

La candela

Credo sia ora di concludere un lungo discorso, cominciato due anni fa, e che mi ha già impegnato per due puntate: quello sul colore. A dire il vero, se volessi dire qualcosa su tutti i punti che mi sono andato annotando, ci vorrebbero ben altro che queste poche pagine; e del resto sapete bene che sul colore sono stati scritti una quantità di libri...

Nelle puntate precedenti ho passato sommariamente in rassegna due ordini di problemi: l'origine fisica del colore nella composizione spettrale della luce di una sorgente, e poi alcuni dei modi coi quali i corpi possono alterare la composizione della luce che ricevono, e quindi apparire colorati. Facendo ancora una volta riferimento alla metafora dei quattro giocatori, per ora sono entrati in ballo solo i primi due: la sorgente di luce e il corpo illuminato. Ora toccherebbe agli altri due, che sono il rivelatore, ossia la retina e più precisamente i coni, e infine il cervello.

Avevo anche messo in evidenza che fin quando si parla dei primi due giocatori siamo nel campo specifico della fisica, che per me è familiare; perciò se una difficoltà ho avuto, è stata (immodestamente) solo quella di farmi capire da chi fisico non è. E non è detto che mi sia sempre riuscito. Ma ora ... è un'altra musica: la fisica c'entra un po', ma non è più in primo piano. È il terreno della fisiologia, della biochimica se vogliamo, ma anche della psicologia; e non è un terreno nel quale posso muovermi con disinvoltura. Anche per questo debbo limitare i miei propositi, e di fatto non proverò ad andare al di là della retina (per quanto, come vedremo, questo non sia strettamente possibile).

Detto in altri termini, cercherò solo di vedere come si passa dalla composizione spettrale della luce che arriva nell'occhio al colore che si vede; ma semplificando, schematizzando, tralasciando o accennando appena tutta una serie di questioni che non sarebbero affatto da tralasciare, ma che vanno ben al di là delle mie competenze (e anche dello spazio che posso occupare, per fortuna ...).

Posso presentare l'argomento che voglio trattare anche da un altro lato: accanto ai colori del mondo naturale, ci sono i colori "artificiali": intendo quelli della pittura, della fotografia, della stampa, della TV. Come si fa a riprodurre coi tubetti di colore, o con composti chimici in una pellicola, o con gli inchiostri, o con i "fosfori" di un cinescopio TV, dei colori che sembrano più o meno quelli della natura? Cercherò di mostrare che questo è possibile grazie a certe particolarità dell'occhio e del cervello, senza le quali (senza aver capito le quali) la riproduzione dei colori non potrebbe essere quella che è.

Potrà sembrare strano, ma dei vari esempi che ho fatto, quello più facile da spiegare, come vedremo, è quello tecnologicamente più moderno e sofisticato, ossia l'ultimo: la televisione a colori.

Credo sia noto a tutti che lo schermo di un cinescopio a colori ha una struttura a mosaico, che del resto è perfettamente visibile guardandolo da vicino, con l'aiuto di una lente: si vedono tanti puntolini luminosi, oppure dei trattini verticali, a seconda del tipo di cinescopio; e questi puntini o trattini sono sì colorati, ma non dei più diversi colori che siamo abituati a vedere. Non vedrete mai trattini o puntini gialli, o color cielo, o indaco, e neanche bianchi: li vedrete solo di tre colori. Rosso, verde, blu.

Quello che può cambiare è solo una cosa: ciascuno dei puntini o trattini può essere più o meno luminoso, pur restando sempre del suo colore. Guardando più attentamente scoprirete che i puntini o trattini sono disposti regolarmente, in "triadi", costituite ciascuna di un elemento rosso, uno verde e uno blu. Inutile dire che spesso si abbreviano i tre colori con RGB, che sta per "red," "green," "blue"; peccato che quella G possa essere presa per iniziale di "giallo," per aumentare un po' la confusione. . .

Se si guarda lo schermo alla distanza usuale, i puntini o trattini non si distinguono, perché sono troppo vicini: la loro distanza è al disotto della capacità di *risoluzione* dell'occhio. Più esattamente, questo vuol dire che la luce emessa dai tre elementi di una triade non va a finire su recettori diversi nella retina, ma sullo stesso, che quindi è stimolato da una luce che è la *somma* (proprio nel senso matematico di addizione delle tre distribuzioni spettrali) delle radiazioni provenienti da tutta la triade. Per questo motivo si dice che il cinescopio a colori lavora in *sintesi additiva*.

