



APPUNTI DI TEORIA

3. COLORIMETRIA

Il colore è una caratteristica complessa della sensazione visiva, definita attraverso le seguenti proprietà della luce:

- **Tono o tinta:** è la proprietà qualitativa della luce, essenzialmente legata alla lunghezza d'onda dominante, che indichiamo con i termini rosso, giallo, arancio, verde, ecc.
- **Purezza o saturazione:** colori puri (saturi) corrispondono a radiazioni monocromatiche, mentre miscelando a un colore puro il bianco la saturazione diminuisce; per definizione i toni di grigio hanno saturazione nulla.
- **Intensità della sensazione:** dipende dalla luminanza della sorgente.

L'insieme di tinta e di saturazione definisce la *cromaticità* della luce.

In base alle Leggi di Grassmann, si può affermare che:

- La variazione delle proprietà cromatiche della luce ha carattere di *continuità*: variando cioè con continuità un attributo fisico della radiazione (ad es. la lunghezza d'onda o la potenza), la sensazione cromatica varia con continuità.
- Il colore può essere costruito attraverso la *composizione additiva* di altri colori, ed in particolare di colori puri. L'occhio non è in grado, infatti, di discernere nel colore-miscela la natura delle singole componenti cromatiche che lo costituiscono<sup>1</sup>.
- La luminanza di un colore che è ottenuto dalla miscela di vari colori è pari alla somma delle luminanze dei colori componenti.

### 3.1 Il Sistema colorimetrico CIE

Il sistema colorimetrico CIE, introdotto nel 1931, permette di rappresentare su un grafico, detto *Triangolo dei Colori*, le proprietà cromatiche della luce.

<sup>1</sup> Si evidenzia anche in questo caso la differenza rispetto ai fenomeni acustici: l'orecchio è infatti capace di distinguere le componenti tonali presenti in un suono complesso.



Il sistema colorimetrico CIE si basa sulla composizione additiva e adotta i seguenti tre *colori primari*:

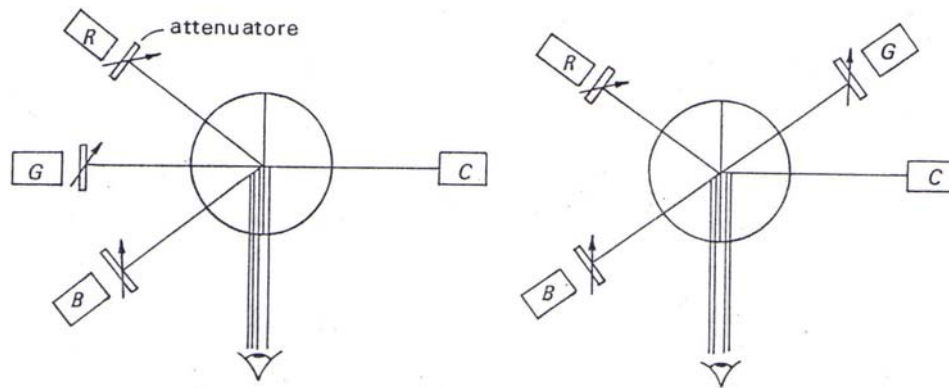
1. Rosso R ( $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ )
2. Verde G ( $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ )
3. Blu B ( $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$ )

Tale scelta si basa su verifiche sperimentali che hanno permesso di verificare che ogni tonalità cromatica conosciuta può essere ottenuta per somma di questi tre colori primari.

In base alle leggi di Grassmann, in condizione di bilanciamento (cioè quando il colore campione ha la stesso aspetto della somma dei tre colori primari), si può scrivere per la luminanza:

$$L(C) = L_R + L_G + L_B$$

dove le luminanze dei colori primari  $L_R, L_G, L_B$  sono dette *unità tricromatiche* della luminanza del colore C.



