

LA FISICA DEL COLORE

CON ELEMENTI DI COLORIMETRIA

Gli studenti conoscono il fenomeno della **dispersione di un fascio di luce bianca** attraverso un prisma. Dunque hanno un'idea del fatto che il bianco non è un colore puro, ma una mescolanza di tanti colori puri. Sanno inoltre che a diverse lunghezze d'onda corrispondono (nel campo del visibile) diverse sensazioni di colore.

Lo studio del colore è relativamente semplice se parliamo di **luci monocromatiche**, ossia luci costituite da un'unica lunghezza d'onda λ ¹. L'occhio umano percepisce le λ comprese tra 380 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) e 780 nm, dal violetto al rosso, attraverso tutti i colori dell'arcobaleno.

In effetti, se avessimo a disposizione una radiazione costituita da un'unica lunghezza d'onda, potremmo individuare un unico colore puro, ossia saturo (le luci monocromatiche hanno ovviamente il massimo di saturazione). L'odierna tecnologia ci consente in effetti di avere delle sorgenti di luce monocromatica: i laser. I laser sono infatti sorgenti di luce monocromatica, in genere di elevato contenuto energetico, impiegati in campo scientifico, medico e industriale².

Le onde monocromatiche sono un fenomeno praticamente inesistente in natura: qualsiasi sorgente di luce emette infatti contemporaneamente diverse lunghezze d'onda. Gli studenti sanno già qualcosa a proposito degli **spettri di emissione a righe** (per le sorgenti gassose) e degli **spettri continui** (per le sorgenti solide e per le stelle). L'emissione luminosa di una sorgente non monocromatica viene rappresentata mediante un grafico che mostra la potenza (l'energia emessa nell'unità di tempo) in relazione alle diverse λ , la cosiddetta **curva spettrale**. Si veda la fig. 1 dove sono poste a confronto la composizione della luce emessa da una lampadina a filamento di tungsteno (grande prevalenza del rosso) e quella di una lampada fluorescente (qui, in particolare, le barre mostrano dei picchi di radiazione caratteristici del vapore di mercurio che si trova nel tubo, mentre la parte continua rappresenta il contributo dei fosfori: si tratta quindi di uno spettro a righe sovrapposto ad uno continuo).

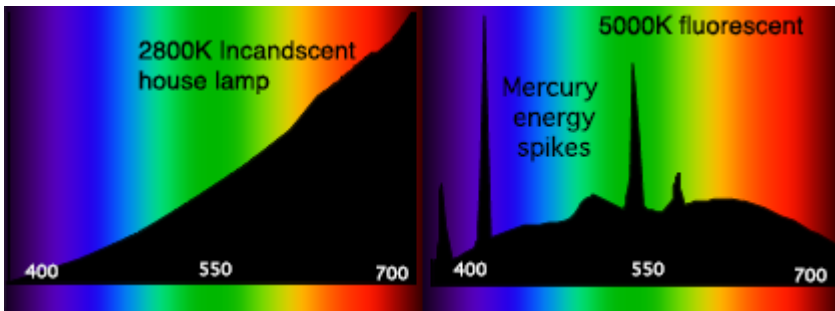


Figura 1: curve spettrali di una lampadina a filamento di tungsteno e di una lampadina fluorescente

Nella fig. 2 sono poste a confronto le curve spettrali delle sorgenti convenzionali³ CIE D₆₅ (è un illuminante standard che simula la luce diurna) e CIE A (che simula la luce di una lampadina al tungsteno).

¹ Si tratta della lunghezza dell'onda elettromagnetica, essendo la luce costituita da un campo elettrico e uno magnetico variabili, tra loro concatenati, che si propagano con le modalità di un'onda.

² Il fascio emesso da un laser è inoltre coerente (ossia: in fase) a differenza della normale luce. Esistono laser a gas, a cristalli, a soluzione di coloranti, etc. In campo artistico vengono usati laser a elio-neon (rosso 633 nm) e ad argon (verde 514 nm o blu-verde 488 nm). I laser a colorante possono produrre ogni λ compresa tra 400 e 750 nm. I laser richiedono comunque delle precauzioni nell'uso, anche quelli al di sotto dei 5 mW di potenza talvolta usati dagli artisti.

³ Sono state fissate e realizzate delle sorgenti convenzionali di luce per poter misurare i colori in condizioni standard; corrispondono grosso modo alla luce solare del mezzogiorno (CIE ILL B), alla luce diurna del cielo (CIE ILL C, la più usata), alla luce di una lampadina da 500 W a filamento di tungsteno (CIE ILL A), etc. La sigla CIE significa Commission Internationale d'Eclairage.

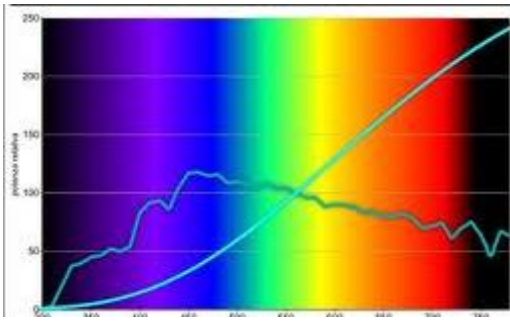


Figura 2: curve di emissione degli illuminanti standard CIE D₆₅ e CIE A

* * * * *

I **materiali opachi** sono la maggior parte di quelli che ci circondano. La luce che li colpisce è modificata dai pigmenti della vernice superficiale e può proseguire il suo cammino in tre modi: una parte è riflessa all'indietro, senza penetrare in realtà nella superficie (la sua composizione spettrale è virtualmente immutata rispetto quella incidente)¹; la maggior parte della luce incidente invece penetra nella superficie del corpo e può essere assorbita o riemessa dalle particelle di pigmento in modo selettivo (ossia: solo alcune lunghezze d'onda vengono assorbite; le altre vengono rimesse). L'assorbimento selettivo è determinato dalla struttura molecolare del pigmento; la luce assorbita è convertita in calore e scompare mentre la luce riemessa, quella che raggiunge la nostra vista, avrà una composizione spettrale molto diversa rispetto quella incidente. Solo una vernice bianca idealmente perfetta non modifica la composizione della luce restituita all'ambiente. Dunque, se la luce diurna (che ci appare bianca) colpisce un oggetto rosso (opaco), la luce che ne riemerge sarà in parte bianca (luce riflessa dalla superficie) e in parte rossa (luce diffusa dopo l'assorbimento selettivo): dalla diluizione con la componente bianca (acromatica) dipende il grado di purezza, cioè la saturazione, del colore rosso.

