
Visión del color

PERCEPCIÓN VISUAL

Tema 8

Profesora María Cinta Puell

Grado Óptica y Optometría



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE
MADRID

Índice

- Introducción
- Propiedades de la percepción del color
- Monocromacia, dicromacia y tricromacia
- Mezclas o igualación de colores
- Sistema CIE de especificación del color y diagrama cromático
- Discriminaciones cromáticas
- Efectos cromáticos
- Adaptación cromática y constancia del color
- Contraste de color
- Bases fisiológicas de la visión del color
 - Mecanismo tricromático
 - Procesamiento del color oponente

Introducción

La visión del color es importante para la detección de objetos y patrones.



El color realza el contraste y permite identificar y localizar objetos que de otra forma serían indistinguibles de su fondo.

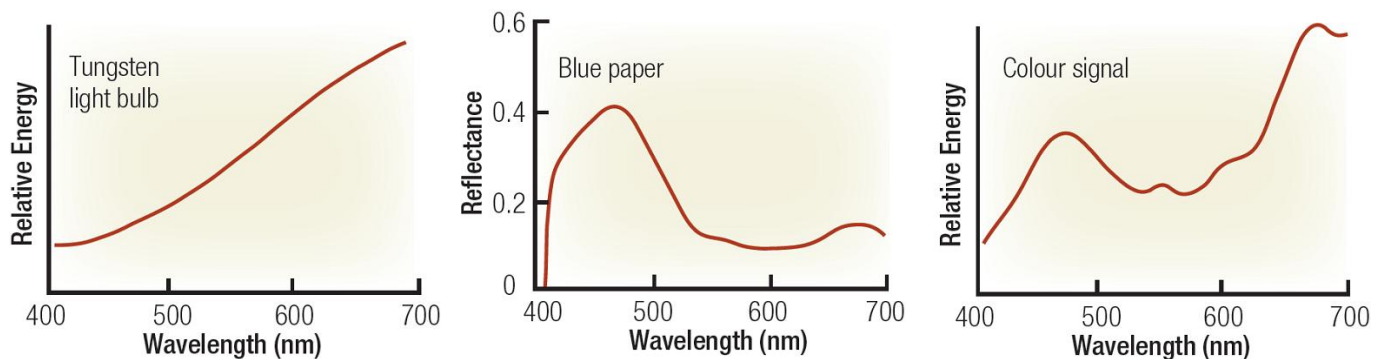
Introducción

- Discriminamos 500 niveles de claridad
- Se pueden diferenciar unos 150 colores entre 380 y 700 nm
- Si variamos la intensidad y la saturación de cada nivel podremos discriminar unos 7 millones de colores
- Compilación de 7.500 nombres de colores diferentes
- Colores básicos:
 - colores cromáticos: rojo, amarillo, verde y azul.
 - colores acromáticos: blanco y negro

Introducción

- El color percibido de los objetos depende de:
 - las longitudes de onda de luz que refleja la superficie del objeto y alcanzan el ojo
 - la composición espectral de la fuente de iluminación:
 - luz solar, filamento de tungsteno de una bombilla convencional, luz fluorescente

Espectro estímulo = iluminante x superficie reflectante



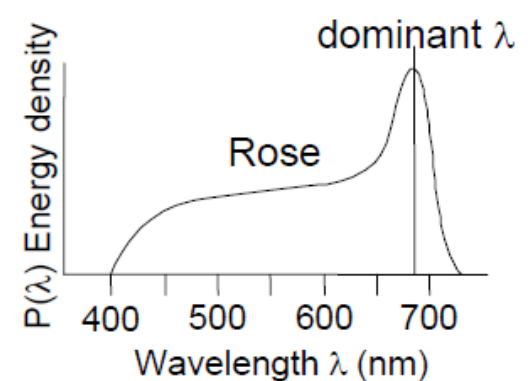
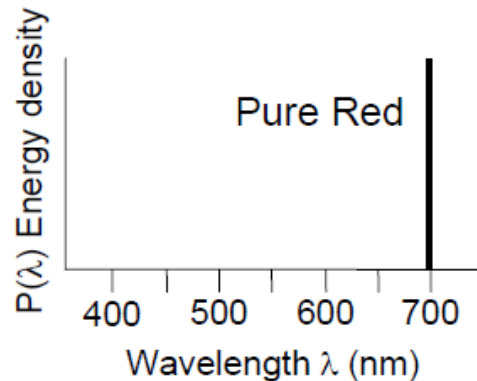
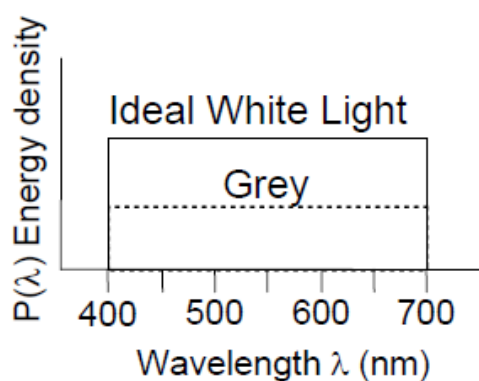
- del área circundante (contraste simultáneo)
- del estado de adaptación del observador.

Introducción

- **Constancia del color:** los objetos parecen tener el mismo color aunque varíen las condiciones de iluminación.
- La **percepción del color** implica analizar el objeto en relación con su fondo.

Parámetros físicos que definen una luz coloreada

- **Luminancia (L)**
- **Longitud de onda (λ)**



La luz reflejada por un objeto usualmente contiene varias longitudes de onda

- **Pureza (P)**, indica en que grado un color es mezcla o no de otros colores y expresa la proporción de luz blanca que acompaña a cada color

Pureza

Factor de pureza colorimétrica:
$$P = \frac{L_{\lambda}}{L_{\lambda} + L_{\omega}}$$

L_{λ} Luminancia de la luz monocromática (color espectral puro)

L_{ω} Luminancia de la luz blanca que está combinada con la luz monocromática

$L_{\lambda} + L_{\omega} =$ Luminancia color mezcla

Escala de pureza:

desde $P = 1$ estímulos monocromáticos o colores puros ($L_{\omega} = 0$)

hasta $P = 0$ para luz blanca

Propiedades de la percepción del color

■ Luminosidad o brillo

- Depende de la energía de la fuente y de la eficiencia luminosa relativa de las longitudes de onda componentes. Percepción de luminosidad "débil", "brillante", "claro", "oscuro"

■ Tono

- Coloquialmente conocido como "color"; p.ej. rojo verde, azul
- Percepción debida a la distribución espectral de la luz, se corresponde con la longitud de onda dominante de la luz que entra en el ojo

■ Saturación

- Grado hasta el cual el color es fuerte o pálido
- Inversamente proporcional a la cantidad de luz blanca mezclada con color puro
 - Rojo puro: 100% de saturación.
 - Blanco: 0% de saturación.
 - Rosa: parcialmente saturado

Tono

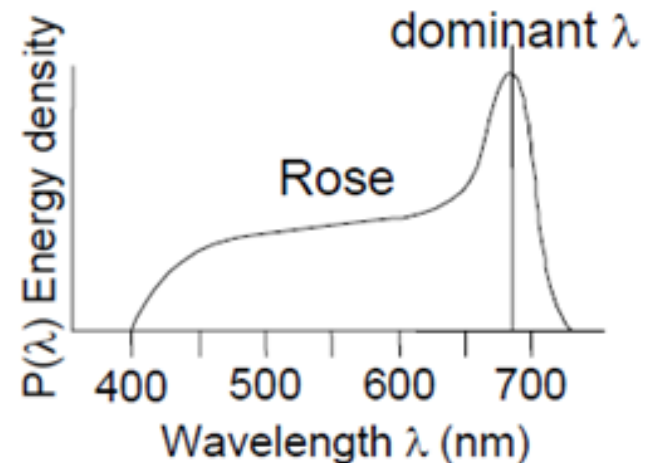
El **tono** es la percepción que está más estrechamente asociada con la longitud de onda.

- ❑ Colores espectrales puros: sensación de color que producen las luces monocromáticas:

540 nm – tono verde

570 nm – tono amarillo

- ❑ Color mezcla: rosa
distribución espectral de la potencia



Color es un término que incluye: tono, saturación y brillo.

Saturación y desaturación

Un **color desaturado** parece como si se hubiera mezclado con blanco (por ejemplo, colores pastel)

Un **color saturado** parece estar lleno de color (púrpura, violeta, corinto)

La percepción de saturación **depende de la longitud de onda**: el amarillo (570 nm) parece menos saturado que el rojo (660 nm)

Un **color espectral** L_λ ($P = 1$) está más saturado cuanto menor sea la cantidad del mismo que sea necesaria añadir a un flujo blanco para que se vea coloreado

Los **colores mezcla** $L = L_\lambda + L_w$
más saturados cuanto menor sea la proporción de blanco
Menos saturados o pálidos cuando L_w es mayor

Propiedades de la percepción del color

Sensación	Dimensión fotométrica	Dimensión psicológica
Acromática	Luminancia	Luminosidad
Cromática	Longitud onda dominante	Tono
	Pureza	Saturación

- El tono y la saturación, son atributos de cromaticidad
- La luminosidad o brillo es común a la sensación cromática y acromática
- Los colores grises son acromáticos

Trivariancia cromática (tricromatismo)

- El tricromatismo es la condición de poseer tres canales independientes para transmitir información de color derivados de los tres tipos de cono diferentes.
- Los organismos con tricromatismo se llaman tricromáticos.
- La mayoría de los humanos tienen visión tricromática.

Monocromacia

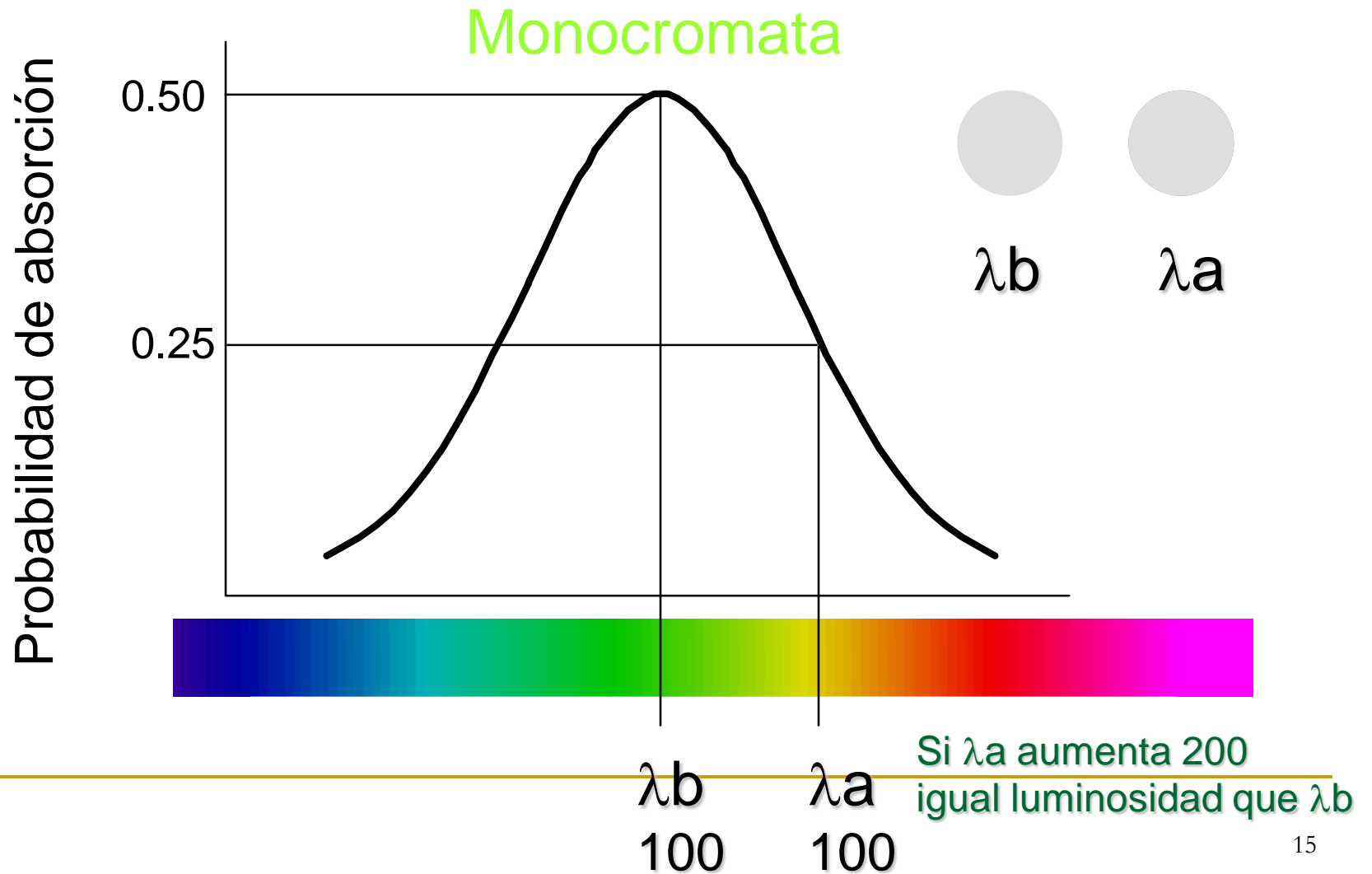
■ Monocromacia

- Un solo tipo de cono (un fotopigmento)
- No hace discriminaciones basadas en la longitud de onda
- Un objeto se distingue si su intensidad es superior a la del fondo.

■ Principio de Univariancia:

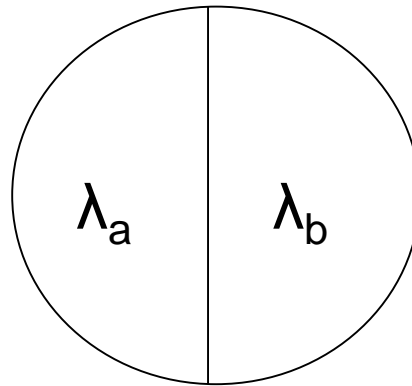
- Cuando una molécula de fotopigmento absorbe un fotón de luz su respuesta eléctrica es siempre la misma cualquiera que sea la longitud de onda del fotón.
- Con la longitud de onda varía la probabilidad de absorción del fotón.
- Un solo tipo de cono no es suficiente para codificar el color

Monocromacia



Monocromacia

Un **monocrómata** es ciego al color y no puede hacer discriminaciones basadas en la longitud de onda ya que puede igualar cualquier longitud de onda con cualquier otra si ajusta sus intensidades



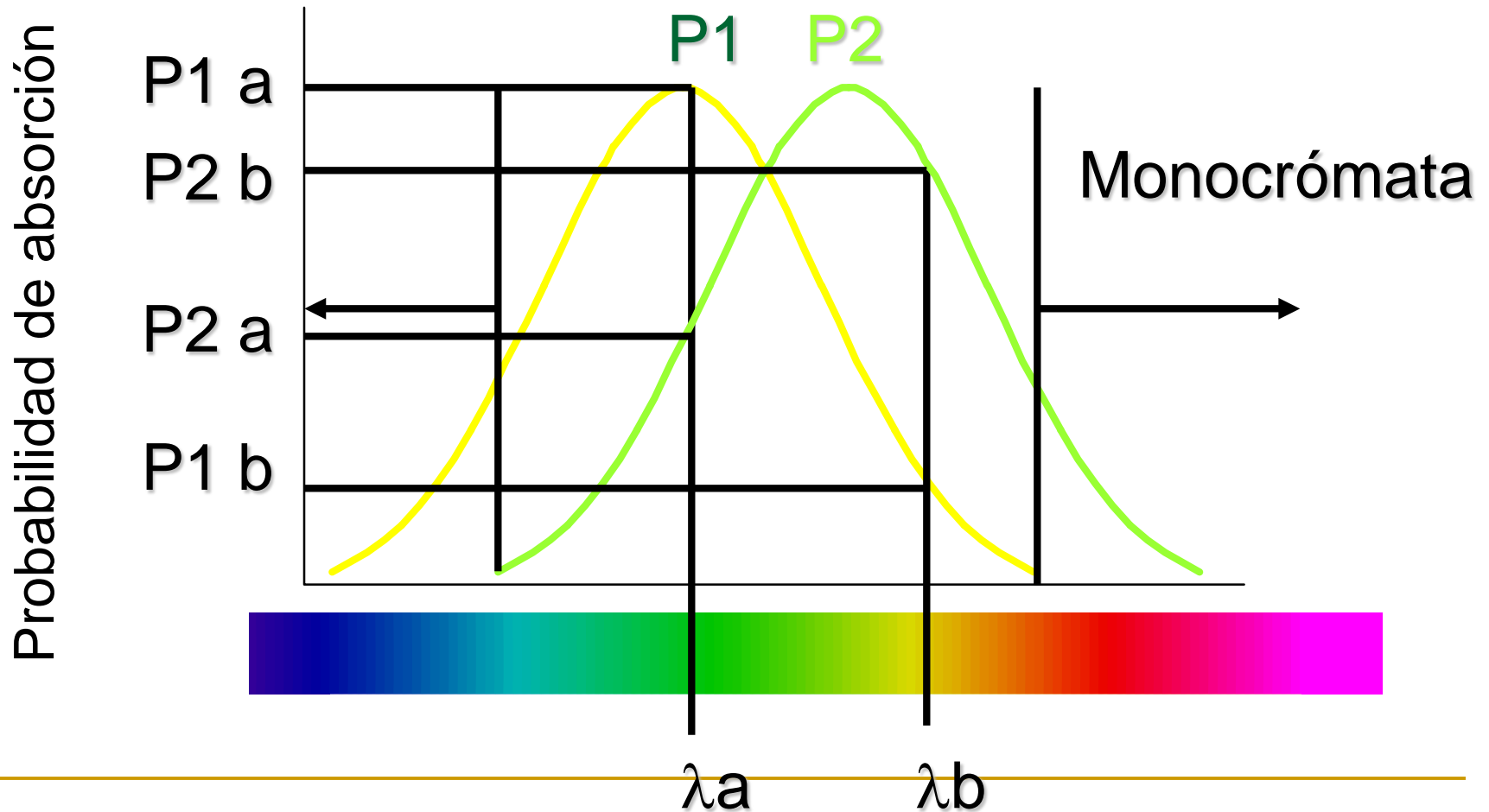
Un objeto se distingue si su intensidad supera la del fondo

Dicromacia

La visión del color requiere al menos dos fotorpigmentos con **máximos** de sensibilidad espectral en **diferentes** longitudes de onda pero que tengan espectros de absorción **superpuestos** en gran parte del espectro.

