

# La visione dei colori

di Semir Zeki

La sensazione del colore non è assoluta: è il risultato di un confronto simultaneo delle quantità di rosso, di blu e di verde tra tutti gli oggetti

**E**dwin Land (1909-1991), fondatore della società Polaroid, ha inventato le pellicole polarizzanti di plastica e la fotografia istantanea, invenzioni che gli portarono fortuna ma non spensero la sua curiosità. Con i suoi scritti e i suoi esperimenti, Land non ha mai smesso di sottolineare l'importanza del fenomeno di costanza dei colori: la nostra percezione dei colori è indipendente dal tipo di illuminazione. Una foglia verde, per esempio, sembra verde all'aurora, al crepuscolo o a mezzogiorno, in un giorno soleggiato come in un giorno nuvoloso. Le quantità di luce rossa, verde e blu riflesse da questa foglia variano considerevolmente nelle diverse condizioni.

Questo fenomeno è stato spesso trascurato, o ignorato, negli studi della visione dei colori: i fisiologi e gli psicologi lo consideravano ora come un fenomeno dipendente dal giudizio (come von Helmholtz), ora come un atto di memoria e di apprendimento (secondo Ewald Hering).

Senza ignorare queste due concezioni della visione, Land le considerava secondarie. Per dimostrare che la costanza del colore è un processo fondamentale della visione, Land realizzò eleganti esperienze. Nel 1959 ricompose con una luce bianca e una luce rossa quasi tutta la gamma dei colori della realtà. Aveva fotografato il suo soggetto sia con un filtro rosso sia con un filtro verde. Poi proiettava la fotografia «in rosso» attraverso un filtro rosso, e la fotografia «in verde» con luce bianca. L'immagine ottenuta sovrapponendo su uno schermo le due fotografie proiettate «in rosso e bianco» avrebbe dovuto dar luogo solo al rosso, al bianco e a sfumature intermedie. Con sorpresa, si constatò che l'immagine somigliava alla fotografia a colori dello stesso soggetto.

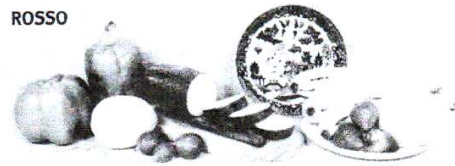
## I rapporti di luce

In esperienze più quantitative, Land illuminava con tre proiettori (uno rosso, uno verde e uno blu) due quadri identici, divisi in zone di vari colori e forme. Con uno spettrometro, misurava la quantità di luce riflessa da una data zona di ciascun quadro. Per uno dei quadri, le quantità di rosso, di verde e di blu erano regolate in modo che una zona bianca apparisse bianca; per l'altro quadro si regolavano i proiettori in modo che una zona verde (rossa, violetta o di qualunque altro colore) riflettesse lo stesso tripetto che componeva la zona bianca del primo.

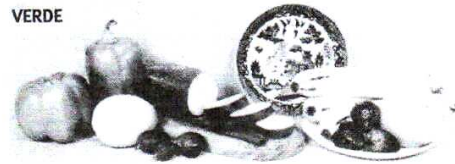
## secondo Edwin Land



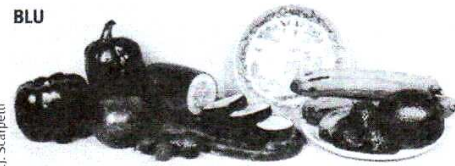
ROSSO



VERDE



BLU



L. Scarpelli

Malgrado questa calibrazione, il verde (rosso, violetto...) del secondo quadro appariva all'occhio non bianco, ma verde (rosso, violetto...). Ciò prova che si riconosce il colore di un oggetto non dalla composizione spettrale della luce che esso riflette, ma dal confronto delle composizioni spettrali riflesse da tutti gli oggetti circostanti.

Edwin Land ha dedotto dalle sue esperienze che la percezione del colore è il risultato di un calcolo automatico: una parte del cervello situato tra la retina e la corteccia confronta la quantità di luce di un dato colore (rosso, verde o blu) riflessa da una superficie con le quantità riflesse dalle superfici vicine. Questa teoria è stata chiamata RETINEX (da «retina» e «cortex»). L'intuizione di Land era corretta. Oggi sappiamo che è proprio la corteccia cerebrale, nell'area V4, a calcolare il rapporto di queste quantità.

La riproduzione in alto (fotografia a colori e fotoincisione) mostra i colori di una natura morta. Le tre fotografie in bianco e nero sono state prese con filtri che riproducono le sensibilità dei tre sistemi di coni: rosso, verde e blu. Fragole e ravanelli sono chiari nella fotografia con filtro rosso e più scuri su quelle con filtro verde e blu. I motivi del piatto sono chiari nella fotografia con filtro blu e scuri nelle altre due. I tre livelli di luminosità di una superficie, in rapporto ai livelli di luminosità delle superfici vicine, sono sufficienti a determinare il colore di un oggetto.

### L'AUTORE

**SEMIR ZEKI** è professore di neurologia all'Università di Londra.

### PER SAPERNE DI PIÙ

LAND EDWIN H., *Una nuova teoria della visione dei colori*, in «Le Scienze», n. 155, marzo 1978.

WENSBERG PETER C., *Land's Polaroid: A Company and the Man Who Invented it*, Houghton Mifflin Co., Boston, 1987.



# Una nuova teoria della visione dei colori

*Oltre 25 anni di esperimenti sembrano indicare che l'identificazione dei colori si basa su triplette di informazioni relative alla riflettanza degli oggetti che vengono elaborate da un sistema retina-corteccia*

di Edwin H. Land

La tradizione scientifica di semplificare le condizioni in cui vengono effettuati gli esperimenti ci ha lasciato fino a poco tempo addietro senza una spiegazione soddisfacente di come l'occhio vede i colori nella vita di tutti i giorni. Paradossalmente la moderna tecnologia della fotografia a colori ha rafforzato la convinzione che i colori osservati da Newton nello spettro sono, con varianti di poca importanza, i colori del mondo che ci circonda. Noi sappiamo, per esempio, che se usiamo una pellicola a colori per luce diurna per fotografare una scena illuminata da una lampada a filamento di tungsteno, l'immagine sarà caratterizzata da una forte dominanza rossastra. Questo avviene, diciamo, perché la luce della lampada è troppo «rossa», senza chiederci come mai ci è possibile cambiare l'illuminazione della scena senza osservare alcun cambiamento di colore degli oggetti familiari: mele, limoni, fragole, pane, facce umane (oggetti i cui colori sono così difficili da riprodurre correttamente su uno schermo televisivo a colori).

Come fa allora l'occhio a non tener conto dell'eccesso di «rosso» in una stanza illuminata con lampade comuni? Come spero di dimostrare in questo articolo, nel determinare i colori l'occhio non percepisce affatto l'eccesso di rosso perché tale determinazione non dipende dal flusso di energia raggiante che giunge all'occhio. L'occhio si è evoluto per vedere il mondo con colori stabili, indipendenti dall'illuminazione, che è sempre imprevedibilmente mutevole. Come sia possibile raggiungere questo risultato è una cosa che mi ha sempre affascinato.

Nel 1959 ho descritto una serie di esperimenti in cui un'immagine prodotta dalla proiezione in sovrapposizione di due diapositive in bianco e nero, proiettate l'una attraverso un filtro rosso e l'altra in luce bianca, viene percepita con quasi tutta la gamma di colori presente nell'originale (si veda *Experiments in Co-*

*lor Vision* di E.H. Land, in «Scientific American», maggio 1959). Per produrre una tale immagine, la diapositiva proiettata attraverso il filtro rosso viene ripresa attraverso lo stesso filtro e la diapositiva proiettata in luce bianca viene ripresa attraverso un filtro verde. Ci si attenderebbe che la proiezione delle due immagini sovrapposte sia solo in bianco, rosso e vari toni di rosa. E invece si osserva un'immagine notevolmente simile a quella a pieni colori riprodotta nella pagina a fronte. Nella proiezione in luce bianca e rossa i peperoni sono verdi, i ravanelli e le fragole sono rossi, l'arancia è arancione, le banane e il limone sono giallo chiaro, la tavoletta di legno e il manico del coltello sono marrone e il disegno sul piatto è blu.

A partire da questi vecchi esperimenti siamo risaliti passo per passo, nel corso di vent'anni, alla spiegazione di come il nostro sistema visivo riesca a estrarre informazioni consistenti sui colori del mondo che ci circonda, un mondo in cui praticamente ogni scena è illuminata in maniera non uniforme, dove la composizione spettrale della luce può variare in maniera enorme e dove illuminazioni brevi come un lampo sono sufficienti per un'identificazione accurata dei colori. Se i fotorecettori della retina funzionassero anche solo approssimativamente come ci hanno insegnato a scuola, e cioè come rivelatori d'intensità della radiazione con sensibilità centrata in tre diverse zone dello spettro, noi confonderemmo continuamente un colore con l'altro. Un oggetto che sembrava giallo in una parte del nostro campo visivo potrebbe apparire verde o grigio o anche rosso qualora venisse spostato in un'altra parte. E invece gli oggetti conservano il loro colore in una gran varietà di condizioni di luce. Questa costanza non è un effetto secondario, è invece talmente fondamentale da condurre a una nuova descrizione del meccanismo della visione dei colori.

I pigmenti della visione sono molecole

fotosensibili che rispondono a una banda molto ampia di lunghezze d'onda. I tre pigmenti che si trovano nei coni della retina coprono l'intero spettro visibile con tre bande d'assorbimento ampie e ampiamente sovrapposte. Il pigmento con massimo di sensibilità alla lunghezza d'onda di 440 nanometri risponde in un certo grado a tutta la metà dello spettro di più bassa frequenza. Gli altri due pigmenti rispondono a circa due terzi dello spettro con massimi di sensibilità separati soltanto di 30 nm, essendo situati a 535 e 565 nm (si veda la figura in alto a pagina 54).

Nel discorso che segue i nomi dei colori - rosso, blu, verde e così via - verranno utilizzati per descrivere la sensazione dei colori che abbiamo guardando il mondo che ci circonda. In breve, solo i nostri occhi possono classificare il colore degli oggetti, gli spettrofotometri non possono farlo. Questo punto è importante perché molte persone che assistono per la prima volta a qualcuno dei nostri esperimenti identificano un colore come rosso o verde ma poi chiedono subito di che colore si tratta in realtà, come se i loro occhi venissero ingannati. La risposta è che l'occhio non viene ingannato. Sta funzionando esattamente come deve, con involontaria precisione, vedendo colori costanti in un mondo illuminato da flussi di radiazione mutevoli e imprevedibili.

Dato che sono convinto che lo studio del colore nelle immagini colorate si cominci più fruttuosamente esaminando immagini del tutto prive di colore e non complicate da questa presenza, descriverò in dettaglio un'esperienza interessante in questo senso. Il sistema fotorecettore ipersensibile basato sui bastoncelli della retina funziona con una illuminazione 1000 volte più debole del sistema basato sui coni. Ciò consente di rispondere a una domanda interessante: che colori si vedono se viene attivato solo il sistema a bastoncelli? Una procedura possibile consiste nell'uso di un paio di occhiali ben

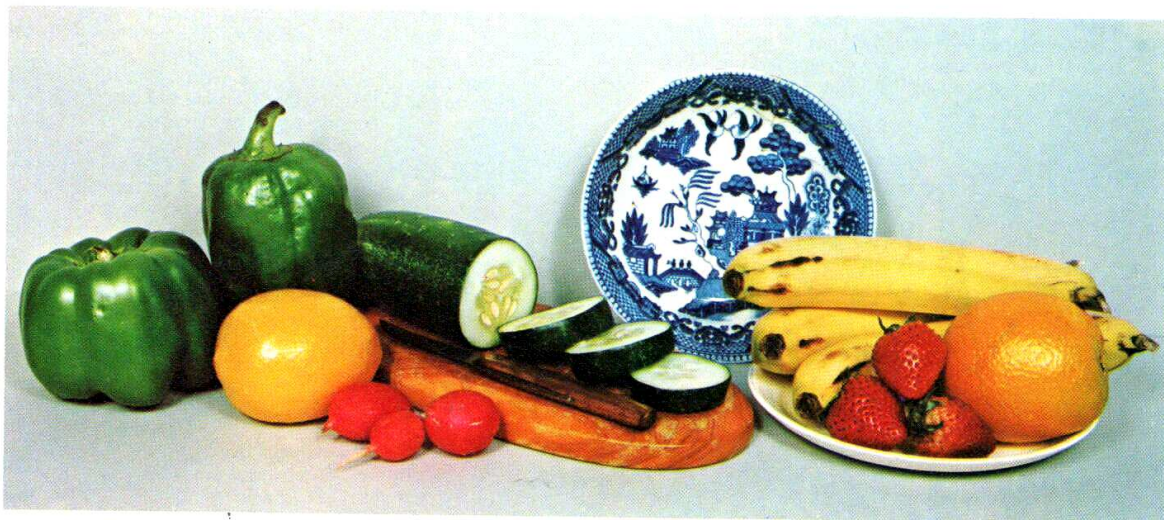


schermati e muniti di lenti grige che riducono 30 000 volte l'illuminazione incidente. Dopo una mezz'ora da che si indossano gli occhiali, diviene visibile anche l'interno di una stanza illuminata normalmente, al livello tipico di 200 lux. L'illuminazione efficace nella stanza corrisponde quindi, per chi indossa gli oc-

chiali, a 1/150 di lux. Guardandosi attorno, i familiari oggetti colorati appaiono privi di colore, con una gamma di luminosità che va dal bianco al nero e con un aspetto simile a quello che assumono in una fotografia in bianco e nero ripresa attraverso un filtro verde per selezioni cromatiche. In altre parole i rossi

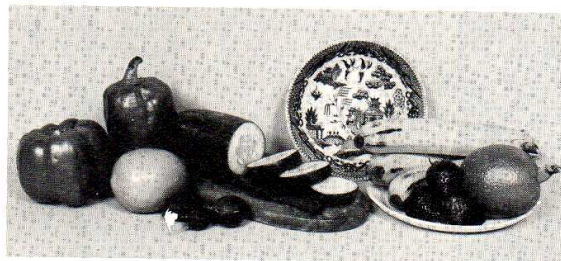
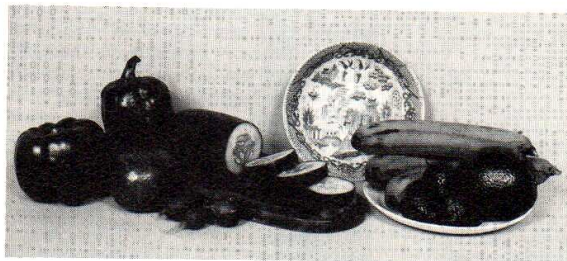
appaiono molto scuri, i verdi più chiari, i blu scuri, i bianchi luminosi e i neri molto scuri.

