

Grafica Computazionale

Il colore

Fabio Ganovelli

fabio.ganovelli@isti.cnr.it

a.a. 2005-2006

*Diapositive a corredo del libro: "Fondamenti di Grafica Tridimensionale Interattiva"
R. Scateni, P. Cignoni, C. Montani e R. Scopigno - McGrawHill Italia*

Parametri in gioco

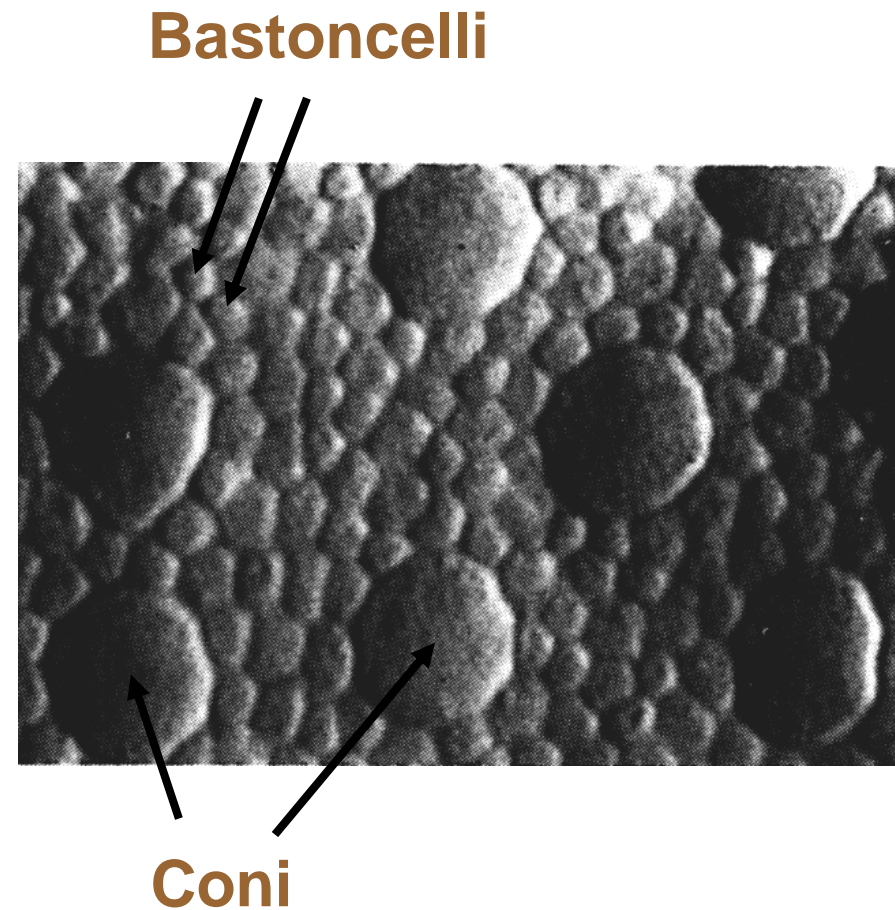
- ❖ La percezione di un oggetto dipende:
 - ❖ dalle caratteristiche dell'oggetto stesso
 - ❖ dalle caratteristiche della luce che lo illumina
 - ❖ dal colore dello sfondo
 - ❖ dalla persona che lo guarda
- ❖ Se illuminiamo con luce rossa un oggetto blu lo vedremo nero
- ❖ Uno sfondo scuro fa apparire l'oggetto in primo piano più chiaro e viceversa

La percezione umana

- ❖ La retina e il cervello sono i componenti base del sistema di visione umano:
 - ❖ il sensore
 - ❖ l'elaboratore dell'informazione
- ❖ Il comportamento del cervello nell'analisi dell'informazione visuale è materia di lavoro per psicologi
- ❖ Il funzionamento dell'occhio è materia di lavoro per fisiologi

La percezione umana

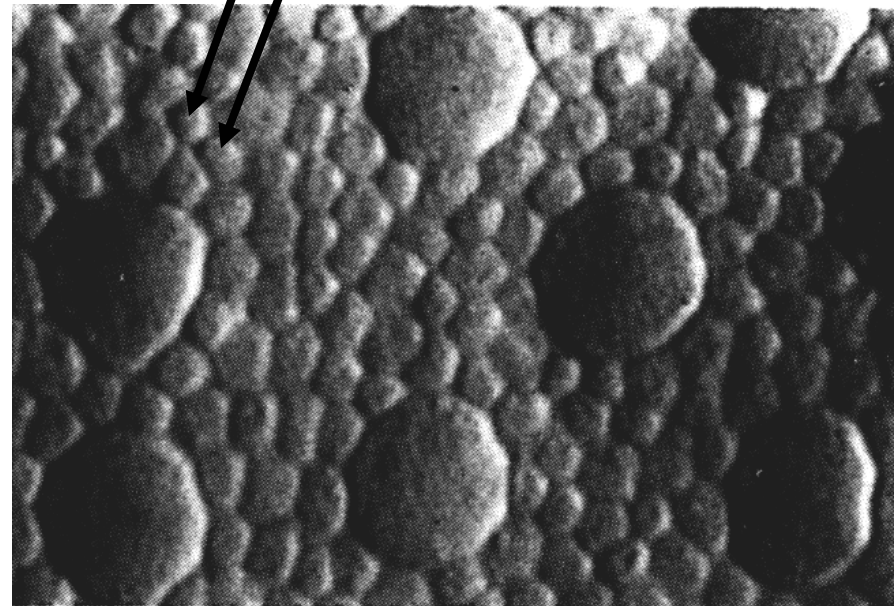
- ❖ Il sensore è costituito da due tipi di cellule, detti per la loro forma, coni e bastoncelli



La percezione umana

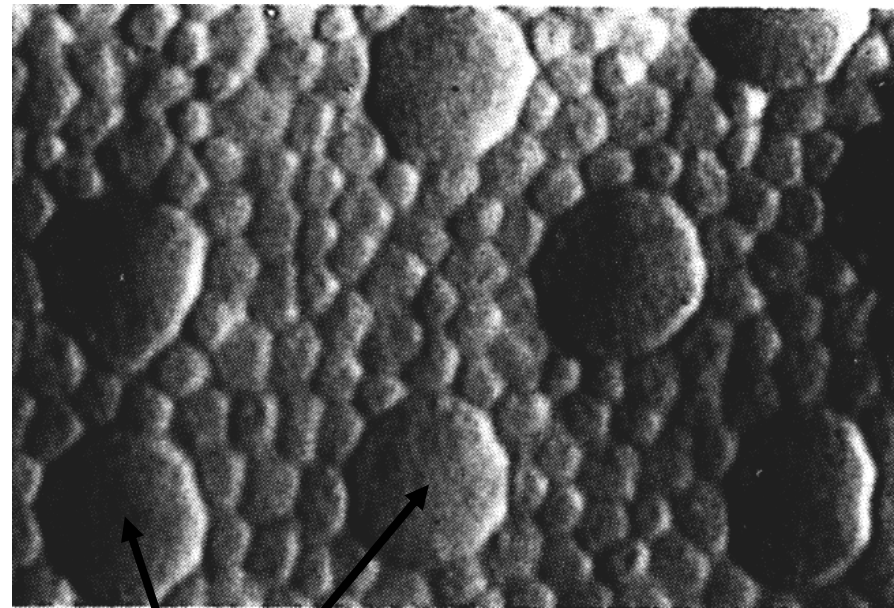
- ❖ I bastoncelli sono dei fotorecettori molto sensibili alla variazione di luminosità, concentrati sul bordo esterno della retina e responsabili della visione notturna e periferica

