

Mauro Boscarol

1 : Colore



16102007



Indice

2 Introduzione

3 Natura del colore

- 3 Percorso del colore
- 3 Fotoni e onde
- 3 Radiazione visibile
- 4 Spettro luminoso
- 4 Sorgenti di luce
- 4 Oggetti
- 4 Stimolo di colore

- 5 Spettro luminoso in Photoshop

6 Occhio umano

- 6 Anatomia dell'occhio
- 6 Retina
- 7 Fotorecettori

9 Visione del colore

- 9 Assorbimento dei fotoni
- 9 Visione notturna e visione diurna
- 9 Sensibilità dei bastoncelli
- 10 Sensibilità dei coni
- 11 Metamerismo
- 11 Sensibilità complessiva dei coni
- 11 Trasduzione: attivazioni ai coni
- 12 Compressione: campi recettivi
- 12 Codifica: segnali opposti
- 13 Trasmissione: il nervo ottico

14 Percezione del colore

- 14 Contesto
- 14 Colori isolati e colori non isolati
- 15 Percezione e sensazione
- 15 Modi di apparire del colore
- 15 Modi oggetto
- 16 Modi non oggetto
- 17 Cambiamento di modo

18 Attributi percettivi del colore

- 18 Brillanza
- 19 Tinta, colori cromatici e acromatici
- 19 Tinte uniche e tinte binarie
- 20 Pienezza
- 20 Saturazione
- 21 Chiarezza
- 22 Importanza della chiarezza
- 22 Croma
- 23 Saturazione rivisitata
- 23 Cromaticità e cromaticità
- 24 Sistema dei colori di Munsell

- 25 Attributi del colore in Photoshop

27 Descrivere un colore

- 27 Come lo descrivono i dizionari
- 27 Nomi delle tinte
- 27 Tinte di base
- 28 Descrizione tramite attributi
- 28 Descrizione mediante primari

29 Argomenti avanzati

- 29 Anomalie della visione del colore
- 30 Studi sulla visione del colore

32 Riassunto

- 32 Radiazione visibile
- 32 Occhio e retina
- 32 Stimolo di colore
- 32 I stadio della visione a colori
- 32 II stadio della visione a colori
- 32 III stadio della visione a colori
- 32 Modi di apparire del colore
- 33 Attributi percettivi del colore
- 33 Sistemi di ordinamento dei colori

34 Riferimenti

- 34 Siti web
- 34 Testi consigliati

Introduzione

Nessun colore affatto posseggono i corpi elementari della materia, né simile alle cose, né da esse diverso... Poi, siccome i colori non possono sussistere in assenza di luce, e i corpuscoli elementari non sono mai in luce, si può comprendere come non li rivesta alcun colore.

– Lucrezio *La natura delle cose* I sec. a. C.

Per lo che io vo pensando che questi sapori odori colori ... non siano altro che puri nomi, ma tengano solamente residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale sieno levate ed annichilite tutte queste quantità.

– Galileo *Il Saggiatore* 1623

I raggi infatti, per parlare in modo appropriato, non sono colorati. In essi non c'è altro che ... una certa disposizione a stimolare una sensazione di questo o quel colore.

– Newton *Ottica* 1704

Viviamo contemporaneamente in due mondi: il mondo esterno e il nostro mondo interiore. Siamo immersi nel mondo fisico, che sta fuori di noi, ma conosciamo questo ambiente esterno solo attraverso i nostri organi di senso. Percepiamo solo le forme di energia per le quali abbiamo recettori sensoriali e conosciamo il mondo esterno solo attraverso una mappa di esso che, col tempo, abbiamo costruito nella nostra mente.

Il colore, in particolare, ci appare come una proprietà fisica degli oggetti, e richiede un po' di immaginazione rendersi conto che non si tratta di un fatto fisico ma psicologico: non appartiene al mondo esterno, ma viene costruito nella nostra mente. E gli occhi sono i sensori che mediano questa trasformazione.

Per questo il colore coinvolge più discipline: all'esterno, la fisica; nell'occhio, la fisiologia; infine la psicologia, l'ultima fase, la più profonda.

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 pre stampa, 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

Questa è la versione del 16 ottobre 2007.

Natura del colore

Il colore è un evento che richiede più partecipanti: una *sorgente luminosa*, eventualmente, ma non necessariamente, un *oggetto* opaco o trasparente, ed infine gli occhi e il cervello di un *osservatore*.

In questa sezione è presentata una descrizione sommaria del “percorso” del colore e delle sue cause fisiche (quest’ultimo tema verrà approfondito nel fascicolo *Colorimetria*). Nelle sezioni successive viene trattata in dettaglio la parte fisiologica (che riguarda l’occhio e la retina) e la parte psicologica (che riguarda il cervello e la percezione del colore).

PERCORSO DEL COLORE

La causa fisica del colore è la luce emessa da una sorgente luminosa. La luce è un particolare tipo di radiazione elettromagnetica e, come tutte le radiazioni elettromagnetiche, è composta da particelle elementari, i fotoni.

I fotoni, dopo essere stati eventualmente riflessi o trasmessi da un oggetto, raggiungono l’occhio, lo attraversano e incidono sui fotorecettori della retina dove formano una immagine retinica. Alcuni dei fotoni che incidono su un singolo fotorecettore, vengono assorbiti dal fotorecettore stesso, il quale genera in corrispondenza un segnale neurale. Questo è un segnale elettrico, la cui ampiezza è proporzionale al numero di fotoni assorbiti.

I segnali neurali dei singoli fotorecettori vengono elaborati, codificati e compressi all’interno della retina e quindi trasmessi al cervello lungo il nervo ottico. Dopo essere transitati per varie zone, i segnali raggiungono settori specializzati della corteccia cerebrale, dove vengono interpretati e determinano la percezione del colore.

Il colore è dunque una qualità della sensazione

visiva, soggettiva e non misurabile. Tuttavia tutti gli essere umani con un apparato visivo “normale” hanno esperienze di colore molto simili, e in particolare sono in genere d’accordo nel giudicare se radiazioni fisicamente diverse appaiono cromaticamente uguali.

FOTONI E ONDE

Le particelle elementari della radiazione elettromagnetica sono state chiamate da Einstein *fotoni*. I fotoni si propagano sempre alla stessa velocità, che dipende dal mezzo di propagazione. Nel vuoto questa velocità viene indicata con c ed è uguale a 299 792,458 km/s. Un fotone non può essere a riposo né può muoversi ad una velocità diversa. Durante la propagazione, ogni fotone vibra a una determinata frequenza ν , che non dipende dal mezzo in cui avviene la propagazione.

Per descrivere l’*emissione* e l’*assorbimento* di una radiazione elettromagnetica conviene considerarla come composta di fotoni, mentre per descrivere la *propagazione* di una radiazione è opportuno considerarla come *onde* ognuna delle quali ha una determinata lunghezza λ . La relazione tra frequenza di fotone e lunghezza d’onda è $\nu \cdot \lambda = c$.

La velocità c e la lunghezza d’onda λ della radiazione dipendono dal mezzo in cui la radiazione si propaga, mentre la frequenza ν non dipende dal mezzo, cioè è costante (si dice che è *invariante*).

RADIAZIONE VISIBILE

I fotoni sono invisibili, ma quelli la cui frequenza è compresa in un certo intervallo, se arrivano ai nostri occhi e raggiungono la retina, causano nel sistema visivo il fenomeno della *visione*. Si tratta dei fotoni la cui frequenza è compresa tra circa 384 e 788 THz o, in modo equivalente, delle onde elettromagnetiche di lunghezza compresa tra circa 380 e 780 nm (fig. 1). Questi fotoni o queste onde costituiscono la *radiazione visibile* o *luce* (più avanti distingueremo tra questi due termini, ma per ora li consideriamo equivalenti).

Hertz (Hz) è l’unità di misura della frequenza, 1 Hz equivale a 1 ciclo al secondo. Il prefisso tera (T) moltiplica per mille miliardi (10^{12}). Il prefisso nano (n) divide per un miliardo (10^{-9}).

SPETTRO LUMINOSO

Una radiazione costituita da fotoni di una singola lunghezza d'onda, oppure da fotoni la cui lunghezza d'onda è compresa in un intervallo ristretto (per esempio un intervallo di 5 nm) è detta radiazione *monocromatica*.

Il sistema visivo umano percepisce le diverse radiazioni monocromatiche come colori diversi, i colori *spettrali* (fig. 1). Se alla retina arrivano fotoni della stessa lunghezza d'onda, per esempio 510 nm (o compresi in un intervallo ristretto attorno a 510 nm), il colore percepito è verde, se la lunghezza d'onda è 600 nm il colore è arancio.

Lo spettro è continuo e i colori spettrali sono numerosi, ma se ne possono individuare principalmente sei: violetto, blu, verde, giallo, arancio e rosso, con i limiti approssimati qui indicati.

COLORE	LUNGHEZZA D'ONDA (nm)
violetto	380-420
blu	420-500
verde	500-560
giallo	560-590
arancio	590-640
rosso	640-780

I colori spettrali non esauriscono tutti i colori. Il viola e il magenta per esempio non sono colori spettrali, così come non lo sono il grigio, il bianco, il nero, il marrone e molti altri. La maggior parte dei colori che vediamo non sono spettrali.

SORGENTI DI LUCE

Esistono sorgenti di luce naturali (il sole, il fuoco), e sorgenti artificiali (le lampade, le candele, i laser). Tutte le sorgenti naturali e gran parte di quelle artificiali emettono contemporaneamente fotoni di *diverse* lunghezze d'onda. Alcune sorgenti artificiali (per esempio i laser) possono emettere fotoni di una *singola* lunghezza d'onda (o di un intervallo ristretto di lunghezze d'onda, per esempio un intervallo di 5 nm).

OGGETTI

Gli oggetti opachi non trasmettono la luce, ma in parte la assorbono e in parte la riflettono. Gli oggetti trasparenti non riflettono la luce ma in parte

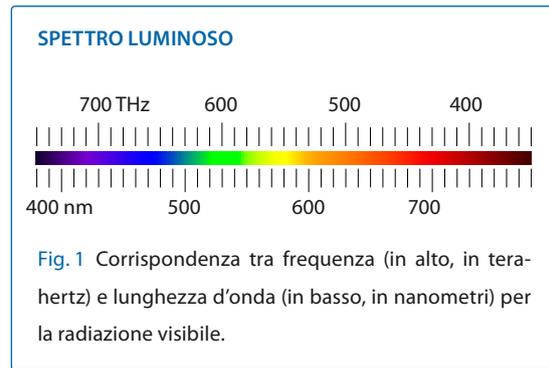


Fig. 1 Corrispondenza tra frequenza (in alto, in terahertz) e lunghezza d'onda (in basso, in nanometri) per la radiazione visibile.

la assorbono e in parte la trasmettono. Prima di raggiungere l'occhio, i fotoni possono interagire con un oggetto opaco o trasparente. In tal caso l'oggetto ne assorbe una parte, mentre la parte non assorbita viene riflessa (nel caso di oggetto opaco) o trasmessa (nel caso di oggetto trasparente) e raggiunge l'occhio.

In ogni caso i fotoni che non sono stati assorbiti e raggiungono l'occhio costituiscono lo *stimolo di colore*.

STIMOLO DI COLORE

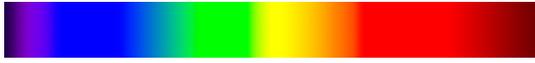
Uno stimolo di colore consiste sempre di luce. In alcuni casi, la luce arriva direttamente dalla sorgente luminosa (per esempio il sole, un televisore) e lo stimolo è detto in *emissione*.

Più tipicamente lo stimolo di colore è il risultato della luce che è stata riflessa da o trasmessa attraverso vari oggetti. In questo caso lo stimolo dipende sia dalla sorgente luminosa che dalle caratteristiche degli oggetti ed è detto rispettivamente in *riflessione* o in *trasmissione*.

L'importante concetto di stimolo di colore è alla base di tutti i metodi di rappresentazione delle immagini digitali. Ogni scena, ogni immagine visualizzata, ogni immagine stampata può essere trattata come una collezione di stimoli di colore. È dunque importante esaminare come lo stimolo di colore viene visto e interpretato dal sistema visivo umano.

Spettro luminoso in Photoshop

Ecco come creare in Photoshop uno spettro come questo qui sotto (i colori di un prisma, o dell'arcobaleno) con i dati di pag. 3.



STUDIO DELLO SPETTRO

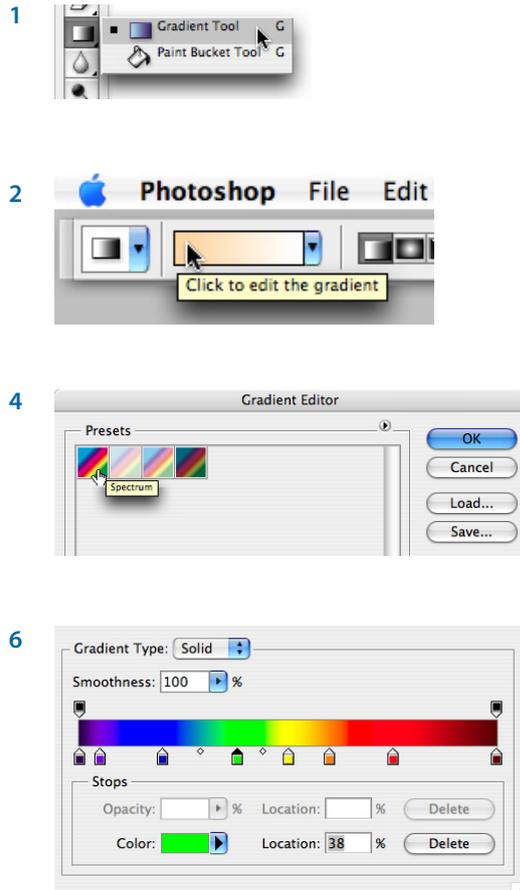
Se dividiamo lo spettro in circa 40 parti (da 380 a 780 nm ogni 10 nm), allora:

- le prime 4 parti sono violetto, il centro è circa a 2 che corrisponde al 5% della lunghezza totale dello spettro;
- le successive 8 sono blu, il centro è a 8, cioè 20%;
- altre 6 sono verde, centro a 15, cioè 38%;
- altre 3 sono giallo, centro a 20, cioè 50%;
- altre 5 sono arancio, centro a 24, cioè 60%;
- le ultime 14 sono rosso, centro a 30, cioè 75%.

FASE DI PREPARAZIONE

I riferimenti sono alle immagini qui a destra.

