



Tecnologie digitali per il suono e l'immagine 2020/21

Vincenzo Lombardo
Corso di Laurea in DAMS
Università di Torino

Mutuato in parte da Elaborazione audio e musica
(Laurea Magistrale di Informatica)

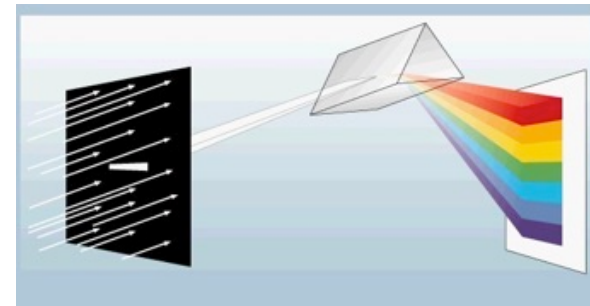
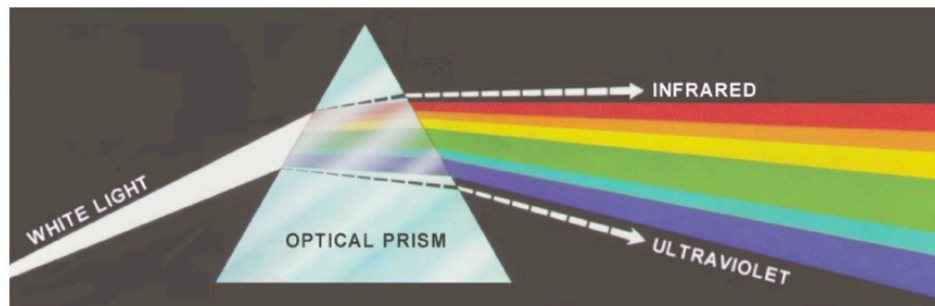
Il colore

Un fenomeno fisico e psicologico



La luce bianca e i colori

- Il prisma di Newton: lo spettro
- 7 bande distinte nello spettro
- Ogni banda su specifiche lunghezze d'onda



La teoria ingenua newtoniana

- Def. colore in base alle proprietà della luce
- Oggetto illuminato assorbe/riflette componenti
- Non tiene conto della fisiologia della visione
- E colori che non esistono nella decomposizione della luce bianca (marrone, porpora)?

Percezione del colore

- Influenza del fattore fisico
 - Natura fisica della luce
 - Interazione luce/materiali (es.: indici riflessione)
- Influenza del fattore psicologico
 - sistema visivo (es.: λ tra 380 e 780 nm)

La percezione acromatica

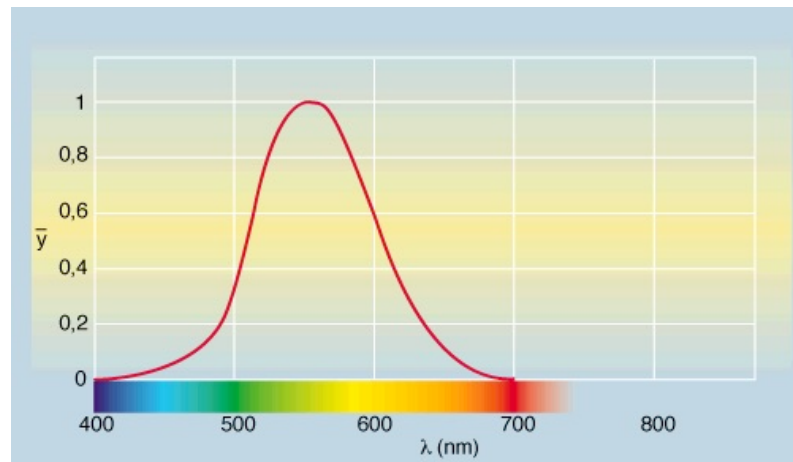
- *Luce bianca*: luce emessa da sorgente che contiene tutte le λ nella stessa quantità
- Riflessione degli oggetti
 - oggetti bianchi: riflessione acromatica > 80%
 - oggetti neri: riflessione acromatica < 3%
 - oggetti a livelli di grigio: riflessione intermedia

L'intensità luminosa

- E' l'unico attributo della luce acromatica
 - valori compresi tra nero e bianco
 - valori intermedi per i livelli di grigio
- Risulta da aggregazione di più λ
- Dà origine alla sensazione di luminosità (o *brightness*)

Efficienza luminosa

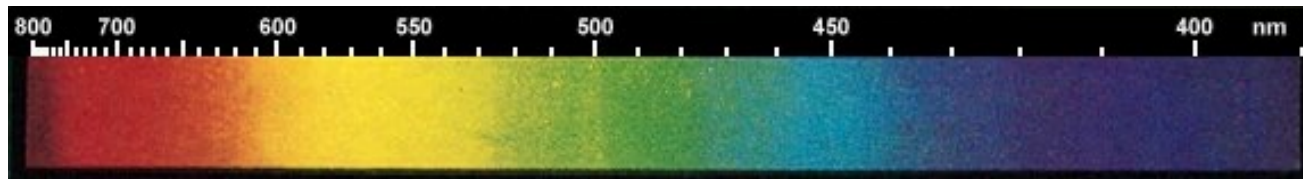
- Sensibilità dell'occhio alle varie lunghezze d'onda



- Occhio più sensibile a λ di 550 nm (luce giallo-verde)

La percezione cromatica

- Avviene quando la luce percepita contiene lunghezze d'onda in quantità diversa
- Luce *monocromatica*: caso speciale - energia di una singola lunghezza d'onda del visibile

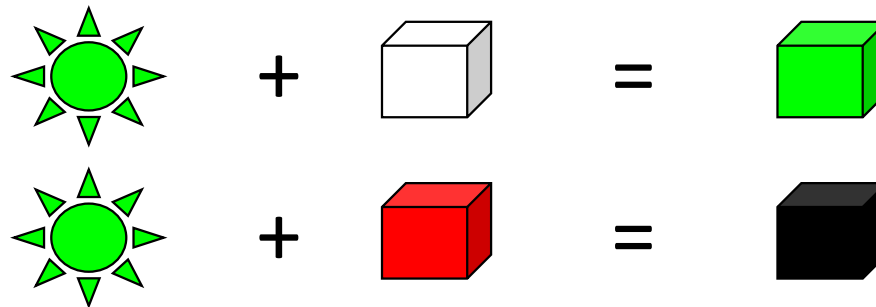


La sensazione di colore

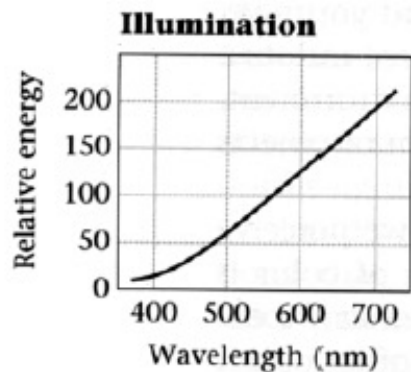
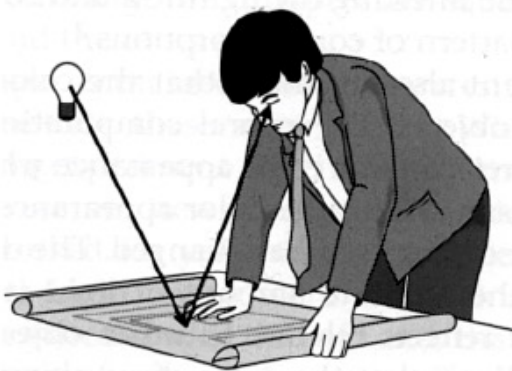
- Differenti distribuzioni spettrali producono differenti sensazioni di colore (in generale)
- Colore: attributo che permette di distinguere tra più composizioni spettrali
- Stimolo di colore = energia radiante + composizione spettrale

Segnale al sistema visivo

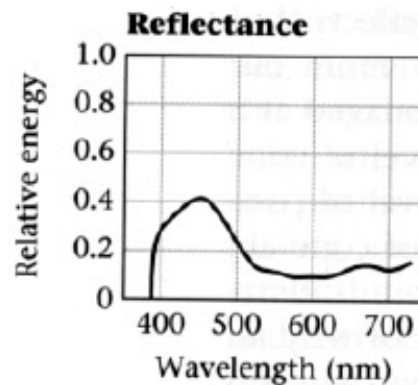
- Due contributi:
 - distribuzione delle λ della sorgente di luce
 - caratteristiche fisiche dell'oggetto
- Esempi:



