

Generazione di un'immagine (Image Formation)

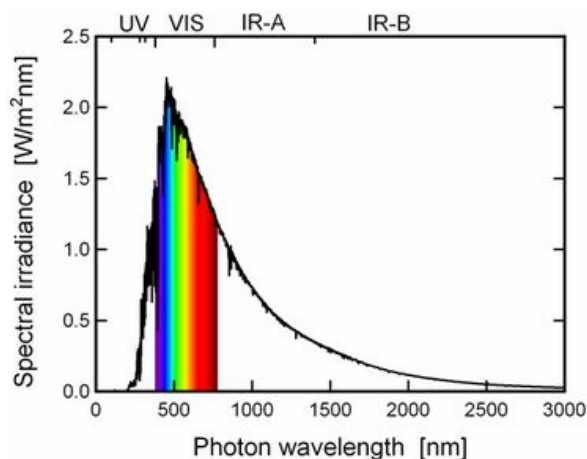
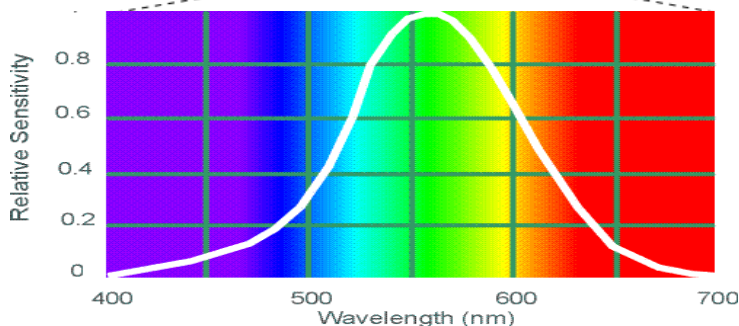
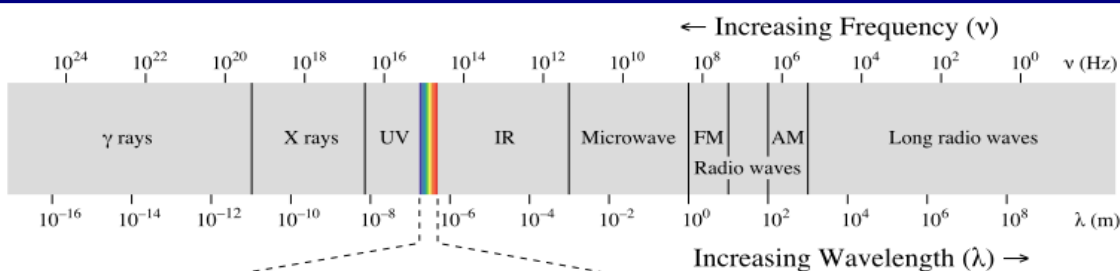
Il colore nelle immagini

- ❖ Fisica e percezione umana del colore
- ❖ Colorimetria
- ❖ Rappresentazione del colore
- ❖ Applicazioni: stima attraverso il colore

(Forsyth/Ponce: Capitolo 3)

Credits:
materiale rielaborato a partire da slide di Luigi Cinque (Univ. La Sapienza, Roma) e altre sorgenti (citate)

Electromagnetic spectrum

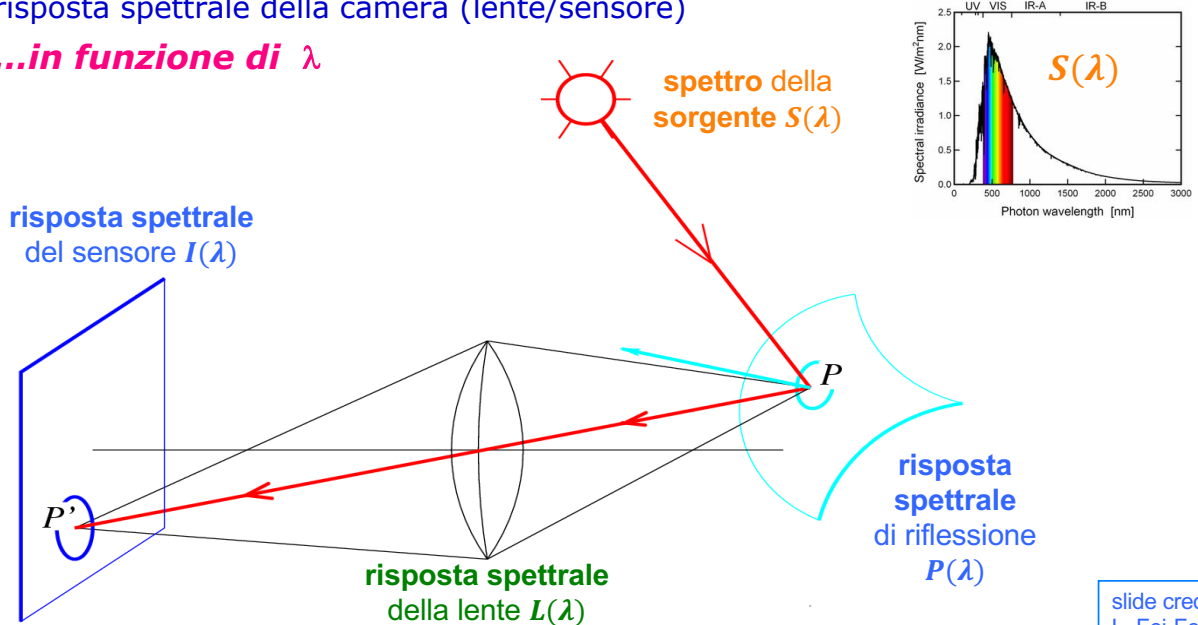


Perché siamo sensibili a questo spettro?

- ❖ Perché corrisponde allo spettro di massima emissione del Sole

❖ Che cosa determina il colore di un pixel?

- **spettro** della sorgente: $S(\lambda)$
- risposta spettrale di riflessione della superficie
- risposta spettrale della camera (lente/sensore)
- ...in funzione di λ



slide credit: L. Fei-Fei

Spettro di radianza delle sorgenti

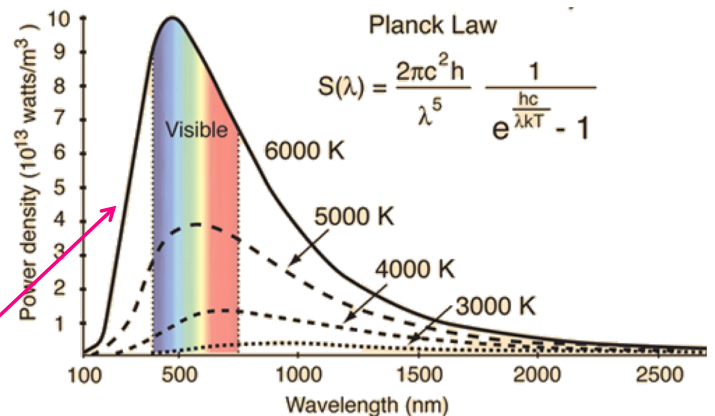
Esempi di sorgente:

Sole/cielo (daylight/skylight)

- ❖ Emissione di **corpo nero**: spettro di emissione $E(\lambda)$ funzione della temperatura T [K]:

Legge di Planck

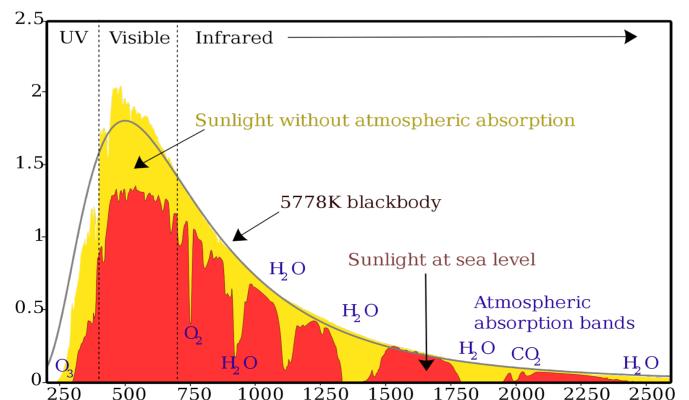
$$E(\lambda, T) \propto \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1} \approx \frac{e^{-\frac{hc}{k\lambda T}}}{\lambda^5}$$



Illuminanti standard CIE:

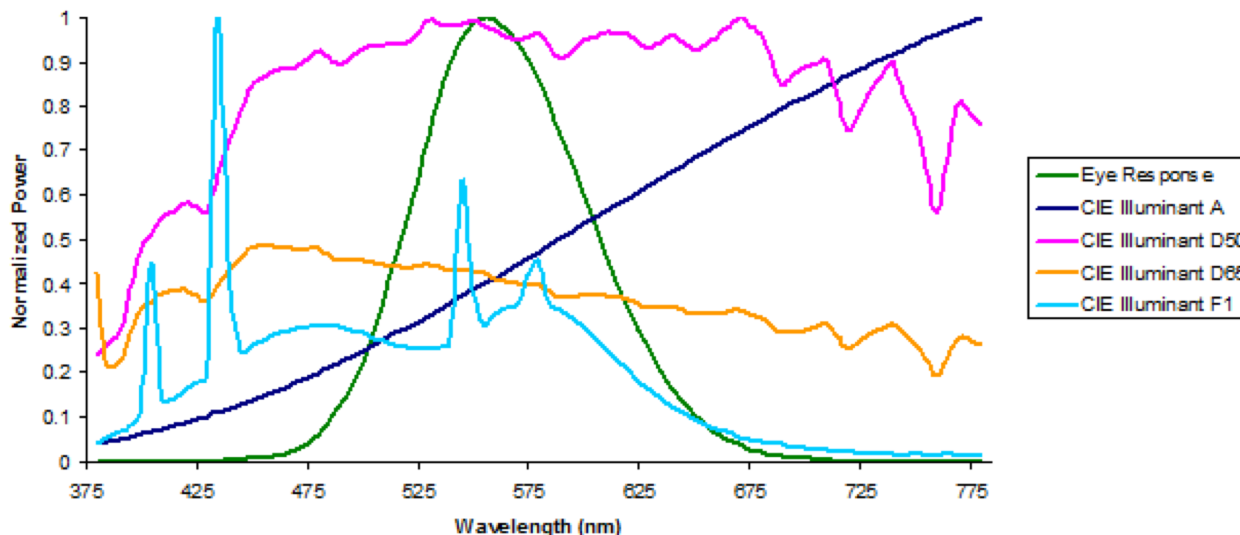
(Commission Internationale de l'Éclairage)

- A:** luce a incandescenza
- D65:** daylight a mezzogiorno (6500 K)
- E:** spettro uniforme (bianco)
- F:** luci a fluorescenza (picchi spettrali)

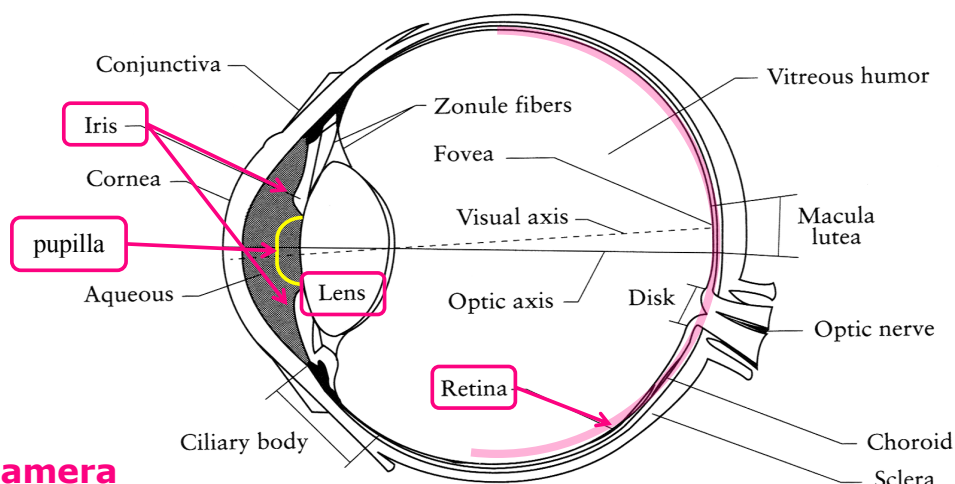


Illuminanti standard CIE (*Commission Internationale de l'Éclairage*):

- A:** luce a incandescenza
- D65:** daylight a mezzogiorno (6500 K)
- D50:** daylight "all'orizzonte" (~5000 K)
- E:** spettro uniforme (bianco)
- F:** luci a fluorescenza (presenza di picchi spettrali)



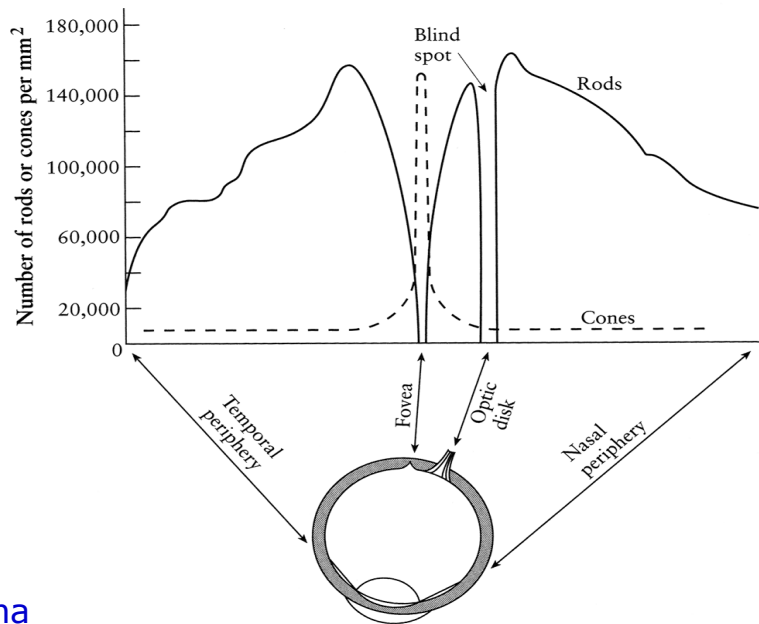
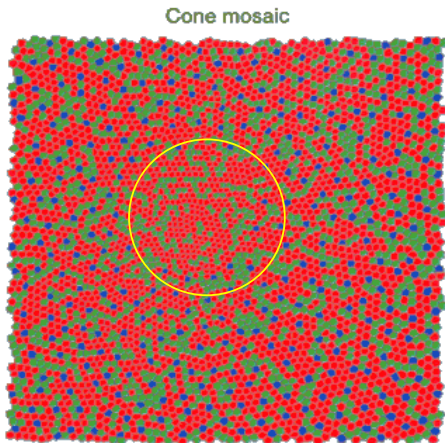
Percezione del colore – l'occhio umano



