

Spettrofotometria e colorimetria

La spettrofotometria eseguita su una superficie colorata qualsiasi è il metodo sperimentale per misurare la frazione di intensità di radiazione visibile che la superficie riflette *per diffusione* alle diverse lunghezze d'onda. Dalla modifica della distribuzione spettrale della radiazione riflessa rispetto a quella della radiazione incidente *bianca*, come è noto, dipende il colore della superficie stessa.

Una misura spettrofotometrica è di solito rappresentata dalla curva che descrive l'andamento del *coefficiente di riflettanza* in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Essa può includere anche la zona dell'infrarosso in modo da ottenere una caratterizzazione più estesa delle proprietà di riflessione del materiale della superficie, al di là del solo spettro nel visibile.

Deve essere attentamente notato, tuttavia, che la spettrofotometria **non** è una misura di colore, cioè essa non deve essere confusa con la *colorimetria*. Infatti, il colore è una elaborazione del cervello umano. La *misura* del colore non può che essere basata, come sarà detto, sul confronto eseguito dall'occhio di un osservatore *medio* tra il colore che la superficie in esame assume, quando è illuminata con una sorgente luminosa *bianca standard*, e il colore assunto da una superficie *perfettamente* bianca (cioè con coefficiente di riflettanza idealmente pari al 100% a qualsiasi lunghezza d'onda) illuminata, a sua volta, da tre luci con i colori *fondamentali* (fig. 1): rosso, verde, blu con valori di intensità in proporzioni aggiustabili fino a ottenere, giudicando a occhio, l'eguaglianza, fra il colore della superficie in esame e il colore della superficie di confronto. Infatti, secondo la teoria del *tristimolo*, qualsiasi colore può essere esattamente riprodotto da una opportuna mescolanza dei 3 colori fondamentali (fig. 3).

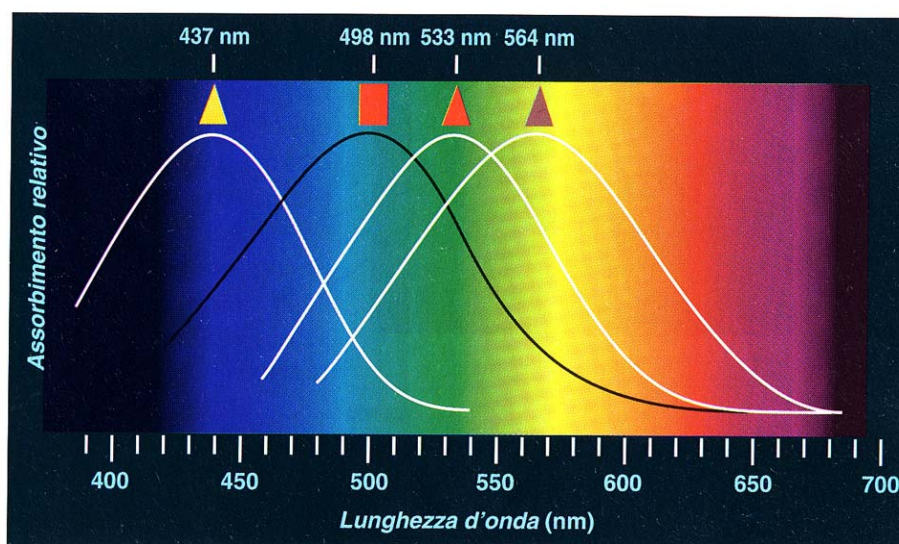


Fig. 1: curve di sensibilità relativa (in bianco) dei tre tipi di coni dell'occhio umano nel blu nel verde e nel rosso con massimi ai valori di lunghezza d'onda indicati. La curva nera indica la sensibilità relativa dell'altro tipo di recettori: i bastoncelli. La soglia di sensibilità dei bastoncelli è molto minore di quella dei coni, però essi non discriminano i colori; ciò spiega la visione in grigio caratteristica dell'occhio umano in condizioni di luminosità molto bassa.

