



COLORIMETRIA

Sommario

Percezione cromatica	2
Attributi della percezione del colore	2
Miscele di colori	11
Leggi di Grassmann.....	16
Temperatura di colore	20
Termocolorimetro	26
Illuminanti planckiani e non planckiani	29
Illuminanti CIE	30
Sistema Munsell	35
Rappresentazione cromatica	39
Imitazione del colore.....	46
Sistema CIE 1931	51
Sistema CIE 1964: CIE UCS, CIE Lu'v'	61
Sistema CIE 1976: CIE L*a*b*, CIE L*C*h*	65
Metamerismo	68
Sistema GATF.....	70
Strumenti per la misura del colore.....	74

Percezione cromatica

Gli oggetti si rendono visibili attraverso l'energia luminosa che irradiano (se sono sorgenti), che riflettono (se sono opachi) o trasmettono (se sono trasparenti) verso i nostri occhi. Per misurare i colori, occorre determinare l'energia raggiante che si propaga sotto forma di onde elettromagnetiche.

Un corpo o una sorgente luminosa possiedono un determinato colore quando provocano nell'osservatore una sensazione cromatica. In prima approssimazione, si considera bianca la luce del sole, che è costituita da un insieme di luci monocromatiche. Qualsiasi luce che non contenga tutte queste radiazioni monocromatiche nelle stesse proporzioni della luce solare, è percepita come colorata. L'occhio umano è sensibile alle radiazioni elettromagnetiche aventi lunghezze d'onda comprese tra circa 380 e 760 nm; qualsiasi corpo che assorba parte dello spettro visibile si percepisce colorato.

La visione del colore è un processo complesso, che avviene in parte nell'occhio ed in parte nel cervello; ciò spiega, ad esempio, perché due osservatori, provvisti di visione normale, spesso vedano lo stesso colore in modo diverso. La difficoltà di giungere alla misura delle caratteristiche dei colori è legata al problema di definire in senso fisico le sensazioni. È, infatti, necessario identificare mediante dati numerici le caratteristiche di una sensazione cromatica e, ad esempio, stabilire se due colori sono uguali (nel senso che danno luogo alla stessa sensazione cromatica). La sensazione visiva provocata da un flusso luminoso, incidente sulla retina, ha tre attributi: la tinta, la saturazione, la brillantezza (chiarezza), che, considerati contemporaneamente, danno la sensazione di colore.

Attributi della percezione del colore

È possibile isolare le caratteristiche della percezione cromatica che consentono, in una certa misura, di descrivere, classificare, scomporre il colore percepito. Queste caratteristiche vengono chiamate **attributi della percezione del colore**.

Si tratta di variabili mentali che non definibili con precisione, ma che è possibile solo evocare mediante nomi e aggettivi. Così si può dire se un colore percepito è chiaro o scuro, vivo o pallido, tendente al rosso o al blu.

Gli attributi della percezione di colore sono sei: tre attributi di base e tre attributi relativi.

Gli **attributi di base** sono:

- brillantezza,
- tinta,
- pienezza.

Gli **attributi relativi** sono:

- chiarezza, cioè brillantezza relativa a quella del bianco;
- croma, cioè pienezza relativa a quella del bianco;
- saturazione, cioè pienezza relativa alla sua brillantezza.

L'insieme di tinta e saturazione definisce la cromaticità di un colore.

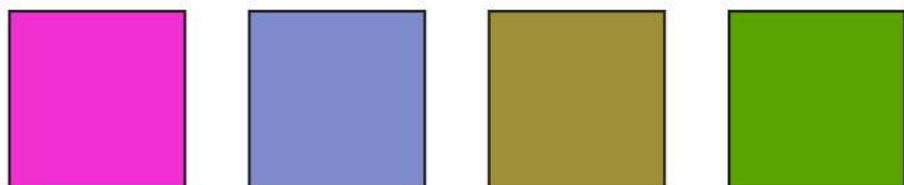
Brillantezza

La CIE definisce la **brillantezza (brightness)** come l'attributo di una percezione visiva secondo il quale un'area appare emettere o riflettere più o meno luce.

Nella prima figura, la luce che proviene dalle quattro aree colorate diminuisce da sinistra a destra; ovvero, diminuisce la brillantezza:



Nella seconda figura, la brillantezza delle quattro aree colorate appare costante, mentre le tinte sono diverse:



La brillantezza si esprime con gli aggettivi "fioco" (dim), "debole", "intenso", "abbagliante", "luminoso" (bright), "lucente", "brillante", "splendente" e dipende dalle condizioni di vista. Ad esempio, la luce di una

motocicletta di notte appare di elevata brillantezza, ma di giorno appare ridotta.

La brillantezza di una sorgente luminosa è l'attributo della percezione di colore che permette di quantificare la sua emissione in funzione della potenza fornita:

$$\text{Brillantezza} = \Phi_{tot}$$

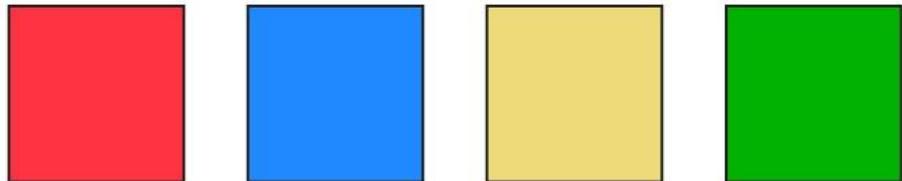
La brillantezza si può giudicare sia per *colori isolati* sia per *colori non isolati*.

È l'attributo percettivo correlato con la *luminanza*. Occorre tener presente che brillantezza e luminanza, fissate le condizioni visive, non sono tuttavia correlate linearmente.

Tinta

La *tinta (hue)* è l'attributo della percezione di colore che esprimibile con "rosso", "azzurro", "giallo", "verde", ecc.

Nella prima figura, la brillantezza delle quattro aree è mantenuta all'incirca costante, ma varia la tinta:



Nella seconda figura, la brillantezza delle quattro aree grigie varia:



Quantitativamente, la tinta è la lunghezza d'onda delle luci monocromatiche e la lunghezza d'onda dominante delle luci policromatiche:

$$Tinta = \lambda, \lambda_d$$

Nella luce bianca tutte le radiazioni elettromagnetiche dello spettro visibile sono contenute in quantità equienergetiche. Un corpo si definirà bianco quando, colpito da luce bianca, riflette totalmente le radiazioni incidenti. Se invece assorbe parte delle radiazioni e riflette/trasmette le restanti, la sensazione visiva del colore sarà determinata dalle radiazioni riflesse/trasmesse. Un oggetto appare quindi di una determinata tinta, se riflette le radiazioni omonime; se assorbe tutte le radiazioni, apparirà nero.

Campi di tinte dello spettro visibile	
Tinta	Banda spettrale
Violetto	380 – 435 nm
Blu	435 – 485 nm
Ciano	485 – 500 nm
Verde	500 – 545 nm
Verde-giallo	545 – 570 nm
Giallo	570 – 595 nm
Arancione	595 – 625 nm
Rosso	625 – 685 nm
Rosso scuro	685 – 760 nm

La tinta si può giudicare sia per colori isolati sia per colori non isolati.

Non tutti i colori hanno una tinta: un colore che ha una tinta è detto **colore cromatico (chromatic color)**, un colore che non la possiede è detto **colore acromatico (achromatic color)**, tipicamente i grigi.

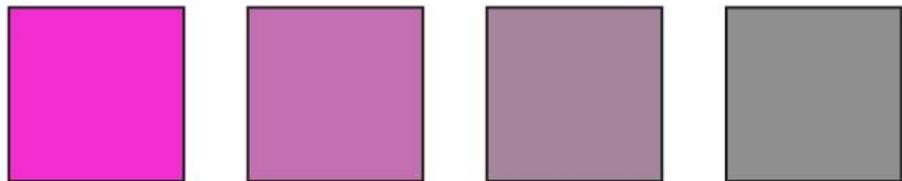
Le tinte hanno un naturale ordinamento circolare. Si possono individuare sei tinte che risaltano in modo più evidente delle altre: rosso, arancio, giallo, verde, blu e viola, ma l'occhio umano si ritiene possa distinguere un numero di tinte compreso tra 100 e 200. Secondo Evans

(1948), l'occhio umano distingue nello spettro circa 125 tinte.

Pienezza

La **pienezza (colorfulness)** è l'attributo della percezione cromatica secondo il quale un'area appare esibire una quantità, o intensità, maggiore o minore di tinta. I colori acromatici per definizione non hanno tinta e dunque hanno pienezza nulla. Man mano che aumenta la quantità di tinta (a brillantezza costante e tinta costante) aumenta la pienezza.

Nella figura, la brillantezza e la tinta (quando c'è) sono tenute costanti, mentre la pienezza diminuisce da sinistra verso destra:



Blu e celeste hanno la stessa tinta; ma il blu ha pienezza maggiore del celeste, è più ricco, e lo stesso si può dire del viola rispetto al lilla, del rosso rispetto al rosa.

La pienezza dipende dal livello di illuminazione: quando questa aumenta, la pienezza aumenta. Ad esempio, un oggetto rosso può avere pienezze diverse, perché è in parte in luce e in parte in ombra.

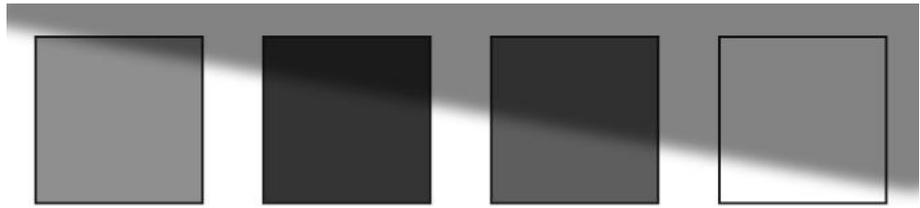
La pienezza si può giudicare sia per colori isolati sia per colori non isolati.

Nel linguaggio comune si usano gli aggettivi "ricco", "pieno", "vivo" e, in senso opposto, "smorto" per indicare la pienezza del colore.

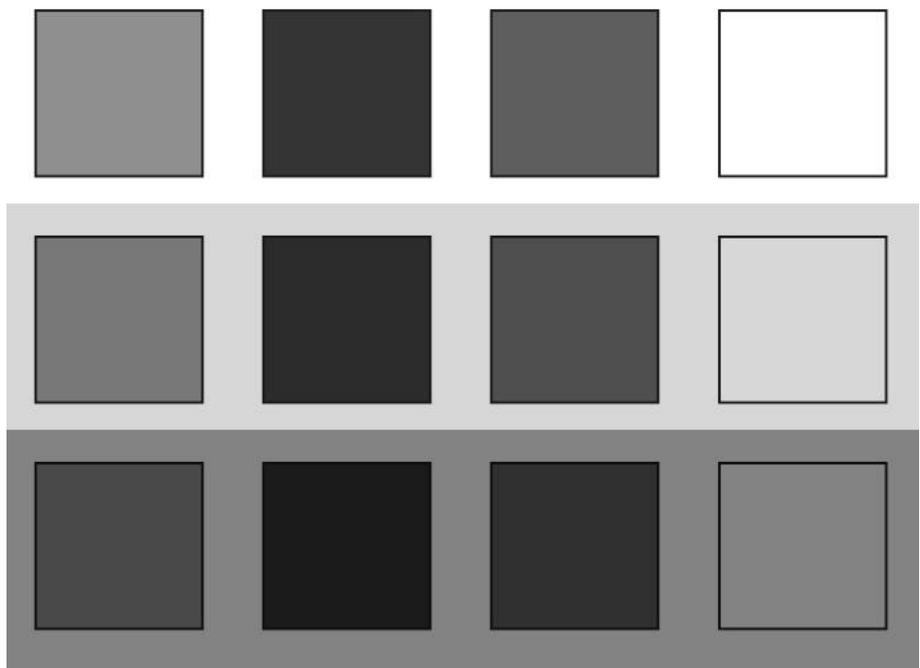
Chiarezza

La **chiarezza (lightness)** è la brillantezza di un'area giudicata relativamente alla brillantezza di un'area similmente illuminata che appare bianca.

Nella prima figura, la chiarezza di ognuno dei quattro grigi su carta bianca rimane costante, all'ombra e fuori dall'ombra:



Nella seconda figura, i quattro grigi sono riprodotti con intensità diverse di illuminazione, ma la chiarezza di ognuno rimane costante:



Se si osserva uno dei quattro quadrati grigi sul fondo bianco in piena luce e poi in penombra, la brillantezza sia del bianco sia del grigio diminuisce. Ma, rispetto al bianco, il grigio ha mantenuto invariata la sua brillantezza relativa, cioè la sua chiarezza. Di conseguenza, la chiarezza non varia al variare delle condizioni di illuminazione.

Dunque, se si giudica la quantità di luce in maniera assoluta, si sta giudicando la brillantezza. Se si giudica la quantità di luce in relazione al bianco (cioè scartando la differenza di illuminazione), si sta giudicando la chiarezza.

Se la carta bianca con il quadrato grigio è illuminata tutta e sempre alla stessa maniera, cioè con lo stesso illuminante e senza ombre, le differenze di chiarezza

sono uguali alle differenze di brillantezza. Ma se si formano zone d'ombra e zone più chiare o se l'illuminazione varia nel corso della giornata, chiarezza e brillantezza sono grandezze percettive diverse.

Il giudizio sulla chiarezza si può estendere anche ai colori cromatici (cioè quelli che hanno una tinta) perché ognuno di essi può essere paragonato ad un grigio di equivalente chiarezza.

Nel linguaggio comune la chiarezza si esprime con gli aggettivi "chiaro" (light) e "scuro" (dark). Il nero non appare emettere luce ed è il più scuro di tutti, il bianco appare emettere la massima quantità di luce ed è il più chiaro di tutti, i grigi intermedi appaiono emettere quantità intermedie di luce ed hanno una chiarezza intermedia.

La chiarezza di un oggetto, di per sé non luminoso, è l'attributo della percezione di colore che permette di quantificare la sua capacità di riflettere/trasmettere radiazioni rispetto alle condizioni di illuminamento dell'ambiente:

$$\text{Chiarezza} = (\Phi_{r,t} / \Phi_i) \cdot 100$$

La chiarezza fa riferimento ad un bianco e dunque si può giudicare solo per colori non isolati.

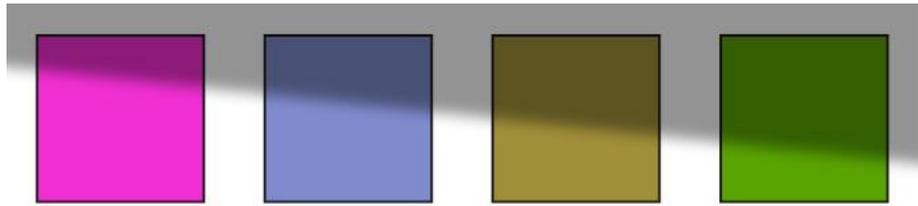
Pare che l'occhio umano possa distinguere circa 100 gradazioni di chiarezza, dal nero al bianco. Le gradazioni di chiarezza si esprimono con gli aggettivi "chiaro", "scuro".

La chiarezza è l'attributo percettivo correlato con il **fattore di luminanza**.

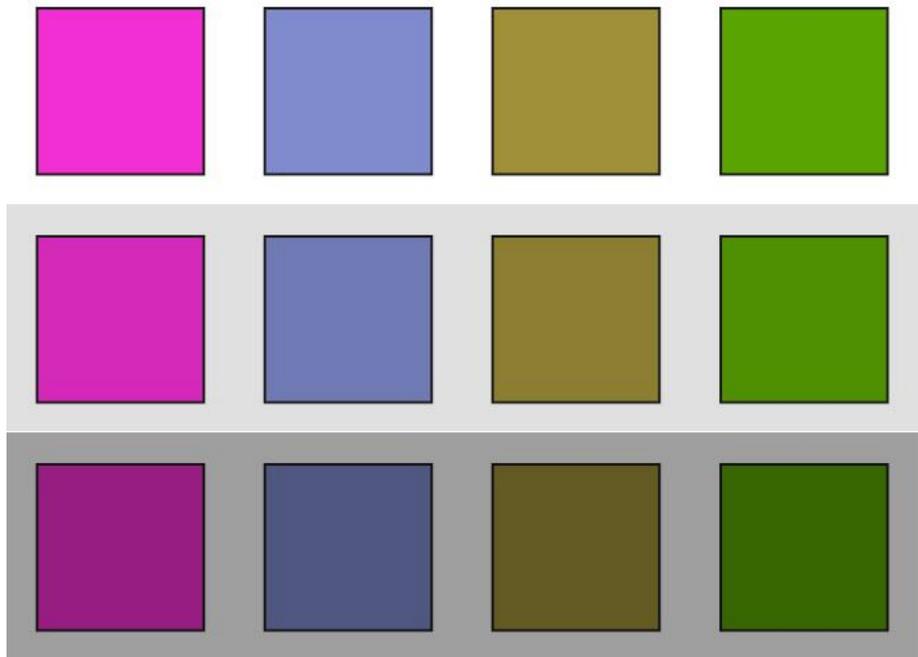
Croma

La **croma (chroma)** è l'attributo della percezione di colore che si usa per indicare l'intensità della tinta indipendentemente dal livello di illuminazione: se quest'ultima varia la croma rimane costante.

Nella prima figura, la croma di ciascuna delle quattro aree colorate rimane costante, all'ombra e fuori dall'ombra:



Nella seconda figura, le quattro aree colorate sono riprodotte con intensità diverse di illuminazione, ma la cromia di ognuna rimane costante:



Se il livello di illuminazione varia, oltre alla brillantezza varia anche la pienezza. Un quadrato rosso su un cartoncino bianco ha una certa pienezza alla luce del sole, minor pienezza in un giorno nuvoloso, meno ancora di sera e alla luce della luna perde quasi del tutto la pienezza.

Poiché la pienezza dipende dall'illuminazione, si può allora considerare una pienezza relativa, indipendente dal livello di illuminazione (analogamente a come è stata considerata una brillantezza relativa, la chiarezza).

Se il quadrato rosso di sera ha minor pienezza, anche il bianco ha una minore brillantezza e ciò permette all'osservatore di attribuire la poca pienezza al basso livello di illuminazione e non all'oggetto stesso, che ha una cromia costante.

La croma fa riferimento ad un bianco e dunque si può giudicare solo per i colori non isolati.

Se il cartoncino è illuminato sempre alla stessa maniera, cioè con lo stesso illuminante e senza ombre, pienezza e croma sono la stessa cosa.

Il nostro sistema visivo è portato a giudicare la croma di un oggetto, non la pienezza.

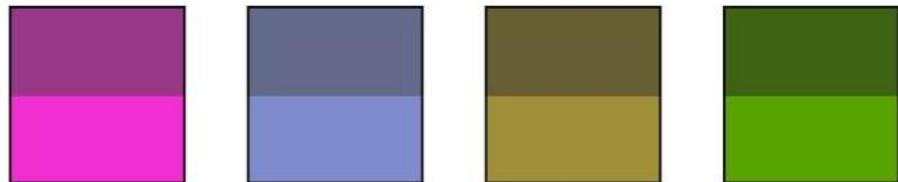
La croma si descrive con gli aggettivi "povero", "debole" e "ricco", "vivo".

La massima croma possibile varia con la tinta e con la chiarezza. La croma è massima per i colori per i quali il sistema visivo ha la massima sensibilità (giallo, verde). Pare che l'occhio possa distinguere tra 100 e 200 livelli di croma (Evans).

Saturazione

La **saturazione (saturation)** è la pienezza di un'area giudicata in proporzione alla sua brillantezza.

Nella figura, la saturazione di ciascuna delle quattro aree colorate rimane costante, all'ombra e fuori dall'ombra:



Si consideri un semaforo rosso nella notte, visto direttamente e poi riflesso in una vetrina. Quando visto direttamente, ha una brillantezza elevata ed una pienezza elevata. Nella riflessione su una vetrina, perde un po' della propria brillantezza e della propria pienezza, ma viene sempre visto rosso e non rosa, perché la sua minore pienezza viene valutata in relazione alla minore brillantezza e la saturazione viene giudicata la stessa. Quindi la riconoscibilità del semaforo dipende da tinta e saturazione, non da tinta e pienezza.

Permette di valutare la percentuale di percezione cromaticamente pura presente in quella totale (per esempio, un rosso con purezza 80% avrà 80 parti rosse e 20 parti bianche); in altri termini è la percentuale di tinta pura presente in un colore. Si può quindi affermare che variazioni di saturazione fanno considerare un colore

più o meno sbiadito (per esempio, il rosa ha saturazione inferiore al rosso), passando dai colori spettrali, che hanno una saturazione del 100% e sono detti puri, al bianco che ha saturazione nulla. La saturazione è quindi il rapporto tra il flusso luminoso monocromatico dominante e il flusso luminoso totale (monocromatico + bianco) emesso o riflesso dall'elemento colorato preso in esame:

$$\text{Saturazione} = (\Phi_d / \Phi_{tot}) \cdot 100$$

Sarà uguale al 100% se il flusso luminoso è monocromatico e uguale allo 0% se il flusso è acromatico.

La saturazione si può giudicare sia per colori isolati sia per colori non isolati.

Miscele di colori

Colori primari

Primari additivi

I colori primari di una mescolanza additiva sono quelli che vengono utilizzati nella stessa.

Con il termine **primari additivi** si indicano solitamente tre colori la cui mescolanza additiva produce ogni altro colore e si individuano questi tre colori nel rosso, verde e blu. Questo uso del termine è improprio, in quanto non esiste nessun insieme finito di colori la cui mescolanza additiva generi ogni altro colore. In altre parole, i primari additivi, con il significato appena detto, non esistono.

D'altronde, se si prende in considerazione una mescolanza additiva di tre componenti e da questa si vuole ottenere il maggior numero possibile di colori, allora il rosso, il verde ed il blu sono i tre componenti più opportuni da miscelare.

Si deve comunque tenere presente che nessun numero finito di componenti è in grado di riprodurre in sintesi additiva tutti i colori dello spettro visibile. Per il meccanismo della sintesi additiva, la miscela di due luci monocromatiche non riproduce una luce monocromatica, in quanto la luce risultante avrà una tinta intermedia e la saturazione sarà sempre inferiore a quella di una luce monocromatica della stessa tinta.

Si definiscono **complementari** due luci colorate che per sintesi danno uno stimolo acromatico (bianco, grigio, nero). Ogni lunghezza d'onda dello spettro visibile ha un suo complementare (che può anche non essere spettrale): per ciascuna esiste la corrispondente che, mescolata in opportune quantità alla prima, fornisce lo stimolo acromatico. Due lunghezze d'onda complementari si trovano nello spettro visibile l'una dalla parte opposta all'altra. Il verde, che occupa la parte centrale dello spettro, non ha quindi un corrispettivo: per trovarne la tinta complementare occorre mescolare la tinta rossa con la tinta blu-violetta in varie proporzioni. Si originano così le luci magenta (porpora), che non hanno quindi lunghezze d'onda definibili fisicamente, ma esclusivamente in modo convenzionale tramite quelle complementari.

Primari sottrattivi

Le stesse considerazioni viste per i primari additivi valgono anche per i colori primari di una mescolanza sottrattiva:

- una mescolanza sottrattiva può essere fatta con un numero qualunque di colori;
- per definizione, i primari di una mescolanza sottrattiva sono i colori usati nella stessa;
- si citano impropriamente come **primari sottrattivi** i colori ciano, magenta e giallo, in quanto capaci di riprodurre, per mescolanza sottrattiva, tutti gli altri colori; in realtà, non

- esiste nessun insieme finito di colori in grado di dare un simile risultato;
- per ottenere il maggior numero di colori in mescolanza sottrattiva con tre componenti, è comunque opportuno che questi siano il ciano, il magenta ed il giallo.

