Luce e colore

Più di 2000 anni fa i filosofi greci pensavano che la luce uscisse dagli occhi per toccare gli oggetti, come dita a tastare.

L'occhio in realtà è un semplice strumento ottico, che al suo interno registra delle immagini proiettate da oggetti che si trovano all'esterno, simile in questo alla caverna di Platone, con l'aggiunta di una lente. L'autentico motore della comprensione è il cervello.

La percezione del colore è un processo psicofisico complesso che ha inizio quando la luce penetrando nell'occhio viene assorbita dalla retina.

L'energia assorbita viene convertita in un segnale elettrochimico e il segnale così ottenuto viene trasmesso ai neuroni e da questi al cervello.

La percezione del colore coinvolge sia i processi fisici legati alle caratteristiche spettrali del segnale luminoso, sia i processi psicobiologici che sovrintendono all'interpretazione del segnale da parte del cervello.

La percezione del colore è inoltre un fenomeno soggettivo. Fortunatamente, pur variando da persona a persona, il meccanismo è sufficientemente simile fra individui diversi da permettere di specificare analiticamente il colore con risultati abbastanza buoni per la maggior parte delle applicazioni pratiche.

I meccanismi complessi della visione dei colori possono tuttavia essere compresi in modo intuitivo ma rigoroso usando le opere d'arte come esperimenti dimostrativi.

Il dipinto, sintesi meravigliosa dell'artista, permette di spiegare il fenomeno del colore nella sua complessità, partendo dagli elementi fondamentali della visione: la luce, l'occhio e il cervello.

La luce

Strettamente connessa alla sensazione di colore è la sensazione di luce che è la più essenziale delle impressioni visive e può essere descritta come quella qualità che distingue superfici luminose da superfici nere; la sensazione di luce non si può tuttavia semplicemente riferire a sensazioni nere, bianche o grigie; essa è propria anche delle sensazioni cromatiche (rosse, gialle, verdi, ..) nelle quali è strettamente fusa con la sensazione di colore.

Luce e colore sono sensazioni così intimamente legate nella vita di tutti i giorni che si tende a dimenticare che si tratta di due fenomeni distinti.

Già Aristotele nel *De Sensu* si occupa di luce e colore spiegando il colore in termini di rapporto bianco/nero utilizzando, in termini scientifici moderni, concetti acromatici per descrivere il fenomeno cromatico.

Nel medioevo lo schema aristotelico acquista connotazioni teologiche, attribuendo alla luce una doppia natura: lux, fonte di illuminazione (Dio) , e lumen, agente materiale che rende possibile la percezione colorata. Esempio sublime della fusione dei due concetti sarà la vetrata gotica.

La chiave per la comprensione dei meccanismi fisici alla base della sensazione di colore è contenuta nel famosissimo trattato *Optica* di Newton (1704).

All’incirca trecento anni fa Newton scriveva: "…*I raggi di luce non possono propriamente dirsi colorati; in essi non c'è altro che una certa disposizione a produrre una sensazione di questo o quel colore*…".

Il celeberrimo esperimento di dispersione attraverso un prisma porta a compimento una serie di esperienze iniziate da Cartesio nel 1637 e proseguite da padre Grimaldi nel 1655, nelle quali si era realizzata la dispersione di un fascio di luce naturale su tutto lo spettro visibile.

L'elemento di novità legato a Newton sta nell'aver ricomposto il fascio disperso riottenendo il fascio di luce iniziale. Così facendo, Newton dimostrò che i caratteristici colori spettrali del fascio disperso erano proprietà della luce e non del mezzo materiale di cui era fatto il prisma.

Ricordiamo che Newton compie il suo esperimento nel 1704. Influenzato dalla cultura del suo tempo, egli individua 7 colori, perché 7 è un numero magico e 7 sono le note.

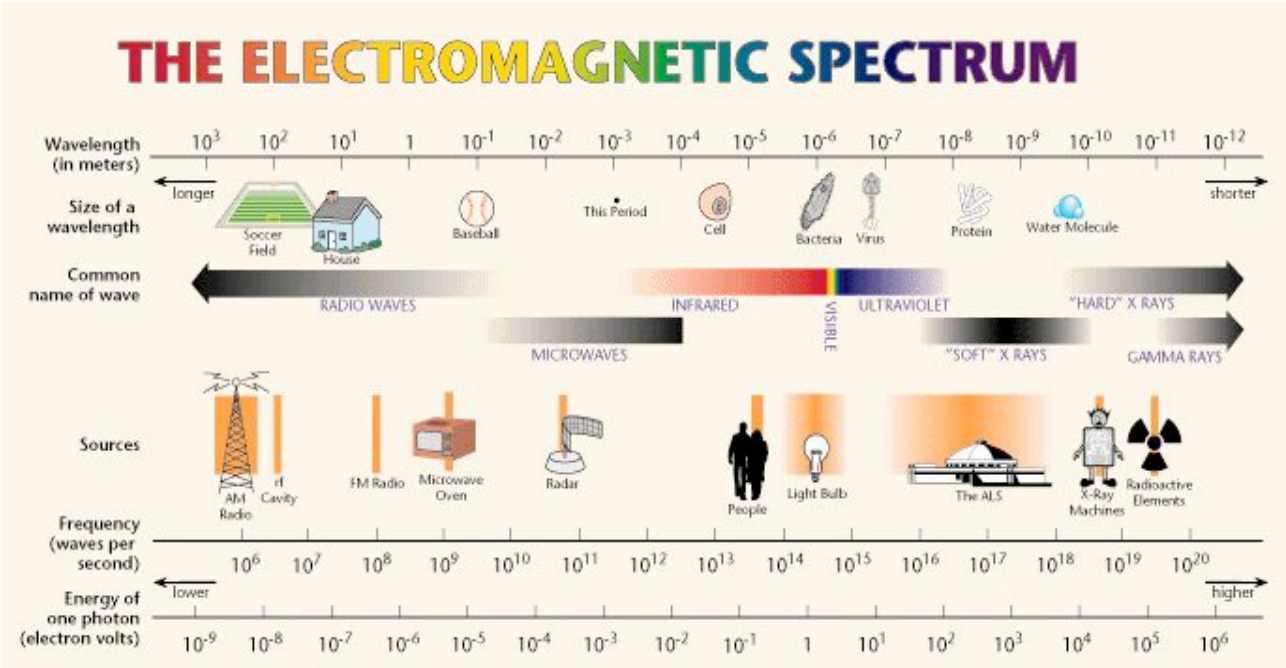
I colori sono il rosso, l'arancione, il giallo, il verde, l'azzurro, l'indaco e il violetto, e, per la prima volta, sono classificati senza riferimenti alla luminosità ma in base al diverso angolo di rifrazione.

La scoperta ha feroci oppositori, primi tra essi i tintori, per ovvie ragioni commerciali, e Goethe.

Sulla base dei risultati di Newton, è possibile descrivere luce e colori in termini fisici moderni. La luce è una radiazione elettromagnetica, fenomeno periodico caratterizzato da un susseguirsi di massimi e minimi, con periodicità nello spazio, in questo caso, estremamente piccola, dell'ordine del miliardesimo di metro.

Occupa nello spettro elettromagnetico una banda limitatissima, inferiore ad un'ottava, detta banda del visibile.

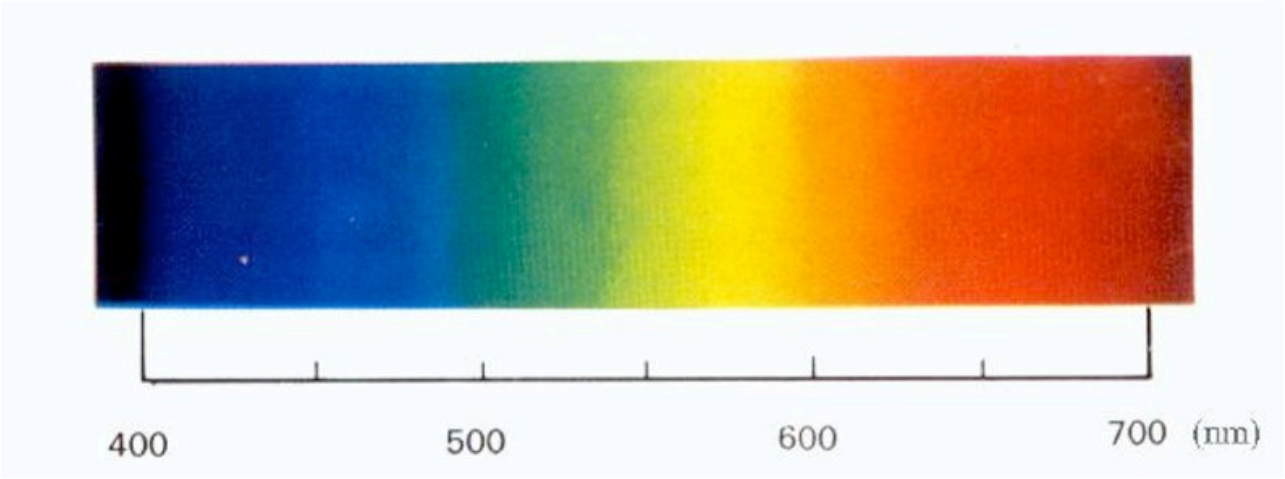
Curiosamente siamo pressoché ciechi alla radiazione elettromagnetica salvo in questa ridottissima banda, caratterizzata da un'energia molto elevata ma che ancora non è in grado di produrre danneggiamenti biologici.



I colori della luce

La “disposizione della luce” cui accennava Newton altro non è che la periodicità nello spazio, o lunghezza d’onda della luce, misurata in nanometri (nm). E' visibile la radiazione di lunghezza d'onda compresa tra 380 nm e 780 nm.

In questa banda distinguiamo il porpora tra 380 e 450 nm, il blu da 450 a 500 nm, il verde tra 500 a 570 nm, il giallo tra 570 e 590 nm, l'arancione tra 590 e 610 nm e il rosso da 610 sino a 780 nm. Non siamo molto lontani dai colori di Newton.



Se il fascio di luce è caratterizzato da una sola lunghezza d’onda il segnale verrà detto monocromatico ed il colore sarà puro.

Più in generale la maggiore parte dei fasci di luce sarà caratterizzata dalla presenza contemporanea di più lunghezze d’onda. Ne segue che sensazioni di colore diverse da quelle dovute ai colori puri non solo saranno possibili ma risulteranno anche le più comuni.

Si può bene comprendere quanto sia stato difficile sviluppare dei metodi per descrivere e misurare il colore, in tutte le possibili miscele di stimoli monocromatici.

