

Il colore tra fisica e fisiologia: un problema di integrazione delle conoscenze.

Massimiliano Malgieri, Claudio Sutrini
Università di Pavia



AIF Pavia - XLIV corso di aggiornamento in
fisica - 4 novembre 2022



La peculiarità dell'insegnamento dell'ottica

L'insegnamento dell'ottica soffre di un problema specifico che consiste nell'introduzione successiva, nel corso dell'istruzione liceale, di diversi modelli con scarsa attenzione alle loro interconnessione e ai loro rispettivi domini di validità.

Il passaggio dall'ottica geometrica a quella ondulatoria è particolarmente problematico, e sono state studiate da diversi autori le difficoltà degli studenti nell'adozione di questi due modelli (insieme, in ibridizzazione, in alternativa). Nel quinto anno, l'introduzione della luce come onda elettromagnetica, del modello quantistico a fotoni, della teoria della relatività ristretta complicano ulteriormente il quadro, rendendo spesso le concezioni degli studenti sulla luce alla fine del liceo scientifico estremamente frammentate.

Il meccanismo della visione

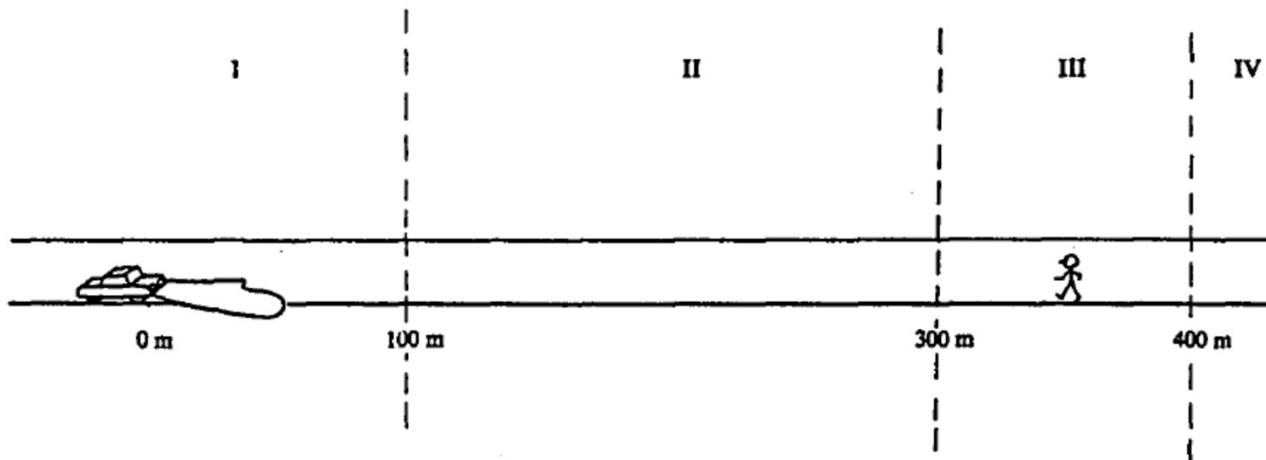
La comprensione degli studenti del meccanismo della visione ha attirato l'interesse dei ricercatori in diversi paesi, che hanno studiato questo aspetto a partire dalla scuola dell'infanzia fino al livello universitario.

La vista è forse il nostro senso più importante e proprio per questo le difficoltà che gli studenti hanno prima, durante e dopo l'insegnamento tradizionale, rispetto alla rappresentazione dei fenomeni ottici hanno origine da concetti pre-scientifici frammentati costruiti sulla base dell'esperienza, e che persistono perché i fattori chiave che portano alla frammentazione di solito non vengono affrontati e risolti.

Tutti gli studi hanno dimostrato che gli studenti hanno seri problemi nel comprendere **la natura della luce**, la **sua propagazione**, la **formazione delle immagini**. Per quanto riguarda l'esperienza primaria della visione, molti studi hanno riportato che i discenti hanno difficoltà ad interpretare fisicamente tale esperienza. Gli studenti oscillano in modo dipendente dal contesto tra due concezioni:

- Concezione **passiva** della visione: la visione è resa possibile dalla luce emessa dall'oggetto che raggiunge l'occhio. Questa prospettiva è in accordo con quella scientifica, ma tipicamente viene utilizzata solo se agli alunni vengono mostrati oggetti molto luminosi, o che emettono luce propria (es. torcia elettrica, lampadina, candela).
- Concezione **attiva** della visione: la visione è resa possibile da raggi (o semplicemente 'la visione') emessi *dall'occhio* verso l'oggetto da vedere; la luce ambientale ha la prerogativa di rendere possibile questo processo (in condizioni di scarsa illuminazione, non si può vedere). Questa idea è attivata più spesso per oggetti comuni, che non emettono luce propria.

Concezione della luce come «catalizzatore»



On a clear, dark night, a car is standing parked on a straight, flat road. The car has its headlights dipped. A pedestrian, who is standing in the road, is able to see the headlights. The illustration is divided into four sections. In which sections is there light? Explain your answer.

Nella domanda riportata (Andersson e Karrkvist, 1986) una percentuale significativa (intorno al 40%) di studenti di 14 anni rispondono che vi è luce solo nella sezione 1, e in parte nella 2. Per questi studenti, la luce si propaga solo a brevi distanze dagli oggetti luminosi, e il meccanismo della visione è collegato solo in modo indiretto alla luce (la luce illumina gli oggetti, ma la visione avviene in altro modo).

Concezioni alternative della visione



Lisa and her physics teacher are discussing seeing.

TEACHER: Explain how you see the book.

LISA: Signals go along nerves between the eyes and the brain.

TEACHER: Yes, this happens between the eyes and the brain. But there's some distance between the book and the eyes. Does anything happen between them?

What would you answer? Draw and explain.

Nella domanda precedente, inclusa nello stesso studio, **circa il 20% degli studenti non vedono connessioni tra la visione e la luce**, e circa il **15%** pensano che qualcosa dall'occhio raggiunga l'oggetto, o che ci sia uno 'scambio' tra l'occhio e l'oggetto.

Difficoltà nel comprendere il ruolo dell'occhio

L'incidenza di difficoltà di base riguardo al meccanismo della visione può non essere molto elevata nella scuola secondaria, ma vale la pena affrontare questo tema, perché le concezioni alternative, in particolare quella della luce come 'facilitatore' della visione, possono permanere fino al livello universitario e oltre.

Inoltre, nello studio dell'ottica geometrica si possono riscontrare difficoltà di origine simile che riguardano la comprensione del ruolo dell'occhio nella formazione delle immagini.

Infatti buona parte delle difficoltà che si incontrano in ottica geometrica hanno a che fare con la **difficoltà a comprendere con precisione il ruolo dell'occhio**.

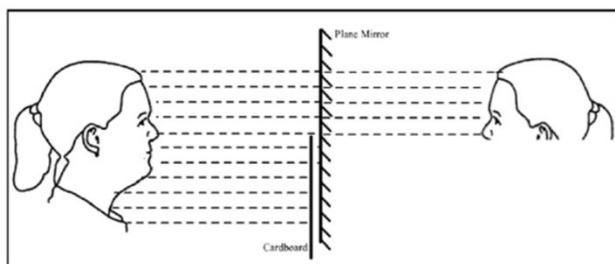
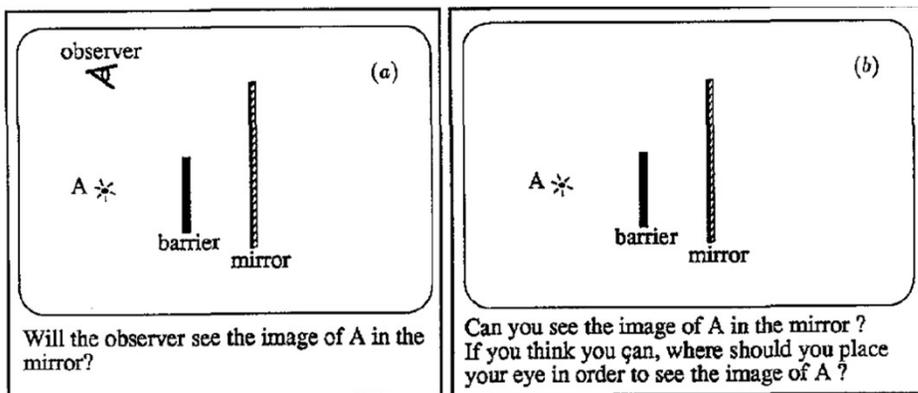
Sebbene "l'occhio" sia uno degli argomenti insegnati in qualsiasi corso di studi, studi recenti forniscono prove fra loro coerenti che gli studenti non riconoscono il ruolo dell'occhio dell'osservatore sia nella formazione che nell'osservazione di un'immagine:

" . . . anche se gli studenti sono consapevoli della posizione di un'immagine virtuale, non sono in grado di fornire una spiegazione per la sua esistenza in termini di comportamento della luce, la componente ottica (specchio o prisma) e l'occhio dell'osservatore; in particolare, gli studenti non riconoscono il ruolo cruciale dell'occhio dell'osservatore sia nella formazione che nell'osservazione dell'immagine (Galili et al., 1992). "

Difficoltà legate alle immagini virtuali

- Spesso gli studenti pensano che **la formazione di un'immagine virtuale sia indipendente dalla presenza o meno di un osservatore**, e pensano che **un'immagine virtuale possa formarsi comunque anche su uno schermo**.
- Gli studenti spesso **non comprendono la differenza tra immagini 'reali' e 'virtuali'** e **sono confusi dall'informazione che l'immagine che appare in uno specchio sia 'virtuale'**. La distinzione più proficua tra immagini reali e virtuali può essere fatta evocando effetti della luce diversi dalla visione (es. posso bruciare oggetti che si trovano dove di forma un'immagine reale del sole attraverso una lente, ma non dove si trova un'immagine virtuale). Inoltre, un'immagine virtuale non si forma su uno schermo, perché questo richiederebbe che la luce fosse ulteriormente riflessa dallo schermo verso l'occhio.
- Gli studenti sono spesso convinti che allontanarsi o avvicinarsi da/a uno specchio possa cambiare la frazione del proprio corpo che è possibile vedere nello specchio. Questa misconcezione è stata studiata nel dettaglio da Goldberg e McDermott (1986) che hanno suggerito che potrebbe essere dovuta a inferenze non valide tratte dall'esperienza. Le persone di solito si allontanano da uno specchio per vedere tutto il loro corpo con una quantità minima di movimento degli occhi. Questa esperienza comune potrebbe essere una possibile per la comparsa di questa difficoltà.

Difficoltà riguardo la formazione delle immagini per specchi e lenti



Per gli stessi motivi, nell'item a destra vengono evidenziate difficoltà degli studenti a comprendere quale delle immagini di diversi oggetti posti in diverse posizioni di fronte ad uno specchio sarà vista per prima da una persona che entra nella stanza. In sostanza, **gli studenti non applicano le leggi della riflessione ma conoscenze di tipo intuitivo per interpretare gli specchi.**

Sono riportate in letteratura un gran numero di difficoltà per quanto riguarda la formazione delle immagini per specchi e lenti. A sinistra, ad esempio, viene esemplificata attraverso due diversi item (e.g Ronen e Bat-Sheva, 1993) la concezione per cui **uno schermo che blocca parzialmente uno specchio impedisca la formazione dell'immagine in ragione della sua ampiezza, senza alcun riferimento al ruolo dei raggi che giungono all'occhio** (la figura in basso non rappresenta l'item ma un tipico disegno degli studenti).

1. On the right you can see the top-view of a homogeneously illuminated room. Hasan (*the observer*) enters the room from the left door and as he walks along the path shown with dashed line, he tries to observe images of the cats numbered by 1, 2, 3 and 4 in the plane mirror on the wall. So;

Interview form

- Which of the cats' images will be formed in the plane mirror? Where? Explain your answer.
- Which of the cats' image does Hasan see first in the plane mirror? Locate Hasan's and the image of cat's position at that time. Explain your answer.
- In which order does Hasan see images of cats in the plane mirror as he walks along the path? Explain your answer.
- Do the position and size of the images of the cats change as Hasan walks along the path? Explain your answer.
- As Hasan walks along the path where he can first see his own image in the mirror? Locate Hasan's and his image's position at that time. Explain your answer.
- Does the position and size of Hasan's own image change as he walks along the path? Explain your answer.
- As Hasan walks along the path, he cannot see the image of a cat at certain places. Does it affect the image formation of that cat? Explain your answer.

Open-Ended Form

- Which of the cats' images will be formed in the plane mirror? Draw the image places on the figure.
- Explain your reasoning for your answer.

- In which order does Hasan see images of cats in the plane mirror as he walks along the path?
- Explain your reasoning for your answer.

Difficoltà nel decidere quali raggi è importante tracciare

In all parts of this pretest, assume that the room is very dark before any bulbs are turned on.

1. A very small bulb is held in front of a screen. A mask with a triangular hole is placed between the bulb and a screen as shown at right.

A. Sketch what you would see on the screen when the bulb is lighted. Explain your reasoning.

B. A second small bulb is added above the first as shown in the diagram at right. How, if at all, would this affect what you see on the screen? Explain your reasoning.

C. The two small bulbs are replaced by a bulb with a long filament as shown at right.

i. Sketch what you would see on the screen when the bulb is lighted.

ii. How, if at all, does your answer differ from your answer to part A?

(a)



Pre-test da Wosilait et al., 1998.

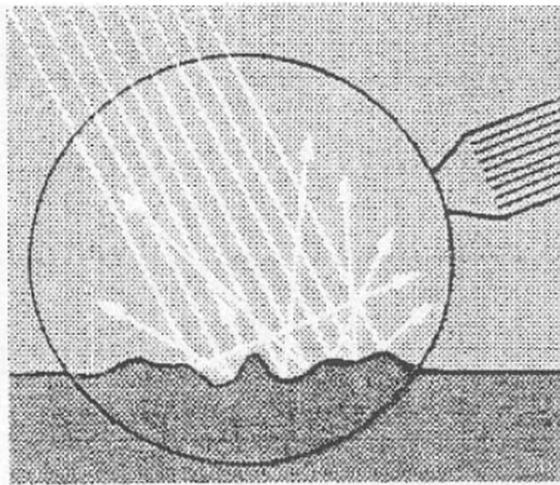
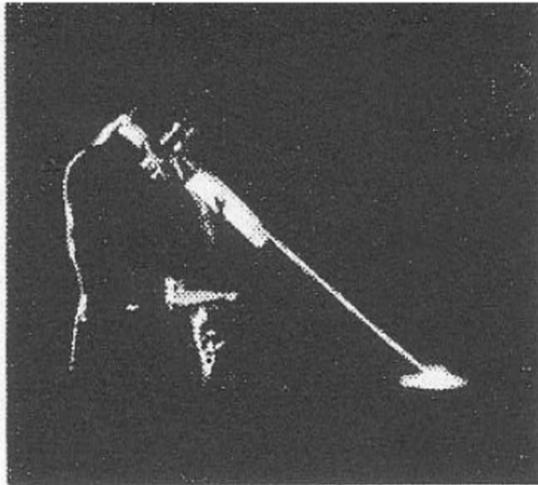
Difficoltà nel decidere quali raggi è importante tracciare

		Students in calculus-based course Pretest before tutorial ($N \approx 1215$) ^a	Students in algebra-based course Pretest before tutorial ($N \approx 165$)
<i>Single small bulb</i>	Correct response: single triangular image	90%	90%
<i>Two small bulbs</i>	Correct response: two triangular images	60%	30%
	Most common incorrect response: single triangular image	35%	60%
<i>Long-filament bulb</i>	Correct response: vertical rectangular image terminating at the top in a triangular shape	20%	< 5%
	Most common incorrect response: triangular image that mimics shape of hole in mask	70%	90%

Le risposte scorrette arrivano al 90% per la terza domanda che richiede una certa padronanza del modello dell'ottica geometrica, con la comprensione del fatto che è necessario tracciare più raggi da punti diversi di un corpo esteso.

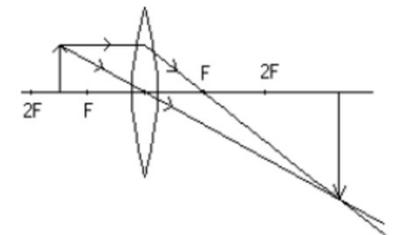
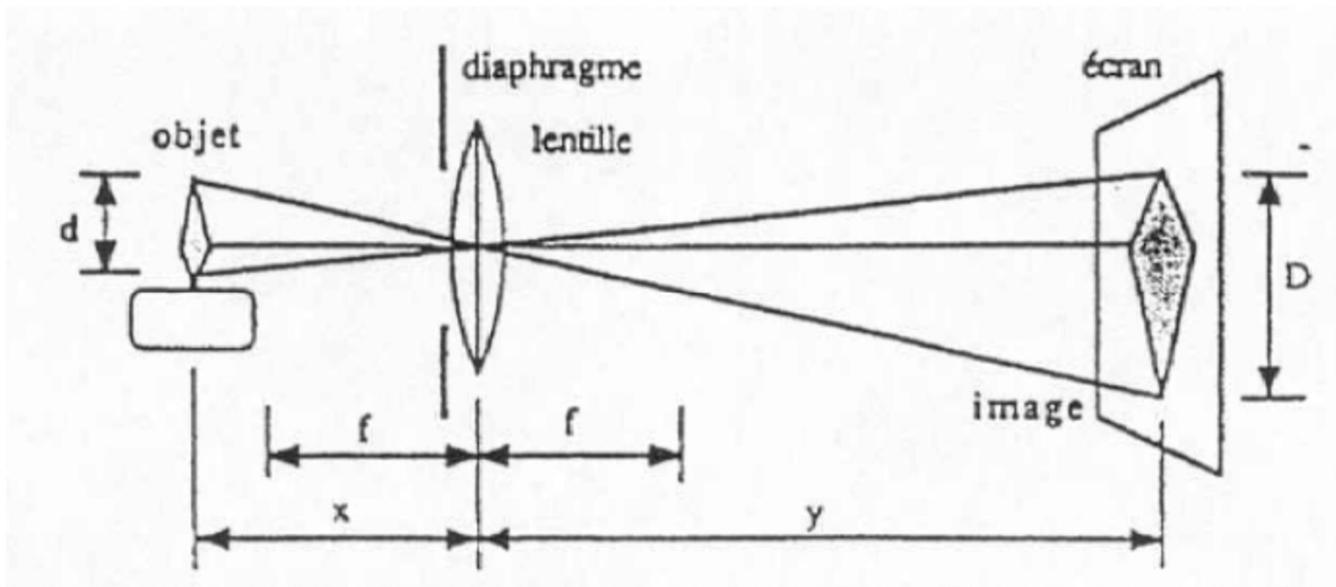
Illustrazioni inadeguate dei libri di testo

- Uno dei problemi riguarda immagini che possono rafforzare l'idea che i raggi ottici non siano elementi di un modello ma oggetti ordinari, visibili da qualsiasi punto.
- L'idea che la luce sia visibile da qualsiasi luogo come un oggetto ordinario è molto comune. Molto spesso appare, infatti, o esplicitamente o come concetto che sta alla base delle risposte fornite dagli studenti, dalla scuola primaria e media (Saltiel e Kaminski 1996) fino al livello universitario. Come sottolineano Saltiel e Kaminski, per cogliere le ragioni della visibilità, ad esempio, di un fascio laser, sono necessari diversi passaggi: (a) ci sono nell'aria alcune particelle che diffondono la luce; (b) le particelle diffondono un po' di luce in un'ampia regione dello spazio; (c) una certa frazione di luce diffusa raggiunge l'occhio dell'osservatore.