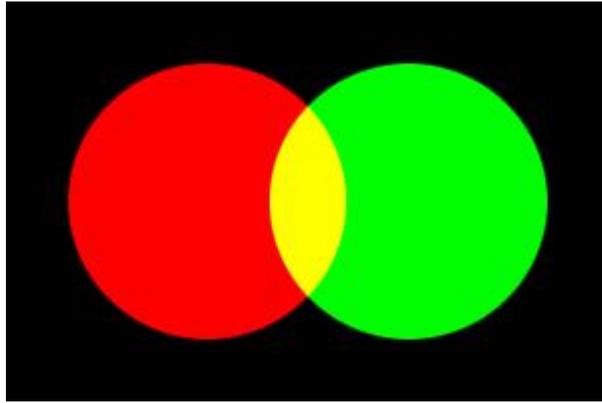
Sintesi additiva e sottrattiva

Sintesi additiva

Si ha la **mescolanza additiva** o **miscela additiva** di due o più stimoli di colore nei seguenti casi:

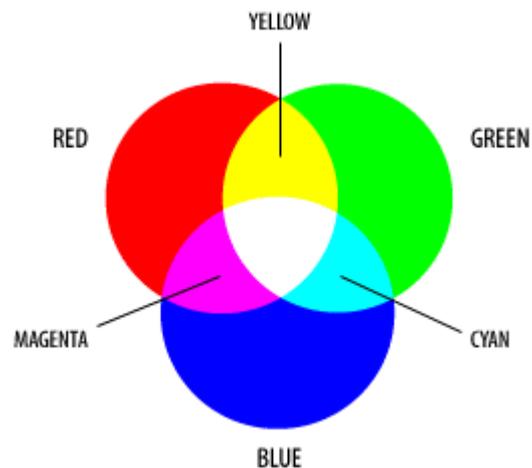
- i diversi stimoli di colore arrivano all'occhio invariati,
- i diversi stimoli di colore entrano nell'occhio simultaneamente o in rapida successione,
- i diversi stimoli di colore incidono sulla stessa area di retina, anche in forma di mosaico.

Un esempio è quello di un fascio di luce rossa e di un fascio di luce verde proiettati, parzialmente sovrapposti, su uno schermo bianco in un ambiente non altrimenti illuminato. I due stimoli luminosi rosso e verde vengono riflessi dallo schermo e giungono simultaneamente ed immutati all'occhio, dove incidono sulla stessa area di retina. Dal punto di vista fisico non avviene alcuna interferenza tra i due fasci luminosi, ma il sistema visivo percepisce il colore risultante dalla mescolanza dei due stimoli come giallo. Il giallo è, in questo caso, un colore prodotto dalla mescolanza additiva del rosso e del verde.



In definitiva, il colore percepito di una mescolanza additiva di stimoli è determinato dai meccanismi visivi ed è quindi un **fenomeno biologico**.

La mescolanza additiva dei primari RGB è riassunta nel seguente schema:



$$\begin{aligned} R + G &= Y \\ G + B &= C \\ B + R &= M \\ R + G + B &= W \end{aligned}$$

In sintesi additiva, si definiscono complementari due luci che sommate danno il bianco:

$$R + C = W$$

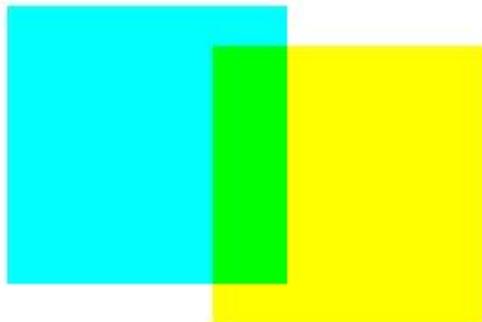
$$G + M = W$$

$$B + Y = W$$

Sintesi sottrattiva

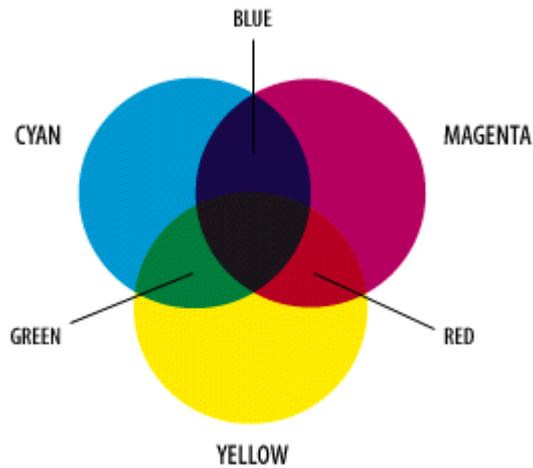
La **mescolanza sottrattiva** o **miscela sottrattiva** di due stimoli di colore è la mescolanza di stimoli di colore che giungono modificati all'occhio.

Un esempio è quello della sovrapposizione di un inchiostro giallo e di un inchiostro ciano su un foglio bianco. In questo caso, i due strati di inchiostro si comportano come filtri per la luce: la luce bianca attraversa l'inchiostro giallo che ne assorbe la componente blu, la parte rimanente attraversa l'inchiostro ciano che ne assorbe la componente rossa, la parte rimanente è riflessa dalla carta bianca e costituisce lo stimolo di colore verde che arriva all'occhio dell'osservatore.



In definitiva, il colore percepito di una mescolanza sottrattiva è determinato da cause fisiche (assorbimento della luce da parte di corpi colorati).

La mescolanza sottrattiva dei primari CMY è riassunta nel seguente schema:



$$\begin{aligned}
 C + M &= B \\
 M + Y &= R \\
 Y + C &= G \\
 C + M + Y &= K
 \end{aligned}$$

In sintesi sottrattiva, si definiscono complementari due sostanze colorate che sommate danno il nero:

$$\begin{aligned}
 C + R &= K \\
 M + G &= K \\
 Y + B &= K
 \end{aligned}$$

Leggi di Grassmann

Hermann Günther Grassmann (1809-1877) è autore della teoria sulla mescolanza dei colori che prende il suo nome e la cui pubblicazione risale al 1853.

La teoria si basa sui seguenti attributi del colore:

- tinta;
- brillantezza del colore;
- brillantezza del bianco;

ed introduce i due seguenti termini derivati:

- brillantezza totale = brillantezza del colore + brillantezza del bianco;
- saturazione = brillantezza del colore / brillantezza totale.

Definiti questi termini, la teoria formula quattro postulati, noti come **leggi di Grassmann**, dai quali dedurre le altre affermazioni della colorimetria.

Prima legge

La sensazione di colore è completamente specificata da tre grandezze: tinta, brillantezza del colore ed brillantezza del bianco.

Questo primo postulato afferma che per definire una sensazione di colore è necessario e sufficiente specificare tre grandezze indipendenti, introducendo così il concetto di **dimensione dello spazio colore**. In altri termini, secondo Grassmann lo spazio colore è tridimensionale, essendo basato su tre variabili indipendenti.

Il postulato non viene meno scegliendo un'altra terna, ad esempio le quantità di tre colori indipendenti (colori primari). La sua nuova formulazione afferma che, scelta una terna di luci, è possibile, con una mescolanza di queste, riprodurre un qualunque colore. Ne discende la possibilità di caratterizzare una luce colorata k , di brillantezza B , mediante i valori delle brillanze B_1 , B_2 , B_3 delle tre luci di riferimento:

$$B (\text{luce } k) = B_1 (\text{luce } 1) + B_2 (\text{luce } 2) + B_3 (\text{luce } 3)$$

Naturalmente, cambiando terna di colori primari, variano anche i flussi necessari per ottenere k .

Seconda legge

Se una luce varia con continuità, anche la sensazione di colore della mescolanza additiva con una seconda luce fissata varia con continuità.

Questo secondo postulato afferma che una tinta varia con continuità se varia con continuità la lunghezza d'onda; inoltre, quando si arriva alla massima lunghezza

d'onda (rosso) si passa alla minima (violetto) e viceversa (attraverso il viola).

Una sensazione di colore varia con continuità se variano con continuità la brillantezza del colore, la brillantezza del bianco e, qualora la brillantezza del colore non sia nulla, anche la tinta. Qualora la brillantezza del colore sia nulla, cioè la variazione avvenga attraverso il bianco, una tinta può trasformarsi con continuità in un'altra di lunghezza d'onda completamente diversa.

Dunque, Grassmann suppone che il violetto abbia lo stesso aspetto del rosso estremo, in modo tale che lo spettro del visibile si chiuda a cerchio su se stesso. In realtà, la formulazione va corretta introducendo il magenta (colore non spettrale) tra il rosso ed il violetto. Con questa modifica, l'esperienza conferma questo postulato: non vi sono mai bruschi mutamenti di colore al variare continuo della luce che ne produce la sensazione.

Terza legge

Il risultato di una mescolanza additiva di colori dipende solo dal loro aspetto e non dalla loro composizione fisica.

Questo terzo postulato è di grande importanza, poiché permette di prescindere dalle caratteristiche fisiche della luce e di parlare semplicemente di colori, nonché di interpretare i colori come vettori e la mescolanza di due colori come somma di due vettori.

Ne consegue che, se due superfici producono la stessa sensazione di colore, l'equivalenza sarà ancora mantenuta qualora le brillanze dell'una e dell'altra siano moltiplicate per uno stesso numero. Per la prima legge si può allora scrivere:

$$nB (\text{luce } k) = nB_1 (\text{luce } 1) + nB_2 (\text{luce } 2) + nB_3 (\text{luce } 3)$$

dove "n" è un numero qualsiasi maggiore di zero.

Era già noto a Newton che due colori che appaiono uguali possono avere caratteristiche spettrali diverse. Ad

esempio, il colore M può essere formato per mescolanza di A e B oppure per mescolanza di C e D. Nel primo caso la caratteristica spettrale di M è la somma delle caratteristiche spettrali di A e B, nel secondo caso di C e D. Due colori che appaiono uguali ma hanno caratteristiche spettrali diverse sono definiti **colori metameri**.

Ci si può chiedere se due colori metameri, cioè due colori visivamente uguali ma fisicamente diversi, mescolati con un terzo colore, diano come risultato due colori uguali o se, al contrario; il risultato della mescolanza dipenda anche dalle caratteristiche fisiche. La risposta che fornisce l'esperienza è che il risultato di una mescolanza di colori è indipendente dalle loro caratteristiche spettrali e dipende solo dal loro aspetto.

Quarta legge

L'intensità luminosa di una mescolanza additiva di colori è la somma delle intensità luminose dei colori mescolati.

In sostanza, l'intensità luminosa di una mescolanza è additiva e, infatti, questo quarto postulato è noto anche come **additività delle luminosità** e come **legge di Abney**. In realtà, l'enunciato è vero solo se si sostituisce la luminosità con la luminanza, questa sì additiva:

$$L (\text{luce 1} + \text{luce 2}) = L_1 (\text{luce 1}) + L_2 (\text{luce 2})$$

Note le terne di brillantezza delle luci di riferimento che caratterizzano due diversi colori k' e k'' , la terna della luce miscelata $k' + k''$ è costituita dai valori di brillantezza ottenuti per somma delle brillanze di uguale cromaticità dei colori componenti. Per la prima legge, si ha:

$$\begin{aligned} B' (\text{luce } k') &= \\ &= B_1' (\text{luce 1}) + B_2' (\text{luce 2}) + B_3' (\text{luce 3}) \end{aligned}$$

$$B'' (\text{luce } k'') = B_1'' (\text{luce } 1) + B_2'' (\text{luce } 2) + B_3'' (\text{luce } 3)$$

ottenendo:

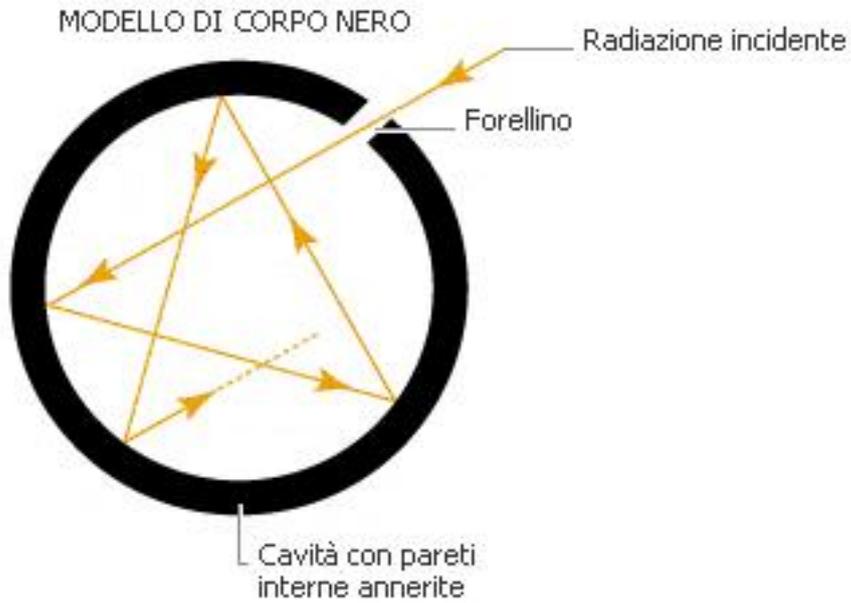
$$B (\text{luce } k' + \text{luce } k'') = (B_1' + B_1'') (\text{luce } 1) + (B_2' + B_2'') (\text{luce } 2) + (B_3' + B_3'') (\text{luce } 3)$$

Temperatura di colore

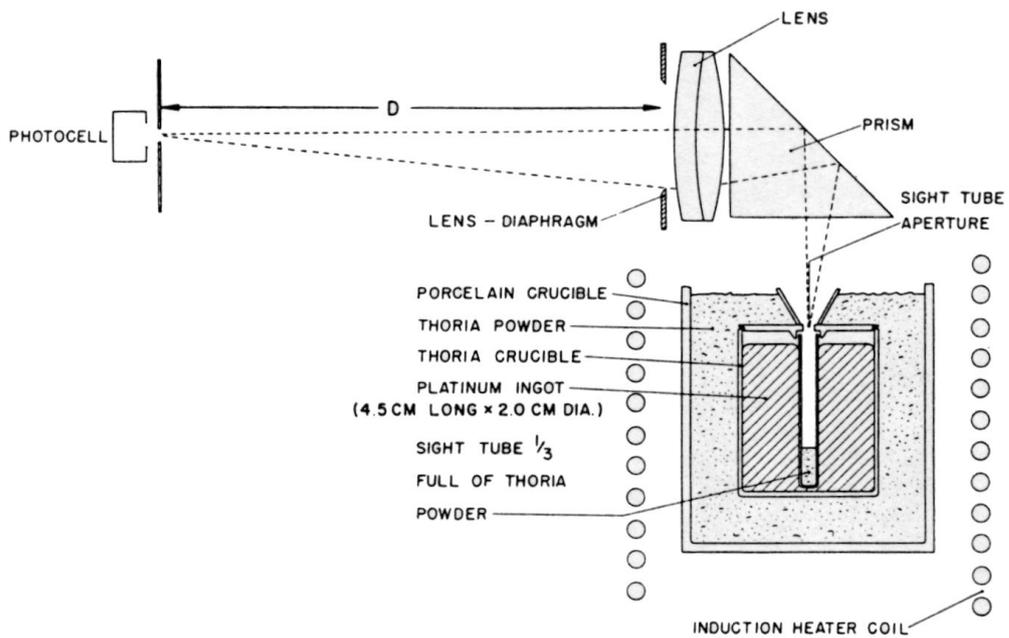
Qualunque oggetto esistente in natura è in grado di assorbire, riflettere o emettere radiazioni. Ad esempio, una sbarra di acciaio scaldata gradualmente emette dapprima radiazioni infrarosse, poi rosse, poi gialle, a energia sempre crescente.

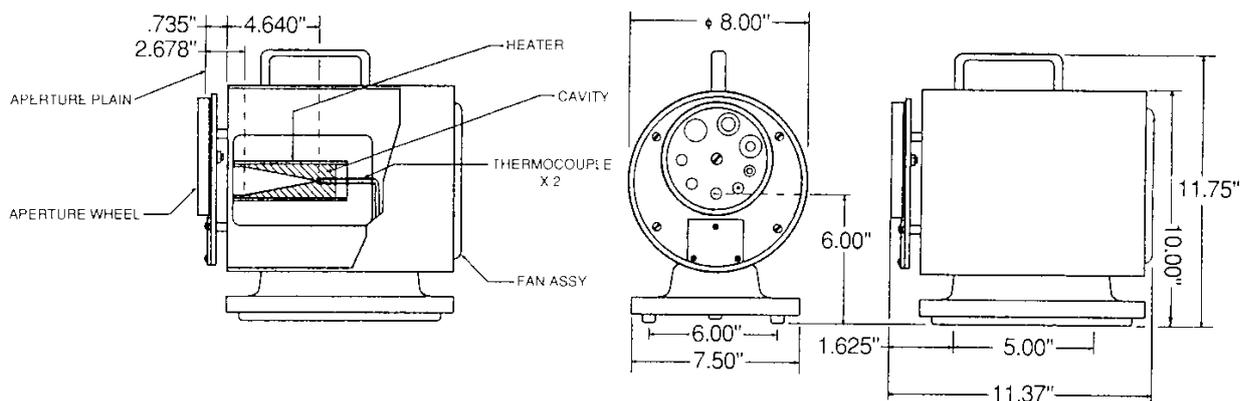
Per analizzare l'emissione luminosa di un illuminante, è necessario introdurre il concetto di **corpo nero**: un radiatore termico (sorgente che emette radiazioni per effetto termico), capace di emettere le radiazioni spettrali e di assorbire quelle incidenti indipendentemente dalle loro lunghezze d'onda, direzioni e polarizzazioni. Nella luce proveniente dal corpo nero è quindi presente solo quella emessa, mancando del tutto quella riflessa.

Un corpo con queste caratteristiche non esiste. Ma una sfera cava, avente un piccolissimo foro e le pareti interne annerite con nerofumo e mantenute a temperatura costante, rappresenta una soddisfacente approssimazione del corpo nero, in quanto il raggio viene assorbito al suo interno prima di avere la possibilità pratica di uscire.

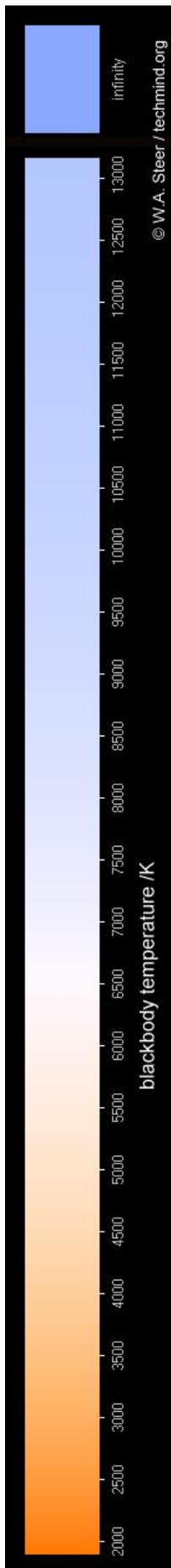


Per problemi costruttivi, la struttura di un corpo nero reale è diversa da questo modello ideale, ma ugualmente efficace.





Se si scalda progressivamente e uniformemente il corpo nero, si nota che, ad una certa temperatura, dal suo foro comincia a fuoriuscire una luce di colore rosso e che, al crescere della temperatura stessa, la radiazione emessa diventa sempre più bianca e intensa, fino ad acquistare una tonalità blu. Nella realtà, non è possibile ottenere un'emissione blu, in quanto occorrerebbe superare la temperatura di fusione del materiale che costituisce il corpo nero; ma le stelle con masse molto maggiori di quella solare confermano questa tendenza, poiché le loro fotosfere sono a temperature superiori a 10.000 K ed emettono luce blu.



Al fisico tedesco Max Planck (1858-1947) si deve la seguente relazione (**legge di Planck**, 1900), che esprime l'energia emessa dal corpo nero ad una determinata frequenza in funzione della temperatura:

$$\varepsilon_{\nu,T} = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

dove:

$\varepsilon_{\nu,T}$ = energia emessa dal corpo nero alla frequenza ν e alla temperatura assoluta T

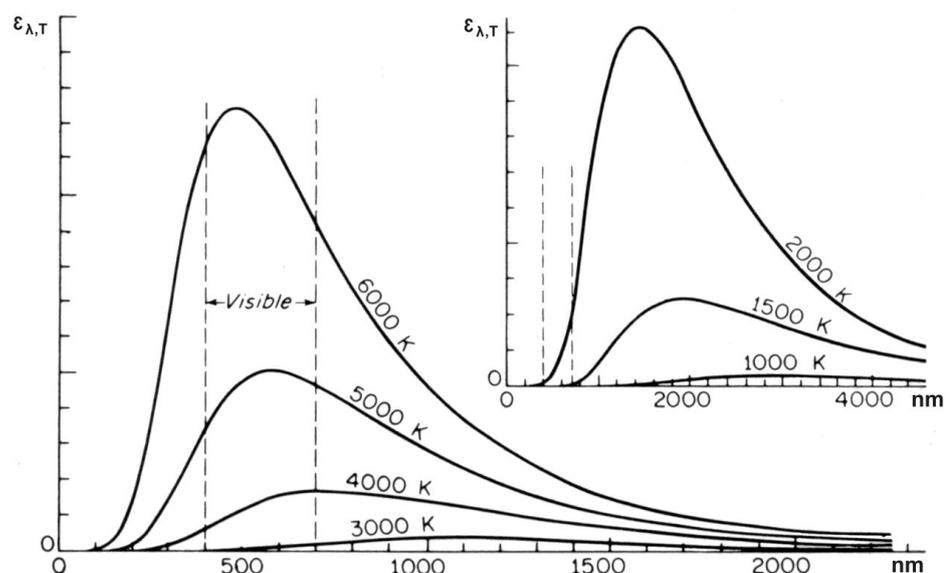
ν = frequenza di emissione del corpo nero

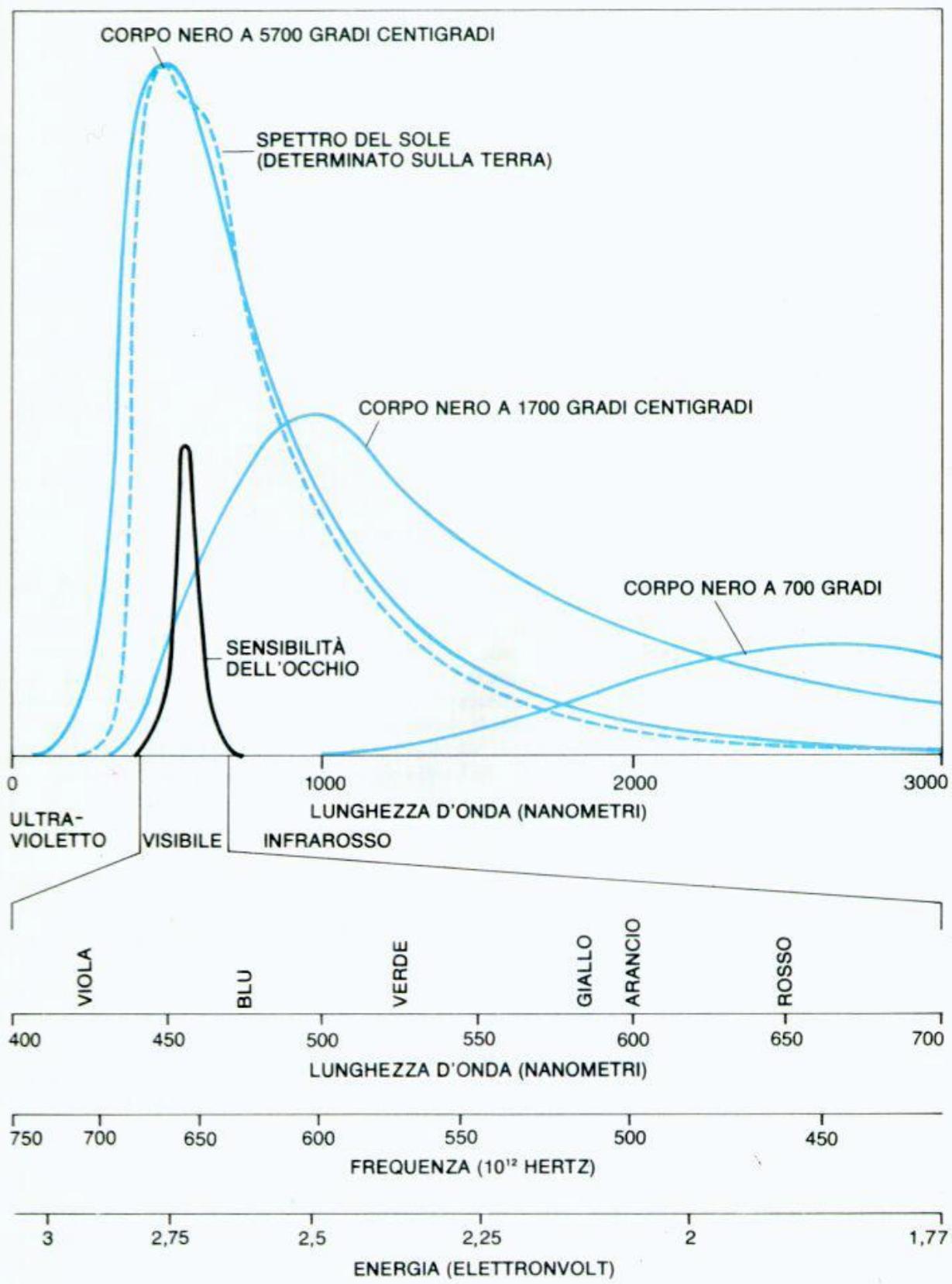
c = velocità della luce nel vuoto

h = costante di Planck

T = temperatura assoluta del corpo nero

La legge di Planck permette di ricostruire l'emissione spettrale del corpo nero a qualsiasi temperatura, come evidenziato nei grafici seguenti, dove l'area sottesa da ciascuna curva esprime l'energia luminosa totale emessa nell'unità di tempo.