Su questo principio è basata la riproduzione a colori dell'immagine sullo schermo del televisore domestico (fig. 2), sul quale ogni elemento puntiforme dell'immagine (*pixel*) è composto da tre punti che si illuminano, rispettivamente, di rosso, di verde e di blu con intensità reciprocamente

indipendenti che dipendono dalla intensità di 3 diversi pennelli elettronici. Così pure sullo stesso principio si basa la stampa a colori (stampa in tricromia). Le lunghezze d'onda dei tre colori fondamentali corrispondono ai valori di massima sensibilità dell'occhio nel rosso, nel verde e nel blu per i tre tipi di recettori specifici di ciascun colore esistenti nella retina (i coni). Il colore che ognuno di noi percepisce è prodotto dalle intensità degli stimoli nervosi separatamente trasmessi al cervello dai tre tipi di coni.

Si noti ancora che da quanto detto segue che a un dato spettro di radiazioni luminose corrisponde un colore ma non viceversa. Inoltre, si noti che la rappresentazione mediante i tre colori fondamentali non è una rappresentazione approssimativa del colore *vero* ma, in virtù del funzionamento del sistema occhio-cervello, con il metodo della la tricromia si può riprodurre esattamente qualsiasi colore. Infatti, il cervello elabora una determinata sensazione di colore a partire dai livelli di segnale ricevuti da ciascuno dei tre gruppi di coni recettori specializzati e non ha altre informazioni esterne.

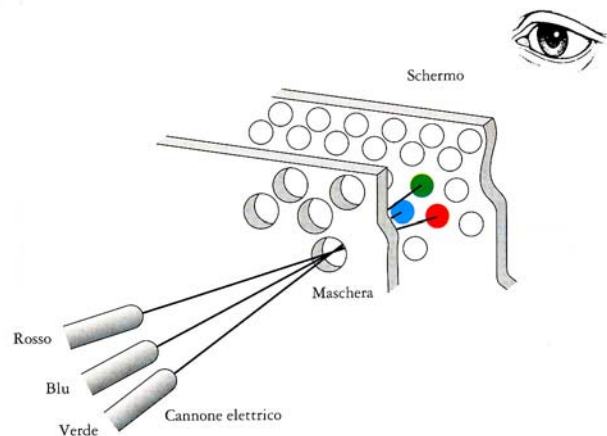
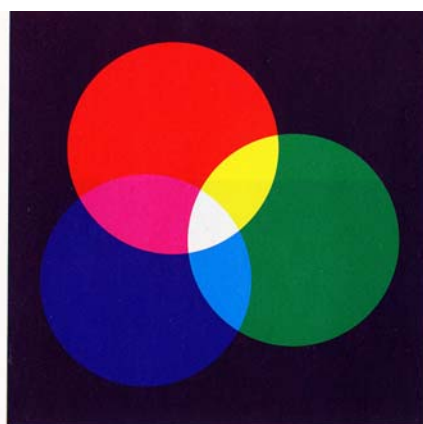
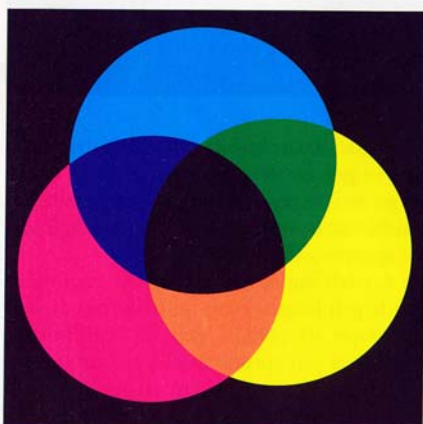


Fig. 2: schema della combinazione additiva che ha luogo nella televisione a colori. I tre punti colorati rappresentano tre fosfori che diventano luminosi sotto l'azione di tre pennelli di raggi elettronici. Questi spazzano velocemente lo schermo televisivo, ma in ogni punto ognuno di essi può illuminare solo il fosforo del colore che gli corrisponde, per effetto della maschera forata che sta davanti allo schermo e indirizza ogni fascetto sul fosforo appropriato.



