

ORIGINE E METRICA DEL COLORE - spunti didattici

Sergio PALAZZI¹

VERBANIA-chem "Insegnare Chimica, oggi"
X congresso nazionale Divisione didattica Società Chimica Italiana, Verbania 6 - 9 novembre 1996
Testo integrale con annotazioni del 2008

Ho deciso di pubblicare su www.kemia.it questo testo ed altri che ormai sono praticamente irreperibili, ritenendo che, al di là di tutto, possano mantenere ancora una qualche attualità, magari per i miei studenti.

Ho semplicemente aggiunto un minimo di note per aggiornare alcuni punti.

Ovviamente le ho scritte in forma pedante e noiosa, se no che note a pié di pagina sarebbero?

Lo schema grafico cerca di riprodurre quello originariamente esposto, migliorando la leggibilità in funzione della conversione pdf, cosa che riusciva un po' più scomoda con il mio 386 di allora.

Va comunque precisato che negli anni successivi qualcosa è cambiato. In alcuni casi in meglio. In altri casi, no.

novembre 2008

¹ Allora: istituto Jean. Monnet, sez. chimica ambientale, Mariano Comense (Co). Attualmente: ITIS di Setificio Paolo Carcano, Como

LA CHIMICA HA COLORATO IL MONDO: COLORIAMO LA CHIMICA

Oggi viviamo circondati dal colore, come in nessuna altra epoca della storia.

Il codice dei colori della società postindustriale è profondamente mutato rispetto a quello delle culture locali preesistenti: dopo le rivoluzioni cromatiche portate nell'arte delle avanguardie storiche, del colore si è impossessata soprattutto la grafica pubblicitaria, che a volte lo usa con un rigore pari all'antica araldica: campiture bianche e rosse, se ondulate, ci evocano una bibita, se triangolari, una sigaretta, se orizzontali, una casa editrice.

La nuova araldica serve altresì per esprimere regole (i cartelli stradali blu, rossi, verdi), sentimenti (confetti rosa, rose rosse), appartenenze (bandiere politiche e calcistiche).

Questa rivoluzione cromatica globale viene spesso subita ed accettata in modo inconscio, e - come solitamente avviene - ad una sovraesposizione si accompagna una assuefazione ed uno svilimento.

Lasciamo ad altra sede l'approfondimento di questi argomenti. E' però essenziale capire un dato fondamentale:

nulla di tutto questo sarebbe stato possibile se, a partire dalla metà dell'ottocento, l'industria chimica non avesse fornito una gamma di coloranti e pigmenti (e di tecniche applicative) incomparabilmente superiore a quella disponibile fino ai decenni precedenti.

Non possiamo immaginare cosa avrebbe fatto Bach con un sassofono, o Mozart con una Fender: neppure possiamo immaginare cosa avrebbero fatto Michelangelo o Tiziano con i pennarelli ed i colori acrilici di cui dispone qualunque hobbysta contemporaneo.

L'industria dei coloranti e dei pigmenti sintetici ha comportato un grande miglioramento della qualità della vita per la maggior parte delle persone del mondo, almeno fra quelle che non vivono in totale miseria.

La preparazione e l'uso di sostanze coloranti hanno anche comportato gravi danni alla salute di troppe persone, e continuano a farlo soprattutto nei paesi più poveri. Ma è importante saper distinguere le due cose.

Semberebbe quindi della massima importanza che la scuola nel suo complesso, e soprattutto le scuole ad indirizzo *chimico*, dedicassero parte del loro tempo alla formazione di conoscenze nel campo del colore.

Così non è.

Questo poster vuole essere un contributo alla diffusione della materia fra i colleghi insegnanti di chimica, presentandone i principi essenziali.

LE 15 CAUSE DEL COLORE

Sono riportati in **grassetto** i fenomeni di tipo prettamente "chimico" ed in nero i fenomeni di tipo "fisico".
Sono riportati *in corsivo* i fenomeni che danno tipicamente origine ad *emissione* di luce.