Il contenuto spettrale della radiazione emessa da una sorgente si rappresenta mediante una curva che riporta i valori delle quantità relative di energia radiante in funzione delle diverse lunghezze d'onda nello spettro visibile.

A Newton dobbiamo un altro spunto fondamentale nella comprensione dei colori, questa volta rivolto ai colori di una superficie, e non di una luce.

Scrive sempre in *Optica*: "*…Il colore di un oggetto è la sua capacità di riflettere un certo tipo di raggi più meno copiosamente del resto*". Quando pensiamo al colore, il primo pensiero va di solito al colore di un oggetto. Quando pensiamo al colore di un oggetto, tendiamo a interpretarlo come una proprietà dell'oggetto in sé.

In realtà, è il colore del segnale luminoso che proviene da questo oggetto che noi recepiamo e interpretiamo come colore. E’ quindi importante distinguere sin dall’inizio tra il colore della sorgente ed il colore apparente di un oggetto.

La sorgente sarà quindi caratterizzata da una certa distribuzione di potenza (colore sorgente) emessa alle diverse lunghezze d’onda; l’oggetto illuminato avrà a sua volta determinate proprietà di riflessione alle stesse lunghezze d’onda.

Il colore di un oggetto

La sola presenza nello spazio di radiazione elettromagnetica di opportuna lunghezza d'onda non determina la sensazione visiva.

Un semplice puntatore laser per conferenze permette di verificare il fenomeno. Puntando verso il muro non si avvertirà alcuna sensazione di colore lungo il cammino del fascio luminoso, a meno di inserire sul cammino ottico un elemento dispersore, ad esempio uno sbuffo di fumo.

Il colore apparente dell'oggetto illuminato dalla sorgente dipenderà dalla frazione della luce incidente riflessa alle singole lunghezze d'onda e ricevuta dall'osservatore. Il colore apparente di un oggetto può quindi essere alterato cambiando la distribuzione spettrale della luce che lo illumina.

Ad, esempio, se illuminiamo una superficie arancione con un laser He-Ne, radiazione monocromatica per eccellenza, la superficie apparirà rossa. In definitiva, il colore percepito di un oggetto dipende sia dalla distribuzione spettrale di potenza della sorgente usata per illuminarlo sia dalla riflessione spettrale dell'oggetto nella direzione di osservazione.

Il dato che il colore di un oggetto dipenda così drammaticamente dalla sorgente ha portato abbastanza naturalmente all'idea di definire una sorgente campione per determinare il colore proprio di un oggetto.

Usando una sorgente di riferimento ed esaminando il colore del segnale riflesso, si può ricavare l'informazione voluta sul colore proprio dell'oggetto.

In colorimetria il termine usato per indicare la distribuzione spettrale di una sorgente di riferimento è "Illuminante".

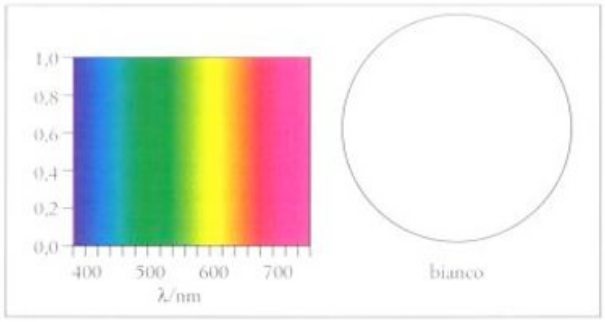
Per avere colore dunque, le onde elettromagnetiche dovranno giungere nel nostro occhio direttamente o mediante l'interazione con un mezzo materiale che allora ci apparirà colorato.

Se questo mezzo è colpito da una luce bianca, cioè da una luce che contiene tutte le lunghezze d'onda del visibile, e se il suo comportamento spettrale non è selettivo ci apparirà bianco quando riavvierà più del 75 % della luce incidente, via via più grigio dal 75 al 5% per apparirci nero quando la frazione rinviata è inferiore al 5%.

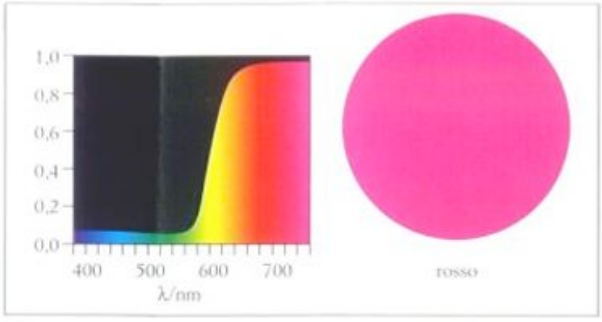
Se il comportamento spettrale è selettivo, la superficie interrogata apparirà colorata.

Ad esempio consideriamo una luce incidente che contenga radiazioni rosse, blu e verdi. Essa apparirà bianca se le rifletterà *in toto*, gialla se assorbirà il blu riflettendo rosso e verde.

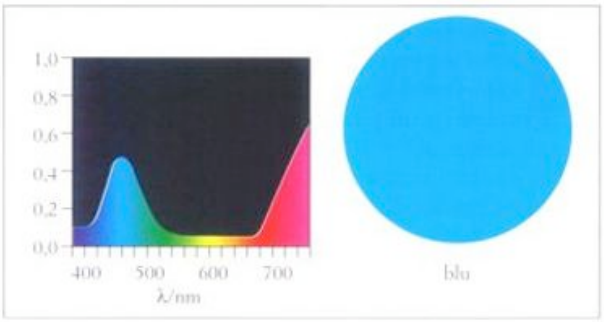
Bisogna qui ricordare che la maggior parte delle superfici colorate per riflessione sono caratterizzate da un colore che deriva dalla presenza contemporanea di molte lunghezze d'onda.



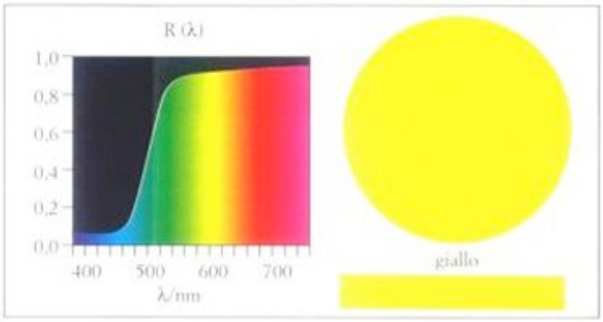
(a)



(b)



(c)



(d)

Quando si vuole determinare il colore di un oggetto, che non sia esso stesso una sorgente di luce (radiatore primario), occorre conoscere, oltre alla distribuzione spettrale della radiazione usata per illuminarlo, i valori del fattore di riflessione o di trasmissione dell'oggetto alle diverse lunghezze d'onda dello spettro visibile.

Lo stimolo fisico che produce la sensazione di colore può essere misurato con metodi radiometrici tradizionali ad un buon livello di accuratezza. Da questo dato oggettivo non è né semplice né immediato predire in modo accurato la sensazione prodotta dallo stimolo su di un osservatore umano.

Anche se la scienza del colore ha fatto consistenti progressi nell'ultimo secolo, ancora rimangono senza risposta molti quesiti.

In altre parole, per definire completamente una sensazione di colore non è sufficiente conoscere i fattori che la caratterizzano dal punto di vista fisico, e cioè la natura della sorgente luminosa e le qualità riflettenti dell'oggetto, ma è necessario conoscere il comportamento del sistema visivo dell'osservatore.

L'occhio

In altre parole, per definire completamente una sensazione di colore non è sufficiente conoscere i fattori che la caratterizzano dal punto di vista fisico, e cioè la natura della sorgente luminosa e le qualità riflettenti dell'oggetto, ma è necessario conoscere il comportamento del sistema visivo dell'osservatore.

L'occhio umano non ha una struttura complicata in quanto spesso la struttura oculare complicata si accompagna ad un cervello semplice. E' uno strumento ottico abbastanza semplice, la cui lente, il cristallino, è responsabile dell'accomodamento della messa a fuoco delle immagini alle diverse distanze.

La luce penetra nell'occhio attraverso la pupilla, foro il cui diametro è controllato da quel muscolo detto iride. L'iride controlla dunque la profondità di campo e l'intensità del segnale.

La retina è una sottile membrana che riveste la parete interna dell'occhio e che, in termini moderni, svolge il ruolo della pellicola nella macchina fotografica. E' ricoperta in modo non uniforme da elementi fotosensibili. Questi fotoricettori sono circa 120 milioni e sono collegati al cervello da un milione di fibre nervose: sono quindi interconnessi.

I fotoricettori sono di due tipi: i coni, per la visione in luce diurna o visione fotopica, e i bastoncelli per la visione notturna o scotopica.

I coni sono di tre tipi e sono responsabili della visione dei colori.

I bastoncelli sono di un unico tipo e non permettono la visione dei colori.

Il meccanismo della visione inizia nel nostro occhio, a partire da due immagini distorte, sfocate e rovesciate sulla retina.

La prima domanda cui rispondere è come si crei un'immagine. Il meccanismo più semplice è il foro stenopeico: dato un oggetto illuminato, se ne ottiene un'immagine su di un piano, interponendo uno schermo con un foro molto piccolo.

Più raffinata è la tecnica che si basa sulla rifrazione di un fascio di luce quando questo passa da un mezzo meno denso, ad esempio l'aria, ad uno più denso, ad esempio un vetro.

Il fascio viene deflesso a formare un'immagine ad una certa distanza dalla superficie rifrangente: è la lente, ideata intorno all'anno 1000 d. C. dall'arabo Al Hazen.

Tutti gli esseri viventi sono sensibili alla luce. I meccanismi sono svariati: nel lombrico, ad esempio, la pelle è letteralmente ricoperta di elementi fotosensibili.

Gli immaginabili inconvenienti trovano soluzione in altri organismi proteggendo i fotoricettori in pieghe cutanee, come avviene nella patella, oppure in pieghe che si chiudono a formare un foro stenopeico, come nel Nautilus. L'apertura permette tra l'altro il risciacquo del fotosensore con l'acqua marina.

Una traccia di questo meccanismo di pulizia è la presenza di liquidi all'interno dei globi oculari delle specie più evolute, dove si arriva a proteggere il fotosensore chiudendo il foro con una membrana trasparente: le immagini si formeranno grazie a questa lente naturale.

L'idea di occhio come ricettore del segnale luminoso, si fa strada a fatica nelle conoscenze umane. Per Euclide (*Ottica*, 300 a. C) l'occhio è sì un punto geometrico ma da esso vengono proiettati verso l'esterno gli elementi responsabili della visione, come manine a toccare gli oggetti da osservare.

