

Per le ricerche di ottica fisica la conoscenza dell'occhio è tanto importante quanto quella dell'ottica per le ricerche di fisiologia della visione Ernst Mach

Introduzione all'attività

Si illustra brevemente il percorso e il suo obiettivo, cioè capire cos'è la luce e quali sono le regole con cui si può interpretare la sua interazione con i diversi materiali. La luce condiziona, ad ogni livello, l'esperienza umana e l'esistenza stessa dei viventi nel mondo. Per capire una fenomenologia così varia e coinvolgente occorrono schemi di interpretazione strutturati e complessi da sviluppare con i ragazzi e le ragazze attraverso percorsi conoscitivi che ne prendano in considerazione, nel tempo, i molteplici aspetti. Si esplicita che il percorso avrà un approccio fenomenologico e che le competenze nell'interpretare fenomeni luminosi saranno costruite gradualmente – attraverso discussioni collettive ed esperienze – partendo dalla percezione e dalle idee di luce che fanno riferimento all'esperienza comune. In particolare, in questo primo incontro si indagherà sulle condizioni che rendono un oggetto visibile e classificando gli oggetti visibili in sorgenti (primarie e secondarie), discuteremo del meccanismo di diffusione della luce, classificheremo i materiali in base alla loro interazione con la luce, esamineremo il colore dei corpi e della luce, analizzeremo il meccanismo di visione.

Il percorso può avere un approccio coinvolgente e multidisciplinare:

- i fenomeni luminosi sono spesso belli e spettacolari, la luce, il colore e la percezione sono gli ingredienti essenziali dell'emozionante esperienza estetica dell'arte e la loro comprensione può fornire chiavi di lettura che aiutano nell'interpretare e nell'inventare opere d'arte;
- il vedere coinvolge la cultura in generale, non solo la biologia, la chimica, la fisica, le neuroscienze ma anche il comunicare e quindi la lingua, l'arte, ecc.

L'esplicitazione di tali legami risulta in generale stimolante e coinvolgente e può permettere di far leva su interessi e stili diversi che si presentano tra i ragazzi.

Nella presentazione gli studenti sono coinvolti non solo sui contenuti ma anche:

- sulle modalità di interazione e di svolgimento delle attività,
- sull'articolazione del percorso;
- sulla necessità di prevedere delle tappe con elaborazioni di gruppo e discussioni collettive nelle quali si lavora con regole fenomenologiche, risultati di misure, ecc. per costruire schemi interpretativi basati su astrazioni, classificazioni, modellizzazioni. Il primo di questi schemi (non descritto ora) riguarderà le sorgenti luminose, gli oggetti che vediamo e il nostro occhio. Se necessario si richiamano altri schemi che fanno riferimento ad argomenti già studiati e si ricostruirà il modo in cui si è arrivati a dividerli.

Gli studenti sono quindi invitati non solo a partecipare con attenzione ma anche a collaborare per:

- favorire il reale capire di tutti,
- giungere sempre a conclusioni condivisibili,
- favorire lo scambio tra i gruppi.

Luce e sorgenti di luce, domande introduttive

elaborazione della scheda

I ragazzi rispondono alla prima domanda della scheda studente (1.1 *Cos'è per te la luce?*); la domanda mira ad introdurre il discorso sulla luce partendo dalle idee dei ragazzi. Si chiarisce che le risposte sono libere e che si dovrebbe fare appello alla capacità di definire ciò con cui abbiamo a che fare. Talvolta funziona lo stimolo “Ma cosa diresti ad un bambino che ti rivolge la stessa domanda?”.

discussione collettiva

Si ascoltano le risposte degli studenti alla prima domanda della scheda. Dalle loro risposte si evince come la luce sia un elemento fondamentale della vita di ogni giorno. Le risposte possono essere raggruppate per categorie e commentate. Alla fine l'insegnante potrebbe leggere alcune definizioni da libri scolastici, enciclopedie, dizionari, ecc. per mostrare analogie, differenze, stili di presentazione, punti di vista anche diversi.

da alcuni libri

...buona parte della radiazione solare è costituita da “radiazione visibile” che comunemente chiamiamo luce (Boni, De Michele, Mayer)

...la maggior parte delle informazioni che riceviamo ci arriva attraverso la vista. Potremmo chiederci “che cos'è la luce?” ma questa domanda non farebbe aumentare la conoscenza della luce...studieremo ora le proprietà della luce...(PSSC)

...l'unica cosa che riusciamo veramente a vedere è la luce. Ma che cosa è la luce?... (Hewitt)

...da ogni sorgente luminosa viene emesso un “qualcosa” che raggiunge i nostri occhi. Due cose possono spostarsi nello spazio: i corpuscoli e le onde. (Mangini, Mignosi)

...ciò che chiamiamo “luce” è un flusso di onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa tra ... (Hulsizer, Lazarus);

“Che cos'è la luce?” è una di quelle domande superbamente semplici su cui l'uomo medita, e con cui lotta, da oltre 2000 anni. Non mancano le risposte...ma anche oggi la nostra conoscenza è lungi dall'essere completa... (Hecht)

spunti

Nello studio sulle concezioni ingenua sulla luce diversi ricercatori (a partire da E. Guesne nel 1978) hanno trovato nei ragazzi idee concordanti con quelle degli antichi Greci. Platone nel Timeo associa ai raggi luminosi un “fuoco visuale” interpretabile come “raggi visuali” uscenti dagli occhi. *Su questo aspetto si veda anche la nota su L'Ottica degli Ellenisti*

“La luce sembra assimilata alle sue sorgenti e ai suoi effetti, o semplicemente alla condizione della vista, senza essere identificata come un'entità autonoma collocata nello spazio tra le sorgenti e gli effetti prodotti. I ragazzi ritengono che esista o nella sorgente o sulla superficie colpita. ...

Una piccola percentuale di studenti ha un'idea della luce come un effetto fisico che esiste separatamente dalle sue sorgenti e dai suoi effetti. La luce illumina gli oggetti che così possono essere visti, ma l'atto del vedere non è associato in maniera esplicita all'arrivo dei raggi di luce all'occhio dell'osservatore. (Ho anche osservato che alcuni studenti reinventano l'antica idea proposta da Parmenide secondo cui, per rendere possibile il fatto di vedere, qualcosa viene emesso dai nostri occhi verso l'oggetto.)”

B. Arons, *Guida all'insegnamento della fisica*, Zanichelli 1992

elaborazione della scheda

I ragazzi rispondono alle domande della scheda studente che vanno dal punto 1.2 al punto 1.14 della scheda studente.

Le domande mirano a: distinguere tra sorgenti primarie e sorgenti secondarie; introdurre il fenomeno della diffusione della luce; introdurre l'idea che la luce "va dritta"; riflettere sulla geometria euclidea.

discussione collettiva

Si ascoltano le risposte dei ragazzi. I ragazzi tendono a separare in due categorie nettamente distinte la luce elettrica (lampade, torce...) e quella "naturale" (Sole, lucciole, torpedini...). Considerando solo le ultime come "sorgenti di luce". Dai discorsi dei ragazzi si evince come questa distinzione si basi sull'idea che nel primo caso la luce è prodotta artificialmente e per essa è evidente la necessità di un'alimentazione (corrente della rete o da batterie...), mentre nel secondo caso no, "perché esiste in natura". È bene allora riflettere coi ragazzi su come anche la luce *naturale* necessiti di sorgenti e di trasformazioni di energia. Sul Sole l'*alimentazione* deriva dalla fusione nucleare e neanche la sua luce può considerarsi eterna: fra circa 5 miliardi si spegnerà!