(a)



(b)

Fig. 3: a) sintesi additiva per ottenere la luce bianca con tre colori primari; b) sintesi sottrattiva per ottenere il nero con tre filtri primari.

La somma di diversi colori in generale produce un colore composto e il fenomeno si chiama di sintesi *additiva*. Esiste anche la sintesi *sottrattiva* che, invece, consiste nella sottrazione dallo spettro bianco di colori corrispondenti a certe lunghezze d'onda. Ciò si ottiene impiegando materiali parzialmente opachi o, equivalentemente, parzialmente trasparenti, come per esempio vetri colorati, con i quali si producono i filtri ottici.

Considerando, a loro volta, i filtri *fondamentali*, abbiamo il filtro che, quando è attraversato dalla luce bianca formata dalla sintesi dei colori rosso, verde e blu, sopprime il blu e quindi è di colore giallo. Il filtro che sopprime il verde e quindi è di color magenta (o porpora) e infine il filtro che sopprime il rosso che appare di colore ciano (o turchese). La sovrapposizione di due filtri restituisce uno dei colori fondamentali. La sovrapposizione di tutti e 3 filtri produce il nero: cioè l'assenza di luce. In figura 3a e 3b sono rappresentati due esempi di sintesi additiva e di sintesi sottrattiva nei casi limite che servono a ottenere rispettivamente la luce bianca e l'assenza completa di luce cioè il buio.

L'importanza della sintesi sottrattiva deriva dal fatto che a essa bisogna fare riferimento quando si mescolano o sovrappongono i pigmenti dei colori. E' ben noto, per esempio, fin da bambini che la sovrapposizione del pastello giallo sul blu (che in effetti è il ciano) produce il verde per rappresentare, ancora per esempio, un prato verde. Ciò si spiega con il fatto che la luce bianca riflessa dal foglio bianco è filtrata sia dallo strato ciano che da quello giallo e, così, si ottiene il verde.

Si noti, infine, che in alcune scuole di pittura, come tipicamente il divisionismo, la tecnica di riproduzione del colore è basata non sulle mescolanze nella tavolozza, ma nel depositare i colori sulla tela con piccole pennellate affiancate e sulla sintesi additiva prodotta dall'occhio dell'osservatore.

Le procedure di misura del colore basate sul confronto, della quale si è detto, sono state codificate nel 1931, per accordo internazionale, dalla C.I.E. (Commission International de l'Eclairage) e, successivamente, riviste nel 1961.

Innanzitutto è stata stabilita una sorgente di radiazione luminosa bianca di riferimento universale, detto appunto illuminatore standard, con la caratteristica fondamentale di produrre una luce il più possibile simile a quella della luce naturale (anche essa misurata in condizioni standard). La misura del colore di una superficie si riferisce, pertanto, a una specifica illuminazione. Per eseguire questa misura, si selezionano mediante un reticolo ottico di diffrazione circa 50 valori di lunghezza d'onda nell'intervallo del visibile e si ha, così, a disposizione un numero elevato di luci *monocromatiche* dal rosso fino al violetto. Con le diverse radiazioni luminose così selezionate si illumina, in successione, un dischetto, che ha un valore di riflettanza del 100% costante, cioè che riflette per diffusione completamente la radiazione di qualsiasi lunghezza d'onda, e si regola la sorgente luminosa in modo che per ogni lunghezza d'onda si abbia esattamente la stessa intensità di illuminazione del dischetto. Nello stesso campo visivo dell'osservatore si dispone di un secondo disco bianco di caratteristiche di riflettanza ideali identiche a quelle del primo. Per ogni lunghezza d'onda selezionata per illuminare il primo dischetto l'osservatore ottiene il colore a suo giudizio identico sul secondo operando opportune regolazioni delle 3 intensità di illuminazione con i colori rosso, verde e blu, ottenuti per mezzo di tre filtri standard, rispettivamente alle lunghezze d'onda di 564, 498 e 437 nanometri che sono i valori della sensibilità relativa massima (cfr. fig. 1).