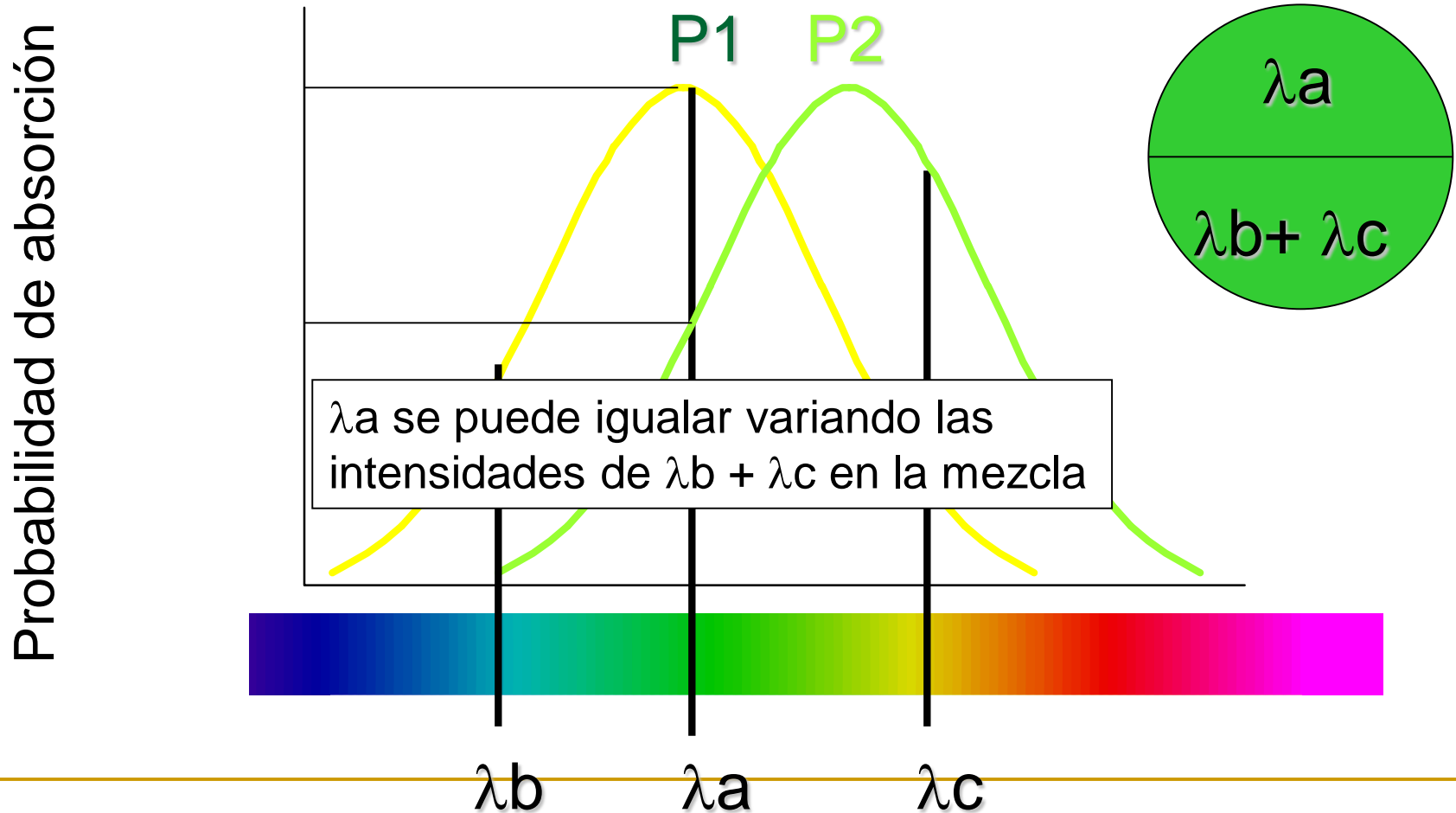
Dicromacia

Un flujo λ_a siempre parece diferente de un flujo λ_b ya que se pueden distinguir en función de su diferencia en λ . El **dicromático** no podrá ajustar las intensidades de los dos flujos para que se igualen.



Dicromacia

Discriminación de color limitada

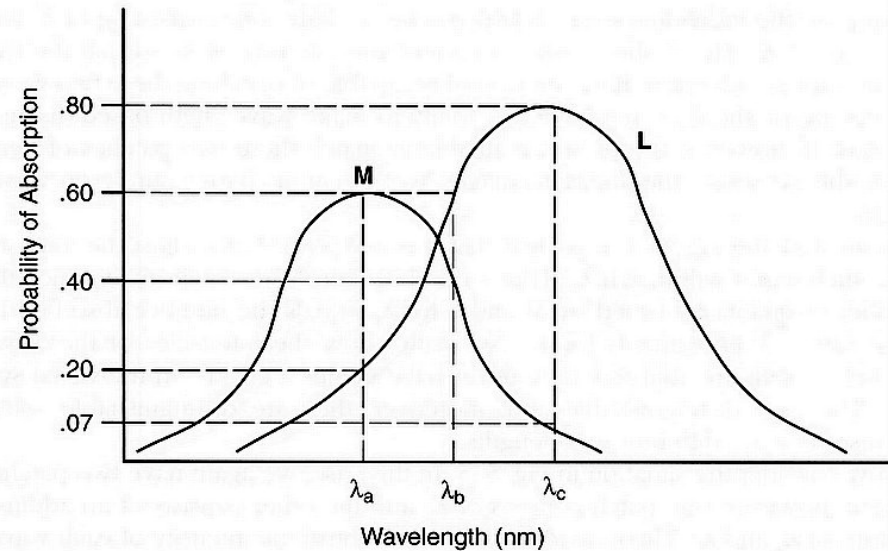


Dicromacia

Algo de discriminación de color:
un dicrómata puede discriminar entre dos longitudes de onda absorbidas por ambos fopigmentos (parte superpuesta)

Sin embargo, está limitada:
un dicrómata puede igualar cualquier longitud de onda a una mezcla de otras dos longitudes de onda

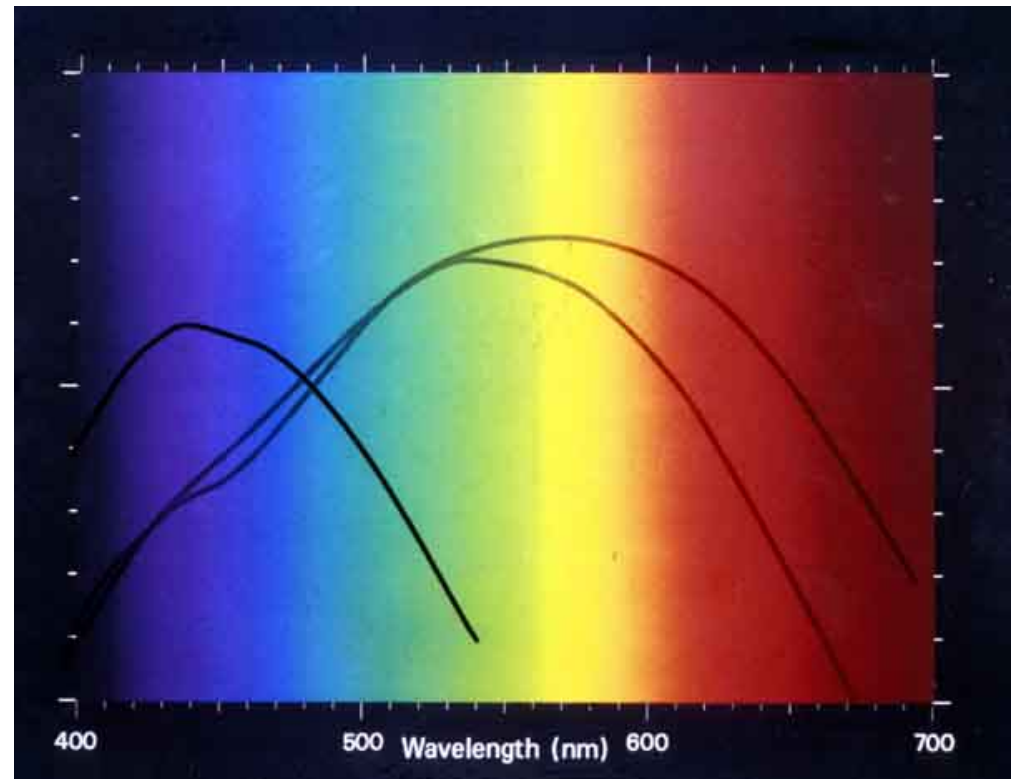
Por lo tanto:
Dadas al menos tres λ s, divididos en dos campos, un dicrómata puede ajustar las intensidades relativas de estas λ s de manera que los dos campos parezcan idénticos.



		λ_a and λ_c		λ_b			
Number of Quanta Emitted	Wavelength	Number of Quanta Absorbed		Number of Quanta Emitted	Wavelength	Number of Quanta Absorbed	
		M	L			M	L
300	λ_a	180	60	500	λ_b	200	300
300	λ_c	20	240				
TOTAL		200	300	TOTAL		200	300

Tricromacia

- Tres tipos diferentes de fopigmentos con sensibilidades espectrales diferentes pero solapadas
- El sistema visual **compara** las respuestas de las tres clases de conos

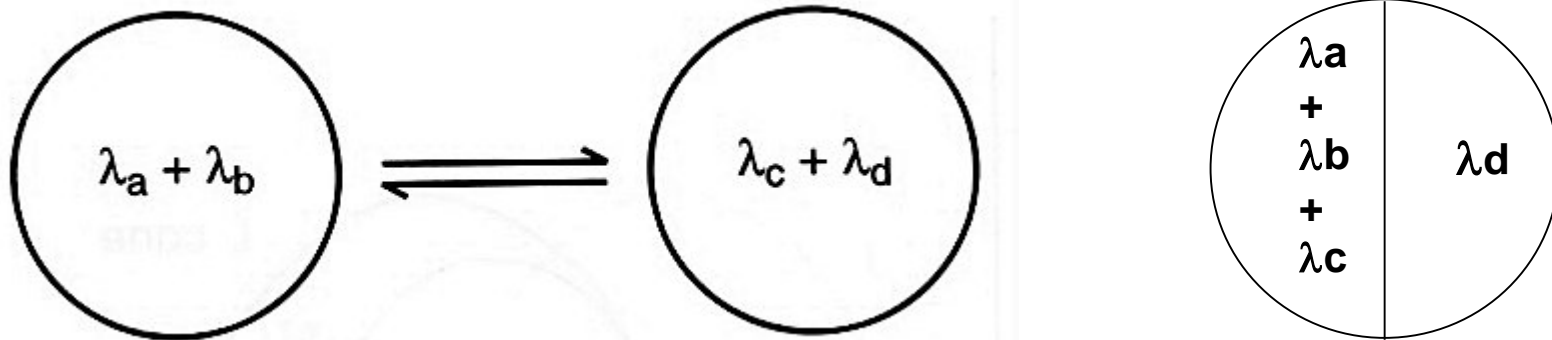


La discriminación de colores es superior a la dicromacia:

dadas tres λ s divididas en dos campos, un tricrómata puede discriminar entre ellos (no puede igualar los campos).

Sin embargo, **está limitada**: si se dan cuatro λ s divididas en dos campos, un tricromático podrá igualar los campos.

Tricromacia



Un tricrómata es capaz de ajustar las intensidades relativas de **cuatro longitudes de onda**, divididas en dos campos, tal que los dos campos parezcan idénticos

Estos dos campos, que son físicamente diferentes pero parecen idénticos, son **METÁMEROS**

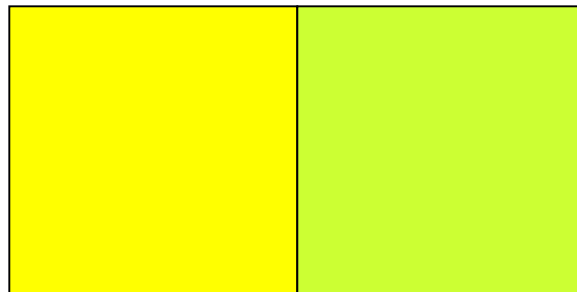
Las luces metaméricas son luces que, a pesar de la diferencia en su radiación espectral, se ven iguales por el observador.

Tricromacia

Los colores espectrales y el blanco pueden igualarse a la mezcla de las proporciones adecuadas de luces rojas, verdes y azules.

Estos tres colores se llaman **colores primarios**.

Color test



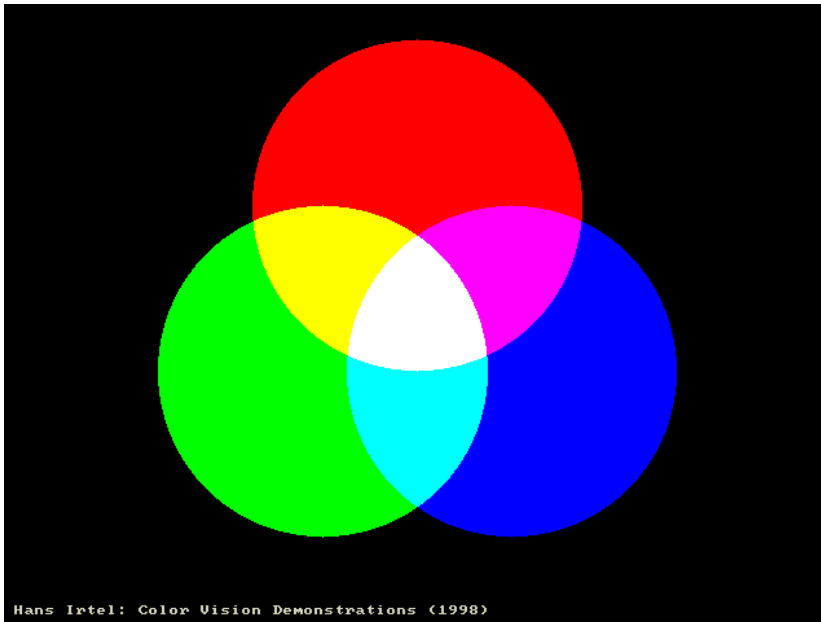
R + V + A
Mezcla

Igualación cromática: el color se iguala usando una mezcla de tres colores primarios

Mezclas de colores

Mezcla aditiva de colores (luces)

Luces de colores primarios:
rojo, verde, azul



Mezcla de colores sustractiva

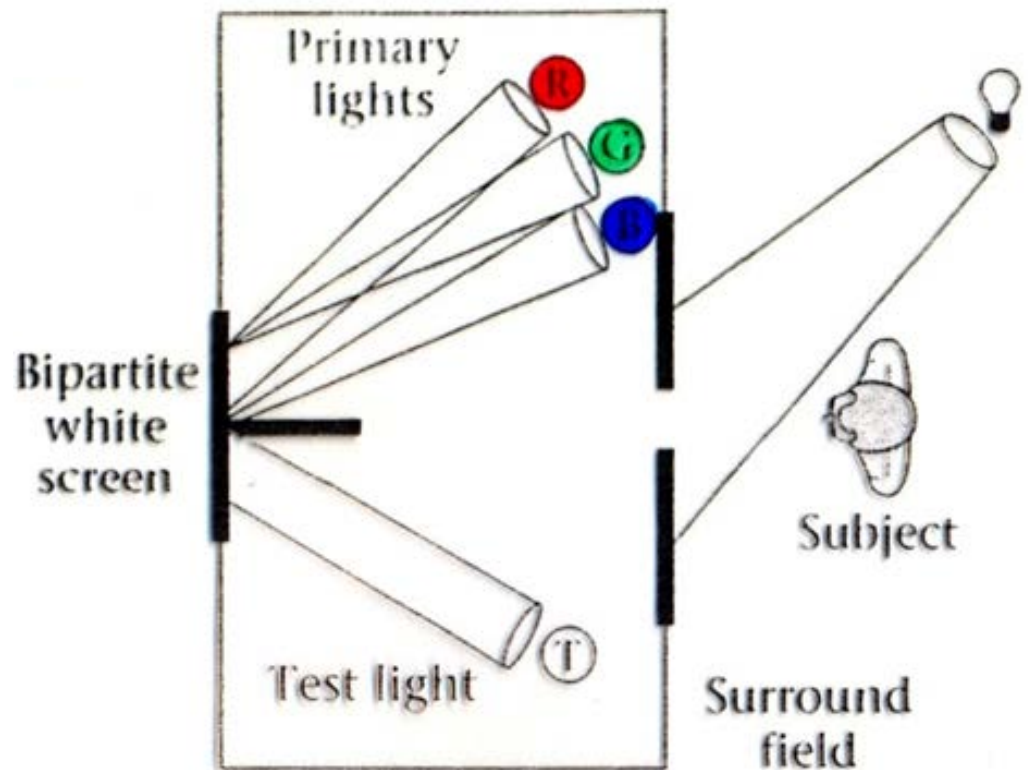
Colores de pigmentos



Mezclas de colores

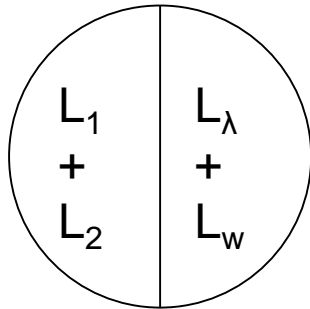
Experimento de mezcla de colores con luces aditivas para obtener un color o luz de composición espectral dada a partir de otros colores utilizados para generarlo

Colorímetro



Mezcla o igualación de colores

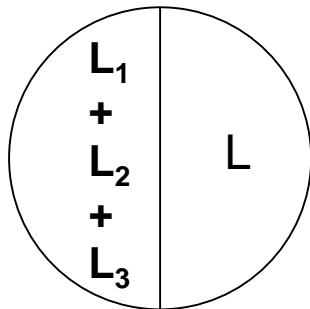
Mezcla dicromática $R + V \equiv Am$



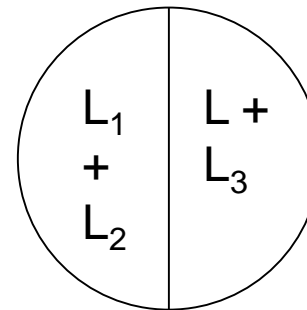
$$L \equiv L_1 + L_2$$

$$L \equiv L_\lambda + L_w$$

Mezcla tricromática L_1, L_2, L_3 son colores primarios



$$L_1 + L_2 + L_3 \equiv L$$



$$L_1 + L_2 \equiv L + L_3$$

$$L_1 + L_2 - L_3 \equiv L$$

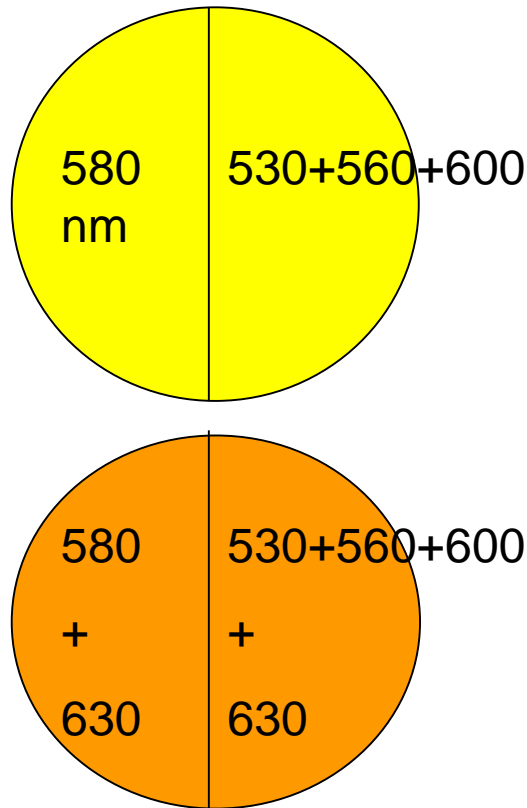
Colores metámeros (luces)

Mezcla de colores

- Cualquier color se puede igualar a la mezcla apropiada de tres colores primarios.
- Los tres colores primarios pueden ser cualquiera siempre que ninguno de ellos se pueda obtener (igualar) por mezcla aditiva de los otros dos.
- Colores primarios reales:
 - Luz espectral roja de 700 nm
 - Luz verde de 546,1 nm
 - Luz azul de 435,8 nm



Leyes de Grassmann de los metámeros o igualaciones de color (luces)



1) Propiedad aditiva

Cuando la misma radiación se agrega de manera idéntica a dos metámeros, estos siguen siendo metámeros.

