

Annalisa Bugini¹

“.37 V + .27 U + .36 EG”: JAMES CLERK MAXWELL E LA TEORIA DELLA PERCEZIONE DEL COLORE

“Daft! Daft!” Questa cantilena risuona spesso nelle orecchie di James, un ragazzo di dieci anni che in quel periodo (1841) frequenta l'Edinburgh Academy. Ma James è abituato a questo; il soprannome di “scemo” che i suoi compagni di classe gli hanno affibbiato, lo perseguiterà sino alla fine degli studi, senza per questo dargli motivo di preoccupazione. Le sue “arguzie” ed i suoi “motti” vengono scambiati per “brutti tiri” e la sua risata secca e vivace (l'unico segnale che svela la sua suscettibilità) è tradotta in un suono pauroso.

Nonostante l'ambiente ostile, il ragazzo si dedica con profitto agli studi, eccellendo in modo particolare in matematica, fisica e poesia ed il suo singolare talento matematico lo porta a pubblicare, per la prima volta, all'età di quattordici anni. Interessatosi alle ricerche di David Ramsey Hay, un noto artista ornamentale di Edimburgo, trova un metodo per disegnare un perfetto ovale e scrive un saggio sul tracciamento delle curve ovali, il riassunto del quale viene pubblicato nel 1846 nei “Proceedings” della Royal Society di Edimburgo.

Nella primavera del 1847 (pressappoco in Aprile) lo zio, Mr. John Cay, persona che nutriva un vivo interesse per la scienza, conduce il giovane Maxwell ad un incontro con William Nicol (1768-1851), amico di Sir David Brewster (1781-1868) ed inventore del prisma usato per produrre luce polarizzata (come riportato in una lettera indirizzata a Mr. Lewis Campbell datata 6 Luglio 1849). James si era interessato alla “luce polarizzata” ancor prima di quest'incontro, lavorando con spato d'Islanda e contorcendo il capo per vedere i “fasci di Haidinger” ad occhio nudo sullo sfondo dell'azzurro del cielo. Questa visita, però, aggiunse un nuovo ed importante stimolo al suo interesse per questi fenomeni, ed alle speculazioni che da qui ebbero origine.²

Maxwell passò a Cambridge nel 1850, senza avere conseguito il diploma, dove ebbe modo di frequentare William Thomson (1824-1907), il futuro Lord Kelvin, fellow di questo college, destinato non solo a rimanere uno dei suoi migliori amici, ma anche ad influire direttamente su tutta la sua ricerca scientifica. Due mesi dopo passò al Trinity College dove compì con impegno gli studi matematici sotto la guida di W. Hopkins, fra i cui allievi erano da annoverarsi William Thomson e Sir George Gabriel Stokes (1819-1903). Il conseguimento del diploma non segna la sua partenza dal Trinity College, poiché egli resta dedicandosi ad un argomento che aveva preso ad interessarlo: la teoria della visione dei colori. Il fervore posto nella vera e propria ricerca scientifica lo distrae dalla preparazione degli esami per divenire fellow del Trinity College, esami che supera al secondo tentativo nell'ottobre del 1855; in compenso pubblica nel medesimo anno il suo primo lavoro sulla teoria dei colori: Experiments on colours as perceived by the eyes, with remarks on colour-blindness.

Nel riportare a Whewell la conversazione avuta con Maxwell nel Dicembre 1854, James David Forbes (1809-1868) rileva che (Maxwell) aveva compiuto esperimenti e formulato eleganti deduzioni a proposito della Combinazione dei Colori, un oggetto di ricerca che lo aveva tenuto occupato per moltissimo tempo.

¹ Dipartimento di Fisica, Museo di Fisica, Università degli Studi di Bologna

² Cercando di ricostruire l'ordine con il quale furono sviluppate queste idee, vengono per primi i fenomeni sui colori complementari, quindi la composizione della luce bianca, poi le mescolanze dei colori (non dei pigmenti), la polarizzazione, le righe scure dello spettro e, nello stesso periodo, studi sullo strabismo, il disegno stereoscopico, ecc., nonché il daltonismo, ecc.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

Forbes, infatti, aveva introdotto Maxwell agli esperimenti sulle mescolanze dei colori nell'estate del 1849, periodo nel quale era impegnato in una sistematica revisione del problema della classificazione dei colori. Gli esperimenti di Forbes consistevano nell'osservazione delle tinte generate da settori colorati (modificabili in ampiezza) posti in rapida rotazione tramite l'ausilio di un disco, usando le carte colorate fornite da Hay, la cui Nomenclature of Colour mostrava un elaborato sistema di classificazione dei colori in base alle proprie sfumature.

Forbes adottò per i colori una classificazione “a triangolo”, derivante da schemi usati in precedenza da Tobias Mayer (1728-1762) e Johann Heinrich Lambert (1728-1777) (e più tardi da Thomas Young); assumendo il rosso, il blu ed il giallo come colori primari, posti ai vertici di un triangolo, Forbes mostrò come i punti che si collocavano all'interno del triangolo rappresentassero diverse combinazioni di colori.