Spunti sulla produzione di luce

Il soffermarsi sul principio di funzionamento di alcune sorgenti di luce può essere l'occasione per inquadrare i fenomeni luminosi nelle trasformazioni di energia. Ecco alcuni spunti che potrebbero essere lo stimolo anche per approfondimenti individuali.

Bioluminescenza riguarda l'emissione della luce da parte di organismi viventi. Le lucciole hanno degli organi addominali bioluminescenti che sono usati come richiamo sessuale

Fluorescenza: luce emessa da alcune sostanze colpite da radiazione luminosa. A differenza della fosforescenza, nella fluorescenza l'emissione di luce cessa quando viene a mancare la radiazione eccitante.

Lampada

È una sorgente artificiale di luce che trasforma energia (chimica o elettrica) in radiazione luminosa. Nel primo caso la trasformazione avviene con la combustione di cera, petrolio, olii, gas...Le lampade sono state usate fin dalla preistoria bruciando grasso animale.

Lampade elettriche. Le più diffuse sono quelle a incandescenza: la luce è emessa da un filamento di metallo resistente alle alte temperature (ad esempio tungsteno); il filamento (sotto vuoto in un contenitore di vetro, il bulbo) è attraversato da corrente e portato all'incandescenza. Altre lampade elettriche sono a gas, a fluorescenza, ad arco. Le lampade elettriche si caratterizzano per durata media (tempo di funzionamento) e rendimento. Le lampade a incandescenza hanno un rendimento variabile tra il 12% e il 18% e una durata media di circa 1000 ore.

Spunti sulle difficoltà

È raro che i ragazzi pensino alla propagazione della luce nello spazio, o almeno che ne esplicitino l'idea. Lo fanno soprattutto in riferimento a grandi distanze (dal Sole o dalle altre stelle), per cui diventano apprezzabili i tempi di spostamento. L'insensibilità che si pone di fronte al problema della propagazione della luce è tale che quando esposto esplicitamente, le relative domande vengono intese come se vertessero sul movimento delle sorgenti. Ecco una risposta tipica di una bambina di 12 anni: «C'è ne che si muove, e dell'altra che non si muove! Per esempio quella sul soffitto, quella non si muove; e la luce delle pile, quella si muove, e anche quella delle automobili... perché la luce è il Sole e il Sole non si muove».

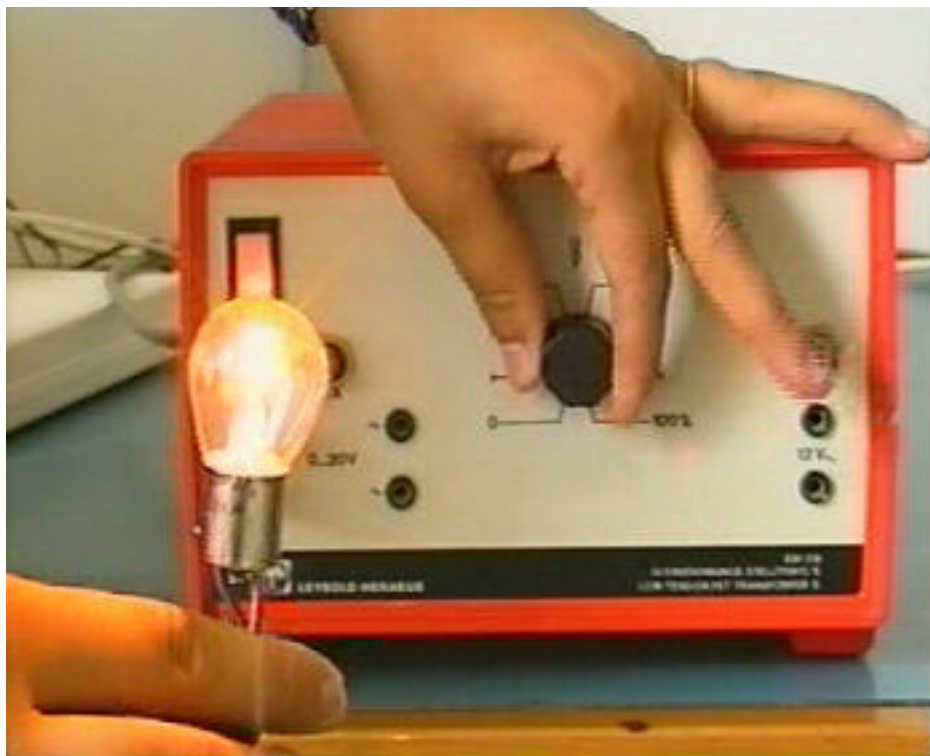
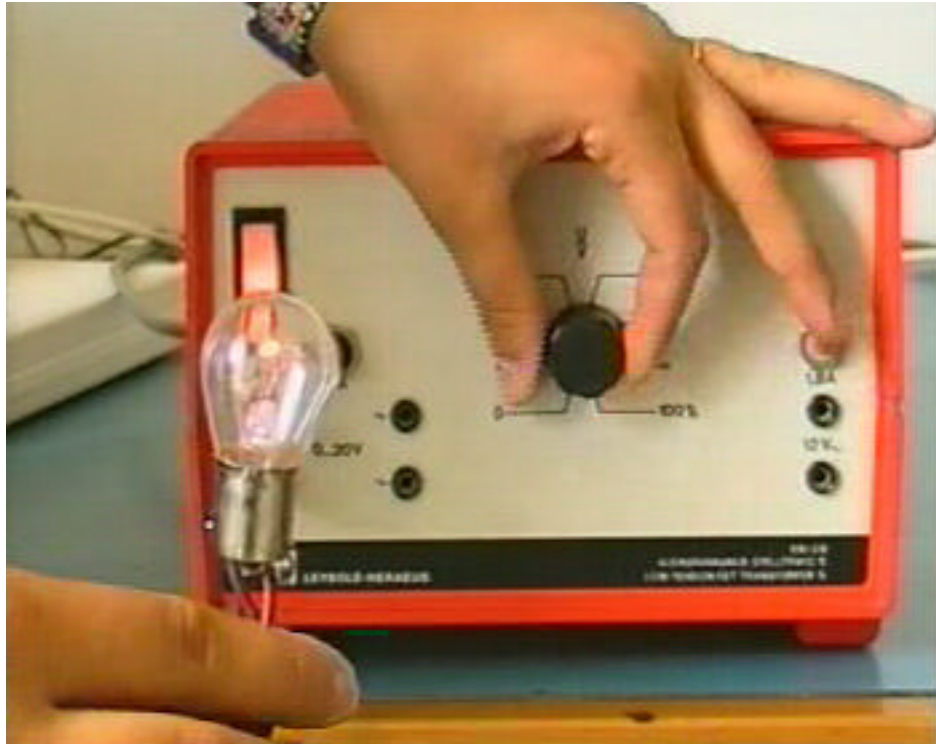


Fig. Una lampada per auto alimentata con un generatore di tensione da laboratorio. Aumentando la tensione aumenta l'intensità della luce emessa dal filamento. Nelle usuali lampade a incandescenza il filamento di tungsteno raggiunge, alla tensione di esercizio indicata, la temperatura di circa 2854K. In questa fase l'esperimento può essere svolto in modo qualitativo (al buio, alla presenza di altre sorgenti, ecc.) per classificare gli oggetti che vediamo. Un esperimento quantitativo è poi proposto nella terza attività del percorso.

La difficoltà di interpretare e correlare correttamente propagazione della luce e visione emerge dalle risposte date ad alcune domande tipiche in questionari utilizzati in diversi paesi. Riferendosi ad esempio alla situazione “E’ notte. E’ buio ma si vede distintamente una tenue brace...” in media solo il 20% dei ragazzi risponde correttamente dicendo che la luce che viene emessa dalla brace arriva ai nostri occhi. Nella maggioranza dei casi sembra affermarsi l’idea che la luce emessa dalla brace resti confinata in qualche modo intorno alla brace stessa.

