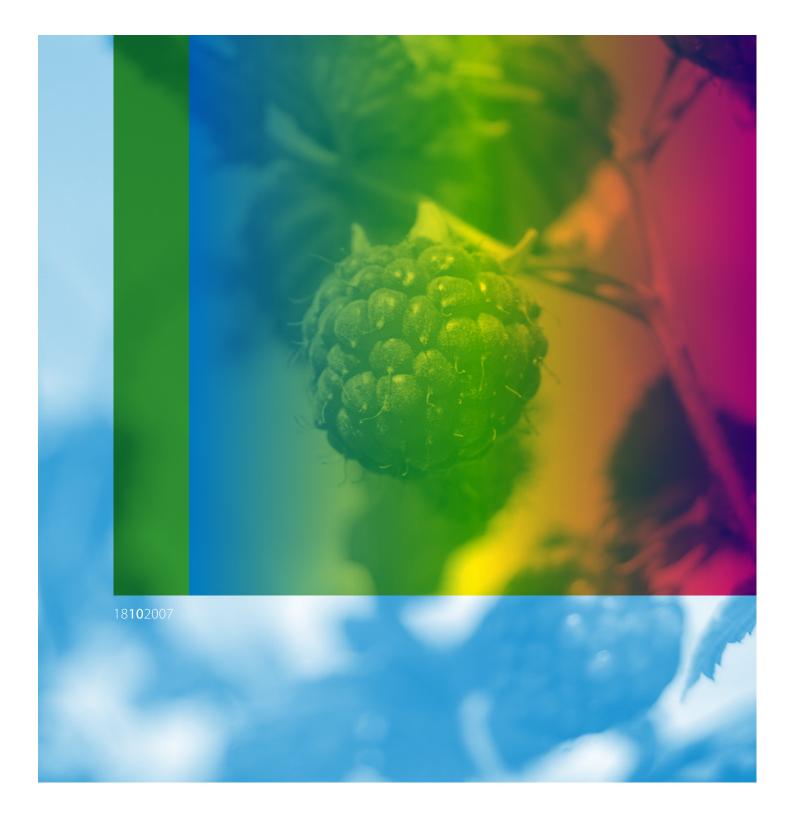
# 2: Colorimetria



#### **Indice**

#### 2 Introduzione

#### 3 Grandezze radiometriche

- 3 Flusso radiante
- 3 Intensità radiante
- 3 Emettenza radiante
- 3 Irradianza
- 4 Radianza

### 5 Grandezze fotometriche

- 5 Curva di efficienza luminosa
- 5 Da radiometria a fotometria
- 6 Flusso luminoso
- 6 Intensità luminosa
- 6 Emettenza luminosa
- 6 Illuminamento
- 6 Luminanza e fattore di luminanza
- 7 Correlati percettivi

# 8 Sorgenti di luce

- 8 Luce ad incandescenza e corpo nero
- 9 Illuminanti standard CIE

# 10 Interazione luce-materia

- 10 Riflessione
- 11 Trasmissione
- 12 Fluorescenza

# 13 Mescolanza additiva

- 13 Mescolanza in media spaziale
- 14 Mescolanza in media temporale
- 15 Mescolanza additiva in Photoshop

# 16 Spazio colorimetrico CIE 1931

- 16 Valori di tristimolo
- 17 Tristimolo dei colori spettrali
- 17 Scelta dei primari
- 18 Osservatore standard CIE 1931
- 18 Calcolo dei valori di tristimolo
- 20 Il valore di tristimolo Y è speciale
- 20 Spazio del tristimolo XYZ CIE 1931

- 20 Diagramma delle cromaticità
- 21 Mescolanze additive

#### 23 Metamerismo

- 23 Vantaggi e inconvenienti
- 24 Riproduzione del colore
- 24 Calcoli colorimetrici

# 25 Spazio colore CIELAB

- 25 Spazi uniformi di colore
- 25 Chiarezza CIE 1976, L\*
- 26 Spazio L\*a\*b\*
- 27 Spazio L\*C\*h
- 28 Differenza di colore
- 29 Differenza di colore CMC (1984)
- 29 Differenza di colore CIE 1994
- 29 Differenza di colore CIE 2000

### 30 Argomenti avanzati

- 30 Psicofisica
- 30 Fotometria scotopica
- 31 CIELAB è veramente uniforme?
- 31 Il cerchio di Newton

### 33 Riassunto

- 33 Radiazione visibile
- 33 Grandezze spettrali e integrali
- 33 Grandezze radiometriche
- 33 Grandezze fotometriche
- 33 Illuminanti
- 33 Corpi
- 33 Sensibilità dei coni
- 33 Psicofisica e colorimetria
- 33 Psicometria
- 34 Correlati percettivi
- 34 Differenze di colore
- 34 Da ricordare

#### 35 Riferimenti

- 35 Siti web
- 35 Testi consigliati

# Introduzione

Un naturalista non si aspetterebbe di vedere la scienza di questi [cioè dei colori] diventare matematica, e tuttavia oso affermare che in essa vi è altrettanta certezza che in qualsiasi altra parte dell'ottica.

- Isaac Newton Lettera a Oldenburg 1671

Se quei principi sono tali che a partire da essi un matematico può determinare tutti i fenomeni dei colori che possono essere causati dalla rifrazione [...] io suppongo che la scienza dei colori sarà ammessa matematicamente.

- Isaac Newton

Se ci chiedessero ... che cosa significano le parole "rosso", "blu", "nero", "bianco" ... potremmo di certo indicare immediatamente certe cose che hanno quei colori, ma la nostra capacità di spiegare i significati di queste parole non va più oltre.

– Ludwig Wittgenstein Osservazioni sui colori 1950

Scopo della colorimetria è esprimere il colore e i suoi attributi percettivi mediante numeri. Per fare questo è necessario stabilire una correlazione tra i vari attributi percettivi del colore e le grandezze della radiazione visibile. In questo senso la colorimetria è una parte della psicofisica, la disciplina che studia la relazione tra qualunque grandezza fisica e la rispettiva grandezza percepita.

La colorimetria si basa sul fatto che persone diverse possono in generale convenire che radiazioni fisicamente diverse appaiono cromaticamente uguali, cioè possono essere d'accordo sulle uguaglianze tra sensazioni di colore.

Questo fascicolo fa parte della serie di tre fascicoli

- Colore
- Colorimetria
- Gestione del colore

che ho preparato per i partecipanti ai corsi per professionisti della computer grafica, fotografi, tipografi, operatori di prestampa, grafici, designer. I fascicoli sono scaricabili in formato PDF dal mio sito web e sono utilizzabili esclusivamente per uso personale. È proibita la riproduzione e pubblicazione anche parziale.

Ringrazio chi vorrà segnalare errori, omissioni, possibili miglioramenti o qualunque altra osservazione su questo testo al mio indirizzo mail:

mauro@boscarol.com

Ouesta è la versione del 18 ottobre 2007.

# Grandezze radiometriche

Lo stimolo che causa la visione del colore è la radiazione elettromagnetica che viene descritta in termini di energia per lunghezza d'onda, e si rappresenta con un grafico di *distribuzione spettrale di energia* (fig. 1).

I valori della distribuzione possono essere disponibili in termini assoluti (cioè riferiti ad una delle unità di misura descritte in questa sezione) e in tal caso la distribuzione si chiama *curva di stimolo colore*. Alternativamente i valori possono essere disponibili in termini relativi, con il valore di energia a 560 nm oppure il valore di energia massimo posto uguale a 1 o a 100. In tal caso la distribuzione si chiama *curva relativa di stimolo colore*. In fig. 1 il valore massimo è stato posto uguale a 1 nel primo grafico e a 100 nel secondo grafico.

La distribuzione spettrale di una grandezza radiometrica riporta i valori della grandezza per ogni lunghezza d'onda. Il valore complessivo della grandezza si ottiene "integrando" la curva, cioè sommando tutti i valori per ogni lunghezza d'onda.

Le grandezze e unità di misura utilizzate in questo fascicolo sono quelle previste dal SI (Sistema Internazionale) adottato dalla Conferenza generale dei pesi e delle misure nel 1960.

La radiazione elettromagnetica trasporta *energia radiante* (*radiant energy*) che come ogni tipo di energia si misura in joule (J). Da questa grandezza derivano le altre *grandezze radiometriche* e le relative unità di misura.

### **FLUSSO RADIANTE**

L'energia radiante nell'unità di tempo è detta *flus-so radiante (radiant flux)* e si misura in watt (W, un watt è un joule al secondo). L'equivalente in fotoni sono i fotoni al secondo.

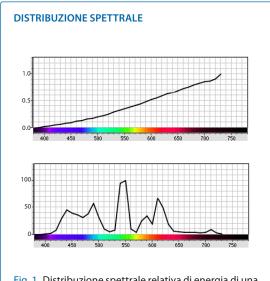


Fig. 1 Distribuzione spettrale relativa di energia di una lampada incandescente (in alto) e di un monitor LCD (in basso). Il massimo è posto uguale a 1 in alto e a 100 in basso.

#### INTENSITÀ RADIANTE

L'intensità radiante (radiant intensity) è il flusso radiante trasportato in una data direzione nell'angolo solido unitario. Si misura in watt allo steradiante (W/sr).

L'angolo solido unitario è lo spazio racchiuso da un cono che ha il vertice nel centro di una sfera di raggio r e che intercetta sulla stessa sfera un'area circolare di estensione  $r^2$ . La sua unità di misura è lo steradiante (sr).

### **EMETTENZA RADIANTE**

L'emettenza radiante (radiant exitance) è il flusso radiante emesso (direttamente, oppure per riflessione o trasmissione) in tutte le direzioni da una sorgente per unità di area. Si misura in watt al metro quadrato  $(W/m^2)$ .

# **IRRADIANZA**

L'irradianza (irradiance) è il flusso radiante incidente su una superficie per unità di area. Si misura in watt al metro quadrato (W/m²).

L'irradianza è specificata per ogni punto su una superficie e in molti casi varia da punto a punto.

Per esempio l'irradianza che incide sul sensore di una fotocamera digitale può essere diversa per ogni *photosite* (e moltiplicata per il tempo di apertura del diaframma fornisce il valore di esposizione di quel photosite).

#### **RADIANZA**

La radianza (radiance) di una superficie emittente è il flusso radiante emesso (direttamente, oppure per riflessione o trasmissione) per unità di angolo solido e per unità di area proiettata su un piano normale alla direzione considerata. Si misura in watt allo steradiante al metro quadrato,  $W/(sr m^2)$ .

La radianza varia con il variare del punto di vista ed essendo basata sulla direzione, è una grandezza vettoriale. È la più importante grandezza radiometrica perché (a) è conservata nella propagazione (a meno di assorbimento o diffusione) e (b) è in relazione con la modalità di collezione della luce da parte dell'occhio umano, telecamere, strumenti.

# Grandezze fotometriche

Le grandezze radiometriche riguardano la misura fisica dell'energia, e non tengono conto che l'occhio umano è diversamente sensibile alle varie lunghezze d'onda dell'energia.

**11** 

Per lo studio del colore è più rilevante tener conto della sensibilità spettrale dell'occhio umano che considerare le grandezze fisiche assolute. È necessario allora "valutare" le grandezze radiometriche mediante la curva di sensibilità dell'occhio umano ottenendo così le grandezze fotometriche.

#### **CURVA DI EFFICIENZA LUMINOSA**

La CIE nel 1924 ha standardizzato a livello internazionale la funzione spettrale di efficienza luminosa (spectral luminous efficiency function) per la visione fotopica, indicata con  $V(\lambda)$ . Si tratta della stessa curva che nel fascicolo Colore abbiamo indicato come curva di sensibilità dei coni nel loro complesso (fig. 2).

Questa funzione viene usata in fotometria per "pesare" una radiazione, dando maggior peso alle componenti centrali dello spettro e minor peso alle componenti verso i due estremi dello spettro, proprio come farebbe il sistema visivo umano. Il risultato è una valutazione della radiazione, non in termini della sua potenza totale, ma in termi-

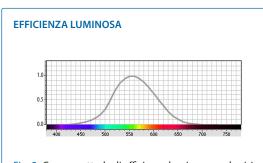
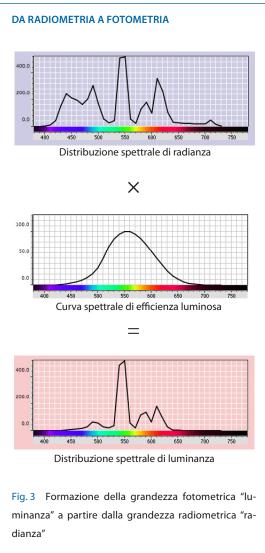


Fig. 2 Curva spettrale di efficienza luminosa per la visione fotopica V(λ). Questa curva definisce la sensibilità luminosa spettrale dell'osservatore fotometrico standard CIE.



ni della sua abilità di stimolare l'occhio.