L'approccio di Maxwell alla visione del colore fu quindi modellato sui tentativi fatti da Hay e da Forbes nel tentare una classificazione ragionata dei colori, usando il triangolo dei colori ed il metodo sperimentale adottato da Forbes. Lo scienziato compì esperienze sulla mescolanza dei raggi di luce colorati nell'Agosto del 1852, e durante la laurea continuò ad occuparsi di questi problemi, ampliandone il settore di ricerca sino ad esaminare il problema del daltonismo, già preso in esame da un altro noto abitante di Edimburgo, George Wilson.

“The Scientific Papers of James Clerk Maxwell”:

Experiments on colours as perceived by the eyes, with remarks on colour-blindness.

Prendendo in esame il lavoro di ricerca di Maxwell sulla teoria della percezione del colore (traendo le informazioni dall'opera The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, W. D. Niven, Vol.I, Cambridge University Press, 1890), cerchiamo di seguire il metodo di indagine da lui adottato per cogliere appieno l'ampiezza delle sue conclusioni.

“La teoria da me adottata assume l'esistenza di tre sensazioni elementari, con la combinazione delle quali sono prodotti tutti i colori da noi percepiti. Young li ha denominati rosso, verde e viola; ma ne possono essere scelti altri tre, a condizione che il bianco sia ottenuto dalla loro combinazione in opportune proporzioni.

Prima di procedere vorrei fare osservare che la parte più rilevante della teoria non sta nel fatto che tre elementi entrino nella nostra percezione del colore, ma che essi siano solo tre!”³

³ *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, edited by W. D. Niven, Vol. I, Cambridge University Press, 1890, p. 121.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

Con queste parole James Clerk Maxwell (1831-1879) dà un aspetto quasi definitivo alla sua teoria della percezione del colore. Nella lettera, datata 4 Gennaio 1855 ed indirizzata al Dr. George Wilson, egli comunica di essersi sforzato di sistemare i propri risultati in una maniera più appropriata di quelli utilizzati per la prima stesura. Maxwell premette che il rapporto sulla teoria dei colori, da lui adottata, si trova nelle *Young's Lectures On Natural Philosophy* e che l'indagine più approfondita che egli abbia mai visto su quest'argomento appartiene a Hermann von Helmholtz (1821-1894), rintracciabile negli *Annals Of Philosophy* nel 1852.⁴

Dopo uno studio sulla scomposizione di un raggio di luce tramite un prisma, trova che “...l'intensità della luce è diversa in differenti punti dello spettro; e la legge della intensità per diverse rifrangibilità differisce in accordo con la natura della luce incidente.”

Nota poi che “...quando un raggio di luce colpisce l'occhio di una persona vengono prodotte in esso certe sensazioni, tramite le quali il possessore dell'organo dà un giudizio sul colore e sulla intensità della luce. ”Intuendo che un'analisi del fenomeno in questione è molto soggettiva e quindi non può divenire oggetto di studio, senza il supporto di mezzi artificiali di riferimento, e prendendo in esame esperienze unidimensionali (una linea orizzontale d'intensità variabile) e bidimensionali (illuminazione di una superficie piana rettangolare con diversi tipi di luce omogenea) Maxwell giunge alle seguenti considerazioni:

Quando gli oggetti sono illuminati da una luce gialla, la sola cosa che può essere distinta dall'occhio è la differenza di intensità o luminosità.

Supponendo che diversi tipi di luce siano emanati da diverse sorgenti, considerando che tutte diano luce perfettamente omogenea, allora la natura di ogni raggio dipenderà da due cose: (a) l'intensità, o luminosità; (b) il colore, che può essere stimato dalla posizione sullo spettro e misurato dalla sua lunghezza d'onda.

Si trova che i colori non differiscono solo in intensità e in tinta, ma anche in sfumatura; per questo essi sono più o meno puri.

Si hanno, quindi, tre fattori nella nostra percezione del colore, ognuno dei quali può variare

⁴ Maxwell perfezionò uno strumento inventato da Thomas Young per l'analisi dei colori. Young è stato definito il fondatore dell'ottica fisiologica. Oltre ad avere spiegato il potere di accomodazione dell'occhio, fu il primo ad attribuire la sensibilità al colore alla presenza nella retina di strutture che reagiscono ai colori rosso, verde e viola. Quindi la cecità ai colori è data dall'incapacità di una di queste strutture di reagire normalmente agli stimoli esterni. L'ipotesi di Young verrà poi perfezionata con rigorose considerazioni fisiologiche da Hermann von Helmholtz, secondo cui nell'occhio esistono ricettori specifici per i diversi colori.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

independentemente dagli altri. Stabilito questo, Maxwell procede illustrando una possibile forma *geometrica* con la quale tentare di esprimere la teoria.

Come ipotesi si accetta che le tre sensazioni corrispondano al colore rosso, verde e viola e che si possa stimare l'intensità di ognuna numericamente.

“Siano v , r , g gli angoli di un triangolo, e poniamo che le tre sensazioni abbiano posizione in questi punti. Se troviamo la parte numerica della parte rossa, verde e viola della sensazione di un dato colore e situiamo il peso in modo proporzionale a r , v , g trovando il centro di gravità dei tre pesi con il solito procedimento, allora quella sarà la posizione del colore dato, e la misura numerica della sua intensità sarà la somma delle tre primitive sensazioni. In questo modo, ogni possibile colore avrà la propria posizione intensità accertata; ed è facile osservare che quando sono combinati due colori composti, il loro centro di gravità è la posizione del nuovo colore.