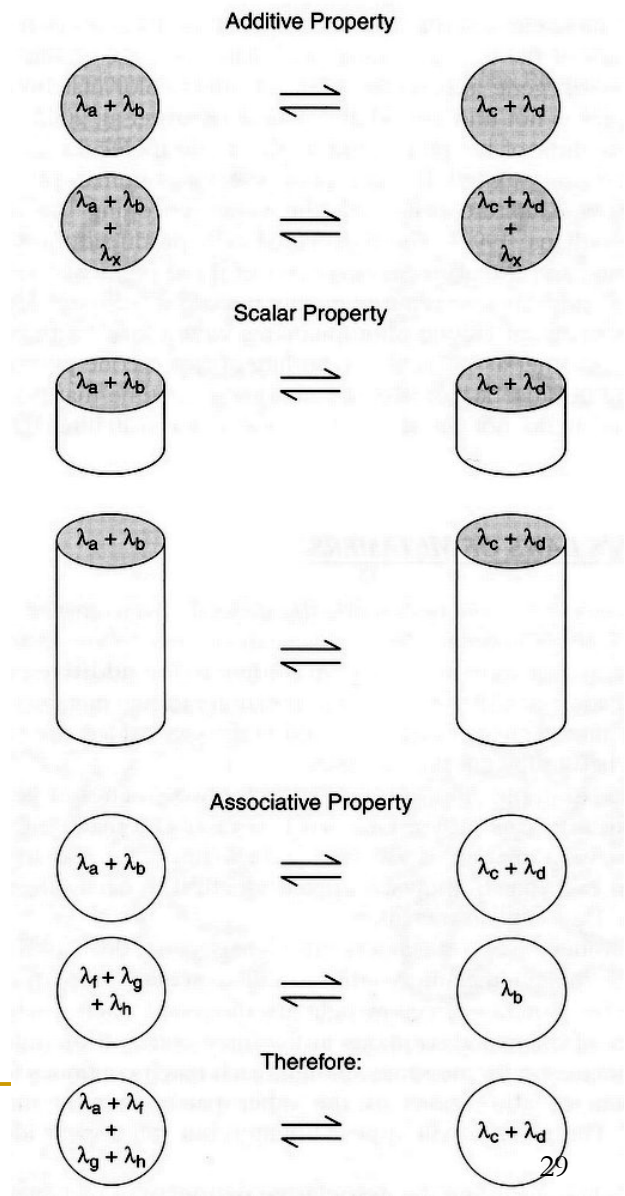
Leyes de Grassmann de los metámeros o igualaciones de color

■ 2) Propiedad escalar

- Cuando ambos campos de mezcla de colores cambian de luminosidad en la misma proporción, el metamerismo no cambia.

■ 3) Propiedad asociativa

- Una igualación se mantendrá si un metámero se sustituye por otro metámero.



Especificación de los colores

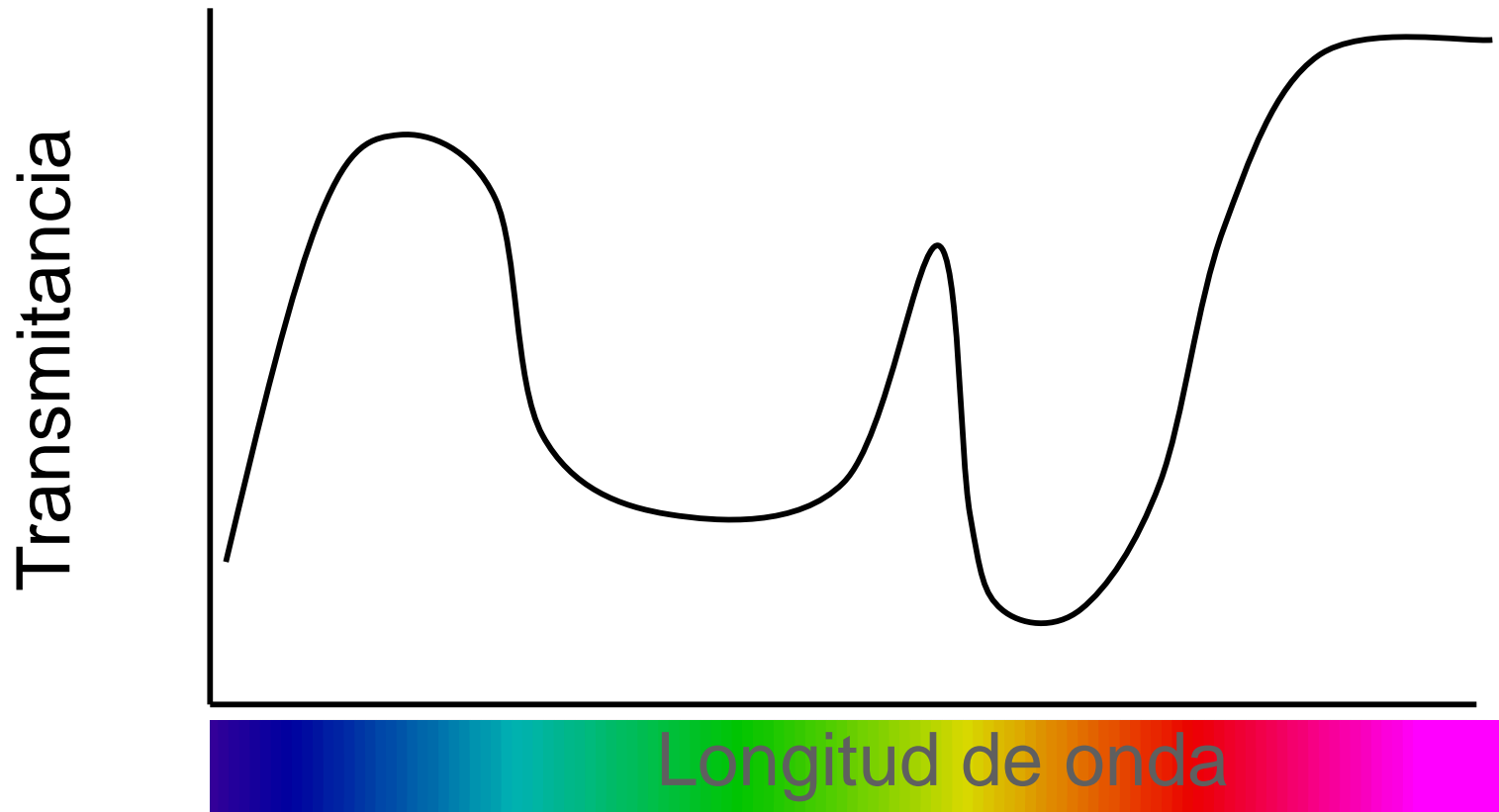
Especificar los colores de forma precisa es importante para la industria, la investigación en visión y la práctica clínica

Hay 3 métodos principales:

- ❑ Espectrofotometría
- ❑ Atlas de colores
- ❑ Mezclas o igualaciones de color

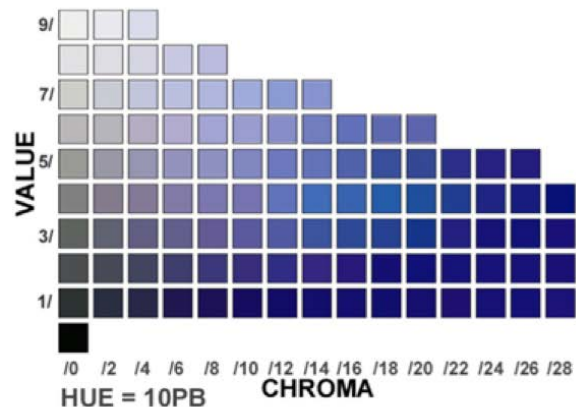
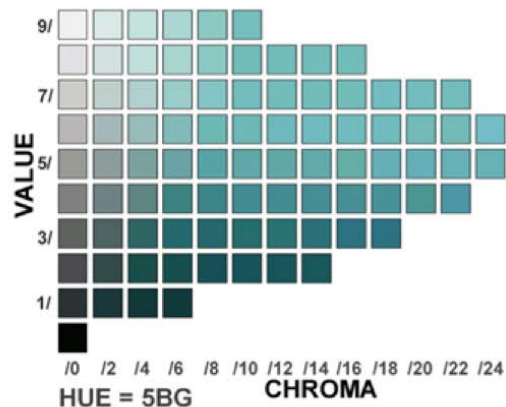
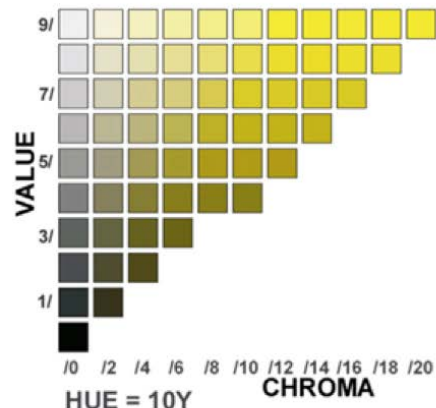
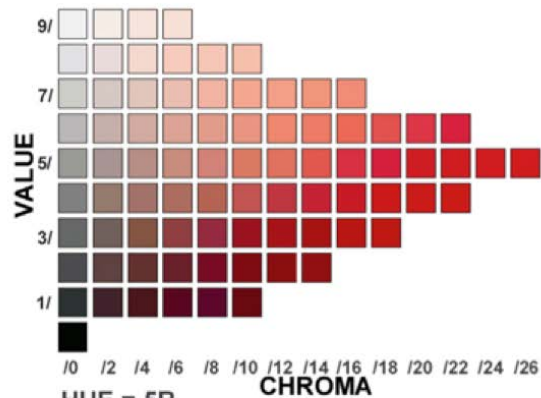
Espectrofotometría

Se mide la cantidad de luz reflejada/transmitida a cada longitud de onda



Atlas de color

Las muestras de color están dispuestas de manera ordenada en un atlas. Por ej. Sistema Munsell



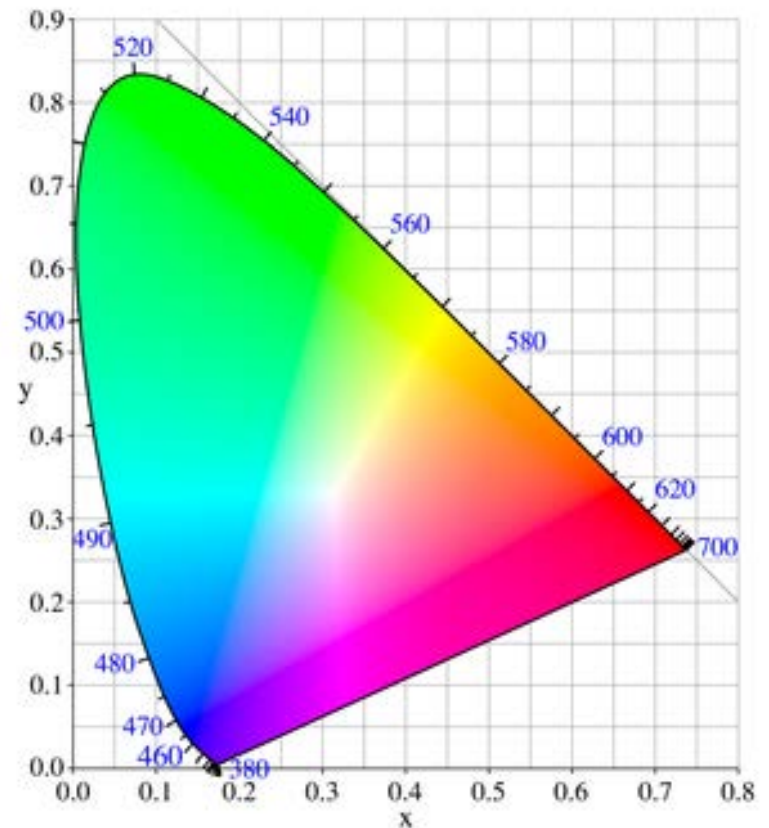
Sistema CIE de especificación del color.

Diagrama cromático

Está basado en los experimentos de igualación de color

Especifica la **mezcla** necesaria de **tres primarios** para igualar una muestra de color determinada

Representa matemáticamente el color en el **diagrama cromático** como un punto en un espacio bidimensional.



Sistema CIE de especificación del color

- **Valor triestímulo:** cantidad de cada primario que se necesita para una igualación
- Representación triestímulo del color:
 - Tres números que expresan la proporción de mezcla.
 - Estos números dependen de:
 - los primarios que se utilicen
 - del observador que realice la igualación.
- El observador patrón se caracteriza por las **funciones de igualación de color:**
 - Muestran la cantidad de cada primario que es necesaria para igualar una determinada longitud de onda

Sistema de especificación del color RGB (CIE)

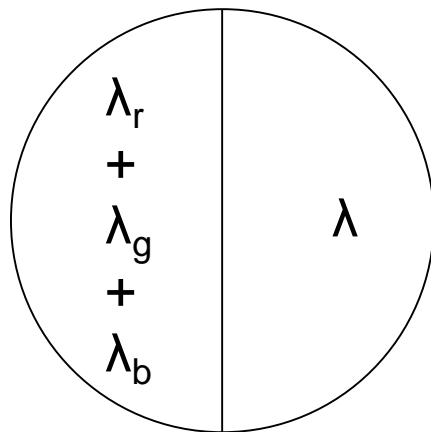
Funciones de igualación de color

Primarios reales:

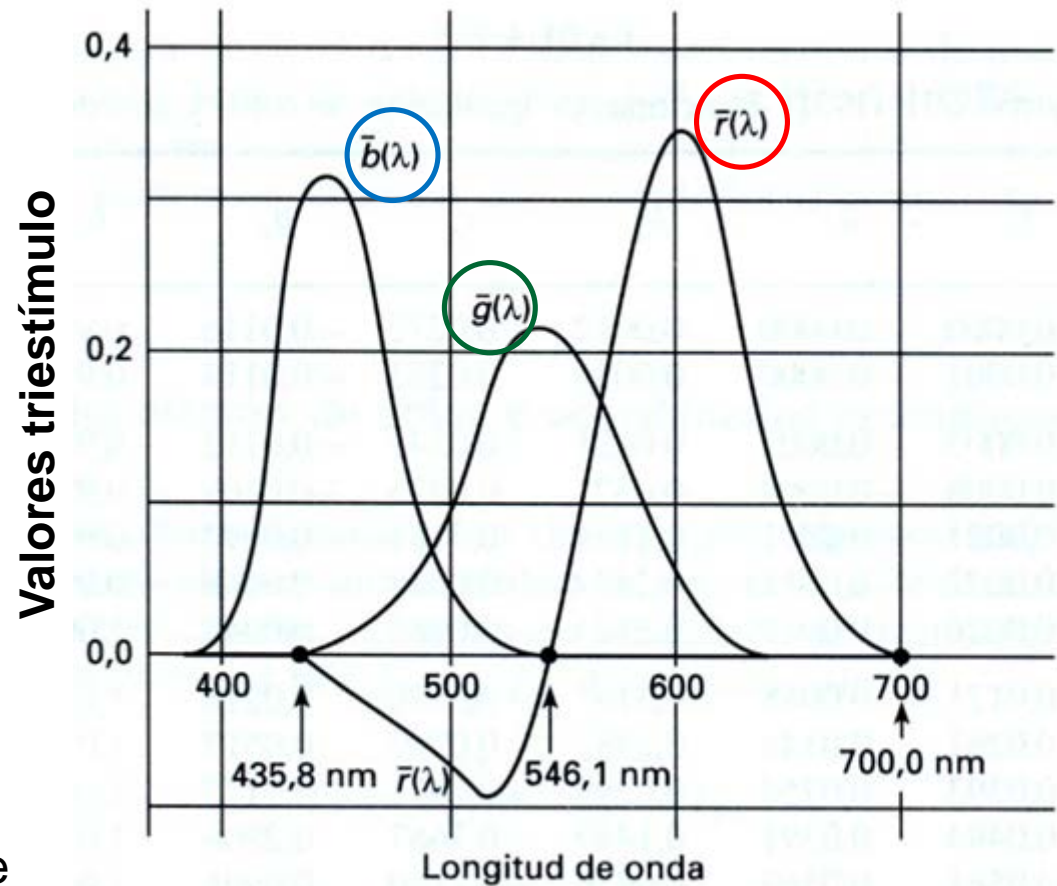
R = 700 nm

G = 546,1 nm

B = 435,8 nm



La cantidad de estos tres primarios se ajusta hasta que se obtiene una igualación perfecta



Sistema de especificación del color RGB

No todos los colores del espectro se pueden igualar con una mezcla aditiva de rojo, verde y azul.

Concretamente, para igualar una longitud de onda en la **región de 450 a 550 nm** se necesitan **cantidades negativas** del primario rojo

Para evitar cantidades negativas en las ecuaciones de igualación de colores, la Comisión Internacional de l'Eclairage (CIE, 1931) adoptó un sistema que emplea **primarios irreales (X, Y, Z)**.

