

1. Ottica nel mondo reale

*L'alba vinceva l'ora mattutina
che fuggia innanzi, sì che di lontano
conobbi il tremolar della marina.*

Purgatorio, canto I

Introduzione

Insegnare ottica è più difficile di altri capitoli della fisica. La ragione sta principalmente nel fatto che non si tratta soltanto di fisica: nell'ottica si trovano, inestricabilmente connesse, anche fisiologia e psicologia.

Per intenderci meglio, facciamo un esempio diverso. Nessuno, insegnando fisica, penserebbe di fare termologia con le mani (organo di senso sensibile al calore): la prima cosa che s'insegna è che le mani sono inaffidabili, e che bisogna sostituirle con uno strumento: il termometro. Invece parlando di ottica non si riesce a fare a meno degli occhi. Perché?

Una possibile risposta è che gli occhi sono troppo importanti! Sono l'organo di senso più complesso e ricco d'informazioni di cui disponiamo, quello dal quale ricaviamo la maggior parte delle conoscenze sul mondo circostante. Perciò è assai difficile (e non sarebbe neppure giusto) pensare di farne a meno quando si ragiona di ottica. Ma è proprio questo che causa l'intreccio di cui sopra: gli occhi non sono soltanto uno strumento fisico.

Però in un insegnamento scientifico occorre saper distinguere ciò che appartiene alla fisica e ciò che va fuori; e insieme non rinchiudersi in una trattazione ristretta all'aspetto fisico. Occorre tener conto del fatto che abbiamo gli occhi e li usiamo, nel bene e nel male. Dobbiamo ad esempio tener conto che il nostro uso degli occhi, lungo tutta la vita, ci ha prodotto certe abitudini, certi modi d'interpretare le sensazioni, che si traducono anche in *preconcezioni* dal punto di vista scientifico.

Detto in termini più precisi: non si può insegnare l'ottica soltanto a forza di raggi, immagini, leggi, ignorando tutto quello che c'è dietro (sotto): il peculiare modo di funzionare dell'occhio, le abitudini e i preconcetti che ne abbiamo tratto, ecc. Allo stesso tempo, è necessario mostrare che l'ottica che si studia aiuta a interpretare ciò che si vede. Vedremo che questi saranno temi ricorrenti del corso.

Che cos'è la luce?

Prima di tutto, la luce è un fenomeno fisico. Noi vediamo perché

- a) alcuni oggetti *emettono* luce
- b) altri oggetti *rimandano* (in vario modo) la luce che ricevono
- c) parte di questa luce *arriva agli occhi*, che nella retina contengono *rivelatori* i quali trasmettono segnali nervosi al cervello
- d) il cervello *interpreta* questi segnali . . .

Si può ricordare tutto questo con la metafora dei *quattro giocatori*: la visione è un gioco complesso, al quale partecipano quattro giocatori: sorgente, oggetto, occhio, cervello. Solo i primi due, e in parte il terzo, sono di competenza del fisico, possono essere studiati con gli strumenti concettuali della fisica; ma la partita è sempre giocata da tutti e quattro...

Qui ci occuperemo soprattutto di *a*) e di *b*). È importante cominciare l'argomento coi ragazzi chiedendo esempi e controesempi: di sorgenti di luce, di corpi luminosi e non, dei vari modi in cui i corpi rimandano la luce. A questo stadio non è necessaria la precisione terminologica: è solo importante la panoramica, la presa di coscienza con fatti che sono di esperienza comune ma su cui di solito non ci si sofferma.

Ma di che cosa è *fatta* la luce? Non è necessario pronunciarsi. Per ora possiamo pensarla costituita di *particelle* (corpuscoli). Chiamiamoli pure "fotoni," senza pretendere di sapere davvero che cosa sono. Questo potrà essere un punto d'arrivo nell'insegnamento dell'ottica (non in questo corso); non sarà certo quello di partenza.

Se la luce (i corpuscoli, i fotoni) viaggia, avrà una velocità. Lasciamo stare prove e misure; contiamo sul fatto che tutti (?) sanno quanto vale la velocità della luce nel vuoto. Possiamo anche dire che è la stessa velocità di tutti i segnali elettromagnetici. Il punto interrogativo poco sopra stava a esprimere un dubbio: è proprio vero che *tutti* conoscono la velocità della luce? E comunque, quanti hanno un'idea di che cosa quel numero significhi?

Mi è capitato di leggere tempo fa che la luce viaggia a 300.000 km/h invece che a 300.000 km/s. Propongo quindi un utile esercizio: se la luce (e i segnali e.m.) viaggiassero davvero a 300.000 km/h, come potremmo accorgercene? Quali situazioni, fatti, esperienze della vita quotidiana sarebbero radicalmente alterati?

