Ombre: storie di luce

Gorazd Planinšič
Laurence Viennot

Luglio 2010

Progetto MUSE (More Understanding with Simple Experiments) [1]
(Physics Education Division della European Physical Society,
http://education.epsdivisions.org/muse)

Versione italiana a cura di P. Di Lorenzo, E. Sassi e L.A. Smaldone per il progetto SCIENZA MAGISTRA VITAE, Caserta, marzo 2011.

[1] Tutti i componenti del Progetto MUSE sono responsabili del contenuto di questo lavoro, la proprietà intellettuale è degli autori

Contenuti

Ombre 3
1. Ombra prodotta dalla luce di una sorgente estesa 3
Perché questo esperimento? 3
Difficoltà degli studenti con ombre prodotte dal Sole 4
Esperimenti con sorgente estesa di luce 6
Valore aggiunto: osservare e interpretare una zona di transizione di ombre 8
Brevi considerazioni teoriche 10
2. Ombre prodotte dalla luce di sorgente puntiforme 12
3. Ombre prodotte da un fascio di luce che subisce rifrazione su una superficie sferica 15
Obiettivo dell'esperimento 15
4. Ombre colorate 17
Obiettivo di questo esperimento 17
Apparato 17
Un modo per analizzare la situazione 18
Suggerimenti per le attività 19
Idee comuni e caratteristiche specifiche di questo esperimento 20
Variante: un miscelatore di colori fatto con LED 21
5. Appendice 22
Leybold Apparato per sintesi additiva del colore 22
Proiettore Dati Liesgang (di tipo LCD) 24
6. Bibliografia 26

Ombre

1. Ombra prodotta dalla luce di una sorgente estesa

Perché questo esperimento?

La domanda apparentemente semplice
"Qual è la dimensione dell'ombra di un oggetto formato dal Sole? Che cosa influenza la nitidezza dell'ombra e come?"
rappresenta un problema significativo per la maggior parte studenti di scuola secondaria ed università. Se si sfogliano i libri di testo di introduzione alla fisica si noterà che la parola "ombra" raramente appare nell'indice. Nei casi in cui c'è, si troverà un breve capitolo o un paragrafo che spiega l'eclissi solare con illustrazioni tipiche come quella mostrata in figura 1 ed indica la differenza nelle ombre prodotte da una piccola e grande sorgente di luce (vedi ad esempio, Hewitt 1998, Tauger 2006, Haber-al Schain et al. 1991).

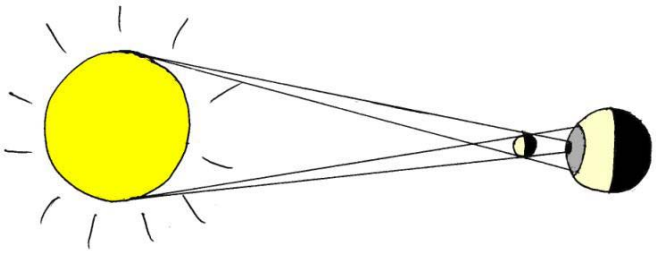


Figura 1: Schema tipico per la formazione di ombra durante un'eclissi del Sole.

Il problema relativo alla figura 1 è che le transizioni dalla regione luminosa a quella meno luminosa (*penombra*) e alla regione scura non sono nitide, ma graduali. Questo potrebbe sembrare un errore minore di della spiegazione, ma è più di questo. E' collegato al modo in cui la formazione delle ombre è spiegata e compresa nelle situazioni quotidiane. L'ombra è spesso vista come un oggetto mobile, "arrivato" sullo schermo invece di una zona di "minore luce" proveniente dalla sorgente sullo schermo dovuta al fatto che parte di questa luce viene bloccata dall'oggetto. La transizione continua tra regione chiara e scura, in caso di eclisse, è diretta conseguenza di ciò.

I problemi con la comprensione delle ombre diventano evidenti nelle spiegazioni di che cosa vediamo e di come interpretiamo le immagini ottenute con una *camera oscura*. La costruzione dell'immagine mediante il disegno di fasci di luce da punti sull'oggetto a punti sullo schermo può apparire abbastanza ragionevole alla maggior parte degli studenti. Ma quando si chiede loro di prevedere in che modo la forma e le dimensioni dell'apertura influenzano l'immagine sullo schermo non sanno rispondere. Infatti, non è facile rendersi conto che ogni punto dell'immagine prodotta dalla *camera oscura* è di fatto un'ombra della parete con l'apertura (diaframma) (vedi figura 2).

Il fatto che l'immagine ottenuta dalla camera oscura è a colori rappresenta un ulteriore ostacolo nell'accettare l'idea delle ombre. Il problema di interpretare le ombre prodotte da sorgenti di luce di diversi colori è interessante di per sé e sarà discusso alla fine di questo articolo.

Prima di proseguire, fermiamoci un po' per riflettere sulla terminologia in materia di ombre e di immagini. Nel dizionario italiano "Sabatini Coletti" si trova la seguente descrizione del termine "ombra" [2]:
"Area di oscurità o di diminuita luminosità prodotta dall'interposizione di un corpo opaco tra esso e la sorgente luminosa. Forma o figura proiettata su una superficie da un corpo opaco illuminato"

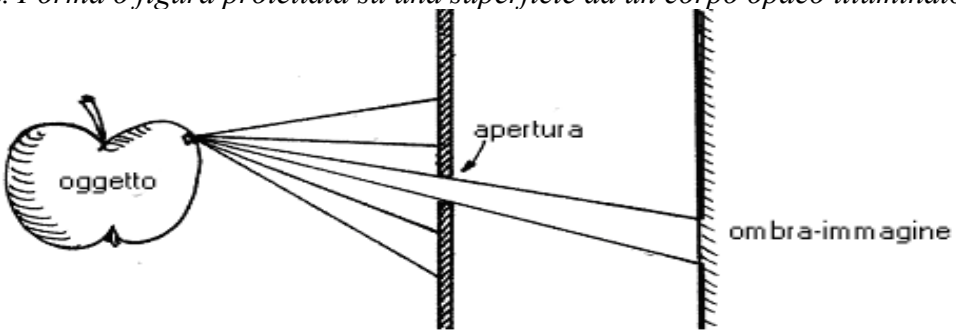


Figura 2: "Immagine" ottenuta da una camera oscura: fasci di luce provenienti da punti sull'oggetto producono ombre della parete con l'apertura.

La descrizione (*area ... di diminuita luminosità*) è sorprendentemente vicina a quella riportata da noi poco sopra.
Questo esempio mostra che alcuni fraintendimenti sono abbastanza resistenti e periodicamente riappaiono in letteratura (vedi figura 1).

Questo è il momento giusto per due avvertimenti sulla terminologia:

- Anche se il termine "raggio" è regolarmente utilizzato in varie situazioni, si deve essere consapevoli che esso è usato correttamente solo nel senso di modello (matematico) per un percorso della luce e non dovrebbe essere interpretato come un oggetto fisico.

- Un immagine ottica è la corrispondenza biunivoca (punto - punto) tra un oggetto e la sua immagine prodotta da un qualche sistema ottico. L'immagine ottica è formata e non "ricevuta" come risultato di qualche immagine che viaggia. Ciò che noi chiamiamo qui "ombra - immagine" è un'ombra che riproduce approssimativamente la forma dell'oggetto che sta bloccando la luce[3].

Difficoltà degli studenti con ombre prodotte dal Sole

La domanda seguente è stata posta agli studenti del primo anno di fisica (Facoltà di Matematica e Fisica, Università di Lubiana).

In una giornata di sole, quando il Sole è allo zenit, tu hai in mano una palla su un'asticella, al di sopra del suolo, come mostrato dal disegno. Disegna i fasci di luce (raggi) e mostra come l'ombra della palla si forma sul suolo. Spiega il tuo ragionamento anche a parole. (Il disegno di una mano che mantiene la palla sull'asticella che era parte della domanda è evidente nella Figura 3).

Diverse tipi di risposte degli studenti sono presentate in figura 3.

Tenendo conto delle risposte ottenute dai questionari e alcune interviste successive, sono state individuate due difficoltà comuni nel ragionamento degli studenti.

[2] L'etimologia del lemma "ombra" risale al XIII secolo.

[3] (nel senso che ne è la proiezione bidimensionale su un piano non necessariamente ortogonale alla direzione del fascio di luce)

- Molti studenti non capiscono come si forma l'ombra prodotta dalla sorgente estesa di luce quando la sorgente luminosa è vicino all'oggetto e allo schermo. Ma anche chi capisce questo, sembra avere difficoltà a spiegare ombre prodotte da sorgenti di luce molto lontane dall'oggetto e dallo schermo, come il Sole. La principale difficoltà deriva dalla generalizzazione della corretta affermazione "i raggi provenienti da una sorgente puntiforme di luce molto lontana sono paralleli" nell'errata conclusione che i "raggi provenienti dal Sole sono paralleli" (vedi figura 3 e figura 4).

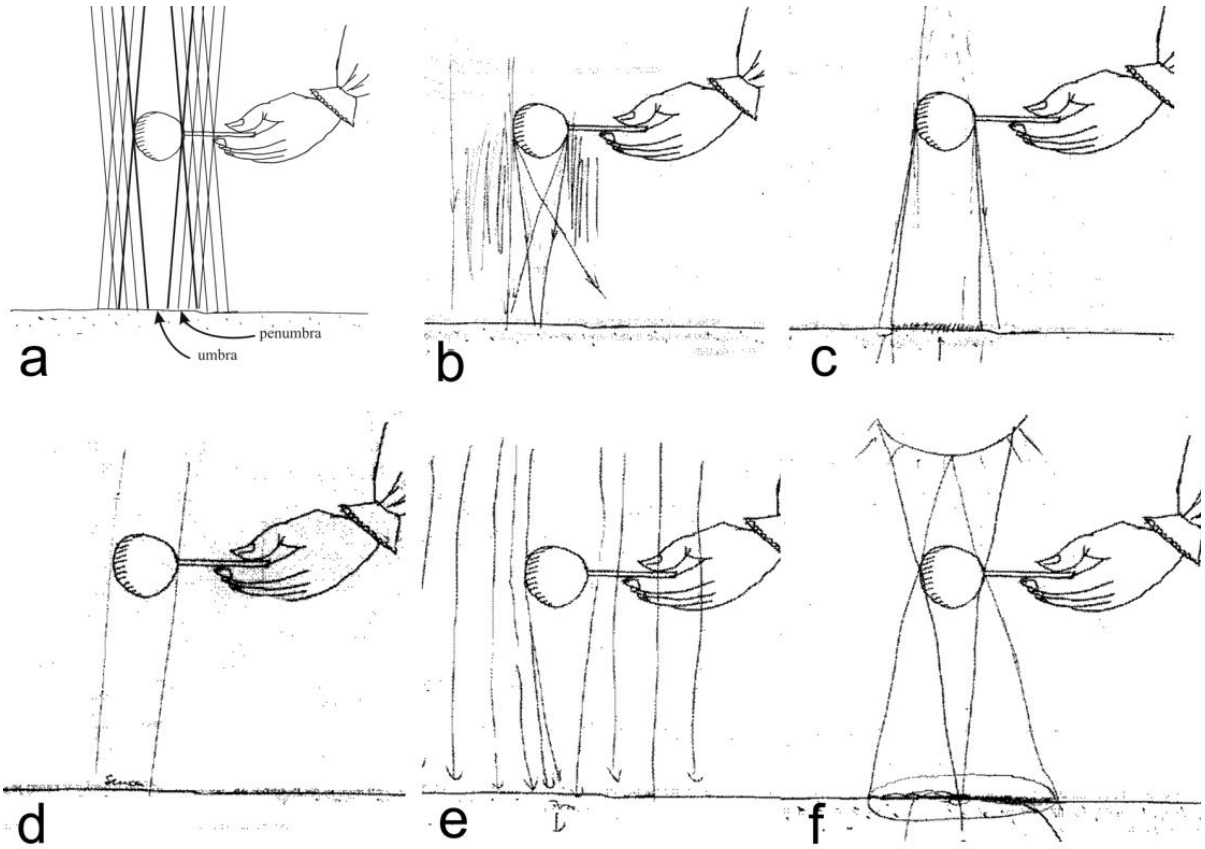


Figura3: Risposte di studenti alla domanda sulla formazione dell'ombra: a) compatibile con la risposta corretta; da b) a f) diversi tipi di risposte degli studenti.