Vibrazioni ed eccitazioni semplici		
1	Incandescenza	<i>Fiamme, lampadine, archi elettrici, lampade da campeggio</i>
2	Eccitazione nei gas	<i>Lampade a vapori, fulmini, aurore boreali, alcuni laser</i>
3	Vibrazioni e rotazioni	<i>Acqua, ghiaccio, iodio, fiamme blu del gas</i>
Transizioni coinvolgenti effetti del campo dei leganti		
4	Composti dei metalli di transizione	<i>Turchese, molti pigmenti, alcuni tipi di fluorescenze, laser e fosforescenze</i>
5	Impurezze di metalli di transizione	<i>Rubino, smeraldo, minerali ferrosi rossi</i>
Transizioni fra orbitali molecolari		
6	Composti organici	<i>La maggior parte dei coloranti, la maggior parte delle colorazioni biologiche, alcuni tipi di fluorescenze e di laser</i>
7	Trasferimento di carica	<i>Zaffiro blu, magnetite, lapislazzuli, molti pigmenti</i>
Transizioni coinvolgenti bande energetiche		
8	Metalli	<i>Rame, argento, oro, ferro, ottone, vetro-rubino</i>
9	Semiconduttori puri	<i>Silicio, galena, cinabro, diamante</i>
10	Semiconduttori drogati o attivati	<i>Diamanti gialli e blu, diodi ad emissione di luce, alcuni tipi di laser e di fosforescenze</i>
11	Centri di colore	<i>Ametista, quarzo fumé, vetri "ametista" del deserto, alcuni tipi di laser e di fluorescenze</i>
Ottica geometrica e fisica		
12	Rifrazione dispersiva, polarizzazione etc.	<i>Arcobaleno, alone solari e parelio, raggio verde, "fiamme" nelle gemme</i>
13	Dispersione	<i>Cielo blu, tramonto rosso, luna blu, pietra di luna, dispersione Raman, occhi blu ed alcuni altri colori biologici</i>
14	Interferenza	<i>Veli d'olio sull'acqua, bolle di sapone, rivestimenti di obiettivi fotografici, alcuni colori biologici</i>
15	Diffrazione	<i>Aureole e glorie, reticoli di diffrazione, opale, alcuni colori biologici, la maggior parte dei cristalli liquidi.</i>

(adattato da: K. Nassau, The Physics and Chemistry of Colour, Wiley, New York 1983)

LA METRICA DEL COLORE: i principi

Le 15 cause del colore elencate da Nassau determinano perchè un corpo emetta o assorba selettivamente la luce a determinate lunghezze d'onda. Ben diverso è invece capire come il cervello reagisca alla luce che incide sull'occhio.

Fin dagli anni '20 si è verificato che la maggior parte delle persone ha una risposta soggettiva agli stimoli "colorati" che è sorprendentemente simile, al di là di piccole fluttuazioni dovute a fattori individuali o collettivi.

È quindi possibile generare dei modelli che, almeno nella maggior parte delle situazioni reali, riproducano strumentalmente tale risposta media.

L'assunto fondamentale, molto semplificato rispetto alle più recenti scoperte, ma praticamente applicabile nella maggior parte delle situazioni, è che l'occhio sia dotato di tre diversi tipi di recettori (sensibili alle frequenze centrate nel blu, nel verde e nel rosso), i quali inviano segnali separati che vengono ricomposti a livello corticale, e interpretati come colori.

L'apparecchio di misura deve quindi poter scomporre il segnale luminoso proveniente dal campione secondo le curve di risposta dei tre recettori (fisicamente, mediante una serie di tre filtri; o per proiezione matematica, sulle tre singole curve di risposta, dello spettro proveniente dal campione ed analizzato con un monocromatore).

Altrettanto importante è ovviamente la natura della luce incidente (se il campione non è totalmente autoluminoso). Anche questo può avvenire utilizzando una lampada standard, o più comodamente correggendo matematicamente la curva spettrale di una lampada reale. Sia le caratteristiche delle luci da impiegare, sia quelle dell'"osservatore" tipo, sia i requisiti strumentali, sono state unificati fin dal 1931, e successivamente modificati ed integrati in base ai dati successivi.

Un moderno apparecchio di misura è in genere uno spettrofotocolorimetro, cioè uno spettrofotometro concepito essenzialmente per misure colorimetriche.

Le differenze principali rispetto ad uno spettrofotometro analitico sono:

- una banda passante abbastanza larga (da 5 fino a 20 nm), poichè la maggior parte delle sostanze ha bande di assorbimento larghe molte decine di nanometri, e per la necessità non sacrificare l'intensità dell'irraggiamento del rivelatore (è richiesta una risposta precisa anche a valori di trasmissione o riflessione prossimi all'1%);
- hardware e software che elaborino i calcoli necessari (spesso ci si appoggia su un PC esterno).
- un portacampione adatto per misure in riflessione (a sfera o a riflessione diretta).

LA METRICA DEL COLORE: le rappresentazioni

Tutte le misurazioni colorimetriche, su corpi autoluminosi o no (e questi ultimi sono ovviamente i più comuni), partono in genere dalla registrazione dello spettro di emissione (o riflessione, o trasmissione) del campione in esame, illuminato - se non autoluminoso - da una sorgente a composizione nota (standard, o riferibile matematicamente ad una curva standard). Ci riferiremo per brevità a campioni opachi puramente riflettenti (un qualunque oggetto solido).