L'idea di questo metodo geometrico nella ricerca dei colori si trova nell'OTTICA di Newton, (il quale) mi risulta non l'abbia mai messa in pratica, eccetto forse per una riduzione elementare dell'esperimento analogo a quello da me eseguito.

L'esattezza del metodo dipende interamente dalla veridicità della teoria delle tre sensazioni, quindi, il suo successo è una testimonianza in favore di quella teoria.”⁵

Ogni possibile colore può essere incluso all'interno del triangolo RVG. Il bianco sarà individuato da un certo punto W all'interno del triangolo. Se vengono disegnate linee colleganti W ad un qualsiasi punto, il colore in quella posizione varierà in sfumatura in accordo con la posizione angolare della linea disegnata da W, e la purezza della sfumatura dipenderà dalla lunghezza della linea; osservando che “...ogni raggio dello spettro dà risalto a tutte e tre le sensazioni, sebbene in diverse proporzioni”, allora la posizione dei colori dello spettro non è posta sul perimetro del triangolo, ma individuata all'interno di un'area delimitata dalla curva CRYGBV. Tutti i colori naturali staranno quindi entro questa curva.⁶

Esperimenti eseguiti con fogli colorati portano ad un grado d'accuratezza di gran lunga maggiore rispetto a quelli effettuati sui colori dello spettro, e Maxwell descrive come effettuare queste esperienze nel modo più semplice e conveniente.

⁵ W. D. Niven, Op. cit., pp.121-122.

⁶ In riferimento al diagramma triangolare, indicato con w il punto del triangolo in cui si colloca la tinta neutra, sono definite le seguenti variabili: (1) livello di luminosità (shade) ossia il coefficiente numerico, che Maxwell ricava dalla formulazione matematica; (2) colore spettrale (hue) ossia la posizione angolare rispetto a w , definita tramite le semirette che partono da w e incontrano i punti a partire dal rosso; (3) grado di saturazione (tint) ossia la distanza da w .

“La carta colorata viene tagliata a forma di disco, con un piccolo foro al centro e tagliato lungo un raggio, così da permettere ad un certo numero di questi dischi di essere posti sullo stesso asse, in modo tale che sia possibile esporre alla vista una parte di ognuno. Facendo scivolare un disco sopra all'altro, può essere resa visibile qualsivoglia porzione di colore predeterminata.

Questi dischi sono posti su di una piccola trottola, costituita da un disco piatto di metallo e da un'asta verticale di avorio. Quest'asta passa attraverso il centro dei dischi e la quantità esposta (visibile) di ogni colore è misurata tramite l'ausilio del bordo graduato del disco, suddiviso in cento parti. Facendo girare la trottola, ogni colore viene mostrato all'osservatore per un periodo proporzionale all'angolo del settore esposto.

Ho trovato con varie esperienze indipendenti tra loro che il colore originato da una rotazione veloce è uguale a quello prodotto dalla luce di differenti colori che cade sulla retina. Aggiustando in maniera opportuna i dischi può essere imitato ogni colore e in seguito potrà essere riprodotto osservando le divisioni sul bordo della trottola.

Funzione fondamentale di questa trottola è quella di ottenere delle equazioni dei colori, le cui variabili sono date dai colori stessi.”⁷

Vengono poi aggiunti a questo set altri dischi, con diametro uguale alla metà di quelli precedenti, giacenti sopra di essi, tramite i quali si forma la seconda combinazione di colori. Queste combinazioni vengono accuratamente confrontate e, quando vengono percepite come sensibilmente identiche, sono annotate le percentuali dei diversi colori presenti in ogni set.

I risultati sono espressi in forma di equazioni e queste, nel caso della visione normale, sono spesso definite da quattro colori, non includenti il nero. Da tutto questo si può trarre una semplice regola:

“...i diversi colori ed i loro composti hanno un proprio posto assegnato sul triangolo dei colori.”⁸

La regola per trovare la posizione è la seguente:

“Si assumono tre punti come posizione di tre colori standard, qualsiasi essi siano; quindi si costruisce un'equazione con i tre colori standard, il colore dato ed il nero, sistemando questi colori sui dischi interni ed esterni in modo tale da produrre un'identità di tinta tra di loro quando vengono messi in rotazione.

Ponendo il colore ottenuto nella parte sinistra dell'equazione e i tre colori standard nella parte destra e togliendo il nero, allora la posizione del colore ottenuto determina il centro di gravità delle tre masse, i cui pesi si comportano

⁷ W. D. Niven, Op. cit., pp.122-123.

⁸ W. D. Niven, Op. cit., p.123.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

come il numero di gradi di ognuno dei colori standard, presi in valore positivo o negativo secondo il caso.”⁹

Maxwell passa poi ad illustrare i risultati degli esperimenti sul daltonismo, una cecità congenita per alcuni colori, così denominata dal fisico e chimico inglese John Dalton (1766-1844), che ne era affetto e lo descrisse nel 1794.¹⁰ Se si trovano due combinazioni di colore che appaiono identiche tra loro ad una persona daltonica e quindi si segna la loro posizione sul triangolo dei colori, la linea retta passante attraverso questi punti passerà anche attraverso tutti i punti corrispondenti ad altri colori che, a tale persona, sembreranno identici ai primi due, e ciò può essere fatto anche per altre linee passanti attraverso la serie di colori che appaiono simili ad un daltonico. Conoscendo questa legge sul daltonismo possiamo predire qualsivoglia numero di equazioni che saranno plausibili per gli occhi che hanno questo difetto.

