

La temperatura di colore

Ricerca fondamentale e pratica sociale

Luigi Cerruti - Ricercatore indipendente - lcerruti00@gmail.com

Elena Ghibaudi - Università di Torino - Dip. di Chimica - elena.ghibaudi@unito.it

Emilio Marco Pellegrino - Università di Torino - Dip. di Chimica -

emiliomarco.pellegrino@unito.it

Abstract: Colour has always fascinated scientists, artists and philosophers, but only in 1931 the Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) could propose a quantitative evaluation of colour, based on the concept of 'colour temperature' (CT). The historical path that led to the CIE method had started much earlier, with Newton, and pursued with Grassmann and Maxwell. The final thrust for a mathematization of colour came from the economic and social need for a standardized system of lighting. Fundamental research necessary for standardization came from an interesting mixing of research centers of the Anglo-Saxon world: in the United States by the National Bureau of Standards and the National Electric Lamp Association Laboratory; in the UK by the National Physical Laboratory and Imperial College, London. CIE's rules are still a fundamental reference in several industrial and research fields (electronics, dyes, food, cultural heritage). However, CT is not devoid of criticisms: it contradicts common use ('hot' colours exhibit lower CTs as compared to 'cold' colours); it is strictly conventional (a LED with CT~2700 K has an active area at 350 K).

Keywords: Color temperature, color space, Maxwell's triangle, metrology

Introduzione

Il colore è un tema affascinante, che come campo di ricerca ha visto il contributo di scienziati provenienti dalle più diverse discipline. Nel secolo scorso è diventata sempre più importante una grandezza denominata 'temperatura di colore'. La 'temperatura di colore' è un parametro importante nella valutazione dei sistemi di illuminazione, in fotografia e cinematografia, nell'industria tipografica e in quella elettronica. Questo contributo è dedicato alla storia e al significato della 'temperatura di colore', e assume come *terminus ad quem* la riunione della *Commission Internationale de l'Éclairage* (CIE), tenuta a Cambridge nel 1931. È la storia di un processo di matematizzazione assai delicato, perché lo studio sperimentale del 'colore' riguarda contestualmente la fisica delle radiazioni luminose e la fisiologia della percezione delle radiazioni stesse. Utilizzando i termini a noi più familiari ricordiamo che per rappresentare i colori in forma

numerica si utilizza un ‘modello di colore’, e cioè un modello matematico che nei casi che tratteremo assegna valori numerici a tre componenti cromatiche. Per utilizzare il modello di colore occorre specificare delle regole di utilizzo, che realizzano una mappatura del modello: uno ‘spazio di colore’ è costituito dal modello di colore e dalla funzione di mappatura.

1. Verso la matematizzazione del colore

La matematizzazione del colore che ha portato alla definizione dello spazio di colore della CIE ha visto proporre decine di spazi di colore diversi (Gerritsen 1984), e in effetti questo processo ha avuto molti protagonisti di un certo rilievo. (Kuehni 2003) Noi abbiamo ristretto la nostra attenzione a Newton, Grassmann e Maxwell, guidati dalla ristrettezza dei tempi e dalla assoluta importanza dei loro contributi.

Nell’ambito delle ricerche sul colore i primi risultati di natura fisica veramente importanti furono ottenuti da Newton, che li pubblicò nel 1671 sulle *Philosophical Transactions* della Royal Society. Nel saggio leggiamo:

As the Rays of light differ in degrees of Refrangibility, so they also differ in their disposition to exhibit this or that particular colour. Colours are not *Qualification of Light*, derived from Refractions, or Reflections of natural Bodies (as ‘tis generally believed,) but *Original and connotate properties*, which in divers Rays are divers. Some Rays are disposed to exhibit a red colour and no other; some a yellow and no other, some a green and no other, and so of the rest. (Newton 1671, p. 3081)