Sistema de especificación del color XYZ (CIE)

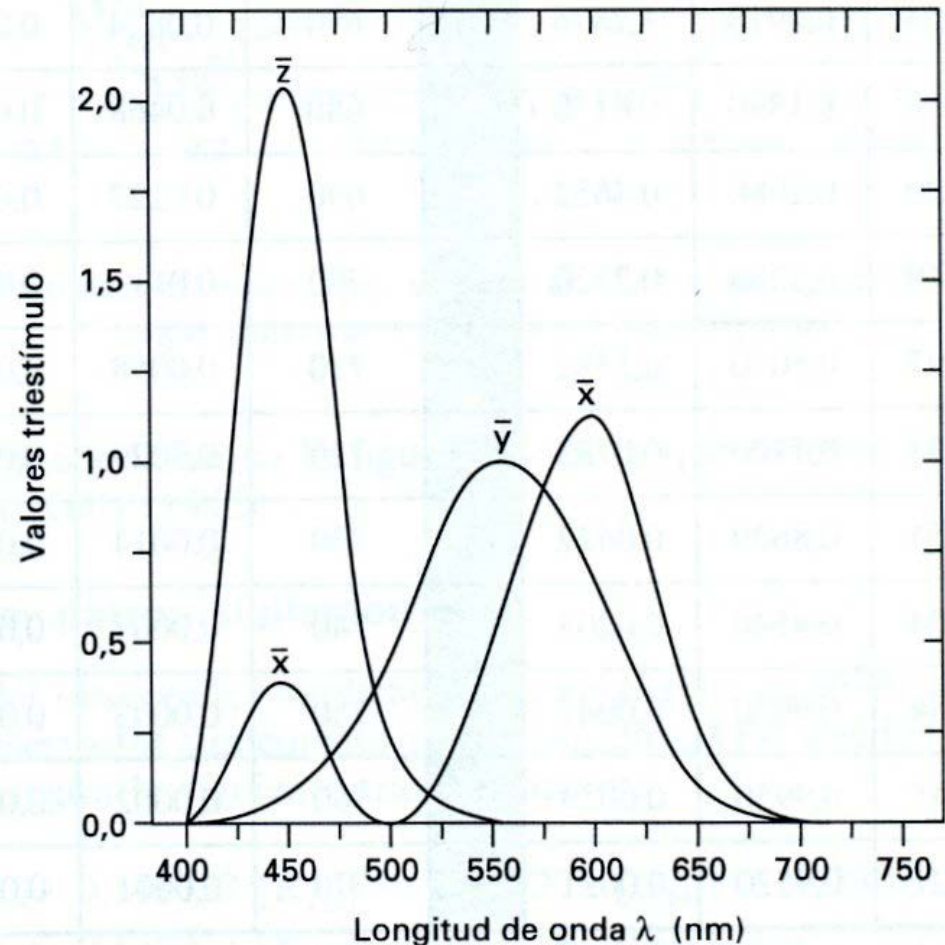
Funciones de igualación de color \bar{x}_λ , \bar{y}_λ , \bar{z}_λ para luces espectrales del observador patrón CIE-1931

Primarios imaginarios (X, Y, Z)

Transformaciones matemáticas de los primarios R, G, B

La función \bar{y} coincide con la curva de eficiencia luminosa V_λ

\bar{x} , \bar{y} , \bar{z} son los valores triestímulo de luces espectrales



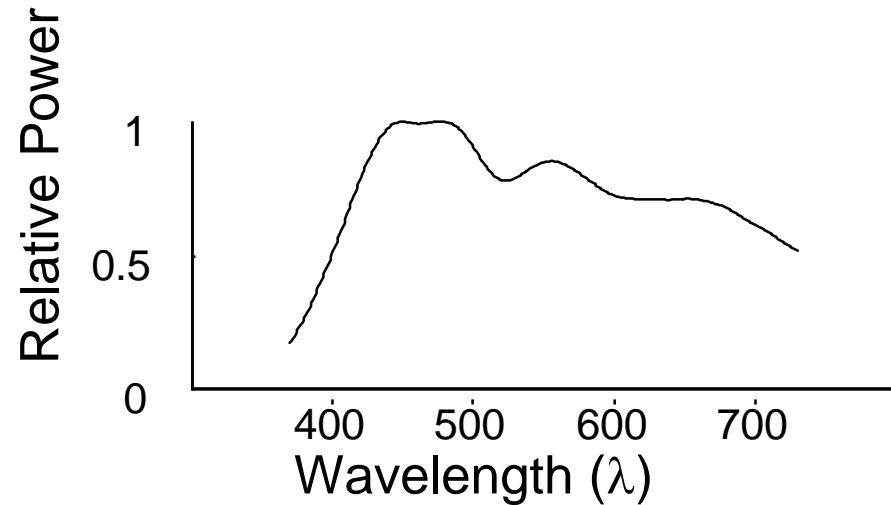
Sistema de especificación del color XYZ

Valores triestímulo de un color (Q)
con una radiancia espectral R_λ :

$$X = \sum_{vis} R_\lambda \cdot \bar{x}_\lambda$$

$$Y = \sum_{vis} R_\lambda \cdot \bar{y}_\lambda \Rightarrow \text{también es la luminancia del color}$$

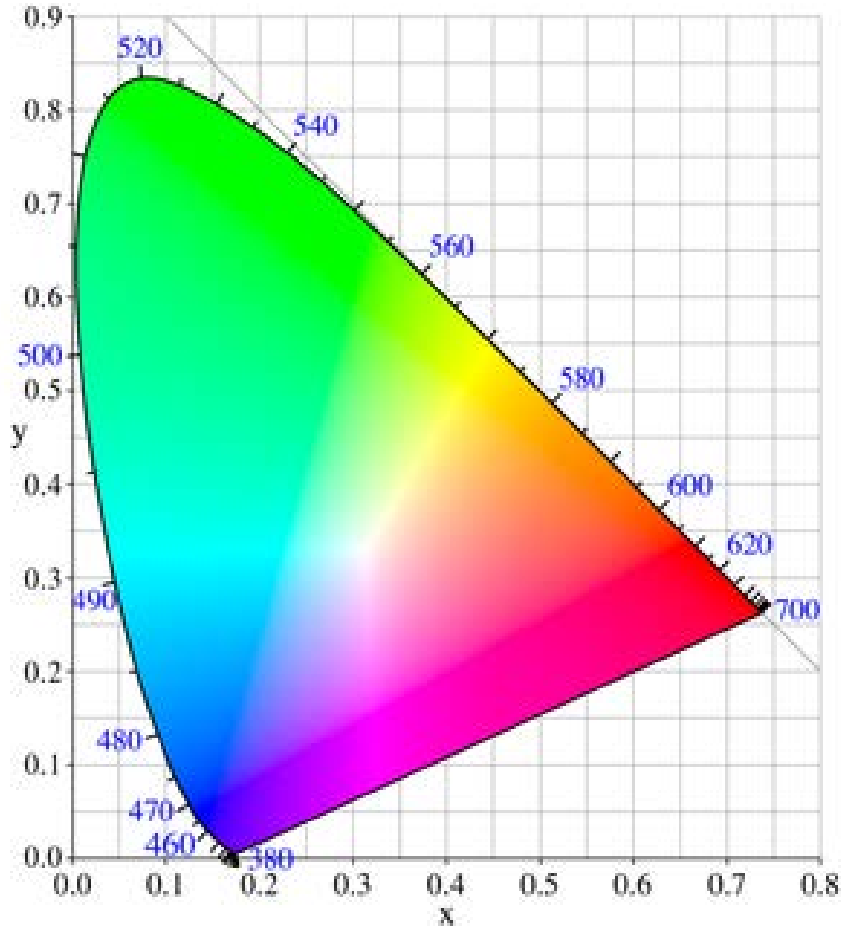
$$Z = \sum_{vis} R_\lambda \cdot \bar{z}_\lambda$$



Las funciones de igualación permiten obtener los valores triestímulo de cualquier color si se conoce su curva de emisión espectral.

Sistema de especificación del color XYZ

Diagrama cromático CIE



Muestra las **cantidades relativas** de cada primario imaginario necesarias para igualar un color real cualquiera

Representa un color como un punto en un espacio de dos dimensiones

Diagrama cromático de la CIE

Los valores triestímulo X , Y , Z del color se convierten en unidades relativas: **coordenadas cromáticas**

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

Cada coordenada representan la contribución relativa de un primario en la mezcla total:

$$x + y + z = 1$$

El diagrama cromático muestra solo las coordenadas x e y

Un color se especifica por sus coordenadas de cromaticidad (x, y) y por el valor de triestímulo Y

Diagrama cromático CIE

Características

- Todos los colores están dentro del diagrama
- Los colores espectrales (tonos monocromáticos) están ordenados en el arco del perímetro del diagrama (**lugar del espectro**)
- El **blanco** o estímulo acromático está en el centro del diagrama
- Los primarios imaginarios (puntos, X, Y, Z) están fuera del diagrama

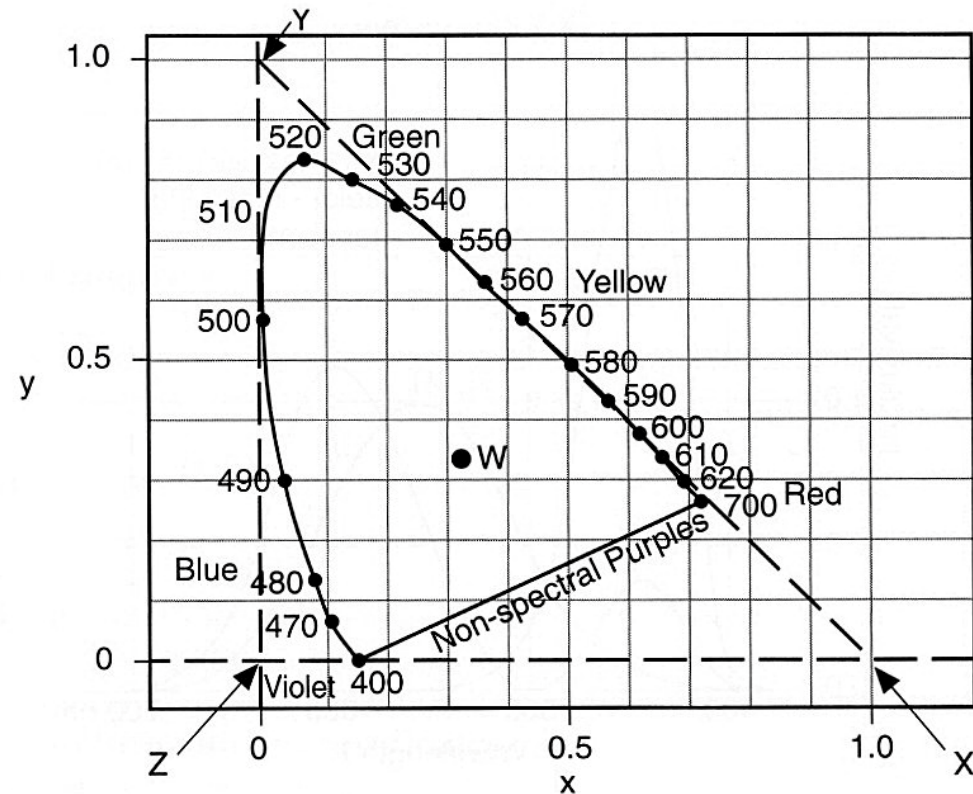


Diagrama cromático CIE

Los estímulos de color están distribuidos en distintas zonas del diagrama según su tono

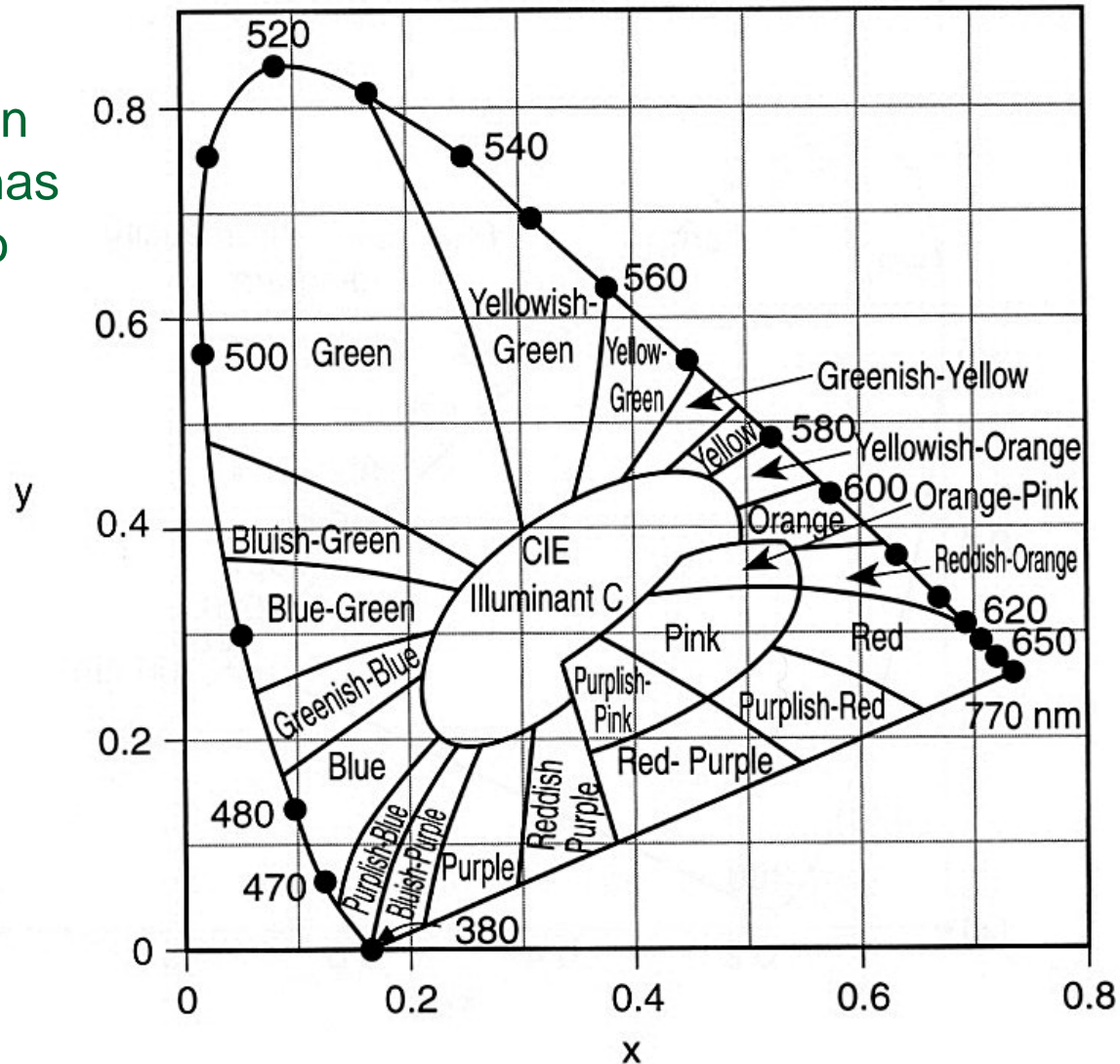
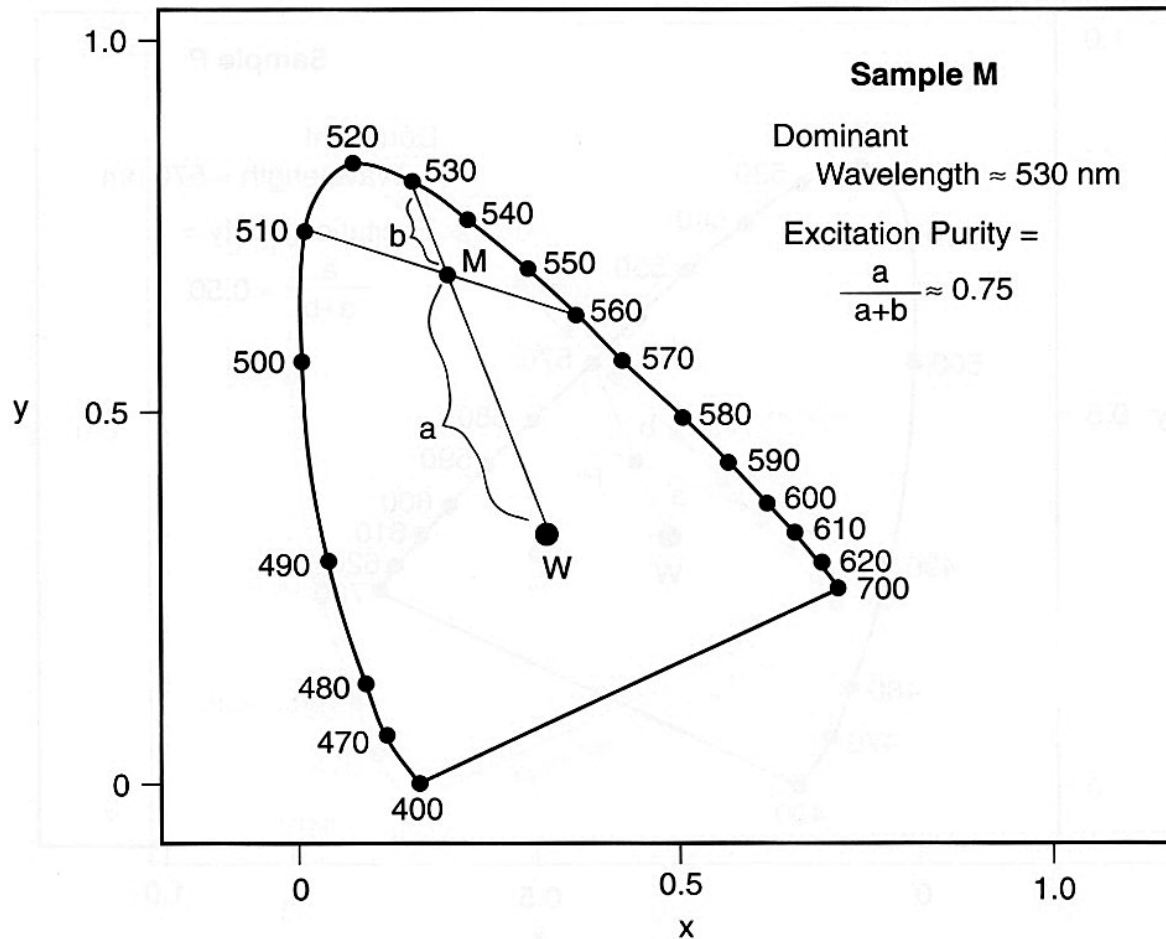


