

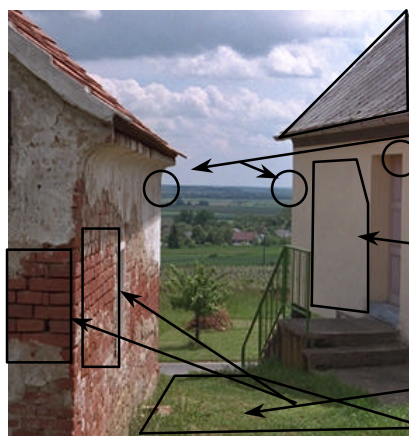


Centre de Visió
per Computador

Màster de
Visió per Computador

Curs MET07: **Color en visió per computador:**
bases i aplicacions

Fonts d'informació visual (*visual cues*)



Discontinuitats

contorns

unions

cantonades

color

textura

Superfícies

1. Definicions i conceptes bàsics

Definició de color

El color és una característica de la llum, que no és deguda a no-homogeneïtats espacials o temporals, considerant que la llum és l'aspecte de l'energia radiant que l'observador humà és capaç de percebre per l'estimulació que produeix a la retina.

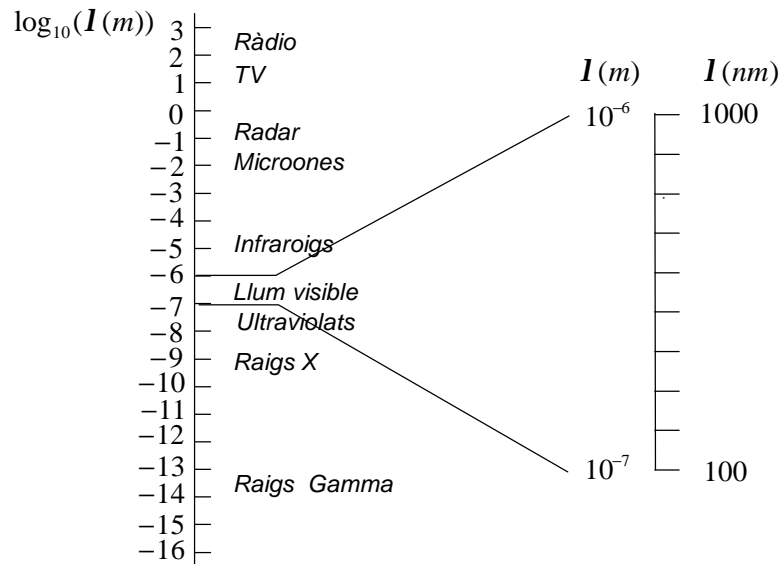
[Comitè de Colorimetria de la Optical Society of America]

La llum

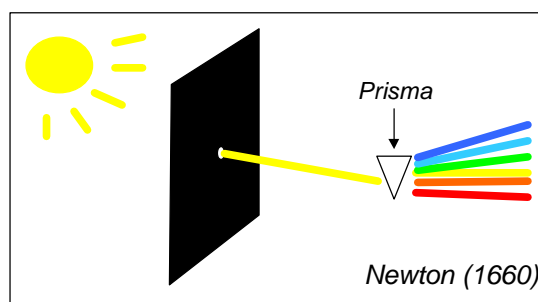
La llum és una radiació electromagnètica, és a dir, una forma d'energia, que es pot caracteritzar d'acord amb les seves components que venen donades per la seva longitud d'ona.



Espectre de la radiació electromagnètica

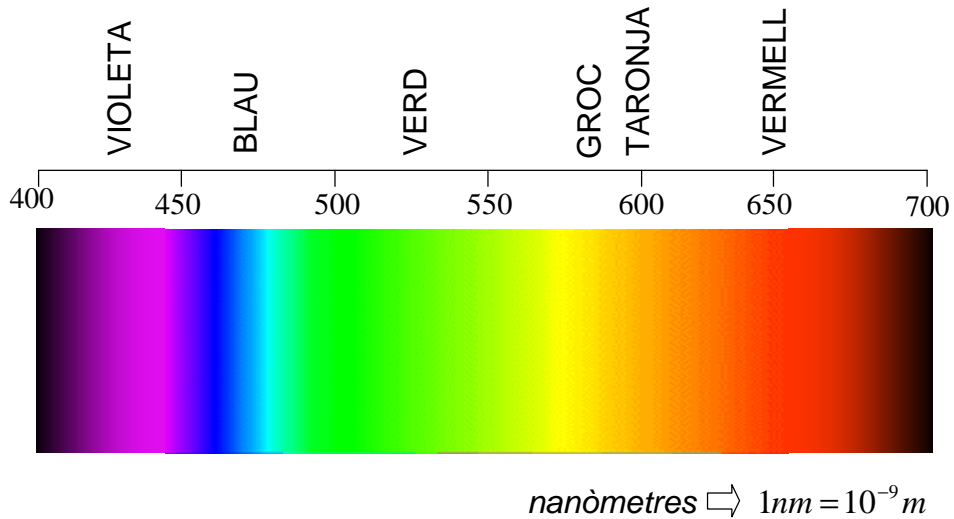


La llum visible és una part molt petita de tot l'espectre



El prisma desvia de diferent manera en funció de la component espectral o longitud d'ona.

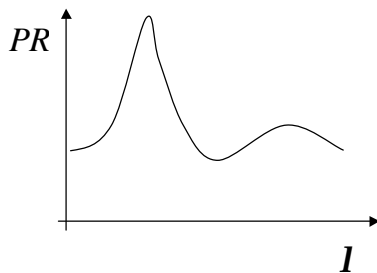
Espectre de la llum visible:



Alguns conceptes

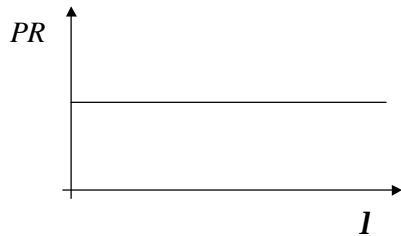
Potència radiant: Potència, és a dir, energia per unitat de temps, emesa, transferida o rebuda en forma de radiació. La unitat de radiació és el watis.

Distribució de potència espectral (DPE): representa la potència radiant per unitat d'interval de longitud d'ona de l'espectre.

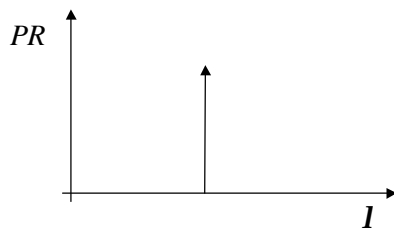


La DPE és la mesura que defineix totes les propietats òptiques que influeixen en el color percebut.

