



# PRINCIPIOS DE COLOR Y **HOLOPINTURA**

ANTONIO VALERO MUÑOZ

**ECU**<sup>®</sup>  
Editorial Club Universitario

Copyrighted material

Principios de color y holopintura

© Antonio Valero Muñoz

ISBN: 978-84-9948-348-1  
Depósito legal: A 310-2012

Edita: Editorial Club Universitario. Telf.: 96 567 61 33  
C/ Decano nº 4 – 03690 San Vicente (Alicante)  
[www.ecu.fm](http://www.ecu.fm)  
e-mail: [ecu@ecu.fm](mailto:ecu@ecu.fm)

Printed in Spain  
Imprime: Imprenta Gamma. Telf.: 96 567 19 87  
C/ Cottolengo, 25 – 03690 San Vicente (Alicante)  
[www.gamma.fm](http://www.gamma.fm)  
[gamma@gamma.fm](mailto:gamma@gamma.fm)

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información o sistema de reproducción, sin permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.



## ÍNDICE

Capítulo I: La luz .....	13
Historia evolutiva del concepto de luz .....	13
Naturaleza de la luz. Dualidad onda-corpúsculo.....	17
1. Propiedades corpusculares.....	18
Iluminantes patrón definidos por la CIE .....	20
2. Propiedades ondulatorias de la luz .....	22
Fenómenos ondulatorios .....	25
Las sombras .....	31
Láser.....	34
Emisión de luz.....	37
Simbología de la luz en la pintura.....	53
Lectura: Es sol.....	54
Capítulo II: El color y la visión.....	65
Génesis del color .....	65
Colores espectrales.....	65
Detección del color en el ojo.....	66
1. Organización anatómica del ojo .....	67
2. Fotorreceptores y vía visual.....	69
Corteza visual.....	79
1. Corteza estriada .....	79
2. Corteza extraestriada .....	83
Percepción del color .....	85
Color percibido y color psicofísico .....	86
Colores primarios .....	87
Mezcla de colores .....	88
Lectura: El científico inglés, Isaac Newton.....	91
Capítulo III: Color psicofísico. Espacio de color RGB-XYZ. Medida del color.....	95
Color psicofísico .....	95
Características de un estímulo visual de color.....	96
Especificación del color psicofísico .....	97
Mezcla aditiva de colores. Leyes de Grassmann.....	97
Ecuación tricromática del color.....	99
Representación de los colores en el espacio. Espacios de colores .....	101
Espacio de color RGB-CIE 1931 .....	103
1) Funciones de igualación para el observador estándar de la cie XYZ 1931.....	115
2) Determinación de los valores triestímulo a partir de las funciones de igualación ..	118
3) Diagrama y coordenadas de cromaticidad x-y .....	119



La medida de los colores.....	122
Capítulo IV: Color percibido. Sistemas de ordenación del color.....	127
Antecedentes históricos.....	127
El doble cono de Ostwald.....	127
El cubo de Hicethier.....	127
Modelos perceptivos de color.....	128
Atributos de color percibido.....	128
Modelo HSV.....	133
Modelo HSL.....	135
Sistema de color Munsell.....	139
Sistema NCS.....	141
Modelo de color directo Pantone.....	142
Capítulo V: Espacios uniformes de color. CIELAB.....	145
Diferencias de color.....	145
Elipses de MacAdam.....	145
Modelo $L^*u^*v^*$ .....	146
Espacio de color $L^*a^*b^*$ .....	147
CIE 1976 $L^*a^*b^*$ . Espacio de color (CIELAB).....	147
Espacio de color Hunter Lab.....	152
CIECAM 02.....	153
Capítulo VI: modelos reproductivos.....	155
Modelo RGB para procesamiento de imágenes en las pantallas electrónicas.....	155
Espacio de color adobe RGB de amplia gama (Adobe Wide Gamut RGB).....	163
Espacio de color adobe RGB (RGB 1998).....	164
Espacio de color sRGB.....	165
Modelos reproductivos de color para televisión.....	166
a) Televisión de vídeo analógico.....	166
b) Vídeo y TV digital.....	170
Color directo.....	172
Sistemas gráficos.....	173
Tipos de sistemas de impresión.....	174
Capítulo VII: La interacción del color. Teoría evolutiva del color.....	179
Gammas y escalas.....	179
Colores cálidos y fríos.....	180
Armonía.....	182
Contraste.....	183
a) El contraste sucesivo (segunda ley de Chevreul).....	183
b) Contraste simultáneo (primera ley de Chevreul).....	184
c) Teoría de la tensión- neutralización de itten.....	185
d) Los contrastes de colores de itten.....	185
Asimilación.....	186
Constancia del color.....	186
Efecto Land.....	186
Contraste con blanco.....	187
Interacciones físicas.....	187



Teoría evolutiva del color.....	189
Capítulo VIII: psicología y simbología de los colores.....	195
Psicología del color.....	195
Emoción.....	195
Teorías sobre la producción de emociones.....	196
Sinestesia.....	199
Simbología de los colores.....	201
1. Significados socioculturales atribuidos al color y su expresión psicológica.....	202
2. Colores cálidos y fríos.....	208
Efectos psicológicos del color.....	209
Relatividad y subjetividad psicológica de los efectos del color.....	211
Cromoterapia ambiental.....	211
Cromoterapia médica.....	212
Lectura: A propósito de "De lo espiritual en el arte".....	213
<a href="#">Capítulo IX: La holopintura y sus elementos formales.....</a>	<a href="#">217</a>
<a href="#">Las bellas artes.....</a>	<a href="#">217</a>
<a href="#">Proceso del concepto de holopintura.....</a>	<a href="#">217</a>
La visión tridimensional.....	219
La percepción de la profundidad y el relieve.....	219
a) Visión monocular. Percepción de la profundidad.....	219
b) Visión binocular. Estereopsis.....	220
c) Visión estereoscópica artificial. Estereogramas y estereoscopios.....	223
Características de la holopintura.....	227
Elementos formales de la holopintura.....	228
La línea y el punto.....	228
El espacio.....	230
La forma.....	231
La composición (sección áurea).....	232
Proporciones de la figura humana. Canon.....	241
Capítulo X: Antecedentes históricos de la holopintura.....	245
Precursores de la holopintura anteriores a la pintura revolucionaria de finales del siglo XIX... 245	245
El renacimiento.....	245
El neoclasicismo y el romanticismo.....	248
La pintura revolucionaria de finales del siglo XIX.....	249
1. El realismo.....	249
2. El impresionismo.....	252
3. El posimpresionismo.....	257
4. El simbolismo.....	259
5. Los nabis.....	273
La pintura del siglo XX anterior a la II guerra mundial.....	273
A. Fauvismo.....	274
B. Expresionismo.....	275
C. Cubismo.....	311
D. Futurismo.....	315
E. Pintura abstracta.....	316
F. Dadaísmo.....	319



G: Surrealismo.....	321
La pintura después de la II Guerra Mundial.....	325
1. Expresionismo abstracto.....	326
2. Op art y pop art.....	335
3. Arte conceptual.....	339
4. Nuevo realismo. Hiperrealismo.....	343
5. Neoexpresionismo.....	344
6. Neorrealismo.....	346
Pintura española de la actualidad.....	350
Artistas que han recibido Premio Nacional de las Artes Plásticas del Ministerio de Cultura del Gobierno de España.....	352
Artistas que no han recibido premio del Ministerio de Cultura.....	356
Pintura rápida.....	359
Capítulo XI: materiales de la holopintura. Técnicas pictóricas y géneros.....	363
Los materiales de la holopintura.....	363
1. Soportes.....	363
2. Aplicables: materia pictórica. Componentes de la pintura.....	369
3. Útiles: utensilios del pintor.....	374
Técnicas pictóricas.....	375
1. Las técnicas a base de agua.....	375
2. Las técnicas sin agua.....	378
Historia de las técnicas pictóricas.....	379
Géneros de la pintura.....	380
Lectura: Pintura cretense.....	384
Capítulo XII: Técnica de la holopintura.....	389
Características de la holopintura.....	389
Materias de carga para textura táctil y relieve.....	390
Planeamiento general de la creación de un cuadro que se pretende será una holopintura ...	391
Primera etapa.....	392
Segunda etapa o etapa del relieve y manchado en campos de color.....	392
Tercera etapa o etapa de color.....	393
Ejercicio práctico.....	394
Anexo: Recuerdo de matemáticas.....	401
Variable y función. Derivadas. Integración.....	401
Álgebra lineal.....	403
Sistema de ecuaciones lineales.....	404
Notación matricial de un sistema lineal.....	404
Matrices.....	405
Determinantes.....	410
Definición de espacio vectorial.....	413
Ecuaciones vectoriales.....	414
Ecuación matricial vectorial: $ax = b$ .....	414
Base de un espacio vectorial.....	415
Coordenadas de un vector en una base y representación de un vector por una matriz.....	415
Representación de un conjunto de vectores por una matriz.....	416
Cambio de base.....	416



## CAPÍTULO I: LA LUZ

Isabel Guerra, la pintora monja, dice en su libro: "... La luz nos salvará".

Pero en mi opinión la luz ya nos ha salvado y desde el mismo momento de la aparición del primer ser vivo en la Tierra; gracias a la luz crecen las plantas y por estas el resto de los seres vivos.

El Sol es la principal fuente de luz sobre la Tierra, pero hay otros cuerpos que también desprenden luz, como el filamento de una bombilla, una vela o una luciérnaga.

La luz es la radiación emitida por el sol, cuerpos en combustión, ignición a altas temperaturas (incandescencia) o por cuerpos excitados (luminiscencia). A cualquier objeto capaz de producir y emitir luz lo llamamos fuente luminosa. Las fuentes luminosas emiten rayos de luz que se propagan en todas direcciones y en línea recta a una gran velocidad.

La luz nos permite ver los cuerpos en el espacio, su color, su forma y movimiento, etc. Los gradientes de luz tienen la virtud de crear profundidad.

### *HISTORIA EVOLUTIVA DEL CONCEPTO DE LUZ*

Los antiguos griegos, particularmente Euclides y Pitágoras, creían que los rayos de luz viajaban como tentáculos desde los ojos hasta los objetos. La idea de que la luz emitida por una fuente era reflejada por los objetos desde los cuales llega a los ojos para producir la sensación de visión fue propuesta por Epicuro (300 a.C.).

En Basora, Alhazén (965-c.1039) estudió la obra de Ptolomeo sobre las leyes de la reflexión y la refracción. También realizó un estudio de las lentes y los espejos curvos, así como del ojo humano en su obra *Óptica*.

A Roger Bacon (c.1214-1294) se le atribuye la primera utilización de lentes para corregir los defectos de la vista. Aportó nuevos conocimientos de óptica, en concreto sobre el fenómeno de la refracción, y el tamaño aparente de los objetos, como el aumento de tamaño experimentado por el Sol y la Luna en el horizonte.

En el Renacimiento, Leonardo da Vinci (1452-1519) describió la cámara oscura. Desarrolló la teoría de la propagación rectilínea de la luz. Además, ayudó al matemático italiano Luca Pacioli en su célebre obra *De Divina Proportione* (1509), que trata sobre el sistema de relaciones armónicas, como la conocida sección áurea.

En el s. XVI-XVII, Galileo Galilei (1564-1642) fue el primero en utilizar un telescopio, construido por él mismo, con fines astronómicos.

Las leyes de la reflexión y la refracción fueron reunidas por el matemático francés Pierre de Fermat, bajo el principio que lleva su nombre. Según este postulado, los rayos de luz toman el camino que requiere un tiempo mínimo.

Descartes, en su obra *Dióptrica* (1637), utilizó un modelo corpuscular, según afirmaba, la luz consistía en una sucesión de partículas que al cambiar de un medio menos denso a otro más denso sufría la acción de una fuerza normal a la interfase y dirigida hacia el medio más denso.

En la segunda mitad del s. XVII, F. M. Grimaldi describió por primera vez la difracción, para cuya explicación usó una *hipótesis ondulatoria de la luz*.



Christian Huygens (1629-1695), en su *Traité de la lumière*, consideraba la luz no como transporte de partículas, sino como propagación de energía mediante ondas, fundamentó las leyes de la reflexión y la refracción en la teoría ondulatoria de la luz.

En el s. XVIII, Isaac Newton (1642-1727) estableció la teoría de que la luz blanca estaba formada por corpúsculos, según había afirmado Descartes. Esta teoría no permitía explicar, cómo unos rayos luminosos formados por partículas no colisionaban al cruzarse. Newton descartaba la hipótesis ondulatoria de Huygens, entre otras cosas, porque no podía explicar con ella la propagación rectilínea de la luz. Supuso, con Descartes, que los corpúsculos viajaban más rápido en un medio más denso, idea contraria a la que mantenían los defensores de la hipótesis ondulatoria. Cuando tenía 18 años de edad, fabricó un telescopio pequeño y poco potente, pero con una innovación: usó espejos en vez de lentes, para evitar la aberración cromática que da lugar a imágenes con franjas de colores alrededor de los objetos.

Por aquel entonces, los primeros años del siglo XVIII, se sabía ya que el sonido no se propaga en ausencia de aire, que necesita un soporte material, los defensores de la teoría ondulatoria aceptaron la hipótesis de la existencia del *éter*, un fluido muy sutil que envolvía todo el espacio en el que se movían los astros, de manera que nos permitía recibir la luz solar. Esta idea del éter fue concebida por Aristóteles allá por el siglo V a.C. La existencia de un éter que sostenía a estas ondas tuvo que descartarse tras el experimento Michelson-Morley en el siglo XIX.

Para Newton, la luz se debía a minúsculas partículas emitidas por los focos luminosos en todas direcciones, que alcanzan nuestra retina tras viajar en línea recta, y al chocar con ella producían la sensación luminosa. En esta teoría corpuscular de la luz, que fue publicada en 1704 en el libro titulado *Óptica*, Newton afirmaba que los corpúsculos eran distintos para cada color, y explicaba la reflexión de la luz como un choque elástico de estas partículas contra la superficie de los cuerpos opacos, conservando como ángulo de salida (o de reflexión) el mismo valor que el ángulo de incidencia.

En 1665 Newton descubrió que la luz del sol, al pasar a través de un prisma, se dividía en varios colores conformando un espectro. Realizó la descomposición de la luz haciendo pasar un rayo de luz solar a través de un orificio en una cámara oscura que se proyectaba en una pantalla blanca, cuando interponía un prisma de cristal la mancha blanca desaparecía y en su lugar aparecía un rectángulo alargado conteniendo los colores del arco iris denominado *espectro solar* o *de la luz visible*. Los colores eran: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, azul índigo (llamado añil por el abate J. Delille [1738-1813], creó bastante confusión en los siglos posteriores, ya que no es color puro del espectro, sino una superposición en el espectro solar del azul y violeta) y violeta.

Durante esta época también se consiguió medir la velocidad de la luz por primera vez. Fue O. Römer (1644-1710) quien lo consiguió midiendo los tiempos de ocurrencia de los eclipses de los satélites de Júpiter.

En el s. XIX, la teoría ondulatoria de la luz fue rescatada por Thomas Young (médico y físico inglés, 1773-1829). En su tesis doctoral sobre la voz humana y los sonidos, sugirió que la luz, como el sonido, eran vibraciones ondulatorias, siendo los colores análogos a las notas sonoras de diferentes frecuencias. Se aceptaba que el sonido consistía en vibraciones longitudinales del aire, por lo que Young suponía que la luz constaba de similares vibraciones longitudinales. Descubrió los fenómenos de la interferencia de la luz. Fue el primero en desarrollar una explicación fisiológica de la sensación del color.

Young creó en 1801 la *teoría tricromática de visión en colores*, según la cual a nivel de la retina deberían existir elementos receptores de tres tipos sensibles al rojo, al verde-amarillo y al azul-añil (Gran Larousse Universal, pág. 2942). Admite que cualquier color puede ser formado a partir de tres colores básicos.



Se sabía que dos frentes de ondas en el agua podían interferir unas con otras, por lo que Young realizó un experimento (el experimento de las dos rendijas de Young) en el que dos haces de luz se solapaban e interferían, produciendo bandas claras y oscuras alternantes allí donde un haz reforzaba o cancelaba al otro. Por la separación de las bandas y las dimensiones del aparato pudo calcular las longitudes de onda de las vibraciones de la luz, mostrando que eran del orden de una millonésima ( $10^{-6}$ ) de metro.

Dado que las longitudes de onda de las vibraciones de la luz eran muy pequeñas comparadas con el tamaño de los objetos visibles, Young señalaba que la luz viajaría en línea recta, pudiendo producir sombras nítidas.

D. F. Arago (1786-1853) descubrió la polarización por transmisión a través de un cristal de espato de Islandia.

Young consideraba que el fenómeno de la polarización era contrario a la hipótesis ondulatoria. Mas, en 1817, vio que si las vibraciones de luz tenían lugar *transversalmente* a la dirección de propagación, como las ondas de agua o las vibraciones a lo largo de una cuerda estirada, en lugar de en la dirección del movimiento como en las ondas del sonido, entonces era posible dar una explicación. Young mencionó esta hipótesis a Arago. La Academia de Ciencias francesa ofreció un premio al mejor trabajo sobre la difracción óptica. El ingeniero Fresnel (1788-1827) —un competidor por dicho premio—, que había intentado resucitar la vieja teoría ondulatoria de la luz, con independencia de Young, se enteró por Arago de la nueva sugerencia de Young. Hizo de ella la base de su ensayo para el concurso, demostró que los fenómenos de la óptica se podrían explicar en términos de la hipótesis de que la *luz consistía en vibraciones ondulatorias transversales*.

La teoría corpuscular mantenía que la velocidad de la luz era mayor en los medios más densos, mientras que la teoría ondulatoria mantenía todo lo contrario. En 1849, Fizeau midió la velocidad de la luz mediante una rueda dentada en rotación que, a determinada velocidad, permitía a la luz pasar por el espacio entre dos dientes consecutivos y retornar por el espacio siguiente.

En 1862, Foucault empleó un espejo rotatorio que realizaba una revolución completa en el tiempo empleado por la luz reflejada en ir y volver hasta un espejo fijo. Demostró que la luz viajaba más lentamente en el agua que en el aire, lo cual confirmaba la hipótesis ondulatoria.

La nueva teoría ondulatoria planteó problemas por lo que respecta a la naturaleza y al origen (generación) de las ondas de luz.

Fresnel señaló en 1821 que las vibraciones longitudinales, como las del sonido en el aire, podían propagarse en un medio de tipo gaseoso, mientras que las vibraciones transversales solo podían tener lugar en un medio que tuviese las características de un sólido. Se conocían sólidos, como la brea o la cera, que eran lo bastante rígidos para transmitir vibraciones transversales.

Los fenómenos de inducción magnética creados por cargas eléctricas en movimiento habían sido estudiados por Faraday en 1831, dando lugar por primera vez a la noción de campo magnético, representado por una serie de líneas de fuerza. Medio siglo antes Coulomb había descrito el campo eléctrico.

El físico danés Hans Christian Oersted estableció por primera vez la estrecha relación entre el magnetismo y los fenómenos eléctricos, al poner una aguja imantada al lado de un hilo conductor por el cual circula la corriente eléctrica, la aguja se desviaba, de su posición inicial, situándose perpendicularmente a la dirección del hilo.

Ambos conceptos sirvieron a James Clerk Maxwell (Escocia, 1831-1879) para la elaboración de la teoría del Electromagnetismo. En las ecuaciones de Maxwell se expresan relacionados por primera vez el campo magnético B y el campo eléctrico E. De las ecuaciones de Maxwell se deduce también que ambos campos pueden estar interactuando continuamente si uno de ellos varía con el tiempo. Así el movimiento acelerado de cargas produce un campo magnético varia-



ble, el cual a su vez genera campos eléctricos, y así repetidamente. Esta sucesión oscilante de campos eléctricos y magnéticos viajando por el espacio se denomina onda electromagnética.

En 1855, sobre *las líneas de fuerza de Faraday*, Maxwell postuló que las partículas adyacentes a los tubos que giran a distinta velocidad se moverían de un tubo al otro (hacía girar en el mismo sentido pero a distinta velocidad dos tubos con un medio), produciéndose una corriente eléctrica. Esta era la explicación que daba Maxwell a la inducción eléctrica de Faraday. El consiguiente movimiento de las partículas de carga constituye la corriente de desplazamiento de Maxwell.

En 1883 Fitzgerald señaló que si la teoría de Maxwell fuese válida, habría de ser posible generar ondas electromagnéticas de manera exclusivamente eléctrica variando periódicamente la corriente de un circuito eléctrico.

Las predicciones de Maxwell fueron confirmadas experimentalmente por Heinrich Rudolf Hertz en 1886. Hertz describió un experimento para producir y detectar dichas ondas: el experimento de Hertz consistía en un circuito oscilante, que producía tensiones eléctricas oscilantes, que podían ser captadas por un detector. Halló que las chispas eléctricas cruzarían una pequeña brecha en un bucle de cable, si este se colocaba próximo a un condensador descargándose, o a una bobina inductora en funcionamiento. El bucle captaba las radiaciones electromagnéticas originadas en estos circuitos variables, transformándose, la energía, en una corriente eléctrica que se descargaba a través de la brecha. Con este sencillo aparato, Hertz pasó a demostrar que dichas radiaciones tenían las propiedades conocidas de la luz, tal como la reflexión, la refracción o la polarización.

De esta forma Hertz verificó las predicciones más importantes de la teoría electromagnética de la luz, y sentó las bases de las telecomunicaciones y el radar.

Maxwell fue el primero en unificar las teorías de la electricidad y el magnetismo, al establecer las leyes generales del campo electromagnético (1873). Comprobando experimentalmente la identidad entre velocidad de la luz y velocidad de una onda electromagnética, demostrando la relación matemática entre los campos eléctricos y magnéticos. Su obra más importante, *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873). La unidad de flujo magnético en el sistema cegesimal se denominó *maxwell* en su honor.

Entre otros logros de Maxwell hay que destacar la investigación de la visión de los colores:

*La percepción de los colores y la síntesis sustractiva y aditiva* fueron explicadas por Maxwell mediante el empleo de discos coloreados sobre un molinete y sobre todo su caja de colores. Hacía pasar por rendijas variables los tres colores básicos cuyos rayos podían superponerse generando cualquier color. La mezcla de colores podía hacerse por suma de haces de luz coloreada o por interposición de filtros sustractivos.

Aditiva (por suma de haces de luz coloreada, hay dos focos emisores de luz al menos):

Superposición de luz azul + luz roja → magenta. Aquí necesariamente Maxwell utilizaba una luz roja que más bien era magentanaranja. El complementario del azul es el naranja, que, al ser luces, su mezcla aditiva da el blanco, prevaleciendo el magenta como resultado.

Superposición de luz roja + luz verde → amarillo. El verde que utiliza Maxwell debió ser el verde, posiblemente, que menciona la teoría tricrómica de Young.

Superposición de luz verde + luz azul → azul-verdoso (cian). En la adición de dos luces la intensidad luminosa se duplica haciendo que el valor sea más alto. El azul verdoso tiene una luminosidad más alta que el verde y que el azul por separado.

La mezcla, simultánea en proporción adecuada, de estas luces produce la luz blanca.

Sustractiva (por superposición de filtros coloreados transparentes a los haces de luz blanca de un único foco emisor):

Filtro amarillo + filtro azul-verde (cian) → verde.



Filtro azul-verde (cian) + filtro magenta → azul. Este azul es un azul-violeta.

Filtro magenta + filtro amarillo → rojo. Este rojo es el magenta-naranja ya mencionado.

El pintor que mezcla sus pigmentos azul + amarillo para obtener el verde opera en síntesis sustractiva.

En 1860, Maxwell demostró que era posible realizar fotografías en color utilizando una combinación de filtros rojo, verde y azul, obteniendo por este descubrimiento la Medalla Rumford ese mismo año.

### **NATURALEZA DE LA LUZ. DUALIDAD ONDA-CORPÚSCULO**

La definición de la naturaleza de la luz siempre ha sido un problema fundamental de la física. El matemático y físico británico Isaac Newton describió la luz como una emisión de partículas, y el astrónomo, matemático y físico holandés Christiaan Huygens desarrolló la teoría de que la luz se desplaza con un movimiento ondulatorio.

La distribución de frecuencias observadas de la radiación emitida por el cuerpo negro a una temperatura dada no se correspondía con las predicciones teóricas de la física clásica. Para poder explicarlo, Max Planck, al comienzo del siglo XX, postuló que para ser descrita correctamente, se tenía que asumir que la luz de frecuencia  $\nu$  es absorbida por múltiplos enteros de un cuanto de energía igual a  $h\nu$ , donde  $h$  es una constante física universal llamada Constante de Planck.

$$E = h\nu$$

En 1924, Einstein y el físico indio S. Bose dedujeron la *ley de Planck del espectro del cuerpo negro*, la radiación dentro de la cavidad consistía en un gran número de fotones (gas de fotones).

Recordando que el espectro de cuerpo negro es un fenómeno intrínseco del campo de radiación, se comprende que este descubrimiento fuese concluyente para aceptar la naturaleza corpuscular de la luz, independientemente de su interacción con la materia.

Por otro lado, durante el siglo XIX se demostró la existencia de ciertos procesos interferenciales y de difracción para cuya explicación era necesario admitir la naturaleza ondulatoria de la luz.

De esta forma se planteó, a principio del siglo XX, una controversia sobre cuál de los dos aspectos de la naturaleza de la luz era el verdadero, ya que ambas perspectivas, la ondulatoria y la corpuscular, parecían contradictorias e irreconciliables.

El propio Einstein propuso la idea de que una descripción completa de los fenómenos luminosos no puede llevarse a cabo más que conservando ambos aspectos de la naturaleza de la luz. Con el fin de resolver la paradoja resultante de esta afirmación, introdujo el concepto de que ambos comportamientos, el corpuscular y el ondulatorio, son aspectos complementarios de una misma realidad conceptual. Esta idea constituye un pilar fundamental en la interpretación cuántica de la realidad.

Einstein propuso una interpretación probabilística de la dualidad onda-corpúsculo. Los resultados de la experiencia de la *doble rendija* rompen con los conceptos clásicos sobre el movimiento de las partículas: según la Mecánica Clásica el movimiento de una partícula queda completamente determinado dadas unas condiciones iniciales.

Por otra parte, según la descripción ondulatoria, la intensidad de un haz de luz es proporcional a la densidad de energía. Sabiendo que “I” es proporcional a  $E(r)^2$ , Einstein propuso que  $E(r)^2$  puede interpretarse como una magnitud proporcional al número medio de fotones por unidad de volumen en el punto “r”.

De esta interpretación se desprende que  $E(r)^2$  es proporcional a la probabilidad de encontrar un fotón en un elemento de volumen centrado en “r”. Se dice entonces que la amplitud de la onda electromagnética asociada al fotón representa una onda de densidad de probabilidad.



Las ideas de Einstein acerca de la doble naturaleza de la luz fueron extendidas a las partículas materiales. En 1924 el físico francés L. de Broglie propuso que la naturaleza debía comportarse de forma similar en cuanto a su doble carácter ondulatorio-corpúscular, tanto en lo que respecta a los fotones como en lo referente a las partículas materiales.

Según el razonamiento de Broglie, podía asociarse la propagación de una onda al movimiento de cualquier clase de partícula material, al igual que Einstein hizo para las partículas de energía (fotones).

De la misma forma que un fotón tiene una frecuencia asociada, una partícula material tiene una frecuencia o longitud de onda característica. De Broglie postuló que las relaciones entre el estado dinámico de una partícula y su longitud de onda y frecuencia características vienen dadas por:

$$E = h \nu, \quad p = h/\lambda$$

donde ahora  $\lambda$  y  $\nu$  designan, respectivamente, la longitud de onda y la frecuencia de una onda asociada a una partícula material de cantidad de movimiento "p" y energía "E".

En la actualidad se cree que estas dos teorías son complementarias, y el desarrollo de la teoría cuántica ha llevado al reconocimiento de que en algunos experimentos la luz se comporta como una corriente de partículas y en otros como una onda. En las situaciones en que la luz presenta movimiento ondulatorio, la onda vibra perpendicular a la dirección de propagación; por eso, la luz puede polarizarse en dos ondas perpendiculares entre sí.

La luz como materia muestra comportamientos corpusculares u ondulatorios, dependiendo del tipo de experimento en que intervengan.

Se puede considerar también como la emisión de un flujo de partículas energéticas desprovistas de masa denominadas fotones (cuantos de luz o fotones), en una sucesión de vibraciones electromagnéticas (dualidad onda-corpúsculo).

En 1930 los trabajos de los grandes físicos culminaron en el nacimiento de la llamada FÍSICA CUÁNTICA, la cual no solo explicaba y justificaba la dualidad onda-corpúsculo de toda radiación, sino que hacía que dicha dualidad fuera válida también para las partículas de la materia. Admitiendo que los conceptos de corpúsculo y onda son complementarios, e introduciendo a su vez una interpretación probabilística del comportamiento de los sistemas físicos.

Respecto a otras teorías de la luz, la Teoría Cuántica explica que la luz es una serie de partículas que viajan en forma de ondas. Estas partículas o fotones ganan o pierden unas cantidades de energía, produciéndose los distintos colores; por ejemplo: una flor amarilla absorbe todas las partículas en su longitud de onda excepto el amarillo.

### **PROPIEDADES CORPUSCULARES**

Se manifiestan sobre todo cuando tiene lugar la interacción de la luz con la materia. Hay tres fenómenos corpusculares que demuestran el carácter corpuscular de la luz: emisión del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico o el efecto Compton.

Según el orden histórico, el primer efecto que no se pudo explicar por la concepción ondulatoria de la luz fue **la radiación del cuerpo negro**. Un cuerpo negro es un radiador teóricamente perfecto que absorbe toda la luz que incide en él y por eso, cuando se calienta, se convierte en un emisor ideal de radiación térmica, que permite estudiar con claridad el proceso de intercambio de energía entre radiación y materia. La distribución de frecuencias observadas de la radiación emitida por la caja a una temperatura de la cavidad dada no se correspondía con las predicciones teóricas de la física clásica.

Para poder explicarlo, Max Planck, al comienzo del siglo XX, postuló que para ser descrita correctamente, se tenía que asumir que la luz de frecuencia  $\nu$  es absorbida por múltiplos enteros de



un cuanto de energía  $E$  era igual a  $h\nu$ , donde  $h$  es una constante física universal llamada *Constante de Planck*, que tiene el valor:  $h = 6,6256 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$ .

En 1905, Albert Einstein utilizó la teoría cuántica recién desarrollada por Planck para explicar otro fenómeno no comprendido por la física clásica: **el efecto fotoeléctrico**. Este efecto consiste en que cuando un rayo monocromático de radiación electromagnética ilumina la superficie de un sólido (y, a veces, la de un líquido), se desprenden electrones en un fenómeno conocido como fotoemisión o efecto fotoeléctrico externo. Estos electrones poseen una energía cinética que puede ser medida electrónicamente con un colector con carga negativa conectado a la superficie emisora. No se podía entender que la emisión de los llamados “fotoselectrones” fuese inmediata e independiente de la intensidad del rayo. Eran incluso capaces de salir despedidos con intensidades extremadamente bajas, lo que excluía la posibilidad de que la superficie acumulase de alguna forma la energía suficiente para disparar los electrones. Además, el número de electrones era proporcional a la intensidad del rayo incidente. Einstein demostró que el efecto fotoeléctrico podía ser explicado asumiendo que la luz incidente estaba formada de fotones de energía  $h\nu$ , parte de esta energía  $h\nu_0$  se utilizaba para romper las fuerzas que unían el electrón con la materia, el resto de la energía aparecía como la energía cinética de los electrones emitidos:

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = h(\nu - \nu_0)$$

donde  $m$  es la masa del electrón,  $v_{\max}$  la velocidad máxima observada,  $\nu$  es la frecuencia de la luz iluminante y  $\nu_0$  es la frecuencia umbral característica del sólido emisor.

La demostración final fue aportada por Arthur Compton, que observó como al hacer incidir rayos X sobre elementos ligeros, estos se dispersaban con menor energía y además se desprendían electrones (fenómeno posteriormente denominado en su honor como **efecto Compton**). Compton, ayudándose de las teorías anteriores, le dio una explicación satisfactoria al problema tratando la luz como partículas que chocan elásticamente con los electrones como dos bolas de billar. El fotón, corpúsculo de luz, golpea al electrón: el electrón sale disparado con una parte de la energía del fotón y el fotón refleja su menor energía en su frecuencia. Las direcciones relativas en las que salen despedidos ambos están de acuerdo con los cálculos que utilizan la conservación de la energía y el momento.

En 1909 y 1916 Einstein demostró que, si en la ley de Planck del cuerpo negro, la radiación es aceptada, el cuanto de energía también debe llevar el impulso  $p = h / \lambda$ , por lo que de pleno derecho el de partícula. Este impulso de fotones se observó experimentalmente por Arthur Compton, por lo que recibió el Premio Nobel en 1927.

La cuestión fundamental es entonces: ¿cómo unificar la teoría ondulatoria de la luz con su carácter de partículas observadas experimentalmente? La respuesta a esta pregunta ocupó a Albert Einstein para el resto de su vida, y se resolvió en la electrodinámica cuántica y su modelo de partículas sucesor, el *modelo estándar* (el fotón como un bosón gauge).

**Radiación de un cuerpo negro.-** Su nombre le viene porque es negro cuando está frío y buen absorbente de la radiación energética que le llegue; en cambio, cuando se calienta emite una luz roja pálida que puede hacerse muy brillante y blanca. En este estado es excelente emisor de radiación lumínica.

En la naturaleza no existe un cuerpo negro con las características anteriormente señaladas, hay aleaciones metálicas, como el tungsteno, que se aproxima al concepto ideal de cuerpo negro.

En laboratorio un aparato que se comporta de forma similar al cuerpo negro es una cámara aislada con un agujero pequeño. La luz que entra por el orificio incide sobre la pared más alejada,



donde parte de ella es absorbida y otra reflejada en un ángulo aleatorio y vuelve a incidir sobre otra zona de la pared. En esta, suele absorberse una parte y otra es reflejada, y así en cada reflexión. Después de muchas reflexiones, toda la energía incidente ha sido absorbida. Sin embargo, cuando la cavidad está caliente irradia energía como un cuerpo negro. La luz emitida depende de la temperatura del interior de la cavidad, produciendo el espectro de emisión de un cuerpo negro.

La temperatura de los cuerpos negros ha sido denominada *temperatura de color*, numéricamente es igual a la escala Kelvin de temperaturas absolutas más 273. La unidad de temperatura de color es el Kelvin (K).

Para normalizar las condiciones de iluminación y contemplación de los motivos y obras pictóricas se han creado unos Patrones basados en la Temperatura de Color. Estos patrones han sido definidos por la Commission Internationale pour l'Éclairage (CIE).

Radiación del cuerpo negro:



Figura I-1. Temperaturas de color según el calentamiento del cuerpo negro.

La CIE ha definido la temperatura de color de varios iluminantes y blancos de referencia.

### **ILUMINANTES PATRÓN DEFINIDOS POR LA CIE**

El color de un determinado cuerpo depende, para un observador dado, de la composición espectral de la luz con la que se ilumine y de su intensidad. Por lo tanto, se hace necesario definir iluminantes patrón para poder definir magnitudes objetivas del color. Se han establecido por acuerdo internacional los siguientes iluminantes patrón:

1. Iluminante A (Fuente o Iluminante A o Patrón A).Corresponde a la luz emitida por una lámpara con filamento de tungsteno (wolframio) que tiene una temperatura de color de 2854 K o 2856 K (tungsteno en medio gaseoso). Equivale a la luz emitida por el cuerpo negro a una temperatura de 2855 K.  
Iluminante CIE A: se calcula con la ley de radiación de Planck con la misma temperatura de color que el Patrón A.
2. Iluminante B (Fuente o Patrón B). Corresponde aproximadamente a la luz solar directa del mediodía. Su temperatura de color es de 4874 K (4870 K para otros autores). Representa en promedio la luz del sol directo al mediodía con un cielo claro.
3. Iluminante C (Fuente o Patrón C). Corresponde a la luz diurna media del cielo en el hemisferio norte sin sol directo en un día claro, es la suma de la luz solar y la luz del cielo. Su temperatura de color es de 6774 K (otros autores, 6740 K).
4. Iluminante D, Iluminante CIE D. Corresponde a la mezcla de luz solar y cielo nublado. Su temperatura de color es de 6500 K. Es el adoptado actualmente como blanco de referencia para la televisión en color. Representa la luz natural media no reproducible por medios artificiales. Posteriormente en 1964 la CIE propuso el iluminante D65 "daylight" (luz de día incluyendo la región ultravioleta), con una temperatura de color correlacionada de 6504 K.
5. Iluminante E. Es el blanco equienergético y representa el blanco que se obtiene al estar presentes todas las longitudes de onda del espectro visible con igual energía. Su temperatu-



ra de color es de 5500 K. Iluminante CIE E: tiene una temperatura de color correlacionada de 6000 K. Representa una luz de espectro equienergético teórico, con  $T = 5500$  K.

En la actualidad los iluminantes B y C están en desuso. El iluminante D65 ha sustituido al C pues muchas de las muestras de color presentan cierta fluorescencia excitada por el ultravioleta.

El inconveniente del D65 es que no se ha conseguido materializar con una fuente, mientras que el iluminante A se logra fácilmente con una lámpara de incandescencia. En la reunión de Estocolmo (1951) se acordó hacer la distinción entre iluminante patrón y fuente patrón. El iluminante es una tabla con la distribución espectral del mismo, mientras que la fuente es la materialización del iluminante.

Los valores de los flujos espectrales de estos iluminantes patrón se encuentran tabulados en los libros de colorimetría.