- Inoltre, alcuni studenti attribuiscono la transizione osservata tra parti scure e luminose sullo schermo alla diffrazione (figura 3b, c), senza essere in grado di riconoscere che la diffrazione è trascurabile in questo caso. Lo stesso ragionamento è stato notato anche tra studenti che frequentano con ottimo profitto la scuola secondaria superiore.

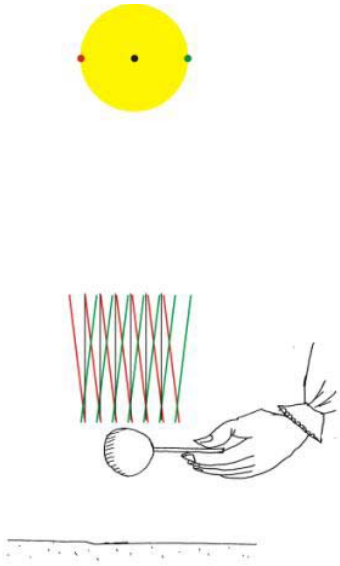


Figura 4: I fasci (raggi) che emergono da una particolare piccola zona del Sole arrivano paralleli sulla Terra. Per chiarezza, sono mostrati solo alcuni raggi che emergono da tre piccole zone. I colori sono utilizzati solo per distinguerli

Due caratteristiche importanti delle ombre-immagini sono le loro dimensioni e la dimensione della regione di transizione in cui l'illuminazione dello schermo diminuisce dal valore massimo a quello minimo (d'ora in poi detta semplicemente regione di transizione). La terza caratteristica, che diventa importante quando diverse sorgenti di luce sono usate, è il colore. Nelle prime tre Sezioni ci concentreremo sulle prime due caratteristiche e nella Sezione 4 aggiungeremo loro la dimensione del colore.

La dimensione dell'ombra-immagine e della regione di transizione dipendono dai seguenti parametri: distanza oggetto - schermo, distanza sorgente di luce - schermo, dimensioni della sorgente di luce e dimensioni dell'oggetto. La dipendenza da così tante variabili può facilmente diventare fonte di confusione per gli studenti, così è preferibile concentrarsi sulla domanda cruciale, che è più strettamente collegata alle difficoltà degli studenti di cui sopra: "*In che modo la dimensione dell'ombra-immagine e la sua regione di transizione dipendono dalle dimensioni della sorgente di luce*?"

La seguente sequenza di esperimenti può aiutare gli studenti a costruire un quadro coerente di come le ombre si formano e, successivamente, a trovare la risposta alla domanda di cui sopra. Alcuni esperimenti offrono la possibilità di confrontare valori misurati con valori calcolati ottenuti mediante un modello teorico relativamente semplice.

Esperimenti con sorgente estesa di luce

Materiali

Sorgente di luce: una sorgente luminosa adatta per questo esperimento è una "torcia frontale ultra-luminosa a 19 LED" (vedi figura 5 a sinistra) i cui LED possono essere attivati a gruppi (nel nostro caso siamo in grado di accendere 1, 7 o tutti i 19 LED). Il prezzo di queste torce, è di circa 5 euro o meno. Un'alternativa a costo quasi zero è utilizzare tre (o più) candele (si veda il testo qui sotto).

Oggetto: Qualsiasi oggetto opaco è adatto. Se le candele sono utilizzate come fonte di luce, l'oggetto deve essere allungato in direzione verticale, come un'asta verticale (vedi testo sotto). Abbiamo usato un'asta di metallo, sostegno usuale in laboratorio.

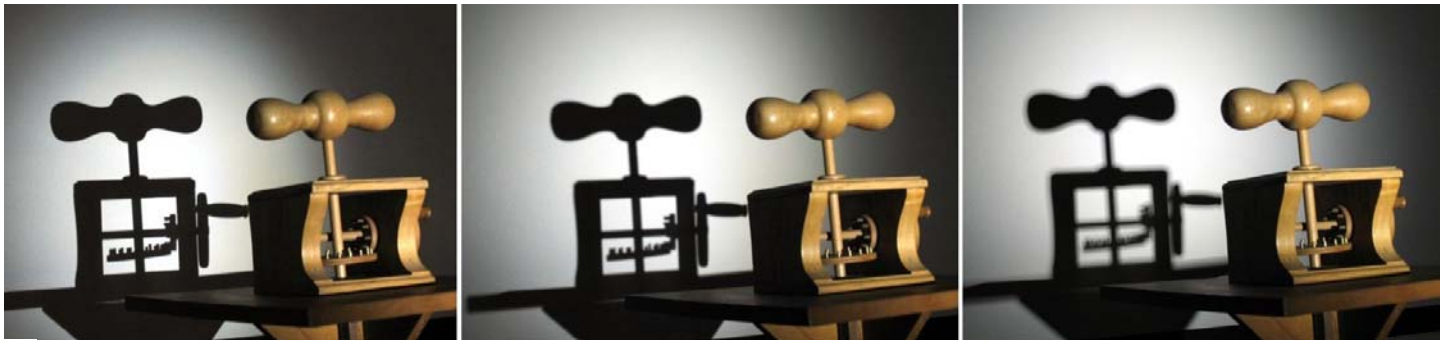
Schermo: Normalmente usiamo una lavagna bianca o uno schermo da proiezione, ma una parete bianca, un foglio di carta bianca o un pezzo di stoffa bianco vanno altrettanto bene.

Figura 5: Due tipi di sorgenti luminose: a) torcia frontale a multi LED, b) candele.

Dimostrazione sperimentale

Un singolo LED è una buona approssimazione di una sorgente luminosa puntiforme (il diametro tipico dei LED è di 5 mm), ma va osservato che i LED normalmente emettono luce in un cono con angolo di circa 20°.

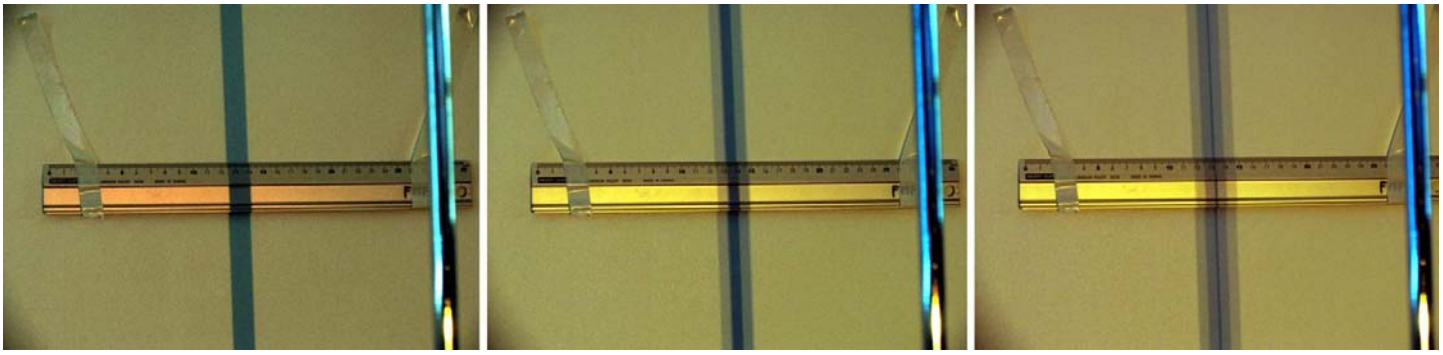
Una torcia frontale può essere considerata come unica sorgente luminosa costruita da un insieme di fonti di luce puntiformi (i LED). Posizionare un oggetto fra la torcia e lo schermo. Ogni LED produce una nitida ombra-immagine dell'oggetto sullo schermo. Da un certo punto sullo schermo alcuni LED appaiono visibili e alcuni non, a seconda della posizione del punto sullo schermo. I punti sullo schermo da cui sono visibili più LED appaiono più luminosi. Il passaggio graduale da una sorgente puntiforme di luce ad una sorgente estesa di luce può essere dimostrata con l'accensione di più e più LED (vedi figura 6).
Come accennato in precedenza, la stessa idea può essere dimostrata anche usando candele. Gli svantaggi di questo esperimento a costo zero sono due: il relativamente basso contrasto / luminosità delle ombre (è un problema se si vuole mostrare l'esperimento a tutta la classe); la forma allungata della fiamma (in una certa misura questo può essere corretto tagliare lo stoppino).



a) **b)** **c)**

Figura 6: Ombra prodotta da a) un LED - fonte di luce con 5 mm di diametro; b) sette LED - fonte di luce con 13 mm di diametro; c) diciannove LED - fonte di luce con 25 mm di diametro. Le foto sono state post elaborate con regolazione automatica dei parametri. In realtà, l'ombra prodotta da un singolo LED è abbastanza luminosa per essere vista da tutta la classe.

Solo nella direzione orizzontale fa fiamma è una buona approssimazione di una sorgente puntiforme di luce. Al fine di ottenere i risultati desiderati bisogna, quindi, utilizzare oggetti limitati in direzione orizzontale ma che si estendono in senso verticale, come le aste verticali. Risultati tipici ottenuti con un'asta verticale illuminata da una, due e tre candele sono mostrati in figura 7. Il righello è stato aggiunto per definire la scala sull'immagine, per permettere un'analisi quantitativa.



a) **b)** **c)**

Figura 7: Le ombre di un asta (visibile sul lato destro di ogni foto) formate da: a) una, b) due e c) tre candele. Le foto sono state post elaborate con regolazione automatica dei parametri. In realtà, le ombre sono difficili da essere viste da tutta la classe a meno che gli studenti non siano invitati a venire vicino allo schermo.

Valore aggiunto: osservare e interpretare una zona di transizione di ombre

Come sottolineato in precedenza, è importante rendersi conto che ombra significa "maggiore o minore luce ricevuta". La formazione di *penombra* (regione di transizione in ombre formate da sorgente estesa di luce) può essere meglio compresa osservando ciò che può essere visto da dietro uno schermo o sullo schermo. Un dispositivo sperimentale semplice che permette tale osservazione è il seguente (Hirn & Viennot 2000, 361). Alcuni fori sono presenti in aree più o meno illuminate dello schermo, come mostrato in figura 8.

Un primo passo è quello di chiedere previsioni su cosa della sorgente luminosa si vedrà da ogni foro (tutta, una parte di essa, quale ?). Infatti, se l'illuminazione di una zona dello schermo è massima, per esempio, ciò è coerentemente con il fatto che, attraverso un foro in quella zona, si vede gran parte della sorgente. Questo ragionamento è importante perché *collega* propagazione rettilinea, illuminazione della pupilla dell'occhio e la condizione geometrica per la visione, favorendo una chiara distinzione tra questi punti.
Inoltre, gli studenti possono essere invitati a provare ad immaginare cosa della sorgente di luce possa essere visto in diversi punti sullo schermo da una formica che cammini lungo esso. Questo esperimento mentale, in combinazione con l'esperimento su descritto, può aiutare gli studenti a costruire una corretta rappresentazione della situazione e dare risposte alle domande sopra poste.