Mediante gli spettrofotometri si misura la quantità di luce riemessa dal materiale ad intervalli di 5 - 10 nm, ottenendo così le **curve di riflessione spettrale**. E' ovvio che una curva del genere dipende non solo dall'assorbimento selettivo prodotto dal materiale, ma, prima di tutto, dalla composizione della luce incidente! Si osservi la fig.3: lo stesso colorante (magenta di alizarina) è illuminato una volta dalla luce diurna (CIE ILL C) e una volta dalla luce di una lampadina ad incandescenza (CIE ILL A): poiché la luce della lampadina è molto rossa e poco blu, anche la luce diffusa dal pigmento è molto rossa e povera di blu (si usa dire: "è calda"), per cui il pigmento stesso appare rosso piuttosto che magenta.

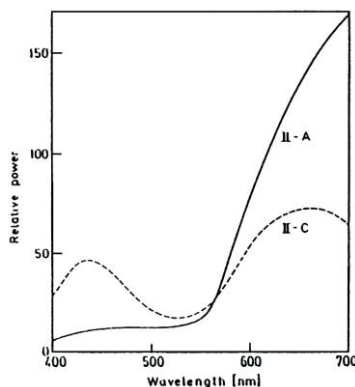
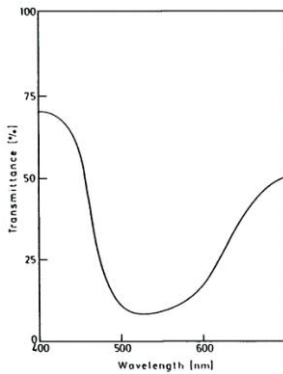


Figura 3: lo stesso pigmento (magenta) visto sotto due luci diverse

¹ La luce può essere riflessa in modo diffuso se la superficie è grezza o in modo speculare se la superficie è liscia.



I fenomeni che accadono nei **materiali trasparenti** (plastiche o vetri colorati) sono del tutto analoghi: parte della luce incidente viene riflessa all'indietro, parte viene assorbita e convertita in calore, parte attraversa il materiale, riemergendo dalla parte opposta dopo un assorbimento selettivo. Si parla allora di luce trasmessa. La trasmittanza di un materiale misura la frazione di luce che attraversa il materiale da parte a parte: si parlerà allora di **curve di trasmittanza**.

Figura 4: curva di trasmittanza di un vetro magenta (mescolanza di luce blu e rossa)

Accenniamo infine ai **materiali fluorescenti**: vernici, inchiostri, plastiche usati spesso nella pubblicità e per ottenere colori altrimenti non producibili in determinate condizioni di illuminazione (per es., con luce diurna). In questi materiali parte della luce (visibile di breve λ , ma soprattutto quella ultravioletta) viene temporaneamente assorbita per essere poi riemessa a maggiore lunghezza d'onda. Tale luce si somma a quella normalmente diffusa (o trasmessa, se il materiale è trasparente). La fluorescenza è ben percepibile se l'ambiente circostante è abbastanza buio, ma avviene anche in condizioni di piena illuminazione senza che la si avverta come tale. E' ovvio che eliminando dal fascio incidente la componente UV e, più in generale, quella di piccola λ , mediante dei filtri, il fenomeno della fluorescenza non può avvenire.

* * * * *

Nella **percezione del colore** sono interessati in realtà sia i raggi di luce sia il nostro sistema visivo e cerebrale: si tratta di un'interazione tra uno stimolo (la luce che raggiunge la retina) ed un responso (la percezione che si ottiene a livello cerebrale dopo che la retina ha trasmesso un segnale al cervello attraverso il nervo ottico). La luce, come detto, può provenire direttamente da una sorgente oppure può essere riflessa/trasmessa da un corpo ed è rappresentata mediante le curve di distribuzione spettrale che esprimono la quantità di energia che viene trasmessa per ogni lunghezza d'onda. Nel seguito dovremo tenere conto però anche delle caratteristiche della sensibilità dell'occhio umano: adotteremo quindi un occhio umano tipico, standard, come riferimento. La **sensibilità dell'occhio umano** standard (in luce diurna) è quella raffigurata in fig. 5: parte da 380 nm, ha un massimo intorno a 555 nm e decresce sino ad annullarsi a 780 nm. La sensibilità a 510 nm (verde) e a 610 nm (arancio-rosso) vale circa la metà (rispetto al massimo); a 472 nm (blu) e a 650 nm (rosso) vale un decimo¹.

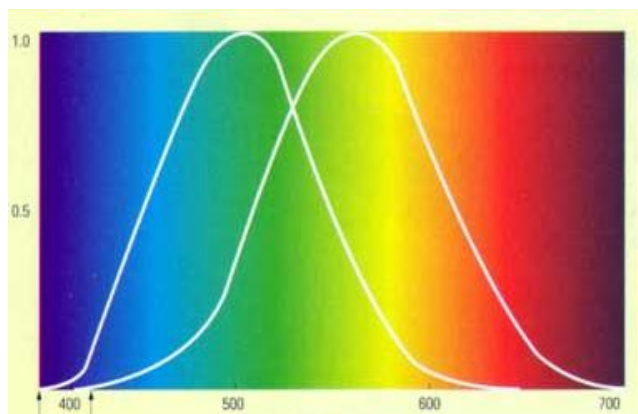


Figura 5: curva di sensibilità dell'occhio umano (a sinistra la visione scotopica; a destra la visione fotopica)

¹ Questa sensibilità vale per la cosiddetta visione fotopica, ossia con alto livello di luce, come in una giornata luminosa; a bassa luminosità, come di notte (visione scotopica), la sensibilità è molto differente, spostata verso le λ più corte, ossia verso il blu.