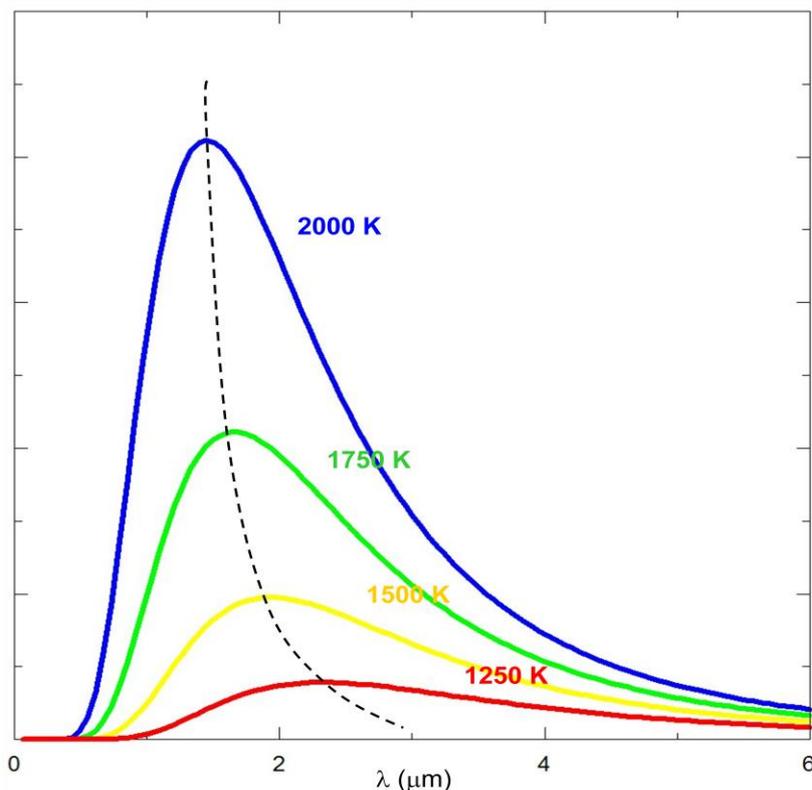
La **legge di Stefan-Boltzmann**, o **legge di Stefan** o **legge di Boltzmann**, stabilisce che l'energia irradiata nell'unità di tempo dal corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura:

$$U = \sigma \cdot T^4$$

dove: U = energia irradiata dall'unità di superficie nell'unità di tempo,
T = temperatura assoluta,
 σ = costante di Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

La relazione fu scoperta sperimentalmente da Jožef Stefan (1835-1893) nel 1879 e spiegata teoricamente da Ludwig Boltzmann (1844-1906) nel 1884. La relazione di proporzionalità inversa tra la lunghezza d'onda del massimo di emissione e la temperatura del corpo nero fu invece esplicitata da Wilhelm Wien (1864-1928) nella seguente relazione (**legge di Wien**, 1896):

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,8977685 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

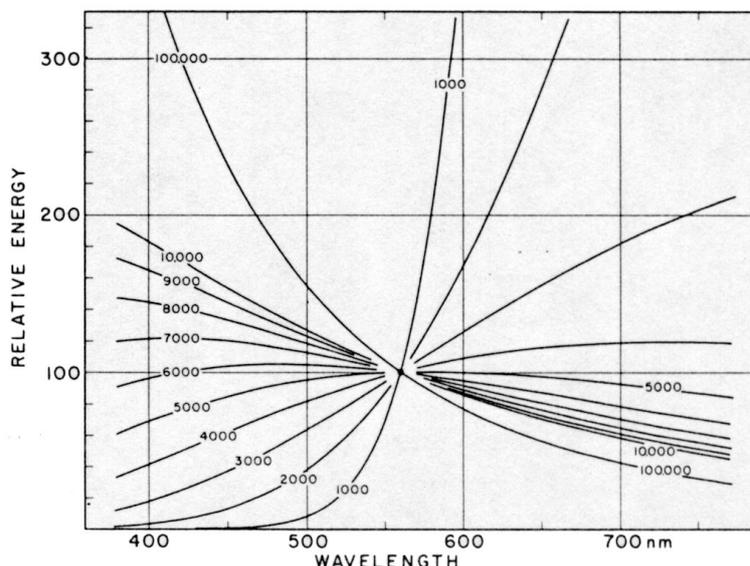


Poiché la composizione spettrale, e quindi la λ_d nel visibile, dipende esclusivamente dalla temperatura del corpo nero, è possibile definire il concetto di **temperatura di colore (T_c)** di un illuminante:

Temperatura di colore di un illuminante

Temperatura, espressa in kelvin (K), alla quale occorre portare il corpo nero affinché emetta una radiazione luminosa avente la stessa cromaticità di quella dell'illuminante in esame.

Per le applicazioni colorimetriche nel settore video-fotografico risulta particolarmente utile la rappresentazione grafica, limitata al solo campo del visibile, delle energie relative all'emissione a 555 nm, assunta uguale a 100, in funzione della lunghezza d'onda. Risulta così immediatamente evidente che la composizione spettrale nel visibile della radiazione emessa dal corpo nero passa progressivamente da una prevalenza di rossi ad una di blu all'aumentare della temperatura. In altre parole, ad una data temperatura di emissione del corpo nero corrisponde univocamente un determinato tono della radiazione emessa e viceversa, come da definizione della temperatura di colore.

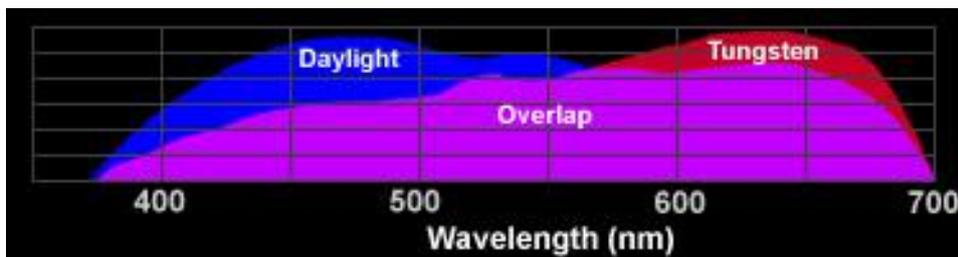


Termocolorimetro

Ogni pellicola fotosensibile è fabbricata in modo da fornire buoni risultati solo se adoperata in ben definite condizioni di ripresa.

Ad esempio, le emulsioni fotografiche per riprese in luce diurna, se utilizzate per riprese alla luce delle lampade a incandescenza, forniscono immagini tendenti al rosso-bruno. L'origine del difetto va ricercata proprio nella differenza tra le temperature di colore: la pellicola è calibrata per una resa ottimale con illuminazione a 5600 K e le lampade a incandescenza sono in grado di fornire una luce avente $T_c \approx 2600$ K.

Nel caso inverso, le pellicole per luce artificiale, tarate per una resa ottimale con luci alla temperatura di colore di 3200 K, causano l'insorgere di una dominante azzurra se utilizzate per riprese in esterni alla luce del sole ($T_c = 5600$ K).



In queste situazioni, occorre rimediare con l'uso di filtri, anteposti all'obiettivo della macchina fotografica, in grado di correggere la temperatura di colore. Si tratta di aggiungere una controdominante azzurra mediante filtri blu per compensare eccessi di colore rosso oppure di ricorrere a filtri di colore ambra per contrastare le dominanti azzurre.

Per determinare la densità del filtro necessaria in ciascuno dei due casi, si deve conoscere la differenza tra la temperatura di colore di taratura della pellicola e la temperatura di colore della sorgente di luce. Ma il contenuto effettivo di colore delle sorgenti luminose non cambia proporzionalmente alla T_c . Il problema si può risolvere trasformando la temperatura di colore in **mired (MICRO REciprocal Degree, [M])** mediante la formula:

$$M = 10^6 / T_c$$

La trasformazione fornisce una scala di valori che diminuisce con l'aumentare della temperatura di colore (contenuto di blu) della sorgente. Si può quindi ricavare il valore di spostamento mired secondo la formula:

$$\Delta M = (10^6 / T_2) - (10^6 / T_1)$$

dove: T_2 = temperatura di colore di taratura della pellicola, in K;
 T_1 = temperatura di colore della sorgente luminosa, in K.

I fabbricanti di filtri fotografici sono in grado di fornire apposite tabelle che specificano il valore mired, positivo o negativo, di ciascun filtro di loro produzione. In altri casi invece, quando la fonte di luce ha una composizione spettrale sconosciuta al fotografo, la ricerca del pacchetto di filtri necessario a compensare il ΔT_c tra l'illuminazione ignota e la pellicola richiede l'impiego di un termocolorimetro.

Poiché lo strumento è composto fondamentalmente da una coppia di esposimetri per leggere le bande alle due estremità dello spettro visibile (banda blu e banda rossa) della scena ripresa, dal confronto tra queste due quantità è possibile risalire alla temperatura di colore della luce che illumina la scena ripresa (vedere l'ultimo grafico della sezione sulla temperatura di colore). In base alla temperatura di colore misurata e al valore di taratura, in K, della pellicola usata, si ottiene il ΔT_c espresso in mired. Gli attuali termocolorimetri digitali sono in grado di indicare il tipo e la densità del filtro o del pacchetto di filtri di compensazione e alcuni permettono di analizzare la distribuzione spettrale della luce che giunge sul soggetto.



Termocolorimetro analogico a singola fotocellula Gossen.

Per determinare la temperatura di colore della sorgente, lo strumento effettua una doppia esposizione con cambio intermedio del filtro selezionatore della banda.

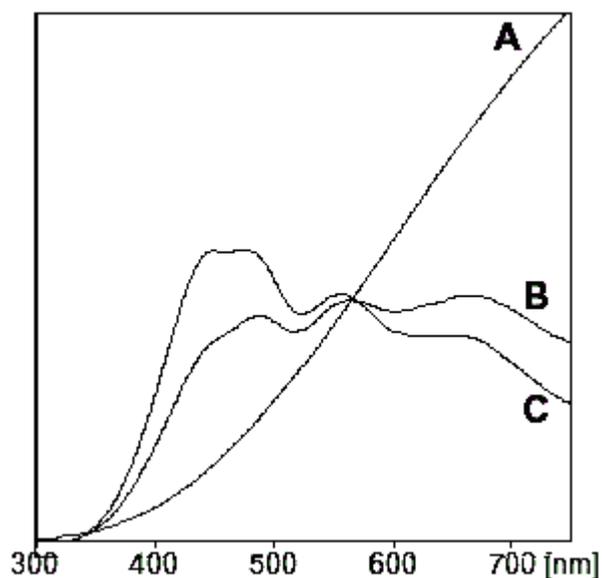


Illuminanti planckiani e non planckiani

Gli illuminanti che emettono secondo la legge di Planck sono definiti di **tipo planckiano**. Di conseguenza, è possibile associare alla loro emissione luminosa una temperatura di colore specifica, come enunciata in precedenza.

Gli illuminanti che emettono luce in maniera diversa dal corpo nero sono invece definiti di **tipo non planckiano**. Di conseguenza, non è possibile associare alla loro emissione una temperatura di colore.

Talvolta è però possibile riscontrare, limitatamente allo spettro visibile, un andamento dell'emissione degli illuminanti non planckiani assimilabile a quello del corpo nero. Si definisce quindi temperatura di colore di un illuminante non planckiano la temperatura alla quale è necessario mantenere il corpo nero per ottenere un'emissione di colore visivamente uguale a quella dell'illuminante.



Curve di emissione di illuminanti CIE:

- illuminante A – planckiano,
- illuminante B – non planckiano,
- illuminante C – non planckiano.

Per le sorgenti aventi emissione spettrale discontinua (ad esempio, sorgenti ed illuminanti fluorescenti) si definisce una temperatura di colore correlata, mediante compensazione delle diverse intensità di emissione alle varie lunghezze d'onda.

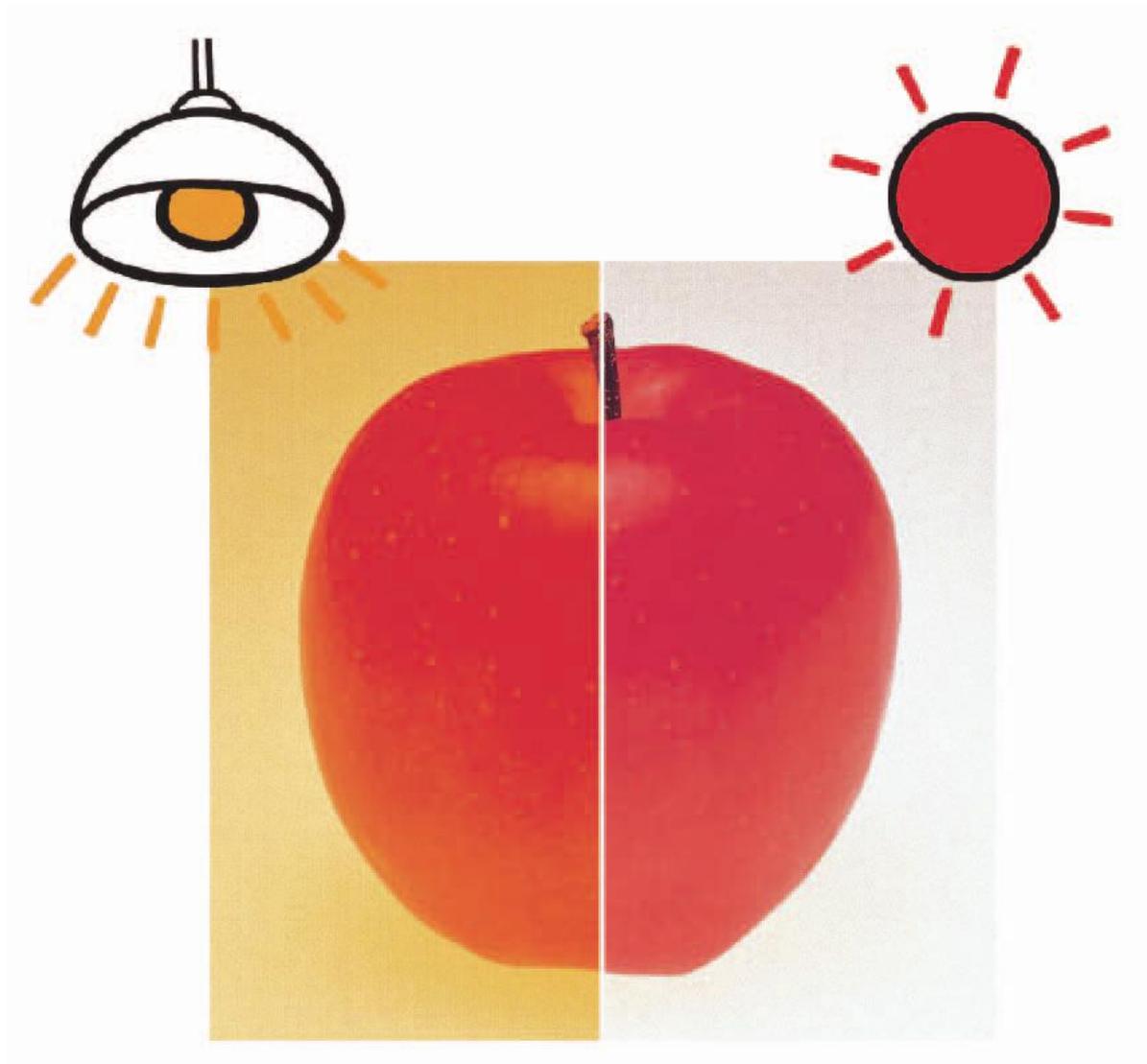
Temperatura di colore di sorgenti luminose tipiche	
Sorgente	Temperatura di colore
Candela	1900 K
Luce del sole al tramonto	2200 K
Lampada ad incandescenza	2600 – 2800 K
Lampada quarzo-alogena	3200 – 3400 K
Lampada a vapori di mercurio	3400 K
Lampada fluorescente	4000 – 6500 K
Luce diurna media	5400 K
Flash elettronico	5600 – 5800 K
Luce del cielo sereno	12000 K

Illuminanti CIE

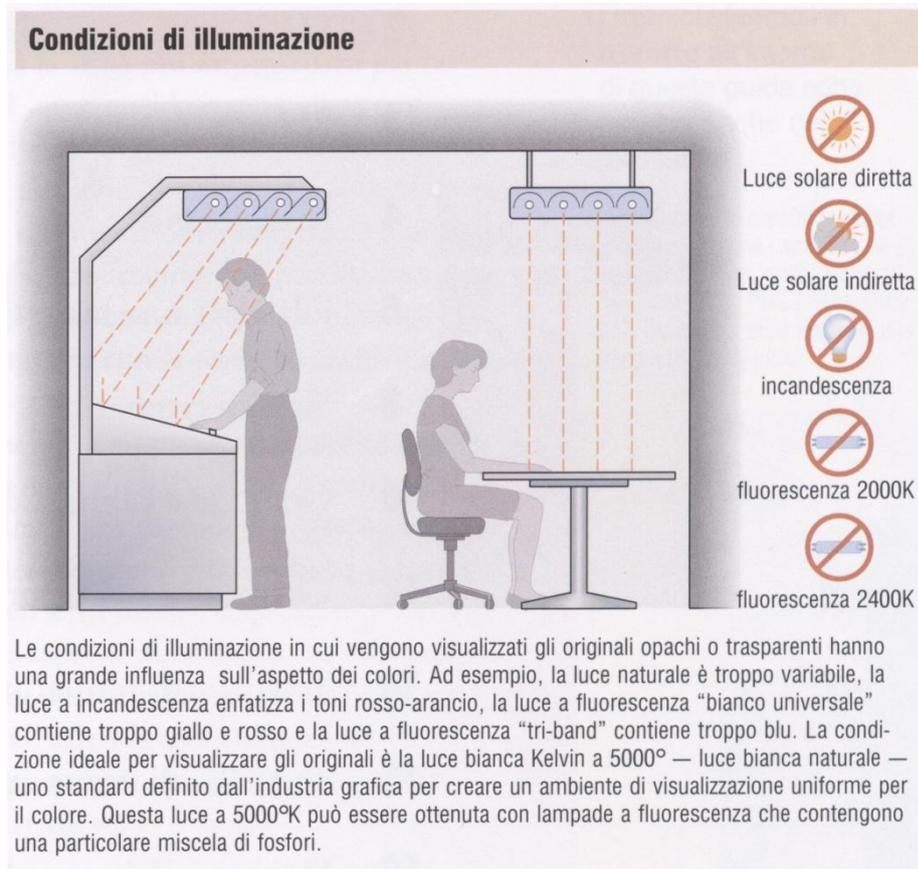
Per sorgente si intende una luce fisicamente realizzata, che può essere usata nelle esperienze di misura e di imitazione del colore. Per illuminante si intende una luce avente composizione spettrale che può essere, oppure no, fisicamente realizzabile.

È noto come il colore di un oggetto appaia all'osservatore in modi diversi se osservato sotto luci differenti. Quando una superficie bianca è illuminata con luce bianca, all'osservatore appare bianca; illuminata con luce verde, appare verde; illuminata con luce rossa, appare rossa, ecc. L'esperienza dimostra che la superficie assume colori diversi in funzione dell'illuminante. La situazione cambia se si ripete l'esperienza con una superficie non più bianca, ma di colore qualsiasi, ad esempio verde. Quando la superficie verde è illuminata con luce bianca, all'osservatore appare verde; illuminata con luce verde, appare verde più o meno satura; illuminata con luce rossa, appare quasi nera e così via.

È allora evidente che il colore di una superficie dipende fondamentalmente dalla composizione spettrale e dall'intensità dell'illuminante, oltre che dalla modalità di osservazione dei campioni. Per definire o misurare un colore, è quindi indispensabile precisare il tipo di illuminante.



Di norma, l'esame visivo e le valutazioni di colore si effettuano alla luce naturale, estremamente variabile dal punto di vista sia qualitativo sia quantitativo: la sua temperatura di colore può variare da 5500 a 25000 K e la sua intensità da 1 a 25 volte. Se si desiderano misure riproducibili anche a distanza di spazio e di tempo, è pertanto indispensabile utilizzare sorgenti ad emissione standardizzata.



Nel 1931 la **CIE (Commission Internationale de l'Eclairage)** ha definito la composizione spettrale degli illuminanti normalizzati, noti come: illuminante A, illuminante B, illuminante C, illuminante D₆₅ e illuminante E.

Illuminante A

È costituito da una lampada a filamento di tungsteno, riempita di gas, che funziona alla temperatura di colore $T_{68} = 2848 \text{ K}$ (il numero 68 significa che T rappresenta la temperatura assoluta del corpo nero secondo la scala internazionale pratica di temperatura 1968) e la luce emessa è bianca con dominanti giallo-rosse. L'illuminante A è di tipo planckiano; è fisicamente realizzabile e pertanto è una sorgente vera e propria.

Illuminante B

Illuminante B: È costituito dall'illuminante A filtrato mediante due soluzioni con le seguenti caratteristiche:

- 1 cm di soluzione di:
 - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 2,452 g
 - mannite ($\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$), 2,452 g
 - piridina ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$), 30,0 ml
 - H_2O distillata, q.b. 1000 ml
- 1 cm di soluzione di:
 - $\text{CoSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 21,71 g
 - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 16,11 g
 - H_2SO_4 ($d = 1,835$), 10,0 ml
 - H_2O distillata, q.b. 1000 ml

La temperatura di colore è $T_{68} = 4870$ K e la luce filtrata è di colore bianco tendente al giallo, un'approssimazione della luce solare a mezzogiorno. L'illuminante B è di tipo non planckiano; è fisicamente realizzabile ed è quindi una sorgente vera e propria.

Illuminante C

È costituito dall'illuminante A e da un filtro di composizione chimica simile, ma di concentrazione diversa da quello usato per l'illuminante B:

- 1 cm di soluzione di:
 - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 3,412 g
 - mannite ($\text{C}_6\text{H}_8(\text{OH})_6$), 3,412 g
 - piridina ($\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$), 30,0 ml
 - H_2O distillata, q.b. 1000 ml
- 1 cm di soluzione di:
 - $\text{CoSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 30,58 g
 - $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 20,52 g
 - H_2SO_4 ($d = 1,835$), 10,0 ml
 - H_2O distillata, q.b. 1000 ml

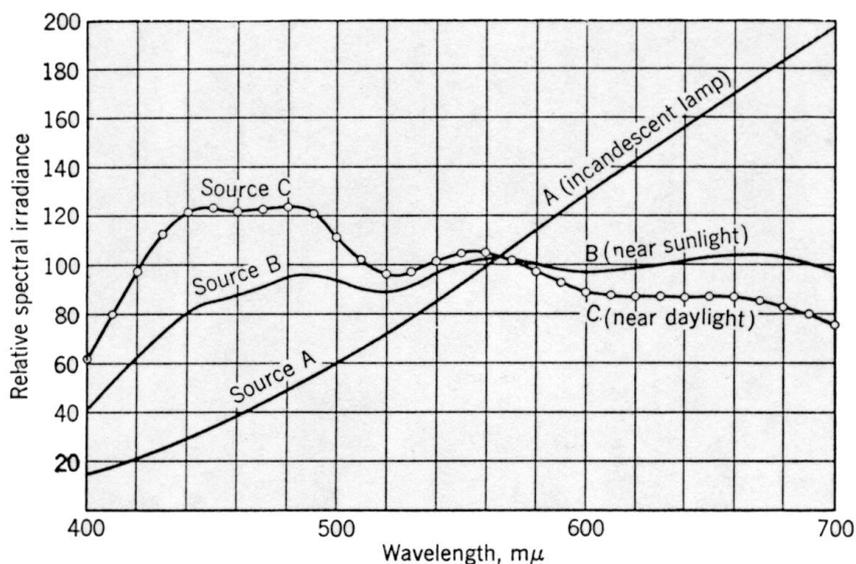
La temperatura di colore è $T_{68} = 6744$ K e la luce filtrata è bianco-azzurra, un'approssimazione della luce che si ha con cielo coperto. L'illuminante C è di tipo non planckiano; è fisicamente realizzabile ed è quindi una sorgente vera e propria.