La relazione precedente può essere rappresentata in uno spazio  $X, Y, Z$ , detto *tricromatico*, assegnando convenzionalmente ai tre colori primari, di luminanza unitaria, le seguenti coordinate:

- R  $X = 2,7689$   $Y = 1$   $Z = 0$
- G  $X = 0,38159$   $Y = 1$   $Z = 0,012307$
- B  $X = 18,801$   $Y = 1$   $Z = 93,066$

Le *componenti tricromatiche*  $X, Y, Z$  di un generico colore C, ottenuto dalla miscela dei tre colori primari rispettivamente di luminanza  $L_R, L_G, L_B$ , possono essere espressa in forma matriciale come:

$$C = A \cdot L$$

dove:

$$C = [X, Y, Z]^T$$



$$L = [L_y, L_g, L_b]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 2,7689 & 0,38159 & 18,801 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0,012307 & 93,066 \end{bmatrix}$$

I valori di  $X, Y, Z$  risultano sempre positivi; si noti inoltre che la componente

$$Y = L_R + L_G + L_B$$

rappresenta la luminanza del colore  $C$ .

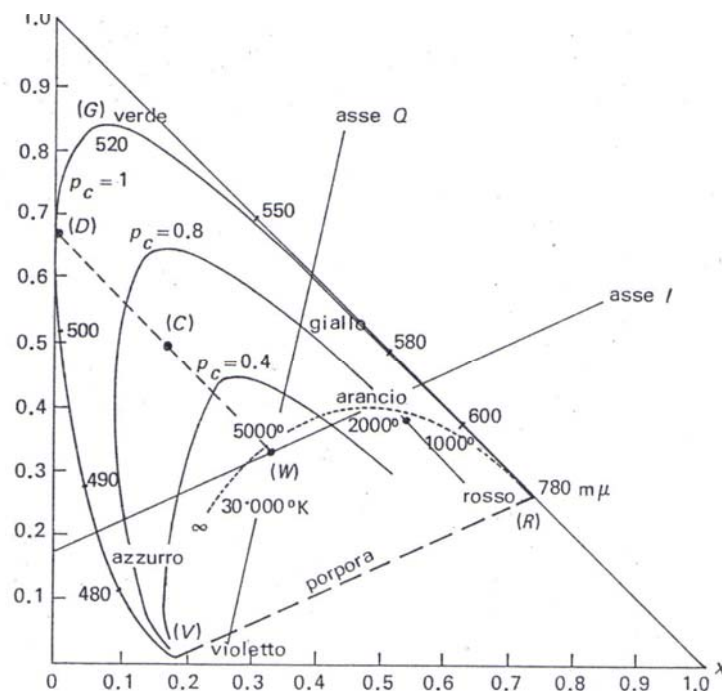
Si definiscono quindi le *coordinate tricromatiche* del colore:

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

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

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

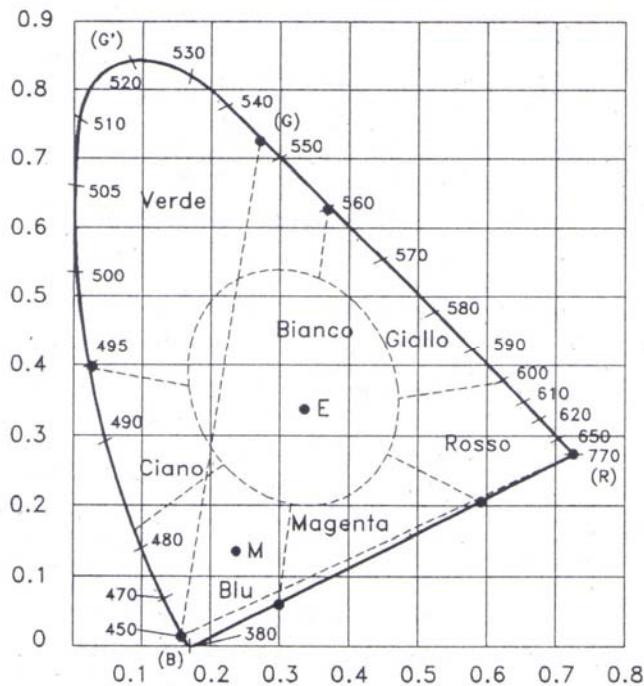
Le coordinate tricromatiche, la cui somma è  $x + y + z = 1$ , permettono di rappresentare qualsiasi colore su un piano. Per convenzione si è scelto il piano  $(x,y)$ . Su questo piano i colori si trovano all'interno di un triangolo (detto *triangolo dei colori*) i cui vertici hanno le coordinate  $(0,0)$   $(0,1)$   $(1,0)$ . Un colore è dunque univocamente individuato dalle coordinate  $x, y$ , che ne definiscono la cromaticità (tinta e saturazione) e da  $Y$  che rappresenta la luminanza.



