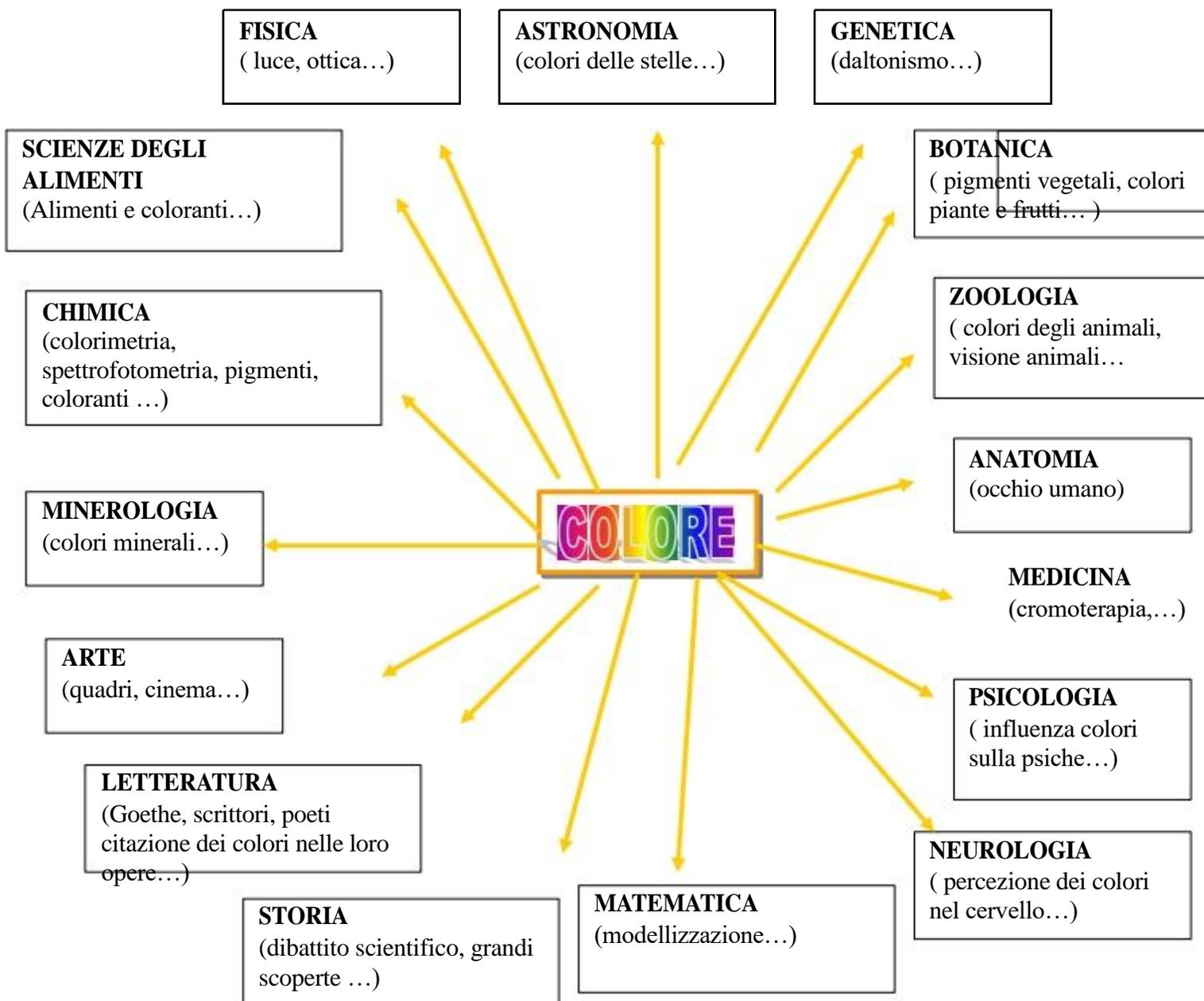


DIDATTICA DELLA FISICA E LABORATORIO

“MAGIA DEL COLORE”



CONTENUTI

1. La teoria del colore: da Newton a Maxwell

1

Al momento della creazione Nut, il cielo e Gheb, la terra, erano abbracciati così strettamente da impedire la nascita della vita. Ra, allora, mandò Shu, dio dell'arte e della luce, a separare i due sposi ed ebbe inizio la vita.

Questa leggenda mette subito in risalto che colore e luce sono legati, per spiegare la teoria del colore occorre riferirsi alla natura fisica della luce. Ma questi due aspetti sono correlati al processo di visione e come noi percepiamo i colori.

1.1 Gli esperimenti di Newton

Lo studio del colore ha interessato generazioni di studiosi. Da Platone a tutto il medioevo le ipotesi e le teorie si sono moltiplicate, ma il fondatore della moderna scienza del colore è considerato l'inglese **Isaac Newton** (1642-1727). Egli comincia gli esperimenti sui colori e la luce a soli 23 anni quando per sfuggire alla peste, si ritira nella casa di famiglia in campagna. Per i contemporanei di Newton i colori erano una proprietà degli oggetti: ad esempio un papavero era rosso anche al buio e la luce che è "bianca" non faceva altro che illuminarlo. Newton eseguì il suo celebre esperimento di **dispersione della luce** per dimostrare che il **colore non è una proprietà dei corpi, bensì è dovuta ad una proprietà della luce**.

Newton descrisse così il suo esperimento in *Opticks*: "...preparai un prisma triangolare... fatto buio nella stanza e praticato un foro nello sportello della finestra per lasciare passare una conveniente quantità di luce solare, collocai il mio prisma ove essa entrava in modo che potesse venir rifratta sulla parete opposta. Fu per me una vera meraviglia il poter contemplare i vividi ed intensi colori così ottenuti" (figura 1).

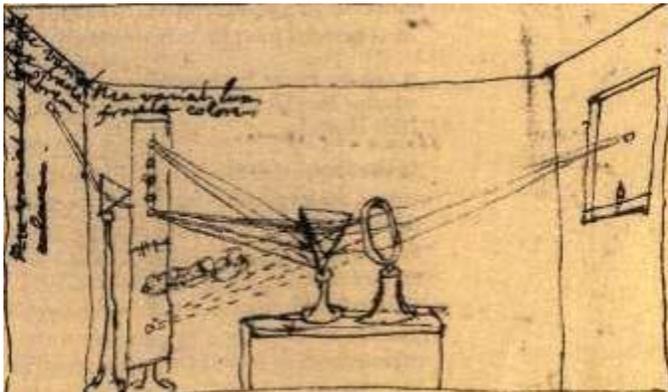


Figura 1. Disegno di Newton rappresentante l'esperimento sulla scomposizione e ricomposizione della luce.

Egli usando un prisma di vetro aveva scomposto la luce del sole (luce bianca) nel cosiddetto *spettro dell'iride* (vedi figura 2), dove i colori sfumavano dal rosso all'arancio, dall'arancio al giallo, poi al verde e all'azzurro fino all'indaco e al violetto. In questo modo si spiega il mistero dell'arcobaleno (che verrà descritto più avanti).

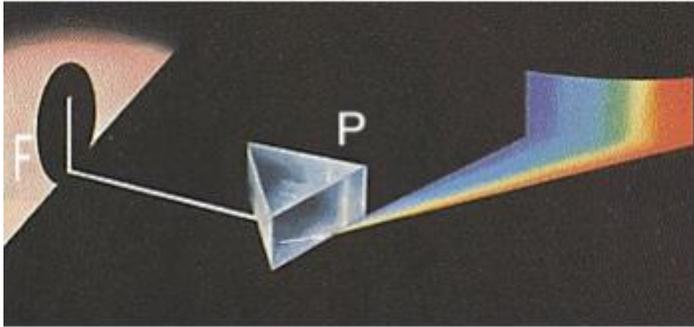


Figura 2. *Esperimento di Newton: prisma di cristallo che scompone un raggio di luce bianca*

Newton spiegava la formazione dello spettro ammettendo che tutti i colori erano già presenti nella luce “bianca” del sole prima della sua scomposizione. E per confermare la sua ipotesi Newton ideò un esperimento inverso al precedente e tale da produrre la “ricomposizione” dei colori. Newton otteneva prima la scomposizione della luce, poi usando una grande lente convergente, faceva convergere tutti i colori in un unico punto. I colori scomparivano e si otteneva di nuovo un raggio di luce bianca (figura 3).

