

La candela

Sto qui seduto a scrivere — eccezionalmente con carta e penna — e dalla finestra vedo il verde cupo degli abeti e quello più tenero dei larici; sullo sfondo l'azzurro del cielo con qualche nuvola bianca. Mi alzo, e in basso vedo il prato popolato di margherite bianche, campanule blu-viola, garofanini purpurei, ranuncoli e denti di leone gialli. . . Se scendessi a guardare il prato più da vicino, so che ci troverei, tra i molti insetti, coleotteri dalle elitre verdi o blu. Non ci sono farfalle perché è ancora un po' freddo; ma più avanti si vedranno le Erebie brune e le Licene azzurro cangiante. Più tardi, al tramonto, il Sole che ora mi appare bianco-giallo diventerà rosso; poi farà buio e cominceranno ad apparire le stelle: bianco-azzurre, gialle, arancio, rosse (ma non verdi o blu . . .).

Sarà ormai chiaro che il tema di oggi è il colore: intendo soprattutto il colore in natura. Tanto per cambiare, si tratta di un altro argomento che ritengo assai trascurato nella scuola, per le solite ragioni: è un tipico campo interdisciplinare, non è chiaro chi se ne dovrebbe occupare, richiede svariate competenze, ecc. Superfluo sottolineare invece il grande interesse educativo che l'argomento colore riveste, tra l'altro proprio perché coniuga gli aspetti estetici con quelli scientifici, perché obbliga a riflettere su ciò che è, in contrasto a ciò che appare, ecc. ecc.

Per cominciare, l'elenco presentato all'inizio è tutt'altro che completo: avrei dovuto ricordare i colori dei minerali, da quelli opachi (cinabro, zolfo sono due soli esempi) a quelli trasparenti (i vari quarzi, corindoni, topazi . . .); la superficie vellutata del turchese, i riflessi metallici della pirite. . . Poi il colore del mare e quello dei laghi; l'arcobaleno e le iridescenze delle gocce di rugiada; le piume degli uccelli e le scaglie dei serpenti. . . E se anche voglio partire dalla natura, non posso trascurare la tecnica: i colori dei pittori, la fotografia, la televisione. . .

E le varie sorgenti di luce: da quelle naturali (Sole) o semi-artificiali (le più diverse fiamme) fino ai vari tipi di lampade elettriche: a incandescenza, ad arco, a scarica (le cosiddette "neon"), fluorescenti. . .

Come si può mettere ordine in tutto questo? Come dare indicazioni didattiche? A dire il vero un'indicazione l'ho già data, implicitamente: si potrebbe far raccogliere a una classe un elenco di oggetti colorati, e un altro di sorgenti di luce, e un altro dei colori che non "appartengono a oggetti," ma tuttavia si vedono. Sarebbe un primo passo per poi ragionarci sopra.

Posso aspettarmi un'obiezione, o una richiesta: a che materia apparterrebbe una tale ricerca? a quale insegnante? Me la cavo facilmente: non rispondo. Vedete un po' voi: c'è posto per tutti. . .

Il passo successivo mi sembra il seguente: riconoscere che ciò che noi chiamiamo "colore" è il risultato di un gioco assai complesso, nel quale entrano di

regola quattro giocatori: la sorgente di luce; un corpo illuminato che diffonde, riflette o trasmette la luce; il nostro personale rivelatore (la retina coi suoi coni); infine un elaboratore (il cervello). In casi meno frequenti il secondo componente può mancare (percezione diretta della luce di una sorgente); in altri possiamo, un po' artificialmente, allungare la catena, per es. quando guardiamo una foto o la TV. Ma almeno per ora limitiamoci al caso più comune.

Notate che riconoscere il ruolo di tutti e quattro i giocatori non è affatto banale. Per es. si dice normalmente che un fiore o un vestito "è rosso," attribuendo al fiore o al vestito il colore come qualità sua propria (sebbene già Galileo abbia fatto la distinzione fra qualità "primarie" e "secondarie," ponendo il colore tra queste ultime). Le caratteristiche della sorgente sembrano poco importanti: il colore della luce diurna può cambiare molto, a seconda dell'ora, della presenza o meno di nuvole, ecc.; ma noi abbiamo la ferma convinzione di vedere i colori sempre allo stesso modo.