Dunque, la luce, con la sua composizione di diverse lunghezze d'onda, raggiunge l'occhio, è assorbita dalle cellule della retina (i coni e i bastoncelli)¹ e produce un segnale che viene trasmesso al cervello: ne deriva quindi una sensazione che ci rende consci di certe caratteristiche della luce: a tali caratteristiche diamo il nome di "colore". In altre parole, la caratteristica della luce che genera in noi la sensazione del colore è la sua distribuzione energetica spettrale.

Il colore potrebbe dunque essere interpretato come una proprietà degli oggetti (un pomodoro ha la proprietà di essere rosso) o come proprietà della luce (la luce emessa da un semaforo è rossa): entrambi questi concetti, per quanto comunemente accettati, non sono esatti. Già Newton aveva rilevato che i raggi di luce in realtà non sono di per sé colorati: è la nostra percezione visiva che attribuisce loro un colore.

* * * * *

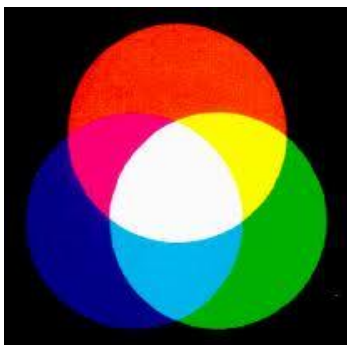
I colori isolati possono essere descritti mediante tre parametri:

la **tinta**: è quel qualcosa che ci permette di attribuire un nome ad un colore (è come, nella percezione acustica, il riconoscimento di una nota musicale o il riconoscimento di un sapore nella percezione gustativa);

la **saturnazione**: è la valutazione dell'ammontare relativo di una tinta rispetto la componente acromatica bianca (qualcosa che assomiglia alla purezza di un colore);

la **luminosità** (o **chiarezza**): è un fattore questo che può essere influenzato dal livello circostante di illuminazione: può essere valutata esattamente solo se l'oggetto è isolato. E' quella grandezza che ci permette di dire se la luce proveniente da un oggetto è debole o abbagliante².

I colori dell'arcobaleno sono detti **colori spettrali**. Ciascuno di essi, preso isolatamente, può essere pensato come generato da una luce monocromatica. Ma noi sperimentiamo comunemente altre tinte sature che non possono essere ottenute come luci monocromatiche (non fanno parte cioè della dispersione della luce bianca): esse sono rappresentate dalla famiglia dei viola, magenta e porpora e sono detti **colori non spettrali**. Per ottenerli basta mescolare in diverse proporzioni radiazioni rosse e blu.



Veniamo ora alla composizione (sovrapposizione) delle luci colorate, detta anche **sintesi additiva**. Si immagini di proiettare su una parete bianca diversi fasci di luce colorata, sovrapponendoli almeno parzialmente. Nell'ipotesi ideale la parete dovrebbe riflettere la totalità della luce che la colpisce, con un aumento di brillantezza nella zona dove due o più dischi colorati si vanno a sovrapporre.

Figura 6: schema della sintesi additiva

In generale, se le luci hanno tinte diverse si otterrà come combinazione una tinta intermedia. Ad es.: rosso + verde darà un giallo-verde o un giallo o un arancio, a seconda delle relative intensità dei fasci di partenza. Sovrapponendo però due luci con tinte sensibilmente diverse (agli opposti del cosiddetto "cerchio dei colori"), ad es.: rosso + ciano (verde-blu), si otterrà un responso senza tinta, cioè un bianco. In questo caso si parla di **colori complementari**.

¹ Gli studi hanno dimostrato che esistono tre tipi di coni, sensibili rispettivamente al blu, al verde e al rosso, per cui la retina riceverebbe tre stimoli simultaneamente. Questo risultato neuro-fisiologico giustificerebbe quindi la scelta dei tre colori primari di cui si parla in seguito.

² Si può però introdurre il termine luminosità in senso differente, valutando l'oggetto in relazione all'ambiente e agli altri oggetti colorati circostanti: allora significa "essere più chiaro/scuro di...".

Fasci di luce possono mescolarsi in modo additivo nel processo visivo anche quando, pur non sovrapponendosi durante il loro cammino, stimolano la stessa porzione di retina contemporaneamente. Si tratta in questo caso di fasci molto sottili che colpiscono simultaneamente il mosaico delle cellule ricettive: la retina opera una sorta di mescolanza, detta media spaziale. E' analogo a quello che succede su uno schermo televisivo, dove l'immagine è costituita da una miriade di piccoli punti luminosi, ciascuno portatore di un singolo colore (i colori emessi sono in realtà tre).

La composizione sottrattiva dei colori (**sintesi sottrattiva**) si ottiene invece con un fascio di luce dal quale siano rimosse, cioè assorbite, differenti quantità di energia a diverse lunghezze d'onda. Un fascio di luce solare, ad esempio, può attraversare una successione di due vetri colorati (due filtri), uno verde e uno giallo, per produrre una luce verde-gialla, essendo tutte le altre lunghezze d'onda praticamente assorbite. Lo stesso processo essenzialmente avviene quando si mescolano due vernici, ad esempio ad olio, una verde ed una gialla. In entrambi i casi il contenuto energetico della radiazione emergente è sempre diminuito, in quanto parte della luce è assorbita (dai vetri o dai pigmenti). Ad esempio: mescolando pigmenti blu e gialli accade che quelli blu assorbono soprattutto il rosso, l'arancio e il giallo, mentre quelli gialli assorbono soprattutto il blu e il violetto e quindi il colore emergente sarà l'unico non sottratto, ossia il verde (mescolando invece in modo additivo luci blu e gialle si ottiene il bianco!). Sempre per sintesi sottrattiva, se cerchiamo di ottenere il colore giallo, mescolando pigmenti rossi e verdi, a causa della sottrazione di luminosità otteniamo in realtà un marrone (ecco perché nella tradizione pittorica il giallo viene considerato un colore primario!).