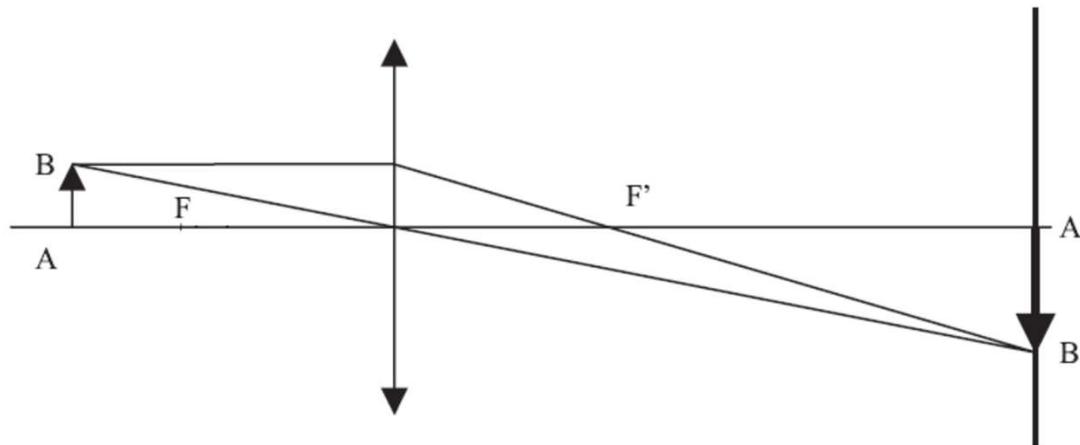


Raffigurazioni inadeguate dell'ottica geometrica

- Alcune illustrazioni possono creare gravi difficoltà riguardo alla formazione delle immagini tramite le lenti. L'immagine riportata può offuscare l'idea che l'immagine di qualsiasi punto possa essere determinata allo stesso modo, e introduce l'idea di un ruolo 'speciale' degli estremi dell'oggetto (Fawaz e Viennot 1986). Inoltre, l'immagine non permette di comprendere il principio di formazione dell'immagine, fornendo l'idea di un trasporto globale da oggetto a immagine (Feher e Rice 1987). La grande maggioranza degli studenti dopo avere esaminato questa immagine sosteneva che l'immagine si sarebbe formata anche molto più distante o vicina dalla lente, solo molto più grande o più piccola.



- Secondo Viennot e Kaminski (2006) tuttavia anche immagini più corrette, come quella riportata sotto, possono essere fuorvianti. L'insistenza nel disegnare solo alcuni raggi specifici (solitamente due che partono da un'estremità dell'oggetto, uno dei quali è quello centrale, non deviato) può rafforzare quello che Galili chiama il 'modello di proiezione dell'immagine', in cui la corrispondenza puntuale è assicurata sostanzialmente da un solo raggio. Inoltre, l'insistenza sul raggio centrale può far pensare agli studenti che, applicando uno schermo opaco in una piccola area al centro della lente, l'immagine scomparirebbe del tutto.



Raffigurazioni inadeguate dell'ottica geometrica

- Il problema era già stato individuato da Grayson (1995) che nell'articolo *'Many rays are better than two'* suggeriva l'utilizzo di molti raggi, anziché due, nelle rappresentazioni a scopo didattico, al fine di evitare misconcezioni degli studenti come quelle sopra esposte.

Nell'item mostrato a destra, Grayson trova l'84% di risposte errate tra gli studenti (matricole universitarie) con prevalenza della risposta errata C (66%).

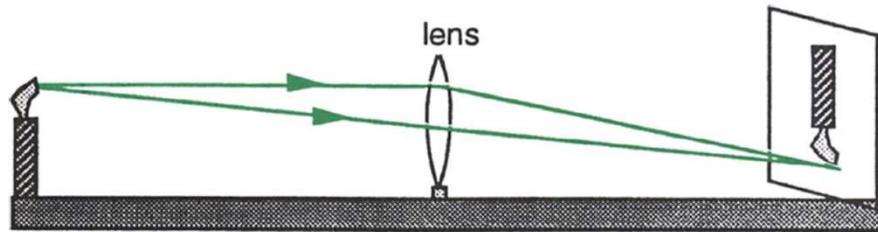
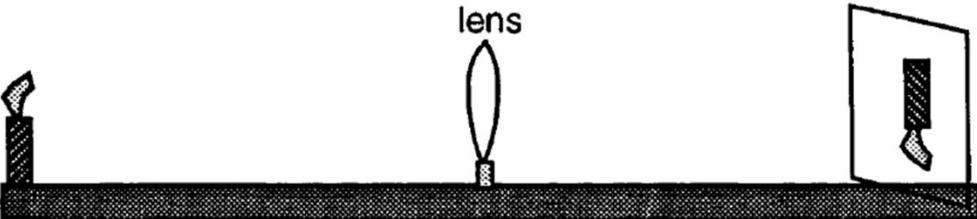
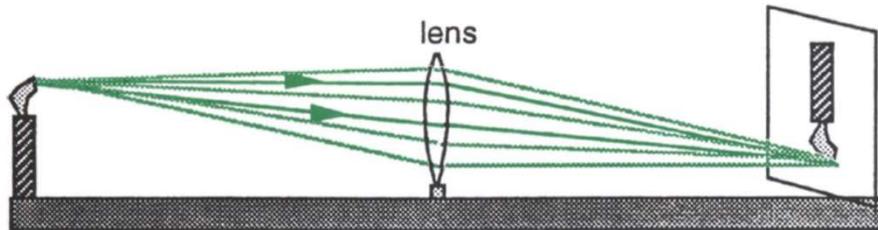


Fig. 1. Typical textbook approach to locating the image formed by a lens using two special rays.



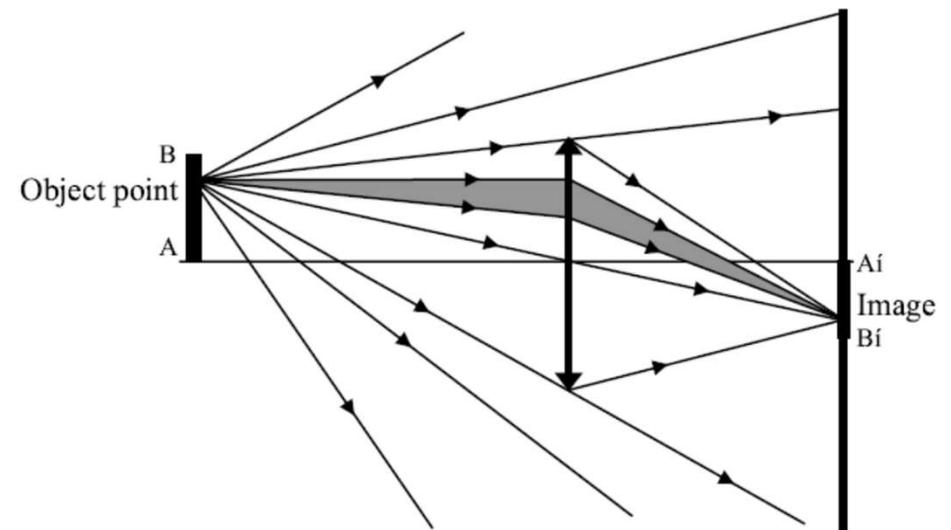
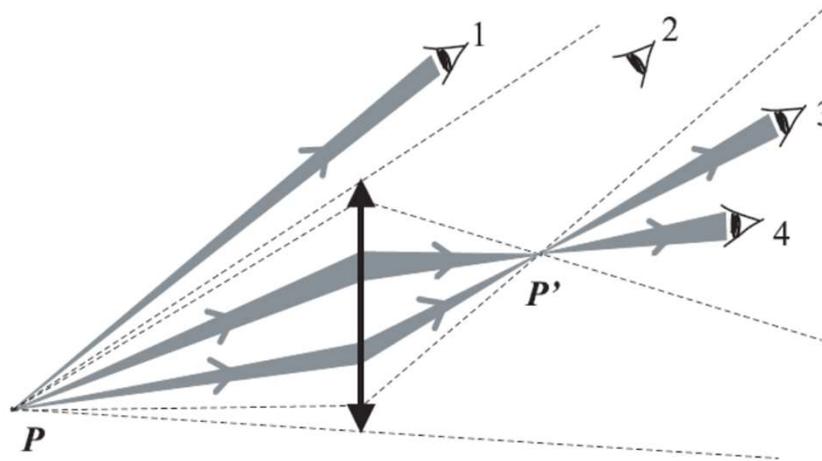
Suppose that a candle is the only light in the room. After the candle is lit an image appears on the screen, as shown above. The image is upside down. If the top half of the lens is covered what will you see on the screen?

A B C D E

I chose my answer because: _____

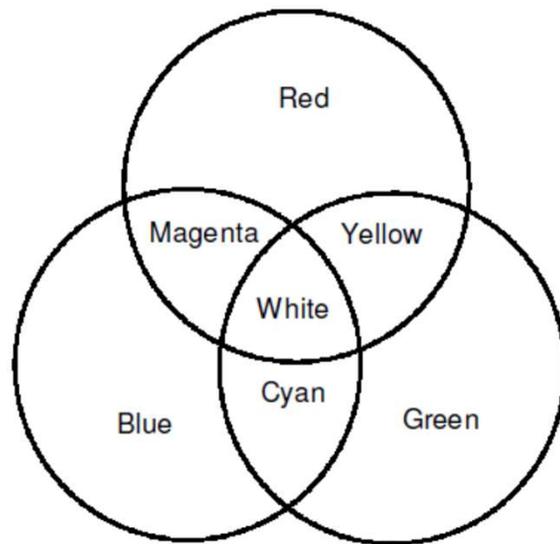
- Proseguendo su questa linea, Viennot e Kaminski (2006) propongono di fornire rappresentazioni ancora più ricche, in particolare rispetto alle seguenti caratteristiche:
 - Vengono proposte, in parallelo, rappresentazioni che utilizzano uno schermo e rappresentazioni che enfatizzano il ruolo dell'occhio.
 - Per ogni punto vengono rappresentati molti raggi, anziché solo uno o due
 - Vengono rappresentati anche i raggi che proseguono imperturbati senza incontrare la lente. Questa prescrizione che sembra a prima vista irrilevante non lo è, perché gli studenti, rendendosi conto che il flusso luminoso catturato da una lente è comunque solo una parte di un flusso più grande, assegnano meno importanza a una ulteriore riduzione del flusso (come nel caso di un piccolo schermo)

Semplicemente utilizzando questo tipo di rappresentazioni al posto di quelle ordinarie, Viennot e Kaminski ottengono una significativa riduzione di alcune delle difficoltà precedentemente menzionate.

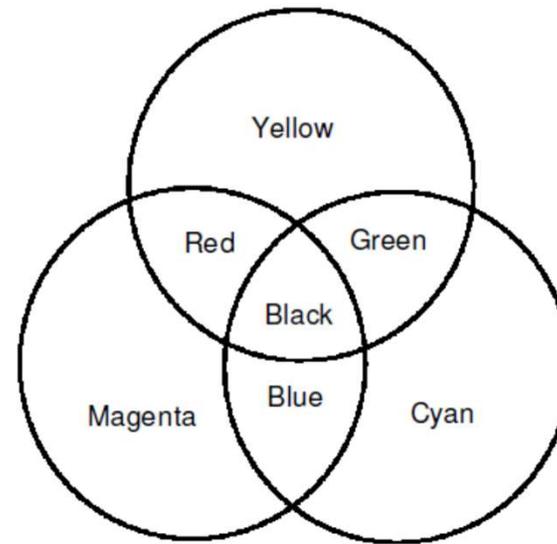


L'insegnamento della 'teoria del colore'

- L'apprendimento della 'teoria del colore' merita un approfondimento a parte. Sono riportate sotto tipiche immagini, comunissime nei libri di testo in molte varianti, per spiegare la sintesi additiva e sottrattiva dei colori.
- Queste immagini quasi mai riportano nei dettagli il contesto richiesto per ottenere le diverse sintesi, il che produce negli studenti confusione sul dominio di validità delle due sintesi.
- Ma soprattutto, il colore viene proposto prima di ogni altro modello sulla luce, e quasi mai rivisitato nella prospettiva di ulteriori conoscenze, né collegato a altre conoscenze di tipo fisico e biologico. Quindi, in sostanza, la 'teoria del colore' si può configurare come una *ulteriore* teoria sulla luce, che contribuisce alla visione frammentata degli studenti di questa sotto-disciplina.



a) Additive colour mixing



b) Subtractive colour mixing

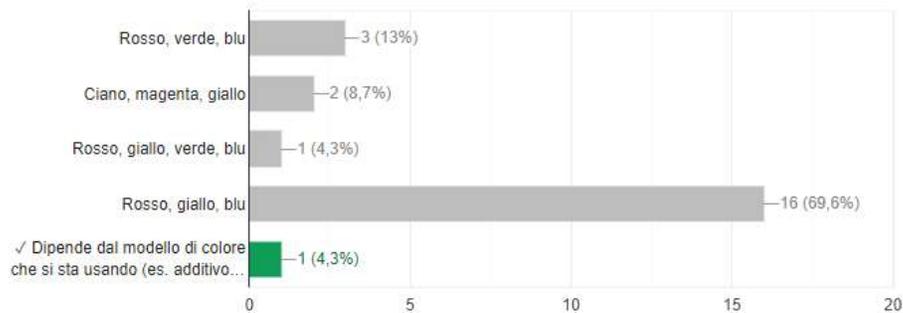
- Il colore fa parte degli argomenti di fisica in cui la conoscenza iniziale degli studenti consiste nell'organizzazione di strutture esplicative "spontanee" da una vasta mole di esperienze quotidiane personali e dati sensoriali.
- La comprensione iniziale degli studenti può essere organizzata in mini-teorie come quella che il colore sia una proprietà intrinseca degli oggetti; che la miscelazione di diversi colori sia regolata dalle regole del mescolamento dei pigmenti in ogni circostanza, ad esempio anche quando luce colorata illumina un oggetto colorato; che la luce naturale (come la luce del sole) non sia composta da una miscela di colori, ma qualificata come "pura" e incolore.
- Le misconcezioni sul meccanismo della visione contribuiscono a una scarsa comprensione del colore; un modello diffuso per gli studenti è quello della luce come facilitatore della vista: la luce ambientale rivela i colori e permette loro di essere visti, ma non ha altro rapporto speciale con la vista o l'occhio
- L'insegnamento tradizionale potrebbe non aiutare gli studenti a sviluppare visioni scientifiche corrette, e indurre invece alla formazione di modelli ibridi: alcuni rischi educativi cruciali su cui si è concentrata la ricerca sono:
 - trascurare il legame tra la fisica e la fisiologia della visione dei colori rende sostanzialmente impossibile comprendere la teoria del colore
 - proporre un modello «tutto o niente» di riflessione o assorbimento della luce per la sintesi sottrattiva, produce una teoria incapace di spiegare alcuni fatti essenziali dell'esperienza.

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

2. Quali sono i colori primari?

Copia

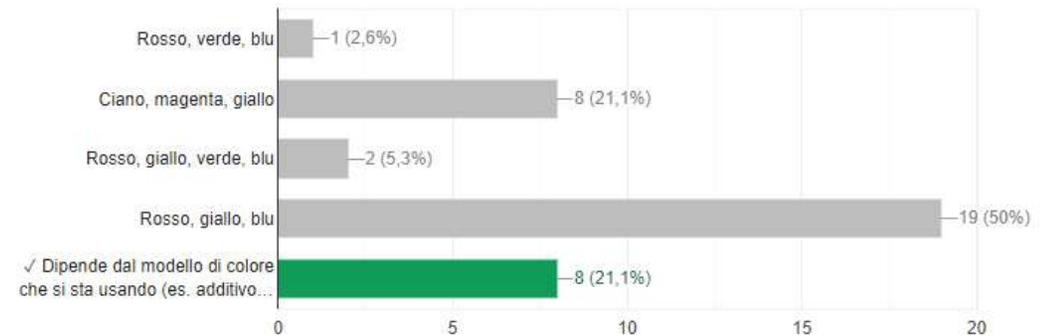
1/23 risposte corrette



2. Quali sono i colori primari?

Copia

8/38 risposte corrette



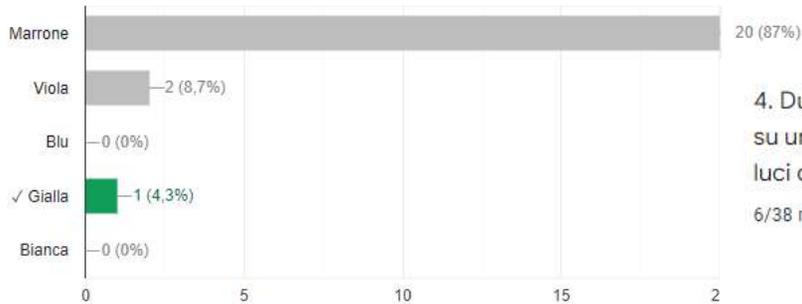
- La maggior parte degli studenti italiani (in questo caso i campioni sono a sinistra, 23 studenti di seconda liceo scientifico; a destra 38 studenti di quarta liceo scientifico altamente motivati verso lo studio della fisica, ma il risultato si ripete simile con molti altri campioni) pensa che i colori primari siano rosso, giallo, blu. Da una parte, questo è il risultato di reminiscenze della scuola primaria sui colori primari-pigmento (ciano, magenta, giallo), dall'altra da un errore evocato dall'acronimo RGB.

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

4. Due riflettori da teatro, uno che emette luce rossa e uno verde, vengono proiettati su un telo bianco in una stanza per il resto buia. Di che colore appare la zona in cui le luci dei riflettori si sovrappongono?

 Copia

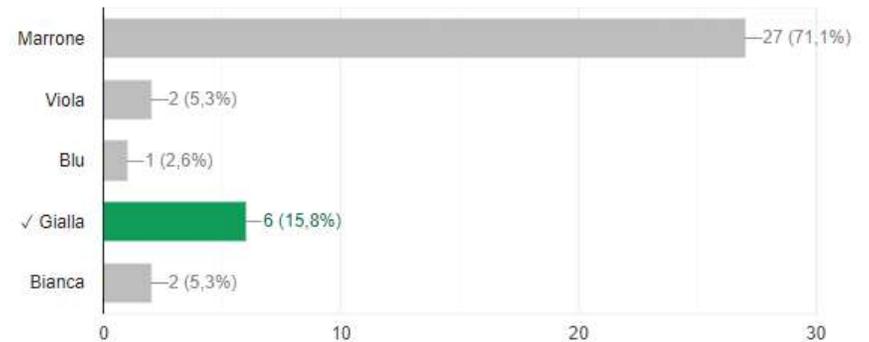
1/23 risposte corrette



4. Due riflettori da teatro, uno che emette luce rossa e uno verde, vengono proiettati su un telo bianco in una stanza per il resto buia. Di che colore appare la zona in cui le luci dei riflettori si sovrappongono?

 Copia

6/38 risposte corrette



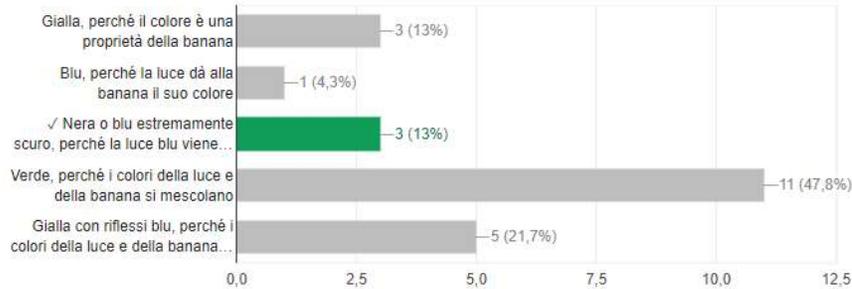
- La maggior parte degli studenti (significativamente oltre il 70% del campione di studenti di quarta liceo scientifico particolarmente interessati alla fisica!) utilizza impropriamente le regole empiriche valide per il mescolamento dei pigmenti nel caso in cui luci di colore diverso vengono proiettate su uno schermo.

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

3. Considera una banana, che alla luce del giorno appare gialla. In una stanza buia viene puntata verso di esso un riflettore blu. Di che colore appare la banana?

Copia

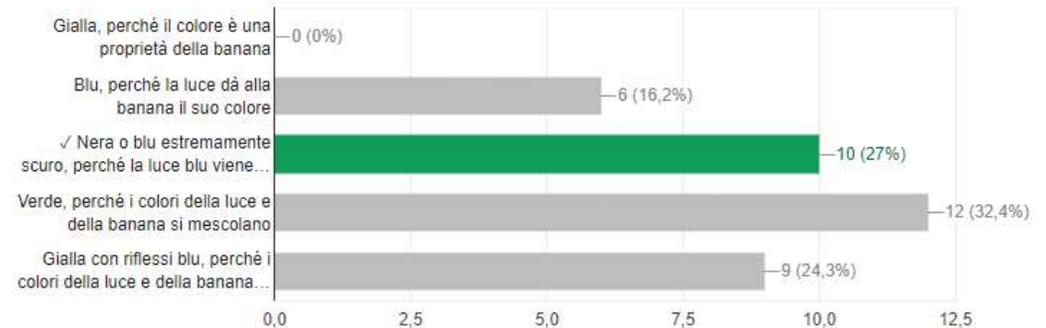
3/23 risposte corrette



3. Considera una banana, che alla luce del giorno appare gialla. In una stanza buia viene puntata verso di esso un riflettore blu. Di che colore appare la pianta?