Ma allora, il colore è o no indipendente dalla sorgente? La risposta provvisoria è che il quarto giocatore supplisce alle variazioni del primo: anche se la sorgente cambia, almeno entro certi limiti l'elaboratore centrale può correggere le variazioni, basandosi su termini di paragone conosciuti. Ho scritto "entro certi limiti" perché se la sorgente è molto diversa da quella "naturale," costituita dalla luce diurna (un esempio estremo può essere una lampada al sodio) la compensazione non funziona più, per mancanza d'informazioni sufficienti.

Continuiamo ad approfondire, occupandoci in primo luogo della sorgente. Dico subito che questa è la parte più semplice del gioco, ed è interamente fisica. Infatti una sorgente di luce non è che un corpo che emette onde e.m. in un certo intervallo di lunghezze d'onda; ma l'intervallo d'interesse dipende dal rivelatore (il terzo giocatore). Se il rivelatore è l'occhio umano, solo le lunghezze d'onda tra 350 e 750 nm, all'incirca, hanno importanza, mentre per altri rivelatori (anche per altri occhi) l'intervallo può essere del tutto diverso.

Ma torniamo alla sorgente. Essa sarà caratterizzata completamente dalla *distribuzione spettrale* della radiazione emessa, ossia da una funzione $I(\lambda)$, che misura la potenza emessa per ogni intervallino di lunghezze d'onda attorno alle varie λ . Le sorgenti che si trovano in natura e gran parte di quelle artificiali hanno uno *spettro continuo*, il che vuol solo dire che $I(\lambda)$ cambia gradatamente e lentamente al variare di λ ; ma esistono anche sorgenti che emettono uno *spettro di righe* (es. i tubi a scarica in gas rarefatto, per non parlare dei laser): in questo caso $I(\lambda)$ è praticamente diversa da zero solo per una o più lunghezze d'onda discrete. Le sorgenti a spettro di righe non si usano per l'illuminazione, proprio perché alterano in modo drammatico la percezione dei colori.

A dire il vero c'è un'altra proprietà delle sorgenti di luce che occorre considerare: l'estensione. Una sorgente puntiforme, una poco estesa (come il Sole) o una largamente diffusa (come un cielo coperto) producono effetti molto diversi, in primo luogo per il tipo di *ombre* che generano, poi per i contrasti fra aree

illuminate o no; e queste differenze si riflettono sulla percezione dei colori. Ma non credo che potrò addentrarmi anche in questi aspetti.

Occorrerebbe poi descrivere lo stato di *polarizzazione* della luce emessa: c'è almeno un'importante sorgente naturale che ci manda luce più o meno polarizzata, ed è il cielo sereno; come pure è polarizzata la luce riflessa dall'acqua, dal vetro, ecc. In certi casi la polarizzazione della luce può influire sul colore, ma debbo purtroppo limitarmi: l'argomento è già sufficientemente complesso. . .

Torniamo dunque alla distribuzione spettrale. Il caso più importante (per la fisica teorica, ma anche per le situazioni pratiche) è quello del cosiddetto "spettro di corpo nero." Mi guardo bene dal tentare definizioni accurate, e mi limito a dire che *all'incirca* la radiazione e.m. emessa da un corpo caldo ha una distribuzione spettrale che dipende solo dalla temperatura, secondo la famosa *legge di Planck*. Insisto che si tratta di una semplificazione, ma che viene solitamente usata anche nella pratica fotografica e fotometrica: molte sorgenti, naturali o artificiali, vengono caratterizzate da una "temperatura di colore" T_c che non è detto che sia la vera temperatura della sorgente, ma è quella di un corpo nero la cui distribuzione spettrale si avvicina il meglio possibile a quella della sorgente.

Si parla così di temperatura di colore per il Sole (e per le stelle in genere): in questi casi essa è sufficientemente vicina alla temperatura della fotosfera; ad es. per il Sole $T_c \simeq 5900$ K. Questa è la temperatura della radiazione solare come il Sole la emette; ma se pensiamo a quella che arriva a noi, filtrata dall'atmosfera, abbiamo un dato variabile con le condizioni meteorologiche e con l'altezza del Sole: orientativamente possiamo dare ~ 5200 K. Ma si dà anche una temperatura di colore per la luce diffusa del cielo (di nuovo dipendente dalle condizioni meteorologiche, ma mediamente si assume $\sim 10\,000$ K), per le lampade a incandescenza e per quelle fluorescenti, per i flash delle macchine fotografiche, ecc.

