

LÀMELE: UNA INSTALLAZIONE DIDASCALICA
SULLA LUCE E LA PERCEZIONE DEI COLORI

che cosa fare: gli esperimenti

Osservate i fogli trasparenti nella luce ambiente e con sorgenti di luce bianca, sia inclinando la sorgente che muovendovi rispetto ad essa, fino a rendervi conto che i colori mutano con il mutare della direzione della luce. E questo avviene sia osservando la luce riflessa (sorgente ed osservatore dalla stessa parte del foglio), che la luce trasmessa (sorgente ed osservatore da parti opposte del foglio). Provate ora con luci LED colorate fino a rendervi conto che in questo caso varia solo l'intensità della luce e non il suo colore. Infine provando con luci laser di diverso colore si verifica la proprietà del materiale di riflettere e trasmettere quantità molto diverse di luce a seconda della direzione: infatti per certe inclinazioni il raggio riflesso quasi sparisce, e per altre è invece quello trasmesso che si attenua fino a diventare evanescente. E cambiando luce laser questi angoli limite, che non sarebbe difficile misurare, cambiano. Non trascurate di provare questi esperimenti anche con il foglio speculare, che osservato da vicino mostra anch'esso la sua natura trasparente, molto simile agli altri due. Ed infatti vi renderete conto che la sua funzione speculare deriva dalla esaltazione del potere riflettente per quasi tutti i colori.

Osservate ora i pannelli, che sono fatti degli stessi due materiali. Muovetevi parallelamente ad essi fino a rendervi conto che i colori mutano con il mutare dell'angolo di osservazione, in modo simmetrico dalla visione diretta frontale a quella laterale. Notate la differenza tra i pannelli montati su fondo nero e quelli su fondo bianco, e confrontatela con la differenza dei colori tra i pannelli montati sullo stesso fondo. Ma soprattutto osservate che di quelli montati su fondo specchio risulta difficile rendersi conto della presenza di questi materiali.

I fenomeni osservati non sono prerogativa dei materiali utilizzati per l'installazione; infatti fenomeni analoghi avvengono talvolta con lamine sottili trasparenti, come per esempio nel caso delle bolle di sapone quando appaiono iridescenti. Ma vedere sfumature di colore diverse a seconda del punto di vista è certamente fatto apposta, cioè in conseguenza della struttura interna, come accade per esempio con la luce riflessa da comuni CD, ma anche trasmessa da ciò che rimane del CD se delicatamente togliete la pellicola riflettente, e naturalmente distruggete tutti i dati ivi contenuti.

che cosa pensare: i modelli

Gli esperimenti sono una dimostrazione pratica che conferma il modello intuitivo di luce bianca come sostanza composta da sostanze più semplici o pure, cioè i colori; ma lo arricchisce facendo letteralmente vedere come il numero dei possibili colori sia costituito da una infinità continua di componenti, e non

dai sette colori dell'arcobaleno dello storico esperimento di Newton (e chi mai è riuscito a distinguere l'indaco dal viola?!). Il modello corpuscolare della luce, più recente di quello ondulatorio è molto utile per descrivere il sistema fisico luce in termini semplici: basta restituire fisicità all'antico concetto geometrico di raggio attraverso la moderna invenzione del laser. Quindi la particolarità della luce laser è la sua elementarità: cioè non solo un unico colore, ma anche un'unica direzione. Anche le luci LED sono luci pure, ma diffuse, cioè con molte direzioni. Il colore di entrambe queste sorgenti non può essere variato dall'azione del foglio, ma dal momento che alcune direzioni vengono soppresse, l'intensità diminuisce. Gli effetti cromatici dimostrati dai fogli sono dunque prerogativa delle luci composte e diffuse come la comune luce bianca.

Scopo degli esperimenti è però principalmente quello di familiarizzare il visitatore con la complessità del mondo dei colori, sia dal punto di vista percettivo che linguistico; pensate infatti alla difficoltà di descrivere, per esempio a parole, tutti i colori che vedete, cioè al problema di rendere quantitativo un campo che sembra così qualitativo come quello dei colori. Il fatto che qualsiasi computer risolva con estrema semplicità il problema di produrre qualsiasi colore da una mescolanza di tre scelti come base (RGB), non deve nascondere la difficoltà principale, che è quella di separare la fisica dalla fisiologia. Mentre infatti la luce è forse il sistema fisico più semplice e prevedibile esistente in natura, lo strumento naturale umano di percezione e misura della luce è straordinariamente complesso: pensate che il flusso di dati del canale visivo è di circa 100 Mbit/s e che quindi questa enorme quantità di dati rende obbligatorio per il cervello, che pure ha la capacità di contenere circa 10^{12} bit, di eliminare tutti i dati che riguardano la composizione della luce!

