

## Sul colore: per trasparenza, per assorbimento per riflessione

di Elio Fabri

Heri dicebamus: perché gli alberi, i fiori, le farfalle, i minerali sono colorati? (sembra ieri, ma è quasi un anno!). Avevo sbrigativamente spiegato che ciascuno di questi oggetti, per varie ragioni, rimanda al terzo giocatore (l'occhio) una radiazione di composizione spettrale diversa da quella della sorgente. Ricordo che il primo giocatore è appunto la sorgente; il secondo l'oggetto che stiamo studiando (il quarto è il cervello, ma il suo turno non è ancora venuto).

Ci sono molti modi in cui un corpo può modificare la radiazione che riceve: il più semplice è quello dei corpi trasparenti e colorati (i vari coloranti liquidi, le gemme e in genere molti cristalli ...). Senza introdurre complicazioni che pure ci sarebbero, diciamo che nel liquido o nel solido in questione ci sono molecole (o ioni) che assorbono selettivamente la luce, ossia che assorbono in diverse proporzioni i fotoni associati alle varie lunghezze d'onda presenti nella luce "bianca" del sole. Potrà accadere ad es. che una certa soluzione catturi tutti i fotoni di lunghezza d'onda tra 600 e 700 nm, e lasci passare pressoché totalmente gli altri: una tale soluzione ai nostri occhi apparirà verde.



Debbo subito precisare due cose: in primo luogo è vero che l'assorbimento selettivo è una delle cause della colorazione, ma quanto a dire che colore vedranno gli occhi, è un altro discorso, che fa entrare il quarto giocatore e perciò ora non voglio toccare. La seconda precisazione è che non mi sono pronunciato sul destino dei fotoni assorbiti, o meglio dell'energia che essi possiedono. Infatti potranno accadere varie cose, a seconda di molte condizioni esterne. Potrà darsi che quell'energia vada ad aumentare l'agitazione termica del corpo: diremo in breve (e

impropriamente) che la luce è stata trasformata in calore. Potrà darsi venga impiegata per una reazione chimica: è immediato pensare alla clorofilla in una cellula. Potrà anche accadere che parte di questa energia venga riemessa come luce, ma in fotoni di energia minore (quindi di lunghezza d'onda maggiore): in questo caso siamo in presenza di fluorescenza, di cui la clorofilla è ancora un esempio.

Sebbene non c'entri col discorso principale, fermiamoci un momento sulla fluorescenza, per smascherare un gioco dei fabbricanti di detersivi per biancheria. Conoscete la "prova finestra"? Dovrebbe servire a far vedere che un capo lavato con "xxx" è più bianco di quello lavato con "yyy". Talvolta (non dico sempre, per carità: non voglio che qualche grossa multinazionale mi faccia causa ...) si usa il seguente trucco. Si aggiunge al detersivo una sostanza fluorescente, che assorbe nell'ultravioletto e riemette nel visibile. In questo modo la tovaglia "fluorescente", esposta alla luce del cielo, che contiene ultravioletto, rimanda nel visibile una luce più intensa, perché ai fotoni semplicemente diffusi (ne riparleremo tra poco) si sommano quelli trasferiti per fluorescenza da

UV a visibile. Et voilà!

Sebbene sia il caso più semplice, l'assorbimento selettivo da un solido o liquido trasparente non è il modo più comune perché un corpo appaia colorato. Nella maggior parte dei casi noi vediamo la luce riflessa o diffusa dalla superficie di un corpo: di che si tratta? perché questa luce può essere colorata?

Bisognerebbe anzitutto distinguere tra riflessione e diffusione, e scopriremmo che la distinzione non è sempre facile. Certo, tutti sappiamo riconoscere uno specchio da un foglio di carta o da una lastra di marmo; ma ci sono gli specchi propriamente detti e le superfici riflettenti del vetro o dell'acqua; ci sono lastre di marmo o di pietra così levigate da avvicinarsi a specchi (anche se non potremo usarle per vederci la nostra immagine); ci sono le superfici metalliche, che passano dall'opaco allo speculare strofinandole col preparato adatto: insomma, come sempre, quando si guarda da vicino le cose si complicano. Non succede solo nelle scienze "soft", come forse qualcuno che mi sta leggendo sarebbe portato a credere: succede anche nella fisica. Solo che i fisici di solito lasciano da parte i casi complicati, col proposito di riprenderli in esame quando avranno capito quelli semplici. Il brutto è che spesso, specie nell'insegnamento, se ne dimenticano (o non ne hanno il tempo); e così resta l'impressione che la fisica si occupi solo di cose che non hanno rapporto con la realtà, con la "complessità" del mondo... Lasciamo andare, perché se no vado fuori tema...