Un osservatore la cui curva di sensibilità luminosa spettrale è la curva  $V(\lambda)$  è detto osservatore fotometrico fotopico standard CIE (CIE standard phototopic photometric observer).

# DA RADIOMETRIA A FOTOMETRIA

Finora abbiamo usato il termine "luce" (e l'aggettivo "luminoso") nel senso di "radiazione visibile". Ora è giunto il momento di specializzare il nostro linguaggio e chiamare luce la radiazione visibile valutata secondo la sensibilità dell'occhio o, in altre parole, l'aspetto della radiazione elettromagnetica di cui l'osservatore è conscio.

Ad ogni grandezza radiometrica corrisponde una grandezza fotometrica, ottenuta dalla prima valutandola secondo la funzione di efficienza luminosa e, per convenzione, moltiplicando il risultato ottenuto per 683.

In figura 3 è riportato un esempio: la distribuzione spettrale di radianza di fig. 1 viene moltiplicata per la curva di efficienza luminosa e il risultato è la distribuzione spettrale della grandezza fotometrica corrispondente alla radianza: la luminanza.

Di seguito sono riportate le grandezze fotometriche definite dal Sistema internazionale di unità di misura (SI) in corrispondenza con le rispettive grandezze radiometriche.

### **FLUSSO LUMINOSO**

La grandezza corrispondente al flusso radiante è il *flusso luminoso* (*luminous flux*), che si misura in lumen (lm). Il flusso luminoso valuta l'energia complessiva emessa da una sorgente.

Per esempio consideriamo una sorgente laser a 670 nm (rosso). A 670 nm l'efficienza luminosa è 0.032 e un laser di 5 mW fornisce 0.005 W x 0.032 x 683 lm/W = 0.11 lumen.

Una seconda sorgente laser ha lunghezza d'onda 635 nm (arancio). A 635 nm l'efficienza è 0.217 e i lumen sono 0.74.

Se i due fasci hanno lo stesso diametro il laser arancio crea una luce che è circa sette volte più luminosa del laser rosso.

### INTENSITÀ LUMINOSA

L'intensità luminosa (luminous intensity) corrisponde all'intensità radiante e la sua unità di misura è la candela (cd). L'intensità luminosa consente di valutare quanta parte del flusso luminoso di una sorgente puntiforme si propaga in una determinata direzione entro un cono di angolo solido unitario che ha il vertice nella sorgente e come asse la direzione di propagazione.

La candela è una delle sette unità base del SI e la sua definizione ufficiale è la seguente: è l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette energia radiante monocromatica alla frequenza di 540 THz e la cui intensità radiante in quella direzione è 1/683 watt per steradiante.

# **EMETTENZA LUMINOSA**

L'emettenza luminosa (luminous emettance) corrisponde all'emettenza radiante e la sua unità di

misura è il lumen al metro quadrato (lm/m²). L'emettenza luminosa misura la densità del flusso luminoso per unità di superficie e riguarda l'emissione di luce. Si tratta di una grandezza poco usata in visione del colore.

#### **ILLUMINAMENTO**

La grandezza fotometrica corrispondente all'irradianza è *l'illuminamento* (*illuminance*) che si misura anch'essa in lumen al metro quadrato, ma in questo caso ha un nome specifico, il lux (lx). L'illuminamento riguarda la *ricezione* di luce, e viene specificato per ogni singolo punto di una superficie.

L'illuminamento determina il tipo di visione. Se è inferiore a 0.1 lux (chiaro di luna) la visione è notturna o scotopica, se è superiore a 10 lux (crepuscolo) la visione è diurna o fotopica. Tra questi due valori di illuminamento la visione è crepuscolare o mesopica (per esempio in una sala cinematografica).

Alla luce del sole l'illuminamento sulla superficie terrestre può arrivare a 50000 lux. All'ombra a 500 lux. La luce di un ufficio tipicamente produce un illuminamento da 150 a 500 lux.

### LUMINANZA E FATTORE DI LUMINANZA

La più importante grandezza fotometrica è la *lu-minanza* (*luminance*) che corrisponde alla radianza. La luminanza di una superficie è l'intensità luminosa *emessa* per unità di superficie lungo una data direzione. Si misura in cd/m².

La CIE ha approvato il nome nit (nt) per questa unità di misura, e il nome stilb (sb) per una candela al centimetro quadrato, ma questi nomi non stati inseriti nel sistema internazionale SI. Nel sistema britannico si usano come unità di misura della luminanza il lambert (L) e il footlambert (fL). Un lambert corrisponde a  $1/\pi$  stilb, cioè  $1/\pi$  candele al cm², mentre un footlambert corrisponde a  $1/\pi$  candele al piede quadrato.

La luminanza di una parete bianca in una stanza dipende dal suo illuminamento; normalmente può essere tra 30 e 100 cd/m². Quella di un monitor tra 100 e 300 cd/m². Il filamento di tungsteno di una lampada incandescente può arrivare a 50 000 cd/m².

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE					
GRANDEZZA RADIOMETRICA	UNITÀ SIMBOLO	GRANDEZZA FOTOMETRICA	UNITÀ SIMBOLO	DEFINIZIONE	
energia radiante radiant energy	joule J	quantità di luce quantity of light	lumensecondo lm s	energia complessiva trasportata da una radiazione elettromagnetica, in tutte le direzioni	
flusso radiante radiant flux	watt (J/s) W	flusso luminoso luminous flux	lumen lm	come sopra, ma diviso la sua durata (cioè per unità di tempo)	
intensità radiante radiant intensity	watt allo steradiante W/sr	intensità luminosa luminous intensity	candela (Im/sr) cd	flusso emesso da un punto in una determinata direzione, nell'unità di angolo solido	
emettenza radiante radiant exitance	watt al metro quadrato W/m²	emettenza luminosa luminous exitance	lumen al metro quadrato lm/m²	flusso emesso dall'unità di area in ogni direzione	
irradianza irradiance	watt al metro quadrato W/m²	illuminamento illuminance	lux (lm/m²) lx	flusso incidente sull'unità di area da tutte le direzioni	
radianza radiance	watt allo steradiante al metro quadrato W/(sr m²)	luminanza luminance	candela al metro quadrato cd/m²	intensità emessa da una sorgente estesa per unità di area normale alla direzione e nell'unità di angolo solido	

Il fattore di luminanza (luminance factor) è il rapporto tra la luminanza di una superficie (in una data direzione di osservazione) e la luminanza di una superficie diffusore ideale (riflettente o trasmittente). Il fattore di luminanza è adimensionale e assume valori tra 0 e 1 (o tra 0 e 100 se considerato in percentuale).

### **CORRELATI PERCETTIVI**

Gli esperimenti hanno dimostrato che luminanza e brillanza sono in qualche senso legate: precisamente, quando la luminanza è nulla (0 cd/m²) anche la brillanza è nulla; quando aumenta la luminanza, aumenta anche la brillanza; e quando diminuisce la luminanza diminuisce anche la brillanza. Si dice che le due grandezze (quella fotometrica, la luminanza e quella percettiva, la brillanza) sono correlate, e che la brillanza è il correlato percettivo della luminanza.

Anche la grandezza fotometrica fattore di luminanza e la grandezza percettiva chiarezza sono due grandezze correlate, e dunque la chiarezza è il correlato percettivo del fattore di luminanza.

GRANDEZZA RADIOMETRICA	GRANDEZZA FOTOMETRICA	CORRELATO PERCETTIVO
radianza	luminanza	brillanza
fattore di radianza	fattore di Iuminanza	chiarezza

**...**.....

# Sorgenti di luce

Le sorgenti di luce hanno un ruolo molto importante in colorimetria. Nel caso di uno stimolo che raggiunge direttamente l'occhio, la sorgente di luce  $\dot{e}$  il colore. Nel caso di uno stimolo che viene riflesso da un oggetto opaco, o trasmesso da un oggetto trasparente, la sorgente di luce *contribuisce* a creare il colore.

La luce può essere prodotta con metodi diversi:

- *incandescenza*: elevando la temperatura di un solido oltre 1000 K;
- scarica nel gas: facendo passare una corrente elettrica in un gas;
- fotoluminescenza: la radiazione è assorbita da alcune sostanze e riemessa con un cambio di lunghezza d'onda;
  - *fluorescenza* l'emissione cessa dopo la cessazione della radiazione;
  - *fosforescenza* l'emissione continua dopo la cessazione della radiazione;
- catodoluminescenza: alcuni materiali (detti fosfòri) emettono luce quando sono bombardati con elettroni (tubi a raggi catodici);
- *elettroluminescenza*: facendo passare una corrente elettrica in certi solidi;
- *chemiluminescenza*: certe reazioni chimiche provocano l'emissione di luce.

I metodi più comuni di produzione della luce sono l'incandescenza (sole, lampade al tungsteno, lampade alogene), la scarica nel gas (lampade al sodio, al mercurio), e la fotoluminescenza. Le lampade fluorescenti sfruttano entrambi i principi della scarica nel gas e della fluorescenza.

# LUCE AD INCANDESCENZA E CORPO NERO

La luce ottimale per la visione umana è quella prodotta da un corpo incandescente. Ciò dipende dal fatto che il sole stesso è composto di materia incandescente e che il fuoco, utilizzato dagli uomini primitivi per riscaldamento e illuminazione, è anch'esso prodotto per incandescenza.

#### **SCALE DI TEMPERATURA**

#### **GRADO CELSIUS**

Nella pratica quotidiana l'unità di misura della temperatura è il grado Celsius, il cui simbolo è °C. La scala Celsius (introdotta dallo svedese A. Celsius nel 1742) è basata su due punti fissi: la temperatura del ghiaccio fondente, posta a 0 gradi Celsius, e la temperatura di ebollizione dell'acqua, posta a 100 gradi Celsius.

#### KELVIN

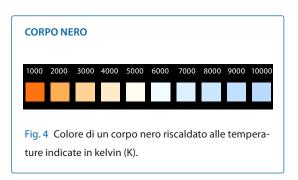
In campo scientifico, e in colorimetria, si usa invece il kelvin (non "grado kelvin") il cui simbolo è K. La scala Kelvin (introdotta dallo scozzese Lord Kelvin nel 1847) è basata sugli stessi punti fissi del grado Celsius, ma pone la temperatura del ghiaccio fondente a 273,15 kelvin, e la temperatura dell'acqua bollente a 373,15 kelvin.

Entrambe le scale sono centigrade perché l'intervallo tra i due punti fissi è diviso in 100 parti. Così 1000 kelvin equivalgono a 1273,15 gradi Celsius, cioè 1000 K = 1273,15 °C.

L'incandescenza si ottiene riscaldando un corpo ad una temperatura oltre 1000 K (vedi riquadro Scale di temperatura). Nei corpi che si incontrano nella pratica quotidiana, l'energia radiante emessa a causa del riscaldamento dipende dalla temperatura e anche da altri fattori.

Invece nel *corpo nero* (*blackbody*), che è un oggetto teorico, la distribuzione spettrale di energia radiante e quindi il colore del corpo dipende *solo* dalla temperatura. La temperatura che ha generato quella distribuzione e quel colore è detta *temperatura di colore* di quella distribuzione e di quel colore (fig. 4).

Il fuoco raggiunge un temperatura di circa 1000 K, una lampada ad incandescenza con filo di tungsteno circa 2000 K, una lampada alogena circa 3000 K e il sole circa 5800 K.



La prima distribuzione in alto di fig. 5 è quella del corpo nero a 2856 K (una lampada ad incandescenza con filo al tungsteno). Il sole stesso è approssimabile a un corpo nero a circa 5800 K.

#### **ILLUMINANTI STANDARD CIE**

A causa della grande quantità di diversi sorgenti luminose la CIE ha introdotto una standardizzazione, distinguendo tra *illuminanti* (definiti dalla loro distribuzione di potenza) e *sorgenti* (definiti come produttori fisicamente realizzabili di luce). In particolare è stata definita la distribuzione spettrale relativa di potenza di un certo numero di illuminanti (alcuni non esistenti come sorgenti) usati per la descrizione del colore. In fig. 2 sono indicate le distribuzioni spettrali di energia di alcuni illuminanti standard CIE, tutte normalizzate con il valore massimo a 1 o a 100.

