Color mixing with glass Mezcla de colores con vidrio

Yago Arosa, Raúl de la Fuente *

*Departamento de Física Aplicada, Facultade de Óptica e Optometría, Universidade
de Santiago de Compostela, 15782 Galicia, España*

(*) E-mail: raul.delafuente@usc.es

Received / Recibido: 07/05/2015

Accepted / Aceptado: 15/06/2015

DOI: 10.7149/OPA.48.2.149

ABSTRACT:

We performed a simple experience of additive color mixing using a glass and different colored cardboards. This experience can not only be used to describe color mixing, but to study and explain the optical properties of a transparent dielectric, such as glass, in a very visual way. This last one is the goal of the present paper.

Key words: color, additive color mixing, reflectance, transmittance, glass.

RESUMEN:

Realizamos una simple experiencia de mezcla aditiva de colores usando un vidrio y cartulinas de diferente color. Esta experiencia no sólo puede ser usada para describir la mezcla de colores sino para estudiar y explicar las propiedades ópticas de un dieléctrico transparente, como el vidrio, de una forma muy visual. Este último es el objetivo de este artículo

Palabras clave: color, mezcla aditiva de colores, reflectancia, transmitancia, vidrio.

Fig. 1. Mezcla aditiva de colores usando cartulinas de tres colores, rojo tomate, verde claro y azul claro, y un vidrio. En la parte inferior (debajo de la línea negra) se observan directamente los colores de las cartulinas usadas y en la parte superior se observa la mezcla aditiva de colores con diferentes proporciones de los colores de la mezcla. La explicación de la fotografía se realiza en la última sección del texto.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] I. Newton, *Opticks: Or, a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections, and Colors of Light*, Digireads.com (2011). La versión original fue publicada en 1704.
 - [2] S. J. Williamson, H. C. Cummins, *Light and color in nature and art*, John Wiley and sons (1983).
 - [3] R.W.G. Hunt, *Measuring colour* (segunda edición). Ellis Horwood Limited (1992).
 - [4] E. Hetch, *Óptica* (tercera edición), Addison Wesley Iberoamericana (2000) .
-

1. Introducción

El título de este trabajo no está, intencionadamente, muy claro. ¿Cómo se utiliza el vidrio para realizar la mezcla?. Para explicarlo, vamos a referirnos primero a que entendemos por mezcla de colores. Ya en 1704, Newton hace referencia en su libro *Opticks*[1] a una serie de experimentos en el que superpone luces de diferentes tonalidades, es decir, de diferentes partes del espectro, sobre una pantalla utilizando espejos. Como resultado en la pantalla se observaba luz de diferente color: amarilla como combinación de verde y rojo, o púrpura como combinación de azul y rojo. Con este simple método Newton observó muchos colores, pero ya anotó que simplemente con dos luces no siempre podía obtener luz blanca. En el año 1860 Maxwell, reconocido por muchos como el padre de la teoría aditiva del color, comprobó que se puede obtener virtualmente cualquier color por superposición de tres colores bien elegidos, denominados primarios (más precisamente, tres colores se denominan primarios si se puede obtener el color blanco mediante su superposición). En principio existen muchos conjuntos de primarios, pero una elección adecuada permite obtener un abanico mayor de colores. Típicamente se usa un conjunto con tonos azul, verde y rojo, correspondientes a la parte baja, media y alta del espectro (en lo que se refiere a la longitud de onda).

La mezcla aditiva de colores se puede obtener de distintas maneras[2]. La más usual consiste en la superposición directa de luces de diferentes tonalidades. Para obtener diferentes colores, simplemente hay que variar el peso o proporción con la cual cada color primario contribuye a la suma. Por ejemplo, considerando colores primarios verde y rojo, vamos obteniendo diferentes tonalidades de verdes, amarillos, naranjas y rojos, empezando con mezclas en las que participa el color verde en mayor proporción y acabando con mezclas en que el rojo es predominante. Con la mezcla de azul y verde, vamos de azul puro a verde puro, pasando por azules verdosos, cianes y verdes azulados. Con la mezcla de rojo y azul, conseguimos, entre otros, los colores púrpura, colores que no están en el espectro de la luz blanca. En general, para variar la cantidad de los colores primarios en una mezcla se varía la luminancia de las luces en la zona de superposición. Las cantidades de luminancia de las luces primarias normalizadas respecto a unas unidades dadas es lo que se conoce como valores triestímulo del color resultante. Estos valores permiten cuantificar y/o medir cualquier color [3].