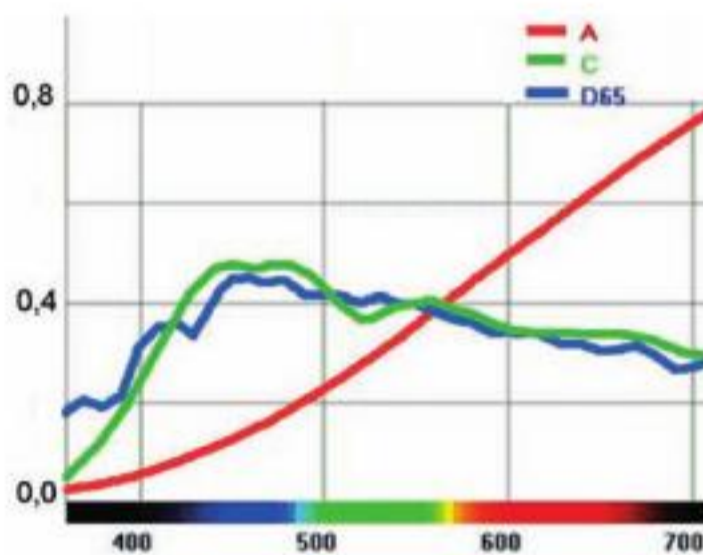


Figura I-2. Temperatura de color de iluminantes estándares.

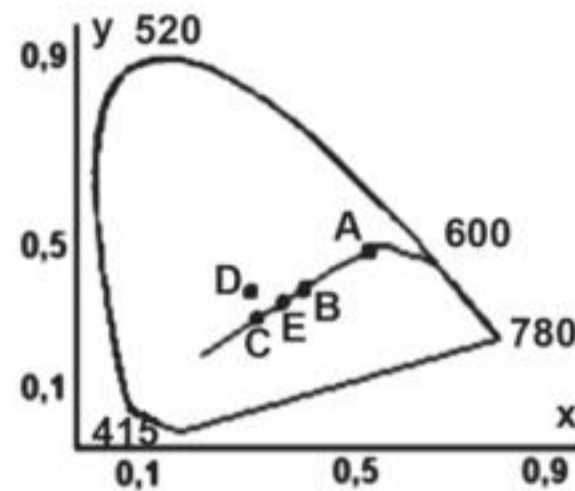


Figura I-3.

A continuación se dan las temperaturas de color de algunos iluminantes ampliamente conocidos, tabla I-1:

Bujía ordinaria	1900 K
Lámpara de petróleo	2000 K
Lámpara de acetileno	2100 K
Lámpara eléctrica de incandescencia	2400 K
Lámpara de atmósfera gaseosa	2700 K
Blanco patrón(A)	2850 K
Luna	4100 K
Blanco patrón(B)	4780 K
Sol	5500 K
Blanco patrón(W) equienergético	5500 K
Luz diurna, con sol y cielo claro	6000 K
Blanco patrón(D)	6500 K
Blanco patrón(C)	6770 K
Luna con cielo cubierto	6800 K
Cielo azul claro	25000 K

Tabla I-1.

- (A) Corresponde a las lámparas incandescentes de baja potencia
- (B) Corresponde a lámparas incandescentes de gran potencia
- (C) Luz difusa de cielo nublado
- (D) Combinación de luz diurna directa y luz difusa de cielo nublado



## PROPIEDADES ONDULATORIAS DE LA LUZ

La luz es una onda electromagnética transversal. Como tal onda sus propiedades se manifiestan sobre todo cuando tiene lugar la propagación de la luz; son, por ejemplo, los fenómenos de refracción, reflexión, y sobre todo los de interferencia, difracción y polarización.

### ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

Las ondas electromagnéticas se propagan por el espacio sin necesidad de un medio, pudiendo, por tanto, propagarse en el vacío. Esto es debido a que las ondas electromagnéticas son producidas por las oscilaciones de un campo eléctrico en relación con un campo magnético asociado, es decir, la onda electromagnética es en realidad un campo electromagnético autopropagado (por el fenómeno de inducción electromagnética y se debe cumplir el principio de conservación de la energía) a una velocidad constante  $c$ .

En el vacío todas las radiaciones luminosas, cualquiera que sea su frecuencia, se propagan a la misma velocidad, no así en los medios materiales, en donde dicha velocidad es distinta para cada color.

#### TIPOS DE ONDAS.

- 1.- Ondas tridimensionales o esféricas: son ondas que se propagan en tres direcciones. Las ondas tridimensionales se conocen también como ondas esféricas, porque sus frentes de ondas son esferas concéntricas que salen de la fuente de perturbación expandiéndose en todas direcciones. El sonido es una onda tridimensional. Son ondas tridimensionales las ondas sonoras (mecánicas) y las ondas electromagnéticas.
- 2.- Ondas longitudinales: el movimiento de las partículas que transportan la onda es paralelo a la dirección de propagación de la onda. Por ejemplo, un muelle que se comprime da lugar a una onda longitudinal. No es el caso de las ondas luminosas.
- 3.- Ondas transversales: las partículas se mueven perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda.

La onda electromagnética se origina por la vibración de los electrones en los tránsitos energéticos entre las órbitas permitidas de los átomos. Estas frecuencias de vibración y por tanto de las ondas de la luz visible están entre  $4 \cdot 10^{14}$  hercios (Hz) y  $8 \cdot 10^{14}$  Hz. Es decir, los electrones de la última capa en estado excitado emiten una onda electromagnética (fotón) al pasar a otra orbita de menor excitación.

A diferencia de las ondas mecánicas, las ondas electromagnéticas no necesitan de un medio material para propagarse.

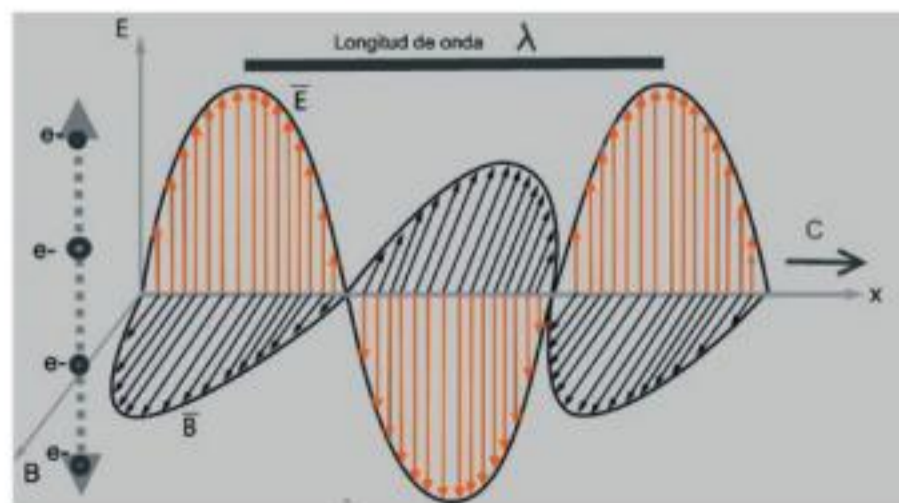


Figura I-4.



La vibración de los electrones  $e^-$  genera la onda electromagnética. Las ondas electromagnéticas son transversales, en ellas la dirección de los campos eléctrico  $\vec{E}$  y magnético  $\vec{B}$  son perpendiculares a la dirección de propagación  $C$ .

La distancia existente entre dos crestas o valles consecutivos es lo que llamamos longitud de onda designada con la letra griega " $\lambda$ " (lambda) en las ecuaciones. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda  $f$ . Una longitud de onda larga corresponde a una frecuencia baja, mientras que una longitud de onda corta corresponde a una frecuencia alta.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

La naturaleza de una radiación luminosa viene determinada, bien por su longitud de onda, o bien por su frecuencia. Por las características del ojo humano, en el dominio visible la longitud de onda oscila entre los 3900 nanómetros (nm), radiación violeta y los 7700 nm radiación roja, a las que corresponden unas frecuencias respectivas entre  $7,7 \cdot 10^{14}$  Hz y  $3,2 \cdot 10^{14}$  Hz. Estas frecuencias son más elevadas que las ondas de radar, que son las más bajas entre las empleadas, pero mucho menos elevadas que las que corresponden a los rayos cósmicos, que superan los  $10^{25}$  Hz.

Por ejemplo, la luz roja, con una frecuencia aproximada de 440 THz (Terahercios), tiene ondas de unos 680 nm de largo:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{299 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}}{440 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}} = 679,5 \cdot 10^{-9} \text{ m} \sim 680 \text{ nm}$$

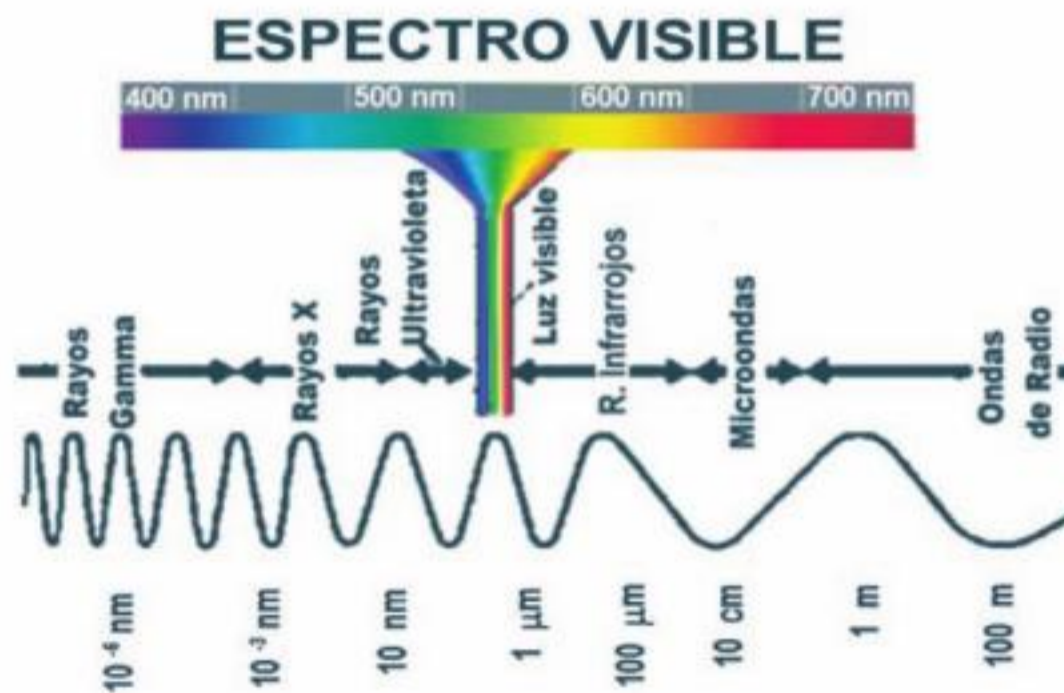


Figura I-5.

Las ondas de la radiación electromagnética que forman la luz visible tienen longitudes de onda que van desde los 400 nm (luz morada) hasta los 700 nm (luz roja), un nanómetro = 1 nm =  $10^{-9}$  metros.

### Emisión de fotones

Los fotones se emiten en muchos procesos naturales, por ejemplo, cuando se acelera una partícula con carga eléctrica, durante una transición molecular, atómica o nuclear a un nivel de energía más bajo, o cuando se aniquila una partícula con su antipartícula.



### Energía y movimiento

En el espacio vacío, los fotones se mueven a la velocidad de la luz  $c$ , y su energía  $E$  y momento lineal  $p$  están relacionados mediante la expresión  $E = cp$ , donde  $p$  es el módulo del momento lineal. La energía y el momento lineal de un fotón dependen únicamente de su frecuencia  $\nu$ , lo que es equivalente, de su longitud de onda  $\lambda$ .

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Este tiene además momento angular de espín que no depende de la frecuencia. El módulo de tal espín, y la componente medida a lo largo de su dirección de movimiento, su helicidad, tienen dos posibles valores, corresponden a los dos posibles estados de polarización circular del fotón (en sentido horario o antihorario).

$$P = \frac{h\nu}{c}$$

La aniquilación de una partícula con su antipartícula tiene que dar lugar a la creación de al menos dos fotones.

La presión de radiación electromagnética sobre un objeto es debida a la transferencia de momento lineal de los fotones por unidad de tiempo y unidad de superficie del objeto, ya que la presión es fuerza por unidad de superficie y la fuerza, a su vez, es la variación del momento lineal por unidad de tiempo.

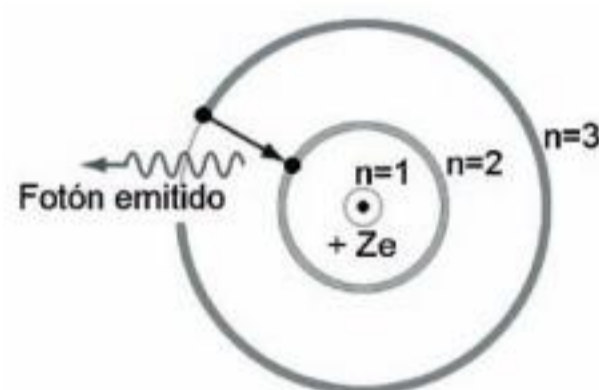


Figura I-6. Emisión de luz tras excitación.

### Proceso de propagación. Velocidad de la luz

Un campo eléctrico que varía en el tiempo producirá una corriente de desplazamiento que, según la ley de Ampère-Maxwell, será fuente de un campo magnético. A su vez este último, al ser variante, producirá un campo eléctrico, de acuerdo a la ley de Faraday. De este modo ambos campos se sostienen uno al otro. Este proceso de propagación fue teorizado por James Clerk Maxwell en 1865, y en 1885 Heinrich Rudolf Hertz detectó experimentalmente las ondas electromagnéticas.

Como demostró Maxwell en el siglo XIX, en el vacío la velocidad de la luz viene dada por la ecuación general de onda:

$$C = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

$\mu_0$ : permeabilidad magnética =  $4\pi \cdot 10^{-7}$ ; en relación con el campo magnético  $B$  y el medio donde se propaga.

$\epsilon_0$ : permeabilidad eléctrica =  $8,85 \cdot 10^{-12}$ ; en relación con el campo eléctrico  $E$  y el medio donde se propaga.

De donde:  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s; o  $c \approx 300\,000$  km/s

Para la luz y otras ondas electromagnéticas que viajan en el vacío,  $c = 299\,793$  km/s ( $\approx 300$  mil kilómetros en un segundo) (186,282 millas/s). La luz se propaga de unos cuerpos a otros, incluso en el vacío, con las siguientes particularidades:

- **SE PROPAGA EN LÍNEA RECTA:** Esta es la razón por la que un haz de luz, como el que produce una linterna, deja de verse cuando se interpone un cuerpo opaco en su camino.
- **SE PROPAGA EN TODAS LAS DIRECCIONES.** Esta es la razón por la que la llama de una vela ilumina todo el espacio que hay a su alrededor.



- **SE PROPAGA CON UNA GRAN RAPIDEZ.** Cuando los rayos de luz atraviesan el aire, el agua o el vidrio, su velocidad es menor que en el vacío. En el agua lo hace con una velocidad de menos de 224 900 km cada segundo.

### ***FENÓMENOS ONDULATORIOS***

Son los efectos y propiedades exhibidas por las entidades físicas que se propagan en forma de onda:

**Reflexión.-** Ocurre cuando una onda, al encontrarse con un nuevo medio que no puede atravesar, cambia de dirección.

**Refracción.-** Ocurre cuando una onda cambia de dirección al entrar en un nuevo medio en el que viaja a distinta velocidad.

**Difracción.-** Ocurre cuando una onda al topar con el borde de un obstáculo deja de ir en línea recta para rodearlo.

**Interferencia.-** Ocurre cuando dos ondas se combinan al encontrarse en el mismo punto del espacio.

**Efecto Doppler.-** Efecto debido al movimiento relativo entre la fuente emisora de las ondas y el receptor de las mismas.

**Onda de choque.-** Ocurre cuando varias ondas que viajan en un medio se superponen formando un cono.

### ***REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN DE LA LUZ***

Los cuerpos se comportan de manera diferente cuando la luz los ilumina. Así, hay cuerpos de tres tipos: opacos, traslúcidos y transparentes.

- **Transparentes:** dejan pasar casi toda la luz que les llega, por ejemplo, una lámina fina de cristal. Esta es la razón por la que podemos ver claramente los objetos que están detrás de ellos. La mayor parte de la luz que le llega lo atraviesa: la luz se refracta.

- **Traslúcidos:** solo dejan pasar la luz en parte. Por esta razón no podemos ver con claridad los objetos situados detrás de ellos. Cuando la luz los ilumina, sobre su superficie se forman imágenes borrosas, poco nítidas.

- **Opacos:** no dejan pasar la luz. Esta es la razón por la que no podemos ver los objetos que hay detrás de ellos. Una piedra, un árbol o nuestro propio cuerpo son cuerpos opacos a la luz. Una parte de la luz que llega a la superficie del cuerpo se devuelve al medio de donde vino: la luz se refleja. Otra parte de la luz que le llega es absorbida por el cuerpo, pudiendo provocar diversos efectos, como que se caliente, una reacción química o una pequeña corriente eléctrica.

Cuando un cuerpo opaco se coloca delante de una fuente luminosa, se produce tras él una zona oscura que es la sombra o umbra y una zona poco iluminada que se llama penumbra, que es un borde de sombra tenue alrededor de la sombra más oscura.

Los eclipses se producen cuando la Luna se coloca entre la Tierra y el Sol, tapando sus rayos de luz parcial o totalmente (eclipse de Sol), o cuando es la Tierra la que se coloca entre el Sol y la Luna, proyectando su sombra sobre esta última (eclipse de Luna).

Generalmente, estos fenómenos se producen a la vez, aunque siempre predomina uno de ellos. Por ejemplo, al incidir los rayos del Sol en una ventana, predomina la refracción, mientras que sobre un espejo predomina la reflexión.

**Principio del tiempo mínimo.-** Principio enunciado por el físico francés Pierre Fermat 1650, dice que: “Entre todas las trayectorias posibles que podría seguir la luz para ir de un punto a otro, toma la que requiere el tiempo mínimo”.



### Refracción

Los materiales transparentes al ser incididos por los rayos luminosos hacen vibrar a los electrones de sus átomos. A diferencia de los materiales opacos, estos electrones están unidos al núcleo por fuerzas elásticas que los mantienen más o menos sujetos. La frecuencia natural de vibración de un electrón depende directamente de esta sujeción a su átomo.

Los electrones de los átomos del vidrio tienen una frecuencia natural de vibración en la región del ultravioleta. Por ello la radiación ultravioleta solar los hace vibrar con máxima amplitud, haciéndoles chocar con los átomos vecinos, cediendo su energía en forma de calor e impiden que la radiación ultravioleta los atraviese, y no se reemite. Por ello el vidrio es opaco a la radiación ultravioleta.

A menores frecuencias de las ondas electromagnéticas, como la luz visible, los electrones de los átomos de vidrio vibran a menor amplitud, retienen menos tiempo la energía lumínica, produciéndose menos choques con los átomos vecinos y menos energía se transforma en calor. En una lamina de vidrio la luz visible incide sobre los electrones de los átomos de la superficie externa haciéndoles vibrar (oscilador electrónico), se produce una reemisión de luz visible dentro del vidrio que es absorbida por los átomos que están por debajo siguiendo una cadena de absorciones y reemisiones. Así pasa la energía lumínica por el material de vidrio hasta que sale por la cara opuesta. Debido a la demora en las absorciones y reemisiones la luz se propaga por el vidrio con menor rapidez que en el aire o el vacío.

En el agua el fenómeno de refracción es análogo al del vidrio. Todos conocemos el “efecto de partido” que se observa al meter una varilla recta en el agua, dado por la ley de Snell.

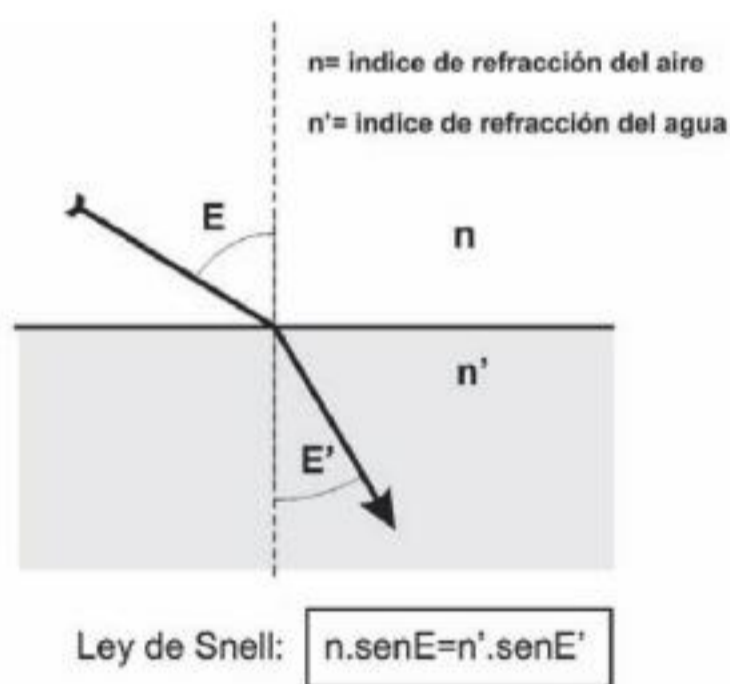


Figura I-7.

$E$  y  $E'$  son los respectivos ángulos de incidencia y refracción.

La refracción es el cambio de dirección que experimentan los rayos de luz al pasar de un medio transparente a otro, por ejemplo al pasar del aire al agua. Esto provoca que veamos imágenes distorsionadas, como cuando metemos una cuchara en un vaso de agua: la vemos como si tuviera dos partes, la de fuera y la de dentro del agua, “efecto de partido”.

La velocidad de la luz en un medio se puede calcular a partir de su permitividad eléctrica y de su permeabilidad magnética de la siguiente manera:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$



**Dispersión de la luz.**- Cuando la luz blanca atraviesa un prisma de cristal se produce la separación en bandas de distintos colores, al salir del prisma. Se debe a que cada color tiene distinta frecuencia y la velocidad de las ondas en un medio transparente depende de su frecuencia. Por lo tanto cada color tiene una velocidad diferente, por lo que a la salida por la cara opuesta en el prisma unos colores lo hacen antes que otros.

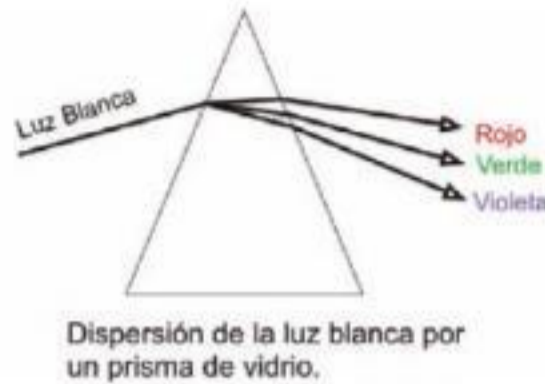


Figura I-8.

La permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética de un medio, diferente del vacío, dependen de la naturaleza del medio y de la longitud de onda de la radiación que lo atraviesa. De esto se desprende que la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en un medio depende también de la longitud de onda de dicha radiación. Por tanto, la desviación de un rayo de luz al cambiar de medio será diferente para cada longitud de onda, es decir, para cada color. El ejemplo más claro es el de un haz de luz blanca que se “descompone” en colores al pasar por un prisma. La luz blanca es realmente la suma de haces de luz de distintas longitudes de onda, que son desviadas de manera diferente (figura I-8). Este fenómeno se llama dispersión. Es el causante de la aberración cromática, el halo de colores que se puede apreciar alrededor de los objetos al observarlos con instrumentos que utilizan lentes como prismáticos o telescopios.

La dispersión de la luz también es la responsable de la aparición del arco iris cuando llueve y hay sol. En las gotas de lluvia esféricas ocurre la dispersión de la luz, de manera similar a como ocurre en el prisma. Los colores de fuera a dentro de la concavidad del arco son: rojo (exterior del arco), naranja, amarillo, verde, azul, violeta (interior del arco). Se forma un segundo arco en algunas ocasiones muy difícil de apreciar en la fotografía de la figura I-9, que tiene los colores invertidos. En este segundo arco iris me dio la impresión de que aparecían de dentro afuera los siguientes colores: magenta, rojo-naranja, amarillo-verde, verde-azulado, azul, azul-violeta. Lo que sí se aprecia perfectamente en la foto es que este segundo arco iris tiene una luminosidad mucho menor.



Figura I-9.



**Ángulo límite y reflexión interna total.**- En el caso de dos medios donde  $n > n'$  y  $E_1 < E_2$ .

A medida que aumenta el ángulo de incidencia aumenta el ángulo de refracción aproximándose a los  $90^\circ$ , hasta que se llega a un ángulo límite o crítico (en este caso  $61^\circ$ ,  $E_2$  flecha discontinua, Figura I-10) que hace que el ángulo de refracción supere los  $90^\circ$  y salga del medio  $n'$ , o sea, que el rayo refractado sufra una reflexión interna total.

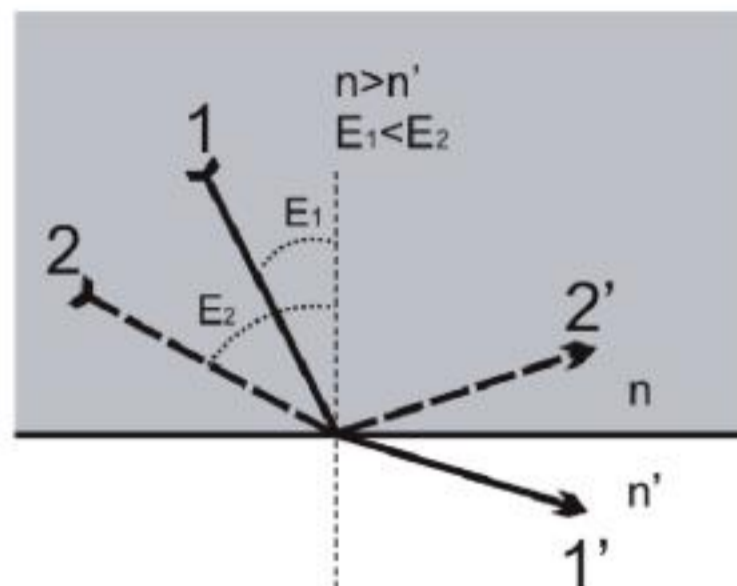


Figura I-10.

Gracias a reflexiones totales internas los cables de fibra óptica pueden llevar la luz a lugares inaccesibles. La fibra óptica lleva por un tubo los rayos de luz que rebotan contra las paredes en reflexiones internas totales siguiendo los cambios de dirección y vueltas.

**Refracción y reflexión parcial.**- En superficies húmedas y secas ocurre algo semejante a la reflexión compuesta. En *superficies irregulares mojadas* por un líquido, el cual puede hacer que estas superficies se transformen en superficies pulidas para las ondas, y adquieran propiedades de refracción, los rayos penetran en el interior de la superficie, haciéndolas aparecer con un tono más oscuro. En otras zonas, dependiendo del ángulo de incidencia, se producirán efectos de reflexión especular dando lugar a la aparición de reflejos o brillos. En *superficies irregulares secas* se produce poca o nula refracción y, en cambio, mucha reflexión difusa. Este hecho junto con el anterior son la causa de que las líneas blancas de límite de calzada en las carreteras se vean muy bien cuando ha llovido un poco o recién asfaltadas, por el contrario se ven muy mal en la noche cuando están secas y tienen poco asfalto.

**Halo.**- Fenómeno de refracción de la luz producido por la existencia de cristales de hielo en la atmósfera, entre el observador y el Sol o la Luna. La forma más común de halo es un anillo de luz coloreada que rodea el disco del Sol o el de la Luna. Los cristales de hielo atmosféricos producen una desviación de la luz del Sol o de la Luna formando un ángulo hacia el observador de  $22^\circ$ . Así, el halo forma un anillo con un radio de  $22^\circ$ . A veces se distingue un segundo halo causado por la refracción de los cristales de hielo alrededor del halo principal a una distancia de  $46^\circ$  del centro del Sol o de la Luna. También se pueden ver imágenes luminosas que se asemejan al disco del Sol; se llaman parahelios o "falsos soles", y se distinguen, en ocasiones, a  $22^\circ$  del Sol en dirección vertical u horizontal.

### Reflexión especular

Cuando una superficie opaca es iluminada con luz solar o luz artificial, los electrones de los átomos de la superficie comienzan a vibrar en respuesta a los campos electromagnéticos oscilantes de la luz que le ilumina. Los electrones energizados reemiten toda la luz que les llega



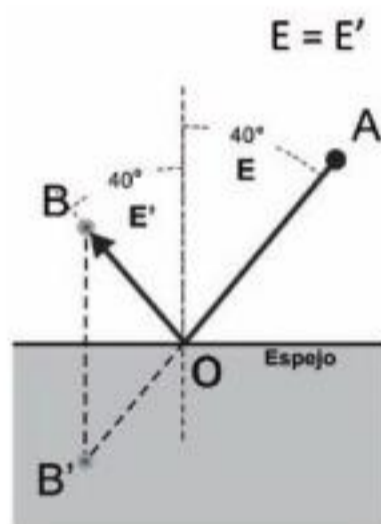
si es una superficie blanca, si es de otro color emiten las ondas electromagnéticas de su color y absorben todas las demás, si la superficie es negra absorben toda la luz que les llega.

En el caso de los metales los electrones no están enlazados a un determinado átomo y se mueven libremente por todo el metal, esto es la causa de que conduzcan tan bien la electricidad y el calor. Pero también estos electrones libres son responsables de que la energía “no salte” de un átomo a otro, al incidir la luz en ellos haciéndoles vibrar, sino que la energía lumínica es reflejada, es lo que observamos como “brillo”. Cuando nos miramos en un espejo: los rayos de luz se reflejan primero en nuestro cuerpo y después en el espejo, permitiendo que nos veamos.

Desde los experimentos de Herón de Alejandria, se sabe que los rayos de luz se reflejan en los espejos. El rayo de luz se devuelve al mismo medio de donde partió, el ángulo del rayo incidente con la perpendicular trazada a la superficie del espejo en el punto de incidencia y reflexión, es igual que el ángulo de reflexión (también respecto a esta perpendicular). El rayo incidente y el rayo reflejado están en el mismo plano, figura I-11.

Suponiendo que un rayo de luz tenga que ir de A a B después de reflejarse en un espejo, por el **principio de Fermat** el tiempo de la trayectoria de A a B ha de ser mínimo. E y E', ángulos de incidencia y reflexión respectivamente. Experimentalmente se ha visto que cuando estos ángulos son iguales la trayectoria tiene un tiempo mínimo.

**LEY DE LA REFLEXIÓN:** El ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión.



Geoméricamente se observa que la recta AB' es la trayectoria más corta ya que es recta. Los puntos B y B' son simétricos están a la misma distancia. El punto O es común al segmento BO y B'O y está en la perpendicular (el plano del espejo) a BB' lo cual implica que está a la misma distancia de B que de B', o sea, que los segmentos BO y B'O son iguales.

Figura I-11. Reflexión.

Cuando aparece un espejo en una pintura, las imágenes representadas en este rara vez concuerdan con la lógica reflexiva, suelen contener alguna de estas irregularidades: a) la figura reflejada está “pintada” en la superficie y no detrás del espejo; b) el tamaño de lo reflejado no está reducido como corresponde al doble de la distancia; c) los personajes que simulan mirarse en el espejo no pueden verse a sí mismos, sino que están viendo al pintor-espectador; d) la inclinación del espejo implica un nuevo horizonte y nuevo punto de vista, etc., puede observarse en: *Lección de Música* de Vermeer.

Leonardo pondera el espejo como verdadero maestro, así, dice en el Códice Atlántico, 762: “El pintor que traduce todo cuanto ve por la práctica y el juicio de la mirada, sin intervención del razonamiento, es como el espejo (o fotografía) que imita las cosas más opuestas, pero sin conocimiento de su esencia”.

### Reflexión difusa

Cuando la luz incide en una superficie irregular áspera, se refleja en múltiples direcciones. Cuando la distancia entre elevaciones sucesivas en la superficie irregular es aproximadamente un octavo o menos de la longitud de onda de la luz, hay muy poca reflexión difusa y se dice que la superficie está pulida. Un ejemplo de superficie pulida lo hemos visto antes en los espejos.



- Esta propiedad de los espejos se da con menor intensidad en otros cuerpos, los cuales devuelven tan solo aquellos rayos de incidencia que no absorben. Despedidos estos en ángulo de reflexión, producen un múltiple juego de iluminación complementaria.
- Gracias a esta propiedad de la luz, es posible ver en zonas que no están directamente iluminadas y, así, en una calle a pleno sol, es posible ver en la sombra la luz sobrante no absorbida por las paredes y objetos directamente iluminados.
- Según la teoría cuántica de la luz, la energía de los rayos de luz incidentes sobre una materia aloja en ella una parte de sus pequeños fotones, que son absorbidos por la estructura de la materia, mientras otros son desalojados y lanzados a la atmósfera con un ángulo igual al que penetraron. Cuando una luz blanca incide sobre una superficie roja, esta despidе reflejos rojizos, con los que se teñirán los objetos próximos. Los maestros experimentados conocen bien estos efectos, que dan unidad a sus obras, mientras los principiantes crean tonos disociados e independientes. Los pintores impresionistas practicaban la pintura "a plein air", sus agudas observaciones del natural les permitió descubrir estos principios. En cuadros de Monet o Renoir puede contemplarse la "participación" de unos tonos con pequeños tonos de otros próximos. Seurat, el más riguroso de todos, estudió los ensayos publicados en 1839 por el químico Eugène Chevreul, *Sobre la Ley del contraste simultáneo de los colores*, y *Sobre los colores y su empleo en el arte mediante círculos de color*, en 1864. Nace la pintura que Charles Angrand bautizó como *puntillista*. Esta pintura puntillista o divisionista explica, de manera práctica, el fenómeno cuántico de la luz, que se expresa aquí como pequeños puntos de color, como si fuesen los fotones que desprende la materia iluminada, los que se transformarían en esos puntos de color e invadirían las parcelas de sombras.

La misma atmósfera, con sus minúsculas partículas de polvo y agua, que hacen de espejo reflector, proporciona la luz diáfana de los crepúsculos. Efectos de la **perspectiva aérea**, que tanto apasionaba a Leonardo, tienen su base en este principio de la reflexión difusa debido, precisamente, a las impurezas que flotan en nuestra atmósfera.

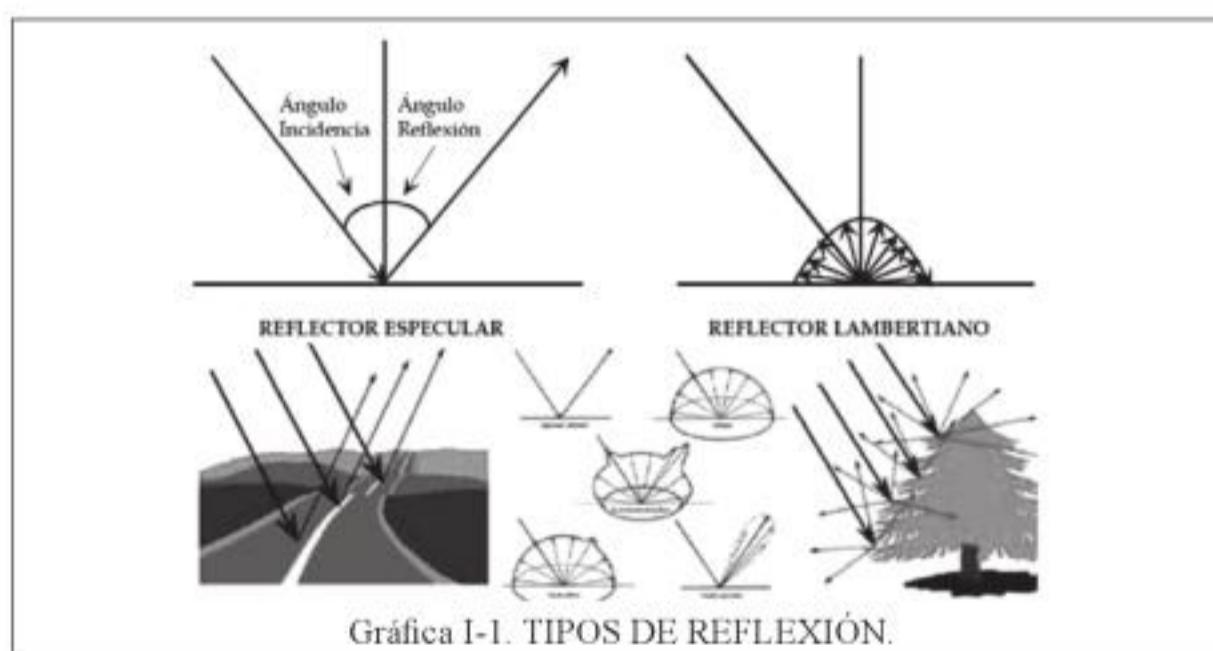
**Reflexión compuesta.**- Es una reflexión parcialmente difusa y parcialmente regular (reflexión especular).

**Factores que influyen en la reflectividad de una cubierta.**

Elementos que absorben (agua, pigmentos, minerales).

Rugosidad superficial (reflectividad lambertiana o especular, Gráfica I-1).

Ángulos de observación e iluminación.





## LAS SOMBRAS

Según la óptica geométrica, la luz se propaga en línea recta. Las sombras son las que *explican* la luz, la ausencia de sombras significa ausencia de luz y por tanto de color. Es un elemento fundamental para la obra pictórica, el estudio de la plástica de la luz y la sombra es comparable a la anatomía morfológica. La **sombra total o umbra** es la ausencia total de rayos lumínicos. Una fuente lumínica lejana o una fuente de pequeño tamaño producen sombras de contornos nitidos. Una fuente cercana o grande produce contornos difusos.