La differenza esistente tra il daltonismo e la visione normale, espressa con il formalismo matematico che sta alla base delle equazioni dei colori, viene interpretata da Maxwell nel seguente modo:

“...il colore per il primo (daltonico) è funzione di due variabili indipendenti, mentre per il secondo è funzione di tre variabili, e la relazione tra i due tipi di visione non è arbitraria ma indica l'assenza di una determinata sensazione, dipendente forse da alcune strutture sconosciute o da combinazioni organiche, le quali formano un terzo dell'apparato tramite cui riceviamo le sensazioni dei colori.

Supponiamo che la struttura assente sia quella che entra in gioco quando la luce rossa colpisce i nostri occhi; allora per un daltonico la luce sarà visibile solo per quello che riguarda le altre due sensazioni, diciamo blu e verde. Quindi, ad esso apparirà meno luminoso che a noi, ed ecciterà una sensazione non distinguibile da quella della luce blu e verde.”¹¹

Viene fatto notare che, per una persona daltonica, i colori neutri possono essere prodotti combinando 6 gradi di blu oltremare con 94 di vermiglio o 60

⁹ W. D. Niven, Op. cit., p.123.

¹⁰ Durante i primi anni delle sue ricerche, Dalton attribuiva i suoi errori di giudizio nelle definizioni delle tonalità dei colori ad una semplice ma irritante discrepanza nella convenzione delle definizioni dei colori. Dalton scoprì solo più tardi di non rilevare alcun tipo di differenza tra il colore di una foglia di alloro ed un pezzetto di cera rossa; comparava il colore di un abito scarlatto a quello degli alberi ed una volta intervenne ad una riunione di Quaccheri abbigliato con un vestito scuro e con un paio di calze rosso fiammanti. La descrizione da lui data al fenomeno fu così famosa che “daltonismo” divenne il comune sinonimo di “cecità per i colori”.

¹¹ W. D. Niven, Op. cit., p.124.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

gradi di verde smeraldo con 40 di blu oltremare; si suppone che il primo di questi esempi rappresenti per noi il tipo di colore rosso che appartiene alla sensazione del rosso per le persone che soffrono di questo disturbo. Questo stimola le altre due sensazioni ed è quindi visibile ai daltonici, ma appare ad essi molto scuro e di un colore non ben definito.

È nella comunicazione posta sotto il titolo “*Esperienze sui colori come percepiti dall'occhio, con osservazioni sul daltonismo*” che Maxwell descrive accuratamente l'esperienza basata sulla trottola dei colori con una approfondita ricerca sulle equazioni dei colori.

Obbiettivo della ricerca è quello di:

“...descrivere un metodo con il quale ogni varietà di colore visibile possa essere mostrata all'occhio in modo tale da permetterne un'accurata comparazione; mostrare come esperimenti così fatti possano essere registrati numericamente e dedurre da questi risultati numerici stabilite leggi per la visione.”¹²

Viene pertanto usato l'apparato con dischi descritto precedentemente in modo che, posto il sistema in rapida rotazione, i settori di diversi colori diventino non più distinguibili tra loro, e l'insieme appaia di tinta uniforme.

Le tinte risultanti da due diverse combinazioni di colori possono essere confrontate usando un secondo *set* di dischi di minori dimensioni posti sopra al centro del primo *set*, così da lasciare esposta la parte esterna del disco più grande; la tinta risultante dalla prima combinazione apparirà allora in un anello attorno alla seconda e dovrà essere attentamente comparata con questa.

Lo strumento, usato nella prima serie di esperimenti effettuati a Cambridge nel Novembre del 1854, fu costruito personalmente da Maxwell, usando carta colorata usata da D. R. Hay. La trottola fu perfezionata da J. H. Bryson e vennero utilizzate le carte colorate fornite da T. Purdie, che utilizzò i pigmenti puri usati in pittura.

Furono preparate un certo numero di trottole, in modo tale da poter disporre di diversi osservatori che potessero testare e comparare indipendentemente i risultati ottenuti.

COLORI USATI DA MR.PURDIE

V vermiglio	U blu oltremare	EG verde smeraldo
C carminio	PB blu di Prussia	BG verde Bruswick
RL rosso minio	VB azzurrite	UC oltremare e cromo
OO orpimento		
OC arancio cromo		
CY giallo cromo		
GAM gamboge		

¹² W. D. Niven, Op. cit., p.126.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

PC cromo pallido		
BK nero		SW bianco niveo

I colori della prima colonna appartengono alla gamma del Rosso; quelli della seconda alla gamma del Blu e quelli della terza alla gamma del Verde.

Vermiglio, blu oltremare e verde smeraldo appaiono come i migliori colori da adottare per assegnare il resto ad uno standard uniforme; per questo motivo essi sono stati posti alla sommità delle liste come tipologia delle tre convenienti divisioni del colore rosso, blu e verde.

