

GIULIO PERUZZI

*«dell'essenza della luce sono stato sempre in tenebre»*  
**Luce e colore. Da Galileo a Einstein**

*Estratto*

Atti e Memorie dell'Accademia Galileiana di Scienze, Lettere ed Arti  
già dei Ricovrati e Patavina  
Volume CXXVIII (2015-2016)  
Parte III: Memorie della Classe di Scienze Morali, Lettere ed Arti



ACCADEMIA GALILEIANA DI SCIENZE LETTERE ED ARTI  
IN PADOVA  
35139 Padova - Via Accademia, 7 - Tel. 049.655249 - Fax 049.8752696  
e-mail: galileiana@libero.it - www.accademiagalileiana.it

PADOVA  
PRESSO LA SEDE DELL'ACCADEMIA

GIULIO PERUZZI

*«dell'essenza della luce sono stato sempre in tenebre»*

## **Luce e colore. Da Galileo a Einstein**

### PREMESSA

Dall'antichità e almeno fino al Rinascimento il colore era subordinato alla luce, cioè l'aspetto cromatico veniva subordinato a quello ottico. Aristotele assimila la chiarezza e l'oscurità dell'aria all'essere bianco e all'essere nero dei corpi. Inoltre, in linea con un'idea già avanzata da Empedocle, Aristotele ritiene che il bianco e il nero siano colori, e anzi sono la matrice di tutti i colori che risultano da una combinazione di bianco e nero in diverse proporzioni.

Non è un caso che a lungo i colori siano stati pensati e classificati secondo un criterio acromatico, quello della chiarezza (o brillantezza), per cui seguendo un ordinamento che va dal bianco al nero, il giallo è considerato come il colore più luminoso. E questo nonostante i colori nell'arcobaleno, distribuiti dal viola al rosso, vedano il giallo apparire nel mezzo.

### TRE SVOLTE TRA SEICENTO E OTTOCENTO

Tra il Seicento e l'Ottocento, tre fondamentali svolte inaugurano il moderno atteggiamento nei confronti del colore dal quale prenderanno avvio le ricerche nel settore.

*Una prima significativa svolta* nell'approccio ai colori si ha agli albori della scienza moderna, con l'introduzione galileiana della distinzione tra qualità primarie (oggettive) e qualità secondarie (soggettive). Riportiamo a tal proposito l'eloquente passo de *Il Saggiatore* (1623):

Per tanto io vi dico che ben sento tirarmi dalla necessità, subito che concepisco una materia o sostanza corporea, a concepire insieme ch'ella è terminata e figurata di questa o di quella figura [forma], ch'ella in relazione ad altre è grande o piccola

[dimensione], ch'ella è in questo o quel luogo [collocazione nello spazio], in questo o quel tempo [collocazione nel tempo], ch'ella si muove o sta ferma [stato di moto], ch'ella tocca o non tocca un altro corpo [contiguità], ch'ella è una, poche o molte [numero], né per veruna imaginazione posso separarla da queste condizioni; ma ch'ella debba esser bianca o rossa, amara o dolce, sonora o muta, di grato o ingrato odore, non sento farmi forza alla mente di doverla apprendere da cotali condizioni necessariamente accompagnata: anzi se i sensi non ci fussero scorta, forse il discorso o l'immaginazione per sé stessa non v'arriverebbe già mai. Per lo che vo io pensando che questi sapori, odori, colori etc., per la parte del soggetto nel qual ci par che risegano, non sieno altro che puri nomi, ma tengano solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sì che rimosso l'animale, siano levate e annichilate tutte queste qualità [...].

Ma che ne' corpi esterni, per eccitare in noi i sapori, gli odori e i suoni, si richiegga altro che grandezze, figure, moltitudini e movimenti tardi o veloci, io non lo credo.<sup>1</sup>

Nelle riflessioni galileiane il colore è uno degli aspetti della più generale questione dell'applicazione del discorso scientifico alle sensazioni, una questione che farà da sfondo anche alle ricerche successive. La difficoltà incontrata da Galileo nello studio della luce e del colore è evidente in un passo della sua lettera a Fortunio Liceti del 23 giugno 1640, in cui afferma che «dell'essenza della luce sono stato sempre in tenebre».<sup>2</sup>

Nel corso del Seicento la dottrina delle qualità primarie e secondarie serve anche a interpretare le qualità secondarie. «Tutte le qualità chiamate sensibili – scrive Hobbes – sono, nell'oggetto che le determina, i vari moti della materia, mediante i quali essa influenza diversamente i nostri organi». Quindi anche le qualità secondarie sono meccanizzate con riferimento all'oggetto che le determina. Quello che noi registriamo con i nostri sensi è una «immaginazione causata dal moto esercitato dalle cose esterne sopra i nostri occhi, orecchi e altri organi analoghi».<sup>3</sup> «Per questa via – afferma Rossi – non si giungeva solo a eliminare dalla visione scientifica del mondo ogni forma di antropomorfismo, ma si perveniva al tentativo di allargare il metodo caratteristico della filosofia meccanica dal mondo dei fenomeni naturali al mondo dei fenomeni fisiologici e psicologici. Fisiologia e psicologia tendono a diventare scienze naturali interpretabili con gli stessi metodi

(<sup>1</sup>) GALILEO GALILEI, *Opere*, volume I-XX, Barbèra, Firenze, 1968, vol. VI, pp. 347-348 e 350.

(<sup>2</sup>) G. GALILEI, *Opere*, cit., vol. XVIII, p. 208.

(<sup>3</sup>) I brani sono ripresi dal *Leviathan*, cfr. P. ROSSI (a cura di), *La rivoluzione scientifica da Copernico a Newton*, Loescher, Torino, 1973, pp. 254-255.

e sulla base degli stessi presupposti teorici che hanno dimostrato la loro straordinaria fecondità nella meccanica e nella fisica».<sup>4</sup>

*La seconda svolta* nell'interpretazione dei colori viene compiuta da Isaac Newton, la cui teoria della luce muta profondamente il rapporto tra luce e colore. Secondo Newton la luce bianca non è omogenea ma eterogenea, cioè composta da «raggi» colorati dotati di angoli di rifrazione diversi. Il numero dei diversi tipi di raggi colorati di cui la luce bianca è costituita, visualizzabile nella scomposizione operata dal prisma, è enorme se non infinito. Tuttavia Newton ritiene di poter ordinare i moltissimi colori in sette classi, corrispondenti ai colori «primari» viola, indaco, azzurro, verde, giallo, arancione, rosso: a partire da questi è possibili ricavare qualunque altro colore con una «regola abbastanza rigorosa per la pratica, sebbene non matematicamente rigorosa».<sup>5</sup>

Nel corso del Seicento molti erano stati i contributi nel settore dei colori ai quali Newton fa riferimento. Tra questi ricordiamo quelli di Robert Boyle, Robert Hooke, Cartesio che però, a differenza di Newton, pensavano al colore come a una qualità derivata dalla modificazione della luce bianca in interazione con la materia. Newton invece pensa ai colori come componenti eterne della luce (come gli atomi per la materia).<sup>6</sup>

<sup>(4)</sup> Cfr. P. ROSSI (a cura di), *La rivoluzione scientifica da Copernico a Newton*, cit., p. 241.

<sup>(5)</sup> Cfr. Proposizione VI. Problema II in I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, Dover, New York, 1979, pp. 154-158, p. 158. Va comunque detto che la costruzione proposta da Newton, in seguito nota come «cerchio dei colori», non risolve il problema di quale sia il numero dei colori primari. La somma di questi sette colori, in opportune proporzioni, produce il bianco; tuttavia Newton sostiene che solo mescolando tutti i colori (non solo sette) dello spettro di luce bianca prodotto da un prisma si può ottenere il bianco equivalente alla luce solare. Come giustificare allora quanti e quali colori possono essere definiti come primari? La «regola pratica», sulla quale torneremo, sembra ammettere diverse possibilità di ottenere il bianco tra le quali c'è anche quella di utilizzare solo due colori. È proprio a tal proposito che Newton osserva: «non riuscii mai a produrre un bianco perfetto mescolando soltanto due colori primari. Non so se può essere composto con un miscuglio di tre, presi a uguale distanza dalla circonferenza, tuttavia non dubito che il bianco possa essere fatto anche di quattro o di cinque. Ma queste sono curiosità di poco o nessun momento per la comprensione dei fenomeni della natura. Infatti, tutti i bianchi prodotti in natura sono soliti essere un miscuglio di tutti i tipi di raggi, e per conseguenza una composizione di tutti i colori» (cfr. I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, cit., pp. 156-157).

<sup>(6)</sup> Sui contributi di Newton alla teoria dei colori anche in rapporto a quelli di Boyle, Hooke e Cartesio, si veda A.R. HALL, *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks*, Clarendon Press, Oxford, 1993.

Alla base della teoria di Newton della luce e dei colori vi è un modello cosiddetto «emissivo»: la luce è costituita da fasci di particelle con proprietà distinte a seconda del colore. Dai primi esperimenti newtoniani sull'ottica, databili intorno al 1664,<sup>7</sup> alla pubblicazione della prima edizione dell'*Opticks* del 1704 passano quarant'anni. Una lunga gestazione della quale è possibile seguire le fasi attraverso i testi di alcune comunicazioni alla Royal Society e delle *Optical Lectures*, la cui stesura risale agli anni 1670-1672, ma la cui pubblicazione postuma è del 1729.<sup>8</sup> Di fatto Newton aveva sperato di riuscire a trattare l'ottica nell'ambito della meccanica dei punti materiali esposta nel suo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.<sup>9</sup> Proprio la progressiva consapevolezza della difficoltà di sviluppare compiutamente il progetto originale è la causa del ritardo della pubblicazione dell'*Opticks*. Il risultato, come osserva Hall, è che Newton relega ai margini la trattazione degli aspetti microfisici dei processi ottici e si concentra sulla illustrazione delle proprietà sperimentalmente indagate della luce.<sup>10</sup> Questo non impedisce a Newton di avanzare una serie di congetture particolarmente significative, come testimoniano le «Queries» che concludono l'*Opticks* del 1704 e che vengono via via ampliate nelle edizioni successive.<sup>11</sup>

La teoria della luce e del colore che Newton propone alla fine di questo lungo processo di revisione è assai più complessa della semplice teoria emissiva o corpuscolare che tradizionalmente gli viene attribuita. La luce è costituita da fasci di particelle, ma i moti di queste sono modulati da perturbazioni periodiche, cioè da vibrazioni di diverse lunghezze d'onda che Newton chiama *fit*.<sup>12</sup> È probabilmente il primo

(7) Cfr. *ivi*, pp. 33-45.

(8) Per i dettagli e la bibliografia rimandiamo a A.R. HALL, *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks*, cit., pp. 45-80.