Tornando a riflessione e diffusione, la distinzione all'ingrosso è questa: una superficie è riflettente se rimanda la luce della sorgente in una direzione precisa (la legge della riflessione); è diffondente se la rimanda più o meno in tutte le direzioni.

"SAL. Noi cerchiamo, signor Semplice, se per fare una riflessione di lume simile a quello che ci vien dalla Luna, sia necessario che la superficie da cui vien la riflessione sia così tersa e liscia come di uno specchio, o pur sia più accomodata una superficie non tersa e non liscia, ma aspra e mal pulita. Ora, quando a noi venisser due riflessioni, una più lucida e l'altra meno, da due superficie opposteci, io vi domando, qual delle due superficie voi credete che si rappresentasse a gli occhi nostri più chiara e qual più oscura.

SIMPL. Credo senza dubbio che quella che più vivamente mi riflettessero il lume, mi si mostrerebbe in aspetto più chiara, e l'altra più oscura.

SAL. Pigliate ora in cortesia quello specchio che è attaccato a quel muro, ed usciamo qua nella corte. Venite, signor Sagredo. Attaccate lo specchio là a quel muro, dove batte il Sole; discostiamoci e ritiriamoci qua all'ombra. Ecco là due superficie percosse dal Sole, cioè il muro e lo specchio. Ditemi ora qual vi si rappresenta più chiara: quella del muro o quella dello specchio? voi non rispondete?

[...]

SIMPL. Che dite voi dunque che la riflessione di uno specchio sia men potente di quella di un muro? io veggio che in questo muro opposto, dove arriva il riflesso dell'altra parete illuminata insieme con quel dello specchio, questo dello specchio è assai più chiaro; e veggio parimente che di qui lo specchio medesimo mi apparisce più chiaro assai che il muro.

SAL. Voi con la vostra accortezza mi avete prevenuto, perché di questa medesima osservazione avevo bisogno per dichiarar quel che resta. Voi vedete dunque la differenza che cade tra le due riflessioni, fatte dalle due superficie del muro e dello specchio, percosse nell'istesso modo per l'appunto da i raggi solari; e vedete come la riflessione che vien dal muro si diffonde verso tutte le parti opposteli, ma quella dello specchio va verso una parte sola, non punto maggiore dello specchio medesimo; vedete parimente come la superficie del muro, riguardata da qualsivoglia luogo, si mostra chiara sempre egualmente a se stessa, e per tutto assai più chiara che quella dello specchio, eccettuatone quel piccolo luogo solamente dove batte il riflesso dello specchio, ché di lì apparisce lo specchio molto più chiaro del muro. Da queste così sensate e palpabili esperienze mi par che molto speditamente si possa venire in cognizione, se la riflessione che ci vien dalla Luna venga come da uno specchio, o pur come da un muro, cioè se da una superficie liscia o pure aspra.

SAGR. Se io fossi nella Luna stessa, non credo che io potessi con mano toccar più chiaramente l'asprezza della sua superficie di quel ch'io me la scorga ora con l'apprensione del discorso. La Luna, veduta in qualsivoglia positura, rispetto al Sole e a noi, ci mostra la sua superficie tocca dal Sole sempre egualmente chiara; effetto che risponde a capello a quel del muro, che, riguardato da qualsivoglia luogo, apparisce egualmente chiaro, e discorda dallo specchio, che da un luogo solo si mostra luminoso e da tutti gli altri oscuro. [...]"

"Se io fossi nella Luna stessa", dice Sagredo. Forse riderete di me, ma io non riesco a leggere queste pagine senza

emozione. Sarebbero occorsi più di tre secoli prima che qualcuno mettesse piede sulla Luna; ma Galileo, con un muro, uno specchio e il coraggio del suo argomentare, ci aveva già fatti certi di quello che vi avremmo trovato. E non è finita: in primo luogo perché il discorso è più complicato, dato che la Luna è sferica e non piana, e perciò andrebbe confrontata con uno specchio sferico; cosa che Galileo fa nel seguito della pagina. Poi perché c'è ancora altro da dire; vedremo fra poco.