La caratteristica per noi più importante della radiazione di corpo nero è che ha un massimo a una lunghezza d'onda che dipende dalla temperatura: più esattamente λ_{\max} è inversamente proporzionale a T_c (legge di spostamento di Wien). Ad es. per il Sole $\lambda_{\max} = 450$ nm, ma questo è il dato fuori atmosfera: l'assorbimento atmosferico sposta il massimo a ~ 500 nm: non a caso, vicino alla massima sensibilità dell'occhio umano (~ 550 nm).

Dunque sorgenti relativamente fredde hanno il massimo a lunghezze d'onda maggiori, che possono anche cadere nell'infrarosso, ossia a lunghezze d'onda cui l'occhio umano è cieco. Poiché la distribuzione spettrale del corpo nero decresce assai rapidamente quando ci si allontana dal massimo nel senso delle lunghezze d'onda più corte, ne seguono due effetti: uno è che il colore dominante si sposta verso il rosso al decrescere della temperatura; l'altro è che la sorgente diviene rapidamente invisibile.

Se la temperatura aumenta accade l'inverso: la lunghezza d'onda dominante si sposta verso il blu e il violetto, poi nell'ultravioletto. Tuttavia nella regione visibile l'andamento della distribuzione spettrale tende a una forma limite (legge di Rayleigh-Jeans) nella quale prevalgono le corte lunghezze d'onda, ma non in modo esclusivo. Questo fatto, combinato con la minore sensibilità dell'occhio alle lunghezze d'onda corte, fa sì che il colore limite di una sorgente molto calda non sia blu, né tantomeno violetto, ma bianco-azzurro. È il colore che mostrano le stelle delle classi spettrali O-B.

Dovrei ora passare al secondo giocatore, ma prima è necessaria una precisazione. Avrete notato che in più punti ho citato il cielo come sorgente di luce (gli ho anche attribuito una temperatura di colore). A rigore questo è sbagliato, perché il cielo (o meglio l'atmosfera) non fa che diffondere la luce solare: dunque la vera sorgente è in ogni caso il Sole. E lo stesso dovremmo dire ad es. per il "chiaro di luna," per la luce sott'acqua, ecc. Però riesce comodo abbreviare il gioco, e pensare al cielo come sorgente.

Possiamo ora tornare al mio elenco iniziale: gli alberi, i fiori, le farfalle, i minerali... Che cosa vuol dire che sono colorati? La risposta del fisico — riduzionista quanto prosaica — è che ciascuno di questi oggetti rimanda al terzo giocatore (l'occhio) una radiazione di composizione spettrale diversa da quella della sorgente, in infiniti modi possibili. Le cose possono essere anche più complicate: l'aspetto "cangiante" d'insetti e uccelli deriva dal fatto che la composizione spettrale della luce dipende da condizioni geometriche, ossia dalla direzione secondo cui la luce della sorgente colpisce la superficie del corpo, e dalla direzione da cui lo si guarda. Ciò accade anche in casi più semplici: per es. le foglie degli ontani che ora sto guardando, mosse dal vento, cambiano colore perché a seconda della loro orientazione mandano ai miei occhi luce riflessa o luce diffusa... ma non anticipiamo.

Adesso viene il difficile. Stabilita la definizione di corpo colorato, resta da rispondere alla domanda: perché i corpi sono colorati? Dove il perché è *causale*, non finale: non mi chiedo "a che serve" che un fiore sia giallo o una farfalla sia bruna, ma solo "come mai" questo accade, da quali proprietà o strutture dipende. Ma lo spazio è finito... Alla prossima puntata (se nel frattempo non sarò attratto da un altro argomento, com'è probabile).

Per concludere: come già in altre occasioni, anche stavolta i frequenti riferimenti che ho fatto a piante, animali, minerali potrebbero facilmente contenere qualche errore. Mi farà solo piacere se qualcuno vorrà segnalarmeli. Più in generale, vorrei avere qualche "feedback" su questa rubrica che ormai conduco da più di quattro anni: quali dei vari argomenti che ho trattato avete trovato più interessanti? più o meno difficili? C'è qualcosa di cui non ho mai parlato e che qualcuno vorrebbe leggere? Come giudicate lo stile, il taglio, il linguaggio?

Non per un banale ossequio alla moda del momento, ma perché lo ritengo veramente utile, ecco due indirizzi di posta elettronica, ai quali potete indifferentemente spedirmi messaggi:

`fabri@ipifidpt.difi.unipi.it`
`mc8827@mclink.it`