E proprio questo gli esperimenti dimostrano con grande semplicità, che ad una identica percezione di colore corrispondono una infinità continua di composizioni diverse: infatti la stessa luce composta bianca la vediamo separata in luce trasmessa di un colore e luce riflessa del colore così detto complementare, appunto perché riproduce la luce bianca originaria quando vengono rimiscolati, cosa che puntualmente avviene nell'esperimento dello specchio. Lo scopo dei pannelli è proprio quello di permettere l'osservazione separata della luce riflessa e della luce trasmessa. Lo schermo bianco diffonde la luce trasmessa che rimane l'unica visibile, mentre lo schermo nero la assorbe e lascia vedere solo la luce riflessa. I due fogli montati su fondo speculare hanno la funzione didattica del controesempio: cioè mostrano la sparizione del fenomeno dovuta al ricombinarsi di luce trasmessa e luce riflessa grazie alla fedeltà della riflessione speculare, e di conseguenza la correttezza della spiegazione.

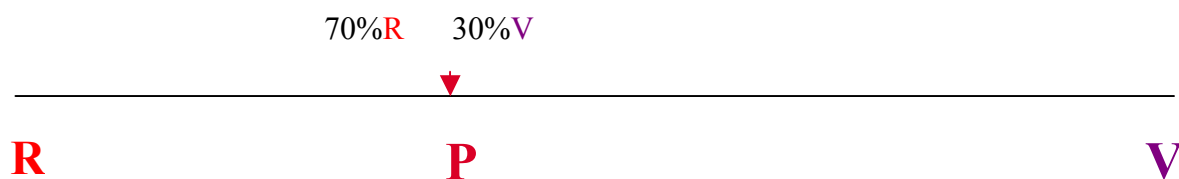
I colori puri visibili costituiscono un intervallo continuo caratterizzato dai valori di una grandezza che ha le dimensioni

fisiche di una lunghezza. Le regole quantitative dei fenomeni precedenti dipendono dalla relazione tra questa lunghezza, che per il rosso vale 0,8 millesimi di millimetro o micrometri μm , e per il viola 0,4 μm , e lo spessore della lamina (30 μm) che viene attraversato dalla luce. Quest'ultimo varia a seconda dell'angolo ed ecco spiegato a grandi linee il cambiamento dei colori; per chi è interessato a calcoli precisi, le parole chiave sono 'interferenza della luce da parte di lamine sottili'.

che cosa misurare: i colori

Come abbiamo osservato in precedenza, la semplice classificazione dei colori secondo la fisica non è sufficiente ad interpretare la complessità del mondo dei colori: infatti è molto comune vedere colori che non compaiono tra quelli dell'arcobaleno, e questi fogli, per determinati angoli in luce trasmessa, permettono di osservare molti dei così detti colori purpurei, che variano con continuità dal viola al rosso, appunto perché sono differenti mescolanze di questi due colori.

Richiamiamo brevemente il modo di rendere quantitativo il concetto di mescolanza di due sostanze, che evidentemente sarà la base per misurare la percezione di colore, proprio con l'esempio della due sostanze Rosso e Viola. Prendiamo un segmento che rappresenta tutte le possibili mescolanze nel modo seguente: ad una estremità abbiamo puro Rosso 100% di rosso e 0% di viola, all'altra puro Viola 100% di viola e 0% di rosso. Un punto intermedio rappresenta il colore Purpureo composto dalle percentuali che si leggono su questa doppia scala (nelle coordinate di colore RGB il Rosso vale (256,0,0), il Viola (256,0,256) ed il colore Purpureo indicato in figura (218,0,38).