Copia

10/37 risposte corrette

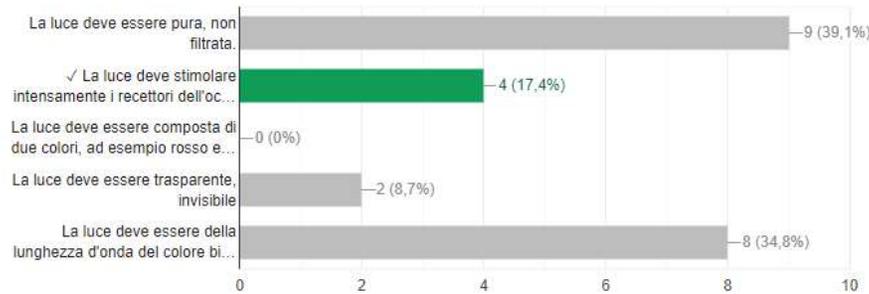


- Questo è vero anche per il caso di un oggetto illuminato da luce colorata, anche se in questo caso osserviamo un maggiore effetto dell'istruzione (il distrattore d) rimane comunque quello maggiormente scelto dagli studenti).

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

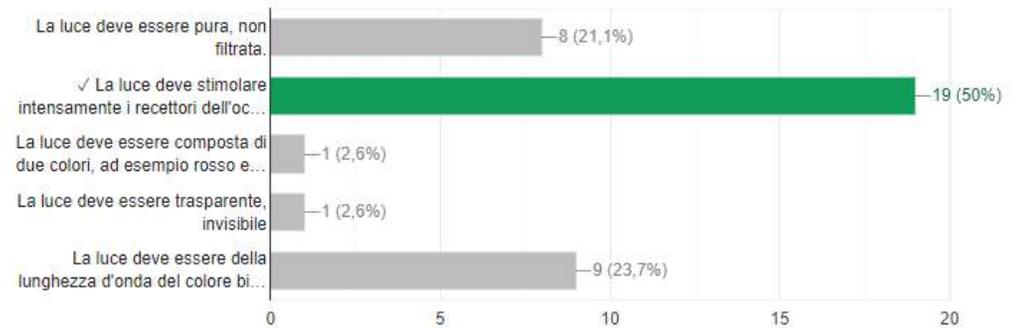
5. Quale condizione esprime meglio le caratteristiche che deve avere una luce perché ci appaia bianca? [Copia](#)

4/23 risposte corrette



5. Quale condizione esprime meglio le caratteristiche che deve avere una luce perché ci appaia bianca? [Copia](#)

19/38 risposte corrette



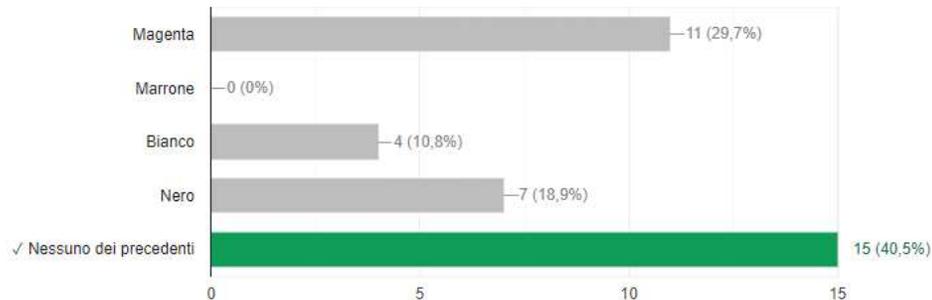
- Difficoltà meno resistenti all'istruzione vengono osservate anche riguardo la natura della luce bianca. In particolare l'idea, riportata nella letteratura, della luce bianca come 'pura' o 'non filtrata'.

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

9. Quale dei seguenti colori può avere un raggio composto da luce di una singola lunghezza d'onda?

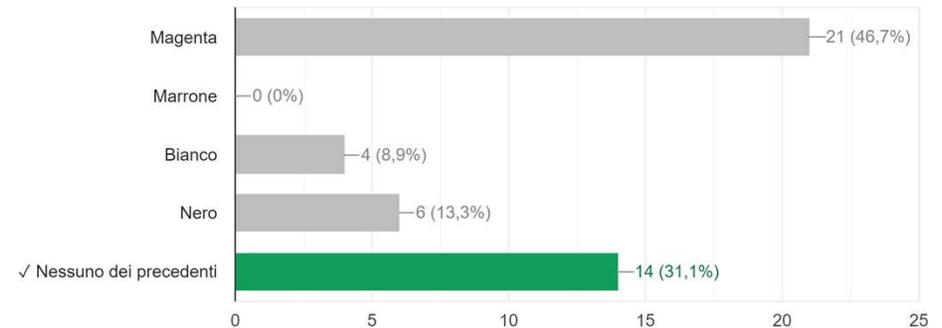
 Copia

15/37 risposte corrette



9. Quale dei seguenti colori può avere un raggio composto da luce di una singola lunghezza d'onda?

14/45 risposte corrette

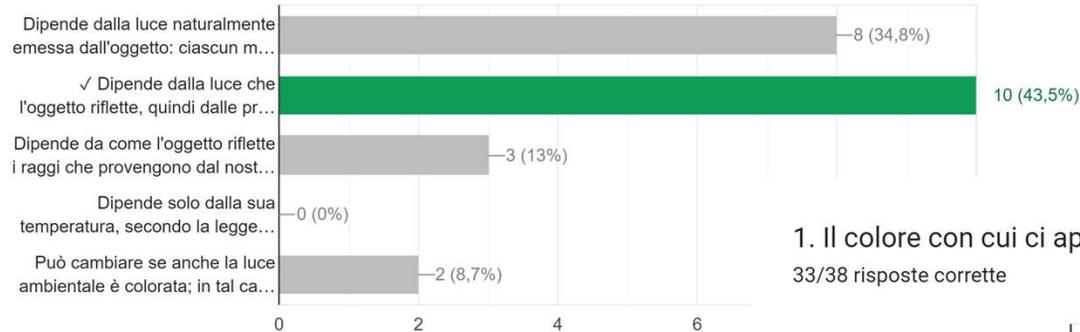


- Una porzione significativa di studenti di quarta liceo, autoselezionati ritiene che il magenta sia un colore spettrale (domanda non posta agli studenti di seconda liceo, in questo caso i due campioni sono simili, relativi al 2021 e 2022)

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

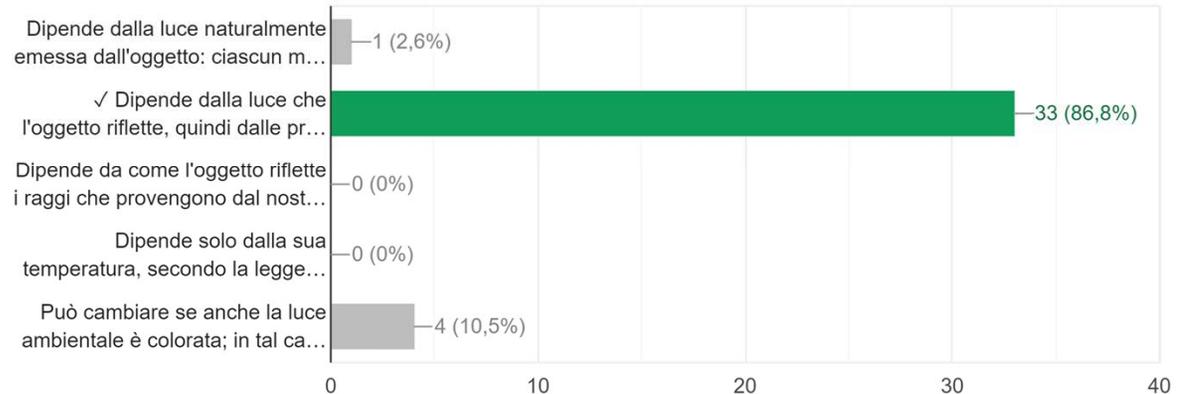
1. Il colore con cui ci appare un oggetto, come il piano di un tavolo:

10/23 risposte corrette



1. Il colore con cui ci appare un oggetto, come il piano di un tavolo:

33/38 risposte corrette

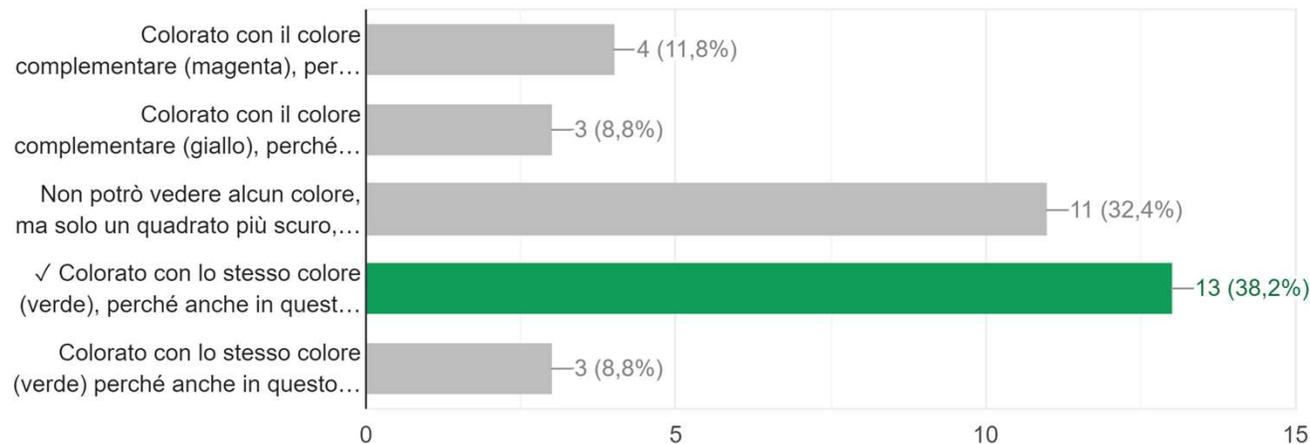


- Le difficoltà di base sul meccanismo della visione scompaiono tra gli studenti auto-selezionati di quarta liceo scientifico (figura a destra) ma sono ancora rilevanti in seconda (figura a sinistra). Queste difficoltà non vanno sottovalutate in quanto se non affrontate al liceo potrebbero permanere per l'intero percorso universitario e oltre.

Alcuni dati da nostre sperimentazioni (in collaborazione con il gruppo di Paolo Montagna)

6. Se io disegno un quadrato con una matita verde su un foglio bianco molto sottile, e lo guardo in trasparenza in una stanza buia, con il foglio posto tra me e una luce bianca, lo vedrò:

13/34 risposte corrette



- Una eccessiva enfasi sulla *riflessione* anziché sul *mancato assorbimento* della luce come causa principale della colorazione degli oggetti può far perdere di vista cosa accade quando un sottile foglio di carta colorato viene osservato in trasparenza.

Il problema delle ombre colorate

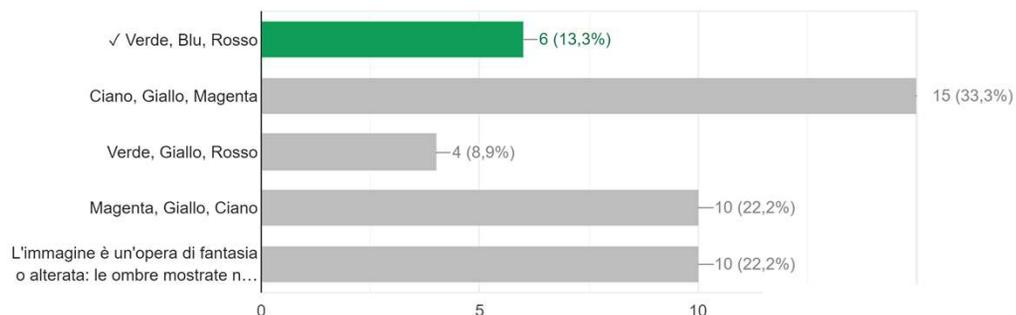


La figura mostra il risultato di un esperimento in cui una piramide viene illuminata da tre fari colorati, e si osservano i colori delle ombre sul muro bianco retrostante. Quali sono a tuo parere, procedendo da sinistra verso destra, i colori dei tre fari che illuminano la piramide?

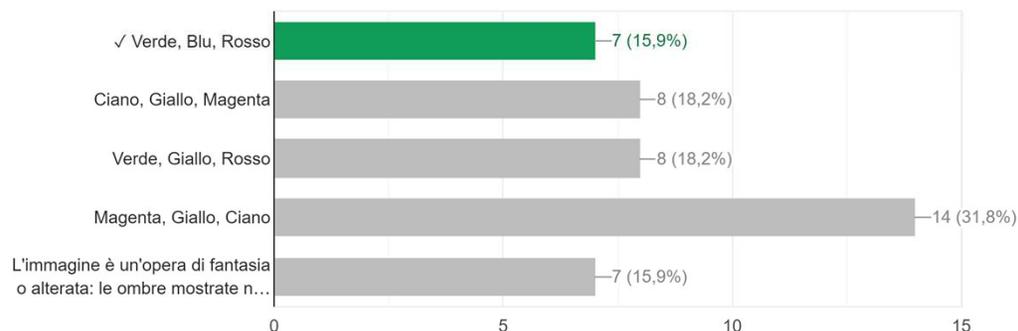
- Il problema delle ombre colorate (nato dalle ricerche di Matilde Vicentini, ripreso da Laurence Viennot) richiede un grado significativo di integrazione di diverse conoscenze.

Il problema delle ombre colorate

La figura mostra il risultato di un esperimento in cui una piramide viene illuminata da tre fari colorati, e si osservano i colori delle ombre sul mur...tra, i colori dei tre fari che illuminano la piramide?
6/45 risposte corrette



La figura mostra il risultato di un esperimento in cui una piramide viene illuminata da tre fari colorati, e si osservano i colori delle ombre sul mur...tra, i colori dei tre fari che illuminano la piramide?
7/44 risposte corrette



- Questo problema è l'unico tra quelli da noi proposti nel quale abbiamo miglioramenti insignificanti dopo l'istruzione, il che può segnalare difficoltà che vanno oltre il tema del colore, che riguardano ad esempio il problema generale della formazione delle ombre in ottica geometrica

Come vediamo gli oggetti?

In considerazione dei risultati della letteratura di ricerca può essere utile preliminarmente ricordare a grandi linee agli studenti come funziona il meccanismo della visione.

Vediamo un oggetto perché luce che proviene da esso entra nel nostro occhio.

Questo significa che ci dev'essere una linea di propagazione libera per la luce tra l'oggetto e il nostro occhio. Altrimenti, non potremmo vederlo direttamente, anche se, per esempio, potremmo vederlo riflesso in uno specchio (in quel caso, vedremmo la luce che arriva al nostro occhio dallo specchio).

Per comprendere la visione del colore, è anche essenziale fare una distinzione tra due tipi di oggetti:

- Oggetti che emettono luce visibile
- Oggetti che non emettono luce visibile

Oggetti luminosi

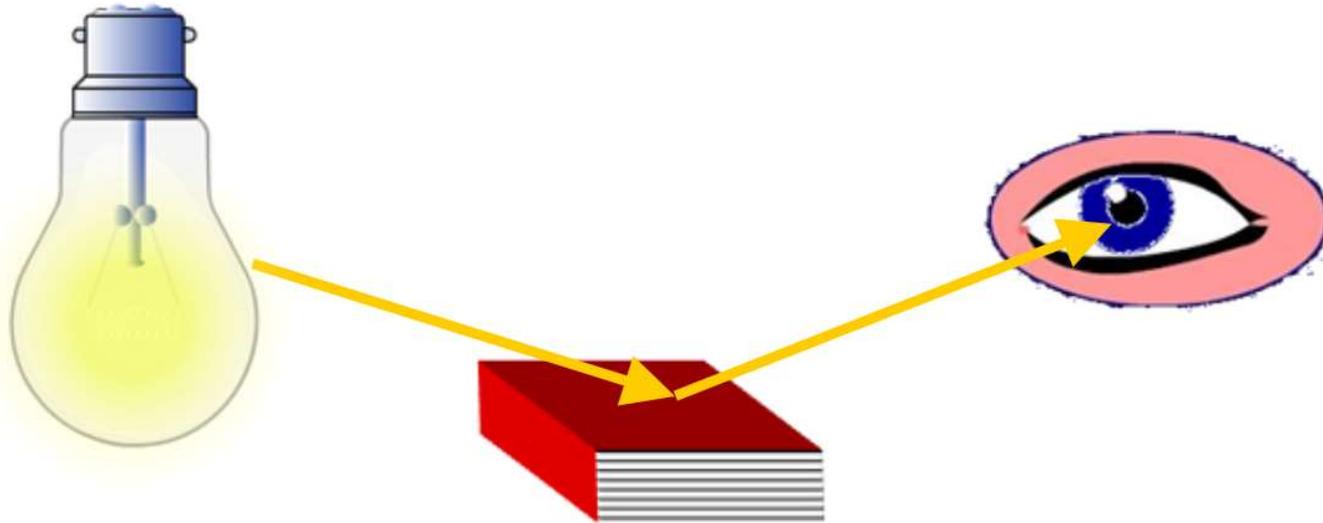
Questi oggetti includono lampadine, LED, torce, candele, fari e naturalmente il sole, che emettono luce visibile. In realtà, tutti gli oggetti emettono «luce» (radiazione elettromagnetica), ma spesso non della frequenza giusta per essere raccolta dai sensori nel nostro occhio.



In questo caso, noi vediamo direttamente la luce emessa dall'oggetto. Possiamo vederli anche se non ci sono altre fonti di illuminazione cioè se l'ambiente, a parte la presenza di tali oggetti, è completamente buio.

Oggetti non luminosi

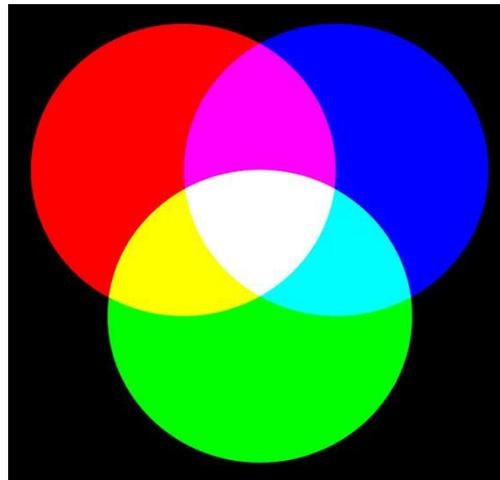
Tutti gli altri oggetti, come il libro in figura, possono essere visti solo se vi è un'altra sorgente di luce. In questo caso, noi vediamo la luce che gli oggetti riflettono (o, meglio, non assorbono).



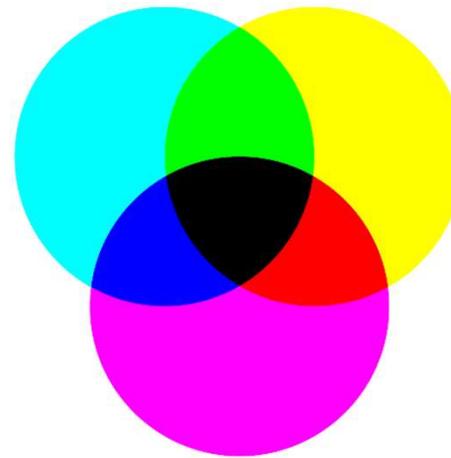
Ma perché vediamo il libro rosso, se la luce della lampadina, che esso riflette, non è rossa? Il fatto che gli oggetti si presentino con un colore definito, potrebbe farci pensare che il colore sia una loro proprietà esclusiva, ma non è così...

Il discorso sulla teoria del colore può poi essere affrontato in termini di **modelli del colore**.

Un modello del colore associa elementi di uno spazio cromatico ("colori") con vettori numerici, spesso a tre componenti. Il termine "colore" è qui riferito ai colori percepiti **dal cervello umano**.

