

Visión de los colores

35-1	El ojo humano	35-4	El diagrama cromático
35-2	El color depende de la intensidad	35-5	El mecanismo de la visión de los colores
35-3	Medición de la sensación de color	35-6	Fisioquímica de la visión de los colores

35-1 El ojo humano

El fenómeno de los colores depende parcialmente del mundo físico. Discutimos los colores de películas de jabón, y de otras cosas, como producidos por interferencia. Pero también, por cierto, depende del ojo, o lo que suceda detrás del ojo, dentro del cerebro. La física caracteriza la luz que entra al ojo, pero después de esto, nuestras sensaciones son el resultado de procesos neuro-fotoquímicos y de respuestas psicológicas.

Existen muchos fenómenos interesantes asociados con la visión que comprenden una mezcla de fenómenos físicos y procesos fisiológicos, y la total apreciación de los fenómenos naturales, cuando nosotros los vemos, debe ir más allá de la física en el sentido usual. No damos mayores justificaciones para hacer estas excursiones en otros campos, porque la separación de campos, como lo hemos recalado, es meramente una conveniencia humana, y no una cosa natural. La Naturaleza no está interesada en nuestras divisiones, y muchos fenómenos interesantes tienden un puente sobre las brechas entre campos.

En el capítulo 3 ya hemos discutido la relación entre la física y las otras ciencias en términos generales, pero ahora vamos a mirar con algún detalle un campo específico en el cual la física y otras ciencias están muy, pero muy relacionadas. Tal área es la *visión*. En particular discutiremos la *visión de los colores*. En el capítulo presente discutiremos principalmente los fenómenos observables de la visión humana, y en el capítulo siguiente consideraremos los aspectos fisiológicos de la visión, tanto en el hombre como en otros animales.

Todo comienza con el ojo; así, con el fin de entender cuál fenómeno vemos, se requiere cierto conocimiento del ojo. En el capítulo siguiente discutiremos con algún detalle cómo trabajan las diferentes partes del ojo, y cómo están interconectadas con el sistema nervioso. Por ahora, describiremos sólo brevemente cómo funciona el ojo (Fig. 35-1).

La luz entra al ojo a través de la *córnea*; ya hemos discutido cómo se desvía para formar imagen en una capa llamada *retina* en la parte posterior del ojo, de modo que diferentes partes de la retina reciben luz desde diferentes partes del campo visual exterior. La retina no es absolutamente uniforme: existe un lugar, un punto, en el centro de nuestro campo



Fig. 35-1. El ojo.

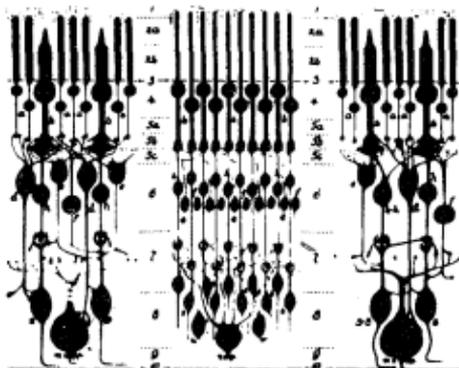


Fig. 35-2. La estructura de la retina. (La luz entra desde abajo.)

visual, que utilizamos cuando tratamos de ver muy cuidadosamente las cosas, y en el cual tenemos la visión más aguda; se llama la *fóvea* o *mácula*. Las partes laterales del ojo, como podemos apreciar inmediatamente a partir de nuestra experiencia al mirar las cosas, no son tan efectivas para ver detalles, como lo es el centro del ojo. Existe también un punto en la retina de donde salen los nervios que llevan la información; éste es un punto ciego. No existe aquí parte sensible de la retina, y es posible demostrar que si cerramos, digamos, el ojo izquierdo y miramos directamente un objeto, y en seguida movemos un dedo u otro objeto pequeño lentamente hacia fuera del campo visual, súbitamente desaparece en alguna parte. El único uso práctico que de este hecho conocemos es que cierto fisiólogo llegó a ser todo un favorito en la corte del rey de Francia, a quien se lo dio a conocer; en las aburridas sesiones con sus cortesanos, el rey podía divertirse "cortándoles la cabeza", mirando a alguno y viendo desaparecer la cabeza del otro.

La figura 35-2 muestra una vista ampliada del interior de la retina en forma algo esquemática. En diferentes partes de la retina existen diferentes clases de estructuras. Los objetos que se presentan más densamente cerca de la periferia de la retina se llaman *bastoncillos*. Más cerca de la *fóvea* encontramos, además de estas células bastoncillos, las células *conos*. Describiremos más adelante estas células. A medida que nos aproximamos a la fóvea, aumenta el número de conos, y en la fóvea misma no hay otra cosa que células conos, empaquetados en forma muy compacta, tan compacta que las células conos son aquí mucho más finas o delgadas, que en cualquier otra parte. Debemos así apreciar que vemos con los conos justamente en el centro del campo visual, pero a medida que nos vamos a la periferia tenemos las otras células, los bastoncillos. Ahora la cosa interesante es que en la retina cada célula sensible a la luz no está conectada por una fibra directa al nervio óptico, sino que está conectada a muchas otras células, que a su vez están conectadas entre sí. Hay varias clases de células: hay células que llevan la información hasta el nervio óptico, pero hay otras que están principalmente interconectadas "horizontalmente". Existen esencialmente cuatro clases de células, pero no entraremos en estos detalles ahora.

Lo principal en que ponemos énfasis es que la señal luminosa ha sido ya "pensada". Esto quiere decir que la información desde las diferentes células no va inmediatamente al cerebro, punto por punto, sino que en la retina una cierta cantidad de la información ya ha sido digerida, por una combinación de la información desde diversos receptores visuales. Es importante comprender que ciertos fenómenos de la función cerebral ocurren en el ojo mismo.

