

9. Polveri e mosaici

*Maria ci pensò sopra, poi chiese ancora:
— Perché è così bianco? —
Anche l'uomo pensò un poco, come se la domanda
gli sembrasse difficile, e poi disse con voce profonda:
— Perché è titanio.*

P. Levi: *Il sistema periodico*

Asciutto e bagnato

Domande:

- 1) Perché una strada (sterrata o asfaltata) appare più scura quando è bagnata?
- 2) Perché un pezzo di vetro chiaro è trasparente, ma se lo riduco in polvere diffonde luce bianca?
- 3) Perché la polvere immersa in acqua è quasi invisibile?
- 4) Perché un vetro da saldatore, praticamente opaco, polverizzato appare bianco, e se immergo la polvere in acqua torna colorata?
- 5) Perché la carta è bianca?
- 6) Perché le nuvole illuminate dal Sole sono bianche?
- 7) Com'è fatta la vernice bianca?

Tutte queste domande sono strettamente imparentate, e riguardano il comportamento ottico di materiali finemente suddivisi.

Conviene cominciare dalla 2) e dalla 3), che sono le più semplici. Nella polvere di vetro, la luce che incide su un granello si riflette, oppure si rifrange (fig. 9-1). (Ci sono anche le riflessioni multiple, ma contribuiscono poco all'effetto finale.) Nella massa della polvere queste riflessioni e rifrazioni avvengono più volte; dato che il vetro è trasparente, non c'è apprezzabile assorbimento. Perciò prima o poi la luce finisce per riemergere dalla superficie (fig. 9-2) ma in direzione casuale, senza nessuna correlazione con la direzione da cui è entrata, e la polvere appare diffondente e bianca.

Se la polvere è immersa in acqua, il fenomeno è simile, ma si riduce di molto l'intensità della luce riflessa, e così pure la deviazione dovuta alla rifrazione (fig. 9-3), perché gli indici di rifrazione di acqua e vetro sono piuttosto vicini. In termini quantitativi, il coefficiente di riflessione a incidenza normale tra due mezzi di indici di rifrazione n_1 e n_2 vale

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

e cambia poco finché l'angolo d'incidenza non diventa piuttosto grande. Nel caso aria-vetro $R = 0.04$, mentre per acqua-vetro $R < 0.004$. Perciò poca luce viene

rimandata indietro, e in gran parte attraversa la massa della polvere, almeno finché il suo spessore è dell'ordine di 1 cm. Diventa quindi difficile distinguere i granelli dall'acqua.

Anche la carta è bianca per la stessa ragione della polvere di vetro: è fatta di fibre trasparenti di cellulosa, che si comportano allo stesso modo dei granelli di vetro.

Ne segue anche la risposta alla domanda sulle nuvole, che sono microscopiche goccioline d'acqua sospese in aria (e non vapore, come si sente dire tanto spesso!). Illuminate dal Sole, rimandano indietro gran parte della luce incidente, mentre poca riesce a penetrare uno strato spesso. Ecco perché quando il cielo è coperto da nubi temporalesche, che sono molto sviluppate in altezza, diventa "nero."

La risposta alla domanda 1) segue dalle precedenti: una strada asciutta è un ammasso di microcristalli, che diffondono la luce più o meno come il vetro. Quando la strada è bagnata invece gran parte della luce penetra e non viene diffusa all'indietro. Dato che il materiale della strada non è trasparente come il vetro, la luce finisce per essere assorbita e la strada appare scura.

Quanto detto vale finché la strada non è così bagnata che sulla superficie si forma una pellicola d'acqua: allora la riflessione è all'interfaccia aria-acqua, e la struttura della strada conta poco. Tra parentesi, è per questo che il miraggio dà l'impressione di "bagnato."