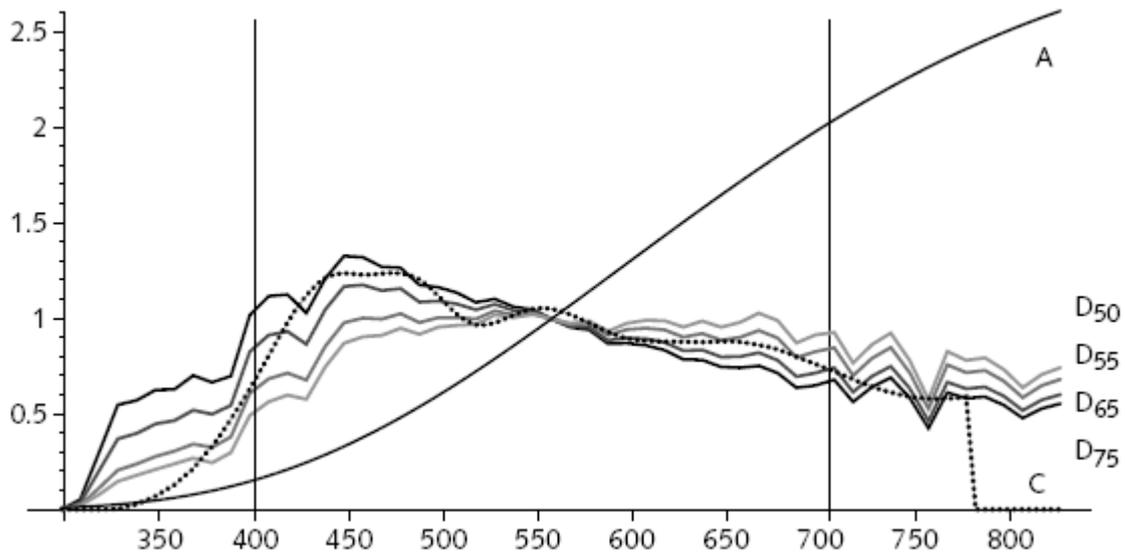
Illuminante D₆₅

La sua composizione spettrale è simile a quella della luce diurna, tanto nel visibile quanto nel vicino ultravioletto. La temperatura di colore è $T_c = 6500$ K. Nel 1965 la CIE ha proposto una serie di illuminanti aventi temperature di colore comprese tra 4000 e 25000 K, identificandoli con la lettera D seguita dal numero che esprime le prime due cifre della T_c . Di questi illuminanti, i tre caratterizzati dalle temperature di colore di 5500, 6500 e 7500 K, e cioè D₅₅, D₆₅, D₇₅ sono idonei all'esame di superfici colorate fluorescenti, poiché, specialmente nell'UV da 300 a 400 nm, hanno una composizione spettrale simile a quella della luce diurna naturale. Il più importante dei tre è quello caratterizzato da $T_c = 6.500$ K, normalmente indicato come illuminante D₆₅.

Illuminante E

La composizione spettrale dell'illuminante **E (Equal Energy, energia costante)** è caratterizzata da quantità uguali di energia per ogni lunghezza d'onda del visibile.





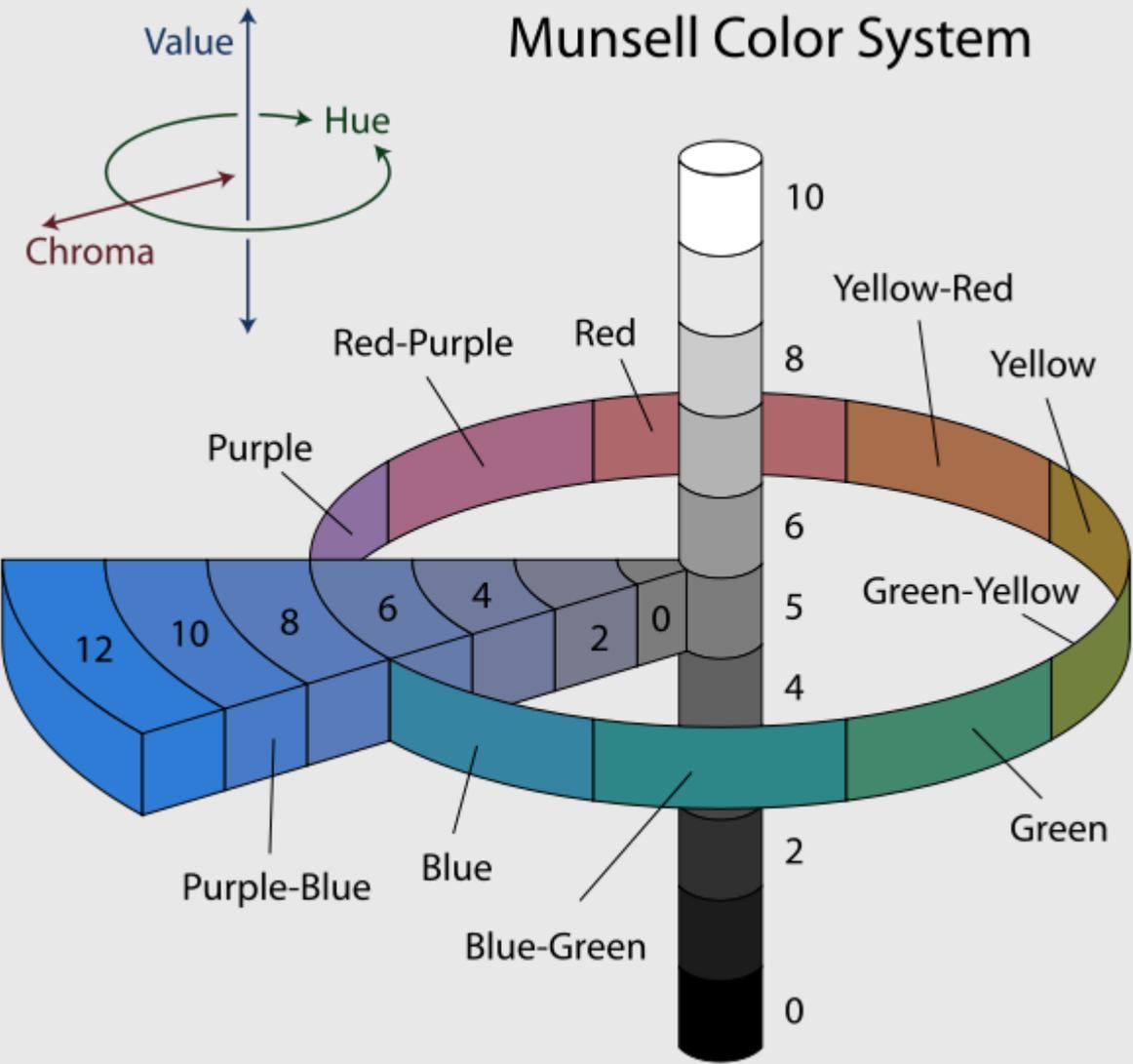
Sistema Munsell

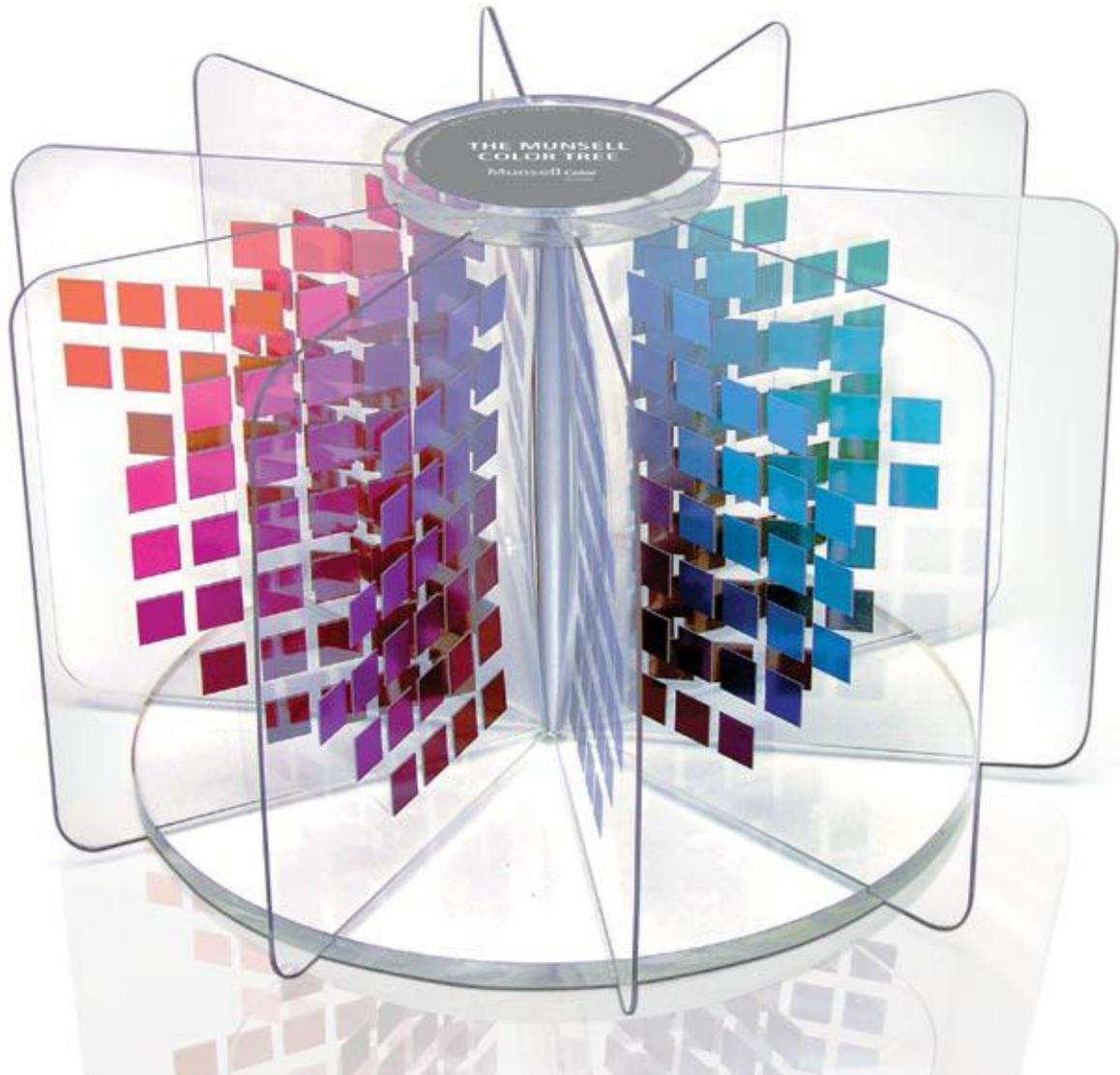
È un sistema di specificazione del colore mediante tipi colorati ordinati secondo un principio, utilizzabile anche per campioni intermedi a due tipi vicini, ideato da Albert H. Munsell (1858-1918).

Nella raccolta, pubblicata per la prima volta nel 1915 con il titolo "Atlas of the Munsell Color System", i tipi sono ordinati in successioni tali da mantenere costante la differenza di percezione visiva tra un tipo e uno adiacente. In altre parole, la piccola differenza di colore tra due tipi vicini (in senso orizzontale e verticale) rappresenta intervalli uguali di percezione visiva.

Il sistema Munsell definisce uno spazio colore tridimensionale, in quanto tutti i colori sono specificati da tre coordinate.

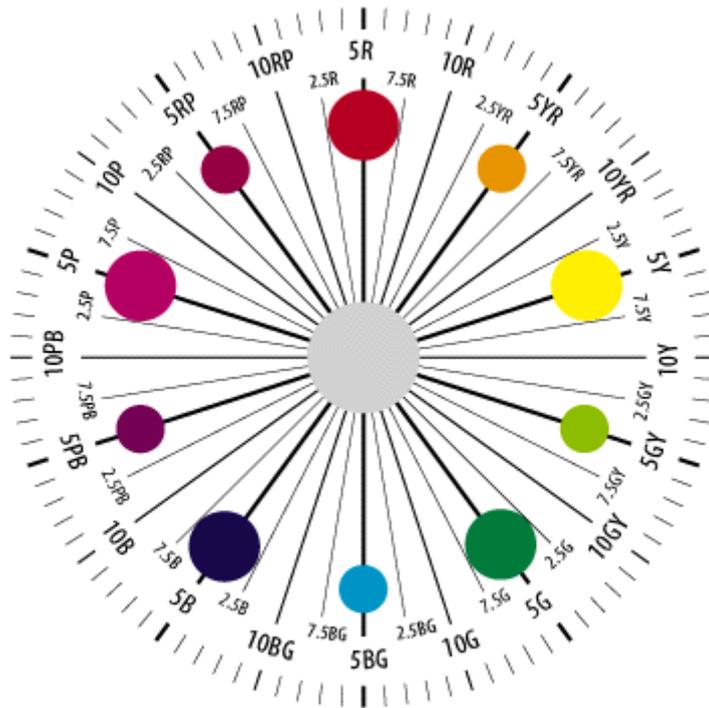
Munsell Color System



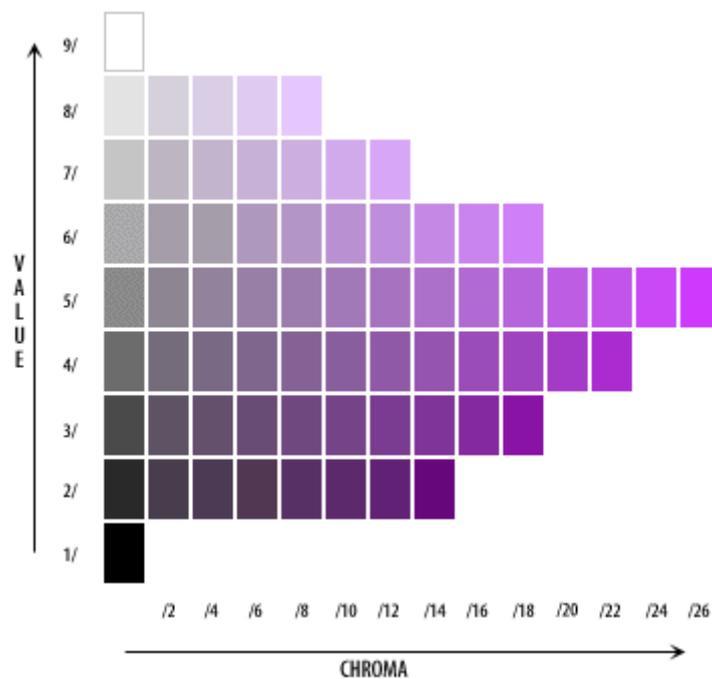


Hue

Rappresenta la **tinta**. Il sistema è costituito da 5 hue principali e dalle 5 miscele binarie corrispondenti ed ognuna di queste 10 hue fondamentali è suddivisa in 10 gradi, per un totale di 100 gradi. La hue è quindi indicata con una sigla alfanumerica, comprendente un numero variabile da 1 a 100 per il grado e da una o due lettere per la tinta fondamentale.



Ad esempio, la tavola cromatica sottostante è relativa alla hue 5RP, cioè una tinta rosso-porpora di grado 5:



Value

Rappresenta la **chiarezza**. Il valore minimo della sua scala corrisponde al nero e quello massimo al bianco. La value è quindi indicata con un numero variabile da 0 a 10, seguito da un trattino obliquo. Per esempio, se il colore ha hue 5RP, i tipi aventi chiarezza diversa si indicano con 5RP 1/, 5RP 2/, 5RP 3/, ecc.

Chroma

Rappresenta la **saturatione**. Il valore minimo della sua scala corrisponde a un grigio, cioè a un colore completamente desaturato. La value è quindi indicata con un numero variabile da 0 a 10, e oltre per colori ad alta saturazione, che segue la value. Per esempio, se il colore a hue 5RP e value 4/, i tipi aventi saturazione diversa si indicano con 5RP 4/1, 5RP 4/2, 5RP 4/3, ecc.

Il sistema Munsell permette anche di specificare un colore intermedio a quello di due tipi adiacenti della raccolta. Per esempio, se il colore è indicato con 8B 6/5, si intende un blu di tinta 8, con chiarezza 6 e saturazione intermedia tra i tipi aventi saturazione 4 e 6.

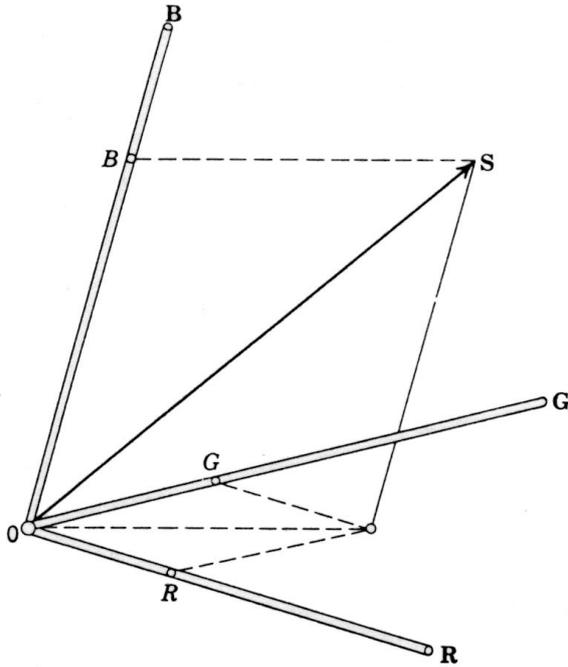
Tutti i tipi del sistema Munsell sono raccolti in cataloghi di colori mat (opachi) e gloss (brillanti).

Il sistema ha una struttura che permette di specificare qualsiasi colore e che non è vincolata ai soli tipi catalogati, ma è aggiornabile.

Rappresentazione cromatica

Per una rappresentazione completa e generale del colore è indispensabile ricorrere alla rappresentazione spaziale mediante vettori. Le leggi di imitazione cromatica con miscele di luci possono essere espresse mediante semplici equazioni algebriche e illustrate in uno spazio tridimensionale, dove i tre primari forniscono gli assi coordinati ed il colore è rappresentato da un vettore.

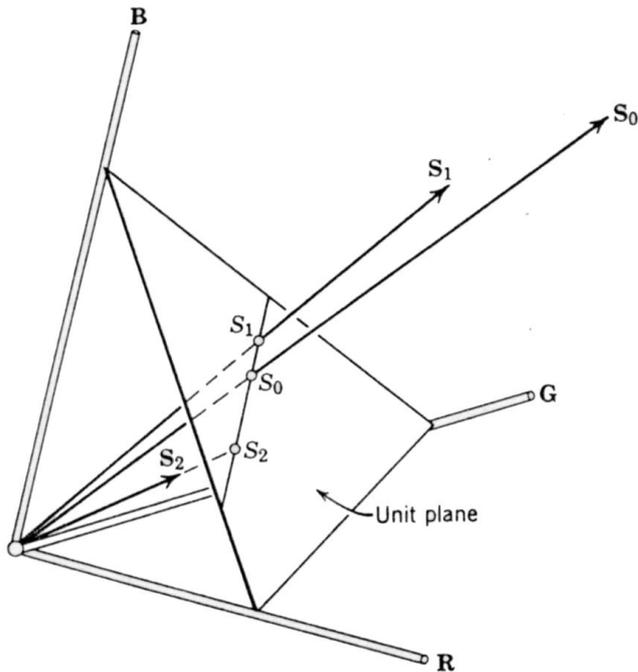
Considerando un colore S questo sarà rappresentato da un vettore \vec{S} di componenti \vec{R} , \vec{G} , \vec{B} misurate sui corrispondenti assi. Gli assi sono orientati in modo arbitrario; non devono però giacere in un unico piano, poiché ciascun primario non può essere una miscela degli altri due.



Se si interseca con un piano il sistema spaziale impostato, si ottiene un diagramma triangolare di cromaticità, in quanto i suoi punti sono rappresentativi della tinta e della saturazione dei colori.

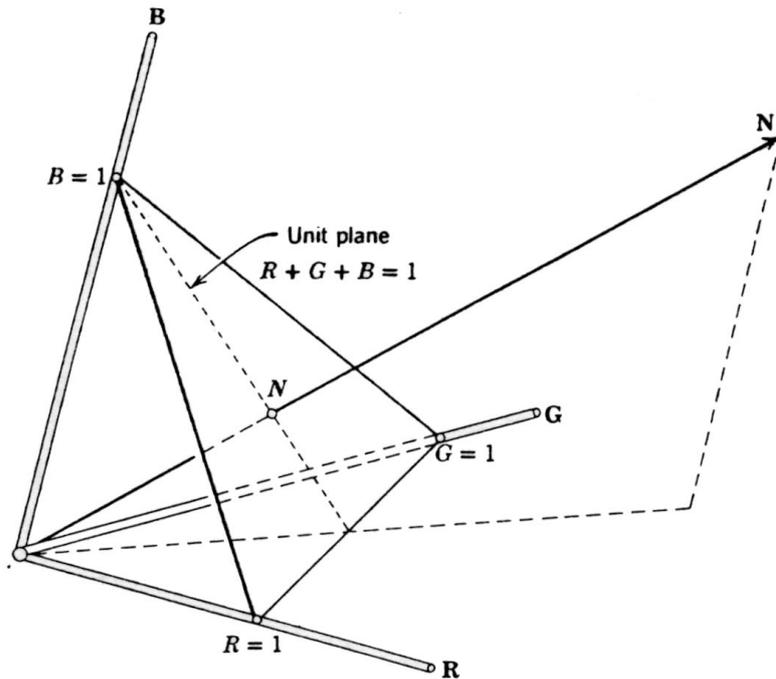
È utile scegliere le unità di misura dei primari in modo che le somme di quantità uguali diano colori neutri; in questo caso, il piano che interseca gli assi nel valore 1 risulta perpendicolare ai vettori che rappresentano le tinte neutre. Inoltre, il triangolo che si genera è un diagramma di cromaticità avente nel centro il punto acromatico e contenente tutti i colori riproducibili dalla terna di primari.

Nel modello di rappresentazione spaziale considerato, l'addizione di colori corrisponde dunque all'addizione di vettori giacenti su di uno stesso piano. Per esempio, l'intersezione tra il piano unitario e quello dei tre vettori \vec{s}_0 , \vec{s}_1 , \vec{s}_2 è un segmento di retta sulla quale giacciono ovviamente i punti di intersezione con i suddetti vettori.