35-2 El color depende de la intensidad

Uno de los fenómenos más sorprendentes de la visión es la adaptación del ojo a la oscuridad. Si nos introducimos en la oscuridad desde una pieza brillantemente iluminada, no podemos ver muy bien durante un instante, pero paulatinamente, las cosas se hacen más y más notorias, y finalmente podremos ver algo donde antes no veíamos nada. Si la intensidad de la luz es muy baja, las cosas que vemos son *incoloras*. Es sabido que esta visión debida a la adaptación a la oscuridad se debe, por mucho, enteramente a los bastoncitos, mientras que la visión en la luz brillante, se debe a los conos. Como resultado, existen muchos fenómenos que podemos apreciar fácilmente a causa de esta transferencia de funciones de los conos y bastoncitos en conjunto a los bastoncitos únicamente.

Hay muchas situaciones en las cuales, si la intensidad de la luz fuera más fuerte, podríamos ver color, y encontraríamos estas cosas bien bellas. Un ejemplo es que a través del telescopio vemos casi siempre imágenes en "blanco y negro" de nebulosas tenues, pero W. C. Miller, de los Observatorios de Mt. Wilson y de Palomar, tuvo la paciencia de hacer fotografías *en color* de algunos de estos objetos. En realidad, nadie ha visto nunca estos colores con el ojo, pero no se trata de colores artificiales, se trata solamente de que la intensidad de la luz no es suficientemente fuerte para que los conos de nuestro ojo puedan verlos. Entre los más espectaculares de estos objetos están la nebulosa de anillo y la nebulosa del Cangrejo. La primera muestra una hermosa parte interna azul, con un halo rojo brillante exterior, y la última muestra una bruma general azulada, penetrada por filamentos rojo-anaranjados brillantes.

A la luz brillante, aparentemente, los bastoncitos son de sensibilidad muy baja, pero en la oscuridad, a medida que pasa el tiempo adquieren su habilidad para ver la luz. Las variaciones en intensidad de la luz para las cuales uno puede adaptarse son mayores que un millón a uno. La naturaleza no hace todo esto con sólo una clase de célula, sino que traspassa su tarea desde las células que ven la luz brillante, las células que ven los colores, los conos, a las células adaptadas a las intensidades bajas, a la oscuridad, los bastoncitos. Entre las consecuencias interesantes de este desplazamiento están, primero, que no existe color, y segundo, que hay una diferencia en la brillantez relativa de objetos coloreados diferentemente. Resulta entonces que los bastoncitos ven mejor hacia el azul que los conos, y los conos pueden ver, por ejemplo, luz roja profunda, mientras que los bastoncitos la encuentran absolutamente imposible de ver. Así, pues, la luz roja es negra en lo que concierne a los bastoncitos. Por lo tanto, dos trozos de papel coloreado, digamos azul y rojo, donde el rojo podría ser aún más brillante que el azul bajo una buena luz, aparecerán, en la oscuridad, completamente invertidos. Se trata de un efecto bastante sorprendente. Si estamos en la oscuridad y podemos encontrar una revista o algo que tenga colores y, antes de que sepamos con seguridad cuáles son, juzgamos las áreas claras y oscuras, y si luego llevamos la revista a la luz, podríamos ver este corrimiento bien notable entre el que era el color más brillante y el que no lo era. El fenómeno se llama *efecto Purkinje*.

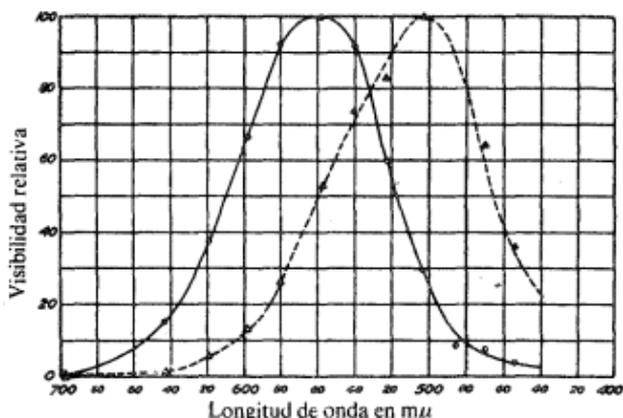


Fig. 35-3. La sensibilidad espectral del ojo. Curva de trazos, bastoncitos; curva continua, conos.

En la figura 35-3, la curva de trazos representa la sensibilidad del ojo en la oscuridad, es decir, utilizando los bastoncitos, mientras que la curva continua representa la sensibilidad a la luz. Vemos que la sensibilidad máxima de los bastoncitos está en la región verde y la de los conos está más en la región amarilla. Si se tiene una página de color rojo (el rojo está aproximadamente a 650 mμ) la podemos ver si está brillantemente iluminada, pero en la oscuridad es casi invisible.

Otro efecto del hecho de que los bastoncitos entran en juego en la oscuridad y de que no existen bastoncitos en la fovea, es que cuando miramos directamente algo en la oscuridad, nuestra visión no es tan aguda como cuando miramos hacia un lado. Una estrella tenue, o una nebulosa, se puede ver a veces mejor mirando un poco hacia el lado en vez de directamente hacia ella, porque no tenemos bastoncitos sensibles en el medio de la fovea.

Otro efecto interesante del hecho que el número de conos decrece a medida que vamos más hacia el lado del campo de visión, es que aun en una luz brillante, el color desaparece cuando el objeto se aleja hacia un lado. La manera de comprobar esto es mirar en alguna dirección fija particular, hacer que un amigo entre desde un lado con tarjetas coloreadas, y tratar de definir de qué color son antes de que estén exactamente frente a usted. Se encuentra que uno puede ver que las cartas están allí mucho antes de que se pueda determinar el color. Al hacer esto, es aconsejable entrar desde el lado opuesto del punto ciego, porque de otra manera resulta bastante confuso ver casi el color, entonces no ver nada y después ver el color otra vez.