Exemples:

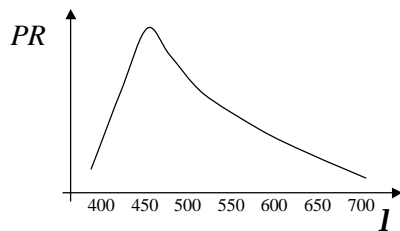


Llum blanca: Llum amb distribució espectral de potència constant a tot l'espectre. Llum amb espectre equi-energètic.

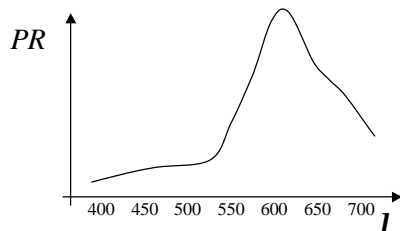


Llum monocromàtica: Llum amb distribució espectral de potència concentrada en una única longitud d'ona. Totes les components tenen la mateixa longitud d'ona.

Exemples:



Sensació de blau



Sensació de groc



Atributs perceptius bàsics: Descriuen d'una manera més eficient la informació de la distribució de potència espectral.

Intensitat (*Brightness*): Atribut de la sensació visual per la que un color pot semblar més o menys intens, o d'altra manera, ve donat pel fet que l'àrea sobre la que el color està present sembla emetre més o menys llum. Les variacions d'intensitat es descriuen des de "dèbil" a "viu".

To (*Hue*): Atribut de la percepció d'un color que es denota pel seu nom: blau, verd, groc, vermell, púrpura.

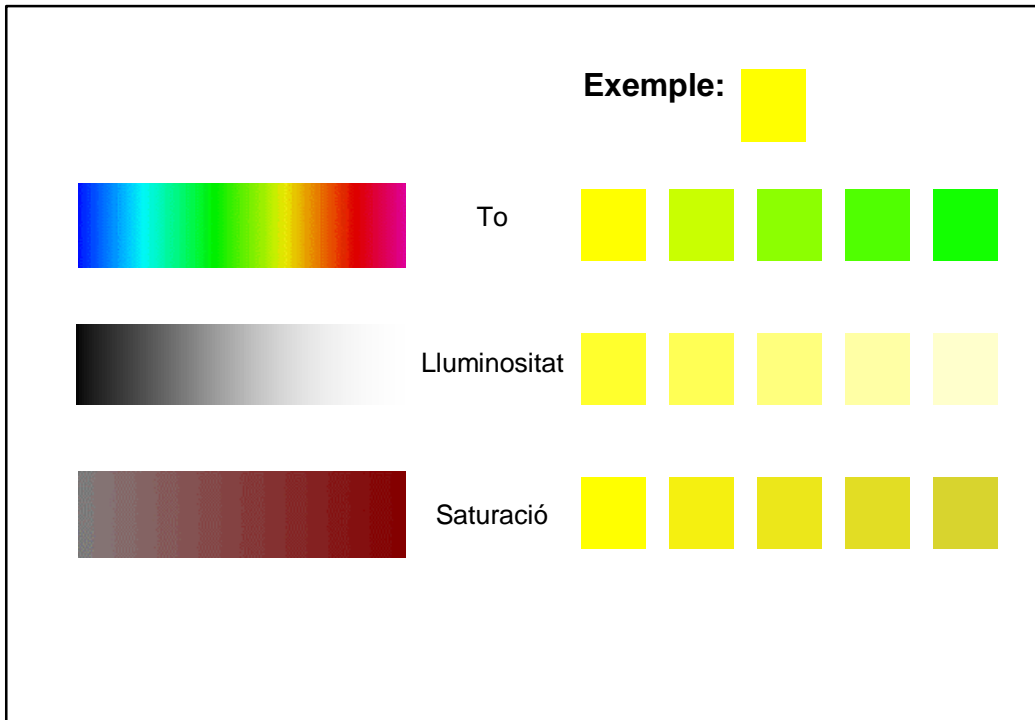
Cromacitat (*Chromaticness*): Atribut de la percepció d'un color per a la que s'exhibeix més o menys quantitat del seu to.

Atributs perceptius relatius:

Croma (*Chroma*): Atribut que permet jutjar el grau en que un estímul cromàtic difereix d'un estímul acromàtic de la mateixa intensitat.

Saturació (*Saturation*): Cromacitat normalitzada respecte de la intensitat.

Lluminositat (*Lightness*): Intensitat normalitzada respecte d'un blanc de referència.

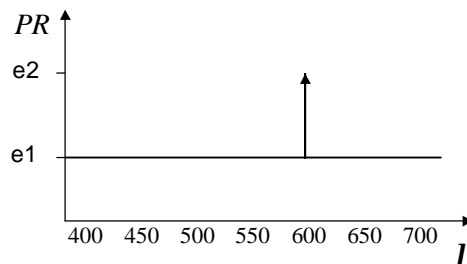


Relació amb la distribució de potència espectral:

Longitud d'ona dominant: és la longitud d'ona de l'espectre que té una energia més alta. Sovint aquesta longitud d'ona ve donada per la que provoca un pic important a l'espectre (e2). \Leftrightarrow TO

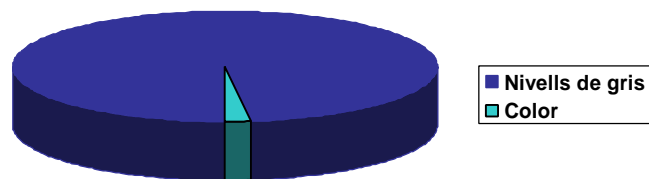
Puresa de l'excitació: es basa en la relació entre l'energia de la longitud d'ona dominant, (e2) i l'energia de la llum blanca (e1). Si e1 és igual a e2 la puresa és zero, si e1=0 la puresa és del cent per cent. \Leftrightarrow SATURACIÓ

Lluminància: és proporcional a l'àrea que queda sota la corba de la distribució de potència espectral. \Leftrightarrow LLUMINOSITAT