Si deve di nuovo a Al Hazen la costruzione della prima camera oscura.

Scrive Giovanni Battista della Porta nel suo *Magia Naturale* (1558):".. *L'immagine può entrare attraverso la pupilla come attraverso il buco di una finestra; e quella parte della sfera che è situata nel mezzo dell'occhio opera invece come una Tavola di cristallo*." E conclude: *" So che le persone di ingegno saranno molto deliziate di ciò*".

A Daniele Barbaro dobbiamo poi l'aggiunta di una lente alla camera oscura (1568). Il segreto è svelato: il mondo è visto dal cervello tramite le immagini riprodotte nella camera oscura che è l'occhio.

Kepler compie la sintesi finale descrivendo l'occhio come un dispositivo ottico che obbedisce alle leggi della fisica.

La struttura dell'occhio umano è quella comune a tutti i vertebrati. Le dimensioni sono quelle di una pallina da ping pong.

Sei muscoli estrinseci lo trattengono nell'orbita, lo ruotano e lo dirigono verso il segnale da osservare. Ad essi si aggiungono due muscoli interni, l'iride e il muscolo ciliare.

Ogni parte dell'occhio è progettata a sé, altamente specializzata e protetta dall'esterno. Non ha una struttura complicata in quanto spesso la struttura oculare complicata si accompagna ad un cervello semplice.

La massima deviazione del segnale luminoso per formare l'immagine avviene sulla superficie esterna della cornea, in quanto l'interfaccia aria/cornea è caratterizzata dalla massima differenza di indice di rifrazione.

La lente dell'occhio è il cristallino, responsabile dell'accomodamento della messa a fuoco delle immagini alle diverse distanze.

Il cristallino ha una caratteristica struttura multistrato simile ad una cipolla. L'accomodamento avviene variando la curvatura del cristallino mediante la *zonula*. Nella visione ravvicinata, la *zonula* si contrae, non si distende, probabilmente per eliminare il tremito muscolare.

Con l'invecchiamento le cellule centrali sclerotizzano, il cristallino perde elasticità e la capacità di accomodamento diminuisce progressivamente rendendo necessario l'uso di lenti correttive anche in persone senza difetti della vista.

L'iride è il muscolo che circonda il foro attraverso il quale la luce penetra nell'occhio. Il termine significa arcobaleno, ma il colore dell'iride non ha niente a che vedere con la sua funzione: il pigmento colorato serve unicamente a renderlo opaco alla luce.

I compiti dell'iride sono l'aumento della profondità di campo e il controllo dell'intensità luminosa.

Il comportamento in questo caso è inaspettato: è il cosiddetto paradosso di Fechner. Inviamo all'occhio un pennello di luce e osserviamo il diametro dell'iride. Ora aggiungiamo un secondo segnale luminoso di intensità inferiore alla prima. Intuitivamente ci aspettiamo che l'iride si contragga, poiché complessivamente il segnale è aumentato. In realtà il diametro dell'iride diminuisce perché l'occhio risponde al segnale medio in ingresso, non al segnale totale.

La pupilla è il foro al centro dell'iride. Appare nero perché nell'osservarlo involontariamente schermiamo la luce che lo interroga.

Ricordiamo a questo proposito, il caso di fotografie in cui gli occhi dei personaggi appaiono rossi. Si tratta di occhi non accomodati alla distanza con la macchina fotografica. In questo caso la pellicola viene impressionata dalla luce sfocata riflessa dalla retina.

Caso unico nella fisiologia umana, la pupilla permette di osservare direttamente il tessuto vivente del fondo dell'occhio a patto di non schermare il segnale di osservazione. Per ovviare a questo inconveniente Helmoltz creò nel 1850 l'oftalmoscopio.

L'occhio è dunque un sistema ottico che può essere corretto secondo le leggi dell'ottica, con opportune lenti.

Gli occhiali più antichi risalgono al X secolo con la produzione delle prime lenti convesse per la correzione della miopia, mentre solo nel XVI secolo verranno prodotte le prime lenti concave per la correzione della ipermetropia.

Gli occhiali nascono probabilmente a Venezia nelle officine dei mastri vetrai, incontrando mille diffidenze fra aristocratici e intellettuali. Sono un'invenzione fondamentale nel progresso umano in quanto hanno determinato l'aumento della vita attiva, senza richiedere consumo di energia e con una manutenzione ridotta al minimo.

La retina è una sottile membrana simile a una ragnatela.

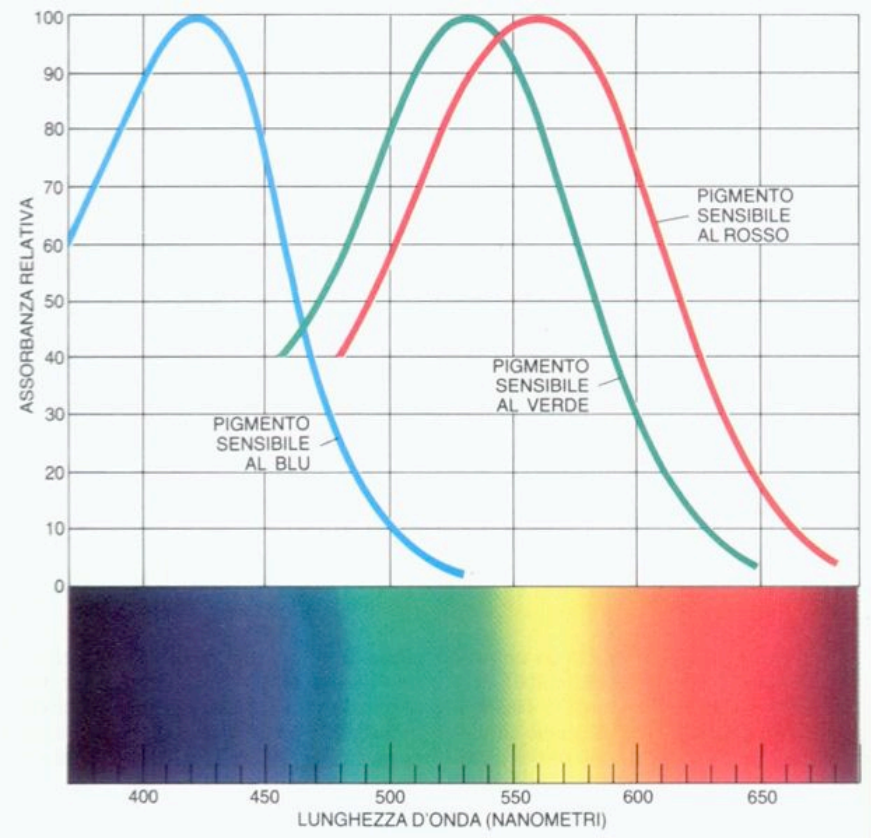
Nel 1604 Keplero individuò la retina come lo schermo nel modello a camera oscura dell'occhio. In termini moderni potrebbe essere descritta come la pellicola nella macchina fotografica.

E' ricoperta in modo non uniforme da elementi fotosensibili che, curiosamente, si trovano dal lato della retina opposto a quello di incidenza della luce.

Il loro diametro è superiore al micrometro, superiore quindi alla massima lunghezza d'onda visibile. Sono 120 milioni in totale e collegati al cervello da un milione di fibre nervose: sono quindi interconnessi.

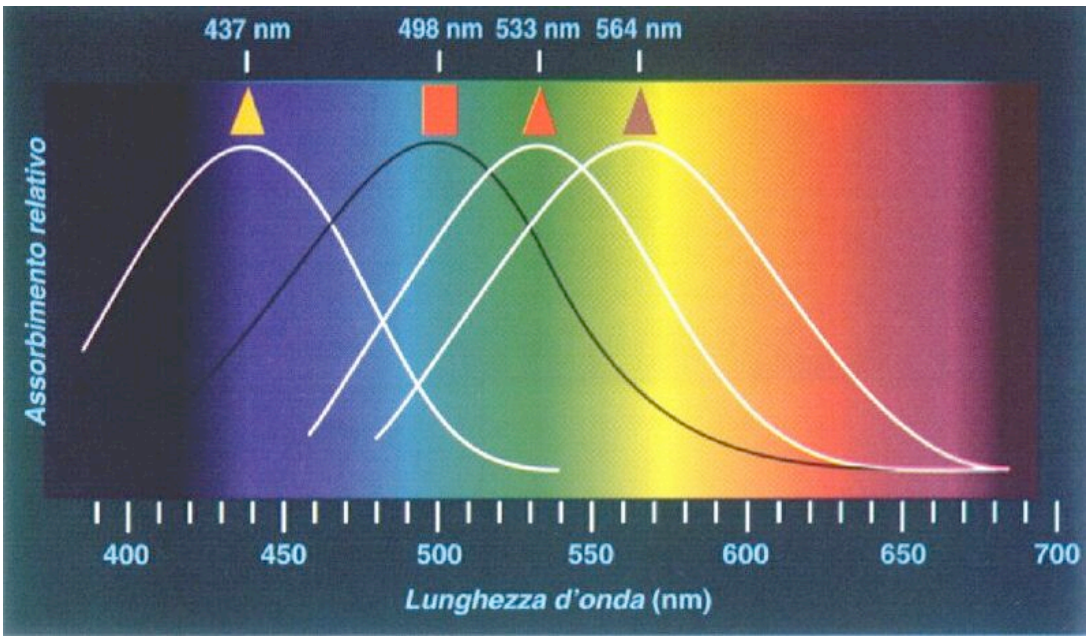
I fotoricettori sono di due tipi: i coni, per la visione in luce diurna o visione fotopica, e i bastoncelli per la visione notturna o scotopica.

La densità dei coni è pari mediamente alla densità degli abitanti di New York; sono di tre tipi e sono responsabili della visione dei colori. La densità è massima nella zona centrale della retina, detta *fovea*, cui corrisponde la massima acuità visiva.



I bastoncelli sono di un unico tipo, sono distribuiti uniformemente su tutta la parete interna dell'occhio e non permettono la visione dei colori.

I bastoncelli determinano la sensazione visiva a deboli livelli di illuminamento, mentre i coni funzionano a più alti livelli di illuminamento.



Ciascuno dei tre tipi differenti di coni è caratterizzato da una particolare sensibilità spettrale. Le sensibilità spettrali sono a banda larga e parzialmente sovrapposte, apparentemente poco adatte a determinare le caratteristiche di colore.