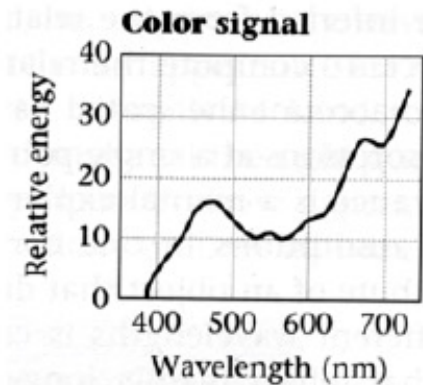
Modello semplice del colore



• *

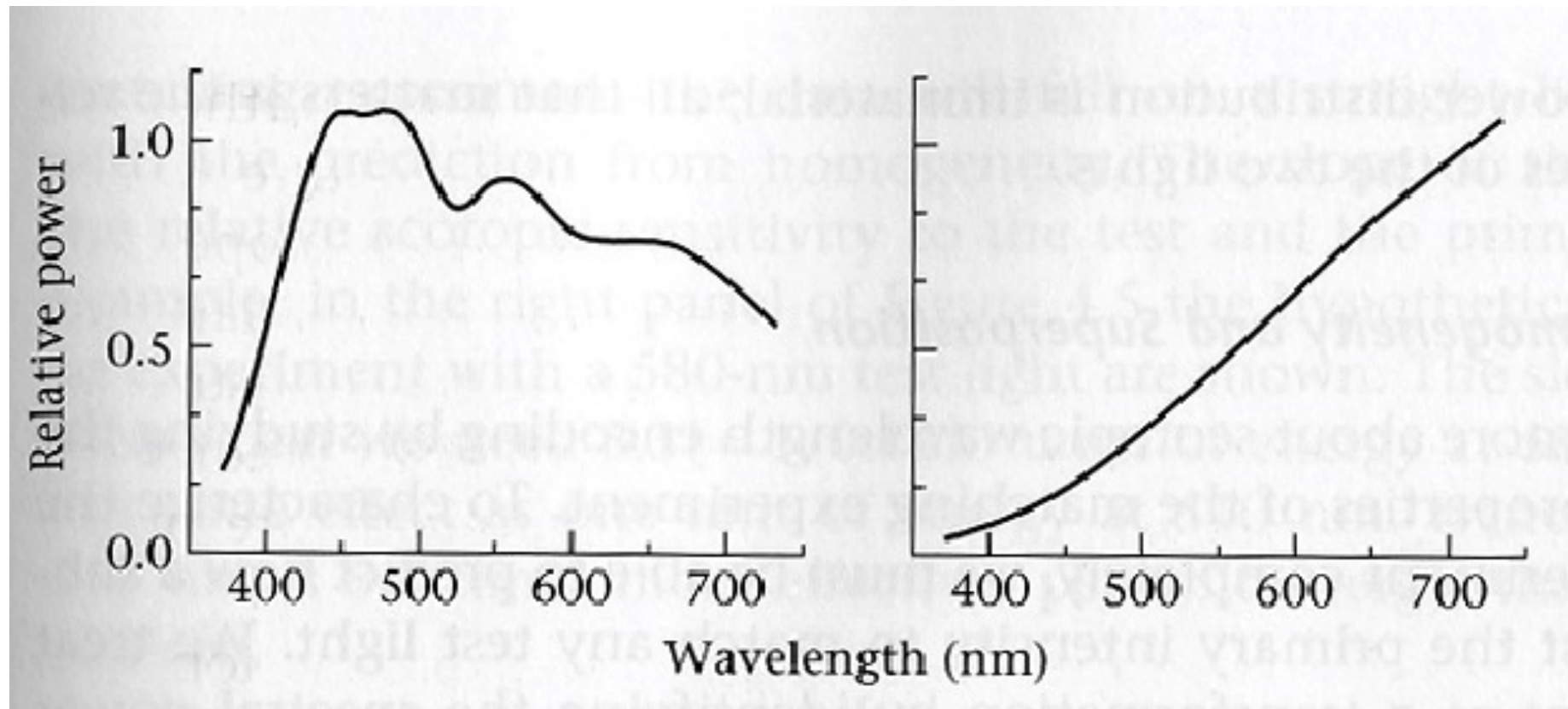


=



$$c(\lambda) = s(\lambda) e(\lambda)$$

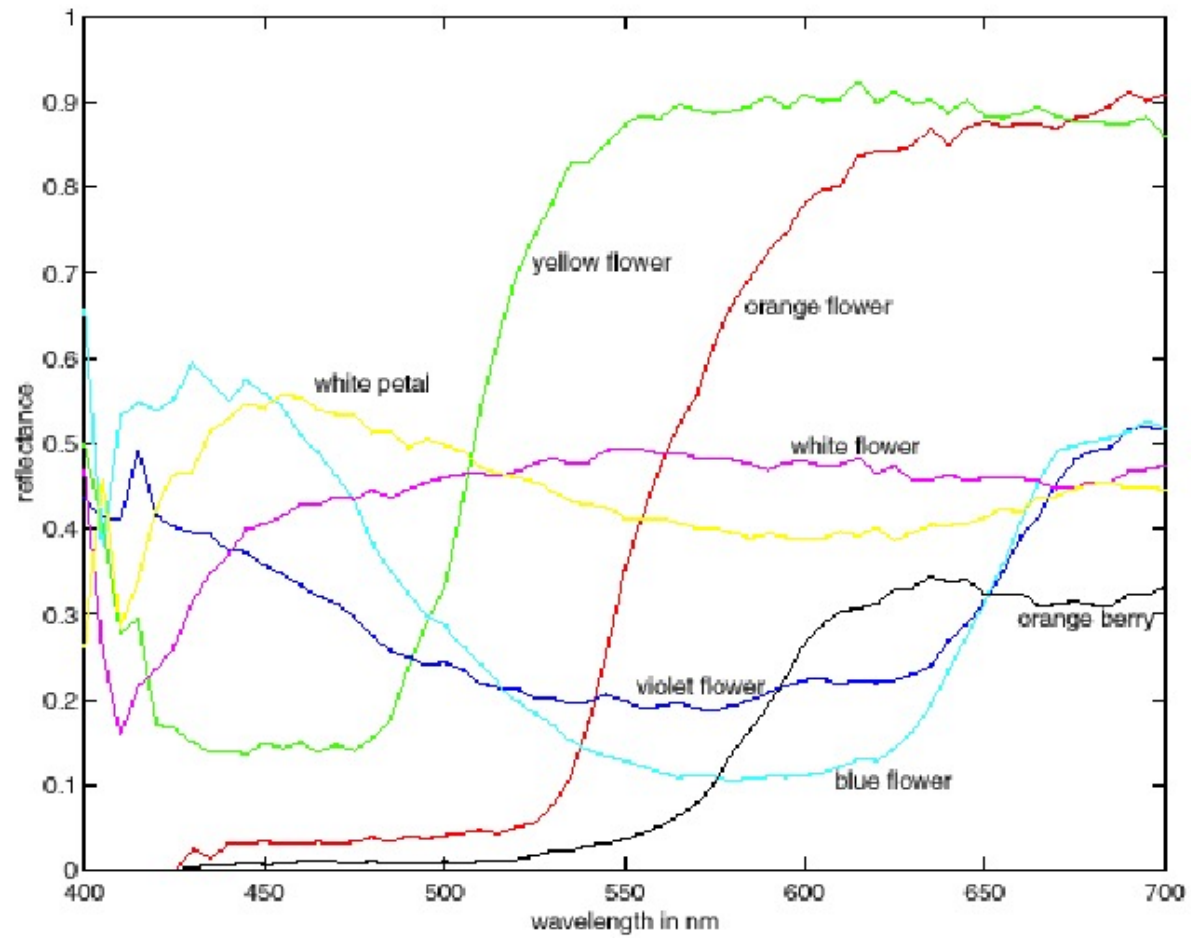
Spettri di illuminazione



Cielo blu

Lampada a tungsteno

Spettri di riflettanza



Obiettivo teorie di colore

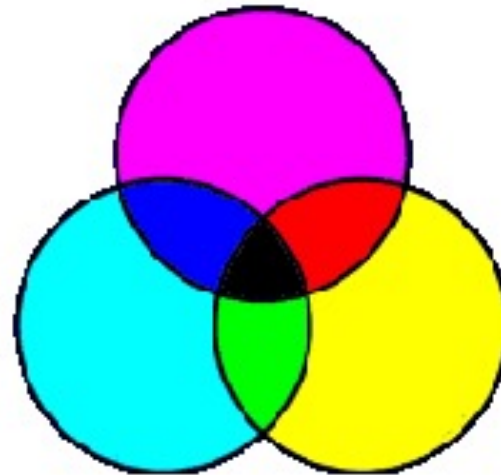
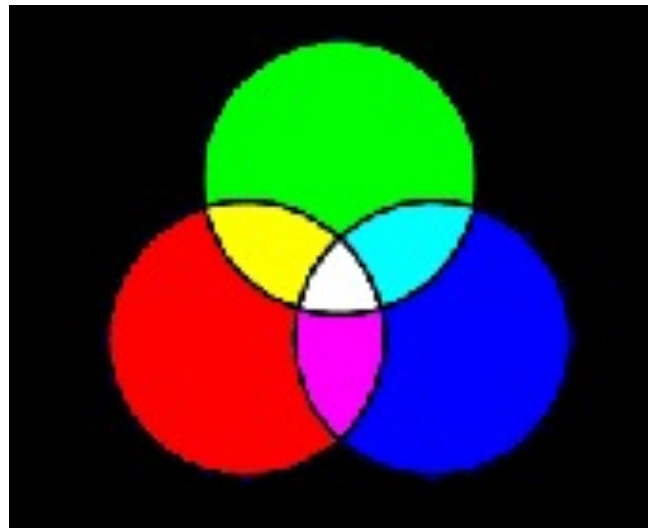
- Come si specifica un colore
- Come si fa a riprodurlo

- Identità di colori
- Quanto sono differenti due colori
- Come appare (viene percepito) un colore

Intuitivamente

- Molti colori si possono ottenere mescolando pochi colori di base
- Si sommano luci, sintesi additiva
- Si sommano pigmenti, sintesi sottrattiva

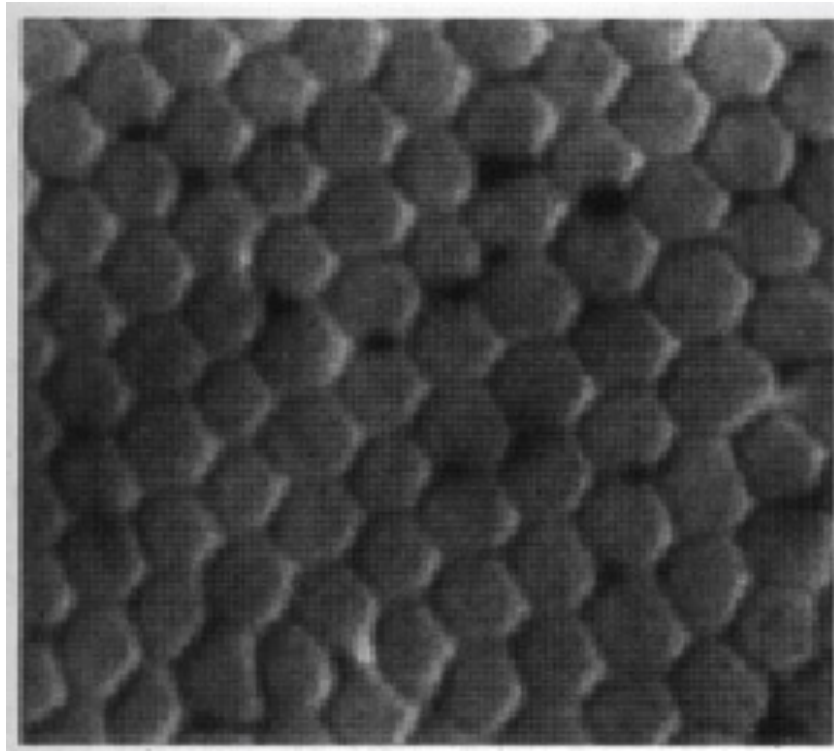
*Colori
complementari*



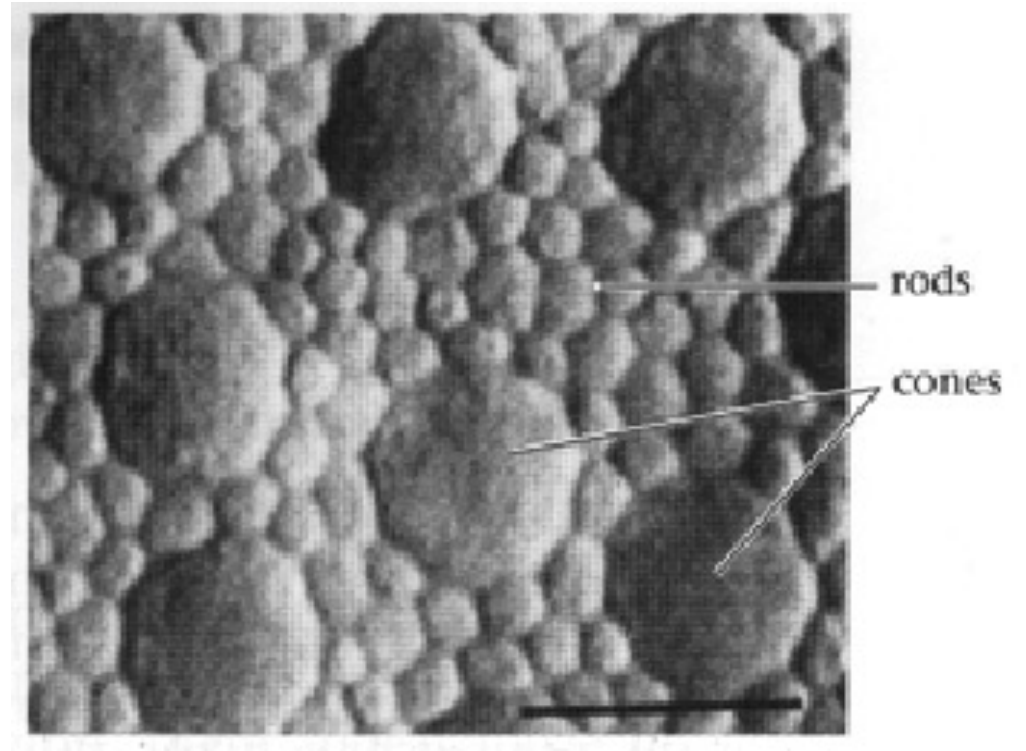
Rappresentazione del colore

- La luce emessa da un pixel è specificata dalla distribuzione spettrale di potenza $S(\lambda)$
- La retina contiene tre tipi di fotorecettori (coni)
- I coni sono sensibili ad aree diverse dello spettro (in sovrapposizione)

Fotorecettori



Fovea

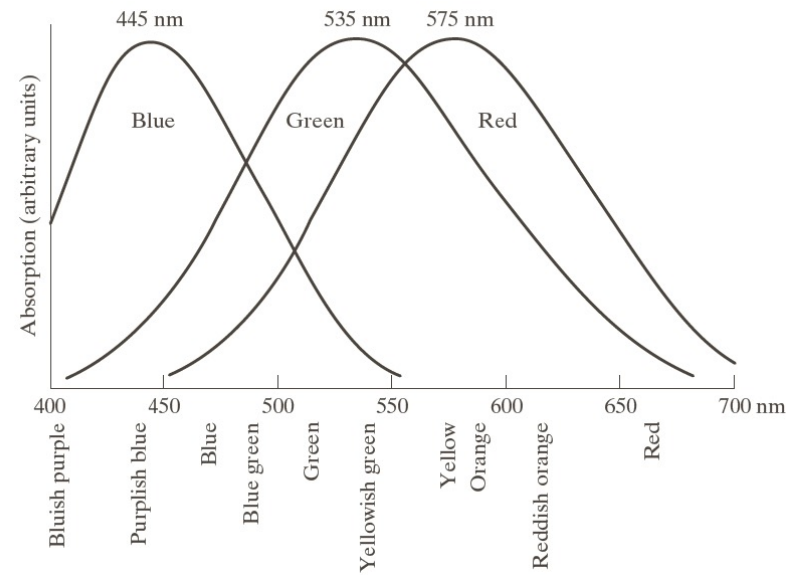


Periferia

[Frank Dellaert]

La teoria del tristimolo

- coni sensibili a λ metà spettro (circa verde) █
- coni sensibili a λ corte (circa blu) █
- coni sensibili a λ lunghe (circa rosso) █