Forse avrete pensato che mi sono dilungato inutilmente: questa storia dei tre colori fondamentali sommando i quali si possono formare tutti gli altri è arcinota. . . È vero: è talmente nota che se ne parla spesso e volentieri a sproposito, facendo anche una discreta confusione: quali sono i colori fondamentali? sono necessariamente quei tre? e non esiste anche una *sintesi sottrattiva*? e la quadricromia allora, che cos'è? Ma soprattutto: stiamo parlando di una legge fisica, o di qualcosa di diverso? di che cosa?

Continuando con l'espedito retorico di mettere in bocca a un ipotetico lettore le domande che mi servono per sviluppare il discorso: "ma a me importa poco della televisione; m'interessa assai di più come *io* vedo i colori!" Giusto: ma sono partito dalla TV perché volevo sottolineare che la TV a colori non esisterebbe se non avessimo capito come "noi" vediamo i colori; e che il fatto che la TV a colori funzioni piuttosto bene è una prova che quello che abbiamo capito è corretto. (Col che vi ho enunciato di straforo il mio credo epistemologico; in forma volutamente rozza e semplicistica, per rimarcare la mia distanza da altre possibili posizioni. Ma questa non è la sede, come si suol dire. . .)

Vediamo dunque di rispondere ad alcune delle domande che ho enunciato più sopra. Prima di tutto: perché proprio *tre* colori fondamentali? e perché proprio quelli? Intanto credo sia ovvio che quando si dice che i colori fondamentali (o primari) sono tre si vuole dire che con quei tre si può riprodurre gran parte dell'universo dei colori; ma non che questo non sia possibile con quattro o più. Anzi, chiarisco subito questo punto: si può dimostrare empiricamente che con quattro colori si ottiene tutto ciò che si può ottenere con tre, *e anche altro*; ma succede un'altra cosa: che se vogliamo ottenere ad es. un certo verde pastello, mentre con tre fondamentali c'è un solo modo di farlo, con quattro le scelte sono molte, anzi a rigore infinite.

Una piccola parentesi: scommetto che quanto sto per dire suonerà quasi incredibile a chi ha un'educazione biologico-naturalistica, ma l'argomento che sto affrontando può essere trattato con chiarezza e precisione solo con l'uso di adeguate tecniche matematiche, che sono qui fuori questione (e non solo perché sarebbe problematico scrivere formule, ma anche perché poi occorrerebbe che venissero intese per quello che dicono ...). Debbo farne a meno, ma questo mi obbliga a giri di parole e anche a sostanziali imprecisioni. Però almeno una cosa — che posso dire senza formule — voglio dirla: il fatto che tre colori fondamentali sono il minimo necessario, e che con più di tre uno stesso colore si può ottenere in infiniti modi, in linguaggio matematico si esprime così: l'universo dei colori è *tridimensionale*.

Mi accorgo ora (e magari qualche lettore me lo starà già rimproverando) che non ho mai definito questo “universo dei colori.” In poche parole, intendo l'insieme di tutti i colori percepibili, che possono differire per *tonalità* (rosso, giallo, arancio, indaco ...); per *saturazione* (dal rosso acceso al rosa, al rosa pallido, al bianco rosato ...); infine per *intensità*. Qui in verità mi trovo in un terreno minato, dove gli aspetti soggettivi (ossia il ruolo del quarto giocatore) diventano determinanti.

Basti un solo esempio: che cosa distingue il bianco da tutte le gradazioni di grigio (intendo sempre grigio “neutro,” ossia senza sfumature di colore)? Dal punto di vista della fisica, l'unica differenza sta nell'intensità: un foglio bianco e uno grigiastro non mandano nei miei occhi una luce di diversa composizione spettrale, ma solo di diversa intensità. Però ecco il problema: il foglio bianco lo vedo bianco sia alla luce diretta del sole, sia vicino alla finestra spalancata che guarda a Nord a metà giornata (quando non è colpita dal sole) sia in un ambiente in penombra. Il foglio grigio mi appare tale solo *per confronto*, non in assoluto. Con questo ho sfiorato un grosso problema: quello della *costanza del colore*, che riguarda non solo il dilemma bianco-grigio, ma anche il confronto di colori.