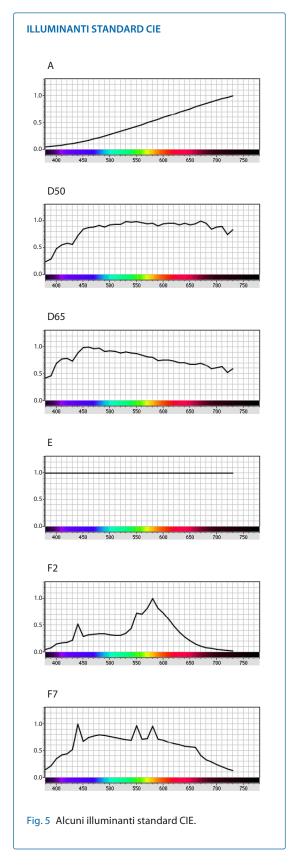
L'illuminante A è basato sulla sorgente più comune di luce artificiale, la lampada ad incandescenza con filo di tungsteno. La distribuzione spettrale corrisponde a quella di un corpo nero alla temperatura di circa 2856 K.

I nomi degli illuminanti della serie *daylight* (luce del giorno) iniziano con D e le due cifre che seguono indicano la temperatura di colore approssimata (D50 ha una temperatura di circa 5000 K). Quando il sole è alto nel cielo la temperatura di colore è circa 5000 K, quando è all'orizzonte è inferiore. Quando il cielo è nuvoloso la temperatura di colore è circa 6500 K e all'ombra è di circa 7500 K.

L'illuminante E è detto *equienegetico* ed ha la stessa potenza per ogni lunghezza d'onda. Si tratta di un illuminante teorico utilizzato solo per i calcoli colorimetrici.

Infine la serie di illuminanti F (da F1 a F12) definisce lampade fluorescenti.

I dati spettrali degli illuminanti standard CIE si trovano nel sito del *Munsell Color Science Laboratory* su fogli Excel, tabulati a 1 e 5 nm. Quelli degli illuminanti A e D65 anche sul sito *Color & Vision Database* (vedi Riferimenti in fondo al fascicolo).



### Interazione luce-materia

I corpi autoluminosi sono quelli che emettono autonomamente luce, cioè le sorgenti di luce che abbiamo visto nella precedente sezione. Gli altri corpi (non autoluminosi) possono essere visti solo se illuminati. L'interazione tra radiazione illuminante e corpo non autoluminoso lo rende visibile e classificabile.

**....** 

Un corpo non autoluminoso è

- opaco se non lascia passare la luce;
- trasparente se lascia passare la luce senza diffonderla;
- traslucido se lascia passare la luce e la diffonde.

L'interazione tra luce e materia può causare:

- cambiamento della direzione: riflessione (con o senza diffusione) e rifrazione;
- assorbimento della radiazione (che viene riemessa in modo non visibile e causa la colorazione dei corpi);
- fluorescenza (assorbimento seguito da emissione a lunghezza d'onda maggiore).

Vale la legge di conservazione dell'energia, per cui la somma delle parti riflesse, trasmesse e assorbite è uguale all'energia originale.

L'assorbimento avviene nelle *sostanze coloranti*, che si classificano in

- *coloranti (dye*), che non diffondono la luce, se posti in opportuni solventi;
- *pigmenti* (*pigment*), che sono sempre diffusori della luce.

# RIFLESSIONE

La riflessione (*reflection*) di radiazione è il fenomeno della riemissione di parte del flusso radiante incidente *senza* variazione della lunghezza d'onda (se c'è variazione il fenomeno è quello della fluorescenza, vedi oltre).

La radiazione in generale viene riemessa in ogni direzione, cioè è *diffusa*. La parte riemessa con angolo uguale a quello incidente è detta *regolare* o *speculare*. Quando ci si riferisce alla radiazione diffusa occorre specificare se si intende comprendere anche la parte regolare (SPIN, *specular included*) oppure se si intende escluderla (SPEX, *specular excluded*).

Ricordiamo che il flusso radiante riguarda l'intera energia incidente, l'irradianza riguarda il flusso incidente in un punto della superficie, la radianza riguarda il flusso riemesso da un punto in una direzione. La radianza di una superficie opaca dipende ovviamente dall'irradianza della luce incidente. Quest'ultima è raramente uniforme sulla superficie e dunque la radianza varia secondo la posizione. Inoltre molte superfici non emettono luce uniformemente in tutte le direzioni, per esempio le superficie con texture, e la radianza varia secondo l'angolo di vista.

La riflessione diffusa è *uniforme* quando la radianza riemessa è uguale per tutti gli angoli di riflessione, ed è indipendente dalla direzione della radiazione incidente. Si tratta di una situazione ideale non raggiungibile in pratica.

Secondo la distribuzione spaziale dell'energia ri-

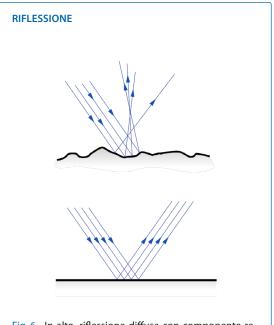


Fig. 6 In alto, riflessione diffusa con componente regolare, in basso riflessione regolare.

emessa si distinguono diversi tipi di superficie. Se è presente solo o prevalentemente la parte regolare, la superficie è liscia (smooth), o anche speculare o levigata. Esempi: argento, alluminio lucidato.

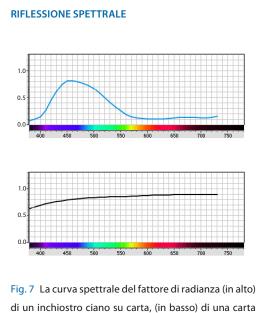
Se l'energia riemessa è diffusa la superficie può

- diffusore riflettente ideale (perfect reflecting diffuser) se non assorbe né trasmette, ma riflette diffusamente tutta la luce, e se illuminato uniformemente presenta diffusione uniforme; si tratta di una superficie ideale che non esiste in pratica e che viene utilizzata come riferimento;
- matt (matte) se la riemissione diffusa è pressoché uniforme (gesso, carta patinata opaca, carta fotografica matt);
- lucida (glossy) se la parte regolare è maggiore rispetto alla superficie matt (carta fotografica lucida); una superficie di questo tipo può presentare diversi gradi di lucidezza (gloss): high gloss, semi gloss, egg-shell, luster;
- scabra (rough) se la riemissione diffusa non è uniforme (intonaco, legname, carta naturale).

La riflettanza spettrale (spectral reflectance) di una superficie è il rapporto tra il flusso radiante riflesso e il flusso radiante incidente per una singola lunghezza d'onda a fissate condizioni geometriche. È una grandezza adimensionale e viene espressa in percentuale (0-100%) o come fattore (0-1). Inoltre riguarda il flusso radiante e quindi la totalità della radiazione riflessa nella emisfera.

Gli esperimenti hanno mostrato che il valore di riflettanza spettrale non dipende dall'intensità e qualità della luce incidente, ed è quindi una proprietà intrinseca della superficie. Il valore di riflettanza spettrale dipende però, oltre che dalla lunghezza d'onda, anche dalla geometria con cui si illumina il corpo (geometria di irradiamento) e dalla geometria con cui si misura la quantità riflessa (geometria di visione), per cui è necessario definire una grandezza più generale della riflettanza spettrale.

Il fattore di riflessione spettrale (spectral reflec-



bianca.

tance factor) di una superficie è il rapporto tra il flusso riflesso dalla superficie in un dato cono il cui vertice è sul corpo considerato e il flusso riflesso nella stessa direzione dal diffusore riflettente ideale ugualmente illuminato.

Il fattore di riflessione spettrale è una grandezza generica che:

- se il cono è una emisfera, corrisponde alla riflettanza spettrale;
- se il cono è piccolo, corrisponde al rapporto tra la radianza di un'area e quella del diffusore riflettente ideale irradiato nello stesso modo. Questo rapporto è detto fattore di radianza spettrale (spectral radiance factor) ed è una grandezza adimensionale espressa in percentuale (0-100%) o come fattore (0-1).

In figura 7 è riportato il fattore di radianza spettrale di un inchiostro ciano steso su carta bianca e quello della stessa carta bianca.

# **TRASMISSIONE**

La trasmissione (transmission) di energia radiante attraverso un mezzo è il fenomeno per cui parte dell'energia radiante attraversa il mezzo e ne riemerge.

Un corpo è opaco se la radiazione non viene tra-

smessa (o viene trasmessa in piccola parte). Se il corpo non è opaco (e dunque parte della radiazione viene trasmessa) la trasmissione può essere

- regolare o speculare (regular transmittance) quando segue le leggi di rifrazione e non esiste diffusione;
- diffusa (diffuse transmittance) se la trasmissione avviene con diffusione.

La trasmittanza spettrale (spectral reflectance) è il rapporto tra il flusso radiante trasmesso e il flusso radiante incidente per una singola lunghezza d'onda a fissate condizioni geometriche. Essendo definita come rapporto di grandezze omogenee, la trasmittanza è una grandezza adimensionale e viene espressa in percentuale (0-100%) o come fattore (0.0-1.0).

Un corpo è trasparente (transparent) se la trasmittanza è elevata e regolare, è traslucido (translucent) se la trasmittanza è elevata e diffusa. Per un corpo trasparente o traslucido, la percezione di colore è determinata dalla selettività spettrale dell'assorbimento. Se tutta la luce è trasmessa il corpo è trasparente e incolore; se la luce viene assorbita selettivamente e il resto viene trasmessa il corpo è trasparente e colorato. Se gran parte viene trasmessa il corpo è traslucido e incolore; se una parte è assorbita selettivamente il corpo è traslucido e colorato.

Il fattore di trasmissione spettrale (spectral transmittance factor) è il rapporto tra il flusso radiante trasmesso in una dato cono il cui vertice si trova sul corpo in esame e quello trasmesso da un diffusore perfettamente trasmittente ugualmente illuminato.

### **FLUORESCENZA**

La fluorescenza (*fluorescence*) è il fenomeno di assorbimento della radiazione con riemissione ad una lunghezza d'onda diversa (diversamente dalla riflessione, dove la radiazione viene riemessa con la stessa lunghezza d'onda), nel quale l'emissione cessa dopo la cessazione della radiazione.

La fluorescenza viene descritta con il fattore di radianza perché il fattore di riflessione si applica

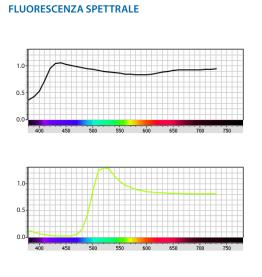


Fig. 8 Distribuzione spettrale del fattore di radianza di due colori fluorescenti: in alto una carta bianca con sbiancanti ottici, in basso un tessuto con colorante fluorescente.

solo alla radiazione riflessa, non alla radiazione fluorescente.

Il primo grafico di fig. 8 riporta la distribuzione spettrale del fattore di radianza di una carta che contiene sbiancanti ottici fluorescenti (optical brightening agents, optical brighteners, fluorescent whitening agents). Si tratta di coloranti che agiscono assorbendo luce nella regione dell'ultravioletto (tra 300 e 400 nm) e riemettendola nel regione del blu (tra 400 e 500 nm). Nel grafico si nota infatti una sommità (con valore maggiore di 1) nella zona del blu. Visivamente, la maggior presenza di blu rende la carta meno gialla, facendola apparire più bianca. Le stesse sostanze vengono usate anche nei detersivi e naturalmente l'efficacia dello sbiancante dipende dalla presenza di ultravioletto nell'illuminante.

Le banconote non contengono sbiancanti ottici, e ciò aiuta nell'individuazione delle contraffazioni.

Il secondo grafico di fig. 8 riguarda un tessuto con un colorante fluorescente (*fluorescent dye*) che assorbe energia nella regione del blu e la riemette nella regione del verde, dove si nota un picco (con valore maggiore di 1).

### Mescolanza additiva

Due diversi stimoli di colore separati nel tempo o nello spazio vengono in percepiti come due diversi colori. Se i due stimoli vengono visti nello stesso tempo e/o nello stesso spazio il sistema visivo non ha modo di distinguerli e li fonde in un unico colore. Questo fenomeno è detto di *mescolanza additiva*.

**....** 

Il modo più comune per illustrare questo fenomeno consiste nel proiettare due luci colorate che si sovrappongono (almeno in parte) su una parete al buio (fig. 9). Se viste indipendentemente le due luci producono due diverse percezioni, mentre sovrapposte producono la percezione di un terzo colore. Naturalmente il risultato della mescolanza varia al variare dell'intensità degli stimoli mescolati.

Si noti che questo comportamento è diverso dalla sovrapposizione di suoni. Le singole note di un accordo musicale possono essere percepite individualmente, mentre il sistema visivo non è in grado di individuare in un colore i colori componenti..