L'operazione può essere rappresentata in modo numerico annotando per il colore *monocromatico* corrispondente a ogni lunghezza d'onda di illuminazione i valori di intensità per i 3 colori fondamentali usando i quali, nella valutazione dell'osservatore, si ottiene al meglio la riproduzione del colore stesso.

Questa operazione è ripetuta da numerosi osservatori e, per ciascuna lunghezza d'onda nel visibile, si assume che i valori ottenuti come media dei 3 valori di intensità dei colori fondamentali, determinati sperimentalmente dagli osservatori, siano quelli con valore universale che forniscono la migliore riproduzione di ogni colore monocromatico (*valori di tristimolo*).

I valori di tristimolo misurano, quindi, con opportune unità di misura, i valori di intensità di illuminazione per i 3 colori fondamentali che dal punto di vista colorimetrico equivalgono esattamente allo stesso valore di intensità per ogni singola illuminazione monocromatica di lunghezza d'onda λ .

Indichiamo con $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$ i valori per il rosso, il verde e il blu in funzione di λ e in base a essi definiamo i valori di intensità relativa:

$$\begin{aligned}x &= X / (X + Y + Z) \\y &= Y / (X + Y + Z) \\z &= Z / (X + Y + Z)\end{aligned}$$

essi sono detti *coefficienti di tristimolo*. Poiché la loro somma dà 1 è sufficiente ricorrere ai valori di x e y per caratterizzare completamente qualsiasi colore monocromatico, infatti il valore di z si ottiene semplicemente come il complemento a 1 della somma di $x + y$.

A questo punto, per *misurare* il colore di una superficie dobbiamo ricorrere prima a una misura di spettrofotometria, utilizzando l'illuminatore standard, e misurare la distribuzione della intensità della luce riflessa per diffusione dalla superficie in funzione della lunghezza d'onda, successivamente si calcolano i coefficienti di tristimolo del colore in esame come media pesata dei

valori misurati alle diverse lunghezze d'onda tenendo conto dell'intensità relativa di riflessione dalla superficie esaminata per ciascuna lunghezza d'onda.

Rappresentiamo i valori di x e y appena definiti su coordinate cartesiane e riportiamo i valori dei coefficienti di tristimolo ottenuti sperimentalmente per i colori *spettrali* o *puri* (cioè quelli corrispondenti alle radiazioni monocromatiche). Al variare della lunghezza d'onda dal blu al rosso si ottiene la linea ad arco, rappresentata in figura 4. La retta tracciata nella stessa figura, che è la base del triangolo, corrisponde ai valori di x e y per i colori che si ottengono mescolando in proporzione variabile da 0 al 100% il rosso con il blu. Essi sono detti colori porpora e la loro collocazione è qualitativamente fornita dalla posizione dei campioni dei colori porpora inseriti nel cerchio di colori di figura 5. Come è indicato nella figura 4, i colori corrispondenti a una radiazione contenente un solo valore di lunghezza d'onda