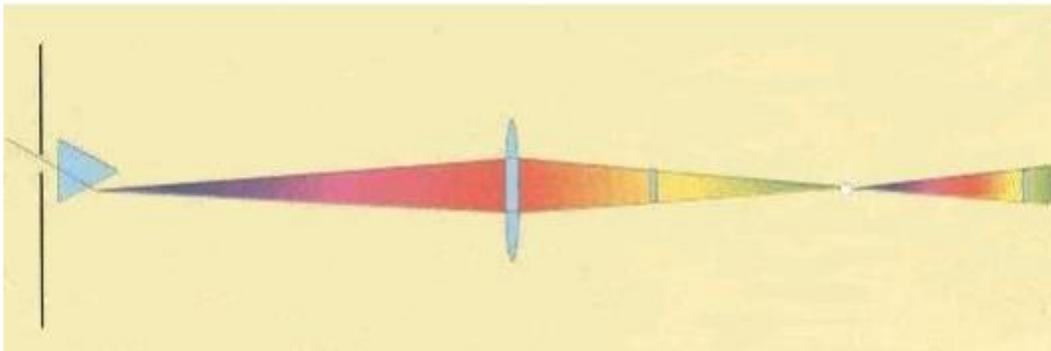


Figura 3. *Schematizzazione dell'esperimento di Newton per riottenere dalla luce scomposta la luce bianca, il punto bianco alla destra della lente è il punto in cui i colori dello spettro si ricompongono nella luce bianca*

Newton chiamò i colori derivanti dalla scomposizione della luce colori spettrali, e nel trattato *Optiks* scrive: *"il rosso, il giallo, il verde, l'azzurro e il violetto che tende al viola, insieme all'arancione, all'indaco, e a un'infinita varietà di gradazioni intermedie"*



Figura 4. *Spettro della luce visibile*

Newton distinse sette colori (figura 4), fra i quali anche l'indaco, compreso fra il violetto e l'azzurro. Ma perché pensò che i colori invece di sei dovevano essere sette? Probabilmente era suggestionato dalla convinzione che i fenomeni naturali fossero tutti riconducibili al numero sette considerato all'epoca un numero perfetto.

Supportato da una lunga serie di esperimenti Newton giunse a formulare la **teoria corpuscolare**. Per Newton i corpi luminosi emettevano dei corpuscoli immateriali. I corpuscoli erano una sorta di “atomi di luce” che, viaggiando in linea retta e a velocità iperbolica, producevano i raggi. Quando i raggi colpivano gli occhi davano la sensazione della luce (Newton distingueva giustamente il fenomeno fisico dalla sensazione soggettiva della visione). Cercava di spiegare anche i colori ammettendo che la luce “bianca” era una miscela di altrettante specie di corpuscoli quanti erano i diversi colori. Nella luce bianca tutti i corpuscoli che formano un raggio attraversano l’aria all’unisono. Quando invece il raggio attraversa un prisma di vetro i corpuscoli luminosi subiscono l’influenza delle forze dovute alle particelle di materia. Gli effetti sono più intensi sul violetto, più deboli sul rosso. Di conseguenza ogni colore viene rifratto con un angolo diverso e il prisma separa i colori a ventaglio ottenendo lo spettro della luce visibile.

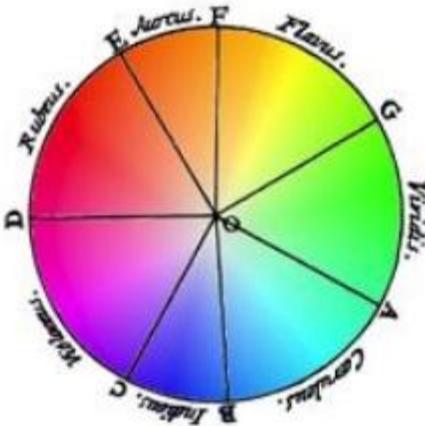


Figura 5. *Il cerchio dei colori di Newton*

A partire dall'osservazione dei colori dello spettro Newton disegnò il cerchio dei colori sul quale i colori dello spettro venivano riportati in settori la cui larghezza era in relazione a quella osservata nello spettro (figura 5). La posizione dei colori sul cerchio definiva le relazioni di qualità tra i colori stessi, Newton immaginò che tra i colori potessero esserci delle relazioni armoniche come tra le sette note musicali, e che i colori vicini tra di loro (adiacenti) sviluppassero rapporti armonici, mentre i colori che si trovavano in opposizione (complementari) avessero tra loro una relazione dinamica.

Newton giunse inoltre alla conclusione che il colore degli oggetti che ci circondano è legato al modo di reagire delle superfici alla luce. Un oggetto rosso ha questo colore perché trattiene tutti gli altri colori e ci spedisce indietro solo il rosso. Escluse del tutto la possibilità che al buio vi potessero essere dei colori, in quanto i colori sono inscindibilmente legati alla presenza della luce.

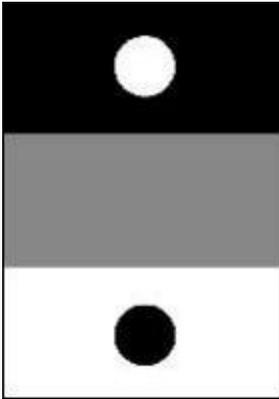
La teoria di Newton sui colori rimase la base per gli sviluppi successivi della ricerca scientifica sui fenomeni legati all'ottica e alla luce. L'ipotesi corpuscolare ha dominato la fisica per circa 100 anni.

1.2 Gli esperimenti di Goethe

Goethe ed una vasta cerchia di artisti ed intellettuali, pensavano che la teoria di Newton fosse un errore, e che un fenomeno naturale come quello dei colori, apportatore di intense emozioni estetiche ed emotive, non potesse essere spiegato attraverso una teoria scientifica meccanicistica. I presupposti da cui Goethe partì lo condussero a delle conclusioni errate sul fenomeno della generazione dei colori, mentre mise in evidenza come la visione dei colori sia un modo dell'organismo, in particolare dell'apparato visivo, di reagire agli stimoli luminosi provenienti dall'esterno. La teoria di Goethe ebbe un certo seguito nel mondo dell'arte, perché poneva al **centro della fenomenologia dei colori l'uomo e i suoi sensi**.

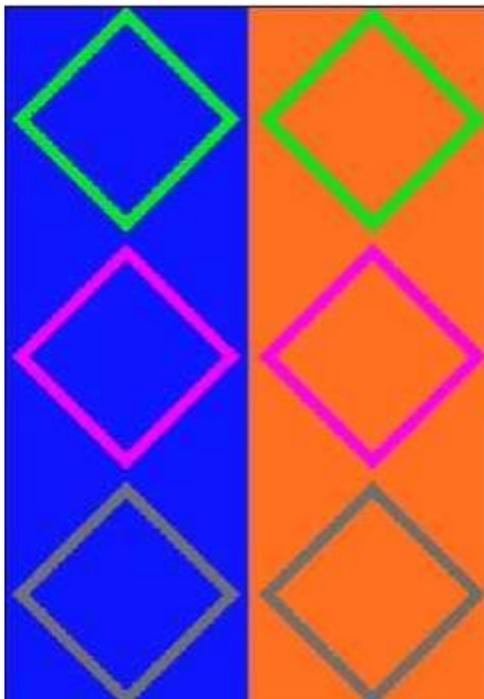
Goethe esaminò un muro bianco attraverso il prisma pensando di vedere lo spettro colorato ma riuscì a vedere solo il bianco del muro. Guardando in direzione della finestra vide dei colori nella zona di confine tra i vetri e lo stipite. Goethe non aveva fatto passare nel prisma un fascio di luce stretto, inoltre aveva realizzato l'esperimento in una stanza illuminata. Egli si limitò ad osservare delle vaste superfici ignorando che la luce

riflessa in ogni punto della parete veniva scomposta ma che i colori scomposti su una superficie vasta venivano a miscelarsi di nuovo riproducendo il bianco, difatti solo ai bordi di vaste superfici è possibile vedere lo spettro luminoso.