A questo punto, ci si può chiedere perché non siano state scelte alcune varietà di giallo al posto di quelle di colore verde, colore questo comunemente posto tra i colori secondari, mentre il giallo si classifica tra i primari. La ragione di questa deviazione dal sistema generalmente accettato, spiega Maxwell, è quella per cui i colori sul disco non rappresentano affatto i colori primari ma sono semplicemente campioni di alcuni tipi di vernice e la scelta è stata unicamente determinata dalla capacità di formare le varietà di combinazioni richieste.

“...ora se fossero stati adottati il rosso, il blu e il giallo, vi sarebbero state difficoltà a formare il verde con un composto di blu e giallo, mentre il giallo formato dal vermiglio e dal verde smeraldo è abbastanza distinguibile.”¹³

Per esemplificare il metodo di ricerca adottato da Maxwell, ci si propone di formare un grigio neutro con la combinazione di vermiglio, blu oltremare e verde smeraldo: i risultati più soddisfacenti sono ottenuti coinvolgendo due persone che agiscono nello stesso momento quando l'operatore sistema i colori e fa girare le trottole, evitando così all'occhio di distrarsi a causa dei colori brillanti propri delle carte quando sono ferme ed inutilizzate. Dopo aver posto i dischi di questi tre colori sul piatto circolare della trottole e i dischi bianco e nero sopra di essi, l'operatore fa girare la trottole e chiede l'opinione degli osservatori comparando tra loro l'anello esterno e quello interno.

Le impressioni riferite saranno, a seconda del caso, o che l'anello esterno è troppo rosso, troppo blu o troppo verde o che l'anello interno è troppo luminoso o scuro, in paragone all'altro. I dischi devono quindi essere sostituiti, in modo da rendere molto più simili tra loro le due tinte risultanti.

Con un po' di esperienza l'operatore imparerà a porre i giusti quesiti e ad interpretare le risposte. L'osservatore non dovrebbe guardare le carte colorate e non dovrebbe essere nemmeno a conoscenza delle proporzioni dei colori usate durante l'esperimento. Quando tutte queste correzioni sono state fatte accuratamente e quando la trottole abbia sufficiente velocità di rotazione, il colore risultante dai circoli interno ed esterno dovrebbe essere perfettamente uniforme. Una volta che i due *set* sono pressoché uguali tra di loro, vengono lette

¹³ W. D. Niven, Op. cit., p.127.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

il numero di divisioni occupate dai diversi colori al bordo del disco e registrate sotto forma di equazioni.

I dati, forniti dall'esperienza del 6 Marzo 1855 compiuta alla luce del giorno e senza sole, sono i seguenti:

$$.37 V + .27 U + .36 RG = .28 SW + .72 B \quad (1)$$

In questo modo si è ottenuto un grigio neutro con la combinazione di tre colori standard. Sostituendo in successione ad ogni colore standard uno dei tre colori che lo seguono, si ottengono equazioni contenente ognuna due colori standard ed uno dei rimanenti colori.

Nel caso del cromo pallido si avrà:

$$.34 PC + .55 U + .12 EG = .37 SW + .63 BK \quad (2)$$

Si possono anche effettuare esperimenti nei quali il colore risultante non è un grigio neutro, ma un colore deciso. Si potrebbe allora combinare blu oltremare, cromo pallido e nero così da ottenere una tinta identica a quella composta da vermiglio e verde smeraldo.

Occorre ricordare però che esperienze di questo tipo sono molto difficili, sia per l'incapacità dell'osservatore di cogliere una differenza tra due colori che hanno probabilmente stessa sfumatura ed intensità, sia per i colori complementari che vengono prodotti nell'occhio dopo avere guardato a lungo i colori da paragonare.

“Il metodo più adeguato per arrivare al risultato precedente è quello di rendere il colore della combinazione rosso-verde come qualcosa di simile al giallo: per ridurre la purezza del giallo si mescola del blu, e per ridurre l'intensità si aggiunge del nero.

Queste operazioni devono essere ripetute e perfezionate, affinché le due tinte non siano semplicemente varietà dello stesso colore ma siano assolutamente identiche.”¹⁴

Un esperimento eseguito il 5 Marzo fornisce i seguenti risultati:

$$.39 PC + .21 U + .40 BK = .59 V + .41 EG \quad (3)$$

Il fatto che questi esperimenti siano realmente testimonianza della conformazione dell'occhio e non una semplice comparazione tra due cose identiche in sé, può essere fisicamente realizzato osservando queste tinte risultanti attraverso vetri colorati o usando luce artificiale al posto della luce del giorno.

¹⁴ W. D. Niven, Op. cit., p.129.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

Nel caso del carminio, abbiamo (alla luce del giorno):

$$.44 C + .08 U + .45 EG = .25 SW + .75 BK \quad (4)$$

e ciò mostra che l'effetto giallo della luce artificiale pesa più sul bianco che su una combinazione di colori.

Se si ripropongono le tinte risultanti dalla espressione (3) e si osservano i dischi girare rapidamente attraverso un vetro blu, la combinazione di giallo blu e nero appare più rossa, mentre attraverso un vetro giallo, il rosso e il verde mescolati insieme appaiono più rossi. Parimenti, un vetro rosso fa diventare la prima parte dell'equazione più scura mentre un vetro verde la rende troppo chiara.