Si può anche ricordare che la velocità della luce in un mezzo è (solitamente) minore di quella nel vuoto, ma l'ordine di grandezza è lo stesso. A questo punto non occorre di più.

Parentesi didattica, che posso chiamare della "fisica a scale." Intendo dire che molte parti della fisica non possono essere affrontate una volta per tutte, e date per "fatte": una scala ci porta in alto, avvolgendosi su se stessa, e ripassando più volte sulla verticale dello stesso punto, ma a un livello superiore. Allo stesso modo, si dovrebbe insegnare (non solo la fisica, in verità) seguendo un percorso elicoidale: affrontare un argomento a un primo livello, prendere conoscenza con gli aspetti più semplici, coi fenomeni fondamentali; poi tornarci sopra con strumenti teorici più sofisticati, interpretando più a fondo i fenomeni, i concetti, le teorie. Spero che sia chiaro ciò che intendo, senza bisogno che allunghi troppo il discorso.

La propagazione rettilinea: le ombre

La luce viaggia in linea retta (vedremo una serie di esperimenti che lo pro-

vano). È molto utile il confronto col suono: come mai si può sentire ciò che non si vede? Altro esercizio utile coi ragazzi: proporre esempi di questa situazione.

La prova più diretta della propagazione rettilinea sono *le ombre*. Si può sperimentare con le ombre prodotte dal Sole; anche se il Sole, come pure molte altre sorgenti luminose, non si prestano tanto bene all'esperimento (perché le sorgenti sono estese: ne ripareremo). Ecco quindi un caso in cui il fisico costruisce una situazione *artificiale* col preciso scopo di semplificare l'indagine sulla realtà naturale.

Nel nostro caso, si tratta di studiare l'ombra di oggetti illuminati da una sorgente "puntiforme" (le virgolette stanno a ricordare che una sorgente davvero puntiforme non esiste, ma si cerca di avvicinarsi quanto meglio si può a questo ideale). Una normale lavagna luminosa è già una buona approssimazione, se si mette l'oggetto abbastanza lontano dall'obbiettivo e vicino allo schermo.

Si verifica nel caso di sorgente puntiforme *vicina* (come la lavagna luminosa) che l'ombra è *simile* all'oggetto (fig. 1-1). Invece nel caso del Sole l'ombra è *uguale* all'oggetto (fig. 1-2).

Ho scritto "simile" e poi "uguale"; ma bisogna riflettere un po'. Sul "simile" torniamo fra poco; ma in che senso ombra e oggetto sono "uguali"? Occorre invitare i ragazzi a pensarci sopra: che cosa hanno di comune oggetto e ombra? In che cosa invece differiscono? Che cosa vuol dire "uguale" in questo contesto?

Perché c'è questa differenza fra i due casi? A rigore, in entrambi i raggi di luce partono da un punto: perciò l'ombra dovrebbe *sempre* essere più grande dell'oggetto. Come mai nel caso del Sole è uguale? Naturalmente la ragione è che il Sole è molto distante; ma si può rendere quantitativa questa osservazione? Confrontiamo due esempi:

Esempio 1: Proietto l'ombra della mano sullo schermo. Se la mano misura 16 cm, la sua distanza dalla sorgente è 1 metro e quella dallo schermo 50 cm, quanto sarà grande l'ombra?

Esempio 2: Una chiesa ha due campanili, le cui cime distano 30 metri (fig. 1-3). Esse proiettano la loro ombra sulla piazza, e la distanza fra le punte dei campanili e le loro ombre è 80 metri. Quanto distano le due ombre?

Uso della similitudine

Ci sono due diverse applicazioni della similitudine alle ombre:

- L'ombra è simile all'oggetto (nelle condizioni giuste).
- La lunghezza dell'ombra di un palo (di una torre ...) è proporzionale all'altezza del palo (della torre ...).

Il primo caso è quello dell'esempio 1. La similitudine si ha se l'oggetto sta in un piano *parallelo* allo schermo (fig. 1-1). Allora, presi due punti qualunque A e B dell'oggetto, e le loro corrispondenti ombre A', B', i triangoli SAB,

SA'B' (dove S è la sorgente puntiforme) sono simili. In particolare riesce utile considerare il punto P che sta sulla perpendicolare da S al piano dell'oggetto, e il corrispondente P' sullo schermo: allora tutti i rapporti A'B'/AB sono uguali al rapporto $k = SP'/SP$ delle distanze dalla sorgente. Il numero k è il *fattore di scala* nella proiezione oggetto \rightarrow ombra.