In questo mondo privo di colori si scopre che la natura dell'immagine non è determinata dal flusso di energia raggiante che raggiunge l'occhio. L'illuminazione può infatti venire facilmente mo-



La riproduzione di questa natura morta, utilizzata per riprendere le quattro immagini in bianco e nero della figura in basso, è stata ottenuta con metodi usuali di fotografia a colori e di fotoincisione, per mostrare al lettore i colori originali degli oggetti fotografati. Le

riprese fotografiche in bianco e nero sono state ottenute con combinazioni di pellicole e di filtri tali da riprodurre fedelmente le diverse sensibilità spettrali dei quattro sistemi di fotorecettori presenti nella retina: i tre sistemi di cellule a cono e il sistema ipersensibile a bastoncelli.



Queste immagini in bianco e nero di una natura morta sono quelle che l'autore chiama fotografie retinex. L'immagine in alto a sinistra è stata presa con una pellicola la cui sensibilità spettrale è stata alterata in modo da renderla uguale a quella dei cono sensibili a grandi lunghezze d'onda. Questa fotografia consente a chi la guarda di vedere un'immagine priva di colori che approssima quella prodotta dal sistema di cono suddetto. L'immagine in alto a destra mostra come la stessa natura morta viene vista dai cono con pigmento sensibile a

lunghezze d'onda intermedie. L'immagine in basso a sinistra corrisponde alla visione dei cono sensibili a piccole lunghezze d'onda e quella in basso a destra all'immagine vista dai bastoncelli. A differenza delle immagini prodotte dai cono, che non possono essere viste separatamente, le immagini prodotte dai pigmenti dei bastoncelli possono venire studiate isolatamente a bassissimi livelli di illuminazione; a tali livelli infatti non si hanno interferenze da parte dei sistemi di cono, caratterizzati da una sensibilità molto inferiore.



dificata in modo che da una superficie che continua ad apparire molto scura vi sia un flusso maggiore di quello proveniente da una zona che rimane molto chiara. E questo indipendentemente dal fatto che queste regioni siano oggetti tridimensionali o artefatti nascosti in un montaggio di pezzi di carta chiara e scura. Di qui nasce il paradosso che gli oggetti, per esempio i pezzi di carta, indipendentemente dal fatto che siano chiari, scuri o di colore intermedio, mantengono il loro aspetto senza variazioni significative quando vengono spostati in zone in cui è diverso il flusso incidente. I fogli di carta chiari continueranno a ve-

nire percepiti chiari e quelli scuri come tali, anche se l'occhio riceve da essi il medesimo flusso di radiazione. Forti variazioni di flusso all'interno del campo visivo vengono percepiti poco o niente.

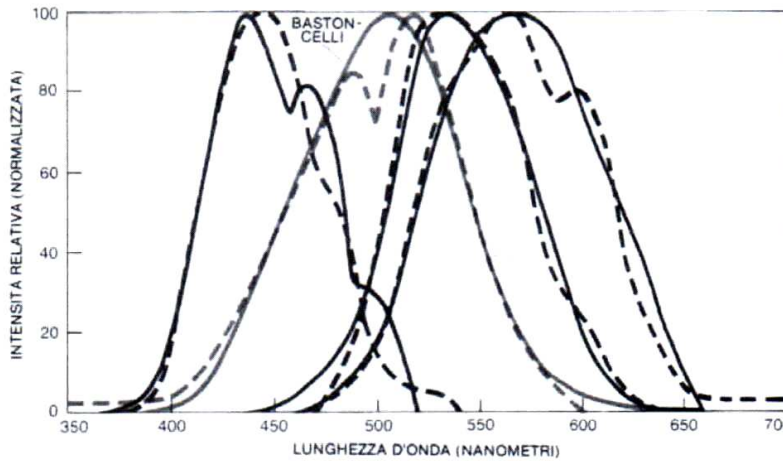
E ancora, in un complicato collage di carte di varie dimensioni, forme e potere riflettente, la luminosità di una data zona non pare variare sensibilmente quando viene spostata da una parte all'altra del collage e quindi associata arbitrariamente all'ambiente circostante. Quando una piccola superficie viene circondata da una molto più grande, allora la percezione della luminosità della prima cambia leggermente in funzione del fatto che

la superficie più grande sia più chiara o più scura. In generale, comunque, il fatto importante è che la percezione della luminosità di una certa superficie non viene modificata dall'ambiente immediatamente circostante e neppure dalle superfici più grandi che la circondano.

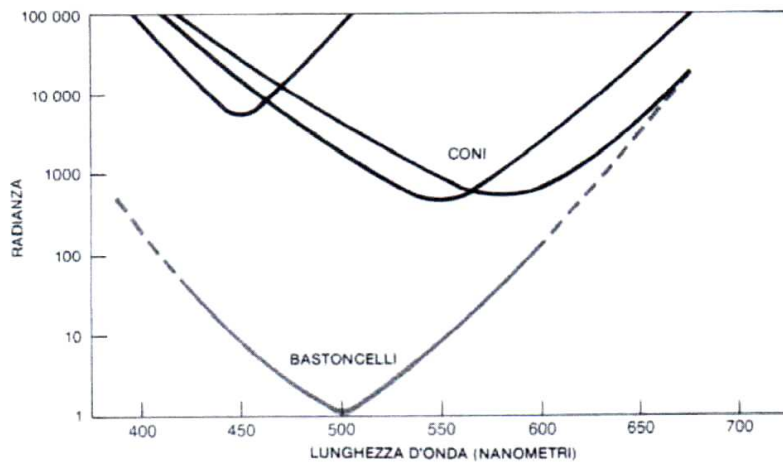
**B**enché finora sia stato descritto il comportamento dei soli fotorecettori ipersensibili a bastoncello, tutte le osservazioni fatte sulla stabilità della percezione della luminosità possono venire ripetute con un collage di pezzi di carta bianchi, grigi e neri osservato a livelli di illuminazione ordinari. Poniamo per esempio un pezzo di carta nera opaca o, meglio, un pezzo di velluto nero su un lato del collage e un pezzo di carta bianca sul lato opposto, a parecchia distanza dal primo, con in mezzo una serie di carte chiare e scure. Ora è possibile disporre una forte sorgente di luce tanto vicino al velluto nero che questo riflette verso l'occhio più luce di quanta non ne rifletta la carta bianca più lontana dalla luce e, malgrado questo, il velluto continuerà a sembrare nero e la carta bianca. In effetti, con il collage sempre illuminato lateralmente in maniera non uniforme, l'impressione di bianco e di nero viene mantenuta muovendo il velluto e la carta in tutte le posizioni possibili.

Questa notevole abilità dell'occhio nel distinguere il potere riflettente degli oggetti, indipendentemente dal flusso di radiazione che lo raggiunge, è la base su cui è possibile costruire una descrizione soddisfacente della visione dei colori. La prima risposta del sistema visivo alla luce incidente è l'assorbimento di questa da parte dei fotorecettori. Per quanto il segnale iniziale proveniente dai segmenti esterni delle cellule fotorecetriche sembri dipendere dal flusso di radiazione assorbito dal pigmento fotosensibile, la risposta finale complessiva del sistema visivo si dimostra praticamente indipendente dal flusso di radiazione assorbito dal pigmento e legata invece al potere riflettente dell'oggetto osservato.

Questo richiede un sistema di elaborazione dei flussi di radiazione, che può risiedere nella retina, nella corteccia cerebrale o in entrambe. Vista l'incertezza sulla localizzazione di tale sistema di elaborazione ho proposto di definire con il termine «retinex» l'insieme dei meccanismi biologici che consentono di convertire i flussi di radiazione incidenti sulla retina in informazioni relative al potere riflettente degli oggetti. Inoltre in questo articolo utilizzerò il termine «luminosità» per indicare la sensazione relativa alla brillantezza delle superfici, sensazione che abbiamo visto dipendere più dal potere riflettente di queste che dalla loro effettiva brillantezza, da cui dipende il flusso di radiazione che raggiunge la retina. Per quanto i bastoncelli possano venire eccitati con livelli di illuminazione al di sotto del valore di soglia per i cono, questi non possono venire eccitati senza stimolare anche i bastoncelli. La luminosità delle immagini prodotte dai vari tipi

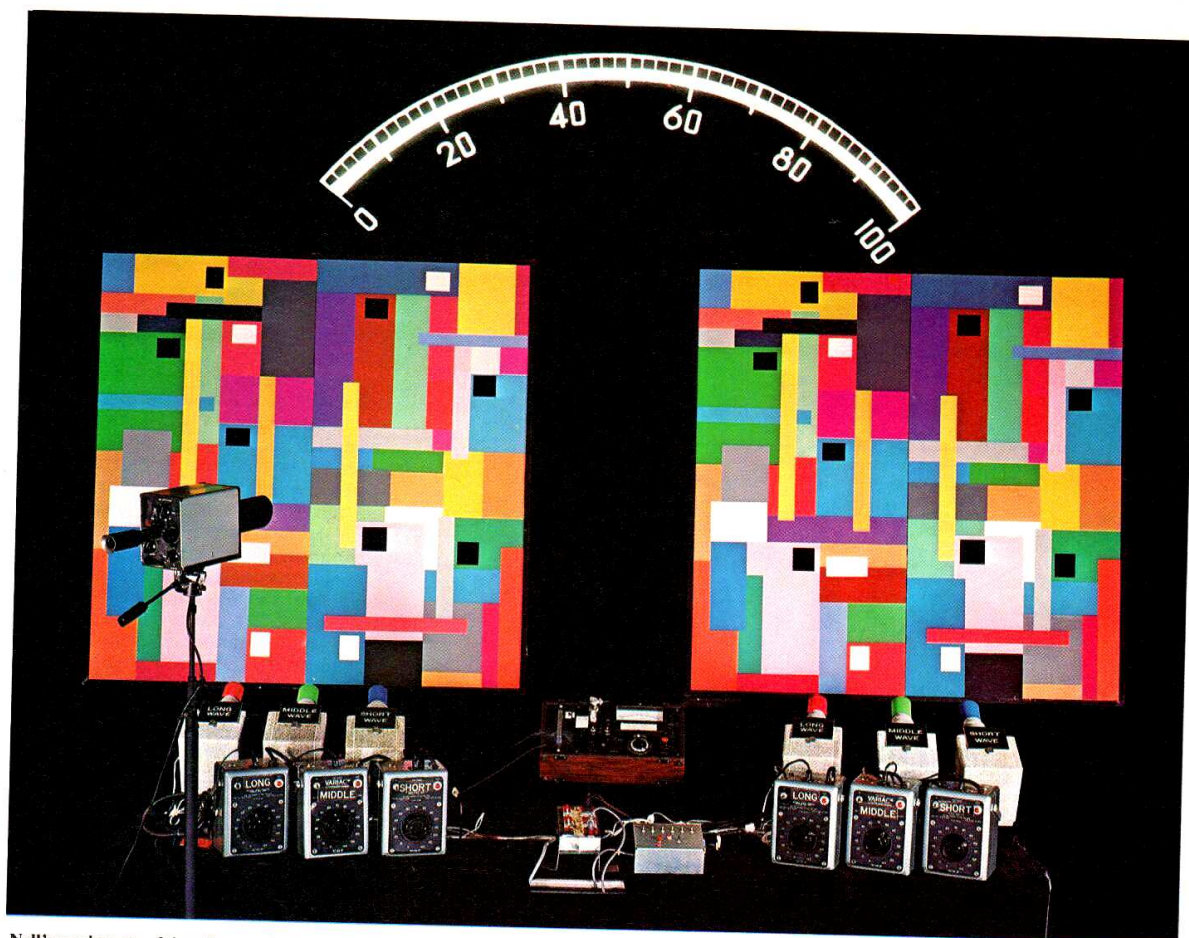


Le sensibilità spettrali normalizzate dei quattro pigmenti visivi (linee continue) coprono lo spettro visibile sovrapponendosi ampiamente. La curva con massimo a 550 nanometri corrisponde alla sensibilità del pigmento dei bastoncelli. Le altre curve corrispondono ai pigmenti dei cono. Le curve tratteggiate mostrano la sensibilità delle combinazioni filtro-pellicola scelte per simulare quelle dei pigmenti della retina e utilizzate per le fotografie retinex in bianco e nero. Le curve relative ai cono sono state adattate dai lavori di Paul Brown e George Wald della Harvard University. La curva relativa ai bastoncelli è la curva standard di sensibilità scotopica.



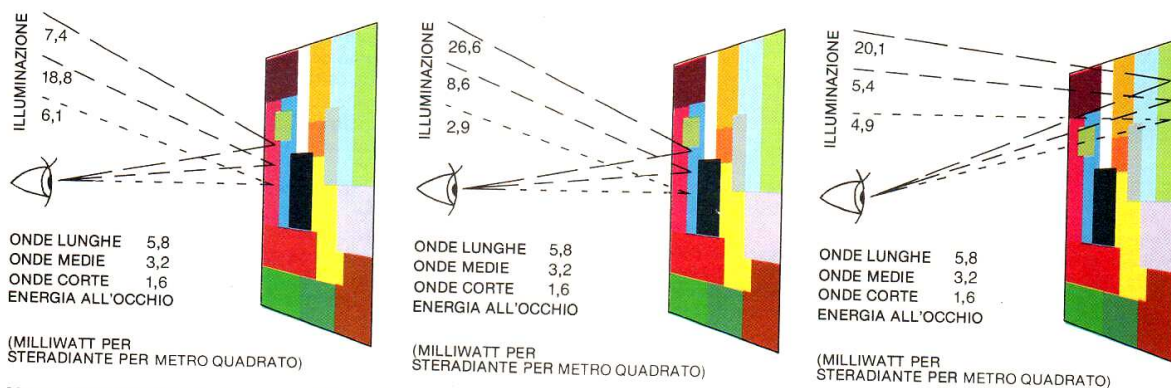
Le soglie di eccitazione dei recettori della retina sono molto diverse. Il sistema ipersensibile a bastoncelli consente la visione a livelli di illuminazione 1000 volte più deboli di quelli necessari per attivare i sistemi a cono. Nel laboratorio dell'autore è stato dimostrato che gli oggetti colorati sono visti nella quasi completezza dei loro colori, a livelli d'illuminazione aggiustati in modo da eccitare solo il sistema a bastoncelli e quello a cono sensibili a grandi lunghezze d'onda.





