

APPUNTI DI
ELEMENTI E DEFINIZIONI DI FOTOMETRIA E
COLORIMETRIA

A cura di: ing. Emanuele Habib

Indice

La luce.....	2
Fotometria.....	3
Definizione.....	3
Curva di visibilità.....	3
Effetto Purkinje.....	4
Visibilità di radiazioni a spettro esteso.....	5
Grandezze fotometriche.....	6
Intensità luminosa.....	6
Flusso luminoso.....	6
Efficienza luminosa.....	7
Radianza.....	7
Luminanza.....	8
Illuminamento.....	8
Contrasto.....	9
Altri concetti di fotometria.....	10
Colorimetria.....	10
Sistemi di classificazione dei colori.....	10
Tono (Hue).....	12
Saturazione (Chroma).....	12
Luminosità (Value).....	13
Il dizionario dei colori di Munsell.....	13
Colorimetria tristimolo.....	15
Leggi di Grassmann.....	16
Lo spazio CIE RGB.....	17
Lo spazio CIE XYZ e xyY.....	18
Metamerismo.....	22
Illuminanti standard.....	22
Il colore degli oggetti.....	27
Relazione tra diagramma CIE e classificazione naturale degli oggetti.....	27
Cenni ai colori digitali.....	28
Bibliografia.....	31
Riepilogo delle immagini a colori.....	Errore. Il segnalibro non è definito.

Elementi e definizioni di fotometria e colorimetria

La luce

La luce è costituita dalle onde elettromagnetiche in grado di stimolare il senso della vista di un osservatore umano normale.

Comunemente si individuano nelle lunghezze d'onda comprese tra 380-770 nm la radiazione in grado di generare uno stimolo visivo. Lunghezze d'onda inferiori al minimo dell'intervallo normale di visibilità si indicano con il nome di ultravioletti. Viceversa, lunghezze d'onda superiori al massimo dell'intervallo normale di visibilità si indicano con il nome di infrarossi.

Gli estremi dell'intervallo, però, non sono definiti in modo certo. Al variare della lunghezza d'onda della sorgente monocromatica osservata, si ha una diminuzione della sensibilità dell'occhio fino ad un valore tale per cui non è più percepibile nelle particolari condizioni di sperimentazione. Esistono pertanto discordanze sugli esatti valori dei limiti dell'intervallo delle radiazioni visibili, in relazione alle condizioni sperimentali (radiazioni di fondo, periodo di adattamento, tipologia del campione).

Le sorgenti di luce si possono classificare in due categorie in relazione alle cause di emissione:

- le superfici e gli oggetti in grado di emettere luce per attività propria (in assenza di altre fonti di radiazione elettromagnetica visibile), che diremo sorgente di luce primaria;
- le superfici e gli oggetti i quali emettono luce per riflessione, rifrazione e trasparenza parziale, ossia per selezione e deviazione della radiazione luminosa incidente, che diremo sorgente di luce secondaria¹.

Se la sorgente è isolata dal contesto (tutto il resto del campo visivo ha emissione nulla) l'occhio non è in grado di distinguere una sorgente di luce secondaria da una primaria. Questa situazione esiste raramente in natura (es. il buco della serratura in una stanza completamente buia), ma è una condizione normale nella pratica sperimentale. Il contesto di osservazione è, infatti, di fondamentale importanza nell'espressione di un giudizio in merito ad una porzione del campo visivo e andrebbe specificato per ogni osservazione sperimentale. L'adozione di sorgenti isolate limita, infatti, i parametri da cui dipende l'esperimento, permettendone una più agevole esecuzione e descrizione.

¹ Tutti i corpi emettono radiazione elettromagnetica per temperatura, ma per gli ambienti comuni, lo spettro di tale emissione non ricade in modo percepibile entro l'intervallo delle lunghezze d'onda delle radiazioni visibili. La sensazione luminosa prodotta dagli oggetti che ci circondano è frutto della radiazione riflessa o rinviata dagli stessi, ma prodotta dalle sorgenti di luce artificiale o naturale.

Fotometria

Definizione

La fotometria studia la percezione degli stimoli visivi prescindendo dall'aspetto cromatico. E' oggetto di osservazione solo la quantità di luce, prescindendo dalle sue qualità.

Curva di visibilità

Come detto, differenti spettri di radiazione elettromagnetica generano diverse sensazioni luminose. L'analisi della relazione esistente tra la potenza incidente sulla retina (porzione fotosensibile dell'occhio) e la sensazione luminosa osservata può essere condotta in prima istanza con riferimento a radiazioni monocromatiche.

Da una serie di confronti binari è possibile definire un *fattore di visibilità* o semplicemente *visibilità* $V(\lambda)$ tale che per due radiazioni monocromatiche qualunque nel campo visibile, di potenza e lunghezza d'onda rispettivamente W_1, λ_1 e W_2, λ_2 , si abbia:

$$W_1 \cdot V(\lambda_1) = W_2 \cdot V(\lambda_2). \quad (1)$$

Per quanto descritto, la funzione $V(\lambda)$ ovviamente tende a 0 agli estremi del campo di visibilità e quindi ammette almeno un massimo all'interno di questo. Sperimentalmente si osserva tale massimo per una lunghezza d'onda di 555 nm.

Si definisce quindi il *coefficiente di visibilità*, normalizzando il fattore di visibilità rispetto alla visibilità massima:

$$v(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_{\max}} \quad (2)$$

Tale funzione assume il valore 1 in corrispondenza del massimo e rappresenta la sensibilità relativa dell'occhio per le varie radiazioni monocromatiche, riferita alla visibilità massima.

Il coefficiente di visibilità alle varie lunghezze d'onda è stato normalizzato dalla CIE (Commission International de l'Eclairage) in forma di tabella e rappresentato in forma di diagramma, riportato qui sotto; la figura prende il nome di curva normale di visibilità:

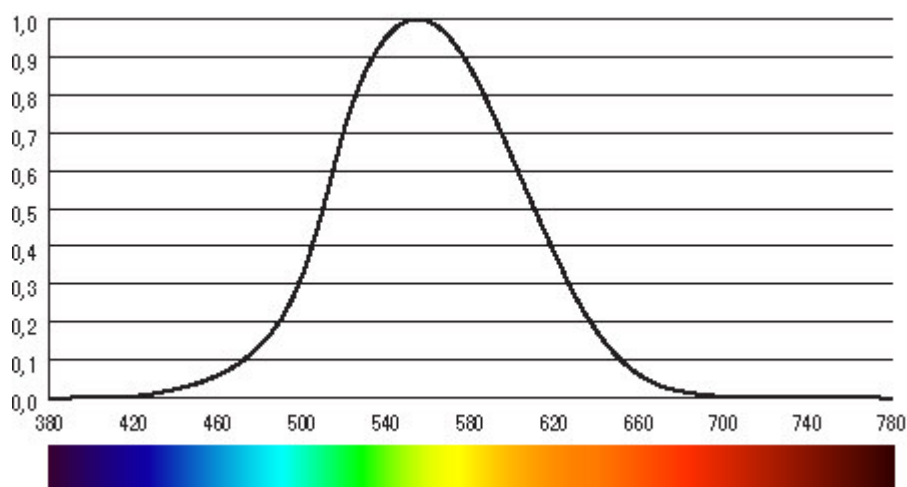


fig. 1

I valori sono tabulati per lunghezze d'onda comprese tra i 360 ed i 830 nm, anche se al di sotto dei 380 ed al di sopra dei 770 nm non si hanno contributi alla visione normalmente apprezzabili.

Le campagne di sperimentazione condotte hanno evidenziato che i valori della visibilità dipendono in modo trascurabile dalle intensità di illuminazione, salvo che per valori particolarmente bassi dello stimolo luminoso.

Effetto Purkinje

Gli organi fotorecettori presenti nella retina dell'occhio umano sono detti coni e bastoncelli. I primi sono di tre tipologie, ciascuna più sensibile ad una porzione dello spettro luminoso ed in grado di generare la percezione del colore (visione fotopica). I coni sono sensibili a stimoli di intensità medio-alta, mentre i bastoncelli sono in grado di percepire stimoli notevolmente inferiori per intensità.

Ciascuna delle tipologie di fotorecettori ha una diversa visibilità spettrale. La combinazione degli stimoli generati dai coni determina la curva di visibilità descritta sopra.

Quando lo stimolo luminoso è insufficiente a sollecitare i coni, la risposta oculare agli stimoli è determinata esclusivamente dai bastoncelli (visione scotopica), i quali hanno una curva di visibilità diversa da quella fotopica: la lunghezza d'onda alla quale si ha il massimo di visibilità è inferiore, pari a 507 nm. La curva di visibilità risulta pressoché immutata, ma traslata di 50 nm circa verso sinistra. Nella visione scotopica non si ha la percezione dei colori.

Visibilità di radiazioni a spettro esteso

A rigore la curva normale di visibilità è corretta solo per radiazioni monocromatiche. Per poterla estendere alle radiazioni a spettro esteso in modo che sia utile per ogni applicazione è necessario introdurre due ipotesi forti:

1. proporzionalità: se l'intensità della luce A di potenza W_A corrisponde all'intensità della luce B di potenza W_B , allora l'intensità di una luce di potenza $\alpha \times W_A$ corrisponde all'intensità di una luce di potenza $\alpha \times W_B$, qualunque sia il valore di α reale positivo.
2. additività: se A, B, C, D sono quattro luci tali che l'intensità di A sia pari all'intensità di B e che l'intensità di C sia pari all'intensità di D, allora l'intensità della luce data dalla composizione di A e di C sarà uguale all'intensità di B e di D.

Le sperimentazioni condotte hanno dimostrato la validità di queste ipotesi per le applicazioni correnti.

E' possibile quindi confrontare fra loro sorgenti qualunque: si suddivide lo spettro in porzioni infinitesime (sorgente monocromatica), ciascuna di queste è moltiplicata per la rispettiva visibilità, quindi si addizionano nuovamente i risultati, il valore ottenuto è l'espressione della luce connessa alla radiazione in esame:

$$\int \varepsilon_1(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda = \int \varepsilon_2(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

Come detto la curva di visibilità è ottenuta sperimentalmente. La rappresentazione con tratto continuo è un'ovvia estensione dei risultati sperimentali, ma in effetti i valori numerici disponibili descrivono un campo discreto. Ogni valore intermedio è ottenuto per interpolazione. Infatti, non è stata definita la funzione matematica che esprime la visibilità o il coefficiente di visibilità, pertanto qualunque integrazione dovrebbe essere eseguita in forma grafica (per punti) o numerica.