Qui Newton affermava che i colori osservati nei fenomeni di rifrazione non erano dovuti ad una particolare azione del mezzo rifrangente sulla luce, ma erano una proprietà intrinseca dei diversi raggi di cui era composta la luce stessa. Guidato da una particolarissima teoria ‘gravitazionale’ e ‘musicale’. (Stabell *et al.* 2009, pp. 12-13) Newton giunse alla conclusione di restringere a sette il numero di colori primari: “possibly colour may be distinguished into its principal degrees: red, orange, yellow, green, blue, indigo, and deep violet, – on the same ground that sound within an eighth is graduated into tones”. (Birch 1757, p. 262) A ciascuno di questi colori il grande fisico assegnò sul disco, che prese il suo nome, un settore di ampiezza angolare proporzionale alla lunghezza d’onda (relativa) della nota musicale corrispondente. La stessa analogia con le note musicali indica che Newton aveva una concezione discreta dei colori fondamentali, così che nello spettro non vi erano colori intermedi.

Un decisivo passo in avanti nella matematizzazione del colore fu fatto nel 1853 da Hermann Grassmann, matematico e *savant* tedesco. Nell’articolo del 1853 lo studioso tedesco riprese la teoria di Newton (e il suo disco), e precedenti esperienze di Helmholtz, ponendo su solide basi matematiche la teoria del mescolamento dei colori. Grassmann si era interessato della teoria del colore per dimostrare con un esempio importante l’applicabilità della sua *Lineale Ausdehnungslehre* (Teoria dell’estensione lineare, 1844), opera che rimase a lungo misconosciuta e che ora è assunta come prima fondazione dell’algebra lineare. Innanzi tutto Grassmann afferma che tre variabili sono

sufficienti per descrivere la fenomenologia della sensazione del colore a livello fisiologico: luminosità (*Farbintensität*), tonalità (*Farbenton*) e saturazione.

Quest'ultima variabile era definita come "intensità del bianco mescolato" (*Intensität des beigemischten Weiß*). È questa la prima delle quattro leggi enunciate dallo studioso tedesco, e – per usare un nostro termine – in essa viene definito uno spazio di colore tridimensionale. Di particolare rilievo è la terza legge che riportiamo nel testo originale:

zwei Farben, deren jede constanten Farbenton, constante Farbenintensität und constante Intensität des beigemischten Weiss hat, auch constante Farbenmischung geben, gleich viel aus welchen homogenen Farben jene zusammengesetzt seien. (Grassmann 1853, p. 78)¹

Per Grassmann questa legge è il 'principio fondamentale della mescolanza dei colori', e certamente essa ha un grande significato epistemologico perché riguarda fisiologia e fisica: la percezione di un colore è indipendente dalla composizione spettrale della luce percepita. Ad esempio: il colore M può essere percepito come tale sia quando è una mescolanza dei colori A e B, sia quando è una mescolanza dei colori C e D.²

L'articolo di Grassman, tradotto in inglese, fu pubblicato nel 1854 sul *Philosophical Magazine*, e l'anno seguente fu citato da James Clark Maxwell nel suo primo contributo importante sulla visione dei colori. (Maxwell 1855) Maxwell si era posto esplicitamente sulla traccia delle ricerche di Newton, e aveva determinato sperimentalmente che, in opportune quantità, tre colori di riferimento erano sufficienti per riprodurre la sensazione di un colore qualsiasi. I colori scelti furono il rosso vermiglio, il verde smeraldo e il blu oltremare, e lo spazio di colore così definito fu completato con un modello matematico che permetteva la mappatura di tutti i colori. È il 'triangolo di Maxwell':

Vermilion, ultramarine, and emerald green, being taken (for convenience) as standard colours, are conceived to be represented by three points, taken (for convenience) at the angles of an equilateral triangle. Any colour compounded of these three is to be represented by a point found by conceiving masses proportional to the several components of the colour placed at their respective angular points, and taking the centre of gravity of the three masses. (Maxwell 1855, pp. 279-280)

Si può notare che in questo passo Maxwell sottolinea due volte l'arbitrarietà delle sue scelte. D'altra parte questo contributo del grande fisico scozzese ha un altro punto di rilievo, e cioè la proposta esplicita di una procedura condivisa per la valutazione quantitativa di un colore. A questo scopo Maxwell dà i dettagli della costruzione dell'apparato sperimentale, indica dove potrebbe essere acquistato e sottolinea che i colori utilizzati sono "unmixed pigments used in the arts". (Maxwell 1855, p. 275)

¹ Il corsivo è nel testo di Grassmann. Tr. it.: "due colori, ciascuno di costante tonalità, costante luminosità e costante intensità del bianco mescolato, danno anche un mescolamento di colore costante, indipendentemente da quali colori omogenei sia costituito ciascuno".