Difficoltà di questo tipo sono state rilevate e documentate, anche in modo scrupoloso, in anni di ricerca didattica.

Dalle sperimentazioni in corso sembra emergere che visioni corrette possono essere costruite già nella scuola di base lavorando con esperienze mirate in percorsi gradualmente che legano l’esperienza quotidiana alla costruzione di modelli interpretativi corretti. Tali modelli dovrebbero essere costruiti e resi plausibili correlando fatti e generalizzando a partire da situazioni osservate e vissute.



Figura

“Luce: un percorso per capire” di M.Gagliardi, P.Guidoni, F.Volpe, in “Facciamo un Esperimento” (a cura di E. Balzano e M. Gagliardi) Cuen 1990

Un primo schema da condividere è quello riprodotto in figura:

- dalle sorgenti primarie (che possono essere definite come quelle legate a trasformazioni di energia) viene emessa luce. In figura la sorgente primaria è la lampada elettrica.
- gli oggetti colpiti dalla luce emessa dalla sorgente primaria diffondono luce e sono definite sorgenti secondarie. In figura, il tavolo, il vaso, i fiori sono sorgenti secondarie.
- a catena, gli oggetti colpiti dalla luce emessa dalle sorgenti secondarie diffondono a loro volta luce, ecc. In figura, il coprilampada del lampadario (se opaco) è investito dalla luce emessa dalle pareti e dal soffitto e può essere definita sorgente terziaria, se traslucido diffonde luce trasmessa ed è sorgente secondaria. Una lampada spenta ma visibile è una sorgente secondaria.
- noi vediamo oggetti che inviano luce nei nostri occhi (sorgenti primarie, secondarie, ecc.). Spesso proteggiamo i nostri occhi quando la luce emessa dalle sorgenti è troppo intensa. Per farlo usiamo filtri o indirizziamo i nostri occhi verso oggetti meno luminosi...
- nello schema il mezzo interposto è l'aria.

Questo primo schema dovrebbe essere condiviso con l'intera classe "esercitandosi" su diverse situazioni familiari anche con geometrie e modalità di interazione luce-materiali più complesse. Ad esempio si può lavorare con la presenza di più sorgenti primarie, con la luce che passa attraverso fenditure, con un mezzo interposto diverso (ad esempio l'acqua), ecc. L'insegnante dovrebbe assicurarsi che lo schema sia realmente condiviso e dovrebbe far intravedere quegli aspetti non ancora discussi che saranno oggetto delle successive esplorazioni e schematizzazioni (propagazione rettilinea, specificazione dell'interazione luce-materia, ecc.). La condivisione del filo del percorso di costruzione graduale, ricca di correlazioni con esperienze quotidiane, ecc. aiuta nella nostra esperienza a non rendere banali interpretazioni di fenomeni familiari.

Dov'è la luce

esperimento in grande gruppo

materiale: una lampadina accesa, cartoncini bianchi.

In grande gruppo si svolge l'esperimento descritto al punto 2.1 della scheda studente. Si evidenzia così che una lampadina emette luce in ogni direzione.

Esperimento in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: rettangoli (10 cm x 15 cm) di lamiera (o cartoncino doppio) con gli spigoli e i bordi netti, lampadina collegata a un generatore, piccoli specchietti, 1 colapasta.

In piccoli gruppi i ragazzi rispondono al punto 2.2 della scheda studente (2.2) e svolgono l'esperienza descritta al punto 2.3

discussione collettiva

Si commenta l'esperienza svolta. Si osserva come la luce emessa da un faro o da una torcia sia più intensa della luce emessa dalla lampadina "nuda" e l'intensità aumenta al restringersi (efficiente, ad esempio con un buon riflettore) dell'apertura del fascio. Con i ragazzi si osserva come, per studiare i fenomeni luminosi e dedurre le regole, sia spesso preferibile lavorare con pennelli di luce piuttosto che con luce emessa in ogni direzione. In questo modo è possibile disegnare su carta linee rette che rappresentano le direzioni secondo cui si propaga la luce. Si introduce "operativamente" il modello di *raggio* di luce che permette di lavorare con la direzione di propagazione rettilinea della luce. La riflessione sulla corrispondenza tra ente fisico e geometrico sarà ripresa più volte nel seguito.

La luce non si vede...

elaborazione della scheda

I ragazzi rispondono alle domande 3.1, 3.2, 3.3 della scheda studente

Le domande mirano a introdurre il fenomeno della diffusione della luce evocando esperienze quotidiane in cui si verifica.

esperimento in grande gruppo

materiale: puntatori laser, borotalco, filo di lana.

Si ascoltano le risposte dei ragazzi riflettendo su come nonostante la luce consenta di vedere non è possibile vedere la luce finché non illumina un oggetto. Alla discussione segue l'esperimento con il puntatore laser. Si accende un laser e lo si punta sulla parete, sulla parete comparirà un puntino rosso. (I puntatori sono laser a bassa potenza – meno di 2mW- ma in ogni caso è bene fare attenzione a evitare che il fascio laser giunga negli occhi. Quest'esperienza potrebbe essere un'occasione per informare gli studenti sulle norme d'uso di un laser – oggetto sempre più diffuso - e sui rischi ad esso legati – lesioni anche permanenti alla retina, alla cornea...). Si muove il laser osservando come il puntino rosso compaia solo quando la luce incontra qualcosa che riemette luce.

Si invita uno studente a spargere del borotalco nella regione compresa fra il puntatore e il punto rosso sulla parete. In questo modo si osserverà comparire la luce del laser. Un altro modo per rendere visibile la luce del laser è quello di tendere un filo di lana dal laser fino al punto rosso che compare sulla parete, in questo modo l'intero filo apparirà illuminato di rosso e renderà visibile la luce.

elaborazione della scheda

I ragazzi singolarmente rispondono alla domanda posta al punto 3.5 della scheda (3.5 -

discussione collettiva

Si ascoltano le risposte dei ragazzi e si discute del fenomeno della diffusione della luce intesa come rinvio in ogni direzione di tutta o di una parte della luce che colpisce la superficie di un corpo (il borotalco, le pareti di una stanza...). Il fenomeno è anche detto riflessione diffusa che differisce da quella ordinaria perché la direzione della luce diffusa non è univocamente determinata da quella del raggio incidente (e dalla normale al piano); la luce diffusa è sparpagliata in tutte le direzioni. La discussione si riaggancia alle considerazioni fatte in merito alle sorgenti secondarie: un oggetto illuminato diffonde la luce diventando esso stesso sorgente di luce; il fenomeno è evidente nel caso della Luna spesso considerata come una sorgente primaria.

La luce non perde il filo

esperimento in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: fili di spago, un oggetto con un occhiello (tazza), un cartoncino abbastanza spesso, fermi per blocchi di fogli di carta o altro da mettere ai lati del cartoncino per mantenerlo verticale.

In piccolo gruppo i ragazzi svolgono l'esperienza descritta al punto 4.1 della scheda studente .

discussione collettiva

L'esperienza mira a evidenziare che la luce va "dritta", infatti le uniche configurazioni del filo che consentono di vedere l'oggetto sono quelle in cui il filo è teso.

Luce e ombre

Successivamente i ragazzi svolgono le esperienze descritte al punto 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 della scheda studente.

esperimento in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: 1 lampada, un cartoncino rigido bianco (che farà da schermo), cartoncini di forma diversa attaccati a un lungo bastoncino, filo di spago.