Disegnò allora una striscia nera su uno sfondo bianco e si accorse che nel confine tra lo sfondo bianco e la striscia nera guardando con il prisma si vedeva apparire lo spettro. Concluse che il colore si produceva dall'incontro del nero e il bianco attraverso un processo di contaminazione del bianco da parte del nero e che quindi i colori venivano generati dal nero. (figura 6)

Figura 6. Uno dei cartoncini ideati da Goethe, con i quali egli realizzò i suoi esperimenti sulla scomposizione



Goethe realizzò una serie di esperimenti sulle ombre colorate e sull'influenza reciproca dei colori. Riuscì a mostrare come l'occhio partecipi alla ricostruzione delle sensazioni di colore.

Goethe si accorse come un dato colore veniva percepito in modo diverso a seconda dello sfondo su cui era posto. Nella figura riportata al lato (figura 7), si possono osservare tre coppie di rombi dello stesso colore, la prima verde, la seconda magenta, la terza grigia. Ogni elemento della coppia è posto su uno sfondo diverso (blu e arancio), si nota come nonostante i colori siano a coppie uguali, vengono percepiti come differenti in relazione allo sfondo su cui sono posti.

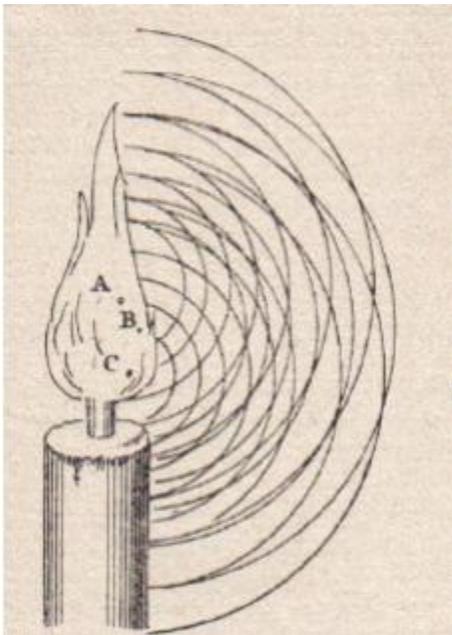
Studiando le ombre prodotte da luci fortemente colorate si rese conto di come l'occhio tendesse a vedere le ombre, per esempio, proiettate da un luce verde come fortemente colorate di rosso. Scoprì che alla visione di un colore l'occhio reagisce tingendo i colori adiacenti con il suo complementare individuabile nel cerchio di Newton come il suo opposto.

Figura 7. Influenza dello sfondo sulla percezione del colore

1.3 Gli esperimenti di Young

La teoria di corpuscolare di Newton spiegava bene i fenomeni dell'ottica geometrica (riflessione, rifrazione e le ombre), tuttavia la necessità di ammettere altrettante sostanze quanti erano i colori lasciava molto perplessi. Agli inizi del 1800 il medico inglese Thomas Young, fisico dilettante, realizza una serie di esperimenti che avvalorano l'**ipotesi ondulatoria** della luce.

L'ipotesi ondulatoria fu formulata da Huygens nel 1678. La luce viene vista come un'onda sferica, le quali a partire dal centro di emissione si propagano nello spazio come una sfera che si dilata contemporaneamente in tutte le direzioni (figura 8, rappresentato un disegno originale e scritti di Huygens). Ogni raggio ideale di questa sfera è paragonabile ad un'onda rettilinea simile a quella che si propaga lungo la corda. Le onde luminose hanno una lunghezza d'onda, che è la distanza che separa il vertice della cresta di un'onda dal vertice della cresta dell'onda seguente. Secondo la teoria ondulatoria della luce a lunghezze d'onda differenti corrispondono colori differenti Huygens ipotizzò e l'esistenza di un mezzo elastico in cui l'onda, potesse trasmettersi. Chiamò etere tale mezzo etere e lo definì come *“il mezzo elastico presente in tutto il cosmo nel quale le onde luminose si propagano per compressione e rarefazione”*, appunto come il suono nell'aria. Le particelle di etere, sollecitate dalla sorgente, urtano tra di loro e compiono dei movimenti oscillatori, che determinano un moto ondulatorio. Le leggi dell'urto permettono così di ricavare quelle della propagazione delle onde luminose. L'etere doveva avere caratteristiche singolari e contrastanti: doveva essere materiale eppure impalpabile, per non dare ostacolo al moto dei corpi celesti, ed inoltre elastico e molto rigido per poter giustificare l'elevatissima velocità di propagazione della luce. A causa delle contraddizioni implicite nel modello ondulatorio, il modello corpuscolare continuò per quasi due secoli ad avere maggiore seguito tra gli scienziati. Comunque la teoria ondulatoria della luce permetteva di spiegare (anche se in maniera matematicamente complessa) un gran numero di fenomeni tra cui la riflessione e la rifrazione, e la dispersione della luce (per la teoria ondulatoria sono i raggi di lunghezze d'onda differenti ad avere velocità diverse nel vetro).



Secondo Huygens da ogni punto di una sorgente luminosa si dipartono delle onde sferiche longitudinali:

«Ogni punto di un corpo luminoso, come il Sole, una candela o un carbone ardente, emette onde il cui centro è proprio quel punto ...; i cerchi concentrici descritti intorno ad ognuno di questi punti rappresentano le onde che si generano da essi ... Quello che a prima vista può sembrare molto strano e addirittura incredibile è che le onde prodotte mediante movimenti e corpuscoli così piccoli possano estendersi a distanze tanto grandi, come, per esempio, dal Sole o dalle stelle fino a noi ...».

Come è allora possibile che avvenga ciò ?

«Cessiamo però di meravigliarci se teniamo conto che ad una grande distanza dal corpo luminoso una infinità di onde, comunque originate da differenti punti di questo corpo, si uniscono in modo da formare macroscopicamente una sola onda che, conseguentemente, deve avere abbastanza forza, per farsi sentire».

Figura 8. Disegno originale di Huygens e suoi scritti per spiegare la teoria ondulatoria.

La prima prova chiara e decisiva sulle proprietà ondulatorie della luce fu data da Young.

“L'esperimento di cui sto per parlare (...) può essere ripetuto con grande facilità, purché splenda il sole e con una strumentazione che è alla portata di tutti”. Così Young parlando il 24 novembre 1803 alla Royal Society di Londra, comincia la sua descrizione dello storico esperimento di **interferenza della luce**.

Ecco come lo aveva realizzato: un raggio di sole veniva deviato con uno specchio in modo da entrare orizzontale nella stanza. Successivamente era reso molto sottile facendolo passare per un piccolo foro creato in una superficie opaca. Quindi il raggio veniva diviso attraversando due fenditure strette e vicine. Nelle sue prime prove Young in realtà non usò una “doppia fenditura” ma un foglietto che con il suo spigolo sottile separava in due il raggio. Dalle fenditure la luce infine colpiva uno schermo. Young osservò che sullo schermo non comparivano due immagini luminose corrispondenti alla forma delle fenditure, ma che i raggi si allargavano, si sovrapponevano e nell’area di sovrapposizione formavano delle bande luminose alternate a zone d’ombra. Come le onde nate in due punti diversi di un lago, incontrandosi, sommano la loro altezza in alcuni punti e si annullano a vicenda in altri. (figura 9 e 10)

Osservò Young nel suo discorso “*Neanche i più prevenuti negheranno che le frange osservate sono prodotte dall’interferenza di due frazioni della luce*”.