La tricromia

Ciascuno dei tre tipi differenti di coni è caratterizzato da una particolare sensibilità spettrale. Le sensibilità spettrali sono a banda larga e parzialmente sovrapposte, apparentemente poco adatte a determinare le caratteristiche di colore.

A questo proposito scrive Thomas Young nel 1801:".. *Ora, poiché è praticamente impossibile supporre che ciascun punto sensibile della retina contenga un numero infinito di particelle, ciascuna capace di vibrare perfettamente all'unisono con ogni possibile andamento ondulatorio, diventa necessario ipotizzare che il numero sia limitato, per esempio ai colori principali: rosso, giallo e blu…*" Nell'intuizione di Young c'è solo un piccolo errore, non è il giallo ma il verde.

In altre parole nei coni vi sono tre, più o meno distinti, sistemi sensibili alla luce, con sensibilità massima in tre diverse regioni dello spettro e precisamente: una nel rosso, una nel verde e una nel blu.

Quando la luce arriva sulla retina, ognuno di questi tre sistemi manda un impulso al cervello, impulso che dipende dalla sensibilità spettrale del sistema e dalla distribuzione di energia dello stimolo; i tre impulsi si considerano appunto gli stimoli fisiologici responsabili della produzione di una sensazione di colore.

Il processo di colore coinvolge poi un complicato processo di elaborazione dei segnali generati dai diversi tipi di rivelatori.

Risultato di questo particolare comportamento dell'occhio è il fatto che fasci di luce di diversa composizione spettrale che colpiscono l'occhio possono dare luogo ad una medesima sensazione di colore.

Si possono ad esempio facilmente realizzare due filtri che appaiono identicamente gialli con una data sorgente di luce, avendo curve di trasmissione diverse l'uno dall'altro; per esempio, uno può trasmettere luce verde, gialla, arancione e rossa, cioè con radiazioni di lunghezza d'onda superiore a 500 nm, e l'altro può non trasmettere il giallo, ma solo luce verde e rossa.

Di conseguenza, un colore può essere caratterizzato da un numero di variabili molto minore del numero di quelle che caratterizzano, dal punto di vista fisico, la radiazione incidente sull'occhio.

In particolare, grazie allo speciale meccanismo che si è descritto, un dato colore è completamente individuato da tre numeri.

L'importanza del lavoro di Young è riconosciuta da J. C. Maxwell nel 1871: "*…Può sembrare quasi una banalità affermare che il colore è una sensazione; e tuttavia Young, riconoscendo con onestà questa verità elementare, ha posto le basi della prima seria teoria sulla visione cromatica. Per quanto mi risulta, Thomas Young è stato il primo scienziato che, partendo dal fatto ben noto dell'esistenza di tre colori primari, ne cercò la spiegazione non già nella natura della luce ma in quella dell'uomo…*"

La misura del colore

Come dimostrato da Young, una sensazione di colore può essere ottenuta mescolando in definite proporzioni tre colori spettrali convenientemente scelti, tali cioè che non sia possibile ottenere uno di essi con un miscuglio in determinate proporzioni degli altri due.

In altre parole, l'esperimento di Young stabilì una volta per sempre che è possibile individuare tre sorgenti primarie tali che, se miscelate in proporzioni opportune, permettono di uguagliare in modo univoco il colore percepito di una qualunque sorgente arbitraria.

È dunque naturale pensare ad un sistema di misura del colore che si basi su tre sorgenti o tre rivelatori di riferimento. Indichiamo ad esempio con **D**, **E** e **F** tre diverse distribuzioni spettrali che formino la base di un sistema tricromatico. E' importante che essi siano mutualmente indipendenti, ossia che nessuno di essi possa essere ottenibile da una miscela degli altri due.

In termini matematici, essi devono formare un insieme ortogonale di versori. Sarà allora possibile uguagliare un qualsiasi stimolo di colore **C** con una combinazione lineare dei tre stimoli primari:

$$\mathbf{C} = d\,\mathbf{D} + e\,\mathbf{E} + f\,\mathbf{F},$$

dove i coefficienti d, e, ed f giocano il ruolo di coordinate del punto **C** nello spazio tridimensionale scelto.

Grazie a questa relazione sarà possibile misurare il colore, specificando lo stimolo di colore per mezzo di tre coordinate tricromatiche.

La colorimetria

La colorimetria è la scienza che si occupa del problema della misura del colore, che ha cioè lo scopo di specificare le impressioni colorate prodotte nel sistema visivo dagli oggetti, dovute a tutte le possibili miscele di radiazioni visibili, e di studiare le leggi che regolano il mondo cromatico.

La natura della fisiologia umana impone un sistema di misura del colore che si basi su tre sorgenti o tre rivelatori di riferimento.

L'esperimento di Young è riassunto nella legge fondamentale della colorimetria: data una sensazione di colore, questa può essere ottenuta mescolando in definite proporzioni tre colori spettrali convenientemente scelti.

La legge vale solo in determinate condizioni, e cioè quando:

a) l'occhio dell'osservatore è normale e ben riposato;

b) i livelli di segnale non sono né troppo alti né troppo bassi;

c) i tre colori fondamentali sono tali che non sia possibile ottenere uno di essi con un miscuglio in determinate proporzioni degli altri due.

Ne segue che, una volta determinati i tre colori fondamentali, la riproduzione perfetta della sensazione colorata in esame si può ottenere mediante una sola miscela in appropriate proporzioni di essi.

Non di rado può accadere di trovarsi di fronte a colori che non si possono eguagliare miscelando i tre colori fondamentali, in tal caso però la legge fondamentale si può ancora ritenere, qualora ci si limiti, come in realtà è possibile, ad eguagliare due miscugli: uno composto dal colore in esame e di uno dei tre primari, e l'altro composto dai due rimanenti colori primari.

Ciò equivale a dire che uno dei tre colori fondamentali contribuisce al miscuglio in senso negativo.

Volendo esprimere la prima legge fondamentale mediante una formula, possiamo affermare che scelti tre colori arbitrari $\boldsymbol{R}$, $\boldsymbol{G}$ e $\boldsymbol{B}$ (rosso, verde e blu), e un colore $\boldsymbol{C}$ qualsiasi, si possono sempre trovare tre numeri r, g e b tali che

$$\boldsymbol{C} \equiv r\boldsymbol{R} + g\boldsymbol{G} + b\boldsymbol{B}$$

Come si è detto questa è l'unica combinazione lineare che dà $\boldsymbol{C}$. Volendo poi esprimere in formula la limitazione c), si potrà affermare che i tre colori di riferimento possono essere qualsiasi, purché non sussista fra essi una relazione del tipo

$$\boldsymbol{B} \equiv r\boldsymbol{R} + g\boldsymbol{G}\,,$$

perché allora si può sostituire a $\boldsymbol{B}$ la combinazione lineare degli altri due, e i colori di riferimento rimangono due soli. Uno dei tre numeri r, g e b può essere anche negativo.

Due colori fisiologicamente uguali (uguali in colore e in brillanza) si comportano identicamente in un miscuglio: perciò si possono sostituire uno all'altro.

Quando due sorgenti luminose danno un'uguale sensazione colorata, continuano a darla anche quando si modificano le loro energie (e quindi le loro brillanze) nello stesso rapporto (lasciando invariata la composizione spettrale).

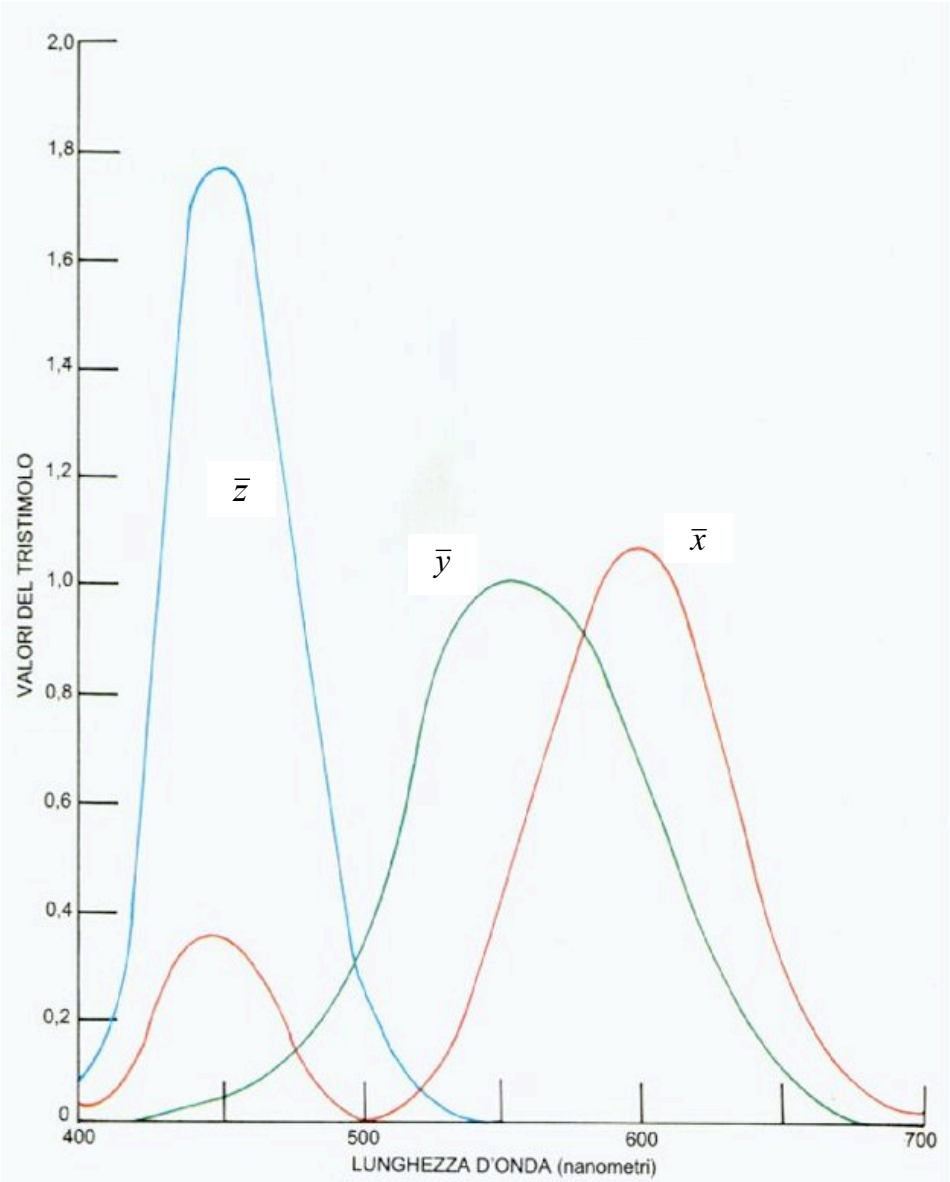
La colorimetria CIE

Definito in modo consistente l'ambito teorico necessario alla misura del colore, si tratterà ora di individuare una procedura per misurare nella pratica quanto abbiamo definito teoricamente.