I ragazzi svolgono l'esperienza descritta al punto 5.4 della scheda studente.(5.4)

discussione collettiva

Si individuano gli "ingredienti" da cui dipende l'ombra (una sorgente, l'oggetto, uno schermo) e i parametri da cui dipendono la sua forma (orientazione rispetto allo schermo) e le sue dimensioni (distanza fra oggetto e la sorgente). L'ultima domanda dà l'occasione di discutere sul fatto che l'ombra di un oggetto è una regione *tridimensionale* delimitata dai raggi di luce tangenti all'oggetto e che l'intersezione dello spazio d'ombra con le superfici del pavimento, delle pareti, degli oggetti determina il formarsi di *figure d'ombra* bidimensionali dai contorni definiti.

È possibile identificare i contorni dello spazio d'ombra camminando in questo spazio o muovendovi degli oggetti o un foglio di carta in modo che risulti parzialmente illuminato e parzialmente in ombra. Si possono evocare situazioni familiari in cui si sperimentano le zone d'ombra: sulla spiaggia all'ombra dell'ombrellone, in una foresta all'ombra degli alberi, all'ombra di una tettoia...

In genere il concetto di dimensione tridimensionale della zona d'ombra sfugge, e le ombre sono per lo più considerate come piane, forse perché sono visibili solo sulle superfici su cui si stagliano.

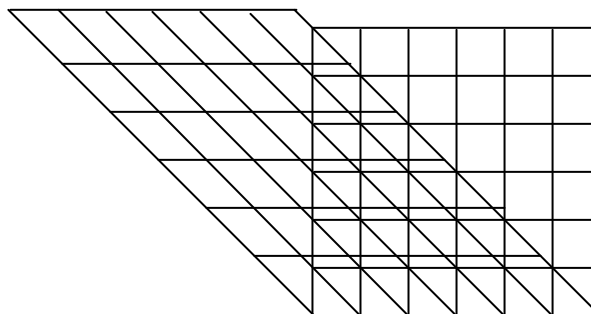
Si confrontano le previsioni dei ragazzi sulla forma e le dimensioni dell'ombra. Si prende in considerazione un caso particolare di ombra (per esempio di un quadrato), si tende lo spago fra la sorgente e i bordi dell'oggetto e poi lo si prolunga fino a incontrare lo schermo. Lo spago teso aiuta a visualizzare il modello di propagazione rettilinea della luce.

Quante ombre per un quadrato.

Con la sorgente luminosa lontana, ruotando la lastrina si possono individuare i movimenti che consentono di cambiare le dimensioni dell'ombra e non la sua forma (movimenti in cui il cartoncino rimane parallelo a se stesso), e quelli che ne fanno variare sia la forma che l'estensione (rotazioni). Forma e dimensioni dell'ombra dipendono dalle posizioni relative della sorgente luminosa, dell'oggetto e dello schermo su cui si proietta l'ombra. Il modello di raggio e di propagazione rettilinea consente di spiegare e prevedere tutte le possibili figure d'ombra della lastrina. La relazione fra la forma di un oggetto e le possibili forme della sua ombra prodotte da una sorgente puntiforme, è descrivibile geometricamente attraverso un uso sistematico delle trasformazioni proiettive.

Ombre e trasformazioni geometriche¹

Esponiamo al Sole un telaio quadrettato (per esempio costruito con le strisce del meccano collegate con viti e dadi) e osserviamo l'ombra sul tavolo su cui è appoggiato. Cambia, a seconda dell'ora in cui viene fatta l'esperienza, la forma e la grandezza dell'ombra del quadrettato, ma qualcosa si mantiene sempre uguale, è *invariante* rispetto a questa trasformazione: il parallelismo; *a rette parallele*



¹ E. Castelnuovo, La via della matematica La geometria – La Nuova Italia, 1977

corrispondono sempre rette parallele.

Al quadrato corrisponde sempre un elemento dell'insieme dei parallelogrammi: un rettangolo o un rombo o un parallelogramma più generale; o anche in casi particolari (per esempio se disponiamo il telaio perpendicolarmente ai raggi del Sole e se facciamo in modo che l'ombra si formi su un piano parallelo al telaio) un quadrato uguale. Una trasformazione come questa che conserva il parallelismo si chiama *affinità*. Otteniamo dunque come ombre date dal Sole, delle figure affini. Mentre gli angoli si mantengono paralleli, gli angoli non sono generalmente conservati; si dice che la trasformazione non è *conforme*. Le proprietà fondamentali di questa trasformazione:

- a rette corrispondono rette, cioè la trasformazione è lineare;
- a rette parallele corrispondono rette parallele;
- è costante il rapporto fra segmenti situati su una stessa retta e i loro corrispondenti;
- è costante il rapporto fra aree di figure corrispondenti.

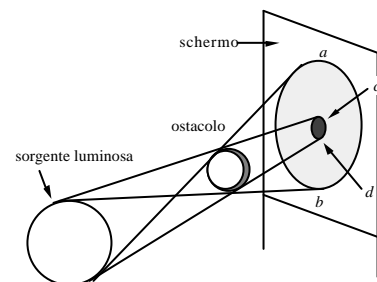
Esponiamo ora il telaio quadrettato alla luce di una sorgente di luce puntiforme e osserviamo l'ombra del quadrato sopra al tavolo. Varia la forma dell'ombra dei piccoli quadrati a seconda della posizione del telaio rispetto al tavolo, ma – fatto importante – a un quadrato corrisponde sempre un quadrilatero. Se poi il telaio è appoggiato al tavolo lungo un lato, i quadrilateri ombra sono trapezi perché due lati risultano paralleli: sono quelli che provengono dai lati del quadrettato paralleli al tavolo. Lo stesso capita quando si guardano le rotaie rettilinee pare che vadano a ricongiungersi, e i rettangoli formati dalle traverse ci appaiono come tanti trapezi. La trasformazione data da una lampada puntiforme si chiama *proiettività*. Se poi le in un quadrato del telaio fossero indicate le diagonali si vedrebbe che queste si trasformano nelle diagonali del trapezio corrispondente: al centro del quadrato corrisponde dunque il punto d'incontro delle diagonali, punto che non taglia a metà le diagonali. Il punto medio di un segmento non è dunque invariante per una proiettività. Se si potesse portare la lampada a distanza infinita, l'ombra del quadrettato sul piano diventerebbe *affine* al quadrettato: si avrebbe insomma l'effetto dato dai raggi del Sole. *L'affinità è un caso particolare della proiettività.*

SULLE TRASFORMAZIONI GEOMETRICHE CON IL COMPUTER SI VEDA IL LINK AL PROGRAMMA GeT

Si analizza la propria ombra realizzata usando come sorgente il Sole, si osserva che l'ombra dei piedi e quella della testa hanno una diversa nitidezza. Questa differenza è anche più notevole se consideriamo l'ombra di una sottile asta verticale. La mancanza di nitidezza delle ombre dipende anche dalla sorgente di luce: le ombre proiettate da piccole sorgenti (non estese) sono di solito perfettamente definite, in accordo con la propagazione rettilinea della luce. Questa considerazione fornisce un indizio circa la ragione per l'apparente minor nitidezza delle ombre proiettate dal Sole. Ogni punto della superficie solare emette luce, perciò l'ombra non è, in realtà, unica, ma è la combinazione di un grandissimo numero di ombre proiettate dalla luce proveniente da ogni punto della superficie solare. Nella figura che segue è mostrata l'ombra formata da una sorgente di luce di considerevole estensione, come il Sole.