Sono comunemente considerati dagli artisti **colori primari** il rosso, il giallo ed il blu. Mescolando vernici di questi tre colori, più il bianco ed il nero, si possono effettivamente realizzare (per sintesi sottrattiva) delle misture che riproducono una vasta gamma di tinte, con varie saturazioni e luminosità. Ma volendo trattare il colore dal punto di vista fisico, ossia delle luci, operando quindi con la sintesi additiva, i colori primari cambiano. Va detto innanzitutto che l'esigenza fondamentale per la scelta di tre colori primari è che nessuna combinazione di due di loro possa dare il terzo (se così fosse, di primari ne basterebbero due!). Inoltre si richiede che la loro composizione possa effettivamente fornire il più ampio ventaglio di tinte possibili e, in particolare, che la somma di tre fasci di uguale intensità (misurata dalla sensibilità dell'occhio umano) dia il bianco. Si è sperimentato che la terna in grado di soddisfare tutte queste caratteristiche è quella costituita dalle seguenti tre luci monocromatiche: rosso (700 nm), verde-giallo (535 nm) e violetto (400 nm). Questi tre colori sono dunque assunti come **primari additivi** e sono generalmente indicati, in modo approssimato, come rosso, verde e blu.

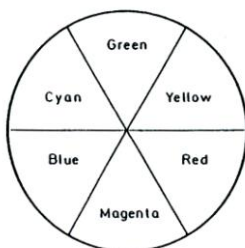


Figura 7: cerchio dei colori con i tre primari additivi (rosso, verde e blu) ed i rispettivi complementari (ciano, magenta e giallo)

In molte situazioni interessano i **primari sottrattivi**: si è sperimentato che la maggior gamma di tinte è ottenibile partendo proprio dalla terna costituita dai complementari dei tre primari additivi, ossia ciano, magenta e giallo. In effetti questi sono i colori usati nella stampa (si parla di quadricromia per l'aggiunta del nero).



Figura 8: schema della sintesi sottrattiva

* * * * *

Assumendo un occhio umano standard come riferimento e partendo dal presupposto che occorrono tre colori primari per ottenere tutte le altre tinte, i fisici sono riusciti, con un procedimento matematico abbastanza complesso, a trasformare una qualunque distribuzione spettrale di luce nel colore corrispondente, collocandolo in un sistema di assi cartesiani mediante due coordinate. Si è ottenuto così il **diagramma di cromaticità CIE 1931**, dalla tipica forma a ferro di cavallo (figure 9 e 10). Esso contiene tutte le cromaticità possibili: i punti del contorno curvo rappresentano i colori monocromatici puri (saturi), dal violetto al rosso; la base rettilinea inferiore rappresenta dei colori saturi non monocromatici, che nascono dalla mescolanza di luci blu e rossa (i porpora e magenta, colori non spettrali, ossia non contenuti nell'arcobaleno). Spingendosi verso l'interno della figura diminuisce la saturazione: i colori si mescolano e sbiadiscono andando verso la zona centrale che rappresenta il bianco.

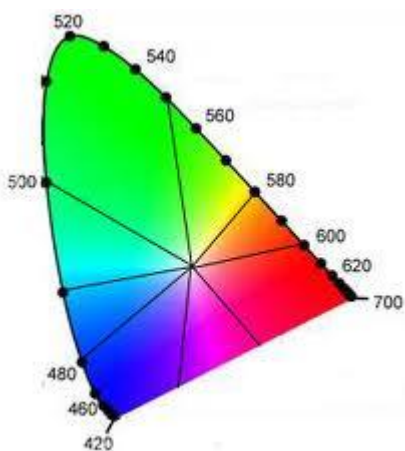


Figura 9: il diagramma di cromaticità CIE 1931

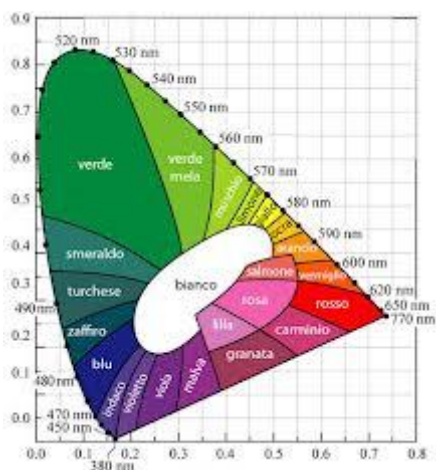


Figura 10: diagramma di cromaticità CIE 1931 con la mappa dei colori

Da notare che, trattandosi della composizione di fasci luminosi, non compaiono tinte come il verde oliva, il rosso mattone, il marrone, colori ottenibili solo per sintesi sottrattiva; la luce non può essere percepita infatti come fattore scurente, ossia grigia o nera!

Il diagramma individua quindi, mediante due coordinate, la cromaticità, ovvero tinta e saturazione. Per definire in modo completo il colore bisognerebbe aggiungere la luminosità (chiarezza), ottenendo allora un diagramma tridimensionale. Il diagramma di figura 11 rende l'idea della tridimensionalità in quanto vi sono riportate le curve di luminosità costante.

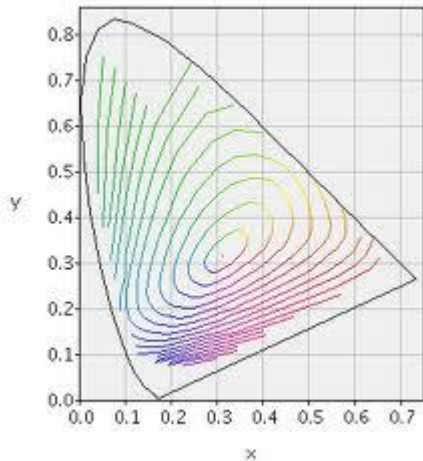


Figura 11: diagramma CIE 1931 con i livelli di diversa luminosità

Nel sistema CIE ogni colore viene allora contraddistinto dalle due coordinate x e y + la luminosità. Ad es: il rosso cadmio viene indicato: CIE 1931 (0,53; 0,34; 0,208), 0,208 è la luminosità relativa al bianco (sarebbe il 20,8%). Nel caso di corpo riflettente si deve specificare anche la sorgente illuminante (es: CIE ILL C).

Mediante il diagramma si possono facilmente individuare i colori complementari per mescolanza additiva. Ricordiamo che sono detti complementari due fasci di luce di diversa tinta quando, dosate le loro intensità, producono, sovrapponendosi, un disco bianco (su uno schermo ovviamente bianco). Tali coppie si individuano quando il segmento che unisce i loro punti attraversa la regione acromatica centrale, a maggior ragione se passa per il punto bianco (E per le luci colorate) (fig. 12). Dunque bastano due luci monocromatiche per ottenere la luce bianca, non occorre affatto mescolare tutti i colori come comunemente si crede!