Nell'esperimento dei collage colorati sono utilizzati due collage identici di pezzi di carta, montati su tavole quadrate di 1,35 metri di lato. Le carte colorate sono opache per minimizzare le riflessioni speculari. Ogni collage viene illuminato da una terna di proiettori, muniti di filtri passa-banda e di controlli indipendenti di luminosità, in modo da poter mescolare nelle proporzioni volute i fasci di luce a grande, media e piccola lunghezza d'onda («rossa», «verde» e «blu»). Si può puntare un fotometro su qualsiasi zona del collage per misurare, singolarmente nelle tre bande, il flusso di radiazione che tale zona

riflette verso l'occhio. La lettura del fotometro è proiettata sulla scala sopra i due collage. In un esperimento tipico i proiettori vengono aggiustati in modo che la zona bianca del collage di sinistra e una zona verde (o qualsiasi altra zona) nel collage di destra riflettano entrambe la medesima tripletta di energie nelle tre bande dello spettro. La situazione reale non può venire riprodotta qui, a causa delle limitazioni della tecnica di riproduzione dei colori. Nella realtà la zona bianca continua a essere bianca e quella verde continua a essere verde, malgrado l'occhio riceva la medesima tripletta di flussi da entrambe.



Negli esperimenti con i collage flussi energetici identici incidenti sulla retina provocano differenti sensazioni di colore. In questo esempio, con i proiettori di luce a grande, media e corta lunghezza d'onda regolati come indicato, una superficie rossa continua a venire vista rossa (a sinistra), una blu rimane blu (al centro) e una verde rimane

verde (a destra), anche se tutte e tre riflettono la medesima tripletta di energie nei fasci di luce a grande, media e piccola lunghezza d'onda. La medesima tripletta può essere fatta riflettere da qualsiasi altro punto del collage: se si tratta di una zona bianca, essa rimane bianca, se la zona è grigia rimane grigia, se la zona è gialla rimane gialla e così via.



di coni può quindi venire studiata solo con il metodo fotografico che descriverò più avanti o mediante calcoli basati sui risultati di misure spettroradiometriche.

Ora che sappiamo come a bassi livelli di illuminazione un singolo sistema di recettori che funziona isolatamente fornisca un'immagine costituita solo da zone di diversa luminosità e priva di colore, sarebbe interessante vedere se è possibile mettere in azione insieme ai bastoncelli uno dei tre sistemi di coni, in modo da avere in funzione solo due sistemi di recettori. Questo esperimento è

stato realizzato e fornisce una solida conferma delle idee suggerite da tutto il nostro lavoro precedente con stimoli binari in luce bianca e rossa e degli esperimenti successivi con stimoli ternari ottenuti mediante oggetti a più colori visti sotto un'illuminazione variabile. Questo esperimento, che sta diventando un classico, è stato ideato dai miei colleghi John J. McCann e Jeanne L. Benton.

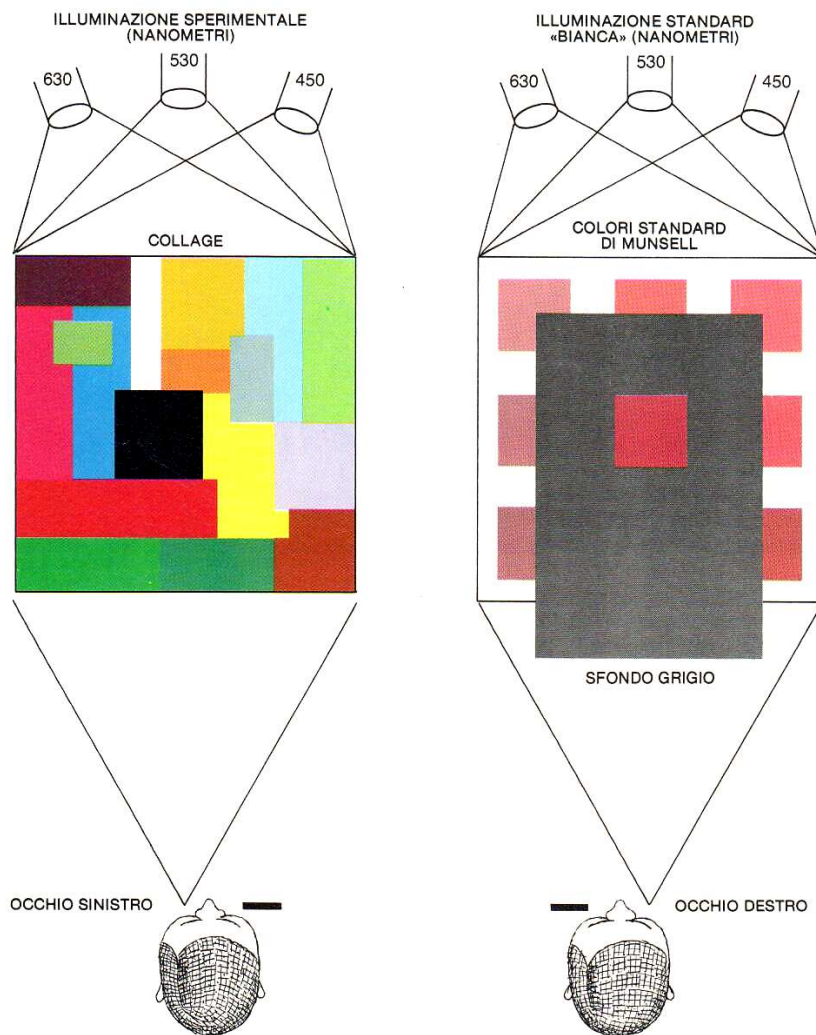
L'esperimento si effettua illuminando un soggetto a più colori con una sorgente a banda stretta, centrata a 550 nanometri, di intensità appena superiore alla soglia necessaria per rendere il soggetto

visibile all'occhio adattato al buio. In questo modo si è certi che viene eccitato solo il sistema ipersensibile a bastoncelli. Si aggiunge poi una seconda sorgente a banda stretta centrata a 656 nanometri e di intensità sufficiente per attivare il sistema a coni sensibile alle grandi lunghezze d'onda ma non quello sensibile alle lunghezze intermedie. In tali condizioni risultano eccitati solo due sistemi di fotorecettori, ossia i bastoncelli e i coni sensibili alle lunghezze d'onda maggiori.

L'immagine osservata è caratterizzata da un'ampia gamma di colori, tale da consentire all'osservatore di assegnare a ciascuna zona dell'oggetto il nome del colore che era possibile vedere con l'illuminazione normale. Il risultato ricorda quello ottenibile con la proiezione di immagini in luce bianca e rossa. Questo esperimento conferma la nostra vecchia ipotesi che le informazioni sulla luminosità raccolte a due diverse lunghezze di onda da due sistemi fotorecettori non vengono mediate punto per punto bensì sono mantenute distinte e confrontate. Sappiamo ora che il sistema a bastoncelli non consente da solo la visione dei colori e che neppure un'illuminazione a grande lunghezza d'onda consente da sola l'osservazione di un'immagine multicolore. Ma quando funzionano entrambi i sistemi si osserva una notevole varietà di colori, in particolare rossi, gialli, marroni, bluverdi, grigi e nero.

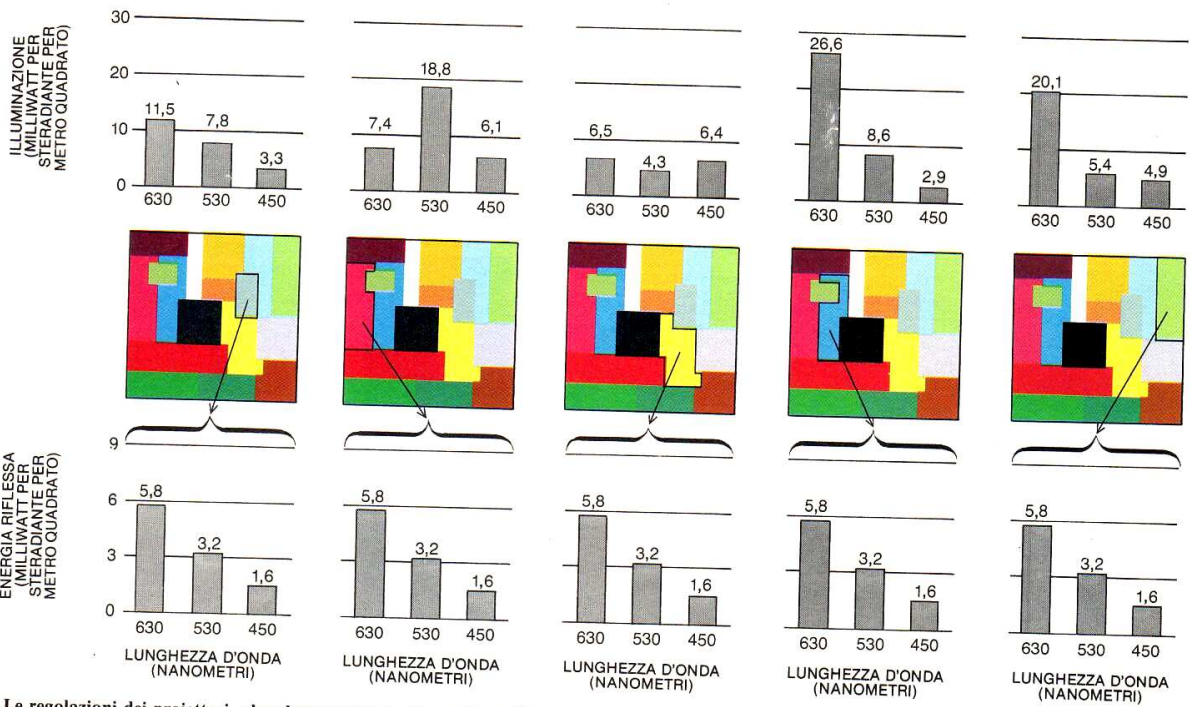
Allora che cosa produce la visione dei colori? La loro visione può venire ascritta a un processo operante in qualche punto del sistema visivo che confronta la luminosità di due immagini distinte in due diverse bande dello spettro fornite da due sistemi retinici indipendenti. L'esperimento con due sistemi fotorecettori rende possibile ipotizzare che, quando vengono associate tre immagini indipendenti che riportano le luminosità percepite dai tre sistemi di fotorecettori sensibili a piccole, medie e grandi lunghezze d'onda, la percezione dei colori sia dovuta al confronto delle diverse luminosità, zona per zona. La ragione per cui il colore di ogni punto dell'immagine risulta essenzialmente indipendente dal rapporto dei tre flussi di radiazione corrispondenti alle tre regioni spettrali di massima sensibilità dei recettori, va cercata nel fatto che il colore dipende solamente dalla luminosità in ognuna delle bande spettrali e la luminosità non dipende dal flusso.

Come abbiamo già visto, le sensibilità spettrali dei pigmenti visivi si sovrappongono ampiamente. Se illuminassimo una scena con l'intera banda di radiazioni cui è sensibile uno dei pigmenti, sarebbe possibile vedere una gran varietà di colori, in quanto verrebbe eccitato più di un sistema retinico. Con l'impiego di filtri e di emulsioni fotografiche appropriate, riesce peraltro possibile isolare la luminosità che altrimenti verrebbe integrata nella percezione del colore. Fotografie in bianco e nero riprese allo scopo si possono chiamare immagini retinex.



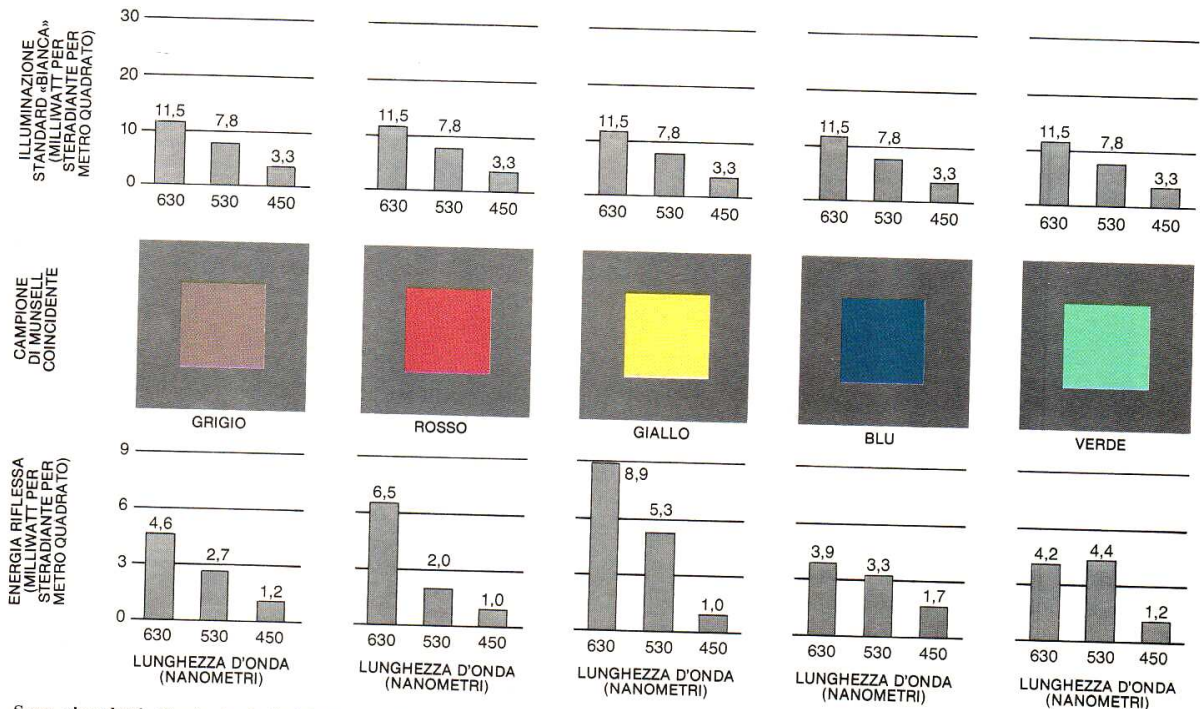
Nell'esperimento di confronto dei colori si impiegano un collage semplificato con 17 zone di colore (a sinistra) e un campionario di colori standard, il *Munsell Book of Color*, che contiene 1150 campioni di colore (a destra). Il collage viene illuminato con tre sorgenti a banda stretta: una a 630 nanometri, una a 530 e una a 450. Le proporzioni dei tre fasci di luce si possono variare in modo che la tripla di energie riflessa da una zona qualsiasi uguagli quella riflessa in precedenza da un'altra zona. In questo esperimento sono state scelte cinque zone, di colore grigio, rosso, giallo, blu e verde, dalle quali far riflettere in successione la medesima tripla di energie. Nel corso di ognuna delle cinque parti consecutive dell'esperimento, l'osservatore doveva scegliere fra gli standard di colore quelli che più si avvicinavano al colore delle 17 zone del collage. Gli standard di colore, durante l'intero esperimento, erano illuminati con una mescolanza costante delle tre luci scelta in modo che il bianco del campionario di Munsell risultasse all'osservatore «il miglior bianco possibile». L'esperimento era condotto in modo che gli osservatori potessero vedere il collage con un occhio e con l'altro i colori standard circondati da una maschera grigia.