Trascurando gli anacronistici metodi grafici, l'integrazione è compiuta per via numerica, risolvendo una sommatoria in luogo dell'integrale.

Per ridurre l'incertezza del procedimento di calcolo è opportuno considerare quindi valori sperimentali anziché valori interpolati. L'espressione formale (3) può essere quindi sostituita dall'espressione operativa:

$$\sum \varepsilon_1(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda = \sum \varepsilon_2(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (4)$$

Il metodo ha buona precisione già con $\Delta\lambda = 10$ nm. I valori di visibilità sono disponibili al più con passo $\Delta\lambda = 1$ nm, ma tale raffinamento non è abitualmente necessario.

Grandezze fotometriche

Intensità luminosa

L'intensità della luce è finora definita in termini relativi, per definirla in termini assoluti è necessario introdurre una nuova unità di misura. Nel sistema internazionale l'unità di misura dell'intensità luminosa I è la candela internazionale (cd), definita come *l'intensità di luce emessa in direzione perpendicolare da una superficie di estensione $1/60 \text{ cm}^2$ con comportamento di corpo nero alla temperatura di fusione del platino (2042 K).*

Nella definizione è indicata la direzione dalla quale deve essere osservata la sorgente perché l'intensità osservata dipende dall'angolo sotto il quale viene vista la sorgente. La relazione tra grandezza fisica e psicofisica per una sorgente monocromatica è quindi:

$$I(\varphi, \vartheta) = V(\lambda) \cdot W(\varphi, \vartheta) \quad (5)$$

dove $W(\varphi, \theta)$ è la potenza emessa nella direzione in esame. Per sorgenti a spettro esteso, allo stesso modo:

$$I(\varphi, \vartheta) = \int V(\lambda) \cdot \varepsilon(\lambda, \varphi, \vartheta) \cdot d\lambda \quad (6)$$

Ovviamente nella definizione del fattore di visibilità e delle grandezze derivate svolto prima era stato implicitamente ipotizzato che le diverse sorgenti osservate avessero tutte la medesima distribuzione spaziale dell'emissione.

La definizione di una "direzione di osservazione" implica il modello di sorgente puntiforme, altrimenti si avrebbe propriamente un angolo di osservazione. Per molte delle comuni sorgenti di luce questo modello è adeguato per le finalità ingegneristiche.

Per descrivere il comportamento spaziale di una sorgente, ovvero la relazione tra intensità e direzione sono utilizzati diagrammi polari tali per cui in ogni direzione è individuato un punto la cui distanza dal punto sorgente è proporzionale all'intensità nella medesima direzione secondo una opportuna scala. Il luogo di questi punti prende il nome di *solido fotometrico*. Nel caso frequente che la sorgente presenti simmetria di rivoluzione attorno ad un asse, è sufficiente la rappresentazione della traccia del solido fotometrico su un piano meridiano (passante per l'asse di rivoluzione), la curva ottenuta prende il nome di *curva fotometrica*.

Flusso luminoso

La luce osservata è in diretta relazione con l'intensità luminosa emessa, in quanto all'occhio giunge la sola radiazione emessa lungo la congiungente la sorgente all'occhio. Nel valutare le emissioni di sorgenti è rilevante, invece, conoscere l'entità della luce irradiata in tutto lo spazio. E' possibile quindi integrare l'intensità luminosa rispetto alle direzioni dello spazio per ottenere una nuova grandezza denominata *flusso luminoso*:

$$\Phi = \int I(\varphi, \vartheta) \cdot d\Omega \quad (7)$$

L'unità di misura del flusso luminoso è il lumen (lm), definito come il flusso luminoso emesso da una sorgente di intensità uniforme pari ad 1 candela in un angolo solido di apertura 1 steradiano.

Il flusso luminoso totale emesso da una sorgente si ottiene quindi, estendendo l'integrale in (7) a tutto lo spazio (da 0 a 4π).

Per una sorgente monocromatica si ha:

$$\Phi = \int_0^{4\pi} V(\lambda) \cdot W(\varphi, \vartheta) \cdot d\Omega = V(\lambda) \cdot \int_0^{4\pi} W(\varphi, \vartheta) \cdot d\Omega = V(\lambda) \cdot W \quad (8)$$

Tale espressione è equivalente al prodotto (1). Questo esprimeva, però, solo un termine di paragone, in assenza di una specifica grandezza (nel confronto dell'intensità della sensazione luminosa generata la sorgente era osservata sotto un particolare angolo). La (1), la (3) e la (4) sono valide in termini generali solo per sorgenti con medesimo solido fotometrico, altrimenti si deve operare con riferimento alle potenze emesse nella particolare direzione di osservazione. Nelle operazioni sperimentali risulta naturale rispettare questa condizione.

Dal valore del flusso luminoso della sorgente campione (il cui spettro è definito dalla legge di Planck per l'emissione specifica del corpo nero) si calcola il valore assoluto del fattore di visibilità nel Sistema Internazionale. La visibilità massima V_{\max} è pari pertanto a 683 lm/W per visione fotopica.

Efficienza luminosa

Di una sorgente artificiale è possibile definire a questo punto un valore che esprima il rendimento di illuminazione, come il rapporto tra il flusso luminoso emesso e la potenza impegnata:

$$\xi = \frac{\Phi}{W} \quad (9)$$

Questo non è un numero puro, ma una grandezza di dimensioni [lm/W].

Le dimensioni sono le medesime del fattore di visibilità; in effetti per sorgenti monocromatiche ideali l'efficienza luminosa coincide con la visibilità. Esiste quindi un massimo assoluto dell'efficienza luminosa per qualunque sorgente di luce, pari al massimo del fattore di visibilità:

$$\xi_{\max} = V_{\max} = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \quad (10)$$

Per una sorgente a spettro complesso, l'efficienza luminosa assume quindi il medesimo significato che ha la visibilità per una radiazione monocromatica.

Radianza

Per sorgenti estese, in genere il flusso luminoso emesso da ogni porzione di superficie non è costante. E' necessaria quindi una grandezza che esprima il valore di flusso emesso localmente.

Tale grandezza è la radianza M , definita come il rapporto tra il flusso luminoso emesso da una superficie infinitesima e l'area di tale superficie:

$$M = \frac{d\Phi_{\text{emesso}}}{dS} \quad (11)$$

Tale grandezza è abitualmente misurata semplicemente in lumen al metro quadrato (lm/m^2).

Luminanza

Come già detto l'emissione luminosa dipende dalla direzione, mentre per sorgenti estese dipende anche dalla posizione. Si introduce quindi la luminanza per esprimere la luce emessa da un punto di una sorgente in una particolare direzione. La luminanza L è definita come:

$$L = \frac{dM}{d\Omega} \quad (12)$$

oppure

$$L = \frac{dI}{dS}. \quad (13)$$

L'unità di misura della luminanza è il nit (nt), pari ad 1 candela per metro quadrato.

La luminanza è in genere funzione del punto specifico della superficie e della particolare direzione. Le sorgenti per le quali la luminanza è costante in tutte le direzioni si definiscono sorgenti lambertiane. Per queste è semplice calcolare l'intensità luminosa corrispondente. Detto α l'angolo compreso tra la normale alla superficie sorgente nel punto e la direzione di osservazione, la proiezione della superficie di area S nella direzione di osservazione corrisponde ad una superficie di area:

$$S_{\alpha} = S \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

L'intensità luminosa della sorgente risulta quindi:

$$I_{\alpha} = L \cdot S_{\alpha} = L \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (15)$$

L'equazione può essere espressa rispetto alla intensità in direzione normale alla superficie, nella forma più nota:

$$I_{\alpha} = I_n \cdot \cos \alpha \quad (16)$$

La curva fotometrica corrispondente è una circonferenza di raggio $I_n/2$, passante per l'origine.

Illuminamento

Le grandezze fin qui esposte si riferiscono alle sorgenti. Questo approccio è legato alla centralità dell'osservatore nella fotometria. Ogni porzione del nostro campo visivo è infatti una sorgente. L'elaborazione delle immagini ci consente di distinguere sorgenti primarie da sorgenti secondarie,

ma, come già detto, per ciascuna porzione isolata del campo visivo isolata dal contesto non è possibile distinguerle.

Per le sorgenti secondarie la luminanza e tutte le grandezze derivate dipendono dal flusso luminoso incidente. L'entità del flusso incidente è misurata dall'illuminamento E , definito come il rapporto tra il flusso luminoso incidente su una superficie infinitesima e l'area della superficie:

$$E = \frac{d\Phi_{\text{incidente}}}{dS} \quad (17)$$

L'unità di misura dell'illuminamento è il lux (lx), pari ad 1 lumen incidente su 1 metro quadrato. Si osserverà la similitudine tra la (17) e la (11) e quindi l'uguaglianza dimensionale delle rispettive unità di misura. Nella (11) però a numeratore c'è il flusso emesso dalla superficie, mentre nella (17) a numeratore compare il flusso incidente.

Il valore dell'illuminamento e della radianza coincidono per una sorgente secondaria che rifletta completamente la radiazione luminosa incidente. Una tale superficie appare di colore bianco (anche se nessuna superficie bianca ha riflessione completa). Per questa ragione alle volte si utilizza come unità di misura della radianza l'unità denominata "lux sul bianco".

L'illuminamento è particolarmente utile nell'illuminotecnica dove costituisce spesso l'obiettivo del calcolo progettuale. Anche se l'occhio non è direttamente sensibile all'illuminazione delle superfici osservate, esiste una buona correlazione tra la sensazione visiva e l'illuminamento del campo. Poiché il calcolo dell'illuminamento è spesso preliminare al calcolo di altre grandezze, limitarsi a questo costituisce una utile semplificazione operativa.