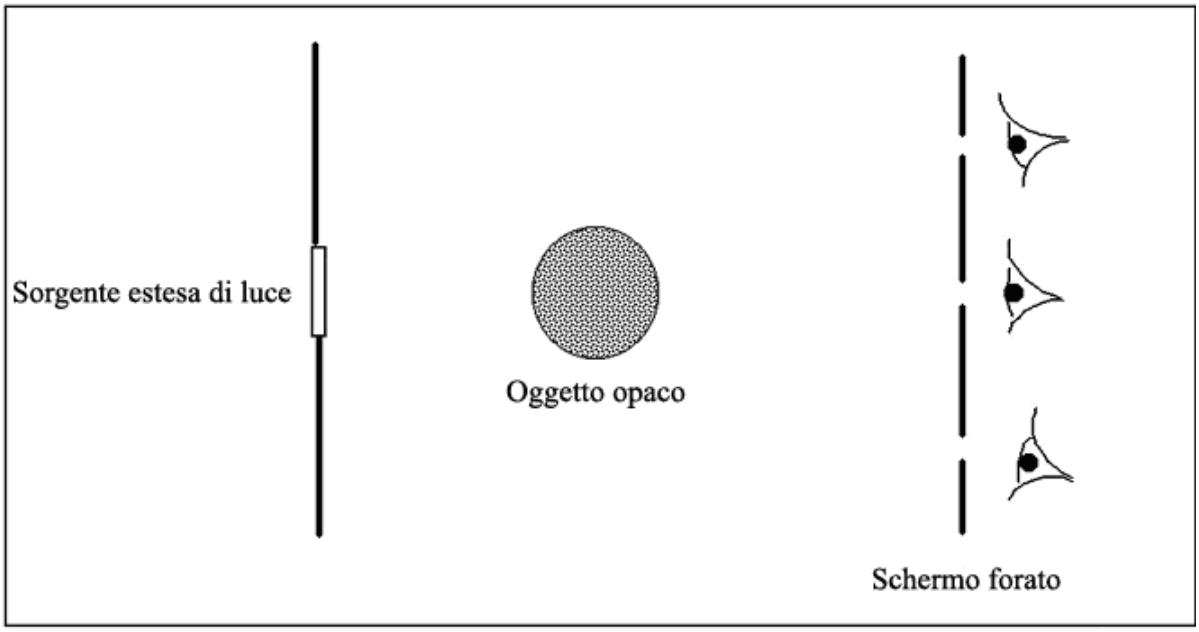


Figura 8: Un apparato sperimentale per la domanda: cosa si vede attraverso ogni foro? (Hirn & Viennot 2000, 361). Questo dispositivo deve essere posto in una stanza buia.

Il panorama, visto da una formica che cammina, può essere materializzato mediante le riprese di un cellulare dotato di fotocamera, facendolo scorrere lungo tutta l'ombra sullo schermo mentre registra un filmato (vedi Figura 9).

a) **b)** **c)**

Figura 9: Analisi di un'ombra mediante la fotocamera del cellulare: a) sorgente luminosa, oggetto e schermo, b) spostamento del cellulare in tutta la zona dell'ombra, c) immagine "vista" dalla fotocamera del cellulare quando passa attraverso la *penombra*.

L'uso della fotocamera del cellulare semplifica l'esperimento e dà un ulteriore elemento di attrattiva per lo studio, poiché include un dispositivo familiare strettamente legato alla vita quotidiana degli studenti. Questo esperimento dovrebbe seguire l'osservazione diretta descritta nell'esperimento dello schermo perforato di cui sopra.

<u>Progetto dello studente o esperimento di laboratorio</u>

La dipendenza della intensità della luce nella regione di transizione, quando l'ombra è prodotta da una sorgente estesa di luce, può essere approssimativamente misurata da foto ottenute con una fotocamera digitale. I profili di intensità possono essere ottenuti facilmente dalle foto utilizzando un software per l'analisi delle immagini, come ad esempio *Image J* (di libero utilizzo)[4]. Misure più accurate possono essere fatte con sensori didattici di luce, ma questi tipi di misura richiedono più tempo e/o apparecchiature più sofisticate. Risultati tipici ottenuti con un'asta di metallo e torcia frontale a LED sono mostrati nella figura 10. In questo caso particolare i parametri geometrici sono stati i seguenti:

- Distanza tra la sorgente di luce e l 'asta $a = 720\ mm$
- Distanza tra l'asta e lo schermo $b = 970\ mm$
- Diametro della sorgente di luce D: *5, 13 e 25 mm*
- Diametro dell'asta: $d = 12\ mm$.

Le foto in figura 10 mostrano tre casi distinti. In linea di massima possiamo dire: se il diametro della sorgente di luce è molto piccola (a), l'ombra ha bordi netti e una regione scura centrale "piatta"; se la sorgente è di grandi dimensioni (c), allora l'ombra non è completamente scura neanche nel centro e la transizione da chiaro a scuro non è nitida. In una situazione intermedia (b) solo la stretta parte centrale dell'ombra è completamente buia. Una definizione più precisa dei tre casi è data nel prossimo capitolo.

[4] http://rsbweb.nih.gov/ij/download.html

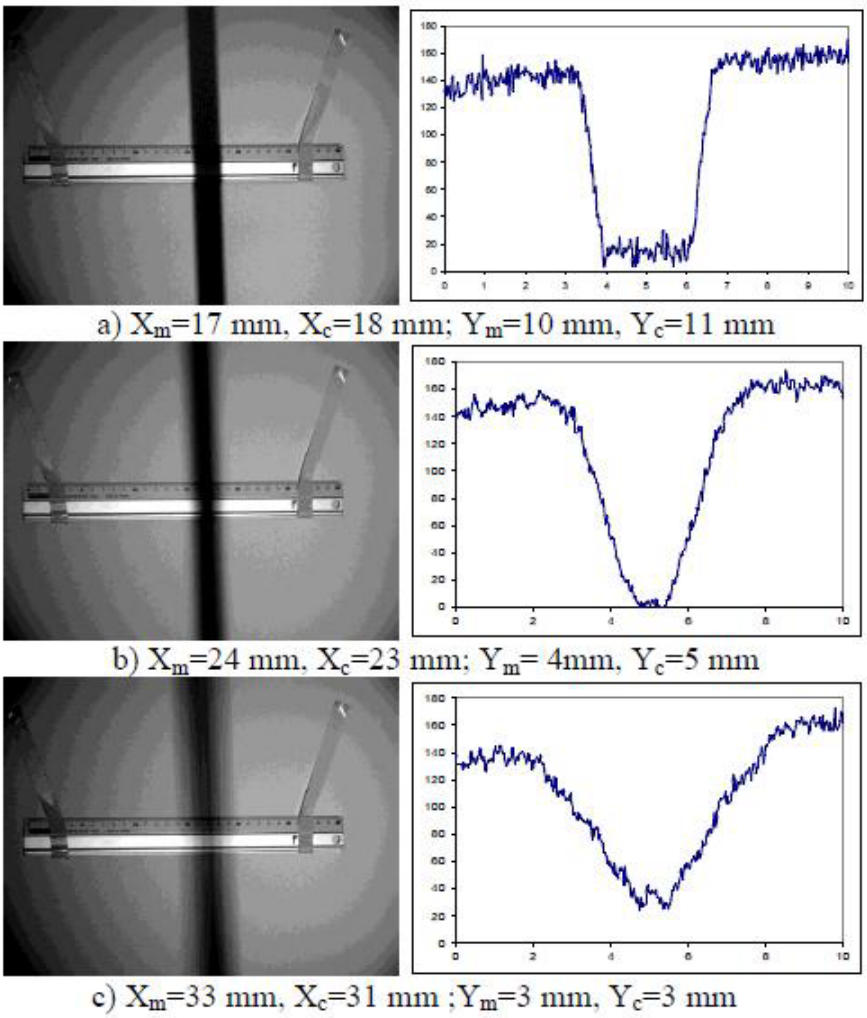


Figura 10: Ombra dell'asta (diametro 12 mm) prodotta dalla torcia frontale a LED quando il diametro della sorgente di luce era: a) 5 mm, b) 13 mm e c) 25 mm. I grafici a destra mostrano i profili di intensità luminosa nella regione di transizione (asse orizzontale è in cm). Nei 3 casi l'asta, la fonte di luce e lo schermo erano nella stessa posizione. Le foto sono state post elaborate con regolazione automatica dei parametri. Vedere il capitolo successivo per la spiegazione dei valori di X e Y (il pedice *m* indica i valori misurati dalle foto mentre *c* i valori calcolati).

Brevi considerazioni teoriche

Con un buon disegno e usando geometria semplice si possono derivare le espressioni per la larghezza della regioni d'ombra nei tre diversi casi di cui al capitolo precedente. I tre casi possono essere distinti a seconda del rapporto tra gli angoli di visuale con cui l'oggetto e la fonte di luce sono visti dalla posizione dello schermo (figure 10 e 11):

A) $d/b > D(a+b)$: la sorgente di luce sottende un angolo di vista più piccolo di quello dell'oggetto

$$X = \frac{d}{2}\left(1+\frac{b}{a}\right)+b\frac{D}{2a}; \quad \mathrm{Y} = \frac{d}{2}\left(1+\frac{b}{a}\right)-b\frac{D}{2a} \qquad (1)$$

B) $d/b = D(a+b)$: gli angoli di vista sottesi dalla sorgente di luce e dall'oggetto sono uguali

$$X = d\frac{D}{D-d}; \quad \mathrm{Y} = 0 \qquad (2)$$

C) *d/b < D(a+b)*:la sorgente di luce sottende un angolo di vista maggiore di quello sotteso dall'oggetto

$$X = \frac{d}{2}\left(1+\frac{b}{a}\right)+b\frac{D}{2a}; \quad \mathrm{Y} = b\frac{D}{2a}-\frac{d}{2}\left(1+\frac{b}{a}\right) \qquad (3)$$

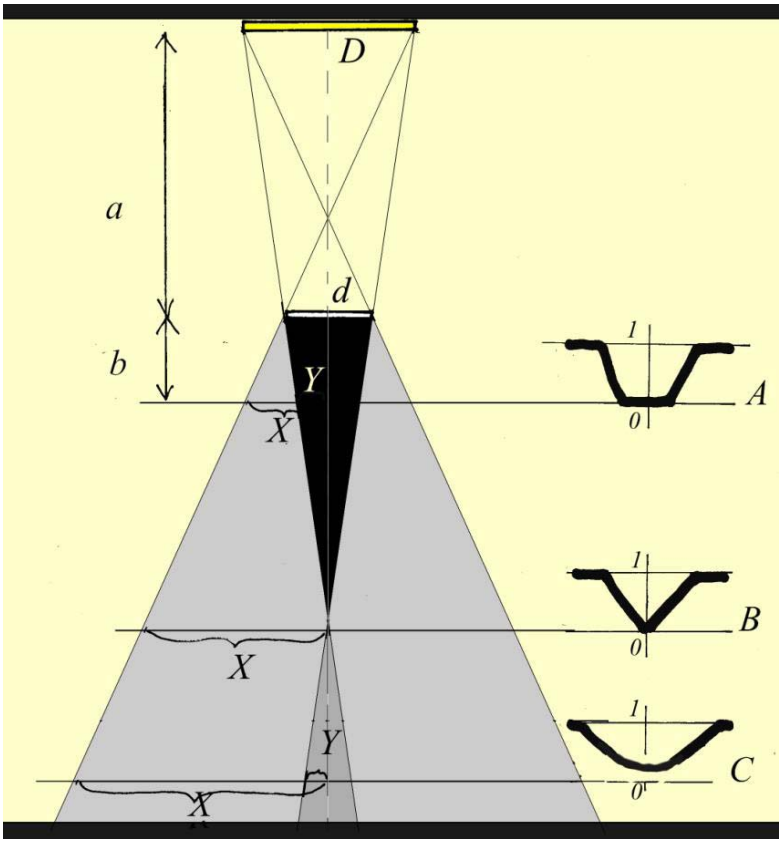


Figura 11: Rappresentazione schematica delle regioni d'ombra formate da una striscia di larghezza *d* illuminata da una sorgente di luce omogenea di larghezza *D*. I grafici inseriti a destra rappresentano la dipendenza qualitativa dei profili di intensità luminosa a varie distanze dietro l'oggetto (vedi anche figura 9). Si noti che, in realtà, l'intensità delle ombre nelle regioni grigie varia con continuità.