La mescolanza additiva si spiega con il modo con cui il sistema visivo risponde allo stimolo di colore. La distribuzione spettrale di uno stimolo produce certe attivazioni ai coni. La distribuzione spettrale di un altro stimolo produce altre attivazioni ai coni. La distribuzione spettrale che è somma delle due precedenti produce ancora altre attivazioni ai coni. Gli stimoli originali se visti indipendentemente producono due diverse percezioni di colore. Se visti contemporaneamente producono una terza, nuova percezione di colore.

Dunque la mescolanza additiva non è un meccanismo fisico che riguarda la luce (perché gli stimoli di colore rimangono invariati), bensì un meccanismo biologico, che riguarda il sistema visivo.

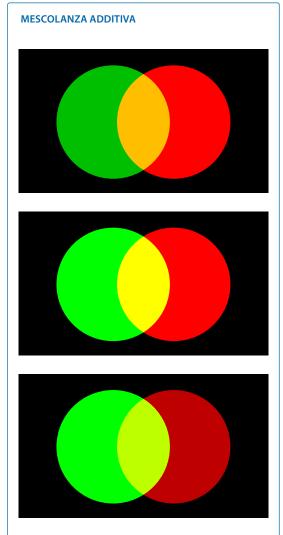


Fig. 9 Mescolanze additive di una luce verde e di una luce rossa. In alto, la luminanza della luce rossa è prevalente e la mescolanza appare arancio, in centro le due luminanze sono uguali e la mescolanza appare gialla, in basso prevale la luce verde e la mescolanza appare giallo-verde.

#### **MESCOLANZA IN MEDIA SPAZIALE**

La mescolanza additiva può avvenire anche per media spaziale o temporale. La mescolanza in media spaziale (fig. 10) è un fenomeno molto comune in pratica. Per esempio il funzionamento dei monitor (televisivi e computer) si basa su questo principio. I singoli pixel dello schermo sono così piccoli da essere indistinguibili e nell'occhio dell'osservatore incidono su un singolo fotorecettore e si fondono.

Alla fine dell'Ottocento all'interno dell'impressionismo francese nasce una corrente chiamata

#### **MESCOLANZA ADDITIVA IN MEDIA SPAZIALE**

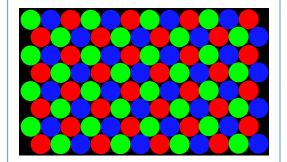




Fig. 10 Mescolanza additiva in media spaziale in televisione (in alto) e pittura puntinista (in basso): *Un dimanche d'été a La Grande Jatte* (Georges Seurat, 1886.

puntinismo (pointillisme). I puntinisti (i maggiori esponenti erano Georges Seurat e Paul Signac) dipingevano avvicinando, ma non sovrapponendo, piccoli punti di colore. Una variante del puntinismo era il divisionismo, i cui maggiori esponenti erano gli italiani Pelizza da Volpedo e Giovanni Segantini.

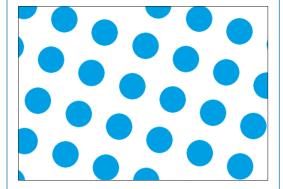
La stampa retinata in quadricromia (fig. 11) si basa sullo stesso principio, nelle aree in cui i punti di retino non si sovrappongono. Dove si sovrappongono, si formano (non additivamente) altri colori che si mescolano additivamente.

La *pop art* degli anni Sessanta mette in evidenza l'utilizzo della retinatura nei fumetti facendola diventare il soggetto della rappresentazione (fig. 11) e non più una tecnica di riproduzione del colore.

# **MESCOLANZA IN MEDIA TEMPORALE**

Oltre che in media spaziale, i colori si possono fondere in media temporale Si tratta del caso in

#### **MESCOLANZA ADDITIVA IN STAMPA RETINATA**



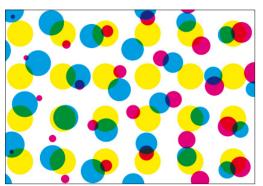




Fig. 11 I punti di retino di uno stampato si mescolano additivamente con il bianco della carta. Se gli inchiostri sono più di uno la mescolanza additiva è tra tutti i colori che si formano per sovrapposizione. In basso *Crying Girl* (Roy Lichtenstein, 1963).

# MESCOLANZA ADDITIVA IN MEDIA TEMPORALE



Fig. 12 Ruotando il cerchio i colori si sommano.

cui gli stimoli di colore incidono sui fotorecettori in momenti diversi, ma così ravvicinati (almeno 50, 60 volte al secondo) che il sistema visivo percepisce un unico colore. Infatti i cambiamenti sono troppo rapidi, così rapidi che il sistema visivo non riesce a mantenere un uguale ritmo di cambiamento e fonde tra di loro i colori..

Lo stesso James Clerk Maxwell (1831-1879), uno dei fondatori della scienza del colore, ha realizzato le prime misure di mescolanze additive con una ruota dei colori (color-mixing top) sul quale erano posti dei settori di carta colorata di angolo variabile. L'apparecchio è ancora oggi conservato al Cavendish Laboratory di Cambridge.

# Mescolanza additiva in Photoshop

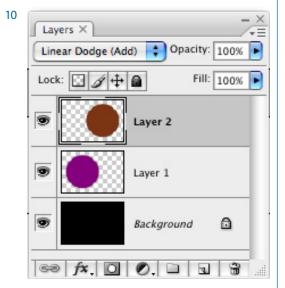
Si può simulare la mescolanza additiva di due colori situati in due livelli diversi in un documento Photoshop, usando il metodo di fusione tra livelli Linear Dodge (Add). La spiegazione qui di seguito è basata sulla versione inglese di Photoshop CS3.

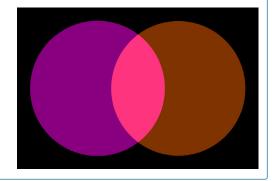
#### **DETTAGLI**

- 1 Creare in Photoshop un nuovo file RGB per esempio di 450 x 300 pixel.
- 2 Riempire il livello di sfondo (Background) di nero RGB = 0.00.
- 3 Impostare nel Color Picker il primo dei due colori che devono essere mescolati additivamente; nell'esempio è stato impostato RGB = 136 0 127.
- 4 Creare un nuovo livello, dargli un nome (nell'esempio Layer 1) e assicurarsi che venga selezionato.
- 5 Selezionare lo strumento Ellipse Tool (U).
- 6 Impostare la modalità Fill pixel.
- 7 Tracciare un cerchio nel livello appena creato (tenere premuto il tasto delle maiuscole per avere un cerchio e non un ellisse; tenere premuto il tasto Alt per tracciare dal centro).
- 8 Impostare nel Color Picker il secondo dei due colori da mescolare additivamente; nell'esempio è stato impostato RGB = 127 52 0.
- 9 Creare un nuovo livello, dargli un nome (nell'esempio Layer 2) e assicurarsi che venga selezionato.
- 10 Con Ellipse Tool (U) impostato in FIII pixel tracciare il secondo cerchio in modo che si sovrapponga in parte al primo, nel livello appena cre-
- 11 Impostare il metodo di fusione del secondo livello su Linear Dodge (Add).









# Spazio colorimetrico CIE 1931

Poiché la nostra retina ha tre tipi di coni le cui attivazioni sono in relazione biunivoca con il colore percepito (se questo è presentato in un contesto impoverito), in prima approssimazione possiamo considerare il colore come funzione di tre variabili. Per valutare il colore si potrebbero considerare le tre curve di sensibilità spettrali dei tre tipi di coni (fig. 13), e rappresentare ogni stimolo di colore con i tre valori L, M e S ottenibili da queste curve.

**....** 

Questa procedura non è stata finora utilizzata perché le tre curve non sono note con precisione e soprattutto non lo erano all'inizio del Novecento, quando sono state gettate le basi della colorimetria.

Non potendosi basare su questo procedimento, la specifica colorimetria di un colore è stata riportata al problema della *corrispondenza di colore* (*color matching*), che consiste nel valutare un colore in termini di tre prefissati stimoli "primari" (scelti quasi completamente a piacere) in opportune proporzioni.

#### **VALORI DI TRISTIMOLO**

La tecnica sperimentale per determinare la corrispondenza di colore consiste nell'utilizzare uno strumento ottico che contiene un campo circolare diviso in due parti (fig. 14). Nella parte su-

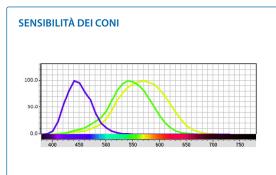


Fig. 13 Curve di sensibilità spettrale dei tre tipi di coni, da destra a sinistra L, M e S.

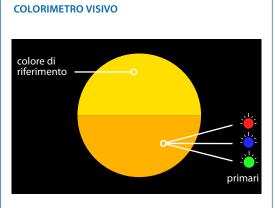


Fig. 14 Modificando le quantità dei tre primari con le manopole in basso a destra il colore inferiore viene modificato fino a corrispondere al colore di riferimento superiore.

periore è proiettato uno stimolo il cui colore è quello di riferimento. Nella parte inferiore sono proiettati in mescolanza additiva tre stimoli primari precedentemente fissati, tipicamente di colore rosso, verde, e blu, in quantità controllate da tre manopole (che agiscono sul flusso radiante in watt di ogni primario).

I tre stimoli primari si mescolano additivamente nella parte inferiore e l'osservatore percepisce un determinato colore. Modificando indipendentemente le quantità dei tre stimoli primari, l'osservatore può trovare uno stimolo tale che i colori delle due parti del campo circolare siano uguali.

L'osservatore normale, con tre tipi di coni, può infatti far corrispondere qualunque luce con una mescolanza di tre luci primarie, una delle quali può essere aggiunta alla luce di riferimento. La corrispondenza è a livello dei coni: il numero di fotoni catturati (quantum catch) da ognuno dei tre tipi di coni e provenienti dai tre primari è lo stesso di quello proveniente dalla luce di riferimento.

Le tre quantità così determinate sono dette *valori di tristimolo* del colore di riferimento, relativi a quei primari e a quell'osservatore.

Dunque un colore presentato come si è detto, può essere descritto, relativamente a fissati primari e ad un determinato osservatore, con tre valori, e ciò è una conseguenza del fatto che nella retina sono presenti tre tipi di coni. Per un altro osservatore (e per gli stessi primari) i tre valori potranno variare.

#### TRISTIMOLO DEI COLORI SPETTRALI

In pratica, il procedimento più opportuno consiste nell'utilizzare come colori di riferimento i colori spettrali, cioè come stimoli le luci monocromatiche (o di un intervallo limitato di lunghezze d'onda, tipicamente 5 o 10 nm) tra 380 e 780 nm, a fissato flusso radiante. L'osservatore determina le quantità dei tre primari necessarie per ottenere un colore corrispondente, segnando i valori in una tabella, in corrispondenza di ogni lunghezza d'onda.

Chi segue questo procedimento si imbatte subito in una complicazione. Infatti, qualunque siano i primari, alcuni colori non possono essere uguagliati da nessuna loro combinazione. Si può però aggirare il problema spostando la luce di uno o più primari dal campo inferiore in quello superiore, cioè aggiungendola alla luce di riferimento. Questo metodo è giustificato dal fatto che, *aggiungere* una luce alla luce di riferimento equivale a *sottrarre* quella luce dalla miscela dei tre primari, cioè aggiungerne una quantità negativa.

Quindi ogni colore spettrale può essere fatto corrispondere alla miscela additiva di tre primari, consentendo, se necessario, di aggiungere uno o due primari al colore spettrale. Formalmente si può dire che ogni colore spettrale si può rappresentare come somma di tre primari, alcuni dei quali possono essere presi con segno negativo.

FUNZIONI DI COLOR MATCHING					
nm	PRIMARIO ROSSO	PRIMARIO VERDE	PRIMARIO BLU		
530	-0.07101	0.20317	0.00549		
540	-0.03152	0.21466	0.00146		
550	0.02279	0.21178	-0.00058		
560	0.09060	0.19702	-0.00130		
570	0.16768	0.17087	-0.00135		
580	0.24526	0.13610	-0.00108		

Un esperimento di questo tipo consente di compilare una tabella, che dipende dai primari e dall'osservatore. Più osservatori compilano una tabella del genere e ne viene fatta una media, come la tabella riportata qui a lato. Questa tabella descrive le quantità in watt dei tre stimoli primari scelti necessarie per far corrispondere (to match) il colore con un watt di stimolo monocromatico di data lunghezza d'onda. Le ultime tre colonne della tabella definiscono le funzioni di color-matching che dipendono dai primari utilizzati.