Per evitare di essere confusi da questi fenomeni di costanza, gli esperimenti coi colori debbono essere fatti in condizioni ben controllate; per es. proiettando i colori sempre su uno schermo in cui ci sia uno sfondo bianco dominante, che

dà per così dire la taratura a tutto il sistema. Non dico di più, perché anche gli esperimenti sulla percezione dei colori non sono il mio mestiere, e se provassi ad approfondire probabilmente direi solo sfondoni... Mi accontento di aver messo sull'avviso, e di avere allo stesso tempo chiarito che è possibile sperimentare in modo attendibile. Torniamo dunque al nostro universo tridimensionale dei colori.

Abbiamo chiarito che tre colori sono necessari e sufficienti. Ma quali? Sopra ho scritto RGB, ma questa non è una definizione precisa. Si potrebbe provare a studiare che luce emettono i tre elementi del mosaico di un cinescopio, e si scoprirebbe che cinescopi di fabbricanti diversi, ma anche di modelli diversi, e perfino lo stesso modello da nuovo a usato, non danno la stessa composizione spettrale. In altre parole, non c'è un ben preciso rosso, un ben preciso verde, un ben preciso blu. Ma allora? Come è possibile che tutti i televisori sembrano funzionare ugualmente bene? O forse questo non è vero, e ci sono cinescopi migliori di altri (da questo specifico punto di vista, si capisce)? Inoltre, domanda più fondamentale: esiste una terna di colori ideale, che permetta di ricostruire tutto l'universo?

Ecco un po' di risposte. Prima di tutto, entrate in un negozio che vende televisori, e vedrete: non sono affatto tutti uguali. Visti l'uno accanto all'altro, uno dà sul rosa, l'altro sul celestino, un terzo sul verdolino... In realtà questo dipende da parecchie cause, alcune inerenti all'elettronica, di cui mi guardo bene dal parlare; ma in parte la differenza sta proprio nella diversa emissione dei tre fosfori di ciascun cinescopio. In altre parole, i colori fondamentali adottati non sono proprio uguali. Se ciononostante tutti sembrano funzionare bene, è proprio grazie a quella costanza del colore che si diceva: insomma è il nostro cervello che viene in aiuto ai fabbricanti, compensandone i difetti (purché non siano troppo grossi...).

Il difetto principale di ogni cinescopio, e di ogni sistema di sintesi additiva, è che i colori fondamentali usati non sono *colori puri*. Che vuol dire? Questo è semplice: colore puro è (quasi) sinonimo di radiazione monocromatica, e non credo di dover spiegare oltre. Purtroppo nessun mezzo tecnico di produzione di colori, ad eccezione delle lampade spettrali opportunamente filtrate, o meglio dei laser, riesce a produrre una buona approssimazione a una luce monocromatica: quindi il rosso del cinescopio ci appare sì rosso, ma non è proprio puro (o completamente *saturo*, come anche si dice). E lo stesso è vero per il verde e per il blu.

Ma c'è di peggio: ammettiamo anche di avere a disposizione sorgenti monocromatiche: una rossa, una verde, una blu (più precisamente, dovrei dire di che lunghezza d'onda, ma i numeri ora non importano). Le uso in un esperimento per costruire, con sintesi additiva, gli altri colori: per es. cerco di realizzare un bel giallo. So già che dovrò sommare rosso e verde, in opportune proporzioni. Le proporzioni le posso aggiustare cambiando a piacere le intensità dei due fasci.

Ebbene, per quanto faccia, non riesco mai a ottenere un giallo puro. Ci potrò andare vicino, ma se confronto con una sorgente gialla monocromatica, posso vedere la differenza: il giallo ottenuto per sintesi è *meno saturo*. Ancora: cerco di fabbricare un violetto. Niente da fare: otterrò forse qualcosa che ci somiglia, ma ben diverso dal violetto puro della sorgente monocromatica.

C'è un fatto strano che occorre descrivere, ed è che mentre tutte le radiazioni monocromatiche corrispondono a colori puri, il viceversa non è vero: l'occhio percepisce colori puri che non esistono come luce monocromatica. Si tratta dei cosiddetti "porpora": tutta una gamma di colori tra il rosso e il violetto. Ecco perché più sopra avevo scritto che colore puro è *quasi* sinonimo di radiazione monocromatica: i porpora sono colori puri, nel senso di saturi, ma non si trovano nello spettro visibile.