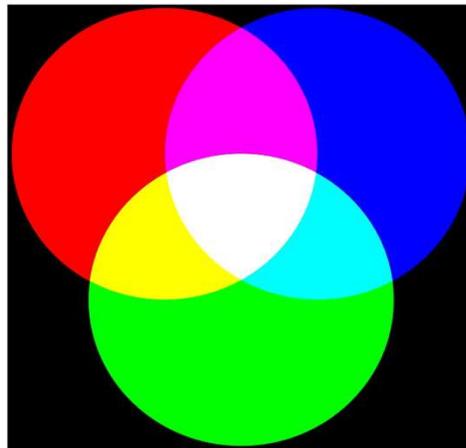


RGB

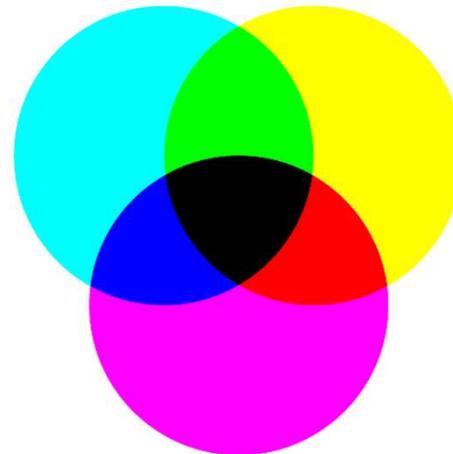


CMY(K)

I due modelli di colore più usati sono RGB e CMY. Il primo è un **modello che rappresenta la sintesi additiva**, mentre il secondo è un **modello che rappresenta la sintesi sottrattiva**. Modelli additivi e sottrattivi corrispondono a situazioni in cui, per mescolare due colori si intendono due cose diverse. Entrambi sono modelli a tre colori primari. Nel caso delle stampanti, ai tre inchiostri C, M, Y viene aggiunto l'inchiostro nero perché, non essendo i pigmenti "perfetti", sovrapponendo inchiostri ciano, magenta e giallo non si ottiene il nero ma un grigio scuro. Si ottiene allora il modello sottrattivo CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, black).



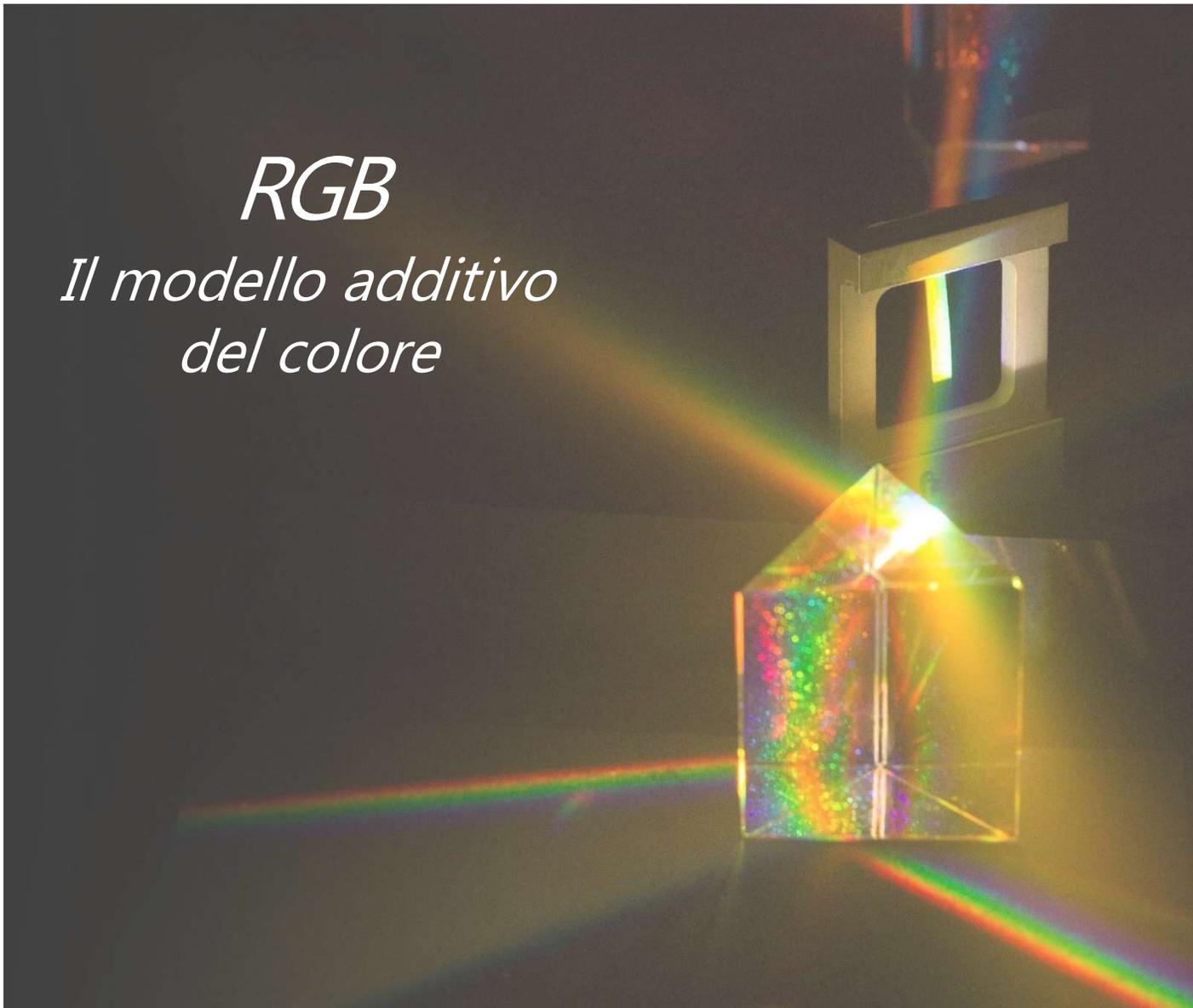
RGB



CMY (K)

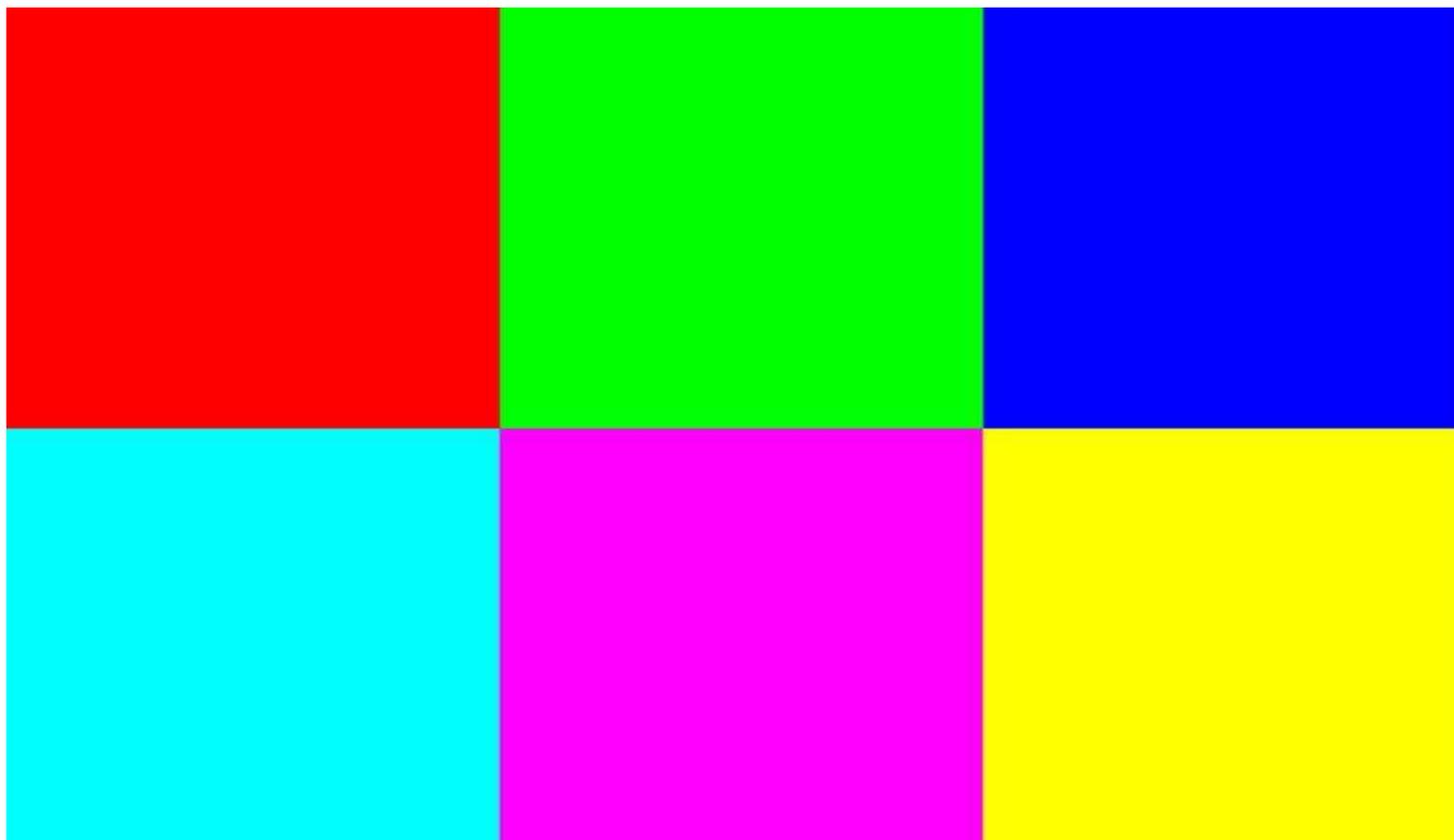
RGB

*Il modello additivo
del colore*

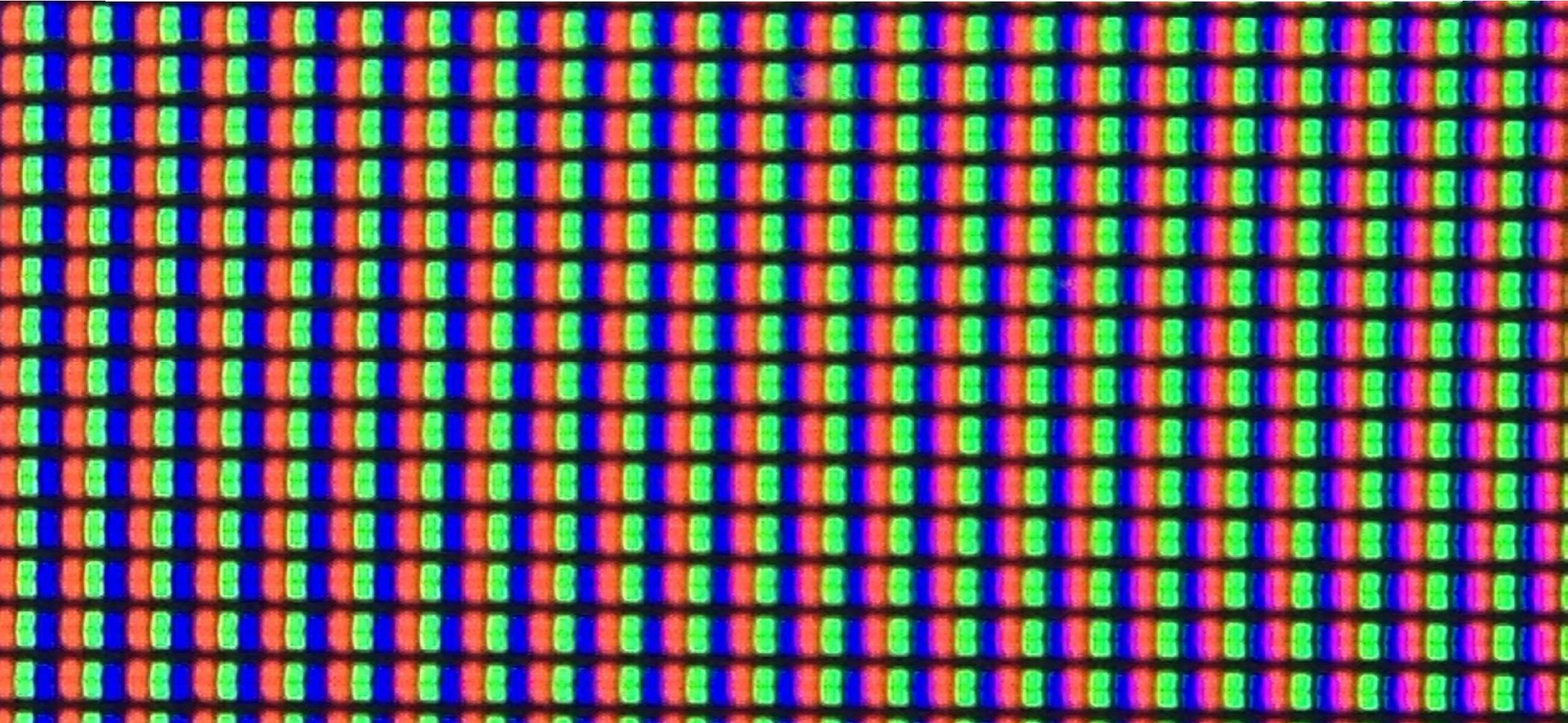




Cosa vedrò se osservo un monitor con questa immagine da molto vicino?



Bianco



Rosso

Verde

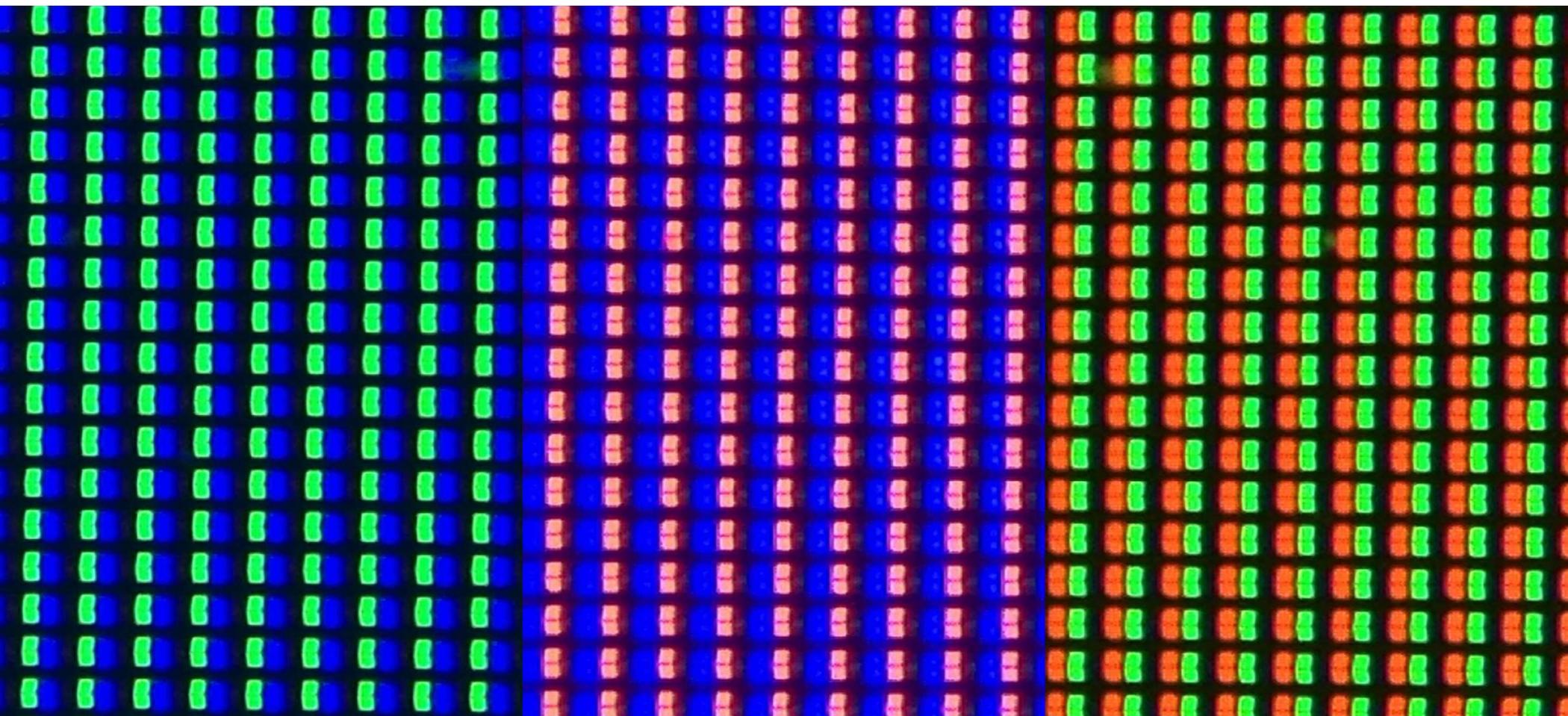
Blu



Ciano

Magenta

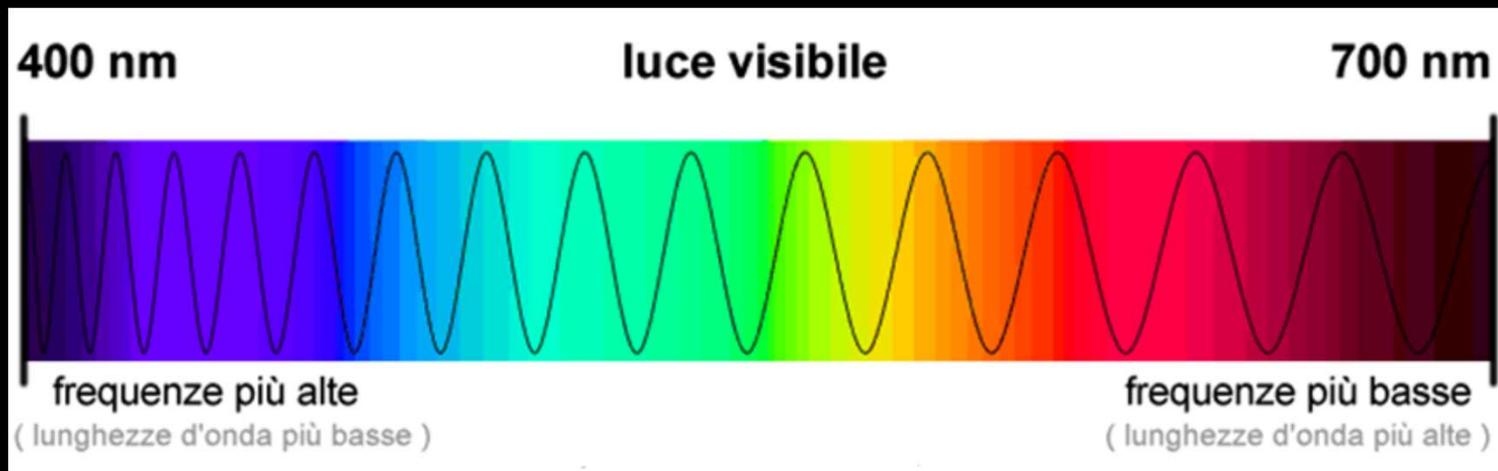
Giallo



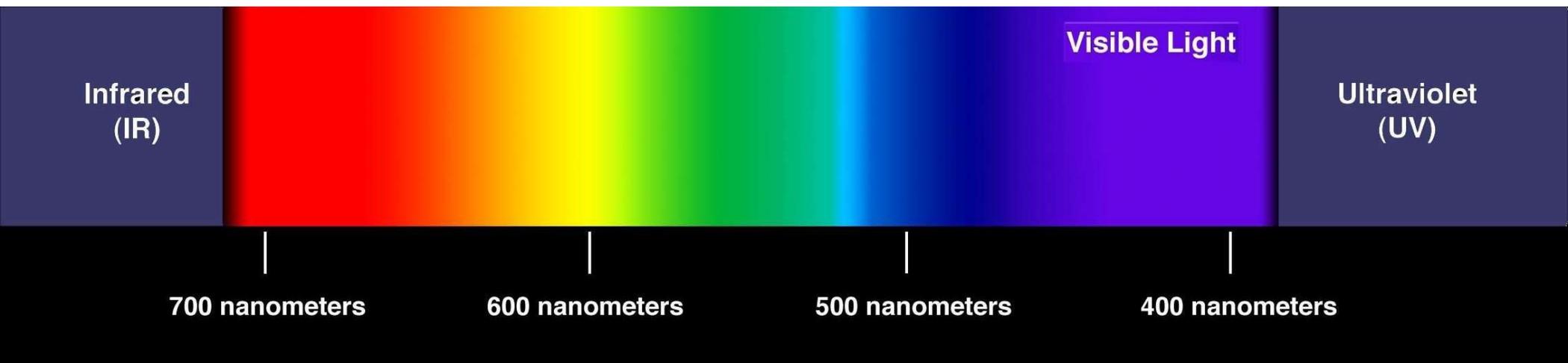
Perché funziona così? Perché vediamo punti formati da coppie di colori molto vicini come se fossero colori diversi, e soprattutto perché queste combinazioni di colori possono essere descritte da un modello con tre colori fondamentali e gli altri derivati da essi?