#### **SCELTA DEI PRIMARI**

Il numero di possibili primari è infinito e quindi esiste un numero infinito di funzioni di *color matching*. Si può però dimostrare che ogni terna di funzioni di corrispondenza colore è in relazione lineare con ogni altra terna, cioè indicando con  $(r_1, g_1, b_1)$  una terna e  $(r_2, g_2, b_2)$  un'altra terna si ha

$$\begin{aligned} r_1(\lambda) &= a \ r_2(\lambda) + b \ g_2(\lambda) + c \ b_2(\lambda) \\ g_1(\lambda) &= d \ r_2(\lambda) + e \ g_2(\lambda) + f \ b_2(\lambda) \\ b_1(\lambda) &= g \ r_2(\lambda) + h \ g_2(\lambda) + i \ b_2(\lambda) \end{aligned}$$

In altre parole se si hanno le funzioni di corrispondenza colore determinate con un certo insieme di primari, si possono facilmente ricavare le funzioni che si sarebbero ottenute con un altro insieme di primari mediante una trasformazione lineare. E anche, se si hanno i le funzioni di corrispondenza colore determinate con un certo insieme di primari, si può trasformarle linearmente in un modo qualunque, e le funzioni che si ottengono sono quelle adatti per un altro insieme di primari (non determinato).

Dunque non è importante come si scelgono i primari, e non è nemmeno necessario che siano monocromatici. Non solo, non è nemmeno necessario che siano colori reali, cioè i cui stimoli siano fisicamente realizzabili. E dunque, anche se non è possibile trovare tre primari reali che producono tutti i colori senza quantità negative di almeno un primario, è invece possibile trasformare linearmente tre primari (reali, fisici) in tre primari (immaginari) in modo che i valori di tristimolo siano tutti positivi.

I primari immaginari non hanno un significato fisico (cioè non sono stimoli di colore fisicamente realizzabili), ma sono una costruzione matematica che consente di avere valori di tristimolo tutti positivi, una proprietà importante all'inizio del Novecento, quando i computer non esistevano, e i conti si facevano a mano.

#### **OSSERVATORE STANDARD CIE 1931**

Sulla linea che abbiamo indicata, la CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*) ha stabilito nel 1931 una procedura ufficiale per la corrispondenza di colore (*color matching*).

Riconducendo le curve di diversi laboratori ad uno stesso insieme di primari si sono ottenute tre curve indicate con  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  che sono state adottate ufficialmente dalla CIE nel 1931 (fig. 15). Queste tre curve si chiamano funzioni di corrispondenza colore CIE (CIE color-matching functions) e definiscono un particolare osservatore, indicato come osservatore colorimetrico standard CIE 1931 (CIE 1931 Standard Colorimetric Observer) a cui ci si riferisce spesso come osservatore  $2^{\circ}$ .

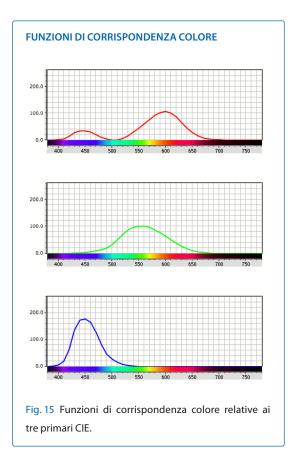
Le tre funzioni indicano le quantità di ogni primario necessarie per uguagliare il colore di un watt di potenza radiante della lunghezza d'onda indicata. Sono state determinate in modo che le aree sottostanti alle tre curve sono uguali tra loro, così che i valori di tristimolo del bianco equienergetico sono uguali (in altre parole sono state fissate le unità di misura in modo che per il bianco E i tre valori di tristimolo siano uguali.

La tabulazione delle curve per l'osservatore standard CIE si trovano nel sito del *Munsell Color Science Laboratory* su fogli Excel, tabulati a 1 e 5 nm e sul sito *Color & Vision Database* (vedi Riferimenti in fondo al fascicolo).

### CALCOLO DEI VALORI DI TRISTIMOLO

Le tre curve di *color matching* consentono di determinare le quantità dei tre primari fissati dalla CIE necessarie per rappresentare ogni colore spettrale e non spettrale.

In fig. 16 è indicato sia il calcolo dei valori di tristimolo di un oggetto illuminato da una data lu-



ce, sia il calcolo dei valori di tristimolo di una sorgente di luce, che segue lo stesso schema, ma in questo caso la sorgente è lo stimolo (non c'è un oggetto che riflette la luce).

I valori di tristimolo ottenuti sono indicati con X, Y e Z e sono dunque le quantità dei tre stimoli primari fissati dalla CIE, necessarie per creare uno stimolo il cui colore corrisponda al colore di uno stimolo di riferimento.

Si nota che il colore (cioè i valori di tristimolo) dipendono dalla forma spettrale dello stimolo. In particolare se la radianza in una zona spettrale (per esempio nei blu) è maggiore rispetto alle altre parti dello spettro, il valore di tristimolo definito in quella zona spettrale (nell'esempio Z) sarà maggiore.

Se lo stimolo varia uniformemente in radianza (cioè ogni valore spettrale viene moltiplicato per una costante) i valori di tristimolo XYZ verranno moltiplicati per la stessa costante. In particolare la luminanza Y varierà secondo la stessa costante.

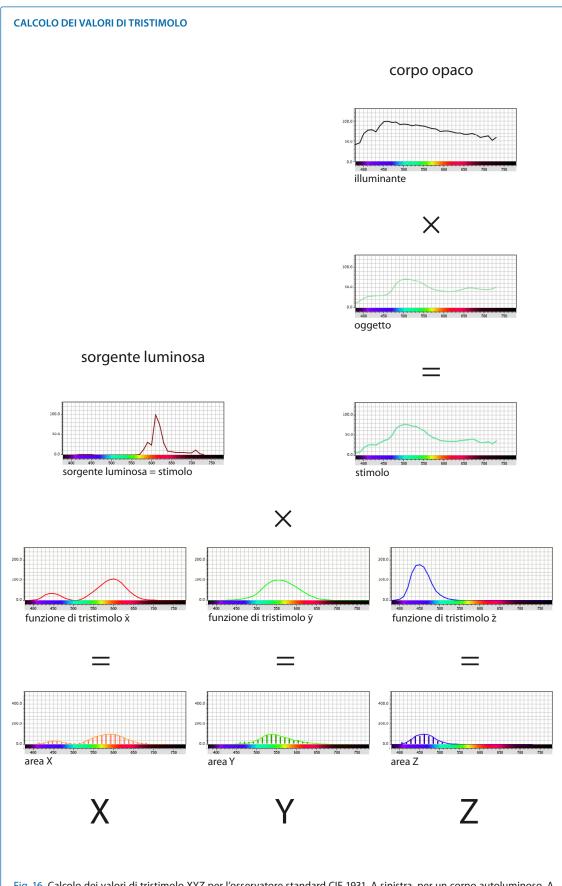
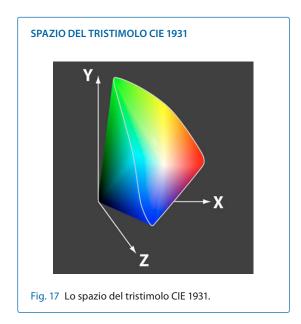


Fig. 16 Calcolo dei valori di tristimolo XYZ per l'osservatore standard CIE 1931. A sinistra, per un corpo autoluminoso. A destra, per un corpo riflettente o trasmittente (le distribuzioni dell'ultima riga sono per quest'ultimo).



#### IL VALORE DI TRISTIMOLO Y È SPECIALE

La CIE ha scelto come seconda curva di *color matching* la curva di efficacia luminosa fotopica  $V(\lambda)$ .

Se il valore di Y viene valutato in termini assoluti, il valore di Y rappresenta la luminanza in cd/m², che come abbiamo visto è correlato alla brillanza dello stimolo.

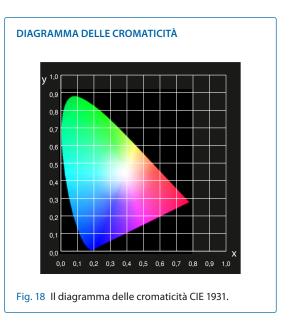
Per stimoli in riflessione o trasmissione il risultato è usualmente scalato in modo che il valore di Y sia 100 (o 1) per il diffusore riflettente/trasmittente perfetto similmente illuminato. In tal caso il valore di Y è il fattore (percentuale) di riflessione, il quale è a sua volta correlato all'attributo percettivo della chiarezza.

#### **SPAZIO DEL TRISTIMOLO XYZ CIE 1931**

Si può considerare lo spazio tridimensionale generato dagli assi X, Y e Z. In questo spazio ogni colore è rappresentato con un punto e l'insieme di tutti questi punti costituisce un solido tridimensionale, lo spazio del tristimolo XYZ (vedi fig. 17).

### DIAGRAMMA DELLE CROMATICITÀ

A parte il valore di tristimolo Y, che è correlato con l'attributo della brillanza, gli altri valori di tristimolo X e Z non sono correlati con nessun attributo percettivo.



Alcuni attributi percettivi del colore sono però correlati alle grandezze *relative*, e non assolute, dei valori di tristimolo. Le grandezze relative si calcolano con queste formule, che definiscono le coordinate di cromaticità di un colore i cui valori di tristimolo sono X, Y e Z:

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

Per esempio se X = 8, Y = 48, Z = 24, allora X+Y+Z = 80 e x = 8/80 = 0.1; y = 48/80 = 0.6; z = 24/80 = 0.3. Questo indica che questo particolare colore contiene il 10% di X, 60% di Y = 30% di Z. Poiché x corrisponde in modo approssimato al rosso, y al verde e z al blu, si può pensare che si tratti di un verde-blu di fattore di luminanza Y circa a metà tra bianco e nero.

Vale x + y + z = 1 e ne deriva che sono sufficienti due dei valori colorimetrici relativi e quelli usati in pratica sono x e y. Con questi due valori è possibile costruire un diagramma bidimensionale (fig. 18).

Cosa rappresenta questo diagramma? Consideriamo tutti i valori di tristimolo XYZ che hanno gli stessi valori relativi xyz. Tutti questi valori di tristimolo differiscono tra di loro solo per un coefficiente moltiplicativo e dunque rappresentano colori che variano solo per la luminanza.

Ne deriva che tutti questi colori hanno la stessa cromaticità. Il diagramma di fig. 18 rappresenta dunque le cromaticità e viene per questo chiamato diagramma delle cromaticità (chromaticity diagram).

Questo diagramma fornisce una mappa di tutte le cromaticità, cioè di tutti i colori a meno della luminanza. La linea curva del diagramma è il *luogo spettrale (spectral locus)* e la linea retta è la linea dei viola (*purple boundary*). Le coordinate x e y assumono valori che vanno da 0 a 1.

È dunque possibile rappresentare un colore con i valori di tristimolo XYZ oppure con i valori di luminanza e cromaticità Yxy. Se si conoscono questi ultimi, X e Z si ottengono con le formule:

$$X = x Y / y$$
  
 $Z = (1 - x - y) Y / y$ 

Per esempio, questi sono i valori di tristimolo e le coordinate di cromaticità di alcuni illuminanti standard CIE per l'osservatore 1931 2°, tratti da [9].

	х	Υ	Z	х	у
D50	96.42	100.00	82.51	0.34567	0.35851
D55	95.68	100.00	92.14	0.33243	0.34744
D65	95.04	100.00	108.88	0.31272	0.32903
А	109.85	100.00	35.58	0.44758	0.40745
Е	100.00	100.00	100.00	0.33333	0.33333

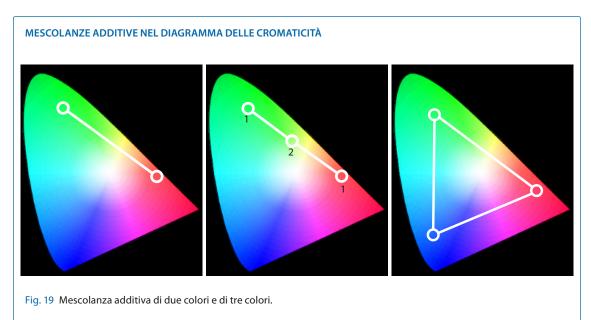
Il diagramma delle cromaticità ha un'importante funzione didattica perché consente di illustrare la ragione per cui i primari della mescolanza additiva sono scelti nelle zone del rosso, del verde e del blu e la ragione per cui i valori di tristimolo, se i primari sono colori reali (cioè interni al diagramma), possono essere negativi. I primari immaginari che danno origine al diagramma CIE 1931 hanno coordinate di cromaticità x, y uguali rispettivamente a (1, 0), (0, 1) e (0, 0).

D'altra parte deve essere sottolineato che la rappresentazione del diagramma illustrata in queste pagine è approssimata perché non è possibile stampare tutte le cromaticità con le normali macchina da stampa (né con periferiche di stampa di altro tipo). Come vedremo, ogni periferica di stampa riesce a riprodurre solo una parte delle cromaticità.