Contrasto

In assenza di variazioni cromatiche nel campo visivo (es. schermi in bianco e nero o illuminazione artificiale con lampade monocromatiche), l'immagine dell'ambiente esterno è interpretata attraverso le variazioni di luminanza. Si definisce quindi fattore di contrasto tra due punti del campo visivo, il rapporto tra la variazione di luminanza e la luminanza media del campo:

$$p = \frac{\Delta L}{L_m} \quad (18)$$

Questa espressione del fattore di contrasto deriva dalla legge di Weber, secondo la quale la minima differenza relativa percepibile di molte grandezze psicofisiche è costante. Tale affermazione è valida solo in prima approssimazione e solo per la zona centrale del campo di sensibilità. In questo intervallo il minimo fattore di contrasto percepibile è pari circa a 0.02. Per luminanze medie particolarmente basse o elevate si ha un notevole aumento del minimo fattore di contrasto percepibile, fino a 0.2 ed oltre.

Un'altra definizione del contrasto tra due porzioni del campo visivo è data dell'espressione:

$$C = \frac{|L_1 - L_2|}{L_1 + L_2} = \frac{2 \cdot |L_1 - L_2|}{L_m} \quad (19)$$

Le due espressioni differiscono numericamente di un fattore 2. Da un punto di vista concettuale la (19) esprime una grandezza relativa alle sole due porzioni del campo visivo oggetto del confronto, mentre la (18) si riferisce alla luminanza media dell'intero campo.

Altri concetti di fotometria

Ulteriori parametri significativi della percezione visiva sono l'acuità visiva (o visus), corrispondente al reciproco del minimo angolo sotto il quale due punti sono distinguibili, e la rapidità di percezione. Entrambi le grandezze dipendono dalla luminanza, anche se la seconda in modo più marcato.

Per stimoli di breve durata l'occhio non è più sensibile alla potenza dello stimolo luminoso ma invece all'energia.

Questi ed altri concetti sono oggetto di approfondimento delle applicazioni della fotometria e dell'illuminotecnica ed esulano dallo scopo di queste brevi note.

Colorimetria

Sistemi di classificazione dei colori

L'importanza dell'aspetto cromatico degli oggetti per la tecnica e per l'economia, richiede la possibilità di individuarne il colore in modo univoco e ripetibile.

Il metodo più semplice per definire i colori consiste nell'unificare dei campioni di colore come riferimento. Il colore di ogni oggetto può quindi essere individuato nel campione identico o più somigliante. Se il numero di campioni è sufficientemente elevato il metodo è preciso entro i limiti richiesti dalle specifiche applicazioni.

Un esempio di tale metodo, molto diffuso nella tecnica industriale, è la classificazione RAL. Tale metodo prende il nome dall'ente di unificazione tedesco che lo ha pubblicato nel 1927, sollecitato dall'esigenza di standardizzare le colorazioni dei prodotti industriali. Attualmente conta 210 campioni, designato da un codice di 4 cifre.

ral 1000	ral 1001	ral 1002	ral 1003	ral 1004	ral 1005	ral 1006	ral 1007
ral 1011	ral 1012	ral 1013	ral 1014	ral 1015	ral 1016	ral 1017	ral 1018
ral 1019	ral 1020	ral 1021	ral 1023	ral 1024	ral 1027	ral 1028	ral 1032
ral 1033	ral 1034	ral 2000	ral 2001	ral 2002	ral 2003	ral 2004	ral 2008
ral 2009	ral 2010	ral 2011	ral 2012	ral 3000	ral 3001	ral 3002	ral 3003
ral 3004	ral 3005	ral 3007	ral 3009	ral 3011	ral 3012	ral 3013	ral 3014
ral 3015	ral 3016	ral 3017	ral 3018	ral 3020	ral 3022	ral 3027	ral 3031
ral 4001	ral 4002	ral 4003	ral 4004	ral 4005	ral 4006	ral 4007	ral 4008
ral 4009	ral 5000	ral 5001	ral 5002	ral 5003	ral 5004	ral 5005	ral 5007
ral 5008	ral 5009	ral 5010	ral 5011	ral 5012	ral 5013	ral 5014	ral 5015
ral 5017	ral 5018	ral 5019	ral 5020	ral 5021	ral 5022	ral 5023	ral 5024
ral 6000	ral 6001	ral 6002	ral 6003	ral 6004	ral 6005	ral 6006	ral 6007
ral 6008	ral 6009	ral 6010	ral 6011	ral 6012	ral 6013	ral 6014	ral 6015
ral 6016	ral 6017	ral 6018	ral 6019	ral 6020	ral 6021	ral 6022	ral 6024
ral 6025	ral 6026	ral 6027	ral 6028	ral 6029	ral 6032	ral 6033	ral 6034
ral 7000	ral 7001	ral 7001	ral 7002	ral 7003	ral 7004	ral 7005	ral 7006
ral 7008	ral 7009	ral 7010	ral 7011	ral 7012	ral 7013	ral 7015	ral 7016
ral 7021	ral 7022	ral 7023	ral 7024	ral 7026	ral 7030	ral 7031	ral 7032
ral 7033	ral 7034	ral 7035	ral 7036	ral 7037	ral 7038	ral 7039	ral 7040
ral 7042	ral 7043	ral 7044	ral 8000	ral 8001	ral 8002	ral 8003	ral 8004
ral 8007	ral 8008	ral 8011	ral 8012	ral 8014	ral 8015	ral 8016	ral 8017
ral 8019	ral 8022	ral 8023	ral 8024	ral 8025	ral 8028	ral 9001	ral 9002
ral 9003	ral 9004	ral 9005	ral 9010	ral 9011	ral 9016	ral 9017	ral 9018

fig. 2

I campioni possono essere classificati in modo casuale oppure ordinati secondo uno specifico criterio. Il primo tipo di classificazione può garantire un adeguato contrasto cromatico tra due campioni successivi, in modo da evitare fenomeni di adattamento, che ostacolano il confronto con i campioni. Nel secondo caso, oltre all'individuazione della esatta somiglianza è possibile la collocazione di sorgenti cromatiche intermedie tra due campioni, permettendo quindi successive specificazioni ed estensioni del metodo.

Il primo dei sistemi di classificazione ordinati dei colori o dizionari dei colori è il sistema Munsell (1915). I colori sono classificati secondo tre caratteristiche intuitive: tinta o tonalità (hue), saturazione o purezza (chroma) e brillantezza o luminosità (value). Tali qualità esprimono adeguatamente la sensazione cromatica, ma non gli unici parametri che ne descrivono gli attributi.

Tono (Hue)

La tinta o il tono o la tonalità di uno stimolo luminoso corrisponde al concetto intuitivo che si ha di colore. Due radiazioni monocromatiche di diversa lunghezza d'onda generano stimoli di diversa tonalità. Le diverse radiazioni monocromatiche dello spettro visibile definiscono la gamma delle tonalità:

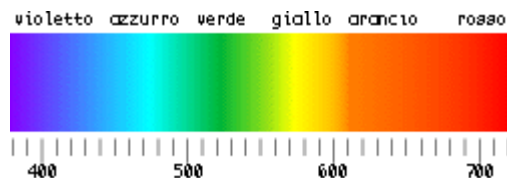


fig. 3

Mescolando (come sarà chiarito in §3.2) le due radiazioni monocromatiche all'estremo dello spettro visibile si ottengono degli stimoli caratterizzati da una tonalità nuova ed originale; si ottengono così le porpore. Qualunque altro colore può essere associato alla tonalità di uno dei colori spettrali o delle porpore.

La classificazione Munsell individua 100 toni, di cui 10 fondamentali: il rosso (R red), il giallo (Y yellow), il verde (G green), il blu (B blue), il porpora (P purple) ed i colori intermedi tra questi (indicati dalla coppia delle lettere dei colori adiacenti. L'intervallo compreso tra due di questi è suddiviso in 10 parti.

La minima variazione lunghezza d'onda di una radiazione monocromatica percepita come variazione cromatica è compresa tra 1 e 2 nm, e sale a circa 5 nm verso gli estremi del campo del visibile. Poiché il campo principale delle lunghezze d'onda visibili è pari a 390 nm il numero dei toni distinti percepibili è pari a circa 290. La classificazione Munsell è quindi piuttosto fedele.

Saturazione (Chroma)

La saturazione esprime la distanza psicofisica tra uno stimolo cromatico specifico e lo stimolo acromatico di riferimento (bianco). Per due stimoli luminosi caratterizzati dalla stessa tonalità è possibile quindi definire uno scostamento dal bianco e quindi una purezza del colore. I colori monocromatici risultano essere del tutto puri (o saturi), così come le porpore ottenute da colori monocromatici. All'estremo opposto è possibile immaginare di "diluire" il colore fino a rendere indistinguibile la tonalità; se ne ottiene un effetto visivo che non è propriamente un colore perché manca del tono. A tale sensazione cromatica è attribuito comunemente il nome di grigio.

La classificazione Munsell individua 15 livelli di saturazione indicati dai numeri da 0 a 14. La saturazione 0 corrisponde al grigio mentre 14 corrisponde al tono puro.

Luminosità (Value)

La brillantezza esprime l'entità dello stimolo a prescindere della sensazione cromatica, ad essa fa' riferimento la fotometria (vedi cap. 2). Per descrivere questa caratteristica è utile riferirsi ai grigi, per i quali la saturazione è nulla e la tonalità è priva di significato. La brillantezza di una sorgente secondaria esprime l'attitudine a riflettere la radiazione luminosa, cioè il coefficiente globale di riflessione.

Gli estremi della scala della brillantezza sono il nero per brillantezza nulla (assenza di stimolo e/o assenza di riflessione) ed il bianco per brillantezza massima. Tra i due estremi è possibile individuare le gradazioni di grigio:



fig. 4

La classificazione Munsell individua 11 livelli di luminosità indicati con i numeri da 0 a 10. Lo 0 corrisponde al nero, mentre 10 corrisponde al bianco.