*Sombra propia*, adherida al propio cuerpo opaco que la produce, desde ella no se puede ver la fuente luminosa que la origina. La *sombra arrojada* es aquella que se proyecta a otros cuerpos tomando una nueva forma, en parte mantiene la forma proyectada del objeto que la produce y además adopta la forma del cuerpo que la aloja. Por último está la *sombra reflejada*, producida por la escasa luz rechazada por los cuerpos que se interponen en la trayectoria de la sombra arrojada, que puede incidir en zonas de sombra propia, o la de otros objetos.

Una sombra parcial, se denomina **penumbra**, aparece cuando es bloqueada parte de la luz directa. El punto perpendicular al foco luminoso produce la mayor intensidad reflectante, denominándose brillo.

Un error fundamental es el asimilar la sombra al gris (claro u oscuro), la sombra también es color aunque sea de valor más bajo y matiz menos intenso. El conocimiento de la luz y la sombra puede ayudarnos a conseguir espacios compositivos con efectos expresivos o misteriosos.

Hasta el siglo XVI, algunos pintores como Giotto, Masaccio, Piero, Botticelli o Rafael, incluso Caravaggio no utilizaban las sombras como elemento compositivo, quedando delimitadas claramente las zonas de luces frente a las de sombras. Los tenebristas empleaban las luces y sombras como formas plásticas de primer orden, pero ignoraban las penumbras y los reflejos, que fueron empleados ampliamente por los pintores impresionistas, Monet, Renoir, etc.

Las luces laterales producen una mayor percepción de relieve, nos pueden servir como un medio de modelación del volumen, y las sombras para representar la redondez. Son de especial importancia en holopintura.

En la *Última cena* de Leonardo da Vinci se observa una concepción distinta: aquí la luz proporciona toques de luminosidad a cada figura, desde un fulcro indeterminado. Rembrandt en sus clásicas pinturas nos muestra un foco de luz central que domina la escena y sus reflejos, quedando el resto en una penumbra muy oscura.

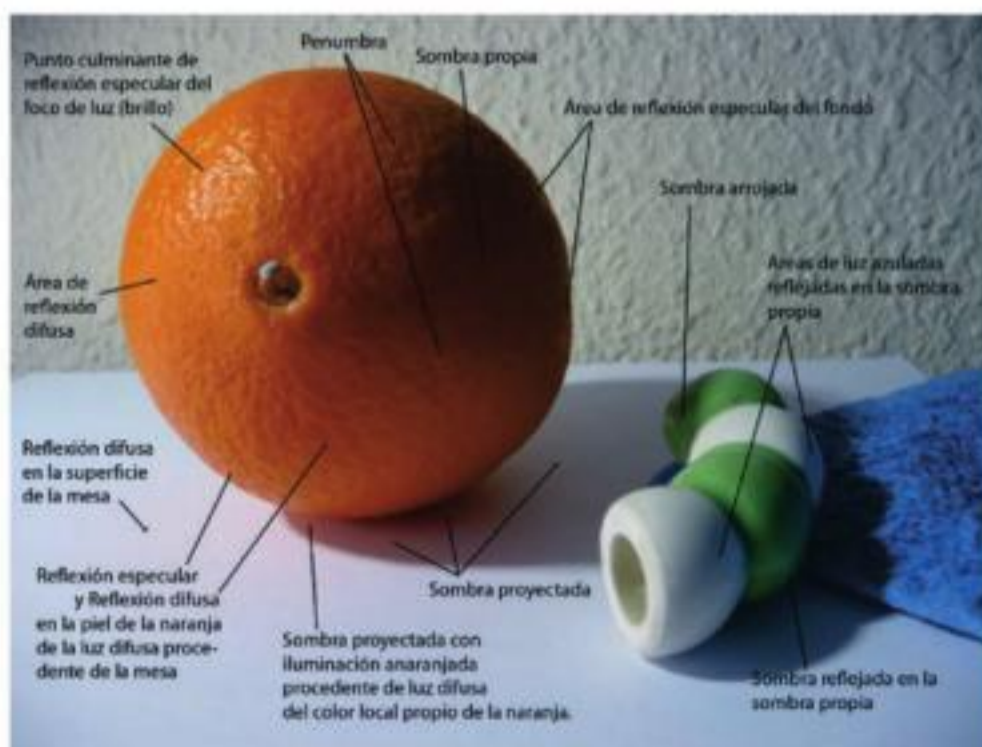


Figura I-12. Estudio de las sombras.



### **Difracción**

Se denomina *difracción* a todo cambio en la trayectoria de la luz que no se deba a la reflexión ni a la refracción. Esencialmente, la difracción no se diferencia de la interferencia; sin embargo, se suele emplear el término de difracción para describir la interacción de un gran número de ondas, mientras que el término interferencia designa la interacción de solo unas pocas ondas.

Cuando una onda de cualquier tipo pasa junto al borde de un objeto sólido o atraviesa una rendija estrecha, se produce una perturbación o expansión de la onda en lugar de continuar en línea recta. Cuando la luz pasa por una abertura grande en comparación con la longitud de onda no se produce difracción.

Si la luz procedente del infinito se hace pasar por una rendija estrecha y larga (difracción de Fraunhofer), como la producida por una cuchilla, la onda se expande en lugar de seguir la dirección del rayo incidente. De acuerdo con el principio de Huygens, cuando la onda incide sobre la rendija todos los puntos de su plano se convierten en fuentes de onda secundarias, emitiendo nuevas ondas, que en este caso se denominan *difractadas*. La interferencia en cada punto entre todas estas ondas difractadas constituye el fenómeno de difracción. Se forman gran número de rayos abriéndose en abanico, que se proyectan sobre la pantalla colocada por detrás, apareciendo una zona central rectangular de luz intensa, rodeada de luz débil y la sombra con extensos y borrosos bordes. Supondremos que las ondas incidentes son normales al plano de la rendija, y que el observador se encuentra a una distancia grande en comparación con la anchura de la misma.

La expansión de la luz por la difracción produce una borrosidad que limita la capacidad de aumento útil de un microscopio óptico o telescopio. Solo un microscopio óptico de barrido puede superar el límite de la difracción y visualizar detalles ligeramente menores que la longitud de onda de la luz.

La difracción no se limita a las sombras de las rendijas sino que aparece en cualquier tipo de sombras.

La difracción se produce cuando se distorsiona el frente de onda por un obstáculo cuyas dimensiones son del orden de la longitud de onda.

La difracción de Fraunhofer para una abertura circular es un círculo brillante sobre la pantalla rodeado de anillos alternadamente claros y oscuros.

En los bordes de los objetos opacos se produce el fenómeno de la difracción, que se puede visualizar cuando miramos en línea el objeto y el foco luminoso, por ejemplo un poste del tendido eléctrico y el sol iluminándolo por detrás.

Experimento de **interferencia** de Thomas Young para demostrar la naturaleza ondulatoria de la luz.

1. Demostró que los anillos de Newton (se producen en una lente con una superficie plana superior que recibe la luz y se refracta en el espesor de la lente y la superficie inferior es curva, apoyada esta en una superficie plana y pulida. Definimos anillos de Newton como el efecto óptico consistente en la formación de anillos concéntricos de diferentes colores, que aparece al superponer dos materiales traslúcidos de plástico o vidrio. Aparecen en función de la humedad o temperatura ambiente, así como del tipo y calidad de los materiales) eran debidos a la superposición de ondas. Contando el número de anillos, llegó incluso a determinar la longitud de onda de la luz: encontró que en una pulgada caben 37 640 ondas rojas y 59 750 ondas violetas.

Estos hallazgos fueron muy importantes, ya que ponen de manifiesto la relación directa entre el color (que es una sensación visual) y un parámetro físico, como es la longitud de onda. Resultando, de acuerdo con lo establecido por Young, que la longitud de onda de la luz era muy pequeña, del orden de 0,00005 cm.



2. La luz que pasa por dos agujeros hechos con un alfiler produce bandas de oscuridad y claridad en la pantalla colocada por detrás. En las zonas oscuras había superposición de crestas de ondas; en las zonas claras había superposición de valles. Las regiones de interferencia destructiva ocurrían al superponerse una cresta con un valle o a la inversa.

Este experimento se puede mejorar si en vez de hacer dos agujeros con alfiler hacemos dos rendijas cercanas, las imágenes de las bandas son rectas en vez de circulares como en el ejemplo anterior. En las bandas claras centrales las ondas procedentes de las dos rendijas llegan en fase y se refuerzan entre sí. En las dos bandas por encima y debajo de la central las ondas llegan desfasadas en media longitud de onda y no hay reforzamiento sino atenuación. Las otras bandas oscuras se producen donde las trayectorias de las ondas de ambas rendijas difieren en múltiplos impares de media longitud de onda.

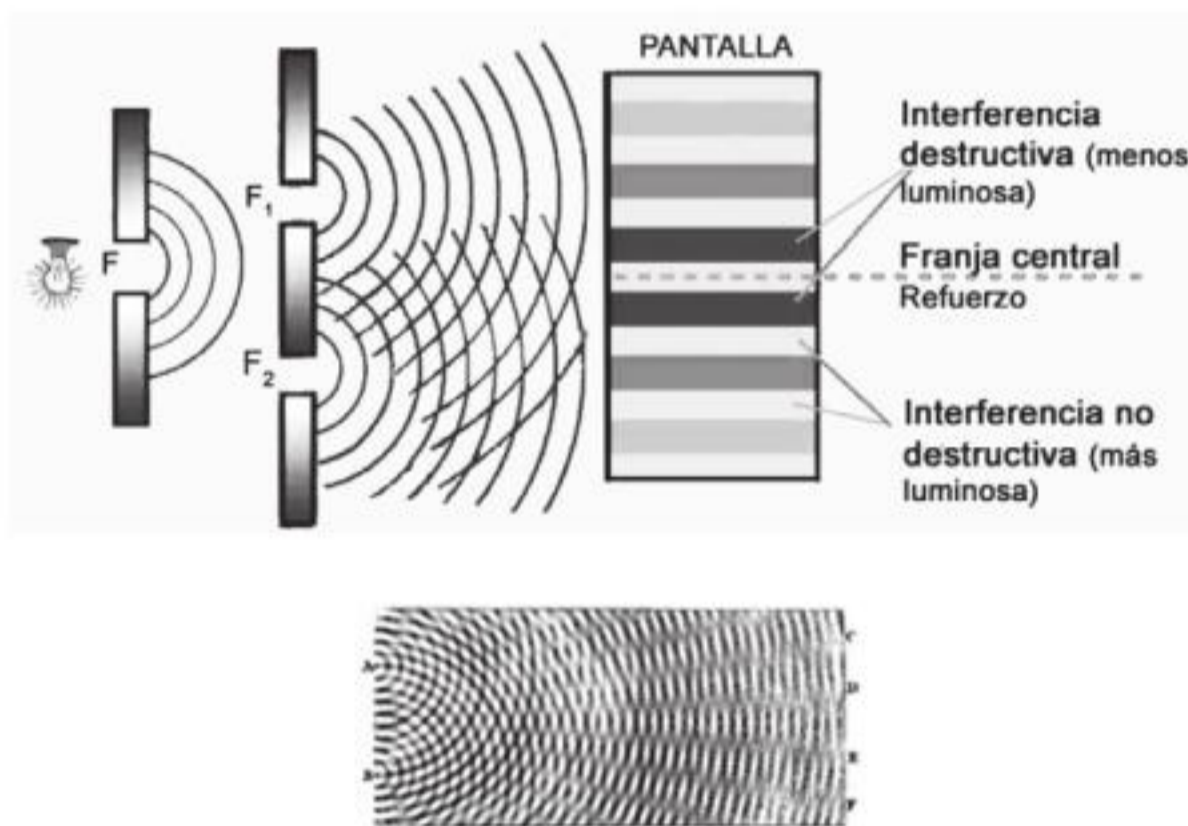


Figura I-13.

**Rejillas de difracción.** - Consisten en varias rendijas muy cercanas, que tienen la propiedad al igual que los prismas de dispersar la luz en sus colores constituyentes. Un ejemplo que he aprovechado para ilustrar el capítulo II es la foto de la figura II-17, los agujeros microscópicos efectuados por el rayo láser en la superficie reflectora del disco compacto (CD) actúan como una rejilla de difracción.

En la naturaleza tenemos otro ejemplo de rejilla de difracción en el ópalo. Los ópalos de mejor calidad exhiben un brillante juego de colores, son el resultado de la formación de diminutas fisuras en las piedras y posterior depósito de más ópalo en esas fisuras. Los índices de refracción de la piedra original y del ópalo depositado después son con frecuencia distintos, esto provoca una interferencia de luz que causa el juego de colores.

**Colores de interferencia por reflexión en película delgada.** - Se conoce como fenómeno de iridiscencia, y consiste en dos reflexiones en la cara externa e interna de la película delgada (de espesor más o menos la longitud de onda de la luz). La luz que se refleja en la superficie inferior de la película transparente anula a la que se refleja en la superior (ref.: Paul G. Hewitt, página 575). Se observan mejor en las burbujas de jabón, son: azul verdoso, magenta y amarillo, debido a la anulación de los primarios rojo, verde y azul.



### ***EFEECTO DOPPLER***

Las ondas luminosas al igual que las ondas sonoras se comportan de forma semejante cuando el origen de las ondas se mueve.

Christian Andreas Doppler, en 1842, señaló que se había dado cuenta de que la percepción que tenemos de una onda depende de la velocidad relativa entre el observador y la fuente que la emite. Por ejemplo, cuando un coche de bomberos se acerca a gran velocidad haciendo sonar su sirena, el tono de la sirena parece más agudo y cuando se aleja parece más grave.

De manera análoga al caso de la sirena ocurre con una luz potente. Cuando el frente de ondas se acerca al observador a gran velocidad su frecuencia aumenta, se produce en la luz un ***corrimiento al azul***, porque la frecuencia es mayor hacia el extremo azul del espectro. Cuando la luz se aleja del observador se produce un ***corrimiento al rojo***, ya que al alejarse el foco la frecuencia de las ondas luminosas disminuye, o sea, tiende hacia el extremo rojo del espectro.

### ***LÁSER***

Es el acrónimo –una palabra formada por las iniciales de una frase se denomina *acrónimo*– de la frase inglesa: light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación). Los aparatos que amplifican la luz y producen haces de luz coherente, pueden utilizar frecuencias que van desde el infrarrojo hasta los rayos X. Un haz de luz es coherente cuando sus ondas, o fotones, tienen todas la misma frecuencia, se propagan en la misma dirección, y en forma acompasada o en fase. La luz incoherente es caótica: de múltiples frecuencias y fases de vibración, se dispersa, se ensancha haciéndose menos intensa en un corto periodo de tiempo. En cambio la luz coherente es monocromática, puede ser direccional, intensa y de gran pureza de color. Se denomina láser cuando la luz coherente está en el rango de la luz visible, ultravioleta o infrarrojos; y máser si está en el rango de las microondas.

Un láser requiere tres elementos: 1) Un medio activo con distintos niveles de energía electrónicos (una población de átomos o moléculas excitadas y otra población mayor de átomos o moléculas no excitadas inicialmente). 2) Una cavidad resonante (núcleo o tubo con dos espejos paralelos) que almacena la radiación emitida y alimenta la radiación estimulada. 3) Un sistema de bombeo (bombeo óptico → láser sólido; bombeo eléctrico → láser de gas).

Los principios de funcionamiento de estos dispositivos son (Figura I-14):

A) Mediante una excitación externa, llamada bombeo, el núcleo o tubo de láser que contiene el medio activo sufre una inversión de la población de átomos, haciéndose mayor la población excitada (población de energía mayor metaestable). La fuente de energía externa excitadora puede ser: una corriente eléctrica con dos electrodos (anodo + y cátodo-) que producen una descarga eléctrica de alta tensión; o una lámpara flash destellante semejante al flash de una cámara fotográfica.

Además, la corriente eléctrica hace que las moléculas en el medio activo se distribuyan en dipolo permitiendo separar las dos poblaciones (excitadas, no excitadas) en el medio activo.

Cuando se verifica la excitación, gran cantidad de electrones pasan al estado excitado y, una gran mayoría, permanece en dicha situación durante un determinado intervalo de tiempo.

B) Mecanismo de la emisión estimulada: cuando un fotón choca con un electrón no excitado, puede hacer que pase al estado de excitado. Este electrón que resulta excitado, al cabo de un tiempo pasa nuevamente al estado de reposo, emitiendo un fotón. Este fenómeno es conocido como emisión espontánea.



En caso de que un fotón externo pase al lado de un electrón excitado (población de energía mayor metaestable), éste retorna al estado no excitado a través de la emisión de un fotón igual al que pasó junto a él inicialmente. Este proceso se conoce como emisión estimulada y constituye el fundamento del láser. Los fotones así emitidos por los átomos excitados poseen igual frecuencia, fase y dirección que el fotón externo que les dio origen.

El dispositivo láser está formado por un núcleo, que suele tener forma alargada, donde se generan los fotones. El núcleo puede ser una estructura cristalina, por ejemplo rubí, o un tubo de vidrio que contiene gases, por lo general dióxido de carbono o la mezcla helio-neón.

Son materiales que poseen electrones fácilmente excitables y que no emiten inmediatamente de forma espontánea, sino que pueden quedar excitados durante un tiempo. Es precisamente este pequeño intervalo de tiempo el que se necesita para que los electrones produzcan emisión estimulada, no espontánea.

También ocurre que algunos átomos excitados realizan una emisión espontánea, generando fotones que se desplazan en todas direcciones. Aunque en su mayoría se pierden por los laterales donde no hay espejos, un pequeño número rebota entre los espejos paralelos pasando por el interior del núcleo que es transparente. Al pasar por el núcleo, provocan la emisión estimulada de nuevos fotones en la misma dirección. Estos nuevos fotones rebotan también en los espejos paralelos, originando, a su vez, la emisión de más fotones, y así sucesivamente.

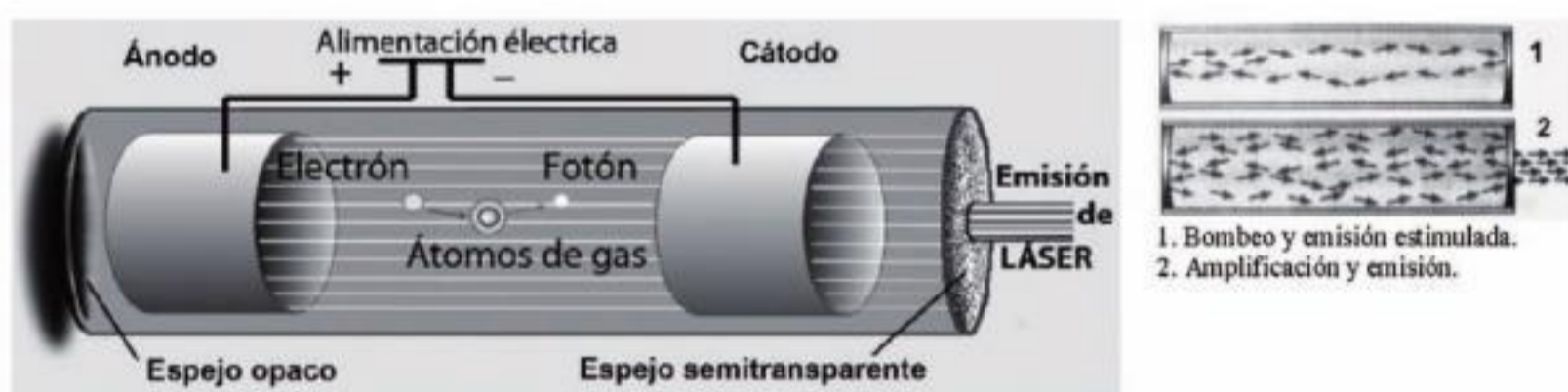


Figura I-14. En 1 los átomos del gas estimulados por la corriente eléctrica emiten fotones que se reflejan en los espejos laterales formando una cavidad resonante dentro del tubo, lo que permite su amplificación. En 2 el haz de fotones se ha hecho lo suficiente potente para atravesar el espejo semitransparente y sale un rayo luminoso monocromático coherente, el rayo láser.

C) Los fotones emitidos, como se ha dicho anteriormente, chocan a su vez con átomos excitados y liberan nuevos fotones con la misma dirección, frecuencia y fase. La luz se ‘amplifica’ a medida que los fotones se desplazan hacia atrás y hacia adelante por reflexiones repetidas entre los dos espejos paralelos, desencadenando nuevas emisiones estimuladas. La luz que viaja de forma paralela al eje del tubo láser es reflejada en los espejos selectivamente a la longitud de onda deseada. Algunos haces en la dirección del eje, se hacen más intensos consiguiendo ‘filtrarse’ por el espejo semitransparente (parcialmente reflectante), y un fino haz monocromático escapa: el rayo láser visible.

En 1917, Albert Einstein estableció el concepto de emisión estimulada, fundamento para el desarrollo de los máseres y los láseres, utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación.

En septiembre de 1957, Charles Hard Townes esbozó un proyecto para la construcción de un “máser óptico” que emitiría luz visible. Y se puso en contacto con su cuñado Arthur Schawlow.

Gordon Gould era un estudiante licenciado de la facultad de física en la universidad de Columbia, donde Townes ejercía de catedrático, quería doctorarse en dicha universidad. Gould



admite que se inspiró en la idea del máser para construir un artefacto que emitiese luz en lugar de microondas. En noviembre de 1957, transcurridos apenas dos meses desde que Townes hubiera esbozado su máser óptico, Gould comenzó a describir su propia idea para la construcción de un aparato semejante utilizando –al parecer por primera vez– el término láser.

Townes llamó por teléfono a Gould para pedirle información relacionada con la lámpara de talio, sobre cuyo estudio preparaba su tesis doctoral. La excitación del talio está relacionada con la excitación de electrones que tiene lugar en el láser. Después de esto, Gould se apresuró a visitar a un abogado especializado en patentes, que no supo comprender la importancia del láser y le dio la errónea impresión de que tenía que resumir sus ideas a un nivel más práctico para poder patentarlas. Dadas las circunstancias, Gould optó por no solicitar ninguna patente en aquellos momentos y esperó hasta abril de 1959. Sin embargo, Townes y Schawlow si lo hicieron y mandaron detallado informe a la prestigiosa revista *Physical Review*, la cual lo publicó en diciembre de 1958.

Gould, además de no solicitar la patente, cometió el error de no publicar sus trabajos. Abandonó la universidad de Columbia sin doctorarse y se fue con sus ideas a una empresa de Nueva York, llamada TRG Inc, la cual contactó con la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA). Al ejército le interesaba el potencial calorífico y bélico del láser, el Pentágono (1959) decidió otorgar un millón de dólares a la TRG en lugar de los trescientos mil que la empresa había solicitado.

A pesar de que Townes, Schawlow y Gould habían solicitado patentes y elaborado varias detalladas propuestas, y de que algunos rusos habían hecho otro tanto, hacia finales de los años cincuenta nadie había construido en realidad ningún láser. En aquella época se suponía que los gases constituirían los mejores elementos para la acción del láser.

Sin embargo, el físico de la compañía aérea Hughes en California, Theodore H. Maiman, utilizó un rubí sintético como cristal para un máser y lo había estudiado con suma atención, llegando a la convicción de que sería apropiado para el láser. En 1960, Maiman observó el primer proceso láser en un cristal de rubí. Un año más tarde, el físico estadounidense de origen iraní Alí Javan construyó un láser de gas. En 1966, el físico estadounidense Peter Sorokin construyó un láser de líquido.

Charles Hard Townes fue galardonado con el Premio Nobel de Física (1964) junto a los soviéticos Nikolái Básov y Aleksandr Prójorov por sus trabajos fundamentales en el campo de la electrónica cuántica.

Dos años después, Robert Hall inventó el láser semiconductor. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos.

En 1977, el Tribunal de Patentes de Estados Unidos confirmó una de las reivindicaciones de Gould en relación con el mecanismo de bombeo para la producción del láser.

El 16 de mayo de 1980, un grupo de físicos de la Universidad de Hull liderados por Geoffrey Pret registran la primera emisión láser en el rango de los rayos X. Cinco años después se comienza a comercializar el disco compacto, donde un haz láser de baja potencia “lee” los datos codificados en forma de pequeños orificios (puntos y rayas) sobre un disco óptico con una cara reflectante. Posteriormente, esa secuencia de datos analógica se transforma en una señal digital permitiendo la escucha de los archivos musicales. Inmediatamente después la tecnología desarrollada se usa en el campo del almacenamiento masivo de datos.

Ya en el siglo XXI, científicos de la Universidad de St. Andrews crean un láser que puede manipular objetos muy pequeños. En el 2002, científicos australianos “teletransportan” con éxito un haz de luz láser de un lugar a otro. Dos años después el escáner láser permite al Museo Británico efectuar exhibiciones virtuales.



En 2006, científicos de la compañía Intel descubren la forma de trabajar con un chip láser hecho con silicio, abriendo las puertas para el desarrollo de redes de comunicación mucho más rápidas y eficientes.

Un haz láser altamente coherente puede ser enfocado por debajo de su límite de difracción, que a longitudes de onda visibles corresponde solamente a unos pocos nanómetros. Esta propiedad permite al láser grabar gigabytes de información en las microscópicas cavidades de un DVD, disco Blu-Ray o CD. También permite a un láser de media o baja potencia alcanzar intensidades muy altas y usarlo para cortar, quemar o incluso sublimar materiales. La luz láser simplifica el registro de un holograma, a partir del cual puede reconstruirse una imagen tridimensional mediante un rayo láser.

### **EMISIÓN DE LUZ. RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA**

La capacidad que tienen algunos organismos de emitir luz se llama biofotogénesis. Muchos seres vivos, invertebrados, son capaces de producir luminiscencia, en el mar son muy abundantes. En las aguas dulces y en tierra son mucho menos frecuentes. Es muy conocida por su espectacularidad la producción de luz en varias especies de insectos coleópteros, por ejemplo las *luciérnagas*.

La luz que emiten suele ser verdosa y "fría" porque no va acompañada de radiaciones infrarrojas.

Cada onda luminosa monocromática lleva asociada una energía, el fotón, cuyo valor es igual al producto:

$$Q = hf$$

donde  $h$  es la constante de Planck, igual a  $6,62 \times 10^{-34}$  J·s, y  $f$ , la frecuencia de la onda. Así, la luz de menor frecuencia tiene menor contenido energético, mientras que la luz de menor longitud de onda posee mayor energía.

La luz, como ya se ha dicho, posee una naturaleza dual, por una parte, la teoría ondulatoria explica convenientemente la propagación de la luz y los efectos de interferencia y difracción, mientras que el efecto fotoeléctrico (transferencia de energía de la luz a ciertos cuerpos o elementos) y la interacción de la luz con la materia se explican más satisfactoriamente mediante el modelo corpuscular.

### **RADIOMETRÍA**

La **radiometría** se ocupa del estudio de la medida de la radiación electromagnética en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético.

#### **Energía radiante (Qe)**

Se entiende por energía radiante, la energía transportada por las ondas electromagnéticas, sea de cualquier frecuencia, por ejemplo luz visible, ondas de radio, rayos ultravioletas (UV), rayos infrarrojos (IR), rayos gamma, etc.

Es la cantidad de energía que incide sobre, se propaga a través de, o es emitida desde una superficie de área dada en un período de tiempo dado. En principio, se incluyen todas las longitudes de onda contenidas en la radiación. Si es preciso, debe indicarse explícitamente el rango de  $\Delta\lambda$  considerado.

La característica principal de esta energía es que se propaga en el vacío sin necesidad de soporte material alguno. Como cualquier tipo de energía se mide en julios ( $[J] = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ ) y se simboliza por  $Q_e$ .



La energía radiante procedente del sol se encuentra en la base de casi todas las formas de energía actualmente disponibles.

*Energía radiante espectral,  $Q_\lambda$* : es la energía radiante por intervalo unitario de longitud de onda. Se mide en J/nm o J/ $\mu\text{m}$ .

$$Q_\lambda = \frac{dQ}{d\lambda}$$

### **Flujo radiante o potencia radiante ( $\Phi$ , $P_e$ )**

Las radiaciones electromagnéticas emitidas por una fuente transportan energía, de forma que cualquier objeto iluminado la recibe.

La potencia radiante o flujo radiante  $P_e$  es la cantidad de energía radiante o potencia radiante emitida, transmitida o recibida en forma de radiación por unidad de tiempo.

Se mide en vatios (W, 1 W = 1 J/s) y se simboliza por las letras  $P_e$ ,  $\Phi$ ,  $fe$ ;  $f$ ;  $P$ .

$$\Phi = P_e = \frac{dQ_e}{dt}$$

*Densidad de energía radiante  $W$* : es la cantidad de energía por unidad de volumen.

Se mide en  $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$ .

$$W = \frac{dQ_e}{dV}$$

*Densidad de flujo radiante instantáneo*: es el flujo radiante interceptado por la unidad de superficie plana. Se mide en  $\text{w} \cdot \text{m}^{-2}$ .

*Irradiancia  $E$*  es la densidad de flujo radiante cuando penetra en la superficie.

*Emitancia  $M$*  es la densidad de flujo cuando sale de la superficie.

$$E, M = \frac{d\Phi}{dA}$$

La *Densidad de flujo de energía radiante o Densidad de flujo radiante* es la cantidad de energía que transportan las ondas electromagnéticas por unidad de superficie en la unidad de tiempo.

$$D = \frac{dQ_e}{dA dt}$$

$D \rightarrow$  Densidad de flujo radiante.  $Q_e \rightarrow$  Energía radiante.  $A \rightarrow$  Área de la superficie.  $t \rightarrow$  Tiempo.

La energía transportada puede manifestarse de formas muy diversas en los cuerpos que la reciben: propiciando reacciones químicas (fotosíntesis y bronceado), efectos eléctricos (fotocélulas), efectos mecánicos (viento solar), calentamiento (estufas de infrarrojos), etc.

*Flujo radiante espectral,  $\Phi_\lambda$* : es el flujo de energía radiante por unidad de tiempo y unidad de longitud de onda. Se mide en W/nm.



$$\Phi_\lambda = \Phi_\lambda(\lambda) = \frac{dQ_\lambda}{dt} = \frac{d\Phi}{d\lambda}$$

La distribución espectral del flujo radiante es, como veremos, muy importante para la mayoría de las aplicaciones, incluyendo la caracterización de la respuesta de un detector en función de la energía incidente.

### Radiancia ( $L_e$ )

Es la densidad de flujo radiante por unidad de área y de ángulo sólido que incide, atraviesa o es emitido por un elemento de superficie centrado en un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en  $W/(m^2 \cdot sr)$ . Su ecuación de definición es:

$$L_e = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial s \partial \omega} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \omega \partial s_o \cos \theta}$$

donde  $\partial s = \partial s_o \cos \theta$  es una magnitud denominada *área proyectada* (*projected area*) que es el área de la proyección de la superficie elemental  $\partial s_o$  (de la superficie que contiene al punto) sobre un plano perpendicular a la dirección de propagación;  $\partial^2 \Phi$  es la segunda derivada del flujo radiante (ver anexo: derivadas, al final del libro).

La **radiancia** se puede entender como la intensidad por unidad de área proyectada o como la irradiancia por unidad de ángulo sólido desde el área proyectada. Esta función es fuertemente dependiente de la dirección. Mediante la operación matemática integración (la integración se puede consultar en el anexo de matemáticas) sobre una superficie de área finita y/o sobre un ángulo sólido finito se puede obtener a partir de ella la irradiancia y el flujo radiante.

**Radiancia espectral  $L_\lambda$** : la magnitud básica a partir de la cual se derivan todas las otras magnitudes radiométricas es la radiancia espectral (*spectral radiance*,  $L_e$ ), es la densidad espectral de radiancia, definida como

$$L_\lambda = \frac{dL_e}{d\lambda} = \frac{d^2 \Phi}{d\omega ds_o \cos \theta d\lambda}$$

y medida en  $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$ .

La radiancia espectral  $L_\lambda$  es así la cantidad de flujo radiante ( $\Phi$ , energía por unidad de tiempo, vatios, W) por unidad de longitud de onda (micras,  $\mu m$ ) radiada (emitida) en un cono por unidad de ángulo sólido (estereorradián, sr) por una fuente cuya área ( $ds$ ) se mide en metros cuadrados.

**Irradiancia,  $E_e$** : es la densidad de flujo radiante por unidad de superficie que incide, atraviesa o emerge de un punto en la superficie especificada. Deben incluirse todas las direcciones

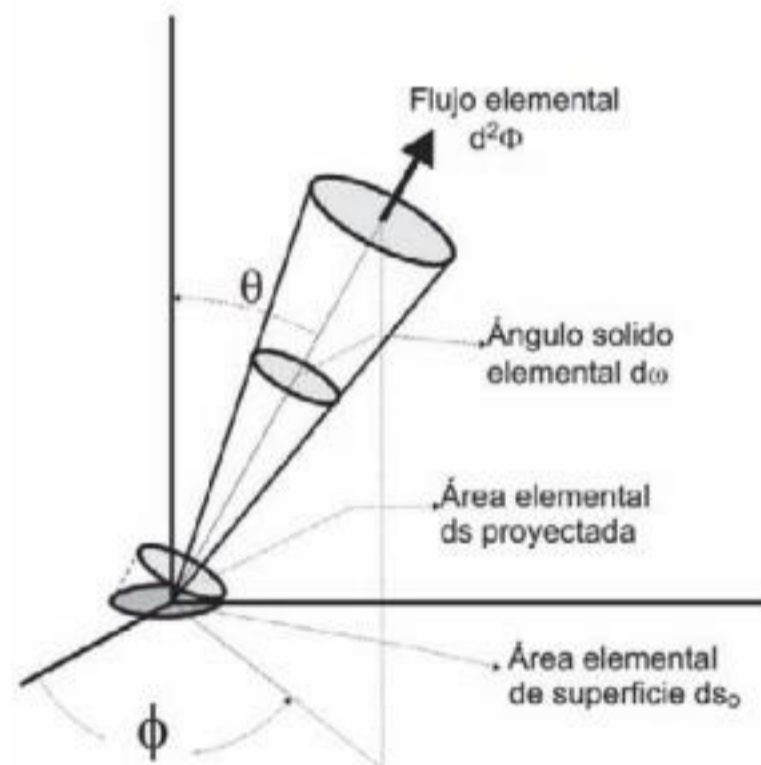


Figura I-15. Radiancia.



comprendidas en el ángulo sólido hemiesférico por encima o por debajo del punto en la superficie. Se mide en  $W/m^2$ .

$$E_e = \frac{d\Phi}{ds_o}$$

La irradiancia saliente de una superficie se denomina *exitancia*  $M$  (también llamada *emitancia*), y tiene las mismas unidades y expresión para su definición.

La irradiancia es la magnitud más importante para caracterizar la incidencia o emisión de radiación por una superficie cuando no es necesario detallar la distribución angular o direccional de la radiación.

### Intensidad radiante $I_e$

Es la densidad de flujo radiante por unidad de ángulo sólido que incide, atraviesa o es emitido por un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en  $W/sr$ .

$$I_e = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

La intensidad radiante es una función de la dirección hacia / desde el punto para el cual se define, siendo necesario indicar explícitamente el punto y la dirección considerados. Para la mayoría de las fuentes luminosas reales es una función fuertemente dependiente de la dirección.

*Intensidad radiante espectral,  $I_\lambda$* : es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido y por unidad de longitud de onda / incidente en / atravesando / emitido por / un punto en el espacio propagándose en una dirección específica. Se mide en  $W/(sr \cdot nm)$ .

$$I_\lambda = \frac{dI_e}{d\lambda} = \frac{d^2Q_\lambda}{d\omega dt} \frac{d^2\Phi}{d\omega d\lambda}$$

### Distribución espectral de la potencia radiante (SPD)

En radiometría, la distribución espectral de la potencia radiante (Spectral Power Distribution [SPD]), se describe como la potencia por unidad de superficie por unidad de longitud de onda de la luz (irradiancia o exitancia radiante), o longitud de onda que contribuye a cualquier cantidad radiométrica (radiancia o energía radiante, flujo radiante o potencia radiante, o intensidad radiante). Las curvas de distribución espectral de potencia (SPD) proporcionan al usuario un perfil visual de las características de color de una fuente de luz. Muestran la potencia radiante emitida por la fuente en cada longitud de onda o banda de longitudes de onda en la región visible (380 nm a 760).

Exitancia luminosa (en un punto de una superficie): cociente entre el flujo luminoso  $df_v$  que abandona un elemento de la superficie que contiene al punto o el área  $dA$  de ese elemento. Símbolo:  $M_v, M$ ; Unidad:  $lm \cdot m^{-2}$ . Matemáticamente, para la distribución espectral de la potencia radiante de una irradiancia o exitancia radiante se puede escribir:

$$M_\lambda = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial A \partial \lambda} \approx \frac{\Phi}{A \Delta \lambda}$$



Donde  $M_\lambda$  es la irradiancia espectral (unidades SI: vatios  $\cdot$  metros<sup>-2</sup>);  $\Phi$  es el flujo radiante de la fuente (unidades SI: vatios);  $A$  es el área sobre la cual el flujo radiante se integra (unidades SI: metro<sup>2</sup>), y  $\lambda$  es la longitud de onda (unidad SI: metros). La aproximación es válida cuando el área y el intervalo de longitudes de onda son pequeños.

La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del SI se mide en W/m<sup>2</sup>.

La irradiancia sirve de base para la definición de magnitudes físicas similares, entre las que la radiancia (energía emitida por unidad de superficie y por unidad de ángulo sólido) es la más utilizada.