- 1 Clic sullo strumento Gradient (G, Sfumatura) nella paletta degli strumenti.
- 2 Clic nella barra delle opzioni sul campione sfumatura per aprire Gradient Editor (Editore sfumatura).
- 3 Per avere un punto di inizio carichiamo le sfumature predefinite del gruppo Spectrum (Spettri): clic su Load (Carica) e poi Photoshop > Presets (Predefiniti) > Gradients (Sfumature) > Spectrum.grd (Spettri.grd).
- 4 Tra le sfumature caricate, individuiamo la sfumatura di nome Spectrum (Spettro, la più simile a quella alla quale vogliamo arrivare) e clic.
- 5 Diamo alla nuova sfumatura il nome Spettro luminoso, il tipo Solid (Omogeneo), Smoothness (Omogeneità) 100%.
- 6 Disponiamo quindi 8 *color stop* (interruzioni di colore, le frecce che puntano dal basso verso la sfumatura, 6 ce ne sono già, per le altre basta fare clic sotto la sfumatura) all'inizio 0%, alla fine 100% e alle percentuali indicate aiutandoci con l'indicatore di Location (Posizione).
- 7 Infine assegniamo i colori ai *color stop* come indicato nella tabella a fianco. La modalità di colore appropriata è HSB perché consente di scegliere separatamente la tinta (da 270° fino a scendere a



0°, prima di 270° ci sono i colori non spettrali), la saturazione (che fissiamo sempre a 100), e la brillantezza (massima nel centro e decrescente verso gli estremi). Alla fine clic su New e poi su OK.

I due estremi devono essere quasi neri (per questo il valore di B è stato impostato a 20) perché oltre il rosso c'è l'infrarosso e oltre il violetto l'ultravioletto, invisibili per l'occhio umano, quindi neri.

Ora possiamo creare un nuovo file RGB, per esempio di 500 x 50 pixel. La risoluzione è irrilevante. Con lo strumento Gradient (Sfumatura) tracciamo la sfumatura e salviamo in PSD o TIFF.

stop	H	S	B
0%	270	100	20
5%	270	100	80
20%	240	100	100
38%	130	100	100
50%	60	100	100
60%	35	100	100
75%	0	100	80
100%	0	100	20

Occhio umano

L'occhio umano è un bulbo approssimativamente sferico di circa 24 mm di diametro (fig. 2).

ANATOMIA DELL'OCCHIO

La *cornea* e la *sclera* formano lo strato protettivo esterno dell'occhio. La cornea è la parte anteriore trasparente attraverso la quale passa la luce, che nel passaggio subisce una rifrazione. La parte restante è la sclera (il bianco dell'occhio) che forma un rivestimento di protezione per gli strati più interni.

I difetti ottici (detti anche *errori di rifrazione*, cioè *miopia*, *astigmatismo*, *ipermetropia*) si possono attribuire a variazioni nella forma della cornea.

L'*umore acqueo* (*aqueous humor*) è un liquido incolore e trasparente contenuto tra la cornea e il cristallino, la cui funzione è mantenere la pressione all'interno dell'occhio.

Alterazioni della produzione e del deflusso dell'umore acqueo possono portare a valori di pressione elevati e al *glaucoma* che consiste nel danneggiamento del nervo ottico dovuto all'aumentata pressione interna dell'occhio.

L'*iride* (*iris*) è la parte colorata dell'occhio, che contiene muscoli che possono modificare il diametro della *pupilla* (*pupil*), il foro al centro dell'iride, nell'intervallo da 2 a 8 mm circa. Il rapporto tra la minima e massima quantità di luce che passa attraverso la pupilla è dunque circa 4:64 cioè 1:16. Se il livello di illuminazione è elevato la pupilla si rimpicciolisce per ridurre il numero dei fotoni che entrano nell'occhio, se è basso la pupilla si apre per consentire il passaggio di un numero maggiore di fotoni.

La *coroide* (*choroid*) continua la struttura dell'iride verso la parte posteriore dell'occhio ed è formata in gran parte da una rete di vasi sanguigni.

OCCHIO UMANO

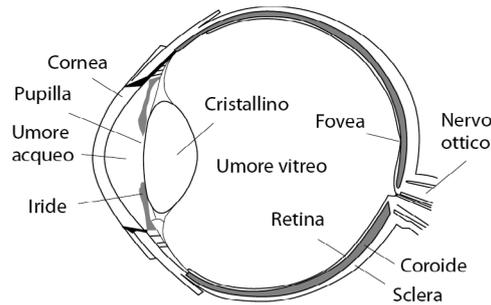


Fig. 2 Sezione di occhio umano destro visto dall'alto.

Il *cristallino* (*lens*) è una struttura flessibile controllata dai muscoli ciliari, che ha la funzionalità di una lente biconvessa che mette a fuoco i fotoni sulla retina.

Con l'età la flessibilità del cristallino diminuisce e l'osservatore perde la capacità di mettere a fuoco gli oggetti vicini (*presbiopia*). Contemporaneamente aumenta la densità ottica del cristallino, che diventa sempre più giallo (*cataratta*). Per questo motivo, un osservatore anziano spesso giudica più rosso un oggetto di quanto non lo giudichi un osservatore giovane.

L'*umore vitreo* (*vitreous humor*) è una gelatina trasparente e incolore posta tra il cristallino e la retina che aderisce perfettamente alle strutture con le quali è in contatto.

L'umore vitreo può perdere la trasparenza. In questi casi la visione è disturbata dalla presenza di macchie scure tipo mosche volanti (*miodesopsie*). La più frequente alterazione dell'umore vitreo è il suo distacco dal piano della retina, il che comporta la comparsa di *miodesopsie* e *fosfeni* (visione di lampi luminosi) e può causare anche il distacco della retina.

RETINA

La *retina* è la sottile membrana nervosa che riveste internamente il globo oculare. È considerata parte del cervello, al quale è collegata mediante il nervo ottico.

Nel mezzo millimetro di spessore della retina sono ordinati tre strati di cellule (fig. 3) connesse tra di loro mediante contatti sinaptici. Il primo strato è costituito dai *fotorecettori*, che giacciono

RETINA

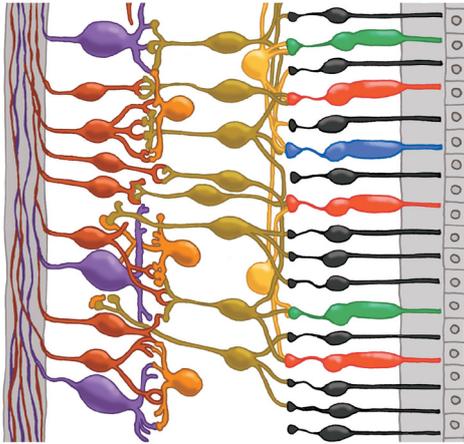


Fig. 3 Dettaglio della retina. Da destra a sinistra: epitelio pigmentato (grigio), fotorecettori (i bastoncelli sono neri, i coni L, M e S sono rispettivamente rossi, verdi e blu), cellule orizzontali (gialle), bipolari (marrone), amacrine (rosso scuro), gangliari (viola), fibre nervose. I fotoni arrivano dal centro dell'occhio che è a sinistra in figura.

sull'*epitelio pigmentato*. Il secondo strato è costituito dalle cellule mediane: cellule *orizzontali*, cellule *bipolari*, e cellule *amacrine*. Il terzo strato è costituito dalle cellule *gangliari*, i cui assoni costituiscono il nervo ottico che connette la retina al cervello. Il punto sulla retina in cui inizia il nervo ottico è privo di fotorecettori e viene detto *punto cieco*.

Questo esperimento spiega perché il punto cieco si chiama così. Si tracciano due segni + su un pezzo di carta, uno a sinistra e uno a destra, alla distanza di circa 8 cm. Si chiude l'occhio sinistro e con l'altro si fissa il + a sinistra. Allontanando l'occhio a circa 30 cm dal foglio, e continuando a fissare il + a sinistra, il + a destra a un certo punto non è più visibile. In quella posizione lo stimolo è capitato sul punto cieco, il quale è privo di fotorecettori e non trasmette nessun segnale al cervello.

Anatomicamente i fotorecettori costituiscono lo strato più lontano dal centro dell'occhio e le cellule gangliari quello più vicino. Questo fatto si esprime dicendo che la retina umana è *invertita* (rispetto alla disposizione in cui i fotorecettori

sono più vicini al centro dell'occhio, disposizione che si trova in alcuni animali).

Ulteriori informazioni sulla retina si possono trovare in *Web-Vision*, sito dedicato al sistema visivo umano e in particolare alla retina, curato da ricercatori dell'Università dello Utah. Contiene il PDF *How the Retina Works* da cui è tratto il disegno di fig. 3.

FOTORECETTORI

Nella retina sono presenti quattro tipi di fotorecettori: un tipo di *bastoncelli (rods)* e tre tipi di *coni (cones)*, questi ultimi indicati rispettivamente con le lettere L, M e S (dall'inglese *long, medium, short*). Nel loro complesso, bastoncelli e coni sono le cellule che formano il *mosaico retinico* (fig. 4). I bastoncelli sono circa 100 milioni e i coni 4 milioni: 60% di coni L, 30% di coni M, 10% di coni S.

I dati numerici sui fotorecettori e sulla retina sono tratti da *Colour & Vision Database* (Riferimenti in fondo al fascicolo).

La *fovea* è un'area di mezzo millimetro di diametro che costituisce il punto di fuoco centrale della retina: quando fissiamo un oggetto, la sua immagine si forma nella fovea. La *macula lutea* è un filtro sulla fovea che limita i danni che si possono verificare se si fissa una sorgente luminosa molto intensa, come il sole.

Nella fovea non ci sono bastoncelli né coni S, ma solo coni L e M (circa 200.000), ed inoltre le cellule bipolari e gangliari non sovrastano questi

MOSAICO RETINICO

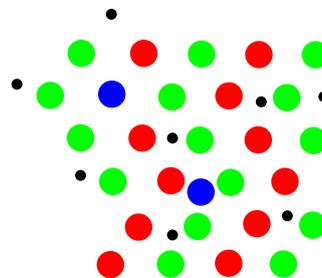


Fig. 4 Mosaico retinico nelle vicinanze della fovea. I bastoncelli sono in nero, i coni L in rosso, i coni M in verde e i coni S in blu. Tratto da [6] con modifiche.

fotorecettori, come invece avviene nel resto della retina. Per questo motivo la fovea appare leggermente affossata (da cui il nome, che in latino significa “fossa”). Inoltre ogni fotorecettore della fovea ha un collegamento “privato” con il cervello, il che fa in modo che in questa zona si abbia la migliore visione dei dettagli (*acuità visiva*).

Appena fuori dalla fovea i coni sono più distanziati e in numero inferiore, e sono presenti anche bastoncelli e coni S. Man mano che ci si allontana dalla fovea i coni diradano e il loro numero diminuisce, mentre aumenta il numero dei bastoncelli, che sono sempre più numerosi man mano che ci si dirige verso la periferia della retina. Inoltre i singoli fotorecettori al di fuori della fovea non hanno un collegamento “privato” con il cervello, ma sono riuniti in gruppi ed ogni gruppo ha un singolo collegamento con il cervello.



Visione del colore

Il primo stadio della visione del colore ha inizio quando i fotoni che compongono lo stimolo visivo entrano nell'occhio attraverso la cornea e l'umore acqueo, superano la pupilla, la cui contrazione e dilatazione ne determina la quantità, penetrano nel cristallino, attraversano l'umore vitreo, raggiungono la retina, ne attraversano i primi due strati e finalmente incidono sui fotorecettori dai quali vengono, in parte, assorbiti.

ASSORBIMENTO DEI FOTONI

Ogni tipo di fotorecettori contiene un diverso fotopigmento: quello dei bastoncelli si chiama *rodopsina* (*rhodopsin*), mentre i fotopigmenti dei cono non hanno un nome specifico.

Ogni fotopigmento assorbe solo una parte dei fotoni che lo raggiungono. I fotoni non assorbiti dal fotopigmento vengono riflessi all'esterno dell'occhio oppure assorbiti dallo strato sul quale posano i fotorecettori, l'epitelio pigmentato, senza avere alcun ruolo nella visione.

VISIONE NOTTURNA E VISIONE DIURNA

Il numero di fotoni assorbiti nell'unità di tempo determina l'intensità luminosa e questa, a sua volta, l'attivazione dei bastoncelli, dei cono o di entrambi.

Quando il numero dei fotoni che arrivano sulla retina è basso, sono attivi solo i bastoncelli, che sono molto sensibili: pare siano in grado di assorbire quantità molto piccole di luce, anche un solo fotone. La visione in tal caso è detta *notturna* o *scotopica*: si verifica per esempio al chiarore della luna o delle stelle.

La visione notturna è povera di dettagli (i bastoncelli sono riuniti in gruppi) e i colori sono assenti, si vede solo grigio ("di notte tutti i gatti sono grigi"). Inoltre, poiché non ci sono bastoncelli nella fovea, per vedere un oggetto quando la

luce è molto debole è necessario guardare lateralmente e non direttamente verso l'oggetto.

Quando il numero dei fotoni che arrivano sulla retina è più elevato, oltre ai bastoncelli, sono attivi anche i cono. La visione è detta *crepuscolare* o *mesopica*. I colori sono presenti, ma la loro visione non è ottimale.

Quando il numero dei fotoni che arrivano sulla retina è ancora più elevato, i bastoncelli non sono più in grado di assorbire fotoni e sono inibiti mentre i cono continuano a rimanere attivi e ad assorbire fotoni. La visione è detta *diurna* o *fotopica* e i colori si vedono in modo ottimale.



I termini *scotopico* e *fotopico* derivano entrambi dal greco: *scotopico* deriva dal greco *skótos* che indica tenebre, oscurità e *fotopico* deriva dal greco *phóto* che significa luce.

La retina è dunque organizzata anatomicamente come due pellicole finemente interlacciate, una (composta dai bastoncelli) ad alta sensibilità per i bassi livelli di illuminazione che consente la visione a grigi e senza dettagli, e l'altra (composta dai tre tipi di cono) a sensibilità inferiore che opera a livelli più intensi e consente la visione a colori.

SENSIBILITÀ DEI BASTONCELLI

L'assorbimento di un fotone da parte della rodopsina, il fotopigmento dei bastoncelli, dipende dalla lunghezza d'onda del fotone, ed è maggiore nella onde corte dello spettro. Il massimo assorbimento si ha a circa 507 nm, e alle lunghezze d'onda maggiori e minori l'assorbimento diminuisce, come è stato verificato con misure sulla rodopsina estratta dai bastoncelli.

Per i fotoni che incidono sulla cornea non è tuttavia sufficiente valutare l'assorbimento della rodopsina ma è anche necessario valutare gli assorbimenti che avvengono prima che i fotoni raggiungano i bastoncelli e cioè gli assorbimenti nella cornea, umore acqueo, cristallino, umore vitreo e cellule della retina.