“...La apparente identità delle tinte in questi esperimenti non è reale, ma una conseguenza di una determinata costituzione dell'occhio e di qui deriva l'importanza dei risultati, indicanti una possibile legge per la visione dei colori.”¹⁵

Un primo risultato degno di nota è il fatto che le equazioni, osservate da varie persone con differenti visioni, coincidono in maniera notevole. Se si ha cura di assicurare lo stesso tipo di luce a tutti gli esperimenti, le equazioni, determinate da osservatori indipendenti, raramente mostrano una differenza superiore alle tre divisioni per ogni componente dell'equazione contenente i colori standard.

La accuratezza di ogni osservatore può essere testata ripetendo lo stesso esperimento diverse volte e confrontando i risultati con le equazioni trovate.

“Esperimenti di questo tipo, fatti a Cambridge nel Novembre 1854, mostrarono che, su dieci osservatori, i migliori furono accurati sino ad una divisione e mezza e che coincidevano all'interno di una divisione; i peggiori si contraddicevano nel limite di sei divisioni, ma nessuno si scostava più di 4 o 5 dal complesso delle osservazioni.”¹⁶

Con ciò Maxwell conclude:

che l'occhio umano è capace di stimare la similarità tra i colori con una precisione che in alcuni casi è molto alta;

che il giudizio così formulato è dato non per la reale similarità tra i colori, ma per una causa residente nell'occhio dell'osservatore;

che gli occhi di differenti osservatori variano in precisione, ma che collimano gli uni con gli altri così bene da non lasciare dubbi sul fatto che la "legge sulla visione del colore" sia identica per tutti gli occhi normali.

¹⁵ W. D. Niven, Op. cit., p.130.

¹⁶ W. D. Niven, Op. cit., p.130.

Approfondendo il discorso sulla teoria della percezione del colore, è opportuno ricordare come per molto tempo gli studiosi di ottica si siano divisi sugli argomenti in questione: da una parte vi erano quelli che credevano alle nozioni comuni e alle proprie impressioni adottando alcune teorie sui tre colori primari e dall'altra quelli che studiavano il fenomeno della luce di persona, provando che nessuna teoria adottata dagli altri ottici poteva spiegare la costituzione dello spettro.

Isaac Newton (1642-1727), nella sua opera *Opticks*, descrisse il mescolamento dei colori facendo ricorso ad una circonferenza divisa in parti proporzionali ai sette intervalli musicali (intervalli in accordo con la divisione dello spettro). Dispose i colori dello spettro intorno al cerchio, e nel centro di gravità di ognuno dei sette archi pose un cerchio più piccolo, la cui area rappresentava il numero di raggi del colore corrispondente che entravano in un dato colore composto. Newton, con l'ausilio di questa rappresentazione mostra chiaramente di avere considerato possibile trovare un punto nel cerchio corrispondente a ogni possibile colore. È vero che le istruzioni che Newton diede per la costruzione del disco erano piuttosto arbitrarie, volendo probabilmente essere solo una indicazione del metodo da seguire, ma il metodo in sé è matematicamente riconducibile alla teoria dei tre elementi.

Thomas Young (1773-1829), che fece il successivo grande passo nella formulazione della teoria della luce, sembra essere stato il primo a sviluppare i suggerimenti di Newton sulla composizione dei colori. Egli vide che, dal momento che questa formazione non ha fondamento nella teoria della luce, la causa doveva essere ricercata nella costituzione dell'occhio; e con una di quelle audaci supposizioni che qualche volta esprimono il risultato di una speculazione meglio di qualsiasi cauta serie di ragionamenti, la attribuì alla esistenza di tre diversi tipi di sensazioni sulla retina, ognuno delle quali prodotta in gradi differenti da diversi raggi.¹⁷

Questi tre effetti elementari corrispondono alle tre sensazioni di rosso, verde e viola e dovrebbero trasmettere separatamente ai sensori la percezione di una immagine verde, rosso e viola, in modo da rappresentare ciò che viene visto tramite la sovrapposizione di queste immagini. Per Young, quella che ogni nervo trasmette alla mente non è, come qualcuno ha pensato, la conoscenza della lunghezza d'onda o il suo periodo, ma semplicemente l'informazione di essere più o meno stimolato dai raggi che lo colpiscono.¹⁸

¹⁷ Vedi nota 3

¹⁸ Young utilizza esattamente questa parola: "sensazione". Maxwell stesso affermò che poteva sembrare una ovvietà dire che il colore è sensazione, eppure Young, con questo, stabilì la prima teoria consistente del colore e, partendo dal fatto che esistono tre colori primari, ricercò la spiegazione di questo fatto non nella natura della luce, ma nella costituzione dell'uomo.

Si deve anche osservare che i nervi corrispondenti alla sensazione del colore rosso sono colpiti principalmente dai raggi rossi, ma in alcuni casi anche da quelli delle altre parti dello spettro, come il vetro rosso che fa passare i raggi rossi ma permette anche agli altri colori di passare in piccola quantità.