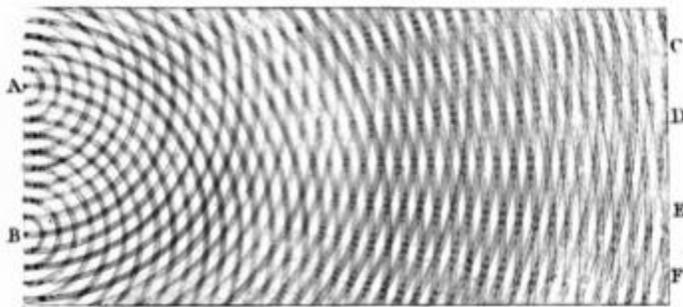


Figura 9. *Schema della diffrazione a due fenditure presentato da Thomas Young alla Royal Society nel 1803*

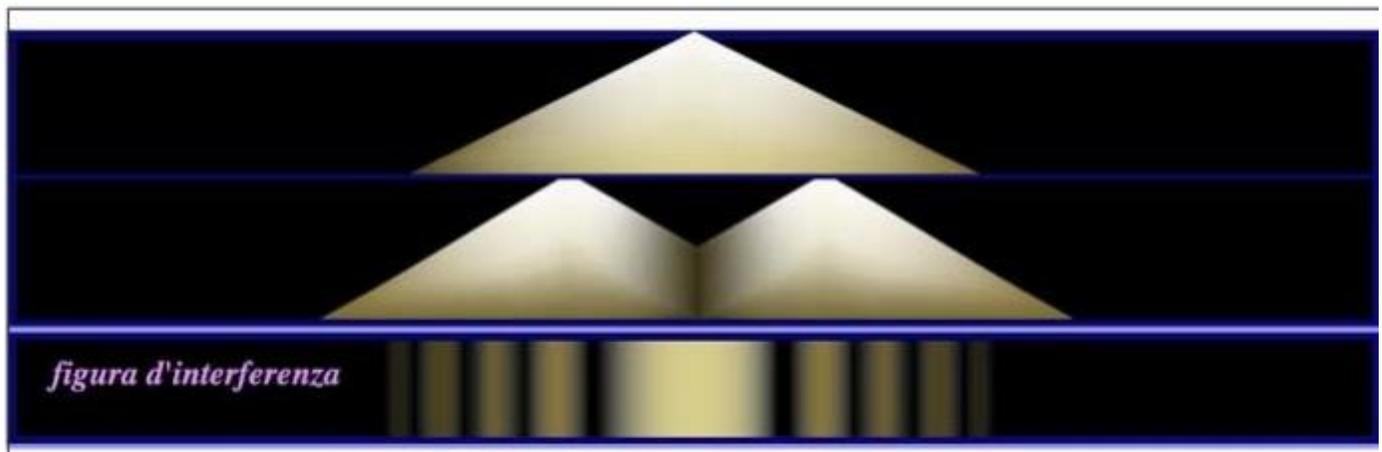


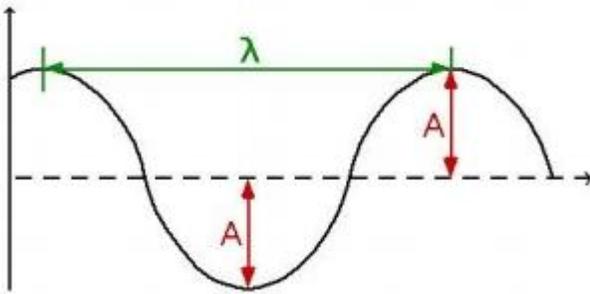
Figura 10. *Figura d’interferenza*

La spiegazione ‘ondulatoria’ è inevitabile: il fenomeno della diffrazione luminosa si manifesta quando i fori attraverso cui passa la luce hanno dimensioni molto piccole e paragonabili con la sua lunghezza d’onda. Un piccolo foro diventa il centro di un’onda sferica che provoca sullo schermo retrostante gli anelli di diffrazione. L’alternanza di zone chiare e scure è interpretabile con il fenomeno dell’**interferenza**. Una frangia scura appare ove il solco di un’onda passata per uno dei forellini incontra la cresta di un’onda passata per l’altro forellino, di modo che le due onde si elidono (interferenza distruttiva). Una frangia chiara appare

invece ove i solchi e le creste di due onde passate attraverso i due diversi forellini s'incontrano rafforzandosi (interferenza costruttiva). (figura 11)

Dato che la distanza fra le frange di interferenza dipende dalla lunghezza d'onda, l'esperienza di Young offrì anche la prima misura diretta della lunghezza d'onda della luce.

Il fenomeno delle ombre nette, vale a dire il fenomeno della propagazione rettilinea della luce che si osserva in natura, dipende unicamente dal fatto che tutti i fori e gli ostacoli con cui si ha a che fare sono molto grandi rispetto alla lunghezza d'onda della luce



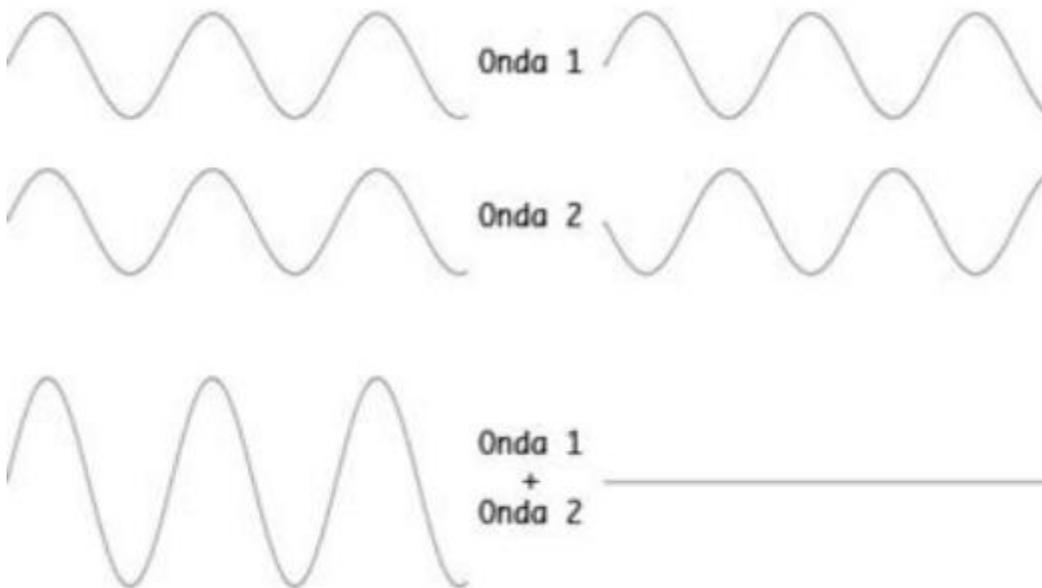
I parametri fondamentali che descrivono e caratterizzano le onde sono:

ampiezza (A), che si misura in metri (m) e corrisponde alla distanza tra il punto massimo della cresta dell'onda e l'asse di propagazione;

la velocità di propagazione, che si misura in metri al secondo (m/s);

la lunghezza d'onda (?), cioè la distanza tra due creste successive, che si misura in metri (m);

la frequenza (f), cioè il numero di oscillazioni dell'onda nell'unità di tempo (secondo), che si misura in cicli al secondo o hertz (Hz).



Interferenza costruttiva

Interferenza distruttiva

Figura 11. Descrizione onda e fenomeno di interferenza

Un altro contributo importante di Thomas Young riguarda la **percezione dei colori**. Partendo dalla conoscenza dei tre colori primari (rosso, verde e blu) dalla cui mescolanza ottica si formano tutti gli altri colori, provò a cercare la spiegazione di questo non nelle proprietà della luce, ma in quelle dell'occhio umano.

L'occhio umano può cogliere più di duecento sfumature di colore, e se ognuna di queste sfumature richiedesse un tipo di fotorecettore, sulla retina dovrebbero esserci più di duecento tipi diversi di fotorecettore, uno per ogni colore, il che è impossibile considerando l'esiguità della superficie della retina. I fotorecettori sono delle terminazioni nervose collegate al cervello, presenti sulla retina dell'occhio e sensibili alla luce. Grazie a questi fotorecettori l'immagine ricevuta dall'occhio viene trasmessa al cervello. Thomas Young avanzò l'ipotesi che i recettori responsabili della visione diurna (visione a colori) fossero di tre tipi, ognuno sensibile ad uno dei tre colori primari che lui stabilì essere il verde, il rosso e il blu. La sua ipotesi venne solo in seguito confermata da successive ricerche sulla fisiologia dell'occhio, che mostrarono l'esistenza sulla retina di tre tipi diversi di coni (fotorecettori adoperati dall'occhio in luce diurna). Young ipotizzò che la visione delle diverse sfumature di colori veniva generata dall'azione combinata di questi tre recettori, capaci di reagire in modo diverso alle differenti frequenze presenti nella radiazione luminosa. In questo lavoro di percezione del colore, il cervello ha un ruolo fondamentale, quello di prendere le informazioni dall'occhio e di restituirle alla nostra percezione in forma di immagine visiva colorata, come aveva intuito nel 600 Cartesio.