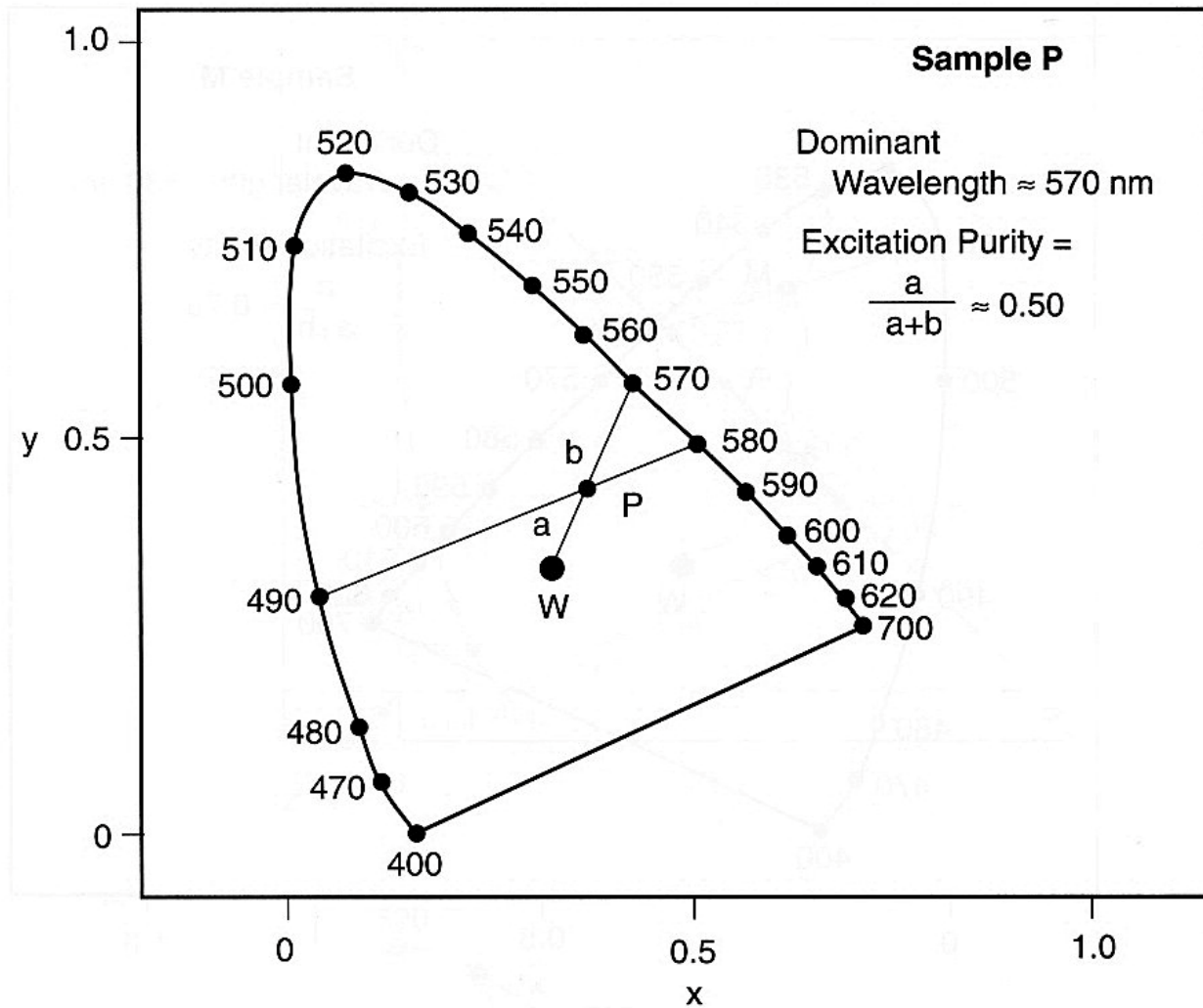
Diagrama cromático CIE

Calculo de mezclas de colores



Color M: mezcla de cantidades iguales de 510 y 560 nm

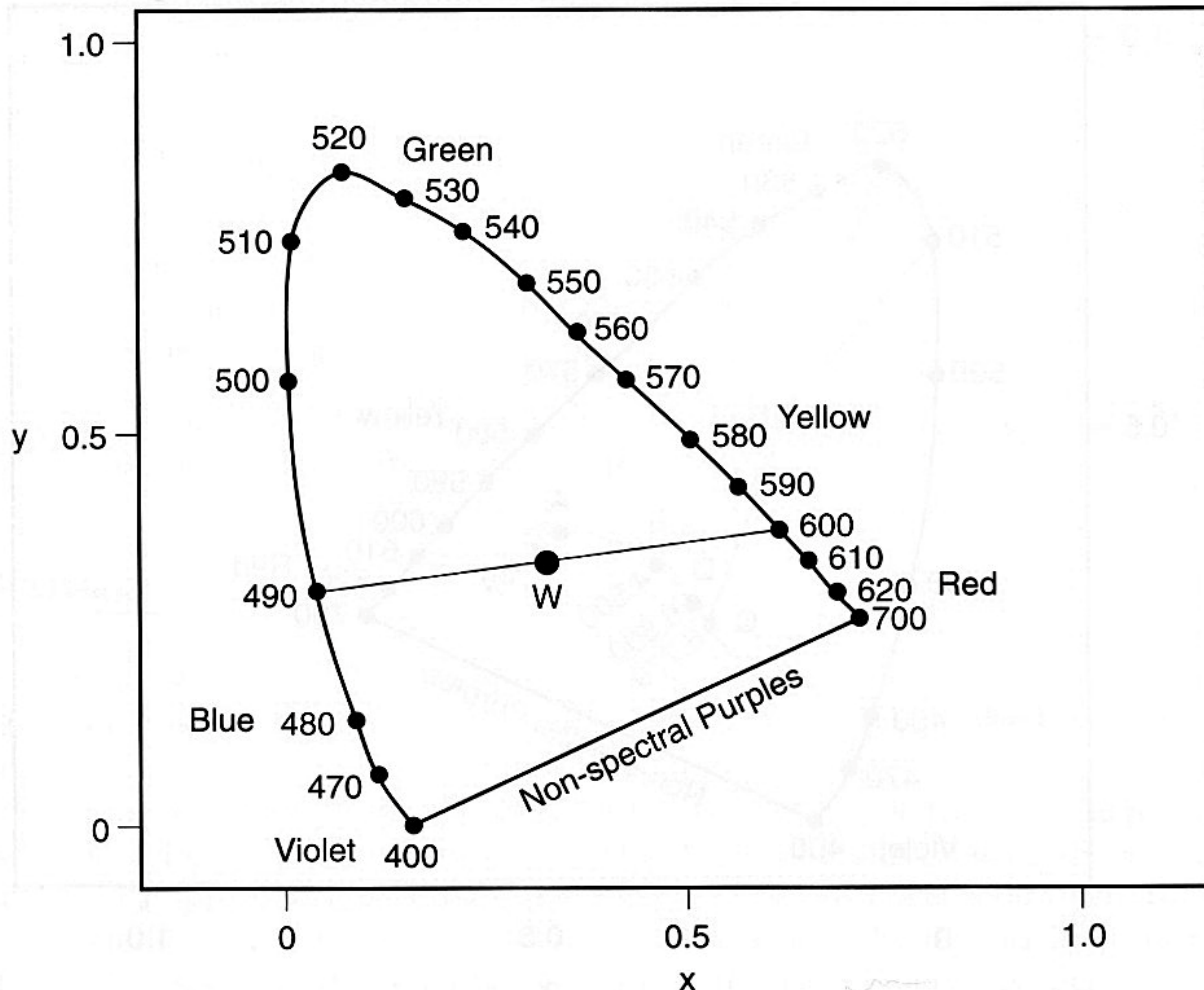
Diagrama cromático CIE



Color P: mezcla de tres partes de 580 nm y una parte de 490 nm

Diagrama cromático CIE

Colores complementarios: cuando se mezclan en las proporciones adecuadas producen **blanco**.



Discriminaciones cromáticas

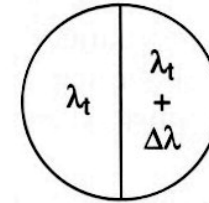
- Discriminación de tono
- Discriminación en saturación
- Discriminación en luminosidad o brillo
- Diferencias de color mínimamente perceptibles:
elipses de MacAdam

Discriminación de tono o longitud de onda

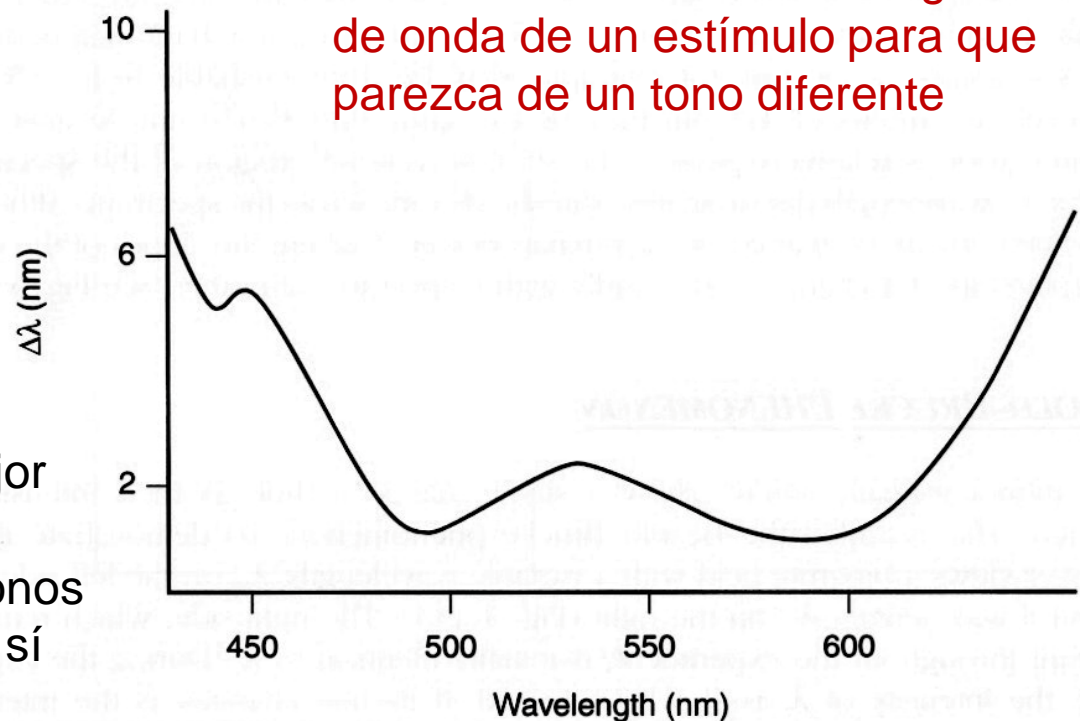
En ciertas regiones del espectro se puede distinguir mejor una longitud de onda de otra

Regiones de mejor discriminación (1-2 nm) entre **495 y 590 nm**

La discriminación de tono es mejor en donde las pendientes de los espectros de absorción de los conos cambian más rápidamente entre sí

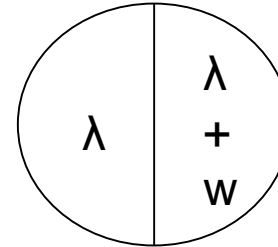


Cuánto debe cambiar la longitud de onda de un estímulo para que parezca de un tono diferente

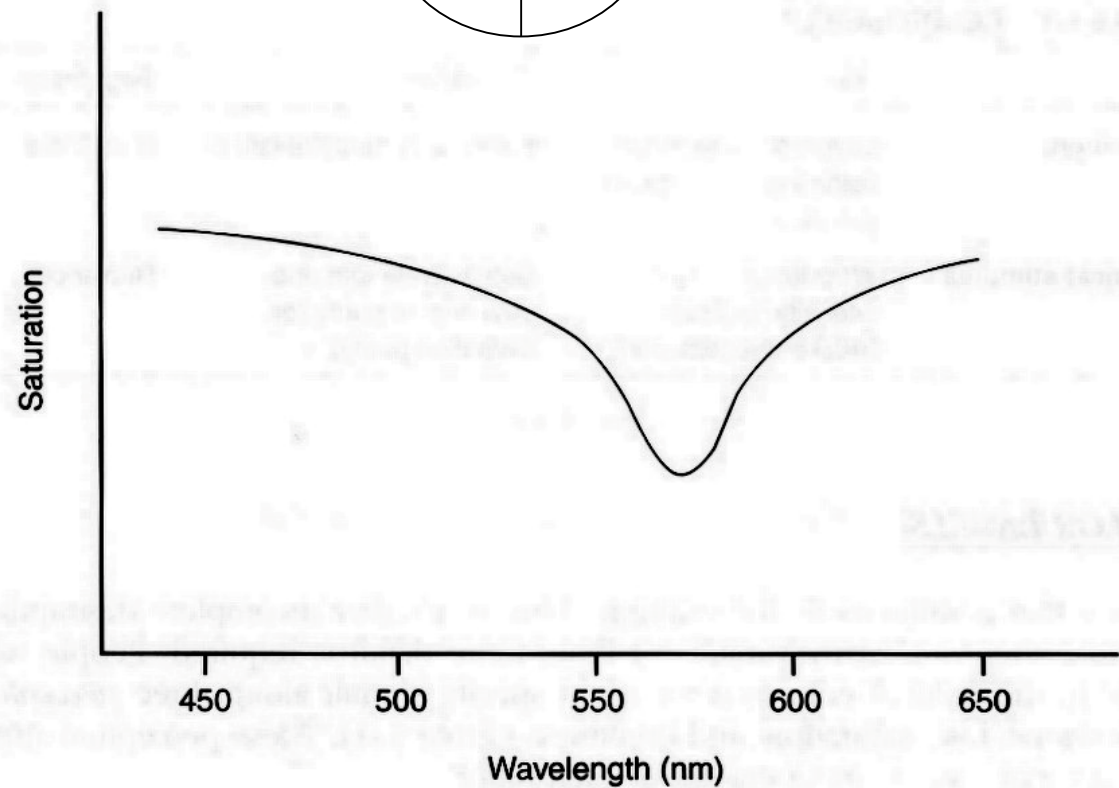


Discriminación en saturación

Saturación: inversa de la cantidad de blanco que es necesario añadir para diferenciar los dos campos



W = white

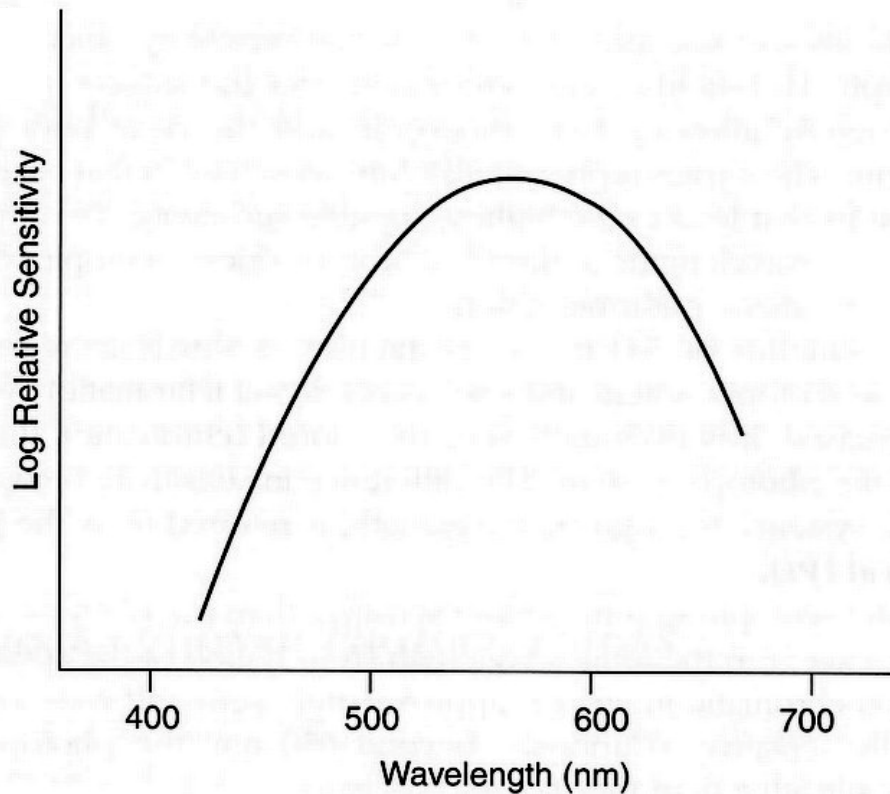


Los estímulos de 570 nm están menos saturados que los estímulos de otras longitudes de onda

Saturación en función de la longitud de onda.

Discriminación en luminosidad

Sensibilidad luminosa espectral fotópica



Un estímulo de 555 nm se percibe más brillante que otros estímulos monocromáticos de igual energía

Discriminación cromática

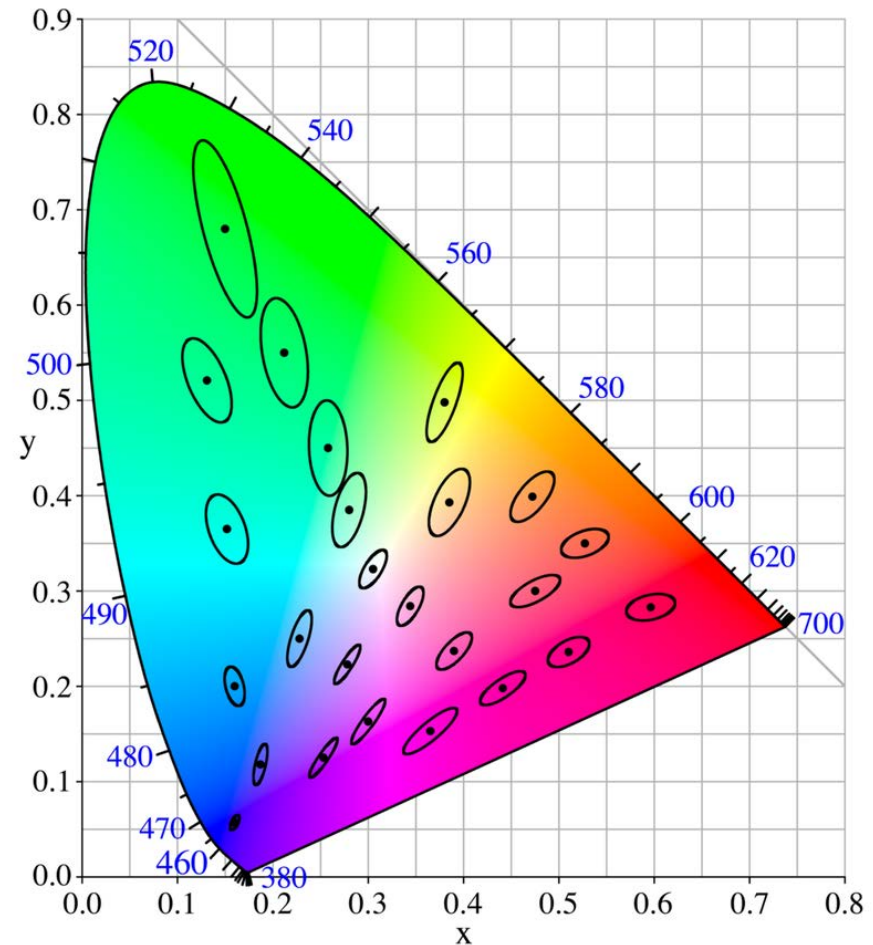
Diferencias de color mínimamente perceptibles para estímulos cuyos tres valores triestímulo pueden variar

Por ej: un estímulo de coordenadas (x_1, y_1, Y_1) se ve igual o diferente a otro de coordenadas (x_2, y_2, Y_2)

La **elipse de MacAdam** es una región en el diagrama de cromaticidad que contiene todos los colores que no se pueden distinguir del color en el centro de la elipse.

El contorno de la elipse representa las **diferencias notables de cromaticidad**.