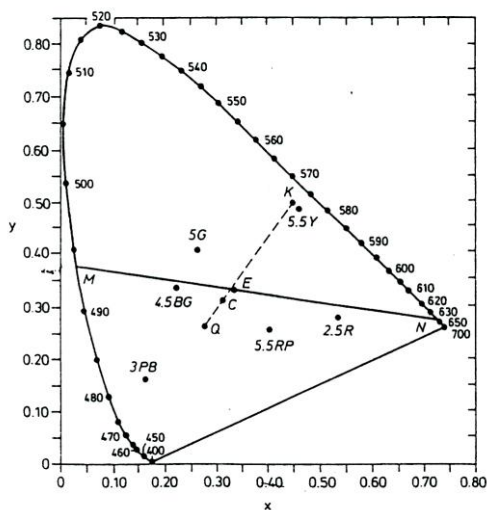


Figura 12: esempi di colori complementari (segmento MN e segmento QK)

L'uso più frequente del diagramma CIE è dunque quello di prevedere la cromaticità risultante dalla mescolanza di due o più fasci luminosi colorati.

Un esempio di mescolanza additiva dei colori è dato dalle immagini televisive, ma anche dalla cosiddetta tecnica puntillistica in pittura. Nella TV vengono emessi raggi rossi, verdi e blu, simultaneamente o in rapidissima successione, dalle particelle di fosforo che riempiono fittamente lo schermo.

Abbiamo già detto che l'area centrale corrisponde alla sensazione di bianco. Si noti che una lampadina a filamento di tungsteno (CIE ILL A) non rientra propriamente nella regione bianca, bensì risulta debolmente giallo-arancio (è l'adattamento dell'occhio che fa sì che possa apparire bianca!).

Se invece mescoliamo pigmenti o vernici (sintesi sottrattiva) le linee di mescolanza non risultano più rette e non attraversano mai la zona acromatica: nessuna mescolanza di pigmenti colorati può dare infatti il bianco, quindi il diagramma CIE non ci permette di fare previsioni sui risultati delle mescolanze. Per tracciare tali curve di mescolanza occorrono diversi punti da determinare sperimentalmente. Si vedano le figure 13 (con annessa tabella) e 14. La fig. 13 presenta sette curve di mescolanza tra pigmenti colorati e un pigmento bianco (bianco titanio). (Si noti la curva 6: in una prima fase della mescolanza (da 6A a 6B) si ottiene un aumento della purezza).

	Rapporto pigmento colore/pigmento bianco	Nome colore ISCC-NBS
1-A	100/0	Strong greenish yellow
1-B	50/50	Light greenish yellow
1-C	10/90	Pale greenish yellow
2-A	100/0	Moderate yellow
2-B	33/67	Brilliant yellow
2-C	5/95	Pale yellow
3-A	100/0	Vivid reddish orange
3-B	33/67	Strong reddish orange
3-C	5/95	Strong yellowish pink
4-A	100/0	Deep reddish brown
4-B	33/67	Strong red
4-C	10/90	Strong purplish red
5-A	100/0	Very deep red
5-B	25/75	Deep purplish red
5-C	5/95	Light reddish purple
6-A	100/0	Blackish purple
6-B	33/67	Strong blue
6-C	5/95	Light purplish blue
7-A	100/0	Very dark greenish blue
7-B	33/67	Strong bluish green
7-C	5/95	Brilliant bluish green

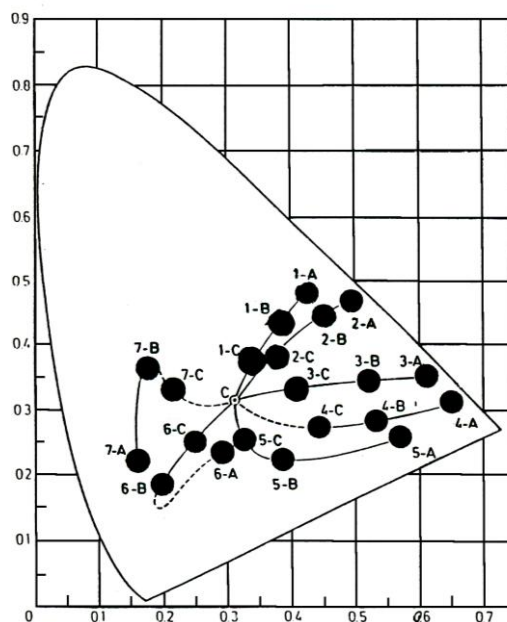


Figura 13: esempi di mescolanze di vernici (7 pigmenti puri vengono mescolati col pigmento bianco)

La fig. 14 mostra invece diversi tipi di linee ottenute mescolando coppie di pigmenti colorati (senza il bianco). Si noti l'ampia varietà di verdi ottenuti nella linea I e nella linea III (quest'ultima rappresenta dei pigmenti ad olio usati a partire dall' 800: per la prima volta i pittori furono in grado di rappresentare tutte le sfumature di verde presenti in natura; si tratta della mescolanza tra il blu di Prussia P e il giallo cromo K: si noti che, pur essendo punti complementari rispetto a C, la loro mescolanza non dà il grigio neutro).

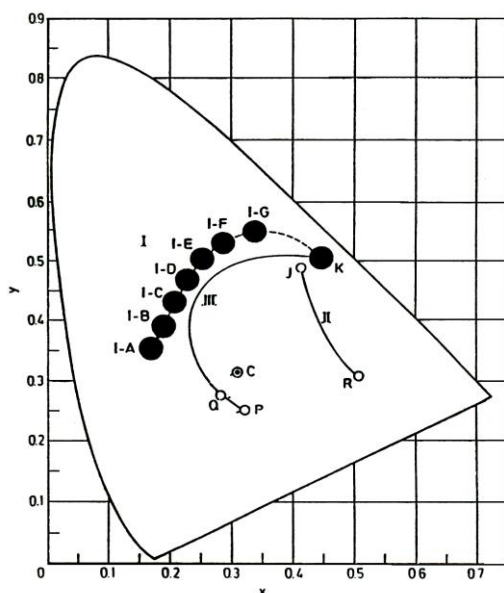


Figura 14: altri esempi di mescolanze di vernici

Nei procedimenti di stampa di riviste, depliant, libri, etc. è spesso usato il processo a quattro colori; esaminando con una lente di ingrandimento una stampa a colori su carta bianca si potranno individuare i puntini, di diverse dimensioni, di colore ciano, giallo, magenta e nero, oltre agli interstizi vuoti (bianchi). Vi potranno essere anche sovrapposizioni parziali di questi puntini al fine di ottenere (per sottrazione) ulteriori colori. La percezione della pagina a normale distanza di lettura avviene dunque per sintesi additiva, più precisamente per media spaziale.