Considerato tutto ciò, ogni fotone che arriva alla cornea ha una determinata probabilità di essere

assorbito dal fotopigmento del bastoncello su cui incide e tale probabilità dipende solo dalla lunghezza d'onda del fotone.

Nel grafico di fig. 5, è riportata la *curva di sensibilità* dei bastoncelli, detta anche *curva di sensibilità scotopica*. Questa curva riporta la probabilità che un fotone che incide sulla cornea, venga assorbito dal fotopigmento di un bastoncello.

La curva di sensibilità scotopica è stata ottenuta in modo sperimentale con metodi indiretti (psicofisici) negli anni Quaranta su 72 osservatori. Tratto da Hunt [4] pag. 22. Per esempio la probabilità corrispondente alla lunghezza d'onda di 550 nm è 0,48, cioè il 48% dei fotoni che hanno questa lunghezza d'onda vengono assorbiti. Così se ad un bastoncello arrivano 200 fotoni a 550 nm, i fotoni assorbiti saranno il 48% di 200, cioè 96.

Avviene che ogni bastoncello, una volta assorbito un fotone, perde l'informazione sulla lunghezza d'onda. In altre parole il bastoncello "conta" semplicemente il numero di fotoni assorbiti. Questo è il contenuto del *principio di univarianza* enunciato dal fisiologo britannico William Rushton nel 1952.

SENSIBILITÀ DEI CONI

Ognuno dei tre tipi di coni L, M e S contiene un diverso pigmento caratterizzato da una curva di assorbimento. Non è ancora stato possibile determinare con precisione la forma di queste curve, e quindi nemmeno le curve di sensibilità dei tre tipi di coni (dette anche *fondamentali dei coni*), che

tengono conto degli assorbimenti che avvengono nel cristallino e nella macula, della diversa proporzione di coni dei tre tipi e della loro non uniforme distribuzione rispetto alla fovea.

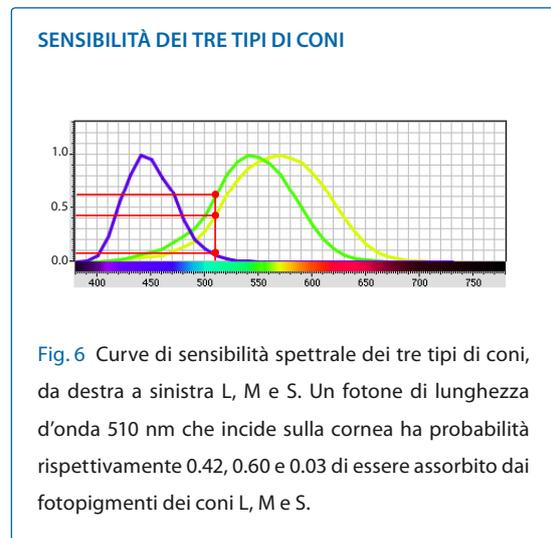
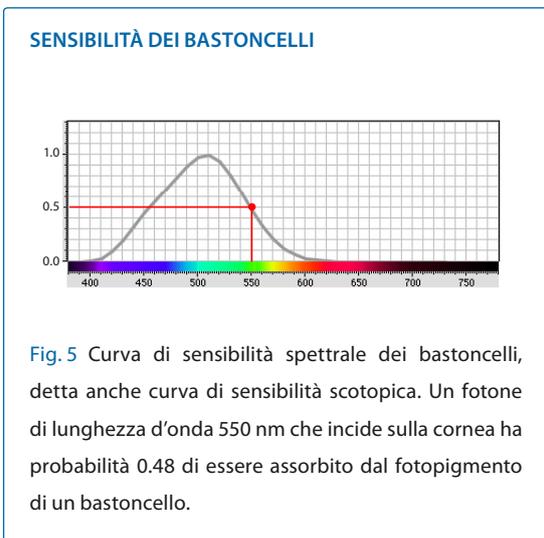
In fig. 6 è indicato un possibile insieme di curve di sensibilità dei coni in cui la massima sensibilità per i coni S è a 437 nm nelle onde corte (*short*), per i coni M a 533 nm nelle onde medie (*middle*) e per i coni L a 564 nm, più o meno nelle onde lunghe (*long*).

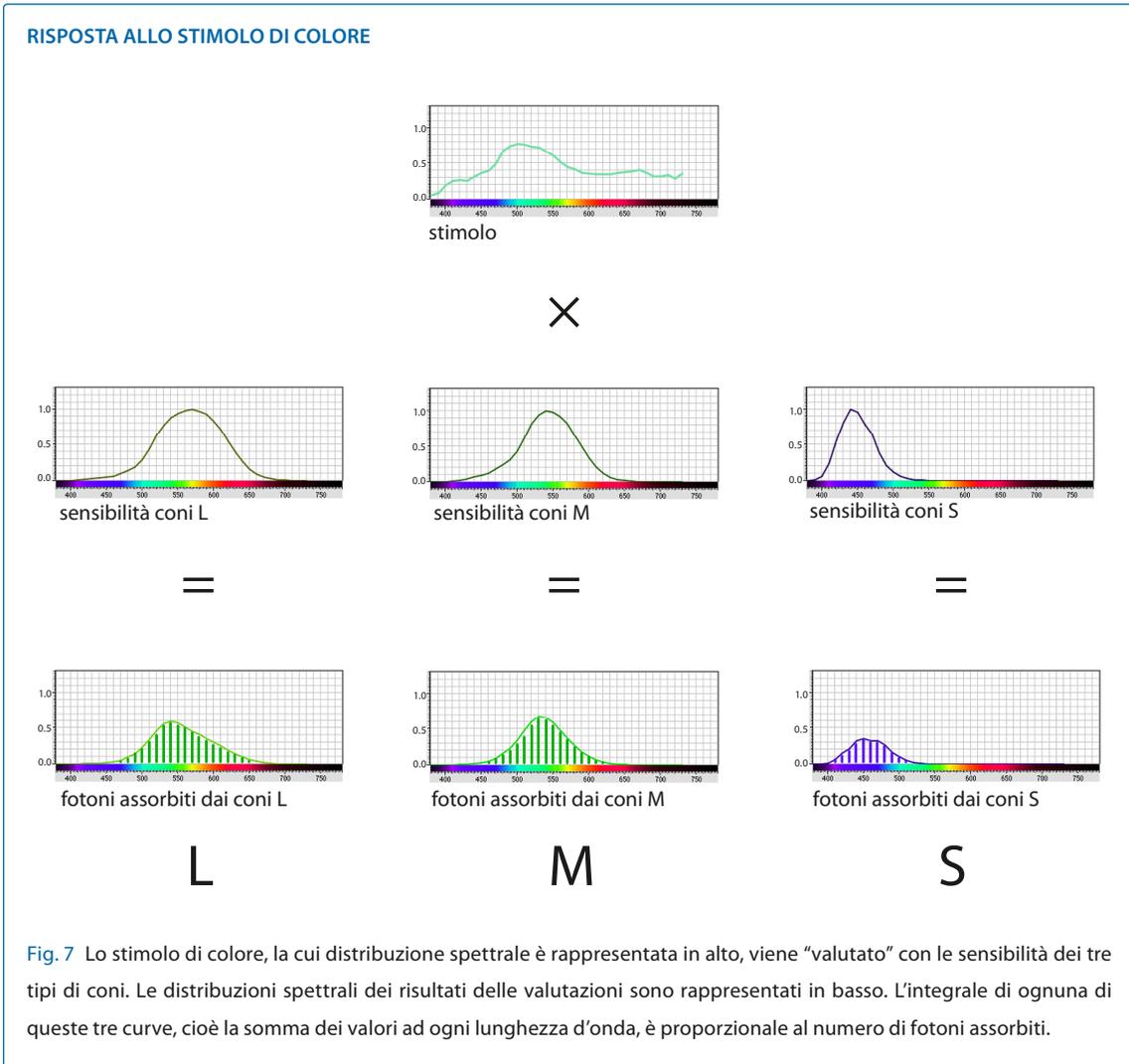
Si tratta dei fondamentali dei coni proposti da Stockman e Sharpe nel 2000, dati tratti da *Colour & Vision Database*.

Come avviene per la curva di sensibilità dei bastoncelli, queste curve di sensibilità dei coni indicano la probabilità che un fotone che incide sulla cornea venga assorbito dal fotopigmento di un cono di tipo rispettivamente L, M e S.

Anche per i coni vale il principio di univarianza di Rushton: il fotorecettore perde le informazioni sulla qualità spettrale della radiazione assorbita (cioè sulla frequenza o lunghezza d'onda dei fotoni), ma solo sul numero di fotoni assorbiti.

In fig. 7 è riportato lo schema di "integrazione" (in altre parole di "conteggio") dei fotoni da parte dei tre tipi di coni. Lo stimolo spettrale, rappresentato in alto, viene moltiplicato per ognuna delle tre curve di sensibilità dei coni. Ognuno dei tre risultati viene "integrato", cioè i valori di ogni singola lunghezza d'onda vengono sommati.





METAMERISMO

Stimoli uguali danno evidentemente origine a valori L, M, S uguali, ma è anche possibile che stimoli diversi diano origine a valori L, M, S uguali. Questo è il fenomeno del *metamerismo*. Tutti gli stimoli che danno origine agli stessi valori L, M, S sono detti *metameri* (cioè “quasi uguali”). Naturalmente il metamerismo dipende dall’osservatore. Due colori metameri per un osservatore possono non esserlo per un altro osservatore.

Il metamerismo è un fenomeno molto importante che presenta aspetti negativi e aspetti positivi. Su questo tema torneremo diffusamente nel fascicolo *Colorimetria*.

SENSIBILITÀ COMPLESSIVA DEI CONI

La somma delle curve di sensibilità dei coni M e L (i coni S non vengono considerati perché danno

un contributo trascurabile) fornisce la *curva di sensibilità dei coni* nel loro complesso, cioè come se costituissero un unico tipo di fotorecettori (fig. 8). Questa curva è detta anche *curva di sensibilità fotopica*. La curva di sensibilità dei coni ha un picco a 555 nm, cioè alle lunghezze d’onda medie (verde-giallo).

TRASDUZIONE: ATTIVAZIONI AI CONI

L’assorbimento di fotoni da parte di un fotorecettore (bastoncello o cono) produce una risposta elettrica da parte dello stesso fotorecettore, che viene detta *risposta sensoriale*. In termini di segnali, lo stimolo, che è un segnale elettromagnetico, viene trasformato in un segnale elettrico a modulazione di ampiezza. Questo processo di trasformazione da segnale elettromagnetico a segnale neurale elettrico è detto *trasduzione*.

L'ampiezza del segnale elettrico generato da un fotorecettore come risposta all'assorbimento dei fotoni è proporzionale al numero di fotoni assorbiti e viene detta *attivazione al fotorecettore*. In particolare, le attivazioni ai coni vengono indicate con le stesse lettere con le quali si indicano i tipi di coni: L, M e S.

L'esperienza mostra che se due stimoli presentati in condizioni impoverite, isolati dal contesto, producono le stesse attivazioni ai coni, il loro colore corrisponde. In altre parole, il colore percepito di stimoli isolati è in corrispondenza con la terna delle attivazioni ai coni. Dunque la terna delle attivazioni ai coni (L, M e S) è idonea a specificare la percezione del colore. Su questo fatto è basata la colorimetria (che viene trattata nel secondo fascicolo di questa serie).

La ragione per cui i bastoncelli non consentono la visione a colori sta nel fatto che i bastoncelli sono di un solo tipo e possono solo "contare" il numero di fotoni assorbiti, non la loro lunghezza d'onda. Anche i coni possono solo "contare" i fotoni assorbiti, ma il sistema visivo può recuperare l'informazione sulla frequenza dei fotoni confrontando tra loro i segnali dei tre diversi tipi di coni che vengono stimolati in modo diverso.

COMPRESSIONE: CAMPI RECETTIVI

Oltre ai circa cento milioni di fotorecettori, la retina è formata dalle cellule intermedie (orizzontali, bipolari, amacrine) e da circa un milione di cellule gangliari, i cui assoni costituiscono il nervo ottico.

Il segnale elettrico generato dai fotorecettori segue il percorso contrario a quello dei fotoni e passa prima alle cellule intermedie e poi alle cellule gangliari e da qui al cervello attraverso il nervo ottico.

Nella fovea, lo abbiamo già visto, non ci sono bastoncelli ma solo coni, ed ogni cono della fovea è collegato con una singola cellula gangliare e quindi con una singola fibra del nervo ottico. Al di fuori della fovea i bastoncelli e i coni sono invece riuniti in gruppi (bastoncelli con bastoncelli e coni con coni) ed ogni gruppo fa capo a

SENSIBILITÀ DEI CONI

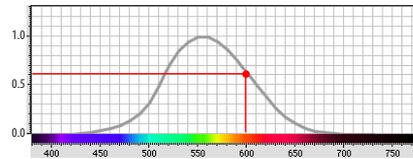


Fig. 8 Funzione di sensibilità spettrale dei coni (detta anche *fotopica*) nel loro complesso. Un fotone di lunghezza d'onda 600 nm che incide sulla cornea ha probabilità 60% di essere assorbito dal fotopigmento di un cono.

una singola cellula gangliare, alla quale confluiscono i segnali dei singoli fotorecettori.

Ogni cellula gangliare risponde così alla luce diretta ai fotorecettori di una specifica area della retina, chiamata *campo recettivo* di quella cellula gangliare.

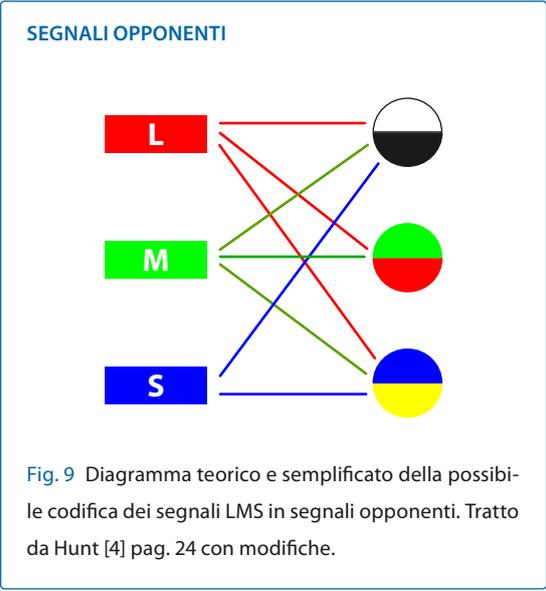
Le cellule della retina dunque operano una compressione dei segnali di tipo spaziale. Tutti i segnali del campo recettivo di un fotorecettore vengono compressi in un unico segnale che viene trasmesso al cervello lungo il nervo ottico.