Un vetro da saldatore, ridotto in polvere, non si comporta diversamente da quello trasparente. La ragione è che riflessione e rifrazione sono effetti di superficie, e quindi dipendono dall'area totale dei granelli; invece l'assorbimento è un effetto di volume, che va col volume degli stessi. Mentre il volume totale non cambia polverizzando il vetro, l'area va come l'inverso della dimensione media dei granelli (perché?). Perciò se i granelli sono abbastanza piccoli l'assorbimento del vetro scuro conta poco rispetto ai fenomeni superficiali, e il vetro appare quasi bianco.

Quando la polvere sta nell'acqua il bilancio si altera: gli effetti superficiali si riducono e l'assorbimento può tornare prevalente, o quanto meno non essere più trascurabile.

E infine la domanda 7), ossia la curiosità di Maria tradotta in curiosità del fisico... Una vernice non è altro che una sospensione di microcristalli in un mezzo trasparente, la cui funzione è di essere liquido finché la vernice non viene esposta all'aria, e poi diventare solido, restando però trasparente. Come si ottenga questo, è un problema di chimica, che non ci riguarda. Interessa invece che un sottile strato di vernice sia capace di diffondere fortemente la luce, mascherando la superficie su cui è stata data: questo si ottiene se i cristallini hanno indice di rifrazione molto diverso dal mezzo di supporto.

Se si vuole vernice bianca, i cristalli dovranno essere trasparenti nel visibile; se invece si vuole vernice colorata, si sceglieranno cristalli con forte assorbimento selettivo, in modo da diffondere solo la banda di lunghezze d'onda desiderata

(però il discorso sui colori sarebbe molto molto più complesso, e qui non vogliamo toccarlo ...).

In passato la vernice bianca si faceva con la biacca, che è un carbonato basico di piombo. Il difetto di tale composto è che in presenza di H_2S nell'aria si trasforma in solfuro, che è nero: ecco perché i dipinti antichi tendono a scurire. Oggi si usa invece il biossido di titanio (TiO_2) che ha un alto indice di rifrazione, circa 2.9, ed è stabile.

Nota: Tutto questo vale finché granelli, fibre, gocce hanno dimensioni grandi rispetto alla lunghezza d'onda. Altrimenti diventa importante la diffrazione, la trattazione si complica, e compaiono fenomeni nuovi. Un esempio: l'alone colorato che a volte si vede intorno alla Luna.

Rivelatori e risoluzione

Qualunque strumento usato per “vedere” (occhi inclusi) oltre ai componenti ottici di cui abbiamo già parlato deve includere un *rivelatore*. Nel caso dell'occhio, si tratta della retina coi suoi elementi fotosensibili (coni e bastoncelli); nel caso di una macchina fotografica tradizionale si tratterà della pellicola, coi microcristalli di bromuro d'argento; nel caso delle fotocamere digitali è il CCD (*charge coupled device*).

Tralasciando il caso della pellicola tradizionale, che è alquanto più complicato, abbiamo sempre a che fare con una superficie ricoperta da un *mosaico* di elementi sensibili, ciascuno dei quali fornisce un segnale la cui grandezza è funzione della quantità di luce ricevuta. Abbiamo volutamente usato il termine “quantità di luce,” piuttosto vago, perché nel dettaglio le cose possono essere diverse da un caso all'altro: nell'occhio il segnale dipende essenzialmente dalla potenza, nel CCD (che è uno strumento *integratore*) dipende invece dall'energia ricevuta durante tutto il tempo di esposizione.

Ma ciò che a noi più interessa ora è l'aspetto geometrico: dato che il rivelatore è un mosaico di elementi di dimensioni finite, già per questo fatto lo strumento ha una risoluzione finita, ossia non è in grado di distinguere dettagli troppo piccoli. Infatti due punti della sorgente che formino un'immagine sullo stesso elemento sensibile sono indistinguibili.

Andando nel concreto: nell'occhio umano le dimensioni dei coni sono tali che la risoluzione angolare limite è di circa $1'$. Nelle camere digitali la risoluzione può variare: macchine del costo di qualche milione hanno rivelatori intorno a 1600×2000 pixel, con dimensioni di circa $10 \mu m$ di lato, con focali più o meno di 40 mm, e ne risulta una risoluzione di circa $50''$, quindi un po' migliore dell'occhio. Ma per le fotocamere più economiche la risoluzione (il numero di pixel) è parecchio minore...