Bastoncelli



La percezione umana

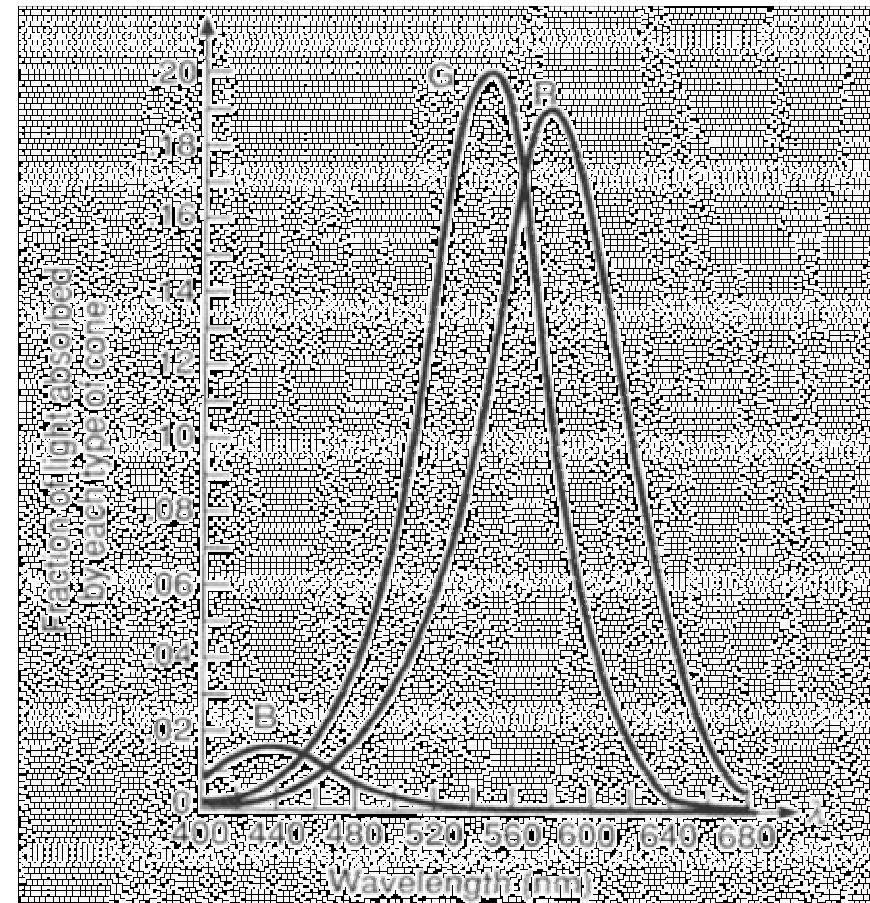
- ❖ I coni sono sensibili alla lunghezza d'onda (percezione del colore)
- ❖ I coni contengono dei composti chimici, detti fotopigmenti la cui attivazione dipende dalla frequenza della luce che li colpisce
- ❖ Esistono coni **rossi**, **verdi** e **blu** i cui picchi di attivazione si hanno attorno a 580 nm, 545 nm e 440 nm



Coni

Curva di efficienza

- ❖ La risposta dell'occhio allo stimolo luminoso a luminosità costante al variare della lunghezza d'onda si dice **curva di efficienza**
- ❖ L'occhio umano vede meglio per scene illuminate da luci giallo-verdi di lunghezza d'onda attorno ai 550 nm: la luce solare



Curva di efficienza

- ❖ Il cervello percepisce una vasta gamma di colori che, fisiologicamente, sono combinazioni di stimoli provenienti dai tre tipi di coni
- ❖ Potremmo dire che esiste una differenza tra il funzionamento **hardware** dell'occhio e la maniera con cui il **software** del cervello interpreta i segnali
- ❖ Questa differenza è alla base della definizione dei vari modelli di colore

Obiettivo riformulato

- ❖ Come si possono generare informazioni visive tali da stimolare nel modo corretto il sistema occhio-cervello?
- ❖ Dobbiamo generare informazioni visuali che abbiano la corretta quantità di luminosità per ogni colore, in cui la variazione di luminosità tra una porzione e l'altra dell'immagine, che determina i rapporti tra colori diversi, sia effettuata in maniera tale da veicolare il messaggio giusto

Luce acromatica

- ❖ Definiamo **acromatica** una luce che trasporta informazioni in un'unica banda di colore: è la luce emessa da un monitor in bianco e nero o riflessa da un foglio bianco con scritte ad inchiostro nero
- ❖ Contiene tutte le frequenze dello spettro del visibile in uguale misura e l'unico suo attributo significativo è la “quantità di luce”
- ❖ Questa è una grandezza misurabile in termini di **energia** o più propriamente di **potenza** del segnale luminoso

Luce acromatica

- ❖ Ci si riferisce a questo attributo con il nome di intensità di illuminazione o **luminanza**
 - ❖ La luminanza è una grandezza scalare finita che, per convenzione, possiamo far variare nell'intervallo 0-1 ed associare al colore percepito di un oggetto su cui si riflette:
 - ❖ 0 = assenza di illuminazione (nero)
 - ❖ 1 = massima intensità (bianco)
- i livelli intermedi rappresentano i toni di grigio

Luce acromatica

- ❖ Il termine **luminosità** è invece comunemente attribuito alla sensazione psicologica della percezione dell'intensità della luce
- ❖ È una misura della sensazione che l'osservatore ricava quando guarda un oggetto che emette o riflette con una ben determinata luminanza
- ❖ Luminanza = misurazione **oggettiva**
- ❖ Luminosità = sensazione **soggettiva**

Luce acromatica

- ❖ In un dispositivo digitale il numero di valori distinti di luminanza è discreto e il problema da risolvere è quello di scegliere quali debbano essere le diverse luminanze da utilizzare per ottenere una percezione continua della luminosità
- ❖ Supponiamo di voler visualizzare 256 diversi grigi su un monitor, quali livelli di intensità dobbiamo usare?
- ❖ La soluzione più immediata è quella di pensare di ripartire l'intervallo di luminanza $[0 \div 1]$ in 256 parti uguali

Luce acromatica

- ❖ Così facendo purtroppo non otteniamo 256 grigi a distanze costanti alla vista poiché il nostro occhio non è sensibile in modo lineare alla luminanza ma è sensibile in modo lineare a rapporti tra luminanze
- ❖ L'intensità percepita (luminosità) non è linearmente correlata all'intensità effettiva (luminanza)

Luce acromatica



Luce acromatica

- ❖ Un altro dato da tenere di conto è che, in un dispositivo qualsiasi (emissivo come il monitor o che sfrutta la riflessione come la stampante) il nero non ha veramente un valore 0, poiché non è fisicamente realistico pensare di “spegnere” completamente i fosfori
- ❖ In questo caso si indica quindi con il nome **nero** non il valore teorico 0 ma il valore minimo di intensità I_0