2. Colorimetria.

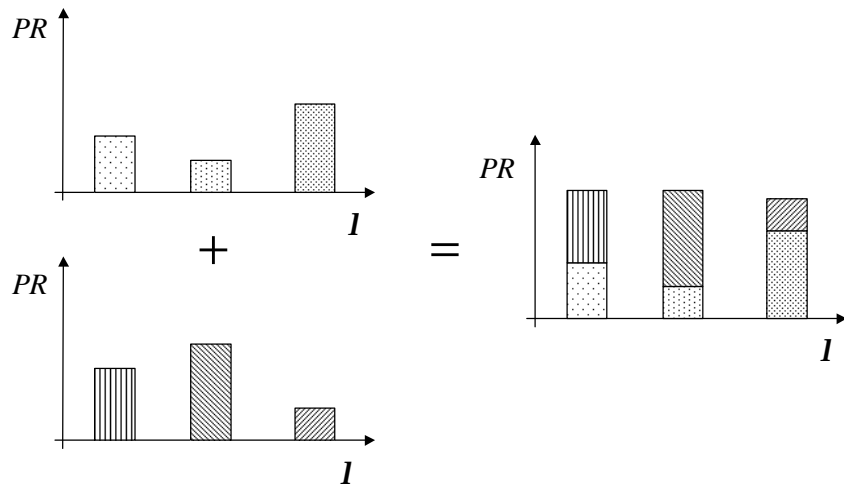
Color en visió per computador



Color en física: COLORIMETRIA

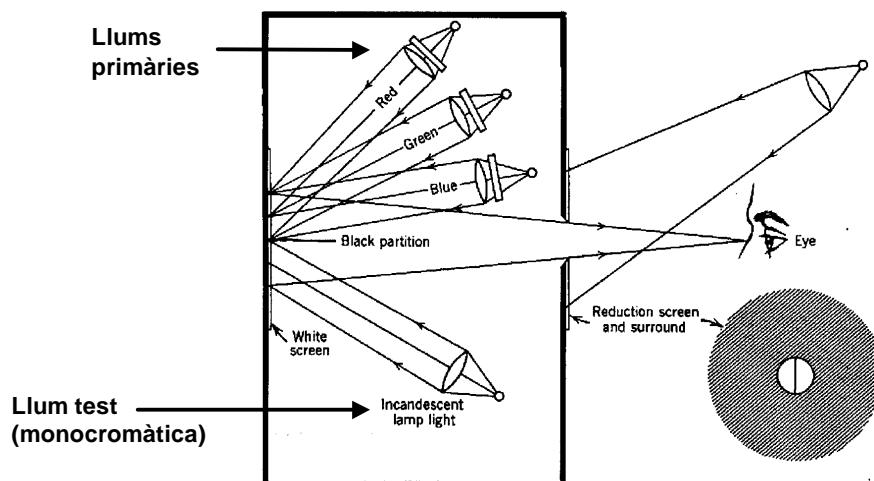
La colorimetria és la ciència que estudia com especificar numèricament el color corresponent a un estímul físic i de com mesurar la diferència entre colors.

Principi de superposició del color: la mescla additiva de llums porta a una sensació del color que es regeix pel següent principi (*Grassman-1853, Àlgebra del color*)



L'experiment de la correspondència de color:

(*Wright 1929, Guild 1931, CIE 1931, CIE 1964, CIE 1971*)



Condicions de l'experiment:

- **Independència entre llum primàries**, no existeix cap mescla additiva d'una o dues llums primàries que doni un color que es correspongui amb la tercera llum primària.
- **Casos impossibles**, es mouen un o dos primaris al costat del test, de manera que tenim valors negatius pel primari mogut.

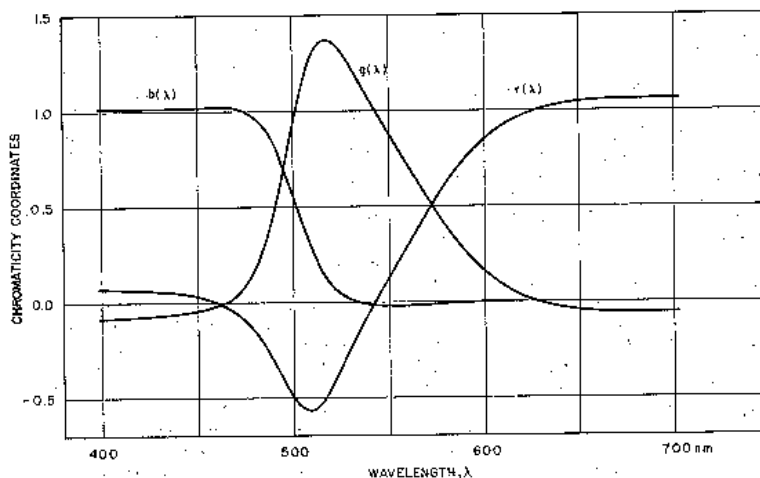
Conclusions \Rightarrow Generalització tricromàtica.

Sobre un ampli rang de condicions d'observació, la majoria dels estímuls de color es poden correspondre completament amb la mescla additiva de tres estímuls primaris fixats amb una potència radiant que es pugui ajustar. (*Generalització empírica*)

Resultat de l'experiment

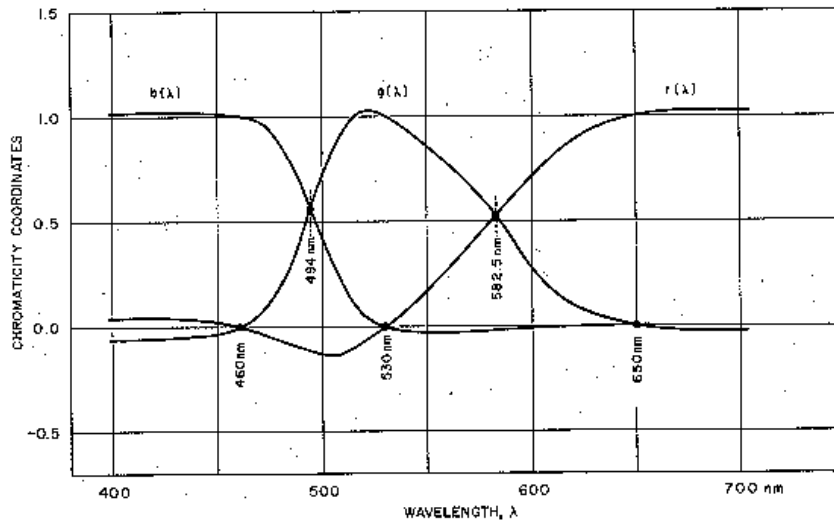
(Guild 1931)

- Sobre 7 observadors tricromats
- Camp visual = 2 graus
- Interval = [400,700]



Resultat de l'experiment
(Wright 1928-29)

- Sobre 10 observadors tricromats
- Camp visual = 2 graus
- Interval = [400,700]
- Normalització WDW



Resultat de l'experiment
CIE 1931 - Observador estàndard
(Commission Internationale de l'Eclairage)

- Camp visual = 2 graus
- Interval = [380,780]
- Sub-intervals = 5nm.
- Estímul monocromàtics bàsics:

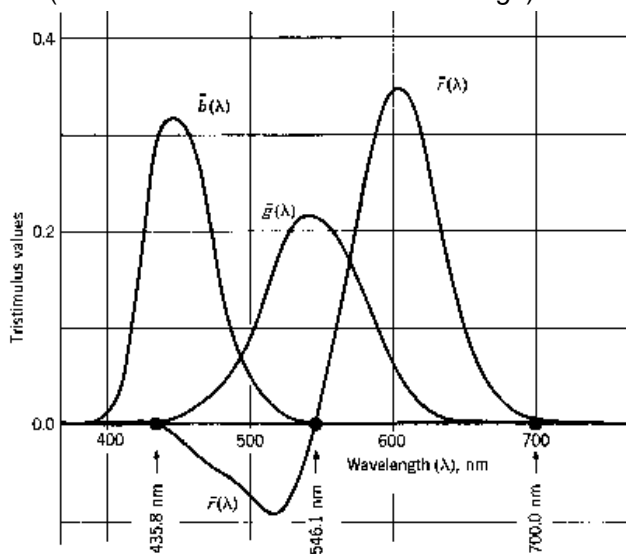
$R=700\text{nm}$
 $G=546.1\text{nm}$
 $B=435.8\text{nm}$

- Les funcions resultants s'anomenen:

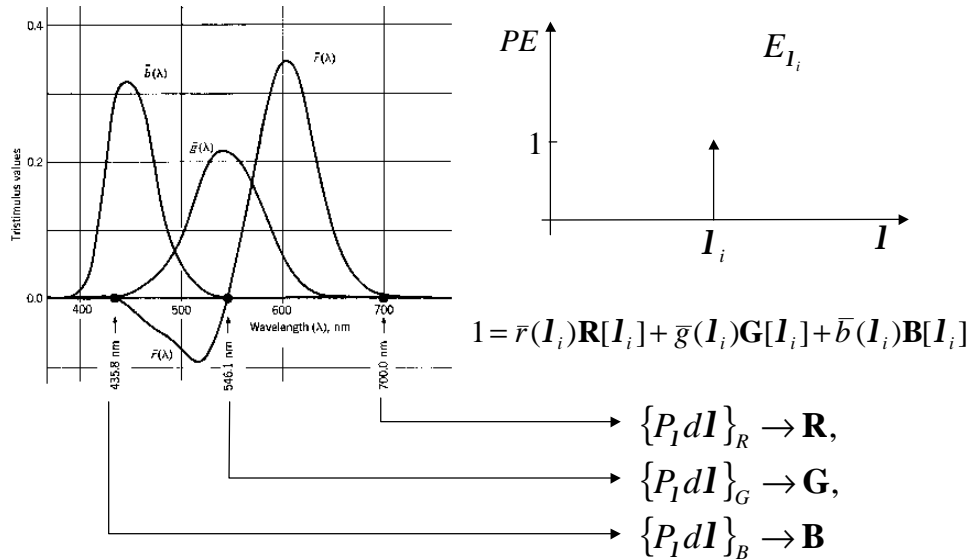
Color-matching functions

i es denoten

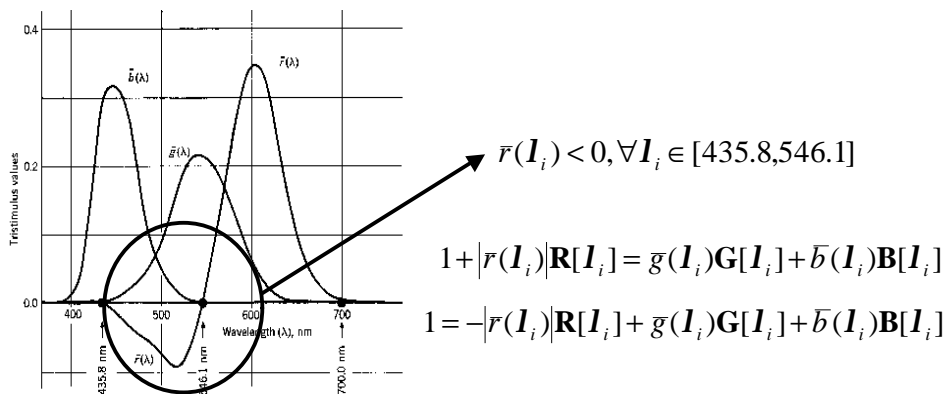
$$\bar{r}(I), \bar{g}(I), \bar{b}(I)$$



Significat de les funcions de correspondència de color:



Casos de correspondència impossible:



Equacions bàsiques de la generalització tri-cromàtica:

Suposem la distribució espectral d'un color Q, que denotem com:

$$\{P_I dI\}_Q$$

Pels colors primaris definim els vectors primaris de l'espai RGB:

$$\{P_I dI\}_R \rightarrow \mathbf{R}, \quad \{P_I dI\}_G \rightarrow \mathbf{G}, \quad \{P_I dI\}_B \rightarrow \mathbf{B}$$

Aleshores, la correspondència del color Q amb els tres primaris, en notació vectorial, serà:

$$\mathbf{Q} = R_Q \mathbf{R} + G_Q \mathbf{G} + B_Q \mathbf{B}$$

L'expressió matricial ve donada per:

$$\mathbf{Q} = \begin{pmatrix} q_{I1} \\ q_{I2} \\ \vdots \\ q_{In} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{I1} & G_{I1} & B_{I1} \\ R_{I2} & G_{I2} & B_{I2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{In} & G_{In} & B_{In} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_Q \\ G_Q \\ B_Q \end{pmatrix}$$

↑

↑

↑

\mathbf{R}

\mathbf{G}

\mathbf{B}

n: depèn del nombre d'increments d'intensitat que s'hagin mesurat al llarg de tot l'espectre.

En general el **vector tri-estímul** del color Q ve donat per:

$$(R_Q, G_Q, B_Q)$$

La matriu de correspondència entre l'espectre i l'**espai tri-estímul** és:

$$M = \begin{pmatrix} R_{I1} & G_{I1} & B_{I1} \\ R_{I2} & G_{I2} & B_{I2} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{In} & G_{In} & B_{In} \end{pmatrix}$$

Problema: Donat un cert estímulo Q , quin és el vector tri-estímulo de Q a l'espai RGB.