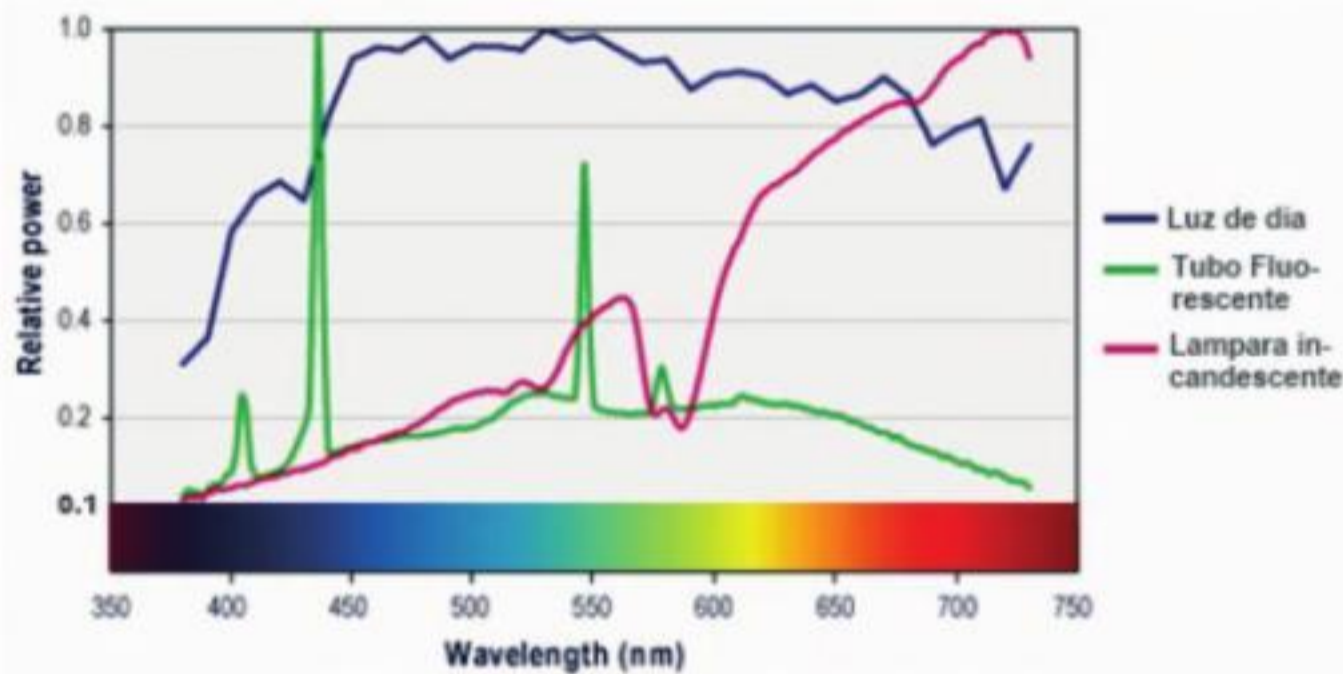


Figura I-16. *Spectral power distribution comparison*

En la figura I-16, la curva SPD de la luz solar al mediodía, por ejemplo, muestra claramente que es una excepcional fuente de luz equilibrada para todas longitudes de onda de la luz visible, presentes en cantidades casi iguales, con un extraordinario colorido. En comparación con fuentes de luz artificial, la luz solar exhibe grandes cantidades de energía en las partes azul y verde del espectro, por lo que es una fuente de luz fría con una temperatura de color alto (5500 K). Las otras curvas SPD de la figura I-16 muestran como diferentes luces se diferencian en la composición espectral con predominio de un color en su flujo luminoso (el verde para el tubo fluorescente 5000 K y el rojo para lámpara de tungsteno o lámpara de incandescencia 2800 K).

En la práctica las fuentes luminosas no son “puras”, en el sentido de que no emiten luz de una sola longitud de onda, sino de varias, aunque las de una banda determinada puedan ser preponderantes sobre las demás.

La distribución espectral de la energía o potencia radiante (SPD) contiene todos los datos físicos básicos de la luz y sirve como punto de partida para el análisis cuantitativo de color y puede ser medida por un espectrofotómetro.

Desde el SPD tanto la luminancia como la cromaticidad de un color pueden ser derivadas para describir con precisión el color en el sistema CIE.

Un ejemplo de aplicación práctica de la distribución espectral de la potencia radiante: al comprar una prenda de ropa en el interior de una tienda, y al salir comprobamos que su color parece diferente a la luz del día. Estos efectos pueden ser cuantificados en términos de la *distribución espectral de la potencia* de la luz bajo las diferentes circunstancias.

La *distribución espectral de la potencia radiante* de la luz es una función radiométrica, su conversión en una magnitud fotométrica y colorimétrica involucra el término  $V(\lambda)$ , *función de luminosidad o eficiencia luminosa espectral relativa*.



### Densidad espectral de una magnitud D

La densidad espectral de una magnitud D se suele simbolizar como  $D(\lambda)$  y se define como la cantidad de D por unidad de longitud de onda. Matemáticamente puede expresarse de la siguiente forma:

$$D(\lambda) = \frac{dD}{d\lambda}$$

Generalmente la forma de medir densidades espectrales o aproximaciones a ellas es usando espectrofotómetros o espectrorradiómetros de banda estrecha.

Si se conoce el valor de  $D(\lambda)$  en cada uno de los puntos de una banda de valores de longitud de onda comprendidos entre  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  (figura I-17), la magnitud D en esa zona de espectro se calcula sumando las energías correspondientes a cada una de las frecuencias en esa banda:

$$D = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} D(\lambda) d\lambda$$

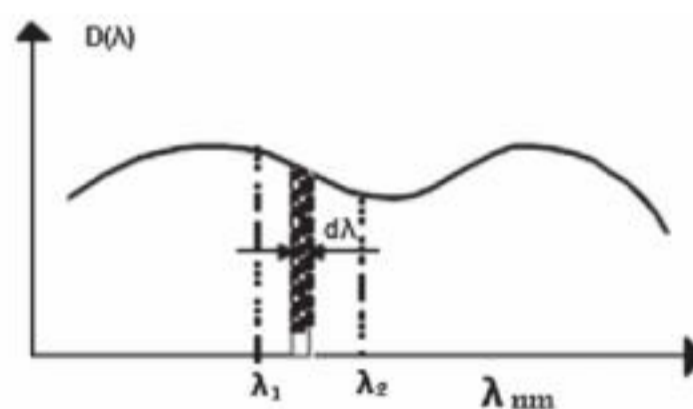


Figura I-17.

El valor de la magnitud total D será el que resulte de efectuar la integración entre las longitudes de onda.

Magnitud radiométrica	Unidad	Magnitud fotométrica	Unidad
Energía radiante ( $Q_e$ )	Julio (J)	Energía luminosa ( $Q_v$ )	Lumen/s (lm/s)
Flujo o potencia radiante ( $P_e, \Phi_e$ )	Vatio (W)	Flujo luminoso ( $P_v$ )	Lumen (lm)
Intensidad radiante ( $I_e$ )	Vatios/estereorradián W/sr	Intensidad luminosa ( $I_v$ )	Candela (lm/sr)
Irradiancia ( $E_e$ ) o Exitancia radiante ( $M_e$ )	W/m <sup>2</sup>	Iluminancia ( $E_v$ )	Lux (lm/m <sup>2</sup> )
Radiancia ( $L_e$ )	W(sr·m <sup>2</sup> )	Luminancia ( $L_v$ )	cd/m <sup>2</sup>

Tabla I-2. Cuando una magnitud radiométrica se considera para una radiación monocromática (en función de su longitud de onda,  $\lambda$ ) se les debe denotar por el mismo nombre seguido por la palabra *espectral* y por el mismo símbolo seguido por  $\lambda$  entre paréntesis. Es el intervalo de longitudes de onda,  $\Delta\lambda$ , cuando se toma el límite de  $\Delta\lambda \rightarrow 0$ , se obtiene la magnitud "espectral" correspondiente (equivalente a considerar la magnitud correspondiente en un haz monocromático de radiación).

### FOTOMETRÍA

Estudia la radiación visible del espectro, la que puede estimular el ojo humano y percibir el sistema visual. Fotometría trata de la medición cuantitativa de la energía luminosa emitida por una fuente o reflejada por una superficie que llega al ojo humano o a un detector.

#### Medida de la sensibilidad luminosa visual (curva de luminosidad relativa o función de luminosidad, $V(\lambda)$ ).

El ojo humano es sensible únicamente a las radiaciones comprendidas entre 380 y 780 nm de longitud de onda, y no es igual de sensible a todas las longitudes de ondas, su sensibilidad es máxima para 555 nm (verde-amarillento) descendiendo hacia los extremos (violeta y rojo). Una placa fotográfica es más sensible a la radiación azul y ultravioleta que el ojo humano.

La intensidad luminosa recibida por el ojo humano no debería ser diferente de la intensidad radiante emitida por un radiador, sin embargo, cuando se intenta realizar medidas sobre



intensidad luminosa (brillo) que recibe el ojo se presentan dificultades, ya que para una misma intensidad radiante, las distintas longitudes del espectro visible producen distintas sensaciones de "brillo".

Se supone que el ojo humano es un detector homogéneo: con detección ecualizada del brillo (B, brightness) o radiancia (magnitud radiométrica). El brillo es una magnitud para la percepción visual que tiene una correspondencia con la luminancia (magnitud fotométrica).

Para salvar estas diferencias, la CIE realizó numerosos experimentos, en cuanto a la sensación del brillo percibido por distintos observadores, para una misma intensidad radiante en distintas longitudes de onda (distintos colores). El resultado obtenido se conoce como *eficiencia luminosa del observador estándar*, y muestra que la sensación de brillo es máxima para los colores centrales del espectro (amarillo y verde), y que esta sensibilidad decrece rápidamente para los colores extremos (violeta y rojo).

*Observador fotométrico patrón CIE:* Observador ideal cuya curva de sensibilidad relativa espectral coincide con la función de luminosidad  $V(\lambda)$  para la visión fotópica, o la función  $V'(\lambda)$  para la visión escotópica, y que cumple la ley de adición, implicada en la definición de flujo luminoso.

La representación gráfica de la sensación subjetiva de brillo para los distintos colores se denomina *curva de luminosidad relativa o función de luminosidad* (figura I-18).

En esta curva puede verse que la sensibilidad máxima corresponde a la radiación de 555 nm de longitud de onda (zona del verde-amarillo), y como tiende asintóticamente a cero a ambos lados del máximo. La escala de ordenadas se ha tomado igual a la unidad para el máximo de la curva. El valor de la ordenada para cada longitud de onda se denomina *coeficiente de luminosidad relativa*.

Como consecuencia de lo anterior, cuando el flujo radiante, la intensidad radiante o la densidad de radiación se refieren a la zona visible del espectro, se utilizan magnitudes especiales afectando los anteriores valores por el coeficiente de luminosidad relativa. Por ejemplo, si se tienen tres fuentes luminosas roja R, verde G y azul B, cuyas densidades de radiación respectivas son de igual valor (H), la que parece más luminosa es la verde, después la roja y, finalmente, la azul. Si queremos expresar la sensación que produce cada una mediante una magnitud que denominaremos L, la densidad H debe estar afectada por un factor de corrección (coeficiente de luminosidad relativa) para que corresponda con la sensación que produce. Estas densidades ponderadas serían:

$$\begin{aligned}L_g &= H \cdot 0,715 \\L_r &= H \cdot 0,213 \\L_b &= H \cdot 0,072\end{aligned}$$

Con este tipo de magnitudes ponderadas debe tenerse en cuenta, para que la información sea completa desde el punto de vista físico (objetivo), que además del valor de la magnitud es preciso

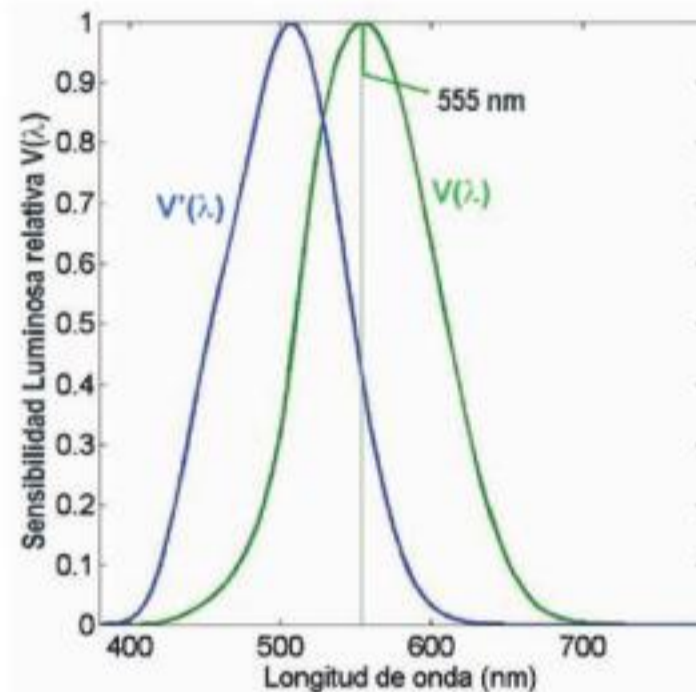


Figura I-18. Eficiencia luminosa espectral relativa  $V(\lambda)$  o función de luminosidad, para una radiación monocromática de longitud de onda  $\lambda$  en condiciones de visión fotópica y escotópica. También llamada curva de sensibilidad luminosa relativa (de una radiación monocromática de longitud de onda  $(\lambda) = V(\lambda)$  para visión fotópica (verde);  $V'(\lambda)$  para visión escotópica (azul); normalizadas a 1).



informar de la longitud de onda de referencia (en el ejemplo, las longitudes de onda de las fuentes R, G y B).

Posiblemente el primer hito más importante para la Colorimetría fue el acuerdo tomado por la CIE en la 16.<sup>a</sup> reunión general, celebrada en Ginebra en 1924 que definió el Observador fotométrico estándar UNE\_1 para la visión fotópica, mediante una curva de sensibilidad espectral que coincide con la función de luminosidad en valores relativos. La eficiencia luminosa espectral relativa es el cociente de los flujos radiantes de dos radiaciones, que producen la misma sensación luminosa, siendo el denominador la radiación de máxima eficacia.

El gran desarrollo de la Radiometría hizo que el Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM) en 1977 fijara el valor máximo de la **eficacia luminosa**,  $K_m = 683 \text{ lm W}^{-1}$ , para una radiación de frecuencia  $540 \times 10^{12} \text{ Hz}$  (que equivale a una  $\lambda = 555 \text{ nm}$  en el aire), para visión fotópica.

Quedaba de esta manera definida la **eficiencia luminosa**,  $V(\lambda) = K(\lambda)/k_m$ , como parámetro adimensional. Tuvo una gran trascendencia pues se abandonó el cuerpo negro del crisol de platino como patrón.

Una vez fijado el valor de  $K_m$ , se dio una nueva definición de candela en la 16.<sup>a</sup> Conferencia General de Pesas y Medidas en 1979.

La  **$V(\lambda)$  función de luminosidad** (*luminosity function or luminous efficiency function*) es una medida de la respuesta luminosa del ojo a longitudes de onda individuales del espectro. La CIE la denota como **función de eficiencia luminosa espectral**. Describe la sensibilidad media del ojo humano a diferentes longitudes de onda, cuya sensibilidad varía con la longitud de onda de la radiación visible.

Bajo condiciones fotópicas una luz monocromática de 555 nm (color verde) con un flujo radiante de 1W, genera un flujo luminoso de 683,002 lm, que se corresponde con la máxima respuesta del ojo humano. A los 555 nm se les atribuye una sensibilidad **unidad**. Por otro lado, el mismo flujo de radiación genera en las gamas de frecuencias de menor sensibilidad unos flujos luminosos más pequeños, de acuerdo con la curva  $V(\lambda)$ , indicadas en la figura I-18.

Se puede utilizar para convertir la energía radiante en energía luminosa (es decir, visible). Asimismo, constituye el formato central de las funciones de igualación de color (*color matching function*). Precisamente en el sistema CIE 1931, XYZ, los valores de  $\bar{y}(\lambda)$  se hicieron coincidir con los de  $V(\lambda)$ .

### **Potencia luminosa o flujo luminoso $P_v$ , $\Phi_v$**

En fotometría, flujo luminoso o potencia luminosa son la medida de la potencia de la luz percibida. Difiere del flujo radiante, la medida de la potencia luminosa total emitida, en que está ajustado para la sensibilidad del ojo humano.

Potencia luminosa es la variación de la energía luminosa en la unidad de tiempo.

$$P_v = \frac{dQ_v}{dt} \quad \begin{array}{l} \text{Ecuación del flujo luminoso} \\ Q_v \text{ es la energía luminosa} \end{array}$$

Magnitud derivada del flujo radiante  $\phi_e$  por valoración de la radiación de acuerdo con su efecto sobre un observador fotométrico patrón CIE, para visión fotópica:

$$\Phi_v = K_m \int_0^{\infty} \frac{d\phi_e(\lambda)}{d\lambda} V(\lambda) d\lambda$$



Donde

$$\frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda}$$

Es la distribución espectral del flujo radiante.

Su símbolo es  $\Phi_v$ ,  $F$ ,  $f_v$ ,  $P_v$  y su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es el *lumen* (lm). 1 lumen = 1 cd · estereorradián.

La razón entre el flujo luminoso total y el flujo radiante se llama la *eficacia luminosa*.

Eficacia luminosa de una radiación: cociente entre el flujo luminoso  $f_v$  y el correspondiente flujo radiante  $f_e$ .

$$k = f_v / f_e \Rightarrow f_v = k \cdot f_e$$

Símbolo: K; Unidad: lm.W<sup>-1</sup>

En la valoración del flujo luminoso se efectúa mediante la ponderación de la energía en cada longitud de onda, que representa la respuesta del ojo a diferentes longitudes de onda en la banda visible.

Se establece la relación de que un vatio de longitud de onda 555 nm (que es donde se produce el máximo de respuesta del ojo) provoca una potencia luminosa de 683 lúmenes. Ese mismo vatio, para otra longitud de onda, a la hora de convertirse a lúmenes ha de multiplicarse por 683 y por el valor de la curva patrón de luminosidad correspondiente a esa longitud de onda.

$$P_v = 683 \cdot V(\lambda) \cdot P_e$$

Si se conoce la densidad espectral de potencia radiante y queremos conocer la potencia luminosa comprendida entre dos longitudes de onda determinadas, aplicamos el concepto anterior y llegaremos a la expresión:

$$P_v = 683 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Así, para cualquier punto de luz, si  $P_v$  representa el flujo luminoso,  $\Phi(\lambda)$  simboliza la potencia radiante espectral del punto de luz en cuestión y  $V(\lambda)$  la función de luminosidad, se tiene:

$$P_v = 683 \int_{\lambda_{\text{visible}}} \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

La potencia luminosa es la potencia radiante evaluada por su capacidad para producir sensaciones visuales en el ojo. Por tanto, se puede deducir que solo una parte de la energía radiante que llega al ojo produce impresión visual y esta es la comprendida entre las longitudes de onda de 380 y 780 nm.



Otra expresión del flujo luminoso:

$$P_v = \Phi_v = K_m \int_{380}^{780} P_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

Donde  $K_m$  es la eficacia luminosa para la visión fotópica.

Al flujo radiante que se corresponde con el transportado con las ondas electromagnéticas, cuyas longitudes de onda están comprendidas en el intervalo de las ondas visibles (luminosas) se le llama **Flujo luminoso**.

Consideremos dos bombillas, una de 25 W y otra de 60 W. Está claro que la de 60 W dará una luz más intensa. Cuando hablamos de 25 W o 60 W nos referimos solo a la potencia consumida por la bombilla, de la cual solo una parte se convierte en luz visible, es el llamado flujo luminoso.

El flujo luminoso se mide en lúmenes (lm), simbolizándose por  $P_v$ . El lumen no se corresponde de forma simple con un número determinado de vatios, puesto que los mismos vatios producirán más o menos lúmenes dependiendo de la longitud de onda de la radiación, ya que unas frecuencias producen más sensación que otras sobre el ojo.

No toda la luz emitida por una fuente llega al ojo y produce sensación luminosa. Para evaluar la energía lumínica se definen las siguientes magnitudes: la intensidad luminosa, la iluminancia, la luminancia, el rendimiento o eficiencia luminosa y la cantidad de luz.

### **Intensidad luminosa**

El flujo luminoso nos da una idea de la cantidad de luz que emite una fuente de luz, por ejemplo una bombilla, en todas las direcciones del espacio. Por contra, si pensamos en un proyector es fácil ver que solo ilumina en una dirección. Parece claro que necesitamos conocer cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio y para eso definimos la intensidad luminosa.

Se conoce como *intensidad luminosa* al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta. Una luminosidad de 1 lumen equivale al flujo emitido por un foco puntual de 1 candela de intensidad, en un ángulo sólido de 1 estereorradián.

Su símbolo es  $I$  y su unidad la *candela* (cd):  $cd = \text{lumen/sr}$

### **Intensidad luminosa (de una fuente, en una dirección dada):**

Cociente entre el flujo luminoso  $df_v$ , o  $d\Phi$  o  $dP_v$ , procedente de la fuente propagándose, y el elemento  $d\Omega$  de ángulo sólido en la dirección dada:

$$I_v = \frac{df_v}{d\Omega}$$

Símbolo:  $I_v, I$ ; Unidad:  $cd = \text{lm} \cdot \text{sr}^{-1}$

Un *estereorradián* es la unidad de ángulo sólido  $\Omega$  del Sistema Internacional equivalente a la abertura de un cono cuyo vértice se encuentra en el centro de una esfera de radio  $r$  y que delimita un casquete esférico de área igual a  $r^2$  sobre la superficie, o un área equivalente a la de un cuadrado cuyo lado es igual al radio de la esfera. Símbolo: sr.



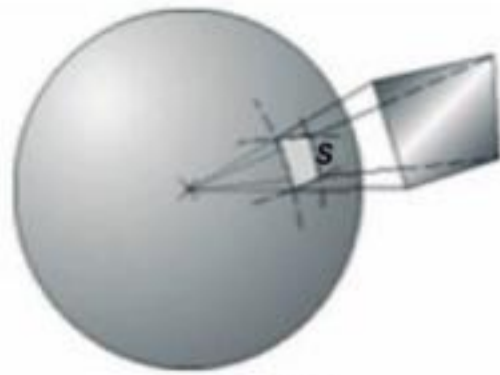
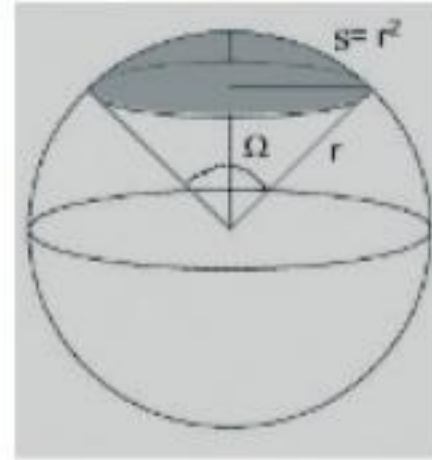


Figura I-19.



Representación de un estereorradián (sr).

Para calcular el ángulo sólido bajo el cual se ve un objeto desde un punto, se proyecta el objeto sobre una esfera de radio  $r$  conocido, centrada en el punto de vista. Si la superficie de la proyección del objeto sobre la esfera es  $S$ , el *ángulo sólido*  $\Omega$  bajo el cual se ve el objeto es, por definición:

$$\Omega = \frac{S}{r^2}$$

**Intensidad luminosa** se define como la cantidad de flujo luminoso, propagándose en una dirección dada, que emerge, atraviesa o incide sobre una superficie por unidad de ángulo sólido. Su unidad de medida en el Sistema Internacional de Unidades es la candela (cd), que es una unidad fundamental del sistema. Matemáticamente, su expresión es la siguiente:

$$I_v = \frac{dF}{d\Omega}$$

Donde:

$I_v$  es la intensidad luminosa, medida en candelas.

$F$  es el flujo luminoso, en lúmenes.

$d\Omega$  es el elemento diferencial de ángulo sólido, en estereorradianes.

La intensidad luminosa se puede definir a partir de la *magnitud radiométrica de la intensidad radiante* sin más que ponderar cada longitud de onda por la curva de sensibilidad del ojo. Así, si  $I_v$  es la intensidad luminosa,  $I(\lambda)$  representa la intensidad radiante espectral y  $V(\lambda)$  simboliza la curva de sensibilidad (función de luminosidad) del ojo, entonces:

$$I_v = K \int_{\text{visible}} I(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

**Tipos de fuentes.-** Se denomina *fente puntual* a aquella que emite la misma intensidad luminosa en todas las direcciones consideradas. Por el contrario, se denomina *fente o superficie reflectora lambertiana* a aquella en la que la intensidad varía con el coseno del ángulo entre la dirección considerada y la normal a la superficie (o eje de simetría de la fuente).

**Unidades:** Una *candela* se define como la intensidad luminosa de una fuente de luz monocromática de 540 THz que tiene una intensidad radiante de 1/683 vatios por estereorradián, o aproximadamente 1464 mW/sr. La frecuencia de 540 THz corresponde



a una longitud de onda de 555 nm, que se corresponde con la luz verde pálida de visión del ojo. Ya que hay aproximadamente 12,6 estereorradianes en una esfera, el flujo radiante total sería de aproximadamente 18,40 mW, si la fuente emitiese de forma uniforme en todas las direcciones. Una vela corriente produce con poca precisión una candela de intensidad luminosa.

En 1979, en la 16.<sup>a</sup> Conferencia General de Pesas y Medidas, se estableció la Unidad de Intensidad Lumínica: la *candela* es la intensidad luminosa, en una dirección dada, de una fuente que emite una radiación monocromática de frecuencia  $540 \times 10^{12}$  hercios y cuya intensidad energética en dicha dirección es  $1/683$  w por estereorradián.

**Iluminancia.** Iluminación (lux).

El concepto fotométrico más importante desde el punto de vista práctico es la iluminación E, que representa el flujo luminoso recibido por unidad de superficie.

Se define *iluminancia* como el flujo luminoso recibido por una superficie. Su símbolo es E y su unidad el **lux (lx)**, que es un  $\text{lm}/\text{m}^2$ . **Lux** = lumen/m<sup>2</sup>

Iluminancia:  $E = \phi/S$

La iluminación sobre la superficie de la Tierra en un día muy claro y en un país mediterráneo, llega a ser de unos 130 000 luxes.

La iluminancia recibida por una superficie depende de la *ley inversa del cuadrado de la distancia*, que relaciona la intensidad luminosa (I) y la distancia a la fuente (r). Esta ley solo es válida si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie.

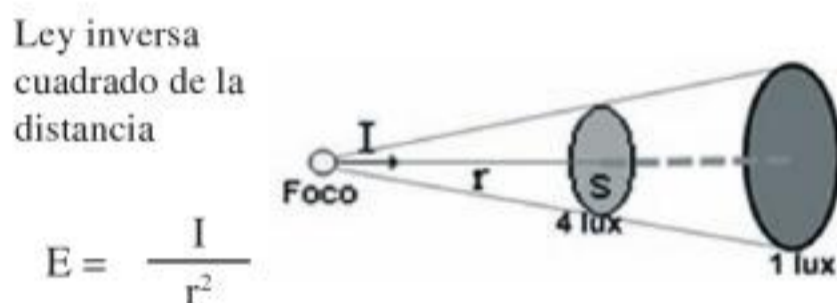


Figura I-20a.

¿Qué ocurre si el rayo no es perpendicular? En este caso hay que descomponer la iluminancia recibida en una componente horizontal y en otra vertical a la superficie.

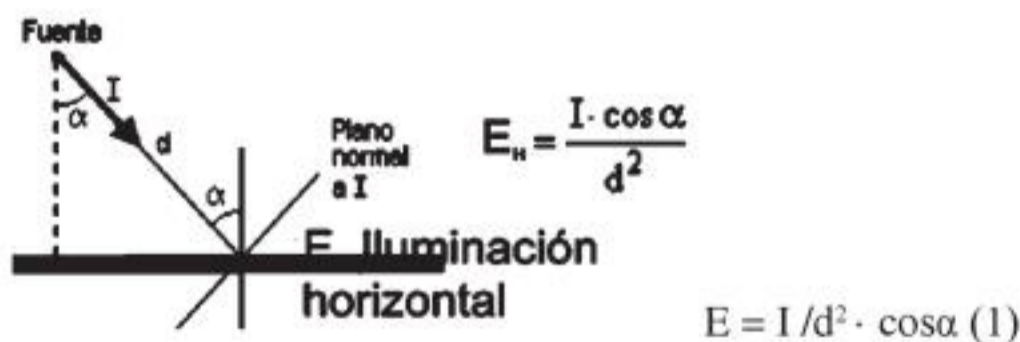


Figura I-20b

A la componente horizontal de la iluminancia ( $E_n$ ) se le conoce como la *ley del coseno*. Es fácil ver que si  $\alpha = 0$  nos queda la ley inversa del cuadrado de la distancia.

La ecuación anterior (1) constituye la **primera ley de Lambert**: la iluminación E por un foco puntual es directamente proporcional a la intensidad I de dicho foco, inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, y directamente proporcional al coseno del ángulo de incidencia. Esta ley permite definir patrones para I, y por consiguiente también para  $\alpha$ .





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



Esta aparentemente extraña definición, que equivale a la enunciada anteriormente, se realizó con intención de que resultase equivalente a la anterior basada en el patrón bujía, pero mediciones posteriores demostraron que era ligeramente inferior.

**Luminancia (L) de una superficie en una dirección determinada** es la relación entre la intensidad luminosa en dicha dirección y la superficie aparente vista por el ojo en dicha dirección.

$$L = \frac{I}{S_{\text{aparente}}} = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha}$$

La luminancia es una medida fotométrica de la intensidad luminosa proveniente o reflejada de una unidad de superficie en una dirección dada. Describe la cantidad de luz que pasa a través o se emite desde una zona determinada, y corresponde a un determinado ángulo sólido.

1) Luminancia según una dirección dada y en un punto determinado de una superficie real o ficticia:

En Fotometría, la luminancia se define como la densidad angular y superficial de flujo luminoso que incide, atraviesa o emerge de una superficie siguiendo una dirección determinada. También se puede definir como la densidad superficial de intensidad luminosa en una dirección dada.

La magnitud de la luminancia se formaliza con la expresión siguiente:

$$L_v = \frac{d^2F}{dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega}$$

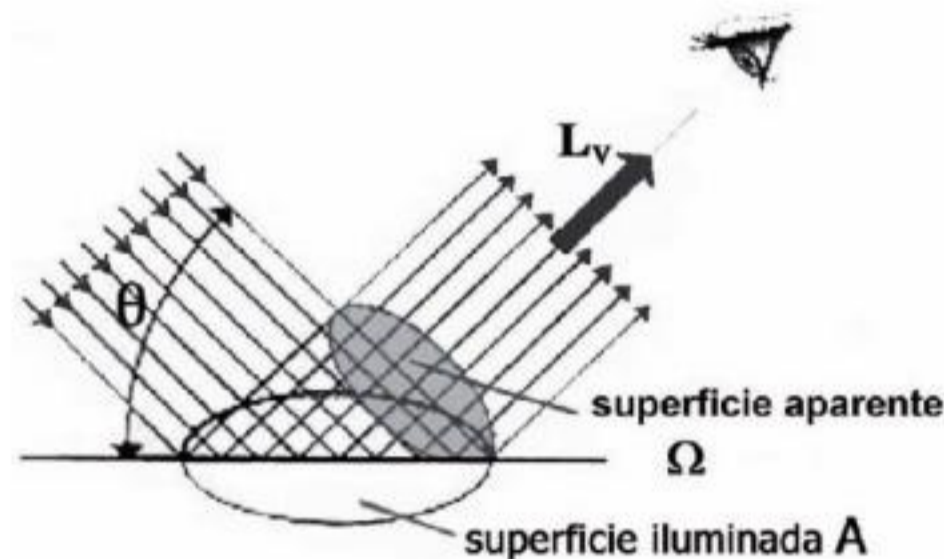


Figura I-21.

Donde:

$L_v$  es la luminancia, medida en candelas/metro<sup>2</sup>,

$d^2F$  es el flujo luminoso o potencia luminosa transmitida por un haz elemental que pasa por el punto dado y se propaga según un ángulo sólido  $d\Omega$  elemental que contiene a la dirección dada del haz, medido en lúmenes. (Véase anexo de matemáticas al final del libro, derivadas  $d^2$ ).

$d\Omega$  es el elemento de ángulo sólido, en estereorradianes.

$dA$  es el elemento de superficie considerado, en metros<sup>2</sup>, es el área de una sección de este haz que incluye al punto considerado.

$\theta$  es el ángulo formado por la normal a esa sección y la dirección del haz.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



- **La capa radiante**, circunda al núcleo; contiene un gas tan denso que los fotones o radiación electromagnética provenientes del núcleo tardan cientos de miles de años en atravesar para poder llegar a la superficie del Sol. La energía generada en el núcleo se difunde a través de la zona radiante por absorción y emisión atómica. Las temperaturas en esta región alcanzan los 130 000 K. Esta zona está localizada a una distancia entre 160 000 km y 485 000 km del centro solar.
- **Zona convectiva**, es una región con mucha agitación donde circula el plasma y los gases ascienden muy calientes, se enfrían y descienden. Esta circulación es el principal mecanismo de transferencia de energía a la superficie solar. Estos procesos convectivos son observados en la superficie del Sol como pequeños gránulos y supergránulos en forma de celdas de 3000 km de radio.
- **La fotosfera** es la superficie visible del Sol; rodea la zona convectiva; posee un espesor de aproximadamente 300 km, es gaseosa y de baja densidad ( $10^{-8}$  g/cm<sup>3</sup>). Sus gases están fuertemente ionizados y con la capacidad de absorber y emitir radiación. La mayor parte de la radiación solar que nos llega proviene de esta capa, su temperatura es cercana a los 5800 K. En esta zona se observan áreas oscuras llamadas manchas solares, las cuales son las partes más frías de la superficie con temperaturas de 3800 K. Su tamaño es similar al de un planeta; allí se presentan intensos rizos magnéticos.
- **La cromosfera**, que está justo sobre la fotosfera, es una fina región de gas que se observa con un color rojizo-anaranjado, de unos 10000 km de espesor. Es esencialmente transparente a la radiación emitida desde la fotosfera.
- **La corona** es la tenue atmósfera exterior compuesta de un halo, el cual solo se ve durante los eclipses totales de sol.

El sol es muy estable, gracias a ello la temperatura en la Tierra es relativamente constante, condición que permanecerá inalterable por mucho tiempo respecto a la escala de la vida humana. Ha cambiado muy poco en los últimos tres mil millones de años y se estima que no cambiará mucho en los próximos tres mil millones. Por esta razón se considera que su radiación es una fuente inagotable de energía.

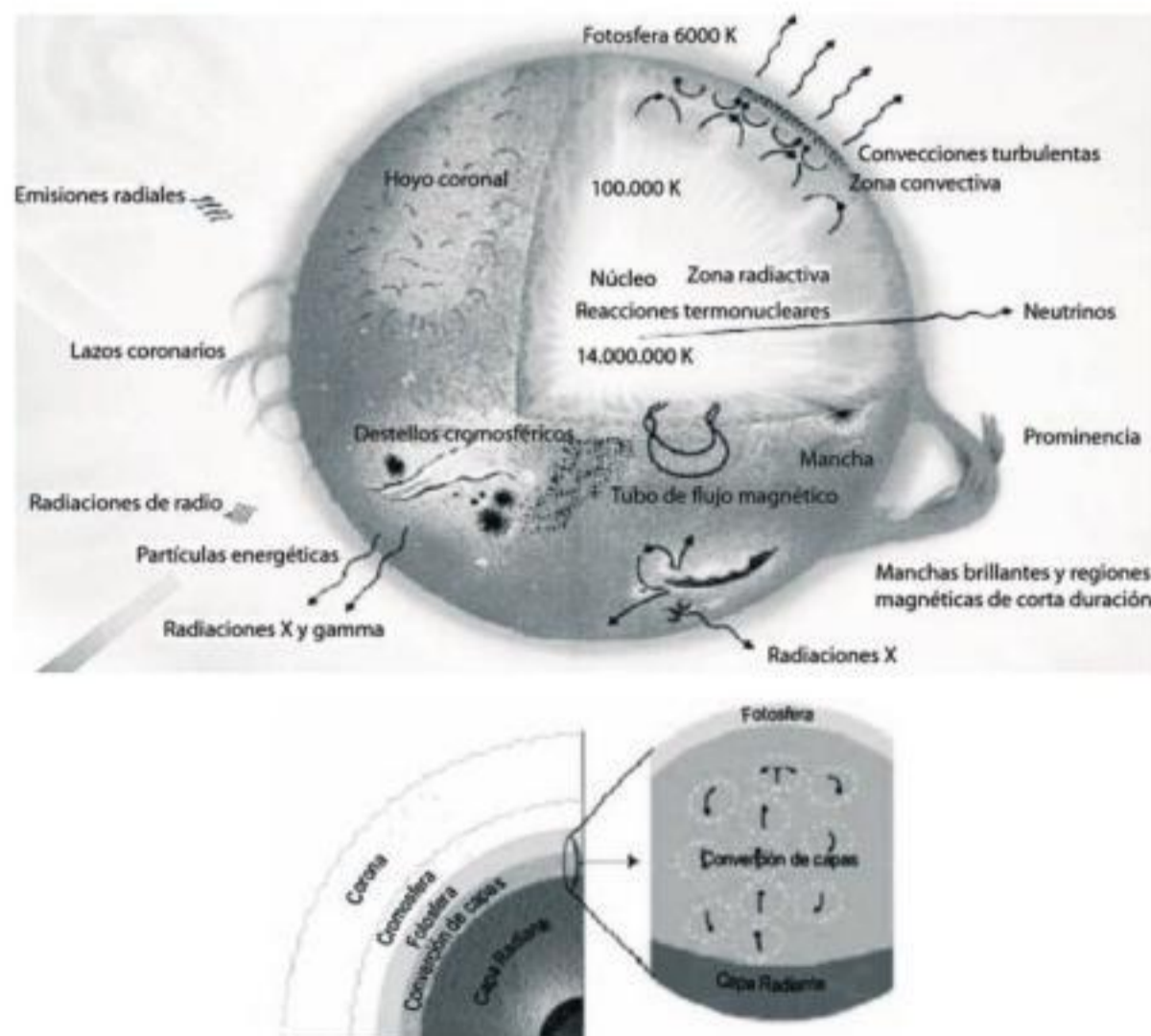


Figura I-22. Estructura del sol.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



## RADIACIÓN SOLAR

Se conoce por *radiación solar* al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La radiación del Sol se propaga radialmente en el espacio vacío y su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia. Debido a que la densidad de partículas en el espacio es muy pequeña ( $10^{-8} \text{ Kg/m}^3$ ), la radiación solar prácticamente no interactúa con la materia en su recorrido hasta la capa exterior de la Tierra. El Sol puede considerarse de manera simplificada como un cuerpo negro, emite energía siguiendo la ley de Planck a una temperatura de unos 5762 K. A esta temperatura el Sol emite energía que se propaga por el espacio a la velocidad de la luz y recorriendo la distancia media Sol-Tierra en 8 minutos 18 segundos. La energía solar que ingresa a la Tierra representa su principal fuente energética; el Sol proporciona el 99,7 % de la energía usada para todos los procesos naturales.