Otro fenómeno interesante es que la periferia de la retina es muy sensible al movimiento. A pesar de que no podemos ver muy bien con el raballo del ojo, si un pequeño bicho se mueve y nosotros no esperábamos que algo se moviera allí, somos inmediatamente sensibles a ello. Dentro de nosotros todo "se conecta" para mirar algo que se agita a un lado del campo.

35-3 Medición de la sensación de color

Ahora pasamos a la visión mediante los conos, a la visión de lo brillante, y llegamos al asunto que es más característico de la visión mediante los conos, y éste es el color. Como sabemos, la luz blanca se puede descomponer

por medio de un prisma en todo un espectro de longitudes de onda que nos parecen tener diferentes colores; esto es lo que son los colores, por supuesto: apariencias. Cualquier fuente luminosa se puede analizar por medio de una red de difracción o un prisma y se puede determinar la distribución espectral, es decir, la "cantidad" de cada longitud de onda. Una cierta luz puede tener mucho azul, bastante rojo y muy poco amarillo, o cualquier otra combinación. Eso es todo muy preciso en el sentido de la física, pero el problema es ¿de qué color aparecerá la luz? Es evidente que los diferentes colores dependen de alguna manera de la distribución espectral de la luz, pero el problema es encontrar cuáles características de la distribución espectral producen las diversas sensaciones. Por ejemplo, ¿qué tenemos que hacer para obtener un color verde? Todos sabemos que podemos tomar simplemente una parte del espectro que sea verde. Pero, ¿es ésta la *única* manera de obtener verde, o anaranjado, o cualquier otro color?

¿Hay más de una distribución espectral que produzca el mismo efecto visual aparente? La respuesta es definitivamente, *sí*. Existe un número muy limitado de efectos visuales, de hecho, una variedad tridimensional de ellos, como veremos en breve, pero existe un número infinito de curvas diferentes que podemos trazar para la luz que proviene de diferentes fuentes. Ahora bien, el asunto que debemos discutir es: ¿en qué condiciones aparecen diferentes distribuciones de luz como exactamente del mismo color para el ojo?

La técnica psico-física más poderosa para juzgar colores es usar el ojo como *instrumento de cero*. Esto es, no tratamos de definir qué constituye una sensación verde, o de medir en qué circunstancias obtenemos una sensación verde, porque resulta que esto es extremadamente complicado. En su lugar estudiamos las condiciones en las cuales dos estímulos son *indistinguibles*. Entonces no tenemos que decidir si dos personas ven la misma sensación en circunstancias diferentes, sino únicamente, que si para una persona dos sensaciones son las mismas, son también las mismas para otra. No tenemos que decidir, cuando uno ve algo verde, si lo que siente en su interior es lo mismo que siente en su interior alguien distinto, cuando ve algo verde; no sabemos nada acerca de esto.

Para ilustrar las posibilidades, podemos usar una serie de cuatro lámparas proyectoras que tienen filtros y cuyas intensidades se pueden ajustar en forma continua sobre un amplio intervalo; una tiene un filtro rojo y produce una mancha de luz roja sobre la pantalla, la siguiente tiene un filtro verde y produce una mancha verde, la tercera tiene un filtro azul y la cuarta es un círculo blanco con una mancha negra en su centro. Ahora bien, si encendemos alguna luz roja y a continuación ponemos algo de verde, vemos que en la superficie de traslape se produce una sensación que no es lo que llamamos verde rojizo, sino que un nuevo color, amarillo en este caso particular. Cambiando las proporciones de rojo y de verde, podemos pasar por varios matices de anaranjado, etc. Si hemos ajustado un cierto amarillo, podemos obtener también el mismo amarillo no mezclando estos dos colores, sino mezclando algunos otros, quizás un filtro amarillo con luz blanca, o algo parecido, para obtener la misma sensación. En otras palabras es posible formar varios colores de más de una manera, mezclando las luces de diversos filtros.

Lo que hemos descubierto recién se puede expresar analíticamente como sigue. Un amarillo particular, por ejemplo, se puede representar por un cierto símbolo Y , que es la "suma" de ciertas porciones de luz roja filtrada (R) y luz verde filtrada (V).

Usando dos números, digamos r y v para describir la intensidad de (R) y (V), podemos escribir una fórmula para este amarillo:

$$Y = rR + vV \quad (35.1)$$

El problema es ¿podemos formar *todos* los diferentes colores sumando dos o tres luces de diferentes colores fijos? Veamos qué se puede hacer en relación a esto. Ciertamente no podemos obtener todos los diferentes colores mezclando sólo rojo y verde, porque, por ejemplo, el azul nunca aparece en tal mezcla. Sin embargo, introduciendo algo de azul, la región central, donde las tres regiones traslapan, se puede hacer aparecer de un blanco bastante hermoso. Mezclando los diversos colores y observando esta región central, encontramos que podemos obtener una gama considerable de colores en esta región cambiando las proporciones, y así no es imposible que *todos* los colores se puedan formar mezclando estas tres luces coloreadas. Discutiremos hasta dónde esto es verdadero; es en efecto esencialmente correcto y veremos en breve cómo definir mejor ese enunciado.