Considerant el principi de superposició del color i la generalització tricromàtica definim les següents equacions:

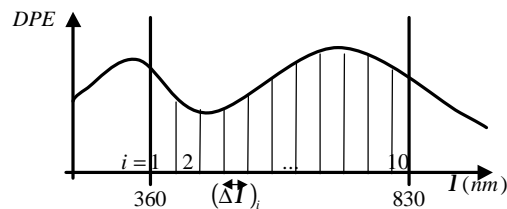
Donat un color, Q , amb funció de distribució espectral: $\{P_I dI\}_Q$

aquest es pot veure com la mescla additiva d'un conjunt d'estímuls bàsics:

$$Q_i \rightarrow \{P_I dI\}_{Q_i} \quad \text{sobre} \quad (\Delta I)_i, i=1..n$$

$$I \in [360,830] \rightarrow \text{interval visible}$$

Exemple:



Per a cada estímulo bàsic, tenim: $Q_i = R_{Q_i} \mathbf{R} + G_{Q_i} \mathbf{G} + B_{Q_i} \mathbf{B}$

on el vector tri-estímulo ve donat per: $(R_{Q_i}, G_{Q_i}, B_{Q_i})$

Aleshores, pel principi de superposició del color, tenim:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \left(\sum_{i=1}^n R_{Q_i} \right) \mathbf{R} + \left(\sum_{i=1}^n G_{Q_i} \right) \mathbf{G} + \left(\sum_{i=1}^n B_{Q_i} \right) \mathbf{B}$$

El vector tri-estímulo de Q a l'espai RGB ve donat per:

$$(R_Q, G_Q, B_Q) = \left(\sum_{i=1}^n R_{Q_i}, \sum_{i=1}^n G_{Q_i}, \sum_{i=1}^n B_{Q_i} \right)$$

Idea: Qualsevol color es pot expressar com la suma de les coordenades tri-estímulo de subparts del seu espectre.

Si el portem el principi de la superposició al cas límit, tenim que:

$$\lim_{(\Delta I)_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n P_{I_i} (\Delta I)_i = \int_{I_a}^{I_b} P_I dI$$

on $[I_a, I_b]$: *Interval visible considerat*

P_{I_i} : *Potència radiant de l'estímul Q a la longitud d'ona I_i que està localitzada en qualsevol punt de l'interval $(\Delta I)_i$*

$P_I dI$: *Potència radiant de l'estímul Q a l'interval de longitud d'ona d'amplada dI i centrat a I*

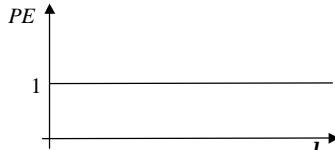
Aquesta potència radiant correspon al estímul:

Q_I : *Estímul monocromàtic amb longitud d'ona I*

Per a cada estímul Q_I s'ha de complir que:

$$Q_I = R_I \mathbf{R} + G_I \mathbf{G} + B_I \mathbf{B} \quad \text{on} \quad (R_I, G_I, B_I): \text{Valors espectrals tri-estímul}$$

Suposem un cas especial de distribució espectral (equi-energètica)

$$\mathbf{E} \rightarrow \{E_I dI\} \quad \text{on} \quad E_I = \text{ctant} = 1$$


La seva representació tri-estímul per a cada component mono-cromàtica es pot escriure com:

$$\mathbf{E}_I = r(I) \mathbf{R} + \bar{g}(I) \mathbf{G} + \bar{b}(I) \mathbf{B}$$

la representació tri-estímul de \mathbf{E}_I és: $(\bar{r}(I), \bar{g}(I), \bar{b}(I))$

que no són res més que les funcions de correspondència de color per a un experiment com el vist.

Si recuperem l'expressió de les components mono-cromàtiques d'un color qualsevol Q, tenim:

$$\mathbf{Q}_l \rightarrow (P_l d\mathbf{l})$$

i considerem l'expressió deduïda per l'estímul constant:

$$\mathbf{E}_l = \bar{r}(\mathbf{l})\mathbf{R} + \bar{g}(\mathbf{l})\mathbf{G} + \bar{b}(\mathbf{l})\mathbf{B}$$

i la multipliquem a ambdós costats, tindrem:

$$\mathbf{Q}_l \rightarrow (P_l d\mathbf{l})\mathbf{E}_l = (P_l d\mathbf{l})\bar{r}(\mathbf{l})\mathbf{R} + (P_l d\mathbf{l})\bar{g}(\mathbf{l})\mathbf{G} + (P_l d\mathbf{l})\bar{b}(\mathbf{l})\mathbf{B}$$

Hem dit que la representació tri-estímul de Q ve donada per:

$$\mathbf{Q} \rightarrow (R_Q, G_Q, B_Q) = \left(\sum_{i=1}^n R_{Q_i}, \sum_{i=1}^n G_{Q_i}, \sum_{i=1}^n B_{Q_i} \right)$$

Considerant el principi de superposició portat al límit de $(\Delta\mathbf{l})_i \rightarrow 0$

$$\mathbf{Q} \rightarrow (R_Q, G_Q, B_Q) = \left(\int_{I_a}^{I_b} (P_l d\mathbf{l})\bar{r}(\mathbf{l}), \int_{I_a}^{I_b} (P_l d\mathbf{l})\bar{g}(\mathbf{l}), \int_{I_a}^{I_b} (P_l d\mathbf{l})\bar{b}(\mathbf{l}) \right)$$

Per tant, donat l'espectre, $\{P_l d\mathbf{l}\}_Q$, del color Q

les seves coordenades tri-estímul són:

$$R_Q = \int_{I_a}^{I_b} (P_l d\mathbf{l})\bar{r}(\mathbf{l})$$

$$G_Q = \int_{I_a}^{I_b} (P_l d\mathbf{l})\bar{g}(\mathbf{l})$$

$$B_Q = \int_{I_a}^{I_b} (P_l d\mathbf{l})\bar{b}(\mathbf{l})$$

on $\bar{r}(\mathbf{l}), \bar{g}(\mathbf{l}), \bar{b}(\mathbf{l})$ són les **color matching functions**

Casos especiales: METAMERS

Donats dos estímuls $Q1 \rightarrow \{P_{1l} dI\}$, $Q2 \rightarrow \{P_{2l} dI\}$

direm que compleixen la correspondència de color si es compleixen les següents igualtats:

$$\int_{I_a}^{I_b} P_{1l} \bar{r}(I) dI = \int_{I_a}^{I_b} P_{2l} \bar{r}(I) dI$$

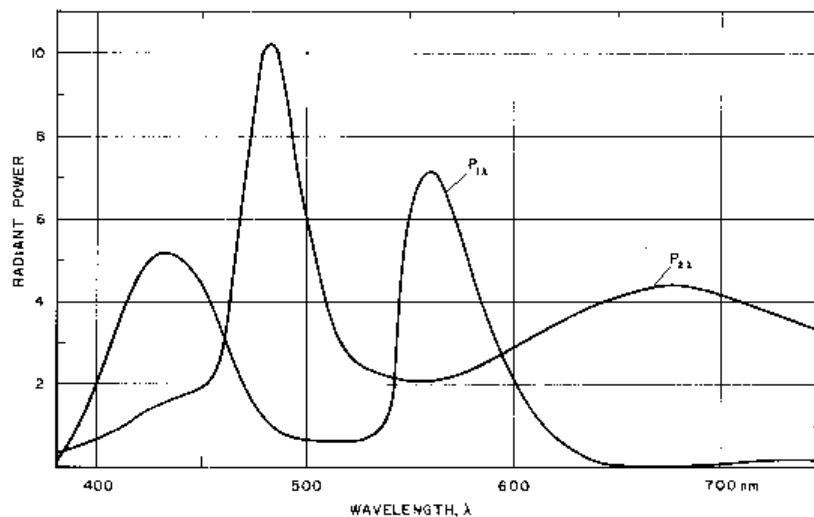
$$\int_{I_a}^{I_b} P_{1l} \bar{g}(I) dI = \int_{I_a}^{I_b} P_{2l} \bar{g}(I) dI \quad \text{això és} \quad \begin{aligned} R_{Q1} &= R_{Q2} \\ G_{Q1} &= G_{Q2} \\ B_{Q1} &= B_{Q2} \end{aligned}$$

$$\int_{I_a}^{I_b} P_{1l} \bar{b}(I) dI = \int_{I_a}^{I_b} P_{2l} \bar{b}(I) dI$$