Il dizionario dei colori di Munsell

I tre parametri introdotti per descrivere una sensazione cromatica non sono indipendenti. Come la diminuzione della saturazione determina una riduzione dell'importanza del tono, fino alla completa scomparsa nei grigi; allo stesso modo, un aumento o una diminuzione della brillantezza determina la riduzione della massima purezza riscontrabile. Un aumento di luminosità di una sorgente secondaria pura determina una diminuzione di purezza, come osservabile, nell'esempio seguente:



fig. 5

La brillantezza aumenta da destra verso sinistra, ma ad essa corrisponde una diminuzione di purezza.

La rappresentazione spaziale dei colori può essere realizzata da un solido che abbia un asse centrale luogo dei grigi, intorno al quale si sviluppano radialmente le diverse tonalità.

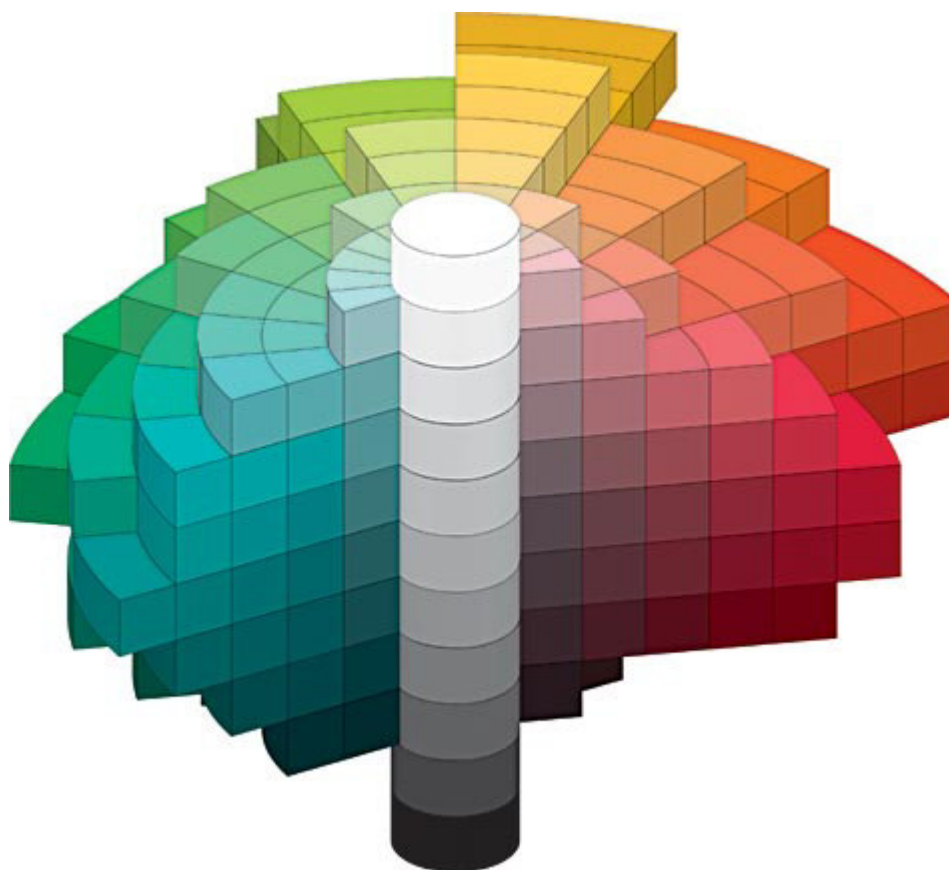


fig. 6

Il dizionario dei colori di Munsell è organizzato in pagine, in ciascuna è rappresentata una sezione del solido dei colori condotta secondo un piano passante per l'asse del solido secondo una particolare tonalità. All'interno di ciascuna pagina sono organizzati i campioni di riferimento in ordine di saturazione e brillantezza. Ogni pagina del dizionario è triangolare, in modo che un vertice sia occupato dal tono puro, mentre gli altri due sono il nero ed il bianco. Ciascuna pagina contiene perciò il segmento dei grigi. Il valore di brillantezza al quale si ha il tono puro varia da pagina a pagina, come è naturale essendo alcuni toni intrinsecamente più luminosi di altri (si pensi al giallo ed al blu).

Ciascun campione di colore è individuato da una sigla composta di un numero ed una lettera o coppia di lettere indicante uno dei colori fondamentali, quindi una coppia di numeri separati da una sbarra “/”. Il primo dei numeri individua la tonalità specifica del colore fondamentale (da 1 a 10), il numero prima della sbarra indica la luminosità (da 0 a 10), il numero dopo la sbarra la saturazione (da 0 a 14). Alcuni esempi di indicazioni di colori sono:

- 4B 3/8 blu di tonalità 4, luminosità 3 e chroma 8
- 6G 2/6 verde di tonalità 6, luminosità 2 e chroma 6

Come già detto, poiché la classificazione è ordinata, il risultato del paragone tra un colore in esame ed i campioni può dare un valore intermedio tra due campioni esistenti, ad esempio:

- 6 PB 5,5/4 blu-porpora di tonalità 6, luminosità compresa tra il campione 5 ed il campione 6 e chroma 4
- 8,5 GY 6,5/5 giallo-verde di tonalità compresa tra la pagina 8 e la pagina 9 dei giallo verdi, luminosità compresa tra i campioni 6 ed i campioni 7 e chroma 5

La cifra decimale ha significato simbolico e non numerico. Indica semplicemente che non c'è identità di stimolo cromatico né con il campione precedente né con quello successivo.

Poiché i grigi (saturazione 0) appartengono a tutte le pagine del dizionario, per evitare la presenza di sigle multiple per i medesimi campioni, i grigi sono indicati dalla lettera N, seguito dal numero indicante il livello di luminosità e dalla sbarra, senza indicazione del chroma (che ovviamente è 0).

Un grigio è indicato quindi, ad esempio con la sigla "N 3/"; il nero è "N 0/"; il bianco è "N 10/".

Colorimetria tristimolo

I sistemi di classificazione presentati presentano due difetti che li rendono inadeguati per molti degli usi richiesti dalle moderne tecnologie:

- permettono l'identificazione univoca dei colori, ma non forniscono informazioni utili alla sintesi dei colori;
- si riferiscono alle sorgenti secondarie (superfici colorate).

Per quanto attiene alla prima osservazione, esistono altri sistemi di classificazione basati sulla mescolanza di inchiostri standardizzati per la generazione di uno spazio dei colori. Questi sistemi però si riferiscono comunque a sorgenti secondarie.

Sovrapponendo su uno schermo due fasci luminosi di diverso colore, dove questi si sovrappongono si ottiene una sensazione cromatica distinta da quelle delle sorgenti originarie. Variando l'intensità relativa delle due sorgenti si ottiene una gamma di colori. Un esempio è mostrato qui sotto per una sorgente verde ed una rossa.

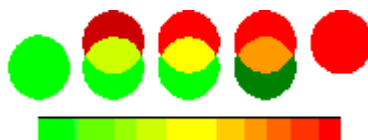


fig. 7

Se si utilizza una terza sorgente la gamma dei colori ottenibili si amplia notevolmente, purché non sia possibile produrre questa ultima come mescolanza delle prime due.

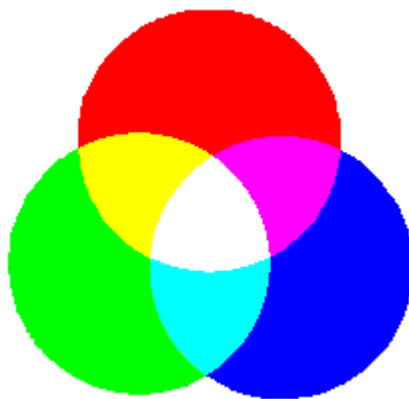


fig. 8

Le mescolanze di colore descritte si dicono additive perché in esse lo spettro della radiazione risultante è dato dalla addizione degli spettri delle radiazioni componenti. La mescolanza di inchiostri o pigmenti viene indicata invece come sintesi sottrattiva di colori ed è tipica delle sorgenti secondarie o dei mezzi trasparenti; in essa alla radiazione della sorgente primaria sono sottratte le componenti della radiazione assorbite da ciascuno dei mezzi interposti (inchiostri, pigmenti, vetri colorati).

Qui di seguito si farà riferimento sempre alla combinazione additiva dei colori, anche dove si utilizzeranno termini come miscela o mescolanza.

Leggi di Grassmann

Considerato uno stimolo cromatico è possibile ricercare i valori di intensità delle tre sorgenti dette, tale per cui si abbia identità tra la mescolanza delle tre sorgenti e lo stimolo in esame. Abitualmente è possibile individuare la corrispondenza con valori molto prossimi tra loro per osservatori diversi (in assenza di difetti della vista).

Esistono, però, stimoli per i quali non si riesce a trovare una terna di valori di intensità per la quale si abbia un effetto cromatico identico. In questi casi è possibile comunque ottenere l'uguaglianza tra opportune intensità di due delle sorgenti e la miscela di una opportuna quantità della terza con la sorgente in esame. Queste proprietà sono note come prima legge di Grassmann.

Considerate tre sorgenti opportune indicate con \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} è possibile esprimere il quantitativo (intensità) di ciascuna di esse che viene utilizzata per ogni paragone mediante il vettore di reali (a, b, c). Le esperienze descritte possono essere rappresentate numericamente mediante le relazioni:

$$\underline{K} = a \cdot \underline{A} + b \cdot \underline{B} + c \cdot \underline{C} \quad (20)$$

$$\underline{K} + c \cdot \underline{C} = a \cdot \underline{A} + b \cdot \underline{B} \quad (21)$$

dove \underline{K} è lo stimolo in esame. Nella (21) portando il termine \underline{C} a secondo membro si ottiene una relazione identica alla (20), salvo il segno. Ammettendo quindi anche valori negativi per i termini del vettore (a, b, c) è possibile rappresentare in modo unitario le esperienze descritte:

$$\underline{K} = (a, b, c) \quad (22)$$

Perché i valori numerici espressi siano utili è necessario che godano della linearità, come espresso dalla seconda legge di Grassmann. Prove sperimentali hanno mostrato la validità di tale assunto. La linearità si esprime attraverso le seguenti due relazioni:

$$\alpha \cdot \underline{K} = (\alpha \cdot a, \alpha \cdot b, \alpha \cdot c) \quad (23)$$

$$\underline{K}_1 + \underline{K}_2 = (a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2) \quad (24)$$

che prendono il nome di legge di proporzionalità e legge di additività.