L'occhio: la nostra camera

- ❖ **Iride (Iris)** – disco (colorato) con muscoli radiali
- ❖ **Pupilla** – l'apertura (diaframma), controllata dall'iride
- ❖ **Cristallino (Lens)** – la lente: cambia forma grazie a muscoli ciliari, per mettere a fuoco il soggetto (mentre in una camera cambia q , non la lente!)
- ❖ **Retina** – è il "sensore" sul 'piano' immagine
- ❖ Fotorecettori: cellule fotosensibili sulla retina: **bastoncelli (rods)** e **coni (cones)**

Densità di coni e bastoncelli (cones/rods)



Coni e bastoncelli **non** hanno distribuzione **uniforme** sulla retina

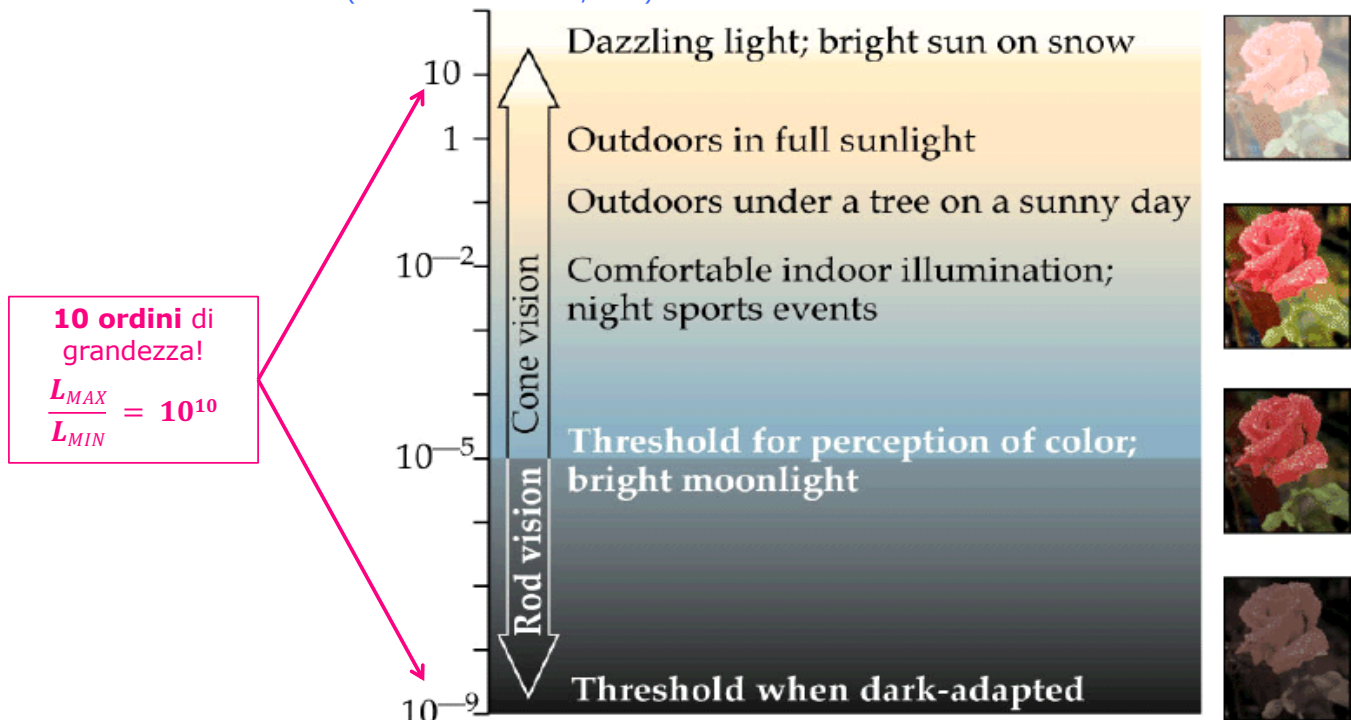
- ❖ Fovea: massima densità di coni e assenza di bastoncelli
- ❖ Acuità visiva (risoluzione) minore in periferia: più bastoncelli collegati a uno stesso neurone
- ❖ Coni L, M e S **non ugualmente frequenti** nella retina: rapporto **L/M/S = 10:5:1**
- ❖ Coni **S** praticamente assenti al centro della fovea

Slide by Steve Seitz

Sensibilità di coni/bastoncelli (cones/rods)



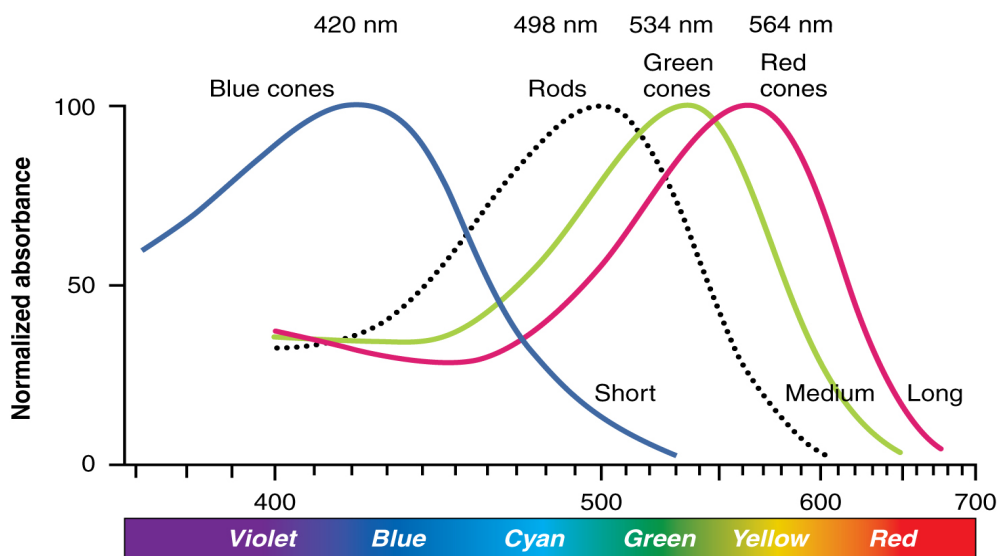
Luminanza [Lambert]
(1 Lambert = 4.66 W/m²sr)



10 ordini di grandezza!
 $\frac{L_{MAX}}{L_{MIN}} = 10^{10}$



- ❖ **bastoncelli (rods)**: maggiore sensibilità all'energia, non al colore
 - visione a bassa luminosità
 - sono meno densi → **minore risoluzione spaziale** (non si legge con poca luce!)
- ❖ **3 tipologie di coni: L, M, S** (Long, Medium, Short) (impropriamente: R, G, B)
 - significativa sovrapposizione spettrale, soprattutto M/L



Percezione del colore – tristimolo



Coni (e bastoncelli) agiscono da **filtri spettrali**

- ❖ Per ottenere l'uscita di un filtro, lo spettro dato va pesato con la risposta spettrale e integrato:
- ❖ Ogni **cono** produce un **valore** (scalare)

$$L|M|S = \int E(\lambda) R_{L|M|S}(\lambda) d\lambda$$

Colore percepito → tristimolo: $\langle L, M, S \rangle$

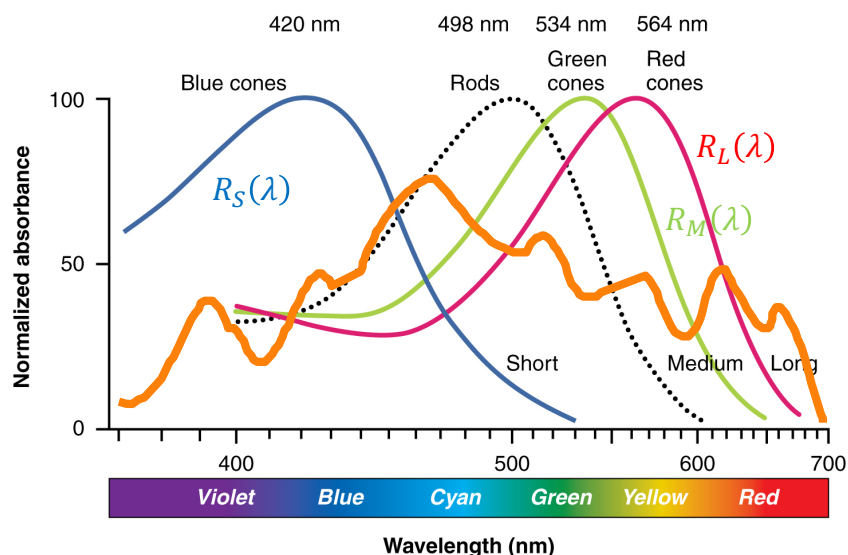
Problema:

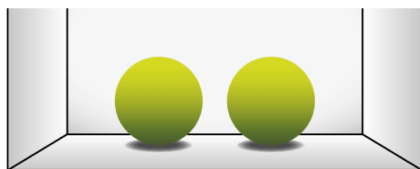
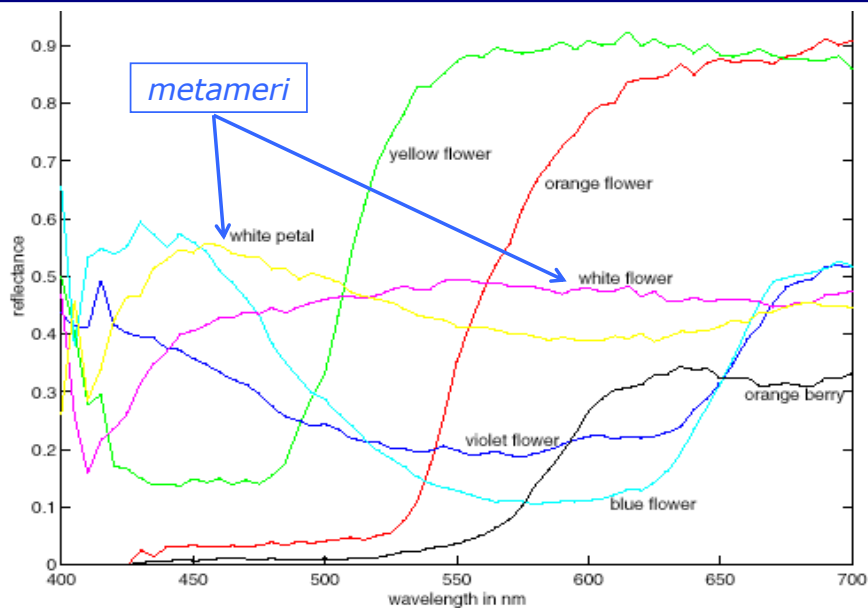
- ❖ *come possiamo rappresentare ogni possibile spettro con soli 3 numeri?*

Impossibile!

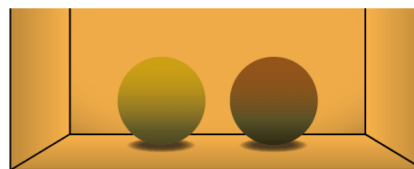
- ❖ La maggior parte dell'informazione viene perduta
- ❖ Posso avere **spettri differenti** che generano lo stesso **tristimolo**

→ **metamerismo**





Standardized illuminant D65 (CIE)



Light bulb A (CIE)

Generazione di un'immagine (Image Formation)

Il colore nelle immagini

- ❖ Fisica e percezione umana del colore
- ❖ **Colorimetria**
- ❖ Rappresentazione del colore
- ❖ Applicazioni: stima attraverso il colore

(Forsyth/Ponce: Capitolo 3)

Credits:

materiale rielaborato a partire da slide di Luigi Cinque (Univ. La Sapienza, Roma) e altre sorgenti (citare)

Conseguenza del funzionamento del sistema visivo umano è la:

Tricromia:

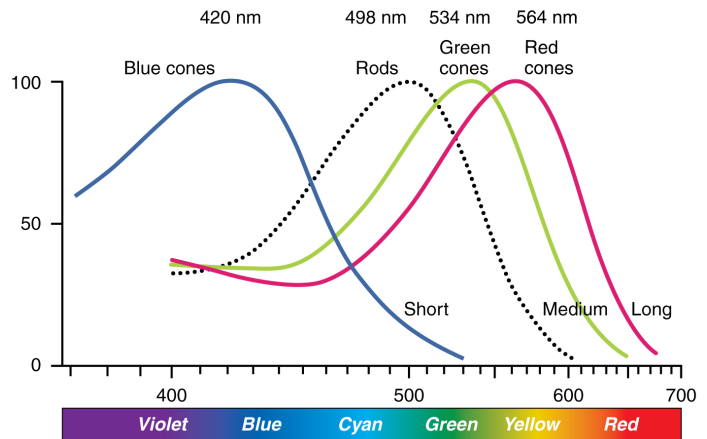
Trichromatic color theory: 18th century (Thomas Young)

- ❖ **3 colori primari** sufficienti **per rappresentare i colori** percepibili
- ❖ **3 valori di potenza** identificano **univocamente un colore**
- ❖ ogni numero rappresenta la potenza di un **colore primario**
- ❖ In esperimenti di *color matching* l'osservatore trova il **match** di ogni colore come combinazione di tre primari

Color match: percezione (umana) di colore identico

- ❖ Per uno stesso esperimento, tutti gli osservatori scelgono **gli stessi pesi** della combinazione lineare

→ **il colore è "oggettivo"**



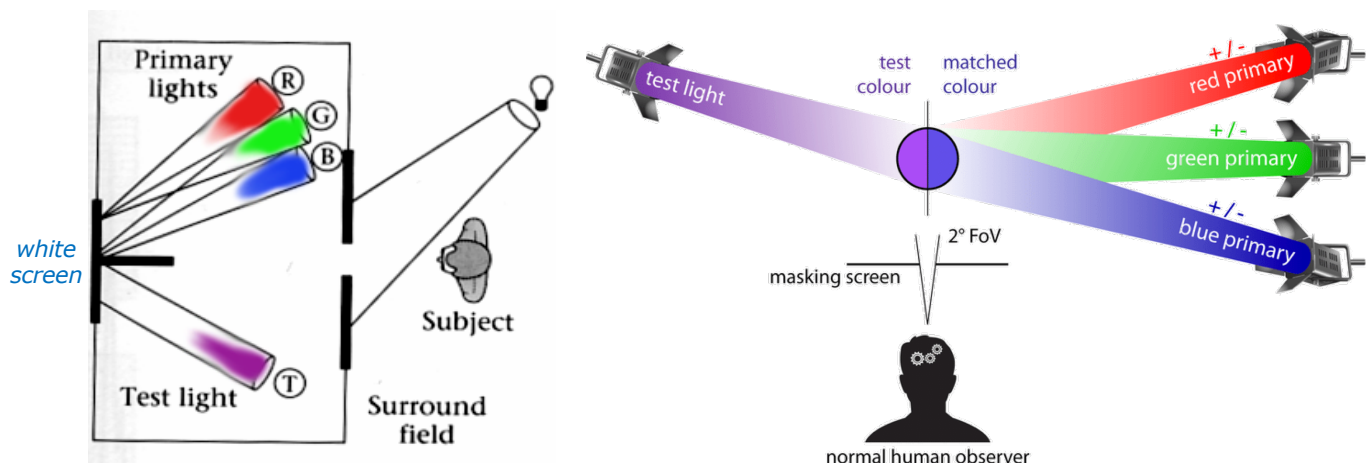
Standardizzazione della percezione cromatica