I direm que Q1 i Q2 són **metamers** si compleixien que:

$$\{P_{1l} dI\} \neq \{P_{2l} dI\}$$

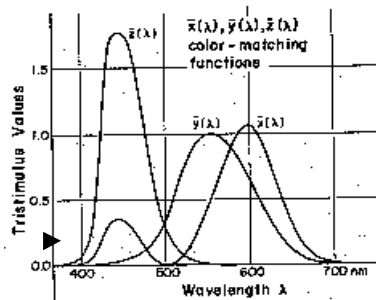
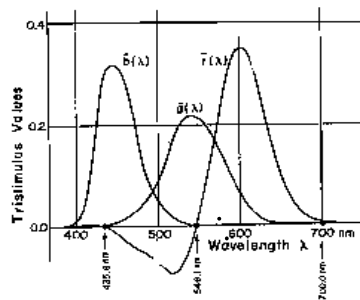
Exemple:



Espai imaginari: XYZ (Observador colorimètric estàndard)
(CIE 1931)

Objectiu: Solucionar alguns problemes de l'espai RGB

- Evitar valors negatius a les funcions de correspondència té conseqüències interessants en la construcció d'instruments de mesura del color (ho simplifica tot).
- Trobar una eix relacionat directament amb la intensitat.



Observador colorimètric estàndard
(CIE 1931)

$$\bar{r}(I), \bar{g}(I), \bar{b}(I) \longrightarrow \bar{x}(I), \bar{y}(I), \bar{z}(I)$$

$$I \in [380, 780] \quad \Delta I = 5nm.$$

$$R = 700nm, G = 546.1nm, B = 435.8nm$$

10 observadors - camp visual = 2°

Donat un color qualsevol Q amb components monocromàtiques, $Q_I \rightarrow \{P_I dI\}$ les coordenades tri-estímul són:

$$R_Q = \int_{I_a}^{I_b} P_I \bar{r}(I) dI$$

$$X = \int_{I_a}^{I_b} P_I \bar{x}(I) dI$$

$$G_Q = \int_{I_a}^{I_b} P_I \bar{g}(I) dI$$

$$Y = \int_{I_a}^{I_b} P_I \bar{y}(I) dI$$

$$B_Q = \int_{I_a}^{I_b} P_I \bar{b}(I) dI$$

$$Z = \int_{I_a}^{I_b} P_I \bar{z}(I) dI$$

$$\bar{r}(I), \bar{g}(I), \bar{b}(I) \longrightarrow \bar{x}(I), \bar{y}(I), \bar{z}(I)$$

Transformació:



$$\begin{pmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00000 & 0.01000 & 0.99000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Observador estàndard suplementari

CIE 1964

$$\bar{r}_{10}(I), \bar{g}_{10}(I), \bar{b}_{10}(I) \longrightarrow \bar{x}_{10}(I), \bar{y}_{10}(I), \bar{z}_{10}(I)$$

$$I \in [360.4, 816.3] \quad \Delta I \approx 3.5nm.$$

$$R = 645.2nm, G = 526.3nm, B = 444.4nm$$

18 observadors - camp visual 10°

Transformació:

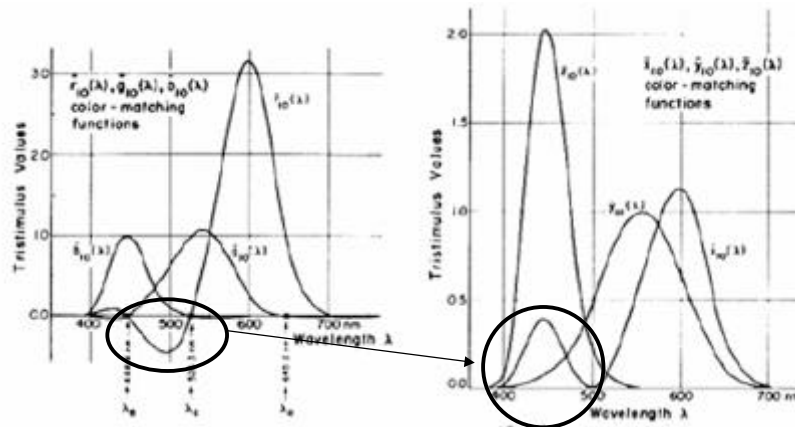


$$\begin{pmatrix} 0.341080 & 0.189145 & 0.387529 \\ 0.139058 & 0.837460 & 0.073316 \\ 0.00000 & 0.039553 & 2.026200 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

Observador estàndard suplementari

CIE 1964

$$\bar{r}_{10}(I), \bar{g}_{10}(I), \bar{b}_{10}(I) \longrightarrow \bar{x}_{10}(I), \bar{y}_{10}(I), \bar{z}_{10}(I)$$



Problemes de l'espai XYZ:

- Es basa en estímuls imaginaris. Empíricament, és impossible trobar tres fonts de llum que es corresponguin amb totes les altres llums existents, a partir d'una suma positiva de llums monocromàtiques.
- No existeix cap interpretació perceptual o intuïtiva de les coordenades d'aquest espai, excepte la relació aproximada entre la coordenada Y i la intensitat del color.

Altres representacions:

- Coordenades cromàtiques: x,y-CIE 1931, r,g-CIE 1931
- Espais uniformes: CIE 1976 L*u*v*, CIE 1976 L*a*b*
- Espais perceptuals: HSV, HSL, HSI.

Conclusions: La CIE ha construït un espai de color estàndar per a la mesura del color, que és la base de tots els instruments de mesura del color. A més a més, ens diu que

- La representació de l'ull és tricromàtica
- El rang dels estímuls que poden ser vistos.

Qüestio: La representació que fa l'ull humà del color, és com la de les *colour matching functions* ?

La resposta sembla ser NO!!