Il vettore delle intensità delle sorgenti prende il nome di coordinate tricromatiche o valori tristimolo e può essere utilizzato per esprimere esattamente ogni sensazione cromatica. Ovviamente utilizzando diverse terne di sorgenti si ottengono vettori diversi per i medesimi stimoli.

Conoscendo le coordinate tricromatiche reciproche delle due terne è possibile passare tra i valori nei diversi sistemi di riferimento. Siano A, B e C una terna di sorgenti e A', B' e C' un'altra terna, le coordinate della seconda terna riferite alla prima sono:

$$\begin{aligned} A' &= (a_1, b_1, c_1) \\ B' &= (a_2, b_2, c_2) \\ C' &= (a_3, b_3, c_3) \end{aligned} \quad (25)$$

La matrice ottenuta dall'unione dei tre vettori permette di passare dalle coordinate espresse rispetto alla prima terna a quelle espresse rispetto alla seconda:

$$T = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Se \underline{K} sono le coordinate di uno stimolo rispetto alla prima terna di sorgenti e \underline{K}' le coordinate della medesima sorgente rispetto alla seconda terna, allora la relazione tra le due è:

$$\underline{K} = T \cdot \underline{K}' \quad (27)$$

Lo spazio CIE RGB

Le coordinate delle radiazioni monocromatiche dello spettro visibile sono state sperimentate con riferimento a diverse terne di sorgenti. I risultati sono stati quindi ricondotti al riferimento di una terna di sorgenti unificate dalla CIE. Le sorgenti prescelte sono degli illuminanti monocromatici ed in particolare uno rosso (R) alla lunghezza d'onda $\lambda_R=700$ nm, con luminanza $L_R=1$ nit, uno verde (G) alla lunghezza d'onda $\lambda_G=546.1$ nm, con luminanza $L_G=4.5909$ nit ed uno blu (B) alla

lunghezza d'onda $\lambda_G=435.8$ nm, con luminanza $L_G=0.06012$ nit. Le luminanze prescelte sono tali per cui combinando le tre sorgenti in parti uguali si ottiene il bianco di riferimento ($\epsilon(\lambda)=\text{cost.}$). E' quindi possibile disporre delle funzioni $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$, rappresentanti le coordinate delle radiazioni monocromatiche dello spettro. Tali funzioni prendono il nome di funzioni di corrispondenza cromatica (color matching functions). La rappresentazione grafica di tali funzioni è:

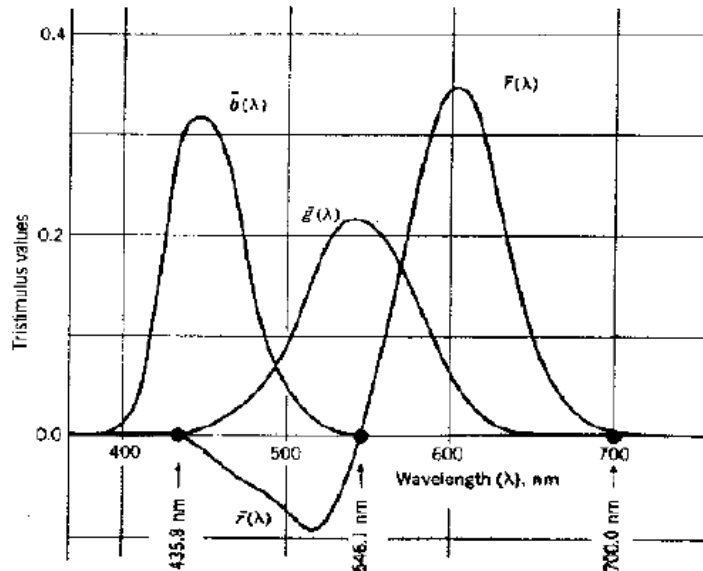


fig. 9

Conoscendo lo spettro $\epsilon_Q(\lambda)$ di una radiazione luminosa Q, applicando le proprietà di linearità esposte dalla seconda legge di Grassmann, è possibile ricavarne quindi direttamente le coordinate tricromatiche (r_Q, g_Q, b_Q):

$$\begin{aligned} r_Q &= \int \epsilon_Q(\lambda) \cdot r(\lambda) \cdot d\lambda \\ g_Q &= \int \epsilon_Q(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot d\lambda \\ b_Q &= \int \epsilon_Q(\lambda) \cdot b(\lambda) \cdot d\lambda \end{aligned} \tag{28}$$

o più propriamente (vedi §2.3)

$$\begin{aligned} r_Q &= \sum \epsilon_Q(\lambda) \cdot r(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ g_Q &= \sum \epsilon_Q(\lambda) \cdot g(\lambda) \cdot \Delta\lambda \\ b_Q &= \sum \epsilon_Q(\lambda) \cdot b(\lambda) \cdot \Delta\lambda \end{aligned} \tag{29}$$

Lo spazio CIE XYZ e xyY

Le particolari sorgenti consentono di rappresentare gran parte dei colori mediante una terna di valori positivi, ma per quasi tutti i valori dello spettro una delle coordinate cromatiche è negativa. E'

semplice verificare che non esiste una terna di stimoli luminosi tale per cui le coordinate tricromatiche di tutti gli stimoli siano positive.

Il modello matematico introdotto ammette tutte le terne di valori reali, anche se il dominio degli stimoli fisicamente realizzabili è notevolmente ridotto. E' possibile però considerare una terna di sorgenti virtuali, non realizzabile, per le quali tutte le coordinate degli stimoli reali siano valori positivi.

La CIE ha individuato una terna di tali sorgenti che hanno le seguenti coordinate nel sistema RGB:

$$X = (0.4185, \quad -0.09117, \quad 0.0009209)$$

$$Y = (-0.1587, \quad 0.2524, \quad 0.01571)$$

$$Z = (-0.08284, \quad 0.01571, \quad 0.1786)$$

Rispetto alle molteplici terne di sorgenti immaginarie possibili, questa particolare scelta permette di ottenere due caratteristiche peculiari:

- il bianco di riferimento (ad energia uniforme nello spettro) è ancora rappresentato da quantità uguali delle sorgenti di riferimento;
- la funzione di corrispondenza del colore per la sorgente Y è uguale alla curva di visibilità normale, mentre l'efficienza luminosa delle sorgenti X e Z è nulla.

E' evidente che questa seconda proprietà è possibile proprio in virtù del fatto che non si tratta di sorgenti reali. La maggiore precisione utilizzata nell'indicare i coefficienti di specificazione della sorgente Y sono dovuti proprio alla maggiore importanza che riveste, indicando contemporaneamente una coordinata tricromatica ed il fattore di visibilità.

Con riferimento alle nuove sorgenti, le coordinate tricromatiche di uno stimolo sono $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$. Tali coordinate contengono oltre all'informazione del colore dello stimolo in senso stretto anche informazioni in merito alla luminosità dello stimolo. Con la normalizzazione adottata la funzione di corrispondenza cromatica $\bar{y}(\lambda)$ coincide con il fattore di visibilità $v(\lambda)$, definito in 2.2.

Per agevolare la rappresentazione grafica dello dominio dei colori è utile ricondurre i parametri a due soli. Tale operazione è possibile, normalizzando le funzioni di corrispondenza cromatica $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, rispetto alla somma delle tre:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\bar{x}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \\ \bar{y} &= \frac{\bar{y}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \\ \bar{z} &= \frac{\bar{z}}{\bar{x} + \bar{y} + \bar{z}} \end{aligned} \tag{30}$$

infatti è:

$$x + y + z = 1 \quad (31)$$

Per conservare l'intera informazione è necessario utilizzare oltre alle coordinate x e y il valore corrispondente alla sorgente Y cioè alla brillantezza dello stimolo. Da qui la denominazione del riferimento xyY . Poiché il diagramma CIE è particolarmente utile per le sorgenti primarie, per le quali l'intensità di emissione può variare indipendentemente dalle coordinate cromatiche, la coordinata Y non sarà riportata di seguito.

E' possibile quindi procedere alla rappresentazione grafica del dominio dei colori come proposto:



fig. 10

Il dominio rappresentato è delimitato da una curva e da un segmento. La curva rappresenta il luogo dei colori spettrali, ossia le coordinate cromatiche delle radiazioni monocromatiche. Il segmento che unisce i due estremi della curva dello spettro rappresenta il luogo delle porpore o magenta saturi (vedi §3.1.1). Il bianco di riferimento è rappresentato dal punto di coordinate $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ ed è circondata da una zona di sensazioni cromatiche prossime al bianco.