Come già detto nella sezione precedente, una misura corretta del colore dovrà tenere conto delle proprietà spettrali della sorgente di luce, dell'oggetto illuminato e dell'osservatore umano.

Il sistema di specificazione del colore scelto dalla Commission International de l'Eclairage (CIE) nel 1931 si basa su tre osservatori di riferimento (X), (Y) e (Z), le cui sensibilità spettrale $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, e $\bar{z}(\lambda)$ vengono usate per pesare la distribuzione spettrale del segnale luminoso di cui si vuole valutare il colore e corrispondono all'incirca alle regioni spettrali del rosso, del verde e del blu.

Nella figura che segue sono rappresentati i valori di $\bar{x}, \bar{y}$, e $\bar{z}$ adottati dalla Commission Internationale de l'Eclairage (CIE).



Le curve riportate traducono quantitativamente il comportamento medio dell'occhio normale.

In particolare la curva della $\bar{y}$ coincide con la curva di visibilità adottata in sede internazionale per la fotometria.

Se indichiamo con Q(λ) lo stimolo di colore, è possibile calcolare le tre componenti X, Y e Z che definiscono in modo univoco il colore del segnale, integrando Q(λ) opportunamente pesato per tre volte nell'intervallo del visibile:

$$X = k \int Q(\lambda)\, \bar{x}(\lambda)\, d\lambda$$

$$Y = k \int Q(\lambda)\, \bar{y}(\lambda)\, d\lambda$$

$$Z = k \int Q(\lambda)\, \bar{z}(\lambda)\, d\lambda$$

La funzione Q(λ), se si considera il colore di un oggetto, può essere il prodotto del fattore di riflessione ρ(λ), oppure di trasmissione τ(λ), o del fattore di radianza β(λ), per la distribuzione spettrale S(λ) della sorgente che sta illuminando l'oggetto.

Come avviene in altri campi, nella pratica spesso l'operazione di integrale è sostituita da una sommatoria su intervalli equispaziati in lunghezza d'onda.

I valori così determinati hanno l'inconveniente di non indicare in modo facilmente comprensibile la natura di una differenza di colore, quando questa esiste; se, ad esempio due colori sono rappresentati da X=40, Y=50, Z=30 e X'=20, Y'=25, Z'=15, si può dedurre che i due colori sono uguali in cromaticità ma uno ha brillanza doppia dell'altro; se le cromaticità fossero state diverse il paragone sarebbe stato più difficile.

Molto più comoda della rappresentazione spaziale è una rappresentazione piana dei colori. Si introducono allora le nuove quantità

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \qquad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \qquad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

che sono legate dalla relazione $x + y + z = 1$. Le quantità x, y, z risultano proporzionali ai numeri X, Y, Z e quindi servono ancora a definire in modo univoco il colore.

I valori si dicono coordinate tricromatiche e determinano la posizione del punto che rappresenta lo stimolo Q nello spazio colorimetrico scelto.

Dato che la somma di x, y, z è uguale all'unità, due soli di essi sono sufficienti per individuare un colore indipendentemente dalla sua brillanza; ogni sensazione di colore si potrà perciò rappresentare in un piano, riportando i due coefficienti su due assi cartesiani ortogonali.

Il colore scelto potrà quindi essere rappresentato su di un diagramma (x,y). In questo diagramma i colori puri occupano il luogo geometrico che limita il cosiddetto triangolo dei colori, all'interno del quali trovano posto tutti gli altri colori.

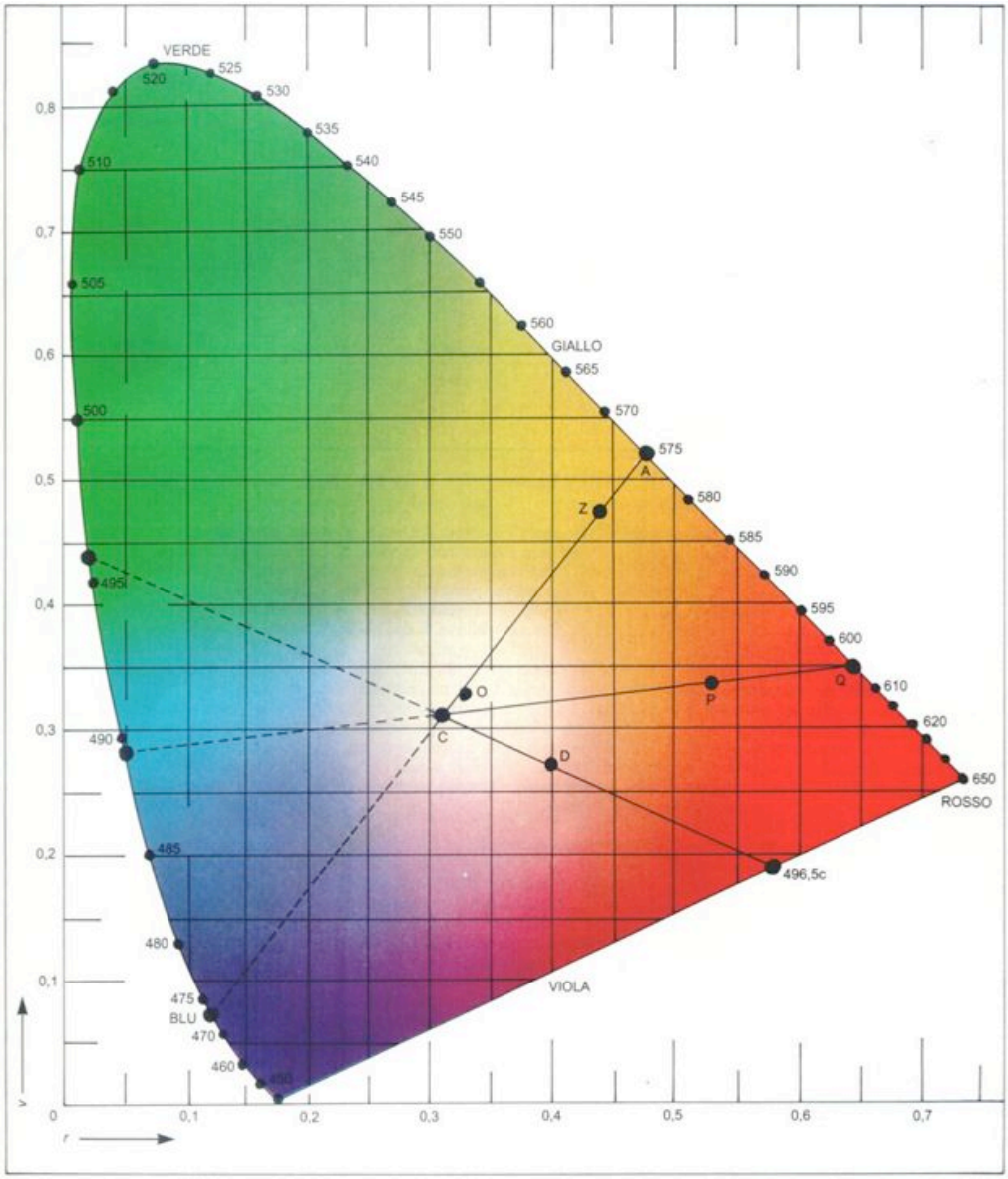
Il diagramma colorimetrico

Il triangolo rappresentato nella figura che segue è il cosiddetto *triangolo del colore* CIE che gode dei i seguenti vantaggi:

1) tutti i colori esistenti sono interni al triangolo

2) la brillanza da attribuire ad ogni punto del triangolo è data dalla coordinata y

3) il punto che rappresenta il colore dello spettro di uguale energia (spettro di una sorgente che irradia la stessa energia ad ogni lunghezza d'onda) è nel baricentro del triangolo



Nel triangolo del colore CIE, il luogo dei colori monocromatici spettrali è rappresentato dalla curva in cui sono segnate le diverse lunghezze d'onda e il segmento che unisce i colori spettrali corrispondenti a λ=400 nm e a λ=700 nm rappresenta le porpore, cioè i colori che si ottengono miscelando opportunamente il rosso estremo dello spettro visibile con il violetto estremo.

Ogni punto interno ala superficie delimitata dai colori monocromatici e dalla rette dei porpora rappresenta una sensazione di colore; un punto esterno non rappresenta alcun colore, ma ha significato puramente geometrico.

Le porpore non sono un colore spettrale, ma rappresentano una sensazione cromatica ben definita, intermedia tra il rosso e il violetto. Per questo Ostwald e altri hanno immaginato di riprodurre su una curva *chiusa* le diverse sensazioni di colore, raccordando un esterno (rosso) con l'altro esterno (violetto) appunto mediante le porpore.

Nello spazio cromatico le miscele dei colori erano rappresentate da somme di vettori; in una rappresentazione piana invece, in cui si hanno punti invece di vettori, una rappresentazione geometrica di miscela si ottiene in questo modo: supponiamo di avere due colori C_1 e C_2 di brillanza B_1 e B_2, per trovare con una miscela di essi il colore C_3 di brillanza B_3 si attribuisce ai due punti C_1 e C_2 due pesi uguali ai quozienti tra la brillanza che i due colori hanno nel miscuglio e quella che hanno come punti del triangolo, e se ne trova il baricentro, che si trova sulla congiungente i due punti e a distanza tra questi inversamente proporzionale ai rispettivi pesi.

La misura del colore in pratica

Per misurare le coordinate tricromatiche di uno stimolo di colore possono essere utilizzati strumenti appartenenti a due particolari categorie: i colorimetri e gli spettroradiometri. Il colorimetro è generalmente costituito da una fotorivelatore la cui sensibilità spettrale è resa di volta in volta proporzionale alla sensibilità di uno dei tre osservatori colorimetrici di riferimento (X), (Y) e (Z) per mezzo di una serie opportuna di filtri. I singoli segnali fotoelettrici in uscita al rivelatore sono allora proporzionali ai valori X, Y e Z e permettono di calcolare facilmente le coordinate del punto di colore. Lo spettroradiometro è invece uno strumento più complesso in grado di fornire la distribuzione spettrale del segnale riflesso dall'oggetto in esame. Una volta raccolta l'informazione alle singole lunghezze d'onda, gli integrali (1) vengono calcolati per via numerica.