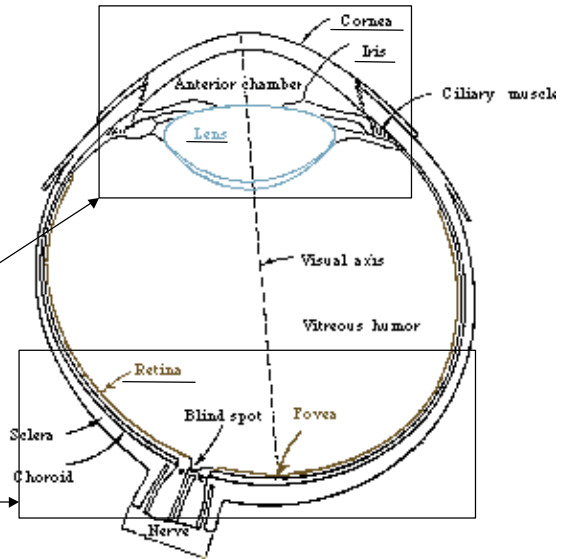
3. La percepció del color en el sistema visual humà.

L'ull humà

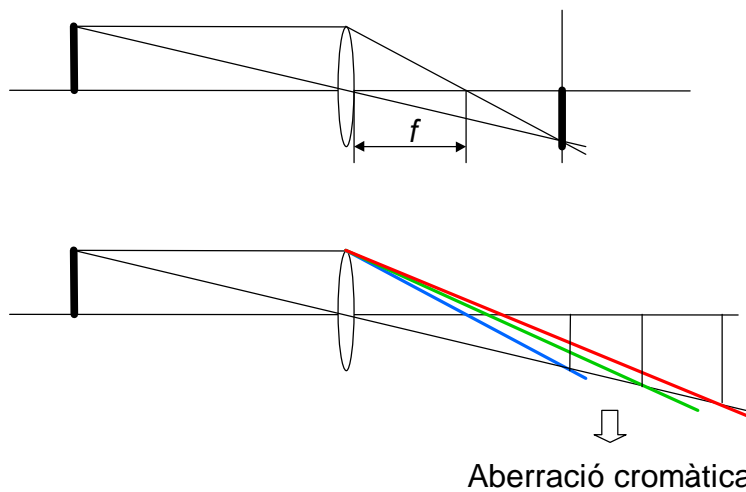
La seva funció és la de capturar una imatge visual i convertir l'energia de la llum en impulsos nerviosos que seran interpretats pel cervell

Projecció de la imatge sobre la retina i adaptació a la intensitat de la llum

Conversió d'estímuls lluminosos en impulsos nerviosos



L'òptica de l'ull es concentra en la còrnea, l'humor aquós i la lent (segons el model de camera puntual de l'òptica geomètrica)



L'iris de l'ull s'encarrega d'establir el rang d'intensitat de llum capaç de percebre

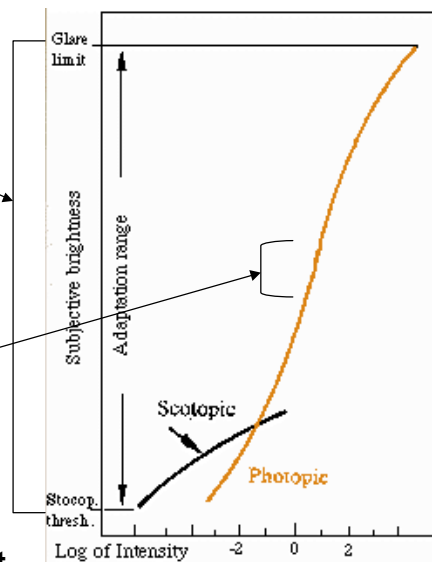
El rang màxim està entre:

- L'Umbral escotòpic
- Límit d'enlluernament

No es pot operar sobre tot aquest rang simultàniament, el rang sobre el que actua és molt més petit.

La variació del rang de la sensibilitat a canvis d'intensitat s'anomena

Adaptació a la intensitat



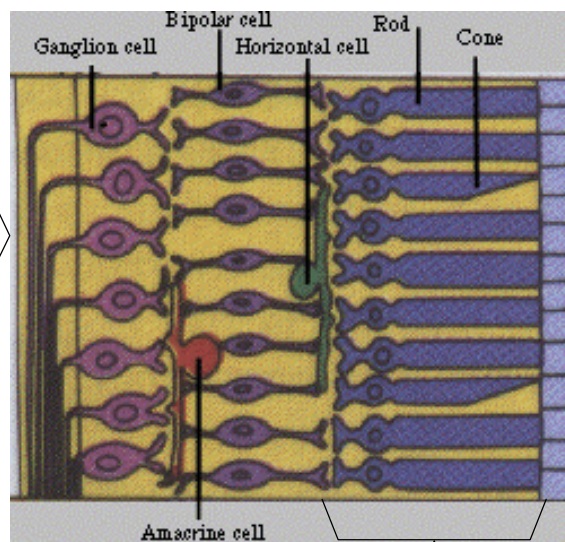
La retina s'encarrega de transformar l'energia lluminosa en impulsos elèctrics

És una capa de cèl·lules nervioses d'un teixit similar al del cervell

LLUM →

Les cèl·lules receptores estan a la part més fonda de la retina. N'hi ha de dos tipus:

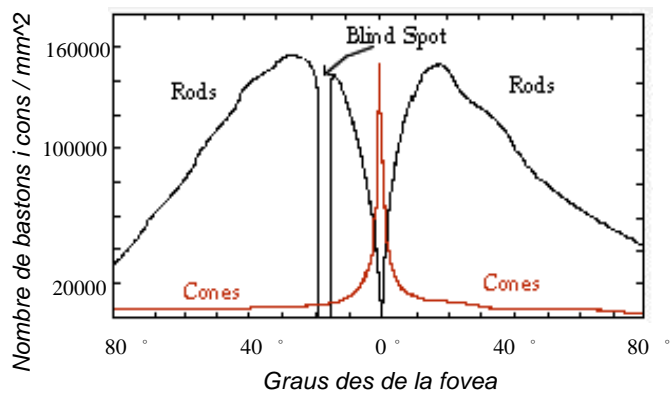
- Bastons
- Cons



Dos tipus de cèl·lules receptores

Bastons: Sensibles a nivells baixos d'intensitat de llum, no són sensibles al color i es situen a la perifèria de la fòvea.

Cons: Sensibles a nivells més alts d'intensitat de llum, són sensibles al color i es situen principalment a la fòvea.