Para ilustrar nuestro propósito, movamos las manchas sobre la pantalla de manera que todas caigan una sobre la otra y tratemos entonces de aparear con un color particular que aparece en el anillo producido por la cuarta lámpara. Lo que antes pensábamos que era "blanco" al salir de la cuarta lámpara, parece ahora amarillento. Podemos tratar de aparear éste, ajustando el rojo y el verde y el azul lo mejor que podamos en una especie de aproximaciones sucesivas y encontramos que podemos aproximarnos bastante a este matiz particular de color "crema". Así, pues, no es difícil convencerse de que podemos formar todos los colores. Trataremos de formar el amarillo en breve, pero antes de hacer esto, hay un color que podría ser difícil formar. Las personas que dan clases sobre los colores, forman todos los colores "brillantes", pero nunca forman el castaño, y es difícil acordarse de haber visto alguna vez luz castaña. De hecho, este color no se usa nunca para algún efecto escénico, uno no ve nunca un reflector con luz castaña; así que pensamos que pudiera ser imposible formar el castaño. Para averiguar si es posible formar castaño, señalemos que luz castaña es simplemente algo que no estamos acostumbrados a ver sin su fondo. De hecho, podemos formarla mezclando algo de rojo y amarillo. Para demostrar que estamos observando luz castaña, aumentamos simplemente la luminosidad del fondo anular contra el cual vemos exactamente la misma luz ¡y vemos que ésta es, en efecto, lo que llamamos castaño! El castaño es siempre un color oscuro al lado de un fondo más luminoso. Podemos cambiar fácilmente la característica del castaño. Por ejemplo, si eliminamos algo de verde, obtenemos un castaño rojizo, aparentemente un castaño rojizo chocolate, y si agregamos más verde, en proporción, obtenemos aquel horrible color de que están hechos todos los uniformes del Ejército, pero la luz de este color no es tan horrible en sí misma; es de un verde amarillento, pero vista contra un fondo luminoso.

Ahora colocamos un filtro amarillo frente a la cuarta luz y tratamos de aparearla. (La intensidad debe estar, por supuesto, dentro de las posibilidades de las diversas lámparas; no podemos aparear algo que sea demasiado luminoso, porque no tenemos suficiente potencia en la lámpara). Pero *podemos* aparear el amarillo; usamos una mezcla de verde y de rojo y ponemos un toque de azul para hacerlo aún más perfecto. Estamos quizás listos para creer que, en buenas condiciones, podemos hacer un perfecto apareo de cualquier color dado.

Discutamos ahora las leyes de la mezcla de colores. En primer lugar, encontramos que distribuciones espectrales diferentes pueden producir el mismo color; a continuación, vimos que "cualquier" color puede formarse mezclando tres colores especiales, rojo, azul y verde. El aspecto más interesante de la mezcla de colores es éste: si tenemos una cierta luz, que podríamos llamar X y si ella aparece al ojo indistinguible de Y (puede ser una distribución espectral diferente, pero aparece como indistinguible), llamamos estos colores "iguales", en el sentido de que los ojos los ven como iguales, y escribimos

$$X = Y. \quad (35.2)$$

Aquí está una de las grandes leyes del color: si dos distribuciones espectrales son indistinguibles, y si *agregamos a cada una* una cierta luz, digamos Z (si escribimos $X + Z$, esto significa que iluminamos ambas lámparas sobre la misma mancha) y tomamos entonces Y y agregamos la misma cantidad de la misma luz, Z , *las nuevas mezclas son también indistinguibles*:

$$X + Z = Y + Z. \quad (35.3)$$

Hemos apareado recién nuestro amarillo; si ahora iluminamos todo con luz rosada, todavía habrá apareo. Así, agregando cualquier otra luz a las luces apareadas, quedan apareadas. En otras palabras, podemos resumir todos estos fenómenos de color, diciendo que una vez que se tenga apareo entre dos luces coloreadas, vista una próxima a la otra en las mismas circunstancias, entonces este apareo permanecerá, y una luz puede ser sustituida por la otra luz en cualquier otra situación de mezcla de colores. En efecto, resulta, y esto es muy importante e interesante, que este apareo de color de las luces no depende de las características del ojo en el momento de la observación: sabemos que si miramos por largo tiempo una superficie roja brillante, o una luz roja brillante, y miramos a continuación un papel blanco, éste se ve verdoso, y otros colores también se distorsionan, por haber estado mirando tanto tiempo el rojo brillante. Si tenemos ahora un apareo entre, digamos, dos amarillos y los miramos y los apareamos, en seguida miramos una superficie roja brillante por largo tiempo, y luego volvemos al amarillo, ya no se verá más amarillo; no sé de qué color se verá, pero no se verá amarillo. Sin embargo, *los amarillos todavía aparecerán apareados*, y así, a medida que el ojo se adapta a los diversos niveles de intensidad, el apareo de colores todavía funciona con la excepción evidente de cuando vamos a una región donde la intensidad de la luz se hace tan baja que nos hemos corrido de los conos a los bastoncitos; entonces el apareo de colores no será más un apareo de colores, porque estamos usando un sistema diferente.

El segundo principio de la mezcla de colores es éste: *cualquier color puede formarse a partir de tres colores diferentes*, en nuestro caso luces roja, verde y azul. Mezclando convenientemente las tres, podemos hacer cualquier cosa, como demostramos con nuestros dos ejemplos. Además estas leyes son muy interesantes bajo el punto de vista matemático. Para los que están interesados en las matemáticas del asunto, resulta como sigue. Supongan que tomamos nuestros tres colores que son rojo, verde, y azul, pero los indicamos por A , B y C y los llamamos nuestros colores *primarios*. Entonces cualquier color puede formarse con ciertas cantidades de estos tres: digamos una cantidad a de color A , una cantidad b de color B y una cantidad c de color C forma X :

$$X = aA + bB + cC. \quad (35.4)$$

Supongan ahora que se forma otro color Y a partir de los mismos tres colores:

$$Y = a'A + b'B + c'C. \quad (35.5)$$

Resulta entonces que la mezcla de las dos luces (esto es una de las consecuencias de las leyes que ya hemos mencionado) se obtiene haciendo la suma de las componentes de X e Y :

$$Z = X + Y = (a + a')A + (b + b')B + (c + c')C. \quad (35.6)$$

Es precisamente como la matemática de la suma de vectores, donde (a, b, c) son las componentes de un vector y (a', b', c') son las de otro vector, y la nueva luz Z es entonces la "suma" de los vectores. Este tema ha interesado siempre a los físicos y matemáticos. En efecto, Schrödinger escribió un maravilloso trabajo sobre la visión de los colores, en el cual desarrolló esta teoría del análisis vectorial aplicado a la mezcla de colores.