1.4 Gli esperimenti di Maxwell

“Se la sensazione che chiamiamo colore possiede delle leggi, ci deve essere qualcosa nella nostra natura che determina la forma di queste leggi. La scienza del colore è dunque una scienza della mente”

Questa è una frase pronunciata da James Maxwell, uno dei più grandi fisici di tutti i tempi. Le sue equazioni sull'elettromagnetismo costituiscono un punto di svolta nella storia della scienza. Maxwell, attraverso i suoi studi, dimostrò che la luce visibile all'occhio umano è un'onda elettromagnetica compresa dentro un certo intervallo delle lunghezze d'onda, che si propaga alla velocità di 300.000 Km al secondo circa. Egli dimostrò, inoltre, che i colori diversi dello spettro corrispondevano a frequenze di oscillazione differenti. Nel 1859 Maxwell fece conoscere la sua **Teoria sulla visione dei colori**, che va considerata come l'origine della misura quantitativa dei colori (Colorimetria).

Grazie ad una serie di esperimenti condotti con dei cerchi rotanti e con delle macchine ottiche di sua invenzione, che gli permettevano di miscelare le luci colorate controllandone con precisione le intensità Maxwell riuscì a creare dei diagrammi, famosi con il nome di Triangoli di Maxwell (figura 12a). Adoperando questi diagrammi era possibile, attraverso delle somme matematiche, ottenere tutte le sfumature di colori ottenibili dai tre primari di Young (verde, blu e rosso). I cerchi rotanti di Maxwell (figura 12b) erano fatti in modo tale da potere fissare sulla superficie, dei settori di carta colorata di diversa larghezza. Maxwell, lavorando con i colori primari spettrali (verde, blue rosso), ottenne le diverse sfumature dello spettro modificando i rapporti di proporzione tra i vari settori. Grazie a questi suoi esperimenti ottenne il suo diagramma triangolare, nel quale alle sfumature di colore corrispondono dei rapporti matematici tra i tre diversi primari.

I diagrammi di Maxwell sono all'origine del diagramma CEI sul quale sono riportate, in corrispondenza dei colori, le rispettive frequenze di onda elettromagnetica. Il diagramma CEI è attualmente considerato il diagramma standard dei colori spettrali, adoperato da astronomi, fisici, pittori e grafici.

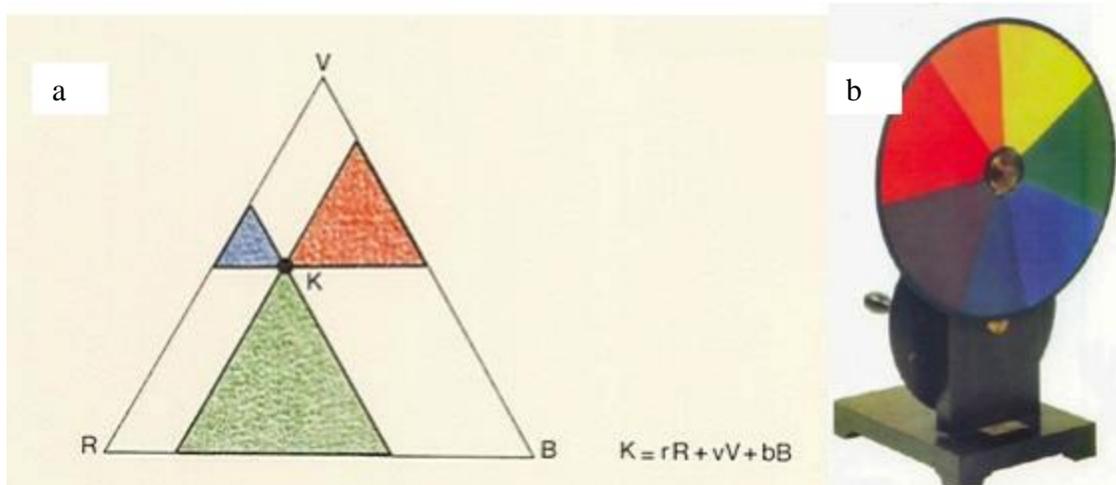


Figura 12. I triangoli (a) e il cerchio rotante (b) di Maxwell



Figura 13. Prima foto a colori scattata da Maxwell

Maxwell scoprì infatti che la fotografia a colori poteva essere realizzata sovrapponendo filtri rossi, verdi e blu. Fece fotografare tre volte un tartan scozzese mettendo sopra l'obiettivo tre filtri di diverso colore. Le tre immagini sono state sviluppate e proiettate su uno schermo con tre proiettori differenti. Una volta messe a fuoco le tre immagini su di uno stesso punto ne è scaturita un'immagine a colori, la prima di tutta la storia (figura 13)

1.4 Esperimenti di Planck e Einstein

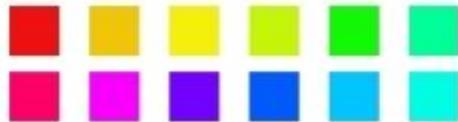
Con la teoria del colore abbiamo ripercorso alcune tappe fondamentali della fisica. L'ipotesi ondulatoria mette in chiaro che la luce è un'onda di energia. Maxwell ha descritto che la luce è un'onda elettromagnetica che si propaga nel vuoto alla velocità di 300000 Km al secondo. Si propaga dove? Sempre nell'etere, secondo Maxwell e secondo molti altri scienziati del tempo che tentavano di conciliare la nuova teoria del campo elettromagnetico con la meccanica di Newton. Affinché questa conciliazione fosse possibile, l'etere avrebbe dovuto essere a sua volta composto da particelle, ma quali erano le proprietà di queste particelle? Nessuno lo sapeva e non si riusciva nemmeno a osservare l'etere ma, in mancanza di una teoria migliore, si supposeva che ci fosse. Per risolvere alcuni problemi sulla trattazione del corpo nero nel 1900 Max Planck propose che lo scambio di energia fra il campo elettromagnetico e la materia potesse avvenire solo tramite pacchetti discreti di energia (quanti) chiamati fotoni. I successivi studi di Albert Einstein sull'effetto fotoelettrico mostrarono che questo non era solo un artificio matematico ma che i fotoni erano oggetti reali. Con l'avvento delle teorie quantistiche dei campi il concetto di fotone venne formalizzato ed oggi sta alla base dell'ottica quantistica.

La luce in certe condizioni si comporta come un'onda, in altre come un fascio di fotoni.

2. Modelli di rappresentazione del colore

2.1 Gli attributi del colore

Ogni sensazione di colore può essere scomposta in tre ingredienti, ciascuno dei quali è a suo modo elementare, nel senso che partecipa alla determinazione del colore da parte dell'osservatore e non può essere ricondotto, per via di semplificazioni, a nessuno degli altri due costituenti. I tre ingredienti del colore sono tonalità, luminosità, saturazione.



La **tonalità** permette la classificazione dei colori. Sono quindi esempi di tonalità il "rosso", il "giallo", il "verde" e il "blu".



La **luminosità** definisce il chiaro-scuro del colore. In questo esempio i quadrati sono della stessa tonalità ma da sinistra a destra aumenta la luminosità.



La **saturazione** si riferisce alla vividezza del colore. In questo esempio la saturazione diminuisce da sinistra a destra.

La **tonalità** permette la loro classificazione. Le differenze di tonalità dipendono in particolare dalle variazioni nella lunghezza d'onda della luce che colpisce i nostri occhi.

Il concetto di **luminosità** si riferisce, invece, alla quantità di chiaro o scuro del colore. Fisicamente un colore viene percepito come più o meno luminoso a seconda del grado di riflettività della superficie che riceve la luce. Un'elevata luminosità ci fa percepire il colore più chiaro rispetto al colore della stessa tonalità con luminosità inferiore.

La **saturazione** si riferisce all'intensità del colore e viene misurata nei termini della *differenza di un colore rispetto ad un grigio con lo stesso livello di luminosità*. Al diminuire della saturazione il colore tenderà al grigio.

2.2 Sintesi additiva

Luci di differente lunghezza d'onda ci appaiono quindi di diverso colore. Il fatto che queste generino, se sommate, la visione del bianco, è un fenomeno che viene definito **sintesi o mescolanza additiva**.