Vediamo i due casi limite.

Sorgente estesa di luce e molto distante (immagini-ombra prodotte dal Sole)

Se il Sole è usato come fonte di luce, le espressioni di cui sopra forniranno i valori limite corretti se si tiene in conto del fatto che il Sole è molto lontano ($a \to \infty$, anche $D >> d$), e che il suo angolo di visione è pari a $\varphi = D/a \approx 3{,}9 \times 10^{-3}$ *rad*. In queste circostanze le espressioni hanno le seguenti forme semplici:

A) $X = \frac{d}{2} + b\frac{\varphi}{2}; \ \mathrm{Y} = \frac{d}{2} - b\frac{\varphi}{2}$ (4) (per esempio, l'ombra solare di un pallone da pallacanestro)

B) $X = d; \ \mathrm{Y} = 0 \quad (b\varphi = d)$ (5)

C) $X = \frac{d}{2} + b\frac{\varphi}{2} \ \mathrm{Y} = b\frac{\varphi}{2} - \frac{d}{2}$ (6) (per esempio, l'ombra di un ago tenuto a circa 0,5 m dallo schermo)

Nel caso in cui l'angolo di vista dell'oggetto è più piccolo di quello del Sole in tutte le direzioni, l'ombra è come l' "immagine" capovolta del Sole ottenuta con una *camera oscura*.

Nel caso A) la larghezza della regione di transizione (la larghezza della sfocatura dove l'ombra passa da scura a luminosa) è pari a

$X - Y = b\ \varphi$ (0,01b. (7)

Sorgente di luce puntiforme

Una sorgente di luce puntiforme è una sorgente con dimensioni pari a zero. In pratica, questa è la fonte di luce che, osservando dallo schermo, sottende un angolo di visione trascurabile rispetto all'angolo di visione dell'oggetto. Così, l'espressione teorica per la dimensione dell'ombra-immagine prodotta da una sorgente luminosa puntiforme può essere ottenuta dall'espressione (1) ponendo D = 0. In questo caso

$X=Y= d/2(1+b/a)$ (8)

il che significa che l'ombra-immagine è sempre perfettamente nitida (poiché X = Y la dimensione della regione di transizione è 0) e la sua dimensione è sempre più grande della dimensione dell'oggetto.

2. Ombre prodotte dalla luce di sorgente puntiforme

Le ombre prodotte da sorgenti puntiformi possono essere viste come un caso speciale di ombre prodotte da sorgenti estese. Dal momento che le fonti puntiformi non producono regioni di transizione nelle ombre, in questo caso i problemi degli studenti menzionati nel capitolo precedente rimangono nascosti. Domande comuni che si pongono quando si cerca di stimolare il ragionamento degli studenti sono in questo caso legate a come cambiano dimensione e forma dell'ombra-immagine se la sorgente luminosa, l'oggetto o lo schermo sono spostati lungo la linea che collega la sorgente di luce e lo schermo (McDermott & Shaffer 1998).

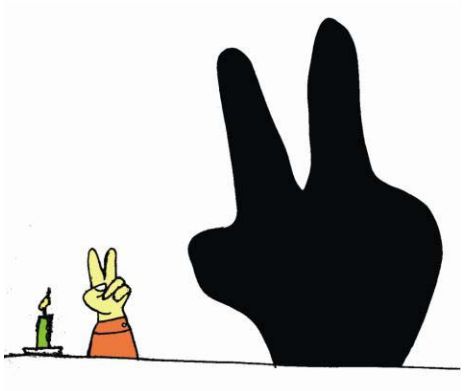
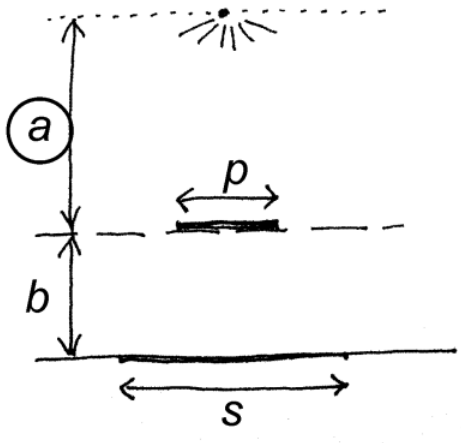


Figura 12: Ingrandimento da sorgente di luce puntiforme.

Le ombre prodotte da sorgenti puntiformi sono delimitate dai contorni ingranditi dell'oggetto. Tale ingrandimento di oggetti diversi (in particolare le mani) può essere un grande divertimento per i bambini (vedi figura 12). Quanto più l'oggetto è vicino alla sorgente di luce, più grande è l'ombra sullo schermo. Diverse culture hanno sviluppato teatri d'ombra che utilizzano lanterne come sorgenti puntiformi di luce. Ad esempio *Wayang* è un nome indonesiano per il teatro d'ombre di burattini e letteralmente significa "ombra".

Le ombre prodotte da sorgenti luminose puntiformi offrono diverse possibilità di semplici esperimenti analizzabili con semplici modelli teorici. Le due attività descritte nel seguito si riferiscono alla configurazione semplice mostrata in figura 13. Un oggetto piatto, come un quadrato di carta nera, è posto tra la sorgente puntiforme di luce e lo schermo.



Attività A

1. Fai una previsione qualitativa su come la dimensione (lineare) dell'ombra *s* dipende dalla distanza tra l'oggetto e la sorgente

luminosa *a*, supponendo che la distanza *b* tra l'oggetto e lo schermo e la dimensione *p* dell'oggetto siano costanti.

2. Misura *s* per alcuni valori di *a* e registra le tue misure.

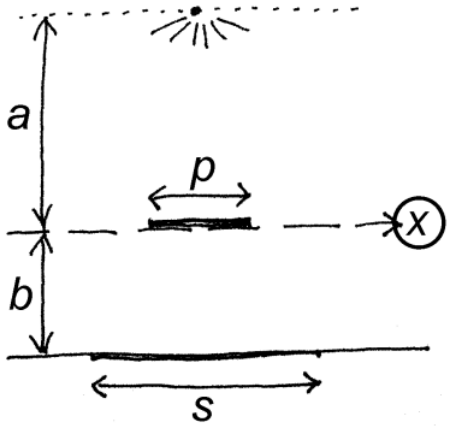
3. Deriva l'espressione teorica per *s*(*a*) e confronta i valori misurati e calcolati. Risolvi eventuali incoerenze tra la previsione iniziale e il risultato finale.

E' stato confermato, in osservazioni informali, che la maggioranza degli studenti delle scuole superiori e degli insegnanti in servizio previdero correttamente che una riduzione di *a* si traduce in un aumento della dimensione (lineare) dell'ombra. Essi hanno anche ricavato l'espressione teorica corretta ($s = p(a+b)/a$) utilizzando la similitudine tra triangoli.

Quando sono state chieste le previsioni per le successive attività, la maggior parte degli studenti e degli insegnanti hanno previsto in modo errato che la dimensione dell'ombra sarà maggiore se l'oggetto viene spostato verso sinistra o verso destra a partire dalla posizione centrale.

Attività B

1. Fai una previsione qualitativa su come *s*, dimensione (lineare) dell'ombra, dipende dalla posizione dell'oggetto nella direzione orizzontale *x* assumendo *a, b,* e *p* costanti.
2. Misura *s* per diversi valori di *x* e registra le misure.
3. Deriva l'espressione teorica per *s*(*x*) e confronta i valori misurati e calcolati. Risolvi eventuali incoerenze tra la previsione iniziale e il risultato finale.



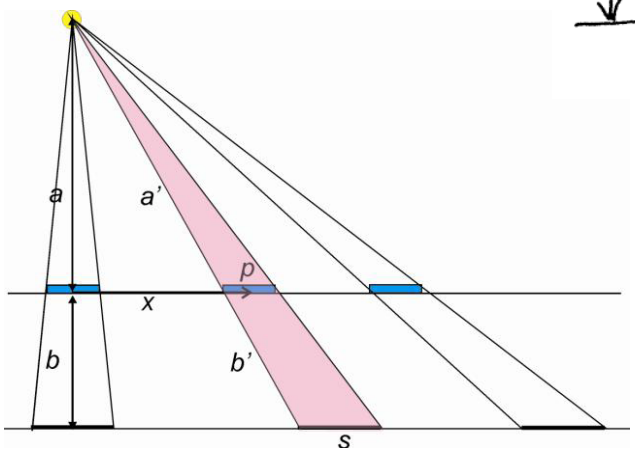


Figura 13: Schema geometrico dell'esperimento proposto nell'attività B.

Con grande sorpresa degli studenti, questo esperimento dimostra che la dimensione dell'ombra non dipende da *x*. Una probabile spiegazione per la previsione sbagliata è l'esperienza sulle ombre prodotte dal Sole che diventano via via più lunghe quanto più il Sole è basso rispetto all'orizzonte.

L'indipendenza della dimensione dell'ombra rispetto ad *x* può essere qualitativamente spiegata nel modo seguente. Quando l'oggetto è spostato dalla posizione centrale, l'angolo di vista dell'oggetto (visto dalla posizione della sorgente di luce) diminuisce, ma la dimensione della proiezione dell'oggetto sullo schermo aumenta per un dato angolo (si veda il disegno in figura 13). I due effetti si annullano e quindi la dimensione dell'ombra non dipende da *x*. La derivazione della formula, sfruttando le proprietà dei triangoli simili, mostra

che la dimensione dell'ombra-immagine s non dipende da x ed è data dalla stessa espressione del caso precedente:

$p/a = s/(a' + b')$ e $a/a' = (a' + b')/(a + b)$ da cui: $s = p(a + b)/a$ (9)

Scatola per ombre

Una scatola per ombre è mostrata nella figura 14. È composta (dall'alto verso il basso) da una sorgente di luce puntiforme fatta da un LED verde[5] fissata al centro del ripiano di cartone, da un ripiano di plexiglass per sistemare gli oggetti (nel nostro caso quadrati di carta nera) e uno schermo bianco sul fondo.

Figura 14: Apparato sperimentale per osservare le ombre realizzato con una scatola di cartone (a sinistra) e l'ombra di un quadrato di carta nera come si vede nella luce emessa dalla sorgente puntiforme di luce realizzata con un LED verde (a destra).

Costruire una sorgente luminosa puntiforme mediante un LED

La maggior parte dei LED disponibili in commercio hanno una lente epossidica a goccia sopra la giunzione PN - l'elemento emettitore della luce. A differenza di una sorgente luminosa puntiforme, i LED emettono luce in un cono limitato. Inoltre imperfezioni nella progettazione della lente causano una disuniforme distribuzione angolare di intensità luminosa. Con una semplice modifica, il LED può essere convertito in una fonte di luce con buona approssimazione puntiforme. Iniziamo con i LED che sono racchiusi in plastica trasparente. Con un seghetto segare attentamente la parte del corpo del LED che costituisce la lente (figura 15).

Assicurarsi di non tagliare troppo vicino alla giunzione PN (1 mm di distanza va bene) Rimuovere i graffi dalla superficie segata mediante spazzolatura e lucidatura. Usare carta vetrata fine a partire da grana media (come la 600) e terminando con grana fine (come la 1200). Dopo, lucidare la superficie con pasta lucidante abrasiva (anche un dentifricio bianco funziona bene) fino a quando la superficie appare chiaramente trasparente.

[5] Per esempio, il LED verde (L-53VGC-E, Kingbright) emette luce con lunghezza d'onda dominante di 525 nm e semilarghezza di riga spettrale di 36 nm.