#### **MESCOLANZE ADDITIVE**

Se due stimoli di colore, rappresentati da due tristimoli, vengono mescolati additivamente, le loro mescolanze stanno sul segmento retto che congiunge i due punti dello spazio del tristimolo XYZ. Nel diagramma delle cromaticità lo stesso segmento retto congiunge i due punti che rappresentano le cromaticità dei due colori.

In particolare la linea retta che congiunge il blu con il rosso, cioè la linea dei viola, indica tutte le mescolanze additive di blu e rosso (cioè i viola).



Le mescolanze additive di due colori, nel diagramma delle cromaticità, stanno sul segmento retto che li unisce (fig. 19 a sinistra). Vale la legge del baricentro: se si considerano le luminanze dei due colori da mescolare come pesi, il risultato della mescolanza sta nel punto di baricentro di questi due pesi (fig. 19 in centro).

Le mescolanze additive di tre colori stanno nel triangolo che ha come vertici i tre colori che si mescolano e vale anche in questo caso la legge del baricentro (fig. 19 a destra).

La legge del baricentro per le mescolanze additive di colori è stata enunciata per la prima volta dallo scienziato inglese Isaac Newton nel 1666 (maggiori particolari nella sezione Argomenti avanzati).

# Metamerismo

Il tricromatismo porta con sé il fenomeno più importante del sistema visivo, cioè il *metamerismo*.

**.....** 

Per descrivere uno stimolo, sono necessari in teoria infiniti valori (la distribuzione spettrale), ma in pratica ne bastano qualche centinaio (per esempio un valore per ogni lunghezza d'onda intera). Per descrivere un colore isolato, invece, ne servono ancora di meno: solo i tre valori XYZ.

Dunque, esistono molti più stimoli che sensazioni, e ciò implica che ci siano stimoli diversi che producono la stessa sensazione: questo è il fenomeno del *metamerismo*. In altre parole l'insieme di tutti gli stimoli può essere ripartito in gruppi, in modo che tutti gli stimoli di uno stesso gruppo producono la stessa sensazione di colore per un dato osservatore. Due stimoli diversi che appartengono ad uno stesso gruppo sono detti stimoli *metameri*. Se appartengono a due gruppi diversi sono *non metameri*.

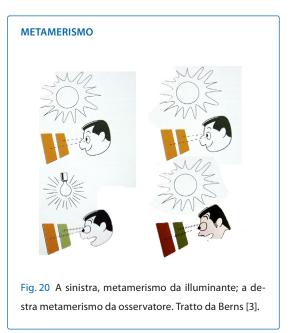
Dunque due stimoli metameri hanno due composizioni spettrali diverse alle quali corrispondono gli stessi valori di tristimolo XYZ, cioè gli stessi colori.

SPETTRI	COLORI	STIMOLI	
uguali	uguali	isomeri	
diversi	uguali	metameri	
	quasi uguali	parameri	
	diversi	non metameri	

# **VANTAGGI E INCONVENIENTI**

Il metamerismo è un fenomeno dal quale conseguono vantaggi e inconvenienti.

Il vantaggio principale è il fatto che il metamerismo consente di riprodurre un particolare colore con numerose ricette diverse che usano coloranti diversi. La riproduzione del colore in televisio-



ne, in fotografia, nel cinema, in stampa, è possibile grazie al metamerismo.

Per esaminare il principale inconveniente del metamerismo, consideriamo due campioni di colore (per esempio due cartoncini colorati) prodotti con diversi coloranti, che quindi hanno diverse curve di riflettanza.

Immaginiamo due situazioni nelle quali i due campioni vengono osservati (a) dallo stesso osservatore sotto due illuminanti diversi, come in fig. 20 a sinistra; (b) da due diversi osservatori sotto lo stesso illuminante, come in fig. 20 a destra.

Nel primo caso varia l'illuminante: l'osservatore, sotto alcuni illuminanti vede che i colori dei due campioni corrispondono (i due stimoli sono metameri), sotto altri illuminanti vede che i colori dei due campioni non corrispondono (i due stimoli non sono metameri). Questo fenomeno è il metamerismo da illuminante e i due campioni di colore costituiscono una coppia di oggetti metamerici, o coppia metamerica.

Nel secondo caso varia l'osservatore, e per alcuni osservatori i due stimoli possono risultare metameri, per altri osservatori possono essere non metameri. Questo fenomeno è il *metamerismo da osservatore*.

#### RIPRODUZIONE DEL COLORE

Corrispondenza *metamerica* (o *condizionale*): due campioni le cui riflettanze e trasmittanze spettrali sono diverse, che corrispondono sotto uno specifico illuminante e per un determinato osservatore.

Una stanza, l'interno di un'automobile, sono illuminati da diverse sorgenti luminose. Si può definire un grado di metamerismo, più alto è, migliore è la riproduzione.

Corrispondenza *spettrale* (o *invariante*): due campioni che hanno la stessa riflettanza o trasmittanza spettrale. Sono sicuramente uguali in tutte le condizioni.

# CALCOLI COLORIMETRICI

CIE [9] raccomanda l'uso dell'intero spettro visibile da 360 a 830 nm ad intervalli di 1 nm per il calcolo dei valori di tristimolo. Per scopi pratici il calcolo può essere approssimato usando l'intervallo da 380 a 780 nm ad intervalli di 5 nm.

# **Spazio colore CIELAB**

Generalmente si fa riferimento al *Munsell Color System* per valutare se un sistema di rappresentazione del colore è percettivamente uniforme. Ebbene, lo spazio colorimetrico XYZ e il relativo diagramma delle cromaticità xy hanno importanti proprietà (per esempio le mescolanze additive sono lineari), ma hanno anche l'inconveniente che la distribuzione dei colori non è percettivamente uniforme.

**.....** 

#### SPAZI UNIFORMI DI COLORE

Nello spazio colorimetrico XYZ (e nel diagramma delle cromaticità xy) coppie di punti *ugualmente* distanti tra loro rappresentano colori che sono *diversamente* distanti per la percezione. Il che è abbastanza evidente considerando l'ampia regione occupata dai verdi e le regioni ristrette nelle quali si affollano rossi e blu.

La situazione è simile a quella che si verifica in una mappa del globo. Qualunque tipo di proiezione si usi, le distanze vengono distorte. Misurati su una mappa, per esempio nella proiezione di Mercatore, 5 centimetri all'equatore corrispondono ad una certa distanza, mentre gli stessi 5 centimetri nella regione artica, verso il polo nord, corrispondono ad un'altra distanza. Anche le proiezioni di Mercatore non sono uniformi (le distanze sulla carta non sono correlate alle distanze reali).

Questo problema è stato studiato sperimentalmente (mediante misure) e teoricamente (introduzione di un tensore metrico nello spazio XYZ e passaggio da una geometria euclidea a una geometria riemanniana). Poiché una specifica numerica della differenza tra due colori è molto utile per la pratica, negli anni 70 la CIE si è posta il problema di costruire uno spazio di colore uniforme indicato con la sigla CIELAB e le cui coordinate sono state indicate con L\*, a\*, b\*.

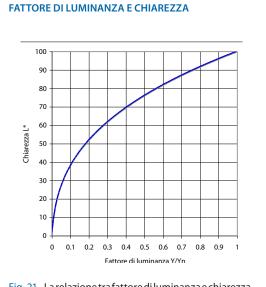


Fig. 21 La relazione tra fattore di luminanza e chiarezza, come stabilita dalla CIE nel 1976.

### CHIAREZZA CIE 1976, L\*

Come abbiamo visto, la luminanza non è percettivamente uniforme. La stessa luminanza incrementale a partire da una luminanza bassa non provoca la stessa percezione di una identica luminanza incrementale a partire da una luminanza più alta. (Questa è la legge di Weber-Fechner, valida per tutte le percezioni, non solo quella visiva.)

Il primo passo per costruire uno spazio colore uniforme consiste dunque nel mettere in relazione il fattore di luminanza con la chiarezza. Nel 1976 la CIE ha precisato la forma di questa funzione, che è definita in termini del rapporto tra il valore di tristimolo Y del colore considerato e il valore di tristimolo Y<sub>n</sub> di un bianco di riferimento.

La formula che definisce la *chiarezza CIE*, indicata con L\* (per distinguerla da altre precedenti definizioni di chiarezza) è la seguente:

se Y / 
$$Y_n \le (24 / 116)^3$$
  
allora L\* = (24389 / 27) (Y /  $Y_n$ ) + 468 / 19  
altrimenti L\* = (Y /  $Y_n$ ) $^{1/3}$ 

e la forma della curva è riportata in fig. 21.

Il bianco di riferimento, per cui  $Y = Y_n$ , ha dunque un valore  $L^* = 100$ , ed un nero perfetto per

cui  $Y = Y/Y_n = 0$  ha un valore  $L^* = 0$ . Un grigio che, per l'occhio, appare a metà tra questo bianco e questo nero ha un valore  $L^*$  di circa 50.

L\* è 0 per un assorbitore perfetto e 100 per un diffusore perfetto. Può essere maggiore di 100 nel caso di riflessione speculare e fluorescenza.

La relazione tra fattore di luminanza e chiarezza è tale che, quando il fattore di luminanza è basso, l'occhio percepisce anche una piccola differenza di luminanza mentre quando la luminanza è alta la stessa piccola differenza viene percepita con minore intensità, ed è necessaria una differenza maggiore per causare una percezione uguale alla precedente.

Perché di giorno non si vedono le stelle? Perché la loro luminanza incrementale riferita alla luminanza del cielo di giorno dà luogo ad un incremento percettivo scarso. Lo stesso incremento di luminanza riferito al cielo di notte dà luogo ad un incremento percettivo maggiore.

#### SPAZIO L\*a\*b\*

Nel 1976 la CIE ha proposto lo spazio colore CIELAB chiamato anche spazio colore CIE 1976 (CIE 1976 color space) come approssimazione di uno spazio uniforme di colore (Munsell è il riferimento standard).

Lo spazio colore CIELAB è una trasformazione matematica dello spazio XYZ nel quale è stato fissato un bianco di riferimento i cui valori di tristimolo sono  $(X_n, Y_n, Z_n)$ . Il bianco di riferimento può essere, per esempio,

- una sorgente luminosa;
- l'illuminante a cui l'osservatore è adattato;
- un diffusore perfetto;
- il colore neutro più riflettente o trasmittente di un mezzo di riproduzione (*media-relative*).

Nel sistema CIELAB i colori dovrebbero essere visti su uno sfondo da bianco a grigio medio da un osservatore adattato a un illuminante non troppo differente dalla luce del giorno media.

I tre assi del sistema CIELAB sono indicati con i

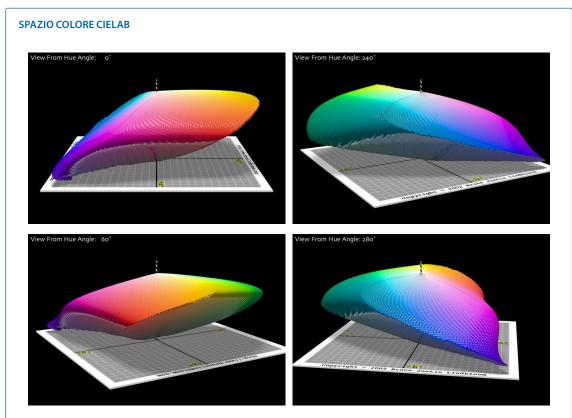


Fig. 22 Quattro viste dello spazio colore CIELAB. Le immagini sono tratte dal sito di Bruce Lindbloom (vedi riferimento in fondo al fascicolo).

nomi L\*, a\*, e b\* e rappresentano rispettivamente una misura di chiarezza (*lightness*), rosso-verdezza (*redness-greenness*) e giallo-bluezza (*yellowness-blueness*) questi ultimi due ispirati alla teoria dei colori opponenti.

Cosa significano gli asterischi in L\*a\*b\*? Servono per distinguere lo spazio colore CIELAB da altri spazi con nomi simili come HunterLab e ANLAB.