La cantidad de energía de los fotones es menor o mayor según la longitud de la onda electromagnética. La energía de los fotones de las ondas largas, como las de radio y televisión, es muy pequeña. En cambio, la energía de los fotones de las ondas muy cortas, como los rayos X, es grande.

La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. No toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, pues las ondas ultravioletas, más cortas, son absorbidas por los gases de la atmósfera, fundamentalmente por el ozono. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la energía por unidad de tiempo y área, que alcanza a la Tierra. Su unidad es el  $\text{W/m}^2$  (vatio por metro cuadrado).

### Generación de la radiación solar

En las regiones interiores del sol ocurren reacciones nucleares que producen su energía calórica hasta temperaturas de unos 20 millones de grados. La capa más externa, que es la que produce casi toda la radiación observada, es la fotosfera y tiene una temperatura de unos 6000 K. Tiene solo una anchura de entre 200 y 300 km. En ella puede haber emisión de energía por cortas longitudes de onda como las de rayos X y por largas longitudes de onda, destacando que no es la emisión igual cuando el Sol está en calma que activo. Además, la cromosfera y corona absorben y emiten radiación, que se superpone a la principal fuente, que es la fotosfera.

### Distribución espectral de la radiación solar

La radiación se puede dividir en tres bandas.

Banda ultravioleta: Longitud de onda inferior a  $0,40 \mu\text{m}$  (micrómetros o micras).

Banda visible: Longitud de onda entre  $0,40 \mu\text{m}$ .  $0,70 \mu\text{m}$ .

Banda infrarroja: Longitud de onda superior a  $0,70 \mu\text{m}$ .

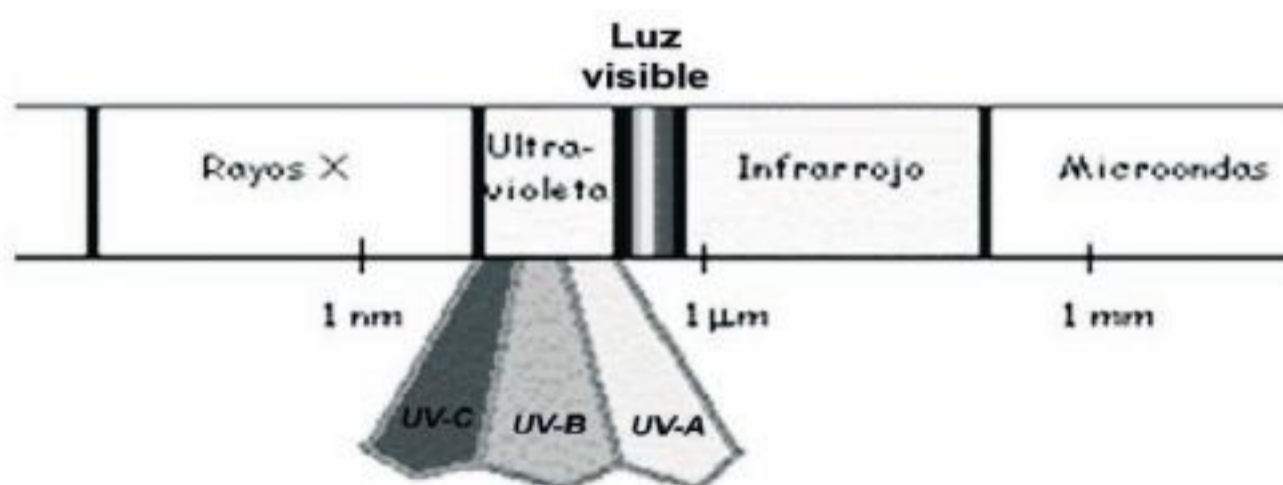


Figura I-24. Bandas de radiación solar





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



***Efectos sobre la salud***

La exposición exagerada a la radiación solar puede ser perjudicial para la salud. Esto está agravado por el aumento de la expectativa de vida, que condiciona a permanecer más tiempo expuesta a las radiaciones solares a la población mundial, con el riesgo mayor de cáncer de piel.

La radiación ultravioleta es emitida por el Sol en longitudes de onda que van aproximadamente desde los 150 nm, hasta los 400 nm, en las formas UV-A, UV-B y UV-C; pero a causa de la absorción por parte de la atmósfera terrestre, el 99 % de los rayos ultravioletas que llegan a la superficie de la Tierra son del tipo UV-A. Ello nos libra de la radiación ultravioleta más peligrosa para la salud. La atmósfera ejerce una fuerte absorción que impide que la atraviese toda radiación con longitud de onda inferior a 290 nm. La radiación UV-C no llega a la Tierra porque es absorbida por el oxígeno y el ozono de la atmósfera, por lo tanto no produce daño. La radiación UV-B es parcialmente absorbida por el ozono y llega a la superficie de la Tierra, produciendo daño en la piel. Ello se ve agravado por el agujero de ozono que se produce en los polos del planeta.

*Precauciones necesarias para observar el Sol:* No mirar nunca directamente al Sol sin la debida protección, puede causar lesiones y quemaduras graves en los ojos e incluso la ceguera permanente.

Las gafas de sol, filtros hechos con película fotográfica velada, polarizadores, gelatinas, CD o cristales ahumados no ofrecen la suficiente protección a los ojos.

***Importancia de la energía solar en la Tierra***

La mayor parte de la energía utilizada por los seres vivos procede del Sol, las plantas la absorben directamente mediante la fotosíntesis (la luz solar es un factor fundamental en el proceso de fotosíntesis, se fija el carbono que será el nutriente de los seres vivos), tan importante para la vida. Los herbívoros absorben una parte indirectamente de esta energía comiendo las plantas, y los carnívoros absorben indirectamente una cantidad más pequeña comiendo a los herbívoros.

El uso directo de energía solar no está aún muy extendido, los mecanismos actuales no son suficientemente eficaces.

La mayoría de las fuentes de energía usadas por el hombre derivan indirectamente del Sol, ¡desafortunadamente!, ya que el Sol podría subvenir las necesidades energéticas humanas si se aprovechara toda la radiación que nos llega. Los combustibles fósiles preservan energía solar capturada hace millones de años mediante fotosíntesis, la energía hidroeléctrica usa la energía potencial del agua que se condensó en altura después de haberse evaporado por el calor del Sol, etc.

En el interior del Sol se producen continuas reacciones termonucleares. De este modo, el Sol convierte cada segundo unos 564 millones de toneladas de hidrógeno en 560 millones de toneladas de helio, lo que significa que unos cuatro millones de toneladas de materia se transforman en energía solar, una pequeña parte de la cual llega a la Tierra y sostiene la vida.

***BIBLIOGRAFÍA***

1. Burrell i Floria, Guillen (director). Gran Larousse Universal. Edición española Plaza & Janes SA, Barcelona, 1983. ISBN: 84-01-61100-8.
2. Capilla, P.; Artigas, J. M.; Pujol, J. Fundamentos de Colorimetría. Universidad de Valencia, 2002. ISBN 84-370-5420-6.
3. Castillo Martínez de Olcoz, Ignacio Javier. Sentido de la luz, El. Ideas, mitos y evolución de las artes y los espectáculos de la luz hasta el cine: 1.ª Parte: 1. 4. El simbolismo de la luz. 83-104. 2.ª parte: La luz en las bellas artes. 2. 2. La luz pintada. 2.3 La luz inspirada,



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



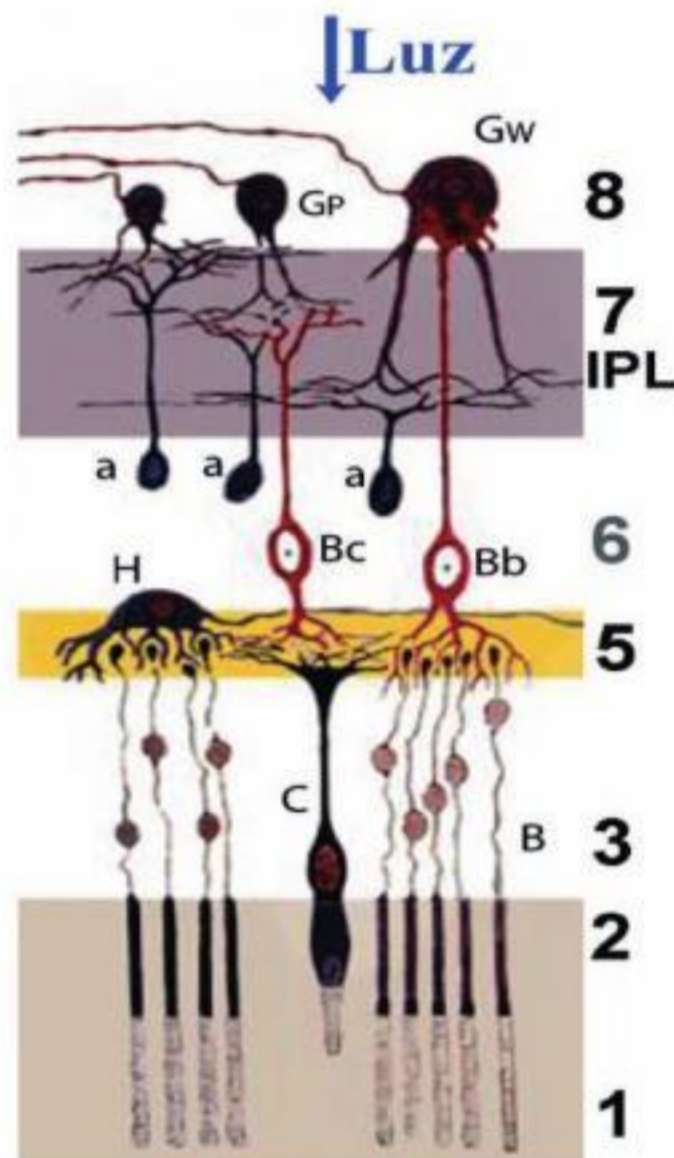
You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



Los conos son convencionalmente etiquetados de acuerdo al orden de las longitudes de onda de los picos de su sensibilidad espectral: cono S, cono M y cono L, tipos de conos, a veces también se les denomina conos: azul (S), verde (M) y rojo (L).

A pesar de que el cono L es designado como el cono rojo, microespectrofotométricamente se ha demostrado que la sensibilidad en su punto máximo se halla en la región amarilla del espectro.

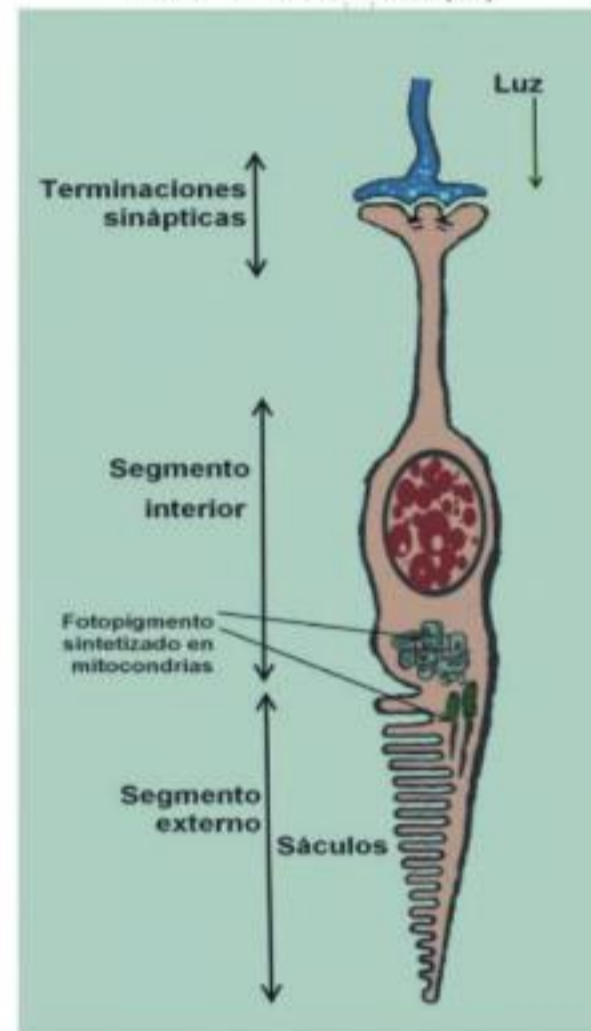
Del mismo modo, los conos S y M no corresponden exactamente al color azul y verde, aunque se describen como tales.



Sobre la capa 1 (epitelio pigmentario) se apoyan los conos (C) y bastones (B), capa 2 (fotorreceptores) y capa 3 (limitante externa); sus núcleos forman la capa 4 (nuclear externa). En la capa plexiforme externa 5 (amarillo), es donde hacen sinapsis C y B con las células bipolares (Bc y Bb), sus núcleos forman la capa 6 o nuclear interna, junto con las células horizontales (H) y amacrinas (a). En la capa 7 plexiforme interna hacen sinapsis las células ganglionares (capa 8) con las células bipolares. Las dos últimas capas están formadas por las fibras nerviosas que parten de las células ganglionares (axones) y la membrana limitante externa.

CAPAS DE LA RETINA SEGÚN CAJAL.

Estructura del cono (C)



El segmento externo del cono contiene pilas de discos membranosos por repliegue, donde se deposita el fotorreceptor (las opsinas de los conos son diferentes entre sí y diferentes a la opsina de la rodopsina de los bastones). Aunque los máximos de absorción de los tres tipos de fotorreceptores de los conos son a longitudes de onda próximas al violeta, verde y amarillo, se hace referencia a ellos como pigmentos azul, verde y rojo. El fotorreceptor una vez transformado en los segmentos externos de los conos y bastones puede ser reutilizado mediante fagocitación de los extremos del segmento externo por las células del epitelio pigmentario.

Figura II-5. Organización simplificada de la retina.

La retina es una pila de varias capas neuronales (figura II-5), la luz se concentra desde el ojo y pasa a través de estas capas (de arriba abajo) para alcanzar los fotorreceptores (abajo y un cono al lado). Esto provoca una transformación química que media la propagación de la señal de las células bipolares y las horizontales (capa plexiforme externa amarilla). La señal es entonces propagada a las células amacrinas y ganglionares. Estas neuronas, en úl-



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



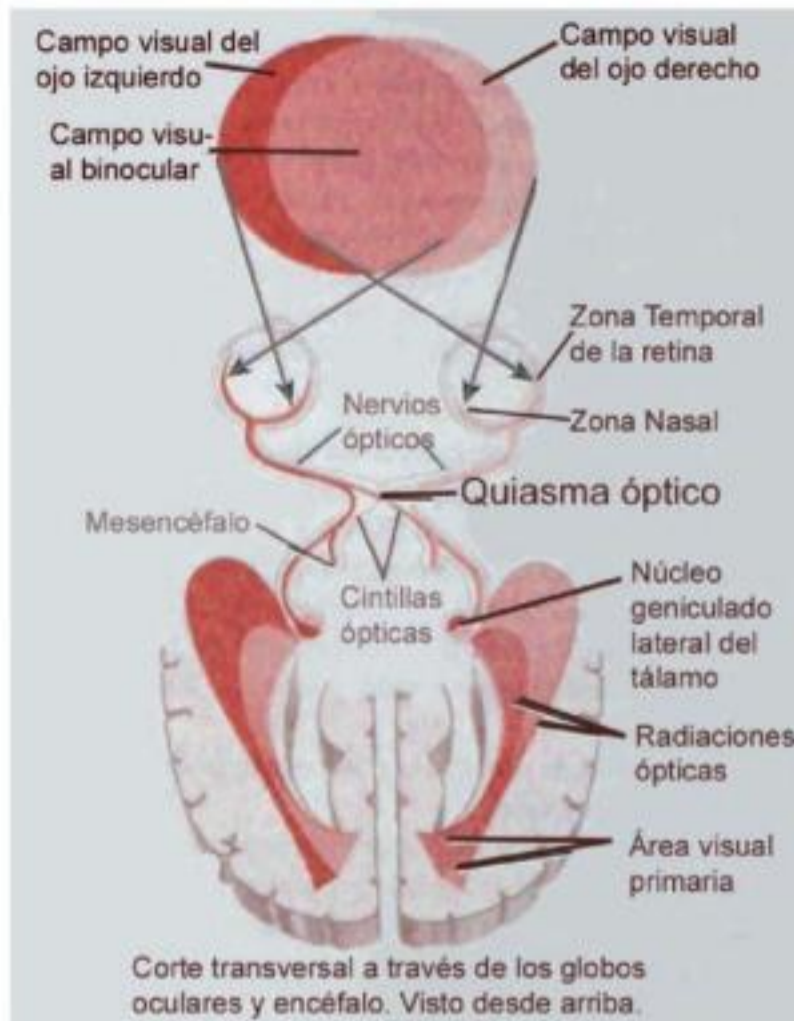


Figura II-7A. Vía visual.

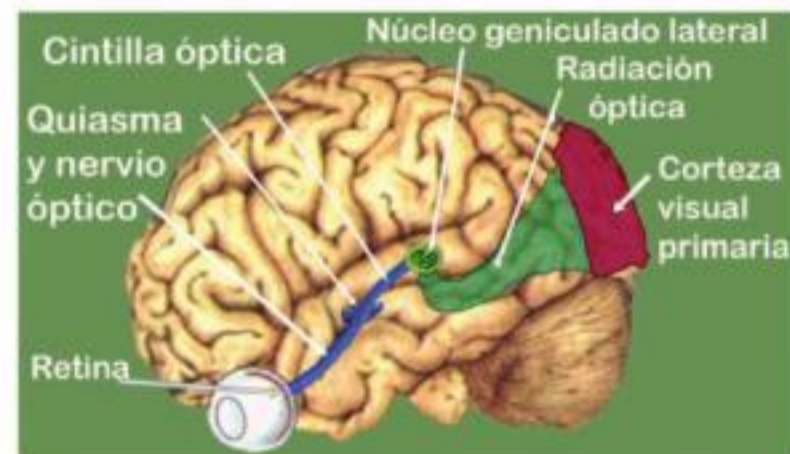


Figura II-7B. Cara externa hemisferio cerebral izquierdo. Esquema virtual transparente del recorrido de la vía visual.

El procesamiento del color comienza muy precozmente a nivel del sistema visual (incluso dentro de la retina), inicialmente a través de los mecanismos de inhibición lateral y de color oponente. Los mecanismos oponentes se refieren a la oposición entre efectos de color rojo-verde, azul-amarillo y claridad-oscuridad.

La luz atraviesa todas las estructuras del ojo (figura II-1), y llega hasta la capa más profunda los fotorreceptores, que descansan en la capa pigmentaria de la retina adyacente a la coroides. Los conos se estimulan según su fotopigmento y el tipo de ondas electromagnéticas que les lleguen. Estos transmiten estímulos a las células bipolares y estas a las células ganglionares. Solo las células ganglionares transmiten potenciales de acción, o sea, impulsos nerviosos.

## 5. CAMPOS RECEPTIVOS

**Campos receptivos de células bipolares.** La luz que alcanza la retina excita los fotorreceptores y de manera indirecta las células bipolares y ganglionares. La parte de campo visual que influye en la actividad de una célula ganglionar concreta (o de cualquier otra célula visual) se puede considerar su **campo receptivo**. Los campos receptivos de los fotorreceptores y de las neuronas retinianas determinan los campos receptores de las células ganglionares sobre las que converge su actividad. El campo receptivo de las células bipolares se compone de dos partes: un área circular de retina que recibe señales directas de los fotorreceptores, denominada *centro del campo receptivo*, y un área periférica de retina que recibe señales de las células horizontales, denominada *contorno o periferia del campo receptivo*.

Una célula bipolar que recibe estímulos de un fotorreceptor puede tener dos tipos diferentes de campo receptivo: A) campo receptivo de centro-on y B) campo receptivo de centro-off, ambos se describen con una organización en centro/contorno en la que la luz que incide sobre la región central del campo receptor excita o inhibe la célula, mientras que la luz que incide en la periferia o contorno que rodea a la porción central tiene el efecto inverso.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



## 7. NÚCLEO GENICULADO LATERAL

La información visual va a ser enviada a través del nervio óptico al quiasma óptico: un punto en el que los dos nervios ópticos se juntan y entrecruzan, la información de los campos visuales temporales que recogen las hemirretinas (nasales) de ambos ojos se cruzan. Después del quiasma óptico, los tractos de fibras visuales son referidos como cintilla óptica que entra en el tálamo y hace sinapsis en el NGL dorsal. En el NGL se separan en seis capas: a) Las *capas 1 y 2* se llaman *magnocelulares* (de células grandes) acromáticas o capas de células M. Reciben conexiones de células grandes ganglionares de la retina y envían conexiones a través de la cintilla óptica a la corteza visual formando una vía rápida acromática. b) Cuatro capas *parvocelulares* (de células pequeñas), *capas 3 a 6* cromáticas (células P). Reciben conexiones de células ganglionares retinianas que transportan color e información espacial precisa pero a velocidad de conducción no rápida. c) Un tercer tipo celular del NGL son las *células koniocelulares* intralaminares, se proyectan en los *blobs* de la corteza visual, se relacionan con el color.

Dentro de las capas de células P del NGL hay dos tipos de oponentes cromáticos: rojo frente a verde y azul frente a verde/rojo.

Desde el nervio óptico otras fibras se dirigen: 1) Al núcleo supraquiasmático del hipotálamo, para regular los ritmos circadianos que sincronizan cambios fisiológicos según noche-día. 2) Al núcleo geniculado lateral ventral del tálamo y regiones basales adyacentes del cerebro, se cree que estas fibras son para contribuir al control de algunas funciones conductuales (comportamiento, estado de ánimo, emociones), se analizará en el capítulo VIII.

El sistema visual, estudiado mediante tomografía por emisión de positrones, activa estructuras corticales: lóbulo occipital, corteza temporal inferior, corteza parietal temporal inferior, lóbulo frontal y amígdala; y subcorticales: cuerpo o núcleo geniculado lateral (NGL) del tálamo, pulvinar, putamen, núcleo caudado, colículo superior y claustró (ref.: Ganong, pág. 141, Fisiología médica).

### CORTEZA VISUAL

#### 1. Corteza estriada

Después de hacer sinapsis en el NGL, el tracto visual geniculoestriado continúa hacia la parte posterior del lóbulo occipital y finaliza en la capa IV de la **corteza visual primaria** o **área visual I (V1)**, también llamada *corteza estriada* (por su aspecto estriado a nivel microscópico), situada en la parte posterior del cerebro en el lóbulo occipital.

La corteza estriada se halla en un área a ambos lados de la cisura calcarina. Las fibras procedentes de la mácula terminan cerca del polo occipital, en un área amplia donde la fovea envía sus señales, que portan la mayor agudeza visual. Como en el NGL la corteza estriada contiene un mapa retinotópico (uno de cada ojo), la macula está representada por una zona mucho más amplia en comparación con el resto de la retina.



Figura II-11.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



## 2. Corteza extraestriada

Contribuyen otras áreas visuales llamadas *áreas visuales de asociación*, ocupan zonas de la corteza occipital laterales superiores e inferiores a V1, y se extienden a la corteza parietal, siguiendo el borde de la corteza V1 está el área de 18 de Brodmann, que es el destino de casi todas las señales del V1, por lo que a esta área se le denomina *área visual II o V2*. Hay otras áreas más alejadas que se denotan V3, V4, etc., que van analizando diversos aspectos de la imagen visual.

Incluyen varias vías del procesamiento cortical paralelo. *La vía P* participa en la *forma y el color*. Estructuras: capas 3 y 6 NGL, la capa IVCb de la corteza estriada, V4 (19 Brodmann) y algunas áreas de la región inferotemporal (IT). El procesamiento de la forma incluye patrones visuales complejos (rostros).

*La vía M* participa en el *movimiento*, estructuras: capas IVB y IVCa de la corteza estriada, y áreas TM (temporal medial) y TMS (temporal medial superior).

El área denominada TM parece recibir sus principales aportaciones de la vía M. Varias otras áreas, llamadas zonas 2, 3 y 4, reciben sus aportaciones de la vía P. La función de estas diferentes áreas es poco clara (Schiller y Lee, 1991). Células selectivas de color se han encontrado en las zonas 1, 2, 3 y 4 (Gouras Kruger, 1979), aunque Zeki (1993) ha sostenido que son mucho más numerosas en el área visual 4 (V4).

Tanto la vía P como la M contribuyen a la percepción de la profundidad.

*La contribución de las áreas extraestriadas (se conocen al menos doce) al sistema visual todavía se halla en debate.*

**Corrientes visuales cerebrales hipotéticas.** La información visual sale de V1 en el lóbulo occipital, se divide en dos “corrientes” principales de procesamiento visual, una corriente dorsal y otra ventral. La hipótesis fue propuesta originalmente por Leslie Ungerleider y Mortimer Mishkin en 1982. Sin embargo, trabajos recientes han cuestionado la validez de la hipótesis.

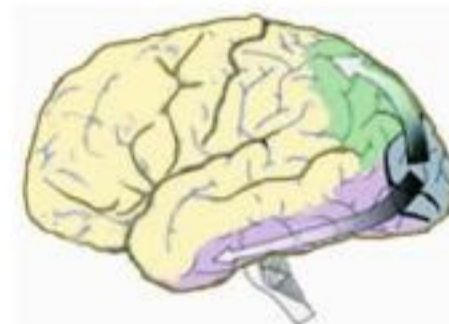
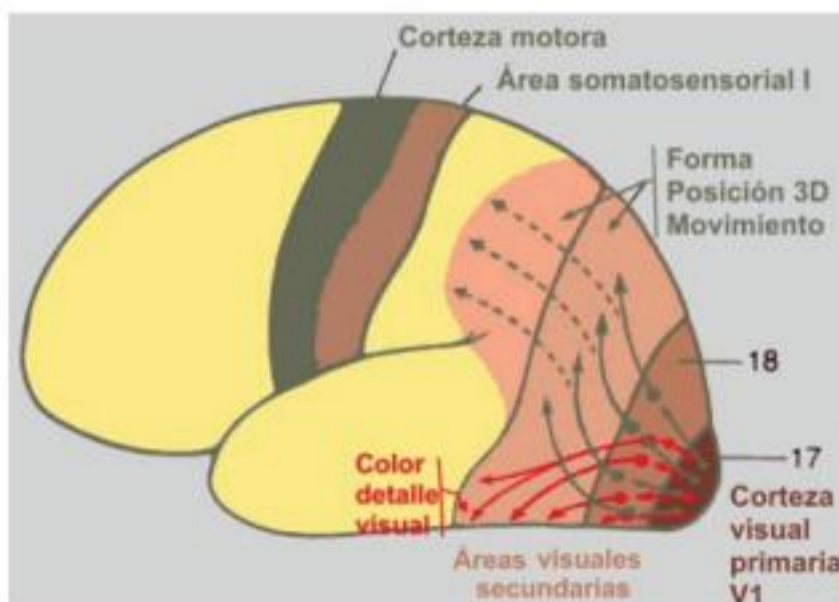


Figura II-15. Vías visuales en el cerebro humano. La corriente ventral (morado) es importante en el reconocimiento de colores. El flujo dorsal (verde). Ambos son proyecciones de la corteza visual primaria.

1) **Corriente dorsal.** Se extiende desde el área V1 dorsalmente al lóbulo parietal, se conoce como *vía del dónde*, o del *cómo* que se cree que sirve para analizar el movimiento. Participa en la orientación de las acciones y el reconocimiento de los objetos en el espacio, termina en el lóbulo parietal y se encarga del proceso de ubicación espacial. Está interconectada con la corriente ventral paralela, que se extiende hacia abajo desde V1 hacia el lóbulo temporal.

La corriente dorsal está implicada en la conciencia espacial y la orientación de las acciones (por ejemplo, el alcance). En esto tiene dos características funcionales distintas, que contiene un mapa detallado del campo visual, y es también buen detector y el analizador de los movimientos.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



Según el Comité Español de Color se especifica como *color psicofísico* un estímulo de color en función de valores definidos experimentalmente, tales como los tres valores triestímulo.

Estudia el color bajo la característica de la radiación visible que permite al observador distinguir diferencias entre otros objetos con propiedades físicas iguales, basándose en la diferente composición espectral de la radiación que interviene en la observación. La medición instrumental del color, la medida de muestras, las mezclas de colorantes o pigmentos utilizan el concepto psicofísico.

Puede especificarse mediante cantidades físicas que incluyen distancias de una geometría euclídea.

En la medición del color es evidente que los colores dependen de los objetos, al mismo tiempo de la luz que los ilumina. Sea cual fuere el iluminante empleado, sus propiedades físicas permanecerán inalterables; sin embargo, su apariencia dependerá de la composición espectral del iluminante; es por tanto un fenómeno psicofísico.

En la ordenación del color se pueden entremezclar ambos conceptos, en el capítulo siguiente se tratará el color psicofísico.

En capítulos siguientes se tratará la especificación del color bajo estos dos tipos de definición del color, y los modelos para su estudio.

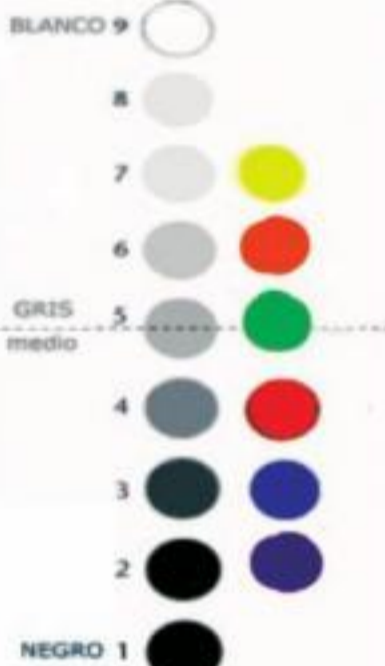
<p>Una relación de luminosidad aproximada reflejada por los colores, medidos por un fotómetro de luz, es la siguiente:</p> <table border="0"> <tr><td>Papel blanco</td><td>82 %</td></tr> <tr><td>Amarillo canario</td><td>77 %</td></tr> <tr><td>Limón</td><td>66 %</td></tr> <tr><td>Verde pálido</td><td>62 %</td></tr> <tr><td>Azul pálido</td><td>58 %</td></tr> <tr><td>Verde claro</td><td>50 %</td></tr> <tr><td>Rosa salmón</td><td>44 %</td></tr> <tr><td>Verde hierba</td><td>18 %</td></tr> <tr><td>Rojo</td><td>17 %</td></tr> <tr><td>Azul turquesa</td><td>15 %</td></tr> <tr><td>Carmesí</td><td>6 %</td></tr> <tr><td>Violeta oscuro</td><td>5 %</td></tr> <tr><td>Negro</td><td>4 %</td></tr> </table>	Papel blanco	82 %	Amarillo canario	77 %	Limón	66 %	Verde pálido	62 %	Azul pálido	58 %	Verde claro	50 %	Rosa salmón	44 %	Verde hierba	18 %	Rojo	17 %	Azul turquesa	15 %	Carmesí	6 %	Violeta oscuro	5 %	Negro	4 %	<p style="text-align: center;"><b>LUMINOSIDAD</b></p>  <p>BLANCO 9</p> <p>8</p> <p>7</p> <p>6</p> <p>GRIS medio 5</p> <p>4</p> <p>3</p> <p>2</p> <p>NEGRO 1</p>	<p>He aquí el coeficiente de reflexión de diversos colores a la iluminación natural media:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cadmio: 80 %</li> <li>- Amarillo y verde: 60 %</li> <li>- Salmón: 40 %</li> <li>- Siena: 35 %</li> <li>- Naranja 32 %</li> <li>- Carmín: 30 %</li> <li>- Bermellón: 25 %</li> <li>- Rojo y escarlata: 20 %</li> <li>- Azul: 16 %</li> <li>- Violeta: 12 %</li> </ul> <p>No es lo mismo que la iluminación sea natural o artificial y, en esta última, variarán los colores según la clase de foco que los ilumine.</p>
Papel blanco	82 %																											
Amarillo canario	77 %																											
Limón	66 %																											
Verde pálido	62 %																											
Azul pálido	58 %																											
Verde claro	50 %																											
Rosa salmón	44 %																											
Verde hierba	18 %																											
Rojo	17 %																											
Azul turquesa	15 %																											
Carmesí	6 %																											
Violeta oscuro	5 %																											
Negro	4 %																											

Tabla II-2.

Al observar un color, además del tono o color, enseguida nos percatamos de su viveza (pureza o saturación), y si es claro u oscuro (valor, claridad, brillo), es decir, su luminosidad. Tabla II. 2. La luminosidad es la luz que reflejan los colores, y por tanto la cantidad de fotones que estos desprenden. Un objeto coloreado solo refleja las radiaciones correspondientes a su propio color, y absorbe todas las demás.

Existen pocas personas que sean capaces de distinguir una intensidad luminosa más alta de otra más baja, entre matices poco diferenciados. El valor más oscuro es visualmente el más pesado, o el que tiene más negro o menos blanco.

### COLORES PRIMARIOS

Young (1807) propuso el rojo, el verde y el violeta como colores primarios.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



### Colores terciarios

La mezcla de los tres colores primarios en proporciones no equipotentes da lugar a nuevos colores, que son los colores terciarios. Según Leonardo da Vinci y Grassmann: "Cualquier color puede expresarse por medio de los tres primarios si han sido bien elegidos".



Rueda de colores de Munsell.

**Figura II-18. Círculo cromático.** En este círculo cromático están representados los colores primarios y sus complementarios opuestos en el círculo. R o RN = rojo o rojonaranja, NA = naranja, AMN = amarillonaranja, AM = amarillo, AMV = amarilloverde, VE = verde, CY = cian, AZ = azul, AV = azulvioleta, VI = violeta, PU = púrpura, MA = magenta. Este círculo cromático se parece bastante al que diseñó Hölzel (J. Paulik, pág 41. *Teoría del color*).

En casi todos los libros sobre color, los colores terciarios se definen como la mezcla de un secundario con los primarios más cercanos en el círculo cromático, en mi opinión son colores formados solo por dos colores primarios.

Cuando se mezcla un color con gris decimos que es "atenuado o tenue". Un color "quebrado" es el resultado de mezclarlo con proporciones discretas de su complementario.

### LECTURA

#### El científico inglés, Isaac Newton

Isaac Newton (1642-1727), matemático y físico británico, fue, junto al matemático alemán Leibniz, uno de los inventores del cálculo diferencial e integral (método de fluxiones, como llamaba Newton a este cálculo). Generalizó los métodos que se habían utilizado para trazar líneas tangentes a curvas y para calcular el área bajo una curva, y descubrió que los dos procedimientos eran operaciones inversas. También, formuló las leyes del movimiento y dedujo a partir de ellas la ley de la gravitación universal. Explicando además que las mareas se deben a la atracción del sol y la luna. Generalizó la fórmula del binomio que lleva su nombre.



Fig. II-19. Isaac Newton.

Cuando tenía tres años, su madre viuda lo llevó a vivir a una granja al cuidado de su abuela. Estudió en una escuela de primaria en Grantham. A los 17 años regresó a su casa, ingresó en el Trinity College de la Universidad de Cambridge y en 1665 recibió su título de bachiller y el de profesor tres años más tarde.

En 1672 publica su primer trabajo acerca del cálculo y de la teoría de los colores; lo que le valió de enfrentamiento con otros físicos de la época, como Huygens o Hooke. Desarrolló la teoría corpuscular de la luz, la descomposición de la misma y demostró su teoría de los colores



haciendo pasar un rayo de luz solar a través de un prisma. En 1704, publicó su obra *Óptica*, en la que explicaba detalladamente su teoría.

La creencia común proveniente del conocimiento aristotélico era que la luz no estaba compuesta, siendo su entidad homogénea, pero que podía modificarse por refracciones y reflexiones dando lugar a distintas percepciones (modificacionismo).

Entre 1665 y 1666, Newton observó que al atravesar un prisma, la luz del sol, se descomponía en siete colores (dispersión de la luz). Newton llamó *espectro* (en latín *spectrum*, *imagen*, *visión*, también *fantasma*) al rectángulo de colores que se formaba en la pantalla colocada detrás del prisma. Postuló que la luz del sol contenía rayos diversos con distinta refractividad y que se percibían como colores al observarlos por separado. Pero además comprobó que si estos rayos de colores se volvían a mezclar con otro prisma colocado donde estaba la pantalla se volvía a recomponer la luz solar blanca.