Un problema se presenta ahora: ¿cuáles son los colores primarios correctos a usar? No hay tal cosa como "los" colores primarios correctos para la mezcla de luces. Podría haber, por razones prácticas, tres pinturas que son más útiles que otras para obtener una mayor variedad de pigmentos mezclados, pero no estamos discutiendo esta materia ahora. *Tres luces diferentemente coloreadas cualesquiera** pueden mezclarse siempre en la proporción correcta para producir *cualquier color*. ¿Podemos demostrar este hecho fantástico? En lugar de usar rojo, verde y azul, usemos rojo, azul y amarillo en nuestro proyector. ¿Podemos usar rojo, azul y amarillo para formar, digamos verde?

Al mezclar estos tres colores en varias proporciones, obtenemos toda una gama de diferentes colores, abarcando todo un espectro. Pero de hecho, después de muchos tanteos, no encontramos nunca nada similar al verde. El problema es: ¿podemos formar el verde? La respuesta es sí. ¿Cómo? *Proyectando algo de rojo sobre el verde*, entonces podemos hacer un apareo con una cierta mezcla de amarillo y azul! Así los tenemos apareados, excepto que tuvimos que hacer trampa, introduciendo el rojo al otro lado. Pero, ya que tenemos cierto refinamiento matemático, podemos darnos cuenta que lo que realmente demostramos no fue que X puede formarse siempre, digamos a partir de rojo, azul y amarillo, sino que al introducir el rojo al otro lado, encontramos que rojo más X podía formarse a partir de azul y amarillo. Poniéndolo en el otro miembro de la ecuación, podemos interpretar eso como una *cantidad negativa*; así que, si admitimos que los coeficientes en ecuaciones como la (35.4) pueden ser tanto positivos como negativos, y si interpretamos las cantidades negativas como que tenemos que *sumar* éstas en el otro *miembro*, entonces cualquier color se puede aparear mediante tres cualesquiera, y no hay tal cosa como "los" primarios fundamentales.

Podemos preguntarnos si existen tres colores que sólo aparezcan con cantidades positivas para todas las mezclas. La respuesta es no. Todo conjunto de tres primarios requiere cantidades negativas para algunos colores, y por eso no existe una manera única de definir un primario. En los libros elementales se dice que son el rojo, el verde y el azul, pero esto es sólo porque con éstos se dispone de una *gama más amplia* de colores sin signos menos para algunas combinaciones.

* Excepto por supuesto, si alguno de los tres se puede aparear mezclando los otros dos.

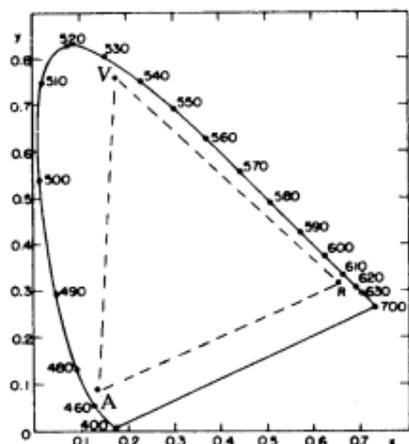


Fig. 35-4. El diagrama cromático normal.

35-4 · El diagrama cromático

Discutamos ahora la combinación de colores a un nivel matemático, como una proposición geométrica. Si se representa cualquier color por la ecuación (35.4), podemos graficarlo como un vector en el espacio, trazando sobre los tres ejes las cantidades a , b y c y entonces cierto color será un punto. Si otro color es a' , b' , c' , este color estará ubicado en alguna otra parte. La suma de ambos, como sabemos, es el color que resulta de sumarlos como vectores. Podemos simplificar este diagrama y representar todo en un plano, basándonos en la siguiente observación: si tuviéramos una cierta luz de color, y duplicáramos simplemente a y b y c , esto es, si los hacemos todos más intensos en la misma proporción, será el mismo color, pero más brillante. Por lo tanto, si convenimos en reducir todo a la *misma intensidad luminosa*, podemos proyectar todo sobre un plano, y esto es lo que se ha hecho en la figura 35-4. Resulta que cualquier color que se obtenga, mezclando otros dos en alguna proporción, estará en alguna parte sobre la línea trazada entre los dos puntos. Por ejemplo, una mezcla por mitades aparecería a la mitad entre ellos, y $1/4$ de uno y $3/4$ del otro aparecería a $1/4$ de camino de un punto al otro, y así sucesivamente. Si usamos un azul y un verde y un rojo como primarios, vemos que todos los colores que podemos formar con coeficientes positivos están en el interior del triángulo de trazos, que contiene casi todos los colores que podamos ver alguna vez, porque todos los colores que podemos alguna vez ver están encerrados en el área de forma extraña, limitada por la curva. ¿De dónde proviene esta área? De una vez que alguien hizo un apareo muy cuidadoso de todos los colores que podemos ver en relación a otros tres especiales. Pero no tenemos que comprobar *todos* los colores que podemos ver: tenemos que comprobar sólo los colores espectrales puros, las líneas del espectro. Una luz cualquiera se puede considerar como suma de diversas cantidades positivas de diversos colores espectrales puros —puros desde el punto de vista físico—. Una luz dada tendrá una cierta cantidad de rojo, amarillo, azul, etc. —colores espectrales—. Así, si sabemos cuánto de cada uno de nuestros tres primarios escogidos se necesita para formar cada uno de estos componentes puros, podemos calcular cuánto de cada uno se necesita para formar nuestro color dado.

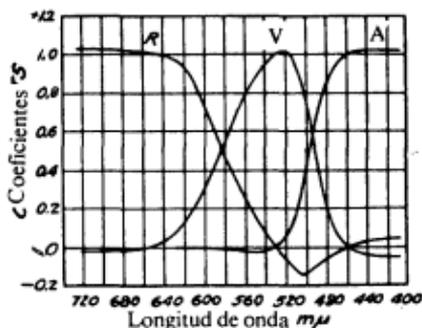


Fig. 35-5. Los coeficientes de color de los colores espectrales puros en términos de un cierto conjunto de colores primarios de referencia.