Standardizzazione della percezione cromatica

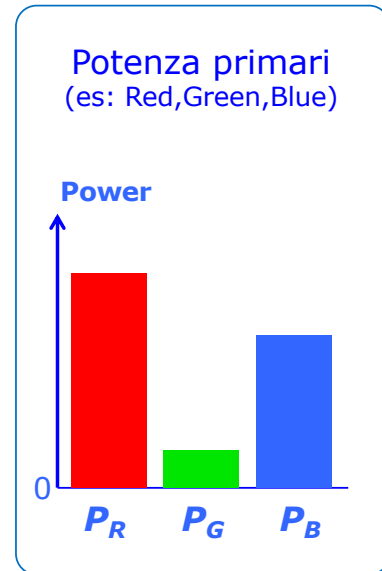
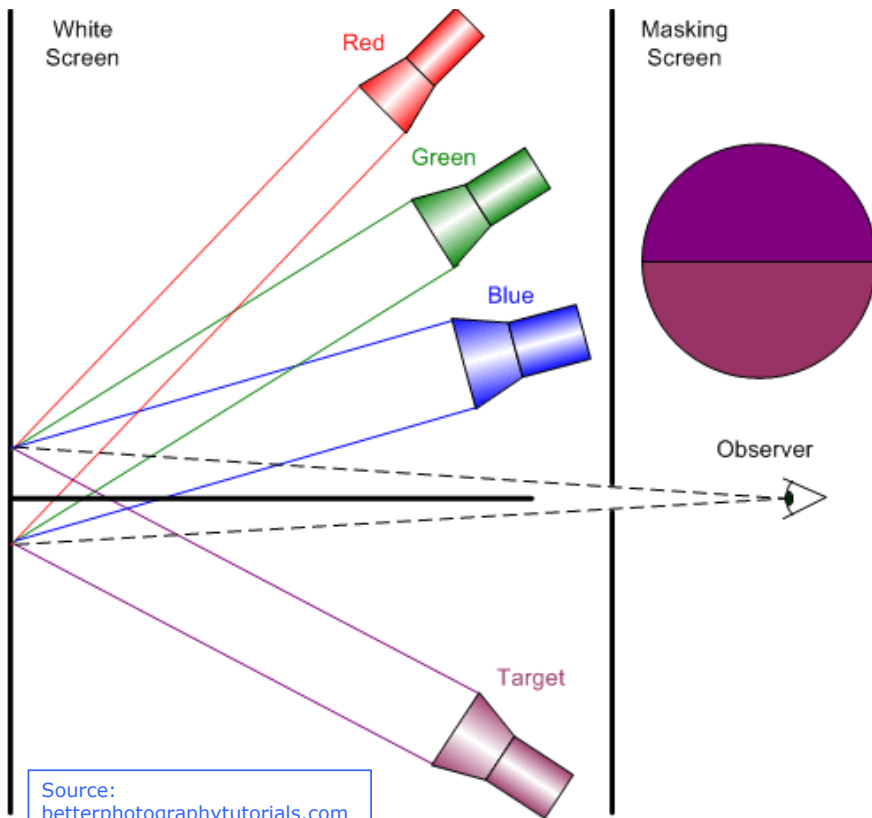
Obiettivo:

capire quali spettri (anche diversi) producono la stessa sensazione cromatica nelle persone, nelle stesse condizioni di osservazione

*The **color matching** experiment setup:*

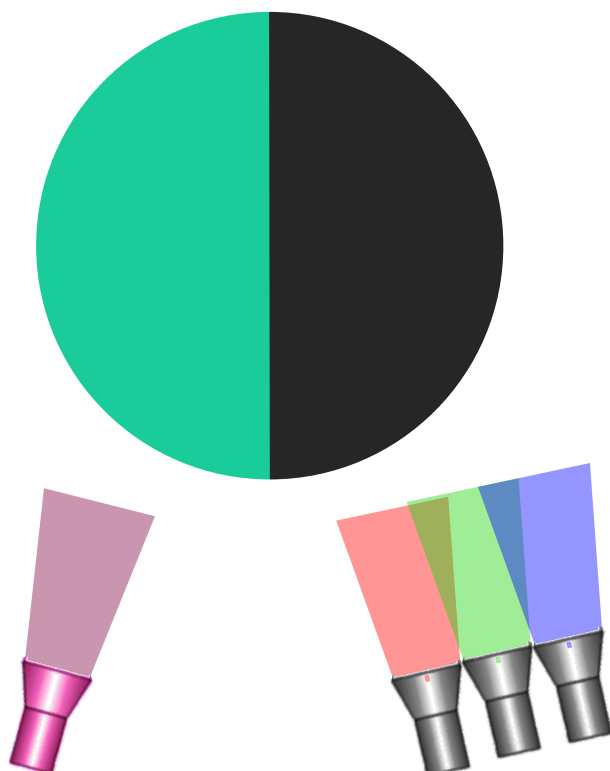


Color matching experiment



Source:
betterphotographytutorials.com

Color matching experiment 1

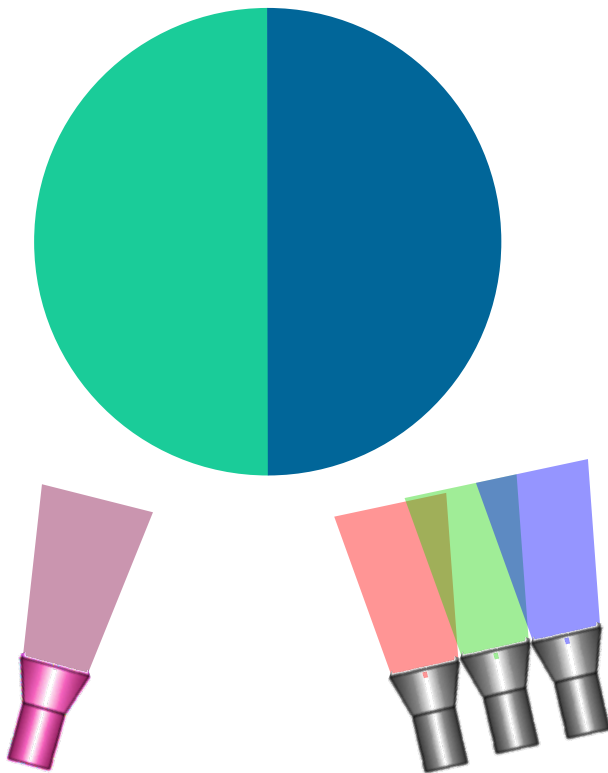


Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)

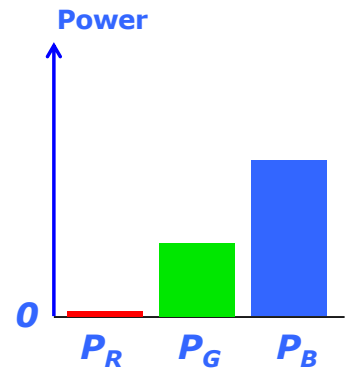


slide credits:
W. Freeman

Color matching experiment 1

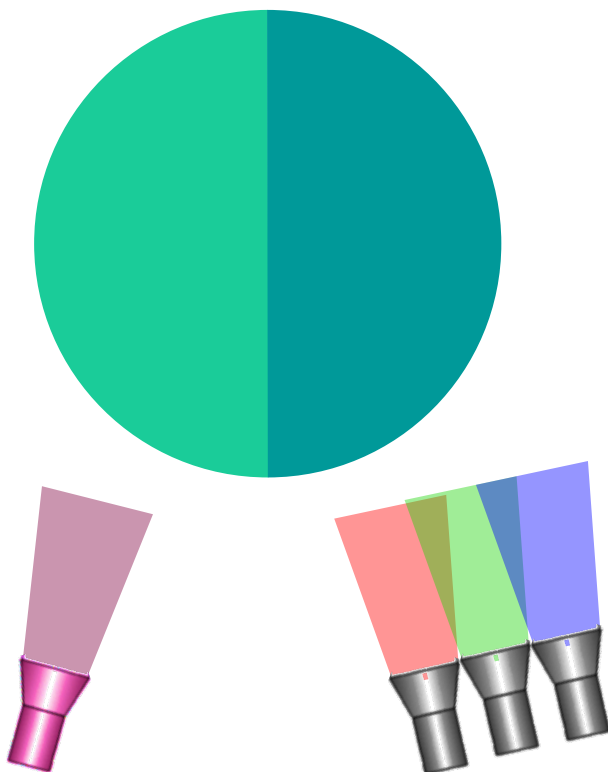


Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)

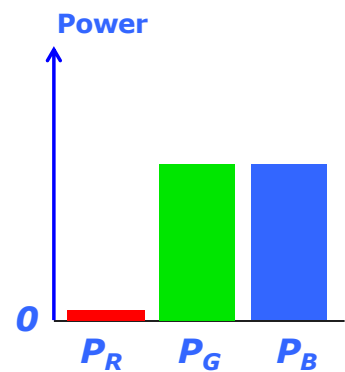


slide credits:
W. Freeman

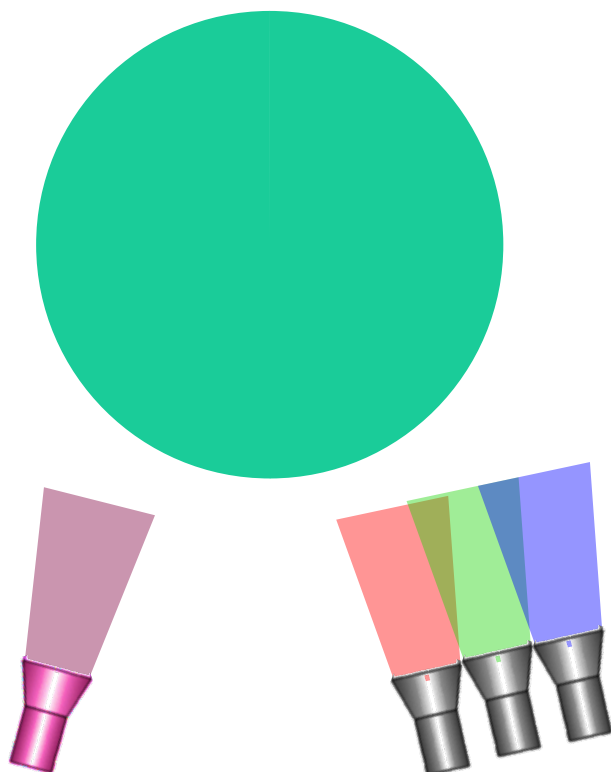
Color matching experiment 1



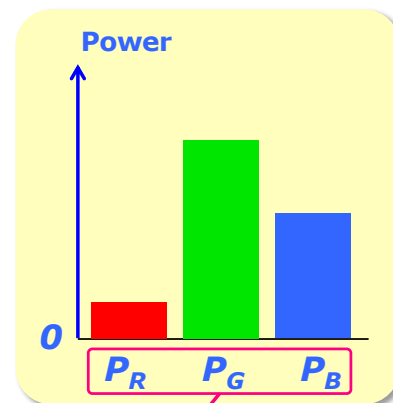
Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)



slide credits:
W. Freeman



Match! Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)



$$\text{Colore} = \langle P_R, P_G, P_B \rangle$$

slide credits:
W. Freeman

Leggi di Grassman (1853)

Gli esperimenti di color matching portano alle

Leggi di Grassman (1853) – leggi empiriche sulla mistura dei colori:

1. *Due luci appaiono di colore differente se differiscono in:*
lunghezza d'onda dominante, in luminanza o in purezza (o saturazione).
 - **Corollario:** per ogni luce colorata esiste una luce di **colore complementare**, tale che la mistura delle due luci 'desatura' quella più intensa o produce luce non colorata (bianco/grigio).
2. *L'apparenza di una luce ottenuta mescolando due componenti cambia se cambia una delle componenti.*
 - **Corollario:** la mistura di due luci colorate non complementari produce un colore la cui **tinta** varia con le intensità relative di ogni luce e la **saturazione** varia in funzione della distanza tra le tinte di ogni luce.
3. *Esistono luci con **differente distribuzione spettrale** di potenza che però appaiono identiche.*
 - **Corollario 1:** luci che appaiono identiche producono lo stesso effetto, se **aggiunte** ad altre misture di luce.
 - **Corollario 2:** luci che appaiono identiche producono lo stesso effetto, se **sottratte** (filtrate) da altre misture di luce.
4. *L'intensità di una mistura di luci è la **somma delle intensità delle singole componenti**.*



Grassman (1853):

lo spazio di equivalenza tra colori (**color matching**) è **lineare**!