CODIFICA: SEGNALI OPPONENTI

Contemporaneamente alla compressione, i segnali ai coni L, M e S vengono anche codificati in segnali di tipo opponente, probabilmente per questioni di efficienza e di riduzione del rumore.

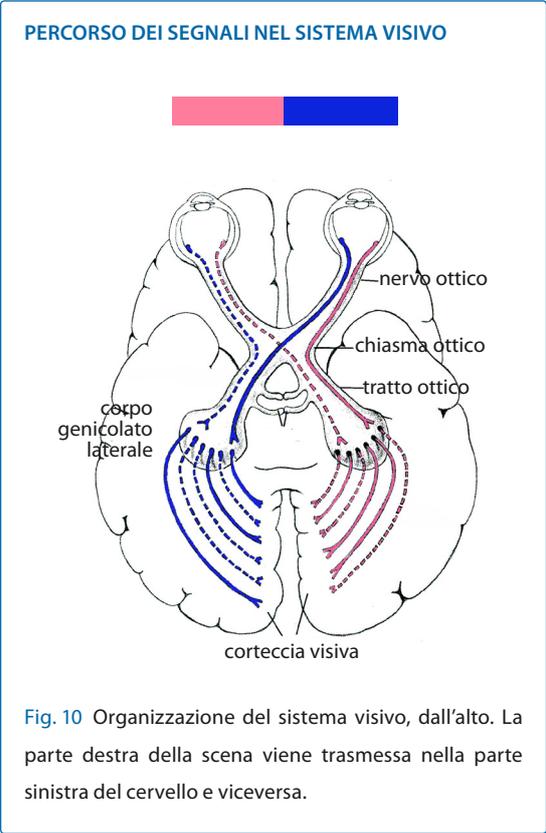
Le modalità di questo meccanismo di codifica non sono ancora state chiarite: varie ipotesi sono state avanzate sulla formazione dei segnali opposti, ma nessuna di queste è stata confermata.

In fig. 9 è indicato un possibile schema. Dai segnali dei tre tipi di coni vengono formati un segnale *acromatico* (detto anche *di luminanza*) e due segnali di *differenza colore*: rosso-verde e giallo-blu. Alla formazione del segnale acromatico i coni contribuiscono in proporzione alla popolazione relativa dei tre tipi.



Dal punto di vista fisiologico il meccanismo di codifica coinvolge l'interazione delle varie cellule della retina (orizzontali, bipolari, amacrine).

Dal punto di vista elettrico i segnali ai coni, che sono a modulazione d'ampiezza (cioè in un certo senso di tipo analogico) sono ancora tali nelle cellule intermedie, mentre sono segnali a modulazione di frequenza (di tipo digitale) alle cellule



le gangliari e quindi al cervello. Evidentemente nella nostra retina c'è un convertitore analogico-digitale.

Un segnale opponente zero è indicato da una certa frequenza di fondo, frequenze superiori indicano un dato segnale, frequenze inferiori un segnale opposto. Per esempio il segnale opponente rosso-verde indica una quantità di verde, oppure una quantità di rosso: rosso e verde sono opposti, come giallo e blu, bianco e nero.

TRASMISSIONE: IL NERVO OTTICO

Il nervo ottico di ognuno dei due occhi è composto da circa un milione di fibre, ognuna delle quali è l'assone di una cellula gangliare. Lungo ogni fibra, la rispettiva cellula gangliare trasmette un segnale al cervello, che fisicamente è un segnale elettrico in modulazione di frequenza e dal punto di vista della codifica è di tipo opponente. I cento milioni di segnali ai fotorecettori diventano dunque un milione di segnali che ogni nervo ottico trasmette al cervello.

I due nervi ottici convergono in un punto di incrocio apparente, il *chiasma ottico* (fig. 10). Per ogni nervo, metà delle fibre (quelle che hanno origine nella emiretina nasale) si dirige verso l'emisfero opposto del cervello, l'altra metà (emiretina temporale) continua il suo cammino nel corrispondente emisfero.

Le fibre terminano in due corpi nel talamo (una struttura all'interno del cervello), i *corpi genicolati laterali*, che stanno uno nell'emisfero destro e l'altro nell'emisfero sinistro e possono essere considerati come dei *terminal* di arrivo. Da questi corpi i segnali vengono smistati ad altre zone della corteccia cerebrale adibite alla loro organizzazione e interpretazione.



Percezione del colore

L'interpretazione dei segnali opposti da parte delle aree a ciò deputate della corteccia cerebrale costituisce e determina la *percezione* (*perception*) visiva (o *esperienza percettiva*) in particolare del colore, ed è essenzialmente sinonimo di "vedere".

La percezione del colore si manifesta con la consapevolezza dell'osservatore di "vedere" un colore e di potergli dare un nome. Inoltre, si manifesta con il fatto che quel colore gli appare, per esempio, come superficie di un oggetto opaco o come corpo luminoso o come qualcosa d'altro; e infine si manifesta con il fatto che quel colore può provocare in lui determinati sentimenti ed emozioni.

I meccanismi psicologici (cioè mentali) mediante i quali percepiamo il colore non sono ancora completamente noti. Il modo in cui la nostra mente analizza il colore costituisce un'area di ricerca da cui non sono ancora emerse indicazioni definitive.

CONTESTO

Il contesto in cui lo stimolo viene presentato ne "guida" l'interpretazione percettiva. Un esperimento classico che mette in luce l'importanza del contesto consiste nell'osservare uno stesso stimolo di colore su sfondi diversi. Un celebre esempio del pittore e designer tedesco Josef Albers (1888-1976) è riportato in fig. 11. I colori dei due quadrati marrone appaiono diversi: quello di sinistra appare più scuro di quello di destra. Tuttavia gli stimoli sono gli stessi, come si può vedere avvicinando i quadrati. Ciò è dovuto al fatto che i due quadrati sono presentati su sfondi diversi e il sistema visivo produce due diverse percezioni di colore.

Se cerchiamo una classificazione dei contesti in cui uno stimolo può essere presentato, la prima e

IMPORTANZA DEL CONTESTO

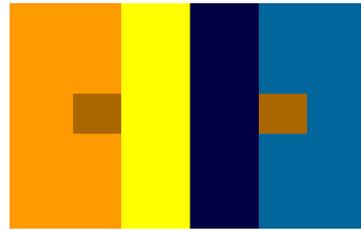


Fig. 11 Classico studio da *Interaction of Color* di Josef Albers (1963) che riguarda l'importanza del contesto. Gli stimoli dei quadrati centrali sono uguali, la loro percezione è diversa.

più semplice distinzione che si può fare riguarda il fatto che lo stimolo sia o non sia accompagnato da altri stimoli, che ne costituiscono il contesto.

COLORI ISOLATI E COLORI NON ISOLATI

Se nel campo visivo dell'osservatore compare un unico stimolo che emana la stessa luce da ogni punto della propria area, se cioè lo stimolo è isolato e uniforme, anche il colore percepito è detto *colore isolato* (*unrelated color*). Al contrario un *colore non isolato* (*related color*) è il colore percepito da uno stimolo accompagnato da altri stimoli nelle sue vicinanze.

Nella vita di tutti i giorni gli stimoli si presentano quasi sempre in modo non isolato. Raramente capita di osservare uno stimolo isolato.



La distinzione tra colore isolato e colore non isolato non è in relazione, come si potrebbe pensare, al fatto che lo stimolo giunga all'occhio direttamente o indirettamente (e in quest'ultimo caso per riflessione o trasmissione): il colore prodotto da uno stimolo diretto, cioè una sorgente luminosa, può essere isolato o non; il colore prodotto da uno stimolo indiretto cioè da un oggetto (opaco o trasparente) può essere isolato o non isolato.

Esempi di colori isolati sono (a) un segnale ferroviario rosso in piena notte, senza la presenza di altre luci; (b) un singolo colore visualizzato su un monitor di computer in un ambiente completamente buio, a patto che tutti i pixel accesi visualizzino lo stesso colore e che non ci siano altre luci (spie, LED). Ma anche il colore il cui stimolo

proviene da un corpo opaco può apparire isolato. Un modo per farlo consiste nel porre l'oggetto in una stanza scura e, con un faretto, illuminarne in modo uniforme una parte. Un secondo modo consiste nell'osservare l'oggetto attraverso un piccolo foro praticato in un cartoncino nero (questo tipo di visione si dice "in apertura").

Alcuni colori (come rosso, blu, arancio) possono essere percepiti sia come isolati che come non isolati; altri colori (come marrone, che è un arancio scuro, bianco e grigio) possono essere percepiti solo come colori non isolati.

L'esperienza mostra che le misure soggettive di colori isolati sono stabili da osservatore a osservatore e dipendono direttamente dai segnali ai coni L, M e S. Invece, il contesto influenza sia l'elaborazione dei segnali nella retina, sia l'interpretazione di questi segnali nel cervello.

PERCEZIONE E SENSAZIONE

In psicologia si considera che la sensazione sia dovuta ai recettori sensoriali. La percezione sarebbe invece la sensazione interpretata e sostenuta da altri elementi (il contesto del colore, ma anche precedenti esperienze e memorie, cioè in generale lo stato mentale, dell'osservatore).

Oggi si ritiene che la distinzione tra sensazione e percezione non abbia fondamento e, almeno per quanto riguarda il colore, non viene usata nel suo senso originario. Certamente esiste la percezione, ma probabilmente non esiste il concetto di sensazione (cioè di percezione non interpretata).

Comunque stiano le cose, nel campo della visione del colore è comune utilizzare il termine *sensazione* per indicare la percezione del colore presentato in condizioni impoverite, su sfondo nero e privato del contesto. Si utilizza invece il termine *percezione* per il colore che viene presentato nel suo contesto comprendente un contorno ed uno sfondo e che viene osservato da un occhio adattato ad un illuminante.

MODI DI APPARIRE DEL COLORE

Oltre alla distinzione tra colore isolato e colore non isolato è necessario distinguere diversi *modi*

di apparire (*modes of color appearance*) del colore. Sono chiamati anche *modi di vedere* il colore (*modes of viewing color*) e sono semplicemente i vari tipi di percezione del colore e del contesto nel quale il colore viene presentato.

Per descrivere un modo di apparire si fa riferimento alle condizioni fisiche o psicofisiche che *più comunemente* causano l'esperienza di tale modo di apparire ("percepisco questo colore come proveniente da ..."). Tuttavia il modo di apparire è determinato dall'*impressione* che lo stimolo provoca sull'osservatore, non dallo stimolo stesso. Basta pensare all'eccellenza di una pittura, che dipende spesso dalla qualità della sua rappresentazione modale.

Un colore viene percepito sempre in qualche modo: spesso come appartenente ad un oggetto, altre volte determinato dall'illuminazione, altre volte ancora come visto attraverso un'apertura su uno sfondo completamente scuro.

MODI OGGETTO

I più comuni modi di apparire del colore sono quelli che vengono associati rispettivamente ad un oggetto opaco (cioè che riflette la luce), trasparente (cioè che trasmette la luce) o autoluminoso (cioè che emette luce, dunque una sorgente luminosa).

Il modo *superficie* (*surface mode*) è il colore normalmente attribuito ad un corpo opaco che riflette la luce che lo illumina. Il colore in modo superficie appare sempre non isolato ed è il modo più comune nel quale viene percepito un colore nella vita di tutti i giorni. Esempi: una parete dipinta, un foglio colorato, la copertina di un libro (fig. 12 a sinistra). Anche il colore su monitor, se non appare isolato, appare in modo superficie.

Il modo *volume* (*volume mode*) è il colore percepito come derivante dal passaggio di luce attraverso la massa di una sostanza più o meno uniforme e trasparente, per esempio un cubetto di ghiaccio, un bicchiere di vino o di *pastis* diluito nell'acqua (fig. 12 a destra). Appare sempre non isolato.

SUPERFICIE E VOLUME



Fig. 12 A sinistra: solitamente il colore viene percepito in modo superficie, come accade con i colori della copertina di questo libro. A destra: il colore rosso del vino in un bicchiere viene percepito in modo volume.

Il modo *illuminante* (*illuminant mode*) è il colore normalmente attribuito ad una sorgente luminosa. Di solito si percepisce così il colore di massima brillantezza in una scena, se è molto più chiaro degli altri oggetti in modo da poter essere caratterizzato con il termine “ardente” (*glow*) nel senso che emette più luce di quanta ne riceve. Può essere una lampada, un faro, un LED, ma anche un oggetto illuminato da un faretto. Può apparire isolato (un faro nella notte, un singolo LED) o non isolato (le lampade di una piazza, le lampadine di un albero di Natale).

MODI NON OGGETTO

I seguenti due modi non vengono collegati ad alcun corpo od oggetto.

Il modo *illuminazione* (*illumination mode*) è il

colore attribuito all’illuminazione prevalente della scena, che riempie lo spazio, piuttosto che agli oggetti presenti, i quali “mediano” il modo illuminazione riflettendo la luce e creando delle ombre (fig. 13). Non è possibile percepire in modo illuminazione un colore isolato. La percezione del colore in modo illuminazione ha interessato molti pittori (Caravaggio, Rembrandt, Pissarro, Monet).

Il modo *apertura* o *riduzione* (*film* o *aperture mode*) è il colore che viene percepito osservando una superficie attraverso una apertura abbastanza piccola. L’area appare omogenea e priva di microstruttura (*texture*) con i contorni sfumati. Il colore del cielo, oppure del fondo di una grotta appare in apertura.

ILLUMINAMENTO

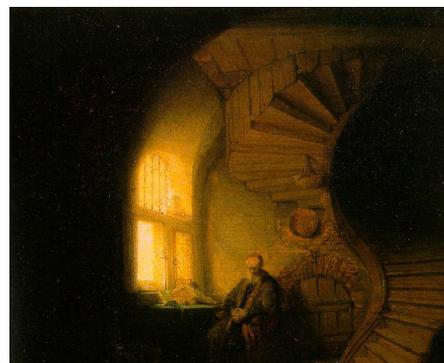


Fig. 13 A sinistra, le lampade stradali sono percepite in modo illuminante, la luce diffusa è percepita in modo illuminazione. A destra, *Filosofi in meditazione*, di Rembrandt (1632), il giallo della finestra viene percepito in modo illuminazione.

Una tecnica per percepire il colore in modo apertura consiste nell'utilizzare un cosiddetto *schermo di riduzione* (*reduction screen*), cioè un cartoncino nero con un foro di circa 1 cm di diametro. Il foro consente di osservare un oggetto mettendo a fuoco il bordo del foro e non l'oggetto, eliminando quindi l'eventuale microstruttura (*texture*) presente e l'effetto del contesto. I fotografi e i pittori ottengono lo stesso risultato chiudendo un po' gli occhi, e in questo caso essere miopi è un vantaggio.