² Per una discussione completa delle leggi di Grassmann si veda Boscarol (2006).

Nel 1860 Maxwell fece avanzare lo studio del mescolamento dei colori e della loro percezione ad un livello che rimarrà insuperato per molto tempo. Lo spazio di colore è così definito: “there are three colours in the spectrum, red, green, and blue, by the mixtures of which colours chromatically identical with the other colours of the spectrum may be produced” (Maxwell 1860, p. 77), e il modello matematico che completa lo spazio di colore è ancora il ‘triangolo’ del 1855. Con un apparato sperimentale di sua concezione Maxwell determina la sensibilità di un osservatore normale alle diverse frequenze dello spettro luminoso e l’apporto quantitativo dei tre colori fondamentali alla sensibilità totale ad ogni frequenza:

I have strong reason to believe that these are the three primary colours corresponding to *three modes of sensation in the organ of vision*, on which the whole system of colour, as seen by the normal eye, depends (Maxwell 1860, p.74); (corsivo aggiunto). (Maxwell 1860)

Qui viene data una inequivocabile base sperimentale alla presenza nella retina di tre diversi ricettori fisiologici della radiazione luminosa, presenza congetturata da Thomas Young nel 1802 e ripresa da Hermann Helmholtz nel 1850 (entrambi citati da Maxwell).

Per quanto riguarda gli aspetti strettamente fisiologici e anatomici possiamo semplicemente ricordare che nel 1892 Arthur König e Conrad Dieterici confermarono sperimentalmente la teoria dei tre recettori, e che nel 1905 Johannes von Kries determinò che la visione è mediata da cellule a bastoncino a bassi livelli di illuminazione e da tre tipi di cellule a cono ad alti livelli di illuminazione.

2. L’effetto decisivo del contesto sociale

La proposta di Maxwell di un metodo standard per specificare i singoli colori cadde nel vuoto. Fu solo all’inizio del secolo scorso che gli sviluppi tecnologici nei sistemi di illuminazione riproposero la questione in termini sociali ed economici. Nel 1900 il nuovo secolo fu celebrato a Parigi con una grandiosa Esposizione universale, un’occasione per innumerevoli congressi scientifici e tecnici. Il Congresso internazionale dell’industria del gas si riunì nel settembre 1900, ed ebbe più di 400 partecipanti. Di fronte a questa platea Théodore Vautier, presidente della “Société technique de l’industrie du gaz en France”, nel discorso d’apertura auspicò un accordo internazionale sui metodi di misura della luce fornita dalle lampade a gas con reticella incandescente. L’auspicio si trasformò in una risoluzione che recitava: “Une commission internationale sera nommée à l’effet de fixer les règles à suivre dans les observations photométriques des becs à incandescence par les gaz”. (Société technique de l’industrie du gaz 1900, p. 88) Nacque così una “Commission Internationale de Photométrie” (CIP) che si riunì a Zurigo nel 1903, nel 1907 e ancora nel 1911. La spinta decisiva per una riforma della CIP venne dal Congresso internazionale di applicazioni elettriche, che si tenne a Torino nel settembre del 1911. Su proposta di un rappresentante della “Illuminating Engineering Society” di Londra venne approvata questa risoluzione: “Il congresso crede che sia desiderabile che sia nominata una Commissione

internazionale per lo studio di tutti i sistemi di illuminazione e di tutti i problemi tecnici che interessano la illuminazione.” (Congresso internazionale delle applicazioni elettriche 1912, p. 120) Per ufficializzare la nuova commissione si dovette comunque aspettare la riunione della CIP che si tenne a Berlino nel 1913, data ufficiale della nascita della CIE.