Nelle diapositive e nelle stampe fotografiche il colore deriva da una sintesi sottrattiva. Le dia e le stampe consistono infatti di tre strati, ciascuno contenente la stessa immagine colorata a tinta unica (ciano, giallo e magenta), che vengono attraversati dalla luce. Nelle stampe, in particolare, la luce penetra attraverso i tre strati, è riflessa dal supporto bianco lucido di base e riattraversa i tre strati giungendo al nostro occhio. La gamma di colori ottenibile per trasparenza è molto più ampia di quella ottenibile nella TV ed anche di quella raggiunta dalla stampa in quadricromia.

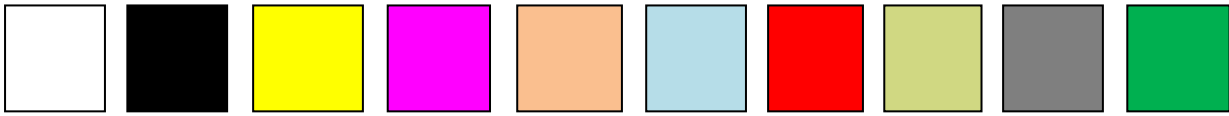
A volte, per rendere i messaggi più evidenti (nella segnaletica di sicurezza o per i richiami pubblicitari, ma anche in campo artistico) si fa ricorso ad accostamenti di colore di grande contrasto.

	Nome colore ISSC-NBS	Lum
1	White	0.90
2	Black	0.01
3	Vivid yellow	0.59
4	Strong purple	0.14
5	Vivid orange	0.36
6	Very light blue	0.57
7	Vivid red	0.11
8	Grayish yellow	0.46
9	Medium gray	0.24
10	Vivid green	0.19
11	Strong purplish pink	0.40
12	Strong blue	0.13
13	Strong yellowish pink	0.43
14	Strong violet	0.10
15	Vivid orange yellow	0.48
16	Strong purplish red	0.15
17	Vivid greenish yellow	0.63
18	Strong reddish brown	0.07
19	Vivid yellow green	0.40
20	Deeo yellowish brown	0.07
21	Vivid reddish orange	0.24
22	Dark olive green	0.04

La tabella mostra una lista ordinata (lista di Kelly) di 22 colori che presentano tra loro il massimo contrasto per tinta o per luminosità: ogni colore contrasta massimamente con quello immediatamente precedente. I primi nove rendono massimo il contrasto anche per i daltonici.

Applicando la lista di Kelly al diagramma CIE, si potrebbe notare che quanto più la linea congiungente due colori passa vicino al punto C, tanto più questi sono tra loro complementari. Se la coppia non apparisse propriamente complementare, vorrebbe dire che il contrasto si basa soprattutto sulla diversa luminosità. Alcune coppie di colori ad alto contrasto producono talvolta uno sgradevole effetto di "vibrazione" (sfarfallio). Questo accade se i due colori sono quasi complementari, di buona purezza e confrontabile luminosità. Utilizzando le coppie successive della lista di Kelly questo fenomeno non dovrebbe accadere (sono infatti coppie ben differenziate per purezza o per luminosità).

Questi i primi dieci colori della lista:



* * * * *

Trattiamo ora un argomento di grande interesse per la **fotografia a colori**. Si considerino due sorgenti di luce di diversa composizione spettrale, tali però da apparire al nostro occhio entrambe bianche: una superficie bianca (o grigia) apparirà bianca (o grigia) sotto entrambe le luci. Ma una superficie colorata selettiva, come ad es. una buccia di limone, apparirà quasi certamente diversa sotto le due luci (ad es.: gialla in luce solare, arancio-rossastra sotto la luce di una lampadina al tungsteno). Mentre l'occhio, guidato dalla memoria, tende a minimizzare questa differenza, una lastra fotografica le evidenzia in pieno. E' necessario allora saper prevedere se un'illuminazione artificiale possa produrre o meno dei cambiamenti rispetto i colori percepiti in luce diurna solare (che è ovviamente il riferimento). Si noti che in verità anche la luce diurna del cielo a nord, cioè del cielo azzurro, è diversa da quella propriamente solare, essendo molto più ricca di blu. I fotografi trovano in commercio diversi tipi di pellicola adatti alle diverse esigenze o ricorrono all'uso di particolari filtri

Diversi tipi di lampade hanno dunque diverse distribuzioni spettrali della radiazione o, come si suol dire, diverse "**temperature di colore**". Il concetto di temperatura di colore si riferisce, più propriamente, alla temperatura di un corpo nero. E' questo un concetto di grande importanza nella fisica teorica¹. Un corpo nero è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione incidente. Può essere realizzato in laboratorio con buona approssimazione prendendo un blocco di materiale refrattario (tipo ceramica) e scavandovi all'interno una cavità, accessibile tramite un piccolo foro: la luce vi entra ma difficilmente riesce ad uscirne. Il corpo nero, oltre ad essere l' "assorbitore" ideale, quando si trova ad una temperatura diversa dallo zero assoluto, diventa un "emettitore" ideale, emettendo la luce con una distribuzione spettrale, variabile a seconda della temperatura, dalla caratteristica forma a campana (curve di Planck, figura 15).