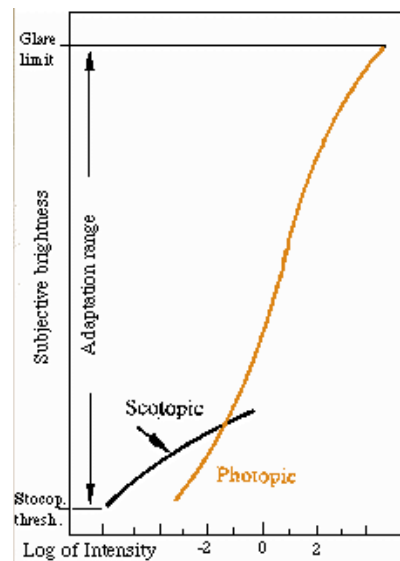
A cada ull:

- 120 milions de bastons
- 6 milions de cons

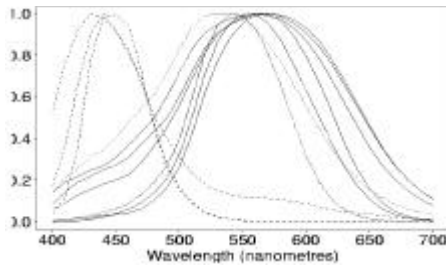
Dos tipus de visions en el sistema visual humà:

Visió escotòpica: visió deguda a la sensibilitat dels bastons.

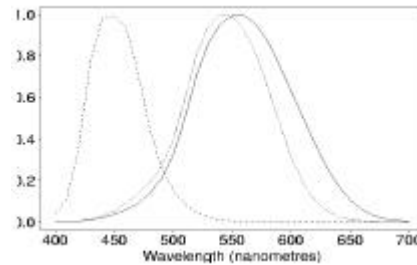
Visió fotòpica: visió deguda a la sensibilitat dels cons.



Sensibilitat dels cons: es distingeixen tres tipus de cons que donen respostes a diferents zones de l'espectre.



Sensibilitats dels cons mesurades en diferents experiments

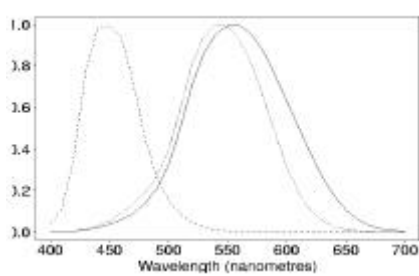


Sensibilitats mitjana dels cons

S'anomenen en funció de la part de l'espectre a la que donen resposta: *Long-, Medium-, and Short-wave sensitive cones*

$$L(I), M(I), S(I)$$

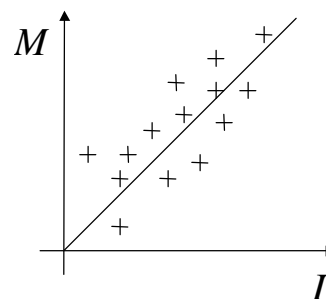
Observacions sobre la sensibilitat dels cons



Les sensibilitats dels cons:

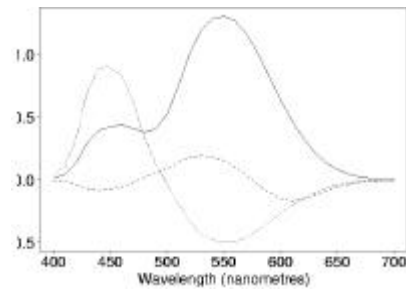
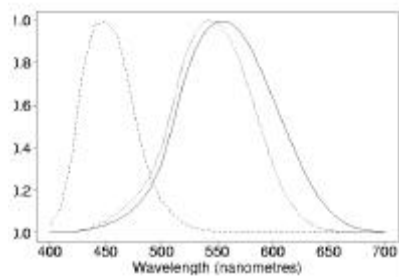
$$L, M$$

están molt correlacionades



Redundància

Objectiu: Buscar una transformació d'aquestes sensibilitats que eviti aquesta correlació.

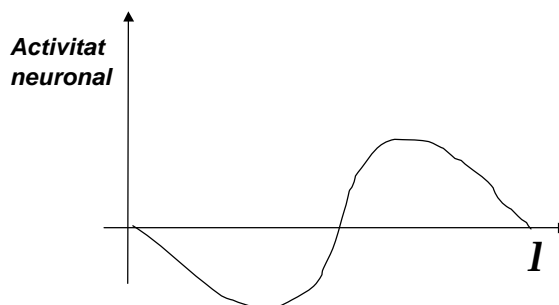


Colour-opponent channels

Transformació lineal que optimitza la representació de la informació

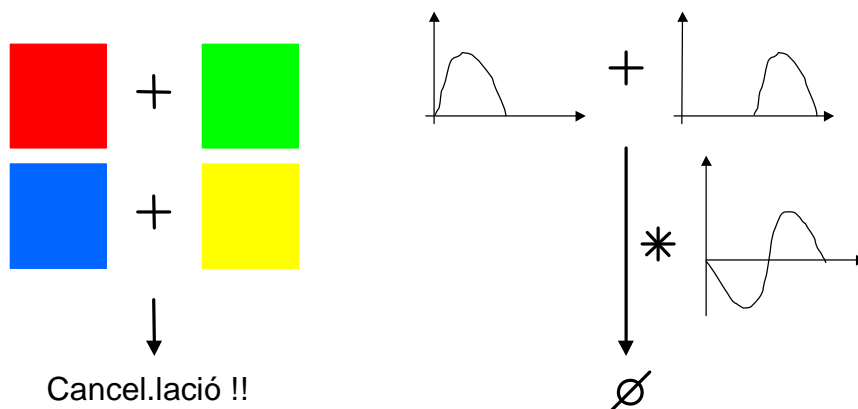
Existeixen evidències neurofisiològiques i psicofísiques

- **Neurofisiològiques.** S'han trobat cèl.lules en el lateral geniculate nucleus dels monos que tenen sensibilitats espectralment oponents.

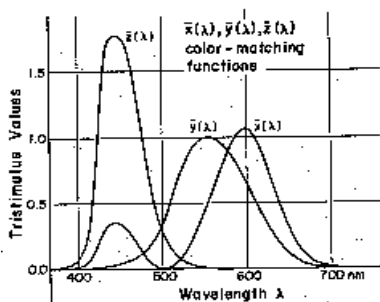


Existeixen evidències neurofisiològiques i psicofísiques

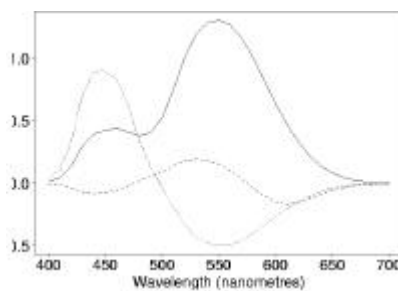
- **Psicofísiques.** Hi ha experiments que demostren que la nostra percepció es comporta segons un model oponent per a determinats colors.



Conclusió: El model de colors-oponents si que podria ser una aproximació del model de representació del color del sistema visual humà.



CIE colour-matching functions



Colour-opponent channels

(Existeixen diferents aproximacions del model de colors oponents)