3. La ricerca metrologica

I contributi della ricerca metrologica che portarono alla risoluzione del 1931 hanno due connotazioni rilevanti. La prima connotazione è che tutto avvenne nel mondo anglosassone, con una specie di staffetta dagli Stati Uniti all’Inghilterra. Il secondo aspetto è a sua volta tipico del mondo anglosassone, e cioè la partecipazione nella ricerca fondamentale di centri privati, istituzioni pubbliche e Università.

La proposta della ‘temperatura di colore’ come nuovo parametro fisico fu fatta da Edward Hyde, direttore del Laboratorio della “National Electric Lamp Association” sito a East Cleveland, Ohio. Il Laboratorio era nato nel 1901, lo stesso anno di nascita del “National Bureau of Standards” (NBS), ed era una filiazione della “General Electric”. Hyde aveva una visione multidisciplinare della ricerca sull’illuminazione, perché mentre sviluppava l’indagine indagini con metodi fisici riteneva essenziale aver sempre presenti gli aspetti fisiologici della percezione della luce. La temperatura di colore è definita con le prime parole di una nota apparsa nel marzo del 1916 sul *Journal of the Franklin Institute*:

By ‘color temperature’ of a solid body radiating by virtue of its temperature is meant that temperature of a black body at which its radiation matches in color that of the solid body in question, provided the radiation from the latter is such that a color match may be obtained. (Hyde *et al.* 1916, p. 418)

Nel caso in cui non fosse stato possibile stabilire questa corrispondenza diretta, la temperatura di colore sarebbe stata quella di un corpo nero che emettesse la stessa intensità relativa per due lunghezze d’onda scelte in riferimento al corpo in esame. Ovviamente la definizione della temperatura di colore non nasceva dal nulla. Una presentazione più ampia della ‘black body color temperature’ viene fatta da Hyde sulla *Physical Review* nell’ottobre 1917. Le ricerche di Hyde in questo campo erano iniziate nel 1909 con uno studio comparativo della radiazione emessa da tungsteno, tantalio e osmio e da un ‘corpo nero’ costituito da ‘untreated carbon’. Nel corso di queste indagini era stato messo a punto un metodo di confronto di cui Hyde rivendica l’originalità, e che poteva essere portato nella pratica di laboratorio in modo preciso: “the result accomplished consists in the establishment of a condition of equal relative emission intensities in some two wave-lengths near the ends of the visible spectrum – say at 0.5 μ and 0.7 μ ”. (Hyde *et al.* 1917, p. 396)

Un contributo fondamentale nella ricerca sul rapporto fra visione e radiazione luminosa venne dall’NBS ad opera di William Coblentz e Walter Emerson. I due fisici pubblicarono nel 1918 un paio di lavori dedicati alla determinazione del cosiddetto

‘equivalente meccanico della luce’. Nel primo articolo presentarono i dati sperimentali raccolti con 125 osservatori (Coblentz, Emerson 1918a), nel secondo articolo discussero questa particolare grandezza che è una misura dell’efficienza della radiazione di una data lunghezza d’onda nel produrre una sensazione visiva. Trattandosi di un rapporto valido per ogni lunghezza d’onda occorre fare una scelta convenzionale, che venne fatta in riferimento alla lunghezza d’onda a cui la sensibilità della visione era massima; quindi dove l’equivalente meccanico era minimo. (Coblentz, Emerson 1918b, p. 260)