Luce acromatica

- ❖ Se vogliamo ottenere 256 intensità differenti a partire da I_0 occorre quindi equispaziare l'intervallo $[I_0 \div 1]$ su scala logaritmica
- ❖ L'intensità di ogni valore di luminanza utilizzato sarà quindi r volte l'intensità del valore precedente

Luce acromatica

❖ I 256 valori saranno quindi:

$$I_0 = I_0$$

$$I_1 = rI_0$$

$$I_2 = rI_1 = r^2 I_0$$

...

$$I_{255} = rI_{254} = r^{255} I_0 = 1$$

Luce acromatica

❖ Il valore di r si ricava come:

$$r = \left(\frac{1}{I_0} \right)^{\frac{1}{255}}$$

ed il valore di ognuno degli I_j :

$$I_j = r^j I_0 = \left(\frac{1}{I_0} \right)^{\frac{j}{255}} I_0 = I_0^{\frac{255-j}{255}} \quad 0 \leq j \leq 255$$

La luce acromatica

- ❖ Più in generale, per $n+1$ livelli anziché 256 la formula diventa:

$$r = \left(\frac{1}{I_0} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad I_j = I_0 \frac{n-j}{n} \quad 0 \leq j \leq n$$

Dynamic range

- ❖ La minima intensità ottenibile (I_0) su uno schermo CRT varia da 1/200 ad 1/40 dell'intensità massima 1.0
- ❖ Il rapporto tra intensità massima e minima ($1/I_0$) è chiamato *dynamic range* ed è una caratteristica fondamentale del dispositivo di output

Dynamic range

- ❖ Per ogni dispositivo dato si può definire come numero di intensità diverse rappresentabili **sufficienti** per riprodurre una variazione percettualmente continua di toni di grigio da bianco a nero

Dynamic range

- ❖ Si è ricavato sperimentalmente che $r=1.01$ è un valore limite al di sotto del quale l'occhio umano medio non riesce più a distinguere tra due valori contigui di intensità I_i e I_{i+1}
- ❖ Il numero diverso di livelli distinguibili (n) che si possono definire per un certo dispositivo dato il dynamic range sarà quindi:

$$1.01 = \left(\frac{1}{I_0} \right)^{\frac{1}{n}} \Rightarrow n = \log_{1.01} \left(\frac{1}{I_0} \right)$$

Dynamic range

Dispositivo	Dynamic Range	Numero livelli
Monitor CRT	50-200	400-530
Stampa fotografica	100	465
Stampa su diapositiva	1000	700
Stampa su carta (B/N)	100	465
Stampa su carta (colori)	50	400
Stampa a rotativa (B/N)	10	234

Aggiungere il colore

- ❖ Come si descrivono le informazioni portate dalla luce cromatica?
- ❖ Ogni colore è caratterizzato da un ben preciso valore in frequenza e si potrebbe ipotizzare l'impiego di due scalari per descrivere ogni colore
 - ❖ uno per la frequenza
 - ❖ uno per la luminanza
- ❖ Sappiamo discretizzare la luminanza per ottenere luminosità
- ❖ Potremmo dividere la banda di frequenza in intervalli regolari senza problemi percettivi

Aggiungere il colore

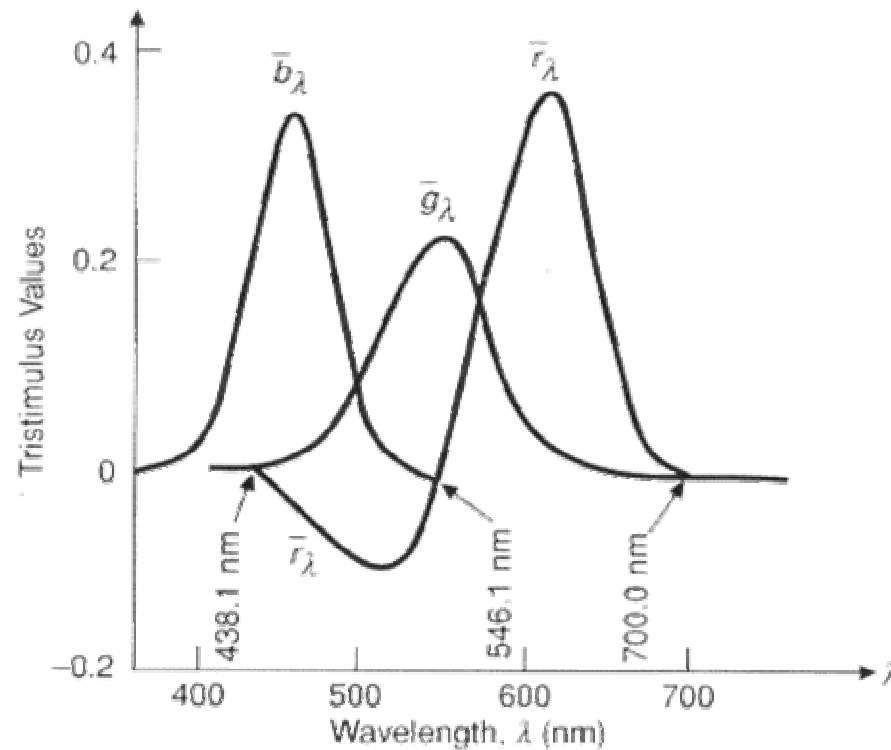
- ❖ Esistono colori che non sono **puri**, sono il miscelamento di varie frequenze
- ❖ Per descrivere anche questa caratteristica si introduce un terzo parametro che misura la **purezza** del colore
- ❖ La descrizione di un colore necessita quindi di tre parametri:
 - ❖ **tinta** (*hue*)
 - ❖ **saturazione** (*saturation*)
 - ❖ **luminosità** (*lightness*)
- ❖ La tinta è la frequenza dominante
- ❖ La saturazione è la misura di purezza

Modelli di colore

- ❖ Adesso abbiamo un modello chiaro di riferimento, intuitivo e anche semplice
- ❖ I dispositivi di output però non generano un colore in questo modo
- ❖ Sono costruiti per stimolare il sistema visivo modulando la luce su tre bande monocromatiche (dette primarie) corrispondenti tre tipi di coni della retina
- ❖ Questo è il modello del **tristimolo** che fa riferimento all'hw dell'occhio non al sw del cervello

Tristimolo

- ❖ Quantità di stimolo ai coni rossi, verdi e blu che occorrono ad un osservatore (medio) per percepire ognuna delle lunghezze d'onda dello spettro del visibile