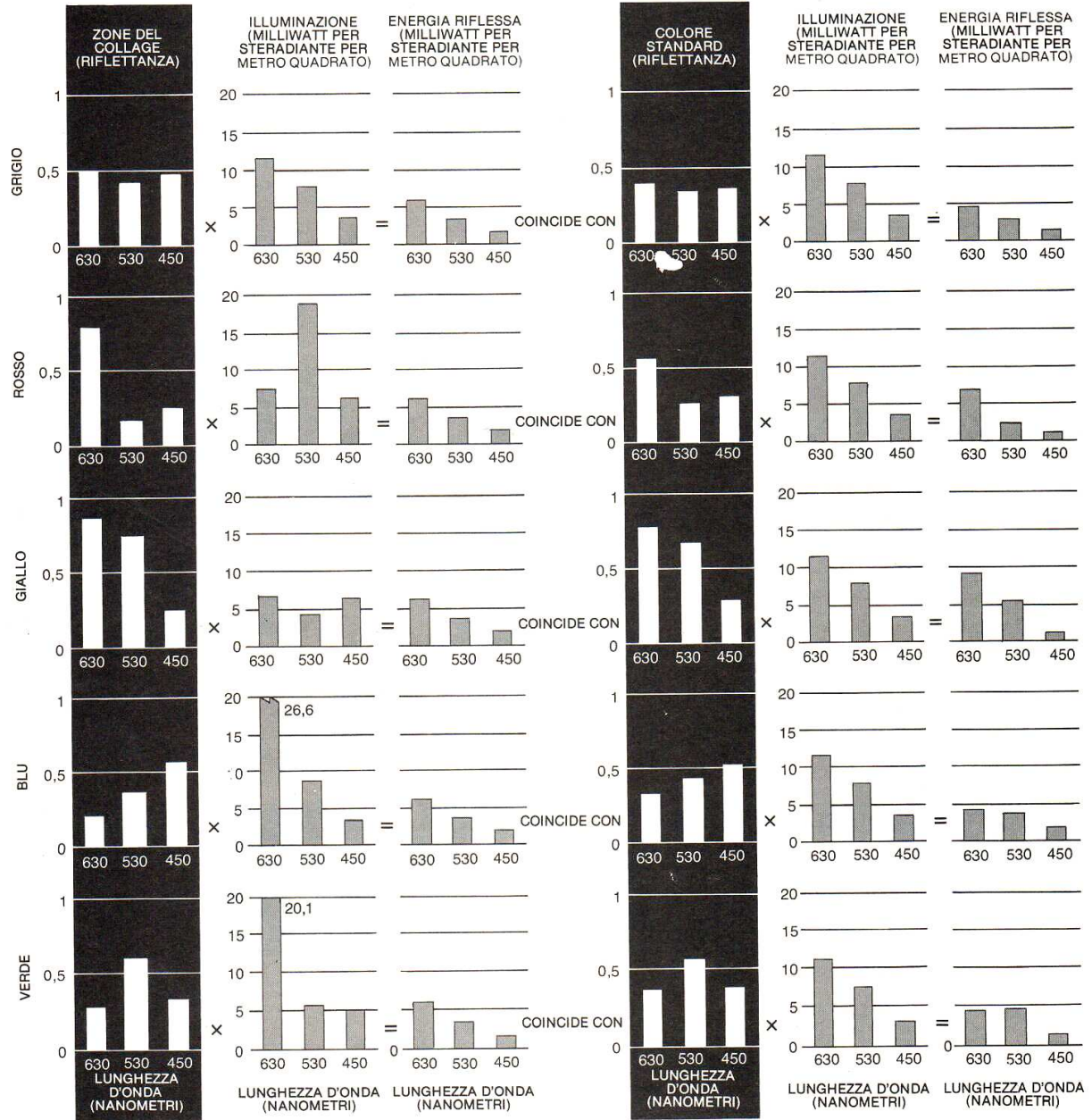
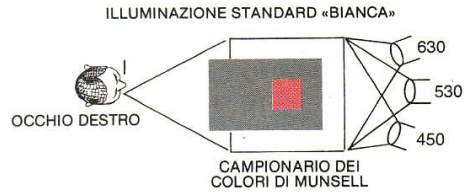
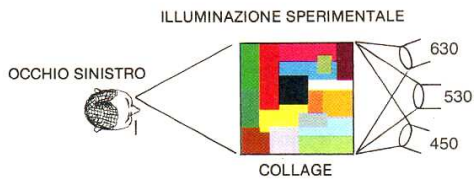
Le regolazioni dei proiettori a banda spettrale stretta usati per illuminare il collage semplificato negli esperimenti di confronto con il campionario dei colori di Munsell, indicate dalle barre in alto, sono state scelte in modo che cinque diverse zone del collage (segnalate dalle frecce) riflettessero, nelle cinque fasi successive dell'esperimento, le

medesime triplette di energie: 5,8 unità di flusso per la radiazione di grande lunghezza d'onda, 3,2 per quella di media lunghezza d'onda e 1,6 per quella di piccola lunghezza d'onda. La figura in basso mostra i colori standard scelti sotto l'illuminazione costante come identici alle cinque zone del collage che avevano riflesso la stessa tripletta di energie.



Sono riprodotti gli standard di Munsell scelti come identici alle zone del collage che avevano riflesso le medesime triplette di energia. Gli standard erano illuminati con una miscela costante di strette bande spettrali (barre in alto) e osservati su uno sfondo

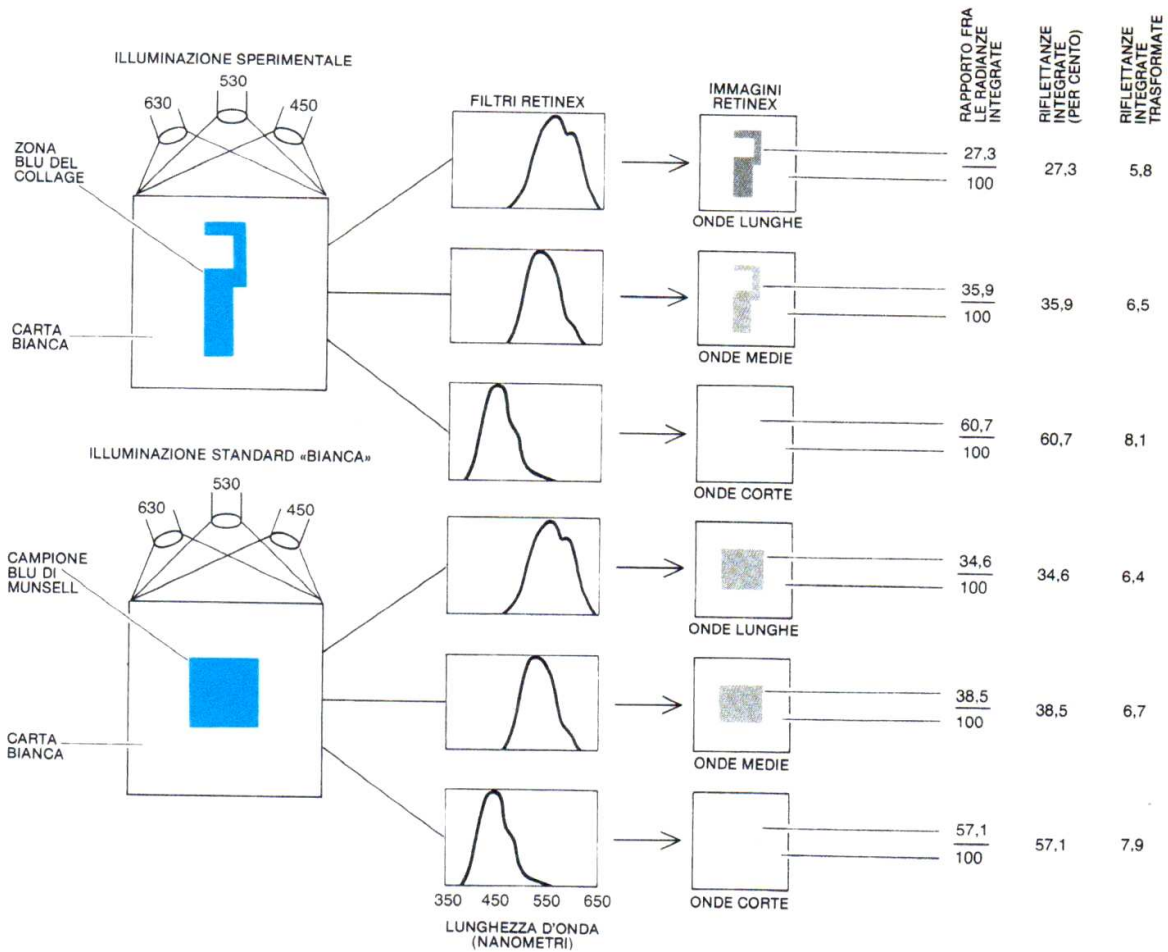
grigio pure costante. L'energia riflessa dagli standard è indicata dalle barre in basso. La sensazione di identità degli standard e dei colori del collage non è dovuta all'identità del flusso di energia riflessa ma ai processi descritti nell'illustrazione successiva.



L'analisi degli esperimenti di confronto dei colori fornisce i primi indizi su che cosa consenta l'identificazione dei colori indipendentemente dai flussi di energia riflessi dalle zone del collage e dai corrispondenti colori standard. L'efficacia con cui una data zona del collage riflette la luce in ognuna delle tre bande spettrali (prima colonna) moltiplicata per l'energia incidente nelle rispettive bande (seconda colonna) fornisce la tripletta di energie che giunge all'occhio (terza colonna). Le tre

colonne a destra contengono gli stessi dati per i colori standard scelti dagli osservatori come identici alle zone del collage. Mentre l'illustrazione in basso nella pagina precedente mostra come l'occhio non confronti i colori in base ai valori assoluti delle triplette di energia che giungono all'occhio, questa figura mostra che l'identificazione della corrispondenza avviene quando corrispondono le riflettanze delle due superfici, indicate nella prima e nella quarta colonna.





Il ruolo sostenuto dalla riflettanza e dalla corrispondente grandezza psicofisica, la luminosità, nel corso degli esperimenti di confronto dei colori è stato studiato mediante combinazioni di fotomoltiplicatori e filtri retinex aventi le medesime sensibilità spettrali dei pigmenti dei coni. Per ciascuna combinazione di fasci di luce (*in alto*) si è confrontata la radianza integrata in ognuna delle bande spettrali dei filtri con la corrispondente radianza integrata di un foglio bianco. Il rapporto fra

le radianze integrate fornisce la riflettanza integrata di ognuna delle zone del collage, qui espressa in forma percentuale. Per il colore standard ritenuto identico si è determinata in maniera analoga una corrispondente serie di rapporti (*in basso*). Il passaggio finale nella determinazione di un equivalente fisico della luminosità è la determinazione della relazione fra le differenze di riflettanza integrata e di luminosità. Questa trasformazione è illustrata nella pagina seguente.

Questa tecnica fotografica, che fa uso di emulsioni d'argento, ha due funzioni. Innanzitutto provvede sensibilità spettrali identiche a quelle dei pigmenti dei fotorecettori; inoltre fornisce immagini da far esaminare a osservatori umani. È il sistema visivo umano che traduce questa immagine fotografica in un insieme di luminosità. Sarebbe interessante poter esaminare l'immagine in bianco e nero con un solo sistema di coni, osservando quindi le luminosità tipiche per quel sistema. Invece in ogni punto dell'immagine la riflessione è praticamente la stessa per tutto lo spettro visibile. Ne segue che con una fotografia in bianco e nero noi stimoliamo tutti i recettori con la medesima informazione, cioè con le energie che verrebbero assorbite da uno solo dei

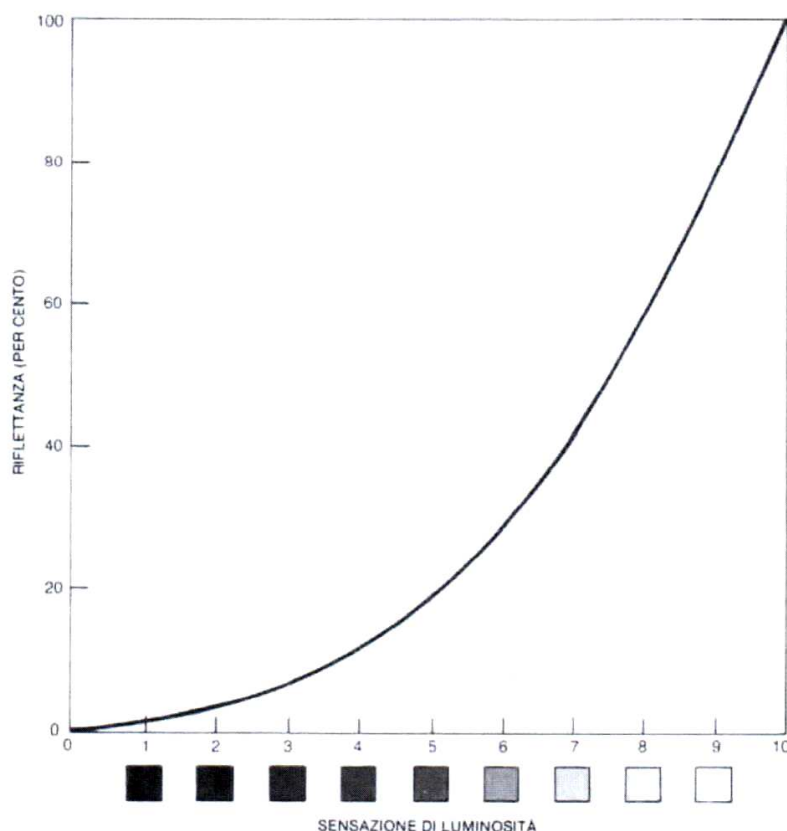
pigmenti. Se ipotizziamo che tutti i sistemi retinex elaborino le informazioni nel medesimo modo, l'inviare un'informazione identica a più sistemi di recettori è lo stesso che inviarla a uno solo, cosa che ci consente di vedere come risulterebbe l'immagine se fosse possibile isolare un sistema di recettori.

A pagina 53 il lettore può vedere tre immagini in bianco e nero riprese attraverso filtri retinex che simulano la risposta spettrale dei pigmenti dei tre sistemi di coni. Le fragole e i ravanelli, per esempio, sono chiari nella ripresa a grandi lunghezze d'onda, più scuri in quella a lunghezze d'onda intermedie e più scuri ancora in quella a lunghezze minori. Benché l'arancia e il limone risultino altrettanto scuri delle fragole e dei ravanelli

nell'immagine ripresa nella banda di lunghezze d'onda minori, presentano praticamente la medesima luminosità nelle altre due riprese. Sulla pagina stampata queste differenze sono assai piccole, eppure sono sufficienti all'occhio che vede una scena a colori per ottenere tutte le informazioni necessarie a distinguere innumerevoli sfumature di tutti i colori.