(9) Non è un caso che nei *Principia*, Libro I, Sezione XIV, Newton si cimenti con alcune questioni che, come lui stesso osserva, «non sono molto dissimili dalle riflessioni e rifrazioni della luce» (cfr. trad. it., *Principi Matematici della Filosofia Naturale*, UTET, Torino, 1965, pp. 386-393: 390).

(10) Cfr. A.R. HALL, *All Was Light: An Introduction to Newton's Opticks*, cit., pp. 82-83.

(11) Cfr. *ivi*, pp. 128-129. Le «Queries» sono sedici nella prima edizione; ne vengono aggiunte sette nella prima traduzione latina del 1706; infine, nella seconda edizione inglese del 1717, che comprende anche quelle della traduzione latina, ne vengono aggiunte ancora otto, per un totale di trentuno.

(12) Il termine *fit* è mutuato dalla medicina dell'epoca dove era usato per indicare sintomatologie ricorrenti, come nel caso delle febbri intermittenti (cfr. A.E. SHAPIRO,

esempio del dualismo onda-corpuscolo col quale si confronteranno gli scienziati dei secoli successivi. Negli stessi anni in cui Newton sviluppa la sua teoria della luce e del colore, Christiaan Huygens propone una teoria alternativa nella quale la luce viene interpretata come onda nell'etere.<sup>13</sup> Tuttavia la descrizione dinamica delle onde, a differenza di quella dei punti materiali, non ha ancora a disposizione gli strumenti matematici per un suo pieno dispiegamento; anche per questo la teoria di Huygens non contiene la trattazione di fenomeni come la diffrazione, l'interferenza e i colori, che pure in seguito risulteranno cruciali per la sua ripresa e affermazione. Non è un caso quindi che si debba a Newton e non a Huygens l'idea che i vari colori derivano dalle diverse sensazioni stimulate dalle diverse vibrazioni associate ai raggi di diverso colore.<sup>14</sup>

Come avverrà anche nella meccanica, la controversia tra cartesiani e newtoniani porterà nel corso del Settecento ad accentuare alcuni aspetti dell'ottica di Newton (in particolare il modello emissivo della luce) perdendo o relegando ai margini alcune delle sue intuizioni.<sup>15</sup> La complessità della teoria originaria di Newton sarà tuttavia recuperata nella prima metà dell'Ottocento, quando l'avvento della teoria ondulatoria ne evidenzierà i limiti e le questioni lasciate incomplete, ma anche l'innegabile ricchezza di spunti.

Tra la fine del Settecento e i primi decenni dell'Ottocento, grazie anche a quel vasto movimento di idee che va sotto il nome di «scien-

---

*Huygens' "Traité de la Lumière" and Newton's "Opticks": Pursuing and Eschewing Hypotheses*, «Notes and Records of the Royal Society of London», 43: 223-47, 1989, pp. 239-240).

<sup>(13)</sup> Anche la teoria di Huygens viene elaborata in un lungo periodo di tempo e pubblicata solo nel suo *Traité de la Lumière*, Pierre van der Aa, Leiden, 1690.

<sup>(14)</sup> Scrive Newton nella *Questione 13* (numerazione dell'edizione del 1717): «I diversi tipi di raggi non producono vibrazioni di diverse grandezze, le quali a seconda della loro grandezza eccitano sensazioni di diversi colori, in maniera pressoché analoga a quella delle vibrazioni dell'aria, le quali a seconda delle loro diverse grandezze eccitano le sensazioni dei diversi suoni?» (cfr. I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, cit., p. 345).

<sup>(15)</sup> È comunque da notare che in questo contesto molte questioni vengono dibattute. Tra le più significative anche per la loro influenza sugli sviluppi successivi ricordiamo: La luce è formata da onde o da corpuscoli? I colori sono qualità oggettive (primarie) delle componenti della luce o frutto della nostra modalità percettiva? I colori osservati nello spettro della luce solare che si sommano nella luce bianca in che modo si possono mettere in relazione con i colori dei corpi e con quelli che i pittori ottengono mescolando pigmenti di diversi colori? I colori fondamentali sono davvero sette, come una certa vulgata della proposta newtoniana sembra affermare?

za romantica» o *Naturphilosophie*,<sup>16</sup> il dibattito sui colori e sulla loro percezione appassiona in misura crescente non solo gli scienziati, ma anche gli artisti (si pensi a J. M. William Turner o a Philipp Otto Runge) e i letterati (come Johann Wolfgang Goethe).

Proprio in quegli stessi anni viene inaugurata la moderna teoria del colore. Questa *terza svolta*, dopo quelle compiute da Galileo e da Newton, è costituita dalla proposta della teoria dei tre recettori presentata da Thomas Young alla Royal Society di Londra nel 1801. Della teoria di Young e delle sue radici nel dibattito settecentesco si parlerà nella prossima sezione. Qui ci limitiamo ad alcune osservazioni generali. Innanzi tutto va notato che la teoria di Young, pur essendo in seguito riconosciuta come base della moderna teoria della visione e del colore, incontra in un primo tempo non poche resistenze, specialmente nell'ambiente scientifico britannico a quell'epoca fortemente influenzato dai dettami della tradizione newtoniana. Young infatti inserisce la nuova teoria della visione all'interno della sua più generale teoria ondulatoria della luce, che si oppone alla teoria corpuscolare della luce di matrice newtoniana. Inoltre in quegli anni la questione cruciale del mescolamento dei colori risulta ancora controversa: permane infatti una certa confusione tra costituzione ottica (evidenziata dall'analisi spettrale) e proprietà cromatiche (percettive) della luce. Non è quindi strano che molti continuino a pensare, richiamandosi all'*Opticks* di Newton, che lo spettro ottenuto dalla scomposizione della luce bianca attraverso un prisma contenga sette colori primari e non tre come vorrebbe la teoria di Young.

Solo a partire dagli anni '20 dell'Ottocento la teoria dei tre recettori si diffonde in Gran Bretagna e, nei primi anni '30, Young e John Herschel suggeriscono che l'incapacità di John Dalton di vedere il rosso (da lui stesso descritta per la prima volta nel 1794 e per questo nota in seguito con il nome «daltonismo») possa essere spiegata con l'assenza o il malfunzionamento di uno dei tre recettori. Da quel momento l'indagine intorno ai colori acquista un crescente interesse anche nell'ambito delle ricerche di fisiologia e fisiopatologia ottica.

La teoria dei colori di Young verrà sviluppata a partire dalla metà dell'Ottocento da James Clerk Maxwell, Hermann Grassmann e Hermann von Helmholtz. Le loro ricerche, che saranno esposte nella sezione successiva con particolare riferimento ai contributi di Maxwell,

<sup>(16)</sup> «Scienza romantica» è il termine utilizzato da STEFANO POGGI nel suo libro *Il genio e l'unità della natura. La scienza nella Germania romantica (1790-1830)*, Il Mulino, Bologna, 2000, che illustra i caratteri di questo movimento e le sue molteplici influenze sugli sviluppi della scienza dell'epoca.

porteranno a una serie di importanti risultati che non solo confermano la teoria di Young ma inaugurano nuovi settori di ricerca. Tra gli esiti più significativi di queste ricerche vi sono: la definitiva verifica della teoria dei tre recettori; la chiarificazione delle proprietà del mescolamento dei colori (additive per i colori spettrali e sottrattive per i colori dei pigmenti); la nascita della moderna colorimetria; le prime analisi quantitative della sensibilità dei recettori alle diverse frequenze e la spiegazione della cecità da colore (a partire dal daltonismo). Senza dimenticare che la teoria ondulatoria della luce troverà nella teoria del campo elettromagnetico di Maxwell la sua più generale collocazione.

### I CONTRIBUTI DI MAXWELL

Nel 1871 Maxwell tiene una conferenza dal titolo *On colour vision* nell'ambito dei «discorsi del venerdì sera» alla Royal Institution, diventati ormai uno degli appuntamenti consueti della vita intellettuale londinese.<sup>17</sup> Sono più di vent'anni che Maxwell si occupa della visione dei colori; ha letto gran parte della letteratura sul problema a partire dagli scritti di Boyle, Newton e Berkeley, ha costruito nuovi strumenti per le indagini sperimentali e ha dato contributi originali per un approccio quantitativo alla colorimetria. Con un linguaggio semplice, adatto a un uditorio di non specialisti, Maxwell presenta alla Royal Institution una sorta di riassunto di questa sua ventennale attività di ricerca. All'inizio del suo discorso Maxwell sostiene che:

Vedere è vedere a colori, perché è soltanto mediante l'osservazione delle differenze di colore che distinguiamo le forme degli oggetti. E quando parlo di differenze di colore intendo includere anche le differenze di luminosità e gradazione.

Fu proprio alla Royal Institution, circa all'inizio del secolo, che Thomas Young fece il primo chiaro riferimento a quell'insieme di principi della visione dei colori che mi propongo di illustrare. La proposta di Young può essere sintetizzata nella seguente proposizione: noi siamo capaci di percepire tre diverse sensazioni di colore. I diversi tipi di luce eccitano in proporzioni diverse queste sensazioni, ed è tramite le diverse combinazioni di queste tre sensazioni primarie che tutta la varietà di colore visibile viene riprodotta. In questa proposizione c'è una parola su cui dobbiamo fissare la nostra attenzione. Questa parola è Sensazione. Può sembrare quasi un tru-

<sup>(17)</sup> Cfr. J. CLERK-MAXWELL, *On Colour Vision*, «Proceedings of the Royal Institution of Great Britain», 6: 260-71, 1872, riprodotto in W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1866-1879)*, volume 2, Cambridge University Press, Cambridge, 1890, pp. 267-279 (ristampa, Dover, New York, 1952-1965-2003).

ismo dire che il colore è una sensazione; eppure Young, riconoscendo onestamente questa verità elementare, stabiliva la prima teoria consistente del colore. Per quel che ne so, Thomas Young è stato il primo che, partendo dal fatto ben noto che esistono tre colori primari, ricercò la spiegazione di questo fatto, non nella natura della luce, ma nella costituzione dell'uomo.<sup>18</sup>

Nonostante la proposta di Young, prosegue Maxwell, molti hanno continuato a scrivere sui colori studiando le proprietà dei pigmenti o analizzando i raggi di luce, nella convinzione che i colori fossero qualcosa di esterno, qualcosa di fuori da noi. Tuttavia «se la sensazione che chiamiamo colore obbedisce a un qualche insieme di leggi, ci deve essere qualcosa nella nostra specifica natura che determina la forma di queste leggi; e non è necessario che vi dica che la sola evidenza che noi possiamo ottenere riguardo a noi stessi è derivata dalla consapevolezza [*consciousness*]. La scienza dei colori deve perciò essere considerata essenzialmente come una scienza della mente».<sup>19</sup> Ma parlare in senso lato di «scienza della mente» può portare in quel contesto a qualche fraintendimento. Maxwell sa bene che Hamilton, il suo maestro di logica e metafisica a Edimburgo, definisce così la filosofia e quindi aggiunge: «La scienza dei colori differisce in gran parte da quella che è chiamata scienza della mente in quanto fa largo uso delle scienze fisiche e in particolare dell'ottica e dell'anatomia. L'evidenza che essa è una scienza della mente si ricava dalle numerose illustrazioni che fornisce alle varie operazioni della mente».<sup>20</sup>

Riferendosi all'erronea convinzione che la luce blu e quella gialla mescolandosi diano luogo al verde, Maxwell afferma: «È una sorprendente illustrazione dei nostri processi mentali che molte persone siano non solo arrivate a credere, sulla base dell'evidenza della mescolanza dei pigmenti, che il blu e il giallo diano il verde, ma che esse si siano anche persuase di poter discernere le sensazioni separate dell'«azzurrità» [*blueness*] e della «giallità» [*yellowness*] nella sensazione del verde».<sup>21</sup> Sembra di leggere un ragionamento che diventerà tipico delle argomentazioni della psicologia della *Gestalt*.