Si può rappresentare la situazione per via geometrica, disponendo i tre colori primari ai vertici di un triangolo (RGB in figura). La sintesi mi dà tutti i colori *interni* al triangolo, ma se cerco di rappresentare i colori puri, questi si dispongono lungo una curva *esterna* al triangolo. Cambiando la terna di primari, cambia il triangolo, e si può cercare di sceglierli in modo che la parte di colori che resta al di fuori sia la più ristretta possibile ($R'G'B'$). Se i miei colori fondamentali (i fosfori del cinescopio) sono scadenti, ossia poco saturi, il triangolo che ne risulta è più piccolo ($R''G''B''$), e mi perdo buona parte dell'universo...

A questo punto il lettore che abbia una qualche familiarità con concetti basilari di matematica mi farà un'obiezione: se l'universo dei colori è tridimensionale, com'è possibile rappresentarlo con un grafico nel piano, che ha solo due dimensioni? Infatti la rappresentazione è parziale, anche se ugualmente utile: si rappresentano solo i *rapporti*, ossia le percentuali di colori primari, non le intensità assolute. Così ne bastano due, visto che la somma di tutte e tre deve fare 100%; ma si perde qualcosa: due colori che differiscano solo per l'intensità corrispondono a uno stesso punto nel grafico. Può sembrare cosa da poco, e in molti casi lo è; ma certe volte l'intensità è decisiva. Così ad es.: che cosa distingue il giallo dal marrone? A parte le varie sfumature, un marrone non è che un giallo a bassa intensità: un giallo scuro. E ci sono tanti casi analoghi.

Come forse l'introduzione della rappresentazione geometrica suggerisce, a tutto questo si può dare una forma matematicamente precisa, nella quale ciascun colore è descritto da tre numeri (detti "coordinate tricromatiche") e si può calcolare, dati tre primari, quali colori siano ottenibili per sintesi da quelli. Ma su questo non voglio insistere, anche perché ci sono altre cose di cui occuparci.

Sicuramente vi starete chiedendo: dov'è finito l'occhio? la retina? i coni? Che cosa c'entrano questi strani triangoli con quello che succede negli occhi quando ci arriva la luce? La risposta possiamo trovarla nella storia. Infatti gli aspetti essenziali del meccanismo tricromatico della visione, che abbiamo

appena visto, erano già noti quasi due secoli fa, e venne fin d'allora supposto che questo meccanismo avesse una base fisiologica: che l'universo dei colori fosse tridimensionale perché nell'occhio ci sono *tre* tipi diversi di recettori. Solo più tardi l'anatomia ha mostrato l'esistenza dei coni, e solo in tempi relativamente recenti si è dimostrato che esistono effettivamente *tre tipi* di coni, con diverse sensibilità spettrali.

Occorre forse descrivere brevemente che cosa vuol dire, in questo contesto, sensibilità spettrale. Se avessimo a che fare con dei rivelatori fotoelettrici, la risposta sarebbe semplice: guardo qual è la corrente elettrica prodotta dal rivelatore, a parità d'intensità (potenza) della radiazione ricevuta, al variare della lunghezza d'onda di questa. Scoprirò in generale, per qualsiasi rivelatore, che esistono lunghezze d'onda alle quali esso non risponde affatto (corrente nulla) altre alle quali risponde più o meno, e di solito con una risposta massima a una certa lunghezza d'onda. Sia chiaro: il discorso così fatto è assolutamente generale, e può valere anche per radiazione non visibile all'occhio: per es. per l'infrarosso.

Ma come si misura la sensibilità di un cono? Oggi si riesce a misurare direttamente la corrente elettrica attraverso la membrana della cellula, in risposta a uno stimolo luminoso. Incidentalmente, in questo modo è stato possibile dimostrare che i bastoncelli danno una risposta misurabile con l'assorbimento di un solo fotone, mentre i coni sono 100 volte meno sensibili. Perciò non c'è nessuna differenza con quello che ho detto sopra per un rivelatore fotoelettrico (a parte l'abilità di micromanipolazione necessaria).

È quindi relativamente facile costruire una curva di sensibilità, che ci dà la corrente prodotta a seconda della lunghezza d'onda, e dimostrare l'esistenza di tre tipi di coni, come dicevo sopra. I tre tipi differiscono soprattutto per il comportamento alle grandi lunghezze d'onda (lato rosso dello spettro): i coni "blu" sono 100 volte meno sensibili (grosso modo) nel verde che nel blu; i coni "verdi" sono 1000 volte meno sensibili nel rosso che nel verde; infine i coni "rossi," che hanno il massimo di sensibilità nel giallo, sono 10 volte più sensibili di quelli verdi nella zona rossa dello spettro.