Quando le tre luminosità di una superficie sono state determinate da tre sistemi retinex, non sono necessarie altre informazioni per definire il colore di qualsiasi oggetto che sia presente nel campo visivo. Ogni specifico colore è così definito da una terna di determinate luminosità. A ogni terna di luminosità, inversamente, corrisponde un solo e ben determinato colore.





La sensazione di luminosità è riportata in ascissa in scala lineare. Agli osservatori vengono mostrati un foglio di carta bianca (9) e uno di carta nera (1) e viene loro chiesto di scegliere un grigio di luminosità esattamente intermedia, denominato 5. Allo stesso modo sono stati scelti i punti a mezzavia fra 1 e 5 e fra 5 e 9 e così via fino al completamento della scala. I punti estremi 0 e 10 sono determinati per estrapolazione. Infine si misurano le riflettanze integrate dei vari fogli di carta e si costruisce la curva che correla le riflettanze integrate nell'equivalente psicofisico.

Le limitazioni della fotografia a colori rendono impossibile mostrare ai lettori gli esperimenti compiuti nel nostro laboratorio, che dimostrano senza ombra di dubbio l'indipendenza del colore percepito dal flusso di radiazioni che giunge all'occhio. I lettori potrebbero vedere due tavole quadrate di circa 1,35 metri di lato, ricoperte in maniera identica con circa 100 pezzi di carta di varia forma e colore. Per minimizzare gli effetti della riflessione speculare i pezzi di carta hanno una superficie opaca e, fatta eccezione per quelli neri, riflettono almeno il 10 per cento della radiazione incidente in qualsiasi zona dello spettro. In questi collage, che chiamiamo «Mondrian» (per la somiglianza con i quadri del noto pittore olandese), i pezzi di carta sono sistemati in modo che ognuno di essi sia circondato da almeno cinque o sei altri di colore diverso (si veda la figura in alto a pagina 55).

Ognuno dei due collage è illuminato da tre diversi proiettori muniti di filtri a banda passante molto stretta (non filtri retinex): le bande sono centrate sulle lunghezze d'onda di 670, 540 e 450 nanometri. Il flusso di luce di ognuno dei proiet-

tori viene regolato da un trasformatore variabile e la durata dell'illuminazione è controllata con otturatori elettromagnetici sincronizzati. Infine v'è un fotometro a piccolo angolo di campo che può venire diretto su un punto qualsiasi dei due collage per misurare la radiazione riflessa e quindi il flusso che giunge all'occhio dell'osservatore. La lettura del fotometro viene proiettata su una scala posta sopra ai collage, dove può essere vista da chi partecipa all'esperimento.

Questo inizia illuminando il collage di sinistra, mentre quello di destra rimane al buio. I trasformatori variabili vengono posizionati in modo che tutti i pezzi del collage appaiano intensamente colorati, pur rimanendo ben bianchi quelli di tale colore. Questa sistemazione iniziale non è critica. Successivamente, accendendo un proiettore alla volta, si misura con il fotometro l'energia che raggiunge l'occhio da un pezzo di carta, per esempio un rettangolo bianco. Le letture della superficie bianca (in milliwatt per steradiante per metro quadrato) sono 65 unità per la luce di grande lunghezza d'onda, 30 per quella a lunghezza d'onda intermedia e 5 per quella di piccola lun-

ghezza d'onda. Si sono stabilite in questo modo le energie associate con quella particolare sensazione di bianco.

Si spengono ora i tre proiettori che illuminano il collage di sinistra e si illumina quello a destra col solo proiettore a grande lunghezza d'onda, aggiustando il trasformatore variabile in modo che da un determinato pezzo di carta di colore qualsiasi giunga all'occhio un'energia uguale a quella che appena prima giungeva dal rettangolo bianco del collage di sinistra, 65 unità. Spegnamo il proiettore e aggiustiamo separatamente gli altri due, uno dopo l'altro, in modo che anche con questi l'energia riflessa da quel pezzo di carta sia la stessa che prima proveniva dal rettangolo bianco del collage di sinistra. Non abbiamo ancora acceso contemporaneamente i tre proiettori, ma sappiamo che quando lo faremo la tripletta di energie che verrà riflessa dalla superficie, di colore ancora sconosciuto, scelta sul secondo collage sarà identica a quella che, sul primo collage, forniva una sensazione di bianco.

Quando accendiamo tutti e tre i proiettori scopriamo invece, per esempio, che il pezzo del collage di destra scelto per l'esperimento è verde. Illuminiamo anche il collage di sinistra con i proiettori regolati come in precedenza, in modo da consentire la visione contemporanea dei due collage. Il rettangolo bianco a sinistra continua a essere bianco, mentre la carta verde a destra continua a essere verde. Eppure entrambe le superfici riflettono verso l'osservatore la medesima tripletta di energie: 65, 30 e 5 nelle unità da noi scelte.

Ora spegnamo tutti i riflettori, scegliamo qualche altro pezzo del collage di sinistra e aggiustiamo i proiettori in modo che anche questo rifletta la medesima tripletta di energie che ha dato origine alla sensazione di bianco sul collage di sinistra e di verde su quello di destra. Riaccendendo contemporaneamente i tre proiettori che illuminano il collage di sinistra scopriamo, per esempio, che il nuovo pezzo di carta è giallo e, ancora una volta, possiamo vedere contemporaneamente le superfici gialla e verde, la prima a sinistra e la seconda a destra.

È possibile continuare l'esperimento scegliendo altre zone dei due collage, di colore blu, grigio, rosso e così via. Il risultato dimostra che la sensazione del colore non è affatto correlata al prodotto del coefficiente di riflessione per l'illuminazione, cioè all'energia riflessa, per quanto questa informazione sembra essere la sola che giunge all'osservatore dalle varie zone dei collage.

Per dimostrare che negli esperimenti appena descritti la sensazione del colore non dipende da un estensivo adattamento cromatico dei pigmenti della retina, i proiettori sono muniti di otturatori sincronizzati, in modo da consentire la visione dei collage solo per un tempo molto breve, un decimo di secondo o meno. I risultati dell'esperimento non cambiano, qualunque sia la durata dell'osservazione. È quindi possibile dire che né



l'adattamento cromatico né i movimenti degli occhi sono coinvolti nei fenomeni che producono la sensazione del colore. Infine il disegno dei collage minimizza l'importanza della forma e delle dimensioni delle superfici circostanti, della familiarità degli oggetti e della memoria dei colori. Di quando in quando v'è qualche tentativo casuale di spiegare i risultati degli esperimenti descritti in base a quella che viene detta costanza dei colori. È chiaro che parlare di costanza dei colori è solo un modo conciso per designare quella notevole abilità dell'occhio che costituisce l'argomento del presente articolo.

La cosa misteriosa è come tutti possiamo accordarci con precisione nella definizione dei colori che vediamo quando non esiste alcuna grandezza fisica apparente che ci consenta di specificare il colore di un oggetto. In effetti si può dire che lo stimolo che produce la sensazione di colore di una superficie non è la radiazione riflessa da questa. È compito della psicofisica trovare lo stimolo che produce la sensazione di colore.

Ricordiamo che ciò che l'occhio fa, senza mai sbagliare, è scoprire l'entità della luminosità, indipendentemente dal flusso. Abbiamo visto che questo è vero per un solo sistema di recettori, i bastoncelli, quando opera singolarmente, e per i tre sistemi di coni quando operano collettivamente nell'osservazione di superfici bianche, grigie e nere. Illuminiamo ora i collage colorati con la luce proveniente da uno solo dei proiettori, per esempio quello che fornisce una banda di radiazioni di grande lunghezza d'onda, e osserviamo cosa succede quando si aumenta e diminuisce di molto l'illuminazione. Si osserva che le varie zone del collage mantengono una scala di luminosità costante. Ma se cambiamo il proiettore e usiamo, per esempio, quello con filtro a banda passante intermedia, la luminosità di molti dei pezzi di carta cambia: molti fra i circa cento pezzi di carta vengono a occupare un posto diverso nella scala delle luminosità. Usando il terzo proiettore si troverà una terza successione di luminosità. In particolare, una superficie rossa verrà vista chiara con luce a grande lunghezza d'onda, più scura in luce a media lunghezza d'onda e molto scura in quella a corta lunghezza d'onda. D'altro canto una superficie blu apparirà chiara in luce a corta lunghezza d'onda e molto scura in luce a media e grande lunghezza d'onda. Superfici di altro colore mostreranno altre triplette di luminosità. Quando abbiamo fatto esperimenti di questo tipo, quasi vent'anni fa, siamo stati portati inevitabilmente a concludere che le triplette di luminosità forniscono quello stimolo costante e indipendente dal flusso di cui abbiamo bisogno per provare la sensazione del colore.

È evidente che le luminosità di un certo pezzo di carta colorata illuminato con sorgenti in tre diverse bande dello spettro sono correlate con la quantità di energia che esso riflette alle diverse lun-

ghezze d'onda. Vediamo ora, con un esperimento particolare, come sia possibile correlare tali riflessioni con le luminosità percepite e come, nel corso di questo processo, il flusso di energia che raggiunge l'occhio diventi irrilevante per la percezione del colore.

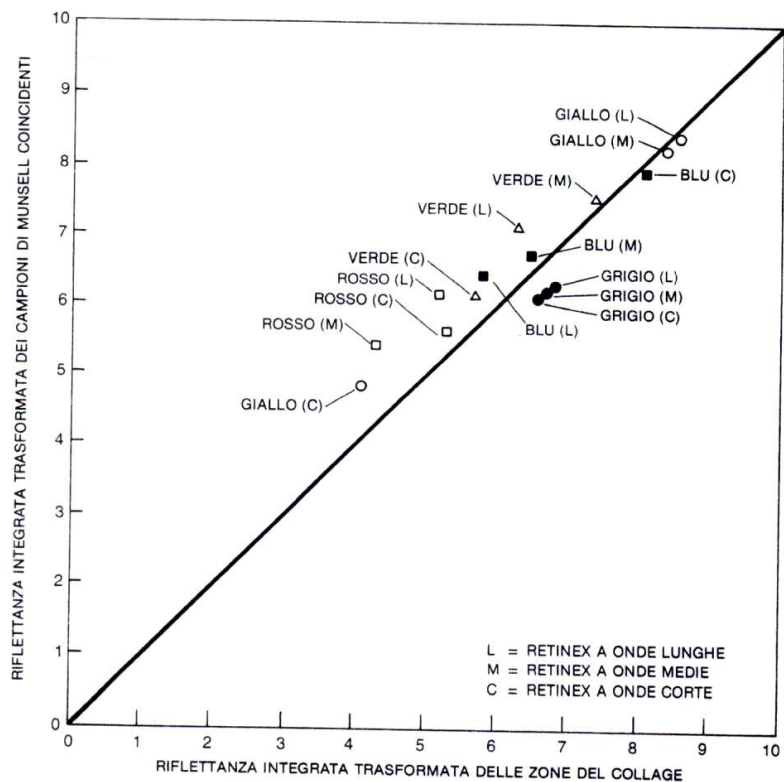
Nel nostro laboratorio McCann, Suzanne P. McKee e Thomas H. Taylor hanno condotto uno studio sistematico delle risposte degli osservatori di un collage semplificato, con superfici di 17 colori diversi. Essi chiedevano agli osservatori di confrontare le 17 superfici, una alla volta, e sotto illuminazioni diverse, con degli standard quadrati di carta colorata scelti da un campionario di colori, il *Munsell Book of Color*, che venivano invece osservati sotto un'illuminazione «bianca» costante.

Le sorgenti che illuminavano il collage venivano aggiustate in cinque esperimenti diversi in modo che cinque differenti pezzi del collage (di colore grigio, rosso, giallo, blu e verde) riflettessero la medesima tripla di flussi di radiazione. Lo

osservatore cominciava col scegliere nella serie di standard i colori che gli parevano uguali a quelli dei 17 pezzi del collage quando il pezzo grigio rifletteva una particolare tripla di energie. Successivamente una seconda serie di colori standard veniva selezionata sotto un'illuminazione tale per cui un pezzo rosso del collage rifletteva la medesima tripla di energie prima riflessa dal pezzo grigio. L'operazione veniva poi ripetuta con il collage illuminato in modo da far riflettere sempre la stessa tripla ai pezzi di carta giallo, blu e verde.

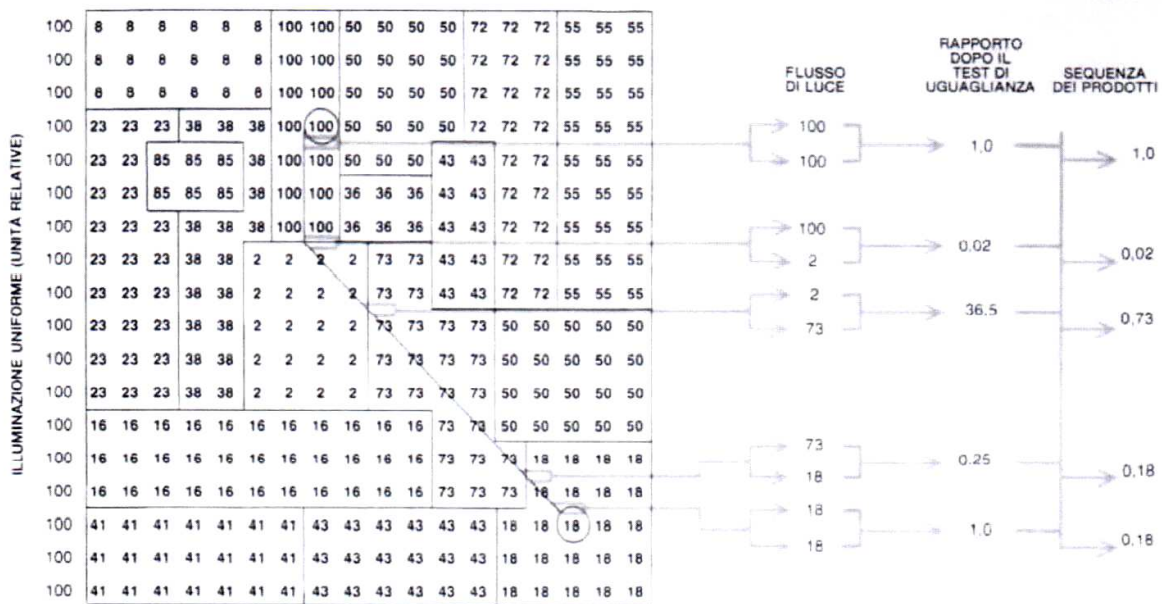
Le figure a pagina 57 mostrano i dettagli dell'esperimento e i cinque diversi colori standard di Munsell che gli osservatori hanno selezionato come uguali a quelli delle cinque superfici studiate quando ognuna di esse rifletteva esattamente la medesima tripla di energie. Malgrado le energie riflesse dal collage che raggiungevano uno degli occhi fossero sempre le stesse, tutti gli osservatori, usando il secondo occhio, sceglievano colori standard grigi, rossi, gialli, blu e verdi.