In Inghilterra i principali risultati che confluirono nello standard della CIE provennero da John Guild del “National Physical Laboratory” di Teddington e da W. David Wright dell’“Imperial College” di Londra. I lavori di Guild riguardarono tanto i problemi teorici quanto quelli sperimentali. Guild si interessò in particolare della matematica necessaria per trattare i dati riguardanti le miscele tricromatiche, e in due contributi del 1925 propose metodi algebrici ed un metodo geometrico. Sul piano sperimentale Guild aveva costruito un colorimetro tricromatico nel 1922, e nel 1926 ne aveva pubblicato i dettagli corredati da numerose fotografie. In quello stesso intorno di tempo Wright aveva eseguito una ri-determinazione completa dei coefficienti tricromatici dei colori spettrali (Wright 1928), facendo un lavoro parallelo a quello di Guild, che solo nel febbraio del 1931 rese pubblici i suoi risultati sulle *Colorimetric Properties of the Spectrum*. (Guild 1932) In effetti Guild aveva già realizzato da tempo le misure con sette osservatori diversi, aveva discusso i propri dati con Wright, e i due ricercatori avevano ritenuto i loro risultati perfettamente compatibili. Così Guild pubblicò in appendice la media dei risultati ottenuti a Teddington e a Londra. (Guild 1932, pp. 185-187)

4. Il punto di arrivo: la ‘Commission Internationale de l’Éclairage’, 1931

Come si è accennato nell’introduzione la riunione della CIE in cui fu adottato lo standard basato sulla temperatura di colore si tenne al Trinity College di Cambridge, dal 14 al 19 settembre 1931, con la partecipazione di 149 delegati di 14 Paesi. La delegazione italiana era guidata dall’ingegnere Carlo Clerici, che allora dirigeva la Osram Edison Clerici e rappresentava l’‘Associazione Nazionale per lo Sviluppo dell’Illuminazione’. L’incontro di Cambridge era stato preceduto da congressi e convegni tenuti in varie parti del Regno Unito, ma i contrasti tra alcuni dei delegati più importanti non si erano appianati. In particolare Irwin Priest, capo della delegazione statunitense, non riteneva che i dati di Guild e Wright fossero i più adatti ad essere adottati come standard, e questo in contrasto con i rappresentanti di importanti industrie americane come la Bell Telephone e la Corning Glass. Si racconta che T. Smith, che presiedeva il comitato ristretto che avrebbe dovuto approvare lo standard, e Guild lavorarono tutta una notte per rielaborare i dati dello stesso Guild e di Wright al fine di controbattere le obiezioni di Priest. (Boynton 1996) La Risoluzione 1 che ufficializzava lo standard iniziava con questo testo:

Il est recommandé, pour obtenir une base normalisée pour la spécification des quantités colorimétriques, en vue d'applications techniques et commerciales, que ces quantités soient exprimées par rapport à un observateur hypothétique, à désigner comme "Observateur de référence 1931 de la C.I.E." (*Commission Internationale de l'Éclairage* 1932, p. 19)

L' 'observateur hypothétique' era costituito dalla tabella dei dati di Guild Wright, modificata nottetempo. La risoluzione fu approvata con il voto contrario della Francia e della Germania. Lo spazio di colore proposto dalla Commissione CIE con la sigla XYZ rappresenta tutte le sensazioni di colore che un 'osservatore medio' può percepire; il

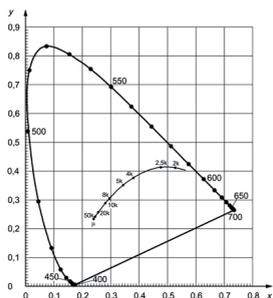


Fig. 1a. Diagramma di cromaticità

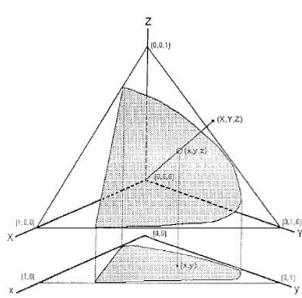


Fig. 1b. Mappatura dello spazio di colore CIE 1931

modello di colore è tristimolo e utilizza i dati sperimentali di Wright e Guild.

La Fig. 1a riporta il diagramma di cromaticità CIE 1931 come è presentato nello standard ISO 9241-302:2008. Il diagramma si ottiene con una mappatura dello spazio di colore XYZ descritta in Fig. 1b. (Fairman *et al.* 1996, p. 13) Si esegue una proiezione centrale di ciascun punto (X, Y, Z) sul triangolo di Maxwell definito da $X + Y + Z = 1$; dato questo vincolo le coordinate variabili possono essere ridotte a due, e si esegue una proiezione parallela all'asse Z , ottenendo il diagramma di Fig. 1a, espresso in coordinate (x,y) .