- ❖ Se, per due sorgenti di luce, nel processo di matching ottengo gli stessi pesi, allora le due sorgenti sono equivalenti (matching color):

Date le sorgenti **A** e **B** e **tre primari** P_1 P_2 P_3 :

➤ se: $A = u_1 P_1 + u_2 P_2 + u_3 P_3$

➤ e: $B = v_1 P_1 + v_2 P_2 + v_3 P_3$

➤ Allora: $\rightarrow A = B$

- ❖ In una miscela di due sorgenti, la somma dei pesi darà una luce equivalente:

➤ se: $A = u_1 P_1 + u_2 P_2 + u_3 P_3$

➤ e: $B = v_1 P_1 + v_2 P_2 + v_3 P_3$

➤ Allora: $A+B = (u_1+v_1) P_1 + (u_2+v_2) P_2 + (u_3+v_3) P_3$

- ❖ Scalando la potenza della sorgente di test, i pesi che danno il match verranno scalati dello stesso fattore:

➤ Se: $A = u_1 P_1 + u_2 P_2 + u_3 P_3$

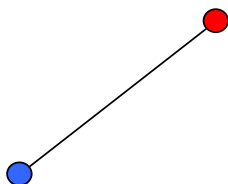
➤ Allora: $k A = (k u_1) P_1 + (k u_2) P_2 + (k u_3) P_3$

Linear color spaces

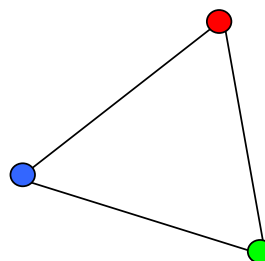


La legge di Grassman definisce uno **spazio-colore lineare**

- ❖ Definito dalla scelta di **tre luci (colori)** detti **primari**
- ❖ **Coordinate:** i pesi dati alle tre luci primarie per ottenere il **color match**
- ❖ **Color Matching Function:** per una luce primaria P_i , è la funzione di λ che definisce il peso da dare a P_i per ottenere il match con una sorgente a lunghezza d'onda λ



Mescolando **due** luci, possiamo ottenere tutti i colori rappresentati, nello spazio colore, sul segmento congiungente i due punti che rappresentano i primari



Mescolando **tre** luci, possiamo ottenere tutti i colori rappresentati, nello spazio colore, nel triangolo i cui vertici rappresentano i primari



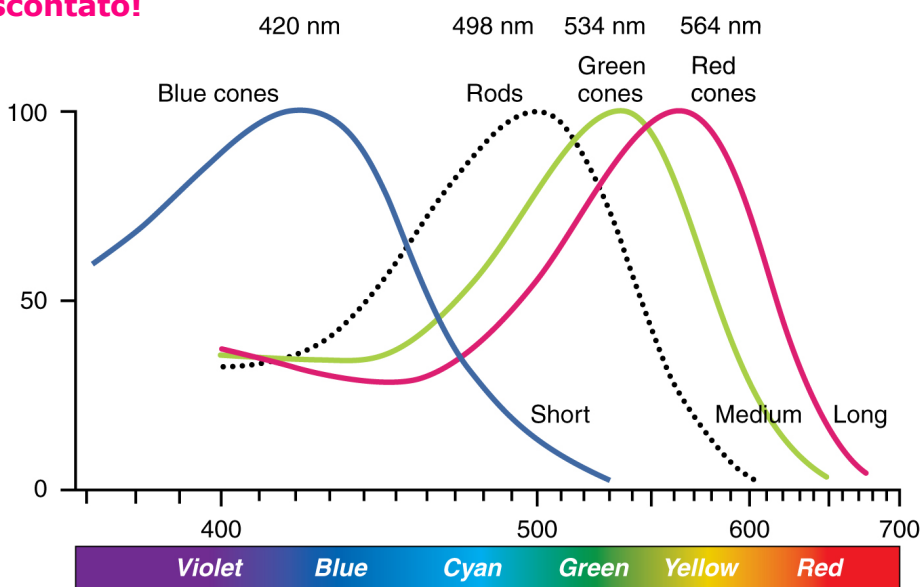
Spazio colore lineare

- ❖ Definito dalla scelta di **tre luci (colori) detti primari**
- ❖ **Coordinate:** i pesi dati alle tre luci primarie per ottenere il color match

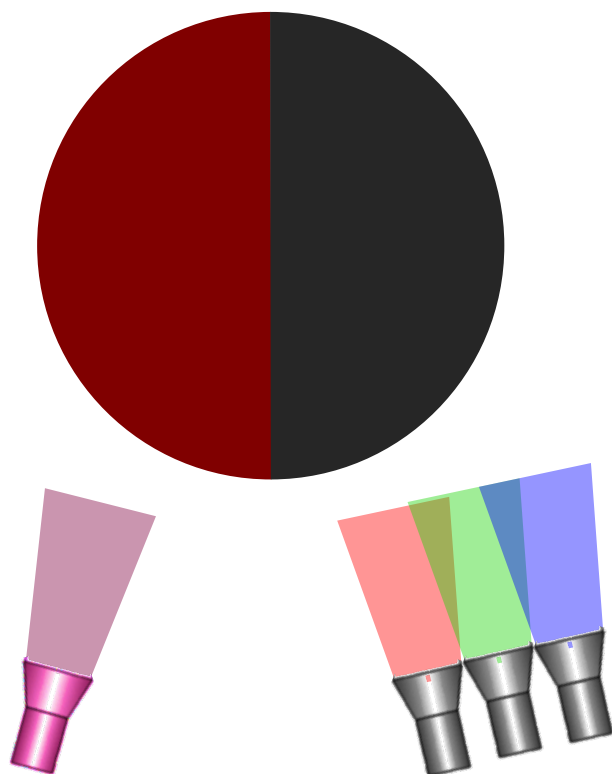
→ **ma è un risultato non scontato!**

i tre canali sensoriali **L,M,S**
non sono ortogonali!

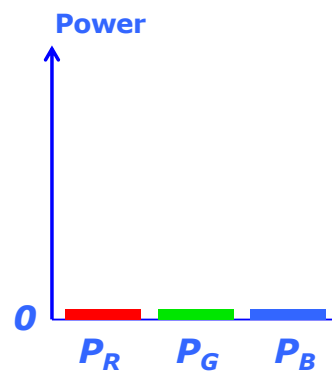
→ *provate a determinare il colore (spettro) che genera il tristimolo: $\langle 0,1,0 \rangle$...*



Another color matching experiment...

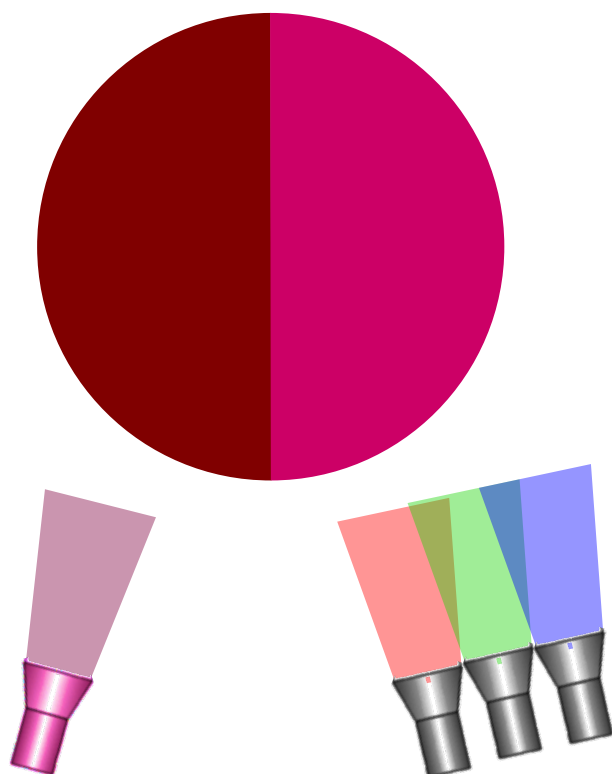


Potenza primari
 (es: Red,Green,Blue)

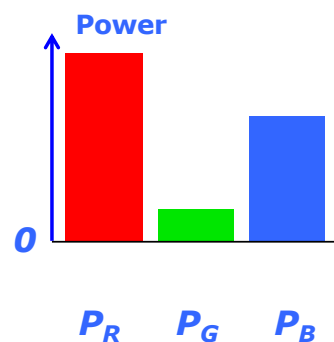


slide credits:
 W. Freeman

Another color matching experiment...

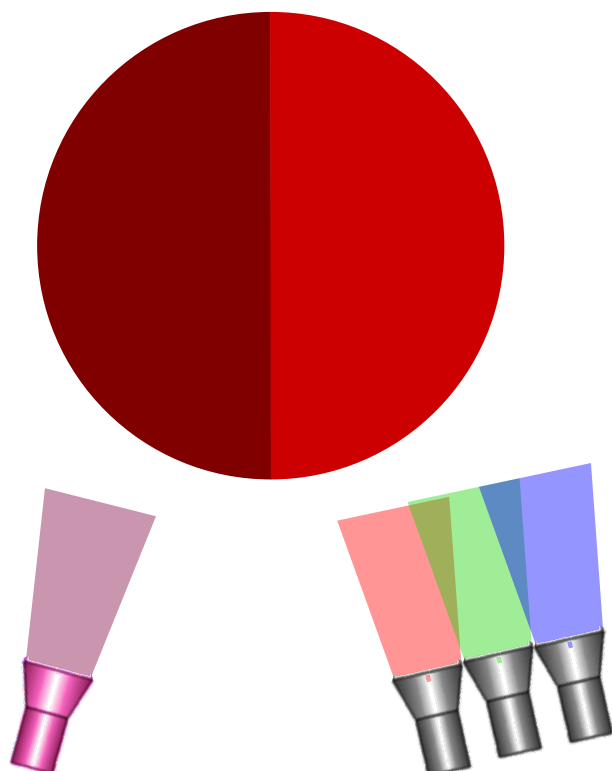


Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)

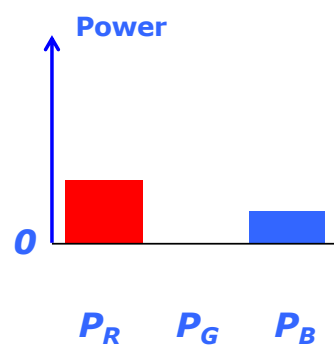


slide credits:
W. Freeman

Another color matching experiment...

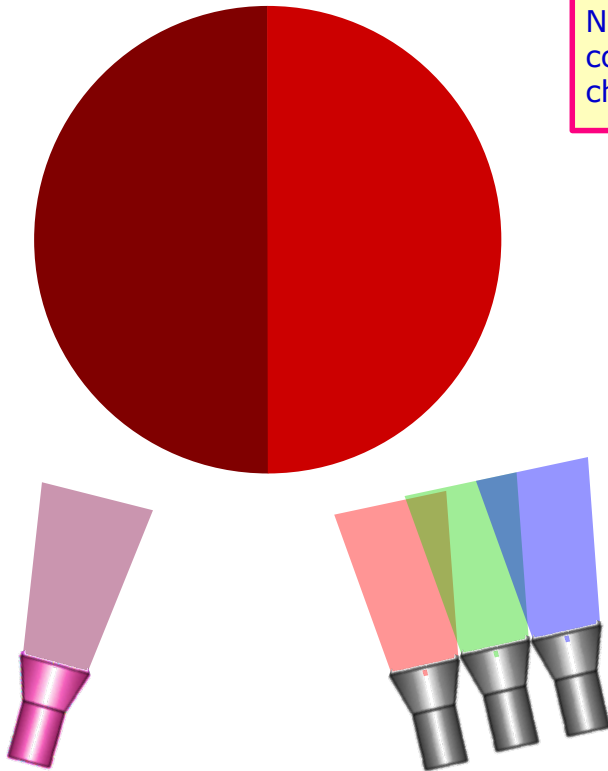


Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)



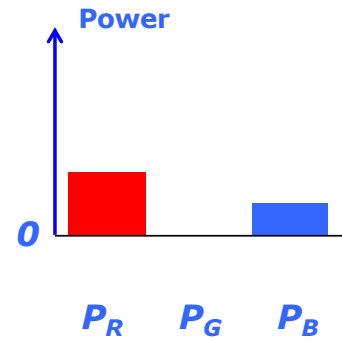
slide credits:
W. Freeman

Another color matching experiment...



Non trovo alcuna
combinazione dei 3 primari
che dia il match!

Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)

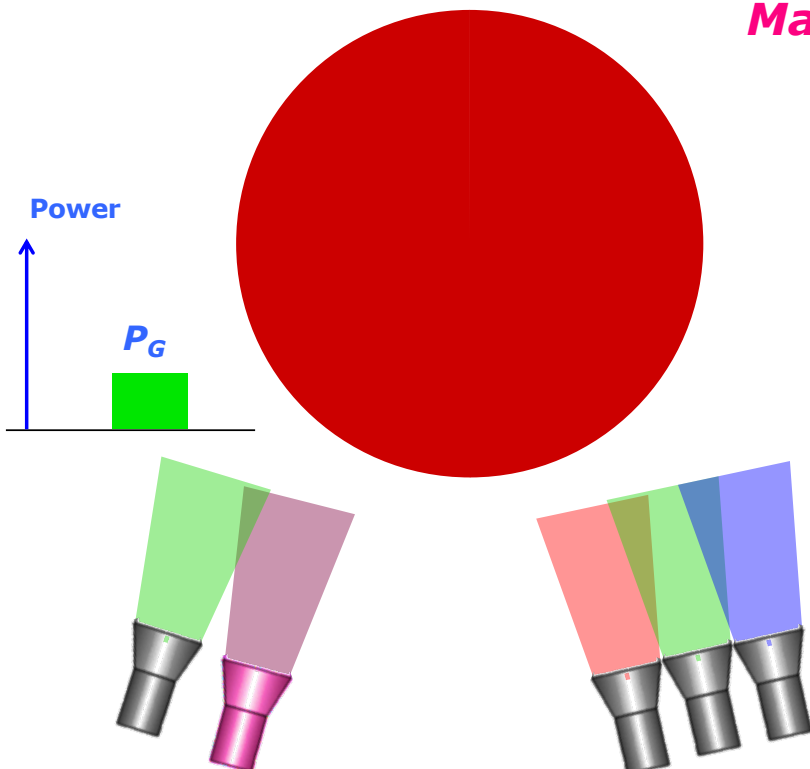


slide credits:
W. Freeman

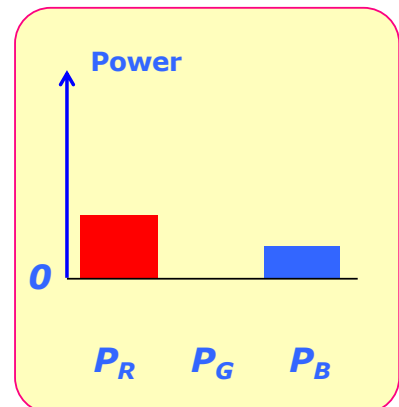
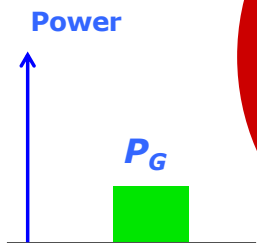
Another color matching experiment...



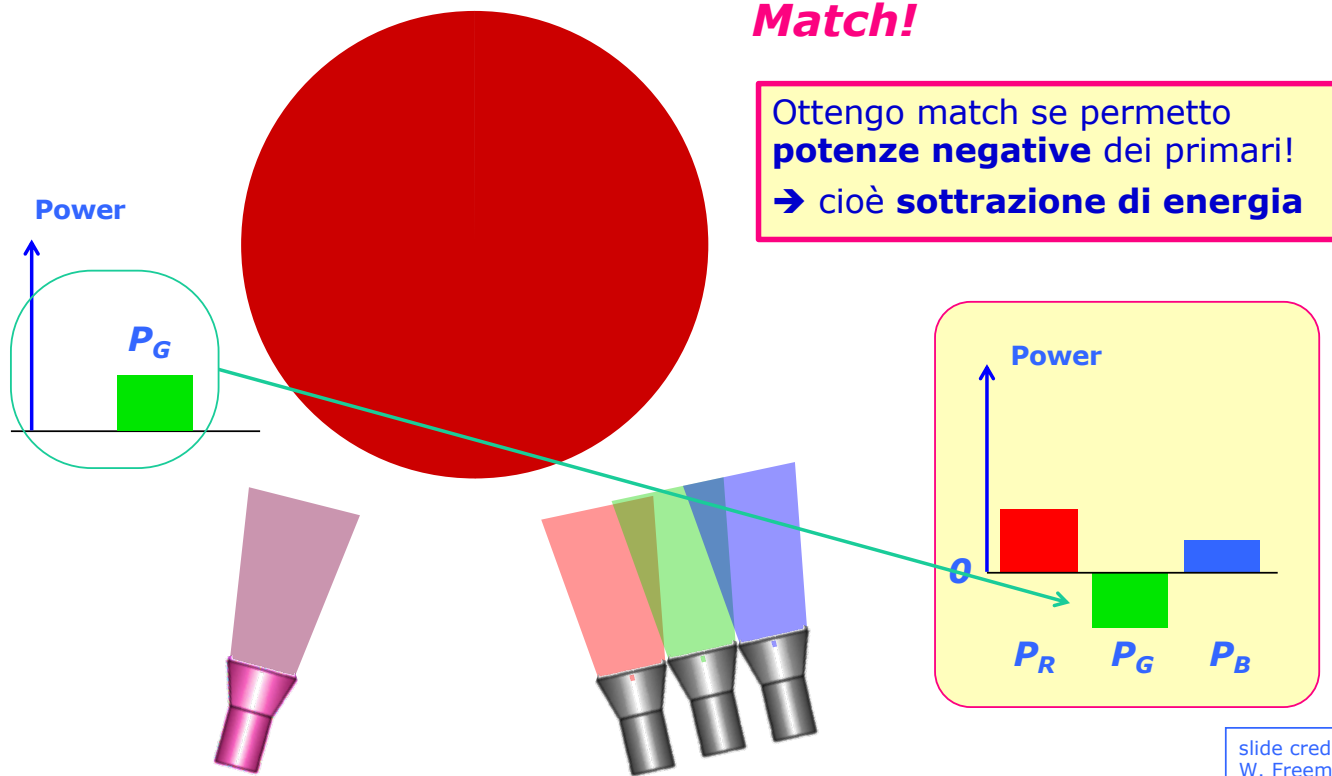
Match!