Así, si averiguamos cuáles son los *coeficientes de color* de todos los colores espectrales para tres colores primarios dados cualesquiera, podemos elaborar la tabla completa de mezcla de colores.

Un ejemplo de tales resultados experimentales al mezclar tres luces se da en la figura 35-5. Esta figura muestra la cantidad de cada uno de los tres diferentes primarios particulares, rojo, verde y azul que se necesita para formar cada uno de los colores espectrales. El rojo está en el extremo izquierdo del espectro, el amarillo es el siguiente y así sucesivamente, hasta llegar al azul. Nótese que en algunos puntos se necesitan signos menos. Es a partir de tales datos que es posible ubicar la posición de cada uno de los colores en un diagrama, donde las coordenadas x e y están relacionadas a las cantidades de los diferentes primarios que se utilizan. Esa es la manera cómo se ha encontrado la línea curva de contorno. Es el lugar geométrico de los colores espectrales puros. Ahora bien, cualquier otro color se puede formar sumando líneas espectrales, por supuesto, y así encontramos que todo lo que se pueda producir, uniendo una parte de esta curva con la otra, es un color que se encuentra en la naturaleza. La línea recta une el extremo violeta del espectro con el extremo rojo. Es el lugar geométrico de los púrpuras. En el interior del contorno están los colores que se pueden formar mediante luces, y en el exterior están los colores que no se pueden formar mediante luces, y nadie los ha visto nunca (¡excepto, posiblemente, como imágenes residuales!).

35-5 El mecanismo de la visión de los colores

El siguiente aspecto del problema es ahora la pregunta *¿por qué* los colores se comportan de esta manera? La teoría más simple, propuesta por Young y Helmholtz, supone que en el ojo hay tres pigmentos diferentes que reciben la luz y que los mismos tienen espectros de absorción diferentes, de manera que un pigmento absorbe fuertemente, digamos, en el rojo, otro absorbe fuertemente en el azul, otro absorbe en el verde. Entonces, cuando hacemos incidir luz sobre ellos, vamos a obtener cantidades diferentes de absorción en las tres regiones y estas tres partes de información son manejadas de alguna manera en el cerebro o en el ojo, o en alguna parte, para decidir cuál es el color. Es fácil demostrar que todas las reglas de mezcla de colores serían una consecuencia de esta proposición. Ha habido grandes debates acerca del tema porque el problema siguiente, naturalmente, es encontrar las características de absorción de cada uno de los tres pigmentos. Resulta, desgraciadamente, que debido a que podemos transformar las coordenadas del color como queremos, sólo podemos encontrar todo tipo de

combinaciones lineales de las curvas de absorción mediante experimentos de mezcla de colores, pero no las curvas para los pigmentos individuales. Se ha tratado de varias maneras de obtener una curva específica que describa alguna propiedad física particular del ojo. Una de estas curvas se llama *curva de luminosidad*, mostrada en la figura 35-3. En esta figura hay dos curvas, una para los ojos en la oscuridad, la otra para ojos a la luz; la última es la curva de luminosidad del cono. Esto se mide encontrando cuál es la menor cantidad de luz de color que necesitamos para apenas verla. Esto mide la sensibilidad del ojo en las diferentes regiones espectrales. Hay otra manera muy interesante de medir esto. Si tomamos dos colores y los hacemos aparecer en una superficie, haciendo aparecer alternativamente uno tras otro, vemos un centelleo si la frecuencia es muy baja. Sin embargo, a medida que la frecuencia aumenta, el centelleo va a desaparecer por último a una cierta frecuencia que depende de la luminosidad de la luz, digamos a 16 repeticiones por segundo. Ahora bien, si ajustamos el brillo o la intensidad de un color respecto al otro, aparece una intensidad para la cual el centelleo de 16 ciclos desaparece. Para obtener centelleo con la luminosidad así ajustada, tenemos que ir a una frecuencia mucho más baja para ver un centelleo de color. Así, obtenemos lo que llamamos un centelleo de la luminosidad a una frecuencia más alta y, a una frecuencia más baja, un centelleo del color. Es posible ajustar dos colores a "luminosidad igual" por medio de esta técnica del centelleo. Los resultados son casi, pero no exactamente, los mismos que los obtenidos midiendo el umbral de sensibilidad del ojo para ver luz débil por los conos. La mayoría de los investigadores usan el sistema centelleo como una definición de la curva de luminosidad.

Ahora bien, si hay tres pigmentos sensibles al color en el ojo, el problema es determinar la forma del espectro de absorción de cada uno. ¿Cómo? Sabemos que existen personas que sufren de daltonismo —ocho por ciento de la población masculina, y medio por ciento de la población femenina—. La mayoría de las personas que sufren de daltonismo o de alguna anomalía en la visión del color, tienen un grado diferente de sensibilidad que los

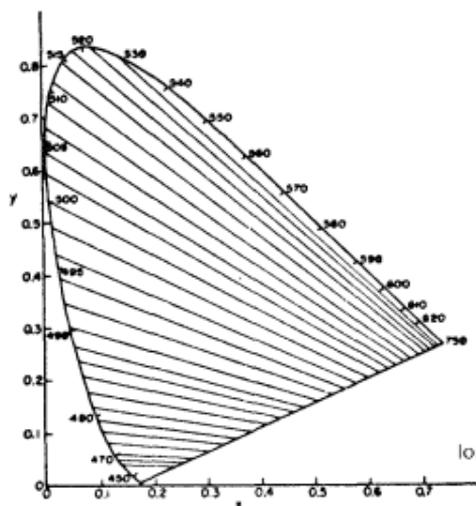


Fig. 35-6. El lugar geométrico de los colores confundidos por los deuteranopes.