Elipses de MacAdam



Efectos cromáticos

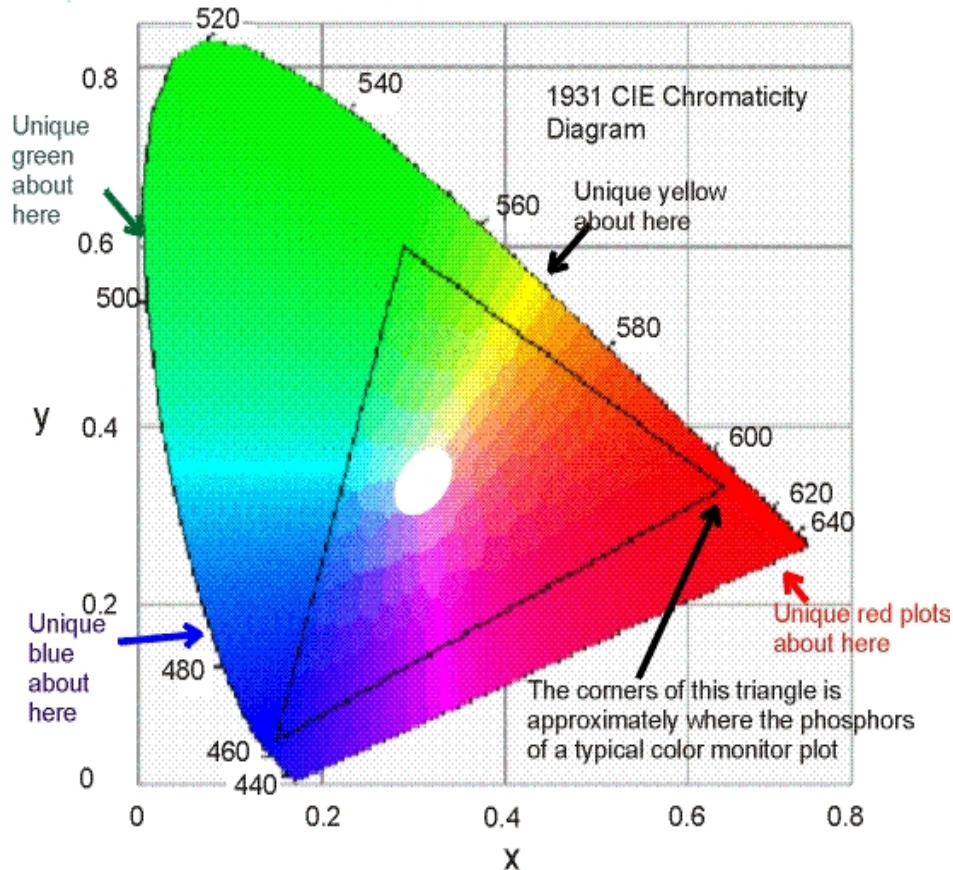
■ Efecto Abney

- Cambio de tono que se produce cuando se agrega luz blanca a una fuente de luz monocromática

■ Fenómeno Bezold Brucke

- La mayoría de los estímulos monocromáticos cambian ligeramente de tono a medida que se ajusta su intensidad.

Tono y Luminancia: fenómeno Bezold Brucke

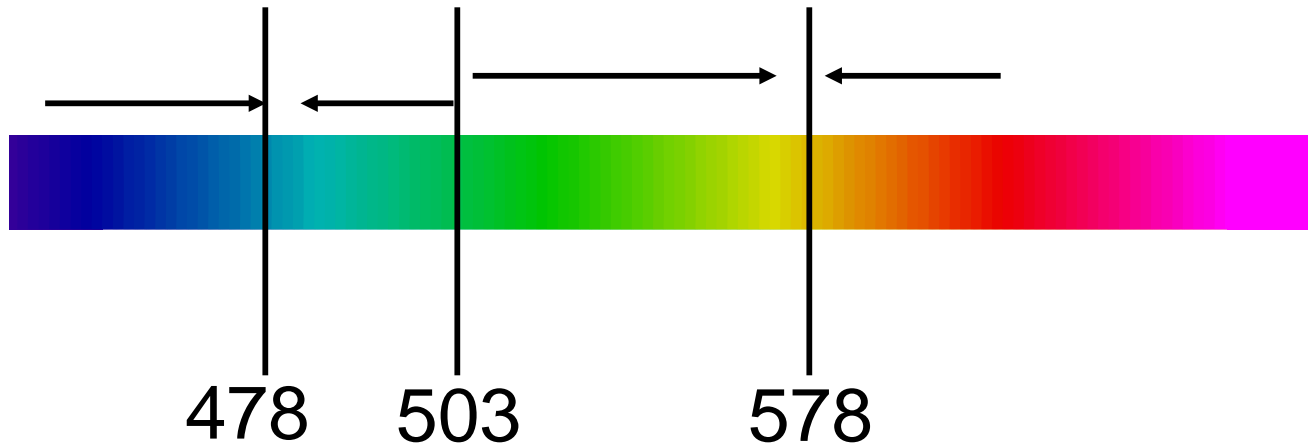


Una variación de luminancia origina un cambio de tono

Las longitudes de onda 478, 503, y 578 no cambian de tono conforme aumenta la intensidad

- Tonos únicos
- Longitudes de onda invariantes

Fenómeno Bezold Brucke



Longitudes de onda inferiores a 500 nm (violetas y azul-verdosos) parecen más azules conforme aumenta la intensidad

Longitudes de onda superiores a 500 nm (rojos y verde-amarillento) parecen más amarillos conforme aumenta la intensidad

La percepción del color

Factores que afectan la percepción del color

La apariencia del color no está determinada simplemente por la estimulación relativa de los fotorreceptores L, M, S, sino que también se ve afectada por:

Luminancia

Adaptación cromática

Contraste de color

Adaptación cromática y constancia de color

- Cambio en las sensibilidades de los mecanismos de respuesta visual como consecuencia de la composición espectral de las luces observadas.
 - Exterior: adaptación cromática a la composición espectral de la luz solar
 - Interior: adaptación cromática a la composición espectral de lámparas incandescentes o fluorescentes.
 - Una adaptación selectiva al predominio de longitudes de onda larga disminuye la sensibilidad a los amarillos y rojos (cambio mínimo en la percepción del color)

Color adaptation

Pre-adaptación

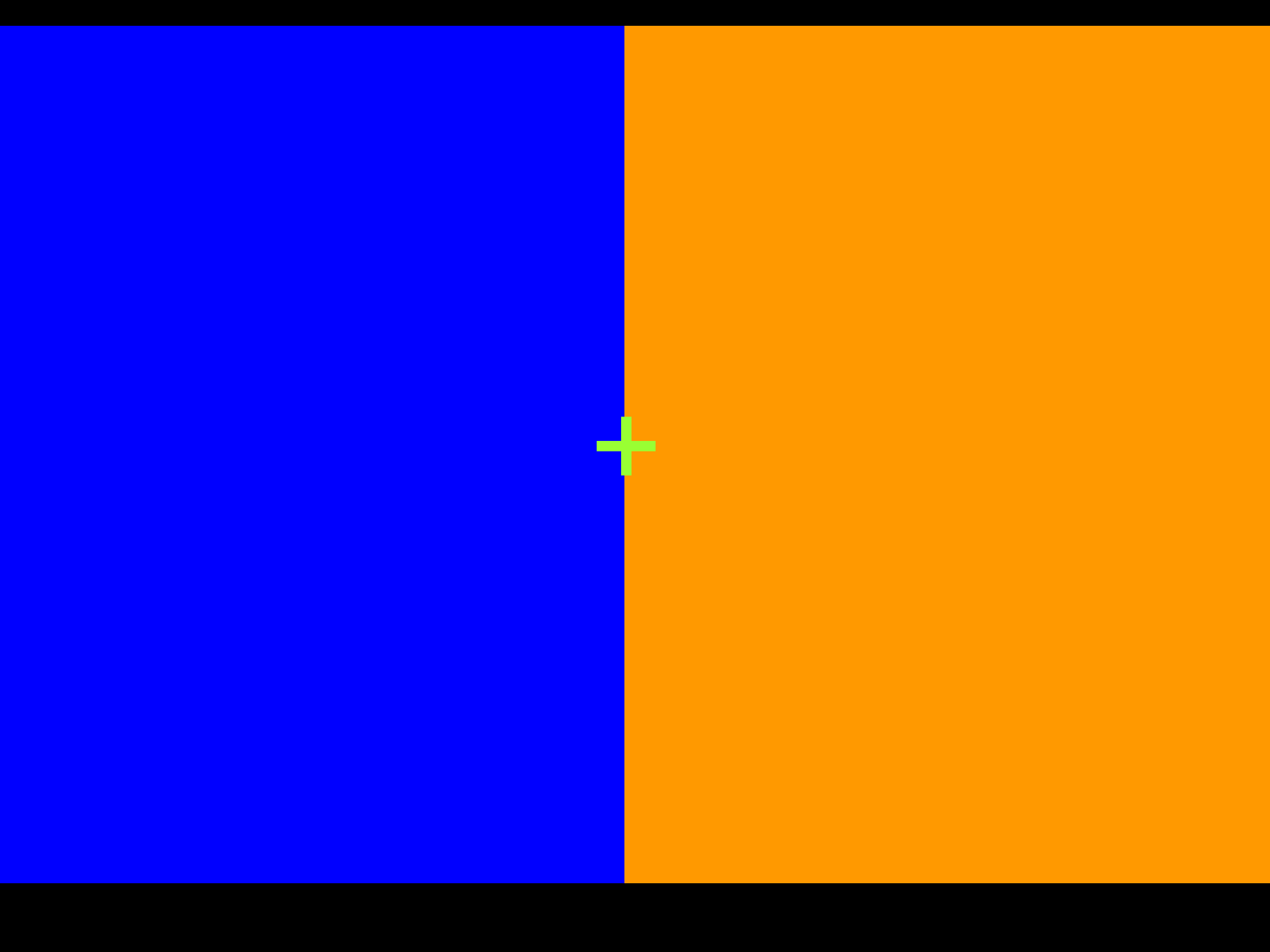
El color percibido depende del color que se haya visto inmediatamente antes

Luz día



Luz tungsteno







Constancia del color

La adaptación ayuda a mantener el equilibrio de color bajo diferentes tipos de iluminación

Constancia del color

El color de los objetos es relativamente independiente del contenido espectral del iluminante

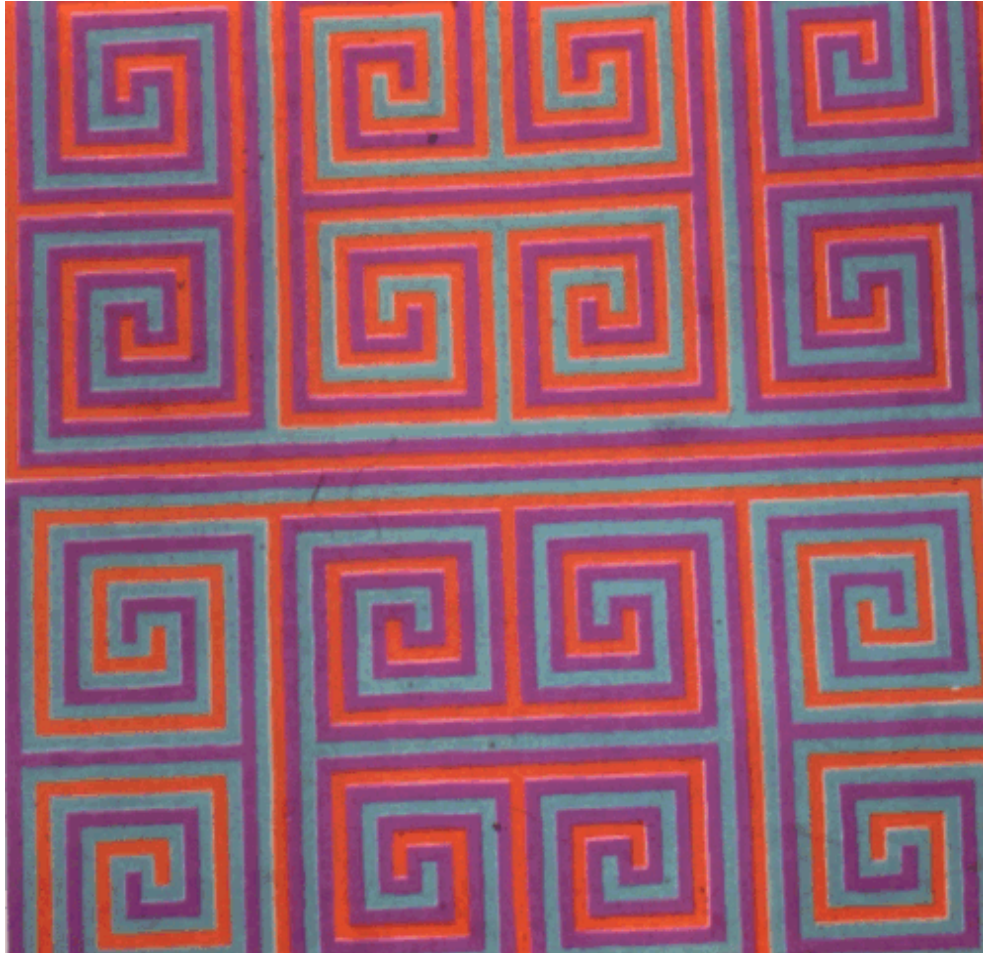
Constancia del color

- Se refiere a la apariencia de color, aproximadamente constante, de los objetos a medida que cambian las condiciones de iluminación.
 - El color de un objeto no cambia aunque las longitudes de onda reflejadas sean distintas según las condiciones de iluminación.
- Nos ayuda a identificar objetos conforme las condiciones de iluminación varían (albaricoque del mismo color en interiores y exteriores)
- Depende del procesamiento neuronal (V4).
- Constancia del color parcial

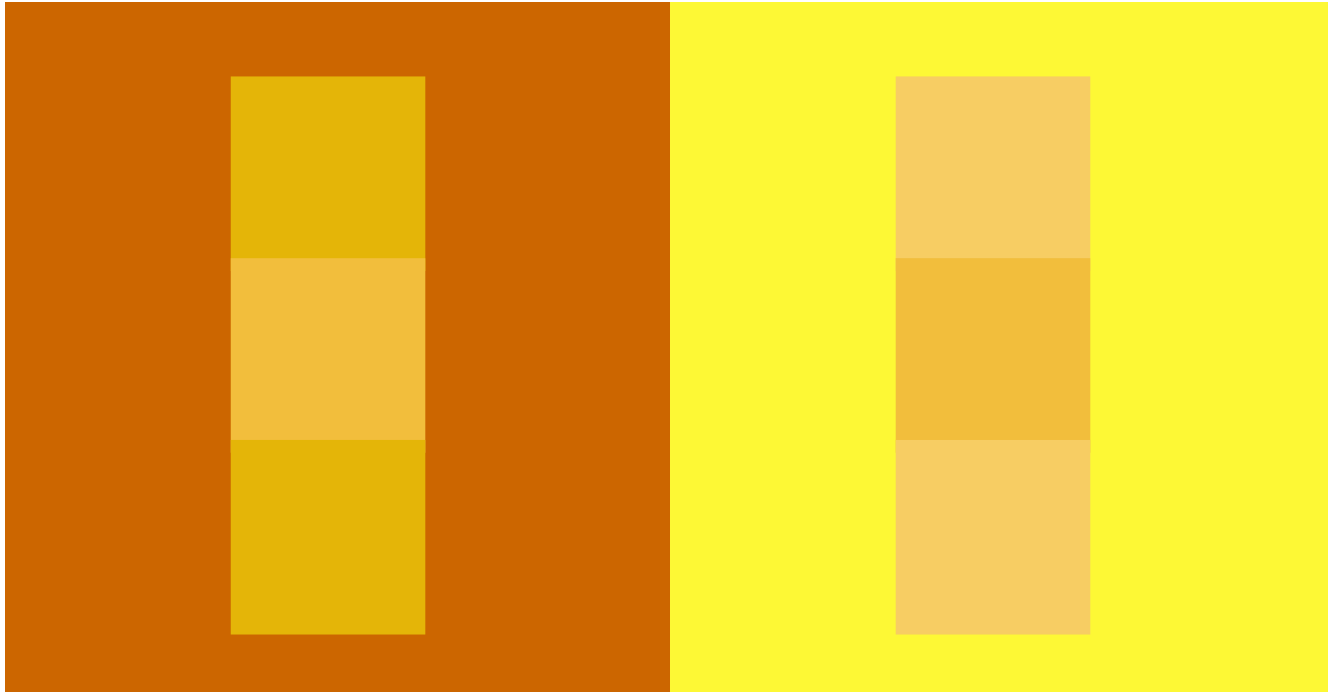
Contraste de color

- El color percibido depende
 - del color del área circundante (contraste simultáneo)
 - de parámetros temporales (contraste sucesivo)
 - Pre-adaptación y postimágenes

Contraste de color simultáneo



Contraste de color simultáneo

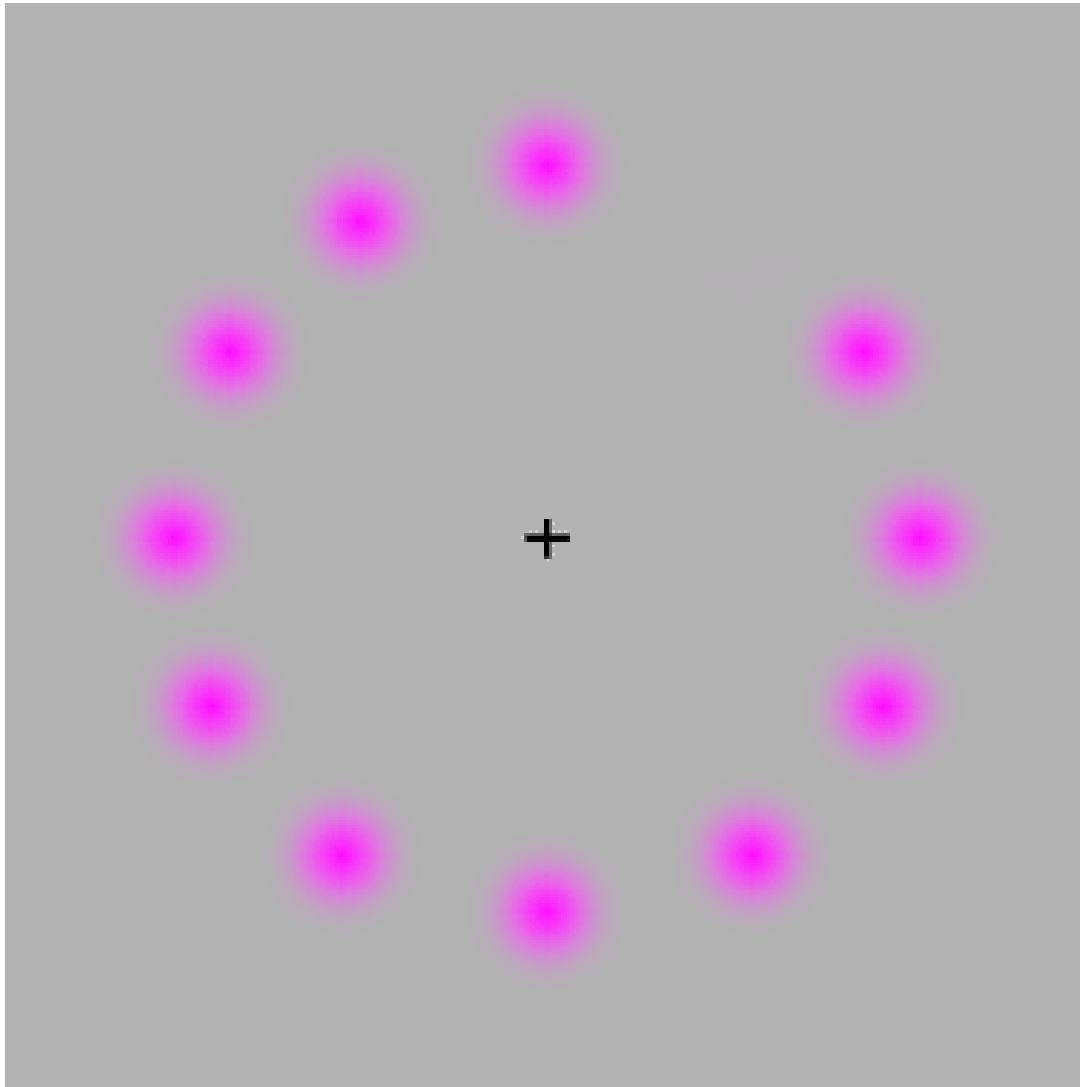


Akiyoshi Kitaoka
(Versionado PIMCD), 2005

Contraste de color simultáneo

- Cambio en la apariencia de un color según las propiedades del área circundante.
- Este fenómeno resalta los contornos y es útil para percibir formas.
- El contraste de color ayuda a mantener el equilibrio de color bajo diferentes tipos de iluminación (Constancia del color)