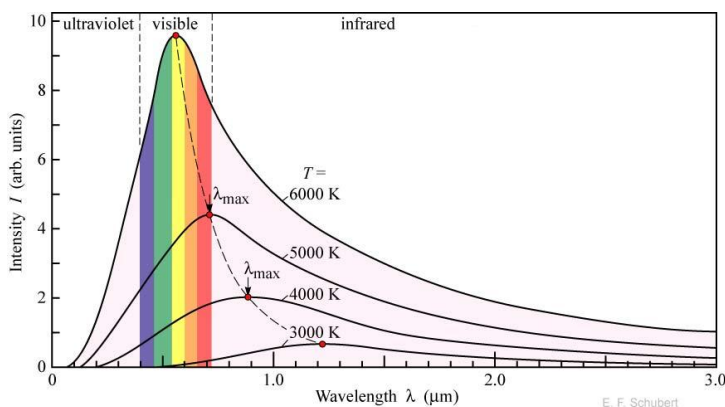
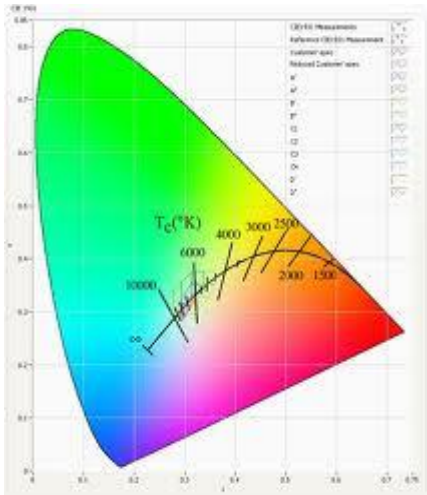


Figura 15: curve di emissione del corpo nero a diverse temperature

La nostra cavità di ceramica, posta in un forno elettrico rende bene il corpo nero: le sue pareti avranno un colore, variabile con la temperatura, che è proprio il colore del corpo nero a quella temperatura: a 500° C il colore è rosso spento; a 750 °C e' rosso-arancio; a 1535 °C (la temperatura di fusione del ferro) è arancio brillante; a 3000 °C comincia ad essere bianco e tende poi progressivamente verso il blu a 10000 °C (sarebbe più corretto usare i gradi della scala Kelvin °K!).

¹ Dallo studio del corpo nero ha preso avvio la meccanica quantistica.



E' importante notare che i colori non dipendono dal materiale impiegato! I punti rappresentativi delle temperature-colore del corpo nero nel diagramma CIE sono mostrati nella figura 16.

Tale curva non è stata in realtà ricavata da dati sperimentali (l'esperienza con i materiali si può fare fino a temperature non troppo elevate), ma è stata ottenuta con considerazioni teoriche sulla struttura della materia dovute a Planck. In effetti la curva sarebbe valida a rigore solo per il corpo nero ideale, ma le sorgenti ad incandescenza (e anche le stelle) si comportano in modo quasi identico al corpo nero. L'area che va da 4000 a 10000 °K viene generalmente considerata come bianca. Una normale lampadina a filamento di tungsteno da 60 W corrisponde al corpo nero di 2856 °K.

Figura 16: diagramma CIE 1931 con le cromaticità del corpo nero a diverse temperature

Si noti che le temperature di colore non hanno necessariamente relazione con l'effettiva temperatura della sorgente! Ad es., in una lampadina la temperatura del filamento è di circa 2500 °K, mentre la temperatura di colore è più elevata; la temperatura di colore del cielo è di 10000 °K e dipende dalla diffusione della luce solare blu da parte delle molecole della atmosfera ma non significa certo che l'aria ha la temperatura di 10000 °K! Nelle lampade a fluorescenza, infine, la luce è emessa da particelle di fosforo bombardate da fasci di elettroni: questa luce non è certo prodotta ad alte temperature!

* * * * *

La nostra percezione dei colori generalmente non avviene nelle condizioni standard previste dalla teoria, di modo che possono generarsi dei responsi talvolta strani ed inaspettati. L'origine di queste variazioni può essere fisiologica o psicologica. Indagheremo brevemente alcuni tra i principali effetti. Gli studenti affrontano solitamente lo studio di questi fenomeni nel corso di Educazione visiva.

Un'esperienza visiva che abbiamo di frequente è l' **adattamento al buio o alla luce**. Passando dalla luce al buio l'occhio può impiegare 20-30 minuti per adattarsi al basso livello di illuminazione. All'inverso, dal buio alla luce, l'adattamento richiede solo un minuto circa.

Qualcosa di simile accade anche quando cambia la caratteristica della luce illuminante, ad esempio passando dalla luce del sole a quella di una lampadina ad incandescenza (si parla allora di **adattamento al colore**). Un magenta con piccola componente blu visto in luce diurna (CIE ILL C), se visto d'improvviso alla luce di una lampadina (CIE ILL A) appare inizialmente rosso-giallo mentre dopo l'adattamento appare praticamente rosso. Ovviamente una pellicola fotografica non mostra tale capacità di adattamento, come già rilevato: bisogna semmai cambiare tipo di pellicola.

Per gli oggetti familiari interviene un ulteriore adattamento, in quanto i colori degli oggetti sono memorizzati e tendono quindi a restare immutati, quasi fossero dei punti di riferimento. Le ricerche hanno anzi dimostrato che la memoria tende ad accentuare la purezza di un colore.

Le superfici bianche o grigio-neutre tendono a mostrare una costanza quasi completa. Tuttavia anche una superficie bianca può assumere una sfumatura "fredda" (verso l'azzurro) quando è illuminata con luce del cielo a nord, oppure una "calda" (verso il rosso) se è illuminata con una lampadina al filamento di tungsteno. Anche una superficie grigia scura, forse inaspettatamente, prende una sfumatura giallastra nel primo caso e bluastra nel secondo. Si è dimostrato infatti che una superficie più luminosa del contesto prende una sfumatura nella direzione della luce

illuminante, mentre una superficie più scura del contesto prende una sfumatura della tinta complementare.

Un altro fenomeno frequente è quello delle **immagini residue** (in inglese: afterimages) detto anche contrasto successivo: quando guardiamo una lampadina accesa o una finestra da cui entra la luce solare e poi volgiamo lo sguardo verso una zona più buia, le immagini restano per alcuni minuti come fantasmi che galleggiano davanti a noi. In molti casi abbiamo imparato ad ignorarle e non ne siamo nemmeno coscienti. Vi sono diversi tipi di afterimage: quelle comuni sono immagini in negativo in cui sperimentiamo tinte che sono praticamente complementari di quelle originali. Il fenomeno è comunque abbastanza complesso da analizzare.