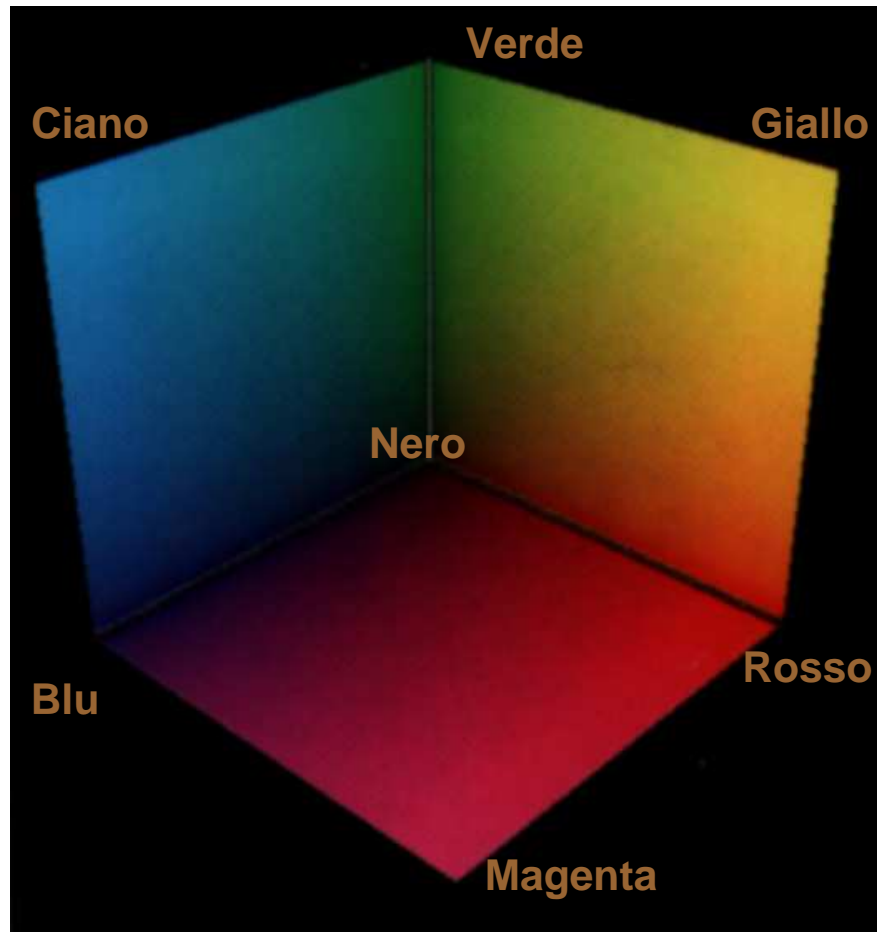
Modelli di colore

- ❖ Questa differenza (tra hw e sw del sistema di visione) porta a definire spazi colore (modelli colore) come sistemi particolari di coordinate diversi dallo spazio intuitivo tinta-saturazione-luminosità
- ❖ Questi spazi consentono di definire all'interno di un sottoinsieme di colori (detto *gamut*) un particolare elemento

RGB

- ❖ Il gamut dei monitor CRT o TFT e dei dispositivi a proiezione è definito dalle primarie rosso, verde e blu o RGB (dall'inglese Red, Green, Blue) dette **primarie additive**
- ❖ I monitor sintetizzano i colori eccitando tre tipi di fosfori (RGB), per cui un colore è ottenuto miscelando (addizionando) parti diverse di queste tre primarie

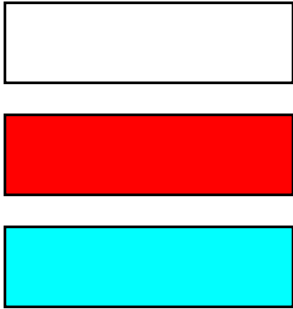
RGB



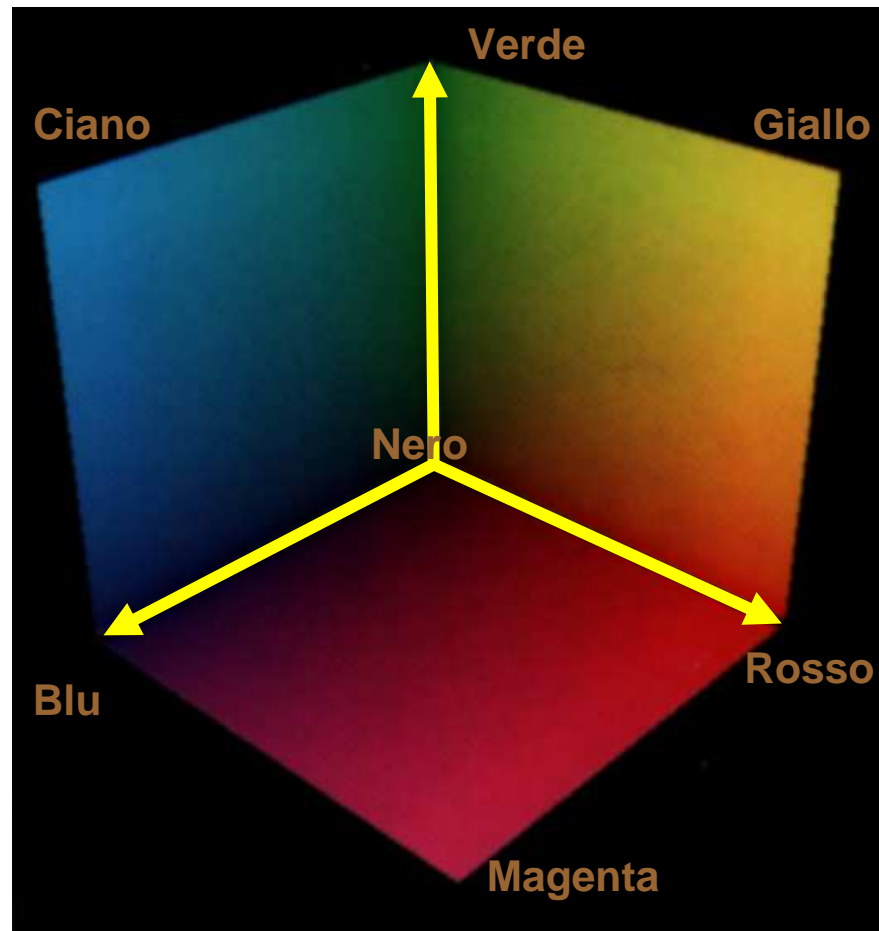
- ❖ La rappresentazione geometrica tipica dello spazio RGB è in forma di cubo
- ❖ Sui vertici si trovano il bianco, il nero, le primarie e i complementari (al bianco)

RGB

- ❖ I colori ciano, magenta e giallo sono detti complementari dei colori primari
- ❖ Ad esempio, il ciano è il complementare del rosso poiché deriva dalla sottrazione del rosso (1,0,0) dal bianco (1,1,1):