Le idee espresse da Maxwell riguardo ai colori sono tra le più avanzate dell'Ottocento. Ricostruire attraverso quali tappe e con quali strumenti Maxwell arrivi alle conclusioni esposte nella sua conferenza

<sup>(18)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1866-1879)*, volume 2, cit., p. 267.

<sup>(19)</sup> *Ibid.*

<sup>(20)</sup> Cfr. *ivi*, pp. 267-268.

<sup>(21)</sup> Cfr. *ivi*, p. 269.

del 1871 ha una duplice funzione: da un lato permette di capire vari aspetti del suo approccio alla conoscenza scientifica che si ritrovano in tutta la sua opera; dall'altro fornisce l'estro per delineare i caratteri salienti di un settore della cultura ottocentesca dove scienza, arte e filosofia si intrecciano in modo particolarmente significativo.

Maxwell inizia le sue ricerche in questo campo nell'estate del 1849, quando il suo professore di filosofia naturale a Edimburgo, James Forbes, lo introduce ad alcuni esperimenti sul mescolamento dei colori. A Edimburgo, in quegli anni, un folto gruppo di studiosi si sta occupando dei colori: oltre a Forbes, ci sono David Ramsey Hay, George Wilson, William Swan e David Brewster. Hay è un pittore che, tra l'altro, pubblica nel 1845 un volume dal titolo *A Nomenclature of Colours*<sup>22</sup> illustrato da un gran numero di fogli colorati, e sarà lui a fornire a Maxwell e Forbes i fogli colorati per i loro primi esperimenti. Wilson è un chimico che studia anche le deficienze nella visione dei colori (*colour blindness*).<sup>23</sup> Swan è un fisico che conduce ricerche sull'ottica, la spettroscopia e la visione. Infine Brewster, uno dei grandi nomi dell'ottica sperimentale della prima metà dell'Ottocento, conduce le sue ricerche avendo come riferimento la teoria corpuscolare della luce di matrice newtoniana rivista alla luce delle nuove evidenze. Su questa base Brewster ritiene tra l'altro di aver dimostrato sperimentalmente l'esistenza di tre tipi fondamentali di luce distribuiti in varia proporzione nello spettro: il colore non deriverebbe quindi da una funzione fisiologica dell'occhio umano ma sarebbe una proprietà oggettiva della luce.

---

(<sup>22</sup>) D. RAMSEY HAY, *A Nomenclature of Colours, Hues, Tints and Shades, Applicable to the Arts and Natural Sciences; to Manufactures and Other Purposes of General Utility*, William Blackwood & Sons, Edinburgh, 1845.

(<sup>23</sup>) Wilson, oltre alla sua attività di chimico, si interessa di storia della scienza. Il primo contributo di Wilson in questo campo è una biografia di John Dalton pubblicata nel 1845 nella *British Quarterly Review*. È probabile che proprio questo lavoro stimoli i suoi studi sulla «cecità del colore» (su questo termine cfr. la seguente nota 55). Nel novembre del 1853 Wilson pubblica un primo articolo sul tema nel *Edinburgh Monthly Journal of Medical Science*, al quale seguono vari contributi pubblicati nei *Transactions of the Royal Scottish Society of Arts*. Tutti questi articoli vengono rieditati in un volume dal titolo *Researches on colour blindness* (cfr. G. WILSON, *Researches on colour blindness with a supplement on the danger attending the present system of railway and marine signals*, Sutherland & Knox, Edinburgh, 1855), con aggiunte e un'appendice di Maxwell (per questa cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, Cambridge University Press, Cambridge, 1890, pp. 119-125 (ristampa Dover, New York, 1952-1965-2003).

Se l'ampiezza del gruppo manifesta l'interesse crescente per la teoria dei colori, la sua composizione rivela la naturale vocazione del settore a svilupparsi col concorso di competenze disciplinari tra loro diverse. Inoltre, come testimonia la posizione non certo solitaria di Brewster, è chiaro che la tradizione newtoniana persiste nonostante ormai siano passati quasi cinquant'anni dalla proposta di Young. Sono tutti elementi che non possono non affascinare il giovane Maxwell che proprio in quegli anni inizia la sua carriera scientifica.

Il punto di partenza delle indagini di Maxwell è costituito dal problema della classificazione dei colori affrontato da Hay e Forbes. Forbes utilizza per la classificazione dei colori un diagramma a forma di triangolo equilatero, introdotto nel Settecento da Tobias Mayer e Johann Heinrich Lambert e usato poi da Young. Ponendo nei tre vertici del triangolo tre colori considerati primari, ogni punto del triangolo può essere messo in relazione con un determinato colore costituito da una diversa combinazione di questi tre colori. Questo modo di rappresentare i colori era stato sviluppato nel corso del Settecento sulla base dell'esperienza maturata dai pittori. Siccome il numero delle sostanze colorate adatte alla pittura era limitato, i pittori erano stati obbligati a produrre la molteplicità dei colori presenti in natura mescolando i pigmenti disponibili in opportune proporzioni. Da questa pratica era derivata una duplice convinzione: che esistessero colori primari (i pigmenti puri di partenza) e colori composti; che bastassero tre pigmenti per ottenere tutta la gamma di colori entro certi limiti di intensità e purezza.<sup>24</sup> Assumendo quindi che il colore sia ottenibile da un'opportuna mescolanza dei pigmenti in proporzioni fissate, l'analisi quantitativa del colore viene ricondotta alla determinazione delle quantità dei pigmenti utilizzati, in analogia con l'analisi chimica di una miscela di sostanze.<sup>25</sup>

---

(<sup>24</sup>) I tre pigmenti puri di uso comune erano il carminio (rosso), il giallo di cromo e l'oltremarino (blu). Per variare l'intensità e la purezza si mescolava la tinta neutra (grigio) ottenuta dalla miscela dei tre pigmenti primari con uno qualunque dei colori ottenuto dalla miscela di due soli colori: in tal modo si poteva disporre di tutte le diverse tonalità di quel colore.

(<sup>25</sup>) La pratica dei pittori viene codificata in forme diverse da scienziati, come Mayer e Lambert, e pittori, come Runge. Se Mayer è il primo a introdurre la rappresentazione dei colori su un triangolo, si deve a Lambert la sua riscoperta ed elaborazione. Lambert infatti, partendo dal diagramma triangolare di Mayer, propone una rappresentazione tridimensionale a forma di piramide per tener conto della variazione di tonalità dei colori. Al vertice della piramide egli pone il bianco, alla base il triangolo dei colori di massima intensità; le sezioni triangolari intermedie, di dimensioni via via decrescenti, contengono

Il primo obiettivo di Maxwell e Forbes è quello di riuscire a ottenere un'espressione quantitativa della combinazione dei colori più soddisfacente di quelle fino allora disponibili. Con questo intento i due scienziati conducono, a partire dagli anni 1848-1849, una prima serie di esperimenti consistente nell'osservazione dei colori che si producono utilizzando una «comune trottola» nella quale un «asse, la cui estremità inferiore è conica, sostiene un piatto circolare» [cfr. in FIG. 1 *d*].<sup>26</sup> Sul piatto circolare sono fissati dei dischi di carta di diversi colori, concentrici e dello stesso diametro. Ognuno di questi dischi è dotato di un taglio radiale che permette di incastrarli e farli ruotare gli uni sugli altri in modo da formare un unico cerchio diviso in settori circolari di colori diversi [cfr. in FIG., *a* e *b*]. Le ampiezze dei settori circolari, che possono essere variate di volta in volta ruotando i dischi, vengono misurate con riferimento a una scala graduata posta sul bordo del piatto [cfr. in FIG. 1 *c*]. «Quando il sistema di dischi è messo in rapida rotazione, i settori di colori diversi diventano indistinguibili, e il loro insieme appare di un unico colore uniforme», la cui composizione può essere determinata misurando sulla scala graduata l'ampiezza dei vari settori circolari corrispondenti ai diversi colori sul

---

colori sempre più chiari fino al bianco del vertice. Tuttavia, permanendo la confusione tra costituzione ottica e cromatica del colore, questi diagrammi fanno uso della triade dei colori dei pittori (rosso, giallo, blu) e non dei colori dello spettro della luce bianca. Se il modello triangolare di Mayer e Lambert è il modello di riferimento in ambito scientifico, nell'ambiente dei pittori uno dei modelli più significativi è quello introdotto da Runge, che nel 1810 rappresenta i colori su una sfera nel suo lavoro *Die Farbenkugel* (cfr. P.O. RUNGE, *Die Farbenkugel oder Konstruktion des Verhältnisses aller Mischungen der Farben zu einander, und ihrer vollständigen Affinität, mit angehängtem Versuch einer Ableitung der Harmonie in den Zusammenstellungen der Farben*, Friedrich Perthes, Hamburg, 1810). A differenza dei lavori di Mayer e Lambert, i contributi di Runge sono ispirati alla «scienza romantica», come attestano anche i suoi scambi epistolari con Goethe. Ed è da qui, da questo intreccio di motivi scientifici, artistici e mistici, che trae origine la proposta di Runge di una forma sferica del modello e l'utilizzo della triade dei colori dei pittori in opposizione alla costituzione ottica della luce. I due poli della sfera sono colorati rispettivamente di bianco e di nero; i tre colori fondamentali rosso, giallo e blu, e i loro intermedi, gradazioni di arancione (tra giallo e rosso), gradazioni di verde (tra giallo e blu), gradazioni di viola (tra rosso e blu), sono rappresentati nella loro purezza sul perimetro dell'equatore; tutti gli altri punti, sulla superficie della sfera o al suo interno, rappresentano le diverse mescolanze e tonalità.