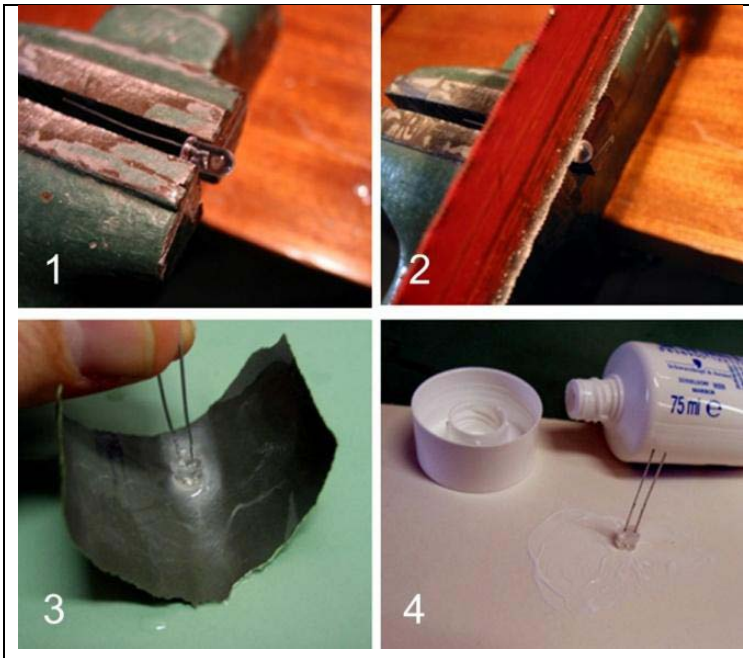


Figura 15: Trasformazione di un LED in una sorgente luminosa puntiforme: (1-2) segare la parte del LED che funge da lente (3), lisciare la superficie segata con la carta abrasiva fine e (4) infine, lucidare con un dentifricio bianco.

3. Ombre prodotte da un fascio di luce che subisce rifrazione su una superficie sferica

Obiettivo dell'esperimento

Una situazione interessante che coniuga rifrazione e formazione di ombra si verifica se un fascio parallelo di luce incide su una sfera trasparente contenente oggetti opachi al suo interno (vedi figura 16)[6]. Il fascio di luce subisce due rifrazioni ed emerge dalla sfera come un fascio divergente di luce, simile alla luce emessa da una sorgente puntiforme. Ogni oggetto che blocca il fascio di luce produrrà un'ombra sullo schermo. Se l'oggetto si trova all'interno della sfera l'ombra-immagine sarà invertita e la sua dimensione dipenderà dalla posizione dell'oggetto lungo l'asse ottico. Si noti che se non vi è rifrazione coinvolta nel processo, non c'è "messa a fuoco" dell'immagine sullo schermo, proprio come nel caso della *camera oscura*. Più lontano è lo schermo, più grande sarà l'ombra-immagine.

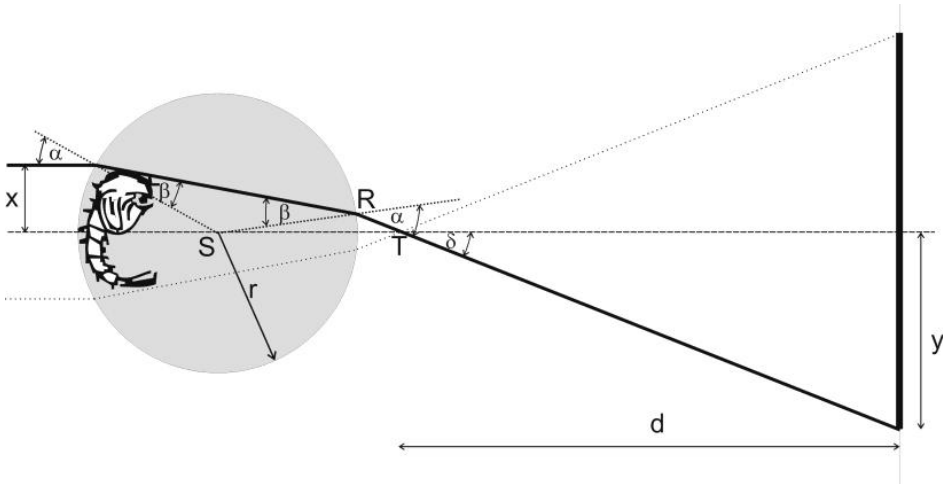


Figura 16: Rifrazione di un fascio parallelo di luce incidente su una sfera trasparente di raggio *r*. L'oggetto, di dimensione *2x* forma un'ombra di dimensione 2y sullo schermo (che si trova a distanza dal punto T in cui fasci paralleli deviati si incrociano). Nel caso in cui il raggio della sfera è molto più piccolo della distanza dallo schermo, *d* è praticamente uguale alla distanza tra la sfera e lo schermo.

[6] Una interessante situazione che combina riflessione e formazione di ombra è descritta in (Cepic 2006).

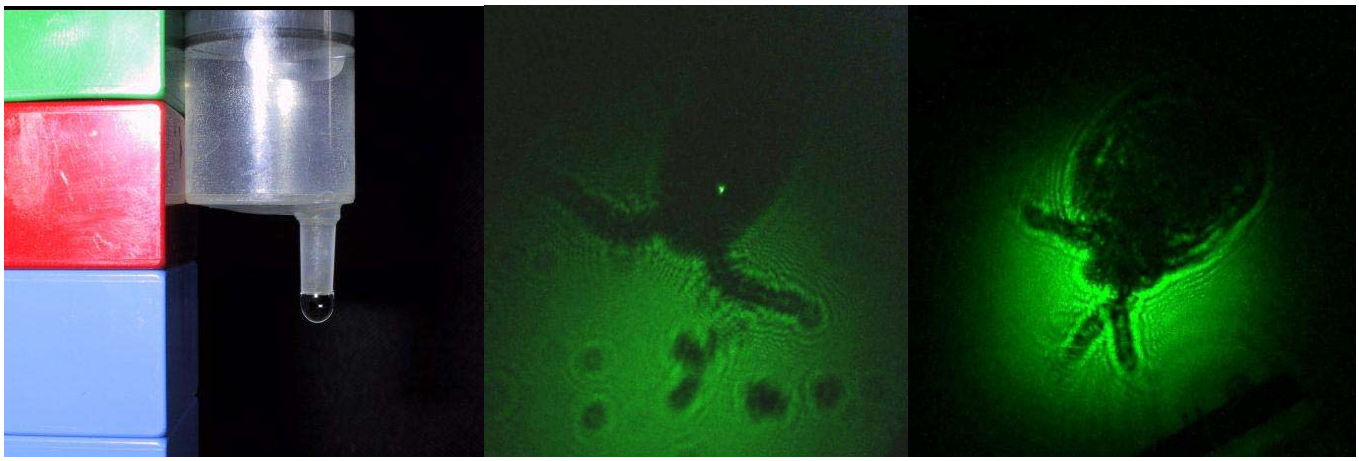
Apparato Sperimentale

L'effetto può essere dimostrato mediante un semplice apparato (vedi figura 17). Riempire con acqua una fiale sferica di vetro trasparente e porre in essa alcuni pezzetti quadrati di foglio di alluminio (dimensioni approssimative 1 cm x 1 cm). Se un sottile fascio di luce è puntato sulla fiale, ombre-immagini ingrandite dei pezzi di alluminio si osservano su uno schermo (vedi figura 17b). Si noti che l'ombra-immagine è invertita rispetto all'oggetto (si può dire ciò notando che le ombre dei pezzi quadrati sullo schermo si muovono verso l'alto quando nella fiale cadono verso il basso.)

a) **b)**

Figura 17: a) fiale sferica piena d'acqua con pezzetti quadrati di foglio di alluminio; b) ombra-immagine di un quadrato di Al. La fiale è stato illuminata con il fascio di luce di un proiettore per diapositive. Si noti che l'ombra del quadrato sullo schermo ha dimensione di circa 50 cm.

La goccia d'acqua che rimane sospesa sul beccuccio di una siringa rappresenta un buon oggetto sferico trasparente. Se si usa acqua di uno stagno, in essa sono presenti microrganismi diversi, come le Ciclopi o pulci d'acqua. Affascinanti ombre-immagini ingrandite di questi microrganismi possono ottenersi sullo schermo se un fascio laser è puntato sulla goccia d'acqua (figura 18). Si può facilmente ottenere un fattore di ingrandimento di circa mille (vedi i calcoli di seguito).



a) **b)** **c)**

Figura 18: a) La goccia d'acqua sospesa sotto la siringa funziona come un oggetto trasparente sferico. Se il fascio di luce prodotto da un puntatore laser verde è puntato sulla goccia, le immagini-ombra di oggetti che galleggiano dentro la goccia

possono essere viste su uno schermo distante: b) immagine-ombra di un C*iclop strenous*, c) ombra-immagine di *Daphnia Ambigua*. Si noti che la dimensione tipica di immagini-ombra di microrganismi è da 0,5 m a 1m. (Planinšič 2001).

Sequenza di attività

In primo luogo, mostrare l'esperimento con la danza dei pezzetti di alluminio nella fiale di vetro e discutere come si formano le immagini-ombra.

Durante o dopo la dimostrazione si possono porre agli studenti le seguenti domande:

- Qual è approssimativamente il rapporto tra la dimensione delle ombre-immagini e quella dell'oggetto?
- Le ombre-immagini sono invertite o diritte rispetto agli oggetti? Suggerimento: osservare il movimento delle ombre-immagini. (i pezzetti di Al cadono. Come si muovono le ombre-immagini?)
- Come cambierà la dimensione dell'ombra-immagine se l'oggetto posto all'interno della sfera si avvicina allo schermo (vedi figura 16 per trovare la risposta)?
- Come dipende l'ingrandimento dall'indice di rifrazione della sfera piena d'acqua?
- Come dipende l'ingrandimento dalle dimensioni della sfera? L'esperimento della goccia d'acqua permette di rispondere a questa domanda. (Molti studenti pensano che più grande è la lente (sferica in questo caso), più grande sarà l'immagine!).

Mostrare poi le ombre-immagini ingrandite di microrganismi mediante l'esperimento con la goccia d'acqua. Esso offre una eccellente opportunità per attività congiunte di biologia e fisica.

Dopo la discussione delle risposte, si può ricavare l'espressione dell'ingrandimento in approssimazione parassiale. Utilizzando elementi di geometria di base, si trova la seguente espressione per l'ingrandimento di un oggetto posto all'interno di una sfera, come mostrato in figura 16)

$$M = \frac{2d}{r}\left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

dove n è l'indice di rifrazione della sfera, d è la distanza tra la sfera e lo schermo e r è il raggio della sfera. Dal momento che n, per la maggior parte dei liquidi, è compreso tra 1,3 e 1,6, il fattore di ingrandimento M è approssimativamente dato dal rapporto tra la distanza dello schermo e il raggio della sfera.

4. **Ombre colorate**

Obiettivo di questo esperimento

Una situazione comunemente indicata come "ombre colorate" può aiutare gli studenti a lavorare contemporaneamente sui colori (combinazione additiva e sottrattiva) e a meglio comprendere cosa sia un'ombra. Per quanto riguarda la combinazione additiva e sottrattiva questo apparato offre un accesso semplice e diretto all'effetto di contributi simultanei di più luci colorate che illuminino una determinata zona di uno schermo bianco oppure ogni oggetto bianco[7]. Per quanto riguarda le ombre, esso porta gli studenti a ragionare esclusivamente su fasci di luce che effettivamente raggiungono una determinata zona.

Apparato

[7] Dato che il colore è una reazione percettiva del sistema visivo ad una luce entrante nell'occhio, con "luce colorata", per esempio "luce gialla", intendiamo una luce che produce l'impressione visiva chiamata, per esempio "giallo"

In ciascuna delle tre scatole mostrate nella Figura 20 una sorgente puntiforme di luce bianca - una piccola lampadina alogena (Osram, 4V, 0,85 nel nostro caso) - è collegata ad una batteria a 4,5 V, e un filtro è posto (con una cornice di diapositiva) su un foro fatto nel lato verso lo schermo. I filtri sono, per esempio, rosso (R), blu (B) e verde (G), ciascuno con una banda passante di circa un terzo di quella dello spettro di luce bianca (figura 19).