Come mettere in ordine i colori del mondo reale che come abbiamo visto si rifiutano di essere messi in fila secondo la fisica semplicemente dal rosso al viola? Se andiamo con la memoria alle scatole di matite colorate, il criterio era genericamente dal più chiaro al più scuro. Questa semplice idea va precisata distinguendola in tre caratteristiche distinte della luce, e nel linguaggio specializzato l'insieme di tutte le luci visibili (lo spazio dei colori) viene descritto come uno spazio tridimensionale.

La prima di queste caratteristiche è la quantità di luce (numero di porzioni elementari o quanti di luce per i fisici, luminosità o intensità della luce per tutti gli altri), ed è facile da capire. Essa descrive vari grigi tra le due situazioni estreme del buio assenza di luce (nero), che rende tutti i gatti appunto grigi, alla massima quantità di luce sopportabile, abbagliante, bianco, che ugualmente non permette di distinguere i colori.

La seconda è quella scoperta da Newton, la tonalità del colore, che nel passaggio dalla fisica alla visione diventa una variabile ciclica, cioè l'intervallo lineare dell'arcobaleno si deforma e si chiude per tenere conto di tutti i colori che passano con continuità dal viola al rosso.

Il terzo compito della misura del colore è descrivere in quali proporzioni ogni luce sia composta di luci più pure, cioè dei colori. Per la disperazione degli insegnanti (e dei loro allievi) invece di colore puro e mescolanze si deve dire colore saturo e colori non saturi. Ma completamente saturo è il colore di una luce composta solo di quel colore, non importa se debole o intensa : l'esempio di luce pura e quindi satura è la luce laser. Questa caratteristica descrive quindi le situazioni intermedie tra il grigio, considerato ora come colore indistinto, ed un colore (per esempio rosso) che progressivamente diventa sempre più rosso fino al massimo del colore saturo.

Ora abbiamo capito perché è difficile descrivere un colore : le tre caratteristiche sono libere da vincoli, e quindi bisogna dare tre informazioni indipendenti per fissare un colore. Ecco le tre dimensioni dello spazio dei colori, allo stesso modo dello spazio ordinario, dove per individuare con buona precisione una posizione abbiamo bisogno di tre coordinate.

Quello che abbiamo descritto in modo semplificato ed imparato a conoscere nelle due stazioni computerizzate allestite a questo scopo, costituisce la base geometrica e matematica di uno dei codici che vengono usati per mettere ordine nel mondo dei colori. Esso usa tre variabili digitalizzate tra i valori 0 e 255, e dal nome di queste variabili si chiama HSL (H per hue tonalità di colore, S per saturazione, L per luminosità). La prima figura lo rappresenta facendo riferimento alla seconda esercitazione, quella intitolata: Come si fa a misurare un colore?