<sup>(26)</sup> Cfr. J. CLERK-MAXWELL, *Experiments on Colour, as perceived by the Eye, with remarks on Colour-Blindness*, «Transactions of the Royal Society of Edinburgh», 21: 275-98, 1855, riprodotto in W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 126.

disco.<sup>27</sup> Come Forbes ha già in precedenza osservato, se si utilizzano tre dischi con i colori della «triade dei colori dei pittori» (rosso, giallo e blu), comunque si aggiusti l'ampiezza dei settori, il colore risultante non è un colore neutro (grigio) ma una sfumatura del rosso. Vengono quindi scelti come colori primari il rosso vermiglio (V = *vermilion*), l'azzurro oltremare (U = *ultramarine*) e il verde smeraldo (EG = *emerald green*).<sup>28</sup>

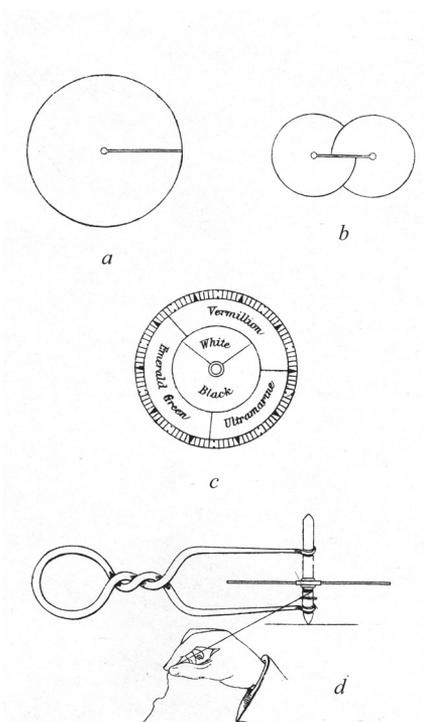


FIG. 1 - Illustrazione del funzionamento della trottoia dei colori e del modo di disporre i fogli colorati sul disco tratta dall'articolo originale di Maxwell del 1855 (cfr. J. Clerk-Maxwell, *Experiments on Colour, as perceived by the Eye, with remarks on Colour-Blindness*, «Transactions of the Royal Society of Edinburgh», 21: 275-98, 1855, riprodotto in W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 126-54, la tavola si trova alla fine dell'articolo).

<sup>(27)</sup> *Ibid.*

<sup>(28)</sup> Vale la pena notare che l'attuale sistema RGB (acronimo per red-green-blue), utilizzato per la descrizione additiva dei colori degli schermi di televisori o computer, deriva proprio da questi studi sui colori.

Queste ricerche subiscono una battuta d'arresto a causa di una malattia di Forbes e della partenza di Maxwell per Cambridge. Solo nel 1854, dopo aver superato i *Mathematical Tripos*, Maxwell riprende in modo sistematico le sue indagini. Come primo passo Maxwell modifica la trottola dei colori sovrapponendo alla prima serie di dischi colorati una seconda serie di dischi colorati concentrici di diametro più piccolo, in modo da ottenere un secondo cerchio formato da settori circolari di altri colori rispetto a quelli del cerchio più grande [cfr. FIG. 1 c]. Lo scopo di questa modifica è duplice. In primo luogo è possibile realizzare un confronto tra il colore ottenuto sul cerchio grande e il colore ottenuto sul cerchio piccolo derivanti da combinazioni di colori diverse. In secondo luogo, fissando l'attenzione sulle proporzioni di diversi colori che rendono il colore del cerchio esterno uguale a quello del cerchio interno, è possibile fare un confronto quantitativo tra i risultati ottenuti con osservatori diversi. In altri termini è possibile misurare, entro certi limiti, l'intervallo di variabilità della percezione del colore da parte di diversi soggetti.

I risultati di queste esperienze vengono presentati da Maxwell in una relazione alla Royal Society di Edimburgo il 19 marzo 1855. Riprendiamo da questa un brano che esemplifica le deduzioni quantitative che Maxwell ricava dai suoi esperimenti, ed evidenzia al contempo la preoccupazione di tenere sotto controllo, per quanto possibile, le procedure seguite al fine di una effettiva riproducibilità dei risultati.

Dopo aver posto i dischi di questi tre colori [V, U ed EG] sul piatto circolare della trottola e i dischi più piccoli di bianco [SW = *snow white*] e nero [Bk = *Ivory Black*] sopra a essi, l'operatore deve mettere in rotazione la trottola e domandare l'opinione dell'osservatore riguardo alla relazione tra l'anello esterno e il cerchio interno. Gli verrà detto, a seconda dei casi, che il cerchio esterno è troppo rosso, troppo blu, o troppo verde, e quello interno è troppo chiaro o troppo scuro comparato a quello esterno. Si procederà quindi a successivi aggiustamenti in modo da rendere il colore risultante del cerchio esterno il più vicino possibile a quello interno. Talvolta l'osservatore vedrà il cerchio interno colorato del colore complementare di quello esterno. In questo caso l'operatore deve interpretare l'osservazione in riferimento al cerchio esterno, poiché il cerchio interno contiene solo il nero e il bianco.

Con un po' di esperienza l'operatore imparerà come formulare le sue domande e come interpretare le risposte. Durante gli esperimenti, l'osservatore non dovrebbe guardare i fogli colorati e neppure essere informato sulle proporzioni dei colori. Una volta fatti questi aggiustamenti i colori risultanti del cerchio esterno e di quello interno dovrebbero essere perfettamente indistinguibili quando la trottola ha una velocità di rotazione sufficiente. Il numero di divisioni spaziate dai diversi settori circolari colorati deve allora essere letto sul bordo del piatto e registrato sotto forma di

un'equazione. I numeri ottenuti da un esperimento con i colori sopra citati eseguito il 6 marzo 1855 alla luce del giorno, senza sole, sono:

$$0.37V+0.27U+0,36EG = 0,28SW+0,72Bk.^{29}$$

È particolarmente evidente nel brano l'attenzione di Maxwell per questioni relative a quella che oggi chiameremmo psicologia della visione, nella quale l'aspetto quantitativo incontra quello soggettivo. Ne emerge la consapevolezza epistemologica che l'approccio scientifico ai problemi della percezione richiede un'attenta considerazione della dimensione soggettiva. Maxwell sa bene che le equazioni colorimetriche sono davvero significative se si ha cura di circoscrivere e controllare l'inevitabile elemento soggettivo. Un obiettivo che egli ritiene di poter ottenere tramite esperienze ripetute con lo stesso osservatore e con osservatori diversi, e tramite accorgimenti come quello di non influenzare gli osservatori facendogli vedere tavole colorate prima degli esperimenti.

I dati ottenuti dagli esperimenti, registrati sotto forma di equazioni, permettono a Maxwell di trarre tre conclusioni:

1°. Che l'occhio umano è capace di stimare la somiglianza dei colori con una precisione che in alcuni casi è molto grande.

2°. Che il giudizio così formato è determinato non dalla reale identità dei colori, ma da una causa che risiede nell'occhio dell'osservatore.

3°. Che gli occhi di osservatori diversi variano in accuratezza, ma concordano tra loro così strettamente da non lasciare alcun dubbio che la legge della visione del colore è identica per tutti gli occhi normali.<sup>30</sup>

Una volta accertata l'attendibilità delle equazioni colorimetriche come traduzione matematica della visione del colore, Maxwell introduce un metodo generale per la loro manipolazione che gli permette di arrivare alla giustificazione delle leggi fondamentali della percezione dei colori. La sua proposta tiene conto non solo dei contributi di Newton e di Young, ma anche dei lavori di von Helmholtz e di Grassmann,

(<sup>29</sup>) Cfr. *ivi*, p. 128. Vale forse la pena chiarire il significato della formula colorimetrica ricavata da Maxwell. Nell'anello esterno il settore rosso (*V*) misura 37 unità su cento della scala graduata, il blu (*U*) 27 su cento e il verde (*EG*) 36 su cento. Quando la trottola è messa in rotazione, la sovrapposizione di queste tre percentuali dei colori primari genera un colore neutro uguale al colore ottenuto sul cerchio più piccolo dalla sovrapposizione di 28 unità su cento di bianco (*SW*) e di 72 unità su cento di nero (*Bk*).

(<sup>30</sup>) Cfr. *ivi*, p. 130.

che segnano all'inizio degli anni 1850 un significativo avanzamento degli studi nella visione dei colori.

Helmholtz pubblica nel 1852 negli *Annalen der Physik* un articolo dal titolo «Sulla teoria dei colori composti»<sup>31</sup> in cui rileva, tra l'altro, che la sovrapposizione del giallo e del blu dello spettro luminoso non produce il verde.<sup>32</sup> Proprio questa osservazione permette a Helmholtz di concludere, negli stessi anni in cui anche Maxwell e Forbes arrivano indipendentemente al medesimo risultato, che il mescolamento dei colori dello spettro luminoso è un processo additivo, mentre il mescolamento dei pigmenti è un processo di sottrazione legato all'assorbimento dei colori da parte delle sostanze pigmentate. È un risultato importante che chiarisce definitivamente una questione centrale della teoria dei colori che, come abbiamo visto, era stata a lungo controversa.

Helmholtz, autore tra il 1856 e il 1866 del fondamentale *Manuale di Ottica Fisiologica*,<sup>33</sup> è sicuramente uno degli scienziati che maggiormente hanno contribuito nel corso dell'Ottocento agli sviluppi dell'ottica fisiologica a partire dalla teoria di Young. Ma nel suo articolo del 1852 la teoria dei tre recettori non è ancora chiaramente accettata: Helmholtz infatti considera necessari almeno cinque colori primari per riprodurre i colori dello spettro, osservando in subordine che se «ci si vuole limitare a tre colori sarebbe meglio scegliere quei tre colori semplici che meno si lasciano imitare, cioè il rosso, il verde

<sup>(31)</sup> L'articolo originale H. VON HELMHOLTZ, *Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben*, «Annalen der Physik» 87: 45-66, 1852 viene tradotto in inglese e pubblicato lo stesso anno col titolo *On the Theory of Compound Colours*, «Philosophical Magazine», 4: 519-534, 1852.