Potenza primari
(es: Red,Green,Blue)



slide credits:
W. Freeman



slide credits: W. Freeman

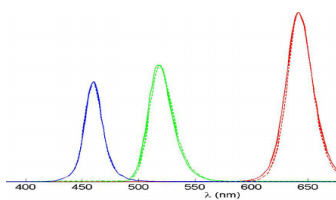
Color Matching Functions

Perché?

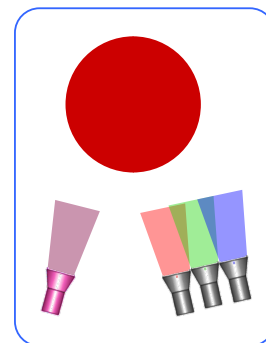
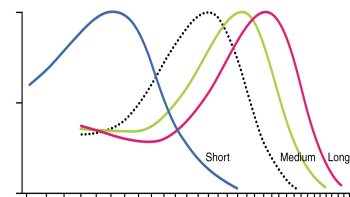
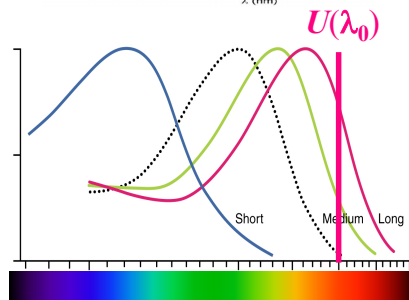
– le risposte spettrali dei coni L,M,S sono **sovrapposte!**

Come modellizzare il fenomeno?

❖ Scelte 3 luci primarie $P_1 P_2 P_3$:

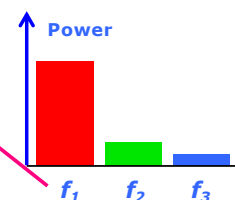


❖ Considero come sorgente di **test** una **sorgente monocromatica** di potenza unitaria: $U(\lambda_0)$



❖ Effettuo il **color matching**: $U(\lambda_0) = f_1 P_1 + f_2 P_2 + f_3 P_3$

$$U(\lambda_0) \rightarrow \langle f_1(\lambda_0), f_2(\lambda_0), f_3(\lambda_0) \rangle$$



Come modellizzare il fenomeno?

- Fatto per ogni $\lambda \rightarrow$ **Color Matching Function:**

$$U(\lambda) = f_1(\lambda)P_1 + f_2(\lambda)P_2 + f_3(\lambda)P_3$$

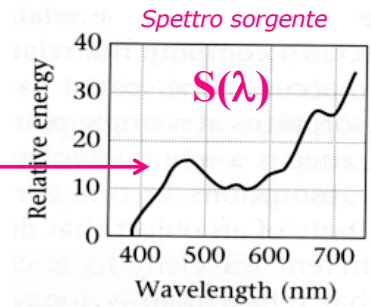
- Data una **terna di primari**, esistono tre corrispondenti **color matching functions:**

$$\langle P_1, P_2, P_3 \rangle$$

$$\langle f_1(\lambda), f_2(\lambda), f_3(\lambda) \rangle$$

Considero ora una sorgente generica $S(\lambda)$:

- Per Grassman (linearità), essa può essere vista come la somma di tutti i contributi ad ogni lunghezza d'onda λ



Quindi:

$$\mathbf{S} = \left[\int_{\Lambda} f_1(\lambda)S(\lambda)d\lambda \right] P_1 + \left[\int_{\Lambda} f_2(\lambda)S(\lambda)d\lambda \right] P_2 + \left[\int_{\Lambda} f_3(\lambda)S(\lambda)d\lambda \right] P_3$$

$$= w_1P_1 + w_2P_2 + w_3P_3 \quad \rightarrow \mathbf{S} \equiv \langle w_1, w_2, w_3 \rangle \text{ nello spazio } [P_1, P_2, P_3]$$

...come modellizzare il fenomeno?

Discretizzando λ , il problema può essere descritto così:

- descrivo la **sorgente S** discretizzata, attraverso le sue N componenti spettrali: $S(\lambda_i), i = 1..N$

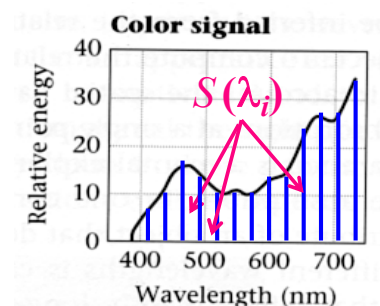
$$\mathbf{S}_{[N \times 1]} = [S(\lambda_i)] = \begin{bmatrix} S(\lambda_1) \\ \vdots \\ S(\lambda_N) \end{bmatrix}$$

- descrivo le **3 color matching functions** discretizzate:

3 vettori di N componenti: $f_{1,2,3}(\lambda_i), i = 1..N$

\rightarrow Matrice \mathbf{F} $[3 \times N]$

$$\mathbf{F}_{[3 \times N]} = \begin{bmatrix} f_1(\lambda_1) & \dots & f_1(\lambda_N) \\ f_2(\lambda_1) & \dots & f_2(\lambda_N) \\ f_3(\lambda_1) & \dots & f_3(\lambda_N) \end{bmatrix}$$



- Nello **spazio colore** definito da **primari** e **CMF's**, la terna \mathbf{c} che definisce il colore della sorgente \mathbf{S} è:

$$\text{Dati: } \langle P_1, P_2, P_3 \rangle \text{ e } \mathbf{F}_{[3 \times N]} \Rightarrow \mathbf{c} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{S}, \quad \mathbf{c} = \langle c_1, c_2, c_3 \rangle$$

In conclusione... come modellizzare il fenomeno?

Date **3 sorgenti primarie:** $\langle P_1, P_2, P_3 \rangle$

→ definisco **3 CMF:** $f_1(\lambda), f_2(\lambda), f_3(\lambda)$

Per una sorgente generica: $S(\lambda)$

→ definisco **3 CMF:** $\mathbf{F}_{[3 \times N]}$

Per una sorgente generica: $\mathbf{S}_{[N \times 1]}$

Colore di $S(\lambda)$:

$$c_{1,2,3} = \int S(\lambda) f_{1,2,3}(\lambda) d\lambda$$

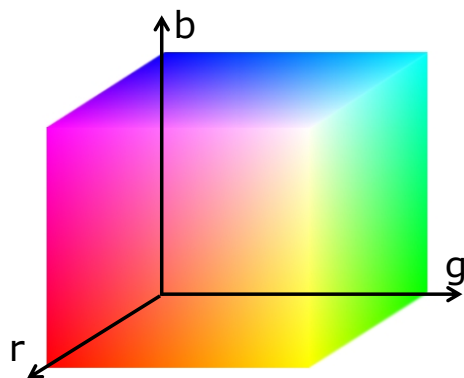
Colore di \mathbf{S} :

$$\mathbf{c} = \langle c_1, c_2, c_3 \rangle = \mathbf{F} \cdot \mathbf{S}$$

- ❖ Ogni colore è definito in uno spazio tridimensionale lineare

Risultato: posso definire **spazi colore lineari**

- ❖ e rappresentare colori come punti in uno spazio vettoriale lineare.



Generazione di un'immagine (Image Formation)

Il colore nelle immagini

- ❖ Fisica e percezione umana del colore
- ❖ Colorimetria
- ❖ Rappresentazione del colore
- ❖ Applicazioni: stima attraverso il colore

(Forsyth/Ponce: Capitolo 3)

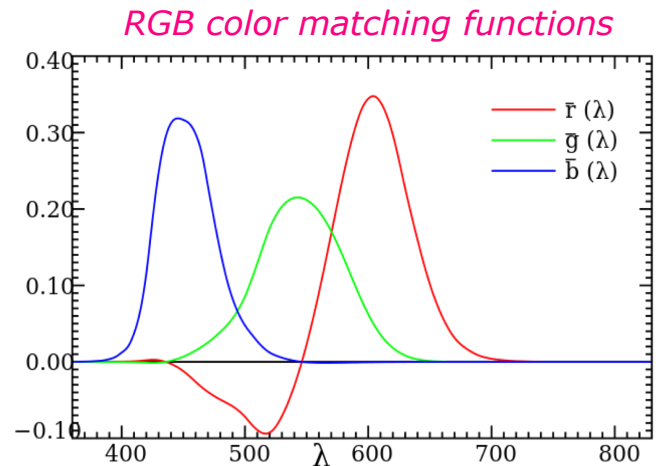
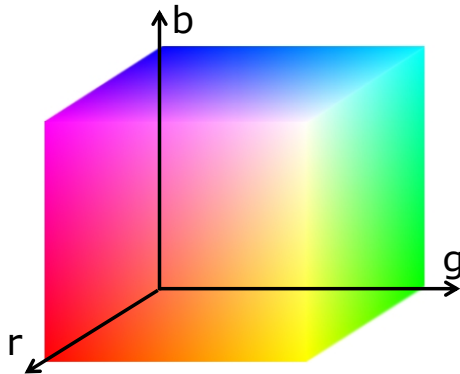
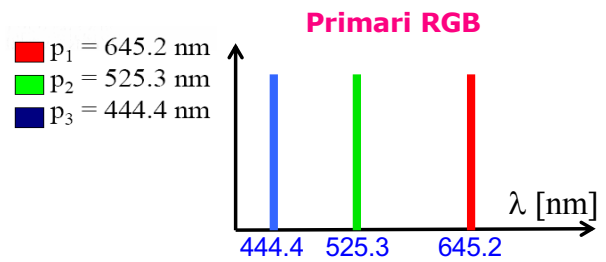
Credits:

materiale rielaborato a partire da slide di Luigi Cinque (Univ. La Sapienza, Roma) e altre sorgenti (citate)



Spazio RGB:

- ❖ **Primari:**
luci **monocromatiche** **R**, **G**, **B**
- ➔ Color Matching Functions **negative**
 - Necessario matching **sottrattivo!**



Color Matching Functions



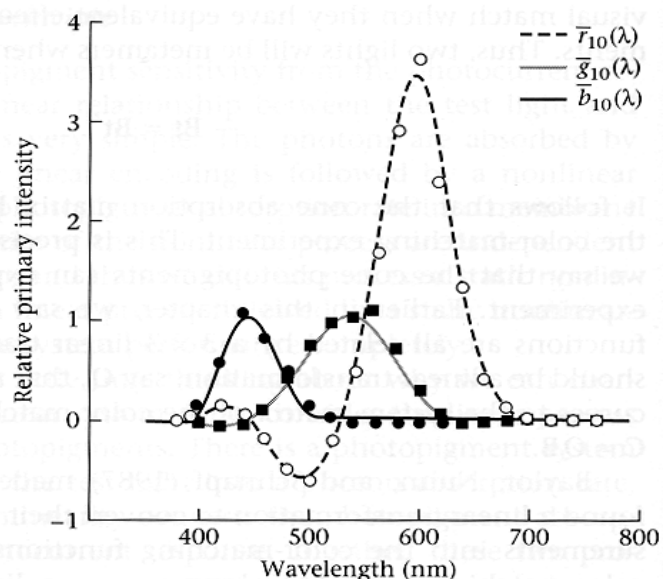
PROBLEMA: a causa della risposta spettrale dei fotorecettori (coni):

- ❖ **Primari reali** ➔ **CMF negative (matching sottrattivo)**

SOLUZIONE:

- ❖ **Primari "immaginari"** ➔ **CMF sempre positive**

4.20 COMPARISON OF CONE PHOTOCURRENT RESPONSES AND THE COLOR-MATCHING FUNCTIONS. The cone photocurrent spectral responsivities are within a linear transformation of the color-matching functions, after a correction has been made for the optics and inert pigments in the eye. The smooth curves show the Stiles and Burch (1959) color-matching functions. The symbols show the matches predicted from the photocurrents of the three types of macaque cones. The predictions included a correction for absorption by the lens and other inert pigments in the eye. Source: Baylor, 1987.