Se Rembrandt avesse dipinto un foglio di carta bianca sul tavolo dei filosofi in meditazione, lo avrebbe fatto giallo. Alla domanda: "di che colore è il foglio di carta?" risponderemmo "bianco" perché vedremo il foglio in modo superficie e sappiamo che la "giallezza" è dovuta all'illuminazione. Se invece vedessimo il foglio attraverso uno schermo di riduzione lo vedremo in modo apertura e diremmo che è giallo.

Il colore in apertura appare quasi sempre isolato, ma può apparire anche non isolato (diversi colori visti attraverso un'apertura, ma vicini tra di loro ed eventualmente su sfondo colorato). Il modo apertura è, in un certo senso, il modo più semplice in cui percepire il colore, perché gli elementi che sostengono l'interpretazione sono ridotti al minimo. Tutta la colorimetria è basata sul modo apertura.

Nel seguito, per semplicità, consideriamo il colore non isolato solo in modo superficie e il colore isolato in modo illuminante (corpo autoluminoso) oppure apertura.

CAMBIAMENTO DI MODO

In condizioni normali, il modo di apparire di un colore non varia: la superficie rimane superficie, il volume rimane volume, ma se le condizioni esterne cambiano, il modo di apparire può cambiare.

Da volume a superficie: un blocco di ghiaccio appare in modalità volume. Man mano che le bolle d'aria che contiene aumentano, diminuisce la trasparenza e il modo volume si trasforma in modo superficie.

CAMBIAMENTO DI MODO

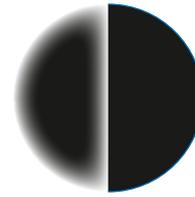


Fig. 14 Da illuminazione a superficie (esperimento di Hering).

Da superficie ad apertura: un colore percepito in modo superficie (perché vediamo la texture dell'oggetto) può cambiare in modo apertura se l'oggetto non viene più messo a fuoco (e dunque la microstruttura svanisce).

Da illuminazione a superficie: un'ombra gettata da un oggetto viene percepita come tale, cioè in modo illuminazione, fino a che la zona sfumata della penombra viene coperta da un tratto continuo e spesso: allora viene percepita come una macchia (fig. 14, esperimento di Hering dell'ombra cerchiata, *ringed-shadow*).

MODI DI APPARIRE DEL COLORE

	MODO	NON ISOLATO	ISOLATO
NON OGGETTO	apertura	✓	✓
	illuminazione	✓	✗
OGGETTO	illuminante	✓	✓
	volume	✓	✗
	superficie	✓	✗

I modi più comuni sono in verde. Quelli che si presentano raramente sono in rosso.



Attributi percettivi del colore

È possibile individuare delle “caratteristiche” della percezione del colore che consentono, in una certa misura, di descrivere, classificare, “scomporre” il colore percepito. Gli studiosi di percezione visiva (“percettologi visionari”) chiamano queste caratteristiche *attributi della percezione del colore*.

Si tratta di *variabili mentali*, che non possono essere definite con precisione, ma che è possibile solo “evocare” mediante nomi, aggettivi ed esempi. Così si può dire se un colore percepito è chiaro o scuro, vivo o pallido, tendente al rosso o al blu.



Per rendere l’idea, gli attributi percettivi di un altro senso, il gusto, sono amaro, salato, dolce, acido.

Distinguiamo tra colore isolato e colore non isolato. I primi quattro attributi possono essere giudicati sia per colore isolato che per colore non isolato. Si tratta degli attributi

- *brillanza (brightness)*;
- *tinta (hue)*;
- *pienezza (colorfulness)*;
- *saturazione (saturation)*.

Altri due attributi possono essere giudicati solo per colore in modo superficie (e in generale per colore non isolato). Si tratta degli attributi

- *chiarezza (lightness)*;
- *croma (chroma)*.

È importante sottolineare che il giudizio sugli attributi del colore viene dato in termini esclusivamente percettivi, senza riferimento ad eventuali misure fisiche dell’energia luminosa, né alla composizione fisica del colore (pigmenti o luci) né alla sua origine.

BRILLANZA

Cosa cambia nella successione dei seguenti colori, da sinistra verso destra?



La luce che proviene dalle aree colorate appare diminuire da sinistra verso destra. Si dice che diminuisce la *brillanza*. La brillanza è la percezione dell’intensità di luce emessa da un’area e si esprime con gli aggettivi che vanno da “fioco” (*dim*), “debole” a “luminoso” (*bright*), “intenso”.

La brillanza è l’attributo che nel linguaggio comune, non specialistico, viene solitamente chiamato “luminosità”.

Ecco alcuni esempi.

- Un foglio di carta bianca o colorata, in parte alla luce del sole e in parte in ombra: la parte al sole ha brillanza superiore alla parte in ombra. Lo stesso foglio alla luce del giorno ha brillanza superiore a quella che ha di sera, alla luce della luna.
- Agendo sul controllo “Brightness” di un monitor si aumenta o diminuisce la brillanza di ogni colore visualizzato sul monitor.
- Su monitor, i colori 255R e 128R sono entrambi rossi ma il primo ha brillanza superiore al secondo; il colore rosso 255R ha brillanza inferiore al colore verde 255G (i canali non citati sono 0).
- A fissate condizioni di illuminazione, un’area di ciano al 100% stampata su carta bianca ha brillanza inferiore ad un’area di ciano al 50%; un’area di giallo al 100% ha una brillanza superiore al magenta al 100%.
- Una lampada alogena dotata di variatore può modificare la brillanza della propria luce. Una lampada bianca da 100 W ha brillanza superiore di una da 50 W.

La brillanza è la percezione della quantità complessiva di luce, ed è in un certo senso un attributo quantitativo (non qualitativo) o, come dicono i fotografi, un attributo *tonale* (per distinguerlo da cromatico).

TINTA, COLORI CROMATICI E ACROMATICI

Cosa cambia nella successione di questi colori, la brillantezza dei quali è mantenuta circa costante?



Cambia la “tinta”. La *tinta* è l’attributo della percezione di colore che esprimiamo con i nomi “rosso”, “azzurro”, “giallo”, “verde”, “arancio” eccetera.

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

Questi colori sono cromatici



mentre i colori acromatici, in modo superficiale, sono il bianco, il nero e i grigi.



In modo illuminante, se il colore non è cromatico, è semplicemente acromatico. Non esiste una luce nera e nemmeno grigia e nemmeno bianca.

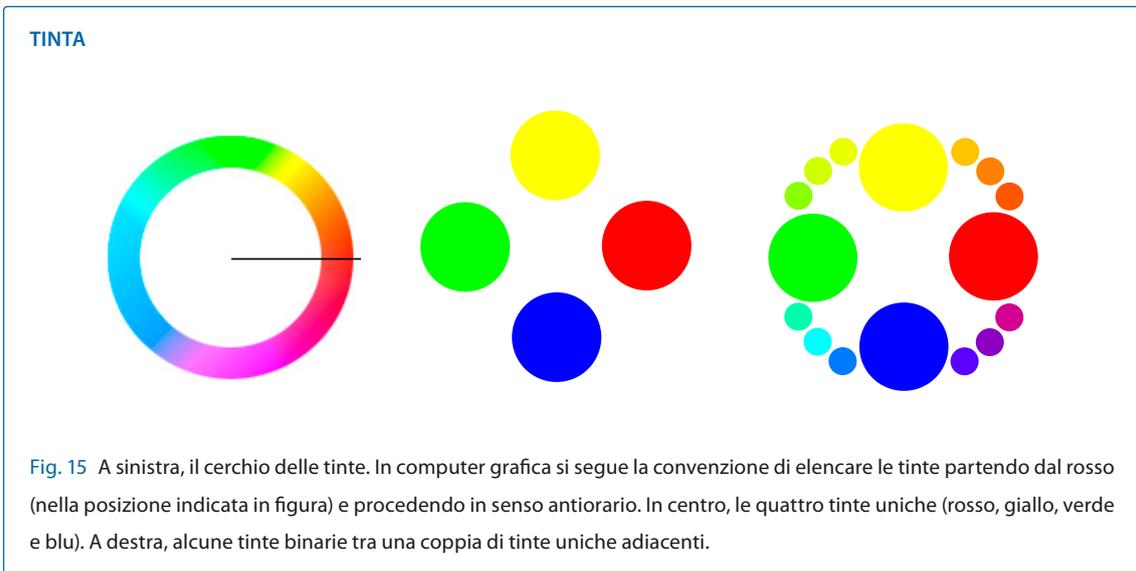
Le tinte hanno un naturale ordinamento circolare (fig. 15, a sinistra). Se si parte dal rosso e si procede in senso antiorario si possono individuare sei tinte che risaltano in modo più evidente delle altre: oltre al rosso, arancio, giallo, verde, blu e viola, ma l’occhio umano si ritiene possa distinguere circa 250 tinte ([1] p. 65).

Alcune tinte sono spettrali (dal rosso al violetto), altre, per esempio il viola (*purple* in inglese) e il magenta, non sono spettrali.

TINTE UNICHE E TINTE BINARIE

Tra tutte le tinte che l’occhio umano può distinguere ce ne sono quattro (fig. 15, al centro) che, dalla maggior parte delle persone, non vengono percepite come mescolanza di altre tinte: si tratta del rosso, del giallo, del verde e del blu, ognuna delle quali è una *tinta unica* o *elementare* (*unique hue*).

Inoltre, la maggior parte delle persone non è in grado di immaginare un colore nel quale siano presenti entrambe le tinte uniche giallo e blu (cioè un giallo bluastrò o un blu giallastro), né un colore nel quale siano presenti entrambe le tinte uniche rosso e verde, allo stesso modo in cui non è possibile immaginare un oggetto che sia contemporaneamente caldo e freddo. Si esprime questo fatto dicendo che giallo e blu costituiscono una coppia di *tinte opposte* (*opponent hues*) e così anche rosso e verde. Il concetto di tinte opposte è stato proposto per la prima volta dal



fisiologo tedesco Ewald Hering nel 1872, e circa 80 anni dopo l'esistenza delle tinte opponenti è stata confermata sperimentalmente.

Una tinta non unica è detta *tinta binaria* (*binary hue*) e viene percepita dalla maggior parte delle persone come mescolanza di due tinte uniche adiacenti, cioè come mescolanza di una delle seguenti coppie:

- rosso e giallo: per esempio arancio, ocra;
- giallo e verde: per esempio limone, muschio, glauco;
- verde e blu: per esempio smeraldo, turchese, zaffiro;
- blu e rosso: per esempio viola, magenta, malva.

In fig. 15, a destra, tra ogni coppia di tinte uniche adiacenti sono state inserite tre tinte binarie.

PIENEZZA

Cosa cambia nella successione di questi colori, nei quali brillantezza e tinta (quando c'è) sono tenute costanti?



La quantità di tinta appare diminuire da sinistra a destra. Nell'ultimo colore la tinta è assente.

Si dice che diminuisce la "pienezza". La *pienezza* è l'attributo della percezione di colore secondo il quale un'area appare esibire una quantità maggiore o minore di tinta. Nel linguaggio comune si usano gli aggettivi "ricco", "pieno", "vivo", e in senso opposto "pallido", "smorto" per indicare la pienezza del colore.

Per i colori in modo superficie, la pienezza dei colori acromatici è nulla. Per i colori cromatici, la pienezza dipende dal livello di illuminazione: quando il livello aumenta, anche la pienezza aumenta. Un cartoncino rosso alla luce del sole ha maggiore pienezza dello stesso cartoncino all'ombra, e un autobus giallo visto in pieno sole ha maggiore pienezza di uno visto di sera.

DONNA CON BILANCIA



Fig. 16 Dipinto di Johann Vermeer (1665). Per dimostrare alcuni attributi del colore.

Alcuni esempi.

- I colori acromatici per definizione non hanno tinta e dunque hanno pienezza nulla. Man mano che aumenta la quantità di tinta aumenta la pienezza.
- Agendo sul controllo "Brightness" di un monitor si aumenta o diminuisce la brillantezza e dunque anche la pienezza di ogni colore visualizzato sul monitor.
- Su un monitor, i colori RGB (255, 0, 0) e (128, 0, 0) sono entrambi rossi ma il primo ha pienezza superiore al secondo.
- Blu e celeste hanno la stessa tinta, ma il blu ha pienezza maggiore del celeste, e lo stesso si può dire di viola rispetto a lilla, rosso rispetto a rosa (alle stesse condizioni di illuminazione).
- Nel dipinto di Vermeer, *Donna con bilancia* (fig. 16) il rosso della gonna ha pienezze diverse, perché è in parte in luce e in parte in ombra.

SATURAZIONE

Il quarto attributo percettivo del colore deriva dalla pienezza ed è la *saturatione* (*saturation*). La saturazione esprime la quantità di tinta di un colore, non in termini assoluti (come fa la pienezza) ma giudicata *in proporzione alla sua brillantezza*. Quando varia la brillantezza di un colore varia la

sua pienezza, ma non la saturazione, che per definizione non dipende dalla brillantezza.

La saturazione viene giudicata in pratica solo per il colore in modo illuminante; per il colore in modo superficie (e in generale non isolato) la saturazione può essere giudicata ma non è importante, come si vedrà più avanti.

Se la brillantezza non varia, le differenze di saturazione sono uguali alle differenze di pienezza.

Esempi.

- Un segnale ferroviario rosso in piena notte ha una saturazione elevata e può essere confrontato con i colori delle luci delle carrozze che sono bianche e dunque a saturazione nulla o quasi.
- Il rosso di un semaforo ha la stessa saturazione quando viene osservato direttamente e quando viene osservato riflesso, per esempio, in una vetrina.

La massima saturazione possibile varia con la tinta. La saturazione è massima per i colori per i quali il sistema visivo ha la massima sensibilità (giallo, verde). Per alcune tinte è possibile discriminare fino a 200 gradi di saturazione.

La relazione tra pienezza e saturazione può essere definita con questa uguaglianza

$$\text{saturazione} = \text{pienezza} / \text{brillantezza}$$

che non va considerata in senso strettamente matematico ma in senso “indicativo”:

CHIAREZZA

Nel giudicare il colore in modo superficie (che è un colore non isolato e presuppone l'esistenza di una illuminazione, e dunque di un bianco e di una scala di grigi), oltre ai quattro attributi percettivi già visti si possono valutare due ulteriori attributi: la chiarezza (che è una brillantezza relativa) e la croma (che è una pienezza relativa).