Nota: Il termine “pixel” (abbreviazione di *picture element*) è usato nella tecnologia delle immagini digitali, per indicare appunto gli elementi discreti di cui

l'immagine è composta. Si applica quindi alle fotocamere, ma anche agli schermi video, alle stampanti, ecc.

Influenza dell'ottica

Occorre notare che i dati che abbiamo fornito sulla risoluzione sono dati limite, perché tengono conto di un solo fattore: il carattere discreto del rivelatore. Ad es. nel caso dell'occhio sono molto importanti le condizioni d'illuminazione (senza contare le differenze individuali, dovute a difetti di rifrazione o alle condizioni generali dell'occhio). Anche per una macchina fotografica, analogica o digitale che sia, non si può trascurare la qualità dell'ottica, che si traduce in maggiori o minori aberrazioni. Come caso limite, le macchinette "usa e getta," col loro obiettivo formato da una sola lente di plastica, hanno una risoluzione che non è certo limitata dalla qualità della pellicola, ma dalle aberrazioni ottiche, cioè dal fatto che la lente non riesce a concentrare la luce da una sorgente puntiforme meglio che in una macchia, probabilmente di un centinaio di micron. . .

Per avere una concentrazione migliore occorre impiegare obiettivi a più lenti e lavorati accuratamente; e la qualità si paga. . .

Che cos'è una sorgente puntiforme?

Ovviamente una sorgente strettamente puntiforme non esiste. Tuttavia, come sempre in fisica, questo è un caso limite a cui ci si può avvicinare, sì che in opportune condizioni una sorgente estesa appare indistinguibile da una puntiforme. Si sarebbe quindi tentati di rispondere: puntiforme (dal punto di vista del fisico) è una sorgente le cui dimensioni sono trascurabili. Già, ma trascurabili rispetto a che cosa?

Certo non contano le dimensioni assolute: le stelle sono enormi (alcune molto più grandi del Sole) eppure ai nostri scopi sono eccellenti esempi di sorgenti puntiformi. Sicuramente questo accade perché sono molto lontane, quindi quello che conta è il *diametro angolare*. Ma resta ancora la domanda: il diametro angolare dovrà essere piccolo, ma rispetto a che cosa? a quale altro angolo?

La discussione precedente suggerisce però la risposta. Dato che lo strumento (occhio, telescopio, fotocamera) ha di per sé una determinata risoluzione angolare, è questo il parametro di confronto. In altre parole: una sorgente va considerata puntiforme quando con quel dato strumento non è possibile rivelarne l'estensione.

In particolare sarà certamente puntiforme una sorgente che vada a illuminare un solo pixel del rivelatore. Ma questa non è una condizione necessaria, perché abbiamo visto che se ad es. l'ottica è di cattiva qualità la macchia di luce sul rivelatore può essere anche più estesa.

Si può vedere la cosa da un altro punto di vista. Voglio fotografare un oggetto lontano e desidero distinguere dettagli di una certa grandezza. Per

esempio, voglio risolvere dettagli grandi 1 mm in un oggetto distante 10 metri. Questo corrisponde a una risoluzione angolare di 10^{-4} rad $\simeq 20''$. Abbiamo visto che la migliore fotocamera digitale non arriva a questa risoluzione: dunque l'impresa è impossibile?

La risposta è ovviamente no: la risoluzione è stata calcolata assumendo una certa distanza focale (40 mm). È facile vedere che se la focale fosse tre volte più lunga, pur con lo stesso rivelatore avremmo una risoluzione migliore di quella desiderata. Per fortuna tutte le fotocamere hanno lo "zoom," che consente appunto di variare la focale. Se lo zoom non arriva alla focale necessaria, l'unica soluzione è cambiare obiettivo: ci si procurerà una fotocamera con ottiche intercambiabili, e si monterà un teleobiettivo.