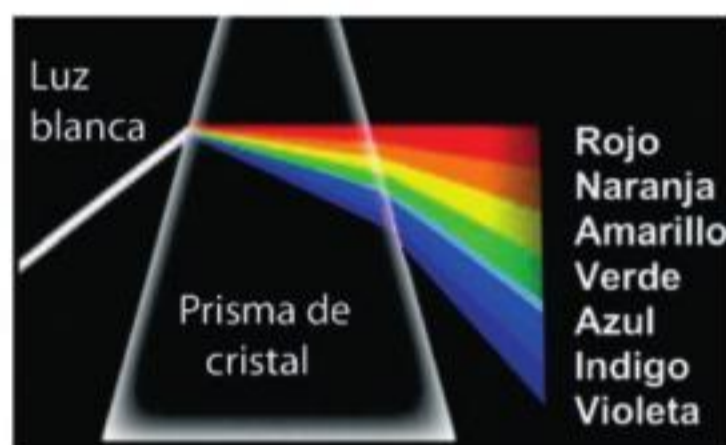


Figura II-20. Dispersión de la luz.

Para explicar la percepción del color construyó un círculo de manera que el rectángulo del espectro se desplegara en abanico juntándose por sus extremos el rojo con el violeta, que desde entonces se llamó *círculo cromático de Newton*.

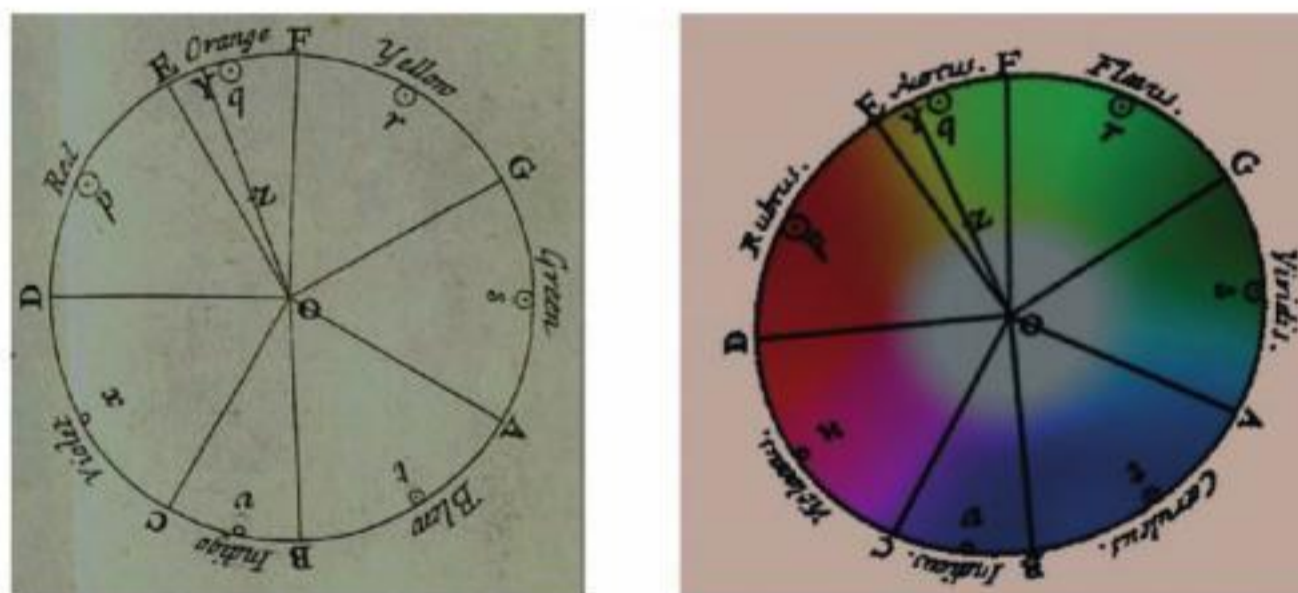


Figura II-21. Círculo cromático de Newton

En el centro del círculo se halla el blanco, en la circunferencia, se hallan los matices más saturados, en gradación desde el blanco (saturación nula) hasta el color espectral (saturación máxima). En su círculo, Newton indicó los límites aproximados de siete colores básicos, imitando los tonos de la escala musical.

Fue el primero en tener la intuición de que las relaciones entre los estímulos luminosos y la percepción del color se podrían representar con un modelo matemático. Aun tendrían que pasar 150 años antes de que, sobre los cimientos dispuestos por Newton, otro matemático alemán llamado Hermann Grassmann enunciase las primeras leyes de la medición del color.



**BIBLIOGRAFÍA**

1. Hewitt, Paul G. *Física conceptual*. Novena edición. Pearson Educación. México, 2004. ISBN:970-26-0447-8. Las mujeres tienen un umbral de activación de los conos menor que el de los hombres, por lo que pueden ver más colores.
2. Arnheim, Rudolf: *Arte y percepción visual. Psicología del ojo creador*. 2.ª edición Alianza Forma. Nueva versión. Trad. María Luisa Balseiro Madrid, 2002. 4.ª reimpresión. 2008. ISBN: 987-84-206-7874-0  
 —————: *Arte y Percepción Visual. Psicología de la Visión Creadora* 1957 - Eudeba Edic.1962. Cap. VI - LA LUZ [en línea]. [Consulta: 14 mayo 2010]. Disponible en web: <[http://www.pescioweb.com.ar/bibliografia/la\\_luz.pdf](http://www.pescioweb.com.ar/bibliografia/la_luz.pdf)>
3. Bowmaker, J. K.; Dartnall, H. J. A. and Mollon J. D. *Microspectrophotometric demonstration of four classes of photoreceptor in an old world primate, macaca fascicularis*. J. Physiol. (1980), 298, pp. 131-143. Queen Mary College University of London Great Britain 1979.
4. Dartnall, H.J.A., Bowmaker, J.K. & Mollon, J.D. (1983). Human visual pigments: microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. *Proceedings of the Royal Society of London B* 220, 115- 130. Cuatro tipos de espectros se obtuvieron con picos de absorción en las longitudes de onda siguientes: bastones,  $496,3 \pm 2,3$  nm (n = 39); conos rojos,  $558,4 \pm 5,2$  nm (n = 58); conos verdes,  $530,8 \pm 3,5$  nm (n = 45 ); conos azules,  $419,0 \pm 3,6$  nm (n = 5). La distribución de los picos fue unimodal para los bastones. Para los conos rojos y verdes, sin embargo, no hubo pruebas para las distribuciones bimodal, con máximos sub-población en  $563,2 \pm 3,1$  nm (n = 27) y  $554,2 \pm 2,3$  nm (n = 31) para los rojos y en  $533,7 \pm 2,1$  nm (n = 23) y  $527,8 \pm 1,8$  nm (n = 22) para los verdes.
5. Levi, MN; Koeppen, BM; Staton, BA. Berne y Levi: fisiología. 4ª edición Ed. Elsevier Mosby. 2006. Página 129, Neuronas activadas por el verde son inhibidas por el rojo.
6. Tortora, GJ y Grabowski, SR. *Principios de Anatomía y Fisiología*. 9ª edición. Oxford University Press México SA, 2002. ISBN: 970-613-570-7
7. Guyton, Arthur C. y Hall, John E. *Tratado de Fisiología Médica* 11 ed.. Elsevier Saundes, 2006. Relación 83:83:0 como amarillo.
8. Ganong, Wiliam F. *Fisiología Médica*. 20ª edición. Manual Moderno. 2006. 6 millones de conos, 120 millones de bastones
9. Bear, Mark F; Connors, Barry; Paradiso, Michel. *Neurociencia: la exploración del cerebro*. 3ª edición. Lippincott Williams And Wilkins. Wolters Kluwer Health España SA. 2008. ISBN ESPAÑOLA:978-84-96921-09-2.
10. Pawlik, Johannes. *Teoría del color*. Paidós Estética 23. Ediciones Paidós Ibérica SA Barcelona. 1996. ISBN: 978-84-493-0215-2.
11. Capilla, P.; Artigas, J. M.; Pujol, J. *Fundamentos de Colorimetría*. Universidad de Valencia 2002. ISBN 84-370-5420-6.
12. González Cuasante, José Mª; Cuevas Riaño, María; Fernández Quesada, Blanca: *Introducción al Color*. Ediciones Akal SA, Madrid, 2005. ISBN-13:978-84-460-096-9
13. Zelanski, Paul y Fisher, Mary P. *Color*. Tercera edición, Tursen S A/H. Blume . Madrid, 2001. ISBN: 84-89840-21-0
14. Urtúbia Vicario, César. *Ver y oír: Fisiología de la retina* [en línea]. Departament d' Optica y Optimetria . Escola Universitaria de Terrassa Universidad Politecnica de Catalunya. De 288-295. Disponible en web: [http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/655/1/Fisiologia\\_de\\_la\\_Retina\\_I.pdf](http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/655/1/Fisiologia_de_la_Retina_I.pdf)



15. Gouras, Peter. Color visión. [en línea]. WebVision. [Consulta 2 mayo 2009]. Disponible en web: <http://webvision.umh.es/webvision/color.html> Diagrama Modificado de las interrelaciones celulares de la retina.
16. ———. The function of the midget cell system in primate color vision (en línea). Laboratory of Vision Research, National Eye Institute, National Institutes of Health U.S. Department of Health, Education and Welfare, Bethesda, Maryland 20014, U.S.A. [Consulta 9 mayo 2009. Available online 7 March 2003. Disponible web: [http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6T0W-4835VR9-43&\\_user=10&coverDate=12/31/1971&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=browse&sort=d&view=c&acct=C000050221&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=10&md5=e0208330da88f97d3bb757957f8b399c](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6T0W-4835VR9-43&_user=10&coverDate=12/31/1971&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=browse&sort=d&view=c&acct=C000050221&_version=1&_urlVersion=0&_userid=10&md5=e0208330da88f97d3bb757957f8b399c)
17. Livingstone, Margaret; Hubel, David H.; Abrams, Harry N. Vision and Art : The Biology of Seeing. 2002.
18. Hattar S, et al.: "Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity,". Science, 295:1065-70. 2002.
19. Ruby NF, et al!.: "Role of melanopsin in circadian responses to light,". Science, 298:2211-3. 2002.
20. Dacey, Dennis M.; et al. Melanopsin-expressing ganglion cells in primate retina signal colour and irradiance and project to the LGN Nature 433, 749-754 (2005).
21. Pokorny, J; Shevell, SK & Smith, VC. Colour Appearance and Colour Constancy. In: The Perception of Colour: Peter Gouras (Editor). Vol 6, Vision & Visual Dysfunction, Macmillan, Basingstoke, England 1991: 43-61
22. Helga Kolb. How the Retina Works [en Línea]. American Scientist, Volume 91, 28. (2003) Sigma Xi, The Scientific Research Society. Available on the American Scientist. [ 14 septiembre 2009]. Disponible en Web site: <http://www.americanscientist.org/issues/feature/how-the-retina-works/1>
23. Vidal, Enrique. Teoría sobre la percepción visual. hacia una interpretación del arte a través de la ciencia de la psicología [en línea]. Facultad de Arte/U.L.A. Revista de arte y estética contemporánea 39-47. Mérida - Enero/Junio 2009. [Consulta 12 abril 2010]. Disponible en web:<<http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/30937/1/articulo4.pdf>>
24. Ortiz Zamora, Fco Gabriel. Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica. Universidad de Alicante Escuela politécnica Superior Tesis de Doctorado Director Dr. Fernando Torres Medina. 2002 [en línea] Capítulo 2 Fundamentos de Color. [Consulta 12 octubre 2008]. Disponible en web: <[http://www.lluisvives.com/servlet/SirveObras/57915842105571617400080/008591\\_2.pdf](http://www.lluisvives.com/servlet/SirveObras/57915842105571617400080/008591_2.pdf)>
25. Ball, Philip. La invención del color. Debolsillo. Primera edición. Barcelona, 2009. ISBN: 978-84-9793-4141-5



## CAPÍTULO III: COLOR PSICOFÍSICO. ESPACIO DE COLOR RGB-XYZ. MEDIDA DEL COLOR

El estudio del color y su repercusión en el mundo actual es muy arduo y amplio, pudiendo ser abordado desde el campo de la física, la percepción psicofisiológica, la significación cultural, el arte, la telecomunicación, la industria, etc.

Para el estudio de las sensaciones subjetivas y su correspondencia con fenómenos físicos se ha creado la Psicofísica, la ciencia que relaciona la energía física con la percepción humana.

La **Psicofísica** es el estudio de las relaciones entre las características físicas de los estímulos, como por ejemplo su intensidad, y nuestra experiencia psicológica de ellos.

La colorimetría, una rama de la Psicofísica, es la ciencia encargada de la medición o cuantificación del color.

La Sociedad de Óptica de los Estados Unidos define a la Colorimetría como la “Ciencia de la medición del color, su luminosidad y cromaticidad”; es decir, estudia los colores para caracterizarlos y cuantificarlos mediante números. De forma que podremos operar con ellos y deducir características de los colores obtenidos mediante mezclas, y las cantidades que hay que mezclar de los colores elegidos como primarios (colorimetría tricromática), para obtener el color deseado. La palabra *colorimetría* significa el conjunto de métodos para medir y evaluar el color de los objetos.

### **COLOR PSICOFÍSICO**

La sensación de color se puede definir como la respuesta integrada de cada una de las curvas de sensibilidad del espectro irradiado por el objeto observado. De esta manera, obtenemos tres respuestas diferentes, una por cada color. La obtención de esta sensación de color de la manera descrita hace que dos objetos observados, irradiando un espectro diferente, puedan producir la misma sensación de color. Y en esta limitación de la visión humana se basa el modelo de síntesis del color, mediante el cual podemos obtener el color de un objeto de un espectro determinado, comparando su estímulo visual emitido (a estudio) con una mezcla de los tres colores primarios.

La medida del color implica la asignación de números que representen atributos del fenómeno psicológico de lo que llamamos color. Generalmente la medida del color no intenta describir directamente percepciones de color, en vez de ello, intenta relacionar el fenómeno psicológico (color) con el fenómeno físico (flujo luminoso, longitud de onda, etc.) que provoca la percepción. La medida del color consiste en el proceso de determinar qué condición física da lugar a una condición psicológica (perceptiva) determinada. A este proceso que relaciona fenómenos psicológicos con fenómenos físicos se le denomina *proceso psicofísico*.

La forma más antigua de medir el color, y la más utilizada hoy en día, es la que determina la igualdad de colores (*color matching*) (figura III-1). No se necesita conocer la medida de percepciones y por esta razón es aceptada por todo el mundo, desde los físicos a los artistas.

De esta forma podemos comunicar algo muy útil sobre el color, duplicando las condiciones de los estímulos cualquiera puede reproducir la igualdad de color, y solo es necesario saber qué dos condiciones de estímulos provocan la misma apariencia de color.



## CARACTERÍSTICAS DE UN ESTÍMULO VISUAL DE COLOR

Un **estímulo luminoso** es aquella radiación visible que penetra en el ojo y produce sensación de luz o color.

El efecto visual de cualquier distribución espectral puede caracterizarse por tres parámetros: longitud de onda dominante, pureza de la excitación y luminancia.

1) Se entiende por **longitud de onda dominante** a la que corresponde el tono que vemos. Aunque la longitud de onda dominante de una distribución real puede no ser aquella de mayor proporción. Algunos colores (como por ejemplo, el magenta) no tienen longitud de onda dominante. Longitud de onda dominante es la longitud de la radiación monocromática predominante en la distribución espectral en estudio, sería el pico de energía máxima. Subjetivamente se habla de *matiz* o *tono* y se dice que un color es amarillo, verde, azul, etc. Se designa con  $\lambda_d$  y su unidad es nm. En el caso de un estímulo magenta la longitud de onda dominante se reemplaza por la longitud de onda complementaria.

2) La **pureza de la excitación**. Es la proporción de luz monocromática de la longitud de onda dominante y la luz blanca necesaria para producir el color; la pureza de excitación es del 0 % (insaturado); la pureza de excitación es del 100 % (totalmente saturado).

Cuando valoramos magnitudes de dilución con blanco, se puede representar por un índice variable entre 0 y 1. Subjetivamente se habla de **saturación**. Y se dice por ejemplo que un color rosa (mezcla de rojo con blanco) está poco saturado. Se puede simbolizar con  $\rho$ .

3) La **luminancia** es la densidad de intensidad luminosa de la luz por unidad de superficie, en una dirección dada. "In photometry, *luminosity* is sometimes incorrectly used to refer to *luminance*, which is the density of luminous intensity in a given direction", queda claro.

Es una magnitud fotométrica que se designa por  $Y$  o  $L_v$ , y su unidad es el Nit (del latín, *nittere*, brillar) definido como candela/m<sup>2</sup>. Se refiere a la energía total que es proporcional a la integral del producto de la distribución y la curva de respuesta del ojo humano ("función de eficiencia luminosa").

Subjetivamente se habla de **brillo**. Otros autores llaman a la luminancia **brillo fotocolorimétrico**. La CIE define *luminosidad* como el atributo de la sensación visual de acuerdo con el cual un área parece emitir más o menos luz (ref.: Capilla, pág. 175). Todos tenemos claro el concepto de lo que significa una estrella más o menos brillante.

Términos perceptuales	Términos colorimétricos
Tono	Longitud de onda dominante
Saturación	Pureza de la excitación
Brillo (objetos con luz propia); claridad (objetos reflectantes); o luminosidad para ambos en general.	Luminancia

Tabla III-1.

Si la luz es *acromática* (sin color), su atributo único es su intensidad, o cantidad de luz (luz acromática es la que se ve en una televisión en blanco y negro). De forma que se define una escala de grises que va desde el negro al blanco.

La luz *cromática* se refiere a la sensación visual del color, abarca el espectro de energía electromagnética desde aproximadamente 400 a 700 nm.

Para describir la calidad de una fuente de luz cromática se usan 3 características: radiancia, luminancia y brillo.

- **Radiancia** es la cantidad total de energía que sale de la fuente de luz, y se mide en vatios (W).



-**Luminancia**, medida en lúmenes (lm), da la medida de la cantidad de energía que un observador percibe de la fuente de luz. Por ejemplo, una luz emitida de una fuente que opere en la región infrarroja del espectro podría tener energía importante (radiancia), pero un observador no podría casi percibirla; su luminancia sería casi cero.

- **Brillo** es un descriptor subjetivo que es casi imposible de medir. Engloba la noción acromática de intensidad y es uno de los factores principales en la descripción de la sensación del color.

### Otros conceptos del color:

Dos colores son *metámeros* si proceden de estímulos distintos pero son percibidos como colores iguales. Sin embargo, dos colores distintos procederán siempre de estímulos (distribución espectral) diferentes.

En el caso en que las distribuciones espectrales de dos estímulos sean iguales, esos colores se denominan *isómeros* y siempre producen la misma sensación de color.

*Cromaticidad*. La pareja de parámetros que definen la cromaticidad o crominancia de un color son: longitud de onda dominante,  $\lambda_d$ , y pureza de excitación,  $\rho$ , pueden considerarse como equivalentes del tono y de la saturación. Así definida, la crominancia puede considerarse una magnitud vectorial.

## ESPECIFICACIÓN DEL COLOR PSICOFÍSICO

En el Renacimiento, Leonardo da Vinci fue el primero en afirmar que a partir de la mezcla de tres colores bien escogidos se podían obtener casi todos los colores conocidos.

Los principios básicos fueron establecidos por Newton en 1672 (comprobó que con tres franjas del espectro se podía obtener luz blanca), fueron retocados por Thomas Young en 1802, con su teoría tricromática de la visión humana.

Sin embargo, sería el físico alemán Grassmann quien, con sus leyes sobre la síntesis del color, sistematizaría en 1853 fisiológica y físicamente la tricromaticidad, consistente en la especificación (igualación) de cualquier color o estímulo cromático únicamente con tres variables independientes correspondientes a cada color primario.

## MEZCLA ADITIVA DE COLORES. LEYES DE GRASSMANN

### Primera ley de Grassmann (ley de la Trivarianza visual)

Una misma sensación cromática puede obtenerse de diferentes modos con luces de distinta composición espectral.

Puede demostrarse experimentalmente que cualquier color de prueba C se puede obtener por la mezcla aditiva de otros tres colores primarios, RGB, si se hace en las proporciones adecuadas, a condición de que ninguno de ellos se pueda igualar por una combinación de los otros dos, o sea, que ninguno de los tres estímulos visuales (triestímulo) elegidos como primarios pueda obtenerse por mezcla de los otros dos.

Por síntesis aditiva es posible conseguir todos los colores percibidos, mezclando tres franjas del espectro visible (R,G,B) en la proporción de intensidad adecuada. Para describir de forma unívoca un estímulo visual de color necesitamos al menos dos parámetros, si es un color luz monocromático necesitamos la longitud de onda y la luminancia.

Un color cualquiera (C), con una luminancia  $L_c$ , tendrá el mismo efecto visual que la suma aditiva de tres colores luz primarios (R), (G), (B), de luminancias  $L_r$ ,  $L_g$ ,  $L_b$  (componentes), siempre que se mezclen en las proporciones adecuadas:



$$L_c(C) \equiv L_r(R) + L_g(G) + L_b(B) \quad (1)$$

Esta ecuación es fundamental para la colorimetría y es la **primera ley de Grassman** de mezcla aditiva de color. Un color C se puede igualar por  $L_r$  unidades de rojo,  $L_g$  unidades de verde y  $L_b$  unidades del azul. Las unidades se pueden medir en cualquier forma que cuantifique la energía luminosa.

Decimos que dos radiaciones de luz son cromáticamente equivalentes cuando producen iguales sensaciones de matiz, saturación y brillo, teniendo distinta composición espectral. Los colores que teniendo distinta composición espectral parecen iguales visualmente se llaman *metámeros* y al fenómeno que permite que dos luces con distinta composición espectral produzcan la misma sensación visual se le conoce como *metamerismo*.

$$A \equiv B \Leftrightarrow B \equiv A$$

Dos radiaciones cromáticamente equivalentes a una tercera son equivalentes entre sí (ley de la transitividad).

$$\text{Si } A \equiv B \text{ y } B \equiv C \Leftrightarrow A \equiv C$$

### Segunda ley de Grassmann (ley de la Luminancia)

La luminancia de una mezcla de luces de colores es igual a la suma de las luminancias de los colores que la componen. De la ecuación (1), cuando se ha conseguido la igualdad de color C, la luminancia del mismo es igual a la suma de las luminancias de los colores primarios utilizados en la igualación.

$$L_c = L_r + L_g + L_b$$

Establece que si se suman dos colores cualesquiera con sus respectivas equivalencias a triestímulo de primarios, el color suma resultante podría haberse obtenido también sumando los primarios de cada uno de los colores origen.

Una mezcla de cualesquiera dos colores (C1 y C2) puede ser igualada por mezcla aditiva lineal conjunta de tres colores que igualen individualmente los dos colores probados. Esta es la **segunda ley de Grassman** de la mezcla del color. Esto puede hacerse extensivo para cualquier número de colores de prueba.

$$\begin{aligned} L_{c_1}(C1) &\equiv L_{r_1}(R) + L_{g_1}(G) + L_{b_1}(B) \\ L_{c_2}(C2) &\equiv L_{r_2}(R) + L_{g_2}(G) + L_{b_2}(B) \\ + \\ L_{c_3}(C3) &\equiv L_{c_1}(C1) + L_{c_2}(C2) \equiv [L_{r_1} + L_{r_2}](R) + [L_{g_1} + L_{g_2}](G) + [L_{b_1} + L_{b_2}](B) \end{aligned}$$

Donde cada número se mide en nits = candela/m<sup>2</sup> o incluso lúmenes.

En el experimento de Grassmann para obtener el blanco utilizando lúmenes en lugar de unidades tricromáticas T. Las unidades T están relacionadas con los lúmenes de la siguiente forma:

- 1 unidad T de rojo = 0,30 lúmenes de rojo.
- 1 unidad T de verde = 0,59 lúmenes de verde.
- 1 unidad T de azul = 0,11 lúmenes de azul.



De la ecuación (1), para el blanco sería: 3 unidades  $T = 0,30 + 0,59 + 0,11 = 1$  lúmen de blanco.

### Tercera ley de Grassmann (ley de la Proporcionalidad)

Conseguida la igualdad de color en la ecuación (1), si multiplicamos por el mismo número los dos miembros de la ecuación, la igualdad no varía, persiste la sensación de igualdad de color.

$$K L_c(C) \equiv K L_r(R) + K L_g(G) + K L_b(B)$$

Siempre que dos superficies produzcan igual sensación cromática es posible variar su luminancia, manteniendo constante el matiz y la saturación, sin que varíe la igualdad cromática entre ambas superficies.

Si dos estímulos luminosos A y B producen la misma sensación de color, esta igualdad se mantiene cuando la luminancia de cada una de ellos se multiplica por un mismo número o una misma cantidad k:

$$\text{Si } A \equiv B \Rightarrow kA \equiv kB$$

### Cuarta ley de Grassmann (ley de la Aditividad)

Si una misma cantidad de un estímulo luminoso o color C se adiciona o superpone a dos colores A y B metámeros, la mezcla aditiva también es metámera:

$$\text{Si } A \equiv B \text{ y } C \equiv D \Rightarrow A + C \equiv B + D$$

## ECUACIÓN TRICROMÁTICA DEL COLOR

Supongamos que queremos reproducir el color de una luz C, mezclando tres luces espectrales primarias, en una superficie difusora de blanco puro en forma de disco. Iluminamos una mitad del disco con un flujo c de la luz de color C, y la otra mitad con las luces primarias R, G y B (estímulos monocromáticos), los flujos de estas luces primarias los variaremos hasta conseguir la igualdad visual completa, figura III-1.

La forma más elemental de medir el color, y utilizada hoy en día, es por comparación de un color con otro variable, es lo que se conoce como *igualación de colores (color matching)*. Una vez encontrada la combinación de luces primarias que producen una igualación de color exacta de las dos partes del disco, estamos en condiciones de especificar las cantidades de primarios necesitados, llamadas *valores triestímulo*.

La igualación del color, según Grassman, se produce mediante síntesis aditiva y se expresa en la *ecuación tricromática del color*:

$$c(C) = \sigma(R) + v(G) + a(B) \quad (2) \text{ según la 1.ª ley de Grassmann}$$

Donde (R), (G) y (B) solo desempeñan un papel cualitativo y no se traducen por ninguna cantidad física.

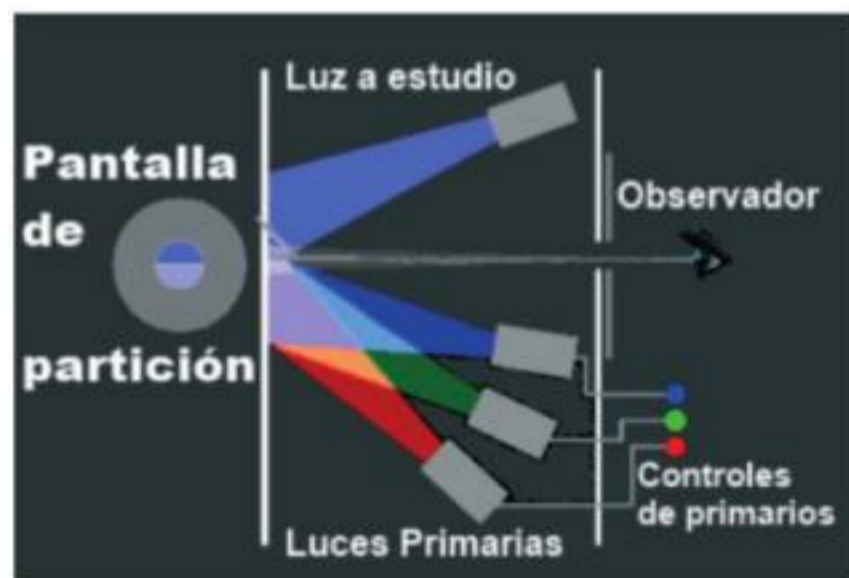


Figura III-1.

Mientras que las magnitudes de los flujos luminosos o luminancias son:  $\sigma$ ,  $v$  y  $a$ , son magnitudes fotométricas cuantitativas. Son los vatios o lúmenes de los estímulos primarios necesarios para la igualación del color  $C$ , las únicas variables que representan una magnitud física, por lo cual la ecuación (2) según la segunda ley de Grassman se puede escribir:

$$c = \sigma + v + a$$

A los flujos  $\sigma$ ,  $v$ ,  $a$  se les denomina *valores triestímulo o componentes tricromáticos* del color  $C$ .

No obstante, en experimentos realizados a lo largo de décadas del siglo pasado se ha visto que algunos colores, especialmente espectrales y altamente saturados, no se podían igualar. Para conseguirlo los investigadores se vieron en la necesidad de mezclar el color  $C$  con una de las luces primarias, igualando la mezcla resultante con las otras dos luces:  $c C + \sigma R = v G + a B$ .

Lo que permite establecer otra vez la verdadera ecuación de igualación del color:  $c C = -\sigma R + v G + a B$ . Esta cantidad negativa,  $-\sigma R$ , no significa que restemos una luz roja a la suma de luces azul y verde, sino que la igualdad se consigue añadiendo luz roja al color en estudio.

Si los dos miembros de una ecuación tricromática se multiplican o dividen por un mismo número, la igualdad no se altera. Aplicando la tercera ley de Grassmann podemos dividir los miembros de la ecuación (2) por  $(a + \sigma + v)$ , podemos escribir:

$$\frac{a + \sigma + v}{a + \sigma + v} (C) = \frac{\sigma}{a + \sigma + v} (R) + \frac{v}{a + \sigma + v} (G) + \frac{a}{a + \sigma + v} (B)$$

Haciendo:

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{\sigma}{a + \sigma + v} \\ g &= \frac{v}{a + \sigma + v} \\ b &= \frac{a}{a + \sigma + v} \end{aligned} \right\} \text{Coeficientes tricromáticos de color } C$$

Podemos escribir:

$$1 C = rR + gG + bB$$

$$1 = r + g + b \quad (3) \text{ Ecuación unitaria del color}$$

Esta última expresión se denomina *Ecuación Unitaria del Color* y sus coeficientes son llamados también *coordenadas tricromáticas del color*, en nuestro caso del color  $C$ .

### Componentes

Se denominan componentes de un color en estudio a las cantidades necesarias de cada uno de los primarios elegidos, para conseguir la igualdad de la sensación visual.



$$c = \sigma + v + a$$

### Coefficientes

Llamamos coeficientes tricromáticos de un color respecto de los primarios elegidos, a las cantidades necesarias de cada uno de ellos para conseguir igualar a una unidad de luminancia del color en estudio.

$$l = r + g + b$$

### REPRESENTACIÓN DE LOS COLORES EN EL ESPACIO. ESPACIOS DE COLORES

Debido a la naturaleza de la visión tricromática, un color puede ser perfectamente definido por un conjunto de solo tres números, que pueden considerarse como las coordenadas de un vector en un espacio vectorial tridimensional. El concepto de vector cromático se diferencia del de vector matemático en que su módulo no es la raíz cuadrada de los cuadrados de sus componentes, sino que es la suma de las componentes energéticas:  $S = r + g + b$ . Más precisamente, un color puede ser representado por un vector cuya magnitud es proporcional a la intensidad de la luz (valor) y cuya orientación en el espacio tiene que ver con el tono de color en sí mismo, es decir con la cromaticidad.

Los espacios vectoriales de color cumplen las leyes de Grassmann, por lo que podemos representar un color por un vector con solo elegir una base adecuada. Un espacio de color se define por una base de vectores (que puede ser los colores primarios espectrales), cuya combinación lineal genera todo el espacio de color.

Un vector color  $C$  (figura III-2 derecha) se define por sus coordenadas tricromáticas  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , medidas por sus vectores base  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ , de colores "primarios".

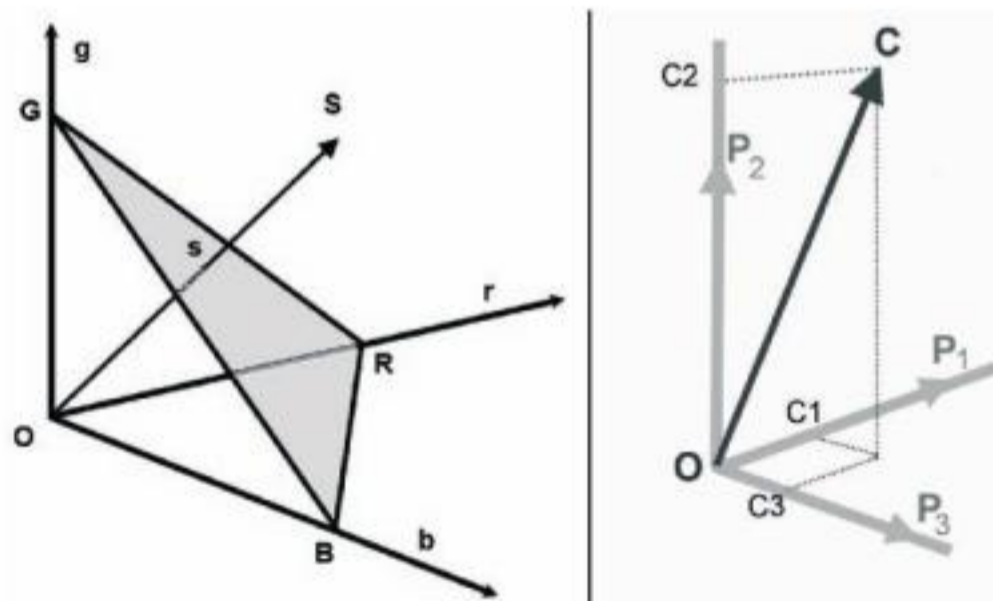


Figura III-2. Espacio vectorial utilizado para la representación de los colores.

Si los colores primarios no son metaméricos, forman una verdadera base para el espacio vectorial y se puede escribir:

$$C = C_1 P_1 + C_2 P_2 + C_3 P_3$$

Esta ecuación significa que se puede igualar el color  $C$  (es decir, encontrar un color metamérico con igual apariencia al  $C$ ) por una mezcla de los tres colores primarios  $P_1$ ,  $P_2$  y  $P_3$  con las respectivas cantidades  $C_1$ ,  $C_2$  y  $C_3$ , que es la 1.ª ley de Grassmann.



Los espacios de color más generales intentan englobar la mayor cantidad posible de los colores visibles por el ojo humano, aunque existen espacios de color que tan solo engloban un subconjunto de ellos. Por ejemplo, los espacios de color de una dimensión (escala de grises), de dos dimensiones (subespacio rg, subespacio xy), etc.

Los espacios de color de tres dimensiones son los más empleados. Un color se especifica usando tres coordenadas, que representan su posición dentro de un espacio de color específico. Estas coordenadas no nos dicen cuál es el color, sino que muestran dónde se encuentra un color dentro de un espacio de color en particular, figura III-3. Los vectores en  $R^3$  son matrices columna de  $3 \times 1$  con tres entradas. Se representan geoméricamente por puntos en un espacio tridimensional de coordenadas con una recta desde el origen que termina en forma de flecha en el punto.

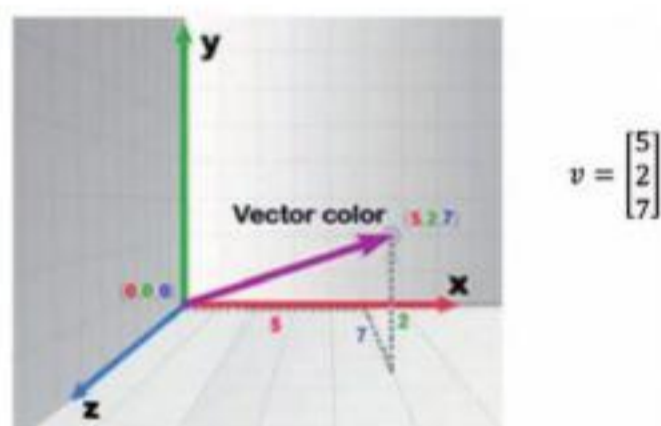


Figura III-3.

Si se incrementa la luminancia del color, se aumentan los tres componentes en la misma proporción, por lo que dicho color siempre se encontrará sobre la recta que une el origen de coordenadas con dicho punto, más separado del origen o más cerca dependiendo de la luminancia.

Los colores monocromáticos se encuentran en la superficie del espacio de color. Los no monocromáticos se encuentran en el recinto interior, por lo que todos los colores están contenidos en ese volumen denominado *sólido de colores*.

La intersección del plano de *luminancia constante* con el sólido de colores origina una superficie, que se encuentra rodeada por una curva plana exterior que recibe el nombre de *spectrum locus* (lugar del espectro), que es donde se encuentran colocados todos los colores monocromáticos.

En esta superficie intersección del plano de luminancia constante se sitúa el triángulo de Maxwell, figura III-4.

### Triángulo de Maxwell

La ecuación unitaria se puede representar mediante un triángulo equilátero de altura la unidad, en él la suma de las distancias perpendiculares a los lados, de cualquier punto interior, es igual a la altura (es una propiedad del triángulo equilátero), es decir, la unidad.

De este triángulo se obtienen los siguientes datos:

Los vértices del triángulo son: R( $r = 1, b = 0, g = 0$ ); G( $g = 1, b = 0, r = 0$ ) y B( $b = 1, g = 0, r = 0$ ).

El centro del triángulo contiene al punto W o blanco de igual energía.

El lado derecho RG contiene las diversas proporciones de los primarios R y G, en cuyo centro se encuentra el amarillo de  $r = 0,5$  y  $g = 0,5$ .