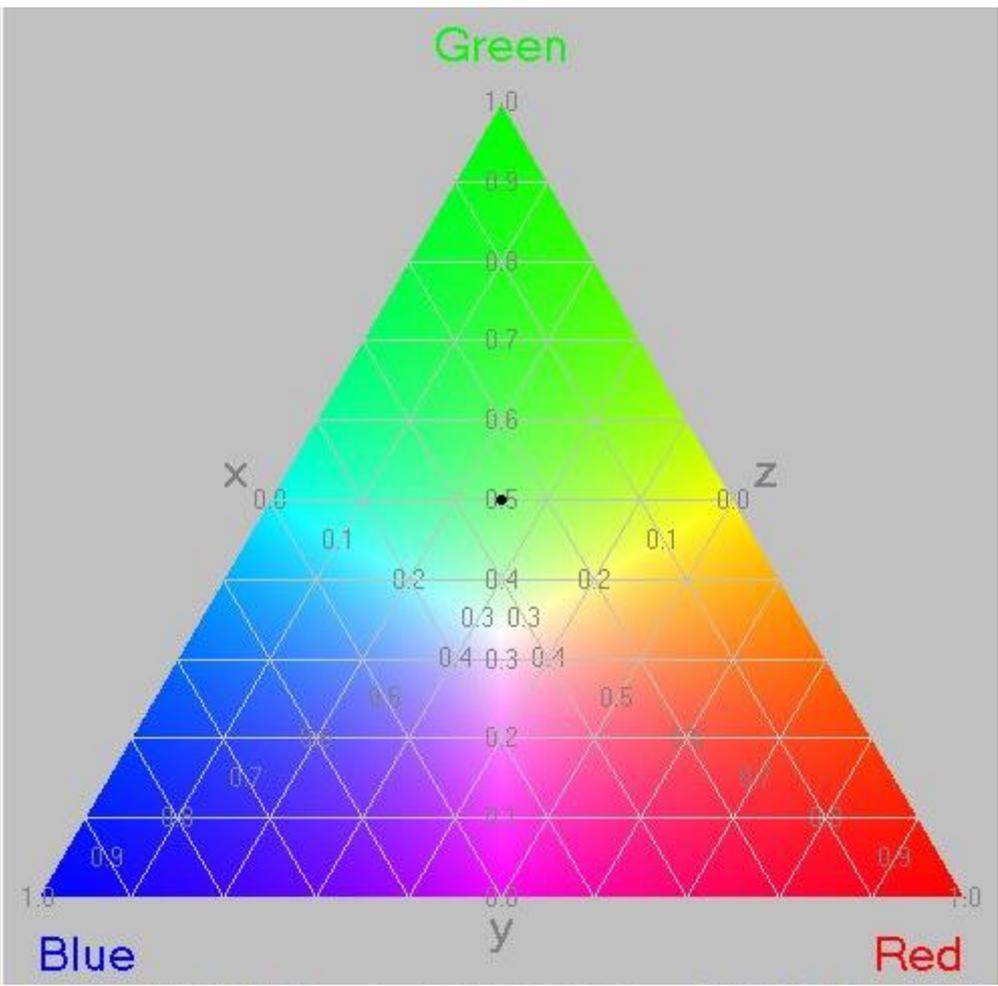
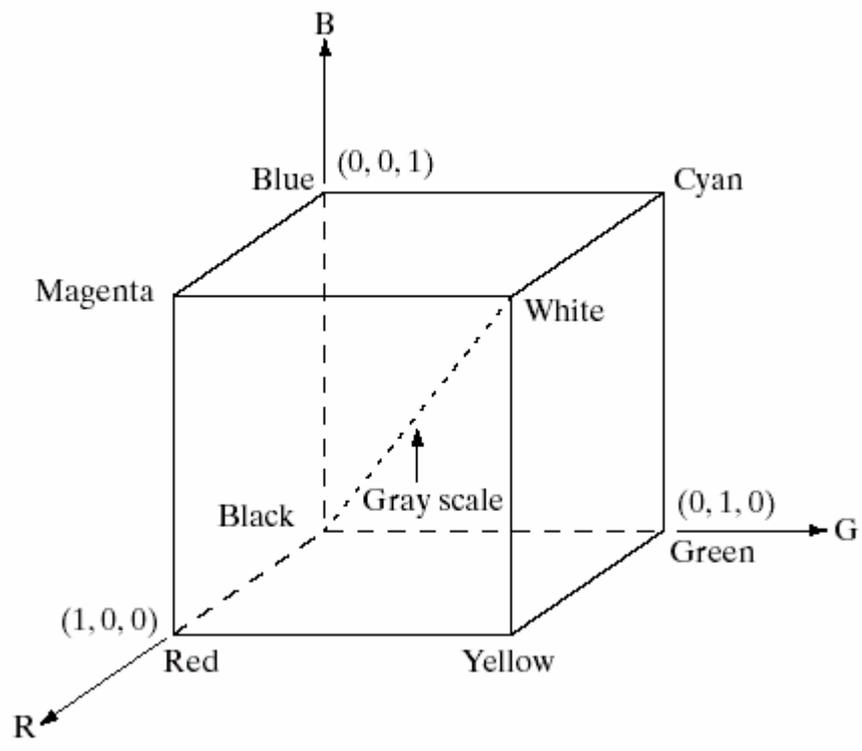
Il piano energetico unitario è di notevole importanza, poiché permette di semplificare il modello della rappresentazione geometrica dei colori. Qualunque vettore \vec{S}_i interseca tale piano in un punto distinto S_i , che identifica la cromaticità del colore, mentre la chiarezza, o la brillantezza se si tratta di sorgenti, è data dal modulo del vettore. Se si moltiplica per un fattore n la brillantezza di S_i , ne consegue che il vettore \vec{S}_i varierà la sua lunghezza di n volte. Il vettore che parte dall'origine degli assi e intercetta il piano unitario nel punto centrale, è l'**asse neutro, luogo geometrico degli stimoli acromatici**.

Per specificare la posizione di un punto S nel diagramma di cromaticità, si introducono le coordinate di cromaticità r, g, b (con $r + g + b = 1$), date dalle distanze di S dai tre lati del triangolo. Qualunque sia la forma del triangolo, le suddette coordinate corrispondono alla percentuale di ciascun primario necessario per l'imitazione.

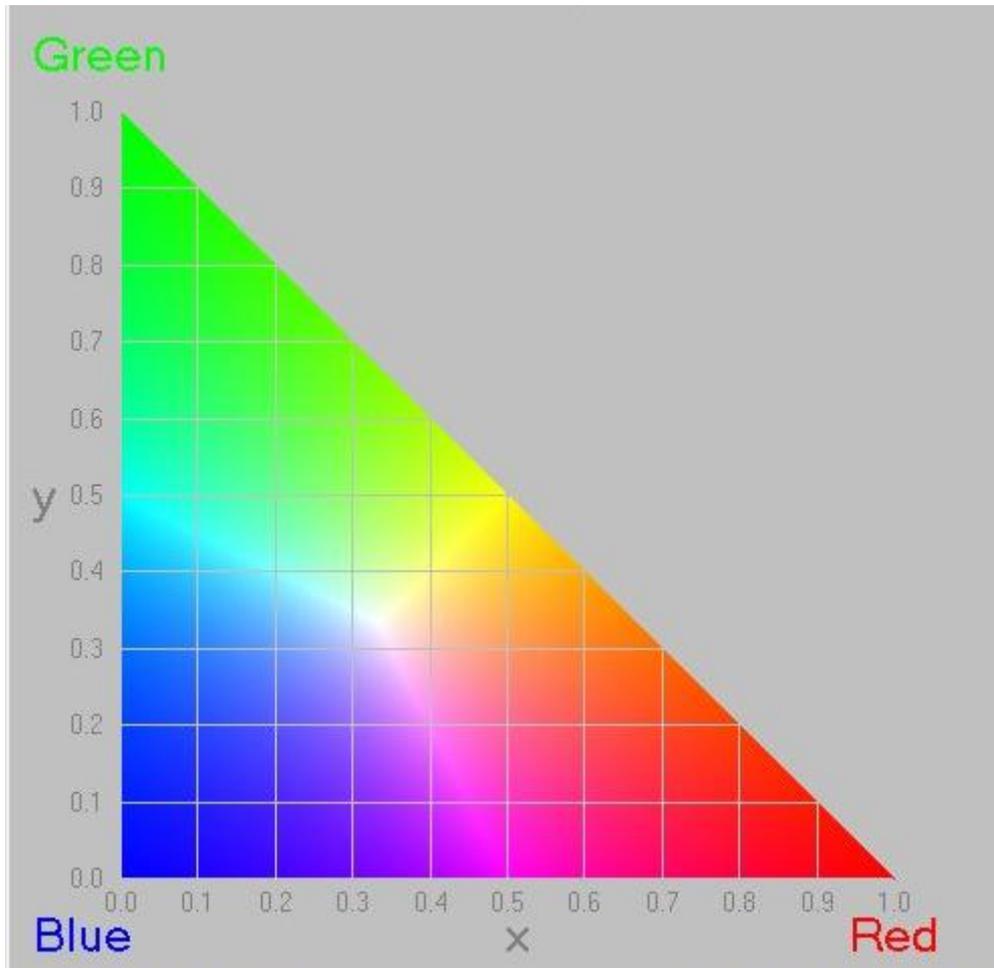


La forma del triangolo che costituisce il diagramma di cromaticità, dipende dal modo in cui si orientano gli assi.

Se gli assi formano tra loro angoli uguali, come nel tipico caso degli assi ortogonali, utilizzati anche nello spazio RGB, si genera un triangolo equilatero equienergetico (**triangolo di Maxwell**), che ha il vantaggio di trattare le tre componenti del colore in modo simmetrico.



L'orientamento degli assi che genera invece un triangolo rettangolo ha il pregio di facilitare la lettura delle coordinate.

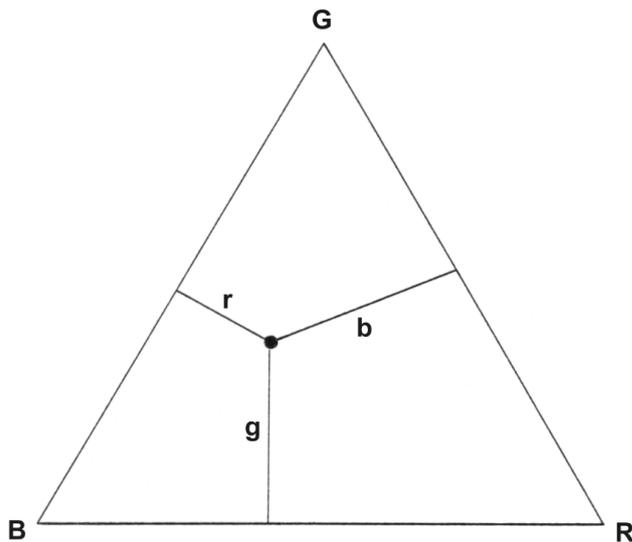


Triangolo di Maxwell

James Clerk Maxwell (1831-1879) è l'ideatore della teoria sulla tricromia (1861), secondo la quale è possibile ottenere qualsiasi colore dalla sovrapposizione, in proporzioni diverse, di tre luci monocromatiche scelte come fondamentali. Il triangolo di Maxwell è un diagramma costituito da un triangolo equilatero che porta ai vertici i tre colori fondamentali prescelti: il blu, il verde e il rosso; ogni punto interno al triangolo rappresenta una miscela dei tre primari. Il triangolo è una rappresentazione bidimensionale che prescinde dalla chiarezza o brillantezza, per le quali occorrerebbe una terza dimensione.

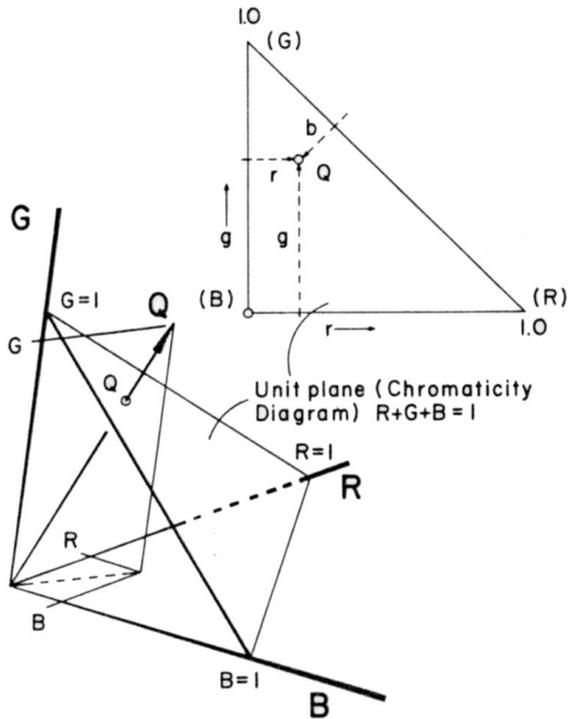
Se si assumono come valori di emissione i flussi luminosi, il bianco non si troverà nel baricentro, in quanto le quantità dei tre flussi primari non sono, in questo caso, uguali. Per avere una posizione baricentrica del bianco, è necessario partire da primari di uguale energia che producono flussi luminosi diversi.

Per determinare le quantità dei tre primari da sommare per ottenere la **cromaticità (tinta + saturazione)** di un colore all'interno del triangolo, è sufficiente tracciare le perpendicolari ai tre lati partendo dal punto che rappresenta il colore stesso. Il segmento b , dal punto al lato RG, rappresenta la frazione di blu; quello r , dal punto al lato GB, la frazione di rosso; quello g , dal punto al lato RB, la frazione di verde.



Triangolo rettangolo

In un diagramma rappresentato da un triangolo rettangolo isoscele, r e g hanno lunghezze proporzionali alla quantità dei primari R e G; per individuare la quantità di primario B, il segmento b deve invece essere moltiplicato per $\sqrt{2}$ o calcolato come $b = 1 - (r + g)$.

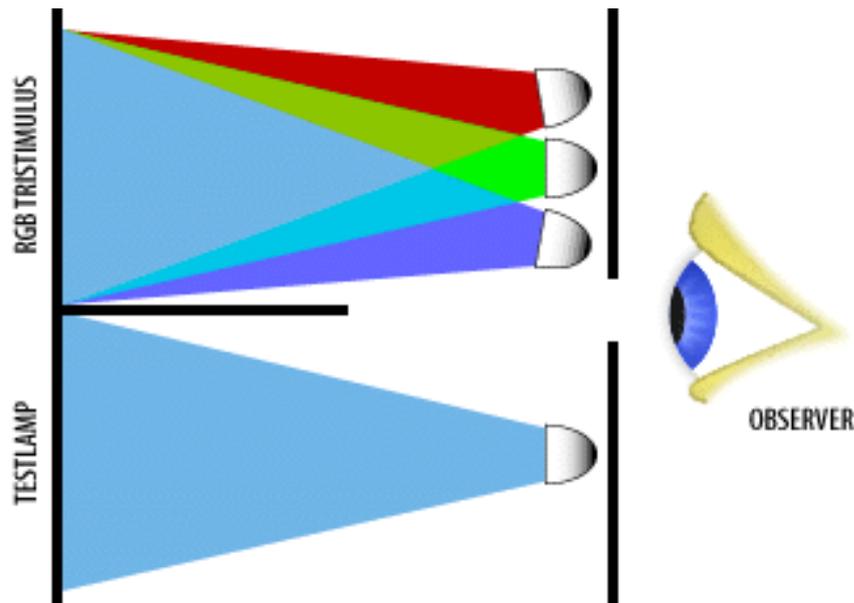


Imitazione del colore

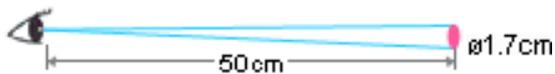
Per determinare la quantità di primari costituenti una luce in esame, mediante confronto tra questa e una miscela di primari, si usa il colorimetro.

Nella sua forma più semplice questo strumento è costituito da uno schermo bianco, sul quale viene proiettata da una parte la luce da misurare e dall'altra la luce miscelata dei tre primari per procedere all'imitazione, con angoli di visione standard dell'osservatore pari a 2° o 10° (salvo diversa indicazione, i successivi grafici sono relativi all'angolo di 2°).

Si raggiunge l'imitazione quando il confronto tra la luce in esame e la miscela dei primari permette di definire uguali i due campi.



2° viewing angle



10° viewing angle



La luce in basso è quella da misurare, mentre le tre in alto sono le luci primarie R, G, B. In questo tipo di colorimetro, il confronto è attuato visivamente e, poiché la percezione dei colori varia da persona a persona, solamente quando un elevato numero di osservatori sarà d'accordo, si potrà procedere a definire la misurazione.

Nei moderni colorimetri la valutazione è fornita da strumenti fotoelettrici che eliminano le incertezze di misura. La taratura dell'apparecchio si effettua proiettando in un semicampo una sorgente bianca ad eguale energia o, meglio, avvicinandosi il più possibile alla perfetta acromaticità, e, nell'altro, i tre primari.

Ogni proiettore per primari è provvisto di due diaframmi: uno interno e uno esterno. I diaframmi interni servono a tarare il colorimetro per avere quantità equienergetiche dei tre primari. I diaframmi esterni sono regolabili da 0 a 100, in modo da permettere di variare linearmente la quantità di radiazione: l'apertura di ciascun diaframma è proporzionale alla quantità di luce che arriva sullo schermo. L'osservatore si pone a una certa distanza

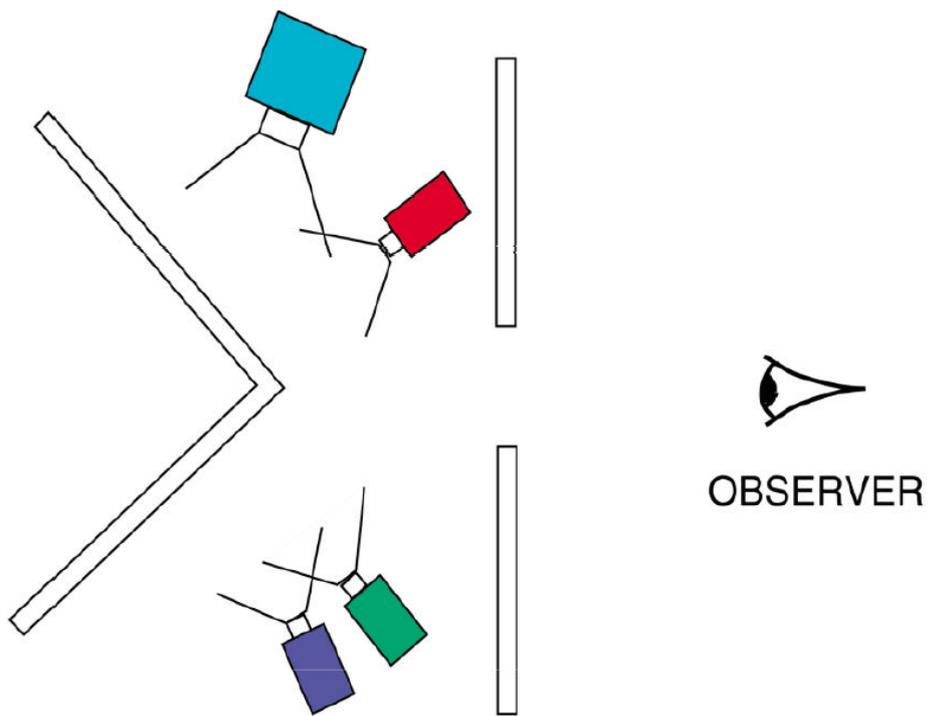
dallo schermo bianco e lo vede sotto un angolo particolare definito dal diametro del foro praticato nello schermo di riduzione.
 Un colore incognito S risulta quindi specificato dalle quantità di primari necessarie per la sua imitazione:

$$S = rR + gG + bB$$

$$r + g + b = 1$$

dove: r, g, b = valori tristimolo.

Può però verificarsi che un colore spettrale non sia imitabile. In questo caso è necessario spostare uno dei primari dalla parte del colore in esame per renderne fattibile l'imitazione; ad esempio:



$$S + rR = gG + bB \quad \rightarrow \quad S = -rR + gG + bB$$

Dal punto di vista colorimetrico, la componente negativa indica che il colore in esame non è direttamente imitabile dalla terna dei primari, in quanto è esterno al relativo triangolo di Maxwell.

La misurazione dei colori spettrali mediante colorimetro permette di definire i colori dello spettro mediante terne di numeri che, proprio per questo motivo, sono assunte come coordinate del colore.

I tre numeri sono detti **valori tristimolo** e rappresentano le quantità di energia raggiante dei tre primari necessarie per riprodurre, in un osservatore normale, la sensazione provocata da un determinato colore. Da questo fatto è derivato il nome di **colorimetria tristimolo** e il dispositivo sperimentale illustrato può essere considerato un **colorimetro tristimolo**. È necessario precisare che:

- una terna di sorgenti primarie permette l'imitazione di un numero elevato, ma finito, di colori (insieme limitato);
- terne diverse di sorgenti primarie permettono l'imitazione di insiemi limitati diversi; questo significa che, una volta fissata una terna di sorgenti primarie, risulta automaticamente determinato lo spazio colore da essa definito;
- non tutte le terne di sorgenti sono idonee come sorgenti primarie, ma soltanto quelle che soddisfano alla condizione di non essere ottenute per combinazione delle altre due (se una sorgente può essere ottenuta per combinazione delle altre due, allora le sorgenti veramente primarie in realtà sono solo due).

Se si riportano su grafico i valori tristimolo in funzione della lunghezza d'onda, si ottengono tre curve che rappresentano le funzioni di imitazione del colore.

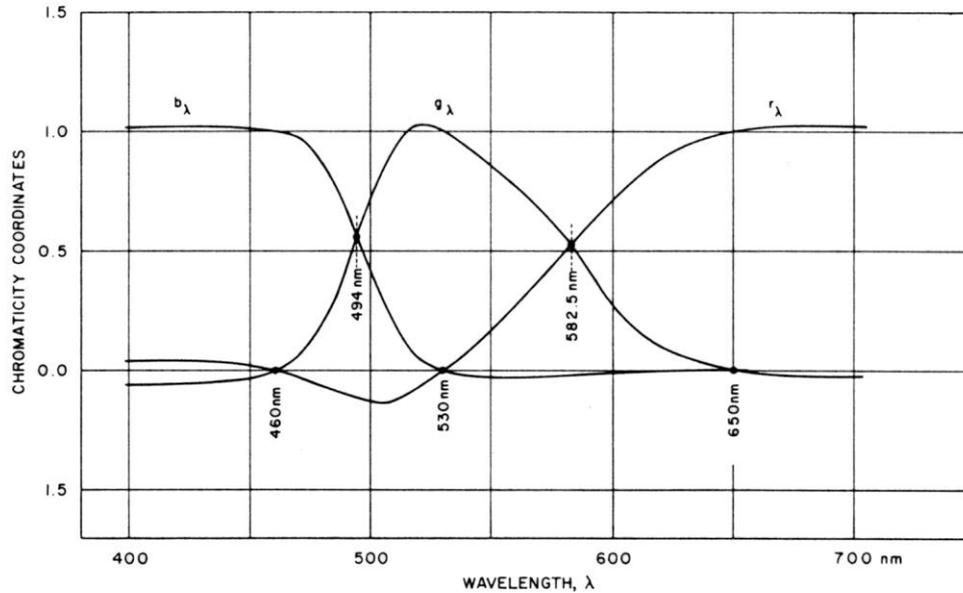
Particolare rilevanza assumono le esperienze di Wright e di Guild, che hanno permesso di definire le caratteristiche dell'**osservatore normale CIE 1931**.

Nel 1928, Wright ha utilizzato come sorgenti primarie le tre radiazioni spettrali monocromatiche:

$\lambda = 460$ nm, blu

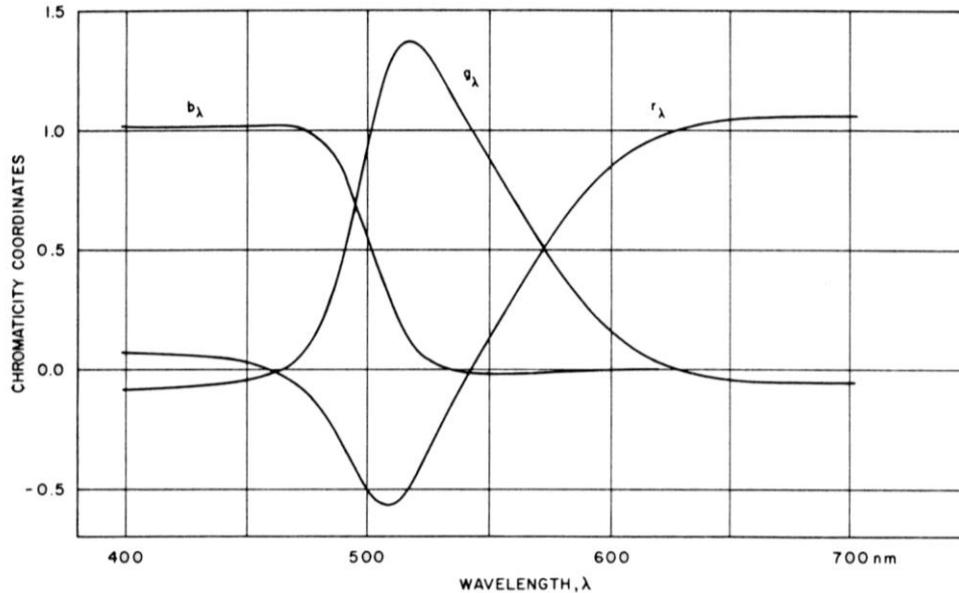
$\lambda = 530$ nm, verde

$\lambda = 650$ nm, rosso



Wright's mean color-matching results for the chromaticity coordinates of the spectrum colors.

Nel 1931, Guild ha invece utilizzato luci policromatiche di colore rosso, verde e blu, ottenute filtrando la luce di lampade a filamento con temperatura di colore di circa 2500 K.



Guild's mean color-matching results for the chromaticity coordinates of the spectrum colors.