L'illuminazione costante usata per la



L'accordo fra le riflettanze integrate trasformate delle zone del collage e dei colori standard scelti come identici è riassunto in questa figura per tutte e tre le bande spettrali. Le riflettanze integrate trasformate delle cinque zone del collage e degli identici colori standard sono state determinate come descritto nella figura di pagina 59. Qui le triplette delle riflettanze integrate trasformate delle zone usate per riflettere identiche triplette di energia sono riportate in funzione di quelle a fronte dei colori standard scelti come identici. I punti nel loro insieme rappresentano la corrispondenza per le tre bande spettrali, ma ognuno di essi rappresenta la correlazione fra un colore del collage e il corrispondente standard in una banda spettrale. La linearità della correlazione dimostra che la riflettanza integrata trasformata è il corrispondente fisico della sensazione di «luminosità» e mostra la precisione con cui una tripla di luminosità determina il colore.





Rimane da stabilire il metodo seguito dall'occhio per definire la luminosità nelle immagini complesse. In questa figura e in quella della pagina a fronte è descritto un metodo efficace e fisiologicamente possibile. I numeri entro lo schema del collage rappresentano le radianze integrate nella banda a grande lunghezza d'onda riflesse da ognuna delle zone quando l'insieme viene illuminato uniformemente. Il sistema retinex sensibile alle grandi lunghezze d'onda «misura» indipendentemente le radianze integrate in tale banda, punto per punto lungo un percorso arbitrario (in colore). I valori dei flussi in ogni coppia di punti adiacenti vengono convertiti in rapporto. Questi rapporti vengono sottoposti a una verifica di uguaglianza: si assume che esista una variazione quando un rapporto differisce da quello immediatamente precedente di più di un valore soglia (che nei nostri calcoli è stato assunto 0,003). Se il rapporto non si scosta dall'unità entro tali limiti, esso viene ritenuto invariato e posto uguale a uno. Quando lungo il cammino il rapporto si scosta dall'unità, esso viene moltiplicato per quello precedente. Questo prodotto è contemporaneamente la risposta del sistema per quella variazione di riflettanza integrata e il segnale da trasmettere

perché venga moltiplicato con il prossimo rapporto diverso da uno. Quando il cammino attraversa una linea di separazione fra zone di diversa luminosità, si ha un brusco cambiamento del rapporto fra radianze integrate e quindi anche nella sequenza dei prodotti. Qui il cammino inizia nella zona bianca, dove il flusso di energia raggianti è 100. Appena si giunge alla zona marrone in basso a destra il prodotto diviene 0,18. Il sistema retinex ha quindi determinato che l'area marrone riflette solo il 18 per cento delle radiazioni di grande lunghezza d'onda rispetto alla zona bianca. Qualsiasi altro cammino che terminasse nella zona marrone attraversando in qualche momento quella bianca avrebbe dato il medesimo risultato. Mediando le risposte per le varie superfici ottenute seguendo diversi cammini arbitrari, il sistema retinex sensibile alle grandi lunghezze d'onda giunge a stabilire per ogni zona di colore un unico valore di riflettanza, che definisce la luminosità percepita. Contemporaneamente pure i sistemi retinex sensibili a lunghezze d'onda corte e a lunghezze d'onda intermedie stabiliscono i loro valori di luminosità. Il confronto delle triplette di luminosità per ogni superficie fornisce la sensazione del colore.

osservazione degli standard di Munsell era costituita da una tripletta di sorgenti in tre bande dello spettro aggiustata in modo che gli osservatori stessi avevano giudicato produrre il «miglior bianco». Il flusso di energia riflesso dal campione più bianco fra gli standard di Munsell era costituito da 11,5 unità a grande lunghezza d'onda, 7,8 a lunghezza d'onda intermedia e 3,3 a piccola lunghezza d'onda. Le sorgenti fornivano bande spettrali strette centrate a 630, 530 e 450 nanometri. Il collage veniva illuminato da tre sorgenti identiche, con le radiazioni mescolate in proporzioni variabili.

A questo punto ci si potrebbe porre una domanda: una superficie grigia non potrebbe mostrare una marcata variazione di colore quando i pezzi di carta circostanti riflettono luci di composizione spettrale molto diversa? E simili cambiamenti di colore non potrebbero render conto dei risultati degli esperimenti con i collage? La risposta è che nessuna manipolazione dei pezzi di carta circostanti riesce a far coincidere il foglio grigio con gli standard di Munsell rosso,

giallo, blu e verde scelti dagli osservatori negli esperimenti con il collage.

McCann, John A. Hall e io abbiamo ulteriormente approfondito la questione ripetendo l'esperimento di confronto del collage con gli standard di Munsell in varie condizioni, in modo che la composizione spettrale media della luce riflessa dal collage e dai suoi dintorni fosse la stessa, qualunque fosse la composizione spettrale necessaria per ottenere la riflessione di una tripletta costante da varie zone di esso. Questo è stato ottenuto in un caso circondando il collage con i pezzi di carta vivacemente colorati e scelti in modo che compensassero esattamente la composizione spettrale media della luce riflessa dal collage. In un'altra condizione sono stati tagliati i 17 pezzi di carta che costituivano il collage, disponendoli poi ben distanziati su sfondi di colore contrastante. Nessuna delle due disposizioni modifica in maniera significativa la scelta dei colori standard identici a quelli delle varie zone del collage.

Torniamo allora a cercare lo stimolo che ci guida in maniera tanto accu-

rata alla giusta identificazione dei colori. Se non si tratta di un flusso di energia raggianti che giunge all'occhio dai vari punti del campo visivo, quali sono i corrispettivi fisici delle luminosità degli oggetti in tre diverse bande dello spettro, corrispondenti alle sensibilità spettrali dei pigmenti dei coni? Può venire messo in evidenza un tale corrispettivo fisico della sensazione di luminosità?

McCann, McKee e Taylor proseguirono il lavoro misurando la radianza, cioè l'energia riflessa verso l'osservatore, delle varie zone del collage e degli standard di colore utilizzando un fotomoltiplicatore equipaggiato con filtri retinex. Dato che il complesso fotomoltiplicatore-filtro retinex integra il flusso di energia raggianti in una ampia banda di lunghezze d'onda, lo strumento fornisce un valore di radianza che chiameremo radianza integrata. McCann e i suoi colleghi hanno quindi ottenuto le radianze integrate di un grosso foglio di carta bianca illuminato con le combinazioni di luci usate per illuminare il collage nei vari esperimenti di confronto. Se faccia-



mo il rapporto fra la radianza integrata di una zona del collage e quella misurata sulla carta bianca, si ottiene un valore di riflettanza integrata, esprimibile in forma percentuale.

Le riflettanze integrate dei vari colori standard di Munsell sono state poi determinate nello stesso modo, sotto l'illuminazione «bianca» costante. È stata cioè misurata la riflettanza percentuale impiegando detettori aventi la medesima sensibilità spettrale dei pigmenti visivi. I risultati mostrano che i colori standard scelti come identici a quelli delle varie zone del collage possiedono approssimativamente le medesime riflettanze integrate percentuali delle zone suddette. La zona blu del collage, per esempio, possiede una tripletta di riflettanze integrate nelle bande a lunga, media e corta lunghezza d'onda pari a 27,3, 35,9 e 60,7 per cento. I corrispettivi valori dello standard Munsell sono 34,6, 38,5 e 57,1 per cento (si veda l'illustrazione a pagina 59).

Infine le riflettanze integrate possono venire disposte in successione in modo che una loro spaziatura uniforme corrisponda a una sensazione di uguale differenziazione delle luminosità. La curva che descrive la legge di questa trasformazione è mostrata nell'illustrazione alla pagina precedente. Utilizzando tale curva si osserva che la zona blu del collage ha una tripletta di riflettanze integrate trasformate di 5,8, 6,5 e 8,1, mentre il corrispondente colore standard possiede i valori 6,4, 6,7 e 7,9. Se consideriamo le cinque zone del collage che hanno inviato all'osservatore identiche triplette di

energia e confrontiamo le loro riflettanze integrate trasformate con quelle dei corrispondenti standard di Munsell, troviamo che tutti i valori sono in ottimo accordo. In altre parole abbiamo trovato nelle triplette di riflettanze integrate un accurato corrispettivo fisico della sensazione di colore. I dati cadono lungo la retta che definisce la correlazione perfetta, che è la bisettrice degli assi (si veda l'illustrazione a pagina 61).

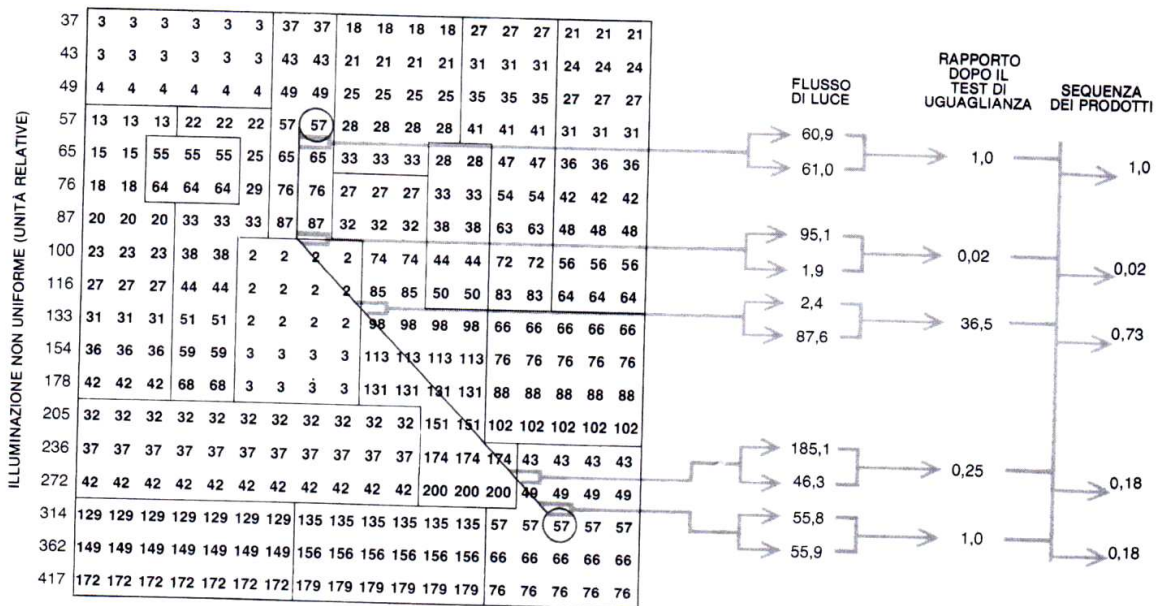
Abbiamo cercato un corrispettivo fisico della sensazione di luminosità e abbiamo trovato che le riflettanze integrate trasformate delle cinque zone di colore che hanno riflesso uguali triplette di energie sono le stesse di quelle dei colori standard uguali alle zone suddette. Questa correlazione ci consente di utilizzare le riflettanze integrate trasformate come una misura indiretta della luminosità. Il problema ora diviene quello di trovare come fa l'occhio a determinare la luminosità che corrisponde alle riflettanze degli oggetti nelle varie bande dello spettro.

Una cosa è misurare la tripletta di equivalenti di luminosità impiegando un fotomoltiplicatore accoppiato a un filtro retinex, e una cosa ben diversa è, per l'occhio, determinare la luminosità in un mondo illuminato in maniera non uniforme e privo di pezzi di carta bianca da confrontare. È stata descritta in precedenza la capacità di un sistema isolato di recettori - quello ipersensibile dei bastoncelli - di classificare correttamente gli oggetti in funzione del loro potere intrinseco di riflessione, indipendentemente dal fatto che si trovino in zone poco o molto

illuminate del campo visivo. Il fatto che un sistema fotorecettore abbia una simile capacità rende plausibile l'ipotesi che anche gli altri tre sistemi, destinati alla visione diurna, la possiedono. Dato che questi tre sistemi vedono il mondo in tre ampie, ma comunque delimitate zone dello spettro (che sono quelle utilizzate nei filtri retinex), ognuno di essi forma un'immagine di luminosità distinta dalle altre. Queste immagini non vengono mescolate, bensì confrontate. È appunto il confronto delle tre luminosità di una determinata superficie che fornisce la sensazione del colore.

Come fa un sistema biologico a costruire una gerarchia e una distribuzione spaziale di luminosità in una scena sapere nulla né sul tipo di illuminazione né sui poteri riflettenti dei vari oggetti? Il meccanismo che descriverò ora è il più generale da noi trovato in grado di sormontare tali difficoltà.