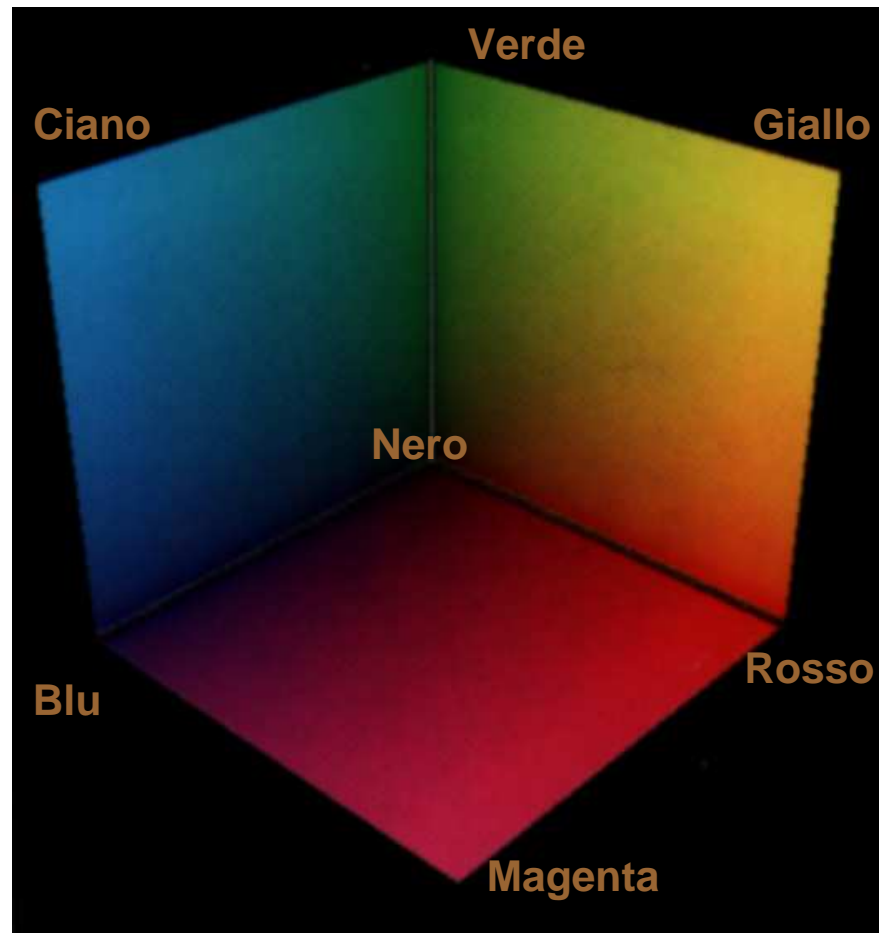
$$\begin{array}{rcl} \text{bianco (1,1,1)} & - & \text{rosso (1,0,0)} \\ \hline \text{ciano (0,1,1)} & = & \end{array}$$


RGB



- ❖ L'intervallo di variazione si può definire a piacere
- ❖ I più comuni sono:
 - ❖ da 0.0 (valore minimo) a 1.0 (valore massimo)
 - ❖ da 0 (valore minimo) a 255 (valore massimo)

RGB



- ❖ Il colore nero si ottiene come combinazione lineare dei tre valori minimi $R=0$, $G=0$, $B=0$
- ❖ Il colore bianco come combinazione lineare dei tre valori massimi $R=1$, $G=1$, $B=1$

RGB come spazio lineare

- ❖ Lo spazio RGB è uno spazio lineare
- ❖ Si possono derivare valori da altri valori dati utilizzando lo strumento matematico dell'**interpolazione lineare**
- ❖ Questo consente di costruire delle scale cromatiche complesse in maniera molto semplice
- ❖ Vedremo che questa caratteristica è di essenziale importanza nel calcolo dell'equazione di illuminazione

Esempio

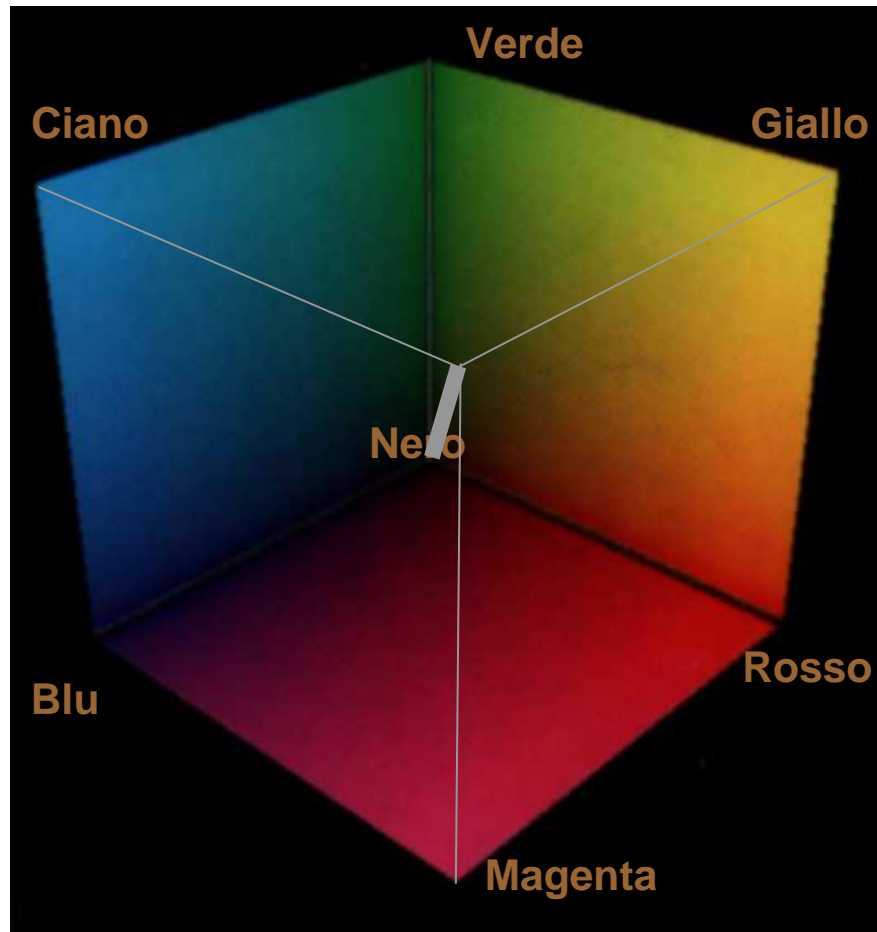
- ❖ In RGB il colore rosso è dato dalla tripletta $(1,0,0)$ e il nero da $(0,0,0)$
- ❖ Variando R da 0 a 1 (mantenendo costanti G e B a 0) si ottengono tutti i rossi puri di diversa luminosità (da poco a molto luminoso)