<sup>(32)</sup> A una conclusione analoga era giunto indipendentemente anche Forbes nel 1849 in alcuni esperimenti condotti insieme a Maxwell. In realtà Forbes era partito dalla convinzione, all'epoca comunemente accettata, che blu e giallo mescolati producessero verde, tuttavia ulteriori esperienze condotte in quell'anno lo portano alla conclusione corretta, anticipando i risultati pubblicati da Helmholtz. Maxwell, che pure ha assistito agli esperimenti, non ricorda la successione degli avvenimenti al momento della sua comunicazione del 1855. Questo fatto genera una serie di scambi epistolari tra Forbes e Maxwell che portano quest'ultimo ad aggiungere una nota (Nota I, 6) nel testo a stampa della sua comunicazione del 1855 (cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 145-146). Tutta la vicenda è ricostruita in una lettera di Maxwell a Forbes del maggio del 1855 (cfr. P. HARMAN (a cura di), *The Scientific Letters and Papers of James Clerk Maxwell (1846-1862)*, volume I, Cambridge University Press, Cambridge, 1990, pp. 300-303).

<sup>(33)</sup> I tre volumi vengono pubblicati in un unico tomo nel 1867, H. VON HELMHOLTZ, *Handbuch der Physiologischen Optik*, Leopold Voss, Leipzig, 1867.

e il violetto». <sup>34</sup> Helmholtz passerà definitivamente alla teoria dei tre recettori solo dopo l'uscita dell'articolo di Grassmann nel 1853 «Sulla teoria del mescolamento dei colori», <sup>35</sup> e del contributo di Maxwell del 1855. Nel suo articolo Grassmann sostiene che «ogni impressione di colore può essere analizzata utilizzando tre elementi matematicamente determinabili: il colore, l'intensità del colore e l'intensità del bianco che vi è mescolato». <sup>36</sup>

La sintesi proposta da Maxwell parte proprio dall'ipotesi che «la natura del colore possa essere considerata come dipendente da *tre* variabili, come, per esempio [nell'esperienza della trottola sopra riportata], la “rossità” (*redness*), la “bluità” (*blueness*) e la “verdità” (*greenness*). Questo è confermato dal fatto che qualunque colore può essere imitato mescolando solamente rosso, blu e verde, purché il colore non superi una certa brillantezza». <sup>37</sup> Ma vi è anche un altro modo, prosegue Maxwell, per mostrare che il colore è funzione di tre variabili, ed è quello seguito da Grassmann, che distingue i colori attraverso la gradazione o tonalità (*shade*), il colore spettrale (*hue*) e il grado di saturazione (*tint*). <sup>38</sup>

Questi due diversi sistemi di tre variabili che definiscono il colore «possono essere dedotti l'uno dall'altro» e le loro mutue relazioni possono essere espresse in modo «numerico esatto». <sup>39</sup> Su questa base allora, secondo Maxwell, il modo migliore di rappresentare i colori sarebbe quello di utilizzare i punti di uno spazio tridimensionale le cui coordinate siano proporzionali ai tre elementi del colore. «Ma poiché un metodo in cui le operazioni sono limitate a uno spazio bi-

<sup>(34)</sup> Cfr. H. VON HELMHOLTZ, *On the Theory of Compound Colours*, cit., pp. 532-533.

<sup>(35)</sup> L'articolo originale, H. GRASSMANN, *Zur Theorie der Farbmischung*, «Annalen der Physik», 89: 69-84, 1853, viene tradotto in inglese l'anno successivo, *On the Theory of Compound Colours*, «Philosophical Magazine», 7: 254-264, 1854.

<sup>(36)</sup> Cfr. H. GRASSMANN, *On the Theory of Compound Colours*, cit., p. 255.

<sup>(37)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 131.

<sup>(38)</sup> Maxwell definisce così queste tre variabili: «Un altro modo di dimostrare che il colore dipende da *tre* cose è quello di considerare il modo in cui due colori, per esempio due lilla, possono differire. In primo luogo, uno può essere più chiaro o più scuro dell'altro, cioè i colori possono differire in tonalità o gradazione (*shade*). In secondo luogo, uno può essere più blu o più rosso dell'altro, cioè questi possono differire nel colore spettrale (*hue*). In terzo luogo, uno può essere più o meno *deciso* nel suo colore; esso può variare dalla purezza da un lato, alla neutralità dall'altro. Questo aspetto è talvolta espresso dicendo che essi differiscono nel grado di saturazione o purezza (*tint*)» (cfr. *Ibid.*).

<sup>(39)</sup> Cfr. *Ibid.*

dimensionale è preferibile a quello che richiede spazi tridimensionali, si considererà per il momento solo quello che per convenienza è stato adottato, fondato sul cerchio dei colori di Newton e sul triangolo di Mayer e Young». <sup>40</sup>

Pur segnalando l'importanza e i limiti del modello del cerchio di Newton, Maxwell non lo descrive esplicitamente nel corpo dell'articolo nel quale si concentra sul modello triangolare. Ma evidentemente ritiene che non tutti sappiano esattamente di cosa si tratti. Per questo, in una nota all'articolo del 1855, Maxwell espone nel dettaglio il metodo della composizione dei colori di Newton. Vale la pena di leggere la sua descrizione, non solo perché illustra chiaramente il modello di Newton, oggi poco noto e spesso mal interpretato, ma anche perché rende più perspicue le sue successive considerazioni.

Il teorema di Newton sul mescolamento dei colori si trova nell'*Opticks*, Libro I, Parte II, Proposizione VI. *In una miscela di colori primari, data la quantità e la qualità di ognuno, trovare il colore del composto.* <sup>41</sup>

Egli divide la circonferenza del cerchio in parti proporzionali ai sette intervalli musicali, in accordo con la sua opinione della divisione dello spettro. Concepisce quindi i colori dello spettro disposti sul perimetro del cerchio, e nel centro di gravità di ognuno dei sette archi pone un cerchietto, la cui area rappresenta il numero di raggi del colore corrispondente che entrano in un dato colore composto. Prende quindi il centro di gravità di tutti questi cerchi come il punto [z] che rappresenta il colore formato da una data mescolanza di colori. Il colore spettrale [hue] è determinato tracciando la linea dal centro del cerchio attraverso questo punto [z] fino alla circonferenza. La posizione di questa linea [il punto Y che questa intercetta sulla circonferenza] indica il colore dello spettro che più si avvicina alla miscela, e la distanza del colore risultante [z] dal centro determina la pienezza del suo colore [cfr. FIG. 2]. <sup>42</sup>

Newton, tramite questa costruzione (della quale non fornisce spiegazione), mostra chiaramente di aver considerato possibile trovare un punto nel cerchio corrispondente a ogni possibile colore. <sup>43</sup>

<sup>(40)</sup> Cfr. *Ibid.*

<sup>(41)</sup> Cfr. I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, cit., pp. 154-158.

<sup>(42)</sup> Le lettere z e Y sono riprese dalla figura che compare nell'*Opticks* di Newton, cfr. I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, cit., p. 155.

<sup>(43)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 149.

La costruzione del diagramma circolare fatta da Newton, come osserva Maxwell, è sicuramente un'indicazione importante del metodo da seguire per la composizione dei colori in analogia con il calcolo

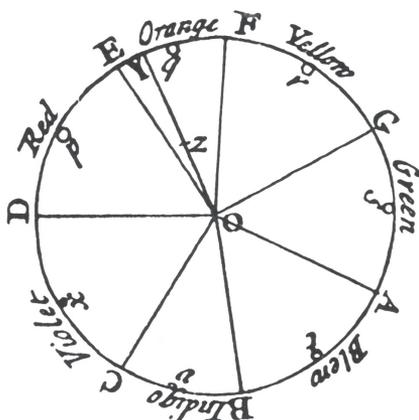


FIG. 2 - Il cerchio di Newton come compare nell'*Opticks* di Newton (cfr. I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, cit., p. 155), con indicati i tratti salienti della costruzione geometrico-fisica che gli permette di trovare un punto nel cerchio corrispondente a ogni possibile colore.

dei baricentri delle masse.<sup>44</sup> Tuttavia lo stesso colore può essere ottenuto componendo i colori dello spettro in un'infinità di modi diversi. L'identità apparente di tutte queste miscele, che pure sono otticamente diverse, come dimostra la scomposizione tramite un prisma, implica l'esistenza di una qualche legge della visione che Newton non esplicita. Se la legge cercata è legata alla triplice natura della sensazione del colore, allora il diagramma più appropriato è quello triangolare, non a caso usato da Young. In tal modo, osserva Maxwell, si supera anche l'arbitrarietà insita nel modello di Newton:

(<sup>44</sup>) Maxwell trova qui un autorevole esempio di uso dell'analogia come chiave di volta per condurre in parallelo ricerche in settori diversi e per tessere una trama unitaria del sapere, che facilita lo sviluppo della scienza rendendo fruibili i progressi fatti in un settore per avanzare più speditamente in un altro. Egli non solo apprezza l'analogia usata da Newton, ma la approfondisce dandone una definizione quantitativa più chiara e generale.

Newton che fu il primo a dimostrare la reale esistenza di una serie di tipi di luce, innumerevoli eppure tutti perfettamente distinti, fu anche il primo a proporre un metodo per calcolare l'effetto della mescolanza dei vari raggi colorati; e questo metodo è sostanzialmente lo stesso di quello che abbiamo appena verificato. È vero che le istruzioni da lui date per la costruzione del suo cerchio dei colori sono piuttosto arbitrarie, essendo probabilmente intese soltanto come un'indicazione della natura generale del metodo, ma il metodo stesso è matematicamente riducibile alla teoria dei tre elementi della sensazione del colore.<sup>45</sup>

Dal brano ora citato emerge chiaramente che Maxwell interpreta il suo lavoro come continuazione e completamento del lavoro di Newton sui colori. E lo stesso fanno, con accenti diversi, Helmholtz e Grassmann. Non è solo un riconoscimento formale a un grande scienziato, già all'epoca considerato un'icona della scienza moderna, ma la consapevolezza che la teoria proposta da Newton è molto più ricca di quella che si è andata consolidando nelle posizioni dei newtoniani. I tre scienziati sono convinti che il contributo di Newton alla comprensione della luce e dei colori non venga accantonato dall'affermarsi della teoria ondulatoria e delle sue verifiche sperimentali. Al contrario la teoria ondulatoria permette di superare alcune inconsistenze presenti nell'*Opticks*, rispondendo al contempo ad alcune delle "Queries" che Newton aveva lasciate aperte alla fine della sua opera.<sup>46</sup>

Nel caso della composizione del colore si può quindi applicare il metodo usato da Newton nella rappresentazione circolare con sette colori, adattandolo alla rappresentazione tramite il diagramma triangolare. Si recupera in tal modo la parte saliente del contributo newtoniano eliminando la scelta arbitraria del numero di variabili in gioco. Come scrive Maxwell: «Il rosso vermiglio [*V*], il blu oltremare [*U*] e il verde smeraldo [*EG*], presi (per convenienza) come colori primari, sono concepiti essere rappresentati da tre punti, presi (per convenienza) ai tre vertici di un triangolo equilatero. Ogni colore composto di questi tre deve essere rappresentato da un punto la cui posizione si ricava immaginando delle masse proporzionali alle diverse componenti del colore collocate nei rispettivi vertici e calcolando il centro di gravità delle tre masse. In tal modo ogni colore indicherà con la sua posizione

<sup>(45)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 135.