La visione del bianco può essere quindi considerata come la controparte percettiva della somma di tutte le radiazioni che compongono lo spettro visibile. Miscelando i colori primari si generano i colori. La terna di colori primari è una scelta arbitraria dell'uomo e sono il rosso, verde e il blu. I tre tipi di coni presenti sulla retina hanno una differente sensibilità alle lunghezze d'onda della luce. In particolare:

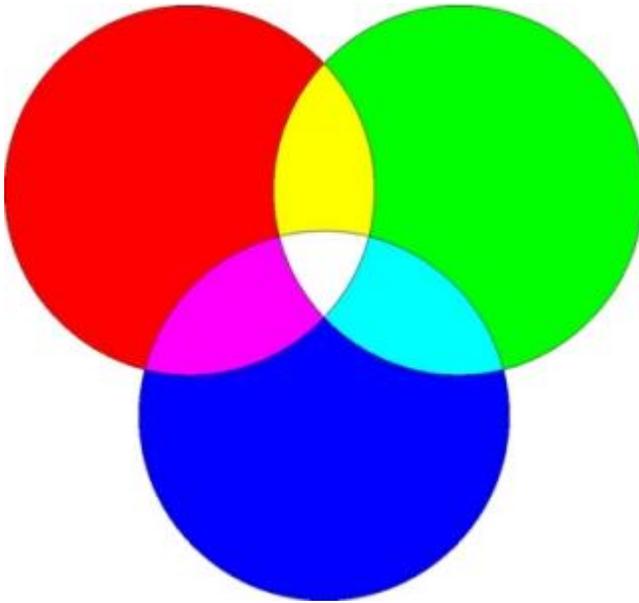
I **coni corti** hanno un picco di assorbimento delle radiazioni intorno ai 400 nm (nanometri). Sono sensibili al blu

I **coni medi** hanno un picco di assorbimento intorno ai 500 nm e quindi risultano principalmente sensibili al verde.

I **coni lunghi** hanno un picco di assorbimento presso i 600 nm. Sono quindi sensibili alla gamma dei rossi

La stimolazione simultanea dei tre tipi di coni della retina porta alla percezione di qualsiasi colore generabile dall'incontro di luce rossa, verde e blu in diversa misura. L'incontro di due fasci luminosi di uguale intensità genera altri tre colori: il **giallo** (rosso+verde), il **ciano** (verde+blu) ed il **magenta** (blu+rosso).

Per ottenere il bianco è necessario che i tre fasci luminosi rosso, verde e blu abbiano un'intensità tale da generare lo stesso triplice stimolo indotto dalla luce del sole. È possibile ottenere il bianco anche usando la terna giallo+ciano+magenta.



In **fig.14** è rappresentato lo schema classico della sintesi additiva. È l'effetto che si ottiene sovrapponendo tra loro tre raggi luminosi: uno verde, uno rosso ed uno blu, opportunamente corretti in partenza nel modo poco sopra descritto. Un simile esperimento si può realizzare facilmente, usando tre sorgenti di luce bianca, ciascuna schermata con un filtro di uno dei tre colori qui considerati primari, e proiettando i tre raggi su una superficie neutra. Come si può vedere, al centro, dove i tre raggi si sovrappongono, appare il bianco. Dove, invece, si sovrappongono solo la luce rossa e quella verde, vediamo il **giallo**. Nella zona di sovrapposizione tra verde e blu, il colore percepito è il **ciano**. Infine dove si mescolano il rosso e il blu il colore percepito è il magenta.

Figura 14. *Esempio di sintesi additiva*

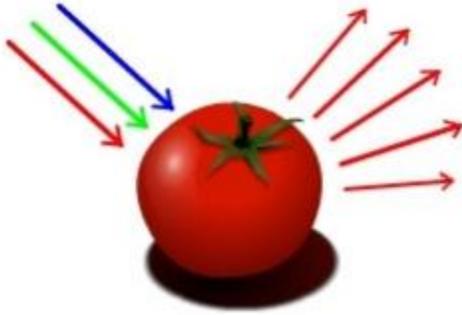
2.3 Sintesi sottrattiva

Abbiamo visto cosa accade quando la luce che colpisce i recettori della retina proviene da fonti luminose (luce rossa, verde o blu). **Cosa accade invece quando osserviamo un oggetto che non emana luce ma la riflette?**

La percezione del colore di tutto ciò che osserviamo dipende da meccanismi "sottrattivi", in quanto si basa sulla capacità della materia di assorbire componenti cromatiche piuttosto che emetterne di proprie.

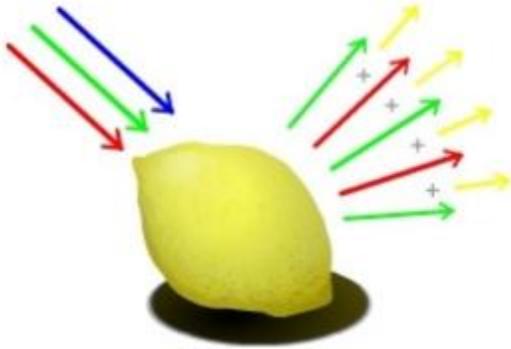
Una superficie colorata assorbe una parte della luce visibile e restituisce il resto all'ambiente sotto forma di luce riflessa.

Facciamo un esempio. **Perché il pomodoro ci appare rosso?**



Evidentemente la sua materia assorbe le radiazioni del verde e del blu, rimandando sulla retina dell'osservatore esclusivamente le radiazioni del rosso.

E ancora, **perché un limone ci appare giallo?**



Il limone illuminato da una luce bianca assorbe la radiazione nello spettro del blu. Le radiazioni riflesse sono quelle del rosso e del verde. Queste ultime combinandosi sulla retina, secondo le regole della sintesi additiva generano la percezione del giallo.

Per comprendere ciò consideriamo la curva di riflessione della superficie: è sostanzialmente una funzione matematica che definisce il grado combinato di eccitazione dei tre tipi di coni della retina. Questa curva può essere tradotta, come mostra il grafico in **fig.15**, in un diagramma diviso in tre parti, che riporta il grado di eccitazione relativo a ciascun tipo di coni: nel caso illustrato, il colore percepito sarà un verde tendente al giallo (la maggiore stimolazione è nell'area sensibile al verde e, in minor misura, nell'area sensibile al rosso).

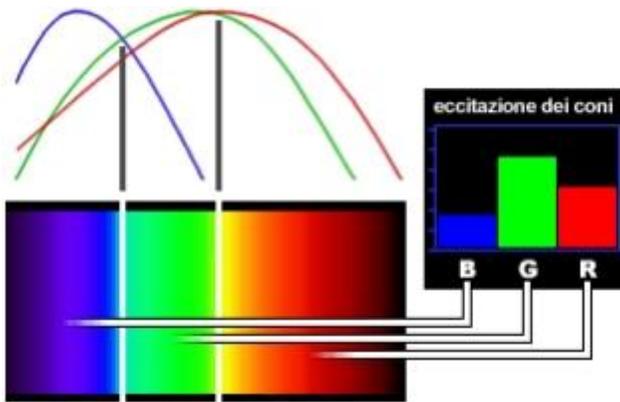


Figura 15. Una curva di riflessione che rappresenta l'effetto combinato della stimolazione dei tre tipi di coni da parte della luce riflessa da una superficie.

Se consideriamo il fenomeno dalla parte della radiazione assorbita, le superfici che ci appaiono colorate **sottraggono** alla nostra visione una parte dello spettro visibile. E' molto importante nel campo della pittura e della stampa prevedere quale effetto produca sulla visione dei colori la combinazione delle proprietà riflettenti (cioè della capacità di assorbire parte della luce) proprie di superfici differenti. Che colore vedremo, dunque, se mescoliamo su una superficie neutra del giallo e del magenta? La curva di riflessione di questi due colori, combinate tra loro, mostrano che il colore risultante visto dall'osservatore è il rosso. il **colore risultante** percepito corrisponderà a quella parte dello spettro visibile che entrambi i pigmenti

riflettono, mentre sarà cancellata ogni parte della luce visibile che è riflessa da uno soltanto di essi. Il giallo riflette la luce verde e la rossa; il magenta riflette invece la luce blu e la rossa. Mescolando i due colori, il giallo bloccherà la componente di luce blu riflessa dal magenta, mentre il magenta bloccherà la componente di luce verde riflessa dal giallo, ed entrambi rifletteranno la luce nello spettro del rosso. Quindi analogamente mescolando:

giallo + ciano = verde;
ciano + magenta = blu.