Nero $(0,0,0)$

Rosso $(1,0,0)$



RGB

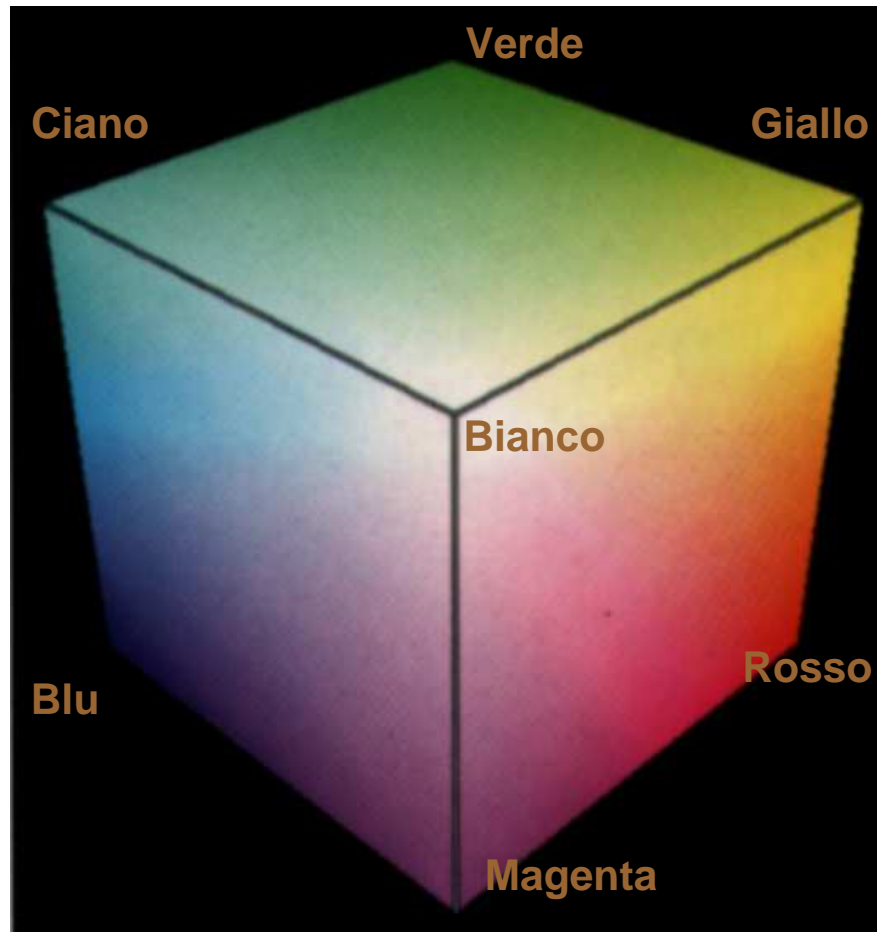


- ❖ La diagonale che unisce il nero con il bianco è detta linea dei grigi
- ❖ Un grigio qualsiasi ha la caratteristica di avere tutte le tre componenti uguali
- ❖ Per esempio, $(0.5, 0.5, 0.5)$ è un grigio

CMY(K)

- ❖ In RGB Ciano, Magenta e Giallo (Cyan, Magenta, Yellow CMY) sono i colori complementari di Rosso, Verde e Blu e sono chiamati **primarie sottrattive**
- ❖ Il nome è dato dal fatto che possono essere usati come filtri (ad es. come inchiostri per stampare su fogli bianchi) per sottrarre frequenze riflesse ad uno sfondo bianco

CMY(K)



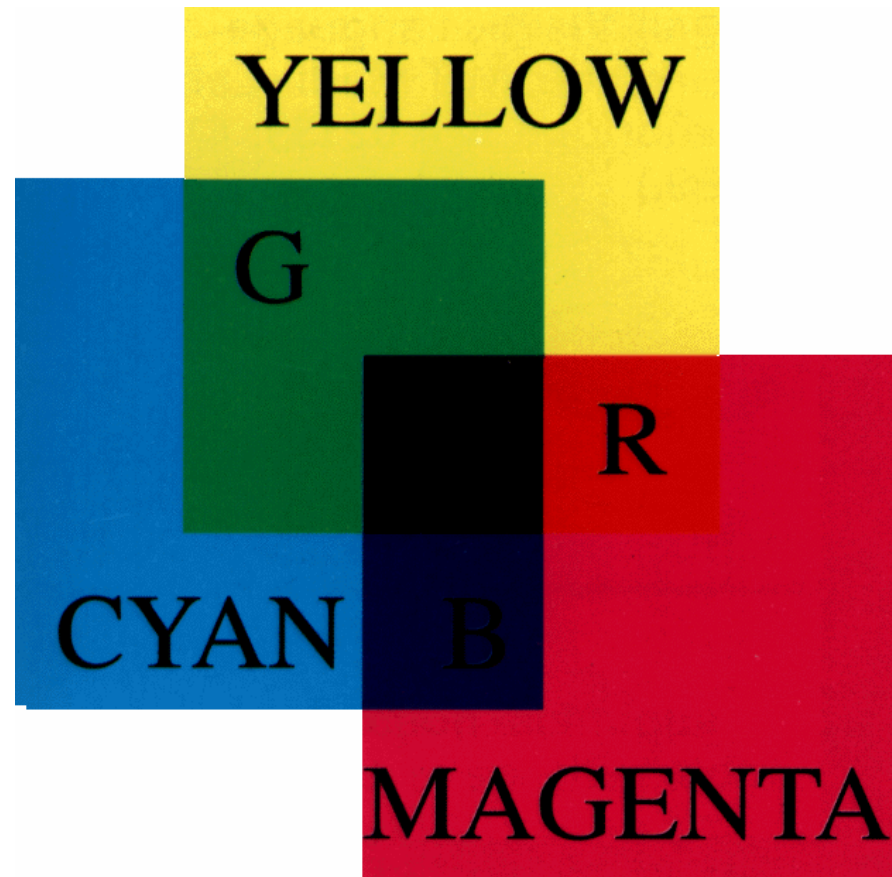
- ❖ Il modello CMY interpretato geometricamente è uguale a RGB con la differenza che, in questo caso, il bianco è l'origine dello spazio e i colori sono pensati come sottrazione dal bianco, anziché per addizione al nero

CMY(K)

- ❖ Il modello CMY è usato nei dispositivi di stampa a colori (stampanti laser, *inkjet*, a sublimazione, elettrostatiche) dove l'inchiostro colorato funziona come un filtro che sottrae alcune frequenze dal bianco del foglio

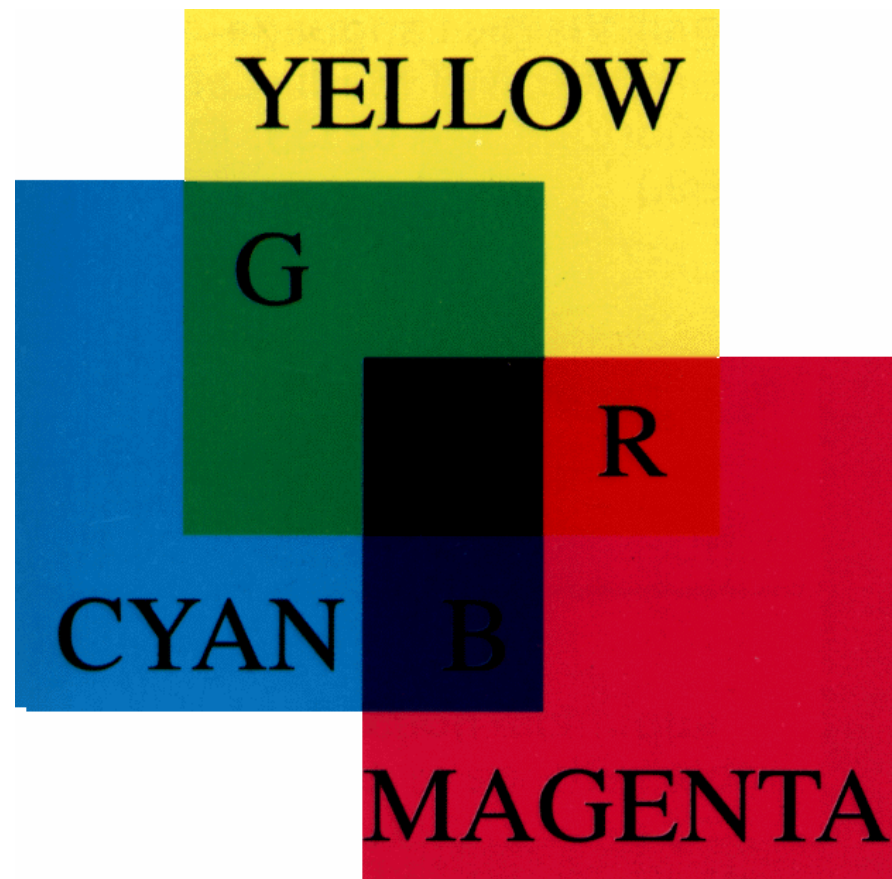
CMY(K)

- ❖ Ad esempio, un inchiostro ciano depositato su un foglio bianco riflette tutti i colori ad eccezione del rosso (in termini di primarie additive, ciano è dato da bianco – rosso o da verde + blu)



CMY(K)

- ❖ Aree in cui si sovrappongono ciano e magenta riflettono tutti i colori ad eccezione del rosso e del verde: quindi appaiono blu!