La chiarezza viene calcolata come visto nella sezione precedente (più sotto c'è una formula equivalente). La CIE ha poi indicato le seguenti formule (tratte dal sito di Bruce Lindbloom) per il calcolo di a\* e b\*:

$$a^* = 500 (f_x - f_y)$$
  
 $b^* = 200 (f_y - f_z)$ 

dove

se 
$$X/X_n \le \varepsilon$$
 allora  $f_X = \kappa (X / X_n) + 16 / 116$   
altrimenti  $f_X = (X / X_n)^{y_s}$ 

se Y/Y<sub>n</sub> 
$$\leq \epsilon$$
 allora  $f_y = \kappa (Y/Y_n) + 16 / 116$   
altrimenti  $f_y = (Y/Y_n)^{y_0}$ 

se 
$$Z/Z_n \le \varepsilon$$
 allora  $f_Z = \kappa (Z/Z_n) + 16 / 116$   
altrimenti  $f_Z = (Z/Z_n)^{\gamma_S}$ 

in cui  $\epsilon = (24/116)^3$  e  $\kappa = 841/108$ . Con queste definizioni la formula per il calcolo di L\* diventa

$$L^* = 116 f_v - 16$$

Lo spazio colore CIELAB ha la forma indicata in figura 22. I colori che stanno sull'asse L\*, cioè che hanno coordinate  $a^* = b^* = 0$ , sono i colori acromatici (bianco, nero, grigi) e i valori su questo asse vanno da 0 (nero) a 100 (bianco).

Gli assi a\* e b\* non hanno un correlato percettivo e a L\* costante, il piano (a\*, b\*) non è un diagramma di cromaticità (tinta + saturazione). Non è dunque disponibile un correlato della saturazione. Sono però disponibili i correlati della croma e della tinta.

In fig. 23 sono rappresentate due porzioni del

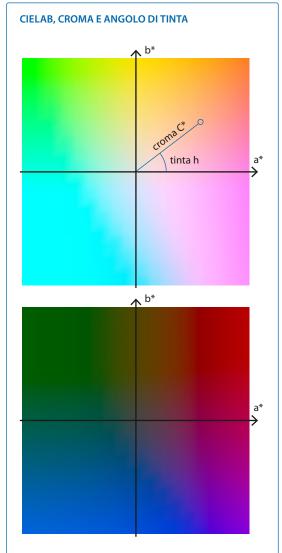


Fig. 23 Rappresentazione approssimata della parte centrale del piano ab nello spazio CIELAB, in alto con L\* elevato (80-90) in basso con L\* basso (20-30). È indicata anche la rappresentazione della croma C\* e dell'angolo di tinta h nello spazio CIELAB.

piano (a\*, b\*) a diversi valori di L\*. Va tuttavia sottolineato che lo spazio CIELAB non è un cubo, né una sfera, è invece un solido con limiti irregolari, come si può vedere in fig. 22.

### SPAZIO L\*C\*h

Ad L\* fissato, il colore si può rappresentare con le coordinate rettangolari a\* e b\* ma anche con le coordinate polari C\* e h così definite:

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$
  
h = arctan (b\* / a\*)

I valori di C\* e h correlano rispettivamente con la croma e con la tinta. Il valore di h è detto *angolo di tinta* ed è espresso in gradi tra  $0^{\circ}$  (compreso) e  $360^{\circ}$  (escluso); se calcolato in radianti deve essere convertito in gradi moltiplicando per  $180/\pi$ .

Se a\* e b\* sono entrambi diversi da 0, la funzione ATAN2(a,b) di Excel fornisce il valore di h in radianti e nell'intervallo da  $-\pi$  a  $\pi$ . Per convertire in gradi usare DEGREES oppure moltiplicare per 180/Pl. Per portare nell'intervallo 0°-360°, sommare 360 se il risultato è negativo.

Le tinte corrispondenti ai vari angoli di tinta sono in modo approssimato le seguenti



Le formule inverse sono

$$a^* = C^* \cos (h)$$
  
 $b^* = C^* \sin (h)$ 

dove il valore di h, se deve essere espresso in radianti, si ottiene invertendo la trasformazione precedente.

### **DIFFERENZA DI COLORE**

A partire dalle coordinate di due campioni in  $L^*a^*b^*$  (riferiti allo stesso bianco) comprese anche le componenti  $C^*$  e h, per esempio

	L*	a*	b*	C*	h
campione 1	20	50	15	52.20	16.7
campione 2	22	49	16	-1	0.66

si possono calcolare le differenze in valore assoluto (o con segno se è più utile) per ognuna delle coordinate

	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔC*	Δh
differenza	2	1	1	0.66	1.38

Ovviamente,  $\Delta L^*$  è la differenza di chiarezza,  $\Delta C^*$  la differenza di croma e  $\Delta h$  la differenza di angolo di tinta ( $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$  non hanno un nome specifico). La differenza complessiva, detta differenza

di colore CIE 1976, si calcola con il teorema di Pitagora

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

Nell'esempio indicato si ottiene  $\Delta E^* = 2.45$ .

È conveniente poter esprimere la stessa differenza di colore in termini di differenza di chiarezza, differenza di croma e differenza di tinta. Tuttavia la differenza tra gli angoli di tinta  $\Delta h$  è una differenza angolare, mentre le altre differenze sono lineari. Per questo motivo non si può usare  $\Delta h$  in combinazione con le altre differenze.

Possiamo però considerare un'altra quantità detta differenza di tinta (da non confondere con la differenza di angolo di tinta) e indicata con  $\Delta H^*$ , che si ricava scrivendo la differenza di colore in questo modo

$$\Delta E^* = (\Delta L^{*2} + \Delta C^{*2} + \Delta H^{*2})^{1/2}$$

e dunque  $\Delta H^*$  si può scrivere alternativamente in due modi

$$\Delta H^* = (\Delta E^{*2} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2})^{1/2}$$
  
$$\Delta H^* = (\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C^{*2})^{1/2}$$

Nell'esempio indicato  $\Delta H^*$  vale 1.25. A questo punto è possibile scrivere la differenza di colore in funzione delle differenze di chiarezza, croma e tinta.

In pratica nelle arti grafiche si valuta la differenza colore più o meno come segue:

ΔE* < 1	impercettibile
1 ≤ ΔE* < 2	minima
2 ≤ ΔE* < 3	accettabile
3 ≤ ΔE* < 5	appena accettabile
ΔE* ≥ 5	non accettabile

Come esercizio, consideriamo questi due colori (un ciano al 100% e un ciano al 50%) e calcoliamo le varie differenze.



		camp. 1	camp. 2	Δ
chiarezza	L*	61	79	18
	a*	20	-18	2
	b*	-46	-26	20
croma	C*	46	31	15
angolo di tinta	h	66	55	11
tinta	H*			31
colore	E*			27

### **DIFFERENZA DI COLORE CMC (1984)**

La differenza di colore CIE 1976 ha evidenziato nel tempo alcuni manchevolezze. Sono state così studiate altre formule per la differenze di colore, che illustriamo qui di seguito.

Nel 1984 il *Colour Measurement Committee of the Society of Dyes and Colourists of Great Brit-ain* (CMC) ha sviluppato e adottato una formula basata sui valori L\* C\* H\*. Intesa per l'industria del tessile, la formula CMC l:c consente l'impostazione dei fattori di chiarezza (*lightness*, l) e croma (*chroma*, c). Poiché l'occhio è più sensibile alla chiarezza il rapporto di default l:c è 2:1. È previsto anche un "fattore commerciale" cf che consente una variazione generale della regione di tolleranza. Se cf = 1 i valori  $\Delta E^*$  accettabili sono < 1.

# **DIFFERENZA DI COLORE CIE 1994**

Il comitato tecnico della CIE TC 1-29 ha pubblicato nel 1995 una formula per la differenza di colore indicata come CIE 1994. La formula è simile alla CMC ma le funzioni peso sono basate sui dati di tolleranza RIT/Dupont derivati dagli esperimenti con le vernici per automobili.

Anche in questo caso ci sono i rapporti indicati kL (*lightness*) e kC (*chroma*) e il fattore commerciale, ma solitamente vengono preimpostati in software e non presentati all'utente.

#### **DIFFERENZA DI COLORE CIE 2000**

Si tratta della prima principale revisione della formula CIE 1994. Al contrario di quest'ultima, che assume che L\* rappresenti correttamente la chiarezza. CIE 2000 varia il peso di L\* secondo l'intervallo di chiarezza in cui il colore sta.

Tutte le formule di differenza colore si possono trovare nel sito di Bruce Lindbloom (vedi Riferimenti in fondo al fascicolo).

# Argomenti avanzati

#### **PSICOFISICA**

La psicofisica è lo studio scientifico della relazione tra la misura fisica di uno stimolo e la percezione che tale stimolo evoca. Lo scopo della psicofisica consiste nel misurare quantitativamente grandezze percettive, che sono soggettive.

**.....** 

Come è possibile misurare grandezze soggettive? La cosa può essere spiegata notando che in realtà le percezioni (per esempio la percezione della brillanza) sono simili in tutti gli esseri umani, e dunque ha senso misurarle. La loro misura tuttavia, rispetto alla misura di una grandezza fisica, ha una maggiore incertezza.

All'inizio del 19º secolo il medico tedesco Ernest H. Weber (1795-1878) studiando la percezione della pesantezza, descrisse esplicitamente una cosa per noi ovvia e cioè che un aumento di peso viene percepito non per il suo valore ma in relazione al peso a cui si aggiunge.

Per esempio, se tengo in mano un sacchetto d1 1 kg di zucchero e ne aggiungo un altro da mezzo kg, percepisco nettamente la differenza di peso. Se invece tengo in mano un sacchetto con 10 kg di zucchero, la stessa differenza di peso, mezzo kg, non la percepisco quasi più. Dunque noi non percepiamo il mezzo kg, ma l'incremento rispetto al peso iniziale. Nel primo caso l'incremento è del 50% e nel secondo caso è del 5%. Maggiore è il peso iniziale, maggiore deve essere l'incremento, per poter essere percepito (legge di Weber).

La legge di Weber si applica a tutte le percezioni, compresa quella della brillanza: per esempio, di notte le stelle si vedono perché l'illuminazione del cielo è bassa, e l'intensità della luce della stella è sufficiente per percepirla. Di giorno le stelle non si vedono perché l'intensità della luce della stella si deve confrontare con una illuminazione del cielo molto più elevata.

Stanley Smith Stevens (1906-1973) stabilì che la relazione tra intensità dello stimolo e grandezza percepita fosse un elevamento a potenza, diversa per le diverse percezioni (legge delle potenze di Stevens). La tabella che segue riporta la potenza che mette in rapporto stimolo e percezione per le diverse sensazioni.

SENSO	PERCEZIONE	STIMOLO	POTENZA
udito	rumore	livello di pressione sonora	0,67
gusto	salato	concentrazione di cloruro di sodio	1,4
olfatto	odore	concentrazione di molecole aromatiche	0,6
vista	brillanza	luminanza	1,45

### **FOTOMETRIA SCOTOPICA**

Nel testo precedente ci siamo riferiti alle grandezze fotopiche, che sono le uniche utilizzate in colorimetria. Tuttavia dopo la funzione spettrale di efficienza luminosa fotopica del 1924, è stata definita da CIE nel 1951 una seconda funzione spettrale di efficienza luminosa, quella per la visione scotopica.

La curva scotopica viene indicata con  $V'(\lambda)$  (fig. 24) e caratterizza la sensibilità spettrale dei bastoncelli. Il valore massimo della curve è a 507 nm. Il relativo osservatore viene indicato come CIE standard scotopic photometric observer. In fotometrica scotopica, ad 1 watt alla lunghezza d'onda di 507 nm corrispondono per convenzione 1700 lumen. Poiché le curve di efficienza luminosa sono due, esistono due famiglie di grandezze fotometriche: scotopiche e fotopiche, secondo il tipo di visione, notturna o diurna.

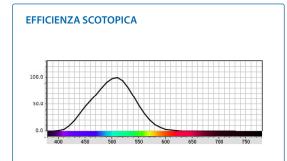


Fig. 24 Curva spettrale di efficienza luminosa scotopica CIE 1924, indicata con  $V'(\lambda)$ .

#### CIELAB È VERAMENTE UNIFORME?

Il sistema di Munsell nella sua *renotation* è spesso usato come base per valutare l'uniformità percettiva di spazi di colori.

Per essere percettivamente uniforme uno spazio deve avere le seguenti proprietà (da Bruce Lindbloom):

- per un dato valore Munsell, tutti gli anelli di croma costante devono essere circolari e i raggi uniformemente distribuiti (cioè devono avere un incremento costante);
- fissata una croma, al variare del valore Munsell gli anelli di quella croma devono coincidere;
- per un dato valore Munsell, tutti i 40 luoghi di tinta costante devono essere segmenti retti equidistanziati ad angoli costanti di 9° (360° / 40 = 9°).
- fissata una tinta, al variare del valore Munsell i segmenti di quella tinta devono coincidere.

Per esempio riportando nel piano ab tutti i campioni di Munsell di valore 5 si ottiene la distribuzione indicata in fig. 25. Se lo spazio Lab fosse percettivamente uniforme, tutti i raggi di tinta costante dovrebbero essere linee rette equidistanziate ad angolo costante di 9°.