<sup>(46)</sup> Questa riscoperta di Newton, anche in chiave di critica alla tradizione newtoniana consolidata, sarà uno degli elementi che connoterà le ricerche di molti scienziati nel corso dell'Ottocento, e in particolare quelle di Michael Faraday e di Maxwell nell'ambito dei fenomeni elettrici, magnetici e ottici.

le proporzioni degli elementi dei quali è composto. L'intensità totale deve essere misurata dal numero complessivo di divisioni del  $V$ ,  $U$  ed  $EG$  del quale è composto». <sup>47</sup> I coefficienti numerici delle equazioni colorimetriche permettono così di esprimere con precisione la regola dei baricentri enunciata da Newton, eliminando sia l'arbitrarietà del numero dei colori primari, <sup>48</sup> sia il riferimento erroneo alla composizione di quantità ponderali di pigmenti. <sup>49</sup>

La rappresentazione sulla varietà tridimensionale  $V$ ,  $U$ ,  $EG$ , osserva Maxwell, può essere trasformata nella rappresentazione tridimensionale di Grassmann che usa come variabili il colore spettrale, il grado di saturazione e la tonalità. Nel caso del diagramma triangolare, se si indica con  $w$  il punto del triangolo in cui si colloca la tinta neutra, allora il colore spettrale è rappresentato dalla «posizione angolare rispetto a  $w$ » [definita tramite le semirette che partono da  $w$  e incontrano i punti a partire dal rosso], il grado di saturazione «è espresso dalla distanza da  $w$ », e la tonalità è data dal «coefficiente [numerico che Maxwell ricava dalla sua formulazione matematica]». <sup>50</sup> In conclusione, «la relazione tra i due metodi per ridurre a tre gli elementi del colore diventa materia della geometria». <sup>51</sup>

Avendo in tal modo ricavato le leggi fondamentali della composizione dei colori, Maxwell ne discute le conseguenze nell'ambito della teoria della percezione. Seguendo Young, Maxwell afferma che il fatto che la composizione dei colori dipenda da tre variabili non può essere

<sup>(47)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 131-132.

<sup>(48)</sup> I sette colori fondamentali indicati da Newton risultano di fatto sovrabbondanti rispetto alle variabili da cui dipende la percezione dei colori.

<sup>(49)</sup> Maxwell illustra i dettagli del suo metodo di manipolazione delle equazioni colorimetriche nell'articolo del 1855, dove si introducono fattori correttivi che tengono conto dell'intensità del bianco. Il risultato finale è la riduzione delle relazioni dei colori alla geometria e alle proporzioni tra coefficienti numerici opportunamente rinormalizzati (cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 132-134).

<sup>(50)</sup> «Se esaminiamo», commenta infatti Maxwell, «i colori rappresentati dai differenti punti che giacciono su una delle linee che parte da  $w$ , troveremo il colore più puro e deciso verso la sua estremità più esterna, e il colore sempre più pallido che si approssima al colore neutro avvicinandosi a  $w$ . Se poi esaminiamo anche i coefficienti associati a ogni colore, troveremo che i colori più brillanti e luminosi hanno coefficienti espressi da numeri più alti di quelli relativi a colori scuri» (cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 135).

<sup>(51)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 135. Vale la pena notare che Maxwell non si spinge, come invece

giustificato dalla teoria della luce, quindi la sua causa deve essere ricercata nella costituzione dell'occhio, nel quale devono trovarsi tre diversi recettori del colore. Non bisogna tuttavia credere, mette in guardia Maxwell, che ognuno di questi recettori trasmetta al cervello le informazioni di lunghezza o frequenza di una determinata radiazione luminosa. Ogni recettore viene stimolato più o meno dalle radiazioni luminose, con una predisposizione maggiore alle frequenze di una certa regione dello spettro, ma non per questo risultando insensibile alle altre frequenze.<sup>52</sup>

La stessa cosa, osserva Maxwell, avviene utilizzando un vetro rosso: questo certamente trasmette completamente i raggi rossi ma allo stesso tempo lascia passare, se pure in quantità ridotte, anche quelli di altri colori. L'osservazione suggerisce a Maxwell una dimostrazione di questa teoria dei colori per mezzo di un esperimento ipotetico che ha a che fare con «l'arte della fotografia».

Una lastra di vetro rosso sia posta di fronte a una macchina fotografica e venga presa un'immagine. Il positivo di questa sarà trasparente in tutte le zone dove la luce rossa è stata dominante nel paesaggio, e opaca dove è stata assente. Mettiamo ora l'immagine in una lanterna magica insieme alla lastra di vetro rosso, e un'immagine rossa sarà proiettata sullo schermo.

Questa operazione sia ripetuta con una lastra di vetro verde e una di vetro violetto, e per mezzo di tre lanterne magiche le tre immagini vengano sovrapposte sullo schermo. Il colore di ogni punto dello schermo dipenderà allora da quello del corrispondente punto del paesaggio; e, aggiustando opportunamente le intensità delle luci, ecc., una copia completa del paesaggio, per quel che concerne i suoi colori visibili, sarà proiettata sullo schermo. L'unica differenza apparente consisterà nel fatto che l'immagine riprodotta sarà più attenuata, o meno pura nel colore, rispetto all'originale. Qui, tuttavia, siamo in presenza del fatto che il processo viene riprodotto due volte – prima sullo schermo e poi sulla retina.

Questa illustrazione mostrerà come le funzioni che Young attribuisce ai tre sistemi di nervi possano essere imitate da un apparecchio ottico. Non è quindi ne-

---

faranno Riemann e Helmholtz, a interpretare in termini non-euclidei la geometria dello spazio dei colori (cfr. B. RIEMANN, *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen*, «Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen», 13, 1867; trad. it., *Bernhard Riemann: Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria e altri scritti scientifici e filosofici*, Bollati Boringhieri, Torino, 1994, pp. 3-20, p. 5, e H. VON HELMHOLTZ, *Über die Thatsachen, die der Geometrie zu Grunde liegen*, «Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen», 14: 193-221, 1868 (trad. it., *Hermann von Helmholtz: Opere*, UTET, Torino, 1988, pp. 421-444: 424).

<sup>(52)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 136.

cessario cercare una connessione diretta tra le lunghezze delle onde dei vari raggi di luce e le sensazioni che noi percepiamo, poiché la triplice partizione delle proprietà della luce può essere effettuata con mezzi fisici.<sup>53</sup>

Il problema è allora quello di trovare un modo per studiare il comportamento dei recettori del colore. Il fatto che esperimenti condotti su diversi individui diano risultati omogenei indica chiaramente che esiste un qualche apparato anatomico identico per tutti. Per capire come questo apparato funziona, scrive Maxwell, la dissezione non è utilizzabile. In mancanza quindi di dati certi sul funzionamento dei singoli recettori, Maxwell fa uso dei risultati indiretti che provengono dagli studi su soggetti affetti da anomala percezione del colore, suggerendo, come già avevano fatto Young e Herschel, che i difetti di percezione del colore possano essere spiegati dall'assenza o dal funzionamento difettoso di uno o più recettori del colore. Gli studi condotti da Wilson sulla «cecità del colore» (*Colour-Blindness*) sono in questo contesto un importante punto di riferimento per il giovane scienziato.

---

<sup>(53)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 136-137. L'esperimento ipotizzato da Maxwell nell'articolo del 1855 sarà da lui realizzato alla Royal Institution il 17 maggio del 1861 (cfr. J. CLERK-MAXWELL, *On the Theory of Three Primary Colours*, «Proceedings of the Royal Institution of Great Britain», 3: 370-374, 1858-1862, riprodotto in W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 445-450: 449). Con l'aiuto del fotografo Thomas Sutton, suo collega al King's College, Maxwell ottiene tre fotografie con tre filtri diversi, rosso, verde e blu, di una coccarda di tartan, il tipico tessuto scozzese a quadri di diversi colori. I tre filtri utilizzati, sia per ricavare le fotografie sia per proiettarle in sovrapposizione sullo schermo con le lanterne magiche, erano costituiti da soluzioni di solfocianuro di ferro (rosso), cloruro di rame (verde) e ammoniaco di rame (blu). Nonostante testimonianze dirette avvalorassero la riuscita dell'esperimento, molti dubbi sono stati sollevati in seguito su come effettivamente Maxwell fosse riuscito a ottenere questo primo esempio di fotografia a colori in tricromia. Infatti l'emulsione utilizzata da Sutton e Maxwell è risultata del tutto insensibile alla luce rossa. In realtà, come è stato dimostrato nel 1960 da un gruppo di scienziati che lavoravano nei laboratori di ricerca della Kodak, l'emulsione fotografica era sensibile alla radiazione ultravioletta riflessa dal rosso della coccarda di tartan e trasmessa dal filtro e dalle lenti della fotocamera, che per l'appunto erano trasparenti in quella banda di frequenze. Una serie di coincidenze fortuite che hanno permesso a Maxwell di ottenere il risultato cercato (cfr. C.W. FRANCIS EVERITT, *James Clerk Maxwell: Physicist and natural Philosopher*, Charles Scribner's Sons, New York, 1975, pp. 71-72 e C. DOUGAL, C.A. GREATED, A.E. MARSON, *Then and now: James Clerk Maxwell and colour*, «Optics & Laser Technology», 38: 210-218, 2006, pp. 215-216).

Wilson, come Maxwell ricorda nel suo articolo,<sup>54</sup> ha descritto un gran numero di casi di cecità del colore che possono grosso modo essere catalogati in due tipologie: la prima riguarda individui che manifestano una generale difficoltà nell'apprezzare i colori; la seconda concerne individui che evidenziano maggiori errori di giudizio per colori che si avvicinano al rosso e al verde e minori difficoltà per colori vicini al blu e al giallo (daltonismo).<sup>55</sup> Proprio questa seconda tipologia più definita di cecità del colore può supportare l'ipotesi che gli individui che ne sono affetti siano insensibili alla luce rossa, in altri termini abbiano uno dei recettori del colore assente o difettoso. Questa ipotesi è in accordo col fatto che gli oggetti rossi appaiono più scuri a soggetti daltonici di quanto non appaiano a soggetti normali.