Percezione del colore

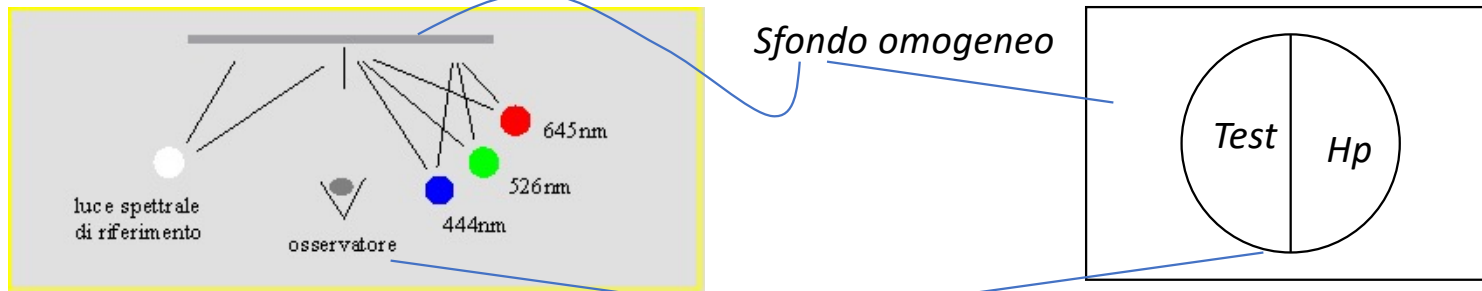
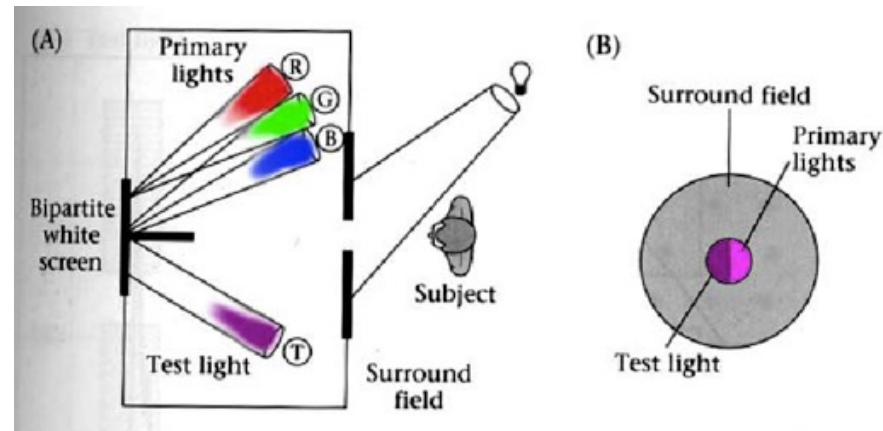
- Esseri umani come animali tricromatici
- Tre tipi di coni come filtri passa-banda non netti
- Funzionamento
 - Arriva la luce sulla retina con un certo spettro
 - Coni reagiscono in modo selettivo: risultati puri o intermedi

La colorimetria

- Un'analisi oggettiva della descrizione dei colori
- Si basa su esperimenti psicometrici

Esperimenti di Wright e Guild (1928-1931)

Base per standard industriali colore



Ampiezza del campo di vista pari a 2°

Esperimenti di color matching

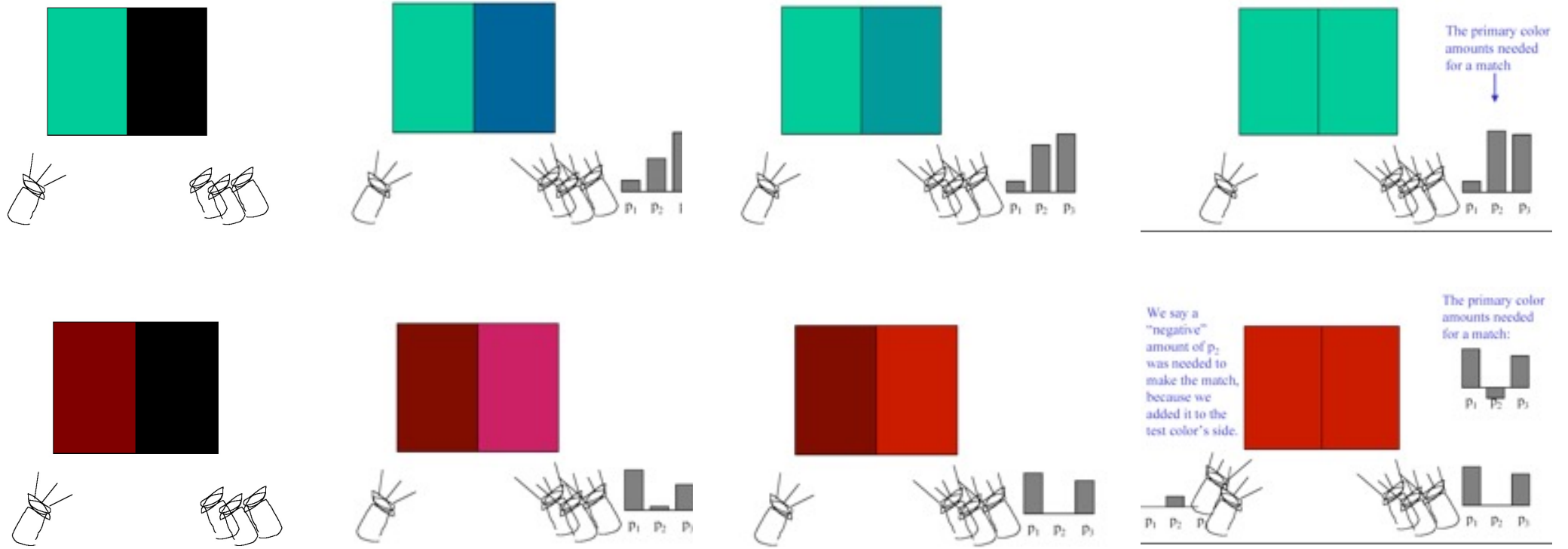


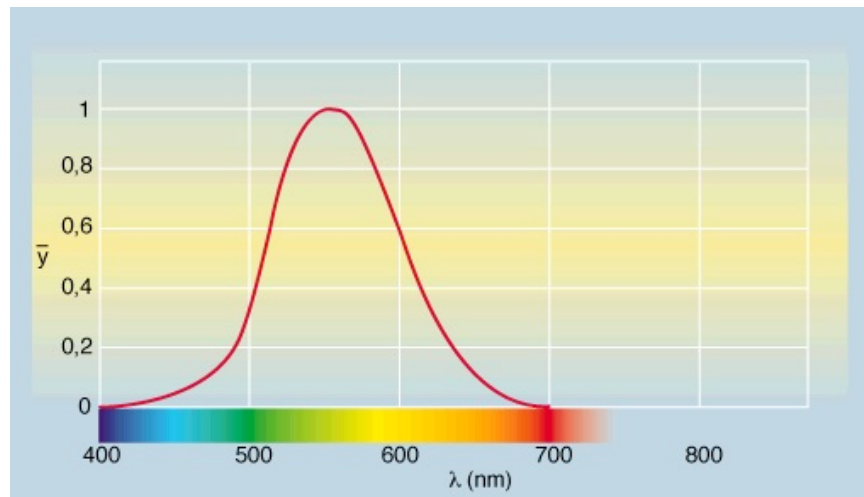
Image courtesy Bill Freeman

Risultati

- Da tre sorgenti di luce monocromatica (primari) si può riprodurre lo stimolo di riferimento
- Proporzione dei tre primari non varia con la potenza della sorgente
- Ciascun primario non deve poter essere espresso come combinazione degli altri due

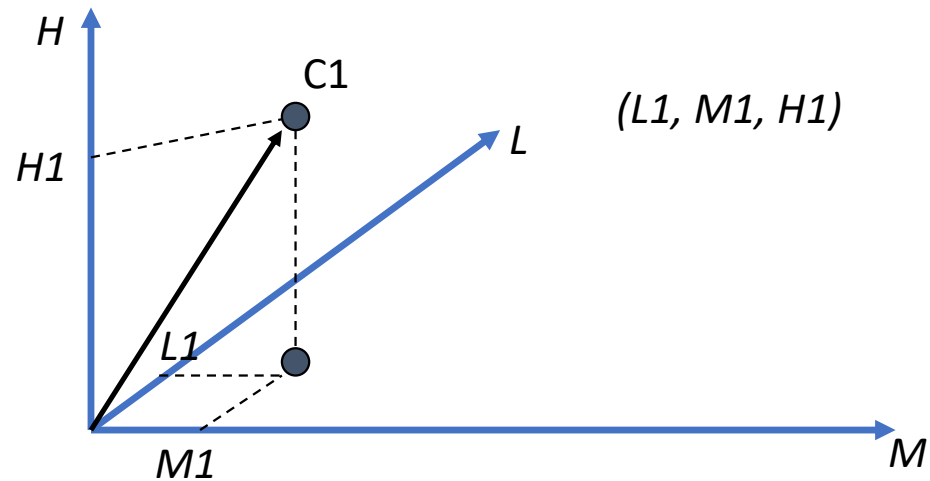
La misura Y

- $y(\lambda)$: efficienza di luminosità relativa
- Definizione completa dei colori:
 - un valore di luminanza Y +
 - due valori di cromaticanza, che specificano il colore



Modello vettoriale additivo

Una distribuzione di energia spettrale assoluta (un colore) viene rappresentata come un punto (vettore) nello spazio LMH



Conseguenze

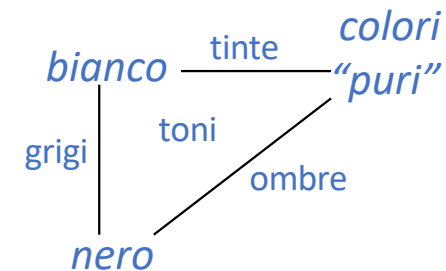
- Colore percepito solo come risposta coni
- Una miscela di due colori segue le leggi della somma di vettori
 - $C = C1 + C2$
 - C1 è specificato dal vettore (L1, M1, H1)
 - C2 è specificato dal vettore (L2, M2, H2)
 - C è specificato dal vettore (L1+L2, M1+M2, H1+H2)

Limitazioni dei sistemi (LMH)

- Non si ammettono quantità negative dei primari
- Problemi con alcuni colori in input
- Trasposizione: si aggiunge il primario all'input
 - $C + 3M = 2L + H$
 - $C = 2L - 3M + H$
 - $(2, -3, 1)$

Gli attributi degli artisti

- *tinta*: addizione di pigmento puro e pigmento bianco (diminuisce la saturazione)
- *ombra*: addizione di pigmento puro e pigmento nero (diminuisce la luminosità)
- *grigio*: addizione contemporanea di pigmento bianco e pigmento nero al pigmento puro



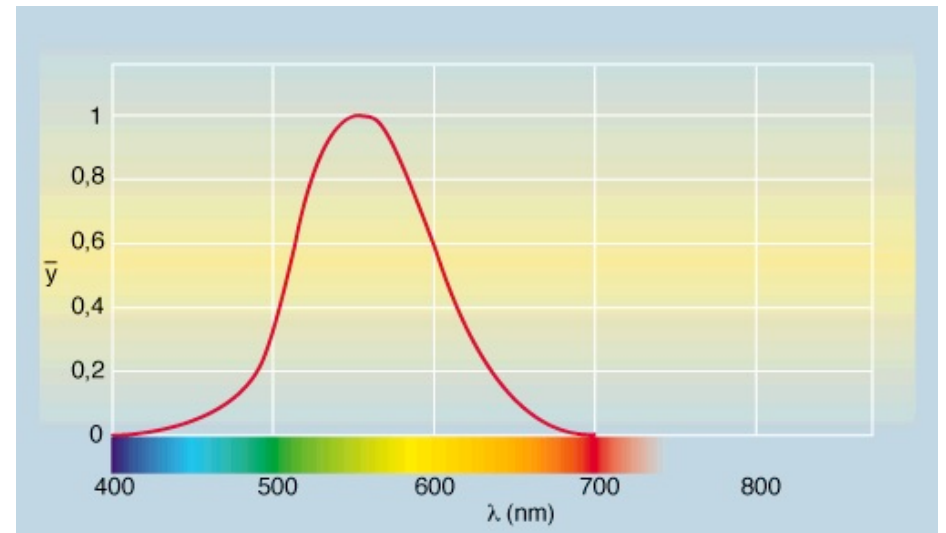
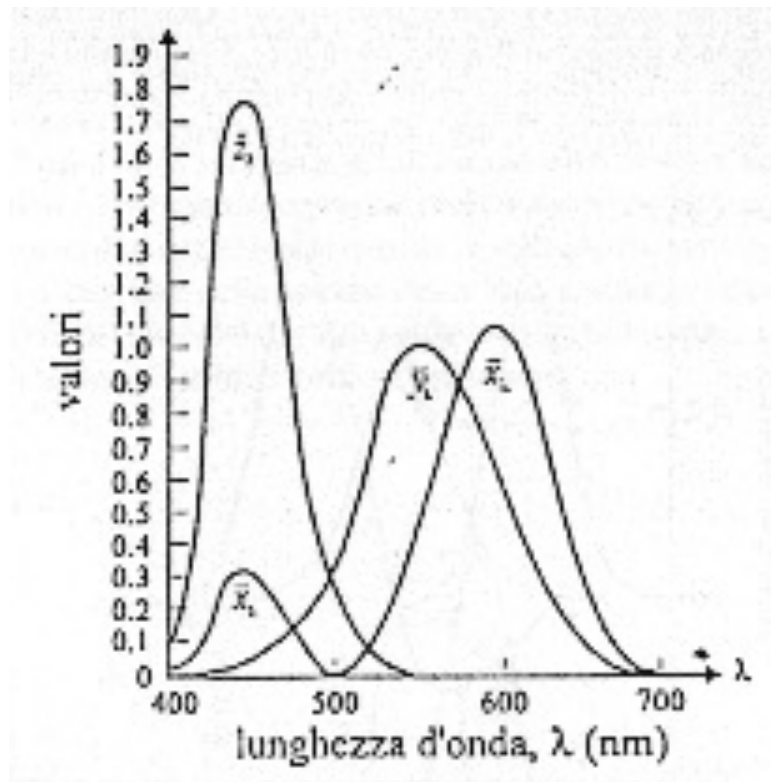
Spazio di colore