I tre colori di base utilizzati – il ciano, il giallo e il magenta – non sono stati scelti casualmente. Ciascuno di essi ha la proprietà di bloccare, cioè di sottrarre alla vista, uno dei colori primari della sintesi additiva e di riflettere gli altri due. Ciano, giallo e magenta sono perciò considerati i **colori primari della sintesi o mescolanza sottrattiva**, cioè di quella mescolanza di pigmenti che genera la visione di colori in dipendenza del modo in cui essi riflettono la luce bianca. La mescolanza di due primari qualsiasi della sintesi sottrattiva genera uno dei primari della sintesi additiva. Gli effetti della combinazione parziale o totale dei colori primari della sintesi sottrattiva sono illustrati in **fig. 16**.

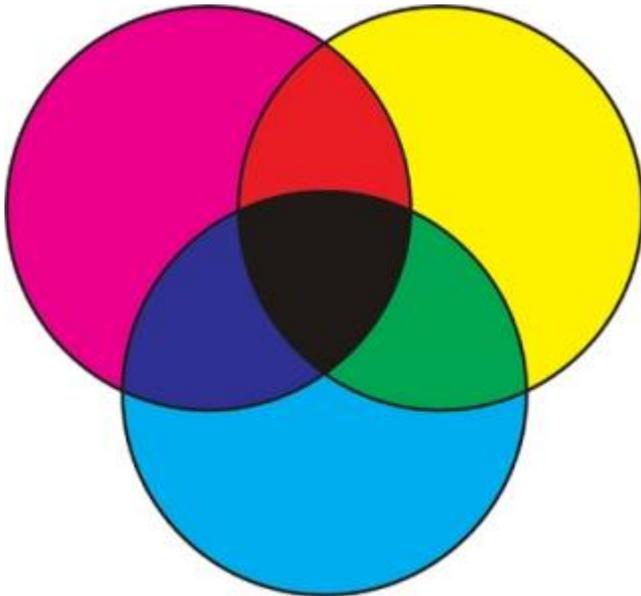


Figura 16. Esempio di sintesi sottrattiva

Sommando i tre colori si ottiene il **nero**, perché ciascuno dei tre colori della sintesi sottrattiva assorbono un terzo delle radiazioni della luce bianca e ne rilasciano due terzi. Il disco magenta trattiene le radiazioni del verde e rilascia quelle del rosso e del blu (rosso+blu=magenta, secondo la sintesi additiva). Il disco giallo trattiene le radiazioni del blu e rilascia quelle del rosso e del verde (rosso+verde=giallo). Il terzo disco, infine, trattiene le radiazioni del rosso, rilasciando quelle del verde e del blu (verde+blu=ciano). Se tutti e tre i dischi vengono sovrapposti tratteranno ciascuno un terzo della luce bianca ed il colore ottenuto sarà quindi "l'assenza del bianco": il nero.

Tutto questo in linea teorica, la mescolanza sottrattiva reale deve fare i conti con la natura materiale dei pigmenti e delle superfici utilizzati. Confrontando le curve di riflessione teorici con le risposte reali dei coni suscitate dai pigmenti disponibili per i tre colori primari della sintesi sottrattiva si nota ad esempio per il pigmento color ciano che riflette la luce verde meno di quella blu e anche una certa percentuale di luce rossa mentre idealmente dovrebbe riflettere il 100 % di luce verde e blu e lo 0% di luce. Tutto questo si traduce in una perdita di saturazione: nessun colore ottenuto dalla combinazione di pigmenti può essere più saturo dei suoi componenti.

PERCORSO DIDATTICO

Metodologia didattica: è stata descritta nella premessa. L'insegnante seguirà un approccio costruttivista.

Contesto didattico : terza classe della scuola secondaria di I grado

Periodo : a metà dell'anno scolastico

Ossatura delle lezioni (tempo totale 20 ore):

1. Per suscitare interesse e curiosità verso l'argomento, l'insegnante propone agli allievi una riflessione sulla simbologia legata ai colori (aspetti psicologici, artistici, culturali,...) per arrivare poi alla formulazione di domande-stimolo: cos'è il colore? a cosa serve?
2. L'insegnante potrebbe predisporre una scheda a cui gli allievi devono rispondere a domande tipo: Il colore è una proprietà dei corpi? Cosa è la luce bianca? Senza la luce esistono i colori?
Gli allievi rispondono alle domande presenti nella scheda prima individualmente, poi l'insegnante li riunirà in piccoli gruppi di 4 persone e dovranno condividere insieme le varie risposte. L'insegnante successivamente analizzerà queste schede e nella lezione successiva avvierà una discussione. Questa scheda permette anche di valutare i requisiti e conoscenze possedute dagli allievi
3. Uso della discussione per individuare argomenti che hanno a che fare con il colore: alcuni potranno essere suggeriti dagli allievi altri dall'insegnante. La scelta collettiva dei contenuti contribuisce a far sentire tutti responsabili della costruzione del sapere
4. Alcune lezioni sui colori, sintesi additiva e sottrattiva possono essere svolte dall'insegnante di educazione artistica oppure in compresenza con l'insegnante di scienze
5. Esperimenti in classe e in laboratorio. Gli studenti dovranno produrre una relazione sulle esperienze svolte.
6. Grazie all'osservazione dei fenomeni, discussione in classe, si arriva a costruire la conoscenza arrivando a capire il perché del fenomeno.
7. Si possono fare ricerche di approfondimento in internet o consultare libri.
8. Si potrebbe proporre come attività alternativa, in collaborazione con gli altri insegnanti, la costruzione da parte degli studenti di un blog sul colore, con i vari riferimenti multidisciplinari.

CONTENUTI

Alcuni argomenti sono stati trattati in questa relazione nel paragrafo "Contenuti". Altri sono stati trattati nelle relazioni di fisica di ottica: in particolare la riflessione, rifrazione della luce e la polarizzazione.

REQUISITI

- Conoscere i concetti di grandezza fisica e di unità di misura (S.I).
- Conoscere il concetto di raggio di luce.
- Sapere misurare (anche tenendo conto dell'incertezza della misura).
- Conoscere il concetto di cifre significative..
- Saper rappresentare i dati su un grafico.
- Saper usare il goniometro
- Conoscere il concetto di proporzionalità

FINALITA' EDUCATIVE: _

1. essere curiosi e aperti verso la conoscenza della realtà
2. lavorare e collaborare con gli altri

3. ascoltare e comunicare
4. affrontare un compito reale individuando metodi, procedure, linguaggi, tempi
5. acquisire senso critico e capacità di valutare il proprio e l'altrui operato
6. sviluppare il desiderio di approfondire le proprie conoscenze

OBIETTIVI DIDATTICI:

1. osservare
2. confrontare per cogliere analogie e differenze
3. formulare ipotesi
4. organizzare la verifica delle ipotesi
5. comprendere l'importanza della riproducibilità degli esperimenti e di eseguirli usando lo stesso protocollo (esempio di Goethe)
6. descrivere con linguaggio appropriato, usando la terminologia specifica
7. acquisire capacità operative in laboratorio
8. raccogliere e selezionare informazioni
9. fare collegamenti con le altre discipline

OBIETTIVI DISCIPLINARI

1. Valutare come si comportano i corpi nei confronti della luce.
2. Conoscere la composizione della luce bianca
3. Spiegare il fenomeno della dispersione della luce.
4. Spiegare il fenomeno dell'arcobaleno.
5. Conoscere il fenomeno della riflessione e rifrazione della luce.
6. Prevedere cosa succederà se si compongono radiazioni di diverso colore
7. Conoscere il dibattito scientifico sulla natura dei colori
8. Fare alcuni esempi di fenomeni osservabili nella vita quotidiana

NODI CONCETTUALI

Comprendere che i colori sono un fenomeno complesso in cui interagiscono la luce, la natura dell'oggetto, il processo di visione e la nostra mente non è semplice per dei ragazzi delle scuole medie.