Poiché la luce si propaga in linea retta da nessun punto della sorgente essa può raggiungere la regione circolare compresa tra c e d ; quindi questa regione dell'ombra è nera. Nella regione punteggiata tra circonferenza ab e la circonferenza cd , arriva soltanto la luce proveniente da alcune zone della sorgente; l'ombra perciò è meno scura e svanisce alla fine di un bordo indistinto in corrispondenza della circonferenza ab . Al di fuori della regione ombreggiata compresa fra a e b , la luce arriva da tutti i punti della sorgente.

È chiamata propriamente ombra la parte scura dell'ombra, quella cioè che non è raggiunta da alcuna luce proveniente dalla sorgente, mentre le parti meno scure formano la penombra.



esperimento in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: una sfera posta su un sostegno, un cartoncino bianco che faccia da schermo, riga.

I ragazzi svolgono in piccolo gruppo l'esperienza descritta al punto 5.8 della scheda studente

alcuni dati

L'esperimento è stato svolto usando una sfera di diametro $D = 4\text{cm}$. I dati ottenuti sono in tabella.

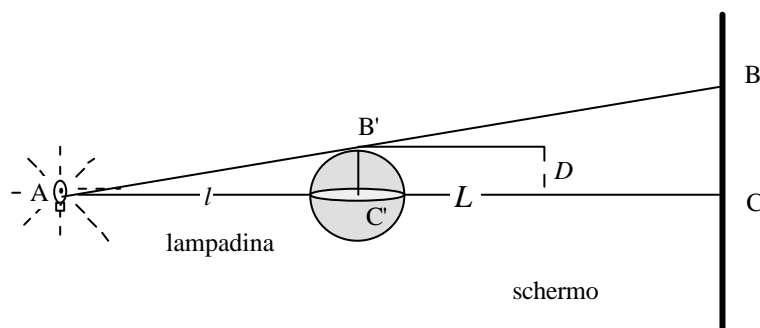
L [cm]	l [cm]	d [cm]	L/l	d/D
60,0	20,0	12,5	3,0	3,1
60,0	30,0	8,0	2,0	2,0
60,0	40,0	6,5	1,5	1,6
60,0	55,0	4,5	1,1	1,1

L'errore sulle misure di lunghezza è di 1mm, mentre l'errore sul rapporto L/l (ricavato come somma degli errori relativi delle singole grandezze) è circa 0,01 mentre quello su d/D è di circa 0,03.

Confrontando le ultime due colonne della tabella si può dedurre la relazione:

$$\frac{L}{l} = \frac{D}{d} \quad \text{da cui} \quad d = D \cdot \frac{l}{L}$$

La stessa relazione poteva essere ricavata dalla similitudine fra i triangoli ABC e AB'C' (cfr. figura).



L'insegnante dovrebbe condividere con l'intera classe le fenomenologie e i ragionamenti che portano al modello di propagazione rettilinea e di raggio. La ricostruzione, inizialmente anche dettagliata, del passaggio tra ciò che immaginiamo ci sia nella luce ("infiniti raggi") e ciò che rappresentiamo, ad esempio quando disegniamo con la matita l'asse di un pennello luminoso (un tronco di cono di luce) radente su un foglio di carta, dovrebbe dare la possibilità di riflettere sul rapporto tra geometria e fisica. Un richiamo storico agli studi di ottica da parte di Euclide potrebbe fornire stimoli per indagare sulla nascita della modellizzazione e sul rapporto tra matematica e fisica.

L'ottica degli Ellenisti

Secondo Lucio Russo una delle prime applicazioni della matematica ellenistica fu la teoria dell'ottica geometrica di Euclide. Nell'*Ottica* l'autore degli *Elementi* costruisce una vera e propria teoria scientifica, "semplice" perché può essere considerata parte della geometria. La propagazione rettilinea della luce era nota anche a Platone ma in Euclide apparirebbe chiaro il rapporto tra gli enti fisici e quelli geometrici.

"I raggi visuali all'interno della teoria possono essere considerati proprio come i segmenti degli *Elementi* ma a essi non si fanno più corrispondere linee tracciate con la riga, bensì percorsi possibili della luce...Euclide deduce nella sua opera tutta una teoria quantitativa che permette di studiare le ombre o di calcolare grandezze apparenti degli oggetti introducendo in concetto di grandezza angolare...La teoria scientifica dell'ottica portò all'elaborazione delle leggi della prospettiva (chiamata scenografia)..Le leggi della prospettiva furono dimenticate nel Medio Evo e fu recuperata nell'ambito dell'interesse rinascimentale per la cultura ellenistica....

Si è spesso insistito sul fatto che nell'*Ottica* di Euclide è detto che i raggi partono dagli occhi e non dall'oggetto osservato...Si tratta di un tipico esempio di incomprensione moderna del metodo scientifico ellenistico. ...I *raggi visuali* non sono enti fisici più di quanto lo siano i *segmenti* nella sua opera più famosa (gli *Elementi*). Per fornire un modello matematico della visione occorre studiare il cono dei raggi visuali con il vertice nell'occhio...L'attuale distinzione tra matematica e fisica ...ha fatto dimenticare che Euclide negli *Elementi* e nell'*Ottica* ha usato esattamente lo stesso metodo...(quello scientifico che porta all'astrazione e alla costruzione di teorie NdR)"
Lucio Russo, La rivoluzione dimenticata, Feltrinelli (1997) pagg. 79-86

Luce e materiali

Esperimento esplorativo in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: sorgenti luminose, un cartoncino bianco che faccia da schermo, riga, cartoncini, lastre colorate, smerigliate, lastre lucide, lastre opache, lastre trasparenti, specchi, solidi di plexiglass, liquidi in contenitori trasparenti di forma diversa (cilindri, parallelepipedi..), lenti di fresnel, pezzi di vetro, specchietti deformabili, velluto nero, ecc.

I ragazzi svolgono in piccolo gruppo l'esperienza descritta nella scheda studente. Le esperienze sono molto ricche e l'insegnante cerca di orientare il lavoro dei gruppi suggerendo modi di indagare con i materiali a disposizione. L'attività è essenzialmente finalizzata alla ricerca di regole fenomenologiche che saranno poi correlate a modelli che saranno indagati nelle attività di misura successive.

Discussione in grande gruppo

L'insegnante invita i diversi gruppi a leggere dalla scheda le regole che sono state ritrovate e cerca di organizzare le osservazioni in gruppi omogenei che permettano di distinguere tra le fenomenologie elementari che appaiono sovrapposte. Nella discussione l'insegnante cercherà di introdurre uno schema interpretativo, "rivisiterà" le osservazioni dei ragazzi incominciando ad utilizzare termini che sono messi in correlazione nelle diverse esperienze presentate: emissione, diffusione, riflessione, trasmissione e rifrazione, assorbimento, trasparenza, opacità, intensità, rivelatore, direzione del pennello luminoso, apertura del pennello, angolo sotto cui si vede, dispersione ecc.

Le esperienze che possono essere riorganizzate in questa fase esplorativa sono ad esempio:

- **la diffusione su superficie opaca (in funzione della direzione di propagazione);**
- **l'assorbimento "neutro" (trasparente o grigio) in funzione dello spessore;**
- **l'assorbimento selettivo in funzione del colore;**

- l'estinzione e l'alterazione dei colori per trasparenza e per diffusione;
- la variazione dell'intensità luminosa riflessa in funzione dell'angolo;
- la dispersione (con prismi);
- la diffrazione con fenditure sottili;
- ecc.

Trasparente e opaco

Qualunque oggetto (e materiale) assorbe una parte della luce che lo attraversa. Un oggetto è opaco se non passa luce in modo apprezzabile.

Gli oggetti possono avere un diverso grado di trasparenza, possono essere diafani se permettono di vedere nitidamente attraverso di essi, traslucidi se permettono di vedere meno nitidamente e la "torbidità", legata alla diffusione, aumenta quanto maggiore è la distanza da essi degli oggetti da osservare.