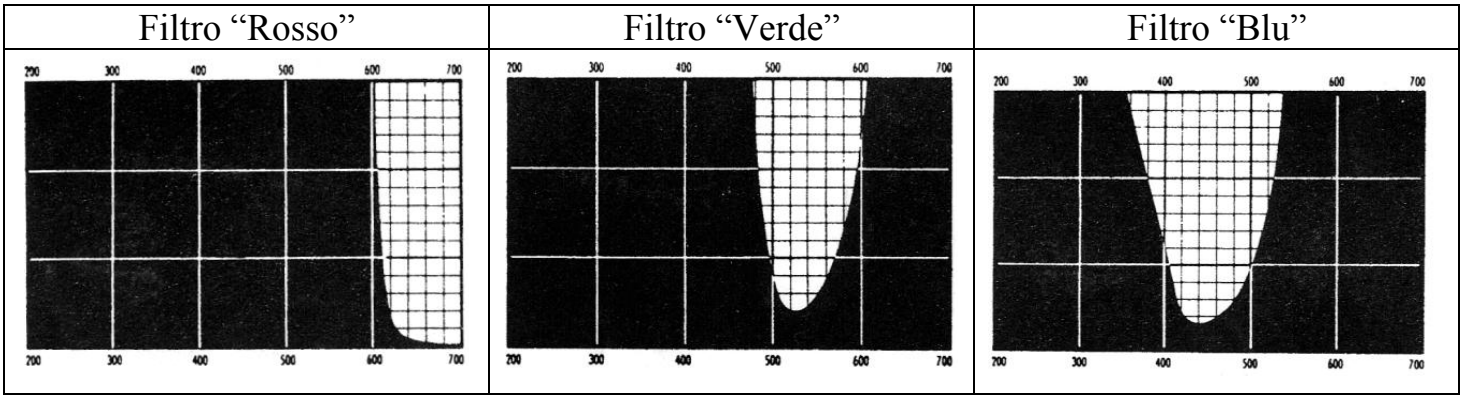


Figura 19: Trasmissività dei filtri Rosso, Verde e Blu (Jeulin-Kodak) utilizzati in questo esperimento, tra 300 nm e 700 nm. Le linee orizzontali dall'alto verso il basso: 0,1%, 1%, 10%, 100% di trasmissività.

Il tetraedro bianco, (fatto ad esempio con un foglio di cartoncino Bristol) blocca geometricamente alcune luci in alcune direzioni, in modo che zone diverse sullo schermo o sul tetraedro sono illuminate da una, due o tre fasci di luce colorata, o nessuno di essi.

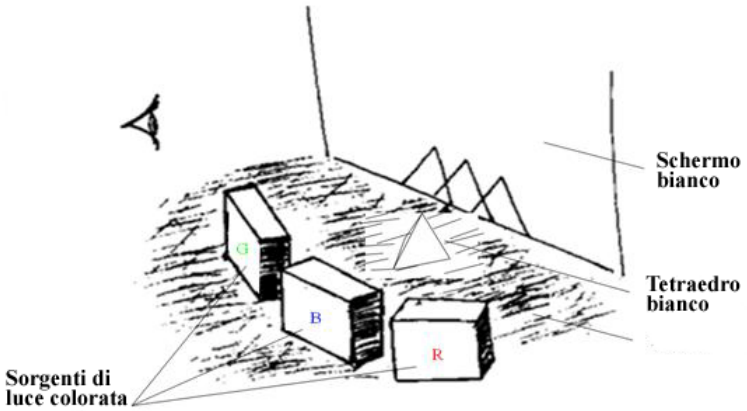


Figura 20: Schema dell'apparato sperimentale per l'esperimento delle "ombre colorate" (Chauvet 1996, Chauvet 1999, versione leggermente modificata: il tetraedro ha un bordo parallelo allo schermo). Non solo la stanza deve essere al buio, ma per evitare riflessioni, l'apparato deve essere coperto con carta nera.

Un modo per analizzare la situazione

Naturalmente, come per le ombre ordinarie, alcuni fori possono essere eseguiti in diverse zone dello schermo per controllare quali fonti di luce sono visibili da un foro particolare. Al fine di prevedere quale luce raggiungerà quale zona, l'unica regola da tenere in considerazione è la propagazione rettilinea della luce.

Lo schermo e il tetraedro diffondono tutte le luci che incidono su di essi, in particolare verso l'occhio dell'osservatore. L'impressione visiva corrispondente a diverse combinazioni di luci colorate è mostrata nel Riquadro 1. I colori osservati sono mostrati in Figura 21. Si potrebbe pensare che solo la prima parte del Riquadro 1 è utile qui, giacché siamo in un caso di somma di luci, una mescolanza additiva. Così, una zona

dello schermo o del tetraedro che appare gialla riceve luci rosse e verdi, una zona di color magenta (per dirla in breve) riceve luci rosse e blu, una zona di colore ciano riceve luci blu e verdi, mentre una zona rossa riceve solo luce rossa, ecc … È da sottolineare che una zona che riceva le tre luci colorate appare approssimativamente bianca (un po' grigia nella foto), questo è anche il caso per il lato del tetraedro verso lo schermo, a causa della diffusione della luce all'indietro. Ma il caso in cui due terzi dello spettro (per dirla in breve) raggiungono una zona - diciamo rosso e blu - può anche essere visto come l'impatto di tre "terzi" meno uno, per dire bianco meno verde. In tal caso, il "meno" è operato da un blocco geometrico. Questo simula il ruolo di un filtro magenta, cioè l'assorbimento della parte "verde" dello spettro. Quando due "terzi dello spettro" della luce bianca sono bloccati, cioè nei triangoli più piccoli che appaiono rispettivamente rosso e verde, la situazione è analoga a quella filtri sovrapposti, rispettivamente "giallo + magenta" e "ciano + giallo". La zona nera - cioè il più piccolo triangolo sullo schermo - mostra gli effetti dei tre filtri sovrapposti: magenta, ciano e giallo. Quindi, questo esperimento realizza geometricamente la combinatoria di luci colorate che danno accesso agli elementi di base della combinazione additiva e sottrattiva.

a) Vista di lato

b) Vista dall'alto

Figura 21: I colori delle diverse zone dell'apparato mostrato in Figura 19, una volta che le lampadine siano accese (foto: P. Sauvage).

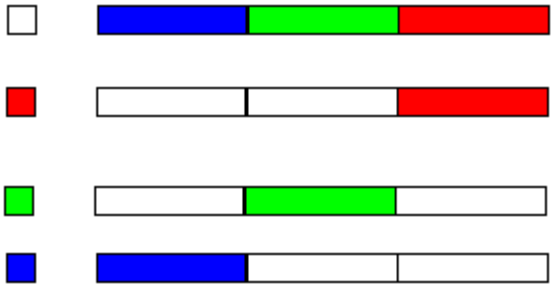
Suggerimenti per le attività

Secondo una strategia ampiamente raccomandata (Chauvet 1996, 1999, v. anche, su questo sito web, il documenti sul Valore Aggiunto per l'Educazione), si potrebbe chiedere agli studenti: "Puoi predire ciò che vedrai sullo schermo bianco se accendi le tre lampadine? Spiega le tue previsioni". Un dialogo con gli studenti dopo l'accensione delle lampadine trarrebbe beneficio da una riflessione preliminare, da parte del docente, sulle prevedibili idee degli studenti.

Combinazione additiva di colori

Il separare le varie radiazioni che costituiscono la luce "bianca" produce uno "spettro".
Lo spettro della luce bianca visibile varia da λ = circa 400 nm a λ = circa 700 nm.
(Lunghezza d'onda misurata nel vuoto; 1 nm = 10^{-9} m)

Lo spettro è qui schematicamente diviso in tre terzi.



Luci colorate con uno spettro corrispondente a un terzo dello spettro di luce bianca nelle lunghe lunghezze d'onda appare rosso,

nelle lunghezze d'onda intermedie appare verde,

nelle corte lunghezze d'onda appare blu.

La combinazione di queste tre luci, in proporzioni diverse, può produrre una vasta gamma di colori e può anche dare luce bianca.

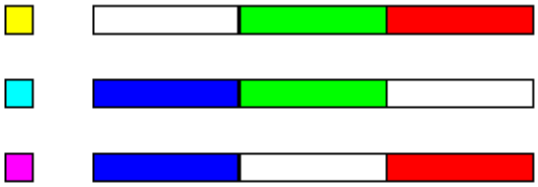
La combinazione di due di queste luci nella giusta proporzione, dà rispettivamente una luce che è:

- gialla, se si sommano luce verde e rossa
- ciano, se si sommano luce verde e blu
- magenta, se si sommano luce rossa e blu

Combinazione sottrattiva di colori

Un filtro (o un pigmento) assorbe una parte dello spettro della luce bianca:

- un filtro giallo assorbe luce blu (un terzo) e riflette diffusamente luce verde e rossa
- un filtro ciano assorbe luce rossa (un terzo) e riflette diffusamente luce verde e blu
- un filtro magenta assorbe luce verde (un terzo) e riflette diffusamente luce rossa e blu

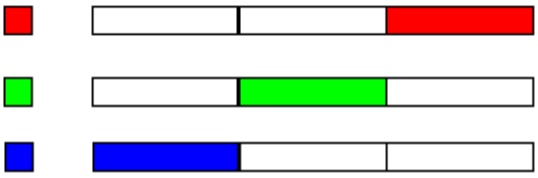


Quando illuminati da luce bianca, due filtri sovrapposti o due colori miscelati rimandano (trasmettono o riflettono in diffusione) all'occhio solo la parte dello spettro che hanno in comune:

filtri o pigmenti giallo + magenta => luce rossa

filtri o pigmenti ciano + giallo => luce verde

filtri o pigmenti magenta + ciano => luce blu



Riquadro 1. Combinazione additiva e sottrattiva: colori associati a "terzi dello spettro".

Idee comuni e caratteristiche specifiche di questo esperimento

Per quanto riguarda le ombre, alcuni autori (ad esempio Olivieri et al. 1988) hanno evidenziato che gli studenti spesso sono molto sorpresi di non vedere alcuna “ombra nera” sullo schermo. Essendo molto piccola, l'unica zona scura sullo schermo non appare come una semplice ombra del tetraedro. Così, l'idea comune di un’ombra vista come una emanazione dell’oggetto proiettata sullo schermo è in messa in discussione.
È meno comune l’analizzare critica del seguente - rituale - commento: “Tale e tale zona è nell’intersezione di (tali e tali) ombre” (Viennot 2006, 401). Questo commento sarebbe fuorviante se esso suggerisse che ognuna delle ombre che si intersecano potesse esistere di per sé: chiaramente, non si può avere, per esempio, una

“ombra” magenta solo con la fonte di luce che è in linea con il tetraedro e questa –cosiddetta- ombra, dato che questa sorgente emette luce verde.
Come osservato da Chauvet (1996, 1999), l'assorbimento della luce non è un concetto semplice, che costituisce un grave handicap per capire la combinazione sottrattiva. Uno dei meriti di questo esperimento è quello di offrire un analogo geometrico all’assorbimento, una sorta di illustrazione radicale del fenomeno. Più tardi, sarà necessario perfezionare questo modello, dato che nella vita reale l’ assorbimento è, il più delle volte, parziale.

Nota: i materiali qui descritti e l’intera sequenza sui fenomeni del colore (Chauvet 1996, vedi anche Viennot 2003) possono essere trovati all'URL fornito nella referenza Chauvet 1999.