Foundations of Vision, by Brian Wandell, Sinauer Assoc., 1995



Risultato → spazio colore **lineare**: **CIE XYZ (1931)**:

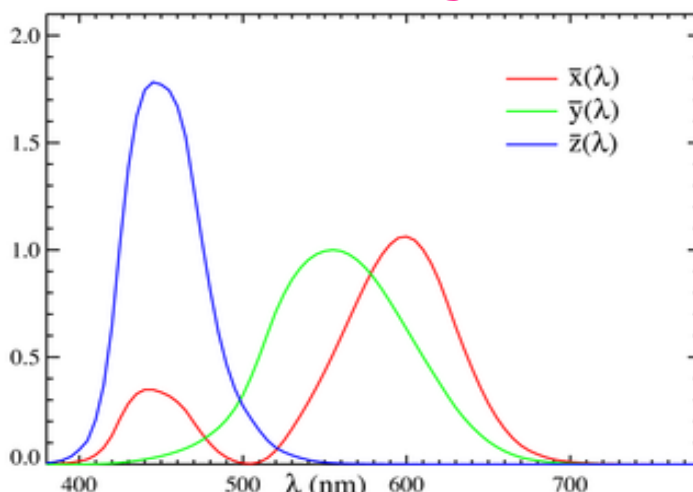
Standard definito dalla **Commission Internationale d'Eclairage** (1931)

- ❖ **Primari (X,Y,Z) immaginari**
- **Color Matching Functions** sempre **positive**

→ tutti i colori sono sintetizzabili per **addizione (comb. lin. positive di X,Y,Z)**

❖ *nello spazio RGB non ci riesco! (non riesco a rappresentare tutti i colori)*

XYZ color matching functions



CIE XYZ (1931)

Standard definito dalla **Commission Internationale d'Eclairage** (1931)

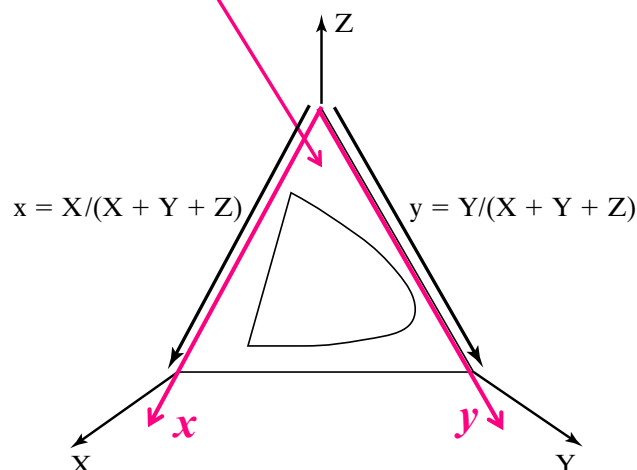
Spazio **lineare**: → $\mathbf{S}=[X_0, Y_0, Z_0] \rightarrow \alpha\mathbf{S}=[\alpha X_0, \alpha Y_0, \alpha Z_0]$ **cambia la brillantezza ma non il colore**

Ponendo un **vincolo di potenza costante**: → $X + Y + Z = 1$

definisco un **sottospazio colore 2D**:

SPAZIO xy:

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



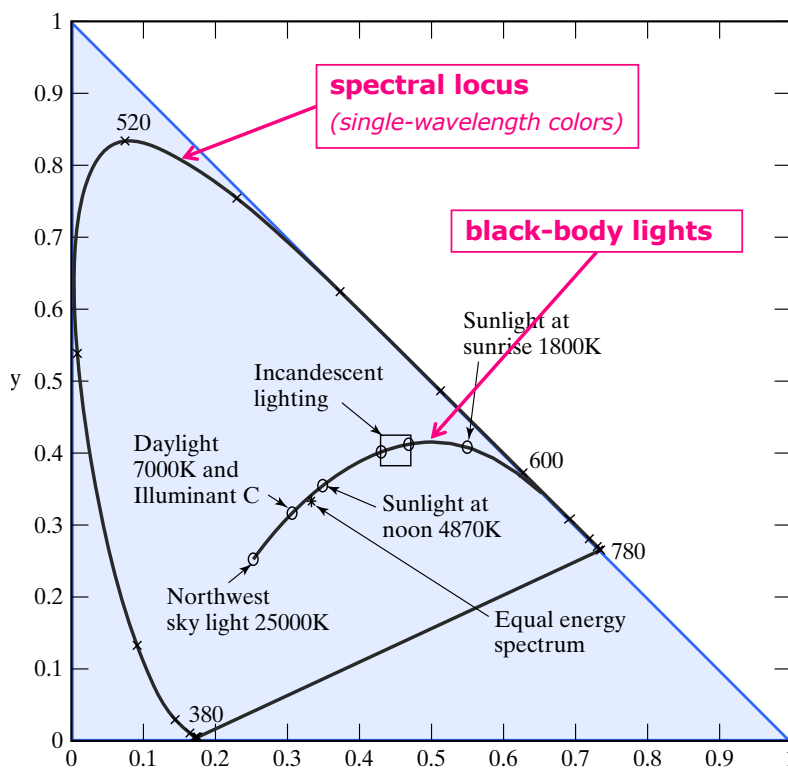
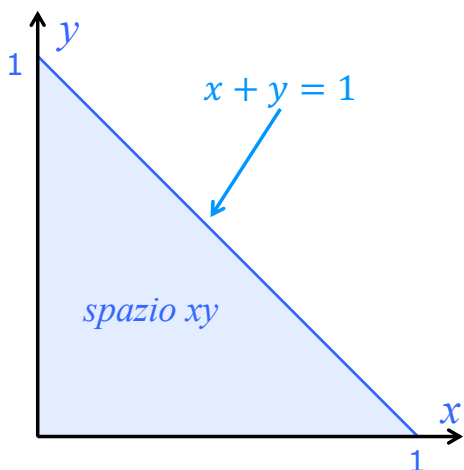


CIE XYZ (1931)

sottospazio **xy**:

Color Gamut

$$\langle x, y \rangle = \left\langle \frac{X}{X+Y+Z}, \frac{Y}{X+Y+Z} \right\rangle$$

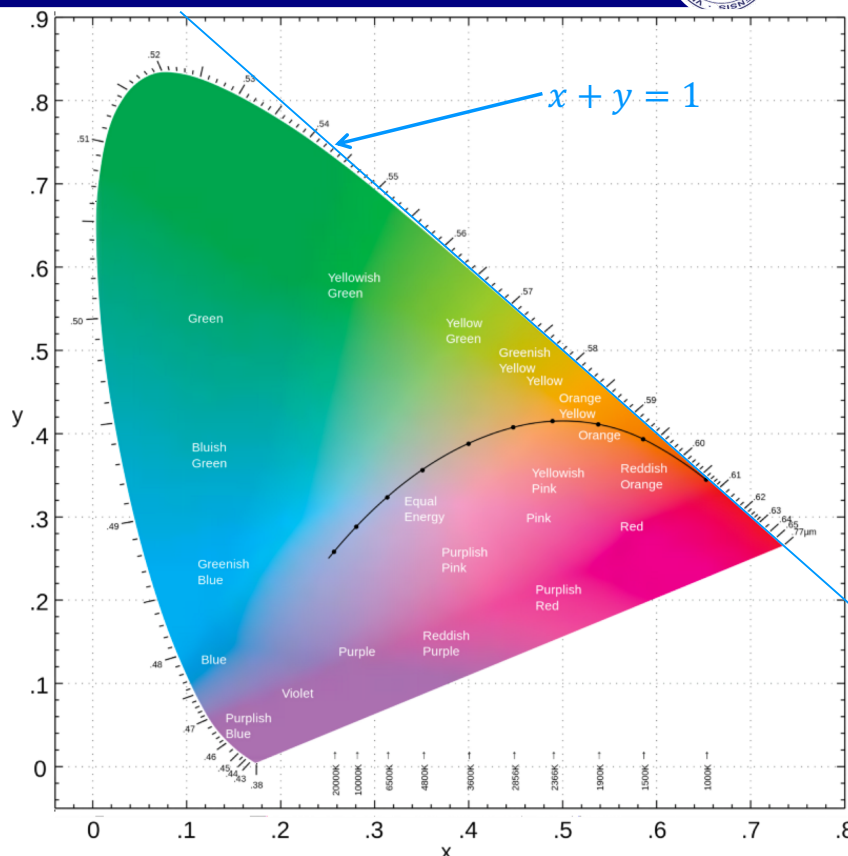


CIE XYZ (1931)

sottospazio **xy**:

Color Gamut

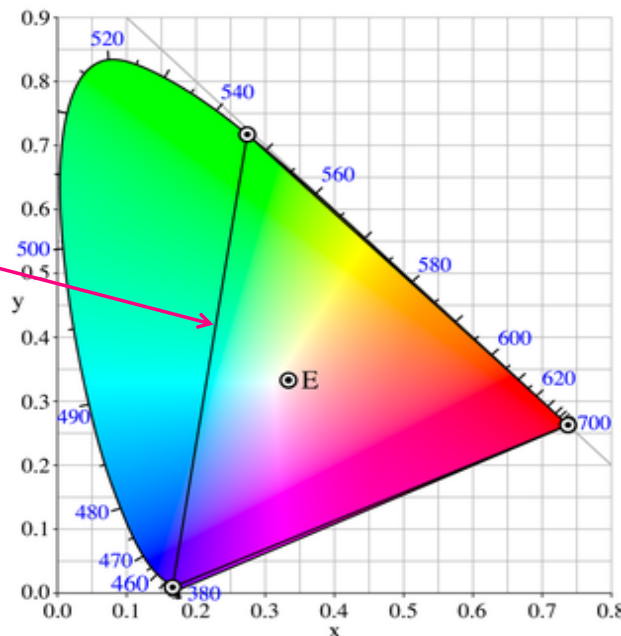
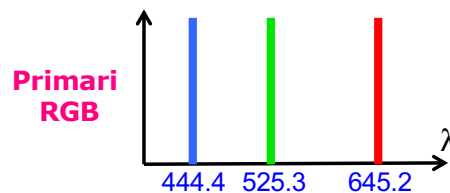
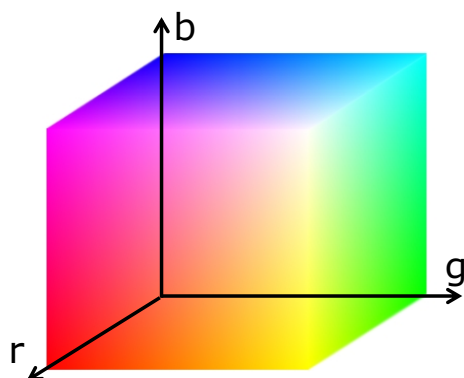
Gamma dei colori visibili





Limiti di rappresentazione nello spazio RGB:

- ❖ I primari R,G,B si trovano sullo **spectral locus**
- ❖ Posso generare per addizione soltanto i colori all'interno del **triangolo RGB**



Spazi colore non lineari



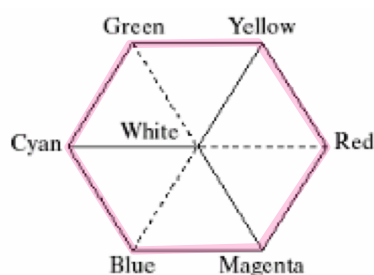
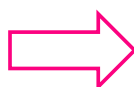
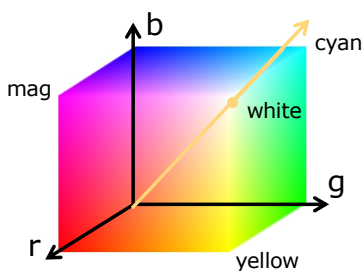
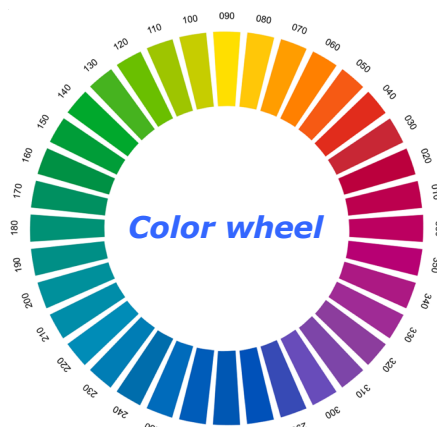
Limite degli spazi colore lineari

non adatti a rappresentare alcune proprietà percettive del colore:

- ❖ Assi non corrispondenti a proprietà intuitive
- ❖ Proprietà topologiche circolari della tinta

Spazio HSV (Hue, Saturation, Value):

- ❖ Si ottiene "girando" il cubo RGB in piedi sulla sua diagonale
- ❖ Gli assi hanno un significato percettivo: **Hue** (tinta), **Saturation** (saturazione del colore), **Value** (brillantezza)





Spazio HSV: coordinate coniche

- ❖ **H**: angolo
- ❖ **S**: modulo (orizzontale)
- ❖ **V**: altezza

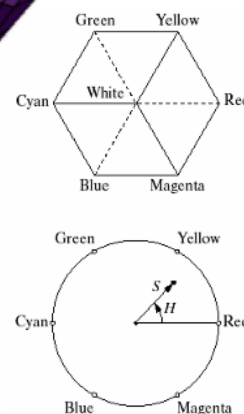
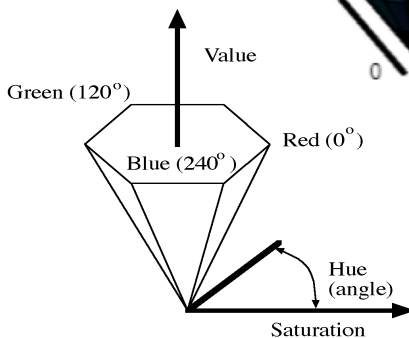
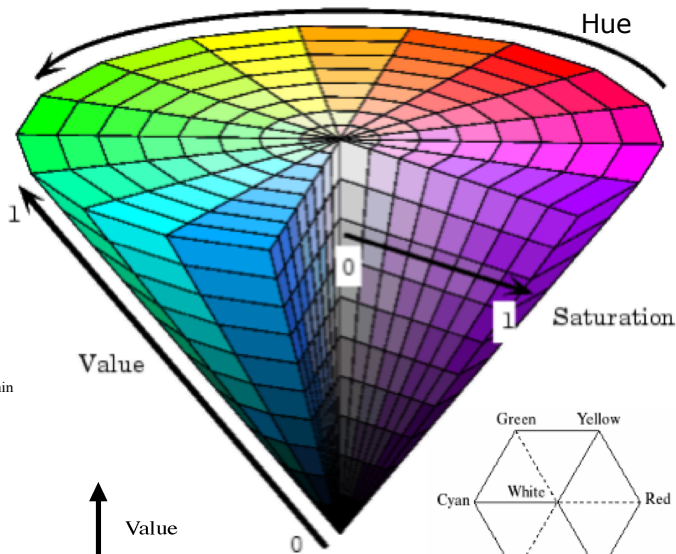
Conversione RGB → HSV:

$$R' = \frac{R}{255}, \quad G' = \frac{G}{255}, \quad B' = \frac{B}{255}$$

$$C_{\max} = \max(R', G', B'), \quad C_{\min} = \min(R', G', B'), \quad \Delta = C_{\max} - C_{\min}$$

$$H = \begin{cases} 0^\circ, & \Delta = 0 \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{G' - B'}{\Delta} \bmod 6 \right), & C_{\max} = R' \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{B' - R'}{\Delta} + 2 \right), & C_{\max} = G' \\ 60^\circ \cdot \left(\frac{R' - G'}{\Delta} + 4 \right), & C_{\max} = B' \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} 0, & C_{\max} = 0 \\ \frac{\Delta}{C_{\max}}, & C_{\max} \neq 0 \end{cases}; \quad V = C_{\max}$$



Spazi colore uniformi – lo spazio CIE u'v'



Lo spazio CIE xy non è uniforme:

- ❖ Distanza sul piano CIE xy non corrisponde a una distanza percettiva
- ❖ Spazio CIE xy non isotropo
- **Ellissi di MacAdam: spazi nulli della percezione**

→ Spazio CIE u'v':