Per spessori sufficientemente elevati qualunque materiale trasparente diventa opaco.

Il grado di trasparenza dipende dalla struttura dei materiali. Diversi solidi amorfi trasparenti (vetro, materie plastiche) diffondono molto poco la luce ma le strutture ordinate (buoni cristalli) come il quarzo e la mica diffondono la luce ancora più debolmente (la trasparenza è maggiore).

Le imperfezioni e le impurità di qualsiasi natura (naturali, dovute a ineliminabili difetti di lavorazione, ecc., ad esempio vapor acqueo e polvere nell'aria, polvere e bolle nei liquidi, difetti di impurità nei solidi, ecc.) diventano diffusori alterando la trasparenza e/o provocando alterazioni dei colori.

Per un materiale la trasmissione dipende anche dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente e può arrivare fino al 99% per alcuni vetri e fino al 92% per l'acrilico fuso.

Il colore della luce e il colore degli oggetti

elaborazione della scheda

I ragazzi rispondono alle domande che vanno dal punto 7.1 al punto 7.7 della scheda studente

Discussione in grande gruppo

Si ascoltano le risposte dei ragazzi. Successivamente si sovrappongono tre fasci di luce monocromatica di colore blu, rosso e verde ottenendo luce bianca.

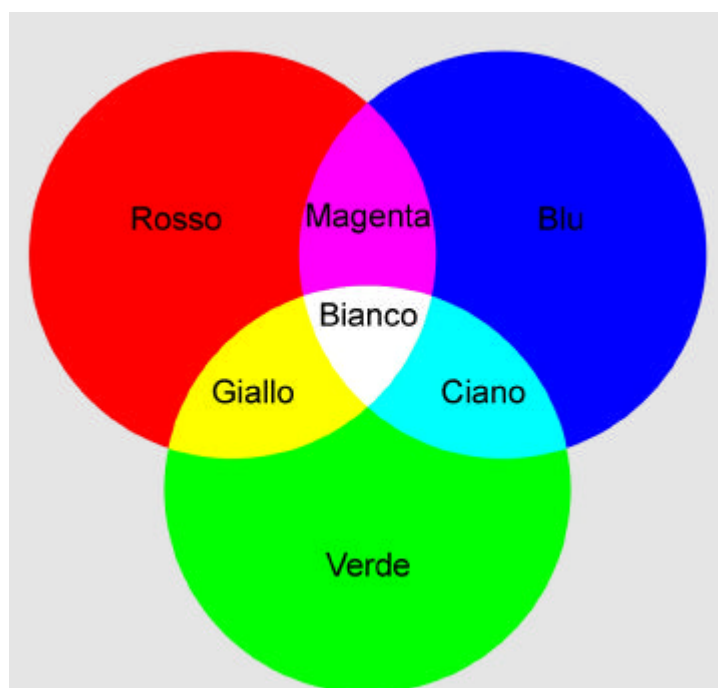


Fig. Sintesi additiva con fasci luminosi (convergenti) con i tre colori primari (rosso, verde, blu). Sullo schermo bianco si ottengono nelle intersezioni i colori complementari (magenta, giallo, ciano) e il bianco.

Fra il fascio di luce e lo schermo si interpone un certo numero di oggetti in modo da fare l'ombra. Si osserva che le ombre ottenute sono tre e sono colorate - una gialla, una magenta, e una ciano - e che i colori sono diversi da quelli delle luci monocromatiche.



Fig. Le ombre colorate (giallo, magenta, ciano) di una ragazza ottenute con tre fasci convergenti di luci, rosso, verde, blu.

Partendo da una posizione prossima alle sorgenti si avvicina lentamente l'oggetto allo schermo, si osserva come le ombre colorate compaiano una alla volta via via che l'oggetto raggiunge una posizione in cui scherma una delle tre luci. Via via che ci si avvicina alla parete il numero di ombre aumenta, ad un certo punto compaiono tutte e tre contemporaneamente, e se ci avvicina ancora le ombre si intersecano e compaiono altri colori: il rosso, il blu, il verde, il nero. Insieme si osserva che per avere un'ombra colorata non basta una sola luce colorata. Come mai? Quando si ha una sola luce, qualunque sia il suo colore, l'ombra è sempre nera essendo l'ombra assenza di luce. Si prova con due luci - per esempio la rossa e la verde. La sovrapposizione delle due luci dà il giallo, mentre le due ombre colorate che si ottengono sono dello stesso colore delle luci proiettate. Giocando con le due luci si capisce come mai ora le ombre sono colorate: le due luci hanno ombre in posti diversi dello schermo, così l'una colora l'ombra dell'altra. Lavorando con una luce per volta si osserva che - fissata la posizione dell'oggetto - la sua ombra con la luce rossa si trova in una posizione diversa rispetto all'ombra con la luce verde. La luce verde illumina dunque la regione d'ombra della luce rossa - cosicché l'ombra diventa verde - e allo stesso modo la luce rossa illumina la regione d'ombra della luce verde - ed ecco comparire l'ombra rossa. Si riprova con le tre luci. Ora le ombre sono tre e di colore diverso da quello delle luci proiettate. Si spiegano i colori delle tre ombre. Ogni ombra è ottenuta dalla sovrapposizione di due luci: l'ombra gialla si ottiene schermato la luce blu e quindi dal mescolamento della luce rossa con la luce verde; l'ombra magenta si ottiene mescolando la luce rossa con la luce blu - schermato la verde; l'ombra ciano si

ottiene mescolando la luce verde con la luce blu. Se si fa ombra, ad esempio con un oggetto più piccolo di quello di partenza, all'interno dell'ombra gialla del primo oggetto, compaiono due ombre: una verde e una rossa, i due colori che sovrapposti danno il giallo. Si discute sul fenomeno di sintesi additiva delle luci cogliendo le differenze con la sintesi sottrattiva che avviene quando si mescolano le tempere, fenomeno a cui i ragazzi sono più abituati. Per esempio mescolando la luce gialla con la luce blu si ottiene una luce bianca mentre mescolando una tempera gialla con una blu si ottiene il verde. I colori delle tre luci monocromatiche considerate sono detti colori *primari* della sintesi additiva, la loro sovrapposizione dà luce bianca mentre variando l'intensità reciproca di ciascuno di essi è possibile ottenere tutti i colori dello spettro.

Si discute della fisiologia dell'occhio in relazione alla visione dei colori e si espone la teoria di Young e Helmholtz sul meccanismo di visione dei colori. Vecchia di oltre cento anni essa è particolarmente significativa da una parte per la sua semplicità, dall'altra perché spiega la maggioranza dei fatti fondamentali legati alla percezione dei colori. È una teoria che, per molti aspetti rimane ancora oggi accettabile, ma vi sono cose che essa non è in grado di spiegare. Il problema di Young era di capire in che modo l'occhio riuscisse a trasmettere al cervello uno stimolo nervoso differente e appropriato per ogni particolare lunghezza d'onda della luce. L'occhio umano riesce a distinguere circa duecento tinte diverse; una possibilità è che ogni tinta richiede un proprio tipo di fotorecettore, che si mette al lavoro solo in presenza del colore che gli compete, se così fosse dovremmo disporre di duecento tipi di fotorecettori diversi. Young ipotizzò che i recettori per la visione dei colori fossero soltanto di tre tipi e che ciascun tipo corrispondesse a una tinta primaria. Ogni altra tinta sarebbe risultata dalla stimolazione simultanea dei tre tipi di recettori, in modi opportuni. Era un'idea nuova solo in seguito giustificata dalla scoperta che, in effetti, la retina dispone di tre tipi di coni. Ebbene, oggi si sa che ciascun tipo di coni ha una diversa risposta spettrale (vedi figura che segue). Il primo tipo di coni presenta un massimo di risposta a circa 560 nm ed è l'unico sensibile al rosso. Il secondo tipo percepisce luce di lunghezza d'onda più corta, tale da includere il verde e il giallo, con un massimo di sensibilità intorno a 530 nm. Infine, il terzo tipo di coni, che sono i meno sensibili, presenta il massimo di risposta intorno a 440 nm, cioè nella regione del blu-violetto. Per semplificare possiamo dire che abbiamo coni che rispondono al rosso, altri al verde, altri al blu.