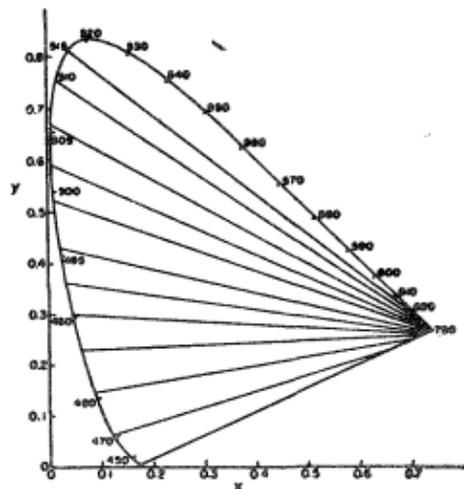


Fig. 35-7. El lugar geométrico de los colores confundidos por los protanopes.

otros a una variación del color, pero de todas maneras necesitan tres colores para aparear. Sin embargo, hay algunos a los que se les llama *dicrómatas*, para quienes cualquier color se puede aparear usando solamente *dos* colores primarios. La sugerencia evidente es, entonces, decir que están perdiendo uno de los tres pigmentos. Si podemos encontrar tres tipos de dicrómatas daltónicos que tienen diferentes reglas para mezclar colores, un tipo debe estar perdiendo la *pigmentación roja*, la *verde* y otro la *azul*. ¡Midiendo todos estos tipos podemos determinar las tres curvas! Resulta que *hay* tres tipos de dicromatía daltónica; existen dos tipos comunes y un tercer tipo muy escaso y a partir de estos tres ha sido posible deducir los espectros de absorción de los pigmentos.

La figura 35-6 muestra la mezcla de color de un tipo particular de persona daltónica llamado deuteranope. Para él, el lugar geométrico de colores constantes no son puntos, sino ciertas líneas, a lo largo de cada una de las cuales el color le parece a él ser el mismo. Si la teoría de que él está perdiendo una de las tres partes de información es correcta, todas estas líneas se deberían cortar en un punto. Si medimos cuidadosamente en el gráfico, *se cortan* perfectamente. Es evidente, entonces, que esto ha sido hecho por un matemático ¡y no representa datos reales! En realidad, si revisamos los últimos trabajos con datos verdaderos, resulta que en el gráfico de la figura 35-6, el punto de enfoque de todas las líneas no está exactamente en el lugar correcto. Usando las líneas de la figura de más arriba, no podemos encontrar espectros razonables: necesitamos absorciones negativas y positivas en diferentes regiones. Pero usando los nuevos datos de Yustova, resulta que cada una de las curvas de absorción es positiva en todas partes.

La figura 35-7 muestra un tipo diferente de daltonismo, el de protanope, quien tiene un enfoque cerca del final rojo de la curva de contorno. Yustova obtiene aproximadamente la misma ubicación en este caso. Usando los tres tipos diferentes de daltonismo se ha determinado finalmente las tres curvas de respuesta a los pigmentos, y se muestran en la figura 35-8. ¿En forma terminante? Quizás. *Existe* una duda acerca de si

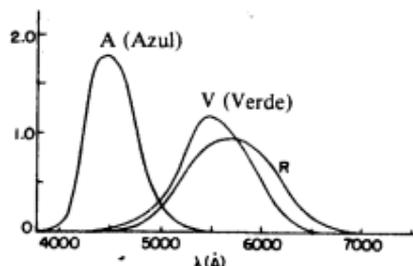


Fig. 35-8. Las curvas de sensibilidad espectral de un receptor normal tricromático.

la idea de los tres pigmentos es correcta, de si el daltonismo resulta por la pérdida de uno de los pigmentos, y aun si los datos de mezcla de color en el daltonismo son correctos. Diferentes investigadores obtienen diferentes resultados. Este campo se encuentra grandemente en desarrollo todavía.

35-6 Fisiología de la visión de los colores

Ahora bien, ¿qué tal si verificamos estas curvas con los pigmentos reales en el ojo? Los pigmentos que se pueden obtener de una retina consisten principalmente de un pigmento llamado *púrpura visual*. Sus características más prominentes son, primero, que se encuentra en el ojo de casi todos los animales vertebrados, y segundo, que su curva de respuesta se ajusta maravillosamente con la sensibilidad del ojo, como se ve en la figura 35-9, en la cual están graficados en la misma escala la absorción del púrpura visual y la sensibilidad del ojo adaptado a la oscuridad. Este pigmento es evidentemente el pigmento con el que vemos en la oscuridad: el púrpura visual es el pigmento para los bastoncitos y no tiene nada que ver con la visión del color. Este hecho fue descubierto en 1877. Aún hoy en día se puede decir que los pigmentos de color de los conos nunca han sido obtenidos en un tubo de ensayo. En 1958 se podía decir que los pigmentos de color nunca habían sido vistos. Pero desde entonces, dos de ellos han sido detectados por Rushton por medio de una técnica sencilla y hermosa.

La dificultad está, presumiblemente, en que como el ojo es tan débilmente sensible a la luz brillante comparado con la luz de baja intensidad, necesita mucha púrpura visual para ver, pero no muchos de los pigmentos de color para ver los colores. La idea de Rushton es *dejar el pigmento en el ojo* y medirlo de todas maneras. Lo que hace es esto. Existe un instrumento llamado oftalmoscopio para enviar luz dentro del ojo a través de las lentes y luego enfocar la luz que regresa. Con él uno puede medir qué cantidad

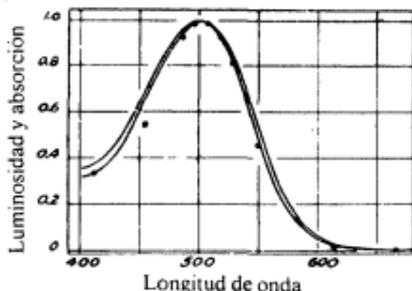


Fig. 35-9. La curva de sensibilidad de un ojo adaptado a la oscuridad, comparada con la curva de absorción de la púrpura visual.