En lugar de usar luces directamente, se puede utilizar la luz transmitida o reflejada por objetos iluminados. Este es el caso de las mezclas de la figura 1. Como fuente de iluminación usamos luz natural, y como objetos para producir los colores primarios, tres pares de cartulinas de diferente color. En cada una de las fotografías, la mezcla aditiva se obtiene a partir de la luz difundida por pares de cartulinas (verde y roja, roja y azul, azul y verde) y la contribución de los miembros de cada par va variando de fotografía en fotografía. Para entender cómo se produce esta variación, en el siguiente apartado realizaremos un repaso a las propiedades ópticas de un vidrio.

2. El vidrio

Desde un punto de vista óptico un vidrio es un material dieléctrico (no conductor), amorfo, y por lo tanto isotrópico, prácticamente transparente a la radiación visible, salvo que este tintado. Valores típicos de su índice de refracción van desde 1.45 hasta 2. Son materiales que transmiten muy bien la luz, ya que prácticamente no presentan absorción y reflejan más bien poco (diríamos que son muy malos espejos), *habitualmente*. El comportamiento de la luz en un vidrio ya fue analizado por los griegos. En el siglo II a. C. el griego-egipcio Claudio Ptolemeu realizó estudios de la reflexión y refracción entre aire e vidrio, llegando a la conclusión (errónea) de que el ángulo de incidencia y refracción son proporcionales. En el siglo XVII Descartes y Snell, entre otros, establecieron la ley correcta que indica que el producto de índice por el

seno de ángulo de propagación en un medio respecto a la superficie frontera se mantiene constante. Pero no fue hasta el siglo XIX, con los trabajos de Fresnel y Stokes, cuando se estableció como calcular la fracción de luz reflejada y transmitida por un medio no absorbente como el vidrio. Realmente este es un problema de superficie; es decir la cantidad de luz reflejada y transmitida no es más que la superposición de estos efectos en las superficies del medio.

Se define la reflectancia y transmitancia superficial, R_s y T_s , respectivamente, como la fracción de luz reflejada y transmitida de la luz incidente sobre la superficie de separación entre dos medios. Dependen de los índices de refracción de los medios, o del índice relativo; de la longitud de onda, a través del índice de refracción; del ángulo de incidencia de la luz medido respecto a la normal al medio y también de la denominada polarización de la luz. Si consideramos dieléctricos iluminados con luz natural, la reflectancia viene dada por [4]:

$$R_s = \frac{1}{2} \left| \frac{\cos \theta_i - n \cos \theta_r}{\cos \theta_i + n \cos \theta_r} \right|^2 + \frac{1}{2} \left| \frac{\cos \theta_r - n \cos \theta_i}{\cos \theta_r + n \cos \theta_i} \right|^2 ; \quad (1)$$

donde $n = n_r/n_i$ es el índice de refracción relativo y θ_i , θ_r los ángulos de incidencia y refracción respectivamente. Para calcular la transmitancia simplemente se puede tener en cuenta el principio de conservación de la energía en la superficie que implica:

$$R_s + T_s = 1 ; \quad (2)$$

Por ejemplo, considerando incidencia normal y tomando $n = 1.5$ se tiene $R_s = 4\%$ y $T_s = 96\%$, es decir, casi toda la luz es transmitida. Y si consideramos una lámina de vidrio con superficies paralelas la fracción de luz reflejada es aproximadamente del 8% mientras que se transmite una proporción del 92%. En la figura 2 se muestra una gráfica de la reflectancia y transmitancia superficial de un vidrio de índice de refracción 1.5 en contacto con aire, en función del ángulo de incidencia.

Figura 2. Reflectancia y transmitancia superficial en función del ángulo de incidencia para un vidrio con $n = 1.5$.

Vemos que la reflectancia se mantiene baja mientras el ángulo de incidencia no supera los 50° , a partir de ahí empieza a crecer cada vez más rápido hasta que reflectancia y transmitancia se igualan par un ángulo de incidencia de $82,82^\circ$. Para ángulos mayores la reflectancia tiende a uno y la transmitancia a cero. El efecto de aumentar el índice de refracción es el de aumentar la reflectancia superficial. Por ejemplo para $n = 2$ e incidencia normal $R_s = 11\%$, aún baja.