Ma prima voglio citarvi un altro brano, che ci mostra assai bene perché Galileo non potesse non avere molti e solidi nemici:

"SAL. Confessando ingenuamente la mia incapacità, dico che non intendo di questo vostro discorso altro che di quella piastra dorata; e se voi mi concedete il parlar liberamente, ho grande opinione che voi ancora non l'intendiate, ma abbiate imparate a mente quelle parole scritte da qualcuno per desiderio di contraddire e mostrarsi più intelligente dell'avversario, mostrarsi, però, a quelli che, per apparir eglino ancora intelligenti, applaudono a quello che è non intendono, e maggior concetto si formano delle persone secondo che da loro son manco intese; e pur che lo scrittore stesso non sia (come molti ce ne sono) di quelli che scrivono quel che non intendono, e che però non s'intende quel che essi scrivono."

E ora si affronta un altro problema: è proprio vero che la Luna è chiara, di superficie ben più diffidente della Terra? Ecco come procede il discorso:

"SAL. [...] Ditemi un poco: quando la Luna è presso che piena, sì che ella si può veder di giorno ed anco a meza notte, quando vi par ella più splendente, il giorno o la notte?

SIMPL. La notte, senza comparazione, e parmi che la Luna imiti quella colonna di nugole e di fuoco che fu scorta a i figliuoli di Isdraele, che alla presenza del Sole si mostrava come una nugoletta, ma la notte poi era splendidissima. [...]

[...]

SAL. Ditemi ora: credete voi che la Luna sia realmente più lucente la notte che 'l giorno, o pur che per qualche accidente ella si mostri tale? SIMPL. Credo che realmente ella risplenda in se stessa tanto di giorno quanto di notte, ma che 'l suo lume si mostri maggiore di notte perché noi la vediamo nel campo oscuro del cielo; ed il giorno, per esser tutto l'ambiente assai chiaro, sì che ella di poco lo avanza di luce, ci si rappresenta assai men lucida.

SAL. Or ditemi; avete voi veduto mai in su la meza notte il globo terrestre illuminato dal Sole?

[...]

SIMPL. Se dunque voi non mi avete per semplice affatto, fate conto ch'io v'abbia risposto, e detto che è impossibile che uno che sia in Terra, come siamo noi, vegga di notte quella parte della Terra, dove è giorno, cioè che è percossa dal Sole.

SAL. Adunque non vi è toccato mai a veder la Terra illuminata se non di giorno; ma la Luna la vedete anco nella più profonda notte risplendere in cielo: e questa, signor Semplicio, è la cagione che vi fa credere che la Terra non risplenda come la Luna; che se voi poteste veder la Terra illuminata mentreché voi fuste in luogo tenebroso come la nostra notte, la vedreste splendida più che la Luna. Ora, se voi volete che la comparazione proceda bene, bisogna far parallelo del lume della Terra con quel della Luna veduta di giorno, e non con la Luna notturna, poiché non ci tocca a veder la Terra illuminata se non di giorno. Non sta così?

[...]

SAGR. Ma che più altri discorsi? Eccovi là su la Luna, che è più di meza; eccovi là quel muro alto, dove batte il Sole; ritiratevi in qua, sì che la Luna si vegga accanto al muro; guardate ora: che vi par più chiaro? non vedete voi che, se vantaggio vi è, l'ha il muro? Il Sole percuote in quella parete; di lì si reverbera nelle pareti della sala; da quelle si riflette in quella camera, sì che in essa arriva con la terza riflessione: e ad ogni modo son sicuro che vi è più lume, che se direttamente vi arrivasse il lume della Luna".

Di nuovo: "se voi poteste veder la Terra illuminata mentreché voi fuste in luogo tenebroso come la nostra notte, la vedreste splendida più che la Luna". Oggi abbiamo potuto vedere tutto questo spettacolo, grazie ai satelliti e alla TV; e abbiamo sulla nostra Terra dei "pezzi" di Luna, sì che abbiamo potuto toccare con mano che la superficie della Luna è scura, come la lava basaltica. Eppure, quanti ai nostri giorni saprebbero ragionare come Galileo? E ancora più doloroso: quanti insegnanti di fisica propongono tali ragionamenti alle loro classi? Ma torniamo al nostro tema.

Avrete forse pensato che mi son fatto prendere la mano, e ho dimenticato che stavamo parlando di colore. Ma non l'ho dimenticato: del resto la "prova finestra" che cosa doveva dimostrare? Che una tovaglia lavata con "xxx" è più bianca di una lavata con "yyy", che al confronto appare grigia. Il bianco, e le varie gradazioni di grigio, sono comunemente ritenute colori; ma in realtà la composizione spettrale della luce è la stessa (almeno se si tratta di un grigio neutro): la sola differenza è nella quantità di luce diffusa, massima per una superficie bianca, minore man mano che si passa al nero attraverso tutti i grigi. E così è per la Luna: non si può decidere se sia chiara o scura, senza un termine di confronto, che Galileo individua in un muro illuminato dal Sole.