5. Conclusioni

Dovettero trascorrere 60 anni tra la proposta di Maxwell di uno standard per la definizione fisico-matematica dei colori e la definizione della temperatura di colore da parte di Hyde. L'esigenza di una standardizzazione fatta propria dalla CIE nasceva da un contesto sociale ed economico completamente diverso da quello in cui operava Maxwell, un contesto in cui non esistevano colossi industriali come la "General Electric". Come in ogni processo di standardizzazione anche nel caso della temperatura di colore emerge il carattere pragmatico e convenzionale delle proposte, che pure giungono dalla ricerca fondamentale. Il carattere convenzionale della temperatura di colore diventa evidentissimo quando abbiamo a che fare con sorgenti di luce bianca non incandescenti. Un 'LED' (light-emitting diode) con temperatura di colore di 2700 K ha una temperatura effettiva dell'area attiva intorno ai 350 K (~80 °C). Infine si può notare anche qualche

contraddizione rispetto a certe proprietà che la nostra cultura attribuisce ai colori. Se i colori sono valutati all'interno della teoria del corpo nero il blu è ad alta temperatura e il rosso a bassa temperatura: i tratti culturali dei due colori sono opposti: il blu è 'freddo' e il rosso è 'caldo'.

Bibliografia

- Birch T. (1757). *The History of the Royal Society*. London: Millar in the Strand, Vol. 3.
- Boscarol M. (2006). *Hermann Gunther Grassmann e la formalizzazione della colorimetria*, in Rizzi A. (a cura di), *Colore e colorimetria: contributi multidisciplinari*. Firenze: SIOF, Vol. II.
- Boynton R. M. (1996). "History and current status of a physiologically based system of photometry and Colorimetry". *Journal of the Optical Society of America*, 13, pp. 1609-1621.
- Coblentz W.W., Emerson W.B. (1918 a). "Relative sensibility of the average eye to light of different colors and some practical applications to radiation problems". *Bulletin of the Bureau of Standards*, 14, pp. 167-234.
- Coblentz W.W., Emerson W.B. (1918 b). "Luminous Radiation from a Black Body and the Mechanical Equivalent of Light". *Bulletin of the Bureau of Standards*, 14, pp. 255-266.
- Commission Internationale de l'Éclairage (1932). *Recueil des travaux et compte rendu des séances*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Congresso internazionale delle applicazioni elettriche (1912). *Atti*, Vol. I., Torino: Bona.
- Fairman H.S., Brill M.H., Hemmendinger H. (1997). "How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from Wright-Guild Data". *COLOR research and application*, 22 (1), pp. 11-23.
- Grassmann H. (1853). "Zur Theorie der Farbenmischung". *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, 89, pp. 69-84.
- Guild J. (1926) "A trichromatic colorimeter suitable for standardisation work". *Transactions of the Optical Society*, 27 (2), pp. 106-128.
- Hyde E.P., Cady F.E., Forsythe W. E. (1916). "Color Temperature Scales for Tungsten and Carbon". *Journal of the Franklin Institute*, 181, pp. 418-420.
- Hyde E.P., Cady F. E., Forsythe W. E. (1917). "Color Temperature Scales for Tungsten and Carbon". *Physical Review*, 10, pp. 395-411.
- Maxwell J.C. (1855). "Experiments on colour, as perceived by the eye, with remarks on colour-blindness". *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 21 (II), pp. 275-298.
- Maxwell J.C. (1860). "On the Theory of Compound Colours, and the Relations of the Colours of the Spectrum". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 150, pp. 57-84.
- Newton I (1671). "A Letter of Mr. Isaac Newton... containing his New Theory about Light and Colors". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 80, pp. 3075-3087.

- Société technique de l'industrie du gaz en France (1900). *Congrès international de l'industrie du gaz*, Paris: S.A.P.P.
- Stabell B., Stabell U. (2009). *Duplicity Theory of Vision*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Wright W.D. (1928). "A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours". *Transactions of the Optical Society*, 30 (4), pp. 141-164.