CMY(K)

- ❖ La relazione esistente tra CMY e RGB è definita dalle semplici formule

$$C=1-R$$

$$M=1-G$$

$$Y=1-B$$

- ❖ Usando questo modello per ottenere una superficie nera dobbiamo evitare che rifletta tutti i primari (rosso, verde e blu), dobbiamo quindi colorarla di ciano, magenta e giallo alla massima intensità

CMY(K)

- ❖ Nei dispositivi di stampa a colori si è pensato di aggiungere ai tre inchiostri CMY del vero e proprio inchiostro nero (detto colore K) perché mettendo insieme C, M e Y non si ottiene un **nero puro** poiché i tre inchiostri non sono filtri perfetti
- ❖ Anziché usare parti uguali di C, M e Y si usa K
- ❖ Si ha così il cosiddetto modello CMYK
- ❖ Si passa da CMY a CMYK con le formule:

$$K = \min(C, M, Y)$$

$$C = C - K$$

$$M = M - K$$

$$Y = Y - K$$

HSV

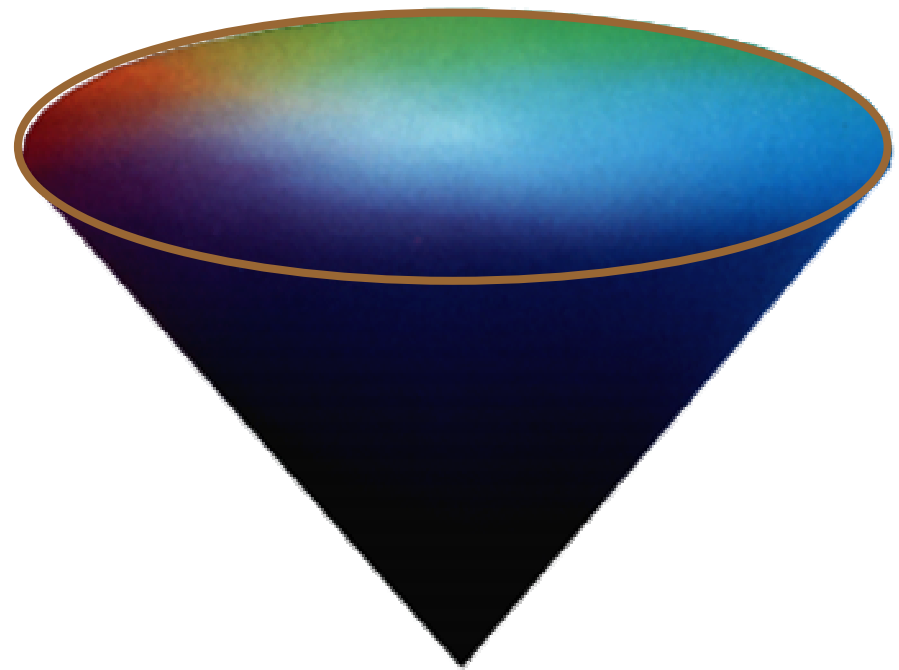
- ❖ Sia RGB che CMYK sono modelli *hardware-oriented*, destinati a semplificare la descrizione dei colore utilizzando dispositivi di visualizzazione o stampa
- ❖ In questi spazi selezionare un rosa, un viola o un marrone non è un'impresa semplice e necessita di numerosi tentativi per ottenere il risultato voluto
- ❖ Questa è l'ovvia conseguenza della differenza tra modello concettuale e percettivo

HSV

- ❖ Per ovviare a questo problema si utilizza uno spazio colore che ricalca il modello percettivo HSV (Hue, Saturation, Value) lasciando al computer la conversione
- ❖ Il modello ottiene anche il risultato di riprodurre il modo con cui un pittore prepara un suo colore sulla tavolozza: prende un colore puro (**hue**) e aggiunge del bianco per cambiarne la saturazione (**saturation**); poi aggiunge del nero per cambiare la luminosità (**value**) ed ottiene il colore finale voluto

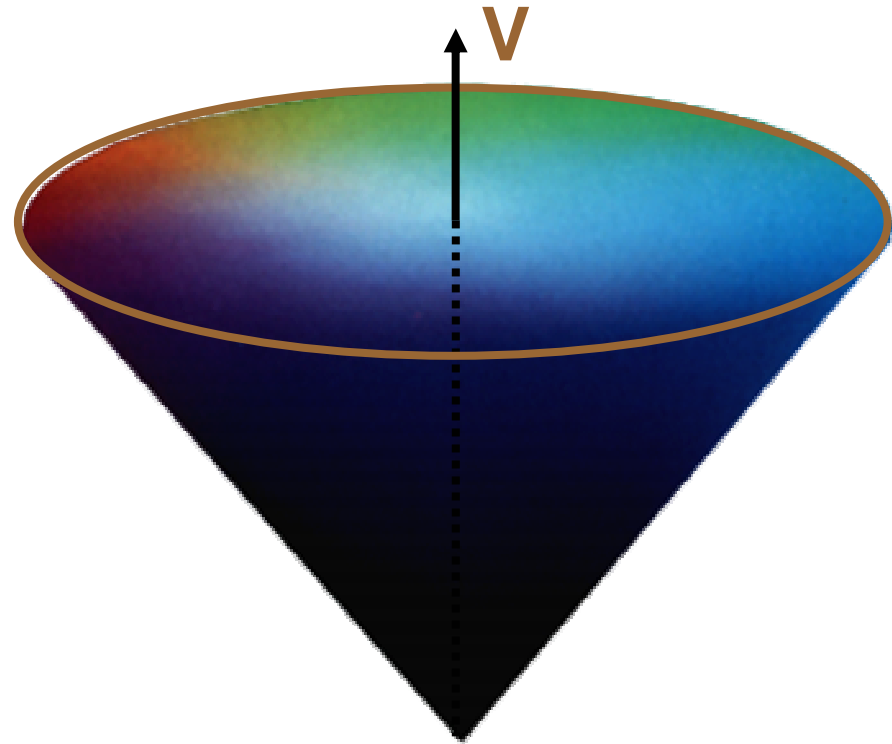
HSV

- ❖ La sua rappresentazione geometrica è su un sistema di coordinate cilindrico (polare 3D) che insiste su un cono (talvolta un prisma a base esagonale) con il vertice rivolto verso il basso