La descrizione fornita dal modello ondulatorio della luce è un componente della spiegazione, ma non l'unica.

Infatti lo spettro elettromagnetico è una scala lineare, per quale motivo si potrebbero identificare tre colori come privilegiati?



Inoltre nello spettro della luce visibile ci sono molti colori ma... ci sono tutti?



Dov'è il rosa? Il magenta? Il marrone?

Noi percepiamo più colori di quelli chiamati «spettrali», cioè che corrispondono a specifiche lunghezze d'onda della luce

Per comprendere i fenomeni relativi al colore, è necessario da una parte tenere presente la natura fisica dei colori «spettrali», che corrispondono a lunghezze d'onda ben definite della luce, ma dall'altra distinguere tali colori dalle sensazioni di colore che noi percepiamo.

I colori che noi percepiamo, cioè quelli che noi comunemente chiamiamo colori, non hanno in tutti i casi una corrispondenza diretta con le lunghezze d'onda della luce, perché risultano da una elaborazione che coinvolge il nostro occhio e il nostro cervello. Noi vediamo molti colori e tonalità che non corrispondono a quelle che percepiamo quando il nostro occhio è investito da una singola lunghezza d'onda. Le ragioni hanno a che fare con la fisiologia del nostro occhio, e con la necessità di distinguere la luce che arriva all'occhio in modo più fine che non caratterizzandola con una sola lunghezza d'onda «principale» (ammesso che esista).

Per rappresentare la struttura della gamma dei colori percepiti, si usano i **modelli di colore**, talvolta rappresentati dai «famosi» diagrammi a tre cerchi.

I colori primari

Come detto precedentemente, oltre a mancare molti colori, nello spettro elettromagnetico non c'è nulla che aiuti a comprendere quali sono i colori primari, e perché.

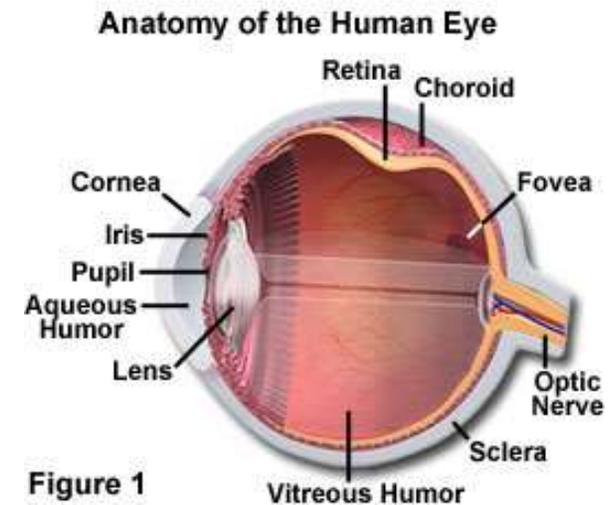
Se si chiede ad uno studente della scuola secondaria quali sono i colori primari è probabile che risponda "rosso, giallo e blu", oppure "rosso, verde e blu". Queste risposte derivano o da reminescenze della scuola primaria o media, oppure, nel secondo caso, da conoscenze del modello RGB utilizzato per gli schermi.

Non c'è niente in fisica che definisca i "colori primari" ma si parla di colori primari in relazione **ad un certo modello di colore**. Se non si fa riferimento ad uno specifico modello del colore, il concetto di colore primario non ha significato fisico.

Nel modello RGB, che è il più utilizzato per rappresentare la sintesi additiva dei colori, la scelta dei colori primari rosso, verde, blu ha però una solida base, che deriva dalla fisiologia.

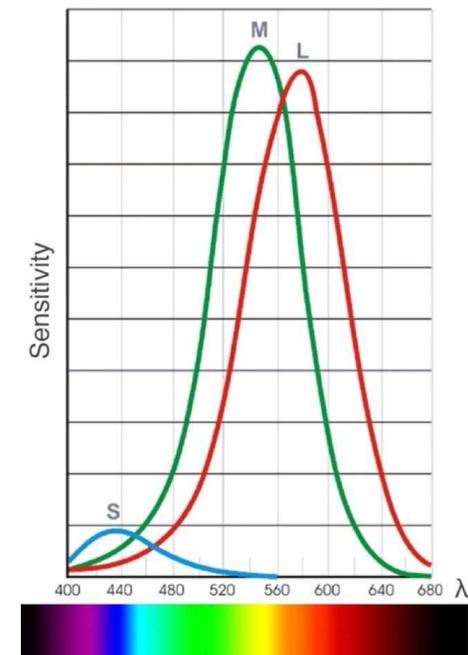
Le cellule fotorecetrici della nostra retina sono un tipo specializzato di neuroni capaci di convertire la luce in segnali elettrici che stimolano vari processi biochimici. Ci sono due tipi principali di fotorecettori, i **coni** e i **bastoncelli**, che hanno differenze funzionali e diversi ruoli.

I bastoncelli sono così sensibili che possono essere stimolati anche da un singolo fotone, ma hanno una risposta lenta e forniscono una visione acromatica. Sono responsabili per la cosiddetta visione scotopica, ossia visione in condizioni di scarsa illuminazione.

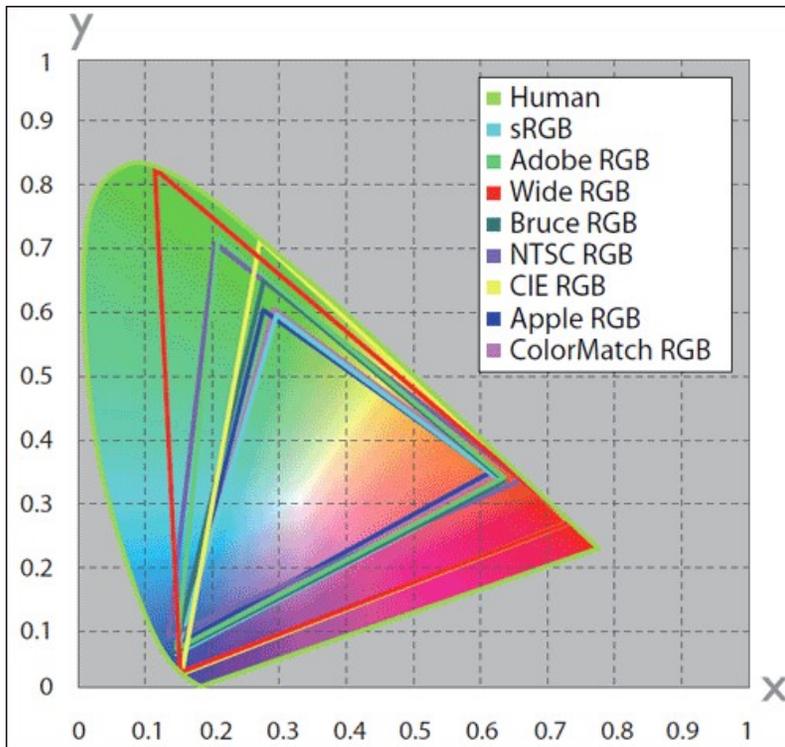


I **coni**, d'altra parte, sono responsabili della visione in normali condizioni di illuminazione (visione fotopica) e sono di particolare interesse perché sono responsabili della visione del colore.

La visione del colore si basa sull'utilizzo di coni con diverse sensibilità spettrali. Gli umani hanno tre tipi di coni, caratterizzati da diverse sensibilità, in particolare i coni detti S (Short, in riferimento alla lunghezza d'onda) sono più sensibili al blu, quelli M (Medium) più sensibili al verde, e quelli L (Long) più sensibili al rosso. La luce che investe l'occhio, a seconda del suo contenuto di frequenza (ad esempio, luce monocromatica o che contiene due o più diverse frequenze) provocherà una diversa stimolazione dei tre tipi di coni (tristimolo SML) che determinerà il colore percepito risultante.



Il modello **RGB** (**R**ed, **G**reen, **B**lue) del colore è di grande importanza per la riproduzione di immagini. E' utilizzato per esempio nei monitor, nei telefoni cellulari, nei proiettori.

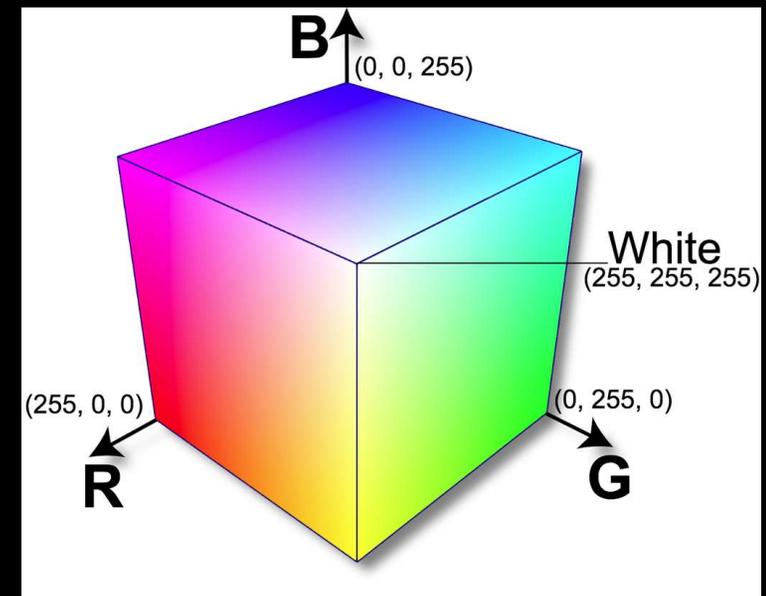


Si basa sull'idea che partendo dal nero (assenza di luce che l'occhio percepisce provenire da una zona) aggiungendo in determinate proporzioni luce rossa, verde e blu si può ottenere "qualunque" colore, o almeno una grande maggioranza dei colori percepibili dagli esseri umani, partendo da soli tre colori, che corrispondono ai tre picchi dei coni S, M e L visti in precedenza. In realtà, RGB è il nome generico di una classe di modelli di colore, le cui caratteristiche dipendono anche dai dettagli delle varianti di R, G e B che vengono scelte come colori primari.

Se le tre componenti cromatiche vengono mescolate in parti uguali, si ottiene un colore una tonalità di grigio. Quando tutti e tre le componenti hanno il valore massimo, si ottiene il bianco.

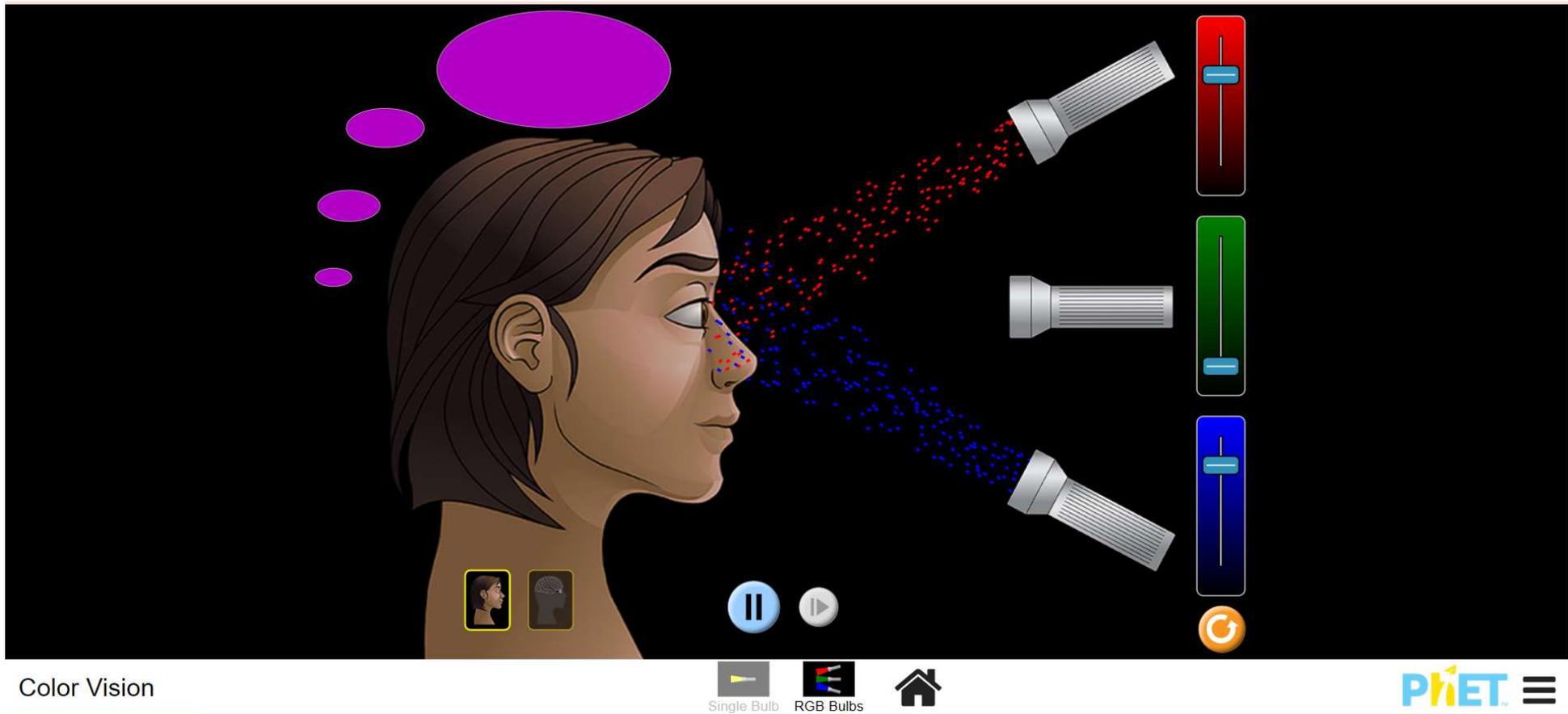
Alla fine degli anni '20, gli scienziati britannici David Wright e John Guild condussero indipendentemente l'uno dall'altro una serie di esperimenti con lo scopo di ottenere un sistema di misura oggettivo del colore.

In poche parole, l'esperimento consisteva nel porre un osservatore di fronte ad un'area che conteneva, una affiancata all'altra, una metà con un colore di riferimento, mentre l'altra metà era illuminata da un mix regolabile di tre luci dei colori primari. Al soggetto veniva chiesto di regolare le intensità di ciascuna luce finché il colore ottenuto non corrispondeva al riferimento. Le tre intensità trovate, facendo una media su molti soggetti, vennero prese come misura del colore di riferimento (standard CIE 1931), con alcuni problemi tecnici, in seguito quasi interamente superati grazie a diverse scelte delle tre luci primarie.



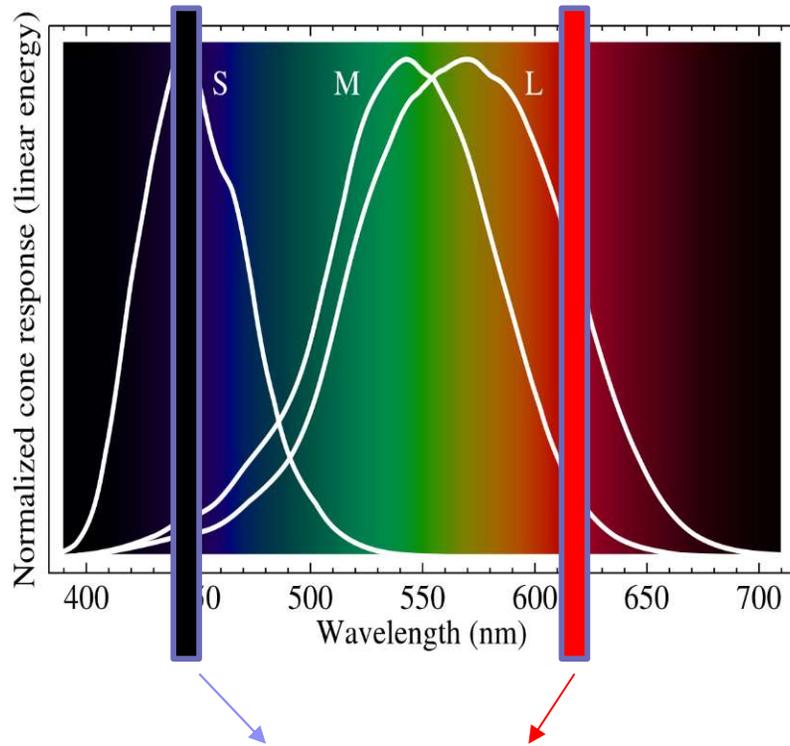
https://phet.colorado.edu/sims/html/color-vision/latest/color-vision_en.html

Simulazione della percezione umana del colore



The screenshot shows the PHET Color Vision simulation interface. On the left, a woman's head is shown in profile, with a purple thought bubble above it. Three flashlights on the right emit red, green, and blue light beams towards her face. The light beams are composed of small dots of their respective colors. To the right of the flashlights are three vertical sliders for adjusting the intensity of the red, green, and blue light. At the bottom of the simulation area, there are control buttons: a pause button, a play button, and a refresh button. Below the simulation area, there is a navigation bar with icons for 'Single Bulb', 'RGB Bulbs', and a home icon. The text 'Color Vision' is displayed on the left side of the navigation bar. The PHET logo is on the right side of the navigation bar.

Cos'è il magenta?



Lo stesso risultato NON si può ottenere con luce monocromatica di nessuna frequenza singola.



Il magenta è un colore percettivamente ben definito, ma non è un colore spettrale.

La combinazione di luce rossa e blu produce uno stimolo che attiva significativamente i coni S e quelli L, ma molto poco quelli M.

Risoluzione dell'occhio umano (spaziale)

Osservandoli ad una distanza di 20-30 cm, possiamo distinguere due punti o linee ad una distanza di al massimo 0.1 mm.

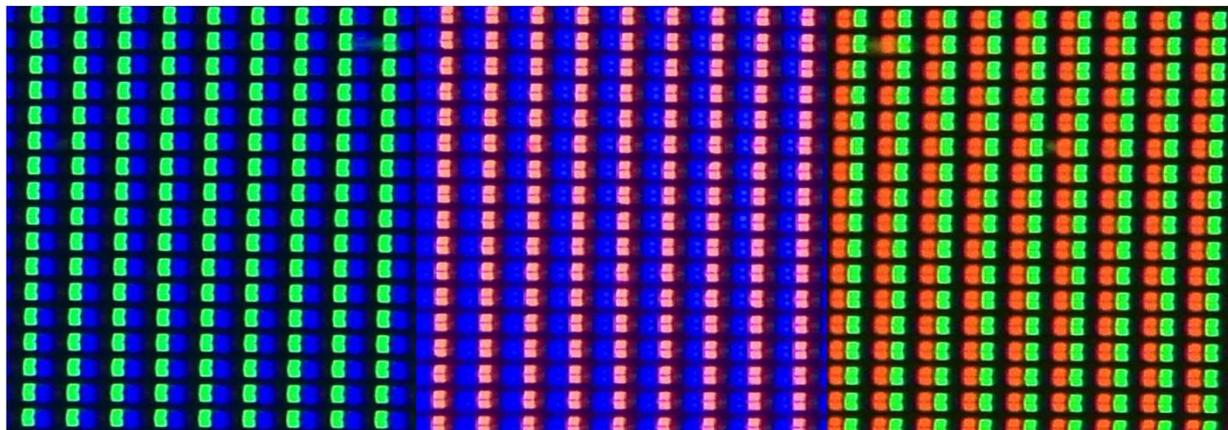
Quanto grande è un pixel?

Stima semplice:

$$300 \text{ mm} / 3000 \text{ px} = 0.1 \text{ mm} / \text{px}$$

In ogni pixel ci sono 3 elementi colorati, quindi essi sono a una distanza di meno di 0.03 mm l'uno dall'altro:

Non possiamo distinguerli! la retina li interpreta come un unico stimolo.



Risoluzione dell'occhio umano (temporale)

La risoluzione temporale dell'occhio umano varia molto con le condizioni di illuminazione, e col tipo di stimolo, ma è generalmente compresa tra alcuni HZ e alcune decine di Hz.

Per quanto riguarda gli stimoli di colore, si ritiene generalmente che stimoli distanziati nel tempo meno di 0.1 s (10 Hz) siano percepiti come lo stesso stimolo, e sommati dalla retina.

Stimoli di colore che variano nel tempo più velocemente di questa soglia, non possono essere distinti.