Nel secondo caso invece stiamo considerando le ombre prodotte dal Sole, e supponiamo che i raggi siano paralleli (v. esempio 2). Il palo (la torre) è supposto verticale, su un terreno orizzontale; allora (fig. 1-4) i triangoli ABB', CDD' sono simili perché i lati sono a due a due paralleli, e ne segue la proporzione

$$AB : CD = AB' : CD'$$

che permette di calcolare CD (altezza della torre) dalla misura degli altri segmenti.

Questo è il metodo attribuito a Talete per la misura dell'altezza della piramide di Cheope (fig. 1-5). Il problema è come misurare la lunghezza dell'ombra, visto che il piede della verticale dal vertice della piramide non è accessibile. La soluzione, semplice quanto ingegnosa, consiste nell'aspettare il momento in cui il Sole sta perpendicolare a una coppia degli spigoli di base della piramide: allora alla parte misurabile dell'ombra va semplicemente aggiunta metà del lato.

Il principale problema didattico in questo lavoro con le ombre è che si ragiona *nello spazio*.

Difficoltà con le ombre

Purtroppo le ombre non sono sempre “nitide”: perché? Suggesto in particolare i seguenti problemi:

1. Perché se un aereo vola basso “fa” l'ombra, e se vola alto no? Quanto basso? quanto alto?
2. Perché non si vede l'ombra di un oggetto sottile e alto (per es. una croce alla sommità di una chiesa)?
3. Volendo individuare nel modo migliore dove termina l'ombra di un palo, che forma daresti alla cima del palo? (tagliata ortogonalmente? appuntita? semisferica? oppure?)

Ombra e penombra

Se la sorgente è “puntiforme” un oggetto produce un'ombra netta; altrimenti l'ombra è “sfumata”: esiste ombra e “penombra” (*paene umbra*).

Per capire questo, conviene cominciare da una sorgente fatta di due punti (A e B): ciascuno produce un'ombra (fig. 1-6), e sullo schermo esistono in generale 4 regioni distinte (fig. 1-7):

- | | | | | | |
|----|-------------|--------|------------|-------------------------|----------------------------|
| 1) | quella dove | arriva | luce | tanto da A quanto da B: | $A \wedge B$ |
| 2) | " | " | " | da A ma non da B: | $A \wedge (\neg B)$ |
| 3) | " | " | " | da B ma non da A: | $(\neg A) \wedge B$ |
| 4) | " | " | non arriva | " né da A né da B: | $(\neg A) \wedge (\neg B)$ |

La regione 1 è più illuminata, 2 e 3 sono illuminate a metà, 4 è al buio (può accadere che 4 non esista, se le due ombre non hanno punti comuni, il che accade solo se le sorgenti sono sufficientemente lontane tra loro).

Se le sorgenti sono 3, le cose si complicano un po': possiamo avere luce completa, ombra completa, e penombra di due gradazioni, a seconda che arrivi la luce di una sola sorgente o di due (fig. 1-8).

Passando al caso di una sorgente estesa (e connessa) dobbiamo aspettarci due casi limite (fig. 1-9):

- luce completa
- ombra completa

separati da una regione in cui arriva luce ma non da tutta la sorgente (penombra). Si passa con continuità da luce a ombra attraverso sfumature di penombra.

Il caso più semplice è una sorgente circolare, con oggetto anch'esso circolare; ma bisogna distinguere due casi:

a) Sorgente più piccola dell'oggetto.

Allora l'ombra sullo schermo diventa più grande quando lo schermo si allontana, ed è circondata da un anello di penombra anch'esso progressivamente crescente. È questo il caso di fig. 1-9.

b) Sorgente più grande dell'oggetto.

Allora esiste il "cono d'ombra" dietro l'oggetto, col vertice a una distanza che poi calcoleremo. Invece la penombra si allarga sempre. Oltre il vertice del cono, esiste solo penombra (fig. 1-10).

È istruttivo mettersi "dal punto di vista dello schermo," ossia chiedersi come e quanto vede la sorgente una formica che sta sullo schermo (fig. 1-11).

- Se sta nell'ombra, non vede la sorgente: questa è coperta (eclissata o meglio *occultata*) dall'oggetto.
- Se sta in luce, vede tutta la sorgente.
- Se sta in penombra, la vede in parte.

Se la sorgente è più grande, da un punto posto nella penombra oltre il vertice si vede un "anello."

Nota didattica: È importante far vedere queste cose dal vero, e non solo con figure!