### IL CERCHIO DI NEWTON

La colorimetria moderna ha le sue basi negli studi dello scienziato (*natural philosopher*, come si diceva allora) inglese Isaac Newton (1642-1727).

Isaac Newton, oggi considerato il principale artefice del passaggio dalle antiche concezioni aristoteliche alla moderna concezione sperimentale della fisica, ebbe per primo l'intuizione che la relazione tra lo stimolo luminoso e la percezione del colore si potesse rappresentare con un modello matematico.

Prima di Newton era opinione comune che la luce fosse una entità omogenea, non composta, capace di differenti "qualità" secondo la sua interazione con la materia, ma che rimanesse essenzialmente illuminante, con la stessa essenza e lo stesso comportamento. Modificata da rifrazioni e riflessioni, la luce generava le diverse

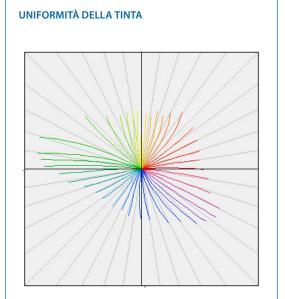


Fig. 25 Le 40 tinte di Munsell a valore 5 visualizzate sul piano ab dello spazio CIELAB. Tratta dal sito di Bruce Lindbloom (vedi Riferimenti in fondo al fascicolo).

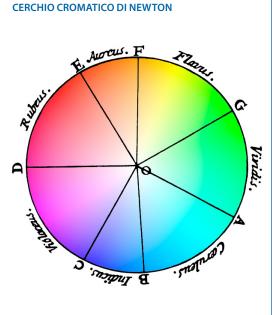


Fig. 26 L'antenato del moderno diagramma delle cromaticità come tracciato da Isaac Newton nel 1666.

percezioni di colore (questo punto di vista viene detto "modificazionismo").

Negli esperimenti che condusse a cavallo tra il 1665 e il 1666, Newton aveva invece osservato che la luce del sole, fatta passare attraverso un prisma, si scompone in una serie di colori (è il fenomeno della "dispersione della luce"), a causa della diversa rifrattività dei raggi che la compongono. Newton chiama questa serie di colori "spettro" (in latino *spectrum*, "immagine", "visione", anche "fantasma") e spiega il fenomeno ipotizzando che nella luce del sole siano contenuti raggi diversi, che hanno diverse rifrattività e che vengono percepiti come diversi colori se osservati separatamente. Quando questi diversi raggi sono mescolati, l'apparato visivo percepisce un colore diverso da quelli che percepirebbe se fossero separati.

Newton ritiene che il modello adeguato per spiegare la percezione del colore sia un cerchio, da allora detto cerchio cromatico di Newton (fig. 26).

Ogni punto del cerchio rappresenta un colore. Sulla circonferenza del cerchio sono disposti i colori spettrali, da rosso a violetto. Tutti i colori all'interno sono non spettrali (cioè ottenuti per mescolanza di spettrali). Nel centro c'è il bianco, e su ogni raggio che unisce il centro con un colore spettrale (sulla circonferenza) sono posti i vari gradi di saturazione di tale colore, dal bianco (saturazione nulla) al colore spettrale stesso (saturazione massima). Nel cerchio Newton indica anche i confini approssimati tra quelli che lui considera i sette colori principali, in relazione alle proporzioni dei colori nello spettro.

In questo modello le diverse mescolanze di due colori nelle varie proporzioni relative stanno sul segmento retto che li unisce. In particolare, se si mescola una quantità (luminanza) a di colore A con una quantità b di colore B il risultato sarà una quantità a+b del colore M rappresentato dal punto che sta sul segmento AB in modo tale che AM stia a MB come b sta ad a.

Newton stesso era conscio del fatto che il suo modello era da perfezionare, e che la regola fosse

abbastanza rigorosa per la pratica, sebbene non matematicamente rigorosa.

Newton insomma fissò i principi fisici della scienza (della misura) dei colori, e

se quei principi sono tali che a partire da essi un matematico può determinare tutti i fenomeni dei colori che possono essere causati dalla rifrazione [...] io suppongo che la scienza dei colori sarà ammessa matematicamente.

Dovettero tuttavia passare più di 150 anni prima che sulle fondamenta gettate da Newton, un matematico tedesco, Hermann Grassmann, iniziasse a costruire le mura maestre della scienza della misura dei colori.

### Riassunto

#### RADIAZIONE VISIBILE

La CIE [9] ha determinato l'intervallo di lunghezze d'onda della radiazione visibile tra 360 e 830 nm, ma per scopi pratici ci si può limitare all'intervallo da 380 a 780 nm.

#### GRANDEZZE SPETTRALI E INTEGRALI

L'occhio funziona in modo "integrativo", cioè somma tutti gli stimoli luminosi, di qualunque lunghezza d'onda. Per quantificare una grandezza spettrale vengono sommati i valori ad ogni lunghezza d'onda.

#### **GRANDEZZE RADIOMETRICHE**

Le grandezze radiometriche riguardano l'energia elettromagnetica, senza tener conto della sensibilità spettrale dell'occhio umano. Le grandezze radiometriche sono:

- energia radiante (joule, J)
- flusso radiante (watt, W)
- intensità radiante (watt allo steradiante, W/sr)
- emettenza radiante (watt al metro quadrato, W/m²)
- irradianza (watt al metro quadrato, W/m²)
- radianza (watt allo steradiante al metro quadrato, W/sr m²)

# **GRANDEZZE FOTOMETRICHE**

Sulla base della sensibilità spettrale dell'occhio umano alla radiazione visibile, dalle grandezze radiometriche vengono derivate due famiglie di grandezze fotometriche (scotopiche e fotopiche). La radiazione visibile adattata secondo la sensibilità dell'occhio si chiama luce. Le grandezze fotometriche sono:

- quantità di luce (lumensecondo, lm s)
- flusso luminoso (lumen, lm)
- intensità luminosa (candela, cd)
- emettenza luminosa (lumen al metro quadrato,  $lm/m^2$ )
- illuminamento (lux, lx)
- luminanza (candele al metro quadrato, cd/m²)

Ad 1 watt corrispondono, nel caso fotopico 683 lumen, nel caso scotopico 1700 lumen.

#### **ILLUMINANTI**

La CIE [9] ha definito diversi illuminanti standard per gli scopi della fotometria e colorimetria. i più usati sono quelli della serie D (*daylight*, luce del giorno).

#### **CORPI**

Si possono classificare in

- autoluminosi (emettono luce);
- non autoluminosi;
  - opachi (la luce viene riflessa);
  - trasparenti (la luce viene trasmessa).

Quando la luce arriva a contatto con un corpo non autoluminoso, una parte viene assorbita, una parte riflessa e una parte trasmessa. Si fa riferimento a tre corpi ideali, l'assorbitore perfetto, il diffusore perfetto, il trasmettitore perfetto.

#### SENSIBILITÀ DEI CONI

La CIE ha definito nel 1931 le curve di sensibilità dei tre tipi di coni.

# **PSICOFISICA E COLORIMETRIA**

La colorimetria è una parte della psicofisica, la scienza che mette in relazione energia fisica con il percepito. Fissati tre primari (reali o immaginari) si possono ricavare i valori di tristimolo XYZ per ogni stimolo monocromatico, e dunque per ogni stimolo eterocromatico (che è somma di stimoli monocromatici). Dallo spazio XYZ si può ricavare il diagramma delle cromaticità Yxy.

#### **PSICOMETRIA**

Dato un valore di tristimolo XYZ e il valore di tristimolo di un bianco di riferimento si può convertire il valore XYZ in L\*a\*b. L\* misura l'attributo percettivo chiarezza (solo per colori non isolati). Convertendo i valori (a\*, b\*) in coordinate polari si ottengono i valori (C\*, h) che misurano gli attributi percettivi di tinta e croma (quest'ultimo solo per i colori non isolati).

Nello spazio L\*a\*b\* e nel suo derivato L\*C\*h, il valore di L\* si correla con la chiarezza, C\* con la croma e h con la tinta in modo uniforme.

ATTRIBUTI PERCETTIVI E LORO MISURE APPROSSIMATE						
ATTRIBUTO PERCETTIVO		MISURA APPROSSIMATA				
ita	eng	UNIFORME	NON UNIFORME			
Brillanza	Brightness		Luminanza			
Chiarezza	Lightness	CIE 1976 chiarezza L*	Fattore di luminanza			
Tinta	Hue	CIE 1976 angolo di tinta h	Lunghezza d'onda dominante			
Pienezza	Colorfulness					
Croma	Chroma	CIE 1976 croma C*				
Saturazione	Saturation		Purezza			
Tinta e saturazione	Hue and saturation		Cromaticità x, y			
Tinta e croma	Hue and chroma	Crominanza a*, b*				

Lo spazio CIE 1976 o CIELAB è uno spazio (a) uniforme, (b) che tiene conto dell'adattamento al bianco.

#### **CORRELATI PERCETTIVI**

Nella tabella della pagina successiva sono riportati gli attributi percettivi del colore, in italiano ed inglese, e le loro misure colorimetriche approssimate.

In pratica le misure utili per i colori non isolati sono

- L\*, C\*, h (chiarezza, croma, tinta);
- X, Y, Z (tristimolo, luminanza).

Gli attributi chiarezza e croma non si applicano ai colori isolati, e quindi nemmeno le misure del fattore di luminanza e CIE 1976 chiarezza e croma.

# **DIFFERENZE DI COLORE**

Sono state proposte quattro formule per il calcolo della differenza tra due colori: CIE 1976, CMC, CIE 1994 e CIE 2000.

# DA RICORDARE

 Esiste un unico spazio XYZ 1931; esistono diversi spazi CIELAB, uno per ogni bianco di riferimento.

#### Riferimenti

Di seguito sono indicati alcuni riferimenti per trovare ulteriori informazioni. Gran parte dei riferimenti sono in inglese, la letteratura italiana sul colore è mediamente povera.

#### **SITI WEB**

Commission Internationale de l'Eclairage Il sito ufficiale della CIE, che ha sede a Vienna, in Austria

http://www.cie.co.at

### Munsell Color Science Laboratory

Il sito del laboratorio di scienza del colore del RIT (*Rochester Institute of Thechnology*) di Rochester, nello stato di New York (US). Nella sezione Resource sono scaricabili, tra l'altro, i dati spettrali degli illuminanti e osservatori CIE su fogli Excel.

http://mcsl.rit.edu

# Bruce Lindbloom

Contiene una interessante raccolta di calcolatori colorimetrici Java oltre a numerose informazioni sugli spazi colore e su altri argomenti relativi alla colorimetria.

http://www.brucelindbloom.com

#### Color & Vision Database

Raccolta dei dati scientifici più aggiornati relativi al colore e alla visione, con numerose funzioni (CIE, fotorecettori, filtri, fotopigmenti) tabulate e scaricabili in diversi formati. Curato da ricercatori dell'Università di Londra.

http://www.cvrl.org

### **TESTI CONSIGLIATI**

[1] Claudio Oleari (a cura di), 1998 Misurare il colore Hoepli

L'unico testo in italiano sulla scienza del colore, raccoglie esposizioni accurate dei vari settori (fisica, percezione, colorimetria, strumentazione, matematica). [2] Günter Wyszecki, W. S. Stiles, 1982 *Color Science* Wiley, 2ª ed.

Anche se risale al 1982, è il testo che viene internazionalmente considerato "la bibbia" della scienza del colore. Di complessa lettura, ricco di riferimenti, tavole, formule.

#### [3] Roy S. Berns, 2000

Principles of Color Technology Wiley, 3ª ed. Libro di testo universitario americano, contiene molte informazioni ed è ampiamente illustrato a co-

#### [4] R. W. G. Hunt, 1998

Measuring Colour Fountain Press, 3ª ed Testo classico sulla colorimetria e sulle basi della scienza del colore.

### [5] Mark D. Fairchild, 1998

Color Appearance Models Addison Wesley Il più importante testo sull'apparenza del colore, con un'ampia parte introduttiva alle basi della scienza del colore.

### [6] David H. Hubel, 1989

Occhio, cervello e visione Zanichelli. Scritto dal premio Nobel 1981 per la medicina, è un testo divulgativo sulla visione.

### [7] Gianni Forcolini, 1988

Illuminazione di interni Hoepli

Un testo italiano che tratta con competenza e chiarezza la luce e le grandezze fotometriche nelle applicazioni.

[8] P. Green, L. MacDonald (a cura di), 2002 Colour Engineering Wiley

# [9] CIE 15:2004

Technical Report Colorimetry
Il documento più recente di CIE con i dati e le procedure raccomandate in colorimetria.