Disco di Newton

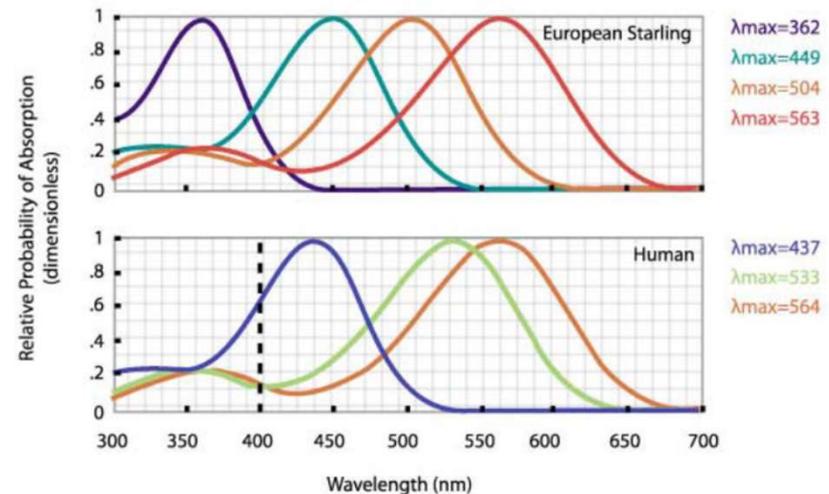


*Il disco di Newton
quando gira sufficientemente veloce
appare bianco (o biancastro)
perché gli stimoli di colore
si sommano nella retina*

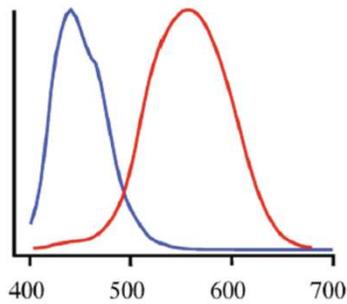
Tetracromatismo



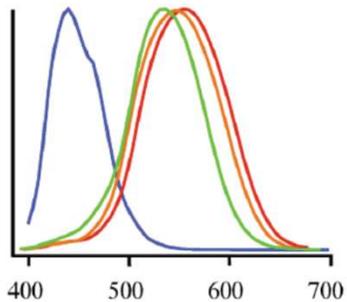
Tra gli animali si possono trovare diversi casi di tetracromatismo. Lo storno europeo ha quattro diversi tipi di coni, con sensibilità ben differenziate in frequenza. E' difficile capire con esattezza quale sia la percezione dei colori dello storno, ma è molto probabile che non sarebbe ben rappresentata da un modello di colore con tre colori primari.



Daltonismo e tetracromatismo negli umani



Sensibilità alle frequenze dei recettori per un umano con deuteranopia, la più comune forma di daltonismo (4-5% degli individui). Per queste persone, verde e magenta sono indistinguibili, e rosso e giallo appaiono tonalità diverse dello stesso colore (mancano i recettori per le frequenze intermedie)



Sensibilità alle frequenze dei recettori per un umano con tetracromatismo. La stima di quanti essi siano è incerta, perché non è una condizione medica. Queste persone hanno solitamente un tipo di recettori aggiuntivi a frequenze comprese tra il rosso e il verde, e, se i recettori sono funzionali (raramente), i soggetti mostrano la capacità di distinguere colori che appaiono identici alle altre persone.

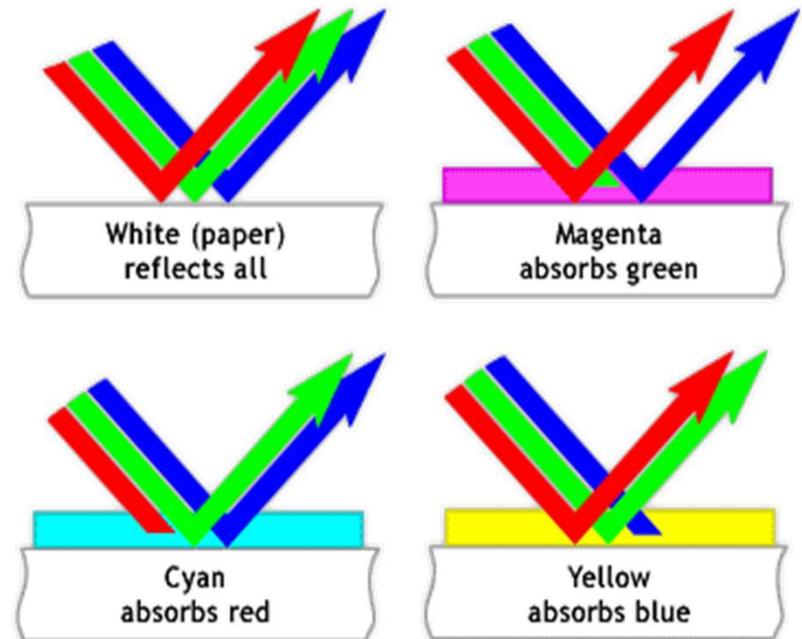
Il colore che noi percepiamo degli oggetti non è una loro proprietà intrinseca: ma dipende da diversi fattori:

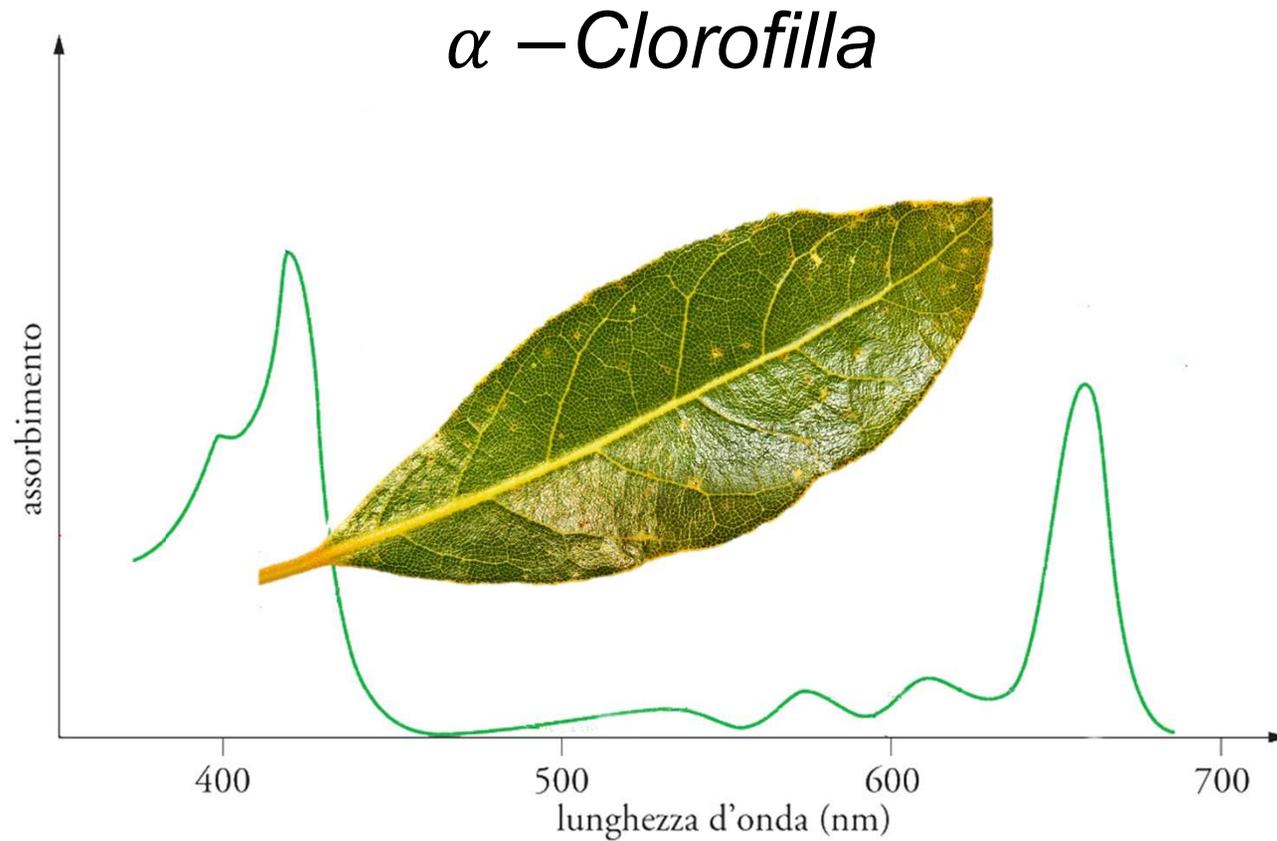
- Dal tipo di illuminazione cui sono sottoposti: luce bianca o colorata? E attenzione, non tutti i «bianchi» sono uguali;
- Dalla fisiologia dell'occhio umano e della sua comunicazione con il cervello, come abbiamo visto;
- **Dalle caratteristiche dell'oggetto di riflessione o assorbimento delle diverse componenti cromatiche della luce.**



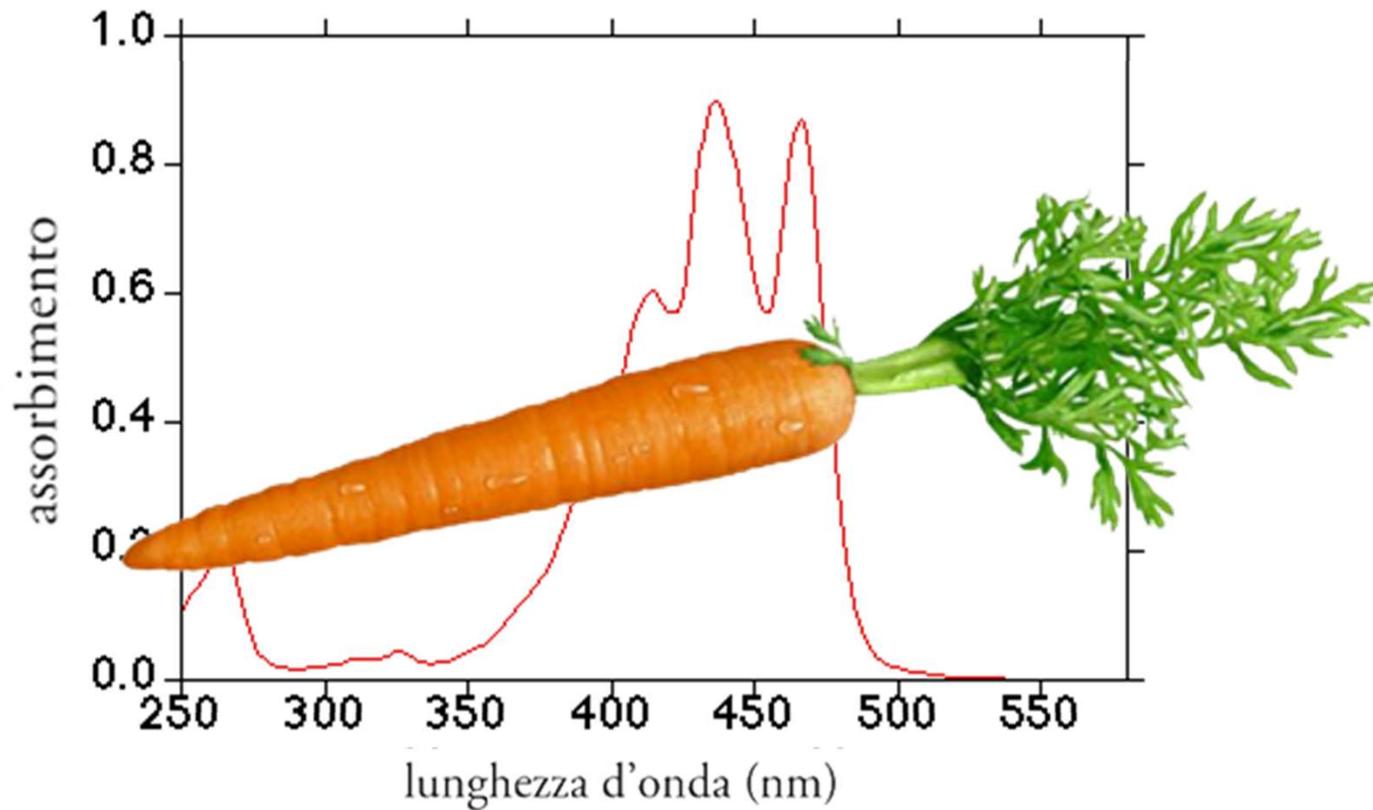
Il modello CMY si può considerare il complementare del modello RGB, nel senso che i suoi colori primari (Ciano, Magenta, Giallo) corrispondono a pigmenti di base che assorbono la luce corrispondente ad uno dei colori primari RGB, riflettendo gli altri due.

Combinando due pigmenti, si ottiene un pigmento che assorbe più luce, e quindi la sintesi cosiddetta sottrattiva tende a produrre colori più scuri per composizione, mentre la sintesi additiva tende a produrre colori più chiari.





β - Carotenoidi



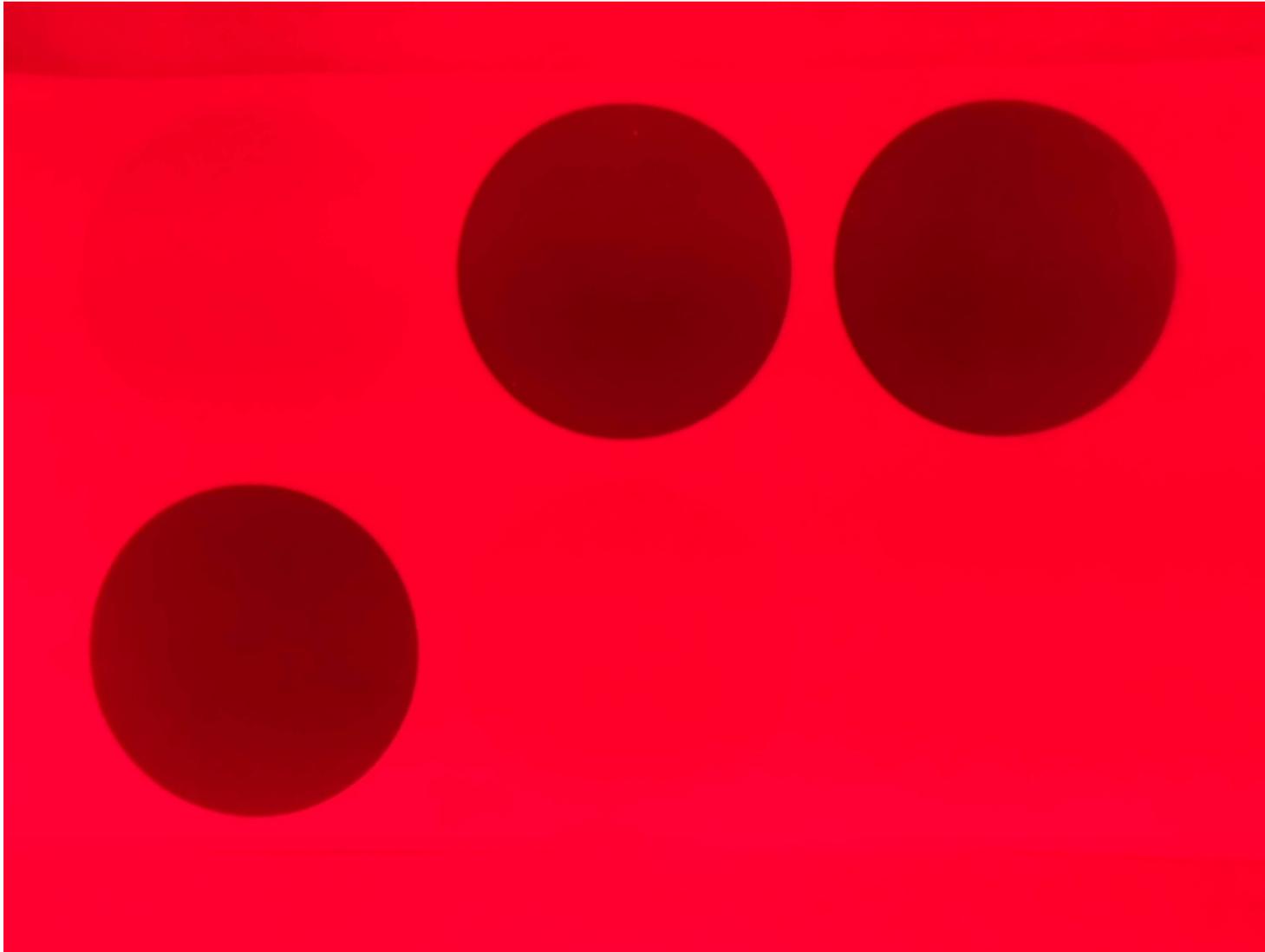
Attività POE: la scatola tricromatica



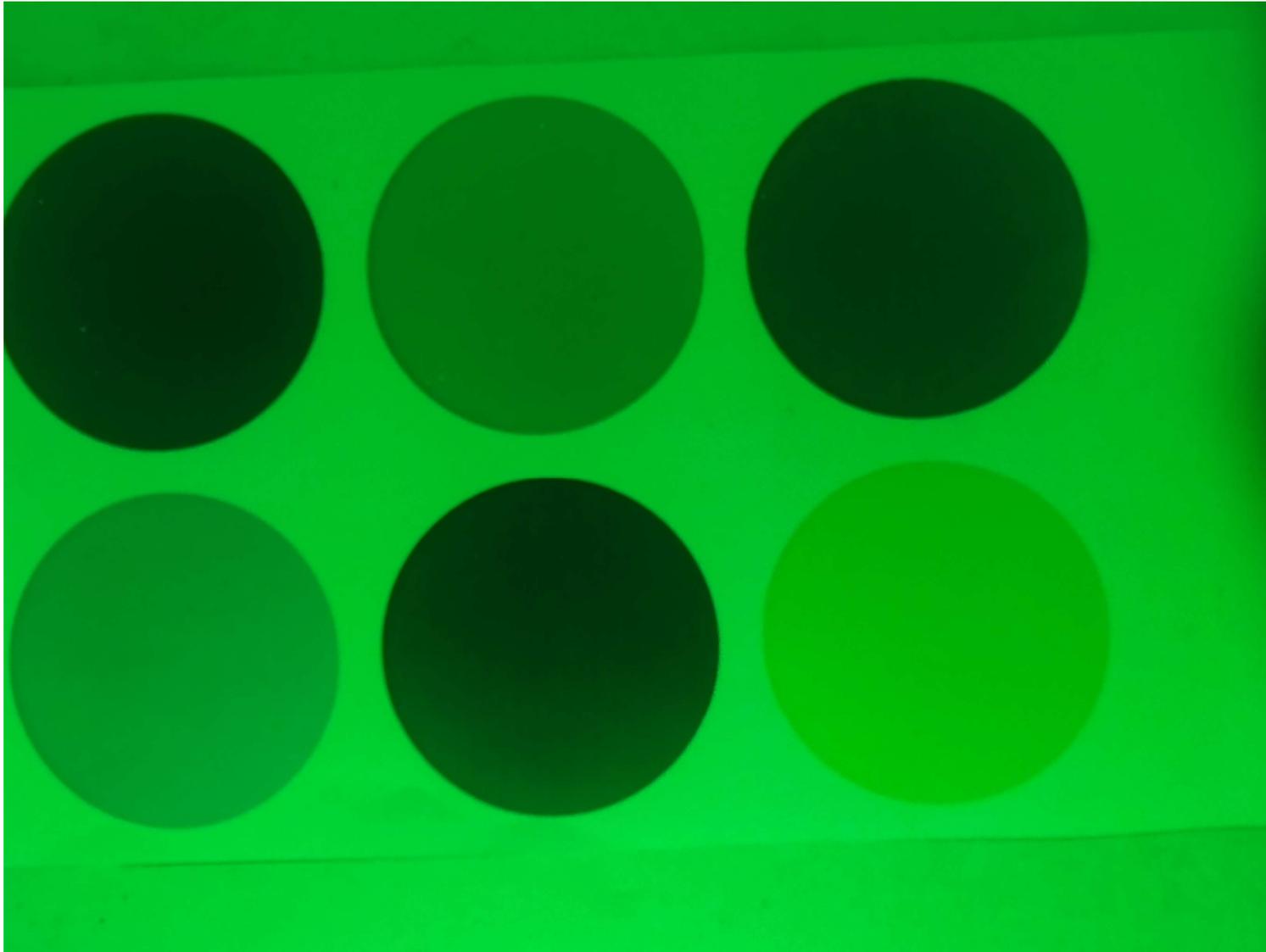
Cosa fotograferà la fotocamera se l'interno è illuminato con luce rossa?
Verde? Blu?