El lado izquierdo GB contiene las diversas proporciones de los primarios G y B. En su centro está situado el cian de  $g = 0,5$  y  $b = 0,5$ .



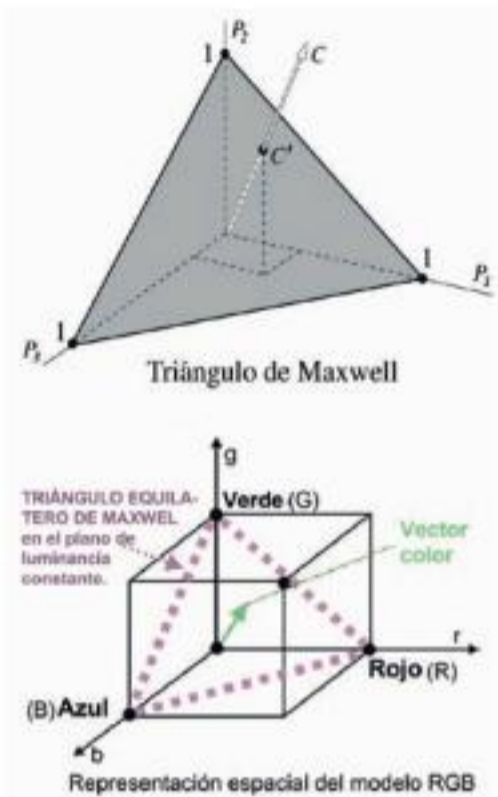


Figura III-4. Cubo y triángulo de Maxwell.

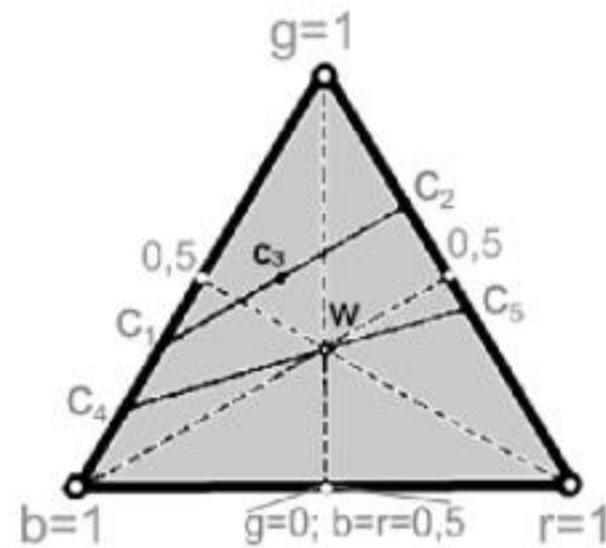


Figura III-5. Triángulo de Maxwell y mezcla de colores.

En la base se tienen los colores del lado BR, formado por las diversas proporciones de los primarios B y R, en cuyo centro se sitúa el magenta de  $b = 0,5$  y  $r = 0,5$ .

Uniendo, mediante una recta 2 puntos de 2 lados cualesquiera, se obtiene el color de su mezcla. Así, al mezclar  $C_1$  y  $C_2$  de la figura III-5, se obtiene  $C_3$  en el interior del triángulo. Aumentando la proporción de  $C_2$ , el punto resultante  $C_3$  se corre hacia la derecha.

Por otra parte, uniendo 2 puntos de 2 lados mediante una recta que pase por W, puede obtenerse un blanco resultante, en consecuencia los colores  $C_4$  y  $C_5$  del gráfico son colores complementarios.

Los colores correspondientes a puntos en el interior del triángulo son colores obtenidos a partir de un primario mezclado con algo de blanco, por lo tanto son colores no saturados.

El matiz se puede representar por medio de un vector que una el punto W con el punto representativo del color en cuestión y midiendo el ángulo así formado respecto de una referencia de base.

Existen numerosos espacios de color en la actualidad. La gran mayoría de ellos se han desarrollado para aplicaciones específicas, aunque todos parten de un mismo concepto: la teoría tricromática de colores primarios rojo, verde y azul.

### ESPACIO DE COLOR RGB-CIE 1931

Los primeros trabajos experimentales fueron realizados a finales de 1920 por David W. Wright y John Guild. Sus resultados se combinaron con la especificación del espacio de color RGB de la CIE (Commission Internationale pour l'Éclairage). Adoptaron como colores primarios los que estableció la CIE, en el año 1931:

( R ) Color rojo, espectral puro, consistente en una única frecuencia correspondiente a una longitud de onda de 700 nm.

( G ) Color verde, espectral puro, longitud de onda de 546,1 nm.

( B ) Color azul, espectral puro, longitud de onda de 435,8 nm.

Las longitudes de onda  $\lambda_R$ ,  $\lambda_G$ , y  $\lambda_B$  de los primarios son las que mejor reproducen experimentalmente el resto de tonalidades, y son la base del espacio de color RGB-CIE 1931.

La CIE eligió estos tres colores primarios con el fin de sentar una normativa universal que permitiera definir todos los colores espectrales.



El rojo es obtenido con lámpara incandescente y un filtro rojo normalizado, en cambio el verde y el azul son obtenidos con el arco de mercurio.

Los colores rojo, verde y azul fueron escogidos porque cada uno corresponde aproximadamente con uno de los tres tipos de conos sensitivos al color en el ojo humano (65 % sensibles al rojo, 33 % sensibles al verde y 2 % sensibles al azul).

El espacio RGB es conocido como un espacio de color aditivo, desde el punto de vista del observador.

El sistema CIE para la especificación numérica del color de una luz o superficie se basa en una descripción de la respuesta media humana a diferentes colores del espectro visible, como los determinados por la igualación tricromática de color con un colorímetro visual.

Para cada prueba de luz monocromática el observador ajusta las cantidades relativas de las luces primarias roja, azul y verde, hasta que las dos mitades del campo visual se igualen exactamente. Este tipo de medición se repite en toda una serie de luces de diferentes longitudes de onda del espectro en todo el espectro visible (figura III-1).

Las cantidades variables de las luces primarias necesarias para igualar cada una de las luces espectrales de longitud de onda determinada describen aquella particular respuesta visual del observador a diferentes luces de colores.

Las mediciones se efectuaron con un número de diferentes observadores de visión de color normal.

En alguna determinada longitud de onda, usualmente hay solo pequeñas diferencias en los tres valores triestímulo o coordenadas de cromaticidad obtenidos por los diversos observadores, y los valores son por lo tanto en promedio. Estos tipos de medidas deben llevarse a cabo bajo condiciones controladas para proporcionar resultados reproducibles. En particular, en los estudios iniciales en los que el observador estándar CIE 1931 se basa, el campo visual subtiende un ángulo de 2° en la pupila del observador. Aberturas ajustables o cuñas ópticas permiten la variación de las intensidades de las tres luces primarias.

#### **a) Funciones de igualación de color y cálculo de los valores triestímulo**

Para la visualización del color de un objeto hacen falta tres elementos básicos:

1. Un iluminante de la escena  $E(\lambda)$  con una emisión de una determinada PSD (*spectral power distribution*). Composición espectral de la luz incidente, es decir, de la potencia emitida para cada longitud de onda, de las fuentes de luz –generalmente, emiten rayos policromáticos, es decir, compuestos por radiaciones monocromáticas de longitudes de onda  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ .
2. Una superficie de reflexión  $P(\lambda)$  con una distribución espectral de la reflexión. Modos de transmisión de las radiaciones que inciden en el objeto, dependen de las características del objeto. Al iluminar un objeto con un rayo policromático, éste lo transmite al ojo alterándolo en función de la reflexión, refracción y absorción.
3. Un ojo que capte la reflexión del color, dicha radiación reflejada  $S(\lambda)$  llegará al ojo con una PSD determinada, y produce la sensación de color. Dicha captación del color por el ojo dependerá también de las características de visibilidad del ojo para las radiaciones emitidas.

Cuando una magnitud radiométrica se considera para una radiación monocromática (en función de su longitud de onda,  $\lambda$ ) se les debe denotar por el mismo nombre seguido por la palabra *espectral* y por el mismo símbolo seguido por  $\lambda$  entre paréntesis, así por ejemplo la potencia radiante espectral se designa por:





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



Un importante conjunto de valores triestímulos espectrales se obtienen cuando todos los estímulos monocromáticos  $C_\lambda$  tienen un valor de flujo radiante constante e igual a 1. Esta clase de estímulo recibe el nombre de *estímulo de igual energía* ( $E$ ). Cada uno de los estímulos monocromáticos son denotados por  $E_\lambda$  (figura III-7).

Flujo radiante del estímulo de igual energía



Figura III-7.

Para cualquier estímulo monocromático de radiancia  $E(\lambda)$ , las funciones de igualación y los valores triestímulo de un color espectral de energía cualquiera serán proporcionales.

En el caso del estímulo monocromático de radiancia  $E(\lambda)$ , tenemos:

$$\left. \begin{aligned} R(\lambda) &= \frac{E(\lambda)}{E_0} & \bar{r}(\lambda) &= k_m E(\lambda) \bar{r}(\lambda) \\ G(\lambda) &= \frac{E(\lambda)}{E_0} & \bar{g}(\lambda) &= k_m E(\lambda) \bar{g}(\lambda) \\ B(\lambda) &= \frac{E(\lambda)}{E_0} & \bar{b}(\lambda) &= k_m E(\lambda) \bar{b}(\lambda) \end{aligned} \right\} E_0 = 1 / K_m$$

En donde el valor de  $K_m$  es  $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ . En un estímulo de radiancia espectral discreta  $E(\lambda)$ , sus valores triestímulo serán la suma de los valores triestímulo de sus componentes espectrales, es decir:  $\sigma = R$ ,  $v = G$  y  $a = B$  de la ecuación (2) tricromática.

$$\begin{aligned} R &= k_m \sum_{i=1}^n E(\lambda_i) \bar{r}(\lambda_i) \\ G &= k_m \sum_{i=1}^n E(\lambda_i) \bar{g}(\lambda_i) \\ B &= k_m \sum_{i=1}^n E(\lambda_i) \bar{b}(\lambda_i) \end{aligned} \quad 3)$$

En el caso de que el color tenga un espectro continuo y  $E(\lambda)$  sea su densidad de radiancia espectral, los valores triestímulo RGB se calculan sin más que sustituir el sumatorio por una integral extendida a todo el espectro.

$$R = k_m \int_{380}^{780} E(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda$$

$$G = k_m \int_{380}^{780} E(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

$$B = k_m \int_{380}^{780} E(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda$$

En conclusión, para **obtener los valores triestímulo de un color cualquiera**, basta con determinar su radiancia espectral, y conocer las funciones de igualación del sistema de primarios que estamos utilizando (estas funciones de igualación vienen dadas en unas tablas editadas por la CIE).

Los valores de las funciones de igualación del color se han deducido experimentalmente para todas las longitudes de onda del espectro visible. Las funciones de igualación estandarizadas para las longitud de onda del espectro visible desde 380 nm a 780 nm se han discretizado cada 5 nm de longitud de onda. La CIE distribuye estas tablas estandarizadas discretizadas: CMF CIE 1931 a 2° grados de la visión y las versiones corregidas de Judd (1951) y Vos (1978).

El nivel de luminancia se normaliza en función de un valor máximo de 1 a 555 nm.

Algunas veces el valor de una de las CMF es negativa, lo que indica que esa luz primaria tuvo que ser retirada de la mezcla y se añade a la luz probando monocromática para completar la igualación.

En la figura III-8 se puede observar como para igualar algunos colores del espectro (tonalidades verdosas) es necesario añadir una cantidad negativa de luz roja a la mezcla de los primarios verde y azul.

$$E_\lambda + \bar{r}(\lambda) R = \bar{g}(\lambda) G + \bar{b}(\lambda) B$$

Para ilustrar el uso de las funciones de igualación del color, considérese el estímulo monocromático  $E_\lambda$ , con  $\lambda = 475$  nm. Sustituyendo se obtiene que  $r(475) = -0,045$ ,  $\bar{g}(475) = 0,032$  y  $b(475) = 0,186$ .

En este caso:

$$E(475) = -0,045R + 0,032G + 0,186B \quad (4)$$

Donde la cantidad negativa del estímulo primario rojo significa que en el proceso de igualación del color,  $0,045R$  es añadido a  $E(475)$  para reducir su saturación en magnitud suficiente para que pueda ser igualado a la mezcla  $0,032G + 0,186B$ . El valor negativo de una componente tricromática significa que dicho primario debe añadirse a la luz en estudio que deseamos igualar. Un coeficiente será negativo en la ecuación unitaria y por tanto su representación caerá fuera del triángulo de primarios.

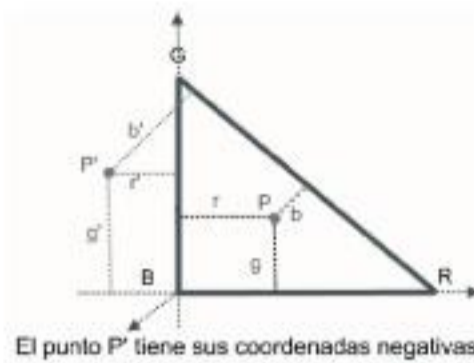
En este caso el punto P' es exterior al área que encierra el triángulo, tiene una de sus coordenadas negativa.

$$-r' + g' + b' = 1$$



La orientación inicial de los ejes en el espacio puede ser arbitraria de manera que los puntos RGB pueden determinar un triángulo equilátero (triángulo de Maxwell), o bien se puede elegir una orientación tal que el triángulo resultante sea el rectángulo isósceles (figura III-8).

Figura III-8. Cada uno de los vértices del triángulo isósceles representa uno de los colores primarios, dentro del triángulo quedan todos los colores que se pueden representar por mezcla aditiva, fuera están los colores que tienen una componente negativa.



La gráfica siguiente muestra las funciones colorimétricas establecidas por la CIE y conocidas como *sistema colorimétrico RGB CIE 1931*.

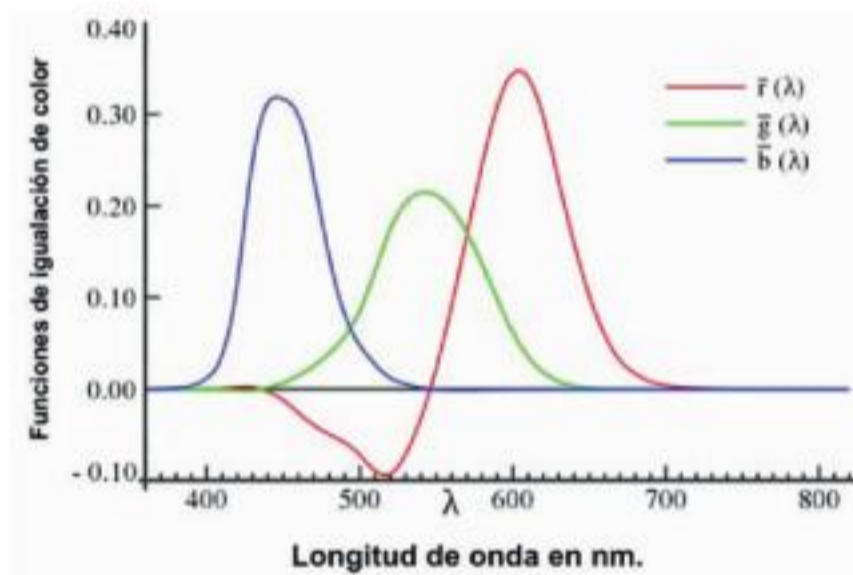


Figura III-9. Funciones de igualación de color RGB-CIE (1931). Con valores triestímulo espectrales de un estímulo monocromático  $E_\lambda$  de flujo radiante unidad (normalizada).

Cálculos realizados con unos estímulos primarios monocromáticos y de longitudes de onda  $\lambda_R = 700$  nm, para el rojo,  $\lambda_G = 546,1$  nm para el verde y  $\lambda_B = 435,8$  nm para el azul.

Los valores negativos de luminancia carecen de sentido físico; es una representación matemática de un fenómeno real.

### b) Diagrama cromático r-g

Es habitual, para establecer las unidades para los primarios, que una mezcla de las mismas cantidades de las tres funciones de igualación den un blanco estándar. Este resultado se expresa por la ecuación de colorimetría:

$$\text{Blanco estándar WE} \cong 0,333 [\text{R}] + 0,333 [\text{G}] + 0,333 [\text{B}]$$

Para obtener luz blanca tomando la misma cantidad de cada primario debe cumplirse que la luminancia de cada uno sea:

$$L_R = 1, L_G = 4,5907, L_B = 0,0601 \quad (5)$$

Donde [R], [G] y [B] representan, respectivamente, una unidad tricromática de cada uno de los primarios (rojo, verde y azul). Las cantidades equivalentes de los primarios están normalizadas de manera que su suma es la unidad. Usando las unidades establecidas de esta manera, el resultado de la igualación de un color espectral C de longitud de onda  $\lambda$  está dado por:

$$C(\lambda) \cong r(\lambda) [\text{R}] + g(\lambda) [\text{G}] + b(\lambda) [\text{B}] \quad \text{Ecuación tricromática}$$

donde  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  son valores triestímulo escalares y representan luminancias o radiancias. Sus valores son dependientes de la longitud de onda.

Este procedimiento de normalización separa la calidad de un color espectral, su cromaticidad descrita por [R], [G], [B], de su luminancia o radiancia  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$  y  $b(\lambda)$ .

De modo que:

$$r(\lambda) + g(\lambda) + b(\lambda) = 1. \text{ Ecuación unitaria.}$$

De aquí se obtienen los coeficientes o coordenadas tricromáticas (ver anteriormente ecuación tricromática).

$$\begin{aligned} r(\lambda) = \bar{r} &= \frac{\bar{r}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \\ g(\lambda) = \bar{g} &= \frac{\bar{g}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \\ b(\lambda) = \bar{b} &= \frac{\bar{b}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \end{aligned} \quad (6)$$

Estos tres coeficientes son las coordenadas cromáticas,  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  o simplemente ( $r$ ,  $g$ ,  $b$ ) señaladas en (6), que permiten la representación gráfica de los colores a partir de las funciones de igualación anteriores, figura (III-10).

En muchos casos, lo que nos interesa no son las cantidades absolutas de los colores primarios, sino sus proporciones relativas, es decir, lo que nos interesa es la cromaticidad y no la luminancia.

Como los coeficientes tricromáticos cumplen la condición  $r + g + b = 1$ , entonces conociendo 2 de ellos, el tercero se puede obtener despejándolo de la ecuación:

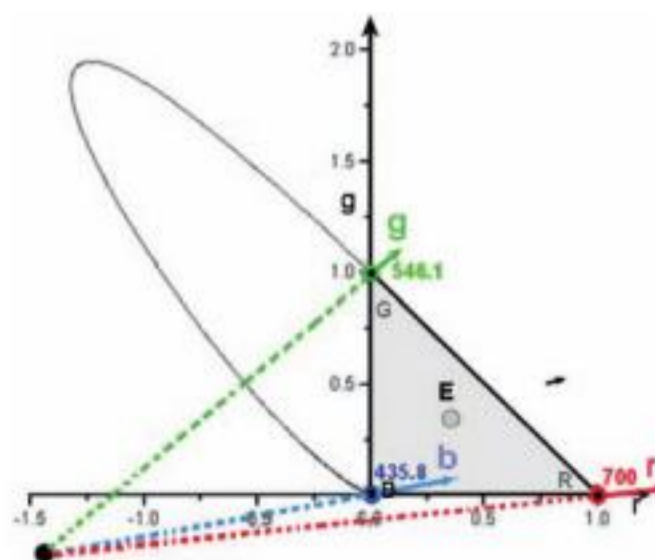
$$b = 1 - (g + r)$$

Si en el plano de igual luminancia construimos mediante la colocación adecuada de los ejes el triángulo rectángulo isósceles de la figura III-8 y III-10, podemos representar los datos de las funciones de igualación.

Con la normalización, la representación de los colores se puede realizar en un plano bidimensional de **coordenadas (r, g)**.

Figura III-10. Spectrum Locus del triángulo RGB.

Si representamos todos los colores espectrales puros que están fuera del triángulo, obtendremos una curva denominada *lugar del espectro*, también conocida con el nombre de *Spectrum Locus*, que, pasando por los tres primarios elegidos, engloba todos los colores espectrales.



Curva de los colores espectrales en el sistema de coordenadas (r-g).



La figura III-10 muestra la distribución de cromaticidades en el plano de coordenadas (r-g). Todos los colores presentes dentro del triángulo de vértices R, G y B pueden imitarse sin coeficientes negativos. Los colores situados fuera del triángulo poseerán alguna coordenada negativa. El punto E se corresponde con el blanco equienergético.

Si se representan en un plano las coordenadas r, g de cada  $\lambda$ , se obtiene una curva (figura III-10) en forma de herradura sobre la que se sitúan los colores espectrales. Por tanto, nos referiremos a ella como *lugar del espectro o locus spectral*. Los primarios  $\lambda_R$ ,  $\lambda_G$  y  $\lambda_B$  se sitúan en los vértices del triángulo.

El blanco equienergético E ocupa el centro del triángulo rectángulo isósceles.

En algunas zonas del plano de colores delimitado por el spectrum, con pequeños desplazamientos numéricos de componentes se producen grandes variaciones de color, mientras que en otras zonas modificaciones sustanciales apenas ejercen variaciones en el color, por lo que casi toda la variación de colores se encuentra en una zona muy reducida, dejando zonas muy amplias sin casi variación de color (por ej., la zona verde del diagrama rg).

El principal problema de esta representación es que la mayoría de los colores tienen una de las coordenadas negativa, lo que dificulta los cálculos colorimétricos y el cálculo de la luminancia partiendo de las componentes tricromáticas.

En el sistema RGB existen muchos colores fuera del triángulo de primarios.

Por ello la CIE ha creado otro sistema de coordenadas que engloba todo el spectrum locus y el triángulo RGB llamado CIE-XYZ 1931.

### **ESPACIO DE COLOR XYZ-CIE 1931**

El espacio de color CIE XYZ se obtuvo a partir de una serie de experimentos realizados a finales de 1920 por David W. Wright y John Guild. Sus resultados experimentales se combinaron en la especificación del espacio de color RGB de la CIE, de la que el espacio de color CIE XYZ se deriva.

El espacio de color XYZ se obtiene por transformación lineal del espacio RGB. A pesar de que el sistema RGB podía especificar un color unívocamente, existían algunos problemas:

1. En el espacio RGB la luminancia no se destaca claramente, sino que hay que realizar una operación para calcularla.
2. El cálculo del color de una muestra implica el manejo de valores negativos en algunas funciones colorimétricas r (R), b (B) y g (G), no siempre comprensibles por todos los usuarios.

Para resolver estos problemas, en 1931, la Commission Internationale pour l'Éclairage (CIE) acordó tomar como primarios o base tres colores ideales (irreales) X, Y, Z, un nuevo sistema para la especificación del color, obtenidos mediante una transformación matricial del tipo [M], con todos los coeficientes positivos.

El requisito principal que debían cumplir los nuevos primarios era que las coordenadas xzy no fueran negativas, lo que significa que el triángulo XYZ debe abarcar toda la gama del observador estándar, por lo que el triángulo XYZ incluye todos los estímulos de color reales.

Entre las infinitas ternas de primarios que se podían haber elegido que cumplieran la condición señalada, se inclinaron por la terna que además cumplía otras condiciones:

- Elección de los tres primarios XYZ de forma que el valor triestímulo Y lleve toda la información del flujo luminoso, con lo cual el valor triestímulo Y es el parámetro que codifica la luminosidad, es decir, Y está correlacionado directamente con la variable perceptual denominada *claridad*.
- Una de las funciones de igualación del nuevo espacio  $\bar{y}(\lambda)$  coincide con la función de



sensibilidad espectral del ojo humano o función de eficiencia luminosa fotópica o función de luminosidad  $V(\lambda)$ .  $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$ .

- El lado XZ define la recta que tiene los colores carentes de luminosidad, para que sea Y quien dé la luminosidad. Bajo la condición de que:  $r + g + b = 1$ .
- Los lados XY e YZ del triángulo que definen los primarios en el diagrama cromático son tangentes al lugar espectral.
- El punto equienergético tiene valores triestímulo iguales. Es decir:  $XE = YE = ZE$ . El blanco teórico o equienergético se situó en el centro del lugar espectral, debía seguir siendo:  $x = y = z = 0,33$ . Se eligió el mismo blanco que en el espacio RGB, el blanco debía continuar teniendo iguales sus tres componentes para mantener la ventaja que aportó RGB.
- El lado XY del triángulo XYZ debe coincidir con la zona GR del espectro, esto es, con la hipotenusa del triángulo rectángulo, tangente al lugar del espectro del diagrama RGB. Es el componente de cromaticidad  $(x, y)$ , que es la integración del tono y la saturación en el plano  $x$ - $y$ .

Este nuevo espacio se conoce como CIE-XYZ (CIE 15:2004) y las coordenadas cromáticas de los nuevos primarios en el espacio RGB fueron elegidas como:

Coordenadas de X en rgb son:  
 $X (1,2750r, -0,2778g, 0,0028b)$

Coordenadas de Y en rgb son:  
 $Y (-1,7294r, 2,7674g, -0,0280b)$

Coordenadas de Z en rgb son:  
 $Z (-0,7429r, 0,1409g, 1,6020b)$

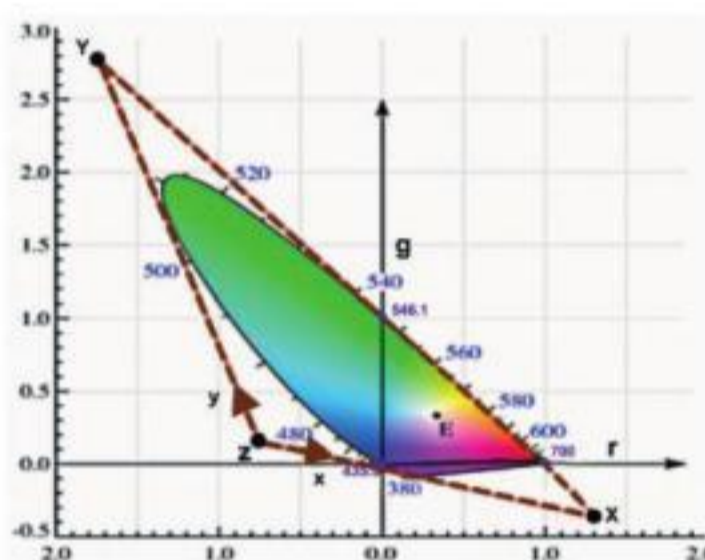


Figura III-11.

Coordenadas de los primarios XYZ en el plano  $rg$ , su relación con el triángulo RGB y spectrum locus RGB. Como puede observarse, los lados XY e YZ son tangentes al lugar espectral. Los primarios X y Z se encuentran sobre la alychne o recta de luminancia nula. Se muestra la relación del Diagrama de cromaticidad CIE  $r$ - $g$  dentro del triángulo  $xyz$  de especificación en el espacio de color CIE XYZ. Obsérvese que el locus espectral pasa a través de  $rg = (0,0)$  a 435,8 nm, a través de  $rg = (0,1)$  a 546,1 nm y que a través de  $rg = (1,0)$  a 700 nm. Asimismo, la igualdad de la energía (E) está en  $rg = xy = (1/3, 1/3)$ .

En términos geométricos, la elección del nuevo espacio de color equivale a la elección de un nuevo triángulo en el espacio de cromaticidad  $r$ - $g$ . En la figura III-11, las coordenadas de cromaticidad  $r$ - $g$  se muestran en los dos ejes en negro, junto con la gama del observador estándar 1931. También muestra en marrón los ejes de cromaticidad CIE  $x$ - $y$ .

Aplicando la ecuación de cambio de base vectorial que podéis encontrar en el ANEXO al final del libro.

$$[x]_{B'} = [P_{B \rightarrow B'}][x]_B$$

Si  $[x]_{RGB}$  y  $[x]_{XYZ}$  son las matrices columnas de los primarios respectivos en ambas bases.



Siendo  $M$  la matriz de transformación de la base B (antigua = RGB) a la base B' (nueva = XYZ). Se cumple:

$$[\mathbf{x}]_{XYZ} = M \cdot [\mathbf{x}]_{RGB} \quad (1)$$

Sean los vectores triestímulos  $[\mathbf{x}]_{RGB}$  en el espacio básico RGB y  $[\mathbf{x}]_{XYZ}$  en el espacio XYZ, y  $M$  o  $M_{RGB \rightarrow XYZ}$  o  $[M]$  la matriz de transformación del espacio RGB al espacio XYZ. En este último espacio las coordenadas correspondientes a los primarios RGB tienen valores positivos (es la condición prefijada).

$$[M] = \begin{bmatrix} 0.4887 & 0.3107 & 0.2006 \\ 0.1762 & 0.8130 & 0.0108 \\ 0.0000 & 0.0102 & 0.9898 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0.4887 & 0.3107 & 0.2006 \\ 0.1762 & 0.8130 & 0.0108 \\ 0.0000 & 0.0102 & 0.9898 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Esta última expresión proporciona las coordenadas en el espacio XYZ, de los primarios RGB.

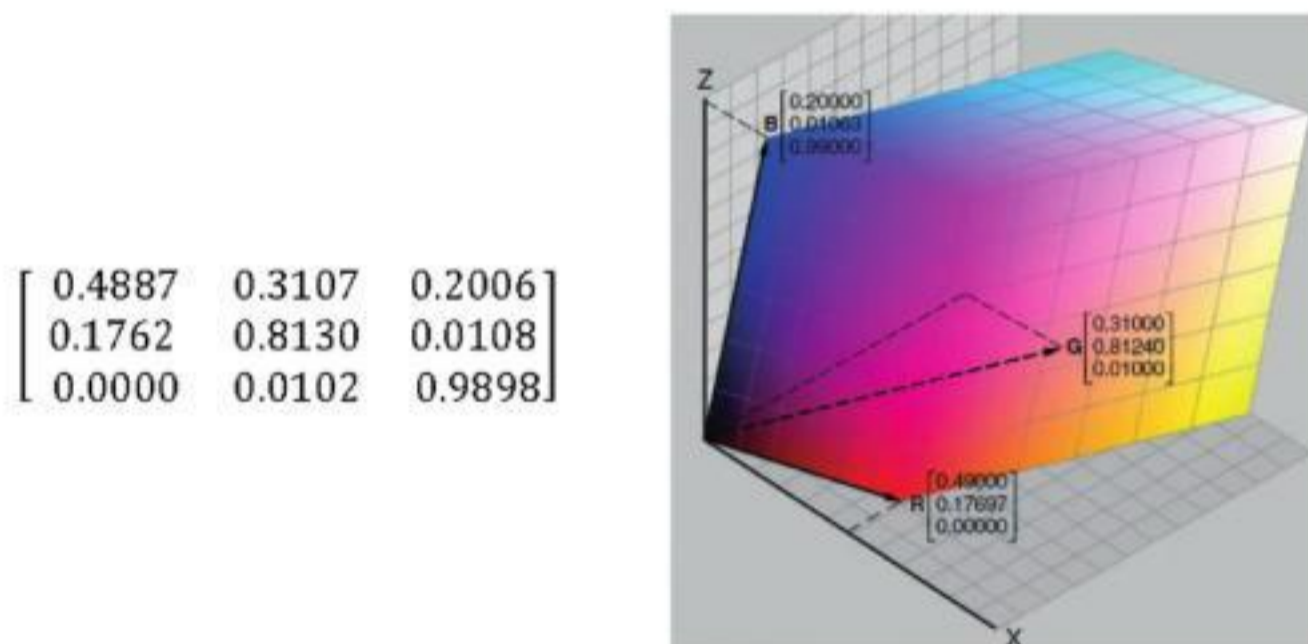


Figura III-12.

Si multiplicamos ambos miembros de la ecuación (1) por la inversa de  $M$ , es decir, por  $M^{-1}$  tenemos:

$$M^{-1}[\mathbf{x}]_{XYZ} = M^{-1}M \cdot [\mathbf{x}]_{RGB} \Rightarrow M^{-1}[\mathbf{x}]_{XYZ} = [\mathbf{x}]_{RGB} \quad (2)$$

La  $[M]^{-1}$ , matriz inversa de  $[M]$ , es también la matriz de transformación  $M_{XYZ \rightarrow RGB}$  de las coordenadas XYZ al espacio RGB, en dicho espacio algunas tienen valores negativos.

$$\begin{bmatrix} 2.3707 & -0.9000 & -0.4706 \\ -0.5139 & 1.4253 & 0.0886 \\ 0.0053 & -0.0147 & 1.0094 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}; [M]^{-1} = \begin{bmatrix} 2.3707 & -0.9000 & -0.4706 \\ -0.5139 & 1.4253 & 0.0886 \\ 0.0053 & -0.0147 & 1.0094 \end{bmatrix}$$

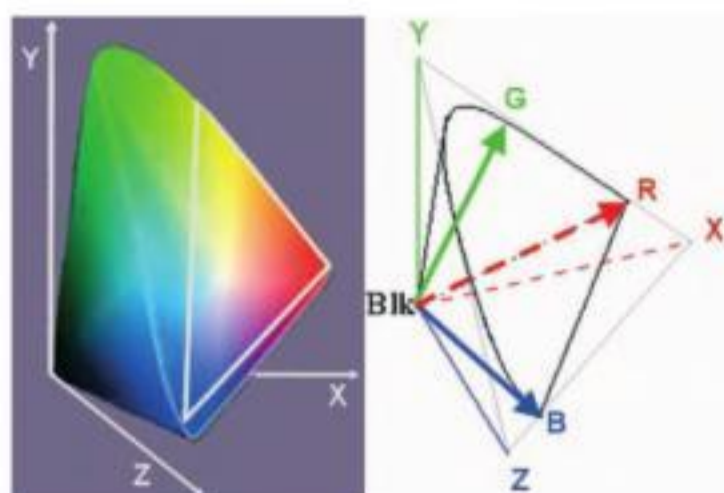


Figura III-13. Espacio CIE-XYZ.

MATRICES DE TRANSFORMACIÓN			
Espacio de trabajo RGB	Blanco de referencia	RGB a XYZ [M] DE B a B'	XYZ a RGB [M] <sup>-1</sup> DE B' a B
CIE RGB	E	0,4887180 0,3106803 0,2006017 0,1762044 0,8129847 0,0108109 0,0000000 0,0102048 0,9897952	2,3706743 -0,9000405 -0,4706338 -0,5138850 1,4253036 0,0885814 0,0052982 -0,0146949 1,0093968
Adobe RGB (1998)	D65	0,5767309 0,1855540 0,1881852 0,2973769 0,6273491 0,0752741 0,0270343 0,0706872 0,9911085	2,0413690 -0,5649464 -0,3446944 -0,9692660 1,8760108 0,0415560 0,0134474 -0,1183897 1,0154096
sRGB	D65	0,4124564 0,3575761 0,1804375 0,2126729 0,7151522 0,0721750 0,0193339 0,1191920 0,9503041	3,2404542 -1,5371385 -0,4985314 -0,9692660 1,8760108 0,0415560 0,0556434 -0,2040259 1,0572252
ColorMatch RGB	D50	0,5093439 0,3209071 0,1339691 0,2748840 0,6581315 0,0669845 0,0242545 0,1087821 0,6921735	2,6422874 -1,2234270 -0,3930143 -1,1119763 2,0590183 0,0159614 0,0821699 -0,2807254 1,4559877
Wide Gamut RGB	D50	0,7161046 0,1009296 0,1471858 0,2581874 0,7249378 0,0168748 0,0000000 0,0517813 0,7734287	1,4628067 -0,1840623 -0,2743606 -0,5217933 1,4472381 0,0677227 0,0349342 -0,0968930 1,2884099

### 1) Funciones de igualación para el observador estándar de la CIE XYZ 1931

Debido a la distribución anatómica de los conos en el ojo, los valores triestimulo dependerán del campo de visión del observador. Para eliminar esta variable, la CIE definió el **observador estándar colorimétrico CIE XYZ**. Originalmente, considerado como la media de las percepciones cromáticas de la visualización a través de un ángulo de 2.°, debido a la creencia de que el color de los conos sensibles residía dentro de un arco de 2.° de la fovea. Por lo tanto, en la 8.ª reunión general de la CIE en 1931, se dieron unas tablas con los coeficientes colorimétricos que constituyen la definición del *Observador estándar CIE 1931*, también conocido como *CIE 1931 2.° Observador estándar*.

Había dos conjuntos de datos, los coeficientes  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  y  $\bar{b}(\lambda)$ , referidos a tres primarios espectrales y los coeficientes  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  y  $\bar{z}(\lambda)$ , propuestos por Judd (1930), como transformación lineal de los primeros, que resultaban más adecuados para la colorimetría práctica. Más moderna pero menos utilizada es la alternativa CIE 1964 10.° Observador estándar, que se deriva de los trabajos de Stiles, Burch y Speranskaya.

Los coeficientes de la transformación lineal fueron elegidos de modo que no dieran lugar a coordenadas negativas, que los valores de la función  $\bar{y}(\lambda)$  coincidieran exactamente con los valores de la **función de luminosidad fotópica  $V(\lambda)$**  para el “observador fotópico estándar de la CIE”, y que para el iluminante de espectro equienergético las coordenadas x, y, z, fueran iguales.

La función de luminosidad  $V(\lambda)$  describe la variación de brillo percibido con la longitud de onda, se puede considerar casi lineal, debido a la naturaleza lineal de la visión humana. La  $V(\lambda)$  se puede utilizar para convertir la energía radiante en energía luminosa (es decir, visible). Existen otras tablas de valores  $V(\lambda)$  de referencia. Una vez más, *la principal razón para la*



creación del sistema XYZ fue la simplificación del cálculo.