Contraste de color sucesivo (postimagen)



Jeremy L. Hinton
"Lilac Chaser"

Bases fisiológicas de la visión del color

- 1) **Mecanismo tricromático** a nivel de los fotorreceptores.
- 2) **Procesamiento del color oponente** en varios niveles de la vía visual

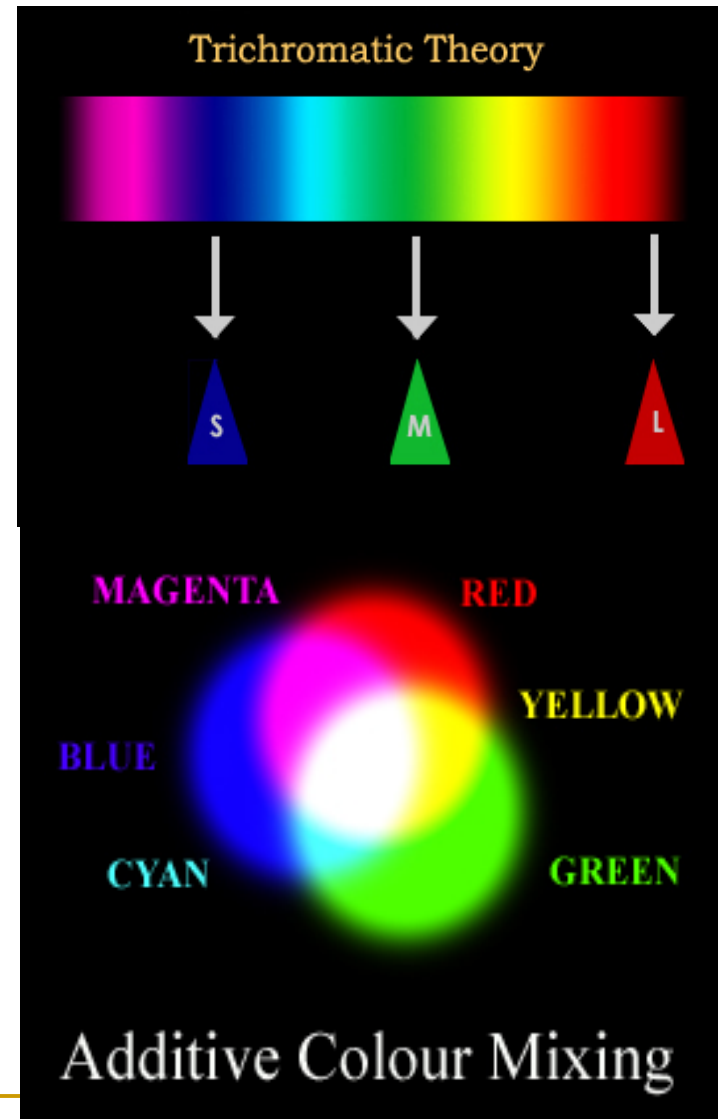
Bases fisiológicas de la visión del color

- **A nivel de los fotorreceptores**, la visión es **tricromática** y está mediada por **tres tipos diferentes de cono**.
- Las respuestas de los tres tipos de conos son transformadas por la compleja red neuronal en la retina.
- **A nivel de las células ganglionares**, la información de color se codifica en
 - **Dos canales de color opuestos** (Campos Receptivos)
 - Rojo vs Verde
 - Azul vs Amarillo
 - **Un canal de brillo**.

Teoría tricromática de Young-Helmholtz

Young (1773) propuso que la visión del color era posible por la estimulación relativa de sólo **tres receptores cromáticos**

La mayoría de los colores de la naturaleza se pueden obtener mediante la **mezcla aditiva de tres colores primarios**
(Maxwell, 1831)



Teoría tricromática de Young-Helmholtz

Helmholtz (1821) consideró tres mecanismos

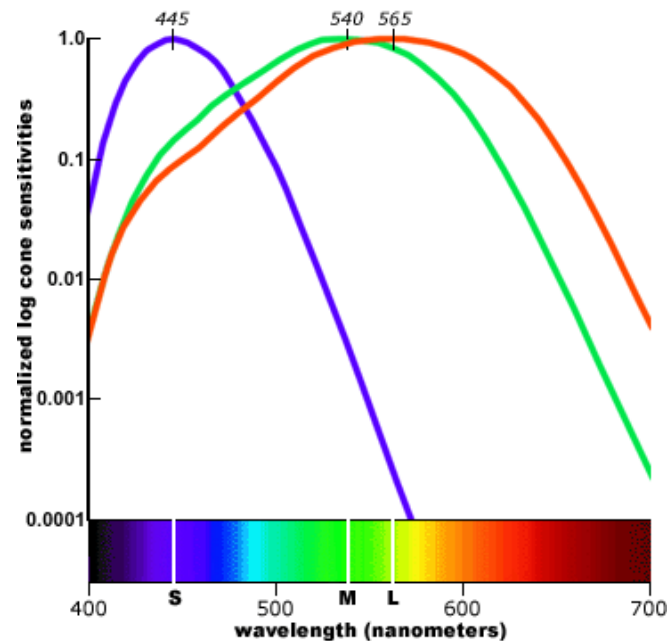
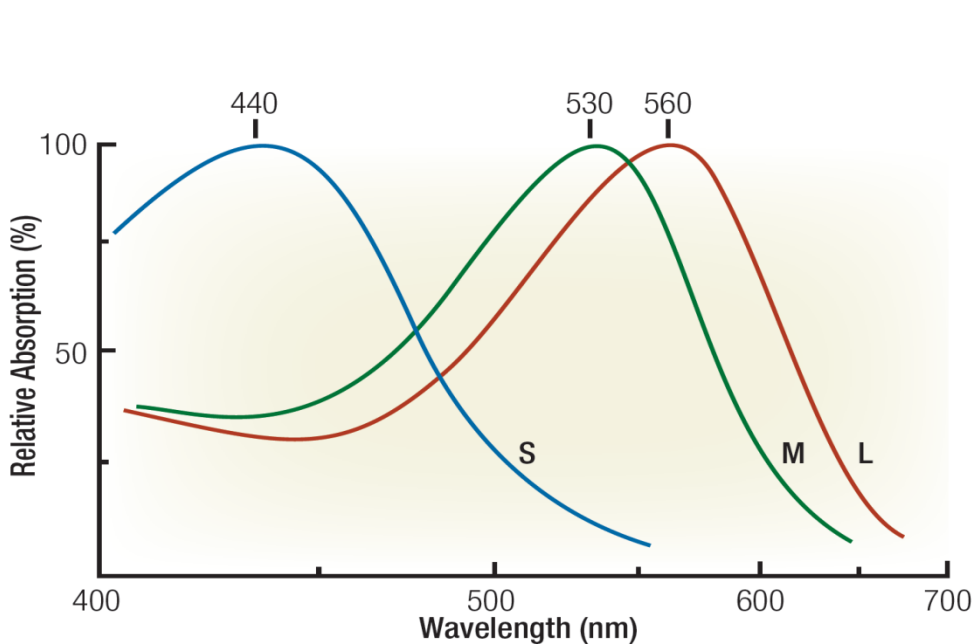
- ❑ Sensibilidades espectrales solapadas
- ❑ Cada uno con una respuesta máxima en una posición espectral diferente
- ❑ Codificación del color por comparación de la actividad en los tres mecanismos

Evidencias empíricas que respaldan la teoría tricromática de Young-Helmholtz

- Experimentos psicofísicos de mezclas de colores
- Experimentos fisiológicos (3 tipos de conos):
 - Densitometría retiniana
 - Microespectrofotometría
 - Registros electrofisiológicos de conos de retina humana

Tres tipos de conos

La existencia de las tres clases de conos no fue confirmada hasta casi 100 años después de la teoría tricromática de Young y Helmholtz (Brown and Wald, 1964)



Curvas de conos normalizadas para valores máximos iguales a 1.0 en escala logarítmica

Teoría oponente de la visión del color de Hering

Ewald Hering (1870)

Propuso que la visión del color era debida a tres mecanismos oponentes:

- Rojo vs Verde
- Azul vs Amarillo
- Luminosidad o brillo

Evidencias empíricas que respaldan la oponencia cromática

- Los estudios psicofísicos de Hurvich y Jameson (1957) determinaron la **sensibilidad espectral de los canales oponentes**
 - **Técnica de la cancelación del tono:** para una longitud de onda dada, el observador ajusta la cantidad de rojo o verde y azul o amarillo que es necesaria para cancelar el tono opuesto de un par oponente R-V o Am-Az

Ejemplo:

Naranja = Rojo + amarillo

Verde para cancelar el rojo = amarillo único

Azul para cancelar el amarillo = rojo único

Evidencias empíricas que respaldan la oponencia cromática

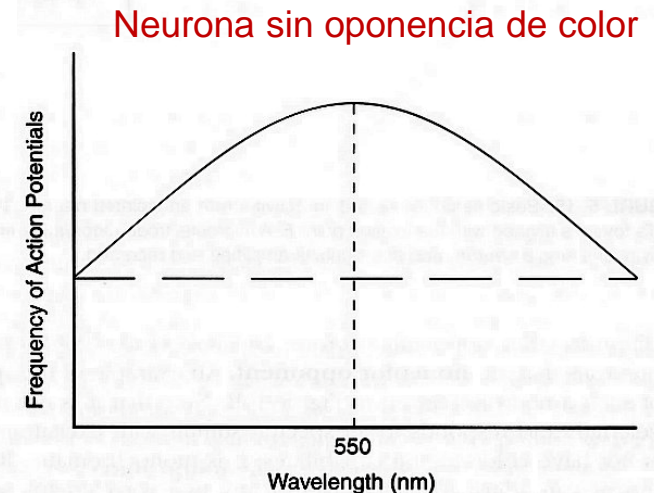
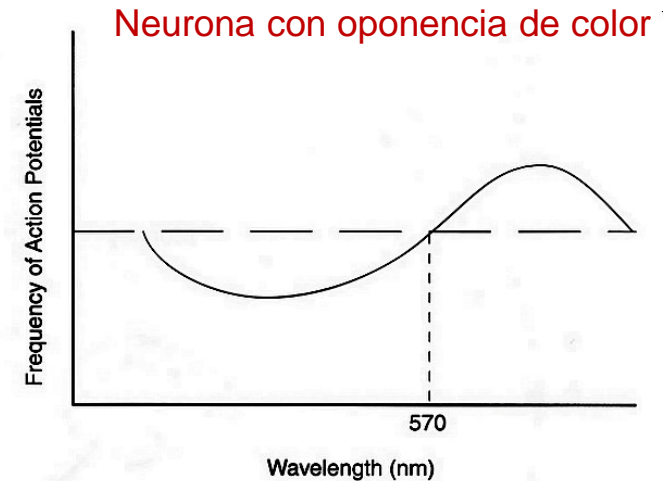
Pruebas de **registros electrofisiológicos** en neuronas con y sin oponencia de color

■ Neurona con oponencia de color

- responden a una región del espectro con excitación (mayor frecuencia de potenciales de acción)
- otra región causa inhibición (menor frecuencia de potenciales de acción)

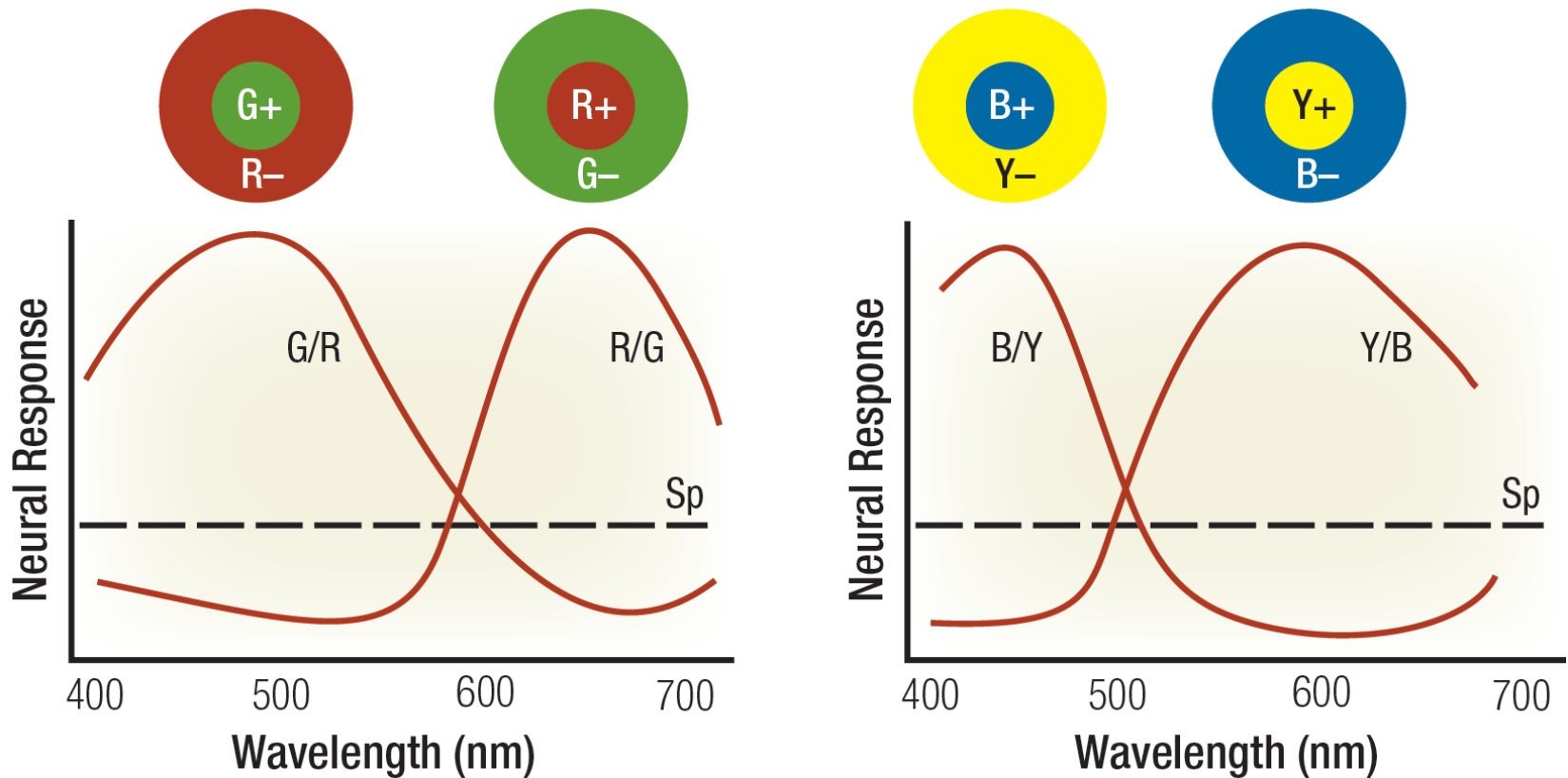
■ Neurona sin oponencia de color

- Igual respuesta a todas las longitudes de onda



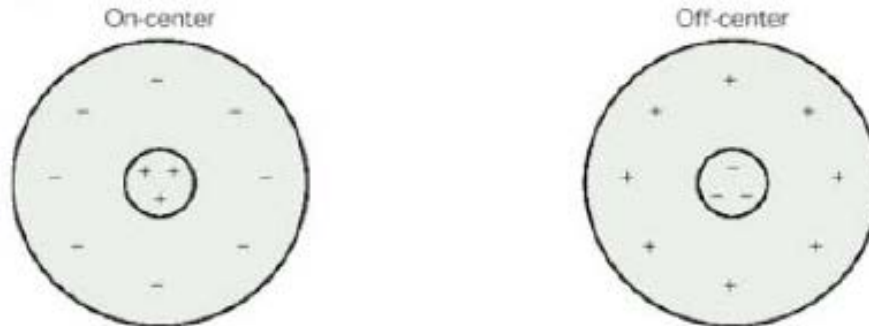
Neuronas con oponencia de color

Núcleo Geniculado Lateral (DeValois & DeValois, 1975)



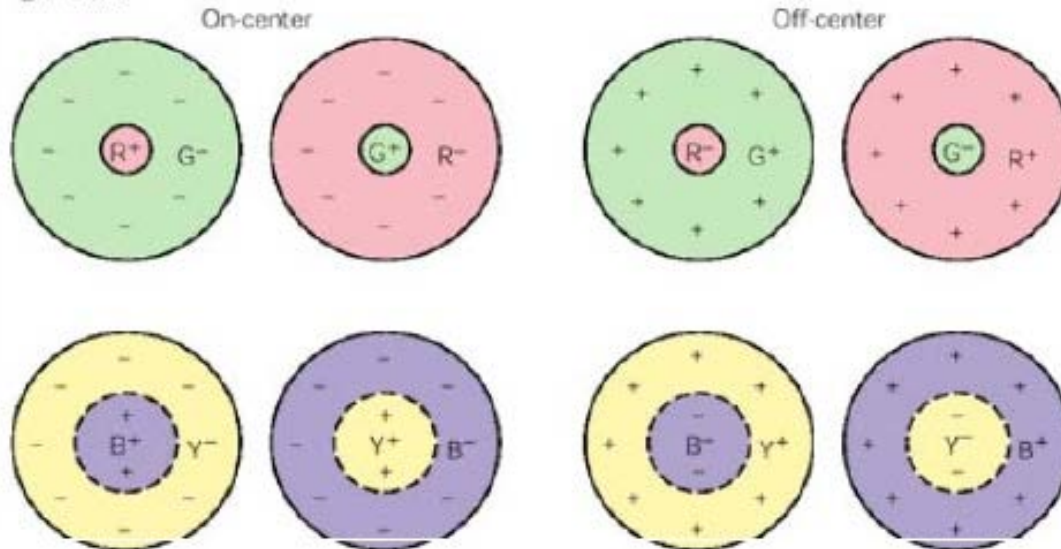
Oponencia de color: campos receptivos de células ganglionares