Attività che risulta molto stupefacente per gli studenti perché i risultati non corrispondono quasi mai alle loro previsioni

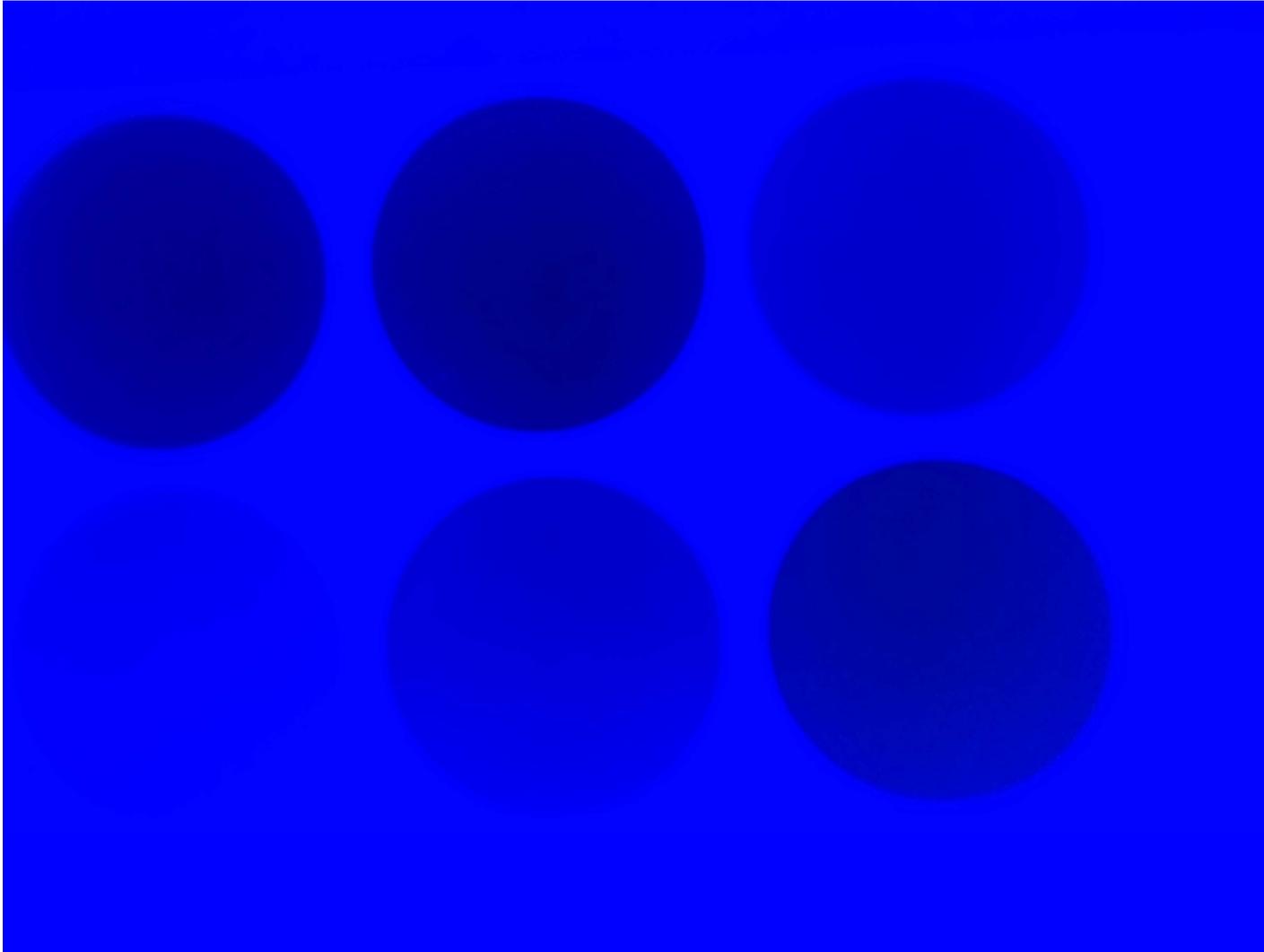
La scatola tricromatica: luce rossa



La scatola tricromatica: luce verde



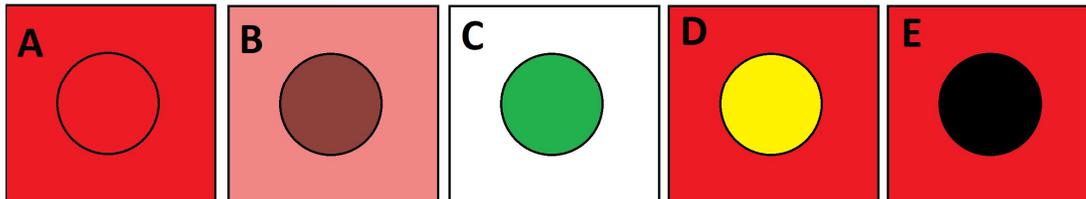
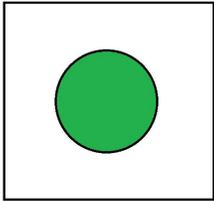
La scatola tricromatica: luce blu



La scatola tricromatica: transizione rosso-blu



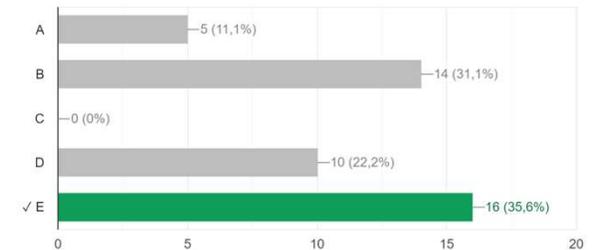
Significativi guadagni pre-post



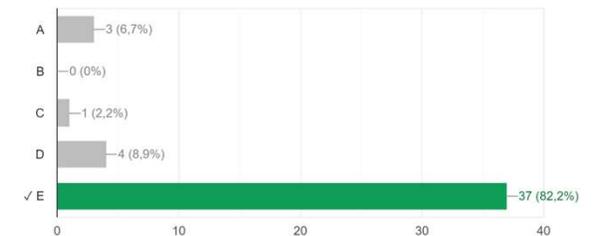
In una stanza illuminata da luce bianca, un telo ha l'aspetto mostrato nella parte in alto della figura (cerchio verde in un telo bianco). Se illumino la stanza con luce rossa, come apparirà il telo (opzioni nella parte bassa della figura)?

Pre-test (circa 36% risposte corrette)

7. In una stanza illuminata da luce bianca, un telo ha l'aspetto mostrato nella parte in alto della figura (cerchio verde in un telo bianco). Se illumino ...irà il telo (opzioni nella parte bassa della figura)?
16/45 risposte corrette



7. In una stanza illuminata da luce bianca, un telo ha l'aspetto mostrato nella parte in alto della figura (cerchio verde in un telo bianco). Se illumino ...irà il telo (opzioni nella parte bassa della figura)?
37/45 risposte corrette



Post-test (circa 82% risposte corrette)

Il problema dell'illuminazione con luci colorate è molto difficile per gli studenti, in quanto essi tendono ad interpretarlo attraverso con le stesse regole che valgono per i pigmenti.

In realtà la sua interpretazione richiede la conoscenza delle basi del modello sottrattivo, ma l'illuminazione con luce colorata va considerato un problema a se stante, diverso sia dalla sovrapposizione di luci di diverso colore, sia dal mescolamento di pigmenti.

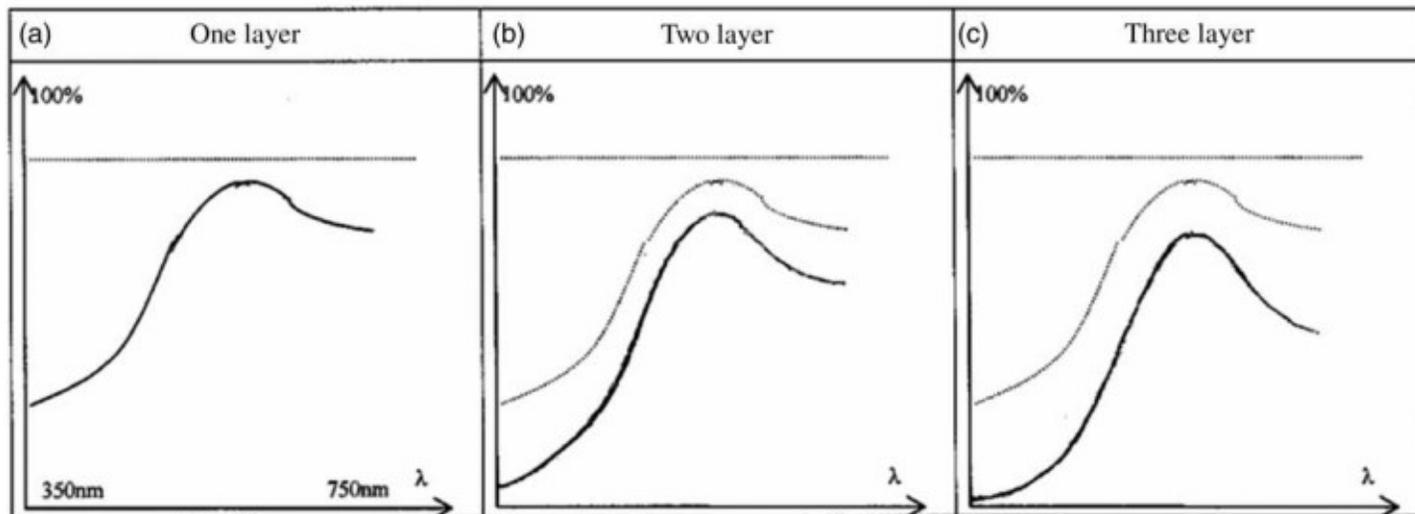
L'esperimento mette in evidenza anche alcuni difetti del modello puramente sottrattivo: in effetti l'effetto di annerimento delle macchie che (in teoria) non riflettono il colore dell'illuminazione appare molto più marcato per la luce rossa che per quelle verdi e blu.

in realtà nessun pigmento «sottrae» completamente un colore alla riflessione, ma lo attenua a diversi gradi. Aggiungendo altri strati di pigmento, si possono ottenere ulteriori attenuazioni.

Modello moltiplicativo del colore

La questione è stata investigata approfonditamente da Laurence Viennot, che propose e sperimentò un *modello moltiplicativo* del colore, valido per il mescolamento di pigmenti. Il modello è basato sulla moltiplicazione degli spettri di assorbimento (modello realistico per l'assorbimento dei pigmenti) che potrebbe costituire un interessante approfondimento per la scuola secondaria.

Il modello dà ragione di alcuni fatti che quello sottrattivo non spiega, come i diversi effetti che si ottengono con strati più o meno spessi di pigmento, o il fatto che una luce laser rossa rimanga visibile anche se lo schermo è costituito da una superficie nera.



In recenti sperimentazioni abbiamo adottato una sequenza di insegnamento apprendimento comprendente i seguenti passi:

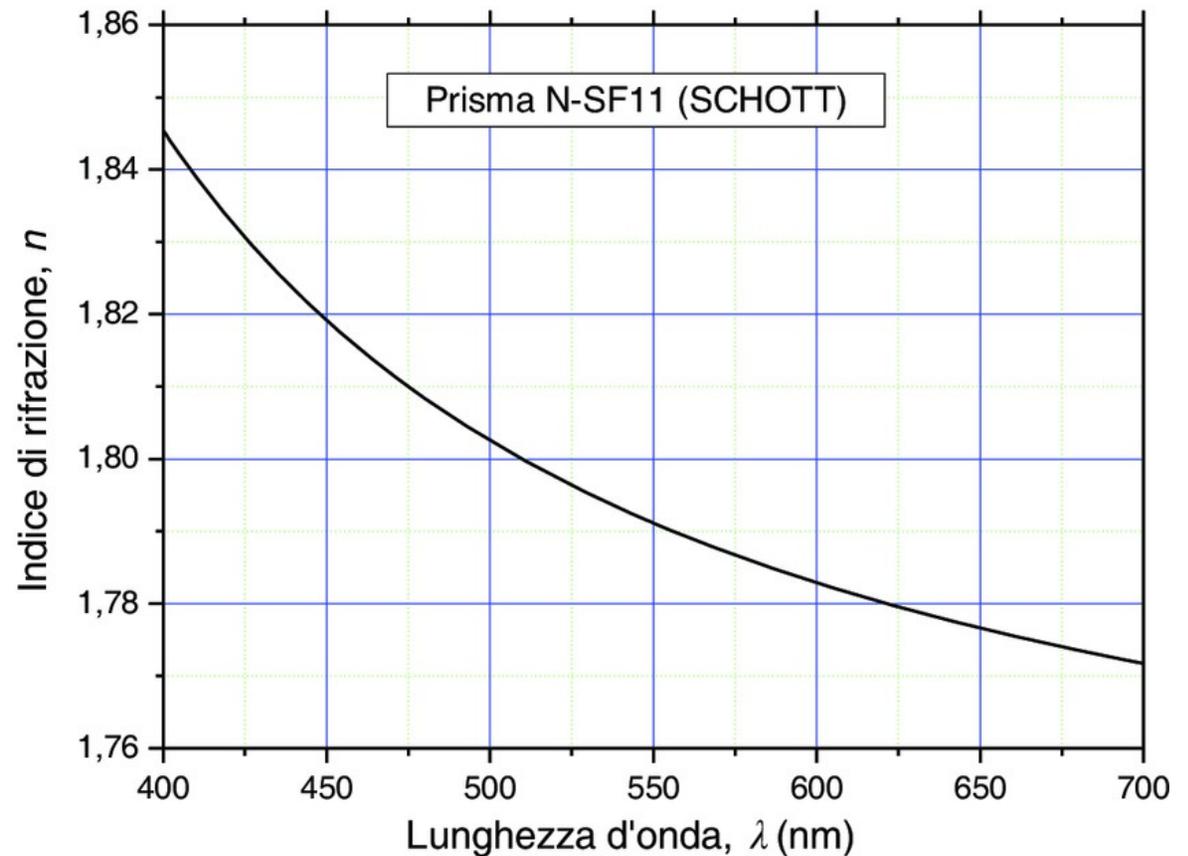
1. Tutorial sul meccanismo fisiologico della visione dei colori e sulla produzione delle sensazioni di colore nel cervello,
2. Revisione o introduzione dei principali elementi della teoria ondulatoria della luce, e introduzione allo spettro della luce visibile
3. Costruzione guidata da parte degli studenti di uno spettroscopio basato su smartphone con materiali poveri,
4. Esperimenti sulla sintesi additiva (esperimenti con torce colorate, distinguere sorgenti con lo spettroscopio anche per rafforzare la comprensione del meccanismo della visione umana)
5. Esperimenti sulla sintesi sottrattiva (filtri colorati) e sul ruolo della luce illuminante (scatola tricromatica)
6. Lo spettro della luce oltre il visibile (esperimenti con termocamere a infrarossi)

Il prisma: esperimento e simulazione



Il prisma

Il prisma può essere compreso con pochi elementi in più rispetto a ciò che gli studenti già sanno: è sufficiente ammettere che alcuni materiali, tra cui il vetro, hanno un indice di rifrazione che non è uguale per tutte le lunghezze d'onda della luce, ma varia con la lunghezza d'onda.

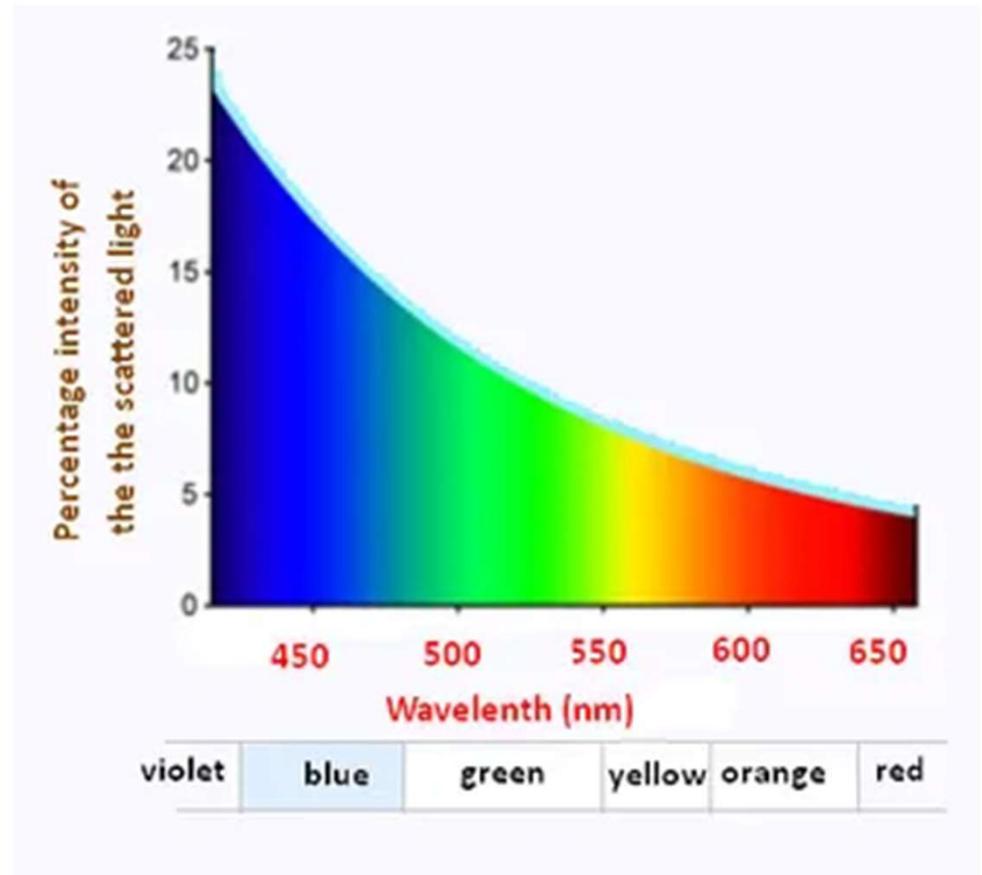


Perché il cielo è blu?

Vi sono altri casi in cui il comportamento di componenti della luce di diversa lunghezza d'onda può differire: una di queste è il cosiddetto «scattering di Rayleigh» che è responsabile del fatto che il cielo appaia azzurro, ma al tramonto diventi rosso.

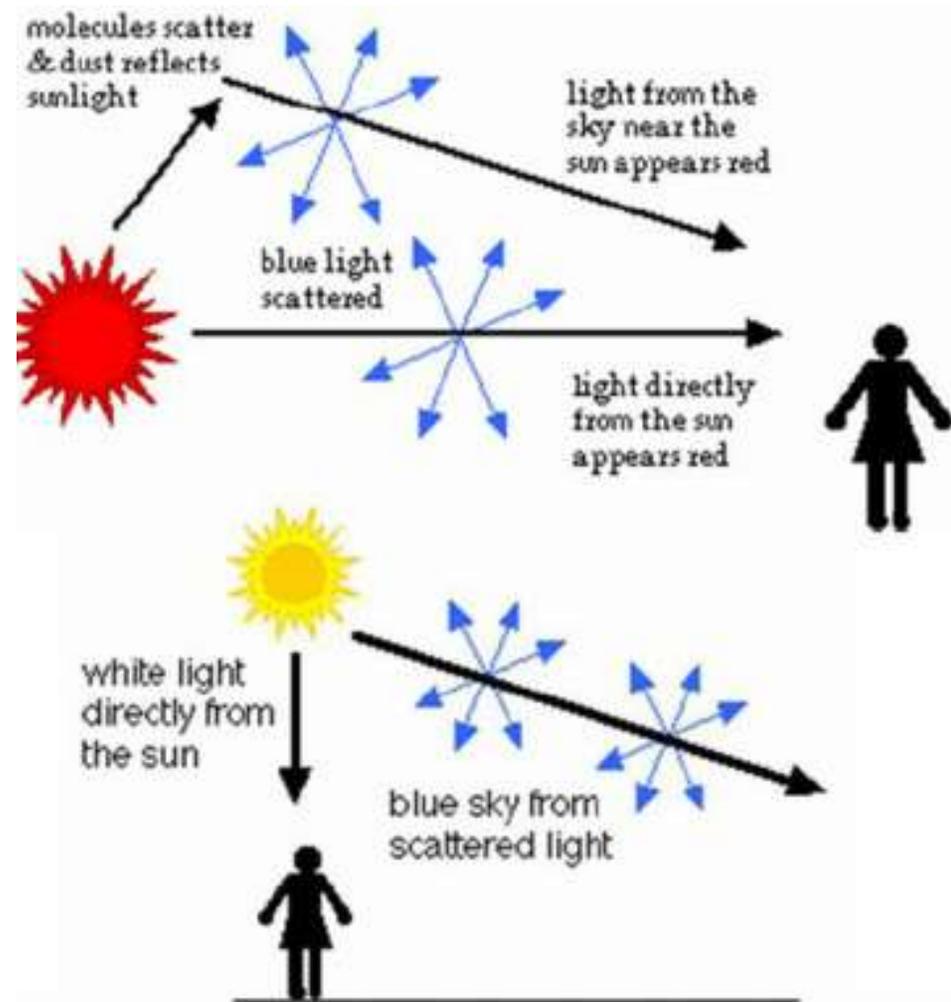
La luce che entra nell'atmosfera subisce deviazioni con una frequenza proporzionale a

$$I = \frac{\text{constant}}{\lambda^4}$$



Perché il cielo è blu?