La differenza di colore

Uno dei problemi fondamentali della colorimetria è la valutazione delle differenze tra i vari colori. Mentre finora l'occhio dell'osservatore doveva giudicare se due miscele di colore gli apparissero uguali, la valutazione della differenza esistente tra due colori implica un giudizio dell'osservatore e interessa quindi, accanto ad elementi fisici e fisiologici, degli elementi psichici.

Da questo punto di vista i colori si possono distinguere fra loro per tre caratteristiche fondamentali. La caratteristica più evidente che distingue i vari colori è la *tinta* (cromaticità): i colori si dicono elementari quando danno luogo a un'impressione semplice (rosso, verde,..) o intermedi se provocano un'impressione composta da più impressioni semplici (arancio: rosso + giallo ..). Tanto i colori semplici quanto quelli intermedi si dicono tra loro complementari o opposti se non si possono assolutamente paragonare tra loro. Si può anche dire che due colori sono complementari quando in combinazione additiva danno il bianco. Nel cerchio di Ostwald questi colori sono diametralmente opposti.

La differenza tra due tinte si può descrivere quantitativamente sempre dal punto di vista psicologico, in quanto, se noi consideriamo una data sensazione e una ad essa tanto simile da rendere la differenza appena percettibile, questa sarà certamente diversa da quella, ma ne differirà di

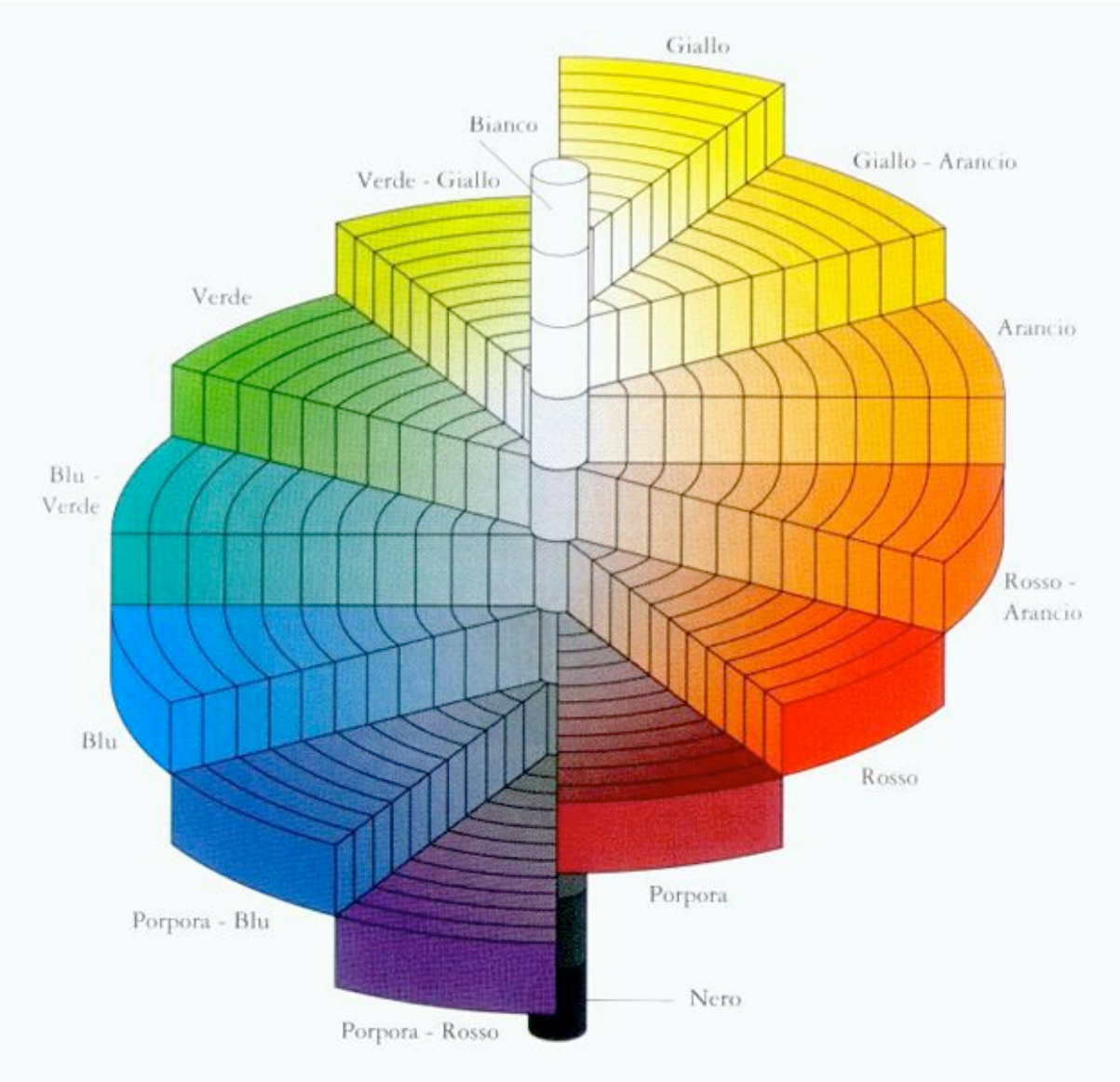
un solo grado di sensazione: toni di colore diversi si potranno perciò valutare col numero di toni intermedi che differiscono tra loro di un solo grado di sensazioni.

Secondo carattere distintivo dei colori è il loro grado di saturazione, che indica la quantità di bianco ad essi miscelata additivamente. Si dicono saturi al cento per cento i colori spettrali, e saturo allo zero per cento il bianco di uguale energia:

Anche una differenza di saturazione si può caratterizzare mediante gradi di sensazioni: queste valutazioni di tinta e di saturazione mediante soglie di sensazioni hanno però il difetto di essere soggettive, di variare cioè da individuo a individuo, e si ovvia a questo inconveniente facendo una media dei valori trovati da un gran numero di osservatori.

Terza ed ultima caratteristica dei colori è la loro brillanza; ad ogni colore di data tinta e saturazione corrisponde una serie di gradi di brillanza, che per i colori non colorati si indica come scala dei grigi; anche le differenze di brillanza si possono esprimere quantitativamente mediante il numero di gradi intermedi di sensazione di brillanza.

Riassumendo, i colori possono differire tra loro per tre proprietà, e queste differenze sono sempre multiple di una minima differenza che abbiamo indicato col termine *grado di sensazione*.



La differenza minima percettibile della brillanza è definita dalla frazione di Fechner; per la cromaticità esistono le curve di Steindler dalle quali risultano due massimi di sensibilità dell'occhio

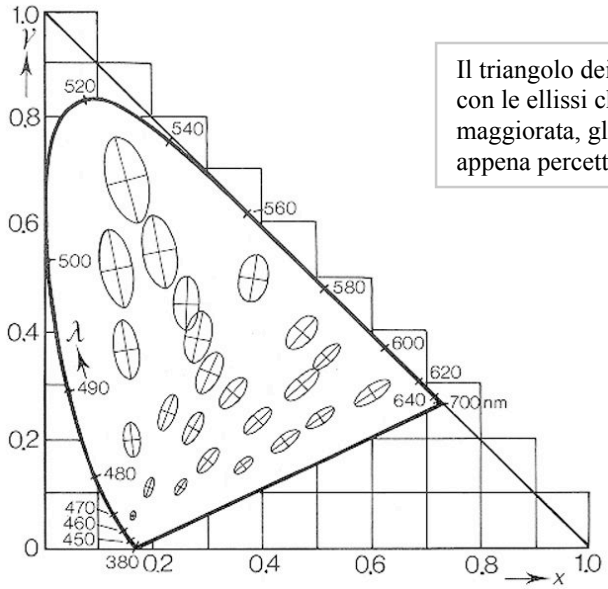
a 500 nm e a 580 nm. Quanto alla saturazione essa può essere valutata con criteri analoghi alla brillanza.

La differenza di colore sul diagramma colorimetrico

Ogni variazione di cromaticità corrisponde ad uno spostamento del punto rappresentativo del colore lungo una linea del triangolo del colore. Si è trovato che queste linee sono piuttosto lunghe nel verde, molto corte nel blu e nel violetto, e di lunghezza intermedia nel giallo e nel rosso.

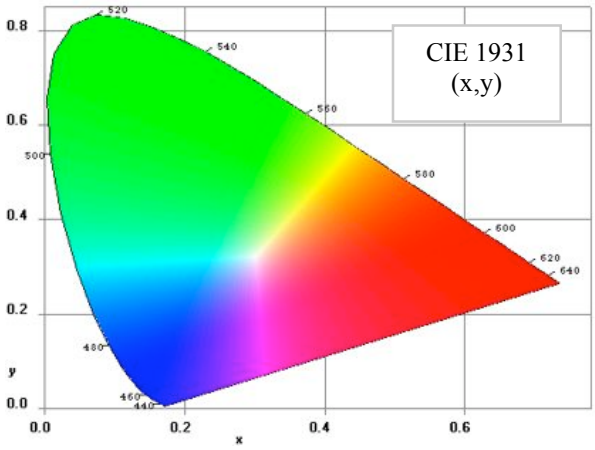
Se dato un colore rappresentato nel piano cromatico da un punto, si vogliono rappresentare tutti i colori appena distinguibili da esso (che differiscono cioè di un solo grado di sensazione), non si ottiene un cerchio avente per centro il colore in esame, ma delle ellissi, e questo perché due uguali distanze non corrispondono allo stesso numero di gradi di differenze appena percettibili di colore.

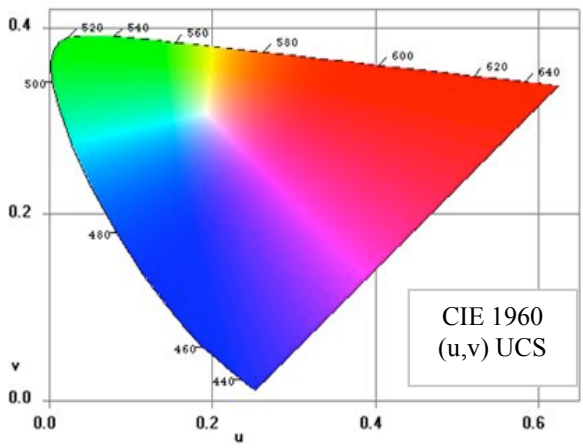
Le ellissi rappresentano quindi la percettibilità di variazione della cromaticità in tutte le direzioni per i colori rappresentati nei loro centri. Nella figura che segue sono rappresentate queste ellissi, ognuna delle quali ha un'area dieci volte maggiore di quella effettiva (rispetto alle coordinate).