Le equazioni colorimetriche permettono a Maxwell di corroborare l'ipotesi con risultati numerici. In questo caso per le osservazioni con la trottola dei colori non sono più necessari i cinque colori utilizzati in precedenza (*R*-rosso, *G*-verde, *B*-blu, *W*-bianco e *Bk*-nero), ma solo quattro (viene eliminato il bianco). Per esempio, la media di varie osservazioni fornisce a Maxwell il seguente risultato:

$$0,19G + 0,05B + 0,76Bk = 1,00R.^{56}$$

In altri termini, l'equazione esprime il fatto che in un individuo daltonico una miscela di verde e blu, resa particolarmente scura dal nero, è equivalente a un rosso pieno. Manipolando le equazioni così ottenute con il metodo già illustrato nel caso di individui normali, Maxwell riesce a determinare il punto, da lui indicato con *D*, che corrisponde al colore non visibile al daltonico. Questo punto, scrive Maxwell, rappresenta la «pura sensazione» che è sconosciuta al daltonico (il rosso).<sup>57</sup>

<sup>(54)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 137.

<sup>(55)</sup> Questo secondo tipo di cecità del colore è oggi comunemente chiamata daltonismo. All'epoca ci fu una certa discussione sull'opportunità di usare il termine «daltonismo», tanto che in Inghilterra si preferì a lungo il termine di «cecità del colore», perché daltonismo veniva utilizzato spesso in riferimento alla proposta di Dalton dell'esistenza di atomi chimici indivisibili. In quanto segue useremo per brevità il termine daltonico, mantenendo il termine «cecità del colore» solo per i titoli degli articoli e dove sussista un'ambiguità referenziale.

<sup>(56)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 138.

<sup>(57)</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 139.

L'accuratezza dei risultati ottenuti e la loro corrispondenza con le osservazioni, afferma Maxwell, è un'indicazione particolarmente significativa a favore del fatto che l'ipotesi della mancanza di un recettore nel caso dei daltonici può essere un ottimo punto di partenza per capire questo tipo di cecità del colore. Inoltre essa ci fornisce informazioni sulla visione normale: il punto *D* rappresenta infatti un colore che deve essere aggiunto all'individuo daltonico per ottenere la visione usuale, in altri termini ci dice che uno dei recettori del soggetto normale ha una sensibilità particolarmente acuta in quella zona dello spettro.<sup>58</sup> «Non sono a conoscenza, conclude Maxwell, di un metodo per determinare con un processo conforme alle leggi della visione la natura delle altre due sensazioni, sebbene le ragioni che hanno condotto Young ad adottare qualcosa di simile al verde e al violetto mi sembrano degne di attenzione».<sup>59</sup>

L'articolo del 1855 contiene tutti gli elementi della teoria della visione dei colori di Maxwell alla quale questi continuerà a lavorare anche negli anni successivi, acquisendo nuovi risultati sperimentali sia sulla percezione normale e daltonica, sia sulla diversa sensibilità ai colori dimostrata dalle varie parti della retina. Da notare che a partire dal 1852 le esperienze con la trottola dei colori sono affiancate da altre esperienze che conducono Maxwell alla costruzione della cosiddetta «scatola dei colori», un dispositivo da lui ideato, dietro suggerimento di Forbes, sfruttando idee che risalgono a Newton.<sup>60</sup> Forbes infatti ritiene importante eliminare eventuali influenze sulla percezione del mescolamento dei colori dovute alle inevitabili variazioni del moto rotatorio del disco dei colori da un'esperienza all'altra.

<sup>(58)</sup> Cfr. *Ibid.*, p. 140.

<sup>(59)</sup> Cfr. *Ibid.*, pp. 140-141.

<sup>(60)</sup> Un riferimento a questo dispositivo si trova sia nella chiusa dell'articolo del 1855 (cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 142), sia nella nota I.3 dello stesso articolo (cfr. *Ibid.*, p. 144). Nella nota, in particolare, si evidenziano analogie e differenze con il dispositivo utilizzato da Helmholtz (cfr. H. VON HELMHOLTZ, *On the Theory of Compound Colours*, cit., pp. 522-525). Sempre nella nota I.3, Maxwell cita la Prop. XI, Libro I parte seconda (erroneamente Maxwell scrive Prop. XI, Libro II) dell'*Opticks* di Newton (cfr. I. NEWTON, *Opticks or A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light*, cit., pp. 186-191), dove «viene descritto un esperimento nel quale un fascio [di luce bianca] è scomposto da un prisma, concentrato da una lente e ricombinato da un altro prisma in modo da formare un fascio di luce bianca simile al fascio incidente. Fermando [selettivamente] i raggi colorati [che giungono] alla lente, una qualunque combinazione prefissata può essere fatta passare nel fascio emergente, che a piacere può essere ricevuto direttamente dall'occhio o da uno schermo» (cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 144). È quello che Maxwell realizzerà con la sua «scatola dei colori».

Una delle prime versioni della «scatola dei colori» viene mostrata da Maxwell al convegno annuale della *British Association* a Cheltenham nell'agosto del 1856, dove tra l'altro presenta due lavori riguardanti la visione dei colori, uno «On the Unequal Sensibility of the Foramen Centrale to Light of different Colours»<sup>61</sup> e uno «On the Theory of Compound Colours with reference to Mixtures of Blue and Yellow Light».<sup>62</sup> Ma è solo al convegno annuale della *British Association* ad Aberdeen nel 1859 che Maxwell può dar conto delle prime esperienze sulla visione dei colori, condotte grazie a una versione modificata del nuovo dispositivo che permette di mescolare direttamente colori dello spettro e paragonarli con la luce bianca. Una descrizione di questa «scatola dei colori» si trova nel contributo «On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum», che Maxwell presenta il 22 marzo del 1860 alla *Royal Society* su sollecitazione di Stokes (in quegli anni segretario della *Royal Society*),<sup>63</sup> al quale rinviamo per i dettagli. Nell'articolo Maxwell introduce anche le equazioni colorimetriche, analoghe a quelle ottenute con la trottola dei colori ma riferite ora al nuovo dispositivo. Il metodo di manipolazione delle equazioni colorimetriche viene illustrato da Maxwell ricorrendo ai dati ricavati dalle osservazioni condotte con la scatola dei colori da lui stesso (J) e dalla moglie Katherine (K).

Le conclusioni cui giunge Maxwell con il nuovo dispositivo sono in linea con quelle ottenute con la trottola dei colori. Tuttavia l'utilizzo di luce colorata proveniente direttamente dallo spettro, e non da fogli pigmentati in rotazione, gli fornisce informazioni più precise e articolate. Innanzi tutto ottiene un'ulteriore e più stringente conferma del fatto che «una porzione triangolare del diagramma di Newton» è in grado di rappresentare tutti i colori dello spettro, in altri termini «tutti i colori dello spettro possono essere composti da quelli che si trovano ai vertici del triangolo».<sup>64</sup> In secondo luogo, analizzando i risultati ricava «forti ragioni di credere» che il rosso, il verde e il blu «siano i tre colori primari corrispondenti ai tre modi della sensazione dell'organo

<sup>(61)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 242.

<sup>(62)</sup> Cfr. *ivi*, pp. 243-245.

<sup>(63)</sup> Cfr. J. CLERK-MAXWELL, *On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum*, «Philosophical Transactions of the Royal Society of London», 150: 57-84, 1860, riprodotto in W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., pp. 410-444 (ristampa, Dover, New York, 1952-1965-2003).

<sup>(64)</sup> Cfr. *ivi*, p. 417.

della visione, dai quali dipende l'intero sistema del colore come visto da un occhio normale». <sup>65</sup> Infine, l'analisi dei dati gli permette di dimostrare che ognuno dei tre recettori manifesta certamente un massimo di sensibilità per specifiche lunghezze d'onda corrispondenti rispettivamente al rosso, al verde e al blu, ma allo stesso tempo ha sensibilità, per quanto via via decrescenti a destra e sinistra del massimo, per una porzione ampia dello spettro. <sup>66</sup>

Nella sezione finale dell'articolo, Maxwell svolge brevemente alcune considerazioni generali. La prima riguarda il fatto che la determinazione delle «posizioni esatte del rosso e del blu non è ancora sicura», mentre «quella del verde» viene da lui individuata <sup>67</sup> in sorprendente accordo con i dati attuali relativi al massimo di sensibilità dei coni retinici responsabili della visione del verde. <sup>68</sup> Una seconda considerazione riguarda il fatto che «l'arancione e il giallo dello spettro sono cromaticamente equivalenti a miscele di rosso e verde. Essi non sono né più intensi né più pallidi delle miscele corrispondenti, e l'unica differenza risiede nel fatto che la miscela può essere risolta da un prisma, mentre i colori dello spettro non possono essere risolti in tal modo. Questo risultato sembra mettere fine alla pretesa di considerare il giallo come elemento primario del colore». <sup>69</sup> Infine, Maxwell osserva che una più precisa ricostruzione «della mappa dello spettro», indipendente dalle «differenze accidentali», e una «più completa discussione delle leggi della sensazione del colore» potranno essere ottenute quando saranno disponibili dati provenienti da un maggior numero di individui sia normali, sia daltonici.

Vale la pena notare che in un Poscritto all'articolo, inviato l'8 maggio e letto il 24 maggio del 1860, Maxwell aggiunge proprio una serie di dati relativi a individui daltonici ottenuti con una variante della scatola dei colori costruita, su suo progetto, dalla ditta Smith e

<sup>(65)</sup> Cfr. *ivi*, p. 431.

<sup>(66)</sup> Per esempio, come noterà Maxwell nel 1861 in una conferenza alla Royal Institution, il recettore «che ci dà la sensazione che chiamiamo rosso, è stimolato massimamente dai raggi rossi, ma anche dall'arancione e giallo, e in misura molto minore dal violetto» (Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 447).

<sup>(67)</sup> Cfr. *ivi*, p. 436.

<sup>(68)</sup> Cfr. R.C. DOUGAL, C.A. GREATED, A.E. MARSON, *Then and now: James Clerk Maxwell and colour*, cit., p. 214.

<sup>(69)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1846-1865)*, volume 1, cit., p. 436.

Ramage di Aberdeen.<sup>70</sup> I risultati ottenuti sullo spettro vengono confrontati con quelli ricavati negli anni precedenti con la trottola dei colori. Entrambe le serie di dati confermano l'idea che individui affetti da daltonismo hanno due recettori funzionanti come quelli degli individui normali e un recettore (quello relativo al rosso) non funzionante o assente.

Con questo articolo la teoria della visione di Maxwell può dirsi definitivamente delineata. Negli anni successivi, come attestato da vari scambi epistolari, egli continua le sue ricerche sperimentali, apportando tra l'altro ulteriori modifiche alla sua «scatola dei colori» e riuscendo a ottenere, in un incontro alla *Royal Institution* del 1861 al quale partecipa anche Faraday, la prima fotografia a colori in tricromia di cui abbiamo parlato in precedenza.