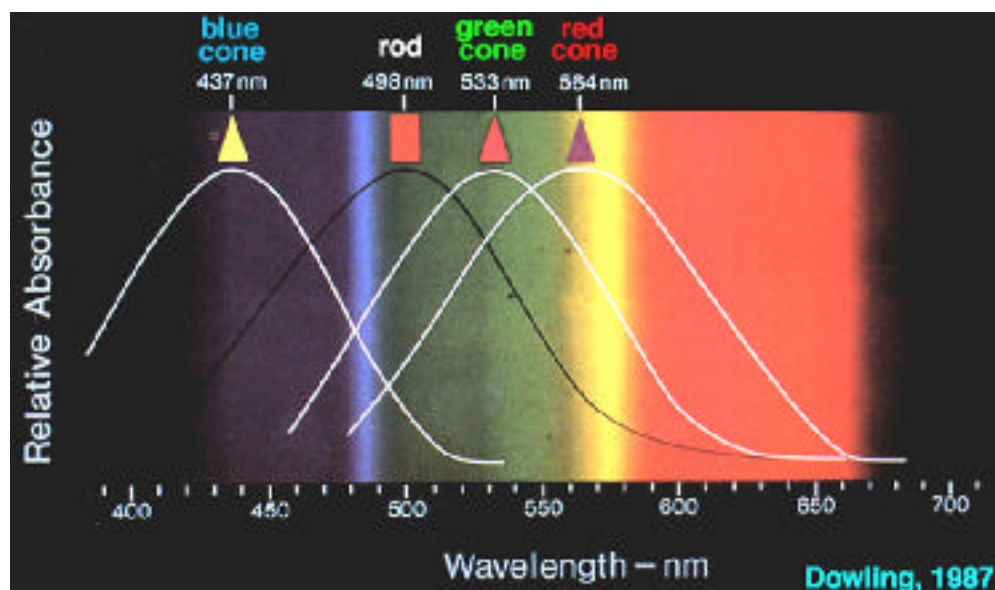


Fig. Le curve di risposta dei tre tipi di coni alle diverse componenti cromatiche della luce. In figura è anche rappresentata la curva di risposta dei bastoncelli (fotorecettori responsabili della visione notturna) che ha un massimo a circa 500 nm. L'immagine è stata scaricata dal

sito web <http://webvision.med.utah.edu> che può essere consultato per approfondimenti, ad esempio per studiare i limiti della teoria di Young.

La radiazione luminosa in arrivo sulla retina stimola simultaneamente tutti e tre i tipi di coni, ma in misura diversa a seconda della particolare composizione spettrale a essa associata. Come conseguenza, al cervello viene inviata in ogni istante una tripletta di segnali che è rigorosamente caratteristica di quella colorazione. In riferimento alla figura precedente, la codifica dei colori da noi percepiti in termini di triplette di valori di intensità (relative) dei tre coni permette di capire perché i colori cambiano rapidamente nella regione centrale dello spettro e molto poco nelle regioni laterali del blu-violetto e del rosso.

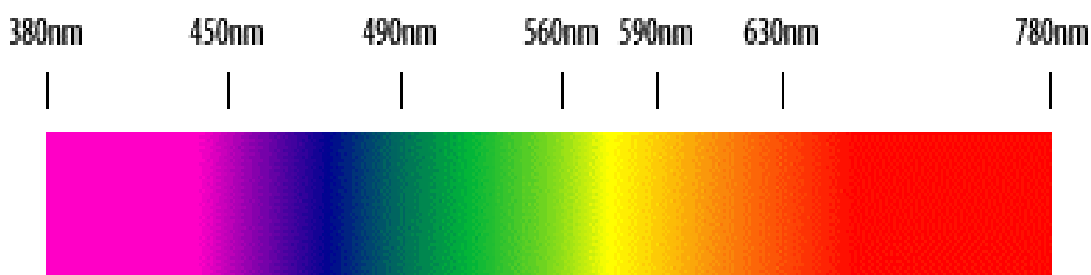


Fig. Lo spettro del visibile

Si conclude illustrando alcune applicazioni pratiche della sintesi additiva: pittori puntinisti, TV a colori, ecc.

elaborazione della scheda

esperimento in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: 1 sorgente di luce bianca, 1 prisma, cartoncini rettangolari, sostegni per mantenere i cartoncini verticali, 1 foglio di dimensione A3 di carta bianca.

I ragazzi svolgono l'esperienza svolta al punto 7.9 della scheda studente

La sorgente di luce è posizionata sul tavolo, su cui è posto il foglio di carta bianca. I ragazzi posizionano i cartoncini in modo da ottenere un pennello di luce anziché luce diffusa in tutte le direzioni; il prisma è poggiato sul tavolo in modo da intercettare il pennello di luce. Attraversato il prisma il raggio di luce apparirà deviato rispetto alla direzione iniziale. Al ruotare il prisma rispetto alla sorgente di luce il pennello di luce bianca si otterrà la decomposizione della luce bianca nei suoi colori componenti.

In questo modo i ragazzi avranno modo di osservare che la luce bianca di una lampada (così come quella del Sole) è data in realtà dalla sovrapposizione di luci colorate monocromatiche..

discussione collettiva

Si ascoltano le descrizioni dei ragazzi e i commenti relativi all'esperienza svolta. Si punta l'attenzione alla deviazione subita dal raggio di luce nel passaggio aria-plex-aria e di come questa deviazione dipenda dall'angolo con cui la luce incide sul prisma. Si accenna al fenomeno della rifrazione che si verifica quando la luce si propaga in mezzi diversi e di come questo fenomeno dipenda dalla lunghezza d'onda della luce incidente. L'argomento sarà poi approfondito nel corso dell'incontro successivo.

esperimento in piccolo gruppo

materiale per ogni gruppo: una sorgente di luce bianca (potrebbe andar bene anche la luce del Sole), filtri colorati.

I ragazzi in piccoli gruppi svolgono le esperienze descritte al punto 7.10, 7.11, 7.12 della scheda studente

Con questo gruppo di esperienze i ragazzi sperimentano il funzionamento dei filtri colorati deducendo alcune semplici regole: un fascio di luce bianca *si colora* del colore del filtro passando attraverso esso; il colore dei corpi cambia quando si guarda attraverso filtri colorati; passando attraverso un filtro parte della luce viene assorbita, infatti se si fa passare la luce attraverso un numero sempre maggiore di filtri dello stesso colore si osserva che il colore della luce al di là dei filtri non cambia, ma la sua intensità ne risulta attenuata, un filtro *filtra* la luce nel senso che ne fa passare solo una parte, in particolare fa passare solo la componente del colore del filtro. Infatti se si fa passare la luce bianca attraverso un filtro rosso la luce diventa rossa, se poi si fa passare questo fascio di luce rossa attraverso un filtro blu la luce non esce al di là del filtro blu: la coppia filtro blu + filtro rosso si comporta come un filtro opaco).

spunti

I colori degli oggetti sono concepiti come una proprietà assoluta dei relativi materiali, senza alcun riferimento all'interazione con la luce. Così generalmente i corpi sono colorati anche al buio e il loro colore è quello che hanno quando sono illuminati dalla luce del Sole o della lampada. Ciò probabilmente deriva dal fatto che la luce è concepita come una condizione del vedere e non ciò che eccita il nostro apparato visivo venendo riflessa dai corpi.