Le curve di Wright e Guild, con i loro valori in parte positivi ed in parte negativi, definiscono le funzioni di imitazione del colore per le rispettive terne di primari, dove:

r_λ

Rappresenta la quantità di primario rosso R necessaria per riprodurre il colore di una quantità unitaria della radiazione spettrale avente la lunghezza d'onda λ .

g_λ

Rappresenta la quantità di primario verde V necessaria per riprodurre il colore di una quantità unitaria della radiazione spettrale λ .

b_λ

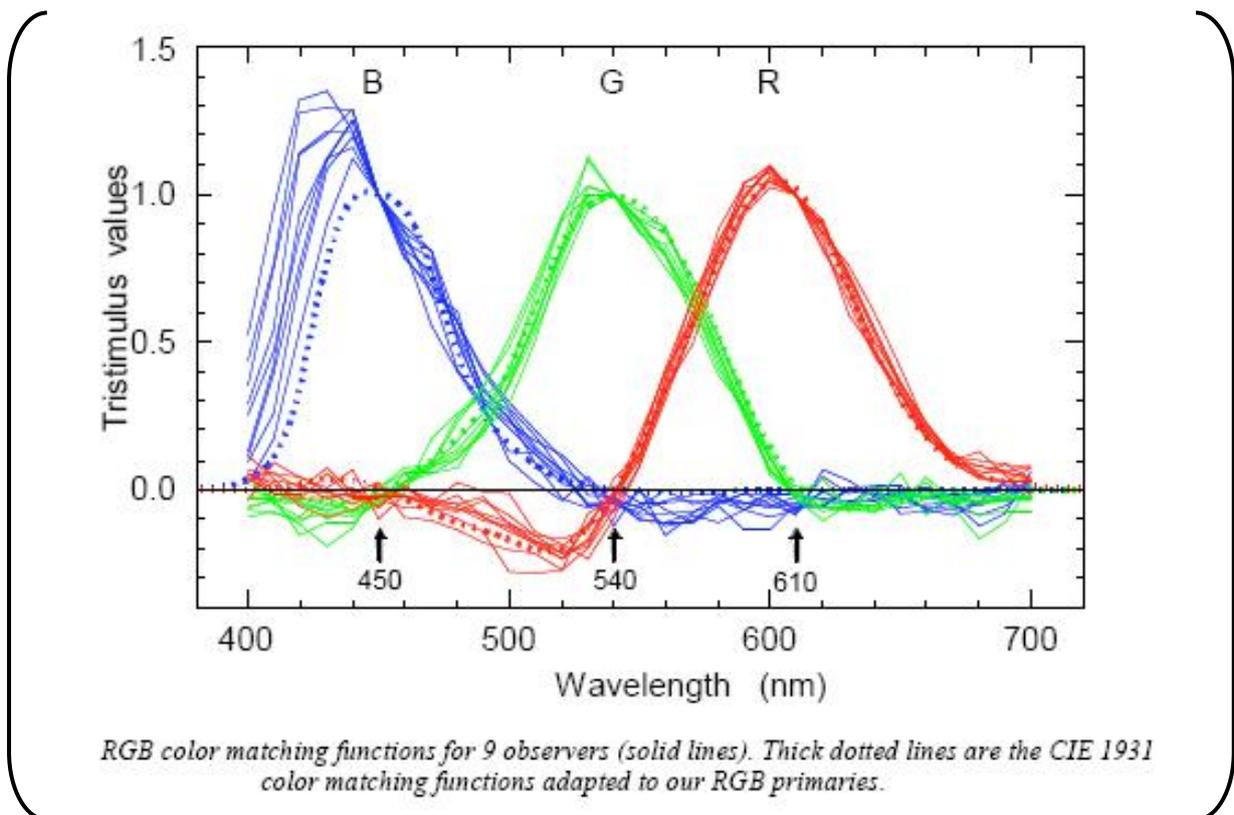
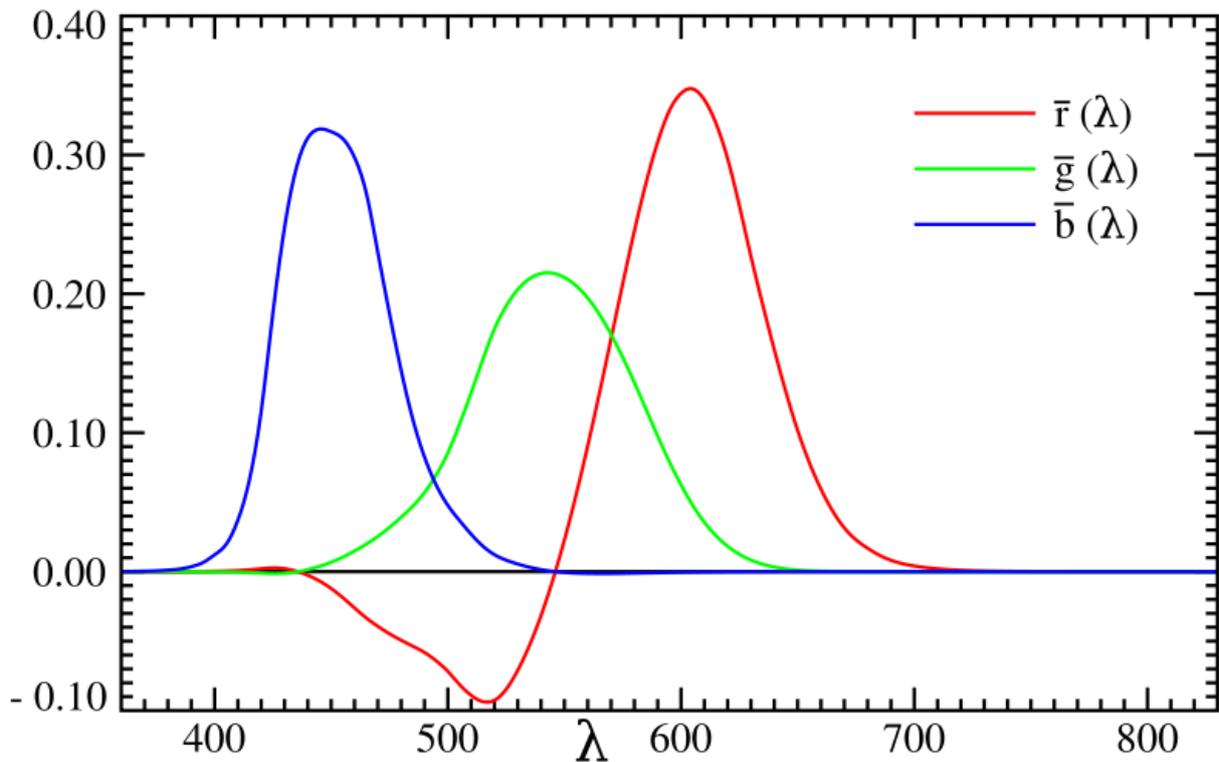
Rappresenta la quantità di primario blu B necessaria per riprodurre il colore di una quantità unitaria della radiazione spettrale λ .

Le funzioni r_λ , v_λ , b_λ sono state determinate sperimentalmente su un campione costituito da migliaia di osservatori aventi la visione dei colori normale (osservatori normali).

Naturalmente le funzioni di imitazione del colore r_λ , v_λ , b_λ di Wright hanno valori numerici diversi da quelli di Guild, in quanto sono diverse le sorgenti primarie impiegate. Pertanto, una superficie colorata è definita da valori tristimolo diversi, in funzione della terna di primari (di Wright o di Guild) utilizzata per la sua specificazione.

Sistema CIE 1931

Nel 1931, sulla base delle analisi condotte da Wright e Guild, la CIE ha messo a punto il seguente grafico delle funzioni di imitazione r_λ , v_λ , b_λ :



Per ovviare al problema delle coordinate negative, la CIE ha ulteriormente elaborato i gruppi di dati adottando una terna di **primari non spettrali XYZ sovrassaturi (saturazione > 100%) e policromatici**, ottenuti

filtrando la luce di lampade al tungsteno con specifici filtri, che presentano le seguenti caratteristiche:

X

$\lambda_d = 498 \text{ nm}$,
 $S = 225\%$.

La funzione di imitazione \bar{x}_λ è caratterizzata da due bande: la principale ha il massimo nella zona dei rossi, mentre la secondaria ha il massimo nella zona dei blu; la tinta di una sorgente avente una composizione spettrale di questo tipo risulta rosso-porpora.

Y

$\lambda_d = 521 \text{ nm}$,
 $S = 133\%$.

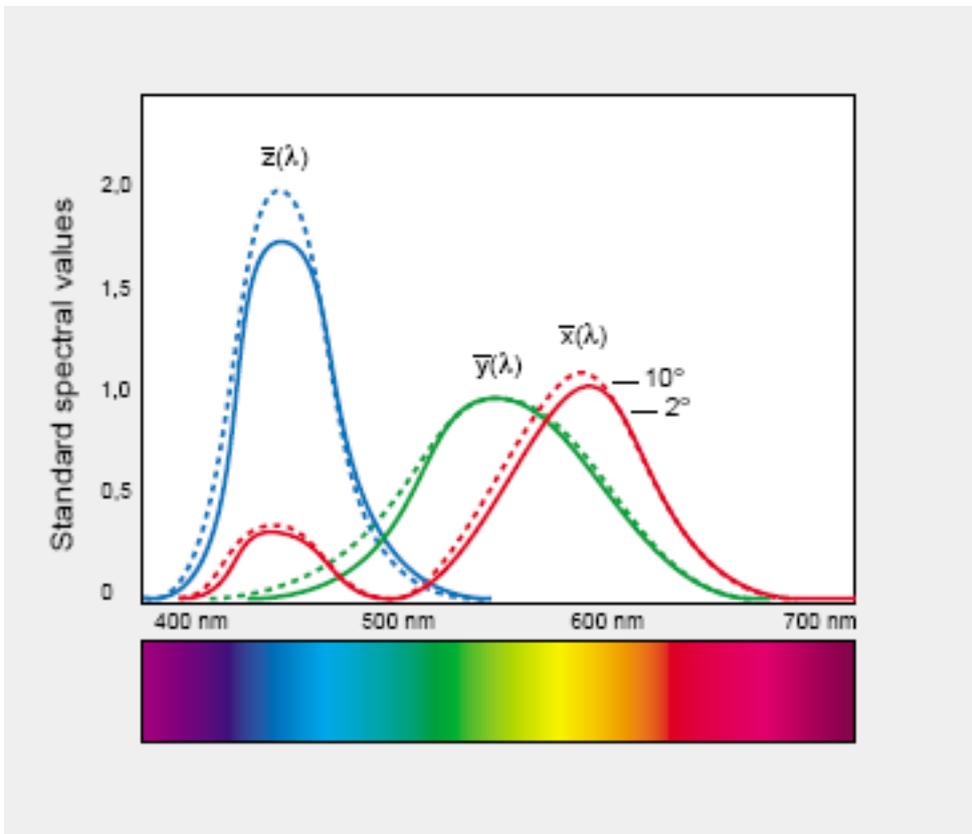
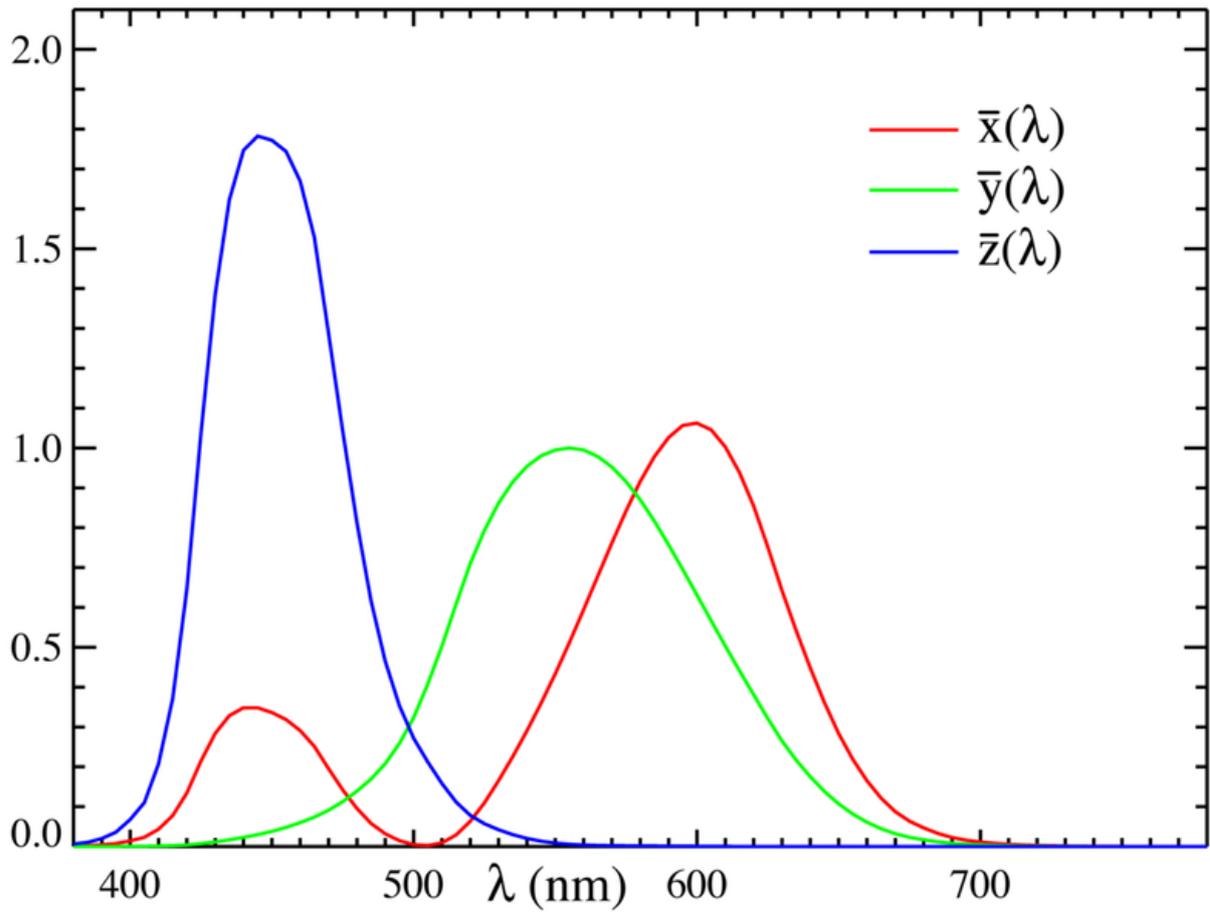
La funzione di imitazione \bar{y}_λ è caratterizzata da una banda che presenta un massimo nella zona dei verdi; la tinta risultante da una distribuzione spettrale di questo tipo è verde;

Intenzionalmente, la funzione di imitazione \bar{y}_λ presenta una curva identica alla curva di sensibilità spettrale dell'occhio umano.

Z

$\lambda_d = 477 \text{ nm}$,
 $S = 144\%$.

La funzione di imitazione \bar{z}_λ è caratterizzata da una banda con un massimo nella zona dei blu; la tinta di una sorgente avente una distribuzione spettrale di questo tipo è blu.



Lo spazio colore corrispondente è tridimensionale, ma i suoi tre primari XYZ sono definiti in modo tale che tutti i colori percepiti dall'occhio umano siano rappresentabili con una loro combinazione lineare. Di conseguenza, ogni colore visibile C avente distribuzione spettrale di energia $P(\lambda)$ è descritto dalla seguente relazione:

$$C = \bar{x}_\lambda X + \bar{y}_\lambda Y + \bar{z}_\lambda Z$$

mentre le quantità dei tre primari, cioè le coordinate dello spazio XYZ, sono ricavabili dai seguenti integrali:

$$X = k \int R(\lambda) I(\lambda) \bar{x}_\lambda d\lambda$$

$$Y = k \int R(\lambda) I(\lambda) \bar{y}_\lambda d\lambda$$

$$Z = k \int R(\lambda) I(\lambda) \bar{z}_\lambda d\lambda$$

$$k = 100 / \int I(\lambda) \bar{y}_\lambda d\lambda$$

dove: k = costante per Y normalizzata a 100,
 $R(\lambda)$ = riflettanza spettrale della superficie illuminata,
 $I(\lambda)$ = distribuzione spettrale della luce incidente.

Diagramma CIE Yxy

Poiché l'occhio umano ha tre tipi di sensori cromatici che rispondono a differenti bande di lunghezze d'onda, la rappresentazione completa di tutti i colori dello spettro visibile è un diagramma tridimensionale. Si può però considerare il colore come costituito da due componenti: brillantezza e cromaticità. Ad esempio, un rosso chiaro è un colore luminoso, mentre un rosso scuro di uguale tinta e saturazione è una sua variante meno luminosa. In altri termini, una scala di rossi di cromaticità invariante presenta una brillantezza variabile.

Lo spazio colore CIE XYZ è stato messo a punto in modo che il parametro Y misuri la brillantezza o luminanza di un colore. La cromaticità di un colore è quindi specificata da due dei tre parametri derivati seguenti:

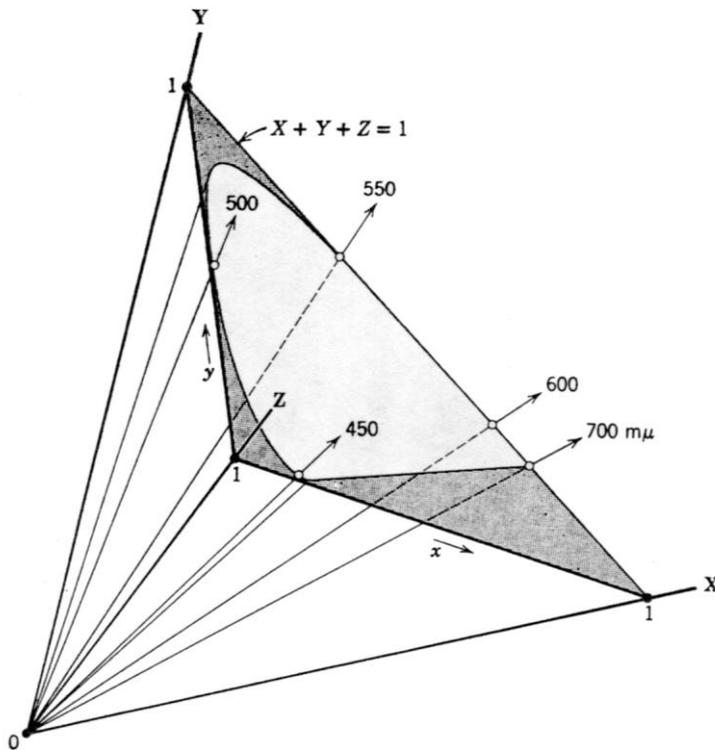
$$x = X / (X + Y + Z)$$

$$y = Y / (X + Y + Z)$$

$$z = Z / (X + Y + Z)$$

$$x + y + z = 1$$

Come già visto in precedenza, questa normalizzazione porta ad individuare il piano unitario che, a causa dell'orientamento prescelto per i tre assi, assume la forma di un triangolo rettangolo, dove la specificazione di un colore è definita dalle sue coordinate di cromaticità (x, y):



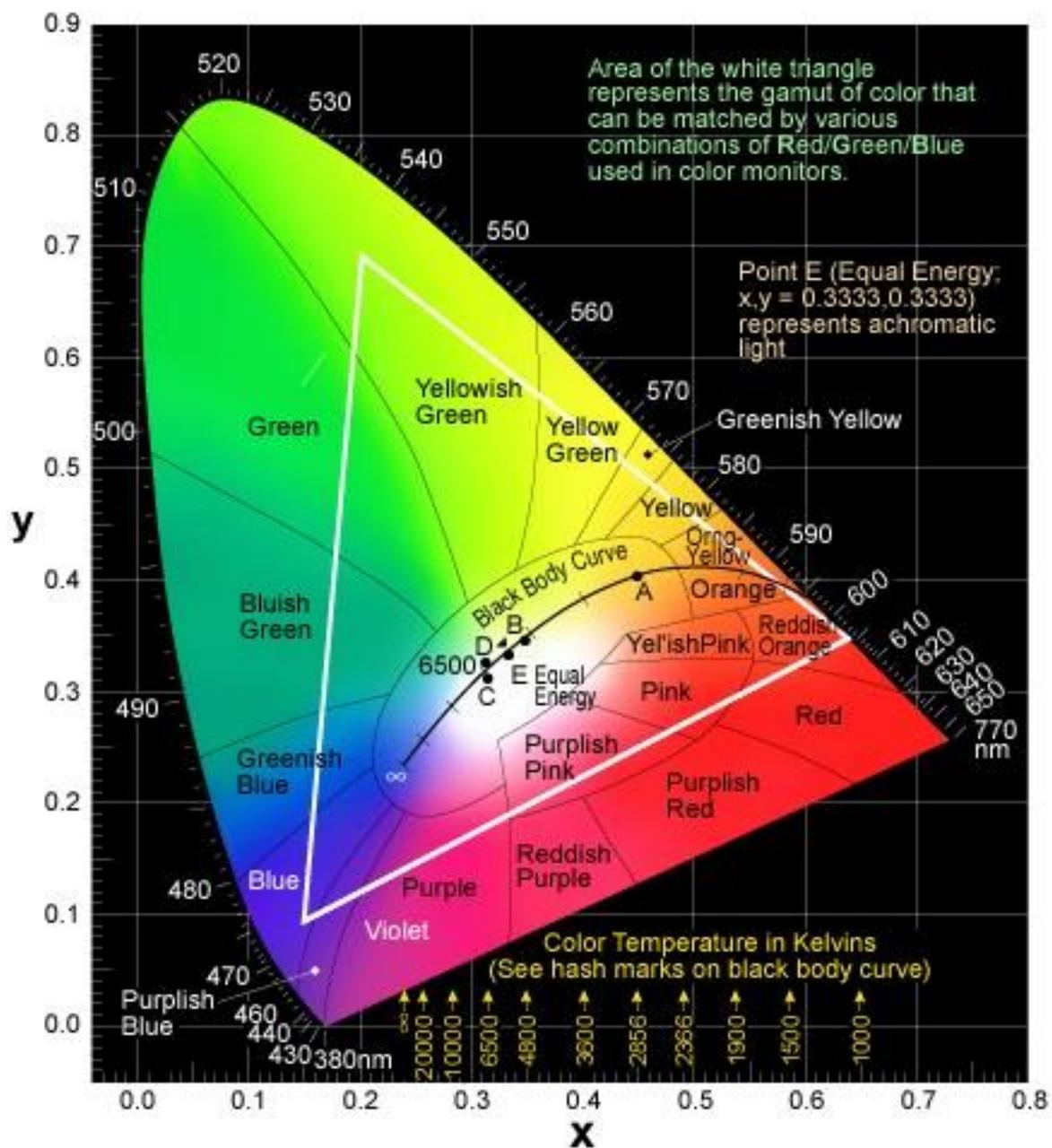
(X,Y,Z)-tristimulus space in oblique projection showing location of (x,y)-chromaticity diagram (unit plane, $X + Y + Z = 1$).

Il diagramma CIE è caratterizzato dalla **curva dei colori spettrali** e dalla **linea di base**, che congiunge gli estremi dello spettro. La linea di base è il luogo dei punti che rappresentano le miscele di blu e rosso, cioè i magenta. La curva spettrale e la linea di base corrispondono a colori con saturazione del 100% e dividono il piano in due zone:

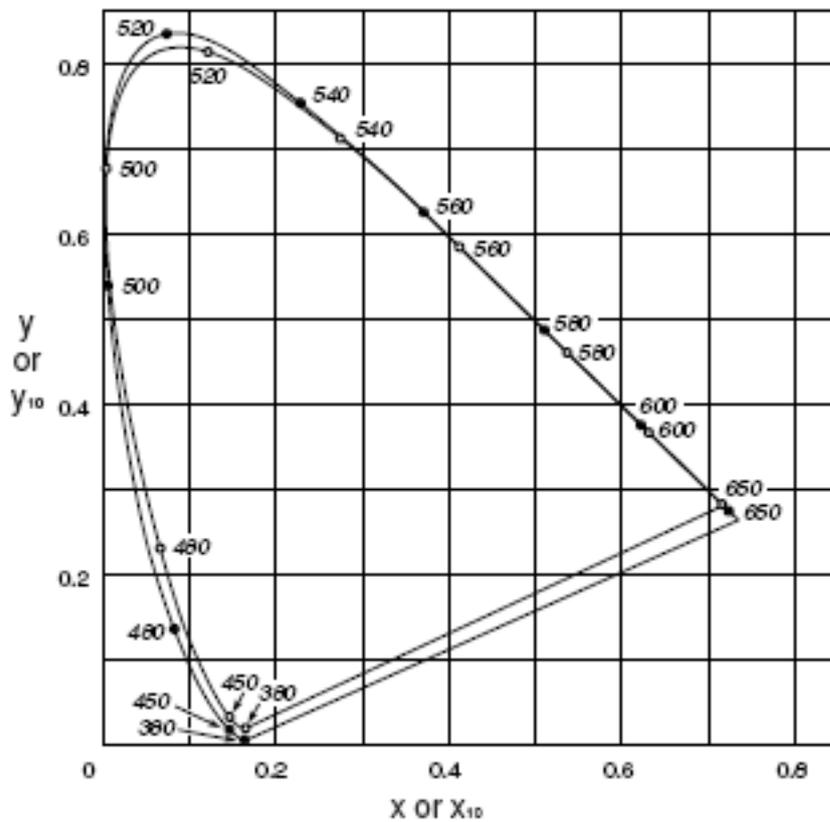
- la zona interna è l'insieme dei **colori reali**, con saturazione compresa tra lo 0% e il 100%,

- la zona esterna è l'insieme dei **colori immaginari**, con saturazione superiore al 100%.

La curva interna, che si stacca dalla curva spettrale nella zona dei rossi, è la **scala delle temperature di colore** ed è quindi il luogo dei punti che rappresentano gli illuminanti.