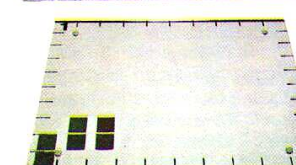
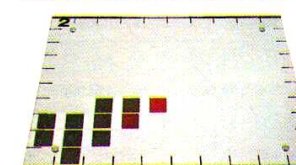
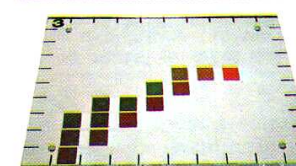
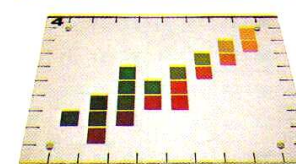
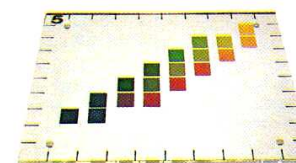
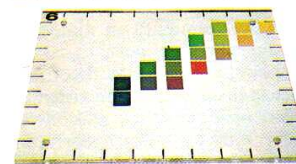
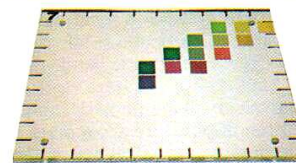
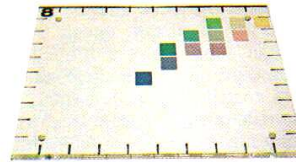
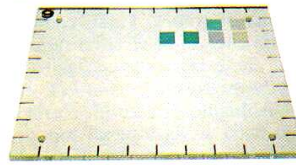
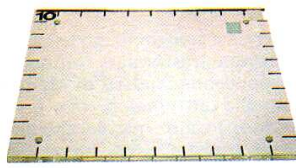
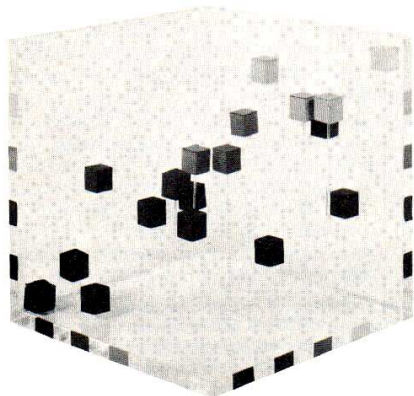
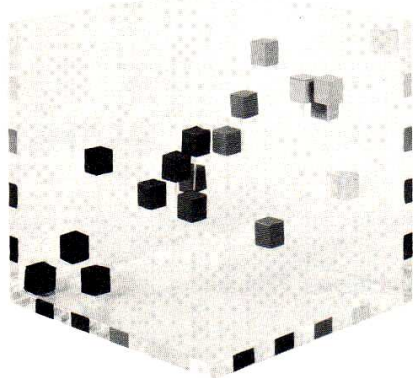
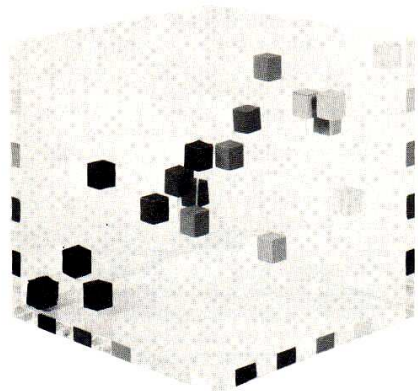
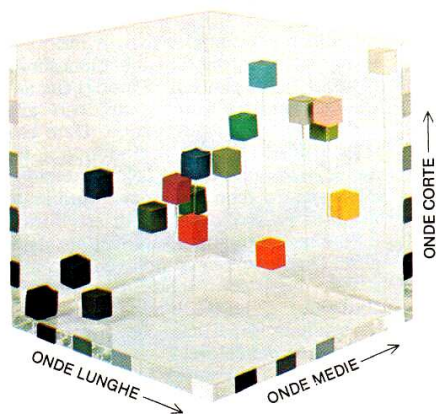
Vorrei segnalare innanzitutto l'importanza dei margini nella definizione degli oggetti e delle superfici presenti in una scena. Se illuminiamo un foglio di carta bianca con una sorgente posta di lato, non si osserva alcuna discontinuità di colore. Immaginiamo ora di misurare la luminanza del foglio con due detettori puntati verso punti diversi del foglio. Se l'illuminazione non è uniforme le luminanze dei due punti risulteranno ovviamente diverse, ma avvicinando i detettori i valori di luminanza tenderanno ad avvicinarsi e il loro rapporto si approssimerà all'unità. Se però i due detettori si trovano da parti opposte rispetto al con-



Una situazione più realistica di quella della figura della pagina precedente con illuminazione non uniforme, viene risolta altrettanto bene col metodo dei prodotti in sequenza. Si giunge infatti al valore 0,18 per la zona marrone al termine del cammino anche se in questo caso il sistema retinex sensibile alle lunghezze d'onda maggiori riceve un flusso identico

(57) dal centro della zona marrone e dal centro di quella bianca. Il metodo consente quindi di giungere al calcolo di una riflettanza che non dipende dal flusso di energia. I valori esatti dei flussi di luce lungo il cammino sono stati ottenuti con un programma di calcolo per elaboratore che interpola altri 75 valori fra due adiacenti stampati su questo schema.





fine fra due aree che differiscono bruscamente in riflettività, come nel caso, per esempio, di una superficie grigia posta sopra quella bianca, il rapporto fra i segnali in uscita dei due detettori si avvicinerà al rapporto fra le due riflettanze. Pertanto il semplice procedimento di fare il rapporto fra le luminanze di due punti adiacenti consente contemporaneamente di scoprire il confine fra due zone di diverso colore e di eliminare l'effetto di un'illuminazione non uniforme. Se la intera immagine viene elaborata in termini di rapporti di luminanza fra punti vicini, si ottiene una serie di numeri adimensionali che risultano indipendenti dall'illuminazione effettiva, e che forniscono il rapporto fra le riflettanze al confine fra superfici diverse; i valori delle riflettanze sono però ancora indeterminati.

Per determinare le riflettanze occorre correlare questi rapporti fra riflettanze in tutto il campo visivo. Dato il rapporto fra le luminanze ai margini di due superfici, che chiamiamo 1 e 2, possiamo moltiplicarlo per il rapporto delle luminanze al margine fra la seconda e una terza. Questo prodotto di rapporti approssima il rapporto fra le riflettanze della prima e della terza superficie, qualunque sia la distribuzione dell'illuminazione. Analogamente possiamo ottenere il rapporto fra le riflettanze di due superfici qualsiasi entro il campo visivo, per quanto distinto fra di loro, moltiplicando i rapporti di riflettanza calcolati a tutti i confini fra la superficie di partenza e l'ultima. Possiamo anche stabilire il rapporto di riflettanza per qualsiasi zona troncando la sequenza dei prodotti (si vedano le illustrazioni alle pagine 62 e 63).

Il «solido» dei colori mostra la disposizione di tutti i colori percepiti, compresi il bianco e il nero, in uno spazio tridimensionale strutturato secondo la teoria della visione dei colori proposta dall'autore. La posizione di un colore in questo spazio non è definita da una tripletta di energie riflesse, bensì dalla tripletta di luminosità calcolata dall'occhio. La fotografia a colori in alto mostra la disposizione spaziale di alcuni colori rappresentativi. La direzione dell'aumento delle luminosità lungo i tre assi è segnata dalle frecce. Le tre fotografie in bianco e nero del solido dei colori sono state prese con combinazioni di filtri e pellicole retinex. Esse mostrano le luminosità dei colori come verrebbero percepite separatamente dai pigmenti visivi sensibili a lunghezze d'onda grandi (*in alto*), intermedie (*al centro*) e corte (*in basso*). Le dieci immagini a colori sulla destra rappresentano sezioni orizzontali del solido dei colori. Ogni piano è il luogo dei colori possibili con una luminosità costante nella banda delle lunghezze d'onda minori. Per esempio, il quinto piano dal basso mostra la varietà delle sensazioni di colore ottenibili con tutti i valori possibili di luminosità alle lunghezze d'onda medie e lunghe quando queste vengono combinate con un valore di luminosità 5 nella banda delle lunghezze d'onda inferiori. I quadrati colorati sono campioni presi dal *Munsell Book of Color*. In generale le zone vuote nei singoli piani indicano regioni in cui il colore potrebbe venire prodotto solo con pigmenti fluorescenti, ammesso che sia possibile.



**S**tiamo avvicinandoci alla risposta alla domanda fondamentale: come si riesce a determinare la riflettanza di una superficie senza porre vicino a questa uno standard di confronto? La sequenza di prodotti può venire utilizzata in modo da evitare di dover porre due superfici una vicina all'altra, fornendo quindi un equivalente di operazione fotometrica fattibile per l'occhio.

Rimane quindi da definire come l'occhio possa scoprire la superficie di maggior riflettanza entro un campo visivo e decidere se si tratti di un bianco o di un altro colore. Nel modello che abbiamo proposto le sequenze di prodotti vengono calcolate lungo svariati cammini arbitrari che si muovono attraverso la disposizione bidimensionale di energie sulla «retina» modello. Dato che questi cammini possono iniziare in un punto qualsiasi, e non proprio nel punto di maggior riflettanza, il primo valore di ogni sequenza viene assunto arbitrariamente come 100 per cento. Ne segue che la sequenza di prodotti diviene maggiore dell'unità ogni volta che il cammino attraversa una zona di riflettanza maggiore di quella del punto iniziale.

Il raggiungimento di un valore superiore all'unità nella sequenza di prodotti indica che la sequenza deve ricominciare da capo assumendo l'ultimo punto di maggior riflettanza come nuovo 100 per cento. Questo procedimento consente il reperimento della zona di maggior riflettanza lungo il cammino percorso dall'occhio. Una volta trovato questo punto tutti i prodotti calcolati successivamente diventano funzione di tale maggior riflettanza. È stato possibile programmare in maniera soddisfacente un calcolatore per studiare il numero dei percorsi, le loro lunghezze e convoluzioni, i valori di soglia per il riconoscimento dei margini e, forse la cosa più importante, per studiare come utilizzare tutti i percorsi che si originano nei diversi punti del campo visivo.

Il sistema biologico utilizza un programma di questo genere in qualche parte non ben definita del percorso fra la retina e la corteccia cerebrale. Il processo corrispondente al calcolo delle successioni di prodotti non implica la valutazione di valori medi né di superfici né di flussi di energia. Richiede comunque l'esecuzione di operazioni aritmetiche su tutto il campo visivo. Inoltre, dato che ciò che interessa viene visto per un tempo molto breve, tutti i calcoli e le conclusioni relative ai rapporti di luminosità devono venir effettuati in frazioni di secondo e in maniera indipendente dai movimenti dell'occhio. Con un singolo impulso di luce, il movimento dell'occhio, per definizione, non è necessario. Con un'illuminazione continua, i normali movimenti rapidi dell'occhio servono probabilmente per effettuare l'aggiornamento dei calcoli.

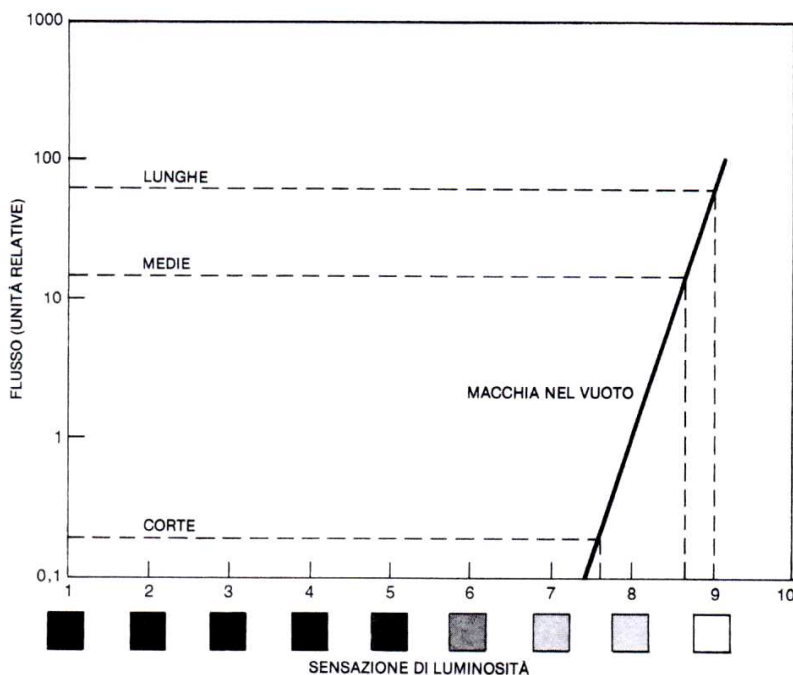
Con un calcolatore programmato secondo il nostro modello possiamo ottenere, per ogni zona del collage a colori, triplette di luminosità che corrispondono

ottimamente alle luminosità che si potrebbero misurare con un fotomoltiplicatore posto dietro un filtro retinex. Il colore corrispondente a ogni tripletta può essere visualizzato con l'aiuto del «solido dei colori» che abbiamo realizzato, nel quale i colori di Munsell sono disposti lungo le tre dimensioni dello spazio in funzione delle luminosità misurate in tre bande dello spettro con filtri retinex (si veda la figura nella pagina a fronte).

Normalmente la sensazione di luce bianca verrà prodotta da qualsiasi superficie che venga posta al vertice della scala di luminosità da tutti e tre i sistemi retinex. D'altro canto una superficie che si trovi al vertice di solo due delle tre scale di luminosità verrà vista come un altro colore. Pertanto una superficie che si trovi al vertice delle scale di luminosità dei sistemi recettori per grandi e medie lunghezze d'onda ma sia meno luminosa di altre superfici per il sistema sensibile alle piccole lunghezze d'onda non verrà vista bianca bensì gialla. Un simile confronto di triplette di luminosità dei vari punti di una medesima scena procura la sensazione di colore, zona per zona, malgrado l'esistenza di imprevedibili variazioni dell'illuminazione.

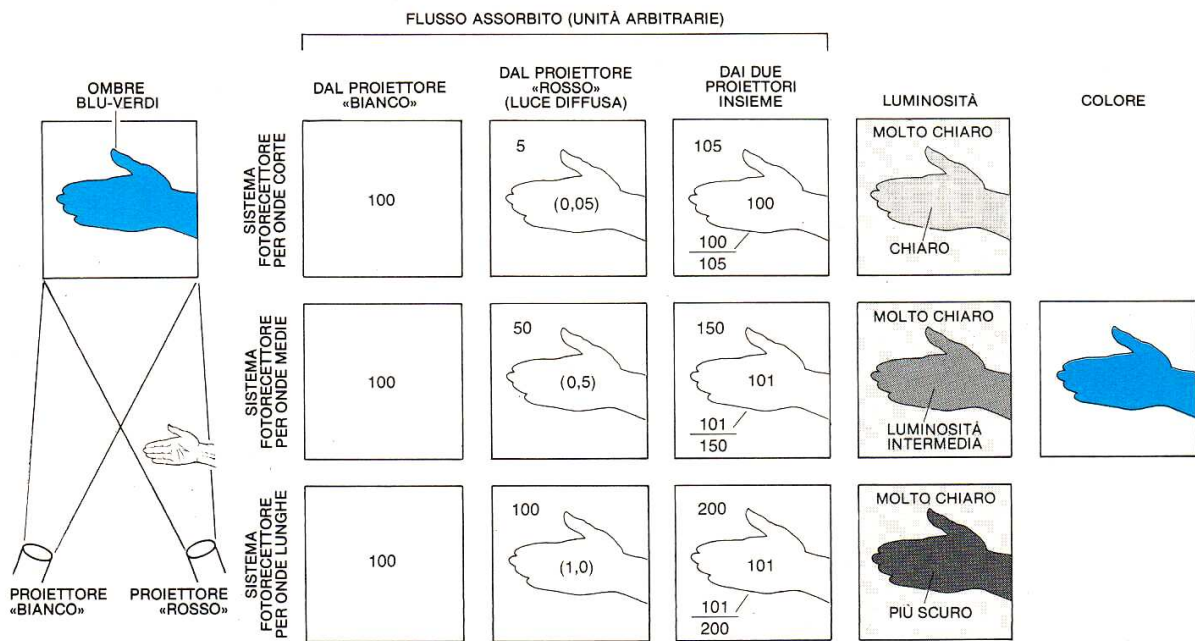
Osservando le fotografie in bianco e nero prese attraverso filtri retinex si nota una grossa differenza fra le luminosità della maggior parte degli oggetti nelle immagini che rappresentano il sistema a piccola lunghezza d'onda e in quelle che rappresentano gli altri due sistemi. Eppure sono proprio le piccole differenze di luminosità registrate dai sistemi sensibili alle medie e grandi lunghezze d'onda che sono responsabili della percezione dei verdi e rossi più vivaci.