Variante: un miscelatore di colori fatto con LED

Una variante molto interessante di questo esperimento è stata descritta in un articolo di G. Planinsic (2004). Le tre fonti puntiformi di luce punto sono costituite da LED colorati, come spiegato alla fine della sezione 2. Se tali fonti di luce sono montati in una pallina da ping-pong e ostacoli vari (pezzi di filo o fermagli per documenti) sono inseriti nella pallina, diverse forme colorati si possono osservare sulla superficie della pallina.

Questo semplice dispositivo offre opportunità per diverse domande adatte agli studenti, dopo che hanno appreso la combinazione additiva dei colori.
Innanzitutto, assicurarsi che gli studenti comprendano come è fatto il miscelatore di colori a LED. Dare loro uno schizzo che mostra chiaramente come i tre LED sono posizionati nella pallina. Attraverso la fessura nella parte superiore della pallina inserire un pezzo di filo (una graffetta raddrizzata funziona bene) fino in fondo alla pallina. Le ombre colorate dovrebbe apparire sulla parete della pallina opposta al LED (vedi figura 22, a sinistra). Chiedere agli studenti di spiegare la posizione e il colore delle singole strisce colorate. Ripetere come sopra, con un fermaglio per documenti (circa 4 mm di larghezza) e si potrà osservare una figura di colore diverso (figura 22, in mezzo). Tirare fuori dalla pallina per metà il fermaglio per documenti e notare una diversa figura colorata. Chiedere agli studenti di spiegare la formazione dei colori in tutti i tre casi.

Per una spiegazione corretta, gli studenti dovrebbero capire in che modo la luce emessa dalla sorgente puntiforme si propaga, come si produce l'ombra e come operano le regole della combinazione additiva dei colori. Essi dovrebbero anche prendere in considerazione la disposizione dei LED nella pallina. Le giustificazioni per le figure colorate osservate sono fornite schematicamente nella figura 22.

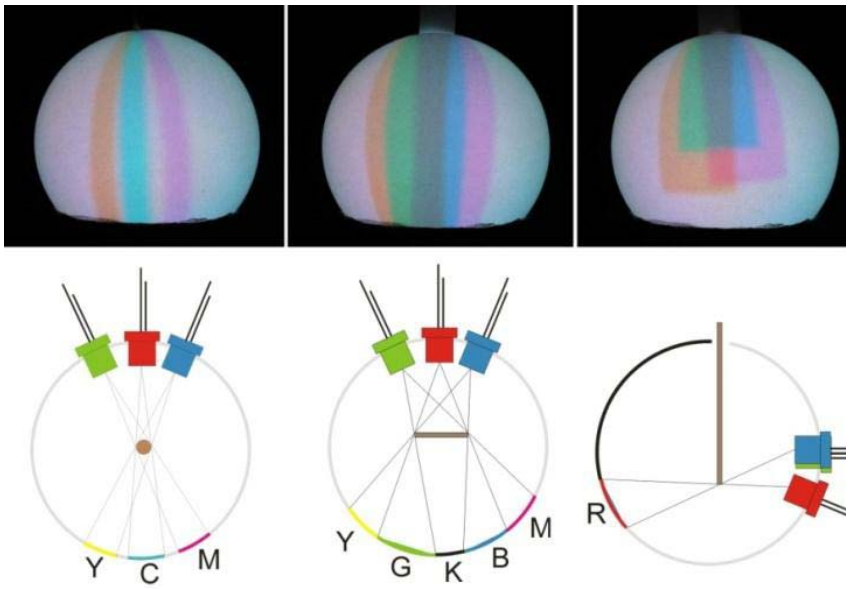


Figura 22: Le ombre colorate prodotte quando un filo (a sinistra) o un fermaglio per documenti (in mezzo) è inserito nella pallina e quando il fermaglio è inserito fino a circa a metà nella pallina (a destra). Gli schizzi sottostanti mostrano

una giustificazione iconica per le figure colorate osservate. I colori sugli schizzi sono indicati con lettere usuali (K significa nero).

Combinazioni di colori e spettri

Gli esperimenti descritti e i relativi concetti diventano ancora più chiari se gli studenti possono osservare gli spettri di emissione del miscelatore di colori a LED. Spettri di luce bianca, gialla come combinazione di rosso-verde e "propriamente" gialla, dagli esperimenti precedenti, sono mostrati in figura 23. Si noti che le lunghezze d'onda del giallo cadono proprio nell'intervallo tra le lunghezze d'onda rosse e verdi. Si noti, inoltre, che le tre regioni di lunghezza d'onda in questo spettro di luce bianca si differenziano per intensità (vedi l'Appendice per ulteriori informazioni sulla composizione degli spettri di luce bianca).

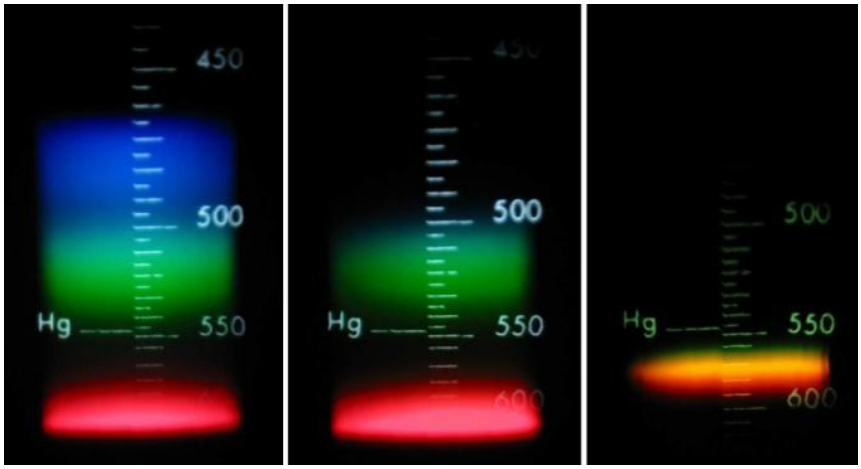


Figura 23: spettri ottenuti con spettrometro a prisma (da sinistra a destra): luce bianca prodotta dai tre LED, luce gialla prodotta dal LED verde e rosso e luce gialla prodotta dal LED giallo. Gli spettri sono stati ottenuti con uno spettrometro a prisma tascabile.

Nota: come per ogni colore percepito, l'impressione visiva di "bianco" può essere generata da vari spettri, aventi tutti la proprietà di eccitare i tre tipi di coni dell'occhio umano con intensità appropriate.

5. Appendice

È noto che descrivere ed interpretare i colori e la sensazione del colore è spesso disciplina dipendente. Così abbiamo deciso di dare un'occhiata a due pezzi di apparecchiature che sono progettate per scopi didattici (proiettore dati *Liesgang* e *Leybold* Apparato per sintesi additiva del colore) e analizzare i loro spettri - ancora una volta utilizzando attrezzature a disponibile nella scuole (interfaccia *Vernier* e lo spettrometro VIS- NIR *Red Tide* della *Ocean Optics*).

Leybold Apparato per sintesi additiva del colore

L'installazione è organizzata usando tre filtri colorati e tre specchi mobili per regolare le direzioni dei fasci colorati (vedi figura A1). La caratteristica importante di questa configurazione è che usa una lavagna luminosa come una usuale fonte di luce bianca per tutti i tre colori, il che significa che non si ha la possibilità di regolare separatamente l'intensità delle componenti del colore. Quindi le proprietà di trasmissione dei filtri per i colori sono state scelte in modo che esse tengono già conto di un corretto rapporto di intensità in modo da vedere il colore bianco quando tutte e tre le luci sono combinati su una superficie bianca.

La figura A2 mostra gli spettri dei singoli fasci colorati riflessi sullo schermo e la somma di tutte e tre (indicata con la linea nera). Regioni che corrispondono alle larghezze a metà intensità di picco per ogni banda (RGB) sono mostrate in grigio trasparente. Gli spettri della luce direttamente incidente sono praticamente identici agli spettri della luce riflessa.
Si noti che tutti e tre i filtri trasmettono anche il vicino infrarosso. È questo succede con la maggior parte dei filtri di acetato in uso nelle scuole.

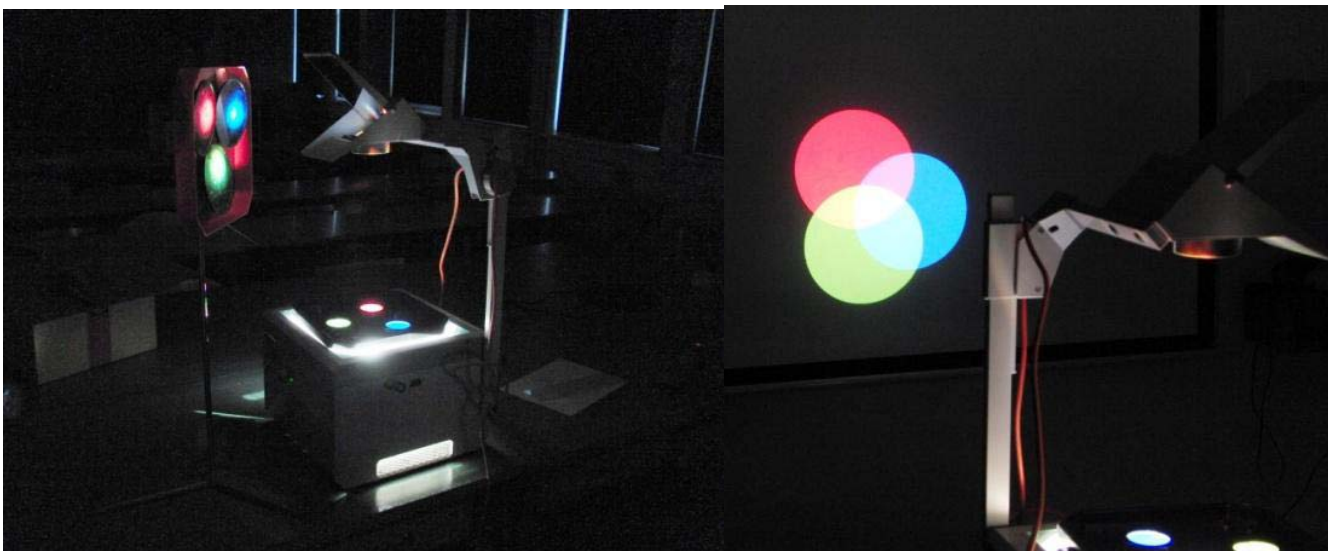


Figura A1: (a sinistra) lavagna luminosa con i filtri colorati e tre specchi montati su un cavalletto, (a destra) foto di una messa a punto della sovrapposizione dei tre fasci colorati che incidono su uno schermo bianco.

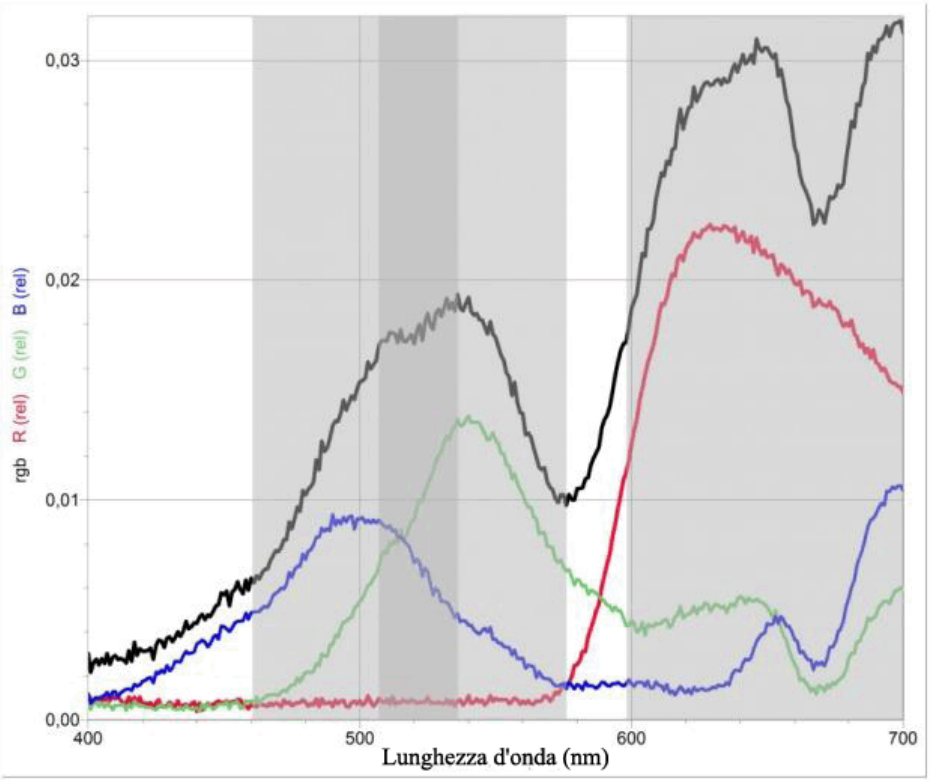


Figura A2: spettri dei singoli fasci colorati riflessi sullo schermo e la somma di tutte e tre (graficato con la linea nera) per il miscelatore di colore Leybold. La finestra in lunghezza d'onda è stata limitata alla regione del visibile (400 nm – 700 nm).