La brillantezza di un oggetto dipende dall'illuminazione. Un pezzo di carta bianca visto alla luce di una candela ha una brillantezza inferiore del-

CHIAREZZA

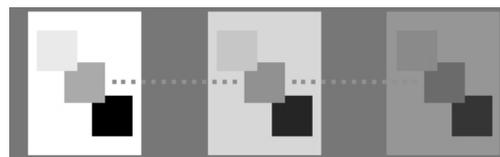


Fig. 17 Tre fogli bianchi sotto diverse illuminazioni, per illustrare l'attributo della chiarezza. I tre quadrati superiori hanno la stessa chiarezza, così come quelli intermedi e quelli inferiori.

lo stesso pezzo di carta bianca visto alla luce del sole. Si definisce allora una brillantezza relativa, la *chiarezza*, che è la brillantezza di un colore relativa ad un'area illuminata allo stesso modo e giudicata bianca (fig. 17). Si noti che il concetto di bianco non interviene trattando di brillantezza, mentre è centrale se si tratta di chiarezza.

Nel linguaggio comune la chiarezza si esprime con gli aggettivi “bianco”, “chiaro”, “scuro”, “nero”.

A parità di illuminazione (nello spazio e nel tempo), se giudichiamo la quantità di luce emessa da un'area in scala assoluta, stiamo giudicando la brillantezza. Se giudichiamo la quantità di luce in relazione ad un bianco stiamo giudicando la chiarezza. Sempre a parità di illuminazione i rapporti di chiarezza sono uguali ai rapporti di brillantezza (cioè se un'area ha brillantezza doppia ha anche chiarezza doppia).

Se l'illuminazione varia, può variare nello spazio (ombre) o nel tempo, e in ogni caso varia la brillantezza. La chiarezza invece non varia: visto in ombra un quadrato grigio su un foglio bianco ha la stessa chiarezza di quando è visto al sole. È vero che al sole il quadrato grigio emette più luce, ma anche il foglio bianco ne emette di più e ciò mantiene il rapporto costante.

Naturalmente è anche possibile giudicare la chiarezza dei colori cromatici, non solo dei colori acromatici.

La relazione tra brillantezza e chiarezza può essere

definita con questa uguaglianza (che non va considerata in senso matematico ma “indicativo”):

$$\text{chiarezza} = \text{brillanza} / \text{brillanza del bianco}$$

Esempi (tutti in modo superficie).

- Consideriamo due monitor, il primo regolato su una brillantezza maggiore rispetto al secondo. Lo stesso quadrato grigio (per esempio RGB = 128, 128, 128) ha maggiore brillantezza nel primo, ma stessa chiarezza.
- Consideriamo un cubo colorato sotto una illuminazione. Le facce del cubo avranno brillantezza diversa (minore dove ci sono le ombre) ma la stessa chiarezza.
- Un foglio di cartoncino colorato di giorno, alla luce del sole, ha maggiore brillantezza che di sera, ma la chiarezza rimane la stessa.
- Due quotidiani possono avere carta di diversa brillantezza ma entrambe le carte (se sono bianche) hanno la stessa chiarezza.

Pare che l'occhio umano possa distinguere, in condizioni normali, circa 100 gradazioni di chiarezza, dal nero al bianco.

IMPORTANZA DELLA CHIAREZZA

Il sistema visivo è portato a giudicare la chiarezza piuttosto che la brillantezza, cioè tende a scartare la differenza di illuminazione (nello spazio e/o nel tempo) nell'osservare una scena (questo fatto viene chiamato *costanza della chiarezza*).

La chiarezza è il fattore dominante della per-

cezione visiva umana. Da sola, infatti, consente una lettura soddisfacente dell'ambiente, degli oggetti, delle forme: basta pensare alle fotografie e ai film in bianco e nero (che in realtà sono a livelli di grigio).

Gli altri attributi del colore dicono qualcosa in più sulle qualità degli oggetti e non sono sempre necessari. Così per distinguere una mela da una pera, è sufficiente la chiarezza. Se c'è anche la tinta è possibile capire se la mela è acerba (verde) o matura (rossa).

CROMA

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

Analogamente a come abbiamo considerato una brillantezza relativa, la chiarezza, possiamo allora considerare una pienezza relativa, la *croma*, che è la differenza di pienezza da un grigio di uguale chiarezza. La croma è indipendente dal livello di illuminazione: se quest'ultima varia la croma rimane costante.

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

I colori acromatici hanno croma nulla. A pari-

ATTRIBUTI DELLA PERCEZIONE DEL COLORE				
COLORE	NOME	CATEGORIA	DESCRIZIONE	NOTE
isolato e non isolato	brillantezza	di base	luce che il colore appare emettere	per colore non isolato è più importante la chiarezza
	tinta		rosso, giallo, verde, blu o mescolanza di due adiacenti	
	pienezza		quantità di tinta	per colore non isolato è più importante la croma
	saturazione	relativo	saturazione = pienezza / brillantezza = croma / chiarezza	per colore non isolato è ridondante
solo non isolato	chiarezza		chiarezza = brillantezza / brillantezza del bianco	richiede un illuminante e viene giudicato relativamente a un bianco similmente illuminato
	croma		croma = pienezza / brillantezza del bianco	

CROMA

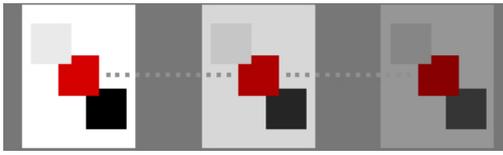


Fig. 18 Tre fogli bianchi sotto diverse illuminazioni per illustrare l'attributo della croma. I tre quadrati centrali hanno la stessa croma.

tà di illuminazione (nello spazio e nel tempo), se giudichiamo la quantità di tinta presente in un'area in scala assoluta, stiamo giudicando la pienezza. Se giudichiamo la quantità di tinta in relazione ad un bianco stiamo giudicando la croma. Sempre a parità di illuminazione i rapporti di croma sono uguali ai rapporti di pienezza (cioè se un'area ha pienezza doppia ha anche croma doppia).

Se l'illuminazione varia, può variare nello spazio (ombre) o nel tempo, e in ogni caso varia la pienezza. La croma invece non varia. Se un cartoncino rosso di sera ha minor pienezza, la hanno anche i cartoncini grigi, e il bianco in particolare, e ciò mantiene il rapporto costante (fig. 18).

Per un colore in modo superficie, il nostro sistema visivo è portato a giudicare più la croma di un oggetto, che non la pienezza e sono più importanti chiarezza e croma (scale relative) che brillantezza e pienezza (scale assolute).

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

La croma può essere espressa con questa uguaglianza:

$$\text{croma} = \text{pienezza} / \text{brillantezza del bianco}$$

che come al solito va intesa in modo indicativo.

CHIAREZZA E CROMA

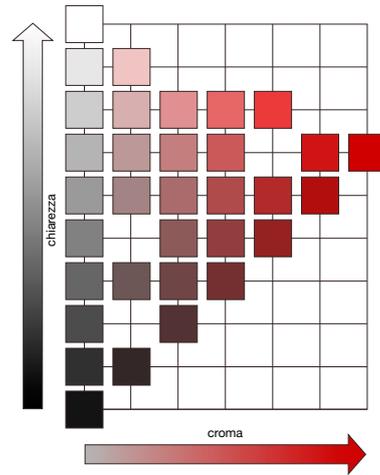


Fig. 19 Colori della stessa tinta organizzati per chiarezza e croma.

SATURAZIONE RIVISITATA

Per il colore in modo superficie (ed in generale per i colori non isolati) l'attributo saturazione è ridondante, perché è noto quando sono note chiarezza e croma. Infatti

$$\begin{aligned} \text{saturazione} &= \text{pienezza} / \text{brillantezza} \\ &= \text{croma} / \text{chiarezza} \end{aligned}$$

Per descrivere un colore in modo superficie ci si può normalmente limitare agli attributi di chiarezza, tinta e croma (fig. 19).

CROMATICITÀ E CROMINANZA

La combinazione degli attributi di tinta e saturazione viene detta *cromaticità* (*chromaticity*) e la combinazione degli attributi tinta e croma prende il nome di *crominanza* (*chrominance*).

Dunque, per un colore in modo illuminante che viene definito in termini di luminanza, tinta e saturazione, la cromaticità indica il colore a meno della luminanza. Analogamente, per un colore in modo superficie, normalmente definito con chiarezza, tinta e croma, la crominanza indica il colore a meno della chiarezza.

SISTEMA DEI COLORI DI MUNSELL

A partire dal 1905 il pittore americano Albert Munsell ha sviluppato materialmente un sistema di ordinamento dei colori (in modo superficiale) basato sulla apparenza, cioè sugli attributi percettivi di chiarezza, tinta e croma, il *Munsell Color Book*. Inizialmente si trattava di un sistema di campioni di carta dipinti ad acquerello ad uso degli studenti.

L'asse centrale del sistema di ordinamento rappresenta la chiarezza (che Munsell chiama "valore") e ha una scala uniforme di undici livelli di grigio, dal nero al bianco, indicati con i valori da 0 a 10 (fig. 20).

La distanza di un colore dall'asse rappresenta la croma con valori che vanno da 0 a 16.

Ogni semipiano che esce dall'asse centrale rappresenta una tinta. Intorno al tronco ci sono cinque tinte principali (rosso, giallo, verde, blu e viola) che vengono indicati rispettivamente con 5R, 5Y, 5G, 5B, 5P e cinque tinte intermedie (giallo-rosso, verde-giallo, blu-verde, viola-blu, rosso-viola) indicati con 5YR, 5GY, 5BG, 5PB, 5RP.

Queste 10 tinte stanno al centro di 10 settori. Per esempio il rosso 5R sta al centro di un settore che va da 0R a 10 R. La notazione Munsell 5R 4:8 rappresenta un rosso con chiarezza (valore) 4 e croma 8.

Tutti i campioni di colore, che Munsell pensava di poter raccogliere in una sfera, sono stati realizzati fisicamente e raccolti nel *Munsell Color Solid*, nel quale ogni tinta viene estesa alla sua massima croma ad ogni valore. I campioni devono essere visti normalmente (90°), disposti su un fondo neutro e illuminati con un particolare illuminante (D65) e luce incidente a 45°.

L'importanza del sistema di Munsell dipende dal fatto che in questo sistema le diverse tinte sono spaziate in modo percettivamente uniforme, e così le diverse chiarezze e i vari gradi di croma. Anche se non è l'unico sistema uniforme, il sistema di Munsell è il principale sistema di riferimento quando si vuole valutare l'uniformità

di uno spazio colore. Nel fascicolo *Colorimetria* usiamo il sistema di Munsell per valutare l'uniformità del sistema CIELAB.

In fig. 21, il sistema di Munsell in una applicazione di grafica vettoriale, FreeHand MX.

SISTEMA DI MUNSELL

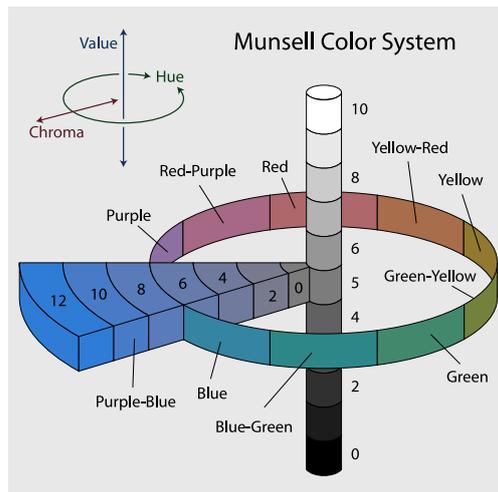


Fig. 20 Schema del Munsell Color System (da Wikipedia); sono indicati i colori 5PB di valore 5 e varie croma.

FREEHAND

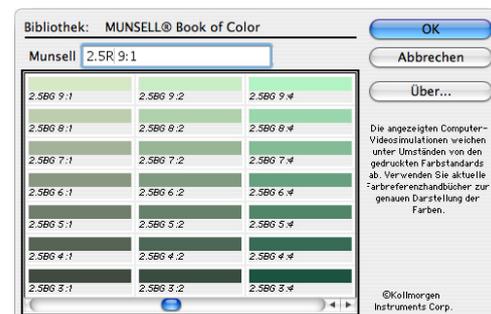


Fig. 21 *Munsell Book of Color* in Macromedia (poi Adobe) Freehand MX.

Attributi del colore in Photoshop

Il colore su monitor appare generalmente in modo superficie (talvolta in modo illuminante). Per il modo superficie gli attributi rilevanti sono chiarezza, tinta e croma.

È possibile osservare questi attributi con Photoshop (qui è usata inglese CS3 su Mac OS X), e come si possa variare ognuno dei tre attributi indipendentemente dagli altri due, cioè mantenendoli costanti.

L'esempio si basa sul sistema Lab, perché in questo sistema la chiarezza è rappresentata da L, la tinta dall'angolo del punto (a, b) con l'origine e la croma dalla distanza del punto (a, b) dall'origine (vedi schema in basso, nella pagina successiva).

FASE DI PREPARAZIONE

I riferimenti sono alle immagini qui a destra.

- 1 Si crea una nuova immagine in Lab (File > New oppure command-N), per esempio di 300 x 300 pixel, a qualunque risoluzione. Clic su OK.
- 2 Si apre la paletta Color (F6), si seleziona Lab Sliders nel menù pop-up della paletta e si imposta un colore, per esempio 50 50 50 come nell'esempio.
- 3 Con lo strumento Secchiello (G) e un clic si riempie l'immagine con il colore impostato.
- 4 Con il comando Image > Adjustment > Hue/Saturation (command-U) si apre la finestra Hue/Saturation.
- 5 Si fa clic con il cursore in un punto qualunque dell'immagine (Il cursore si è trasformato in contagocce e il clic consente di "animare" la paletta Color).

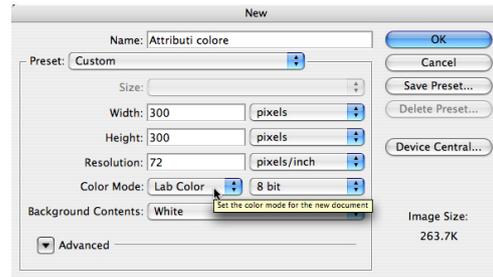
Ora vediamo il funzionamento dei tre cursori. Partiamo dal terzo perché è il più semplice da trattare.

IL TERZO CURSORE (LIGHTNESS)

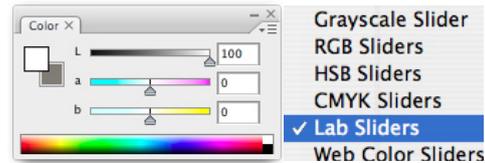
6 Il terzo cursore modifica indipendentemente la chiarezza (*lightness*) e quindi anche la brillantezza del colore, mantenendo costanti tinta e croma (non la saturazione). Dunque il nome Lightness è corretto. La traduzione in italiano dovrebbe essere appunto Chiarezza, ma è stato tradotto con Luminosità.