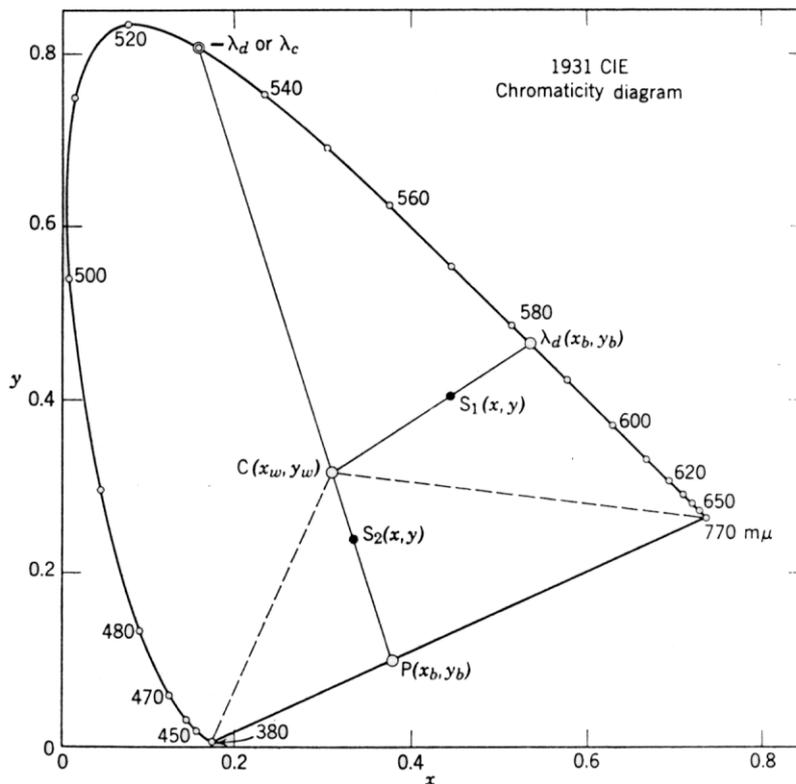


xy and $x_{10}y_{10}$ chromaticity diagram



- For 2° Standard Observer (CIE 1931)
- For 10° Supplementary Standard Observer (CIE 1964)

Il diagramma permette di definire il colore mediante l'individuazione della sua tinta (λ_d) e della sua saturazione.



Graphical determination of dominant wavelength and purity for color S_1 , and complementary wavelength and purity for color S_2 , relative to source C on the (x,y) -chromaticity diagram.

La tinta è determinata dal punto di intersezione (dove si legge la λ_d) ottenuto congiungendo il punto rappresentativo dell'illuminante usato con quello del colore e proseguendo fino ad incontrare la curva dei colori spettrali. La saturazione, normalmente espressa in percentuale, è definita dal rapporto delle distanze tra i punti dell'illuminante e del colore e tra quelli dell'illuminante e del tono.

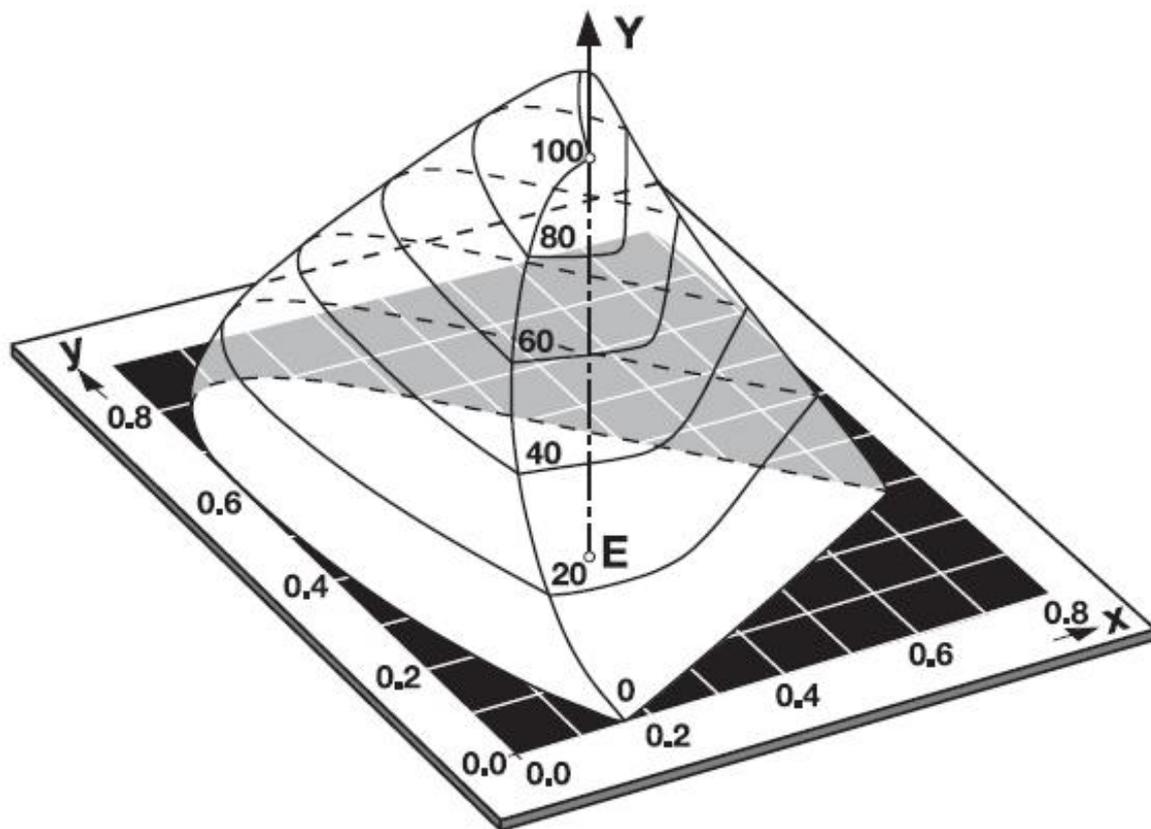
Qualora il colore in esame abbia una cromaticità rappresentata da un punto posto all'interno del triangolo delimitato dagli estremi della curva spettrale e dall'illuminante usato, la λ_d non può essere letta sulla linea dei magenta, che non hanno lunghezza d'onda propria. In questo caso la tinta è definita dalla lunghezza d'onda complementare (λ_c), ottenuta prolungando la retta passante per il punto rappresentativo dell'illuminante usato e per quello del colore fino ad incontrare la curva dei colori spettrali.

Componente tricromatica Y

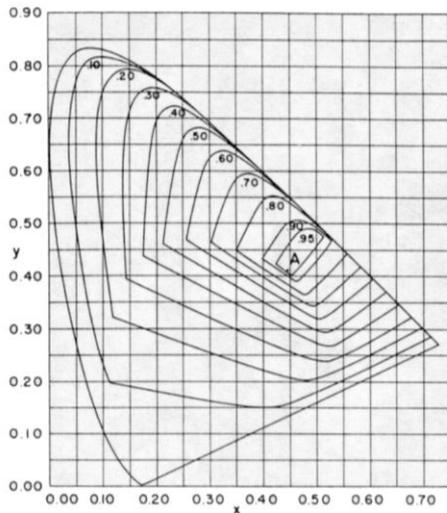
Poiché la percentuale di luce bianca riflessa da un oggetto è massima quando lo si percepisce bianco, minima quando lo si percepisce nero, la

riflettanza dipende dalla chiarezza del colore: più è alta la percentuale di luce riflessa e più chiaro apparirà il colore.

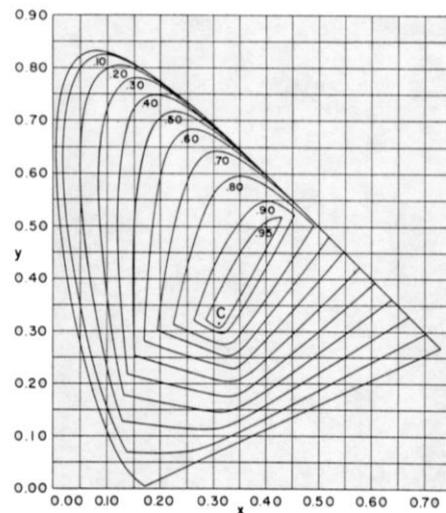
Convenzionalmente la componente Y, misurata su una scala che ha origine nel punto rappresentativo dell'illuminante in uso e che varia dallo 0% per il nero al 100% per il bianco, definisce la chiarezza e richiede l'impiego di un diagramma CIE tridimensionale.



In alternativa, si possono usare i normali diagrammi bidimensionali con linee inscritte, che rappresentano ognuna la proiezione sul piano xy dei luoghi geometrici dei colori aventi chiarezza rispettivamente uguale a 10-20-30-40-50-60-70-80-90-95%. Ciascun diagramma è specifico dell'illuminante in uso e ogni linea è ottenuta per intersezione dello spazio CIE con un piano parallelo al piano x, y e passante per l'asse Y% al valore indicato.



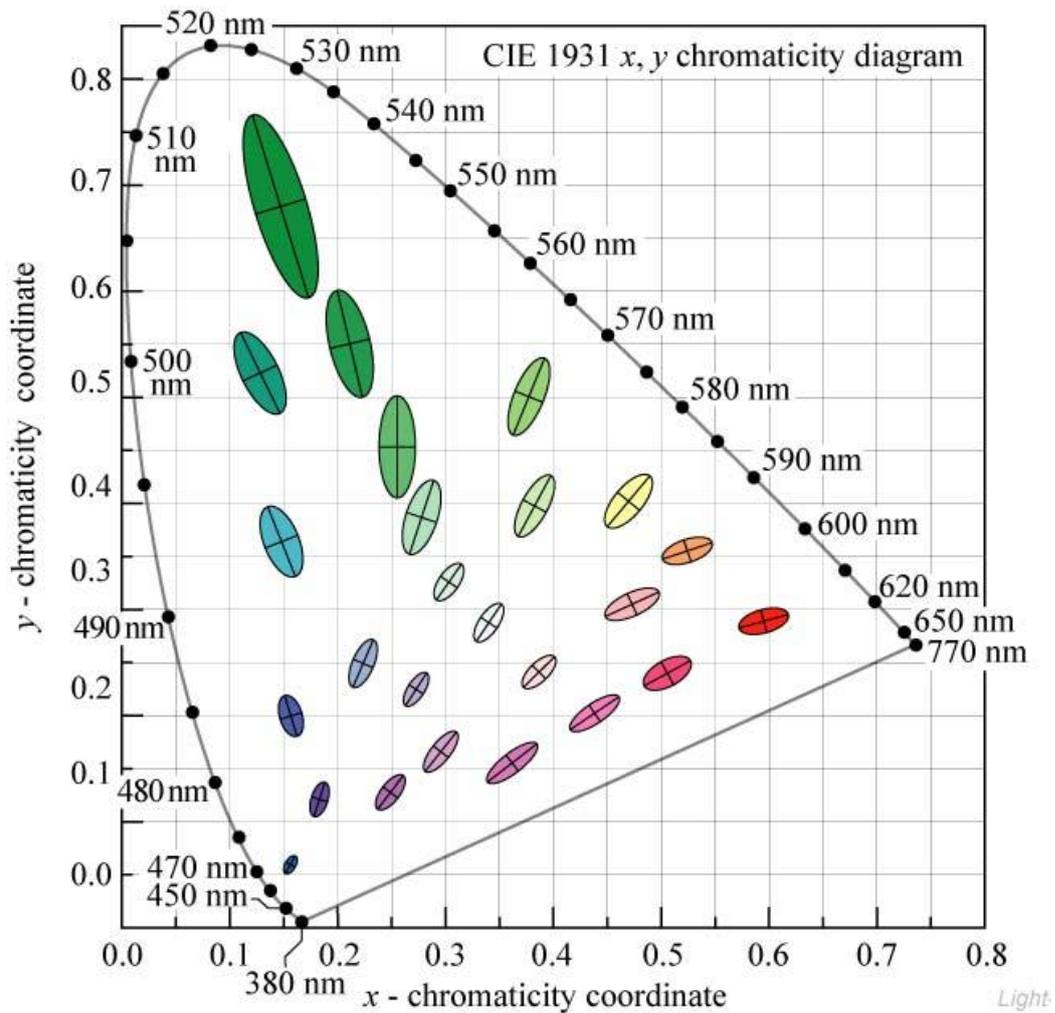
Chromaticity loci of optimal colors as a function of Y , on the basis of the 1931 CIE standard observer and for incident flux from CIE source A



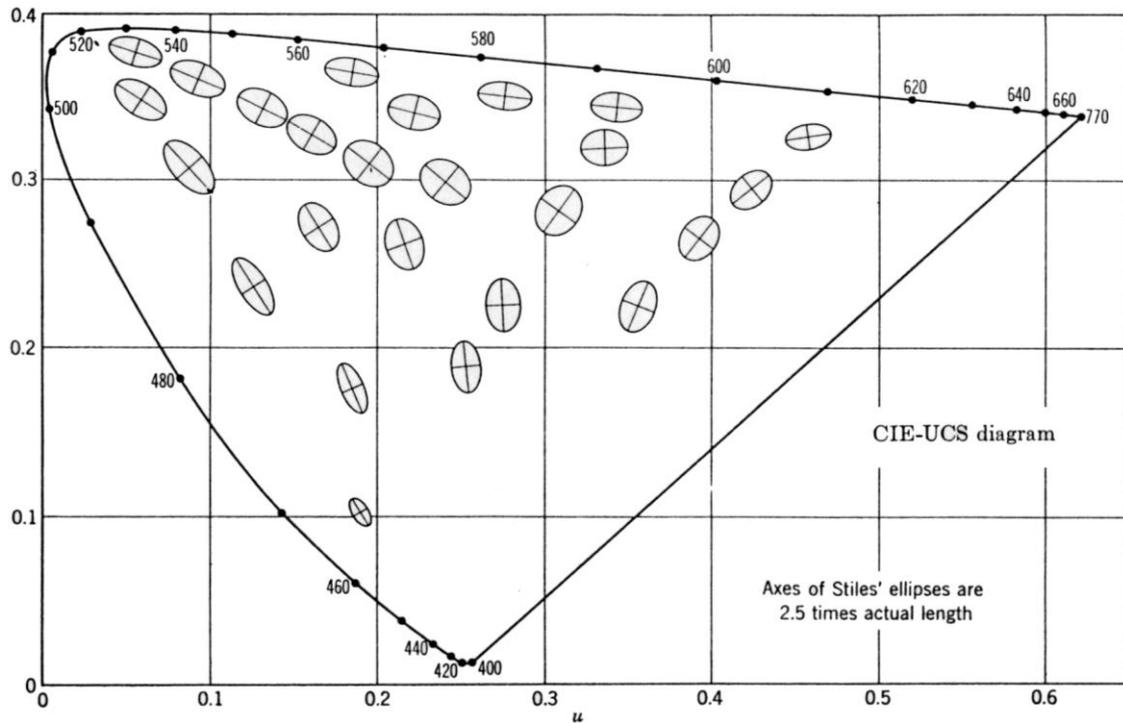
Chromaticity loci of optimal colors as a function of Y , on the basis of the 1931 CIE standard observer and for incident flux from CIE source C

Sistema CIE 1964: CIE UCS, CIE $Lu'v'$

Nel 1964, la CIE ha esteso l'angolo di osservazione normale nelle imitazioni colorimetriche da 2° a 10° ed ha introdotto il diagramma **CIE-UCS (Uniform Chromaticness Spacing)** per la valutazione delle differenze di colore. Il sistema CIE 1931 è, infatti, carente per quanto riguarda la rappresentazione grafica della differenza di colore, che non risulta rispondente alla percezione ed è anisotropa all'interno del diagramma di cromaticità.



Il CIE-UCS introduce una semplice modifica di coordinate che produce un diverso spazio colore e, di conseguenza, un diagramma di cromaticità più uniforme, ma ancora anisotropo: la rappresentazione sul diagramma di differenze di colore percepite eguali risulta variabile, in funzione del campo cromatico considerato.



I primari derivati dal CIE 1931 sono U, V, W e le nuove coordinate cromatiche sono u, v:

$$u = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v = 6Y / (X + 15Y + 3Z)$$

Nel 1976, la CIE ha modificato il diagramma CIE-UCS derivandone il **CIE Lu'v'**, al fine di migliorare l'uniformità del diagramma di cromaticità; ma la differenza di colore presenta ancora un'anisotropia residua.

Le nuove coordinate cromatiche sono u' , v' :

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z)$$

$$u' = 4X / (X + 15Y + 3Z)$$

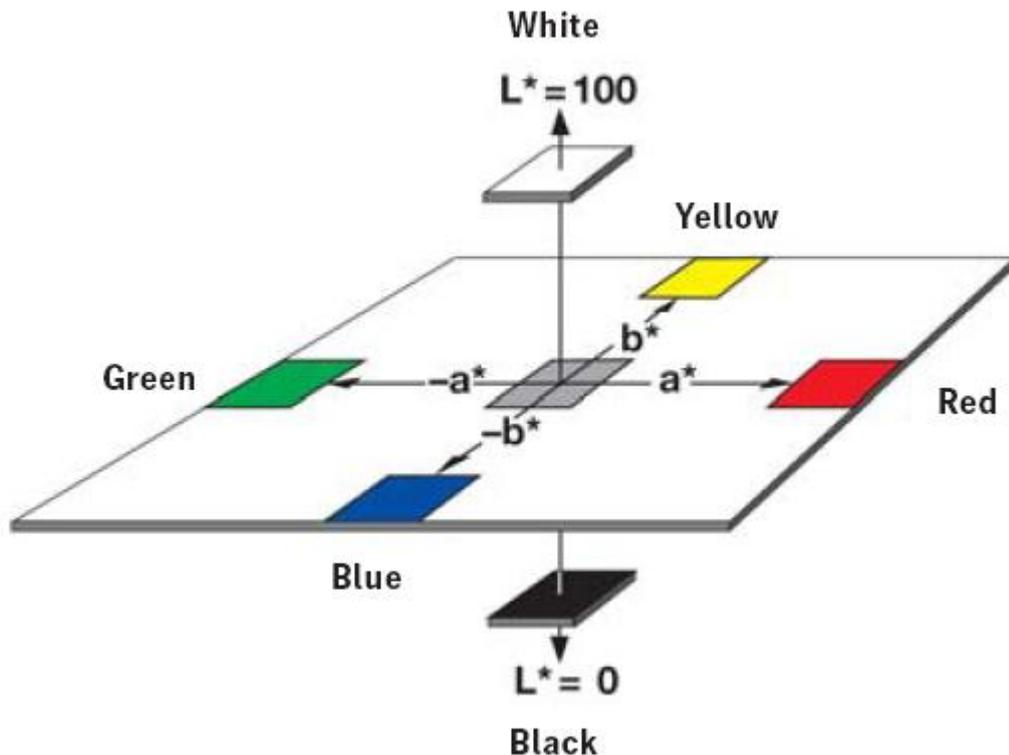
$$v' = 9Y / (X + 15Y + 3Z)$$

Sistema CIE 1976: CIE $L^*a^*b^*$, CIE $L^*C^*h^*$

Nel 1976, la CIE, oltre a rivedere il sistema CIE-UCS, ha proposto altre versioni di spazio colore, sempre derivate dal CIE 1931.

La nuova struttura di colore del **CIE $L^*a^*b^*$** è tridimensionale e si basa sulla **teoria dei colori opposti: un colore non può essere contemporaneamente verde e rosso e nemmeno giallo e blu.**

Pertanto, la notazione di colore con un attributo rosso/verde (asse delle ascisse, chiamato **asse a^* , orientato nel verso verde → rosso**) e con uno giallo/blu (asse delle ordinate, chiamato **asse b^* , orientato nel verso blu → giallo**), può essere sufficiente ad identificare la variazione di tinta tra tinte considerate alternative.

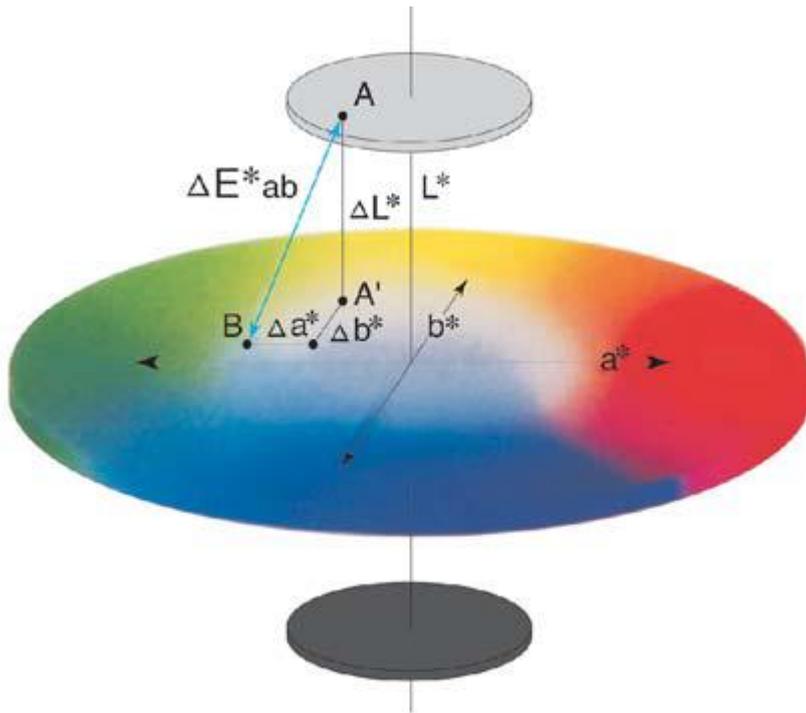


Entrambi gli assi riportano come variabili **differenze di colore ΔE** , quindi la funzione di tali spazi cromatici è finalizzata alla misura delle medesime e non alla determinazione della lunghezza d'onda e della purezza, per le quali si continua a usare il CIE 1931. L'unità di misura del CIE $L^*a^*b^*$ corrisponde alla minima variazione di colore percepibile per ogni coordinata, indipendentemente dal punto cromatico osservato.

Il colore si colloca in uno spazio tridimensionale sferoidale. Sull'asse a^* , un valore negativo definisce uno spostamento verso il verde ed un valore positivo uno spostamento verso il rosso. Sull'asse b^* , un valore negativo definisce uno spostamento verso il blu ed un valore positivo uno spostamento verso il giallo.

Il punto di intersezione degli assi del **piano a^*, b^*** rappresenta un colore acromatico (privo di tinta) la cui luminosità o chiarezza è espressa con il valore numerico L^* . L'**asse della variabile L^*** è perpendicolare al precedente piano e la sua scala va da 0 (minima luminosità o nero) a 100 (massima luminosità o bianco).

Il CIE $L^*a^*b^*$ è adatto alla misura e al calcolo di piccole differenze tra il colore di riferimento ed il colore da esaminare. La differenza di colore si calcola, come per il sistema CIE-UCS, mediante la distanza tra i due punti rappresentativi dei colori in esame.



Il diagramma di cromaticità è più uniforme dei precedenti, ma ancora anisotropo.

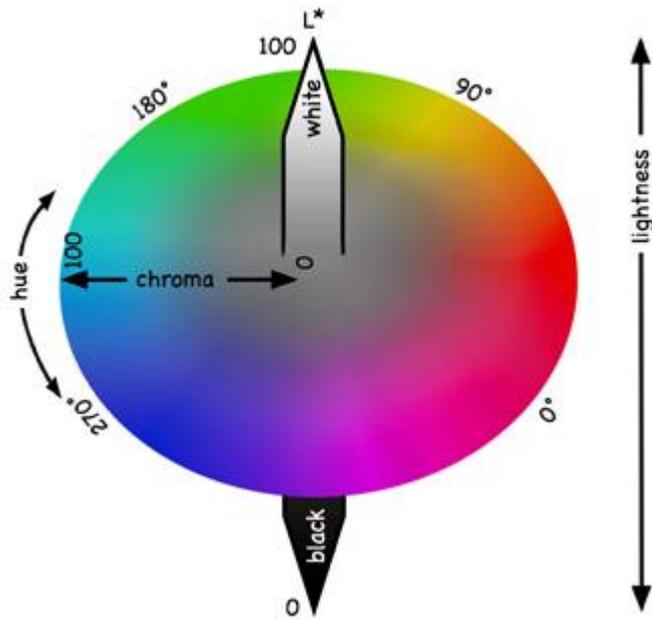
$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{100}} - 16$$

$$a^* = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{98,041}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{100}} \right)$$

$$b^* = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{100}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{108,103}} \right)$$

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Il **CIE L*C*h*** è un diagramma derivato dal CIE L*a*b* ed utilizza coordinate polari invece delle usuali coordinate cartesiane.