Il prodotto della curva di emissione della lampada per la curva di riflessione dell'oggetto (che normalmente è invariante rispetto alla sorgente) viene moltiplicato per le tre curve di risposta dell'osservatore standard; gli integrali delle tre curve ottenute, opportunamente pesati nel campo del visibile, 400 - 700 nm, costituiscono i **valori tristimolo** del corpo nelle date condizioni di esame (modello visivo di Young).

Il rosso, il verde ed il blu usati come colori di riferimento sono quindi una rielaborazione dei **colori primari additivi**, ed i loro complementari (ciano, magenta, giallo) lo sono per i **colori primari sottrattivi**. Si noti che in colorimetria tutti i colori di combinazione sono considerati secondari, e cade la vecchia definizione di colori terziari ancora diffusa in campo artistico.

L'uso di tali valori non è tuttavia pratico, e una prima rielaborazione consiste nel valutare il peso relativo dei tre valori: si ottengono così le **coordinate di cromaticità** del corpo, che consentono di separare il colore nei suoi tre attributi percettivi: la *luminosità*, la *vivacità* o *saturazione*, e la *tonalità*. Le ultime due caratteristiche sono le più immediate ed intuitive per la definizione di un colore, e possono essere rappresentate classicamente in un **diagramma di cromaticità**.

Lo spazio generato dalle coordinate tristimolo (**CIE 1931**) è fortemente nonlineare. Una sua modifica come quella suesposta non consente quindi di valutare un parametro essenziale come la *misura della differenza* fra due colori simili. Dal 1931 sono state proposte numerose modifiche, basate su sviluppi in serie piuttosto complessi e difficilmente gestibili. In un certo senso, l'ironia ha voluto che un modello non completamente lineare ma ragionevolmente affidabile e semplice sia stato adottato nel 1976, cioè all'alba del moderno calcolo elettronico.

Lo spazio metrico in questione è detto **CIE 1976**, e può essere espresso in coordinate ortogonali (**CIELab**) o cilindriche (**CIELCh**). Le prime esprimono il colore come una combinazione di opposti giallo-blu e verde-rosso e della luminosità (modello di Hering), le seconde richiamano (ma non identicamente) la rappresentazione tramite luminosità, tonalità e saturazione. Ha il limite di non consentire la visualizzazione dei colori in un diagramma simile al precedente e di essere adatto solo a corpi non autoluminosi, ma dal punto di vista pratico è il più agevole e comunemente impiegato in pratica. Per le sorgenti luminose (come gli schermi TV) viene adottato uno spazio diverso, detto **CIELuv**.

Gli ulteriori affinamenti, come i modelli **CMC** e **Labmg**, servono a correggere le residue deviazioni dalla linearità. Per quanto siano essenziali nella valutazione di piccole differenze di colore, il loro uso è di solito riservato ad applicazioni pratiche o ad approfondimenti teorici, e ne omettiamo qui la definizione.

E' importante notare che la differenza di colore (dE^* , che in coordinate ortogonali rappresenta la distanza pitagorica fra due punti nello spazio) è la base per la **formulazione strumentale** di una tinta, cioè per la previsione di una combinazione sottrattiva di colori di corpi opachi (p.es., miscele di vernici), classicamente basata sul modello di Kubelka e Munk, oltre che per la valutazione delle **tolleranze** cromatiche ammissibili fra due colori virtualmente uguali ma non perfettamente identici (la qual cosa ha una evidente importanza in campo commerciale).

IL COLORE NELLA SCUOLA ...²

Esaminiamo cosa si può trovare di tutto questo nei normali programmi scolastici.

Scuole ad indirizzo scientifico e tecnico

Fra le cause del colore, gli insegnanti di fisica di solito trattano i punti 12 e 14, e più raramente 1, 2, 13 e 15.

Negli ITI chimici, gli insegnanti di chimica organica sfiorano il punto 6, che viene sviscerato da chi insegna chimica tintoria; quelli di analitica possono aggiungere i punti 4 e 7.

Aggiungiamo pure qualche altro accenno, specifico di alcuni settori dell'istruzione tecnica: nella globalità, la nostra scuola non prevede alcuna materia che specificamente si occupi di tutte le cause delle manifestazioni cromatiche.

Sono poi rarissimi i corsi in cui venga almeno accennata la metrica del colore, ovvero i metodi e le tecniche per valutare numericamente e strumentalmente le caratteristiche di un colore.