Nell'interpretare gli spettri ottenuti con materiale scolastico si deve tener presente che tali apparecchiature hanno, in genere, significativa sensibilità selettiva spettrale. La figura A3 mostra il confronto tra lo spettro della

luce solare diretta, ottenuta con il summenzionato spettrometro scolastico e lo spettro standard ottenuto con attrezzature professionali (Irradianza Spettrale Solare di Riferimento). Si noti la ridotta sensibilità spettrale delle attrezzature scolastiche (spettrometro e fibra ottica) nella regione del vicino infrarosso e l'ultravioletto.

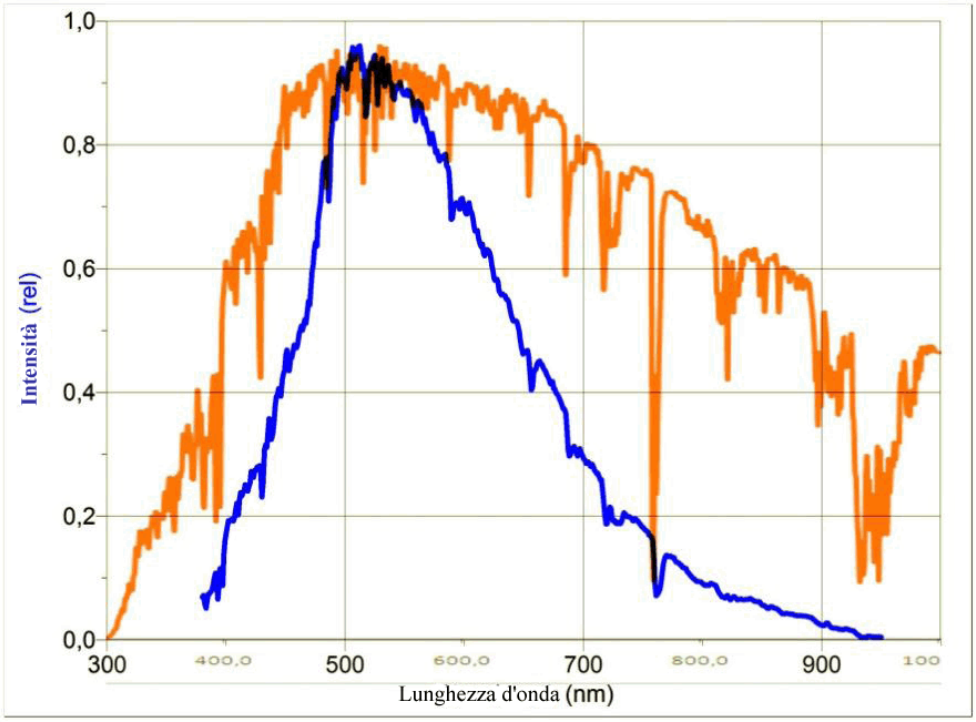


Figura A3: irradianza spettrale solare ottenuta con lo spettrometro scolastico (linea blu) e con attrezzature professionali (Irradianza Spettrale Solare di Riferimento).

Proiettore Dati Liesgang (di tipo LCD)

La differenza principale tra il proiettore ed il miscelatore di colori di cui sopra (relativamente al filtraggio della luce) è che il proiettore utilizza filtri dicroici che sono una migliore approssimazione di filtri passa-banda, rispetto ai filtri di acetato (Reid 2008). Abbiamo smontato un proiettore e misurato le proprietà del solo sistema di filtraggio.

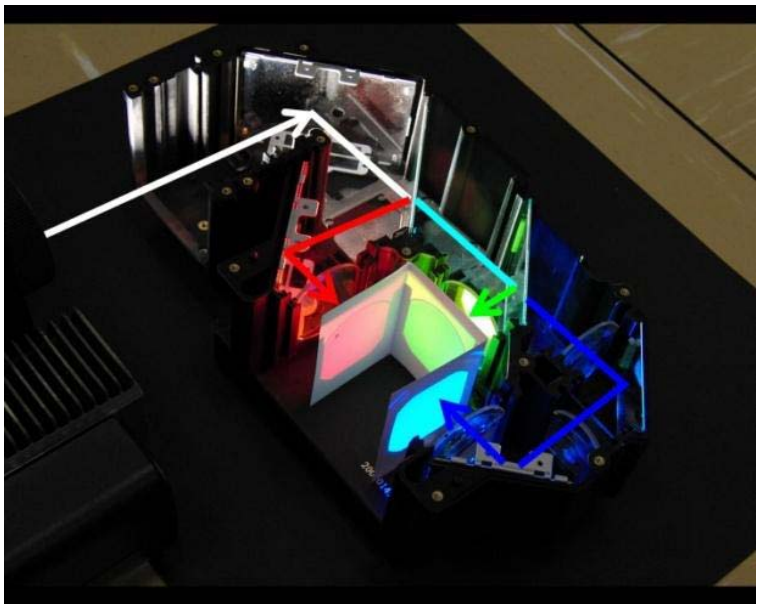
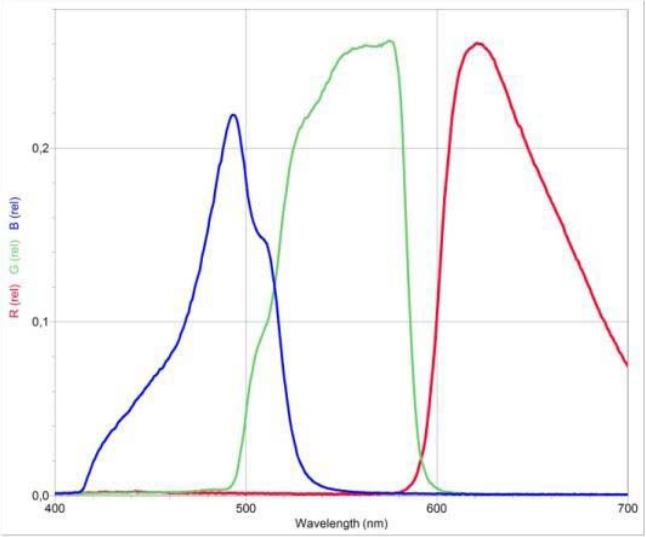
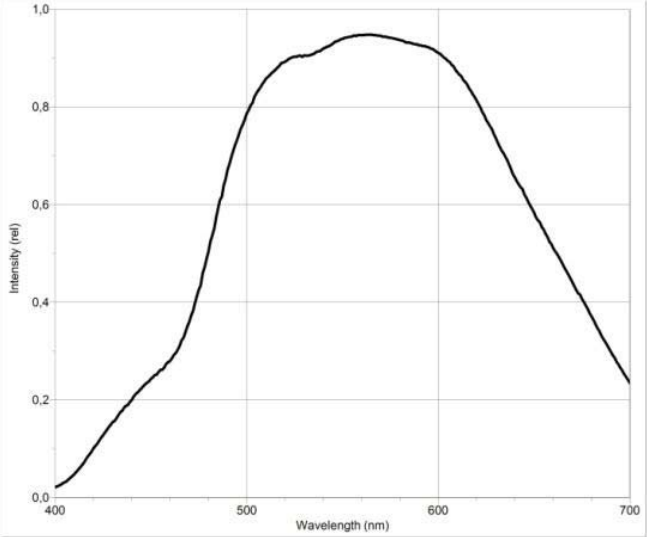


Figura A5: parte del proiettore dove ha luogo la separazione dei colori ed il successivo sistema della loro miscelazione (per chiarezza il prisma tricroide, che miscela i tre componenti del colore, è stato sostituito con un foglio bianco piegato visibile al centro della foto).

La figura A5 mostra il 'cuore' del sistema di separazione/miscelazione della luce.
In figura A6a sono mostrati gli spettri dei singoli colori e, in figura A6b, lo spettro della luce del classico proiettore per diapositive, che in questo caso abbiamo usato come sorgente di luce bianca.





a) **b)**

Figura A6: a) spettro delle tre componenti di colore dopo essere passato attraverso i filtri dicroici e b), dello spettro della luce dal proiettore classico per diapositive, utilizzato in questo caso come una fonte di luce bianca.

Sulla base delle nostre osservazioni e misurazioni si può trarre la seguente conclusione:

- Parlando di lunghezza d'onda, possiamo dire che le componenti si riferiscono a tre regioni spettrali distinte dello spettro visibile, ciascuna delle tre regioni ha una larghezza di banda di circa un terzo di quella dello spettro della luce bianca, ma vi sia una sovrapposizione, soprattutto tra verde e blu.
- Per quanto riguarda le intensità, le tre componenti possono essere molto differenti.

6. Bibliografia

- Čepič, M. 2006. Does virtual image cast a shadow?, *Phys. Educ*. **41**, 295.
- Chauvet, F. 1996. Teaching colour: designing and evaluation of a sequence, *European Journal of Teacher Education*, vol 19, n°2, pp 119-134.
- Chauvet, F.1999. STTIS Project, *Colour sequence* University " Denis Diderot ", LDAR (Laboratoire de didactique André Revuz); and STTIS (Science Teacher Training in an Information Society) web sites: (retrieved 1.7.2010) http://www.lar.univ-paris-diderot.fr/sttis_p7/color_sequence/page_mere.htm oppure http://crecim.uab.cat/websttis/index.html
- Haber-Schain, Dodge, Gardner, Shone 1991. *PSSC Physics* (7th ed), Kendall/Hunt publ.
- Hewitt P 1997, Conceptual Physics (8th ed), Addison-Wesley.
- Hirn C. & Viennot L. 2000. Transformation of didactic intentions by teachers: the case of geometrical optics in grade 8 in France, *International Journal of Science Education*, 22, 4, pp. 357-384.
- McDermott, L. C. & Shaffer, P. S. 1998. Tutorials in introductory physics (with homework book), Prentice Hall, New Jersey.
- Olivieri, G., Torosantucci, G., Vicentini, M. 1988. Coloured shadows, *International Journal of Science of Education*, vol. 10, n° 5, p. 561-569.
- Planinsic, G. 2001.Water drop projector, *The Phys. Teach*. Vol. 39.
- Planinsic, G. 2004. Color Light mixer for every student, *The Physics Teacher*, 42,138-142
- Reference Solar Spectral Irradiance http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ (retrieved 23.6.2010)
- Reid, A. 2008.The physics of the data projector, *Phys.Ed*. **43**, 599-603.
- Tauger J 2006, *Introductory Physics – building understanding*, John Wiley.
- Viennot L 2003. Teaching Physics, Kluwer Academic Publishers (chap.6).
- Viennot L 2006. Teaching rituals and students‘ intellectual satisfaction, *Phys. Educ*. **41,** 400.