Inoltre grande interesse suscitano in Maxwell le questioni più propriamente filosofiche intorno al problema della visione, da lui trattate in numerosi interventi, sia specificamente dedicati alla teoria della visione dei colori (come quello del 1871 citato all'inizio), sia concernenti riflessioni più generali sulla conoscenza fisica. Partendo dal fatto che l'essenza della nozione del colore può essere compresa solo indagando le relazioni tra mente e corpo, Maxwell arriva a convincersi che le conoscenze acquisite sulla base della teoria della visione dei colori possano gettare luce sul funzionamento dei processi mentali in rapporto ai meccanismi percettivi, ma allo stesso tempo ritiene fortemente problematica una riducibilità dei processi mentali ai soli processi fisici. La mente è qualcosa di materiale? E qualora lo fosse, dove dobbiamo collocare la coscienza? E l'anima? Tutti interrogativi ricorrenti nei suoi scritti in un confronto critico con le diverse posizioni espresse in quegli anni da fisiologi e biologi, come Emil Du Bois-Reymond e Karl Wilhelm Nägeli, e da filosofi, come Herbert Spencer.

In ogni caso Maxwell è ben consapevole del fatto che solo una convergenza degli studi di matematica, fisica, fisiologia, psicologia ed estetica potrà portare a una comprensione più approfondita dei problemi della visione e in generale della percezione, come osserva in un articolo di rassegna dell'attività scientifica di Helmholtz apparso su *Nature* nel 1877.<sup>71</sup> Proprio all'inizio dell'articolo, prima di esporre

<sup>(70)</sup> Cfr. *ivi*, pp. 436-444. La Smith e Ramage è la medesima ditta che costruisce in quegli stessi anni per Maxwell la trottola dinamica per lo studio delle rotazioni di un corpo rigido, da lui applicate a studi di meccanica celeste.

<sup>(71)</sup> L'articolo originale (*Nature*, vol. 15, pp. 389-391) è riprodotto in W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1866-1879)*, volume 2, cit., pp. 592-598.

alcuni dei fondamentali contributi di Helmholtz, Maxwell ripropone e sviluppa il tema a lui caro dell'importanza della fertilizzazione incrociata delle scienze, paradigmaticamente rappresentata dall'attività scientifica del grande scienziato tedesco. Usualmente, osserva Maxwell, la conoscenza umana cresce per accumulazione intorno a un certo numero di centri distinti che rappresentano altrettanti comparti del sapere. Tuttavia, prima o poi, arriva il momento in cui ci si accorge che settori diversi della conoscenza non possono più restare distinti e devono fondersi in modo consistente in un unico settore. Ora, prosegue Maxwell, per quanto gli uomini di scienza possano essere consapevoli della necessità di tale fusione, l'operazione in sé è tutt'altro che facile. La ragione di questa difficoltà risiede nel fatto che, per quanto si possa essere convinti che i fenomeni della natura siano tutti tra loro consistenti, il nostro processo conoscitivo non ha che fare solo con i fenomeni ma anche con le ipotesi che sono state inventate per sistematizzarli. E per quanto un certo gruppo di uomini di scienza abbia onestamente lavorato per ordinare un determinato insieme di fenomeni, non è affatto detto che le ipotesi che questi hanno introdotto in quel contesto saranno consistenti con le ipotesi tramite le quali un altro gruppo di scienziati è riuscito a spiegare un diverso insieme di fenomeni. Ogni settore della scienza, afferma Maxwell, può apparire abbastanza consistente al suo interno, ma prima che diversi settori scientifici possano essere combinati insieme a formare un'unità, ognuno di questi deve essere attentamente rianalizzato per individuare quelle parti che troppo «prematuramente sono state rese coerenti». Quindi, conclude Maxwell, l'operazione di fusione di due scienze in una implica in generale una critica serrata di metodi consolidati, e «l'esplosione» di molti pezzi di conoscenza che possono avere avuto a lungo reputazione scientifica.<sup>72</sup>

Inutile notare che queste riflessioni mature di Maxwell traggono spunto dagli esiti complessivi della sua attività scientifica. Molti sono gli esempi della lungimiranza delle osservazioni maxwelliane negli sviluppi successivi della scienza. Restringendosi alla teoria della visione, vale la pena ricordare che sarà solo nel corso del XX secolo che si riuscirà ad ampliare enormemente le conoscenze in questo ambito, grazie all'affermarsi di settori di «fusione» come la neurofisiologia, la neurobiologia e la neurochimica.

---

<sup>(72)</sup> Cfr. W. NIVEN (a cura di), *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell (1866-1879)*, volume 2, cit., p. 592.

ALCUNE APPLICAZIONI DELLE TEORIE DEL COLORE E UN CENNO AGLI SVILUPPI DELLA TEORIA DELLA LUCE NEL XX SECOLO

Prima di concludere parlando brevemente degli sviluppi della teoria della luce nel XX secolo, elenchiamo alcune delle applicazioni che derivano dagli studi ottocenteschi nel settore. Della fotografia a colori abbiamo già parlato, ed è forse inutile sottolineare l'importanza di questa anche nell'ambito del cinema (a partire in particolare dagli anni 1930). Meno noti, e comunque più recenti, sono gli studi sugli spazi dei colori: RGB (rosso-verde-blu), additivo, usato per gli schermi, e CMYK (ciano-magenta-giallo-nero), sottrattivo, usato per i processi di stampa. Lo studio algoritmico delle connessioni tra questi spazi di colore è cruciale per chi si occupa per esempio di grafica col computer. Ed infine pochi sanno che la nascita della chemioterapia, cioè della distruzione di organismi patogeni nel malato per mezzo di composti chimici, è legata fortemente alle ricerche sui coloranti sintetici per i preparati istologici. Tra i pionieri del settore vale la pena ricordare Paul Ehrlich (1854-1915) che, partito proprio dalle ricerche sui coloranti istologici, approdò all'idea di cercare agenti battericidi nella famiglia dei composti coloranti (tra i primi il blu di metilene contro la malaria). Da queste ricerche derivarono anche i sulfamidici, che fino alla scoperta degli antibiotici rimasero i farmaci più efficaci per il trattamento di patologie di origine batterica.

Ma veniamo agli sviluppi della teoria della luce nel XX secolo. Nel 1900 Max Planck, risolvendo il problema proposto da Gustav Kirchhoff nel 1859, formulava l'equazione che esprime l'emissione di radiazione di un corpo nero. Come è noto, la nuova equazione si basava sulla quantizzazione di una grandezza fisica, l'energia, classicamente ritenuta continua. Tuttavia la giustificazione di questa equazione addotta da Planck si dimostrò di lì a poco insufficiente (come notato, in particolare, da Einstein e Ehrenfest). Planck infatti propone di quantizzare l'energia emessa e assorbita dagli ipotetici microscopici oscillatori carichi costituenti le pareti della cavità del corpo nero, lasciando invece continuo il campo elettromagnetico nella cavità. Questo approccio "semiclassico" viene superato per la prima volta nel 1905 da Einstein nell'articolo «Un punto di vista euristico relativo alla generazione e trasformazione della luce»,<sup>73</sup> dove anche il campo

---

<sup>(73)</sup> A. EINSTEIN, *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*, «Annalen der Physik», XVII, 1905, pp. 132-148 (tr. it. *Albert Einstein. Opere Scelte*, a cura di E. Bellone, Bollati Boringhieri, Torino, 1988, pp. 118-135).

elettromagnetico viene quantizzato. Ma i “quanti di luce”, di cui parla Einstein, verranno definitivamente accettati dalla comunità scientifica come nuove particelle solo molto tempo dopo (il nome di “fotoni” verrà introdotto dal chimico americano Gilbert Lewis nel 1926). Negli anni successivi al 1905 Einstein torna più volte sulla questione,<sup>74</sup> ma una ricostruzione dettagliata della storia che porta all'accettazione dell'esistenza del fotone esula dagli scopi di questo intervento.

Ci limitiamo a notare che la chiave di volta per comprendere ed estendere la teoria della radiazione (e con essa la nozione di campo) si trova nella relatività ristretta di Einstein, e in particolare, nell'equivalenza tra massa ed energia. Infatti, due sono gli aspetti che sembrano essere interpretabili in modo più naturale nell'ambito di teorie emissive che in quello di teorie ondulatorie: 1. che la luce sia un'entità indipendente dal mezzo (il campo elettromagnetico come nuovo oggetto fisico e non come deformazione di un qualche etere); 2. che l'emissione di luce da una sorgente sia seguita dal suo assorbimento da un ricevitore (con trasferimento di energia). Le equazioni di Maxwell interpretano l'emissione come produzione da parte di una carica oscillante di un'onda sferica che si espande, ma l'assorbimento (che le equazioni di Maxwell porterebbero a considerare come contrazione di un'onda sferica da parte di una carica) non è certamente interpretabile come un processo elementare. È necessario, secondo Einstein, ristabilire la simmetria tra processi di emissione e assorbimento. Le teorie emissive, basate sull'esistenza dei fotoni, permetteranno in questo senso di ristabilire la simmetria sotto forma di emissione e assorbimento di particelle. È in questa linea interpretativa che si colloca la nascita della moderna elettrodinamica quantistica, a partire dai contributi di Dirac del 1927.<sup>75</sup> Per molti aspetti la nuova teoria della luce sembra riprendere elementi presenti nella teoria newtoniana, ovviamente rivista nel nuovo contesto.

L'ottica fisiologica e la psicologia della percezione del XX secolo non potranno non confrontarsi con questa nuova teoria della luce,

<sup>(74)</sup> Si vedano per esempio, A. EINSTEIN, *Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems*, «Physikalische Zeitschrift», 10, 1909, pp. 185-193 (tr. it. *Albert Einstein. Opere Scelte*, cit., pp. 201-220); *Strahlungs-emission und -absorption nach der Quantentheorie*, «Deutsche Physikalische Gesellschaft. Verhandlungen», 18, 1916, pp. 318-323 e *Quantentheorie der Strahlung*, «Physikalische Gesellschaft Zürich. Mitteilungen», 18, 1916, pp. 47-62, ristampato in «Physikalische Zeitschrift», 18, 1917, pp. 121-128 (tr. it. *Albert Einstein. Opere Scelte*, cit., pp. 344-260).

<sup>(75)</sup> P.A.M. DIRAC, *The quantum theory of emission and absorption of radiation*, «Proceedings of the Royal Society of London», Series A, vol. 114, 1927, pp. 243-265.

ottenendo importanti risultati che, da un lato, confermeranno molti degli esiti delle ricerche svolte nel settore nel XIX secolo, ancorché interpretati alla luce delle nuove acquisizioni teoriche e sperimentali, e dall'altro porteranno ad ampliare e approfondire le nostre conoscenze sui meccanismi di percezione della luce e del colore.