- Variabili rappresentate su assi cartesiani (descrivono spazi geometrici)
- Due gruppi
 - Spazi relativi (device dependent)
 - Spazi assoluti (device independent)

I colori primari CIE

- Sono il risultato di calcoli teorici: tre distribuzioni spettrali di energia
 - non colori visibili
 - non esistenti in natura
 - non utilizzati in sistemi di visualizzazione
- Standard internazionale
- Primario Y definito su sensibilità umana

X, Y, Z



Uso dei primari CIE

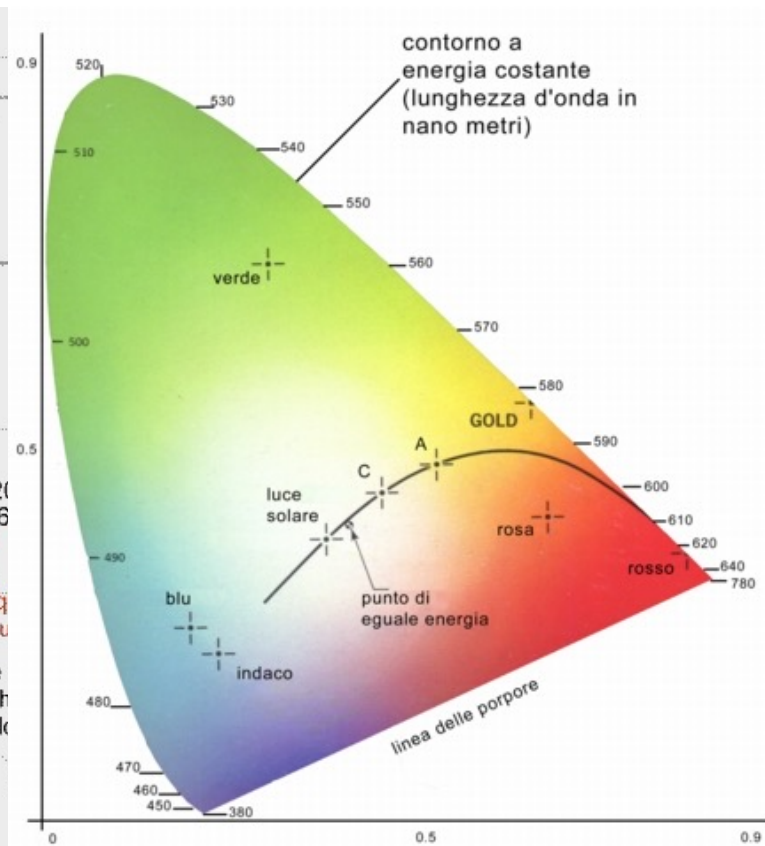
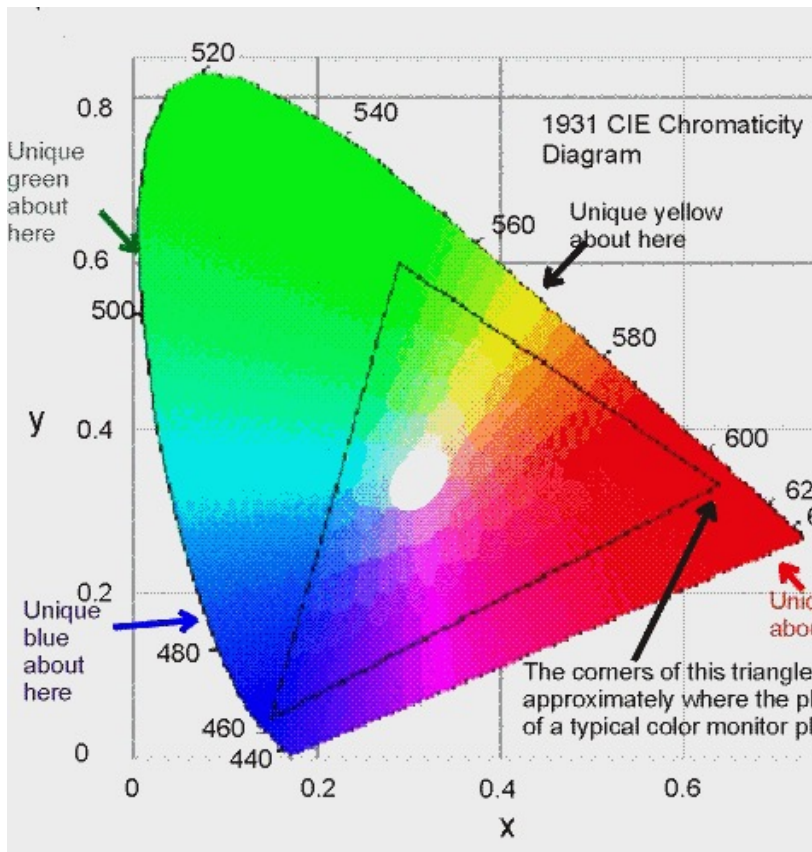
- Ogni colore è rappresentato da una tripla (X, Y, Z)

- Quantità normalizzate

$$x = X / X+Y+Z ; y = Y / X+Y+Z ; z = Z / X+Y+Z$$

- dipendenti da lunghezza d'onda dominante e saturazione
 - indipendenti dalla quantità di energia luminosa
 - $x + y + z = 1$
- In pratica, si definiscono x e y (z derivato), e Y

Il diagramma di cromaticità CIE



Tipiche gamme di colori

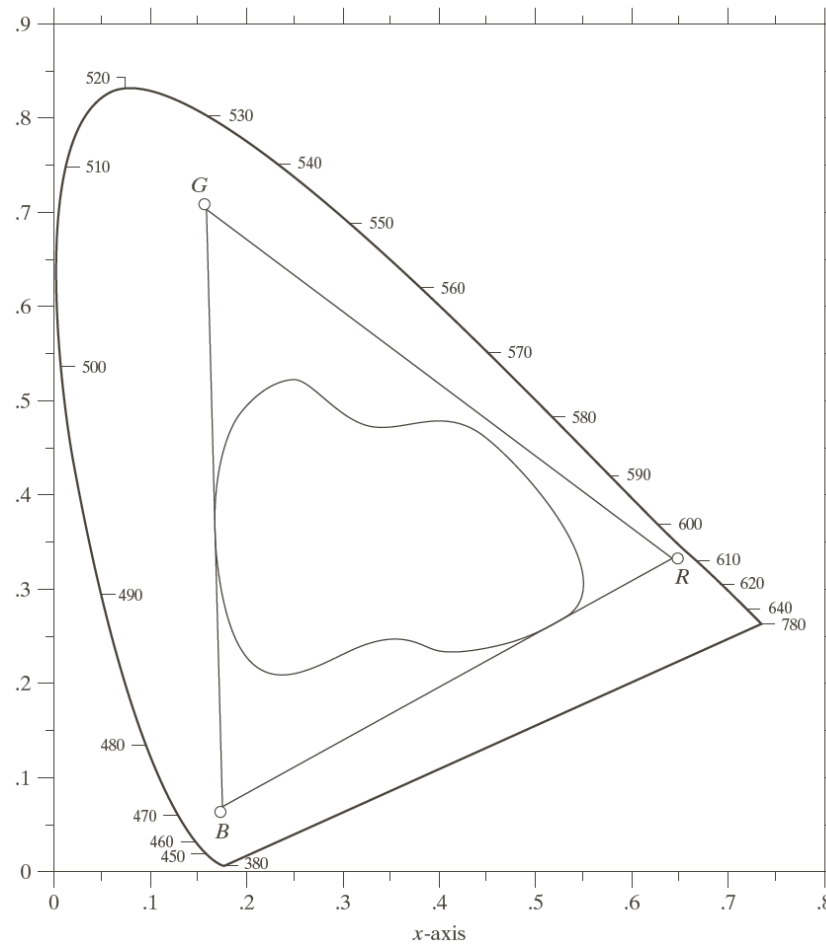


FIGURE 6.6
Typical color gamut of color monitors (triangle) and color printing devices (irregular region).

Spazi relativi

RGB

CMY

HS*

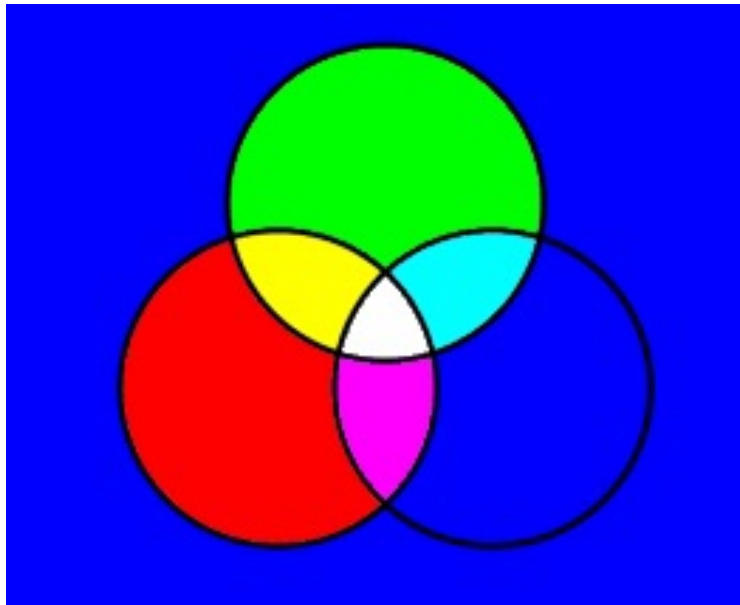
YUV, YIQ, YC_bC_r

Modelli additivi

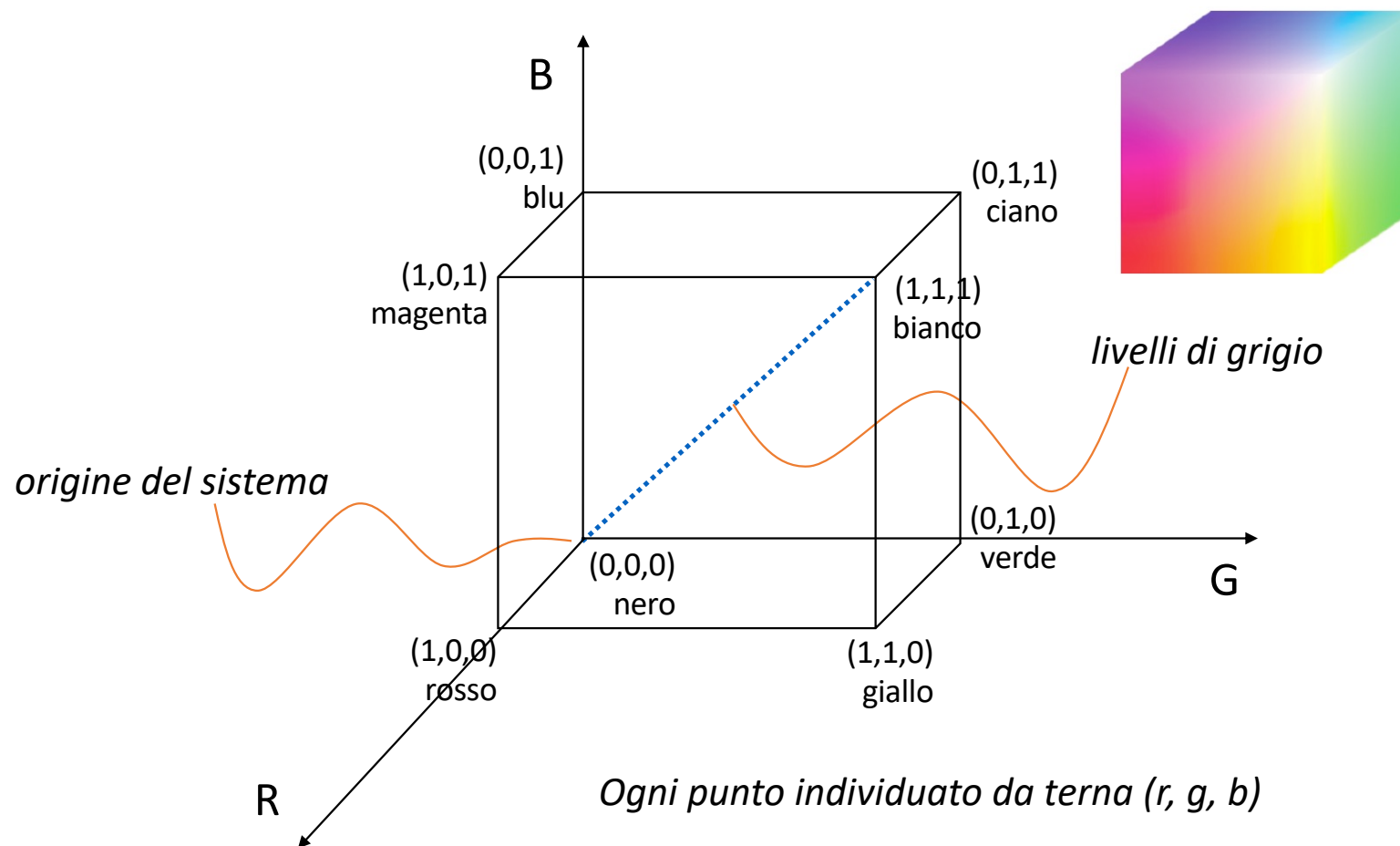
- I colori si creano aggiungendo colori al nero fino al bianco
- Per gli ambienti a emissione propria (monitor)