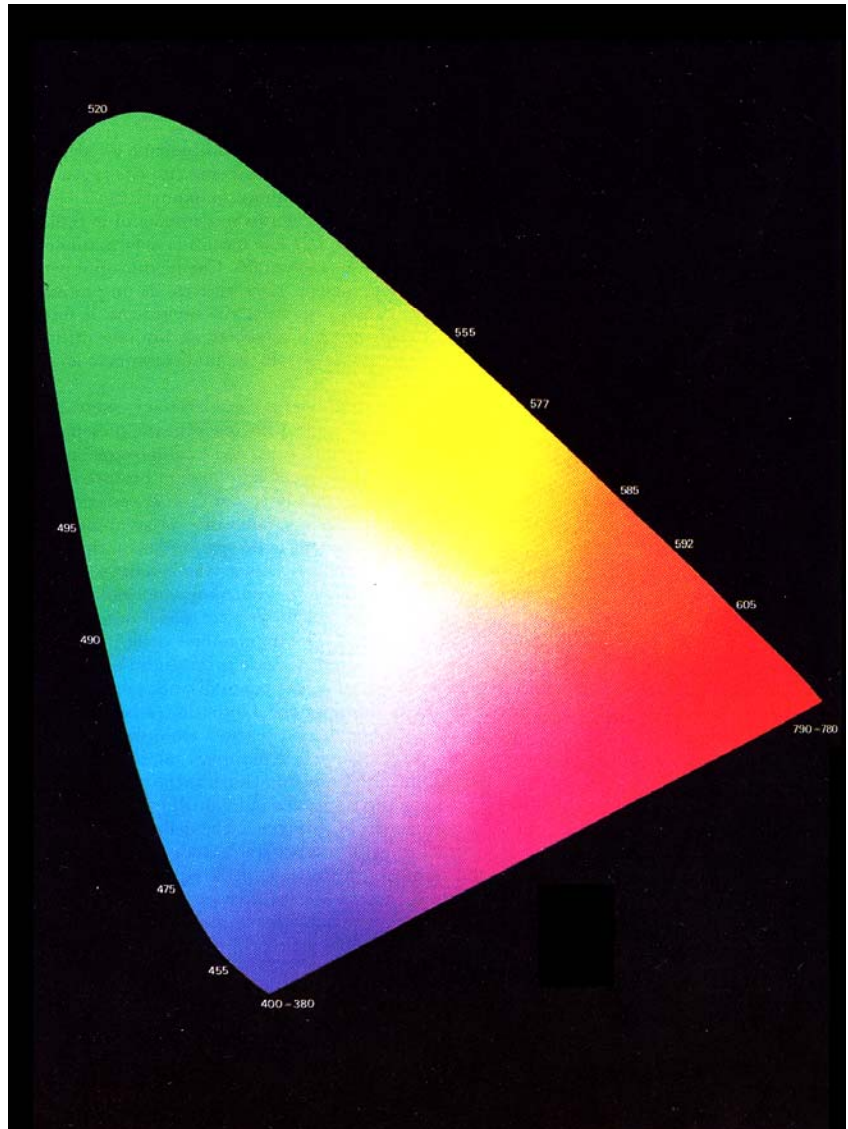


Fig. 4: triangolo dei colori.

incluso nell'intervallo delle radiazioni visibili (cioè a una radiazione monocromatica) si collocano sul bordo curvo superiore della figura, mentre i colori porpora si allineano lungo la retta di base. Tutti i colori esistenti si collocano all'interno di questa figura, detta il *triangolo dei colori*.

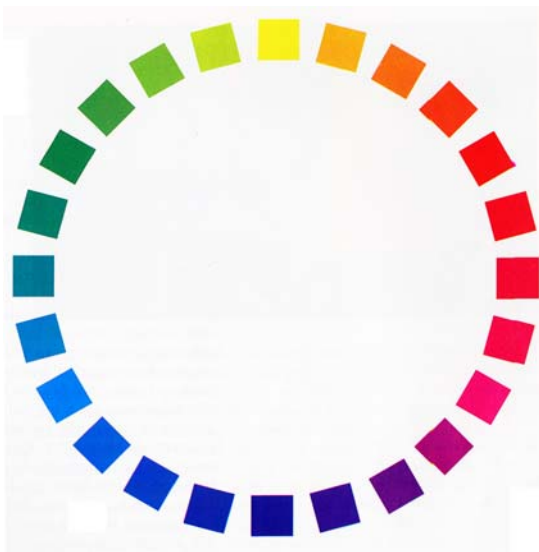


Fig. 5: cerchio dei colori.

Cioè un colore qualsiasi è rappresentato con un punto interno al triangolo. Il bianco occupa la posizione centrale, se conduciamo una retta dal punto centrale del bianco al punto rappresentativo del colore prescelto e la prolunghiamo fino al bordo, determiniamo all'intercetta un punto del bordo. Per qualsiasi colore, esclusi i colori porpora, si determina in questo modo una lunghezza d'onda, detta *dominante*, che è il valore di lunghezza d'onda corrispondente al punto di intersezione sulla curva. Fissata una data retta, possiamo considerare tutti i colori corrispondenti ai punti su di essa: dal punto sul bordo al punto centrale corrispondente al bianco. Il colore puro, o a *saturazione* del 100%, è quello rappresentato dal punto, estremo, di intersezione della retta con il bordo. I colori a saturazione via via decrescente fino al valore 0 del bianco sono quelli