Le difficoltà di previsioni e di interpretazione risultano particolarmente ostiche quando si tratti di confrontare i risultati ottenuti sovrapponendo fogli trasparenti colorati, o mescolando vernici, con quelli prodotti dalla proiezione su uno stesso schermo bianco di luci colorate. Proprio perché in genere manca la capacità di ragionare in termini di riflessione e di assorbimento della luce, diventa difficile capire che nel primo caso si sommano gli effetti di assorbimento di ogni successivo colore sovrapposto a strati o mescolato agli altri, mentre nel secondo si sommano tutte le luci, poiché lo sfondo bianco le riflette tutte.

Si pensa che i filtri colorati aggiungano colore alla luce bianca.

Il meccanismo della visione

elaborazione della scheda

I ragazzi rispondono al punto 8.1 della scheda studente

Discussione collettiva

Si ascoltano le risposte dei ragazzi. Dalle risposte potrebbero emergere interessanti interpretazioni della visione alcune delle quali spesso coincidenti con i primi modelli di visione elaborati nel corso della storia. Per esempio il modello la visione in cui si riconosce all'occhio la capacità di mandare raggi luce che colpiscono gli oggetti rendendoli visibili. Segue la dissezione dell'occhio di bue.

Esperimento in grande gruppo

materiale: occhio di bovino, bisturi a lame intercambiabili, forbici da dissezione, guanti in lattice, lente di ingrandimento

Osservazione dell'occhio nelle sue caratteristiche esterne. Prima di procedere alla dissezione, l'insegnante mostra la forma e la struttura della parte esterna dell'occhio. È importante far notare ai ragazzi la forma sferica del bulbo oculare e il grasso che circonda il bulbo (che serve per ammortizzare gli urti nella cavità orbitaria). Si chiede ai ragazzi di commentare la similarità e le differenze tra il nostro occhio e quello bovino (principalmente il colore dell'iride, variabile tra gli umani e fisso nei bovini). Successivamente si passa ad illustrare la forma e la consistenza della sclera e come essa diventa trasparente (cornea) in prossimità della parte anteriore dell'occhio.

In questa fase dell'attività è consigliabile non stimolare una eventuale sensazione di disgusto, anzi può invitare qualche ragazzo a far toccare ai visitatori sia la sclera che la cornea. Inizia poi la dissezione dell'occhio. Si stacca gentilmente la cornea dalla sclera con il bisturi, è importante fare attenzione a non incidere troppo altrimenti si rischia di far uscire gli umori delle cavità interne. Appena staccata la cornea si mostra ai ragazzi la sua trasparenza e la sua curvatura. Dopo aver posato la cornea su un vetrino, si lascia uscire l'umore acqueo, che riempie e inturgidisce la prima cavità. È interessante far notare come l'occhio si sia "sgonfiato" dopo l'uscita del liquido. L'umore acqueo ha consistenza prossima all'acqua, da cui il nome. Infine un taglio più profondo, sovrapposto al primo, permetterà l'uscita dell'umor vitreo con il cristallino in esso contenuto. Una volta isolato il cristallino dall'umor vitreo (di cui si evidenzierà la consistenza gelatinosa), lo si poggerà su un vetrino per farlo asciugare. Nel frattempo si può far toccare ai ragazzi l'umor vitreo. Una volta asciugato il cristallino si può far osservare ai ragazzi come guardando attraverso esso gli oggetti appaiono capovolti, inoltre muovendo il cristallino in prossimità di una sorgente luminosa si potrà evidenziare la sua capacità di focalizzare. Eseguendo le stesse operazioni con la lente d'ingrandimento si potrà mostrare che il cristallino non è altri che una lente d'ingrandimento. A questo punto si pratica con le forbici un taglio lungo la sclera, aprendo l'occhio per 3/4 della sua lunghezza; infilando le dita all'interno si rivolta la sclera, portando la retina all'esterno e la stessa sclera all'interno. Sulla retina si evidenzia la funzione e la posizione del *tapetum lucidum*, che permette agli animali la visione notturna. Una volta trovato il punto cieco (dove scarseggiano sia i cono sia i bastoncelli), si ribalta l'occhio per trovare dalla parte opposta del punto cieco l'attacco del nervo ottico. Si può far toccare il *tapetum lucidum*.

elaborazione della scheda

I ragazzi fanno uno schizzo dell'occhio e delle sue parti

elaborazione della scheda

I ragazzi rispondono al punto 8.3 della scheda studente.

discussione in grande gruppo

Si ascoltano le risposte dei ragazzi cercando di far emergere come spesso i nostri sensi ci possono ingannare. Per esempio misurando la lunghezza delle due frecce al punto a) si può vedere come, nonostante le apparenze, i due segmenti siano in realtà uguali. Il confronto fra ciò che è e ciò che sembra dà la possibilità di introdurre il ruolo del cervello nel processo di visione. Il cervello riceve minuscoli impulsi elettrochimici di varie frequenze. Per assumere un significato, questi segnali devono essere letti in base a regole e a conoscenze acquisite. In una parola, ciò che *vediamo* può essere assai differente da ciò che *conosciamo*. Ciò che sorprende è il grande contributo dato dal cervello alla visione nel fornire un enorme "valore aggiunto" alle immagini che si formano nei nostri occhi. Il cervello consente di vedere più di quanto venga mostrato agli occhi. La percezione di un oggetto è molto più ricca di ogni possibile immagine formata negli occhi e il valore aggiunto non può che derivare da processi dinamici cerebrali, i quali utilizzano una conoscenza memorizzata, proveniente dal passato, per vedere il presente e predire il futuro. La capacità di previsione ha un immenso valore per la sopravvivenza: non solo rende possibile, malgrado i ritardi fisiologici dei segnali dagli occhi al cervello e dal cervello alle mani, lo svolgimento di quei veloci cambi d'azione, ma consente di anticipare i pericoli o le possibili situazioni favorevoli e rende possibile la sopravvivenza permettendo di guadagnare tempo grazie alla possibilità di vedere oggetti lontani. Se il cervello non si sforzasse continuamente di organizzare i dati della visione, nel tentativo di identificare degli oggetti, i disegnatori dei cartoons incontrerebbero gravi difficoltà. Il loro compito è soltanto quello di presentarci l'insieme di poche linee ben scelte, e noi vedremo un volto completo nei suoi lineamenti ed espressivo. Numerose note *figure ambigue* chiariscono come la medesima traccia che giunge agli occhi come stimolo visivo possa dare origine a percezioni fra loro differenti. Per esempio il cubo di Necker (punto e della scheda), nel quale la percezione prospettica di profondità è soggetta a commutazione; venne scoperto dal cristallografo svizzero L.A. Necker nel 1832, mentre disegnava dei cristalli romboidali osservati al microscopio:

all'improvviso il disegno (o cristallo) ebbe una commutazione prospettica, presentandosi sotto un aspetto completamente differente.

A proposito dell'educazione alla visione può essere interessante citare gli esperimenti svolti, a partire dal 1951, da Kohler (1) con occhiali che rovesciano l'immagine. Gli sperimentatori che indossano gli occhiali senza interruzioni, dopo alcuni giorni vedono di nuovo "normalmente" tanto che possono andare tranquillamente in bicicletta. Situazioni analoghe di adattamento si osservano a seguito di interventi correttivi

(1) I. Kohler. The formation and transformation of perceptual world. International University Press, 1964