Il triangolo dei colori presenta le seguenti proprietà:

- I punti della linea  $VGR$  rappresentano i *colori puri* o *saturo*, di cui è indicata la lunghezza d'onda; i punti esterni a tale linea non rappresentano alcun colore.
- Il punto  $W$ , che ha coordinate  $(1/3, 1/3, 1/3)$  ed è il baricentro del triangolo, rappresenta la *luce bianca*. Essa è infatti ottenuta miscelando in parti uguali i tre colori primari (ed ha un uguale contenuto energetico al variare di  $\lambda$ ).
- I colori puri individuati da una retta passante per  $W$  sono detti *complementari*: con la loro miscela in quantità opportune è possibile riottenere il bianco.
- Un colore  $C$  (ad eccezione delle porpore sature) può essere ottenuto come miscela di bianco  $W$  e di un colore puro  $D$ , che si definisce “dominante” per il colore  $C$ .
- La saturazione (o purezza) del colore  $C$  è dato dal rapporto

$$P_c = \frac{1 - \left( \frac{y(W)}{y(C)} \right)}{\left( 1 - \frac{y(W)}{y(D)} \right)}$$



- Il triangolo  $WVR$  è detto triangolo delle porpore ed è caratterizzato da colori con una non definibile lunghezza d'onda dominante (in quanto non sono ottenute solo dal bianco più un colore saturo); il segmento  $VR$  corrisponde alla linea delle *porpore sature* (miscela di violetto e rosso).



- In talune zone del diagramma si hanno notevoli variazioni di tinta anche per piccoli spostamenti, mentre in altre non si hanno apprezzabili differenze pur con grandi variazioni di posizione: la massima sensibilità alle variazioni cromatiche si ha lungo l'asse  $I$  che va approssimativamente dall'arancio (giallo-rosso) al ciano (verde-blu), mentre la minima sensibilità si ha in corrispondenza dell'asse  $Q$  che va dal verde al Magenta (porpora).
- La linea tratteggiata (luogo Planckiano) rappresenta la cromaticità di un corpo nero alle varie temperature (da ciò deriva il concetto di *Temperatura di colore*, che verrà ripreso nel par. 3.2).

Per mezzo del triangolo dei colori è possibile determinare le proprietà di un colore  $C$ , somma di due colori  $C_1$  e  $C_2$  di cui sono note le coordinate  $x, y$  e la luminanza  $Y$ ; definendo:

$$T_1 = X_1 + Y_1 + Z_1$$

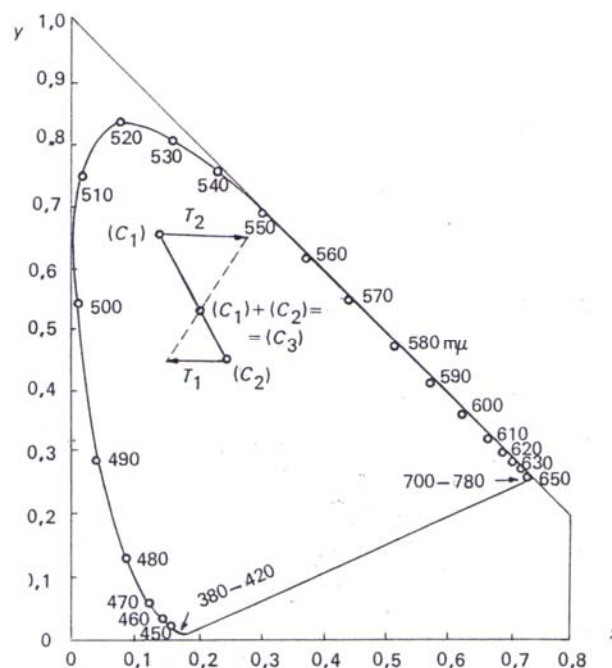
$$T_2 = X_2 + Y_2 + Z_2$$

si ottiene:

$$x_3 = \frac{x_1 T_1 + x_2 T_2}{T_1 + T_2}$$

$$y_3 = \frac{y_1 T_2 + y_2 T_2}{T_1 + T_2}$$

Analogamente le coordinate del colore somma si possono determinare con la seguente costruzione grafica:





Si noti che  $x_3$  ed  $y_3$  rappresentano le coordinate del baricentro dei due punti e ciò sta alla base del sistema grafico prima descritto.

### 3.2 Temperatura di colore, Indice di resa cromatica, Sorgenti standard CIE

Le sorgenti luminose, siano esse naturali che artificiali, presentano due proprietà cromatiche legate alla loro composizione spettrale: una relativa al colore della luce emessa dalla sorgente, l'altra relativa all'effetto che tale luce determina sull'aspetto delle superfici illuminate: il colore di una superficie dipende infatti sia dalle proprietà di riflessione del materiale (o di trasmissione per i materiali traslucidi), sia dallo spettro della sorgente che le illumina. Per poter valutare in modo quantitativo gli effetti di cui sopra, sono stati introdotti due parametri, denominato *Temperatura di colore* ed *Indice di resa cromatica*.

La Temperatura di colore è definita come la temperatura assoluta di un Corpo nero che emette radiazione visibile di colore uguale alla luce emessa dalla sorgente. La corrispondenza tra temperatura del corpo nero e cromaticità della luce è rappresentata sul triangolo dei colori attraverso la curva detta luogo Planckiano (v. 3.1).

A stretto rigore la Temperatura di colore è applicabile solo a sorgenti, quali le lampade a incandescenza, che emettono radiazione termica; per estendere l'uso di questo utile parametro anche alle lampade a scarica è stato quindi introdotto il concetto di *Temperatura Correlata di Colore (CCT)*, definita come la temperatura del corpo nero il cui colore più si avvicina a quello della sorgente in esame.

Il CIE ha definito una scala del colore apparente delle lampade che prevede tre livelli: 1 per  $CCT < 3000$  K (*luce calda*), 2 per  $3300 \text{ K} \leq CCT \leq 5300$  K (*luce intermedia*), 3 per  $CCT > 5300$  K (*luce fredda*): luci "calde" sono quindi caratterizzate da una bassa temperatura di colore e presentano una dominante nel giallo; luci "fredde" hanno invece una temperatura di colore elevata e una dominante azzurra.

Il CIE ha inoltre definito tre sorgenti luminose standard (dette *illuminanti A, B, C*) con  $CCT$  rispettivamente pari a 2848 K, 4800 K e 6500 K. Le sorgenti CIE fanno riferimento alle tre condizioni più comuni di illuminamento: la prima alla luce di una lampada ad incandescenza (luce calda), mentre le altre a due diverse condizioni di luce diurna (intermedia e fredda).

Al fine di determinare in modo sintetico quanto una sorgente di luce alteri il colore degli oggetti illuminati è stato introdotto dal CIE un fattore detto indice di resa cromatica  $R_a$ . Il valore massimo, pari a 100, fa riferimento alla luce prodotta da una lampada ad incandescenza campione, mentre valori via via più bassi indicano rese sempre peggiori.

Per determinare il valore di  $R_a$  si misurano con uno spettrofotometro le coordinate cromatiche di 14 campioni di colori definiti, illuminati rispettivamente con la sorgente di riferimento e con la sorgente in esame, e se ne valuta lo scostamento. La tabella riporta i valori di  $CCT$  e  $R_a$  per un gruppo di lampade di comune impiego.