I fenomeni fisiologici e psicologici con cui il nostro corpo percepisce e reagisce ai colori sono, tutt'al più, appena accennati nei corsi di scienze.

Scuole ad indirizzo artistico e grafico

Sia le cause che la metrica del colore sono, nella migliore delle ipotesi, appena accennate; la metrica del colore viene spiegata, agli studenti di grafica, in una sua variante empirica e semplificata: la densitometria quadricromatica.

² Questo paragrafo andrebbe aggiornato perchè qualcosa è effettivamente cambiato. Ne davo già atto nella mia comunicazione di Bari, citata in bibliografia.

Nelle scuole ad indirizzo grafico, che rispetto ad allora si sono enormemente convertite all'elettronica sulla spinta dell'industria e della tecnologia, la scienza del colore ha acquistato uno spessore nettamente maggiore. Del resto, oggi ogni studente ha un pc con una scheda grafica e software di elaborazione d'immagine, vettoriale e raster, che rende inevitabile l'acquisizione di una dimestichezza almeno empirica con i concetti che esprimevo in queste pagine... non di rado, taluni studenti sanno smanettare e ottenere risultati meglio di taluni loro insegnanti.

Io stesso non potevo immaginare, allora, che oggi avrei scattato immagini più che decorose e da utilizzare per edizioni di vario tipo usando la *fotocamera digitale RGB del mio telefonino!*

Crede tuttavia che il senso generale delle pagine che seguono resti valido come e più di allora: il livello *medio* della formazione di tipo scolastico ed accademico di carattere generale soffre probabilmente di un distacco ancora *maggiore* rispetto a "quella roba strana che sta intorno al cancello della scuola e che chiamiamo *mondo*".

La *cromatologia* degli istituti artistici consiste essenzialmente nello studio della fisio-psicologia della percezione. Le teorie in uso, ancorché qua e là accettabili, sono però in genere antiquate e dogmatiche, e non tengono praticamente conto delle scoperte fatte nel nostro secolo sulla natura della luce e della materia.

Esse si basano spesso su un'opera tra il mistico ed il fantascientifico quale la *Farbenlehre* di Goethe - 1810 - e su schematismi da essa derivati ancora a metà del nostro secolo, quali la teoria cromatica di Itten (che può essere valutata appieno per ciò che è solo leggendola in versione integrale, senza espungerne gli aspetti frenologici al limite del razzismo - come avviene nelle edizioni a stampa più diffuse)³.

Altre scuole superiori

Tutta la trattazione del colore si riduce perlopiù alla descrizione degli esperimenti newtoniani.

E all'università?

Vale quanto sopra: tutti gli aspetti del colore, al di là della fisica e chimica di base, vengono studiati nell'ambito di rari e sporadici corsi; gli approfondimenti sono perlopiù strettamente settoriali.

... E IL COLORE NELL'INDUSTRIA

Lo studio delle cause del colore, e soprattutto la misurazione sperimentale del colore di materie prime e manufatti, è essenziale per industrie di settori come ad esempio:

<ul style="list-style-type: none"> • pigmenti e coloranti • polimeri • fibre naturali e sintetiche 	<ul style="list-style-type: none"> • schermi video catodici, a cristalli liquidi ed affini • sorgenti di luce tradizionali e laser
---	--

³ Sulla *Farbenlehre*, da allora ho avuto modo di confrontare questa posizione drastica con studiosi di alto livello che mi hanno suggerito di essere meno perentorio, e credo abbiano ragione. Del resto, però, lo stesso Goethe invecchiando aveva in parte riveduto le sue opinioni. Su Itten e sul fatto che possa ancora trovare spazio in corsi che pretendono di essere scientifici, resto della stessa idea.

I materiali e le tecniche da esse prodotti sono a loro volta impiegati, applicando estesamente la colorimetria strumentale (tristimolo, densitometrica, spettrofotometrica), ad esempio, per:

<ul style="list-style-type: none"> • prodotti vernicianti • inchiostri • materie plastiche • carrozzerie auto, moto, ciclo ed affini • tessili, per abbigliamento ed usi tecnici • calzature e pelletteria • fotografia • agroalimentare • diagnostica chimica e clinica • editoria, imballaggio, segnaletica • detergenza 	<ul style="list-style-type: none"> • grafica elettronica, TV, hardware e software • illuminotecnica • materiali sportivi • legno ed arredamento • galvanotecnica • vetro e ceramica • combustibili e lubrificanti • arti figurative e restauro • eccetera, eccetera.
---	---

Per limitarci ad un semplice esempio applicativo: nel solo comparto tessile comasco, basato essenzialmente su aziende medio - piccole dedite a produzioni di alta qualità, sono quotidianamente in esercizio alcune decine di spettrofotometri e colorimetri⁴.