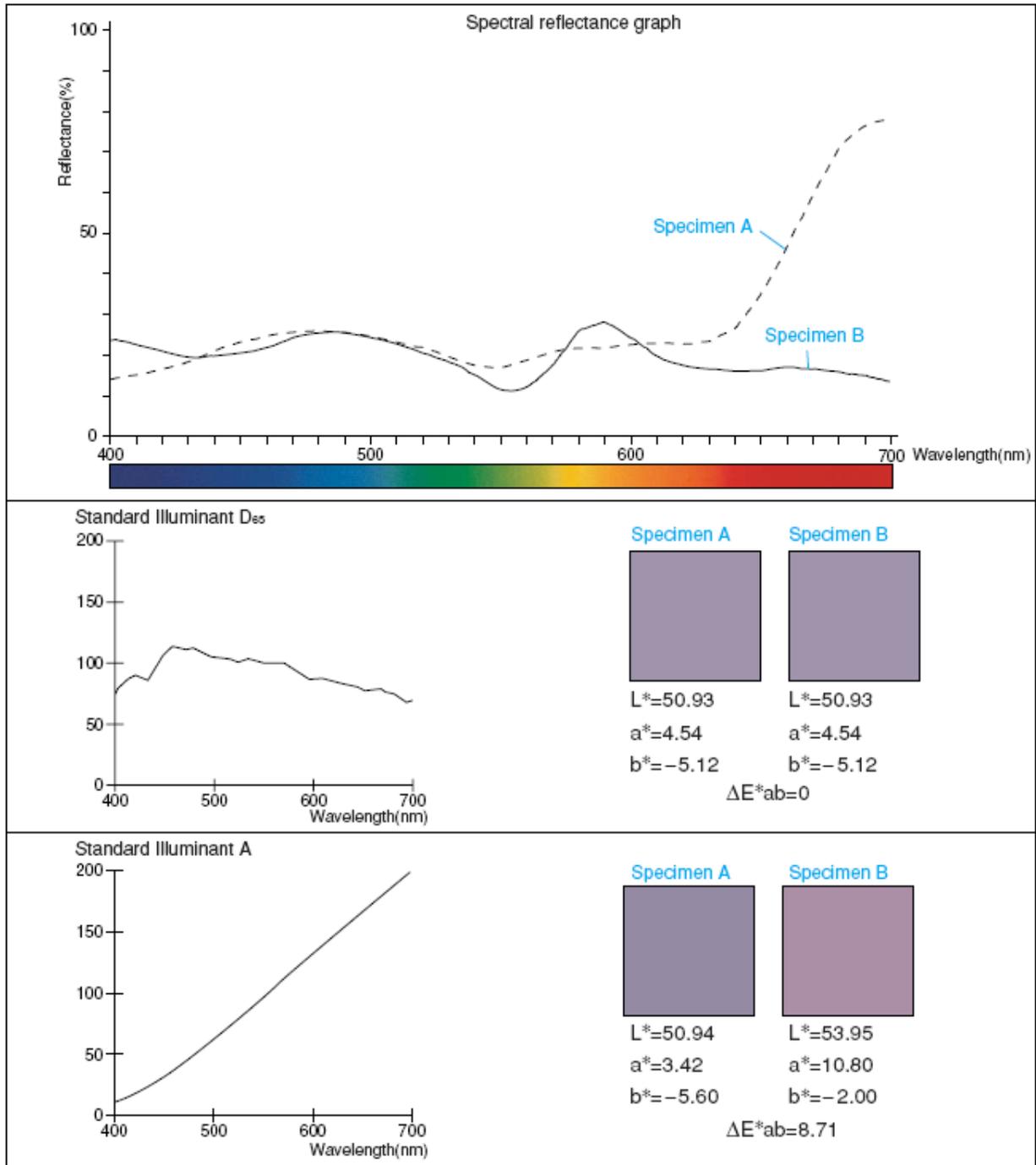
Metamerismo

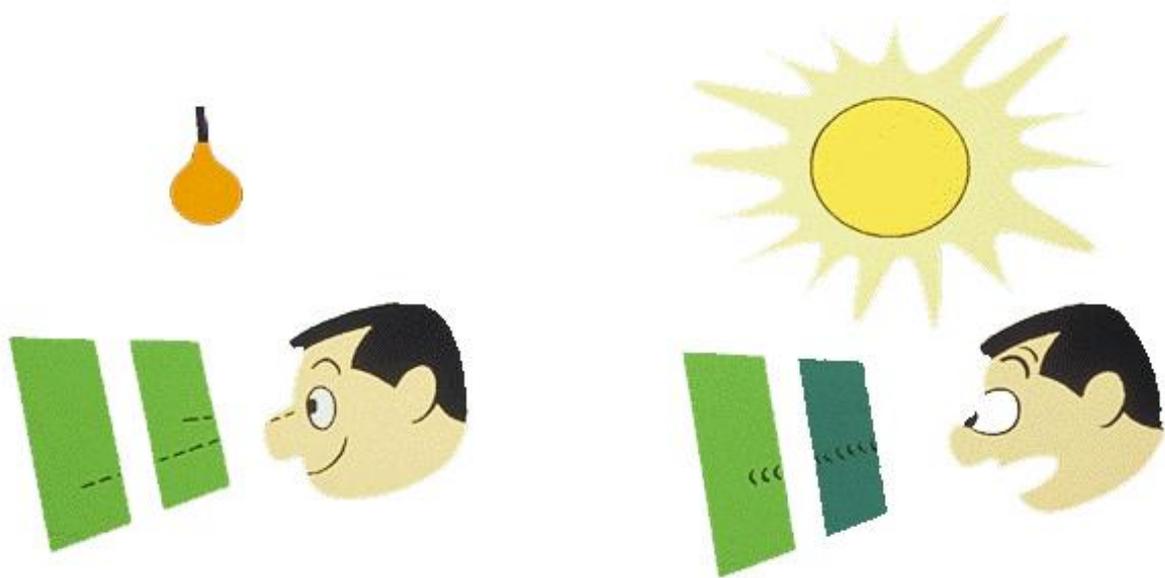
La curva di riflettanza spettrale o curva spettrofotometrica, che fornisce il valore della percentuale di luce riflessa da un oggetto alle varie lunghezze d'onda, fornisce un'analisi accurata del comportamento di un oggetto colorato, sotto condizioni di illuminamento prestabilire. È, infatti, possibile determinare, mediante calcolo, se esso abbia lo stesso colore di un altro oggetto di riflettanza spettrale nota, nelle stesse condizioni di illuminamento e osservazione. Ciò è del tutto generale e vale per qualunque illuminante di composizione spettrale nota in condizioni specifiche.

Se due oggetti hanno curve spettrofotometriche identiche, allora sono percepiti uguali, indipendentemente dagli illuminanti o dagli osservatori impiegati: si dice che tali oggetti hanno colori isomeri. Se uno standard di colore è fatto dello stesso materiale e degli stessi coloranti del prodotto da esaminare, vi è la certezza che quest'ultimo imiterà lo standard o mostrerà una differenza di colore isomerica, cioè non dovuta alla distribuzione spettrale.

Qualora si usino prodotti coloranti diversi, l'imitazione di colore tra standard e oggetto presenta un certo grado di metameria: anche se i due colori sembrano uguali (imitazione), le curve di riflettanza differiscono. I colori metameri sono pertanto definiti come stimoli di colore che danno la medesima percezione visiva e quindi hanno gli stessi valori tristimolo (nel

diagramma di cromaticità sono quindi rappresentati dallo stesso punto), ma con distribuzione spettrale differente; questi colori sono giudicati uguali limitatamente a specifiche condizioni di imitazione e osservazione.





Sistema GATF

La fondazione **GATF (Graphic Arts Technical Foundation)** ha sviluppato un metodo sistematico per la rappresentazione colorimetrica degli inchiostri utilizzando appositi diagrammi, carte e tabulazioni, atta a prevedere gli effetti delle variabili che entrano in gioco durante la stampa: carta, inchiostri, pressioni di stampa, ecc.

I diagrammi usati sono tre: il cerchio, il triangolo e l'esagono, ma il primo è senza dubbio quello più importante per la rappresentazione delle caratteristiche generali degli inchiostri e delle loro sovrastampe. I dati necessari per l'uso del sistema GATF si ottengono con letture dei colori stampati, effettuate mediante densitometri a riflessione attraverso tre filtri Wratten (rosso 25, verde 61, blu 47B), identici a quelli usati nella selezione dei colori.

Le letture effettuate sono indicate con le lettere R, G, B, rispettivamente per i filtri rosso, verde, blu; mentre le lettere L, M, H indicano le letture densitometriche rispettivamente più bassa (L), intermedia (M), più alta (H).

Densità cromatiche degli inchiostri da stampa			
	Filtro R	Filtro G	Filtro B
Inchiostro C	1,59 (H)	0,48 (M)	0,18 (L)
Inchiostro M	0,21 (L)	1,42 (H)	0,65 (M)
Inchiostro Y	0,03 (L)	0,09 (M)	1,64 (H)

Le misure densitometriche sono effettuate su fondini colorati stampati uno per uno o su sovrastampe di due colori; ciascuno è misurato con i tre filtri e le letture possono essere sintetizzate in una tabella, in cui si riportano, oltre i valori densitometrici, le coordinate relative ai vari diagrammi. Naturalmente il densitometro deve essere azzerato per ciascun filtro, ponendo eguale a zero la lettura fatta sulla superficie della carta impiegata.

Variabili GATF

Forza

Determina la gamma e l'intensità dei colori che è in grado di fornire in combinazione con gli altri inchiostri. La forza di un inchiostro è espressa dalla seguente relazione:

$$F = H$$

Errore di tinta

La tinta di un colore è determinata dalle lunghezze d'onda che riflette; un inchiostro per tricromia perfetto, assorbirebbe un terzo dello spettro e ne rifletterebbe due terzi. L'errore di tinta di un colore è determinato dalla misura dello squilibrio cromatico in riflessione ed è espresso sotto forma di percentuale. Un inchiostro privo di dominanti ha un errore dello 0%, una bicromia perfetta ha invece un errore del 100%. L'errore di tinta di un inchiostro è espresso dalla seguente relazione:

$$E_t = [(M - L) / (H - L)] \cdot 100$$

Grigio

La presenza di grigio in un inchiostro pregiudica sia la purezza dell'inchiostro stesso sia delle relative sovrastampe. Gli inchiostri diventano grigi quando riflettono il loro colore dominante in misura inferiore alla carta sulla quale sono stampati e il livello di grigio dipende dalla quantità di inquinante minore. Il grigio di un inchiostro è espresso dalla seguente relazione:

$$Gr = (L / H) \cdot 100$$

Efficacità

È la misura della sua capacità di assorbire un terzo dello spettro e di riflettere gli altri due terzi. Più il valore di efficacia di un inchiostro è elevato, più estesa è la gamma di colori che potrà fornire in combinazione con gli altri inchiostri e minori le correzioni da apportare. L'efficacia di un inchiostro è espressa dalla seguente relazione:

$$E = [1 - (L + M) / (2H)] \cdot 100$$

Cerchio dei colori GATF

Serve a visualizzare le caratteristiche di un inchiostro reale mediante l'errore di tinta e la percentuale di grigio.

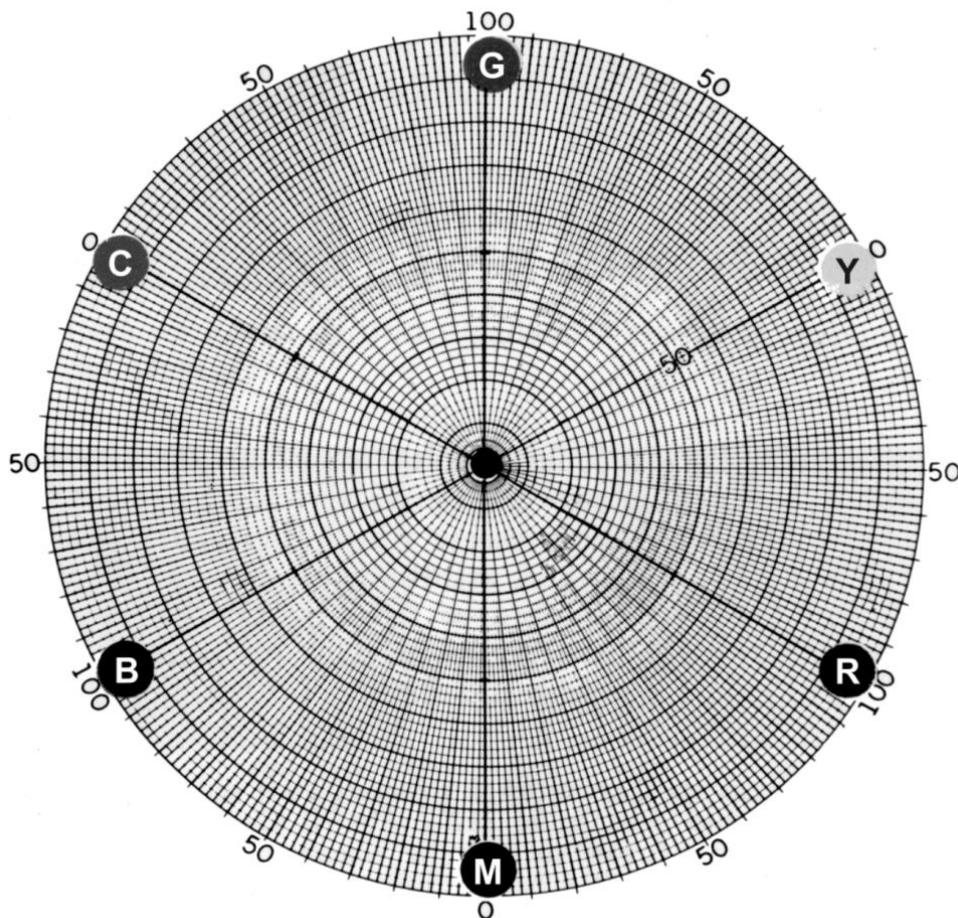
Il cerchio GATF è diviso in sei settori, suddivisi ognuno in 50 parti, per l'individuazione dell'errore di tinta. Altrettanto si può dire per i gradi di grigio: vi sono 10 divisioni tra il centro del cerchio, che rappresenta il nero (percentuale di grigio = 100%) e la circonferenza, che è il luogo dei colori saturi (percentuale di grigio = 0%), a loro volta suddivisi in cinque parti; ogni divisione corrisponde quindi al 2% di incremento della variabile.

Il posizionamento del punto, a sinistra o a destra di un determinato asse di colore, avviene in direzione del filtro con la lettura densitometrica minore.

Il posizionamento del punto rappresentativo di un colore di sovrastampa avviene in direzione del complementare del filtro con la lettura maggiore e ad una distanza da tale complementare pari all'errore di tinta. Un errore di tinta del 100% corrisponde ad una sovrastampa perfetta.

Le più importanti proprietà del cerchio dei colori nello studio della riproduzione cromatica a stampa sono le seguenti:

- i valori coordinati di un colore hanno un significato evidente e comprensibile perché specificano caratteristiche, quali errori cromatici e purezze;
- le variazioni di ubicazione per ogni colore sono di facile interpretazione e danno un'indicazione pratica di correzione cromatica;
- i punti di uguale percentuale di grigio si trovano sulla medesima circonferenza;
- le miscele di colori sottrattivi vengono indicate e messe più facilmente in relazione con i colori primari.



Il diagramma permette di valutare i limiti e le possibilità di un gruppo di inchiostri, le condizioni di ancoramento o adesione, l'opacità. Si raggiunge lo scopo determinando a priori il colore di sovrastampa, per semplice addizione delle densità dei singoli inchiostri componenti, e paragonandolo con quello reale.

La tinta dovrebbe essere quella prevista se l'inchiostro stampato per secondo fosse interamente trasparente e perfettamente ancorato. I prodotti commerciali però sono tali da produrre fenomeni di trapping, provocati dal non completo trasferimento dell'inchiostro di sovrastampa sul primo stampato. Inoltre il secondo inchiostro può essere parzialmente opaco e le proprietà fisiche della carta possono causare una certa dispersione superficiale della luce. Queste circostanze possono alterare il colore di sovrastampa previsto spostandolo verso il primo o verso il secondo inchiostro.

Una volta riportati i punti rappresentativi di giallo, magenta e ciano e delle loro sovrapposizioni (rosso, verde e blu) sul diagramma, si uniscono con segmenti i punti a due a due: l'area circoscritta darà, approssimativamente, i limiti dei colori che è possibile riprodurre con la serie di inchiostri considerata. Le tinte limite che si possono avere con mescolanze di due colori, si trovano sulle linee tracciate.

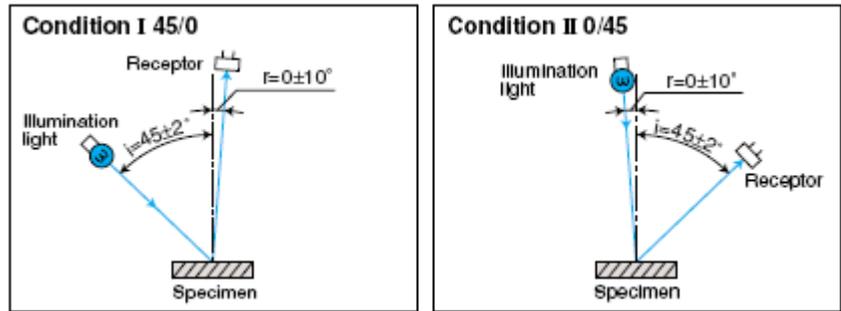
Strumenti per la misura del colore

Il colore di una superficie varia in funzione delle condizioni di visione, dell'angolo di osservazione e dell'angolo di illuminazione. Quando si esegue l'analisi strumentale del colore di un campione, l'angolo di incidenza sulla superficie del fascio luminoso emesso dalla sorgente e l'angolo di lettura della luce riflessa sul fotosensore costituiscono la geometria ottica dello strumento.

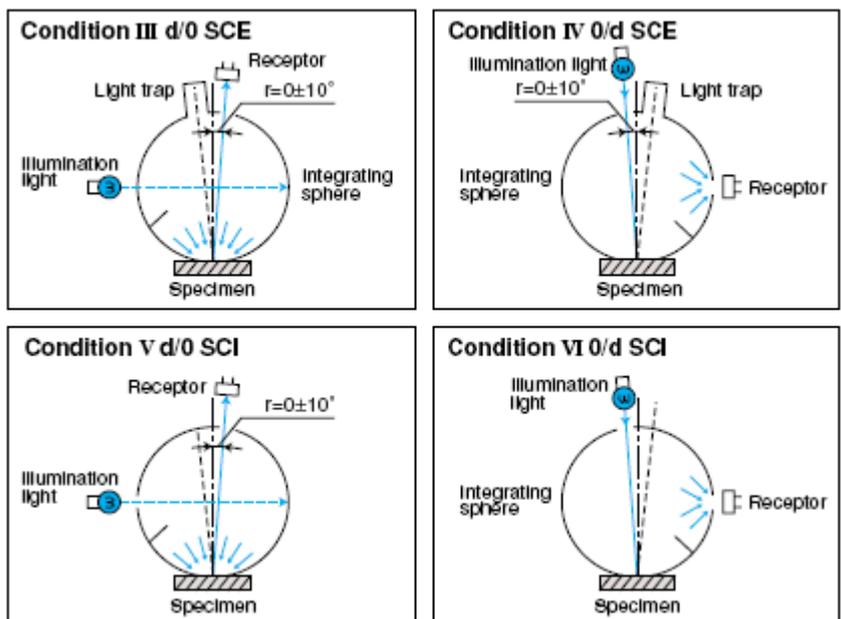
Illuminazione unidirezionale

La luce incide sulla superficie provenendo da un'unica direzione. La **geometria 45/0** prevede un angolo di incidenza della luce sulla superficie da analizzare di $45 \pm 2^\circ$ e la lettura della luce riflessa lungo la perpendicolare, con un angolo di $0 \pm 10^\circ$. Invece, la **geometria 0/45** prevede l'incidenza della luce lungo la normale della superficie da analizzare, con un angolo di $0 \pm 10^\circ$, e la lettura della luce riflessa con un angolo di $45 \pm 2^\circ$.

Sfera di integrazione illuminazione diffusa



La sfera di integrazione è un dispositivo sferico cavo, con la superficie interna dotata di rivestimento bianco, ad esempio solfato di bario (BaSO_4), per diffondere la luce. Serve ad illuminare la superficie del campione con luce diffusa o a raccogliere la luce riflessa diffusa. La **geometria d/0** prevede l'illuminazione diffusa della superficie da analizzare e la lettura della luce riflessa lungo la perpendicolare, con un angolo di 0° . Invece, la **geometria 0/d** prevede l'illuminazione della superficie da analizzare lungo la normale, con un angolo di 0° , e la lettura della luce riflessa diffusa. La luce riflessa entro un angolo di $\pm 5^\circ$ rispetto alla direzione speculare può essere eventualmente esclusa.



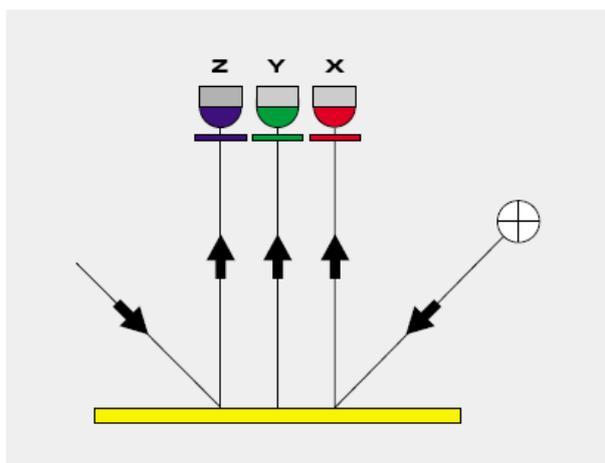
Colorimetro

Il colorimetro è di valido ausilio nella stampa per riprodurre esattamente i colori e per misurare gli scostamenti cromatici.

Il colorimetro è uno strumento che effettua misure relative ai sistemi colorimetrici precedentemente descritti. Con una sola lettura si può avere sia l'indicazione della densità (funzione densitometrica), sia dei valori delle terne XYZ, Y_{xy} , $Y_{u'v'}$, L^*a^*b ; la lettura può essere effettuata con l'illuminante C o D_{65} , sia con angolo di visione di 2° sia di 10° (funzioni colorimetriche).

Mentre nello spettrofotometro la geometria del sistema di rilevamento è a sfera di integrazione, ossia sono computati i raggi comunque riflessi, nel colorimetro si impiega una geometria per riflessione a 45° (come nel densitometro): ciò implica che i valori forniti dai due strumenti non sono direttamente confrontabili.

Il colorimetro può dunque effettuare letture significative su qualsiasi zona del foglio di stampa, senza necessariamente ricorrere all'uso di apposite strisce di controllo, ciò consente la misura diretta nelle aree più delicate dello stampato, come le tinte delle carnagioni, di alcuni tipi di verdi, ecc.



Densitometro

Le variazioni di colore sono rilevabili con un densitometro in termini di variazioni di densità ottica e utilizzabili per la stampa. La densità dipende soprattutto dallo spessore dello strato di inchiostro stampato e dalla concentrazione di pigmenti, nonché dal filtro impiegato nella misura.

In funzione del campo di impiego, le caratteristiche dei filtri dei densitometri sono standardizzate in base alle norme ANSI e DIN.

I filtri usati nel densitometro non sono sufficienti per la misurazione cromatica in quanto non coprono l'intero spettro di riflessione del colore. I

valori di misurazione densitometrici non esprimono quindi a sufficienza l'effetto visivo di un colore, in particolare di quelli cosiddetti speciali o composti.



Spettrofotometro

Lo spettrofotometro, lavorando per trasmissione o per riflessione di luce, fornisce le percentuali di trasmissione (trasmittanza) o riflessione (riflettanza) del campione colorato per le diverse lunghezze d'onda dello spettro. I valori generano la curva di riflessione; in alcuni modelli è possibile avere i valori tristimolo XYZ e i valori CIE $L^*a^*b^*$.

La misura spettrofotometrica presenta delle caratteristiche di precisione che la fanno preferire a quella colorimetrica. Lo spettrofotometro è però uno strumento costoso, adatto soprattutto alla valutazione delle materie prime (carta, inchiostri, coloranti, ecc.) ed alla formulazione di tinte particolari.

Per la misurazione del colore, lo strumento dispone normalmente di più tipi di illuminanti; quelli più diffusi nell'industria grafica sono A, C e D_{65} . I risultati ottenuti con il tipo C e il tipo D_{65} differiscono solo se la carta o i colori contengono sbiancanti ottici che, se eccitati dalla luce UV, producono effetti fluorescenti.