Vediamo ora cos'è il **contrasto simultaneo**. Se fissiamo una macchia quadrata grigia posta al centro di una estesa area verde, tale macchia apparirà con una tonalità rossastra. Questa tonalità è prodotta dal contrasto simultaneo.

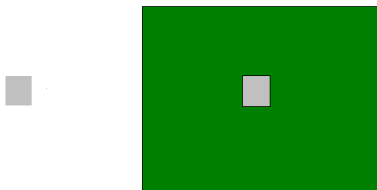


Figura 17: esempio di contrasto simultaneo

Altri esperimenti mostrano per esempio l'influenza di un fondo rosso su diverse macchie di colore: la tinta della macchia si orienta sempre nella direzione del complementare del colore rosso di sfondo, quindi verso il verde-blu: così una macchia gialla accentua la sua tendenza al verde, una violetta appare blu, una blu appare più verdastra e una verde-blu resta tale, accentuando anzi la sua saturazione.

Se sovrapponiamo ora una macchia rossa poco satura (rosa) sul fondo rosso (molto saturo), per effetto della componente verde-blu di contrasto, la macchia rosa perderà ulteriormente di saturazione, tendendo al bianco/grigio o addirittura assumendo una debole apparenza verde-bluastro.



Figura 18: altro esempio di contrasto simultaneo

Lo stesso contrasto avviene notoriamente tra il bianco e il nero, anche se si preferisce chiamarlo in questo caso **contrasto di luminosità**. Così abbiamo che una macchia grigia su un fondo più chiaro o bianco apparirà più scura; al contrario apparirà più chiara se la poniamo su un fondo scuro o nero.

L'effetto dovrebbe essere in realtà reciproco, cioè anche la macchia dovrebbe influenzare il fondo su cui è posta: se questo non avviene è solo perché il fondo è molto più esteso della macchia. Se osserviamo due figure di eguali dimensioni poste l'una accanto all'altra, effettivamente entrambe si influenzano a vicenda.

Un altro effetto, per certi versi opposto al contrasto simultaneo, è costituito dalla **assimilazione**: i colori di due aree distinte adiacenti tendono a trasbordare l'una sull'altra. Mentre nel contrasto simultaneo un'area rossa circondata da uno sfondo giallo appare più bluastro, nel fenomeno di assimilazione appare ingiallita. Come spiegare due fenomeni apparentemente

contrastanti? Tutto dipende dalle dimensioni delle aree proiettate sulla retina: se il campo ricettivo non riesce a differenziare i dettagli riporterà un responso medio (giallo + rosso). Di seguito un esempio di assimilazione: in una diagonale il rosso si assimila al giallo (e tende all'arancio), nell'altra il rosso si assimila al blu (e tende al magenta).

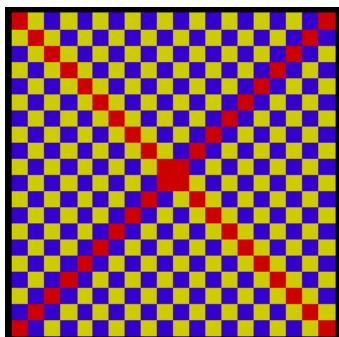


Figura 19: esempio di assimilazione

Quindi, se osserviamo una figura costituita da quadretti di due colori alternati può accadere che, se i quadretti sono abbastanza larghi, ne viene messo a fuoco uno per volta e si genera il contrasto simultaneo; se i quadretti sono più piccoli, vengono messi a fuoco simultaneamente e si produce la assimilazione; se, infine, sono ancora più ridotti, appare una immagine indistinta, per media spaziale, come nella pittura puntillistica

e nella stampa a colori (figura 20):

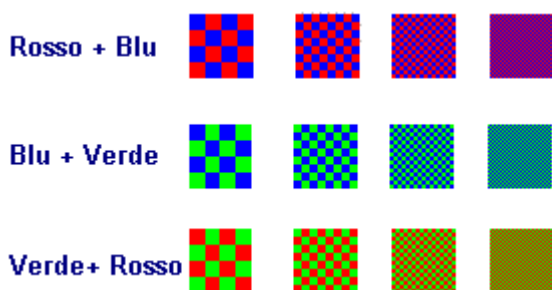


Figura 20: dal contrasto simultaneo alla assimilazione, alla sintesi additiva per media spaziale

Tutti questi esperimenti ci portano alla conclusione che il cervello, nella percezione dei colori è influenzato solo in parte dalla effettiva quantità di radiazione che giunge ai nostri occhi. Esso tiene conto anche del contesto, della memoria, etc. Il processo della visione, dunque, risulta particolarmente complesso e a tutt' oggi non pienamente compreso.

* * * * *

Molte delle considerazioni fatte sulla colorimetria trovano applicazione in campo informatico: tutti i programmi in commercio riguardanti la grafica e la rielaborazione delle immagini offrono varie possibilità di scelta dei colori. I metodi (numerici) più usati sono: RGB, CMYK, HBS e Lab. In RGB i diversi valori di luminosità delle luci primarie rosso, verde e blu vengono combinati per ottenere i colori sul monitor: il programma assegna ad ogni pixel un valore che va da 0 (nero) a 255 (bianco) per ciascuna delle componenti RGB. Quando i valori delle tre componenti sono uguali, il risultato è una tonalità di grigio. In particolare se sono tutti e tre uguali a 255 si ottiene il bianco. CMYK si basa invece sul principio della quadricromia ed è quindi utilizzato nella fase di stampa: ad ogni pixel di una immagine viene assegnato un valore percentuale per ciascun inchiostro di stampa. Ai colori chiari vengono assegnate basse percentuali, a quelli scuri percentuali più alte: il bianco si ha quando tutte le componenti hanno valore 0%. La gamma CMYK è parzialmente diversa da quella RGB: in effetti il programma segnala quando un colore visualizzato sul monitor in RGB non può essere stampato in CMYK.

I programmi offrono comunque la possibilità di selezionare i colori in modo diretto (non numerico) scegliendo da campioni standard che vengono visualizzati sul monitor: i sistemi più diffusi portano i marchi delle ditte produttrici americane, inglesi, giapponesi, etc. come PANTONE, TRUMACH, TOYO ed altri.