se refleja. Así uno mide el coeficiente de reflexión de la luz que ha pasado *dos* veces a través del pigmento (reflejada por una capa posterior en el globo del ojo, y saliendo a través del pigmento del cono nuevamente). La naturaleza no está siempre tan maravillosamente diseñada. Los conos están diseñados en forma interesante para que la luz que llega a los conos rebote alrededor y busque su camino hacia abajo, hacia los pequeños puntos sensibles en el ápice. La luz baja derecho hacia el punto sensible, rebota en el fondo y regresa hacia afuera nuevamente, habiendo atravesado una cantidad considerable del pigmento de visión de color; también, examinando la fovea, donde no existen bastoncitos, el púrpura visual no nos confunde. Pero el color de la retina se vio hace mucho tiempo: es algo como un rosado anaranjado; luego están todos los vasos sanguíneos y el color de la sustancia del fondo, y todo lo demás. ¿Cómo sabemos cuándo estamos mirando el pigmento? *Respuesta:* Primero tomamos a una persona daltónica, quien tiene menos pigmentos y para quien, por lo tanto, es más fácil hacer el análisis. Segundo, los diversos pigmentos, como la púrpura visual, tienen un cambio de intensidad cuando son blanqueados por la luz; cuando los alumbramos cambian su concentración. Así, mientras miraba al espectro de absorción del ojo, Rushton introdujo *otro* rayo en todo el ojo, lo que cambia la concentración del pigmento, y midió el *cambio* en el espectro, y la diferencia, por supuesto, no tenía nada que ver con la cantidad de sangre o el color de las capas reflectoras, u otras cosas, sino solamente con el pigmento, y en esta forma Rushton obtuvo una curva para el pigmento del ojo protanope, la cual se da en la figura 35-10.

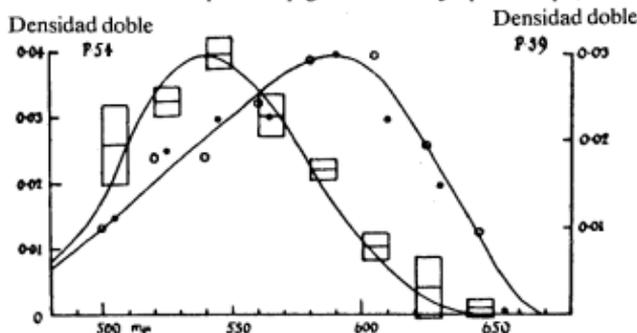


Fig. 35-10. Espectro de absorción del pigmento del color de un daltónico protanope (cuadrados) y de un ojo normal (puntos).

La segunda curva de la figura 35-10 es una curva obtenida con un ojo normal. Se obtuvo tomando un ojo normal y, habiendo ya determinado cuál era uno de los pigmentos iluminando el otro en el rojo, donde el primero es insensible. La luz roja no afecta el ojo protanope, pero sí el ojo normal, y así uno puede obtener la curva del pigmento que falta. La forma de una curva se ajusta maravillosamente a la curva del verde de Yustova, pero la curva del rojo está un poquito desplazada. Así que tal vez estamos en el buen camino. O tal vez no —los últimos trabajos con deuteranopes no demuestran que falta ningún pigmento definido.

El color no es un asunto de la física de la luz misma. El color es una *sensación*, y la sensación de los diferentes colores es diferente en diferentes circunstancias. Por ejemplo, si tenemos una luz rosada, formada superponiendo haces cruzados de luz

blanca y luz roja (todo lo que podemos hacer con el blanco y el rojo es rosado, evidentemente), podemos mostrar que la luz blanca puede aparecer azul. Si colocamos un objeto en los rayos de dos sombras —una iluminada por sólo la luz blanca y la otra por el rojo—. Para la mayoría de las personas la sombra “blanca” de un objeto se ve azul, pero si seguimos extendiendo esta sombra hasta que cubra toda la pantalla ¡vemos que de repente se ve blanca, no azul! Podemos obtener otros efectos de la misma naturaleza mezclando luces roja, amarilla y blanca. Las luces roja, amarilla y blanca pueden producir solamente amarillos anaranjados, etc. Así, pues, si mezclamos estas luces aproximadamente en forma igual, obtenemos solamente luz naranja. Sin embargo, al proyectar diferentes tipos de sombras en la luz, con diferentes colores traslapados, uno obtiene una serie bastante grande de hermosos colores que no están en la luz misma (que es solamente naranja), sino en nuestras *sensaciones*. Vemos claramente muchos colores diferentes que son totalmente diferentes a los colores “físicos” en el rayo. Es muy importante apreciar que una retina está ya “pensando” en la luz; está comparando lo que ve en una región con lo que ve en otra, aunque no en forma consciente. Lo que sabemos acerca de cómo lo hace es el tema del próximo capítulo.

BIBLIOGRAFIA

Committee on Colorimetry, Optical Society of America, *The Science of Color*, Thomas Y. Crowell Company, New York, 1953.

HECHT, S., S. SHLAER, and M. H. PIRENNE, “Energy, Quanta, and Vision,” *Journal of General Physiology*, 1942, **25**, 819-840.

MORGAN, CLIFFORD and ELIOT STELLAR, *Physiological Psychology*, 2nd ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., 1950.

NUBERG, N. D. and E. N. YUSTOVA, “Researches on Dichromatic Vision and the Spectral Sensitivity of the Receptors of Trichromats,” presented at Symposium No. 8, *Visual Problems of Colour*, Vol. II, National Physical Laboratory, Teddington, England, September 1957. Published by Her Majesty's Stationery Office, London, 1958.

RUSHTON, W. A., “The Cone Pigments of the Human Fovea in Colour Blind and Normal,” presented at Symposium No. 8, *Visual Problems of Colour*, Vol. I, National Physical Laboratory, Teddington, England, September 1957. Published by Her Majesty's Stationery Office, London, 1958.

WOODWORTH, ROBERT S., *Experimental Psychology*, Henry Holt and Company, New York, 1938. Revised edition, 1954, by Robert S. Woodworth and H. Schlosberg.