Si può sperimentare variando la posizione del cursore con il mouse o anche con i tasti (freccia in

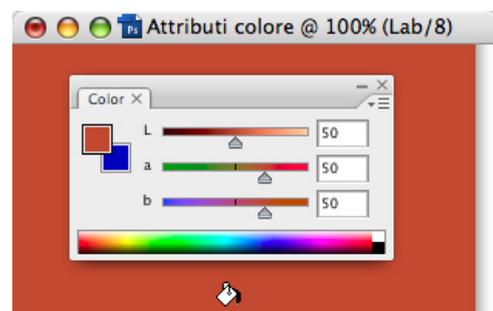
1



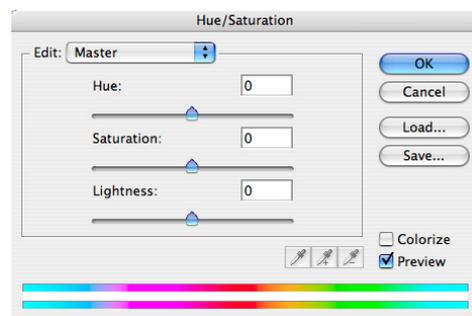
2



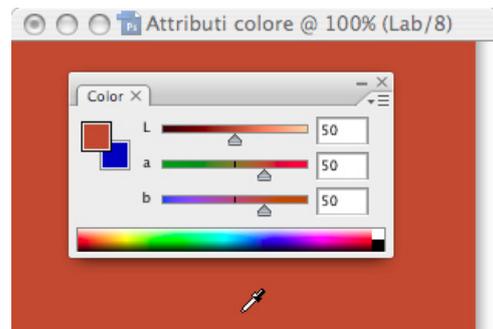
3



4



5



alto, freccia in basso). Si può osservare che variando la posizione del cursore varia solo il valore L di Lab (che infatti nel sistema Lab indica la *lightness*, cioè la chiarezza).

Si può variare la brillantezza senza variare la chiarezza agendo sul controllo  Brightness (Luminosità) del monitor. Il monitor appare più o meno luminoso ma la chiarezza (il valore L) non cambia.

IL PRIMO CURSORE (HUE)

7 Questo cursore modifica indipendentemente la tinta (*hue*) del colore mantenendo costanti chiarezza e croma (e quindi anche saturazione). Il nome Hue è dunque corretto. La traduzione in italiano dovrebbe essere Tinta e non Tomalità.

Si può sperimentare muovendo il cursore (con il mouse o con i tasti freccia in alto, freccia in basso) fino all'estrema destra e poi continuando dall'estrema sinistra. La tinta cambia con continuità. Si può osservare che variando la posizione del cursore, cambia il rapporto tra a e b (che infatti nel sistema Lab indica la tinta di un colore).

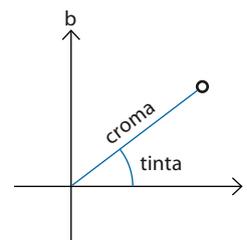
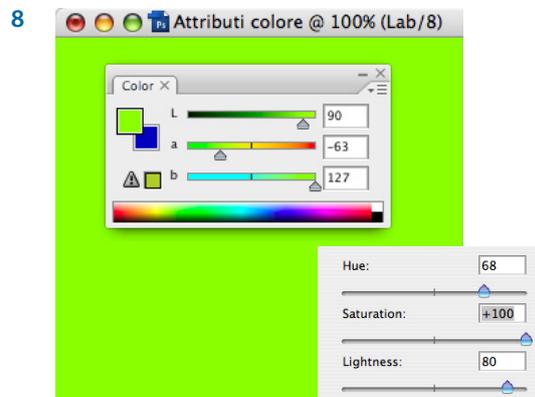
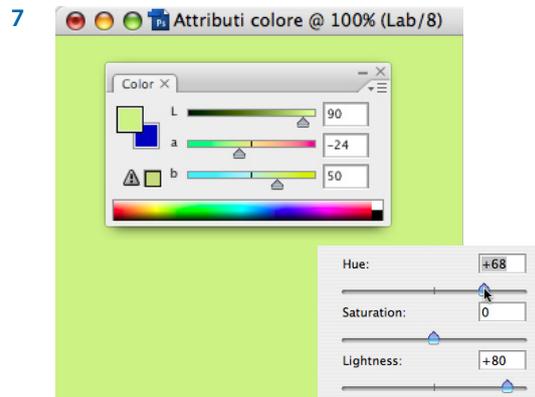
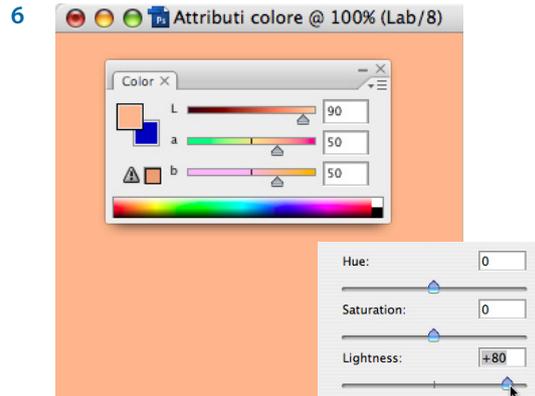
IL SECONDO CURSORE (SATURATION)

8 Questo cursore modifica la croma (*chroma*) del colore e di conseguenza anche la pienezza e la saturazione, mantenendo costanti tinta e chiarezza.

Si può sperimentare variando la posizione del cursore (con il mouse o con i tasti freccia in alto, freccia in basso). Si vede che non varia il valore L (cioè la chiarezza rimane costante) né il rapporto tra a e b (cioè la tinta rimane costante). Varia il valore a nella stessa proporzione del valore b. La distanza di (a, b) dall'origine è appunto la croma nel sistema Lab.

Il secondo cursore in realtà rappresenta la croma, non la saturazione. Di conseguenza i suoi spostamenti modificano anche la saturazione, perché la saturazione dipende dalla croma. Ma la saturazione dipende anche dalla chiarezza, rappresentata dal terzo cursore. Quindi se il secondo cursore rappresentasse la saturazione, dovrebbe spostarsi anche spostando il terzo.

Si può variare la pienezza senza variare la croma con il controllo  Brightness (Luminosità) del monitor. Il monitor appare di maggiore o minore pienezza ma la croma non cambia.



Tinta e croma sul piano (a, b) di CIELAB



Descrivere un colore

La parola “colore” ha la stessa radice del verbo “celare” nel senso di nascondere; il colore è quindi, secondo una antichissima interpretazione, ciò che nasconde le cose. I pitagorici (Pitagora è vissuto tra il 570 e il 490 a. C.) chiamavano χρομα (*khroma*, ovvero colore) la superficie dei corpi, e per la filosofia classica, basata sui principi di Aristotele (384-322 a. C.), il colore è l'estremità visibile dell'oggetto.

Nell'italiano moderno la parola “colore” ha due principali significati:

- percezione provocata dalla luce che arriva all'occhio: il colore dell'oro, i colori dell'arcobaleno, i colori liturgici, un film a colori;
- sostanza colorante usata per dipingere, pitturare, stampare: colore a olio, negozio di colori, colori da tubetto, una mano di colore.

Ma come vengono descritti i singoli colori nei dizionari?

COME LO DESCRIVONO I DIZIONARI

Ogni dizionario della lingua italiana riporta nomi di colori, le cui descrizioni inevitabilmente sono vaghe. Ecco alcuni esempi tratti dallo Zingarelli:

- amaranto: rosso intenso con sfumature violacee;
- ambra: giallo bruno caratteristico della sostanza omonima;
- marrone: colore scuro, quasi nero;
- giallo: colore tra l'arancio e il verde.

Vi sono molti motivi che giustificano la vaghezza delle descrizioni, tra i quali:

- il nome non si riferisce ad un singolo colore ma, in modo approssimato, ad un gruppo di colori dai confini non bene precisati (esistono per esempio numerosi verdi con caratteristiche diverse);
- i linguaggi naturali (come l'italiano e l'inglese)

sono per loro natura ambigui e vaghi (cosa significa “quasi nero?”);

- le percezioni sono per loro natura inspiegabili.

Per descrivere appropriatamente un singolo colore, inteso come percezione e in modo superficiale, si possono indicare i sei attributi percettivi. Nella maggioranza delle applicazioni pratiche si può tuttavia tralasciare brillantezza, pienezza e saturazione, ed è sufficiente indicare solo chiarezza, tinta e croma per descrivere efficacemente un colore.

NOMI DELLE TINTE

Anche in assenza di specifici nomi comuni, l'esistenza delle tinte uniche consente di standardizzare i nomi di tutte le tinte, come si fa con i punti cardinali. Per esempio, i nomi standard di tre tinte binarie tra rosso e giallo potrebbero essere:

- rosso giallastro (un rosso che tende al giallo, molto rosso con un po' di giallo);
- rosso-giallo (combinazione di rosso e giallo in uguale proporzione, cioè arancio);
- giallo rossastro (giallo che tende al rosso, molto giallo con un po' di rosso).

In italiano infatti gli aggettivi (in particolare quelli indicanti colori) che terminano con il suffisso *-astro* esprimono una qualità attenuata, cioè significano *che tende a* e corrispondono agli aggettivi inglesi che terminano con il suffisso *-ish*. Così *yellowish green* si traduce “verde giallastro” e *greenish yellow* “giallo verdastro”.

TINTE DI BASE

Rosso, giallo, verde e blu, oltre a essere tinte uniche, sono tinte “di base” anche in un altro senso. Una famosa ricerca pubblicata nel 1967 dagli antropologi americani B. Berlin e P. Kay sui nomi indicanti le tinte in 98 lingue diverse porta alla conclusione che (fig. 22):

- tutte le lingue hanno almeno due nomi per indicare il bianco e il nero;
- nelle lingue che hanno tre nomi, oltre a bianco e nero compare il rosso;
- nelle lingue che hanno quattro nomi, ai precedenti viene aggiunto o il verde o il giallo, e in quelle con cinque viene aggiunto l'altro;

- nelle lingue con sei nomi, ai precedenti viene aggiunto il blu;
- il nome successivo, se esiste, è il marrone;
- gli ultimi nomi, se esistono, sono il viola, il rosa, l'arancio e il grigio.

Dunque, oltre bianco e nero, le quattro tinte che i linguaggi di tutto il mondo hanno sentito la necessità di nominare per prime sono appunto le tinte uniche.

DESCRIZIONE TRAMITE ATTRIBUTI

La descrizione del colore *brown* (marrone) che si trova nell'*American Heritage Dictionary of the English Language*, che prendiamo come esempio, è fatta "scomponendo" il colore nei suoi attributi di chiarezza, tinta, e croma (e considerando il colore in modo superficiale):

brown: any of a group of colors between red and yellow in hue that are medium to low in lightness and low to moderate in saturation.

La tinta è descritta come una tinta binaria intermedia tra le due tinte uniche rosso (*red*) e giallo (*yellow*), dunque si tratta più o meno di un arancio; la chiarezza è compresa tra bassa e media (quindi si tratta di un arancio scuro); la croma è tra bassa e moderata: un arancio scuro poco cromatico. Personalmente aumenterei un po' la croma, ma la descrizione in termini di attributi del colore è impeccabile. Ecco altre descrizioni di colore in termini di attributi dell'*American Heritage* più o meno riuscite:

- *amaranth: a deep reddish purple to dark or grayish, purplish red;*
- *lemon yellow: a moderate to brilliant vivid yellow;*
- *lilac: a pale to light or moderate purple;*
- *mauve: a moderate grayish violet to moderate reddish purple;*
- *ocher: a moderate orange yellow, from moderate or deep orange to moderate or strong yellow;*
- *orange: any of a group of colors between red and yellow in hue, of medium lightness and moderate saturation;*
- *turquoise: a light to brilliant bluish green.*

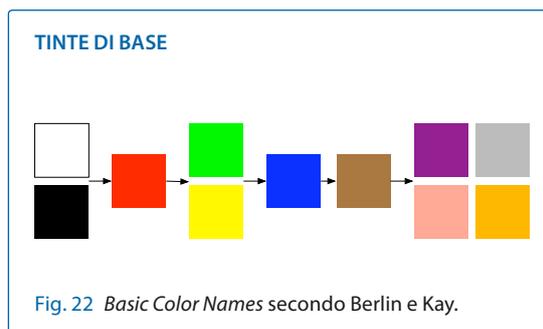


Fig. 22 Basic Color Names secondo Berlin e Kay.

DESCRIZIONE MEDIANTE PRIMARI

Un altro modo per descrivere un colore è quello indicato da Hering. Le quattro tinte uniche (rosso, giallo, verde, blu) assieme ai due colori acromatici fondamentali (bianco e nero, che non sono tinte, ma pur sempre colori) sono i sei *colori primari psicologici* che sono a due a due opposti: il bianco si oppone al nero, il rosso al verde e il giallo al blu.

Ogni percezione di colore è composta a partire da queste sei percezioni elementari. La descrizione della tinta non è diversa da quella usata precedentemente.



Argomenti avanzati

ANOMALIE DELLA VISIONE DEL COLORE

Alcune anomalie della visione derivano da alterazioni dei fotorecettori della retina. Il *tricromate normale* è il soggetto che non ha alcuna anomalia ai coni della retina e quindi vede normalmente tutti i colori (fig. 23 in alto).

Circa l'8% della popolazione maschile ha qualche difetto genetico relativo ai fotorecettori.

Il *tricromate anomalo* è un soggetto nella cui retina sono presenti tutti e tre i tipi di coni, ma un tipo di coni presenta delle *anomalie*:

- il *protanomalo* presenta una anomalia ai coni L, cioè è anomalo per il verde (riguarda l'1% della popolazione);
- il *deuteranomalo* presenta una anomalia ai coni M, cioè è anomalo per il rosso (riguarda il 5% della popolazione);
- il *tritanomalo* presenta una anomalia ai coni S, cioè è anomalo per il blu.

Il soggetto *dicromate* è caratterizzato dall'assenza di un tipo di coni:

- se sono assenti i coni L (rosso) il soggetto è detto *protanope* (1% della popolazione) e non distingue tra rossi e verdi (fig. 23 in centro);
- se sono assenti i coni M (verde) è detto *deuteranope* (1% della popolazione) e anche in questo caso confonde tra rossi e verdi (fig. 23 in basso);
- se sono assenti i coni S (blu) è detto *tritanope* (è un difetto molto raro, colpisce il 0,004% della popolazione) e non distingue tra violetto e giallo.



Il primo elemento proto- deuter- trito- dei termini composti deriva dal greco e significa rispettivamente primo, secondo, terzo (con riferimento rispettivamente a rosso, verde, blu). Anopsia (composto di a privativa e del greco opsis, vista) significa "impossibilità di vedere".