Spazio RGB

- Modello di tipo additivo: somma di ogni colore
- Base di tre colori: Red, Green, Blue



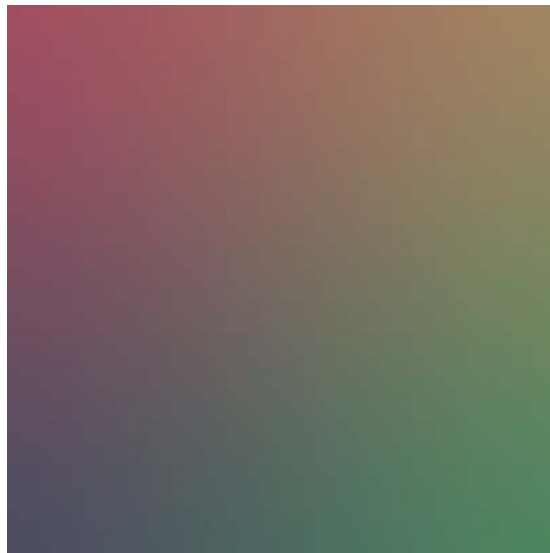
Spazio geometrico RGB



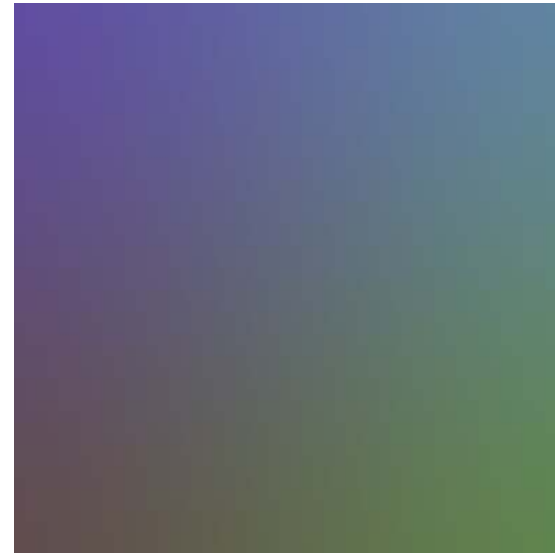
Spazio dei colori nelle immagini digitali

- Non valori continui per le tre componenti, ma discreti
- Esempio: un byte per componente ($3 \times 8 \text{ bit} = 24 \text{ bit}$)
- Modalità TrueColor

Esempi di sottospazio (piani del cubo)



Rosso costante (=128)



Blu costante (= 128)

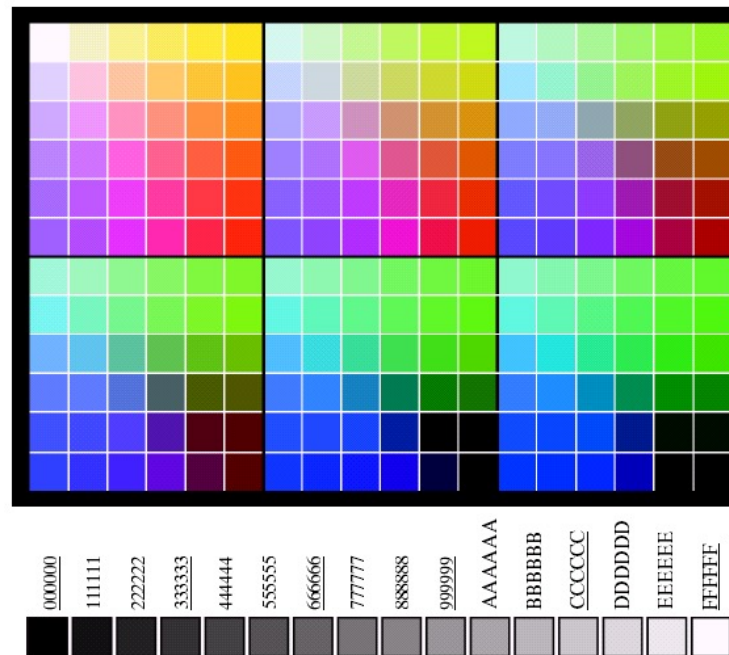
Colori RGB sicuri e colori browser sicuri

$$6^3=216$$

Number System	Color Equivalents					
Hex	00	33	66	99	CC	FF
Decimal	0	51	102	153	204	255

TABLE 6.1

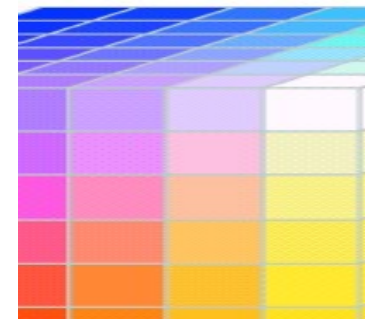
Valid values of each RGB component in a safe color.



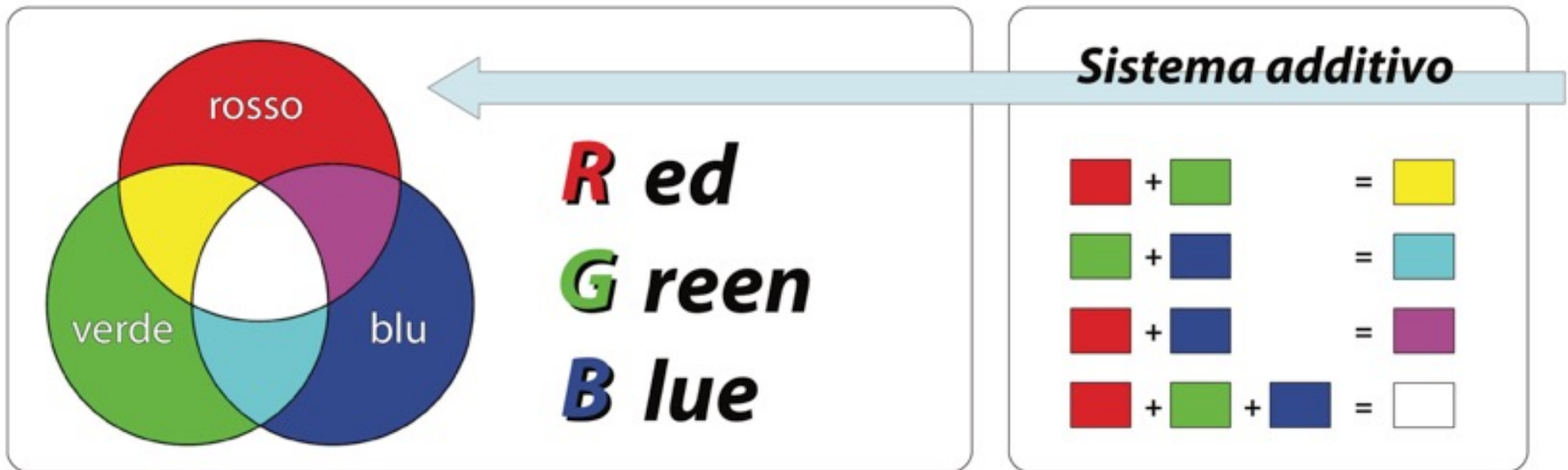
a
b

FIGURE 6.10

(a) The 216 safe RGB colors.
(b) All the grays in the 256-color RGB system (grays that are part of the safe color group are shown underlined).



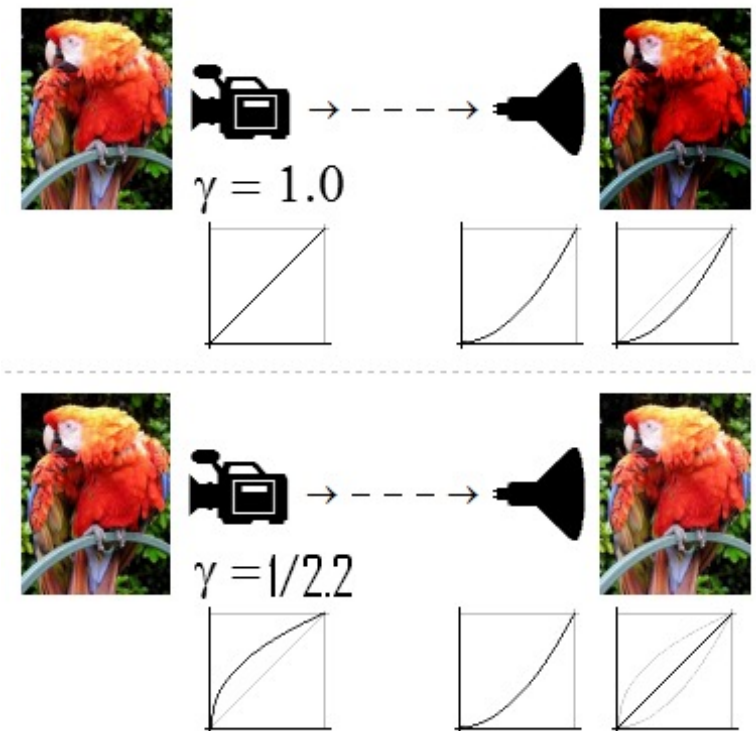
RGB: riassumendo



spazio colore sRGB

- Standard creato da HP + Microsoft (1996)
- Per schermi, stampanti, e Internet
- Primari ITU-R BT.709-5
 - Monitor da studio e HDTV
 - correzione gamma (CRT, circa 2,2)

*non linearità della relazione tra
corrente e tensione
dei fasci elettronici dei CRT*



[Wikipedia]

Gamma di sRGB

Primari ITU-R BT.709

Red: $x = 0.64$; $y = 0.33$

Green: $x = 0.30$; $y = 0.60$

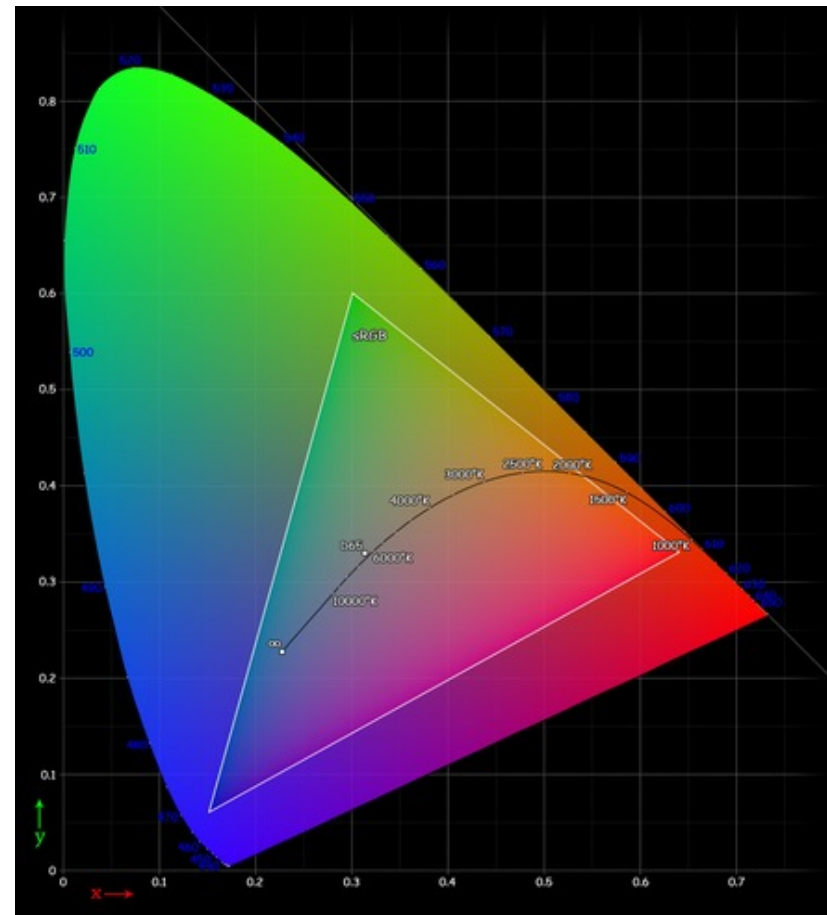
Blue: $x = 0.15$; $y = 0.06$

White: $x = 0.3127$; $y = 0.3290$

AdobeRGB:

Red e Blue come sRGB

Green come NTSC

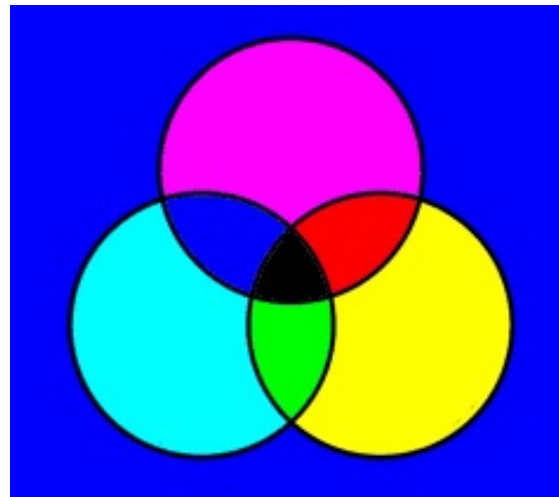


Modelli sottrattivi

- Colori primari sottratti al bianco per ottenere tutti i colori fino al nero
- Gli ambienti sottrattivi sono quelli riflettenti di natura (un'immagine a colori su carta)

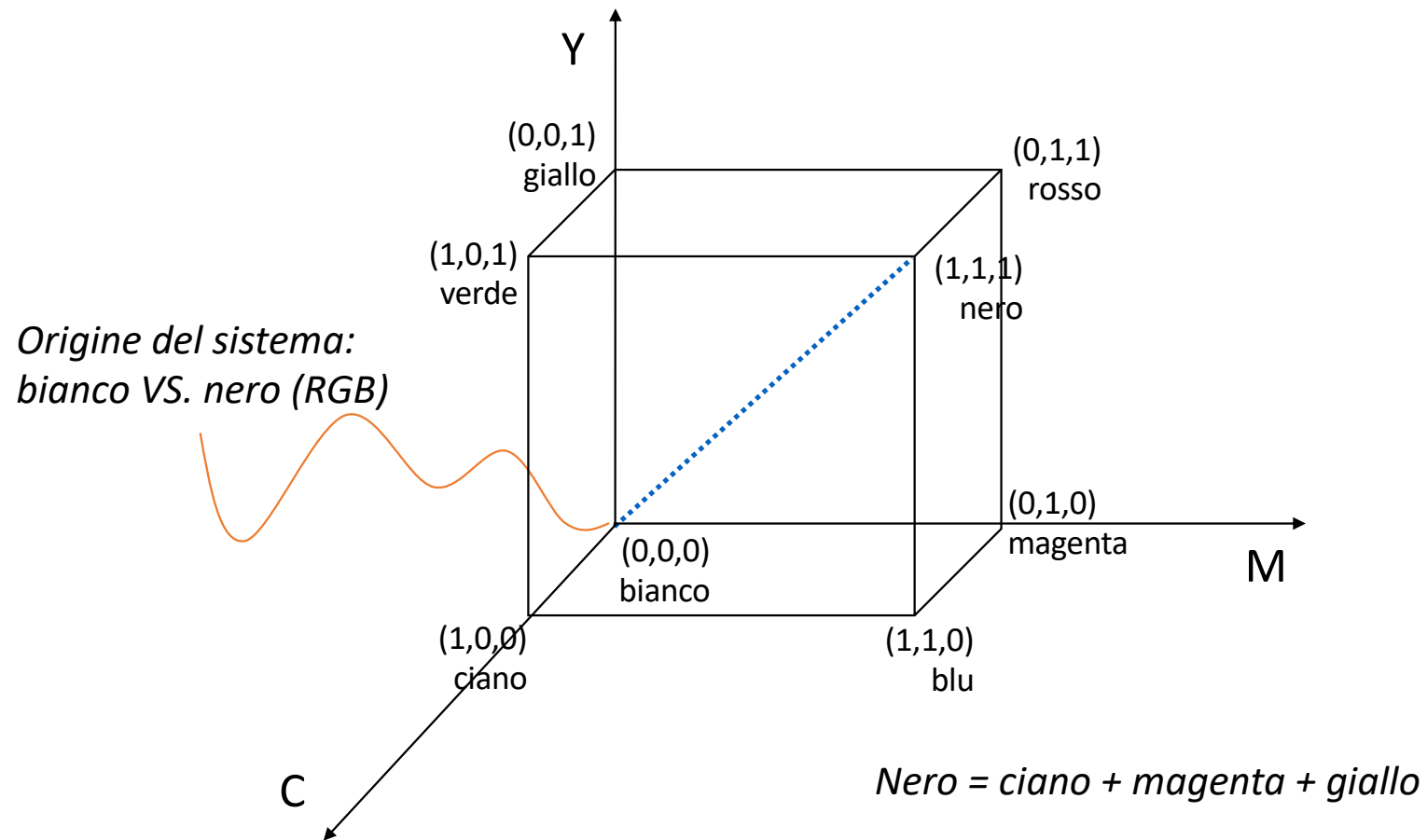
Lo spazio CMY

- Modello duale del modello RGB
 - componenti sottrattive rispetto alla luce bianca
 - stampa (colore di base bianco - foglio di carta)
- Ciano, magenta, giallo complementari di rosso, verde e blu



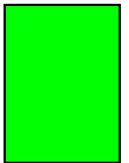
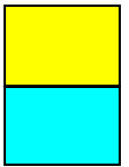
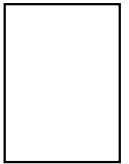
*Colori duali:
ciano - rosso
magenta - verde
giallo - blu*

Spazio geometrico CMY

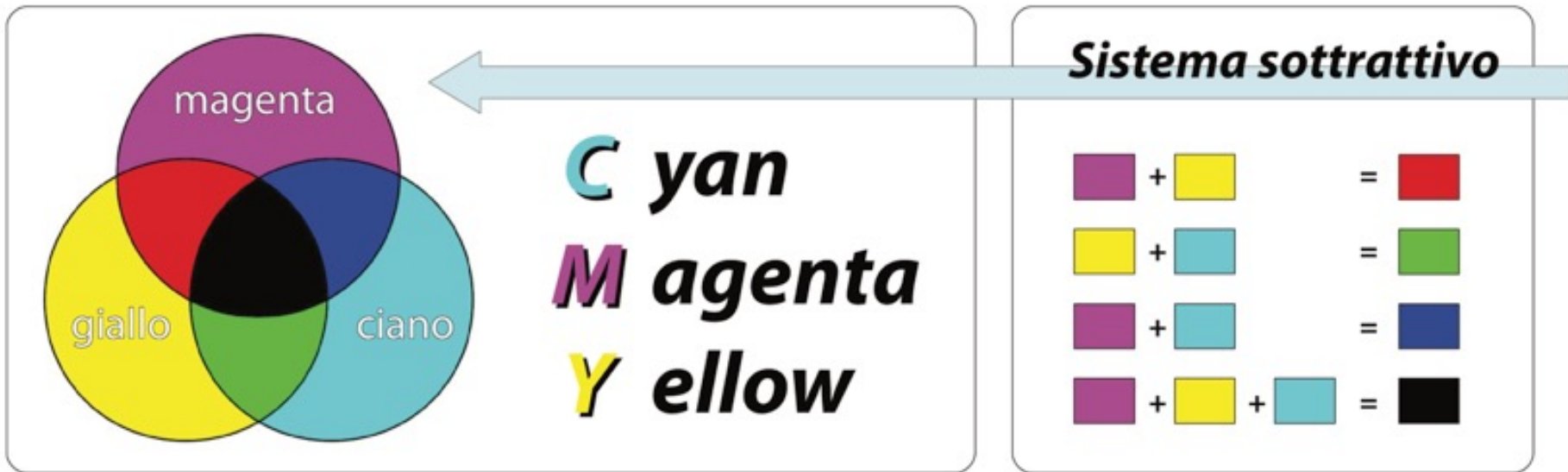


La stampa

- Colore di sfondo = foglio di carta (es. bianco)
- Inchiostri sottraggono componenti alla luce riflessa (C sottrae R, M sottrae G, Y sottrae B)
- Colore riflesso (es. $G = W - R - B = W + C + Y$)
 - totale (es. bianco $W = R + G + B$)
 - meno assorbimenti (es. $C + Y$ assorbe R e B)



Riassumendo CMY



Relazioni CMY - RGB

- Un vettore indica un certo colore
- Conversioni di sistema:
 - vettore unitario rappresenta il bianco in RGB
 - vettore unitario rappresenta nero in CMY

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 255 \\ 255 \\ 255 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} C \\ M \\ Y \end{pmatrix}$$

Problemi da RGB a CMY

- Differenza tra colori rappresentabili su monitor e stampante (ma anche tra monitor differenti)
- Differenza sulle caratteristiche del supporto della stampa (carta diversa per assorbimento, tessitura, ruvidezza, ...)

Problemi di RGB e CMY

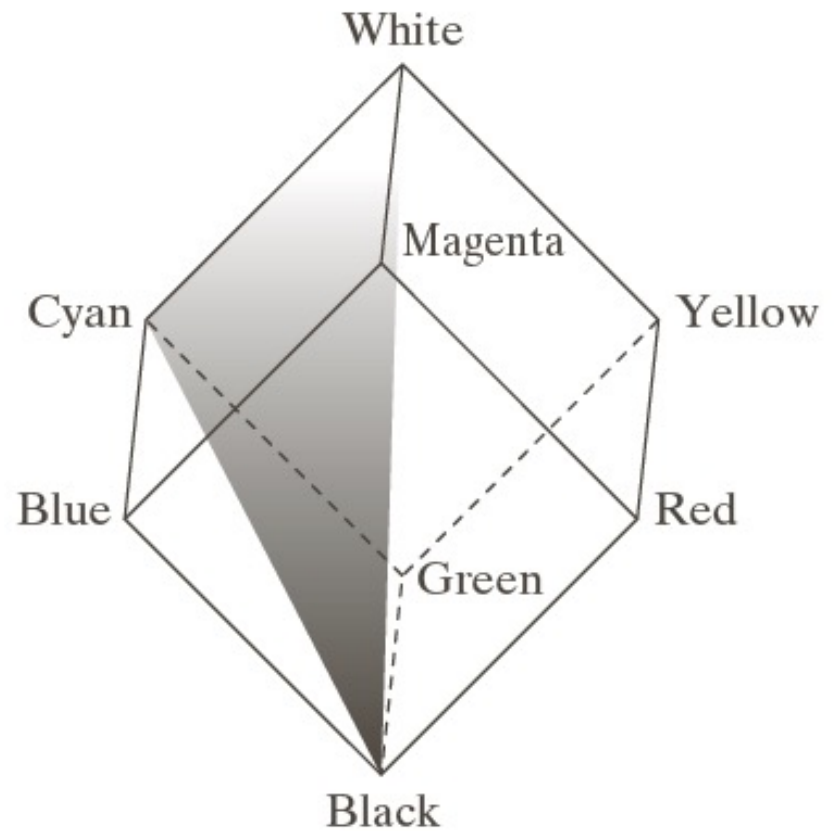
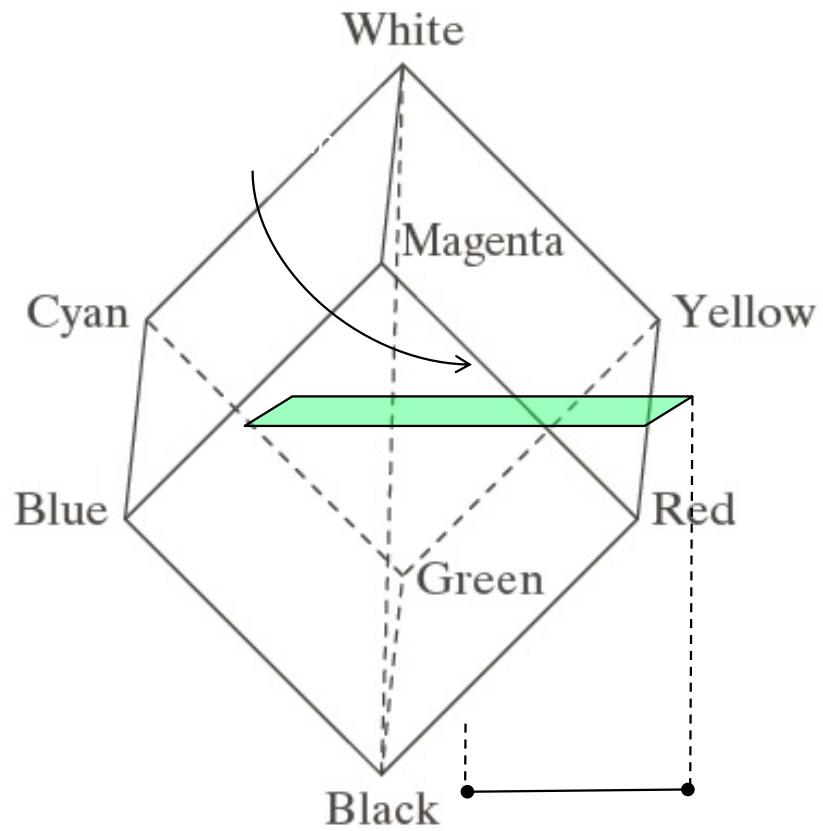
- Come si sfuma un colore per passare a un altro?
- Come si visualizza all'interno del cubo una curva?
 - la curva rappresenta una certa gamma di colori
 - esempio: bianco, celeste, azzurro, blu, blu intenso, nero

- Come si mettono in relazione i sistemi con le proprietà psicofisiche?