La rappresentazione dei colori è resa difficile dall'imperfetta riproduzione dei colori ad opera degli strumenti utilizzati come la stampa, i monitor, i proiettori ed in particolare gli algoritmi di codifica dei colori. Le immagini che si vedono sul presente testo stampato saranno quindi differenti rispetto alle medesime immagini viste a schermo. Persino tra diversi monitor si avranno discrepanze nei colori. Quindi, salvo metodi di stampa particolari ad altissima definizione del colore, i colori

rappresentati sul diagramma non saranno i colori veri. E' utile quindi avere come riferimento il diagramma CIE in forma descrittiva senza colori:

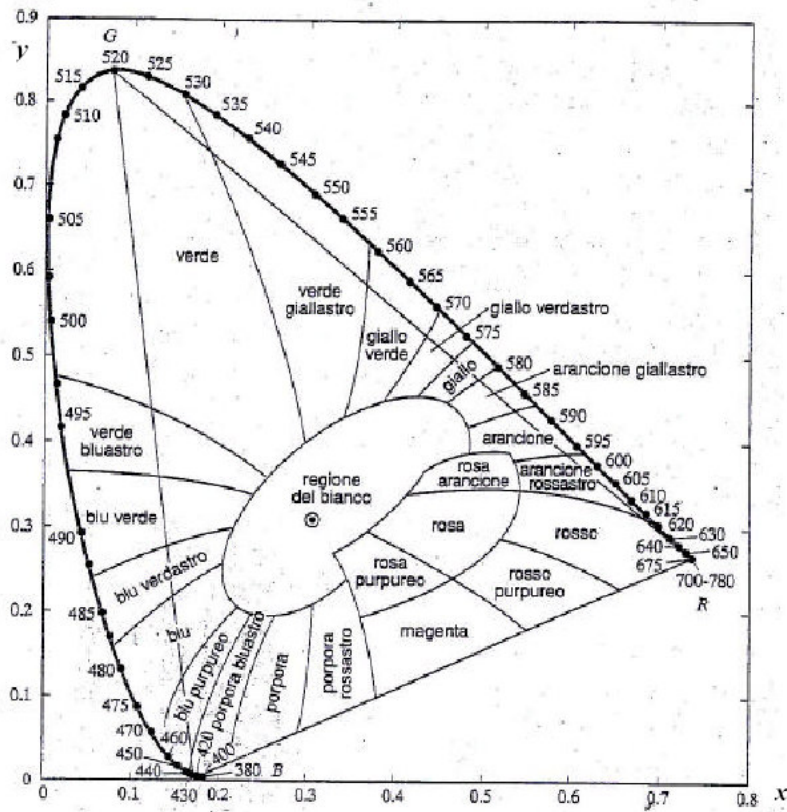


fig. 11

Miscelando due colori, il luogo dei punti rappresentanti le miscele possibili al variare delle quantità relative si trova sulla congiungente i punti:

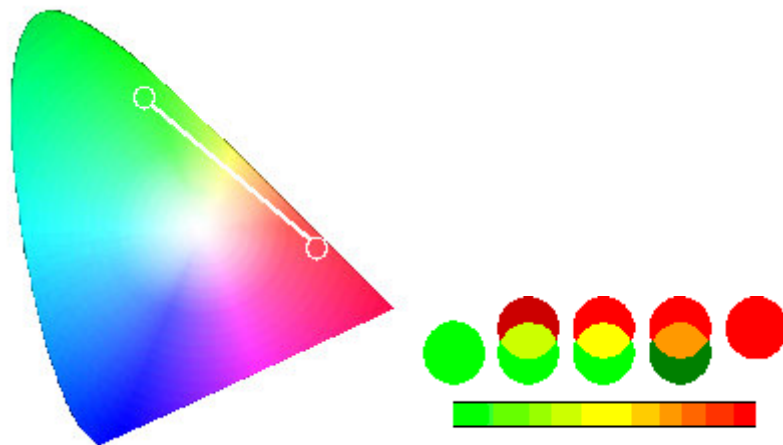


fig. 12

Utilizzando 3 colori il luogo dei colori risultanti è il triangolo avente per vertici i 3 colori. Poiché non esiste un triangolo che comprende tutti i colori percepibili, scelte 3 sorgenti, esistono sempre

dei colori che non è possibile imitare mediante miscela. In effetti, poiché il luogo dei colori spettrali è una curva regolare, non è possibile, con un numero finito di sorgenti generare per miscela tutti gli altri colori.

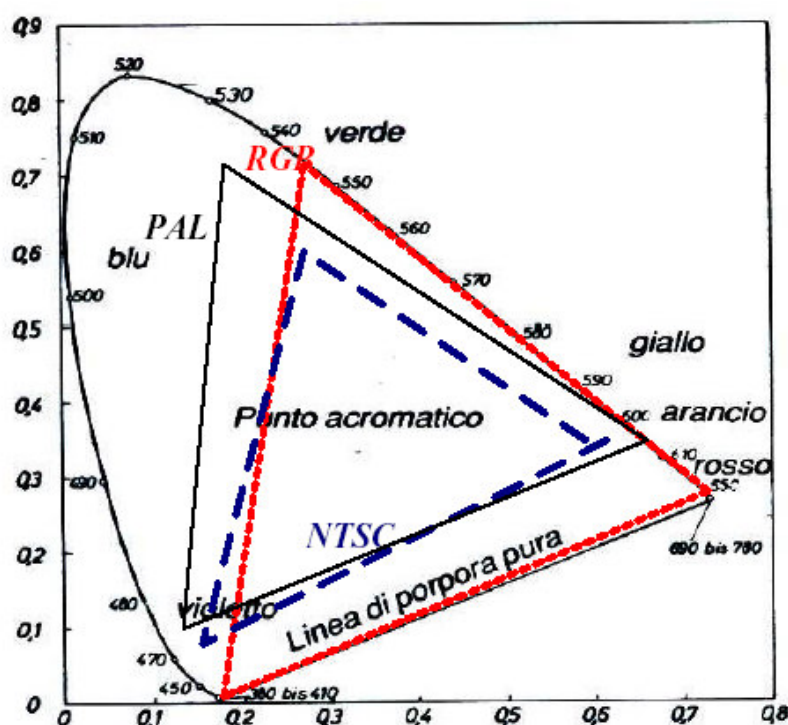


fig. 13

Metamerismo

Dall'equazione (28) e successive si osserva che non esiste una associazione biunivoca tra gli spettri e le coordinate cromatiche. In altri termini, esistono molteplici spettri di radiazione cui corrisponde esattamente la stessa sensazione cromatica. Questo fenomeno prende il nome di metamerismo.

Diversi standard di monitor e tubi catodici (CRT) utilizzano diverse sorgenti primarie. Quando producono il medesimo colore a schermo lo spettro di radiazione del particolare pixel considerato è diverso, ma la percezione che ne abbiamo è la medesima. Lo stesso fenomeno si ha nell'uguaglianza di colori ottenuti con inchiostri diversi.

Illuminanti standard

Le sorgenti di luce comuni hanno diversa composizione spettrale. La luce solare diretta ha composizione spettrale variabile in funzione delle condizioni meteorologiche, della latitudine, dell'altitudine e dell'ora, cioè della posizione del sole nella volta celeste. Ad esempio, è esperienza comune il colore rossastro del sole al tramonto. Anche le sorgenti artificiali comuni non danno abitualmente garanzia in merito alla composizione spettrale: lo spettro della radiazione emessa da una lampada a filamento di tungsteno dipende dalla tensione di alimentazione, dalle caratteristiche

ottiche del bulbo e dell'apparecchio illuminante che le contiene, oltre che dall'età dell'apparecchio stesso.

Si possono quindi utilizzare come illuminanti di riferimento certi gli spettri di corpo nero. Per il corpo nero lo spettro è noto con certezza, come definito dalla legge di Planck. Conoscendo le funzione di corrispondenza cromatica è agevole quindi determinare le coordinate cromatiche del corpo nero in base alla temperatura dello stesso.

Qui di seguito sono presentati gli spettri di corpo nero per alcune temperature:

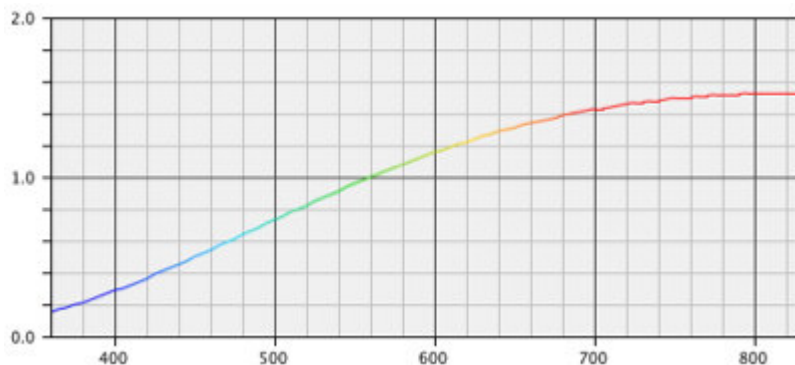


fig. 14

corpo nero a 3500 K, con effetto cromatico simile ad alcune lampade fluorescenti a luce bianca;

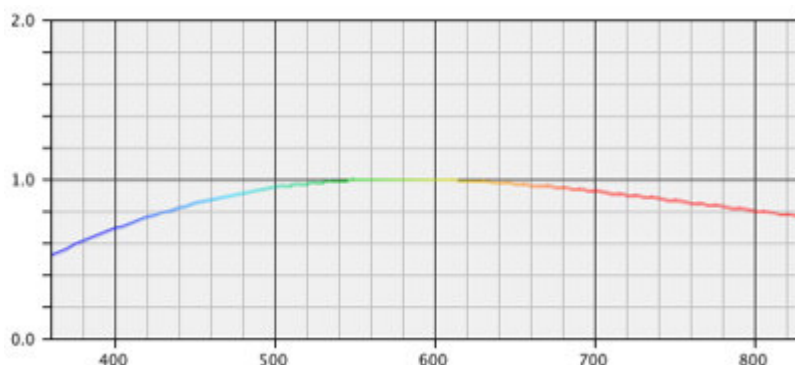


fig. 15

corpo nero a 5000 K, simile alla luce solare diretta al livello del mare;

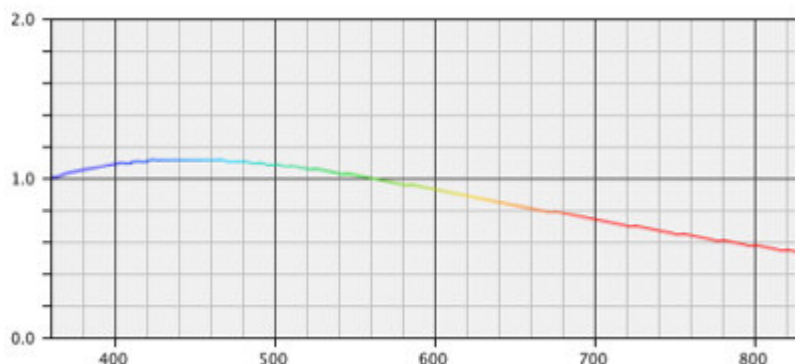


fig. 16

corpo nero a 6500 K, simile alla luce diurna naturale (luce solare diretta più radiazione diffusa della volta celeste);

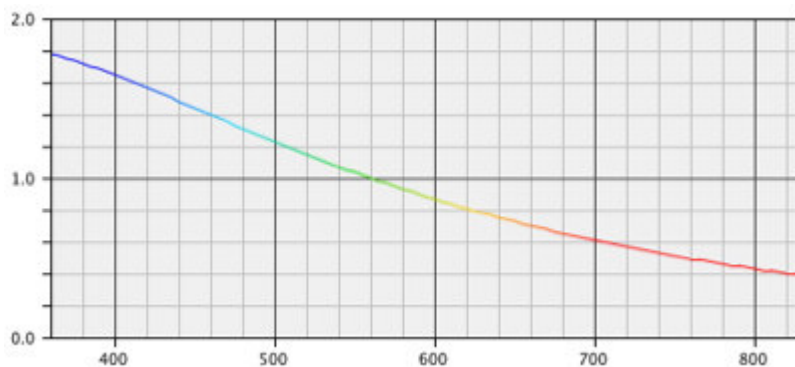


fig. 17

corpo nero a 9000 K, simile al bianco dei tubi catodici.

