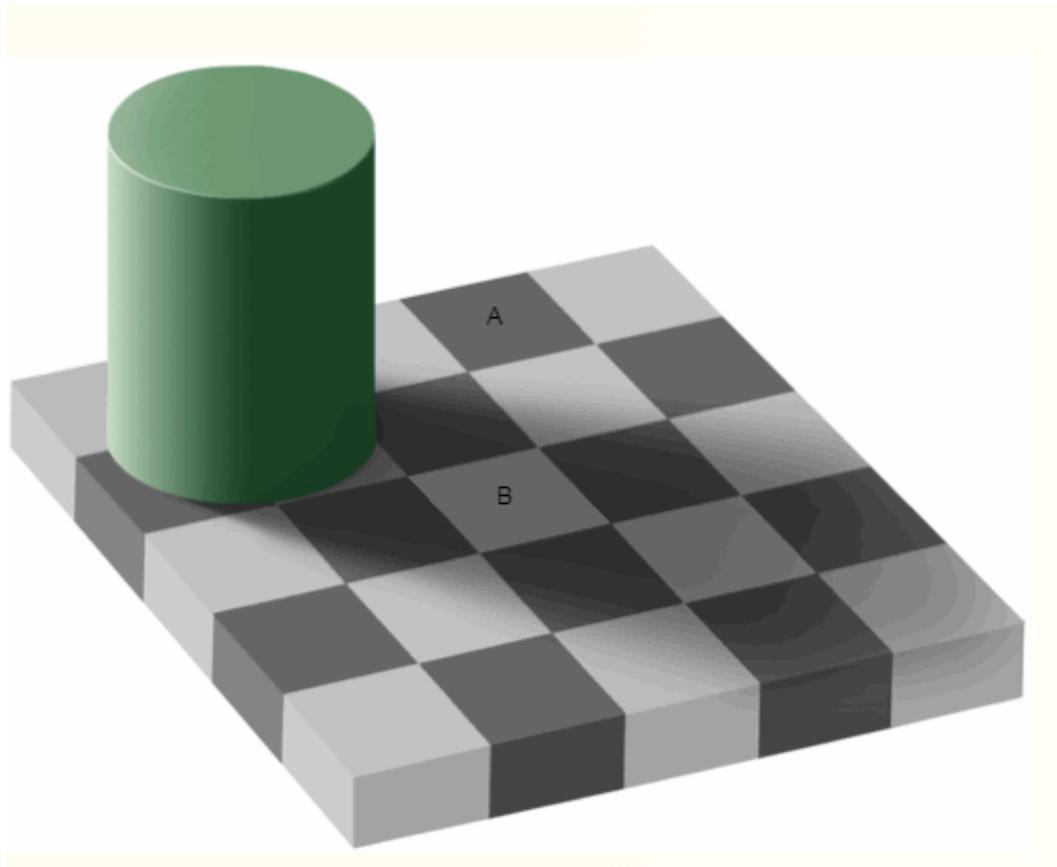
antes veíamos el **rectángulo rojo**, tal como el que se muestra en la figura situada más a la derecha. Eso ocurre porque durante la primera mirada, los conos de nuestros ojos a los que les llega (y detectan) la luz roja del rectángulo "se fatigan", de tal forma que, en el momento de sustituir esa primera pantalla por la que es totalmente blanca, nuestro ojo compone el cuadrado que queda donde estaba el cuadrado rojo (que ahora es, como toda la pantalla, blanco) con el resto de conos (**verdes y azules**) apareciendo, por tanto, de manera transitoria como el cuadrado de color **cian**.



Tan importante o más que el funcionamiento de los receptores de luz es el papel que juega el cerebro, que es el órgano que finalmente interpreta lo que vemos y que puede alterar nuestra visión de datos objetivos parciales en pro de una interpretación global satisfactoria o más útil de la imagen que estamos viendo.

Un buen ejemplo de ello, lo podemos ver en la animación mostrada después de este párrafo (en la página siguiente), que enseña la conocida "ilusión de la sombra del damero de Adelson". En este caso, como puede verse, nuestro cerebro interpreta la tonalidad de los cuadrados A y B de manera diferente, dependiendo de cuál sea el entorno de dichos cuadrados. Objetivamente A y B tienen exactamente el mismo color (un gris de la misma intensidad) y, de hecho, los conos tienen la misma excitación con la luz procedente de ambos. Sin embargo, el cerebro opta por interpretar que A y B tienen el mismo color únicamente cuando ambos están rodeados por el mismo contexto (en este ejemplo rodeados de amarillo) y atribuye a B un color más claro que a A, cuando A y B están rodeados por el resto de piezas del tablero ajedrezado. Como sucede con muchas de las llamadas ilusiones ópticas, este efecto demuestra en realidad el éxito, más que el fracaso, del sistema visual en su conjunto. En esta ocasión, nuestro cerebro pretende (y lo consigue) hacer una descomposición de la imagen en componentes significativos, es decir, prioriza que le demos sentido a la naturaleza de todos los elementos que se ven en esta imagen, lo que ocurre aquí integrando A y B en el resto del tablero.

Porque la tarea más importante para el cerebro no es servir como fotómetro físico, sino componer la información de toda la imagen de la manera más útil posible para el observador de la misma.