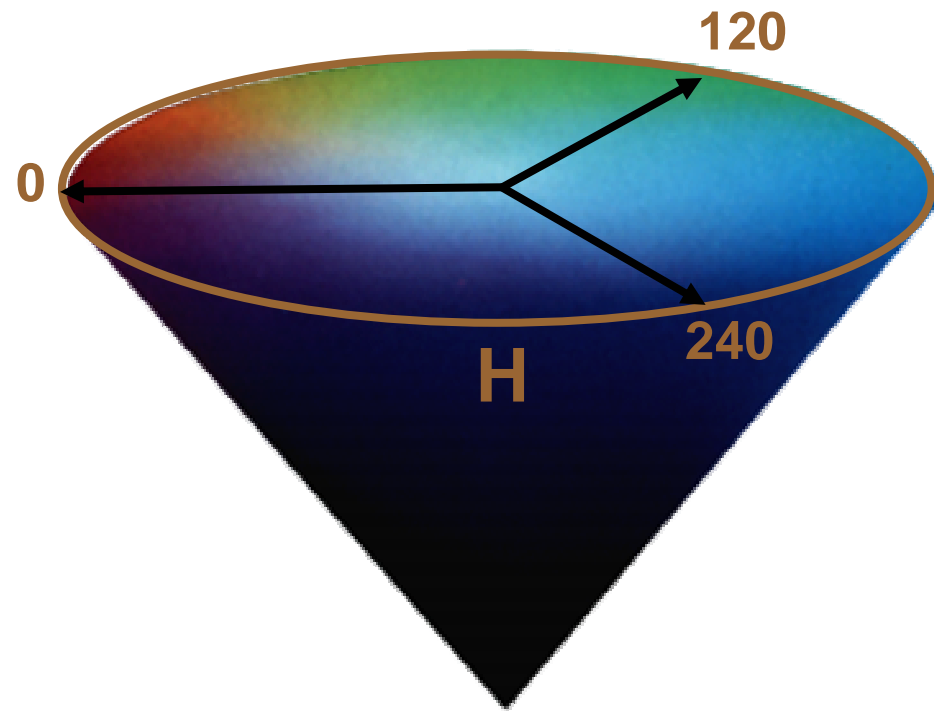
HSV

- ❖ La coordinata V (Value) corrisponde alla luminosità e assume valori nell'intervallo da 0.0 (scuro) a 1.0 (chiaro)
- ❖ V viene associato alla coordinata y sull'asse verticale



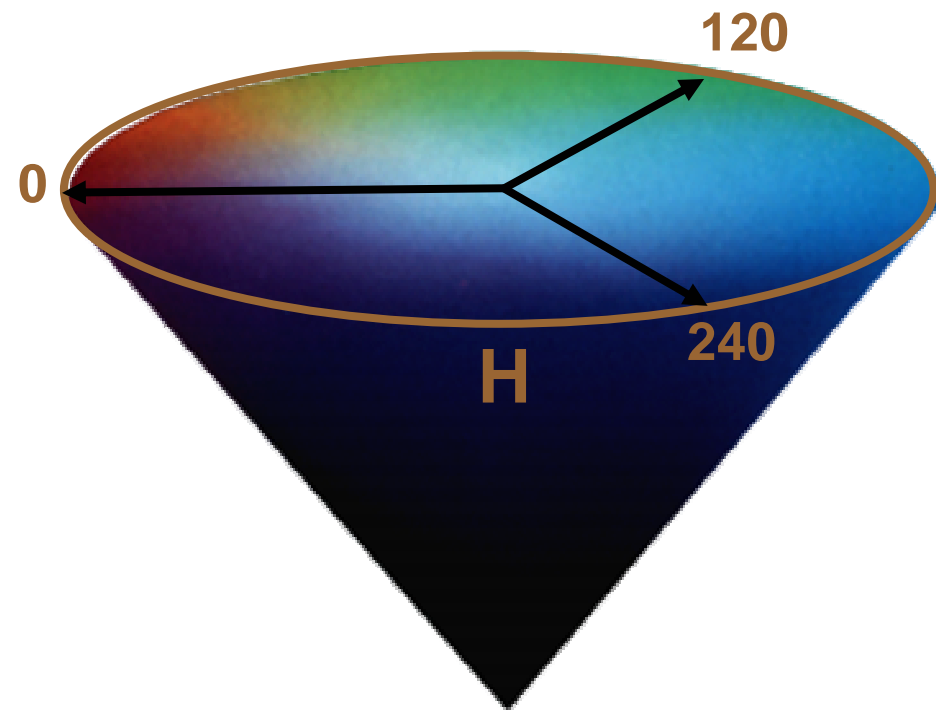
HSV

- ❖ La coordinata H (Hue) corrisponde al colore ed è la misura angolare del sistema di coordinate
- ❖ il rosso vale 0° (0.0), il verde vale 120° (0.3...) e il blu 240° (0.6...)



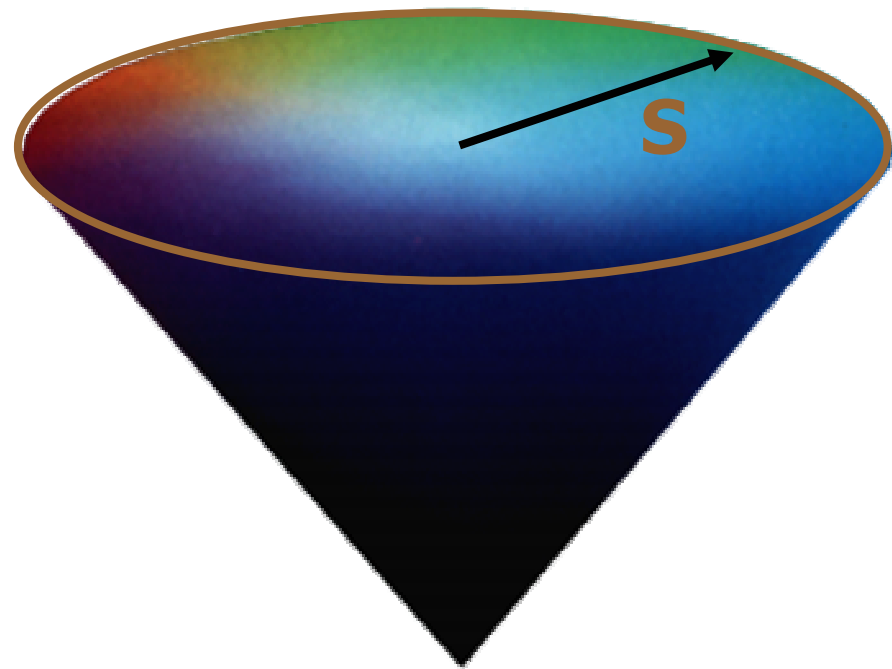
HSV

- ❖ I colori primari sono alla massima distanza possibile tra loro (120°)
- ❖ I colori complementari sono opposti ($+180^\circ$) ai primari



HSV

- ❖ La coordinata S (Saturation) corrisponde al livello di saturazione ed è rappresentato dall'asse orizzontale (x)
- ❖ S può variare da 0.0 (completamente desaturato, miscela perfetta) a 1.0 (colore puro o completamente saturo)



HSV

- ❖ La coordinata S (Saturation) corrisponde al livello di saturazione ed è rappresentato dall'asse orizzontale (x)
- ❖ S può variare da 0.0 (completamente desaturato, miscela perfetta) a 1.0 (colore puro o completamente saturo)