La rappresentazione convenzionale degli spettri degli illuminanti prescinde dall'intensità: gli spettri sono normalizzati in modo che alla lunghezza d'onda di 560 nm (circa il massimo di visibilità) corrisponda il valore convenzionale unitario. E' noto infatti che all'aumentare della temperatura aumenta l'intensità delle radiazioni emesse, ma per i fini colorimetrici è rilevante solo la distribuzione spettrale relativa.

I corpi neri sono però difficilmente realizzabili. E' stato necessario quindi definire delle sorgenti standardizzate effettivamente realizzabili per gli usi tecnici. Degli illuminanti standardizzati è definito il metodo per realizzarli (abituamente una lampada a filamento di tungsteno con applicati dei filtri) e lo spettro che si ottiene da una corretta realizzazione, che costituisce il riferimento.

Alcuni spettri di illuminanti standard sono:

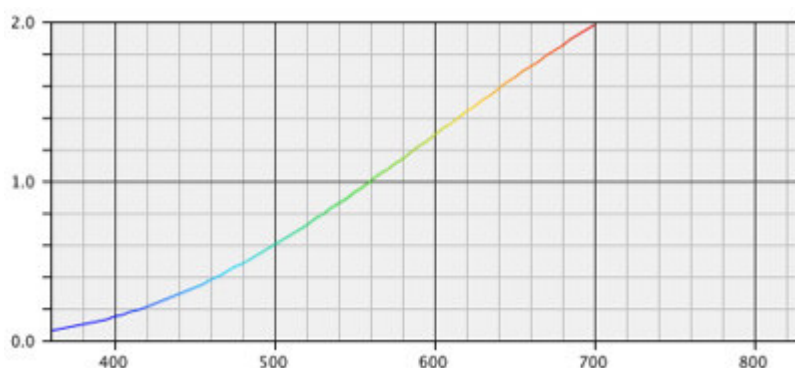


fig. 18

illuminante A, corpo nero a 2856 K, realizzato mediante lampada a filamento di tungsteno;

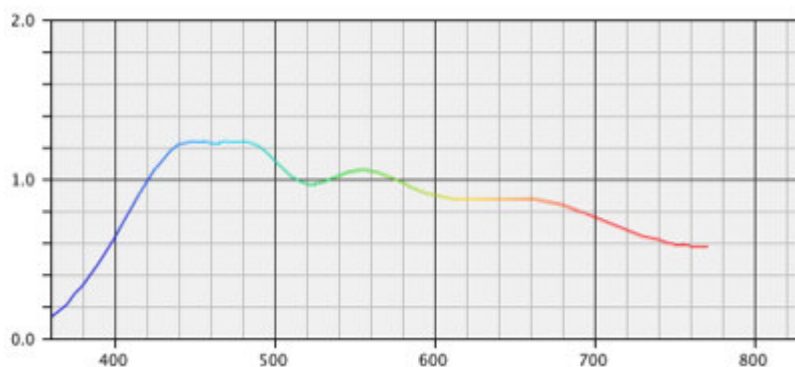


fig. 19

illuminante C, simile al corpo nero a 6774 K, veniva utilizzato come riferimento di luce naturale. E' stato sostituito dagli illuminanti D i quali si discostano dal luogo degli effetti cromatici dei corpi neri, per meglio approssimare le rese degli illuminanti naturali;

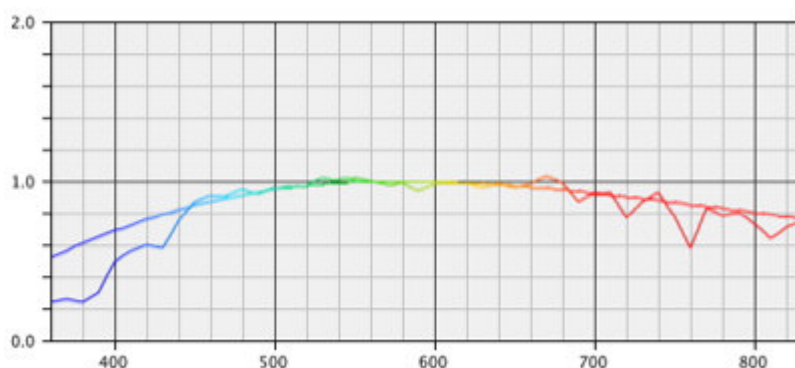


fig. 20

illuminante D50, confrontato con il corpo nero a 5000 K, standard americano per i lavori grafici;

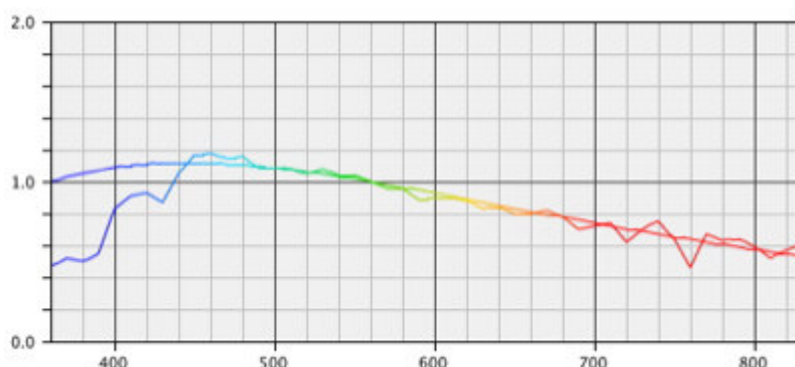


fig. 21

illuminante D65, confrontato con il corpo nero a 6500 K, standard europeo, utilizzato in ambito industriale, corrisponde al bianco standard dei televisori NTSC.

La curva rappresentante le coordinate cromatiche dei corpi neri ha origine sulla curva dello spettro nella zona del rosso, passa per il bianco di riferimento (spettro uniforme) e termina nella zona del bianco azzurrino. Dalla espressione matematica dello spettro dei corpi neri è possibile calcolare

infatti lo spettro (virtuale) di un corpo nero con $T \rightarrow \infty$, per il quale si ottengono le coordinate cromatiche dell'estremo finale della curva descritta.

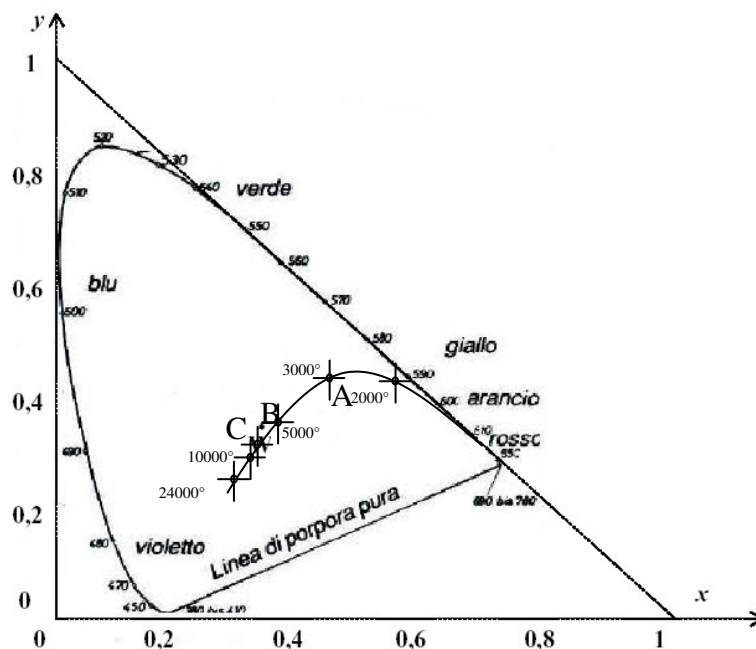


fig. 22

Nella figura, oltre alla curva dei corpi planckiani (corpi neri), si hanno le posizioni di alcuni illuminanti.

Per i colori prossimi alla curva dei corpi neri è utilizzata l'espressione "temperatura di colore". Con questa si intende la temperatura del corpo nero cui corrisponde una sensazione cromatica prossima a quella della sorgente considerata. Questa espressione è diffusa nella descrizione delle proprietà delle sorgenti di luce artificiale. Queste infatti hanno quasi tutte colore bianco, con tenui sfumature. La definizione del colore è quindi poco significativa e difficile. L'uso della temperatura di colore permette invece, di descrivere in modo semplice le caratteristiche cromatiche apparenti della lampada.

Non si deve confondere però il colore della sorgente con la resa cromatica della sorgente. La prima proprietà descrive la percezione della radiazione emessa, la seconda l'interazione della radiazione emessa con gli oggetti e le superfici illuminate (vedi §3.3)

L'espressione "temperatura di colore" si presta inoltre a generare confusione rispetto alla sensazione cromatica tradotta con termini termici. Quando un colore è detto "caldo" o "freddo" ci si riferisce ad un'associazione mentale che non ha niente a che fare con la temperatura dei corpi neri. Si ha invece un'antitesi tra queste espressioni e la temperatura di colore in senso planckiano: alle basse temperature (1000-5000 K) l'effetto cromatico delle emissioni dei corpi neri è "caldo", alle alte temperature (oltre 7000 K) i corpi neri sono percepiti come radiazioni "fredde".

Il colore degli oggetti

Lo spettro emesso dalle sorgenti secondarie, quindi l'effetto cromatico, dipende dalle caratteristiche superficiali dell'oggetto e dalle caratteristiche dello spettro illuminante.