DICROMATOPSIA



Fig. 23 In alto una scena vista da un osservatore tricromatico; in centro da un osservatore protanope; in basso da un osservatore deuteranope.

Infine il soggetto *monocromate* è afflitto da cecità cromatica totale o *acromatopsia*. Questo difetto è molto raro, interessa lo 0,003% della popolazione e può derivare dalla presenza di un solo tipo di coni (*monocromatismo da coni o atipico*) o dall'assenza totale di coni (*monocromatismo da bastoncelli o tipico*).

Molti casi di anomalie della visione sono ereditari e colpiscono soprattutto i maschi. La verifica delle anomalie della visione viene effettuata mediante tavole colorate, tra le quali molto usa-

ANOMALIE DELLA VISIONE A COLORI						
	DIFETTO	ANOMALIA	%M*	%F*	CONFUSIONE	PROBABILE CAUSA
TRICROMATISMO ANOMALO	protanomalia	anomalia per il rosso	1	0.02		sensibilità spettrale dei coni L spostata verso le onde corte
	deuteranomalia	anomalia per il verde	4.9	0.38		sensibilità spettrale dei coni M spostata verso le onde lunghe
	tritanomalia	anomalia per il blu				
DICROMATISMO	protanopia	cecità per il rosso	1	0.02	rosso e verde	mancanza dei coni L
	deuteranopia	cecità per il verde	1.1	0.01	rosso e verde	mancanza dei coni M
	tritanopia	cecità per l'azzurro	0.002	0.001	giallo e blu	mancanza dei coni S
MONOCROMATISMO	da coni o atipico	cecità per i colori			i colori appaiono grigi	mancanza di due tipi di coni
	da bastoncini o tipico	cecità per i colori			i colori appaiono grigi	mancanza di tutti i coni
* Maschi, Femmine						

te sono le tavole di Ishihara (dal nome dell'oftalmologo giapponese Shinobu Ishihara, 1879-1963, fig. 24).

"Daltonico" è un termine generico per indicare dicromatismo. Deriva dal nome del chimico inglese John Dalton (1766-1844) che nel 1794 diede una descrizione scientifica della propria visione alterata dei colori nell'articolo "Extraordinary facts relating to the vision of colors". Basandosi sulla sua descrizione si è creduto per molto tempo che fosse protanope, mentre esami fatti dopo la sua morte hanno dimostrato che era deuteranope.

STUDI SULLA VISIONE DEL COLORE

Immaginate di voler capire come funziona una radio o un televisore. Ci sono due possibili approcci: considerare il televisore una "scatola nera", agire sui vari meccanismi (interruttori, manopole) e osservare cosa succede. Oppure, aprire l'apparecchio, cercare di tracciare uno schema dei componenti e studiare il comportamento delle resistenze, condensatori, transistori, valvole.

I due metodi, quello che studia i meccanismi e quello che studia i componenti, non sono equi-

TAVOLA DI ISHIHARA

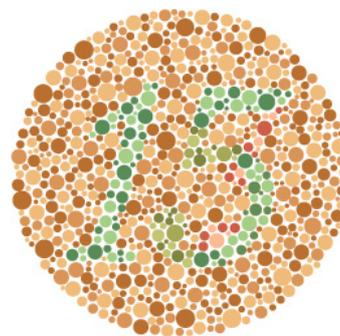


Fig. 24 Una delle tavole di Ishihara. Un soggetto normale legge 15, un soggetto con alterazioni retinali legge 13, o 17 o nulla.

valenti, né facilmente rapportabili, in quanto non c'è una relazione diretta tra meccanismi e componenti.

Il metodo che studia i meccanismi è concettualmente meno complesso, ma non consente di scendere nei dettagli perché un meccanismo non è necessariamente identificabile con una precisa

struttura circuitale, e potrebbe essere espressione delle attività di molti componenti. Se si rompe qualcosa, non avremo la minima idea del componente sul quale agire.

Il metodo che studia i componenti è più complesso ma analitico; consente di dire dov'è il *componente* che fa quella cosa, ma non di spiegare direttamente gli aspetti qualitativi. Sapere tutto su resistenze, condensatori e valvole non basta a spiegare come funziona una radio.

Analogamente, i fenomeni visivi che iniziano nel momento in cui i segnali neurali vengono generati dai fotorecettori, possono essere indagati in due modi: dal punto di vista *psicofisico*, cioè studiando la relazione tra lo stimolo e la risposta psicologica del sistema visivo, o dal punto di vista *neurofisiologico*, cioè seguendo passo dopo passo il percorso del segnale nervoso dalla retina lungo il nervo ottico fino al cervello.

La psicofisica studia il modo in cui lo stimolo visivo viene “valutato” dall'osservatore e genera una percezione, considerando il sistema visivo una “scatola nera” che viene investigata senza “sollevarne il coperchio” cioè senza entrare nei dettagli del suo funzionamento. In particolare la *fotometria* è la parte della psicofisica che mette in relazione lo stimolo visivo con la percezione di *brillanza* (che nel linguaggio comune è detta luminosità) mentre la *colorimetria* mette in relazione lo stimolo visivo con la percezione di colore (di cui la brillanza è uno degli attributi). I dati psicofisici riguardano il processo sensoriale nella sua globalità e consentono di isolare i meccanismi visivi, ma non di identificarli con una struttura neurale.

Invece la neurofisiologia indaga il modo in cui i segnali neurali elettrici generati dai fotorecettori dopo aver assorbito i fotoni vengono trasmessi ad altre parti della retina, dove vengono ulteriormente elaborati e codificati nei cosiddetti “canali opposti”. Vengono utilizzate tecniche di misurazione elettrofisiologica, per esempio tramite elettrodi introdotti nella corteccia cerebrale, per cercare di comprendere il collegamento tra i singoli componenti del cervello (i neuroni) e il lo-

ro funzionamento. I dati neurofisiologici riguardano singole cellule o componenti e consentono di localizzare i meccanismi visivi, ma non di descriverli qualitativamente.

Per esempio, per misurare la sensibilità dei fotorecettori, i metodi psicofisici consistono nel far vedere all'osservatore (che è sempre un essere umano) una luce e chiedergliene conto. Ci sono due tipi di tecniche psicofisiche: dirette, come quelle di Stiles, e indirette basate sulle funzioni di *color matching*.

I metodi neurofisiologici consistono invece nell'estrarre un fotorecettore dalla retina di una scimmia o di un essere umano e nel misurare l'assorbimento spettrale. Esistono due tecniche: microspettrofotometria e microelettrodi a suzione. Sono metodi diretti, praticati da circa 30 anni, ma difficili da attuare, non sempre possibili sull'uomo e le cui misure non sempre sono precise.



Riassunto

RADIAZIONE VISIBILE

La parte di radiazione elettromagnetica che dà luogo al fenomeno della visione è quella che ha lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nm circa. Viene detta radiazione elettromagnetica visibile o luce.

OCCHIO E RETINA

L'occhio si compone di tre strati:

- protettivo (cornea e sclera);
- nutritivo (coroide e iride);
- sensibile (retina).

La retina è composta di tre strati di cellule:

- fotorecettori ed epitelio pigmentato;
- intermedie (orizzontali, bipolari, amacrine);
- gangliari.

I fotorecettori sono di quattro tipi, secondo il fotopigmento che contengono:

- bastoncelli (rodopsina);
- cono L;
- cono M;
- cono S.

Ogni tipo di fotorecettore ha una propria funzione di sensibilità che indica la probabilità che un fotone di data lunghezza d'onda venga assorbito dal fotopigmento dei fotorecettori di quel tipo.

STIMOLO DI COLORE

Lo stimolo di colore è la radiazione elettromagnetica che arriva all'occhio, lo attraversa e raggiunge i fotorecettori, dai quali viene assorbito.

Il numero di fotoni assorbiti nell'unità di tempo determina il tipo di visione:

- notturna o scotopica: solo i bastoncelli sono attivi, la visione è a grigi;
- crepuscolare o mesopica: sono attivi bastoncelli e cono; la visione a colori è di bassa qualità;
- diurna o fotopica: solo i cono sono attivi, la visione a colori è di qualità.

I STADIO DELLA VISIONE A COLORI

Il fotorecettore che ha assorbito un certo numero di fotoni, genera un segnale neurale elettrico (risposta sensoriale) di ampiezza proporzionale al numero di fotoni assorbiti. Questo è il fenomeno della trasduzione.

II STADIO DELLA VISIONE A COLORI

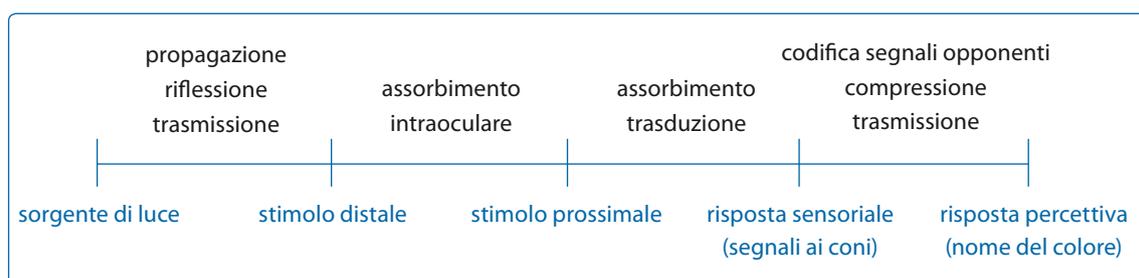
Ancora a livello retinale i segnali dei bastoncelli e dei cono L, M e S vengono compressi spazialmente (più fotorecettori convergono in una singola fibra del nervo ottico) e codificati in tre segnali opposti (probabilmente per motivi di efficienza e riduzione del rumore). I segnali opposti vengono trasmessi al cervello lungo il nervo ottico.

III STADIO DELLA VISIONE A COLORI

Cervello e mente interpretano i segnali opposti e avviene la percezione del colore che si manifesta, per esempio, nel fatto che l'osservatore è in grado di assegnare un nome al colore e di giudicare gli attributi (risposta percettiva).

MODI DI APPARIRE DEL COLORE

Il modo di apparire di un colore è determinato dall'impressione che lo stimolo provoca sull'osservatore e viene descritto facendo riferimento alle condizioni fisiche o psicofisiche che più comunemente causano l'esperienza di tale modo di apparire. I cinque principali modi di apparire sono:



- superficie (oggetto, non isolato, il colore appare riflesso);
- volume (oggetto, non isolato, il colore appare trasmesso);
- illuminante (oggetto, isolato o no, il colore sembra emettere più luce di quella che riceve);
- illuminazione (non oggetto, non isolato, il colore sembra riempire lo spazio indipendentemente dalla sua origine);
- apertura (non oggetto, isolato oppure no).

Nella pratica i modi più importanti sono il modo superficie (non isolato per definizione), il modo illuminante (isolato) e il modo apertura (isolato).

ATTRIBUTI PERCETTIVI DEL COLORE

È possibile giudicare i seguenti attributi percettivi del colore:

- brillantezza;
- chiarezza (solo per colori non isolati);
- tinta;
- pienezza;
- saturazione;
- croma (solo per colori non isolati).

Per quanto riguarda la tinta, si distinguono quattro tinte uniche: rosso, giallo, verde e blu ordinate circolarmente. La mescolanza di due tinte uniche adiacenti dà origine a tutte le altre tinte, le tinte binarie (fig. 25).

Nella pratica per descrivere il colore isolato (tipicamente in modo illuminante) sono spesso sufficienti gli attributi di

- brillantezza;
- tinta;
- saturazione.

Per il colore in modo non isolato (tipicamente in modo superficie) sono spesso sufficienti gli attributi di

- chiarezza;
- tinta;
- croma.

Nel linguaggio quotidiano, non specializzato, viene usato il termine "luminosità" per indicare la brillantezza e il termine "colore" per indicare la tinta.

SISTEMI DI ORDINAMENTO DEI COLORI

Il sistema di ordinamento di Munsell è una raccolta di campioni colorati, che vengono visti in modo superficie. I campioni sono ordinati per chiarezza, tinta e croma. La distribuzione dei campioni per ognuno di questi attributi è uniforme (cioè i campioni appaiono equidistanti).

ATTRIBUTI PERCETTIVI DEL COLORE

BRILLANZA (*brightness*)

Attributo della sensazione visiva secondo il quale un'area appare emettere più o meno luce.

CHIAREZZA (*lightness*)

Brillantezza di un'area giudicata in rapporto alla brillantezza di un'area similmente illuminata che appare bianca. Solo i colori non isolati esibiscono chiarezza.

TINTA (*hue*)

Attributo della sensazione visiva secondo il quale un'area appare simile ad uno dei colori rosso, giallo, verde e blu, o ad una combinazione di due di loro.

PIENEZZA (*colorfulness*)

Attributo della sensazione visiva secondo il quale il colore di un'area appare avere più o meno tinta.

CROMA (*chroma*)

Pienezza di un'area giudicata in rapporto alla brillantezza di un'area similmente illuminata che appare bianca. Solo i colori non isolati esibiscono croma.

SATURAZIONE (*saturation*)

Pienezza di un'area giudicata in rapporto alla sua brillantezza.

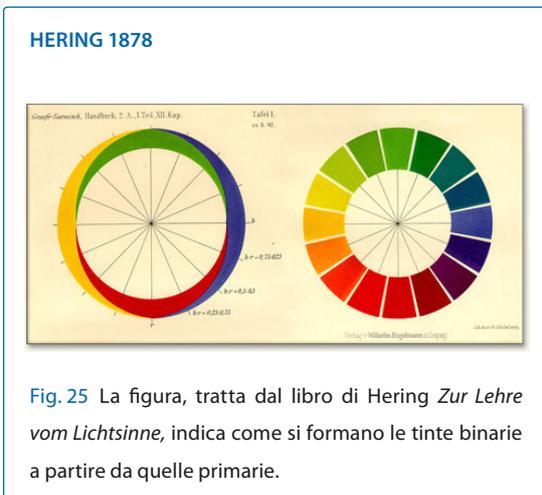


Fig. 25 La figura, tratta dal libro di Hering *Zur Lehre vom Lichtsinne*, indica come si formano le tinte binarie a partire da quelle primarie.



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

Colour & Vision Database

Si tratta di una raccolta dei dati 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>

WebVision

Sito dedicato al sistema visivo umano e in particolare alla retina, curato da ricercatori dell'Università dello Utah. Contiene il PDF *How the Retina Works* da cui è tratto il disegno di fig. 3.

<http://webvision.med.utah.edu>

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, 2^a 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, tabelle, formule.

[3] Roy S. Berns, 2000

Principles of Color Technology Wiley, 3^a ed.

Libro di testo universitario americano, contiene molte informazioni ed è ampiamente illustrato a colori.

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

Measuring Colour Fountain Press, 3^a 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.