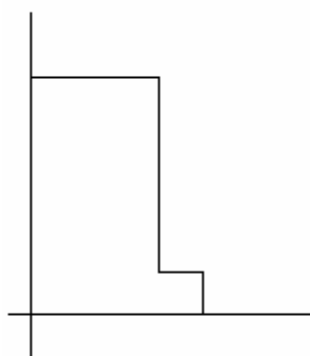


Lampada	CCT (K)	$R_a$	X	Y
Alogena	3190	100	0,424	0,399
Fluorescente bianco freddo	4250	62	0,373	0,385
Fluorescente bianco caldo	3020	52	0,436	0,406
Fluorescente De Luxe bianco freddo	4050	89	0,376	0,368
Fluorescente De Luxe bianco caldo	2940	73	0,440	0,403
Fluorescente luce diurna	6250	74	0,316	0,345
Vapori di mercurio	5710	15	0,326	0,390
Vapori di mercurio corretti	4430	32	0,373	0,415
Vapori di mercurio con alogenuri	3720	60	0,396	0,390
Sodio alta pressione	2100	21	0,519	0,418

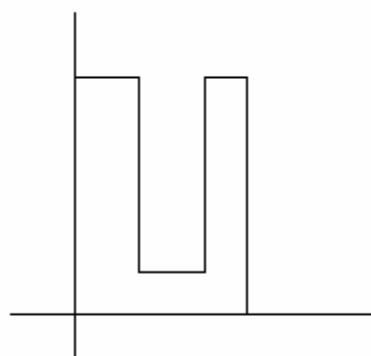
### 3.3 Processo Sottrattivo

Utilizzato nella stampa e nella fotografia a colori, sfrutta la proprietà dei filtri ottici (ad esempio degli inchiostri) di assorbire selettivamente determinati. I pigmenti ideali per un processo tricromatico sottrattivo sono quindi i seguenti:

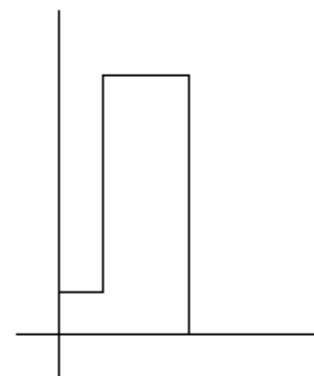
- ROSSO NEGATIVO            Assorbe il rosso, appare CIANO  
VERDE NEGATIVO           Assorbe il verde, appare MAGENTA  
BLU NEGATIVO             Assorbe il blu, appare GIALLO



“Rosso Negativo”  
(passa tutto tranne il rosso)  
CIANO

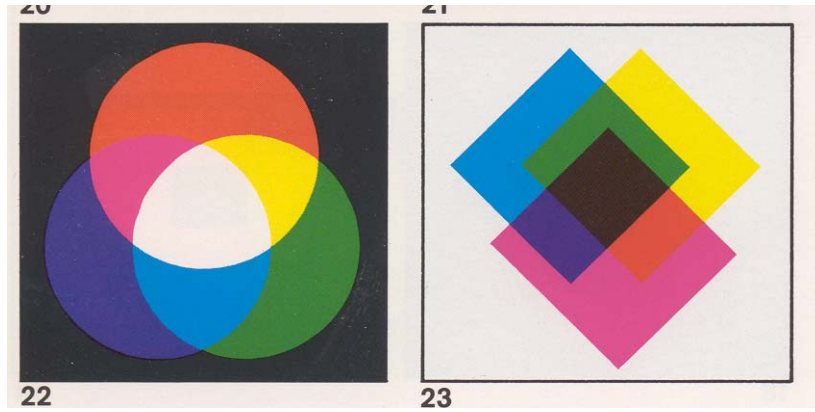


“Verde Negativo”  
PORPORA (MAGENTA)



“Blu Negativo”  
GIALLO

La figura seguente illustra i diversi risultati che si ottengono attraverso un processo additivo che utilizza i colori primari *RGB* (riquadro n. 22) e attraverso un processo sottrattivo che utilizza i filtri Ciano, Magenta e Giallo (riquadro n. 23)



Si riporta infine una versione “a colori” del triangolo dei colori CIE