rappresentati in posizione progressivamente più interna. Il grado di saturazione del colore è misurato dal rapporto della lunghezza del segmento staccato sulla retta dal punto rappresentativo del colore al punto di intercetta con il bordo, con la intera distanza fra punto di intercetta e punto centrale. Il bianco, per definizione, è il colore perfettamente *neutro* cioè con grado di saturazione 0. Se consideriamo il punto rappresentativo di un colore porpora, la retta tracciata dal punto del bianco passante per esso intercetta alla base il triangolo dei colori e, pertanto, per i colori porpora non esiste una lunghezza d'onda dominante. In questo caso, si ricorre alla lunghezza d'onda del colore *complementare* che si ottiene prolungando la retta dalla parte opposta in modo da ottenere l'intersezione con il bordo curvo.

Si noti che considerando i colori spettrali, (cioè quelli per i quali la rappresentazione è data dai punti su bordo curvo) qualsiasi colore, secondo la rappresentazione del triangolo, può essere riprodotto mescolando la luce monocromatica di lunghezza d'onda dominante con luce bianca. Per i colori porpora si prenderà, invece, una mescolanza di luce del colore corrispondente al punto di intercetta della retta con la base del triangolo e, ancora, di luce bianca.

Da quanto fin'ora esposto si ha, dunque, che ogni colore è rappresentato da un punto nel piano x, y . La posizione di ogni punto può essere ottenuta considerando, fra le rette della stella di rette centrate sul punto centrale del bianco, la retta passante per il punto dato e dalla posizione di questo punto sulla retta. La distanza del punto dal centro, misura il grado di saturazione del colore. Il numero infinito, su 360° , di possibili orientamenti per la retta identifica tutte le possibili sfumature del colore. In connessione con la rappresentazione dei colori di figura 5, l'angolo di orientamento della retta è la misura dalla quantità fisica detta *tinta* (in inglese Hue). Si noti che in questo modo si è ottenuta una definizione generale per la tinta che vale sia per i colori cromatici, per i quali la tinta si identifica con la lunghezza d'onda dominante, sia per i colori porpora.

La rappresentazione sul piano dei coefficienti x e y , non è sufficiente a definire completamente un colore: manca ancora il parametro detto *intensità o chiarezza del colore*. Per illustrare questo ultimo punto, riferiamoci al bianco per il quale, come si è detto, il grado di saturazione è zero e, poiché il punto rappresentativo del bianco è quello centrale non esiste, come è logico che sia, alcuna lunghezza d'onda dominante (assenza di tinta). Il bianco che abbiamo fin qui considerato, tuttavia, ha la proprietà di avere una riflettanza del 100% per tutte le lunghezze d'onda del visibile. Se, però, consideriamo la possibilità che esista un colore con valore di riflettanza perfettamente costante con la lunghezza d'onda, ma di valore inferiore al 100%, otteniamo un grigio. Dal bianco *assoluto*, possiamo percorrere tutti i livelli di grigio fino al nero via via che la riflettanza del colore, pur mantenendosi costante con la lunghezza d'onda, si riduce fino a 0.

Nella nostra rappresentazione dovremo, quindi, adoperare anche la terza dimensione ortogonale al piano x, y e assegnare un'altezza in corrispondenza al punto centrale rappresentante un valore di grigio che da un valore massimo corrispondente al bianco ideale diminuisca progressivamente fino a 0 per il colore nero.

In questo modo l'intera rappresentazione dei colori si estende nella dimensione verticale. Si noti che il punto più alto è quello rappresentativo del bianco poiché una superficie di colore bianco teorico, o ideale, riflette senza alcun effetto di assorbimento tutta la radiazione bianca che la colpisce. Una superficie colorata, invece, sottrae per effetto di assorbimento selettivo alcune lunghezze d'onda dallo spettro di luce bianca che la illumina, pertanto un colore diverso dal bianco è necessariamente meno chiaro, e le tinte di colore sono via via più scure a misura che la lunghezza d'onda dominante corrisponde a una zona di sensibilità inferiore per l'occhio (fig. 6).