Il triangolo dei colori unificati CIE, 1931, con le ellissi che riproducono, in scala maggiorata, gli spostameti di colore appena percettibile

Lo spazio colorimetrico definito dalla CIE nel 1931 risulta quindi essere non uniforme, nel senso che ad uguali distanze euclidee tra punti rappresentativi non corrispondono uguali differenze nella percezione dei colori.





Nel tentativo di risolvere almeno in parte il problema, la CIE ha definito uno spazio colorimetrico uniforme, detto CIELuv, le cui coordinate possono essere calcolate, una volta che si siano misurate le componenti X,Y, e Z, dalle espressioni seguenti

$$u = 4X / (X+15Y+3Z)$$

$$v = 6Y / (X+15Y+3Z)$$

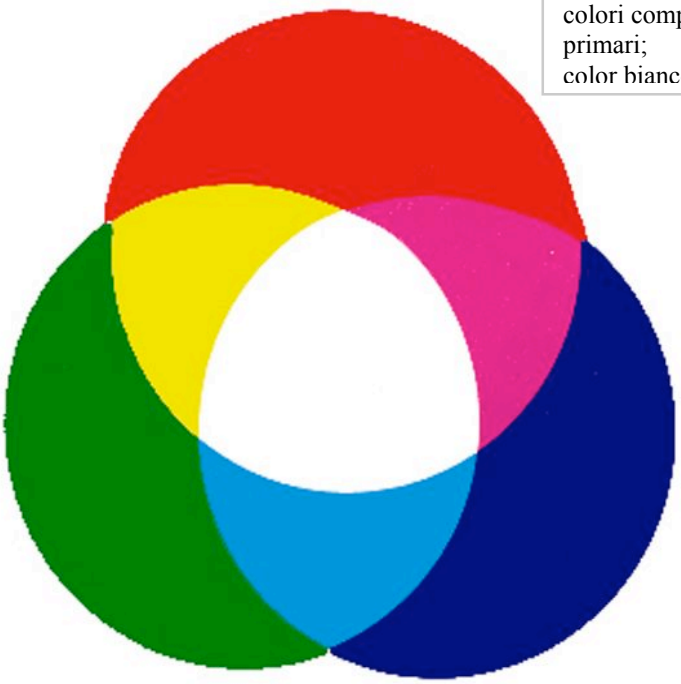
In questo spazio è ora possibile valutare in modo corretto le differenze di colore.

In conclusione, i risultati ottenuti dalla colorimetria nel corso dell'ultimo secolo hanno permesso l'individuazione di un metodo oggettivo e ripetibile per misurare il colore di un oggetto.

La sintesi additiva del colore

La presenza di tre tipi di coni è il fondamento della tricromia della visione diurna ed è alla base della possibilità di riprodurre una gamma estesa di colori mediante la sintesi additiva di tre radiazioni , scelte a piacere in tre regioni dello spettro, ad esempio nelle regioni del rosso, del verde e del blu. Un esempio è riportato qui di seguito.

Colori risultanti dalla miscelazione di tre luci dei colori primari:
colori complementari, da due primari;
color bianco da tre primari



La sintesi additiva si riferisce sia alla sovrapposizione spaziale delle radiazioni sia alla sovrapposizione nel nostro occhio, come accade quando due piccole zone di colore diverso, una accanto all'altra, sono così minuscole e vicine che non le distinguiamo come separate.

L'esperimento che ognuno di noi può realizzare a conferma della teoria è il mosaico.

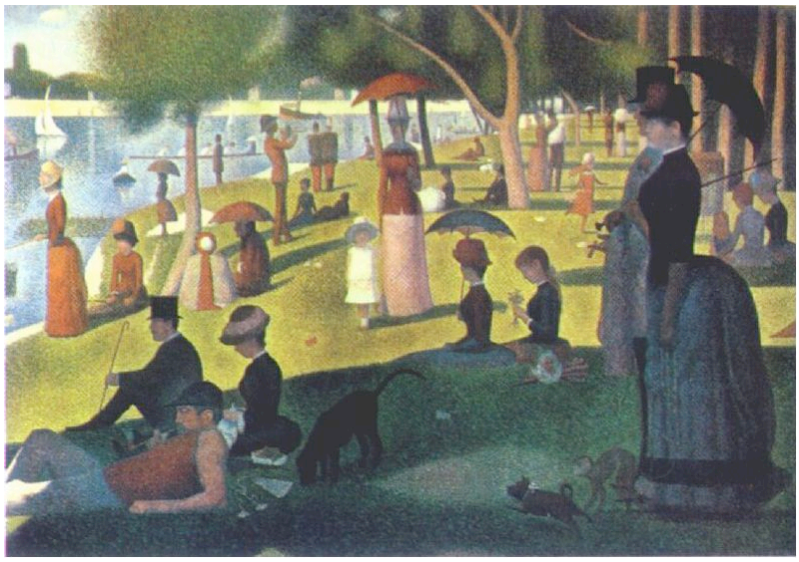
Prendiamo come esempio un'opera che appartiene al patrimonio artistico italiano, il *Gesù di Nazareth come Christus Imperator* a Ravenna. Sull'opera sono distribuite piccole aree o tessere di colori differenti, chiaramente distinguibili a distanza ravvicinata, ma alla distanza da cui si osserva

l'opera nel suo insieme le tessere si confondono tra loro,dando luogo nell'occhio ad una sintesi additiva dei rispettivi colori: a grandezza delle tessere, infatti, è stata proporzionata dall'artista alla distanza da cui il mosaico era destinato ad essere visto.

Lo sviluppo, nella prima metà dell'Ottocento, delle conoscenze scientifiche sulla visione dei colori, e sulla sintesi del colore in particolare, nella prima metà dell'Ottocento influenzò notevolmente lo sviluppo delle scuole pittoriche che caratterizzano la seconda metà del secolo: Pointillisme e Divisionismo.

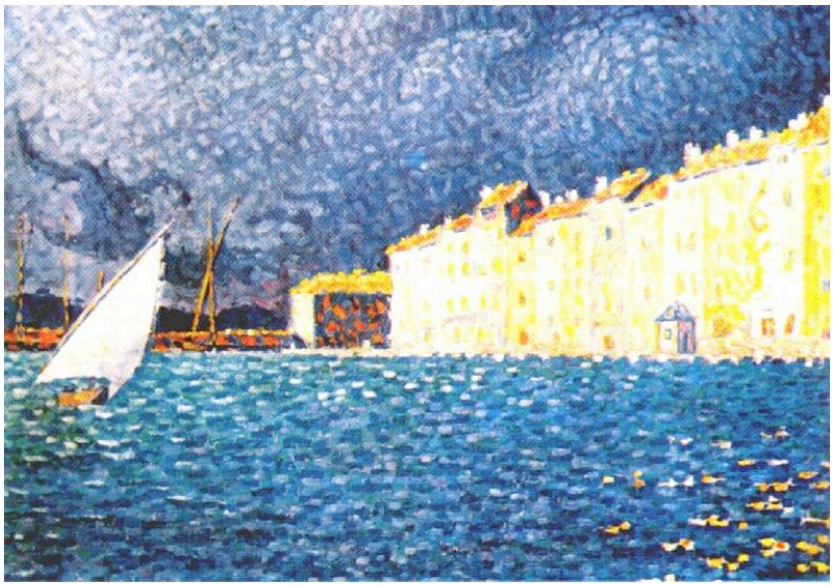
Nel Pointillisme l'opera viene frammentata in piccolissime macchie di colori puri, vicinissime tra loro al punto da essere fuse dall'occhio. I colori del quadro risultano così da un'integrazione visiva dei colori puri delle macchie nell'occhio dell'osservatore.

Geroges Seurat tentò di dare una base scientifica al metodo con quella che chiamò *peinture optique*. La prima grande opera con questa tecnica, *Un dimanche d'été a la Grang Jatte*, fu il risultato di ben diciotto studi preparatori, veri e propri esperimenti di laboratorio.



La tecnica ha in realtà il limite di desaturare, cioè smorzare, le tinte. Nasce allora il Divisionismo che sfrutta ancora il meccanismo di sintesi additiva evitandolo con cura: le macchie di colore si fanno tanto grandi da non essere fuse dall'occhio.

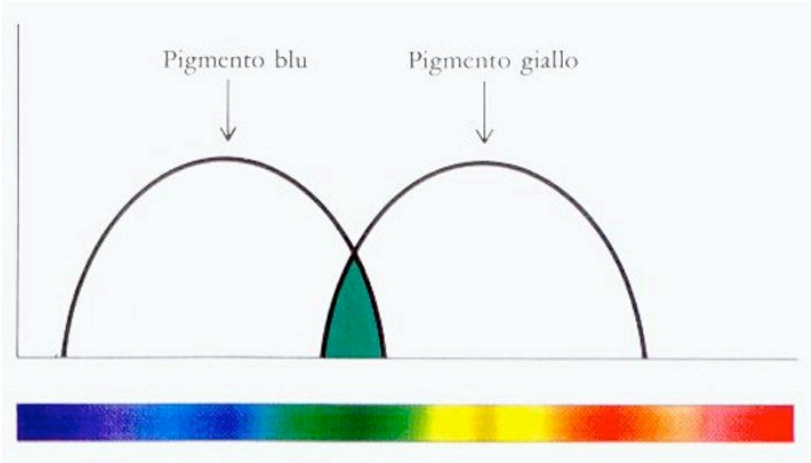
L'esperimento a conferma è *Il Temporale* di Paul Signac. Si producono così dei fenomeni di contrasto locale tra colori diversi con l'effetto, come spiegheremo tra poco, di esaltare le tinte. La tecnica divisionista rende difficile la leggibilità del quadro e questo porterà alla semplificazione delle forme.



La sintesi additiva del colore

La maggior parte delle opere pittoriche si basa sul processo opposto alla sintesi additiva, la cosiddetta sintesi sottrattiva dei colori.

Per le luci, si realizza filtrando una radiazione complessa attraverso dei vetri colorati che lasciano passare le radiazioni di solo una parte dello spettro.



Filtrando la radiazione solare attraverso questi vetri, si vedono luci di colore diverso, ad esempio giallo se il vetro lascia passare le componenti verde e rossa dello spettro, turchese se lascia passare le componenti verde e blu, porpora se il vetro lascia passare le componenti blu e rossa.

Dove due filtri si sovrappongono passerà un solo colore: rosso, verde, e blu, rispettivamente. Se si sovrappongono tutti non viene trasmessa nessuna radiazione.