Il loro impiego è equamente diviso fra controllo qualità e formulazione automatica delle ricette, ma vi sono esempi di gestione dei magazzini di materie prime e di resi, che si basano sull'analisi spettrofotocolorimetrica, attraverso elaborati programmi di calcolo e simulazione.

E' difficile valutare quanti siano gli apparecchi colorimetrici di vario tipo, in funzione oggi in Italia; sicuramente alcune migliaia. Salvo che per pochi diplomati provenienti da scuole particolari, **la quasi totalità dei tecnici e dei ricercatori ha dovuto impararne sul campo sia la teoria che la pratica**, con i prevedibili disagi anche nel confronto tecnologico e commerciale con i paesi più evoluti.

In effetti, non si riesce a capire quali siano i reconditi motivi di un simile disinteresse della scuola per questo importante settore tecnologico.

⁴ Il numero di quelle aziende è purtroppo molto diminuito, l'uso della spettrofotocolorimetria si è però generalizzato, soprattutto per la potenza di calcolo dei computer che è incomparabile a quella delle macchine di dodici anni fa.

CHI E COME POTREBBE INSEGNARE LA SCIENZA DEL COLORE?

Lo studio di tutte le **cause** del colore può essere compiuto solo da parte di uno studente che abbia una discreta preparazione scientifica di base, sotto la guida di un chimico che abbia buoni ricordi di ottica e spettroscopia, o di un fisico che abbia solide conoscenze di chimica. Anche cercando di essere ottimisti, è ragionevole pensare che solo pochi degli studenti delle medie superiori possano compierlo in modo completo e non superficiale.

Sono tuttavia sufficienti cognizioni non approfondite dei principi generali di tali cause, perchè lo studente possa affrontare proficuamente lo studio della **metrica** del colore, ossia della colorimetria.

Quanto poi alla scelta del corso cui affiancare questi argomenti, considerato quanto detto sulle cause del colore, e il taglio eccessivamente empirico della colorimetria rispetto ai metodi degli insegnanti di fisica, sembra ragionevole attendersi che la didattica del colore e della colorimetria **possano diventare parte (integrante, complementare o magari facoltativa) di corsi di chimica** teorica o applicata.

Negli ITI chimici, quando non faccia già parte di corsi ad hoc, lo studio del colore potrebbe inserirsi nei programmi di analitica: sia perchè molte basi sono già fornite nei corsi di spettrofotometria UV-vis, sia perchè le prove di laboratorio possono avvalersi di un UV-vis che dia un responso in forma numerica, su carta o su file; è utile - ma non indispensabile - la sfera integratrice per corpi opachi. Tutti i calcoli necessari possono essere facilmente eseguiti, e resi in forma grafica, con qualunque foglio elettronico.

Riguardo ai **testi**, infine, si apre un punto dolente: in italiano non esiste alcuna opera recente di approfondimento, e le poche a livello introduttivo sono spesso difficili da reperire o non aggiornate: è raro trovare volumi che dedichino agli aspetti chimico-fisici almeno lo stesso spazio dato alle suddette teorie percettive. Riportiamo, per chi fosse interessato, alcune indicazioni su testi il cui contenuto è alla portata anche dei non esperti (specialmente gli ultimi due)⁵.

K. Nassau, *The Physics and Chemistry of Color*, Wiley, 1983

R.W.G. Hunt, *Measuring Colour*, Ellis Horwood 1991

A. Frova (ed.), *Il colore - Le Scienze quaderni* 1994

S. Palazzi, *Colorimetria - la scienza del colore nell'arte e nella tecnica*, Nardini 1995

⁵ Integrazioni: da allora, il mio testo, che aveva avuto buone recensioni, non è stato ristampato ed ora è difficilmente reperibile. Del resto, avrebbe anch'esso bisogno di un aggiornamento al progresso tecnologico. In compenso sono usciti diversi testi validi, a partire da uno specialistico (e piuttosto impegnativo) come quello di C. Oleari, *Misurare il colore*, Hoepli, Milano 1998.

All'XI congresso della Divisione Didattica SCI, Bari 2000, avevo portato un'altra comunicazione intitolata "Colorimetria su campioni trasparenti ed opachi: note didattiche", disponibile in rete in formato html e che ripubblicherò in pdf su www.kemia.it con le illustrazioni originali, in cui ampliavo ed aggiornavo quanto esposto in queste pagine.