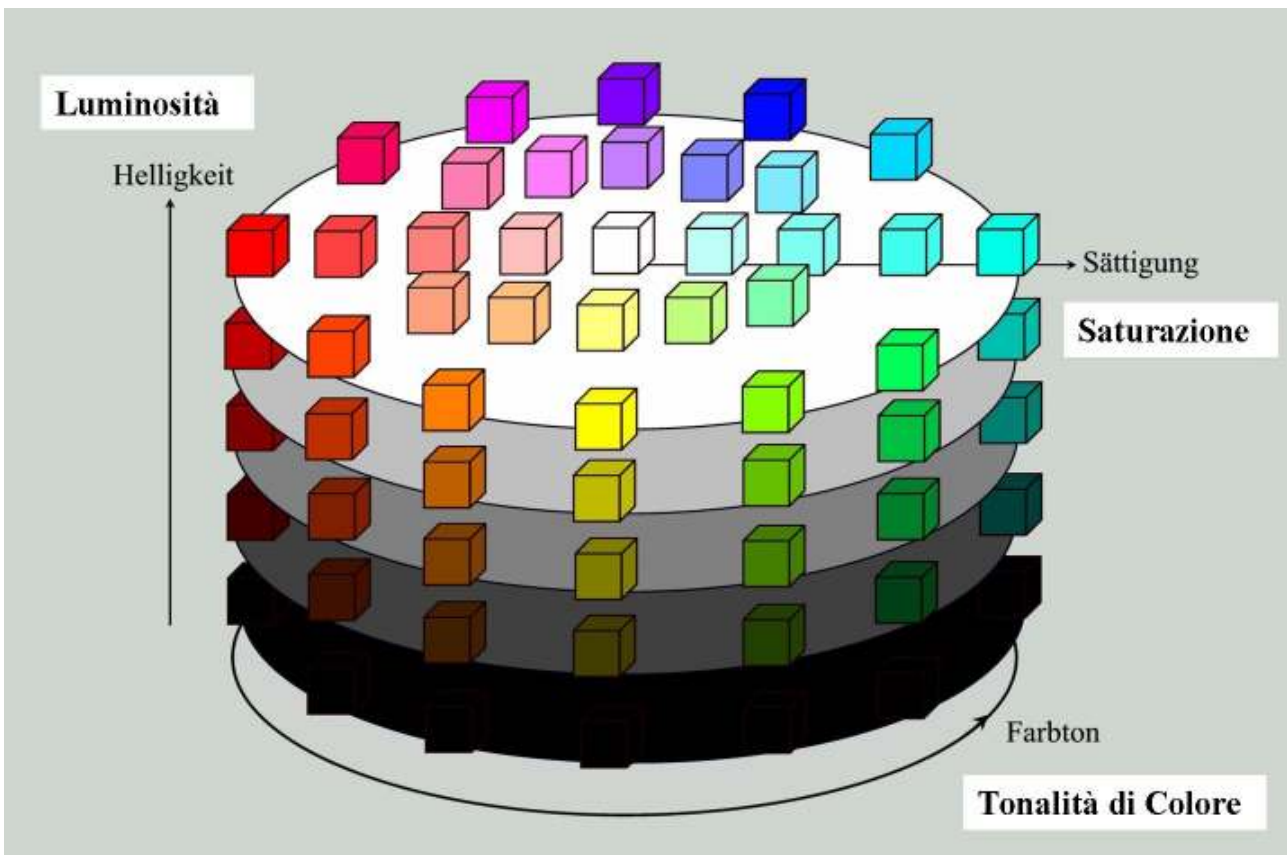
La realtà naturalmente è molto più complicata, e l'insieme di tutte le luci visibili, se facciamo corrispondere ad ogni punto una luce diversa, riempie con continuità un volume che non è un cilindro perfetto, ma quello che i matematici chiamano un cilindroide. Nella seconda figura viene rappresentata in modo metrico una sezione che contiene tutte le possibili luci di una data luminosità. Immaginando il resto del volume, alla sommità avremo una sezione di forma simile ma completamente bianca e sotto