En condiciones normales, por ejemplo cuando observamos una escena a través de una ventana, la luz que la atraviesa y llega hacia nosotros lo hace con bajos ángulos de incidencia. Por lo tanto, vemos muy bien a través de la ventana y apenas se observan los objetos de la habitación reflejados en la misma (salvo que sea de noche y no se tenga iluminación exterior y la habitación este bien iluminada; en este caso, la ventana funciona como un buen espejo). Pero la situación es muy diferente si observamos a través de la ventana pegados a ella y lateralmente; la luz que penetra en nuestros ojos en esta situación incide en la ventana con ángulos grandes y se observa mejor el reflejo que a su través. Este efecto es el que permite la variación del color en las mezclas de la figura 1. ¡Vamos a ello!

Fig. 3. Montaje experimental. A través del vidrio se observa la mezcla de colores (aguamarina, violeta y naranja).

3. La mezcla de colores a través del vidrio

El montaje usado para realizar las fotografías de la figura 1 se muestra en la figura 3. Colocamos un vidrio verticalmente entre dos tablas y dispusimos un trío de cartulinas de colores en ambos lados de modo que estuviesen enfrentadas dos cartulinas de diferente color. Las fotografías fueron realizadas en el exterior, usando la luz del cielo nublado, típico de Santiago de Compostela. Al realizar las fotografías de las mezclas de colores no utilizamos la cartulina blanca que aparece al fondo. Simplemente la pusimos para realizar la foto de la figura por razones estéticas. Para las fotos propiamente dichas, nos pusimos enfrente al vidrio, enfocamos la cámara sobre el mismo y fuimos modificando la dirección de visión de modo a modificar el ángulo de incidencia de la luz recogida por el objetivo de la cámara. En la figura 1 el ángulo de incidencia de la luz recogida aumenta de arriba abajo y de izquierda a derecha, empezando por incidencia casi normal al vidrio y terminando con incidencia casi rasante. En el tercio inferior de cada fotografía se observa directamente las cartulinas, mientras que en la parte superior se observa la superposición de la luz incidente en la lámina por ambos lados bajo un mismo ángulo (mejor, en un pequeño abanico de ángulos). Para un ángulo de incidencia dado observamos la luz reflejada en las caras del vidrio más la luz transmitida por el vidrio. Es decir, observamos la mezcla aditiva de la luz que es difundida por las cartulinas y posteriormente reflejada, por un lado y transmitida, por otro lado, por el vidrio. Así, en la primera fotografía los colores de las láminas correspondientes vistas directamente y a través del vidrio se asemejan mucho. Esto es así, porque bajo ese ángulo de incidencia la reflectancia es muy pequeña y observamos en la parte superior prácticamente sólo la luz transmitida. Mientras va aumentando la contribución de la luz reflejada se observa un cambio de color, apareciendo colores púrpuras, azules verdosos a anaranjados como resultado de la mezcla aditiva. Ya en la última fotografía, abajo a la derecha, predomina notablemente la contribución de la luz reflejada sobre la transmitida por el vidrio y se observa justo por encima de la parte baja del vidrio (línea negra) colores semejantes a los de abajo. También en las últimas fotografías se observa un cambio gradual de tonalidad. Esto indica, que estamos recogiendo luz que corresponde a un abanico de ángulos de incidencia.

Aparte de las variaciones de color debido a la variación de la proporción de luz reflejada y transmitida, en la figura 1 se observan otras variaciones no asociadas a la mezcla. Así de fotografía en fotografía, se observa variación del color de las cartulinas fotografiadas directamente (en la parte inferior). Dado que íbamos variando la disposición de la cámara, las condiciones de iluminación de la misma no se mantenían. Por ejemplo, la cantidad de luz difundida por las cartulinas varía con la dirección. Podemos achacar entonces este efecto a "condiciones medioambientales". Además, las fotografías de la derecha son más oscuras que las de la izquierda. Esta variación de luminosidad se produce tanto para la mezcla como para la luz difundida directamente por las cartulinas. Por lo tanto este efecto, tiene causas similares al anterior.