Il sole stesso, se guardato direttamente, vira progressivamente al rosso all'approssimarsi del tramonto, perché la luce del sole, per giungere all'occhio, deve attraversare uno strato più spesso di atmosfera.



Costruzione di uno spettroscopio basato su smartphone



Reticolo di diffrazione

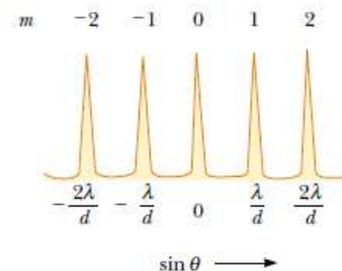
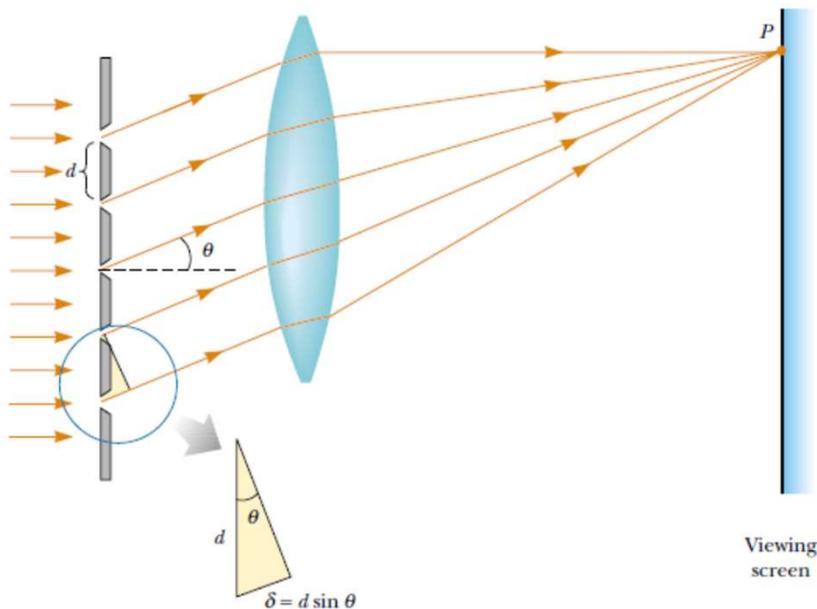


Figure 38.19 Intensity versus $\sin \theta$ for a diffraction grating. The zeroth-, first-, and second-order maxima are shown.

Condition for interference maxima for a grating

$$d \sin \theta = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$m \lambda = d (\sin(\alpha) + \sin(\beta))$$

Where

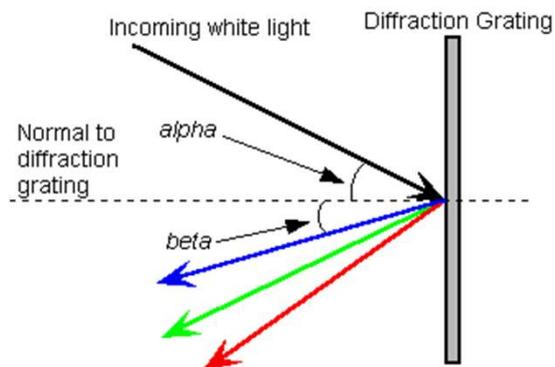
$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ (spectral order)

λ is the wavelength of light (nm)

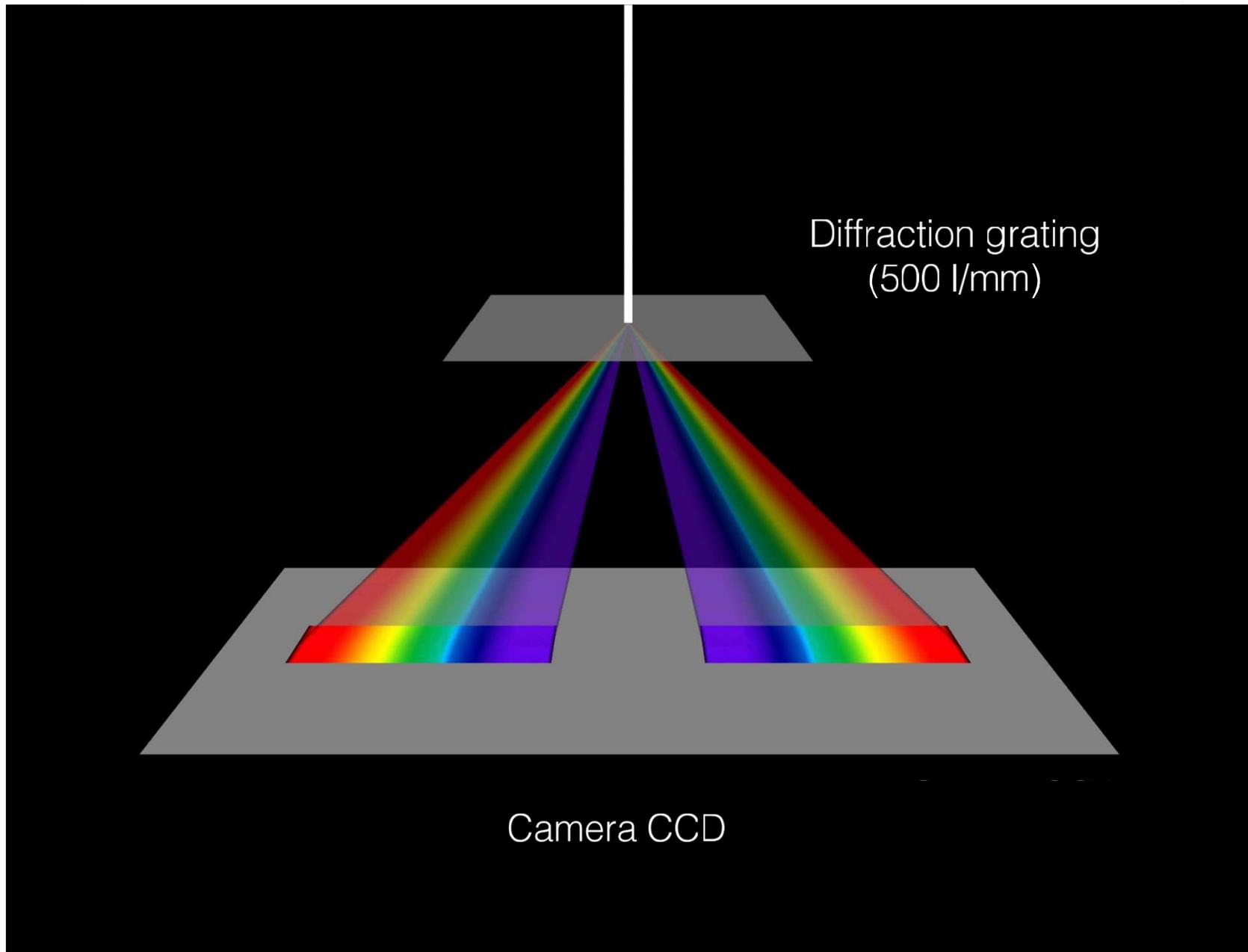
α is the incidence angle

β is the diffraction angle

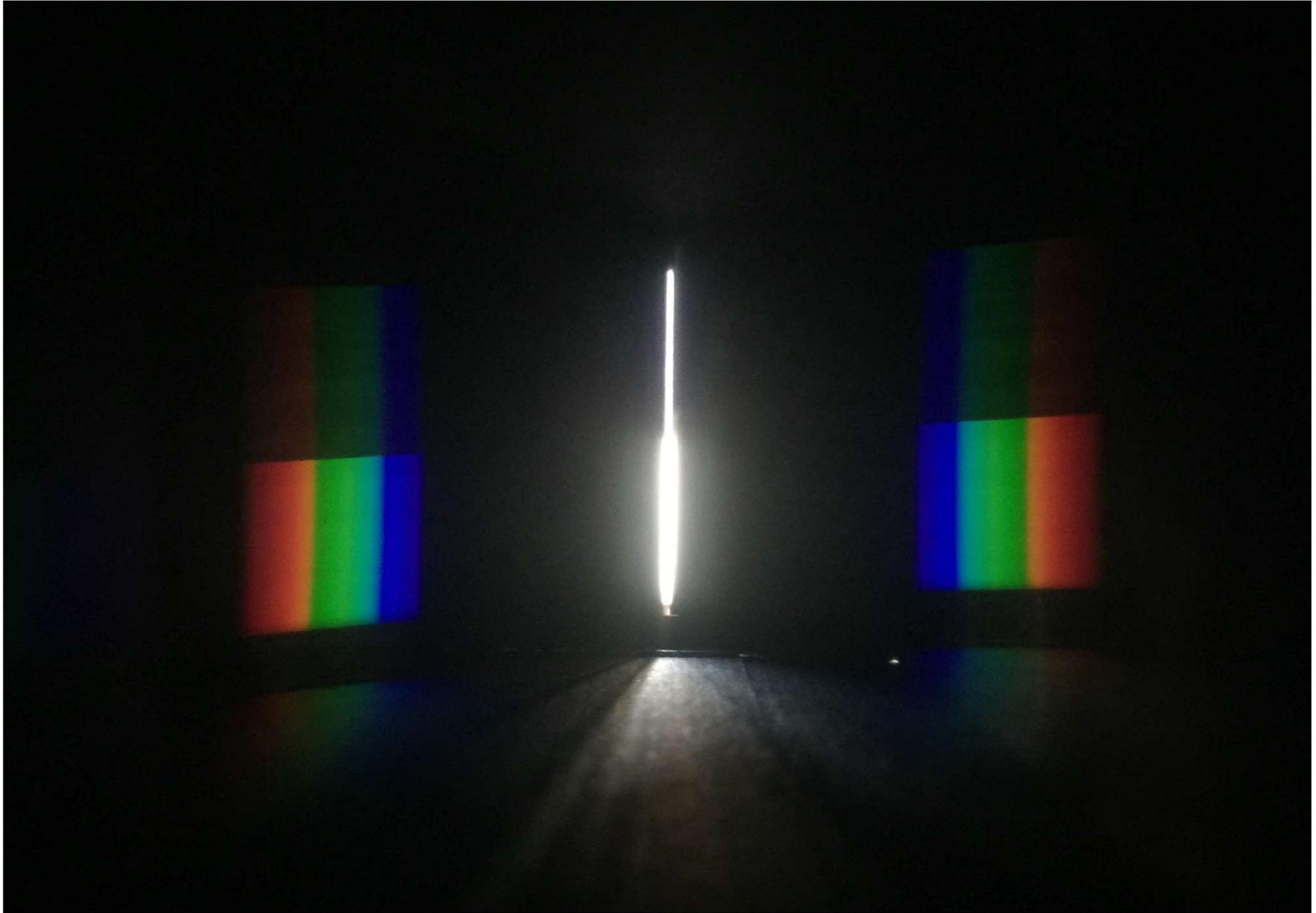
d is grating separation (nm)



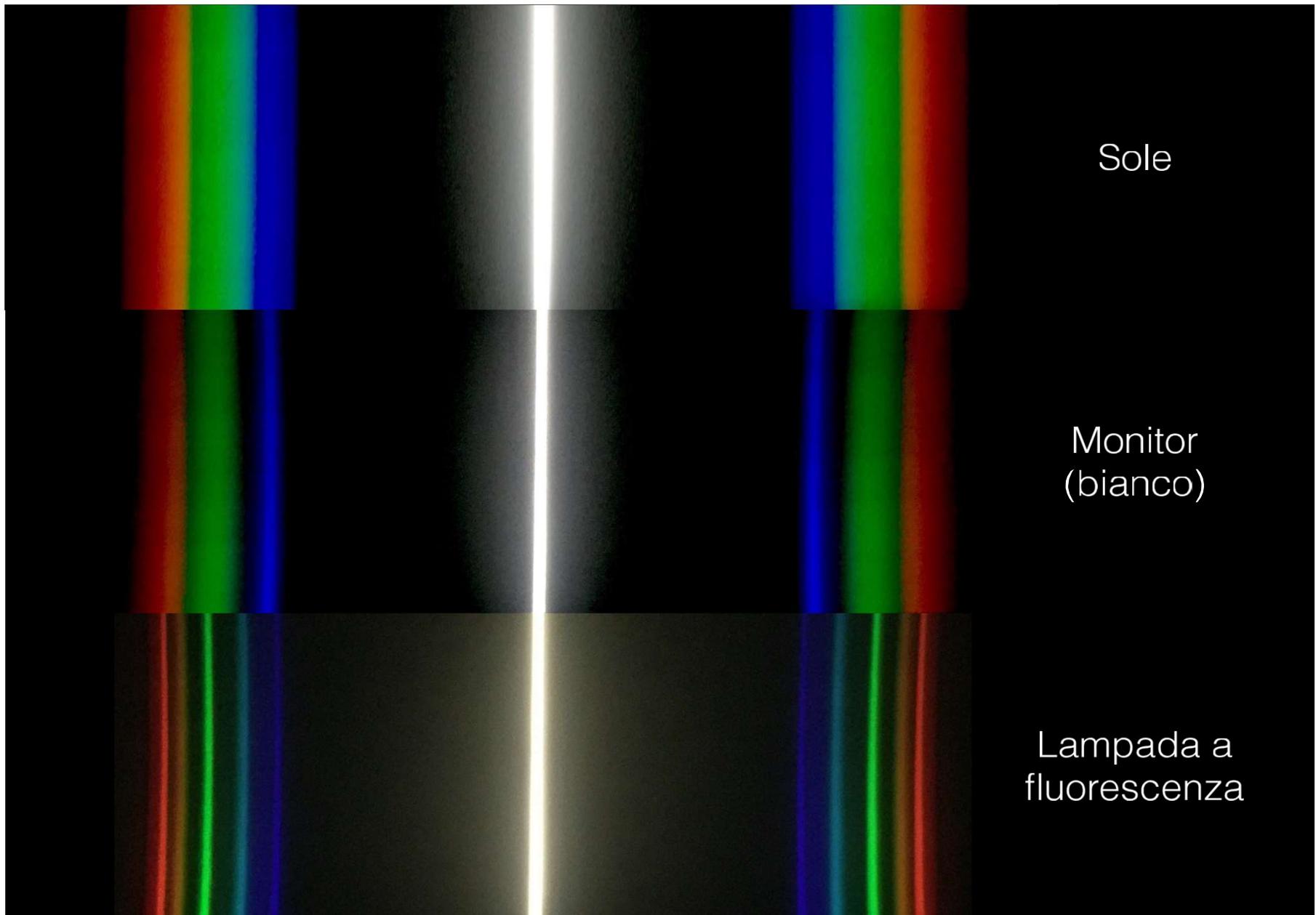
Costruzione di uno spettroscopio basato su smartphone



Costruzione di uno spettroscopio basato su smartphone

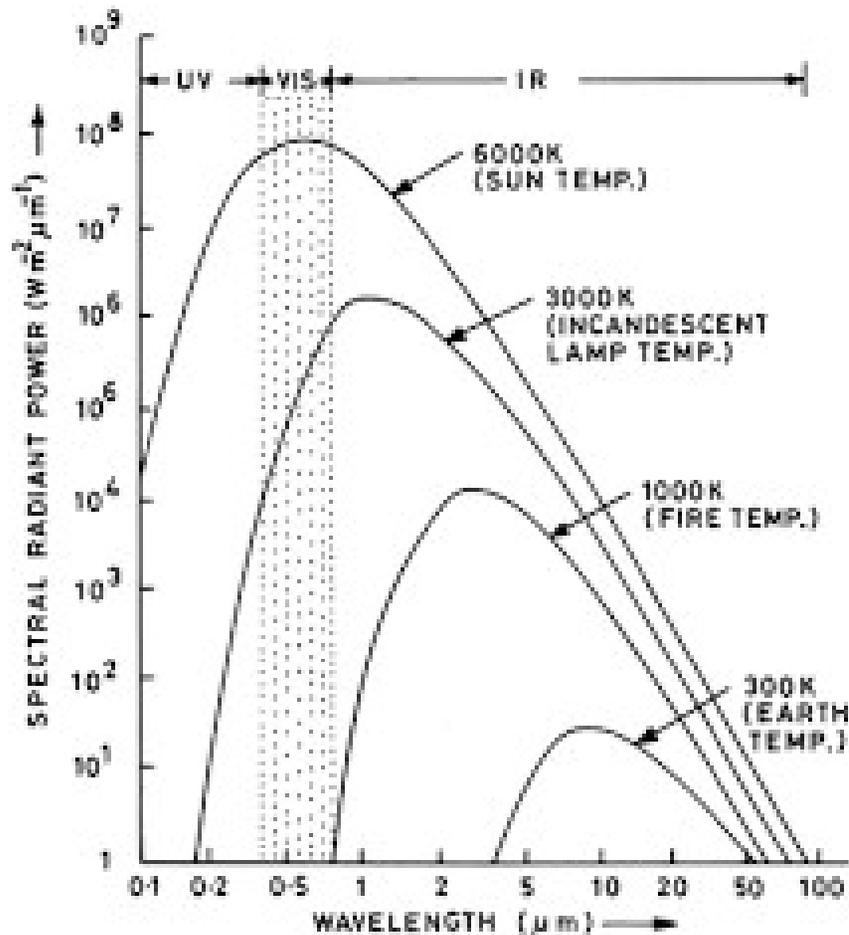


Differenziare luce bianca da diverse sorgenti

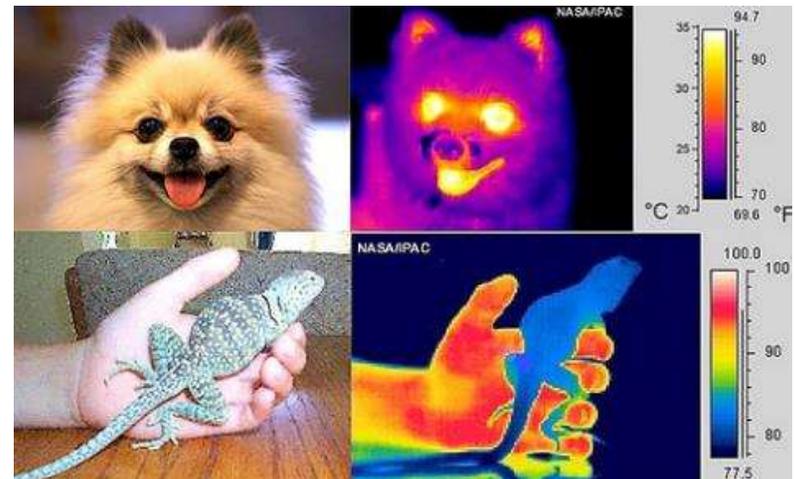


- Distinzione tra colori spettrali e colori composti che appaiono simili o identici all'occhio umano (es. luce gialla da lampada al sodio / LED giallo vs. luce gialla prodotta da LED RG).
- Studio dello spettro di trasmissione dei pigmenti (Rosi, T., Malgieri, M., Onorato, P., & Oss, S. (2016). What are we looking at when we say magenta? Quantitative measurements of RGB and CMYK colours with a homemade spectrophotometer. *European Journal of Physics*, 37(6), 065301.)
- Studio degli inchiostri fluorescenti (Onorato, P., Malgieri, M., & De Ambrosis, A. (2015). Quantitative analysis of transmittance and photoluminescence using a low cost apparatus. *European Journal of Physics*, 37(1), 015301)

Lo spettro elettromagnetico oltre il visibile: attività con termocamere



Si sta sviluppando una mole considerevole di letteratura sull'utilizzo di termocamere nell'insegnamento. Oggi disponibili come periferiche USB per lo smartphone a costi relativamente ridotti, possono essere usate per favorire la comprensione di concetti relativi all'energia, alla trasmissione del calore, all'attrito, all'assorbimento selettivo della luce in funzione della lunghezza d'onda...



Grazie per l'attenzione!