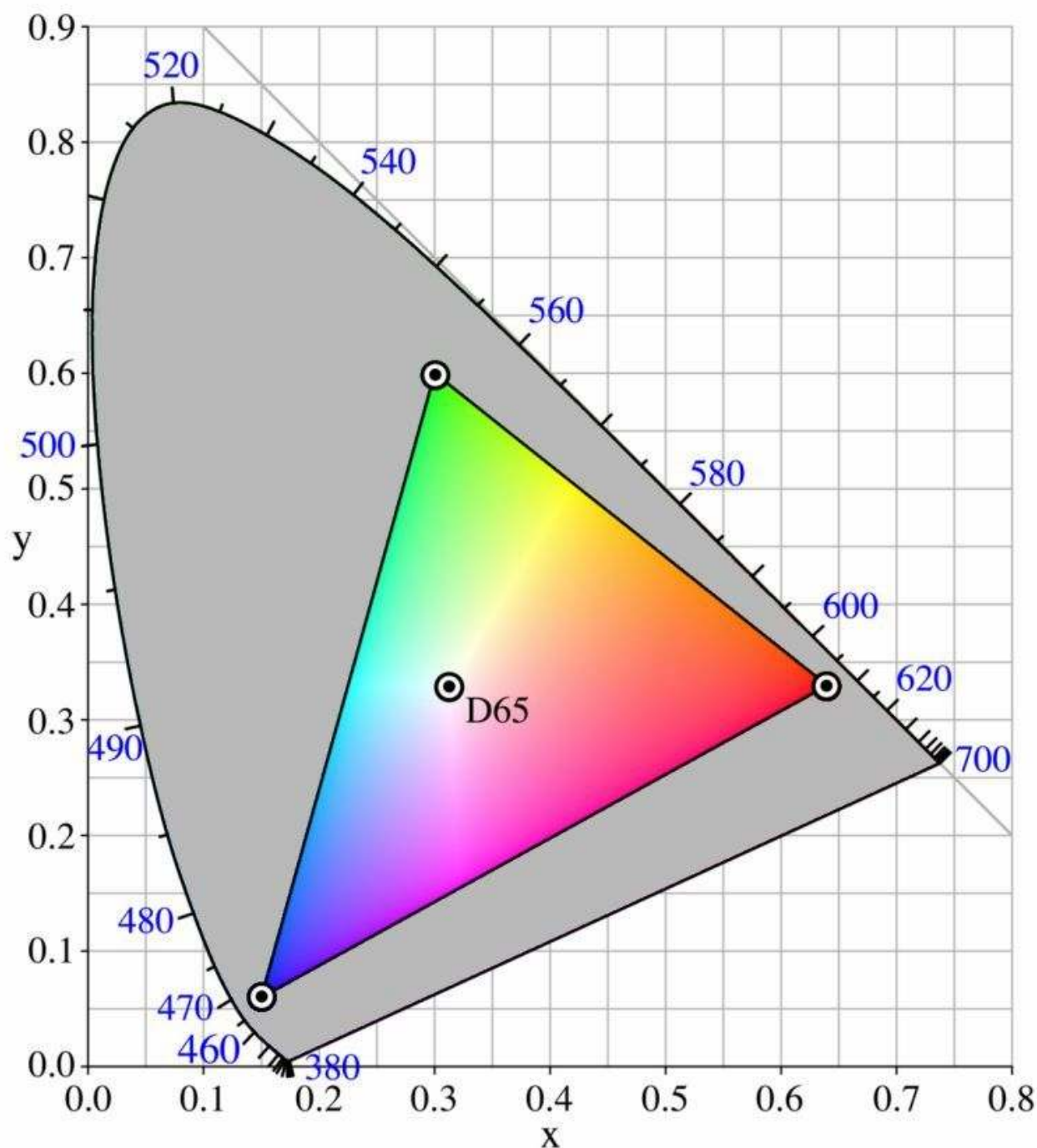
una base completamente nera (si anche il nero è un colore e può essere ottenuto mescolando colori luminosi!): questo cilindroide è dunque la forma cercata della scatola perfetta per mettere in ordine le nostre matite colorate.

A me piace chiamare questa figura la tavolozza dei colori della visione umana, ma essa semplicemente è il metro con il quale misuriamo i colori percepiti. I colori puri sono sul bordo curvo della figura, mentre la mescolanza che produce il colore di un punto può essere ottenuta in infiniti modi: basta prendere un qualsiasi segmento che contenga il punto considerato ed i suoi estremi sono i colori, le luci che mescolate nelle proporzioni indicate dalle distanze producono la medesima sensazione visiva di ogni altra scelta di estremi, ed anche ovviamente dei colori puri componenti, nel caso il segmento raggiunga i bordi.

Molte delle difficoltà didattiche derivano dal mancato uso del concetto di sistema di riferimento e del passaggio dall'uno all'altro quando si parla di colori.

A questo punto siamo in grado di fare l'esempio del codice RGB, che anch'esso usa tre variabili digitalizzate tra i valori 0 e 255 (R red rosso, G green verde, B blue blu) e che considera ogni colore una mescolanza di questi tre presi come riferimento, ed è quindi il codice che più intuitivamente si riferisce al modello di luce come sostanza. Nella medesima figura esso viene indicato con un triangolo, estensione del segmento, usato in precedenza per spiegare i colori purpurei, ad una terza sostanza di riferimento, come fanno sempre i chimici. E' chiaro che tutti i punti esterni al triangolo non saranno rappresentabili in questo sistema di coordinate e sarà necessario cambiare sistema di riferimento.





Queste note didattiche fanno riferimento al testo di fisica per le scuole secondarie inferiori "La Fisica di Karlsruhe", sviluppato presso la divisione didattica del Dipartimento di Fisica della omonima Università e scaricabile (in italiano) dal sito <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de>, in particolare ai capitoli 21 - 23 del volume secondo, ed inoltre all'articolo sullo Spazio Tridimensionale dei Colori, anch'esso scaricabile dal sito.

Per i programmi delle esercitazioni al computer e qualsiasi ulteriore informazione, rivolgetevi pure all'autore di queste note: Corrado Agnes, Dipartimento di Fisica, Politecnico di Torino, email corrado.agnes@polito.it