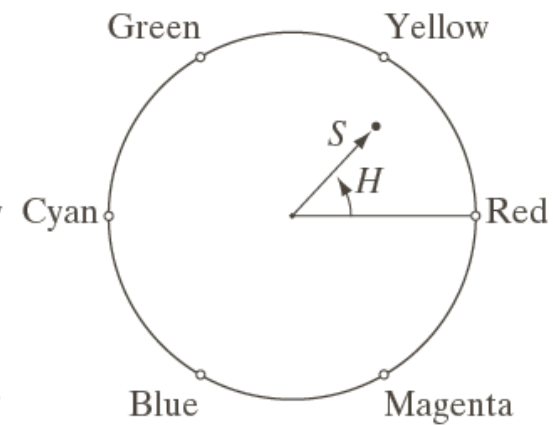
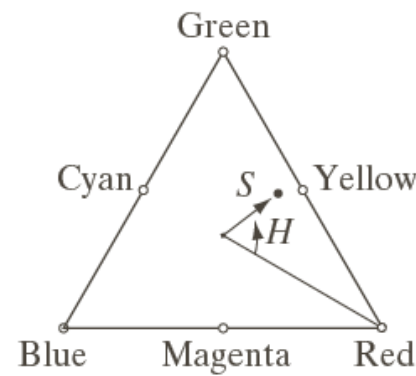
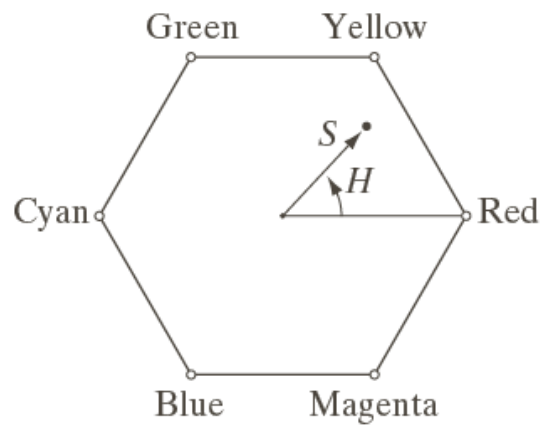
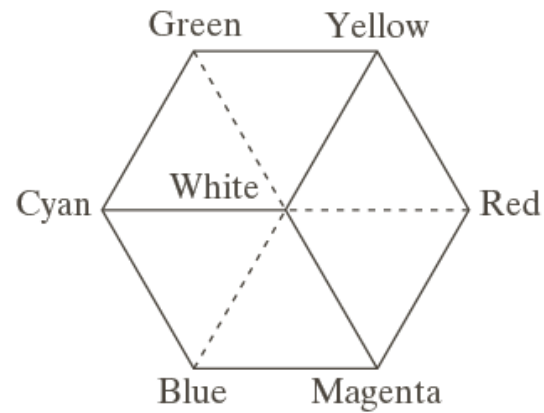
Il Modello HSI

- Modello intuitivo/percettivo dei colori
- Hue (colore, tinta, tonalità)
- Saturation (saturazione): quantità di grigio contenuta in un colore
- Intensità: luce emessa

Relazione concettuale tra RGB e HSI

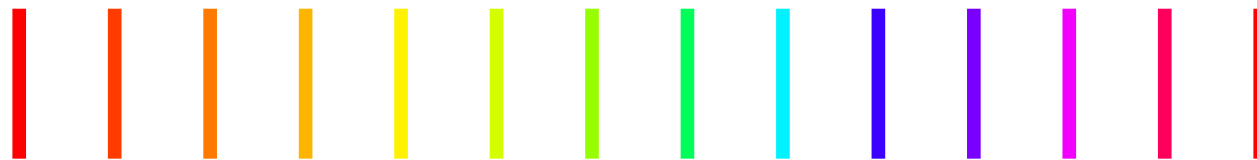


Tonalità e saturazione in HSI



Tinta, tonalità (hue)

- parametro discriminatore (dimensione) che permette di distinguere il “colore” del colore
- scala di percezione (parte da e ritorna al rosso)



Saturazione (saturation)

- distanza di un colore dalla percezione acromatica con medesima luminosità
- misura del grado di diluizione del colore con il bianco (% colore puro + luce bianca)

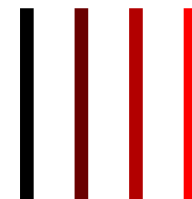
Esempi:

- colore puro (rosso) saturato al 100%
- aggiungendo bianco e nero, la saturazione decresce
- luce acromatica saturata allo 0%

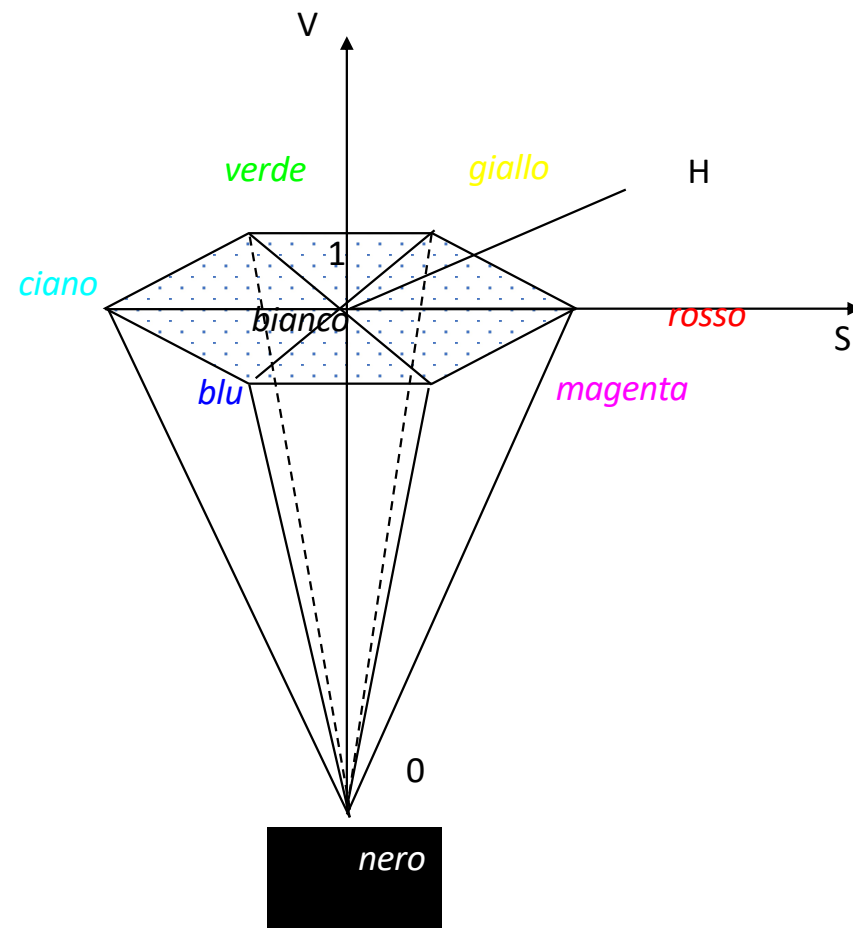


Intensità

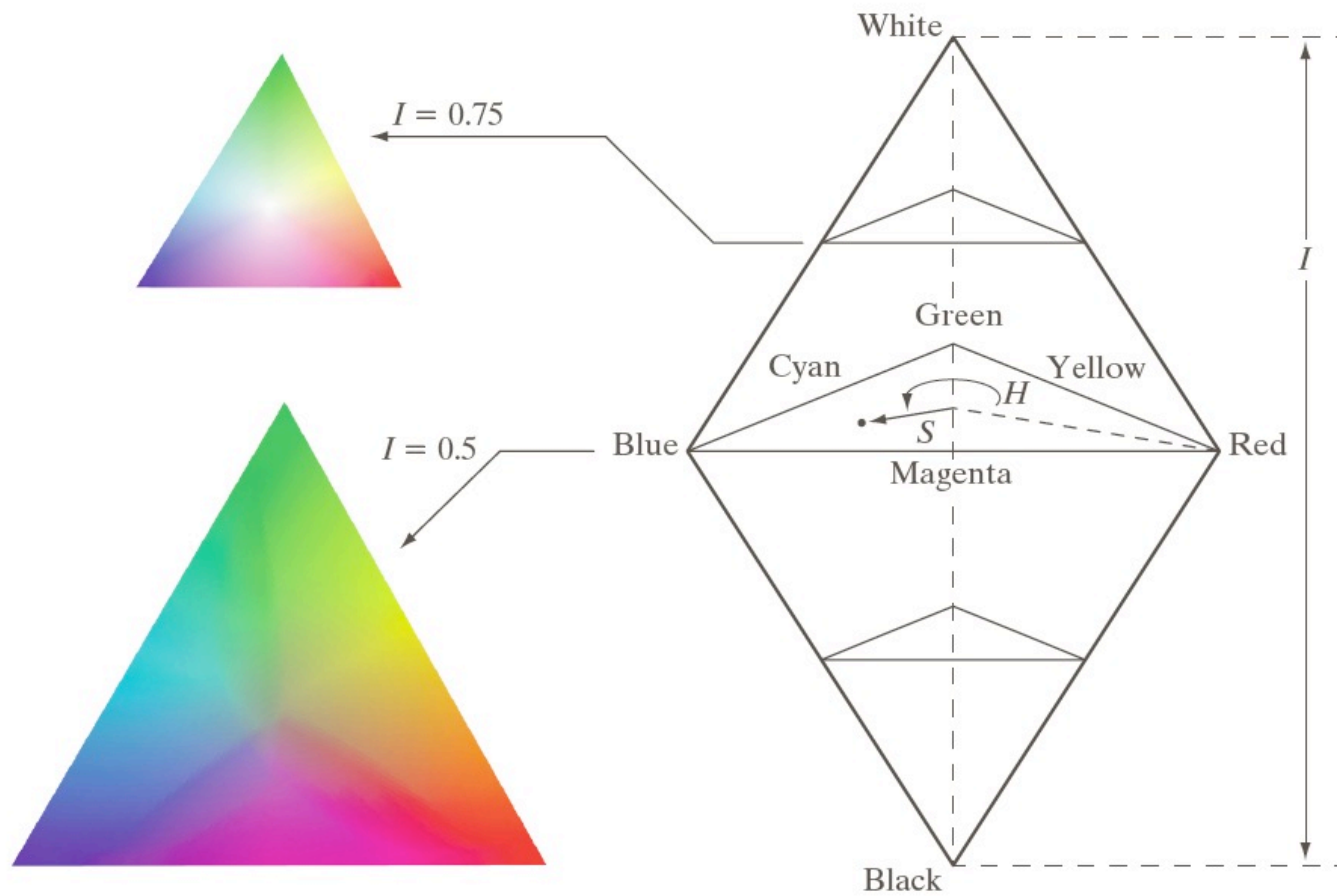
- scala di percezione della somiglianza del colore ad uno di una serie di colori acromatici, livelli di grigio (da molto scuro a molto chiaro)
- luminosità (attributo dell'oggetto riflettente) VS brillantezza (attributo dell'illuminazione in cui viene visto l'oggetto)