Questa teoria del colore può essere illustrata con una esperienza presa dall'arte della fotografia e sperimentata dallo stesso Maxwell: viene richiesto di studiare i colori di un paesaggio per mezzo di ristampe ottenute con un preparato sensibile ai raggi di ogni colore.

“Una lastra di vetro rosso sia posta di fronte alla camera e sia preso uno scatto. La positiva sarà trasparente nel paesaggio ovunque era trasparente la luce rossa e opaca dove ve ne era scarsità. Poniamo ora la positiva in una lanterna magica, con il vetro rosso, e vedremo che verrà proiettata così una immagine rossa sullo schermo. Si ripeta questa operazione con un vetro verde ed uno viola e, per mezzo di lanterne magiche, si facciano sovrapporre le tre immagini su di uno schermo. Il colore di ogni punto sullo schermo dipenderà allora dal corrispondente punto del paesaggio; e, correggendo accuratamente le intensità delle luci, verrà proiettata sullo schermo una esatta copia del paesaggio.

La sola differenza che appare è quella che la copia sarà molto più attenuata, o meno pura in tinta dell'originale. Qui, inoltre, abbiamo il processo eseguito due volte: la prima volta sullo schermo e la seconda sulla retina.”¹⁹

La notevole corrispondenza tra i risultati ottenuti durante gli esperimenti basati su individui diversi potrebbe indicare la presenza di "congegni umani" identici in tutte le persone. Poiché, secondo Maxwell, la speranza di trovare questi "congegni" con la dissezione anatomica è molto piccola, ci si deve accontentare di ogni evidenza sussidiaria che è possibile ottenere con altri mezzi. Tale evidenza è fornita quindi da quegli individui che hanno difetti della visione come quelli descritti da Dalton, evidenza che è stata ampiamente studiata dal Dr. G. Wilson: egli descrive numerosi casi di daltonismo, alcuni dei quali indicano una confusione generale nella valutazione dei colori, mentre in altri gli errori di giudizio sono chiaramente più numerosi per quei colori che si avvicinano al rosso e al verde, piuttosto che per quelli che si avvicinano al blu e al giallo.

Per questi ultimi il fenomeno può essere imputato ad una insensibilità alla luce rossa e questo, entro un certo limite, è confermato dal fatto che oggetti rossi appaiano a questi occhi decisamente più scuri che ad occhi normali. Analizzando esperimenti condotti con lo spettro, nel caso di un soggetto affetto da daltonismo per il rosso, si costata che il rosso appare ai daltonici più scuro degli altri colori, e, ciò è curioso, assomigli più al verde che agli altri colori. A questi soggetti, lo spettro appare debolmente luminoso (scuro) nella banda del rosso, giallo luminoso nella parte di banda che va dall'arancio al giallo, luminoso ma non colorato dal giallo-verde al blu e infine fortemente colorato all'estremità blu e

¹⁹ W. D. Niven, Op. cit., pp.136-137.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

viola, dopo la quale la sensazione sembra avvicinarsi alla tinta neutra scura del rosso.

Vediamo come Maxwell conduce le esperienze sul fenomeno del daltonismo:

“Dei soggetti dei miei esperimenti a Cambridge, quattro rientravano decisamente in casi di daltonismo.

Tra questi, due, chiamati Mr.R e Mr.S, non furono sufficientemente attenti nelle loro osservazioni da fornire risultati consistenti entro dieci divisioni del disco. I due rimanenti, Mr.N e Mr.X, furono accurati nelle loro osservazioni quanto potevano esserlo per obiettività persone con una vista normale, tanto che i risultati mostrarono tutti chiaramente quanto le loro sensazioni differiscano completamente dalle nostre.

Il metodo di ricerca fu quello adottato nel caso di individui con visione normale eccetto che, in questi casi, l'operatore poteva difficilmente influenzare il risultato cedendo alla propria impressione, poiché non aveva una esatta percezione di quale fosse la somiglianza tra due tinte come viste dall'osservatore.

Le domande poste dall'operatore erano due: Quale cerchio appare più blu o giallo? Quale appare più luminoso e quale più scuro?

In base alle risposte a questi quesiti l'operatore doveva correggere il colore risultante per eguagliare questo rispetto a quello che appariva all'osservatore. Le equazioni così ottenute non richiedevano cinque colori, nero incluso, ma solo quattro.”²⁰

Ad esempio, il risultato di varie operazioni dà:

$$.19 G + .05 B + .76 BK = 100 R \quad (5)$$

È evidente allora che il colore blu-verde scuro della parte sinistra della equazione è equivalente al rosso pieno della parte destra. Quindi, se si divide la parte BG nella proporzione 19 a 5 al punto , e uniamo R con , il colore in differirà da quello in R (per un daltonico) solo per una maggiore brillantezza nella proporzione 100 a 24, e tutti i colori intermediari sulla linea R appariranno ai daltonici della stessa sfumatura ma di intensità intermedie.

Ora, se si prende un punto D, tale che RD sta a R nella proporzione di 24 a (100 -24), o 76, il colore di D, se riproducibile, apparirà invisibile ad una persona daltonica e la somma di questa sensazione con qualsiasi altra non potrà alterare questa nella stima e sarà equivalente al nero. Se si disegna DW e la si riproduce, tutti i colori della parte alta rispetto a DW saranno delle varietà di blu e quelli della parte bassa una varietà di giallo, in modo che la linea DW tracci un confine tra i due tipi di colore che i daltonici chiameranno con il nome di blu e giallo.