Del resto, più prosaicamente e semplicemente, prendete diversi fogli di carta bianca, di diversa origine, e metteteli l'uno accanto all'altro: avrete la sorpresa di scoprire che quello che visto da solo sembrava bianco, ora è decisamente "meno bianco" di un altro, e magari anche un po' giallino... Il che ci mostra, di passaggio, che il quarto giocatore è sempre in campo, e dobbiamo essere sempre assai cauti nel giudicare di quello che vediamo.

Stabilito dunque che il corpo bianco ideale è quello che rimanda (diffonde) tutta la luce che riceve, cerchiamo di capire come fa a essere bianco. Prendiamo la solita carta, e guardiamola al microscopio: vedremo un intreccio di fibre di cellulosa, e scopriremo che le singole fibre sono trasparenti! Ma se così è, come fa la carta ad apparirci bianca e diffondente?

La ragione è che grazie al complicato intreccio delle fibre quasi tutti i fotoni che arrivano sulla carta vengano riflessi e rifratti in più modi, e alla fine trovano la strada per uscire di nuovo, in tante direzioni. Il fatto che le fibre sono trasparenti fa sì che pochi fotoni vengano assorbiti: di qui il bianco. La stessa cosa succede con i colori usati in pittura: il bianco è di solito  $\text{TiO}_2$ , in forma di microscopici cristalli sospesi in un mezzo trasparente. Di nuovo i cristalli sono trasparenti, ma hanno un alto indice di rifrazione, che aumenta le riflessioni sulle facce del cristallo.

Un esperimento casalingo si può fare pestando un pezzo di vetro in un mortaio: mentre il vetro è ... trasparente come vetro, la polvere è biancastra. Se poi si mette la polvere in una provetta e ci si versa dell'acqua, si vede che diventa quasi invisibile. Questo succede perché l'indice di rifrazione del vetro non è molto diverso da quello dell'acqua, e perciò le riflessioni alla superficie dei granelli di polvere sono assai ridotte.

Anche se abbiamo parlato solo di bianco, in realtà abbiamo già preparato il terreno a spiegare buona parte dei corpi colorati: per esempio le foglie. Una foglia è verde a causa della clorofilla, ma non allo stesso modo di una soluzione. In una foglia la clorofilla è raccolta nei cloroplasti, mentre il resto della cellula è trasparente. Risultato: un fotone che penetra la superficie di una foglia subirà riflessioni e rifrazioni dalla diverse pareti e membrane, e tornerebbe prima poi a uscire (in tal caso la foglia sarebbe bianca!) se non fosse che nel suo girovagare il fotone incontrerà prima o poi una molecola di clorofilla. A questo punto, quello che succede dipende dalla lunghezza d'onda: se siamo nella banda d'assorbimento della clorofilla, il fotone viene assorbito; in caso contrario esso esce indenne dall'incontro con la molecola, e riappare nella luce diffusa dalla foglia.

E perché le foglie mosse dal vento cambiano colore? Ci sono almeno due ragioni. La prima è che molte foglie hanno la pagina inferiore diversa dalla superiore: ad es. coperta di peluria. Questa peluria non contiene clorofilla, e d'altra parte è sufficientemente fitta per diffondere indietro la luce che riceve, senza farla arrivare dentro la foglia. Perciò la luce diffusa dalla pagina inferiore è bianca; e se il vento ci fa vedere alternativamente l'una e l'altra faccia delle foglie, il colore cambia.

Una seconda ragione ha a che fare con l'angolo d'incidenza. Ho già osservato sopra che molte superfici possono apparire riflettenti in condizioni favorevoli; la condizione migliore è l'incidenza "radente": quando la luce arriva quasi tangente alla superficie viene in gran parte riflessa, senza penetrare nel corpo, anche se questo è trasparente. Perciò se la foglia è orientata in modo che la luce del sole la colpisce radente, essa si comporta come uno specchio, e non rimanda luce colorata, ma bianca. Se il vento fa muovere le foglie di alberi lontani, questa condizione geometrica è verificata più o meno, ora qui ora là nella massa del fogliame: il risultato è un luccichio continuamente mutevole che tutti noi, anche senza sapere un briciolo di fisica, interpretiamo come segno del vento, pur se non riusciamo a distinguere le foglie e tanto meno il loro movimento.

Come succede sempre, lo spazio che mi posso permettere è finito ben prima che sia finito l'argomento. Ci sono tanti altri fenomeni legati al colore, di cui vorrei parlare: se lo spettacolo è piaciuto, si replica...