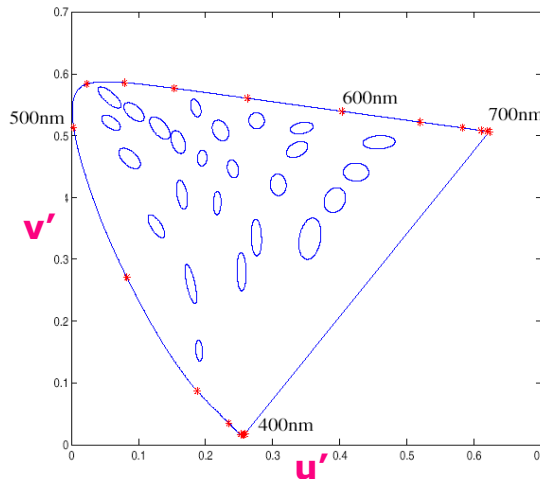
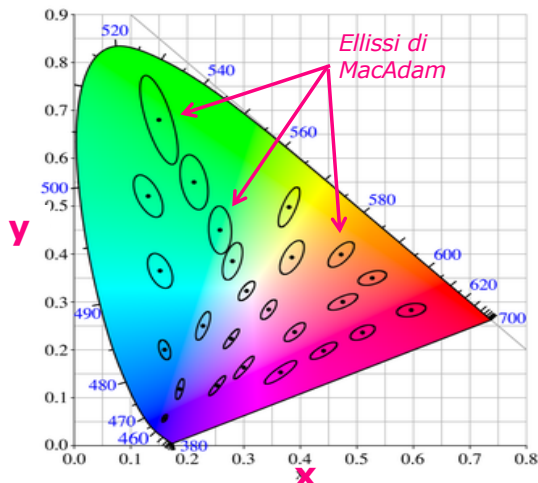
trasformazione proiettiva di CIE xy
→ rende ellissi di MacAdam più uniformi

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

$$v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12}$$

$$y = \frac{4v'}{6u' - 16v' + 12}$$



CIE L*a*b* (1976)

- ❖ Spazio colore **uniforme** per costruzione
- ❖ Koenderink: *"an awful mix of magical numbers and arbitrary functions that somehow 'fit' the eye measure"*

Conversione XYZ → L*a*b*

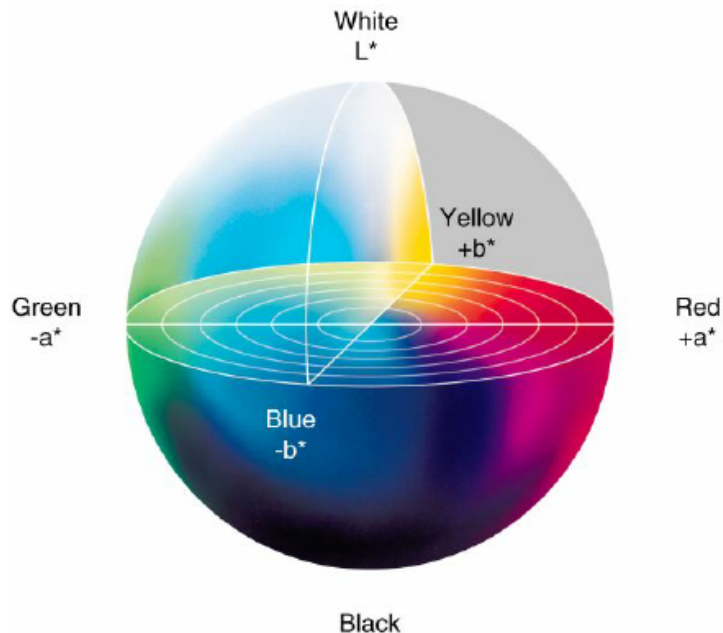
$$L^* = 116f\left(Y / Y_n\right) - 16$$

$$a^* = 500\left[f\left(X / X_n\right) - f\left(Y / Y_n\right)\right]$$

$$b^* = 200\left[f\left(X / X_n\right) - f\left(Z / Z_n\right)\right]$$

$\langle X_n, Y_n, Z_n \rangle$: coordinate XYZ "bianco"

Il "bianco" nell'immagine
(ad es. D65)



Generazione di un'immagine (Image Formation)

Il colore nelle immagini

- ❖ Fisica e percezione umana del colore
- ❖ Colorimetria
- ❖ Rappresentazione del colore
- ❖ Applicazioni: stima attraverso il colore

(Forsyth/Ponce: Capitolo 3)

Credits:

materiale rielaborato a partire da slide di Luigi Cinque (Univ. La Sapienza, Roma) e altre sorgenti (citate)

Applicazioni legate alla percezione umana del colore

Fenomeni percettivi:

❖ Color/lightness constancy

- The ability of the human visual system to perceive the intrinsic reflectance properties of the surfaces despite changes in illumination conditions

❖ Instantaneous effects

- Simultaneous contrast (background color affects target color), Mach bands

❖ Gradual effects

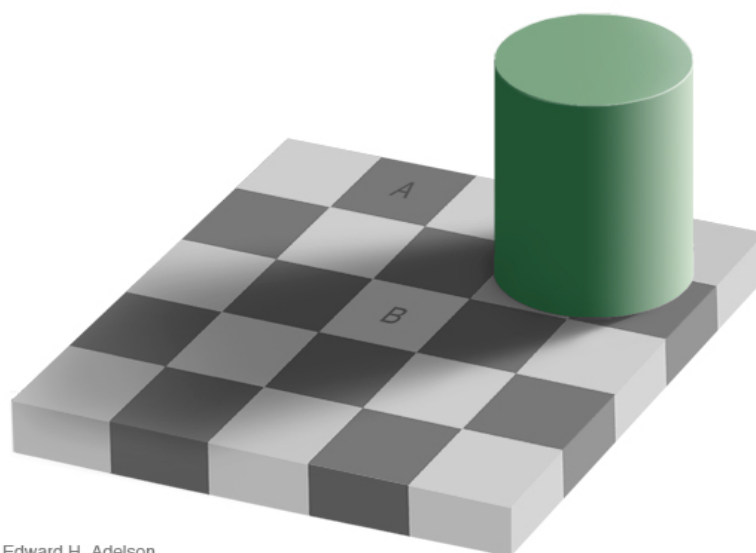
- Light/dark adaptation, Chromatic adaptation, Afterimages

❖ Chromatic adaptation

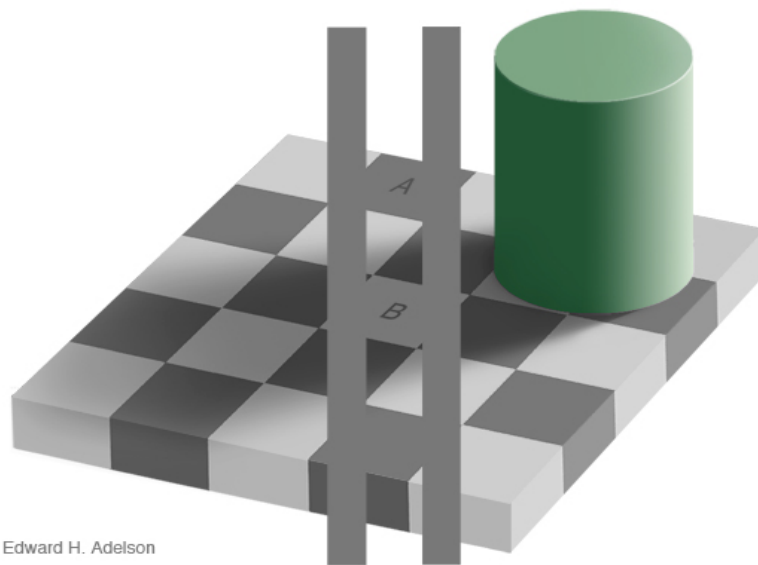
The visual system changes its sensitivity depending on the luminance prevailing in the visual field

- Adapting to different brightness levels
 - ✦ (changing the size of the iris – the aperture)
- Adapting to different color temperature
 - ✦ The receptive cells on the retina change their sensitivity: if there is an increased amount of red light, the 'red' cones decrease their sensitivity until the scene looks white again
 - ✦ We actually adapt better in brighter scenes: This is why candlelit scenes still look yellow

Lightness constancy



Edward H. Adelson

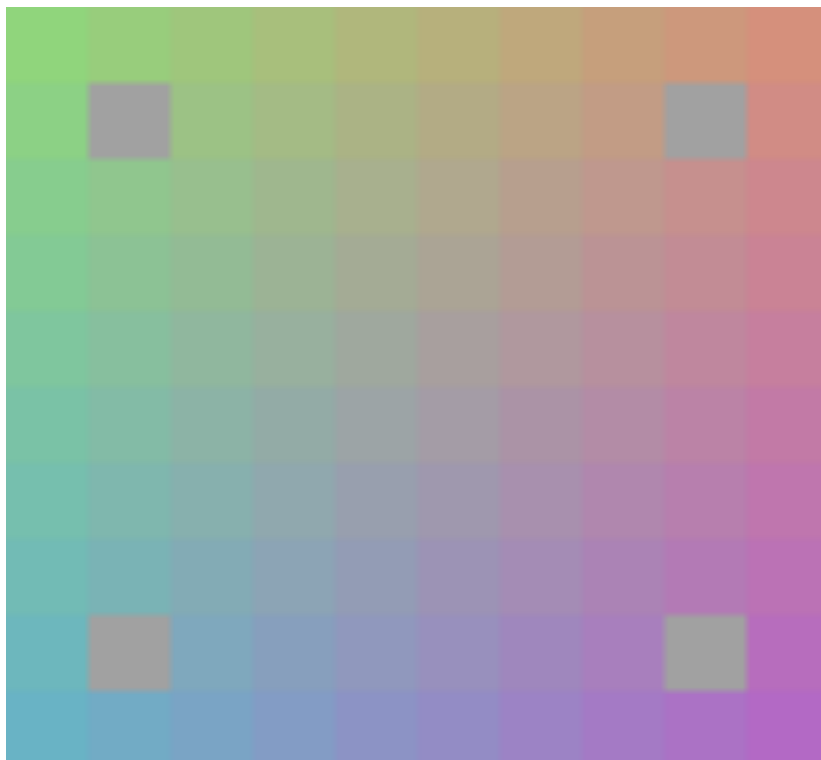


Edward H. Adelson

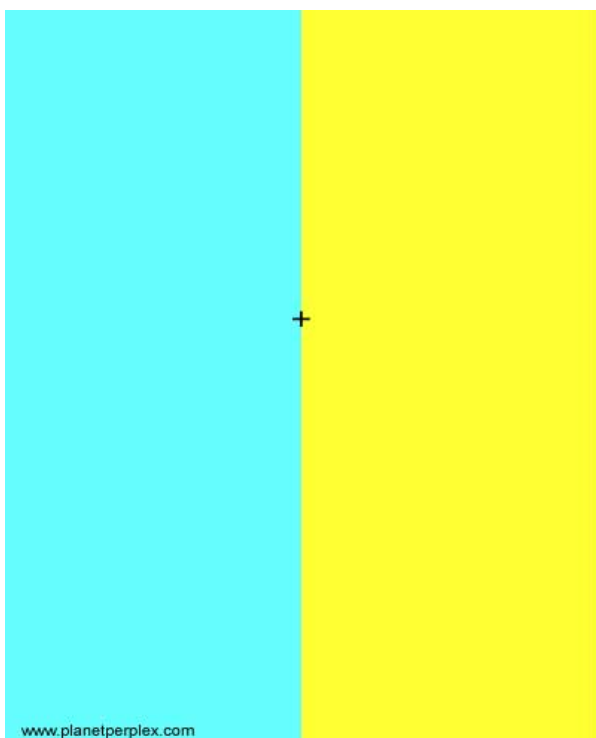
- Possible explanations
 - Simultaneous contrast
 - Reflectance edges vs. illumination edges

http://web.mit.edu/persci/people/adelson/checkershadow_illusion.html

Simultaneous contrast / Mach bands



Source: D. Forsyth



Algoritmi di adattamento: bilanciamento del bianco

Bilanciamento del bianco

- ❖ L'occhio umano si adatta alla luce **dell'ambiente**; una camera, **no**.
 - ❖ Osservando un'immagine riprodotta (**foto, display, ...**), l'occhio si adatta all'ambiente, non alla foto!
 - ❖ il **bianco** nella foto rispecchia il **colore dell'illuminante** della scena
- ➔ necessario il **bilanciamento del bianco**

Camere digitali:

- bilanciamento automatico
- bilanciamento per comuni illuminanti
- bilanciamento "custom" utilizzando un riferimento bianco nella scena

incorrect white balance



correct white balance



AWB	Auto White Balance
	Custom
K	Kelvin
	Tungsten
	Fluorescent
	Daylight
	Flash
	Cloudy
	Shade

Increasing Color Temperature

<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/white-balance.htm>

Bilanciamento problematico:

- ❖ Posso avere più di un "bianco di riferimento" nell'immagine
→ bilanciamenti con riferimenti diversi forniscono risultati diversi



Reference: moon



Reference: stone

<http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/white-balance.htm>

Metodi di bilanciamento del bianco:

- ❖ **Tecnica semplice: Von Kries adaptation**
 - Ogni canale (tristimolo) viene moltiplicato per un guadagno:
 - guadagno che rende neutrale un oggetto di riferimento bianco (o grigio)

- ❖ **Tecnica migliore: "gray card"**

- Acquisizione immagine di un oggetto di riferimento "neutro" (bianco/grigio)
- Determinazione dei pesi dei canali:

Se la *gray card* risulta di colore

$$\mathbf{C} = [r_w, g_w, b_w]$$

→ guadagno di bilanciamento

$$\mathbf{G} = \left[\frac{1}{r_w}; \frac{1}{g_w}; \frac{1}{b_w} \right]$$



Tecniche che non necessitano di "gray cards":

- necessario stimare quali pixel corrispondono a oggetti bianchi
- ❖ Assunzione: "gray world"
 - The image average is gray ($r_{ave}, g_{ave}, b_{ave}$)
 - ➔ use weights: $1/r_{ave}, 1/g_{ave}, 1/b_{ave}$
- ❖ Brightest pixel assumption
 - Gli spot speculari ("highlights") hanno in genere il colore dell'illuminante
 - ➔ assumo sia **bianco**
 - ➔ Guadagni **inversamente proporzionali** ai valori del pixel più brillante
- ❖ Gamut mapping
 - Gamut:** involucro convesso di tutti i colori (pixel) contenuti nell'immagine
 - Trova la legge di trasformazione che fa corrispondere il gamut dell'immagine con quello di una "tipica" immagine in luce bianca
- ❖ Exploitation of **image statistics, learning** techniques

Modelli di colore superficiale (diffusa/speculare)

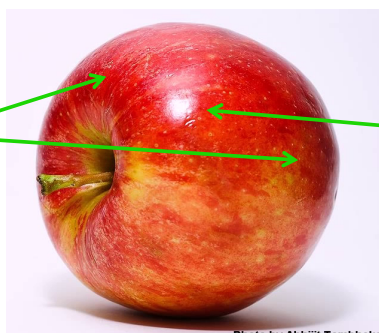
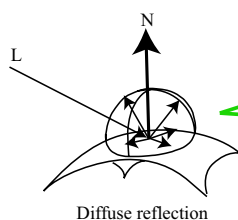
Modello di riflessione più comune: riflessione **diffusa** + riflessione **speculare**
 Introducendo il colore:

➔ riflessione **diffusa**(λ) + riflessione **speculare**(λ)

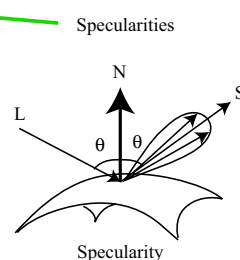
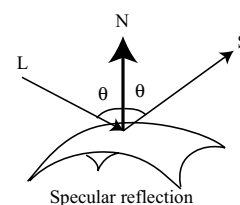
$$E(\mathbf{x}, \lambda) = E_{DR}(\mathbf{x}, \lambda) + E_{SR}(\mathbf{x}, \lambda)$$

componente
diffusa

componente
speculare



source:
khanacademy.org

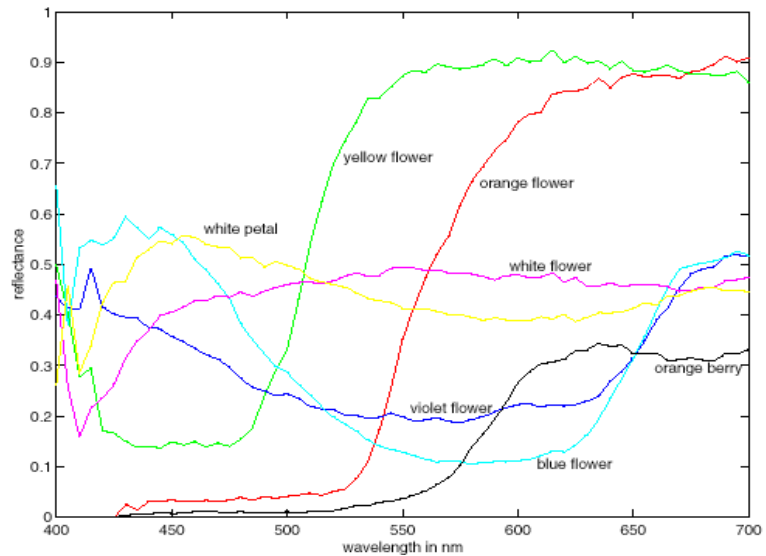


Modelli di riflessione superficiale:

il più comune:

comp. diffusa (albedo)
+ **comp. speculare**

Come cambia il modello se considero i colori?



❖ **Componente diffusa**
Albedo = $\rho(\lambda)$
→ *spectral reflectance*

❖ **Componente speculare**
dipende dal materiale:

❖ Dielettrici: colore → colore della sorgente

❖ Metalli: → colore può cambiare molto

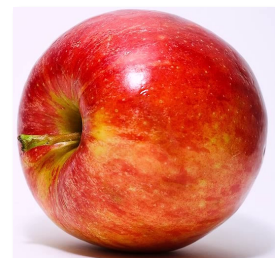
Modelli colore superficie

La radianza di un pixel \mathbf{x} ... per ogni λ :

$$\begin{aligned} E(\mathbf{x}, \lambda) &= E_{DR}(\mathbf{x}, \lambda) + E_{SR}(\mathbf{x}, \lambda) = \\ &= [\text{ill. diretta} \cdot \text{albedo} \cdot \text{param_sup_diff}] \\ &\quad + [\text{ill. diretta} \cdot \text{colore} \cdot \text{param_sup_spec}] = \\ &= \rho(\mathbf{x}, \lambda) g_D(\mathbf{x}) E(\lambda) + c(\mathbf{x}, \lambda) g_S(\mathbf{x}) E(\lambda) \end{aligned}$$

parametri geometrici
in \mathbf{x} , rifl. **diffusa**

parametri geometrici
in \mathbf{x} , rifl. **speculare**



Integrando in λ , ottengo il **vettore colore** $\mathbf{C}(\mathbf{x})$:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}(\mathbf{x}) &= \langle r(\mathbf{x}), g(\mathbf{x}), b(\mathbf{x}) \rangle = \\ &= \int \rho(\mathbf{x}, \lambda) g_D(\mathbf{x}) E(\lambda) d\lambda + \int c(\mathbf{x}, \lambda) g_S(\mathbf{x}) E(\lambda) d\lambda \\ &= g_D(\mathbf{x}) \mathbf{d}(\mathbf{x}) + g_S(\mathbf{x}) \mathbf{s}(\mathbf{x}) \end{aligned}$$

param. superficie
in \mathbf{x} , [$\cos(\theta)$]

colore rifl. diffusa in \mathbf{x}

colore speculare in \mathbf{x} , di fronte ($\delta\theta=0$)

param. superficie in \mathbf{x} , [es. $\cos^N(\delta\theta)$]



Applicazione: rivelazione/eliminazione delle specularità

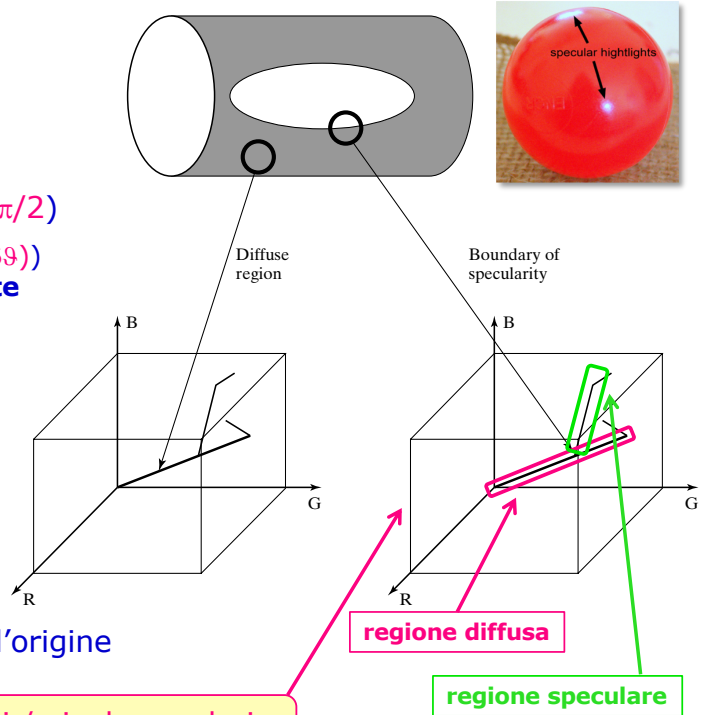
Il colore di un pixel, $\mathbf{C}(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{C}(\mathbf{x}) = \mathbf{C}_D(\mathbf{x}) + \mathbf{C}_S(\mathbf{x}) = g_D(\mathbf{x}) \mathbf{d}(\mathbf{x}) + g_S(\mathbf{x}) \mathbf{s}(\mathbf{x})$$

- ❖ $g_D(\mathbf{x})$ varia lentamente ($g_D(\mathbf{x}) \propto \mathbf{n} \cdot \mathbf{S} = \cos(\theta)$) e scende fino a $\mathbf{0}$ ($\theta = \pi/2$)
- ❖ $g_S(\mathbf{x})$ varia bruscamente (proporz. a $\cos^N(\delta\theta)$) appare dove la componente **diffusa è costante**

Nello spazio RGB:

- ❖ il colore dei pixel **diffusi**:
 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_D = \alpha \mathbf{d}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1$
 → pixel su una retta che passa per $\mathbf{0}$
- ❖ il colore dei pixel **speculari**:
 $\mathbf{C} = \bar{\alpha} \mathbf{d} + k \mathbf{s}, \quad 0 \leq k \leq 1$
 → pixel su una retta che **non** passa per l'origine



→ **Dog-Leg Pattern**: determino pixel diffusi / pixel speculari

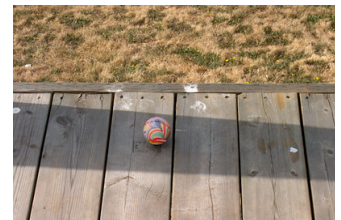
Brelstaff and Blake, 1988

Applicazione: rimozione di ombre



Rimozione di ombre – problema complesso:

- ALBEDO più scura? → non funziona
- Cambio di luminosità e non di tinta (utile spazio HSV)?
 → non funziona OUTDOOR: tinta Sole ≠ tinta ombra (cielo)



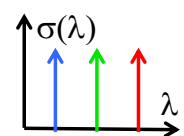
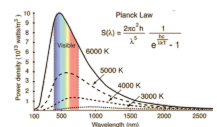
G.D. Finlayson et al., 2006

IDEA:

OUTDOOR: Sole → sunlight (corpo nero, $T_{\text{sun}} \approx 6000 \text{ K}$)
 ombra → skylight (corpo nero, $T_{\text{sky}} > 10000 \text{ K} \neq T_{\text{sun}}$)
 → se posso determinare le diverse T , determino sole/ombra

Assunzioni:

- ❖ Illuminanti: corpi neri radianti → $E(\lambda, T) = K \frac{\exp(-hc / k\lambda T)}{\lambda^5}$
- ❖ Fotorecettori selettivi in frequenza → $\sigma_j(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_j), \quad j = 1, 2, 3$



Le 3 componenti di colore $r_j, j = 1, 2, 3$ di un punto di albedo $\rho(\lambda)$:

$$r_j = K \int_{\Lambda_j} E(\lambda, T) \rho(\lambda) \sigma_j(\lambda) d\lambda = K E(\lambda_j, T) \rho(\lambda_j) = K \rho(\lambda_j) \frac{\exp(-hc / k\lambda_j T)}{\lambda_j^5}$$

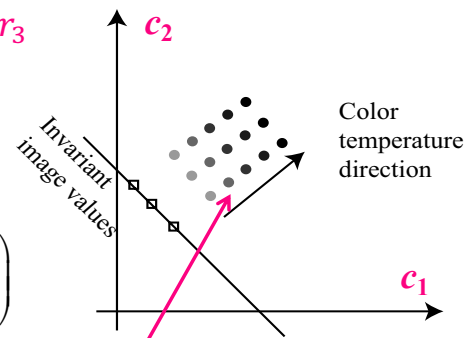
Rimozione di ombre

Per ogni pixel, calcolo: $c_{1,2} = \log\left(\frac{r_{1,2}}{r_3}\right) = \log r_{1,2} - \log r_3$

$$\begin{aligned} c_{1,2} &= \log(r_{1,2}) - \log(r_3) \\ &= \log \rho(\lambda_{1,2}) - 5 \log \lambda_{1,2} - \frac{hc}{kT\lambda_{1,2}} - \log \rho(\lambda_3) + 5 \log \lambda_3 + \frac{hc}{kT\lambda_3} \\ &= \left[\log \rho(\lambda_{1,2}) - 5 \log \lambda_{1,2} - \log \rho(\lambda_3) + 5 \log \lambda_3 \right] + \frac{1}{T} \frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_3 - \lambda_{1,2}} \right) \\ &= a_{1,2} + \frac{1}{T} b_{1,2} \end{aligned}$$

Quindi, in forma vettoriale:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \frac{1}{T} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}$$



Tutti i pixel, cambiando T , si muovono su una retta!

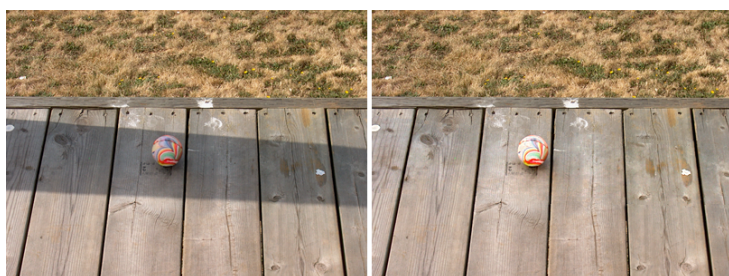
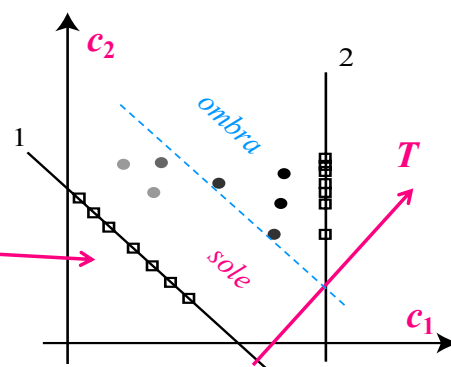
- **temperature direction**: ogni pixel si muove lungo la retta, al variare dell'illuminazione.
- ❖ Se proietto ogni pixel lungo tale direzione, ottengo un'immagine che non dipende dall'illuminante → **invariant image**

Rimozione di ombre

Problema: non conosco le albedo $\rho(\lambda)$:

- ❖ per trovare la **temperature direction** mi servono punti a T diversa ma con la stessa albedo

→ **SOLUZIONE:** cerco la **direzione** con la **massima distribuzione di albedo** (massima entropia di colore)



G.D. Finlayson et al.,
On the Removal of Shadows
from Images,
IEEE Trans. Pattern Analysis
and Machine Intelligence, 2006.

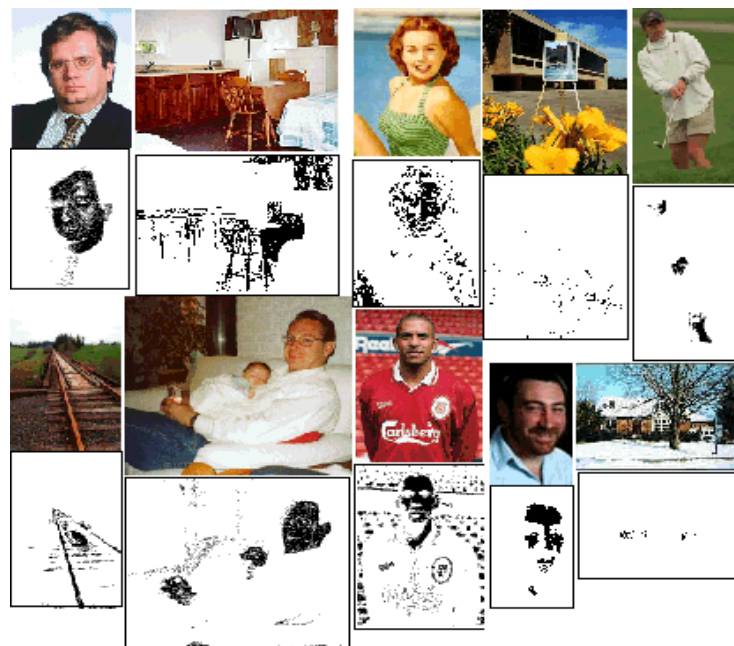
Altre applicazioni di inferenza da colore:

- ❖ **Color histograms for indexing and retrieval**



Swain and Ballard, Color Indexing, IJCV 1991.

- ❖ **Skin detection**



M. Jones and J. Rehg, Statistical Color Models with Application to Skin Detection, IJCV 2002.