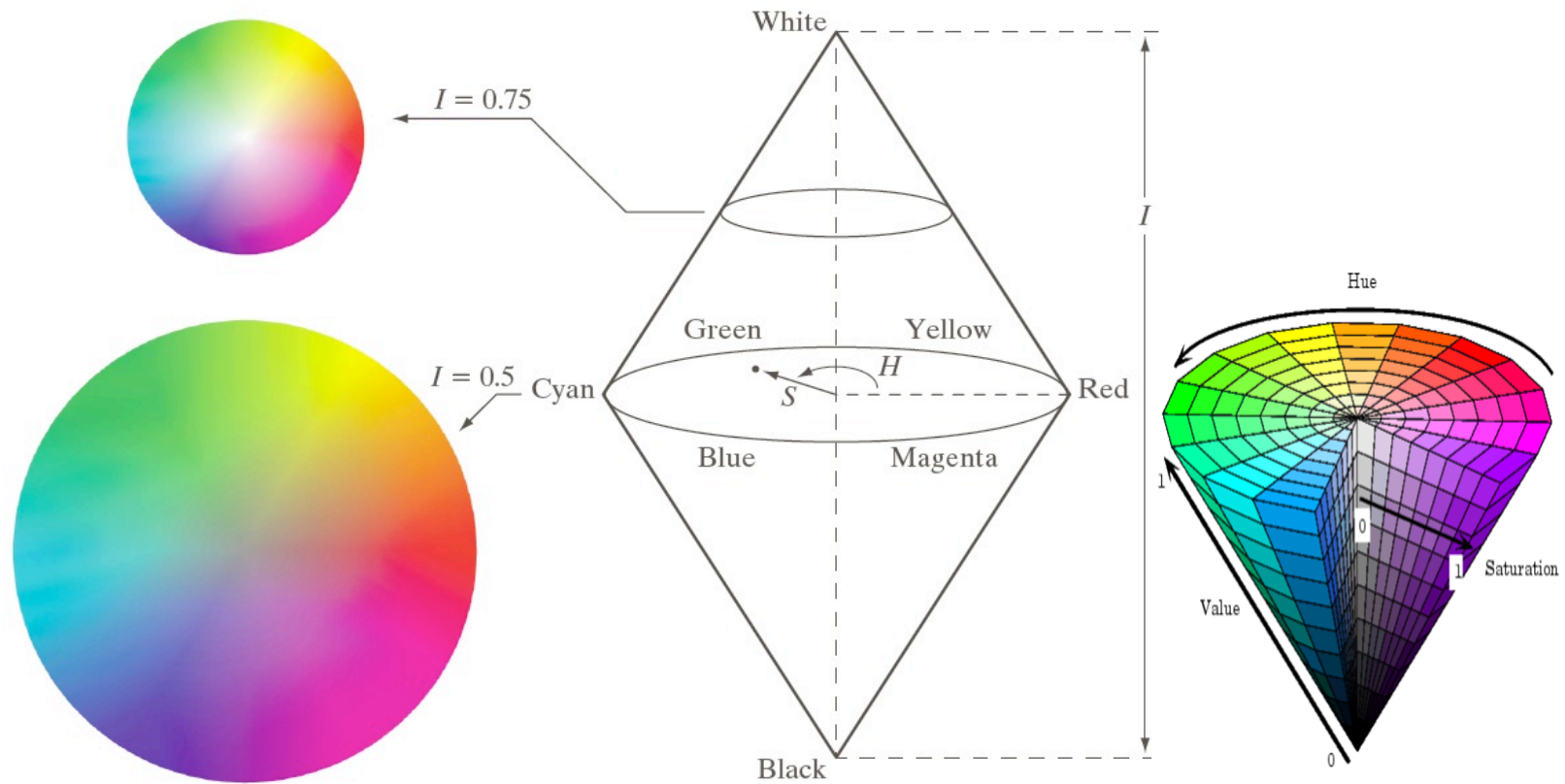
Il sistema HSI



HSI: piano colore triangolare



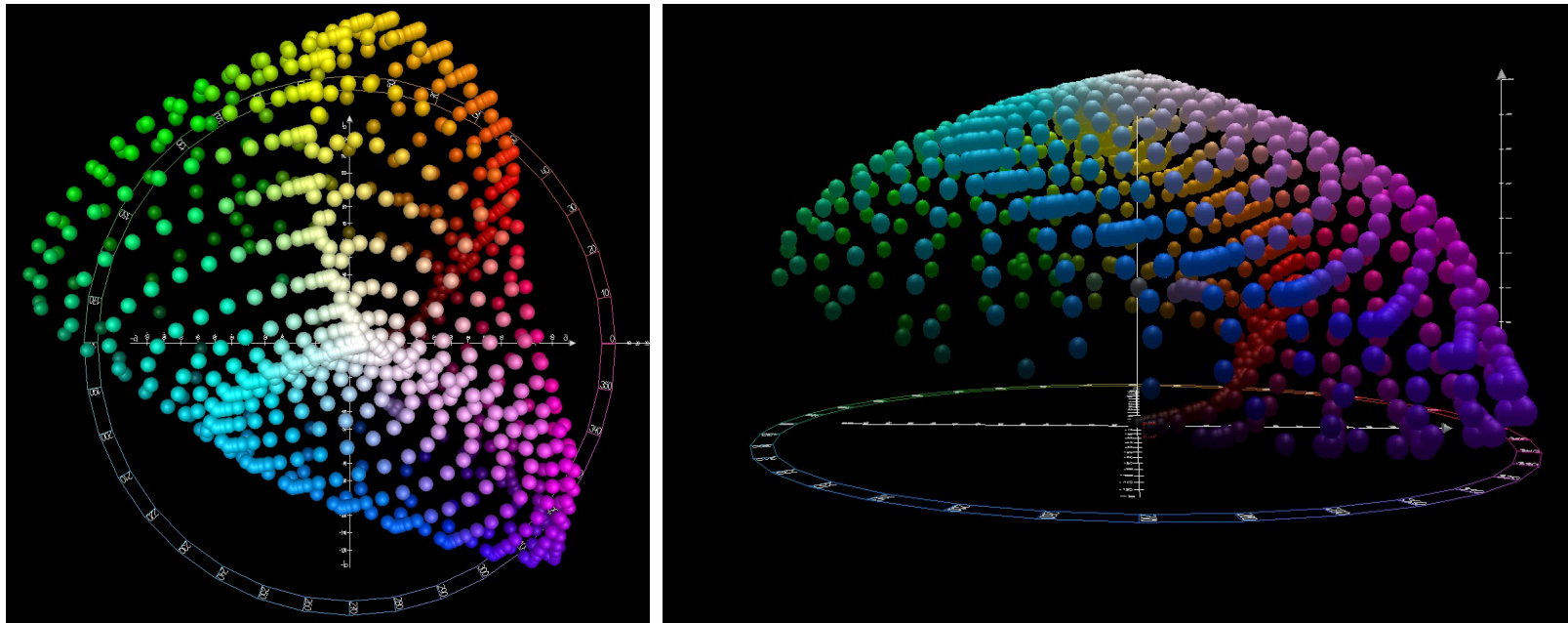
HSI: piano colore circolare



Spazio colori CIELAB

- Colore come tre valori
 - L^* luminosità (0, black – 100 white)
 - a^* *chroma* (-1, green — +1, red)
 - b^* *chroma* (-1, blue — +1, yellow).
- Criterio: ammontare di variazione numerica lungo gli assi = cambiamento percepito visivamente

CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) color space (CIELAB)



By Holger kkk Everding - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38366968>

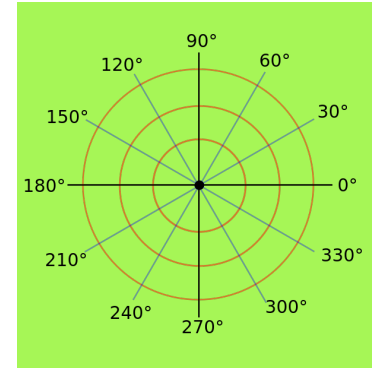
CIELAB usi

- Intenzione: spazio che si può calcolare con formule semplici dallo spazio CIEXYZ ma percettivamente uniforme per la riproduzione con valori limitati (es. 0-255)
- Esempio d'uso: nella conversione RGB – CMYK per la stampa (gamma CIELAB include gamme RGB e CMYK)

CIELAB colori

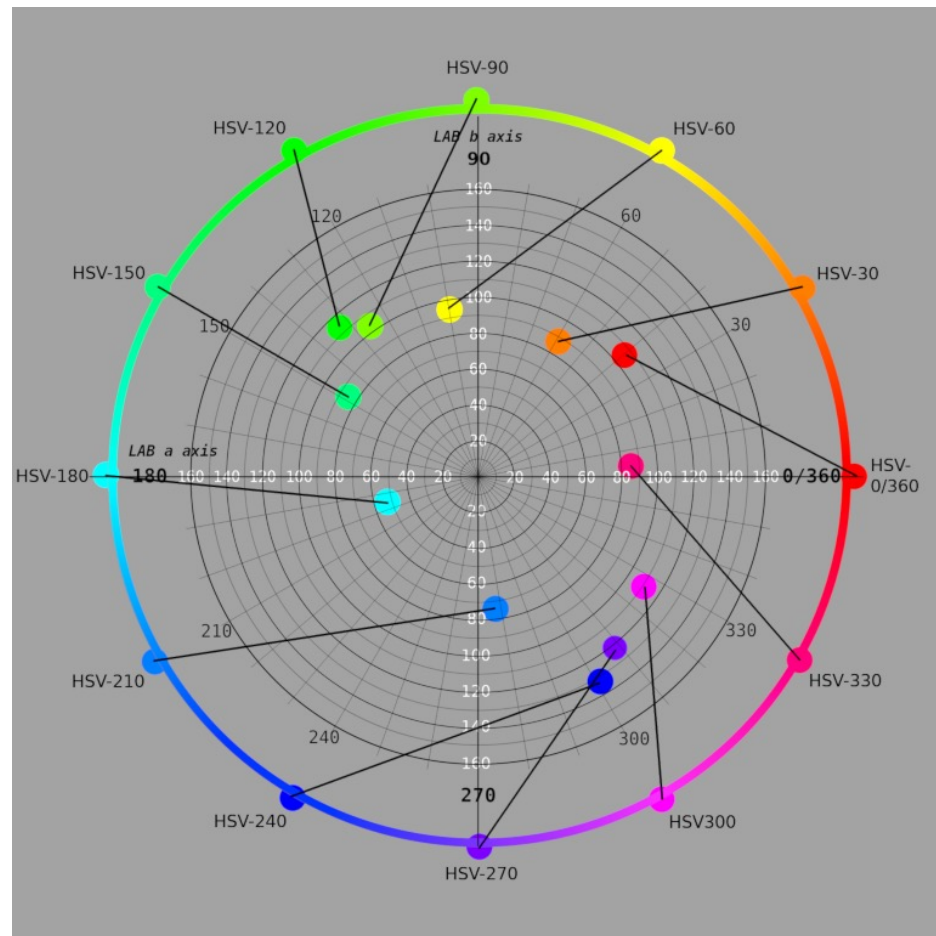
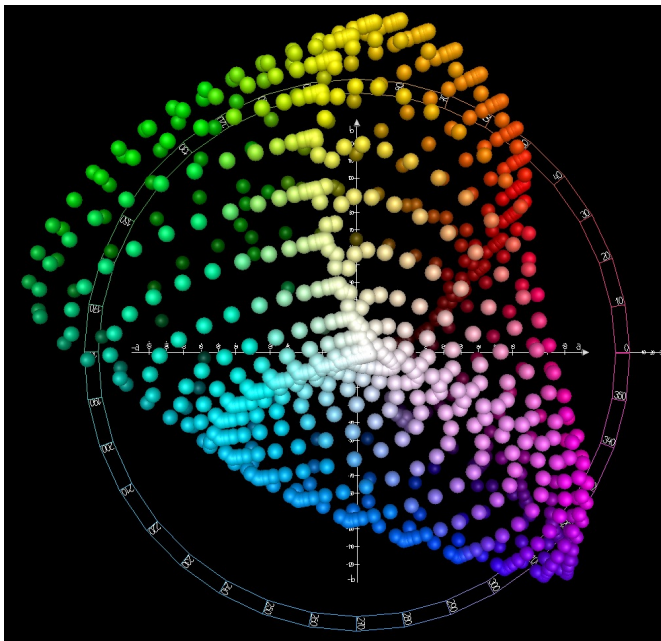
- Colori assoluti con punto di bianco fissato (es. illuminante CIE standard D50)
- In Adobe Photoshop, image editing in "Lab mode" = CIELAB D50

L^*C^*h



- Simile a CIELAB
- preferito da alcuni esperti perché correla meglio con la percezione umana (vantaggi HSV)
- Stesso diagramma dello spazio $L^*a^*b^*$ ma con coordinate polari
- L^* = lightness, C^* = chroma, h = hue angle
- C^* = distanza da asse L^* (0 al centro)
- hue angle parte da asse $+a^*$ (e.g., $0^\circ = +a^*$ = red, $90^\circ = +b^*$ = yellow)

Confronto tra le ruote LCh - HSV



Spazi YUV, YIQ, YC_bC_r

- Standard nella trasmissione televisiva a colori per compatibilità con ricevitori B/N
- Separano luminanza (Y) e cromaticità (U e V, I e Q, C_b e C_r)
- YUV per PAL, YIQ per NTSC, YC_bC_r digitale

Lo spazio YUV

- Componente Y ($0,59xG + 0,3xR + 0,11xB$)
 - colore primario che segue la curva di risposta dell'occhio alla luminosità
 - nei sistemi B/N tale componente si visualizza come segnale di luminanza
- Componenti $U=B-Y$ (dal blu al giallo), $V=M-C$ (dal magenta al ciano)

Conversione tra YIQ e RGB

- Spazio YIQ (NTSC) non cartesiano
- Gli assi formano un poliedro convesso
- Matrice di conversione:

$$\begin{pmatrix} Y \\ I \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.30 & 0.59 & 0.11 \\ 0.60 & -0.28 & -0.32 \\ 0.21 & -0.52 & 0.31 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Capacità del sistema visivo umano

- Distingue approssimativamente 350 colori
- Differenze distinguibili sulla TINTA
 - λ dominante distante circa 1 nm
 - Agli estremi dello spettro circa 10 nm
 - Circa 128 tinte
- Differenze distinguibili sulla SATURAZIONE
 - Capacità di distinzione più limitate

Utilità dei colori nella visione

- Distinzione degli oggetti di interesse dallo sfondo
 - Es.: Frutta matura in contrasto con le foglie
- Proprietà degli oggetti
 - Es.: Colori diversi dal verde indicano la frutta matura
- Identificazione degli oggetti
 - Es.: Trovare la frutta matura in mezzo alle foglie

Grazie dell'attenzione