L'esempio è la vetrata della cattedrale du Chartes detta la *Belle Verriére* (XII secolo). I colori fondamentali della sintesi sottrattiva sono proprio il giallo, il porpora e il turchese.

La sintesi sottrattiva si ottiene anche mescolando inchiostri e pigmenti di colore diverso come avviene nella tavolozza del pittore.

Il temine sottrattiva non va inteso in senso aritmetico ma sta solo ad indicare che ciascun filtro o pigmento elimina una banda di radiazioni; il colore risultante da una sintesi sottrattiva obbedisci in realtà a leggi complesse riconducibili al prodotto delle trasmissioni spettrali dei singoli filtri.

Esempi stupendi di tecniche sottrattive sono presenti in tutto il patrimonio artistico italiano: l'affresco, che è una tecnica ad acqua come la tempera e l'acquerello, consente una pennellata sciolta e decisa mentre la pittura ad olio si distingue per il colore denso compatto e lucente.

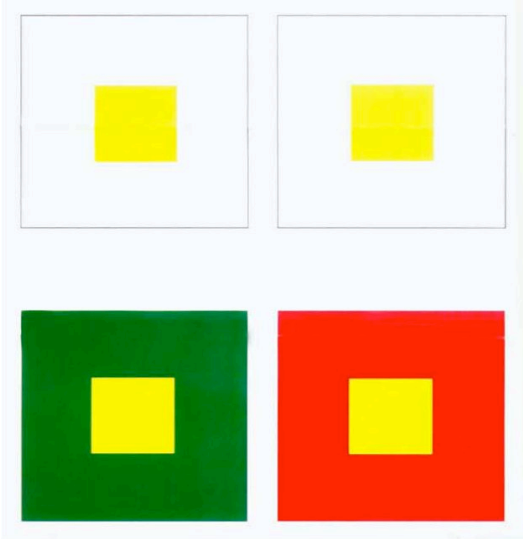
Con l'olio è possibile ottenere effetti drammatici impensabili nelle pitture ad acqua e nel mosaico.

Il colore per contrasto

La tricromia permette di spiegare bene i fenomeni di sintesi additiva e sottrattiva ma non spiega i colori prodotti per contrasto dai pittori divisionisti.

Già Leonardo aveva osservato il fenomeno del contrasto cromatico: il colore di un oggetto viene a modificarsi se visto su uno sfondo neutro (bianco, grigio o nero) oppure su uno sfondo colorato.

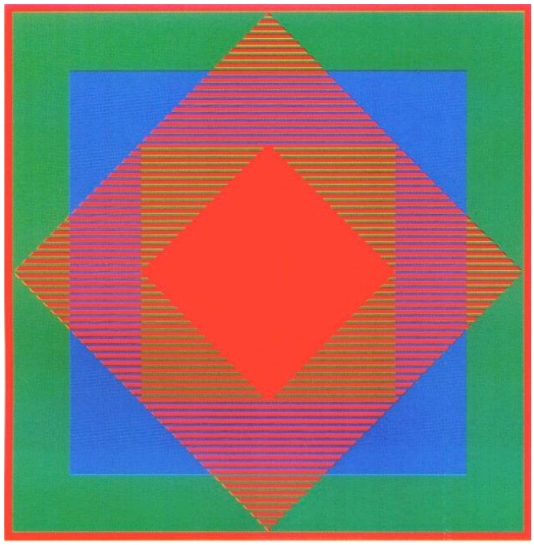
Il colore dello sfondo tende a far virare il colore dell'oggetto verso il colore complementare allo sfondo.



Lo stesso giallo appare verdastro se circondato da uno sfondo rosso e rossastro se circondato dal verde. Anche un semplice pezzetto di carta bianco apparirà giallino accanto a un blu e azzurrino vicino ad un giallo.

Quando però una trama fitta e sottile di un colore si alterna con una trama altrettanto fitta di un altro colore, allora non si ha colorazione per contrasto, ma il colore di una trama vira verso quella dell'altra e non verso il colore complementare.

Una trama rossa appare più arancione se sovrapposta al verde e più azzurrata se sovrapposta al blu, e non viceversa. E' il fenomeno dell'assimilazione cromatica.



A questi fenomeni si aggiunge il contrasto cromatico successivo, quando l'osservazione prolungata di un oggetto di un certo colore modifica la sensazione di colore di oggetti visti successivamente.

Se osservassimo per un minuto un campo quadripartito rosso, blu, verde e giallo, su sfondo grigio e poi osservassimo una campo uniformemente grigio, questo fondo grigio apparirà debolmente quadripartito con i colori complementari a quelli osservati in precedenza: giallo al posto del blu, rosso al posto del verde, e viceversa.

Contrasto ed assimilazione indicano che la percezione del colore si discosta da quanto si puòprevedere solo sulla base della tricromia di Young.

L'esistenza dei tre tipi di coni non esaurisce tutti gli aspetti della visione del colore. Infatti, l'informazione proveniente dai tre tipi di coni non si mantiene separata lungo le vie neurali che collegano la retina la cervello; già nella retina i segnali provenienti da uno o più coni confluiscono su singole cellule nervose, integrandosi, cioè sommando gli effetti, oppure annullandosi a vicenda.

Il cervello

Contrasto ed assimilazione indicano che la percezione del colore si discosta da quanto si può prevedere solo sulla base della tricromia di Young.

L'esistenza dei tre tipi di coni non esaurisce tutti gli aspetti della visione del colore. Infatti, l'informazione proveniente dai tre tipi di coni non si mantiene separata lungo le vie neurali che collegano la retina la cervello; già nella retina i segnali provenienti da uno o più coni confluiscono su singole cellule nervose, integrandosi, cioè sommando gli effetti, oppure annullandosi a vicenda.

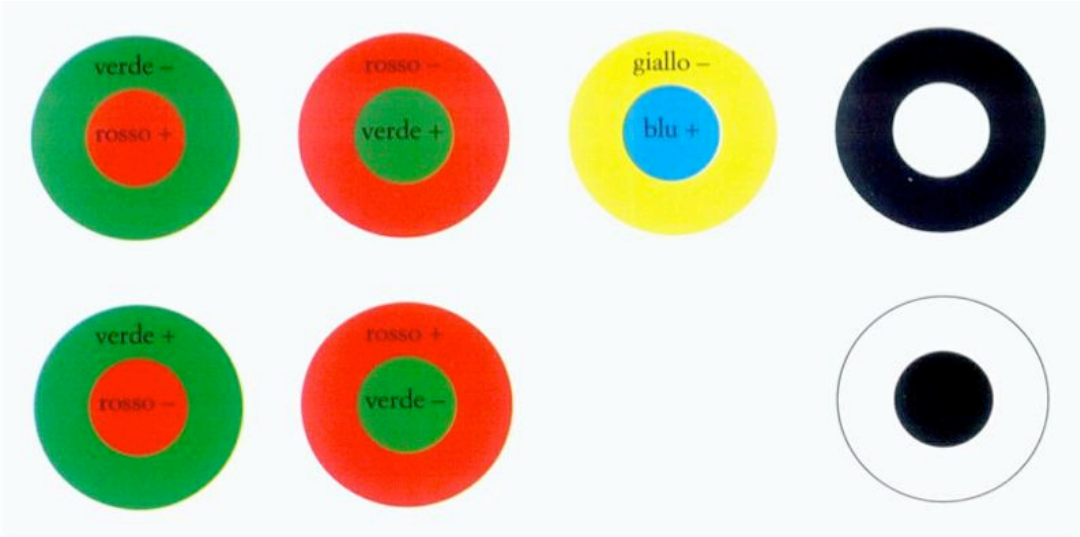
Le cellule gangliari della retina sono di due tipi e si differenziano per forma e per funzione.

Il primo tipo riceve segnali dello stesso segno dai coni "rossi" e "verdi": trasmettono quindi un'informazione sull'intensità luminosa dello stimolo visivo in termini di rapporto chiaro/scuro, ma non trasmettono informazione cromatica.

Questa viene trasmessa invece dall'altro tipo che è a sua volta suddiviso in due specie di cellule: la prima specie viene eccitata dai coni rossi e inibita dai coni blu e le cellule sono dette opponenti per

il rosso/verde, la seconda viene eccitata dai coni blu e inibita sia dai coni rossi sia da quelli verdi e le cellule sono dette opponenti per il blu/giallo.

Si ritrova quindi a livello gangliare la presenza di tre neuroni capaci di elaborare e trasmette informazioni su tre proprietà dello stimolo visivo, rispettando la trivarianza della visione cromatica. I meccanismi sono opponenti: chiaro/scuro, rosso/verde, blu/giallo.



La presenza di queste ultime due spiega perché i pittori abbiano da sempre individuato quattro colori elementari: il rosso, il verde, il giallo e il blu, così come abbiano fatto largo uso del contrasto cromatico.

Nell'arte, due colori incontrandosi si trasfigurano e diventano linguaggio vivo. Così, accostando due zone di azzurro, una diventa mare e l'altra cielo; accostando due marroni, uno diventa tronco e l'alto terra, accostando due verdi, uno diventa mela e l'altro foglia, accostando due bianchi uno diventa tovaglia e l'altro piatto.

Due colori accostati si modificano a vicenda, cioè si esaltano, si spengono o mutano proprio per la legge del complementarismo, sempre presente.

Così l'artista, accostando un rosso da un nero, vedrà il rosso farsi squillante ed il nero farsi verdastro (poiché il rosso ed il verde sono complementari). Avremo perciò un particolare tono di rosso e un particolare tono di nero, derivati dal loro accostamento.

Il contrasto per complementarità è usato da Piero della Francesca nella *Madonna di Monterchi* e da Cezanne nel famoso *Mont Saint Victoire.*

In entrambi i casi il contrasto cromatico giallo/verde si rafforza in contrasto di luminosità, in quanto l'occhio è molto più sensibile alle lunghezze d'onda del giallo che a quelle del blu,

Sulla tinta poi influisce la quantità del colore usato attraverso il meccanismo del contrasto per quantità. Matisse soleva dire che un metro quadrato di colore azzurro è meno intenso di 10 metri quadrati dello stesso colore.

Questo concetto di quantità di colore ha spinto alcuni pittori moderni ad esprimersi solo con due o tre ampie zone di colore, per arrivare ad una sola, come quantità assoluta, affidandosi alla potenza di espressione che deriva, appunto dalla quantità.

La pittura di Mark Rothko, ad esempio, occupa una posizione a se stante nell'ambito della produzione artistica americana degli anni '50, perché le grandi dimensioni delle campiture di colore sono fondamentali per suscitare il coinvolgimento emotivo dello spettatore.