²⁰ W. D. Niven, Op. cit., p.138.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

Prendendo il punto , fra R e B, appare, con la misura delle linee R e B , che corrisponde a:

$$.07 B + .93 R \quad (6)$$

Misurando W e D , e correggendoli rispetto al coefficiente di W, e chiamando D = nero nel linguaggio dei daltonici, corrisponde a:

$$.105 W + .895 BK \quad (7)$$

Quindi:

Misura:	$.93 R + .07 B = .105 W + .895 BK$
Osservazioni di N e X insieme:	$.94 R + .06 B = .10 W + .90 BK$
Osservazioni di X da solo:	$.93 B + .07 B = .10 W + .90 BK$

Con simili calcoli rispetto al punto , posto tra B e G:

Misura:	$.43 B + .57 G = .335 W + .665 BK$
Osservazioni di N e X:	$.41 B + .59 G = .34 W + .66 BK$
Osservazioni di X da solo:	$.42 B + .58 G = .32 W + .68 BK$

Si può anche osservare che la linea Gd incrocia la RY. Nel punto di intersezione abbiamo:

Misura:	$.87 R + .13 Y = .34 G + .66 BK$
Osservazioni di N e X:	$.86 R + .14 Y = .40 G + .60 BK$
Osservazioni di N da solo:	$.84 R + .16 Y = .31 G + .69 BK$
Osservazioni di X da solo:	$.90 R + .10 Y = .27 G + .73 BK$

Qui le osservazioni sono in disaccordo, a causa dell'effetto dei colori decisi sulla retina, ma, in media, possiamo affermare che questi coincidano abbastanza bene con i calcoli. Disegnando la linea BY, si vede che questa taglia le linee passanti per D descrivendo ogni colore; quindi, al daltonico, tutti i colori appaiono composti da blu e giallo.

Con le misure del diagramma, si trova per il rosso:

Misura:	$.138 Y + .123 B + .749 BK = 100 R$
Osservazione di N:	$.15 Y + .11 B + .74 BK = 100 R$
Osservazione di X:	$.13 Y + .11 B + .76 BK = 100 R$

Per il verde:

Misura:	$.705 Y + .295 B = .95 G + .05 BK$
---------	------------------------------------

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

Osservazione di N: .70 Y + .30 B = .86 G + .14 BK
Osservazione di X: .70 Y + .30 B = .83 G + .17 BK

Per il bianco:

Misura: .407 Y + .593 B = .326 W + .674 BK
Osservazione di N: .40 Y + .60 B = .33 W + .67 BK
Osservazione di X: .44 Y + .56 B = .33 W + .67 BK

L'ultima osservazione sulla quale Maxwell vuole richiamare l'attenzione è quella dell'effetto di lenti colorate su soggetti daltonici:

“Sebbene essi (i daltonici) non possono distinguere i rossi e i verdi da varietà di grigio, la trasparenza di lenti rosse e verdi per questi tipi di luce è molto differente.

Quindi, dopo avere trattato un caso come quello della equazione (5), nel quale un rosso ed un verde appaiono identici, guardando attraverso una lente rossa essi vedono il rosso chiaramente e il verde in modo indistinto, mentre attraverso una lente verde il rosso appare scuro ed il verde luminoso.

Fornendo a Mr.X una lente rossa ed una verde, lenti che poteva distinguere solo dalla forma, permisi a questi di formulare giudizi su alcuni casi precedenti su i quali si era mostrato dubbioso, avendo ora su di essi una assoluta certezza.

Ho costruito allora un paio di occhiali con una lente rossa e una verde: Mr.X intende usarli per un lungo periodo, e spera di acquisire l'abitudine di distinguere il colore rosso e verde tramite l'impressione che i diversi effetti comportano sugli occhi. Sebbene non potrà mai acquisire la nostra percezione del rosso, potrà distinguere da sé quali cose sono rosse, e il processo mentale diverrà a lui così familiare da agire, in maniera inconscia, come un nuovo senso.”²¹

Dopo avere fornito alcune notizie bibliografiche sulle proprie ricerche, Maxwell conclude la sua trattazione con l'intenzione di connettere questi semplici esperimenti sui colori dei pigmenti con quelli su i colori puri dello spettro, ammettendo di avere ottenuto fin lì *risultati sufficientemente interessanti da proseguirne lo studio.*

Quando, nel 1871, Maxwell tiene una lezione alla Royal Institution dal titolo *On Colour Vision*, sono ormai più di venti anni che si occupa della visione del colore, costruendo strumenti innovativi e fondamentali per le indagini sperimentali e contribuendo in maniera essenziale ad un approccio quantitativo alla colorimetria.

Con un linguaggio semplice ed appropriato per l'uditorio dei “discorsi del venerdì sera”, apre la lezione ricordando che: “Vedere è vedere a colori... e la

²¹ W. D. Niven, Op. cit., p.141.

Bugini Annalisa “.37 V + .27 U + .36 EG”: James Clerk Maxwell e la teoria della percezione del colore

scienza dei colori deve quindi essere vagliata essenzialmente come una scienza della mente”.