A M cells



Células magnocelulares
sin oponencia de color

B P cells



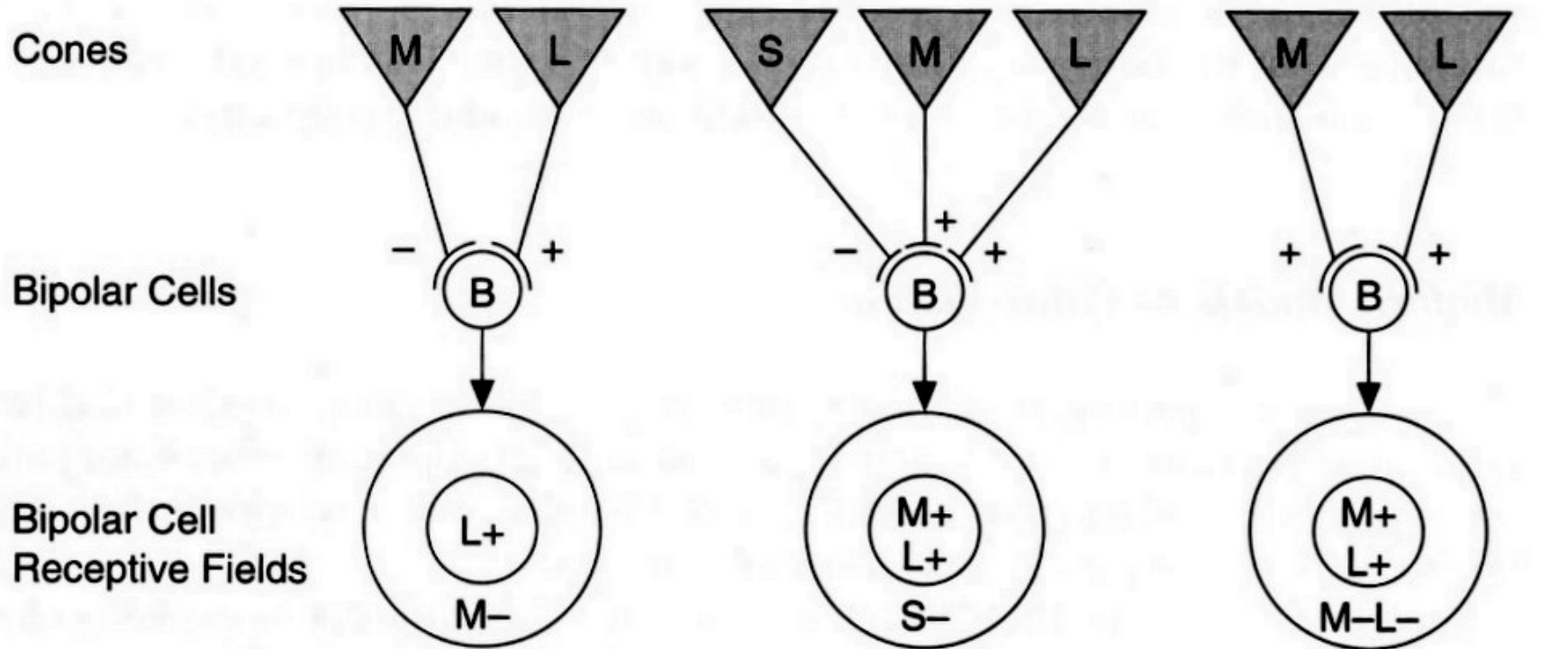
Células parvocelulares
con oponencia de color

Modelo actual de la visión del color

- Las dos teorías se unieron en la **teoría de zona**, propuesta originalmente por Donders en 1881
 - Las señales tricromáticas de los tres tipos de conos (con sensibilidades espectrales solapadas pero diferentes máximos) interaccionan en las células ganglionares para formar canales cromáticos y acromáticos.

Modelo actual de la visión del color

Señales tricromáticas (tres tipos de conos)



**3 canales (psicofísica)
o campos receptores
(neurofisiología)**

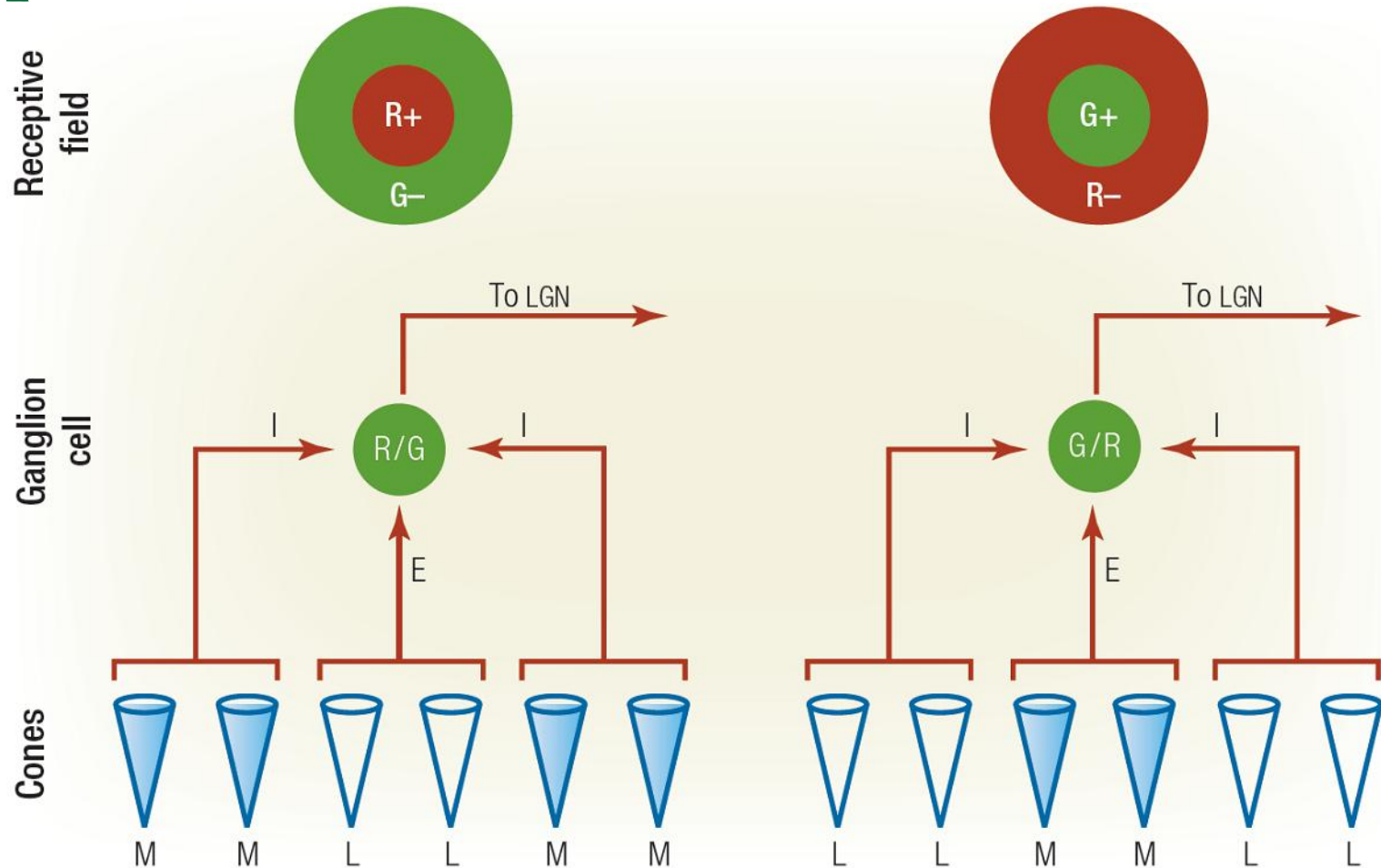
Canal oponente
rojo-verde

Canal oponente
azul-amarillo

Canal acromático

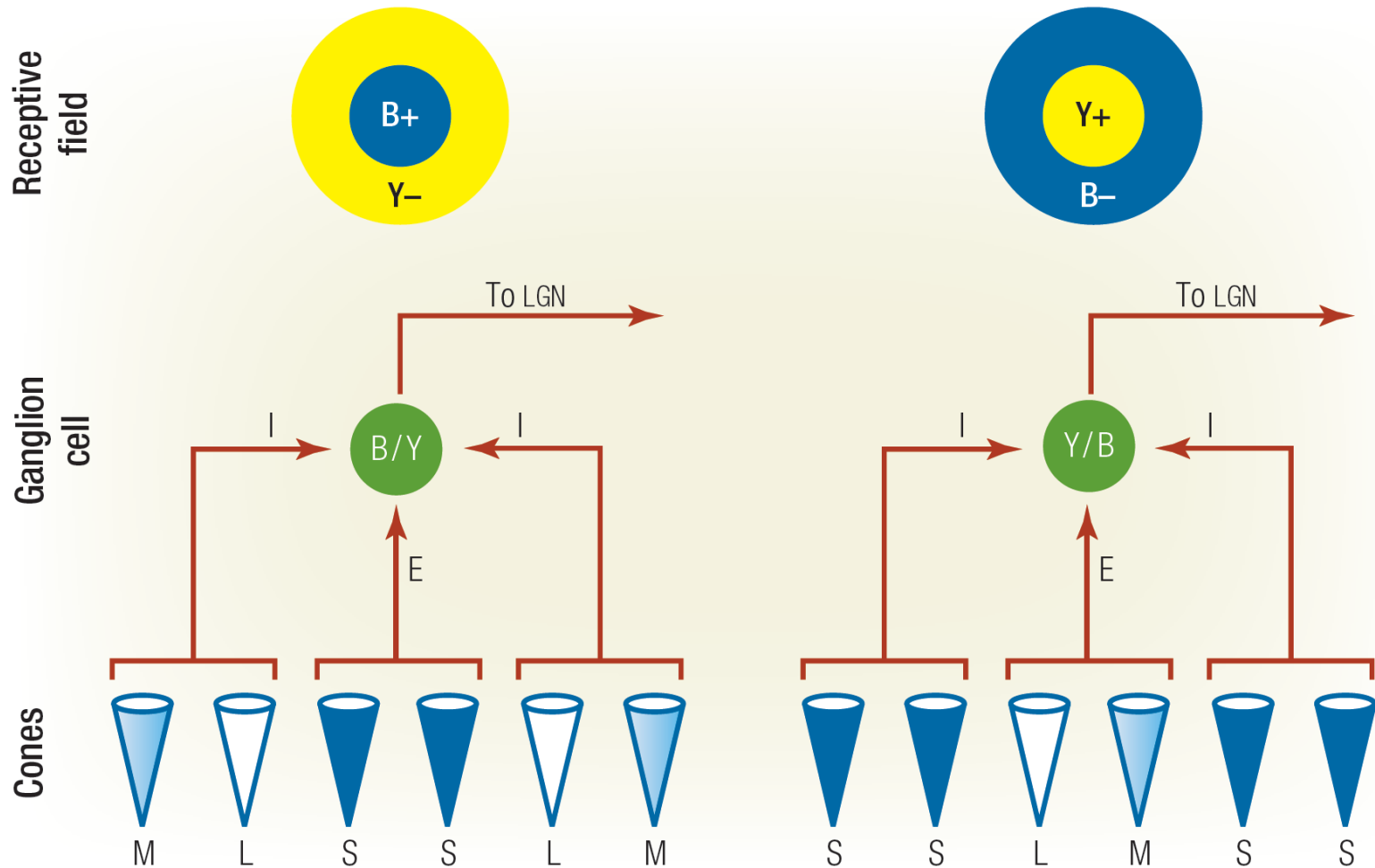
Canal Rojo-Verde: Célula Ganglionar

Oponencia de color

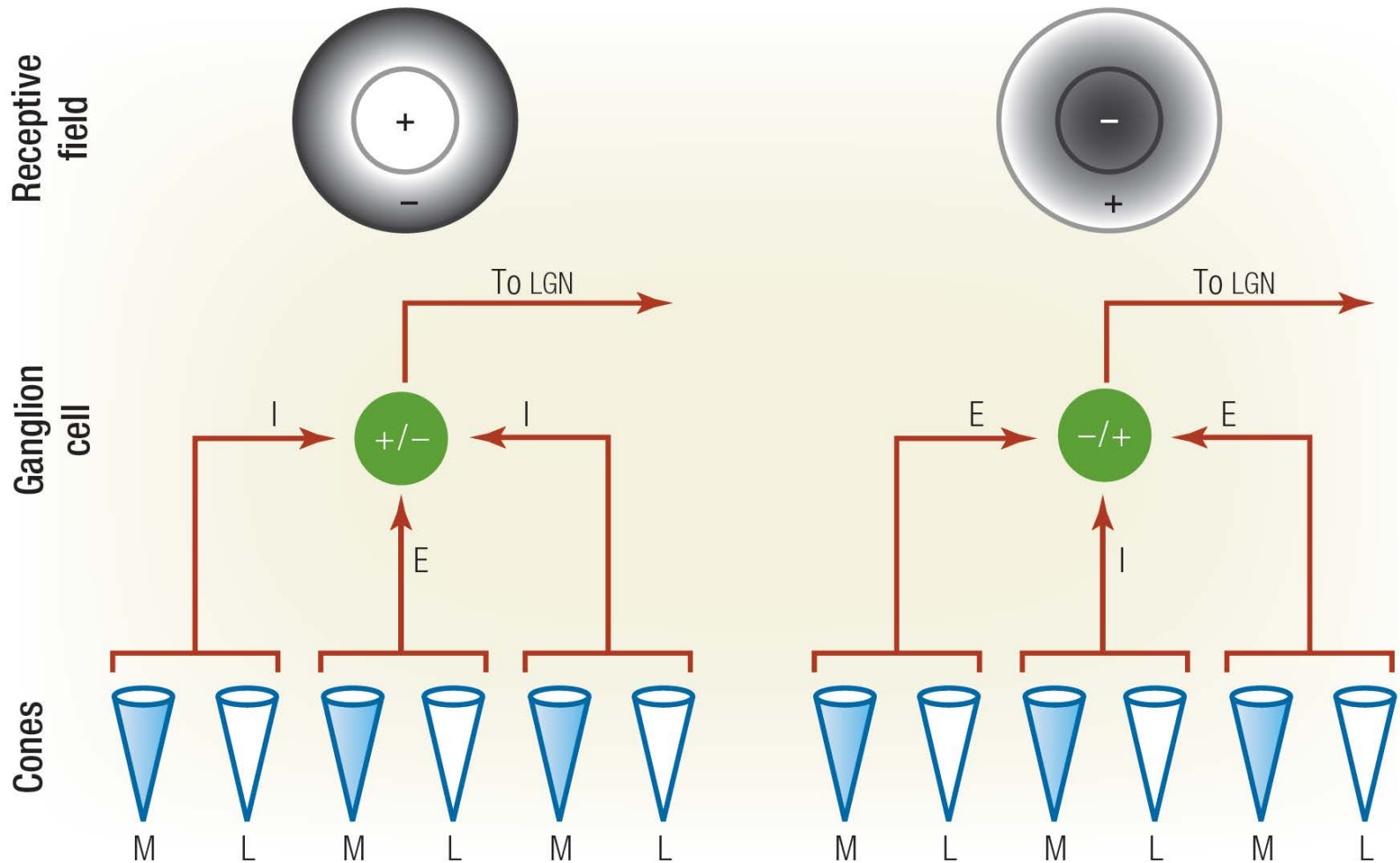


Canal Azul - Amarillo: Célula Ganglionar

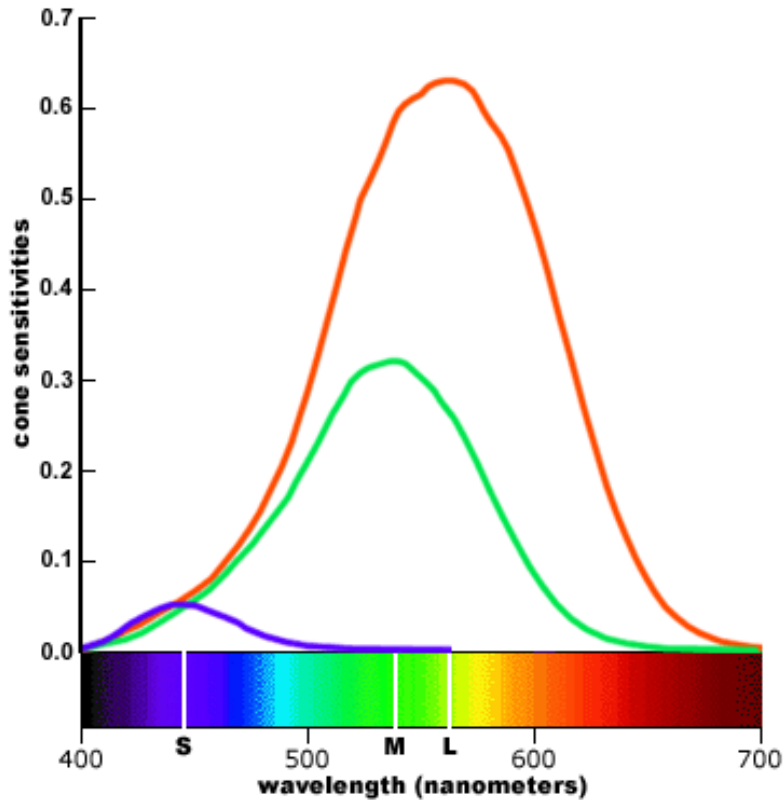
Oponencia de color



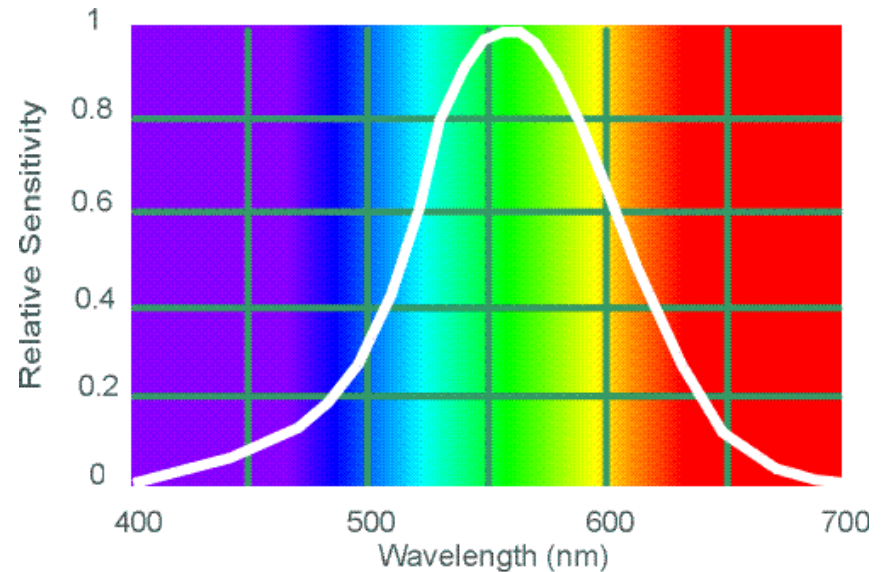
Canal acromático: Célula Ganglionar



Canal acromático o de luminosidad: L+M



Curvas con la escala vertical lineal y escaladas para reflejar las proporciones de conos L, M y S en la retina (1.0 = respuesta acumulada total de los tres conos)



Función de luminosidad

El canal de luminancia se alimenta con la suma de las señales procedentes de los conos **L** y **M**

$$L + 2M$$



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Gracias