Mi sono un po' soffermato su questi dettagli, perché volevo sottolineare che non è affatto vero che i coni blu "vedano" solo il blu, quelli verdi solo il verde, ecc.: tutti i coni sono sensibili a tutto lo spettro, ma con sensibilità parecchio diverse. Qual è l'effetto di queste diverse sensibilità?

Cominciamo col ricordare qual è l'effetto ultimo di quelle correnti che dicevo sopra, pensando al caso semplice di uno stimolo luminoso costante nel tempo. Grazie al peculiare comportamento biochimico di queste cellule (come di tutti i recettori sensoriali) la corrente costante abbassa il potenziale interno della cellula, e questo riduce il rilascio di neurotrasmettitore alla sinapsi tra il cono e una cellula successiva (cellula bipolare). Da qui in poi le cose si complicano, prima di tutto per me, perché ne so poco o niente. Quel poco che ho capito

è che nella retina c'è già una rete complessa di cellule nervose, che eseguono una preelaborazione dei segnali; e che sono cruciali a questo proposito le cellule gangliari, nelle quali avviene un confronto tra i segnali ricevuti da coni di diverso colore.

Torniamo ora al mondo esterno, e supponiamo di star guardando un vestito rosso. Allora i coni blu assorbiranno pochissima luce, quelli verdi un po' di più, quelli rossi ne assorbiranno molta. Comunque avvenga nei dettagli l'elaborazione successiva, resta il fatto che tutto dipende dalla diversa risposta dei tre tipi di coni: quindi se al posto del vestito rosso metto una sorgente di luce che produca lo stesso assorbimento di fotoni nei vari coni, l'effetto (e alla fine dei conti la sensazione di colore) sarà lo stesso. Non è necessario che la nuova sorgente emetta luce con la stessa composizione spettrale del vestito; basta che produca lo stesso assorbimento nei tre coni, come ho detto. Sarebbe facile mostrare matematicamente che ci sono in realtà infinite combinazioni spettrali che si equivalgono in questo senso, e che quindi per noi *hanno lo stesso colore*, sebbene dal punto di vista della fisica della radiazione siano ben distinguibili.

Metto subito le mani avanti: non voglio lasciar credere che la sensazione di colore, nelle condizioni comuni, non dipenda da altro che da quanto ho detto. Ho già ricordato il fenomeno della costanza, ma accanto a questo ci sono i fenomeni di contrasto: per es. un oggetto colorato appare di colore diverso a seconda dello sfondo in cui si trova. Qui entra in ballo in parte la preelaborazione retinica, che consiste anche di confronto fra le risposte di coni adiacenti; ma entra pure il quarto giocatore: il cervello. E mi basta di averlo ricordato.

Ho scritto abbastanza, e debbo chiudere l'argomento, per quanto affascinante. Tante cose sono rimaste fuori, com'era facile prevedere; magari se ne potrà riparlare fra qualche anno... Non voglio però finire senza almeno un cenno alla sintesi sottrattiva, che è quella usata in tutte le tecniche tradizionali di riproduzione del colore.

La sintesi sottrattiva lavora per sottrazione, come dice il termine (anche se, per ragioni su cui non posso soffermarmi, sarebbe più giusto dire che lavora per moltiplicazione). Un pigmento colorato, in una fotografia come nell'inchiostro da stampa o nei colori per pittura, lavora *assorbendo* una parte della radiazione che riceve (come la clorofilla delle foglie, ricordate?): quello che vediamo rosso assorbe le lunghezze d'onda più corte, il blu assorbe di più quelle lunghe, ecc. Più esattamente, un pigmento che assorba prevalentemente nel blu viene visto giallo, uno che assorba nel rosso viene visto blu-verde (turchino o ciano); uno che assorba soprattutto nel verde appare porpora (o magenta).

Ma che succede se mescoliamo due pigmenti, uno turchino e uno giallo? Succede che l'assorbimento dell'uno si combina con quello dell'altro: il primo toglie alla luce bianca la frazione rossa, il secondo toglie la parte blu... che cosa rimane? Rimane il verde. Ecco perché nella sintesi sottrattiva giallo più turchino fa verde, eccetera.

E con questo dobbiamo proprio lasciarci. Anche se ho già un'idea di quale sarà il tema della prossima puntata, non ve lo dico: per tener viva un po' di curiosità, ma anche perché, come ormai sapete, ci sono sempre gli imprevisti. . .