[Ver esta figura animada](#)



ALGUNA BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA (para personas curiosas que quieran ampliar)

(Se proporciona aquí el vínculo original a todos los documentos. No obstante, al ser de libre acceso, quienes estén interesados en cualquiera, también lo pueden descargar, si lo prefieren a lo largo del tema digital de nuestra página web o, todos ellos, en la [última página de dicho tema](#))

[El espectroscopio cuantitativo como instrumento para la construcción y uso de modelos de emisión y absorción de radiación en física cuántica](#): Artículo de F. Savall-Aleman, J.L. Domenech y J. Martínez Torregrosa publicado en 2014 en la “Revista Brasileira de Ensino de Física”. Explica cómo se puede construir (usando una caja de zapatos) el espectroscopio casero al que nos hemos referido en [este apartado](#), y desarrolla un conjunto de instructivas experiencias a realizar con él, observando los colores de espectros de gases y, de paso, aprendiendo algunos conceptos básicos de física cuántica.

[Espectroscopía fácil en el laboratorio de bachillerato](#): Artículo de A. García-Verdugo, publicado en 2022 en la revista “Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales”. Explica cómo construir con una plantilla de cartulina otro espectroscopio casero al que también nos hemos referido en [este apartado](#). Añade experiencias realizables con dicho espectroscopio.

[¿Cómo se emite y se absorbe radiación?. Introducción a la física cuántica. Programa-guía de actividades comentado para el profesorado](#): Documento de F. Savall-Aleman, J.L. Domenech y J. Martínez Torregrosa, publicado en 2014 por la Universidad de Alicante. Desarrolla una secuencia problematizada de actividades para la enseñanza de la física cuántica en los cursos introductorios. Además del profesorado, cualquier persona interesada en adentrarse de manera muy básica en la física cuántica, puede hacerlo leyendo este trabajo y, de paso, disfrutar con la observación de diversos espectros.

["Classification of peacock feather reflectance using principal component analysis similarity factors from multispectral imaging data"](#): Artículo de J. M. Medina, J. A. Díaz, y P. Vukusic, publicado en 2015 en la revista “Optics Express”. Relata de manera detallada el fundamento de los espectaculares colores estructurales que exhiben las alas del pavo real, al que nos hemos referido en [este apartado](#).

["Photonic structures in biology: a possible blueprint for nanotechnology"](#): Artículo de F. P. Barrows y M. H. Bartl, publicado en 2014, en la revista “Nanomaterials and Nanotechnology”. Explica con detalle el fundamento del muy intenso y muy poco habitual color azul que tienen las alas de las mariposas Morpho, de las que hablamos en [este apartado](#).

[“Photonic crystals cause active colour change in chameleons”](#): Artículo de J. Teyssier, S. V. Saenko, D. Van Der Marel y M. C. Milinkovitch, publicado en 2015 en la revista “Nature communications”. Explica cómo el camaleón pantera modifica la periodicidad del cristal fotónico que es responsable del color de su caparazón, lo que le ayuda a camuflarse, como hemos visto en [este apartado](#).

[Biologically inspired humidity sensor based on three-dimensional photonic crystals](#): Artículo de Jae Hyun Kim, Jun Hyuk Moon, Seung-Yop Lee, y Jungyul Park, publicado en 2010 en la revista “Applied Physics Letters”. Explica cómo se han diseñado sensores de humedad, para cuya construcción se reproduciendo estructuras similares de la del caparazón del escarabajo rinoceronte (al que nos referimos en [este apartado](#)) y usando el color que reflejan estas estructuras como parámetro indicador de la humedad.

[Photonic Crystal Fibers](#): Artículo de P: Russell publicado en 2003 en la revista “Science”. Relata el fundamento y diseño de las “fibras ópticas de cristal fotónico”, de las que hemos hablado en [este apartado](#).

[On the theory of light and colors](#). Memoria presentada por Young en 1802 a la “Royal Society” en la que reforzó su modelo ondulatorio sobre la luz, superando brillantemente la dificultad que había observado en la teoría corpuscular de Newton de la propia luz. Puso de manifiesto el hecho de que, en nuestros ojos, solamente sería necesario tener receptores de tres tipos para distinguir todos los colores visibles, sentando con ello las bases de la actual teoría tricolor sobre la percepción de los colores que tratamos en [este apartado](#).



CONFERENCIA Y ENTREVISTA, RELACIONADAS CON CONTENIDOS DE ESTE TEMA

https://www.youtube.com/results?search_query=manuel+alonso+sherezademr Retransmisión de la conversación del primer autor de este tema con la creadora de contenido ("streamer") SherezadeMR en Twitch en marzo de 2023 sobre los [cristales fotónicos](#), donde también comenta su investigación en este campo.

https://www.youtube.com/watch?v=zqPN9fHx_Vw Conferencia del primer autor de este tema en la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en diciembre de 2023 (ciclo de conferencias "Hablemos de Física") dirigida a estudiantes. Centrada en los [cristales fotónicos en la naturaleza](#) y la conexión con [su investigación](#).

Materiales fotónicos: De la naturaleza iridiscente a la termometría luminiscente

Manuel Alonso Orts
Institute of Solid State Physics, University of Bremen, 28359, Bremen (Alemania)

Jueves 14 de diciembre de 2023, 13:30
Aula M2, Facultad CC. Físicas UCM

Ciclo especialmente orientado a estudiantes

The poster features a blue header with the title. Below the title, there are three images: a blue butterfly, a portrait of Manuel Alonso Orts, and a diagram of a photonic crystal structure with a lattice constant $a = 730 \text{ nm}$. The text on the right provides the speaker's name, affiliation, and the event details. A blue banner at the bottom states 'Ciclo especialmente orientado a estudiantes'.