Para calcular las **funciones de igualación** se aplica la matriz de transformación:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_\lambda \\ \bar{y}_\lambda \\ \bar{z}_\lambda \end{pmatrix} = [\mathbf{M}] \begin{pmatrix} \bar{r}_\lambda \\ \bar{g}_\lambda \\ \bar{b}_\lambda \end{pmatrix}$$

A partir de la transformación pueden obtenerse las **funciones de igualación de color** en este sistema  $(\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda)$ , que están relacionadas con  $(\bar{r}_\lambda, \bar{g}_\lambda, \bar{b}_\lambda)$  por:

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_\lambda \\ \bar{y}_\lambda \\ \bar{z}_\lambda \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4887 & 0.3107 & 0.2006 \\ 0.1762 & 0.8130 & 0.0108 \\ 0.0000 & 0.0102 & 0.9898 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r}_\lambda \\ \bar{g}_\lambda \\ \bar{b}_\lambda \end{pmatrix}$$

Las nuevas funciones de coincidencia de color de todo el mundo iban a ser mayor o igual a cero. En 1931, los cálculos se realizaron con la mano o con regla de cálculo, y la especificación de los valores positivos en el cálculo es una simplificación útil.

Se constató que la función  $\bar{z}(\lambda)$  de igualación de color se podría establecer a cero por encima de 650 nm, mientras permanezcan dentro de los límites de error experimental.

La línea que une los puntos x con z se fija por el requisito de que la función de igualación de color  $\bar{y}(\lambda)$  fuese igual a la función de luminosidad. Esta línea es la línea de cero luminancia, y se denomina *alychne*.

Los coeficientes colorimétricos del observador patrón CIE 1931 se obtuvieron a partir de las medidas hechas por Guild con 7 observadores en el National Physical Laboratory en Teddington, y con las medidas hechas por Wright con 10 observadores en el Imperial College de Londres, suplementadas con las medidas de Wright con 35 observadores para comprobar el efecto de la pigmentación macular.

Llevando las curvas de los distintos laboratorios a un mismo conjunto de primarios se obtuvieron tres curvas, llamadas  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , que fueron adoptadas oficialmente por la CIE en 1931.

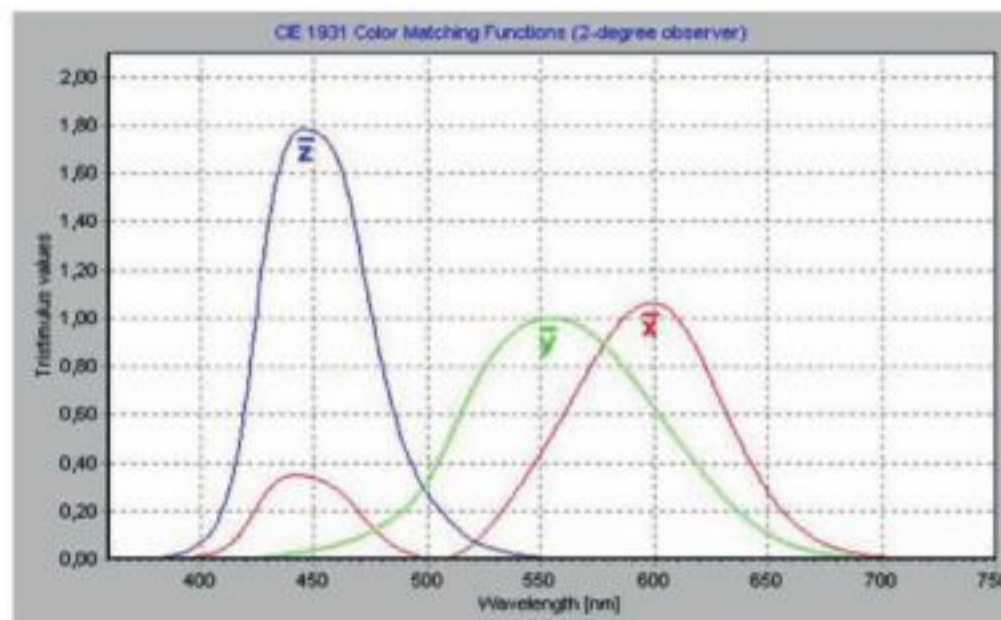


Figura III-14. Curvas de las **funciones de igualación o coincidencia de color colorimétricas CIE 1931** (CIE color-matching functions) del observador estándar colorimétrico CIE 1931 (CIE 1931 Standard Colorimetric Observer), al que se suele llamar observador de 2°.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

Los valores tabulados son las cantidades de cada uno de los estímulos de referencia  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  que se necesitan para igualar cada radiación monocromática del espectro visible, para un vatio de potencia radiante. Es decir, son los valores triestímulo de las componentes espectrales de la radiación equienergética, cuyo flujo radiante es la unidad.

Estas funciones colorimétricas definen y componen el **sistema colorimétrico patrón CIE 1931**, aplicable a campos de observación hasta 4°, siendo un sistema lineal y unívoco para la evaluación de cualquier radiación con ayuda de estas funciones.

Para cualquier color, la cantidad de luz emitida por cada longitud de onda se representa con la denominada distribución espectral de la potencia radiante, cuyas iniciales en inglés son SPD (*spectral power distribution*). Cuando se añaden diferentes SPD se crea un nuevo color, que es lo que se conoce como mezcla aditiva del color.

**2) Determinación de los valores triestímulo a partir de las funciones de igualación de un color con una distribución espectral de potencia radiante determinada**, están dados en términos del observador estándar:

Por medio de las funciones de igualación de color, los estímulos luminosos con cualquier distribución espectral de energía se pueden especificar para su color por medio de tres valores:

$$X = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) dy$$

$$Y = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) dy$$

$$Z = k \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) dy$$

donde  $\Phi(\lambda)$  es la distribución espectral del estímulo luminoso y k es una constante de normalización. Estos valores integrados son los **valores triestímulo**. Para las fuentes de luz y *displays* (pantallas de visualización de aparatos electrónicos),  $\Phi(\lambda)$  se da en cantidades tales como irradiancia espectral y radiancia espectral. Si  $\Phi(\lambda)$  se da en una unidad absoluta y  $k = 683 \text{ lm/W}$ , Y rendirá una cantidad fotométrica absoluta tal como la luminancia o la iluminancia. Donde  $\lambda$  es la longitud de onda de la luz equivalente monocromática (medida en nanómetros).

Adoptado el sistema colorimétrico anterior vamos a determinar los valores triestímulo de una radiación monocromática de longitud de onda 500 nm y flujo radiante 1 vatio. A partir de la tabla III-2, se obtiene:

$$X = 0,0049$$

$$Y = 0,3230$$

$$Z = 0,2720$$

Para otra radiación de la misma longitud de onda y un flujo radiante de dos vatios, los valores triestímulo son ahora el doble de los anteriores:

$$X = 0,0049 \times 2 = 0,0098$$

$$Y = 0,3230 \times 2 = 0,6460$$

$$Z = 0,2720 \times 2 = 0,5440$$

Así pues, los valores triestímulo no indican de un modo fácilmente comprensible la naturaleza de la diferencia de color cuando esta se presenta. Las dos radiaciones anteriores son de la misma calidad cromática (tono y saturación) pero una es más luminosa que otra, lo que viene confirmado por el triestímulo Y, ya que  $\bar{y}(\lambda)$  es proporcional a la función de luminosidad.



### 3) Diagrama y coordenadas de cromaticidad x-y

La representación espacial del sistema XYZ suele realizarse a partir de coordenadas de cromaticidad que se corresponden con una normalización de los primarios. Se normaliza la luminancia de los tres estímulos, de tal forma que la suma de las tres componentes sea igual a 1, teniendo en cuenta que esta luminancia sea dada solo por eje y, por lo que las luminancias x y z son cero.

Para el punto de igual energía (punto blanco E), se requiere que  $x = y = z = 1/3$ .

El triángulo xyz es simplemente el triángulo xy = (0,1), (1,0), (0,0), en el espacio de cromaticidad CIE x-y.

En virtud de la definición de cromaticidad y el requisito de los valores positivos de x e y, se puede ver que la gama de todos los colores se encuentra en el interior del triángulo (1,0), (0,1), (0,0).

Tomando los coeficientes x e y, todos los colores quedan representados en el triángulo de vértices (1,0), (0,1), (0,0). Ubicando los puntos del espectro dentro del triángulo obtenemos el **diagrama de cromaticidad**.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Donde X, Y, Z son los valores triestímulo.

Solo dos de estas variables son independientes, cumpliéndose su relación indiferentemente de los valores asignados a X, Y, Z. Por ello, en lugar de utilizar los valores triestímulo para especificar un color, se comprende mejor si se especifica en función de **x, y, Y**. En el ejemplo anterior se puede comprobar que las radiaciones monocromáticas tienen la misma cromaticidad y se diferencian en la luminosidad debida al flujo radiante.

$$x + y + z = 1$$

De donde se deduce que

$$z = 1 - (x+y).$$

De este modo, solo dos coordenadas son necesarias para describir el proceso de igualación del color, ya que el coeficiente z se deriva automáticamente de las dos anteriores.

Así, en un diagrama cuyos ejes cartesianos representen las variables x e y podemos representar las distintas cromas. La representación del espectro en un plano 2D se conoce como **diagrama cromático x-y CIE 1931**, o diagrama de cromaticidad o de tonos de la CIE, es un espacio plano.

La recta que une los 400 nm con los 700 nm es la línea de los magentas o púrpuras, son los colores no espectrales. Esta línea cierra el lugar espectral y dentro deben hallarse los puntos representativos de todos los colores reales.

En la figura III-15 se muestra la curva obtenida al representar las coordenadas de cromaticidad de los colores del espectro visible, tiene forma de "herradura". Todos los colores espectrales saturados al 100 % se sitúan en el borde del diagrama.

**El diagrama de cromaticidad constituye un buen método de especificación de colores.** Se concibe como un triángulo rectángulo en el que los tres primarios irreales se sitúan en los vértices y todos los colores del espectro se sitúan a lo largo de la curva en herradura. En el interior de la curva en herradura se sitúa el triángulo RGB. Las posiciones de los diferentes colores espectrales se indican alrededor de la línea curva. Cualquier punto situado no exactamente en el borde, pero sí dentro del diagrama, representa una mezcla de colores del espectro, o un punto



situado dentro de la “herradura” representa un color mezcla de radiaciones con una longitud de onda predominante y una determinada saturación.

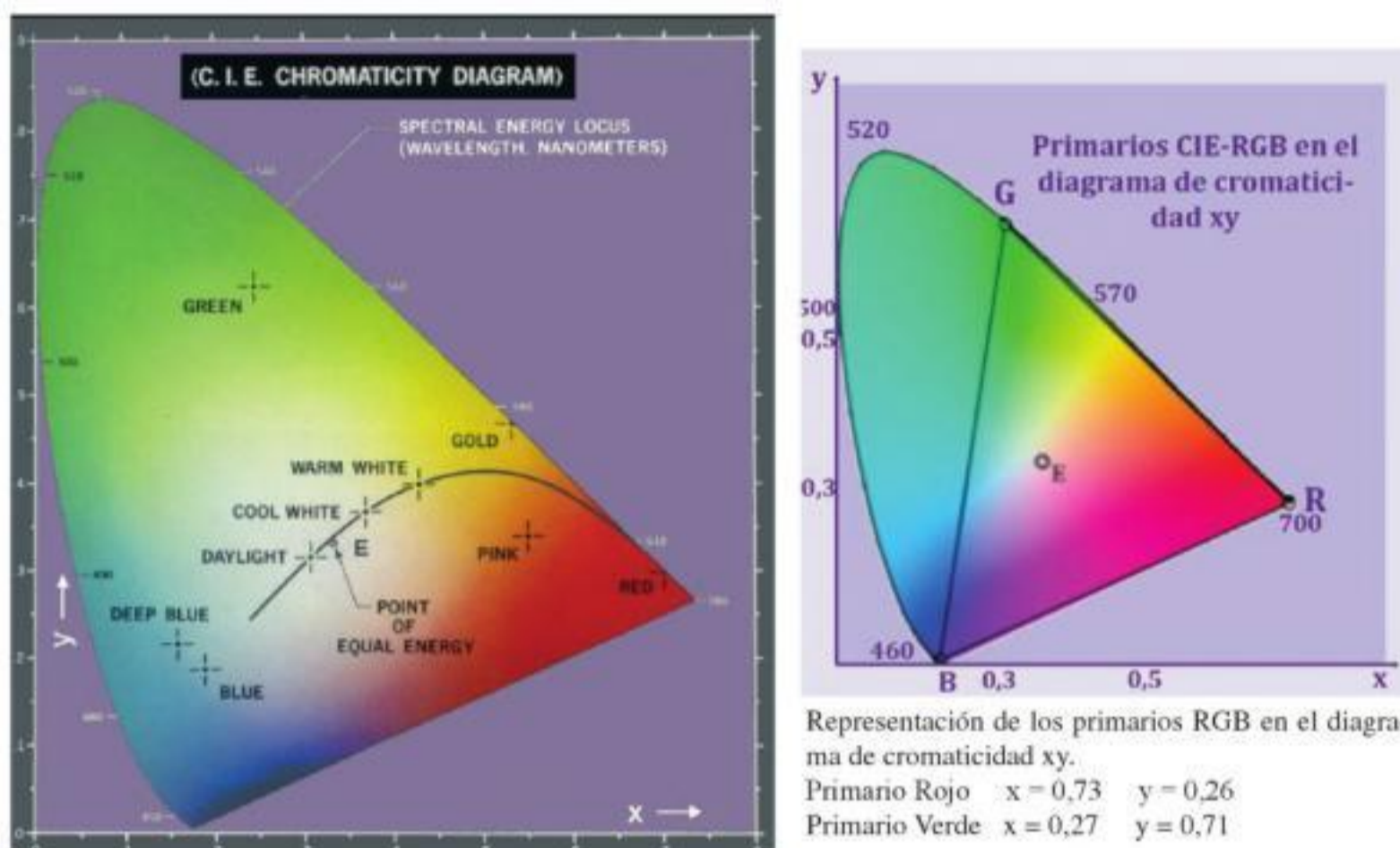


FIGURA III-15. Diagrama de cromaticidad x-y CIE 1931.

La curva definida por todos los colores puros del espectro se denomina *lugar del espectro*.

Es el borde curvo del diagrama (*spectral energy locus*) corresponde al locus de los colores con las longitudes de onda puras entre 380 nm (azul púrpura) y 780 nm (rojo oscuro), fuera de estos límites las longitudes del espectro electromagnético no son visibles. En el denominado *spectral locus* (o monocromático), las longitudes de onda se muestran en nanómetros.

Ejemplo, el color verde esmeralda con una longitud de onda dominante estándar de 510 nm corresponde a las coordenadas cromáticas  $x = 0,014$ ,  $y = 0,750$  y  $z = 0,236$ . Hay unas tablas tabuladas que dan las coordenadas cromáticas del Locus Espectral del Observador Patrón CIE 1931 XYZ (2.º) según la longitud de onda ( $\lambda$ ).

COORDENADAS CROMÁTICAS DEL LOCUS ESPECTRAL DEL OBSERVADOR PATRÓN CIE-1931 XYZ (2º)			
$\lambda$ (nm)	$x(\lambda)$	$y(\lambda)$	$z(\lambda)$
360	0.175560	0.005294	0.819146
365	0.175161	0.005256	0.819582
370	0.174821	0.005221	0.819959
375	0.174510	0.005182	0.820309
380	0.174112	0.004964	0.820924
385	0.174008	0.004981	0.821012
390	0.173801	0.004915	0.821284
395	0.173560	0.004923	0.821517
400	0.173337	0.004797	0.821866
405	0.173021	0.004775	0.822204
410	0.172577	0.004799	0.822624
415	0.172087	0.004833	0.823081
495	0.023460	0.412703	0.563837
500	0.008168	0.538423	0.453409
505	0.003859	0.654823	0.341318
510	0.013870	0.750186	0.235943
515	0.038852	0.812016	0.149132
520	0.074302	0.833803	0.091894
525	0.114161	0.826207	0.059632
530	0.154722	0.805864	0.039414
535	0.192876	0.781629	0.025495
540	0.229620	0.754329	0.016051
545	0.265775	0.724324	0.009901
550	0.301604	0.692308	0.006088
555	0.337363	0.658848	0.003788
560	0.373102	0.624451	0.002448
565	0.408736	0.589607	0.001657



Con este diagrama cromático se pueden definir exactamente los colores para comparación y procesos de manufactura.

El interior del diagrama representa el color mezcla en distintas proporciones de varias longitudes de onda.

El punto de energía neutro (*Point of Equal Energy*) representa el punto en el que todas las radiaciones entre el azul, verde y rojo tienen la misma intensidad (blanco teórico).

Puede verse como el blanco de la luz natural (*daylight*), el blanco de una lámpara fría (*cool white*) o el blanco de una lámpara incandescente (*warm white*) difieren sensiblemente del blanco teórico.

El punto E representa al blanco equienergético, el mismo que en el sistema RGB, es el punto de igual energía para los tres colores primarios. A medida que un punto abandona el borde y se aproxima a E se añade más luz blanca y se hace menos saturado. La saturación en E es 0. Las coordenadas del blanco E (W) son  $x = y = z = 0,3333$ .

Los colores sobre la herradura, que se obtienen prolongando el segmento que pasa por E (W), son colores complementarios del espectro.

El modelo cromático XYZ es independiente del dispositivo y se emplea en aplicaciones en las que la representación del color no dependa de la naturaleza del equipo o *hardware*, por ejemplo, en los sistemas industriales de medición del color. Asimismo, el modelo XYZ es empleado para especificación normalizada del color y en los cálculos colorimétricos.

Coordenadas en el diagrama x-y	x	y
Primario Rojo	0,73	0,26
Primario Verde	0,27	0,71
Primario Azul	0,17	0,009
Blanco E	0,33	0,33

El diagrama de cromaticidad es útil porque la unión de dos puntos cualesquiera del diagrama por una línea recta define todas las variaciones de colores que pueden obtenerse combinando los dos primarios de forma aditiva.

Para determinar el rango de colores que pueden obtenerse a partir de tres primarios cualesquiera del diagrama, se unen los tres puntos mediante líneas. Los colores del interior del triángulo formado son los reproducibles por los tres primarios elegidos.

Cuando se conocen x, y, Y, se pueden calcular los valores triestímulos:

$$X = \frac{Y \cdot x}{y}; \quad Z = \frac{Y \cdot (1 - x - y)}{y}$$

**Sistema XYZ de la CIE(1964):** El sistema XYZ que hemos visto corresponde al año 1931 y fue realizado con base en las ecuaciones unitarias para todos los colores espectrales puros. La experimentación se hizo bajo un ángulo de observación de 1° a 4°. En 1964 se normalizó que los ángulos de observación puedan ser superiores a 4°. Para diferenciar ambos sistemas se acostumbra a escribir los datos relativos al diagrama XYZ de 1964 con los subíndices correspondientes al ángulo de observación. Por ejemplo X10, Y10, Z10. El papel del modelo XYZ en procesamiento de imágenes es realmente escaso, si bien, será requerido como espacio intermedio para realizar transformaciones del sistema RGB a otras coordenadas cromáticas como L\*a\*b\* o L\*u\*v\*.



## LA MEDIDA DE LOS COLORES

### Medida de un color

Es el proceso de localización de sus tres componentes, dando por sentado que se conocen las características de los tres colores que se han utilizado como primarios.

### Medida de los componentes de los colores puros con potencia constante

Aunque el conjunto de colores espectrales puros es una parte muy reducida dentro del mundo de todos los colores, la realidad es que también hay infinitos colores espectrales puros.

Para realizar la medida se tomaron colores a intervalos de 10 en 10 nm, todos con la misma potencia en vatios, con potencia  $P_0$ , donde  $P_0$  puede ser cualquier valor, en este caso se tomó  $P_0$  tal que para 555 nm se obtuviese una luminancia de un nit.

Como resultado se obtuvo una tabla III-2 en la que puede observarse: en los extremos del espectro los valores de los tres componentes descienden hacia cero, lógicamente, puesto que esos colores, aunque tengan la misma potencia energética, el ojo casi no los ve y las cantidades de tres colores que el ojo ve perfectamente tienen que ser muy pequeñas para conseguir la sensación de igualdad.

Los valores de LB son muy pequeños ya que el color azul (B) elegido como primario se encuentra en una zona del espectro en la que el ojo apenas tiene sensibilidad. Por esto, en algunos libros al confeccionar la tabla representan  $10 \cdot LB$ .

### Blanco equienergético

Es el color formado por la suma de todos los colores espectrales puros, todos ellos con la misma potencia, será un color con componentes:  $L(W) = LR + LG + LB \Rightarrow$  Las luminancias de cada primario LR, LG, LB para igualar la luminancia del blanco equienergético L(W), según Grassman, viene dada por la ecuación.

$$1 + 4,5907 + 0,0601 = 5,6508 \text{ cd/cm}^2$$

Donde los valores numéricos solo son útiles en esta prueba particular (si hubiésemos utilizado otra  $P_0$ , los valores serían otros, por ejemplo:  $LR = 1,00$  (700 nm),  $LG = 4,33$  (546 nm) y  $LB = 0,047$  (436 nm) según Wright; lo importante es la relación de proporción entre los valores. Para ver más clara la proporción se suele asignar el valor uno al rojo.

### Longitud de onda dominante

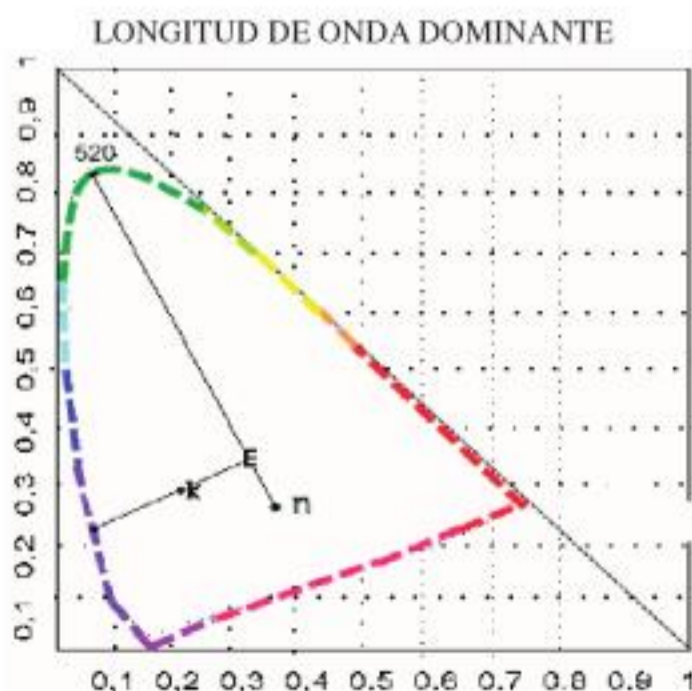


Figura III-16.



Un punto cualquiera de la superficie del diagrama de cromaticidad ( $k$  en la figura III-16) tiene una longitud de onda dominante que se puede calcular trazando una recta que pase por dicho punto y por el blanco  $E$ . Esta recta corta a la curva lugar del espectro en un determinado punto cuya longitud de onda conocemos y que es la longitud de onda dominante del color "k".

Los colores comprendidos en el triángulo formado por el blanco  $E$  y los dos extremos de la curva lugar del espectro se denominan *colores no espectrales*: púrpuras y magentas. Si se une mediante una línea recta partiendo del blanco  $E$  y prolongándola cortando al punto  $n$ , esta prolongación no cortará a la curva lugar del espectro, no pueden obtenerse estos colores cercanos a  $n$  por mezcla del blanco y otro color del espectro, puesto que no son monocromáticos. La forma de indicar la longitud de onda dominante de un color no espectral es prolongando el segmento que lo une con el blanco  $E$  en dirección opuesta hasta que corte la curva lugar del espectro. La longitud de onda correspondiente se expresará precedida del signo menos. En la figura III-16 el punto  $n$ , que sería un color no espectral, tiene una longitud de onda dominante de  $-520$  nm.

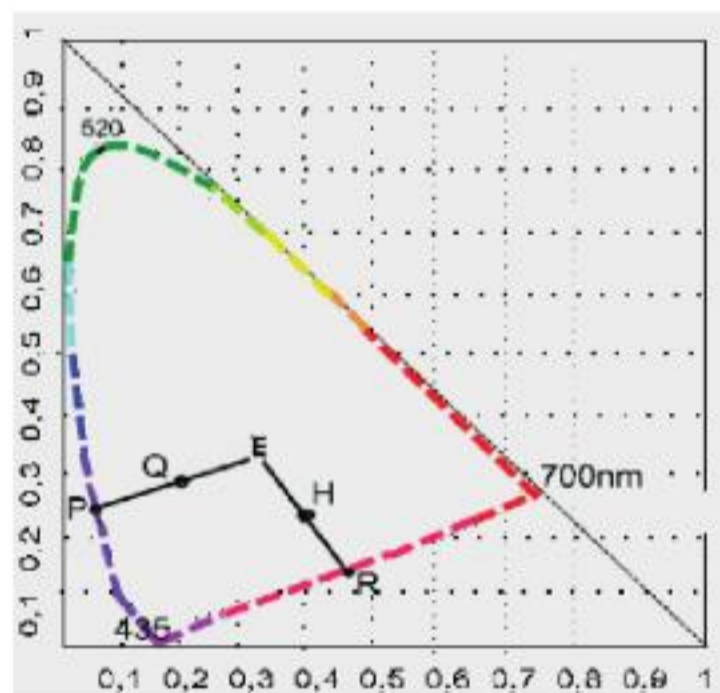


Figura III-17. Pureza de color.

### Pureza de un color

Se define la pureza de un color como el cociente entre los segmentos:

$$P = EQ / EP$$

Es decir, la pureza de un color viene expresada por el cociente entre las distancias del punto del blanco equienergético al punto a considerar (Q), y desde el blanco E hasta el lugar del espectro (figura III-17).

La pureza de colores no espectrales se halla de la misma forma, con la diferencia de que las distancias se toman del blanco E a la recta que une los dos extremos del espectral locus. Se puede definir por el siguiente cociente:

$$P = EH/ER$$

## Mezcla de colores

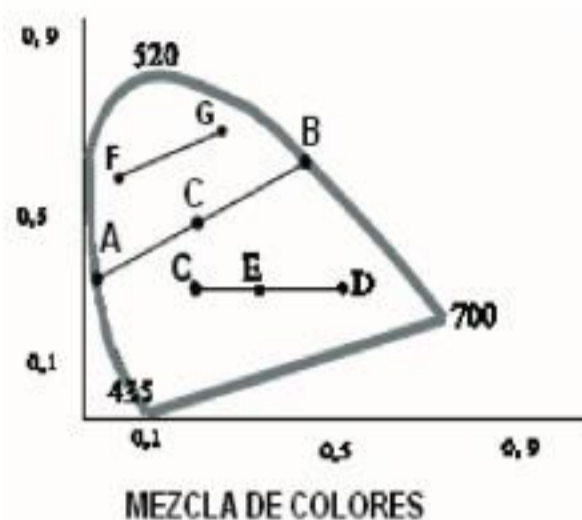


Figura III-18.

Para cualquier color, la cantidad de luz emitida por cada longitud de onda se representa con el denominado SPD. Cuando se añaden diferentes SPD se crea un nuevo color, que es lo que se conoce como mezcla aditiva del color.

Si mezclamos aditivamente dos colores obtenemos otro que se encuentra en la recta que los une en el diagrama de cromaticidad. La distancia que separa ambos colores es proporcional a las cantidades utilizadas de cada uno de los dos componentes.

Cualquier color puede obtenerse como mezcla de blanco teórico más un color, bien espectral puro, bien púrpura.

Los colores que pueden unirse por una recta que pase por el blanco E son los únicos que, en proporción adecuada, pueden mezclarse para obtener blanco y por lo tanto son colores complementarios entre sí (C y D, figura III-18).

Al igual que en el triángulo de Maxwell, se puede trazar una recta desde 2 puntos del borde de la herradura, pasando por C, indicando que C es color mezcla de A y B (ver figura III-18). También, si se aumenta la proporción de B, el punto C se corre hacia el punto B.

No se debe olvidar que el diagrama de cromaticidad es derivado del triángulo a luminancia constante, por lo que aquí tampoco cambia el contenido de brillo de los colores, sino solo su matiz y saturación.

**BIBLIOGRAFÍA**

1. Choudhury, A.K.R. *Modern Concepts of Color and appearance*, Science Publishers, 2000.
2. Artigas, JM.; Capilla, P.; Felipe, A.; Pujol, J. *Óptica fisiológica, psicofísica de la visión*. Madrid : Mcgraw-Hill, 1995.
3. Capilla, P.; Artigas, J. M.; Pujol, J. *Fundamentos de Colorimetría*. Universidad de Valencia 2002. ISBN 84-370-5420-6.
4. González Cuasante, José M<sup>a</sup>; Cuevas Riaño, María; Fernández Quesada, Blanca: *Introducción al Color*. Ediciones Akal SA, Madrid, 2005. ISBN-13:978-84-460-096-9
5. Wyszecki G.; Stiles W.S. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd Edition", John Wiley, (1982).
6. Wright, William David. *The measurement of colour*. Adam Hilger: London. 1969.
7. Jain, Anil K. *Fundamentals of Digital Image Processing*. New Jersey, United States of America: Prentice-Hall Inc.,1989.



8. Gilabert Pérez, Eduardo. La medida del color. Universidad Politécnica de Valencia, 1ª, edición, 2002. ISBN: 84-9705-174-2
9. Lennie, P; Pokorny, J and Smith, VC: Luminance. Journal of the Optical Society of America [en línea] A 10: 1283-1293, 1993. [ref.: 20 abril 2010]. Disponible en web: [http://macboy.uchicago.edu/~eye1/PDF%20files/Lennie,Pokorny\\_Smith%2093.pdf](http://macboy.uchicago.edu/~eye1/PDF%20files/Lennie,Pokorny_Smith%2093.pdf)
10. Pokorny, J; Jin, Q and Smith, VC: Spectral luminosity functions, scalar linearity and chromatic adaptation [en línea]. Journal of the Optical Society of America A 10:1304-1313, 1993.[ref.: 20 abril 2010]. Disponible en web: [http://macboy.uchicago.edu/~eye1/PDF%20files/Pokorny,Jin\\_Smith,%201993.pdf](http://macboy.uchicago.edu/~eye1/PDF%20files/Pokorny,Jin_Smith,%201993.pdf)
11. Ortiz Zamora, Fco Gabriel. Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica. Universidad de Alicante Escuela politécnica Superior Tesis de Doctorado Director Dr. Fernando Torres Medina. 2002 [en línea] Capitulo 2 Fundamentos de Color. [Consulta 12 octubre 2008]. Disponible en web. [http://descargas.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/57915842105571617400080/008591\\_2.pdf](http://descargas.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/57915842105571617400080/008591_2.pdf)



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.

espiritual que contiene el germen del futuro. En esta última cabe distinguir dos tipos de sentimientos que pueden ser despertados en el espectador:

- 1) Sentimientos toscos: miedo, alegría, tristeza, etc.
- 2) Sentimientos sutiles, que no tienen nombre. Provoca en el espectador emociones más matizadas.

El espectador generalmente busca en la obra de arte una pura imitación de la naturaleza o una imitación con una cierta interpretación (impresionismo) y finalmente... “estados de ánimo disfrazados de formas naturales —lo que Kandinsky llama *emoción*—”.

En todas las verdaderamente artísticas y para un espectador capaz de tener tales vibraciones, las obras cumplen su finalidad y son, incluyendo el primer caso 1), alimento espiritual. Especialmente en el último caso 2), es según Kandinsky cuando el espectador encuentra una consonancia o resonancia con su alma.

No es fácil de entender este libro de Kandinsky, en la página 29:

“[...] La reproducción de los objetos es la única meta del arte que se base en “lo material”. El “qué” del arte desaparece *eo ipso*. Lo único que interesa es el “cómo” se representa el objeto en relación con el artista. El arte pierde el alma...”.

Cuando Kandinsky habla del objeto se refiere a la pintura figurativa o realista. Según él, toda la pintura figurativa es materialista y no tiene alma. Es más que discutible que la pintura figurativa (objetual) no tenga alma y estoy convencido de que las pinturas figurativas hacen vibrar y resonar más las almas de los espectadores que las pinturas no figurativas (sin objeto o abstractas).

En cuanto al “qué”, no sé si se refiere a la esencia del arte o a lo espiritual del arte, supongo que será esto último. “Lo esencial en el arte”, concretamente en la pintura, para mí, es dual: materia y alma.

No se puede hacer obra de arte que no se sustente en la materia; solo el arte conceptual puro podría catalogarse como inmaterial. Aunque el lenguaje o escritura imprescindible para ser expresado es material.

El “cómo” es para mí uno de los factores más importantes de la obra de arte, del artista, del grupo al que pertenece el artista. Muchas veces es lo que diferencia a un artista de un “popuar-tista” (*vox populi* artistas), o sea, los artistas consagrados por la masa popular.

Estos “popuar-tistas” forjados por intereses políticos partidistas, regionalistas o autonómicos, con un conocimiento sectario y superficial del arte, son proyectados por campañas propagandísticas y movimientos de *marketing* en los medios de comunicación para grandes masas. Medios de comunicación de masas o masivos (término muy utilizado en inglés como: *mass media*) son los medios de comunicación recibidos simultáneamente por una gran audiencia, equivalente al concepto sociológico de masas o gran público. La finalidad de estos medios de comunicación es, según la fórmula acuñada específicamente para la televisión, formar (este es el gran peligro de la globalización, formar al gran público según sus intereses o de *marketing*), informar y entretener al público que tiene acceso a ellos. Buscan el beneficio económico del empresario o grupo empresarial que los dirige, habitualmente concentrado en grandes grupos de comunicación multimedia, e influir en su público ideológicamente y mediante la publicidad. Todos los ciudadanos del mundo están expuestos a todo tipo de agentes económicos, sociales y políticos (tomado y parcialmente modificado de Wikipedia).

**Alegoría.** En las artes plásticas o visuales, sobre todo en pintura, es la personificación de determinadas ideas abstractas, tales como vicios y virtudes, etc.



Por ejemplo, la alegoría de la música está personificada por una mujer tocando el arpa u otro instrumento clásico. *La alegoría es la "explicación" del símbolo*, su vulgarización, su traducción al mundo cotidiano; aunque parte del misterio del símbolo se pierde, hace de enlace con el misterio original para tratar de entenderlo. La alegoría en relación con la pintura histórica y con la mitológica busca la plasmación figurada de ideas abstractas: la virtud, la fuerza, el poder, la caridad, etc. Es constante a lo largo de los tiempos y puede estar asociada también a la pintura religiosa. Entre las pinturas alegóricas más renombradas se encuentran las que pintó Rafael en las estancias del Vaticano: las famosas alegorías de la Teología (*La disputa del sacramento*), de la filosofía (*La escuela de Atenas*) y de la poesía (*El Parnaso*).



Eduard del Moral Farré

### BIBLIOGRAFÍA

1. Arnheim, Rudolf: *Arte y percepción visual*. Psicología del ojo creador. 2ª edición Alianza Forma. Nueva versión. Trad. María Luisa Balseiro Madrid, 2002. 4ª reimpresión 2008. ISBN: 987-84-206-7874-0
2. Belmonte Martínez, Carlos. *Emociones y cerebro*. Catedrático de Fisiología y Ex-Director del Instituto de Neurociencias de Alicante, Universidad Miguel Hernández-CSIC. Rev.R.Acad.Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp) Vol. 101, N°. 1, pp 59-68, 2007
3. Eckermann, Johann Peter y Ayala, Francisco. *Conversaciones con Goethe*. Editorial Océano, S.L. 2000.
4. Heller, Eva. *Psicología del color*. Cómo actúan los colores sobre los sentimientos y la razón. Edit. Gustavo Gili, Barcelona, 2009
5. Zelanski, Paul y Fisher, Mary P. *Color*. Tercera edición, Tursen S A/H. Blume . Madrid, 2001. ISBN: 84-89840-21-0. Pág. 26 Color
6. Kandinsky, Wassily. *De lo espiritual en el Arte*, Barral, Paidós Estética 24.Ediciones Paidós Ibérica SA Barcelona. 1996. ISBN:978-84-493-0315-9
7. Myers, David G. *Psicología* 7ª Edición. Buenos Aires; Madrid; Médica Panamericana, 2006. ISBN 84-7903-917-5
8. Bear, Mark F. et al. *Neurociencia*. Lippincott Williams And Wilkins. Wolters Kluwer Health España. 3ª edición 2008
9. Livingstone, Margaret; Hubel, David H.; Abrams, Harry N. *Vision and Art : The Biology of Seeing ;* (2002)
10. Gouras, Peter. *Color visión*. [en línea].WebVision. [Consulta 2 mayo 2009]. Disponible en web: <http://webvision.umh.es/webvision/color.html> Diagrama Modificado de las interrelaciones celulares de la retina.
11. Hattar S, et al.: *Melanopsin-containing retinal ganglion cells: architecture, projections, and intrinsic photosensitivity*. Science, 295:1065-70. 2002.
12. Ruby NF, et al. *Role of melanopsin in circadian responses to light*. Science, 298:2211-3. 2002.
13. Pokorny, J; Shevell, SK & Smith, VC. *Colour Appearance and Colour Constancy*. InPeter Gouras(Editor):*The Perception of Colour. Vision and Visual Dysfunction, Vol. 6:*. London: Macmillan, pp. 43-61. 1991
14. Vidal, Enrique. *Teoría sobre la percepción visual. Hacia una interpretación del arte a través de la ciencia de la psicología* [en línea]. Facultad de Arte/U.L.A. Revista de arte y estética contemporánea 39-47. Mérida - Enero/Junio 2009. [Consulta 21 abril 2010].





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.





You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.



You have either reached a page that is unavailable for viewing or reached your viewing limit for this book.