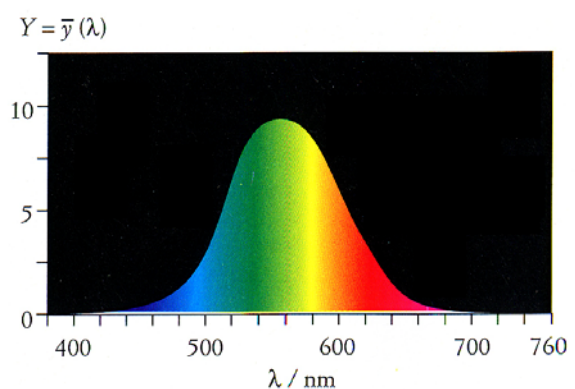


Fig. 6: sensibilità relativa dell'occhio in funzione della lunghezza d'onda.

Per i colori porpora che, come abbiamo spiegato, sono formati da una mescolanza di rosso e di blu, saranno relativamente più chiari quelli vicini al rosso rispetto a quelli vicini al blu.

Quanto esposto sulla colorimetria, benché non completamente esauriente, ha comunque illustrato che si tratti di argomento molto complesso, ma di grande interesse, per esempio, per ottenere nelle grandi produzioni industriali la riproduzione esatta dei colori.

Si confida di avere provato in modo convincente che si tratti di argomento ben distinto dalla spettrofotometria.

Molti metodi sono stati introdotti per descrivere i colori in modo semplice e conveniente. Il più noto è *l'albero dei colori* di Munsel rappresentato in figura 7. In essa vediamo che ciascun colore è rappresentato da un punto che definisce

una direzione giacente nel piano ortogonale all'asse centrale secondo un angolo che misura la tinta del colore. La distanza dall'asse centrale misura, a sua volta, il grado di saturazione o *croma*. La quota, infine, misura l'intensità, o *chiarezza* del colore che, come già detto, è massima per il bianco e minima per il nero.

I colori neutri, rappresentati da tutti i gradi di grigio dal nero al bianco, sono allineati lungo l'asse centrale a una quota che è misura della chiarezza del colore, essi non possiedono una lunghezza d'onda dominante e il grado di saturazione, o di cromaticità, è nullo.

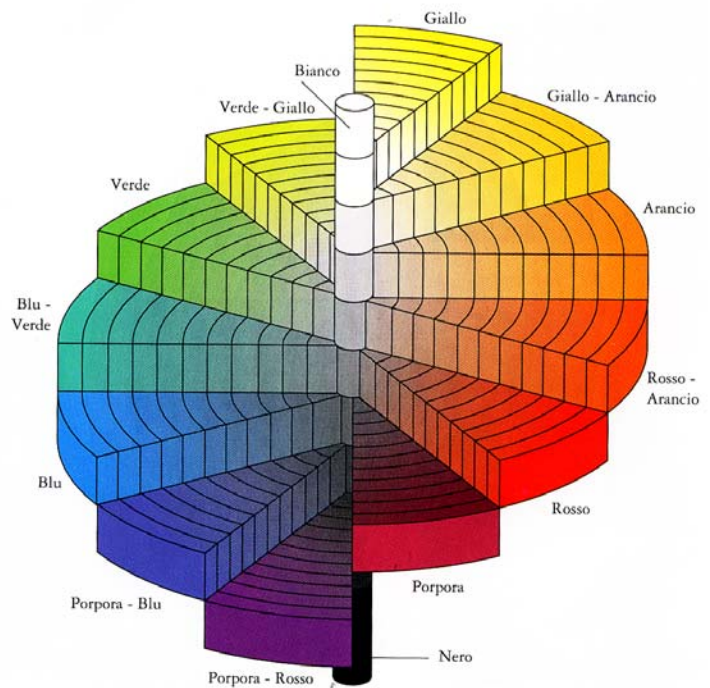


Fig. 7: albero dei colori di Munsel.