Simili risposte, sensibili e accurate a piccole differenze di luminosità, stanno alla base della visione dei colori in condizioni di illuminazione anomale, molto lontane da quelle per cui si è evoluto l'occhio. Due esempi interessanti riguardano il colore di una macchia di luce in un ambiente completamente privo di luce e lo spettro di colori prodotto da un prisma. È facile misurare il flusso di luce che raggiunge l'occhio da un ambiente buio. Cambiando il flusso è possibile stimare il corrispondente cambiamento della luminosità percepita. Ebbene, si trova che la luminosità percepita cambia solo di poco in seguito a enormi variazioni del flusso. Per esempio, riducendo moltissimo il flusso si osserverà solo una



Una macchia di luce nel vuoto, cioè una singola macchia di luce in una banda ristretta dello spettro vista in un ambiente completamente buio, possiede un colore che sembrerebbe dipendere solo dalla sua lunghezza d'onda. Il suo colore, peraltro, può venire spiegato in termini delle luminosità percepite dai tre sistemi fotorecettori dell'occhio. Misure psicofisiche dimostrano che in queste condizioni la luminosità percepita cambia molto poco per grandi variazioni del flusso, come è indicato dalla linea retta. Per esempio, se la macchia è costituita da una banda ristretta centrata, diciamo, a 600 nanometri, i tre pigmenti dei coni assorbiranno flussi molto diversi, a causa della forma delle loro curve di assorbimento. In unità arbitrarie il pigmento sensibile a grandi lunghezze d'onda assorbirà 80 unità, quello sensibile a lunghezze d'onda intermedie 20 unità e il terzo pigmento al massimo qualche decimo di unità. I valori di luminosità corrispondenti a questi flussi sono 9 per le grandi lunghezze d'onda, 8,5 per quelle intermedie e 7,5 per quelle corte. Questa combinazione di luminosità viene percepita come una luce arancio-rossastra, non percepibile in condizioni ordinarie a meno che si abbia a che fare con colori fluorescenti.





Quando si interpone la mano o un altro oggetto fra un proiettore di luce a grande lunghezza d'onda («rossa») e uno schermo bianco illuminato con luce bianca si osserva un'ombra di colore bluverde (azzurro). L'autore considera la descrizione delle ombre colorate, prodotte dalla luce di candela, fatta da Otto von Guericke nel 1672 come la prima osservazione importante per la comprensione del meccanismo di percezione delle immagini e dei colori. Nell'analisi a destra si assume che un proiettore illumini lo schermo con luce bianca. L'altro proiettore, equipaggiato con un filtro rosso, illumina lo schermo solo con radiazioni di grande lunghezza d'onda. Assumiamo che la luce bianca fornisca 100 unità arbitrarie di flusso a ognuno dei tre sistemi di fotorecettori. Il flusso del secondo proiettore è assorbito in proporzioni differenti dai tre sistemi di fotorecettori: 100 unità sono assorbi-

te dal sistema sensibile alle grandi lunghezze d'onda, 50 da quello sensibile alle lunghezze intermedie e 5 dal terzo. (Una piccola quantità di radiazione di grande lunghezza d'onda compare per diffusione anche nell'ombra.) La terza colonna mostra le quantità complessive di flusso assorbite dai tre sistemi fotorecettori. Le frazioni rappresentano i rapporti ai margini dell'ombra fra il flusso proveniente da questa e il flusso proveniente dall'esterno. La quarta colonna mostra infine le luminosità percepite dai sistemi fotorecettori. La luminosità delle zone più luminose per ogni sistema si troverà vicina all'estremo più chiaro della scala di luminosità, essendo determinata dal flusso di energia raggiante allo stesso modo in cui il flusso determina la luminosità di una macchia di luce. Le triplette di luminosità all'interno dell'ombra cadono nella regione dello spazio dei colori che l'occhio percepisce come azzurro.

piccolissima riduzione di luminosità. Se la macchia di luce è costituita da una piccola banda spettrale di grande lunghezza d'onda, intorno, diciamo, a 600 nanometri, ci si può attendere che tutti e tre i sistemi di coni assorbano della radiazione, ma quelli sensibili alle grandi lunghezze d'onda ne assorbiranno parecchia di più. Leggendo i tre valori su una scala delle luminosità percepite, le tre luminosità risultano 9 per il sistema sensibile a grandi lunghezze d'onda, 8,5 per quello sensibile a lunghezze d'onda intermedie e 7,5 per il terzo (si veda la figura nella pagina precedente). Questa tripletta di luminosità è percepita come un arancione rossastro, un colore raramente percepito in condizioni ordinarie, a meno che le superfici siano fluorescenti. Lo spettro, un insieme di colori straordinariamente anomalo, può essere considerato come una serie di tre gradienti continui di colore affiancati, che possiedono contemporaneamente sia le proprietà delle macchie di luce sia quelle delle superfici colorate.

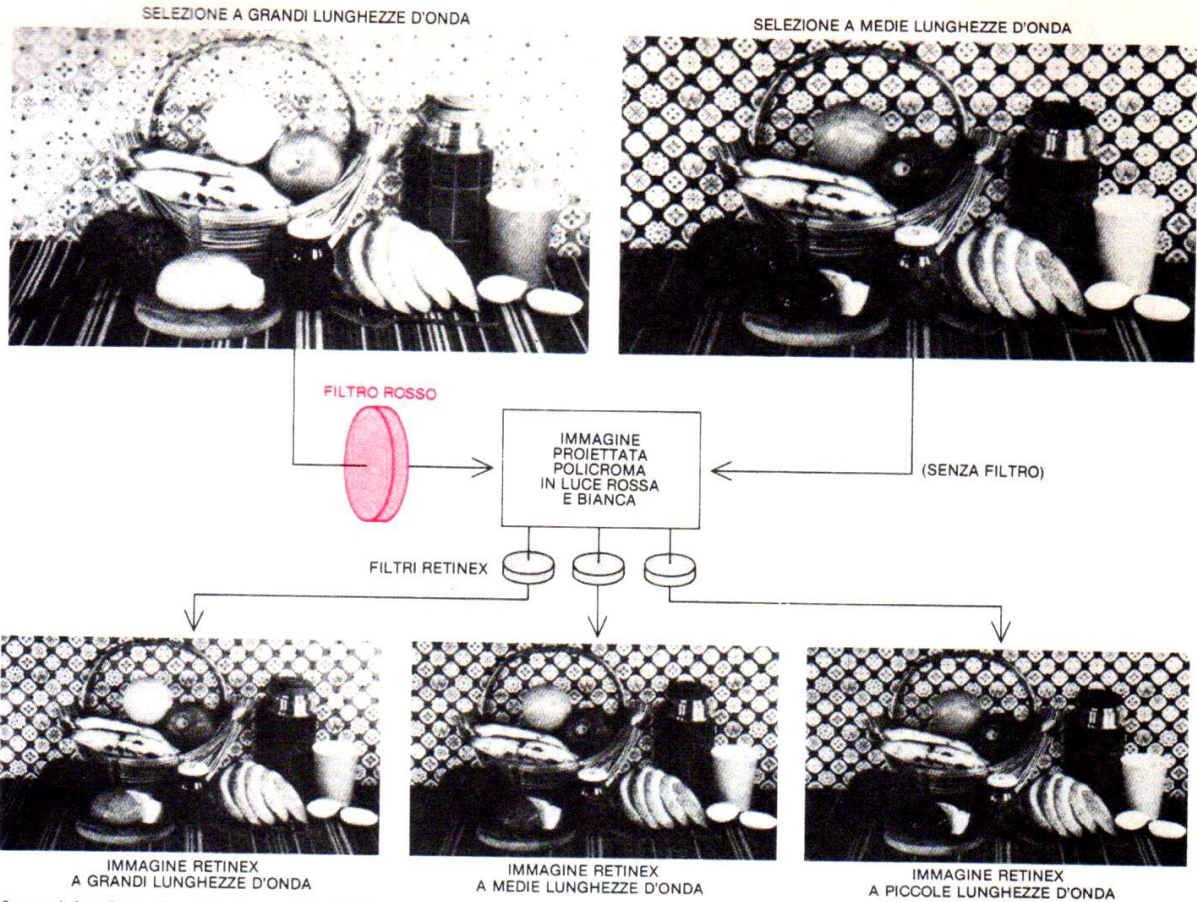
A causa di queste proprietà è possibile prevedere i colori dello spettro, mentre non è possibile, come abbiamo visto, attribuire una specifica composizione spettrale, nelle condizioni abituali, di tut-

ti i giorni, alla luce che viene riflessa da una superficie colorata.

Probabilmente la prima osservazione importante per la comprensione del meccanismo della percezione dei colori non è quella di Newton dello spettro, bensì quella delle ombre colorate, descritta nel 1672 da Otto von Guericke. «Accade - egli scrisse - che nella penombra del primo mattino si può produrre un'ombra azzurra su un pezzo di carta [tenendo] un dito o un altro oggetto ... fra una candela accesa e la carta posta sotto di essa». Ora sappiamo che questo importante esperimento descrive un esempio elementare della generazione di tre diverse luminosità su un sistema a tre recettori. Uno schema dell'esperimento con luce bianca o con luce di grande lunghezza d'onda («rossa») è descritto nella figura di questa pagina. Qui il colore dell'ombra è blu. La figura mostra che la tripletta di luminosità nell'ombra corrisponde al colore bluverde che è possibile prevedere dalla sua posizione nello spazio colore - luminosità. È ora possibile comprendere che i nostri vecchi esperimenti con le immagini in luce bianca e rossa non sono che un procedimento per ottenere colori tipo ombra colorata in molte sfumature

e nelle immagini anziché nelle ombre. I colori visti in una proiezione in bianco e rosso possono venire facilmente previsti estendendo l'analisi fatta per giustificare il colore dell'ombra di von Guericke. Per dimostrare questo punto, a pagina 68, sono riprodotte le immagini di selezione con filtri rosso e verde usate per una proiezione a colori in luce rossa e bianca (in questa dimostrazione non si è fatto alcun tentativo per riprodurre i colori effettivamente visti nella proiezione). La proiezione in bianco e rosso è stata fotografata attraverso una combinazione filtro-pellicola retinex sensibile a bande di grande, media e corta lunghezza d'onda. Le tre immagini sono riprodotte sotto la coppia di selezioni cromatiche (a grande e media lunghezza d'onda) usate per ottenere la proiezione in luce rossa e bianca. Il punto significativo è che quando l'occhio, utilizzando il proprio sistema retinex, vede sullo schermo l'immagine rossa e bianca ottiene per ogni punto dell'immagine una tripletta di luminosità che assomiglia a quella che otterrebbe guardando direttamente il soggetto usato per le riprese. In questo importante punto d'incontro fra le ombre azzurre e le immagini colorate il lavoro estensivo di determinazione e moltiplicazione dei rap-





Immagini retinex di proiezioni in luce rossa e bianca mostrano che queste producono triplette di luminosità in accordo con le sensazioni di colore provate durante la proiezione. Le due fotografie in alto sono riproduzioni delle selezioni nelle bande a grande (a sinistra) e media (a destra) lunghezza d'onda di una natura morta. La prima immagine è stata proiettata su uno schermo attraverso un filtro a banda passante di grande lunghezza d'onda (rosso). La seconda è stata proiettata in sovrapposizione alla prima con la luce prodotta da una lampada a filamento di tungsteno. L'immagine sullo schermo è stata poi fotografata con tre combinazioni filtro-pellicola riproducendo le sensibilità spettrali dei sistemi fotorecettori. Queste «immagini retinex» sono ri-

prodotte in basso: a sinistra quella relativa alle grandi lunghezze d'onda, al centro quella relativa alle lunghezze intermedie e a destra quella relativa alle piccole lunghezze d'onda. I colori visti nella proiezione in luce bianca e rossa sono quelli che ci si può attendere dalle loro triplette di luminosità. La mela risulta chiara nell'immagine ripresa a grande lunghezza d'onda e più scura nelle riprese nelle altre bande dello spettro. L'arancia è gradatamente meno chiara nelle tre riprese. È notevole che con i propri sistemi retinex l'osservatore possa vedere una tazza blu, un cestino marrone e delle banane gialle con differenze di luminosità tanto piccole da costituire un problema per la loro resa con i procedimenti di fotoincisione usati comunemente.

porti di riflettanza determina la luminosità di ogni zona. In conclusione, tutti questi principi vengono applicati nella visione ternaria di ogni giorno, nel corso della quale vengono formate tre distinte immagini per i tre diversi sistemi sensibili, immagini che vengono confrontate per produrre la sensazione del colore.

Questo programma di ricerche teoriche e verifiche sperimentali ha avuto inizio 25 anni fa, in seguito all'osservazione che le energie dei proiettori in luce rossa e bianca potevano venire cambiate senza che cambiassero i colori dell'immagine proiettata. Questa osservazione confutava la spiegazione semplicistica della visione dei colori in termini di contrasto, affaticamento e influenza degli oggetti circostanti, portando a formulare l'idea fondamentale di due sistemi indipendenti di formazione dell'immagine sensibili a grandi e corte lunghezze d'onda, idea

successivamente evolutasi in quella di tre sistemi retinex indipendenti, dimostrati dalle esperienze con i collage. L'idea che la variabile determinante fosse la percentuale di radiazione riflessa in ognuna delle tre bande dello spettro e la tecnica della sua misurazione hanno portato ad ammettere che le luminosità mantengono una graduatoria indipendente nelle bande a grande e piccola lunghezza d'onda. La tecnica sperimentale si è poi evoluta dalla proiezione di un'immagine in bianco e nero alla disposizione in collage di pezzi di carta colorata. L'evidenza della stabilità e della costanza delle luminosità di tutti i pezzi del collage quando viene illuminato con una singola banda dello spettro di intensità variabile sottolinea il fatto che ogni pezzo di carta è caratterizzato da tre riflettanze in tre diverse bande dello spettro e che tali riflettanze sono in rapporto con una grandezza di pre-

ciso interesse biologico: la luminosità.

I colori possono venire disposti nello spazio delle luminosità, definito da tre assi di luminosità in bande di radiazione a grande, media e piccola lunghezza d'onda. Tutti i colori visibili si dispongono in questo spazio, indipendentemente dal flusso energetico, e corrispondono a una terna di coordinate di luminosità. È necessario tener presente che la realtà dei colori va ricercata in questo spazio. Quando il collage a colori viene fotografato o misurato con un'illuminazione non uniforme la riflettanza nelle fotografie non corrisponde al colore, ma la luminosità continua a corrispondervi. I tre insiemi di rapporti fra integrali ai margini e i prodotti di tali integrali entro l'insieme di superfici risultano essere i determinanti fisici delle relazioni che si instaurano fra il sistema biologico e il mondo esterno.