Le caratteristiche superficiali dell'oggetto rispetto all'illuminazione si esprimono attraverso la riflettanza spettrale $\rho(\lambda)$ pari al rapporto tra la radiazione riflessa e la radiazione incidente. Le coordinate tricromatiche di una superficie S, illuminato da una radiazione I, sono quindi pari a:

$$\begin{aligned}\overline{x_{SI}} &= \sum \varepsilon_I(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \overline{z(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \\ \overline{y_{SI}} &= \sum \varepsilon_I(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \overline{y(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \\ \overline{z_{SI}} &= \sum \varepsilon_I(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \overline{z(\lambda)} \cdot \Delta\lambda\end{aligned}\tag{32}$$

Le coordinate dipendono quindi tanto dalle caratteristiche dell'oggetto, quanto dallo spettro dell'illuminante. E' esperienza comune però, la capacità di riconoscere con buoni risultati i colori sotto una varietà di illuminanti. E' evidente quindi che non vi è una corrispondenza semplice e diretta tra le coordinate cromatiche di una sorgente secondaria e il colore riconosciuto.

Il riconoscimento dei colori delle superfici è basato quindi non solo sullo spettro di emissione della superficie, ma anche dal contesto cromatico nel campo visivo.

Relazione tra diagramma CIE e classificazione naturale degli oggetti

La classificazione naturale degli oggetti, proposta ad esempio dal sistema di classificazione Munsell, come detto, si riferisce alle sorgenti secondarie. Per poter associare ai campioni di colore le coordinate corrispondenti è necessario definire l'illuminante di riferimento.

Più interessante della individuazione delle coordinate dei campioni di colore sul diagramma, è definire la relazione esistente tra le coordinate cromatiche ed i caratteri di tono e saturazione. La brillantezza è definita semplicemente dalla coordinata Y.

Si consideri uno stimolo luminoso le cui coordinate cromatiche corrispondono al punto A nella figura seguente. Tracciato il segmento che congiunge lo specifico punto con il punto rappresentativo delle coordinate cromatiche dell'illuminante (nello specifico l'illuminante C), lo si prolunga oltre A ed oltre C, fino ad incontrare il bordo del dominio nei punti A₁ e A₂. Lo stesso procedimento si segue per un altro stimolo rappresentato dal punto B.

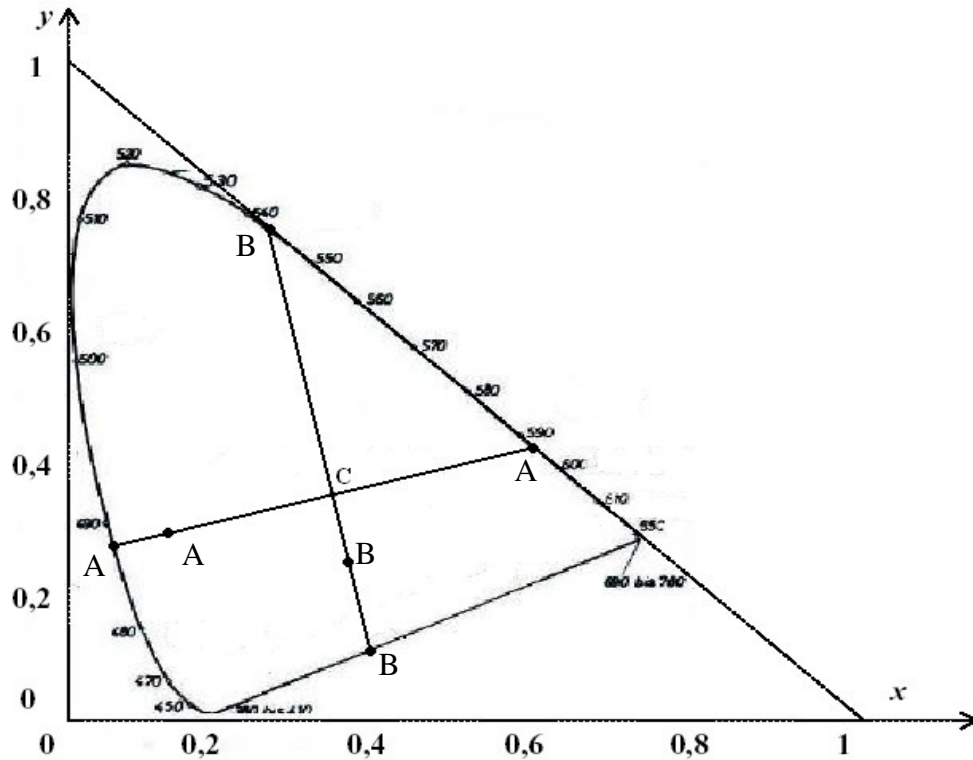


fig. 23

Del punto A è possibile quindi individuare la radiazione monocromatica A_1 da cui è ottenibile per desaturazione (addizione di illuminante di riferimento al colore). Inoltre il rapporto:

$$P_A = \frac{\overline{AC}}{\overline{A_1C}} \cdot 100 \quad (33)$$

indica il contenuto di tono puro. A_1 prende il nome di lunghezza d'onda dominante ed è indicativa del tono o tonalità (hue). P_A esprime una qualità analoga al chroma del diagramma Munsell, che può essere espressa come saturazione (saturation). A_2 è invece la lunghezza d'onda complementare, cioè la radiazione monocromatica che combinata con A in dosi opportune permette di riprodurre il bianco (l'illuminante) mediante miscela binaria.

Per il punto B non esiste la lunghezza d'onda dominante. Il punto B_1 giace infatti sulla retta delle porpore che non appartiene allo spettro. Per tali punti il tono si indica convenzionalmente con la lunghezza d'onda complementare. La saturazione continua ad essere definita come in (33):

$$P_B = \frac{\overline{BC}}{\overline{B_1C}} \cdot 100 \quad (34)$$

Cenni ai colori digitali

La riproduzione dei colori osservati ha costituito da sempre una sfida per la tecnologia. Le moderne tecnologie hanno spostato però il problema, dalla semplice ricerca dei pigmenti necessari alla

colorazioni dei manufatti ed alla decorazione, alla ricostruzione dinamica di immagini su supporti effimeri (televisioni a colori). L'avvento del digitale ha poi introdotto il problema della codifica del colore per la portabilità dell'informazioni tra diversi dispositivi.

I più diffusi software commerciali di computer grafica utilizzano principalmente due metodi per la designazione dei colori, indicati con le sigle HSB e RGB.

Il metodo HSB è l'acronimo di Hue, Saturation e Brightness. Si tratta di una designazione dei colori che si riferisce agli attributi del colore, come classificati dal metodo Munsell. Non tutte le terne di valori sono possibili. Come già specificato in §3.1.4, per $B=0$ si ha il nero e gli altri attributi perdono di significato, così come per $S=0$ si ha la scala dei grigi.

Il metodo RGB definisce invece le intensità dei tre primari necessari a generare il colore desiderato. L'assenza di colore è data per $R=G=B=0$ e corrisponde al nero. Al contrario $R=G=B=255$ (per codifica a 8 bit non normalizzata) si ha il bianco. Tutti i punti con $R=G=B$ appartengono alla scala dei grigi.

L'utilizzo del diverso sistema di designazione del colore non modifica in alcun modo lo spazio dei colori possibili. Tra le due codifiche sussiste una corrispondenza biunivoca. La definizione naturale dello spazio raggiungibile è il metodo RGB, ma la designazione HSB consente una più semplice individuazione del colore desiderato. La gamma dei colori si amplia modificando i valori estremi del campo, ossia modificando i tre colori primari utilizzati.

La designazione RGB consente di individuare il colore all'interno dello spazio cromatico implementato per la specifica applicazione e non si deve ritenere di avere accesso a tutti i colori possibili. Gli schermi degli elaboratori hanno però capacità cromatica limitata dalle coordinate dei fosfori utilizzati per la ricostruzione del colore. Alcuni software consentono gamme più ampie di quanto non sia rappresentabile a schermo, ad uso di altri dispositivi di riproduzione del colore in grado di accedere ad uno spazio più ampio.

La gamma dei colori dei dispositivi di stampa comuni non coincide con lo spazio dei colori dello schermo. E' possibile quindi che alcuni colori visualizzati sul monitor non siano riproducibili o che il dispositivo di stampa sia in grado di riprodurre colori che non sono rappresentabili a schermo.

Viceversa, lo spazio dei colori dei dispositivi di acquisizione immagini (scanner, macchine fotografiche digitali, ecc.) può non coincidere con lo spazio gestibile dal software e/o rappresentabile a schermo. Si possono quindi avere colori memorizzati che non si è in grado di riprodurre o viceversa si possono perdere informazioni in fase di codifica. Per migliorare la fedeltà dei colori, alcuni software utilizzano per la codifica delle immagini spazi definiti mediante sorgenti virtuali, anche se in tal modo esistono codici cui non corrispondono colori reali, aumentando il costo di elaborazione.

Infine si deve tenere presente che la percezione dei colori è generata dal contrasto rispetto all'illuminante dominante nel campo visivo principale: il bianco non è un valore assoluto ma è definito in relazione alla minima saturazione individuata nel campo di visione. Immagini acquisite con un certo illuminante non sarebbero correttamente percepite se rappresentate tal quali in ambienti dove l'illuminante dominante è differente. Al fine di una corretta gestione dei colori, è necessario quindi compiere un adattamento delle coordinate cromatiche delle immagini acquisite rispetto all'illuminante presente in fase di acquisizione, in modo da imitare il comportamento dell'occhio umano.

Bibliografia

- [1] I. Barducci, “Fotometria e colorimetria”, vol. III, ed. ESA, 1991
- [2] G. Wyszecki, W. S. Stiles, “Color Science: concepts and methods, quantitative data and formulae”, ed. Wiley, 1982
- [3] A. Colli, “Elementi di colorimetria tristimolo”, estratto da: “Enciclopedia della stampa”, vol. III, 1978
- [4] U. Bordoni, “Fondamenti di fisica tecnica”, Zanichelli, 1971