Parlare della teoria corpuscolare ed ondulatoria può servire come informazione per far comprendere il dibattito scientifico sulla natura luce, in modo che lo studente si renda conto di come è difficile dare una spiegazione scientifica a dei fenomeni. Pur non nascondendo agli allievi la complessità di queste teorie, per aiutare i ragazzi nella comprensione dei fenomeni inerenti la luce e il colore possiamo far ricorso a dei modelli "figurativi". Per la teoria corpuscolare si può fare riferimento a un modello figurativo di particelle che viaggiano ad elevata velocità in tutte le direzioni. Per la teoria ondulatoria si può riferirsi al modello dell'onda nello stagno, a una corda.

Esperimento con il prisma ottico evidenzia la composizione della luce bianca. Parlare dell'arcobaleno può rendere questo esperimento più vicino al loro vissuto (occorre introdurre il concetto di riflessione e rifrazione della luce, già descritti nella relazione di laboratorio di fisica).

Comprendere concettualmente il fenomeno della diffrazione e dell'interferenza è più laborioso. Si possono impostare delle esperienze di laboratorio con reticoli di diffrazione per creare su degli schermi figure di interferenza e diffrazione. Per capire meglio il significato della diffrazione si può ricorrere all'esempio di una

persona nascosta dietro a un albero. Non è possibile vederla, tuttavia è possibile udirla. Questo succede perché la lunghezza d'onda della luce è di gran lunga più piccola delle dimensioni dell'albero e quindi la luce non riesce a "girare l'ostacolo". Al contrario, la lunghezza d'onda delle onde sonore emesse dalla persona è dello stesso ordine di grandezza delle dimensioni dell'albero. Tali onde sono quindi in grado di superare un ostacolo, consentendo così di percepire la voce di una persona, anche se nascosta. Si possono fare esempi dell'interferenza nel quotidiano.

Vediamo rosso il pomodoro, giallo il limone perché la superficie "colorata" di un corpo toglie alla luce bianca alcune radiazioni e riflette le altre verso l'occhio dell'osservatore. Un oggetto colorato è ricoperto di un pigmento colorato. Ci si riferisce a dei modelli (le radiazioni non sono colorate), per la sintesi additiva e sottrattiva si possono fare degli esperimenti con delle tempere, pitture in collaborazione con l'insegnante di educazione artistica. Con un'esperienza di chimica sulla determinazione del pH si può mettere in risalto di come il colore può essere usato per riconoscere le sostanze (e fare qualche accenno alla colorimetria).

ESPERIMENTI DA PROPORRE AGLI STUDENTI

1. LA DISPERSIONE E LA RICOMPOSIZIONE DELLA LUCE

Materiale occorrente

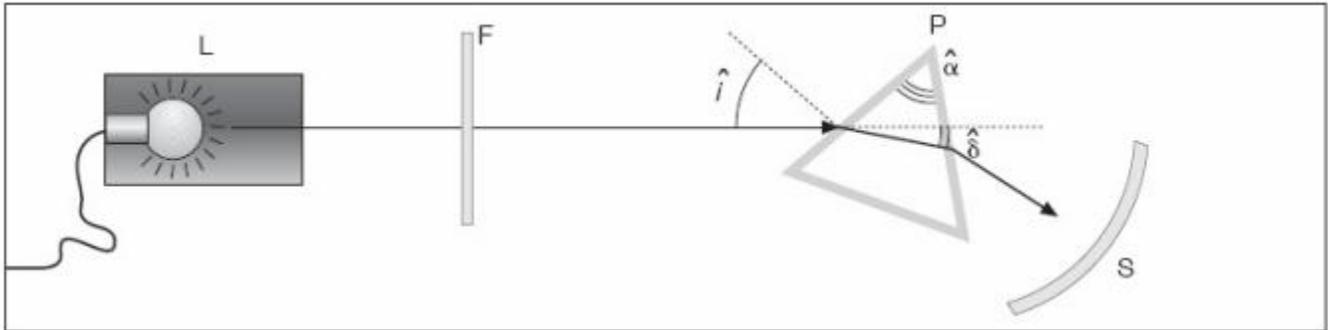
- prisma di vetro (con angolo rifrangente $\alpha = 30^\circ$)
- lampada
- schermo con fenditura rettilinea
- schermo bianco, possibilmente curvo
- banco ottico dotato degli appositi sostegni per le strumentazioni
- goniometro
- nastro adesivo nero
- cartone e forbici
- matite colorate o colori a tempera

Procedimento

1.1 Dispersione della luce

- Si predispongono l'apparecchiatura illustrata nella figura, dove le strumentazioni sono viste dall'alto: di fronte alla lampada L, si dispone lo schermo dotato di fenditura rettilinea F, orientata verticalmente. Si fa incidere il fascio luminoso sul prisma P e se ne raccoglie lo spettro sullo schermo S.
- Si ruota leggermente il prisma, osservando la posizione dello spettro proiettato sullo schermo.

- Si posiziona il prisma in modo che la deviazione \hat{d} del fascio luminoso sia quella minima: questa è la posizione più conveniente di impiego del prisma.
- Mediante il goniometro, si misurano in questa posizione l'angolo di incidenza i e gli angoli di deviazione corrispondenti ai colori dello spettro.
- Se l'apparato sperimentale lo consente, si prova a utilizzare come sorgente di luce anche una lampada fluorescente e la luce solare.



1.2 Ricomposizione della luce

- Da un cartone rigido, si ricava un disco del diametro di circa 15 cm e si dipinge su di esso una serie di settori con i colori dello spettro solare, per quattro o cinque volte.

I settori devono avere larghezze proporzionate a quelle che essi hanno nel vero spettro.

Perciò le loro ampiezze angolari dovranno essere le seguenti:

rosso = 62° blu = 62°

arancio = 25° indaco = 37°

giallo = 62° violetto = 62°

verde = 50°

- Al centro del disco si pratica un foro nel quale si infila un'astina, o una matita, intorno alla quale il disco possa ruotare liberamente.
- Si imprime al disco un moto di rotazione il più rapido possibile e si osserva l'effetto di ricomposizione dei colori.

2. UN ARCOBALENO FATTO IN CASA

Materiale occorrente

Una bicchiere a superficie curva riempita di acqua

Un foglio di carta bianca

Procedimento

In una giornata di sole, riempi il bicchiere di acqua e appoggialo sul davanzale della finestra, in una posizione tale che sia attraversato dai raggi luminosi. Metti il foglio di carta sul pavimento in modo che raccolga la luce che passa attraverso il bicchiere. Sul foglio apparirà l'arcobaleno.

3. COLORI CHE SCOMPAIONO

3.1. Esperienza con il prisma di Newton + filtri colorati

Interponendo dei filtri colorati tra il prisma e lo schermo il corpo colorato lascia passare la radiazione colorata del suo stesso colore e trattiene o assorbe tutte le altre. Ad esempio interponendo un filtro rosso sullo schermo si osserva la fascia del rosso, dell'arancio e del giallo, mentre scompare la fascia verde, blu, violetto. Il contrario avviene con il filtro blu.

3.2. Con la scatola

Materiale occorrente

- Una scatola da scarpe senza coperchio
- Una torcia elettrica
- Pezzetti di carta trasparente rossa e verde
- Un paio di forbici
- Nastro adesivo
- Una foglia
- Un pomodoro

Procedimento

Ritaglia una finestrella su uno dei lati della scatola e ricoprila con la carta rossa, fissata con nastro adesivo. Metti gli oggetti nella scatola dopo aver fatto buio nella camera, appoggia la torcia all'esterno della scatola, in modo che la luce penetri attraverso la finestrella. La carta lascia passare solo la luce rossa: osservando dall'alto potete vedere il pomodoro con il suo reale colore, perché riflette la luce. La foglia ti apparirà nera. Sostituisci poi la carta verde a quella rossa. Potrai vedere il reale colore della foglia, mentre il pomodoro ti apparirà nero.

3.3 Polarimetro e misura del potere rotatorio di una soluzione zuccherina

Per la descrizione di questa esperienza si rimanda alla relazione di laboratorio di fisica.

4. COLORI PER DISTINGUERE LE SOSTANZE

Materiale occorrente

- Cartina tornasole
- Succo di limone
- Coca Cola
- Aceto
- Soluzione di bicarbonato di sodio
- Acqua
- Soluzione di cloruro di sodio

Versare qualche goccia della sostanza e osservare il colore della cartina tornasole.

LO SAPEVI ?

Tutti i colori dell'arcobaleno

Un arcobaleno è il risultato di un prisma naturale in grande scala. Le gocce d'acqua sospese in aria possono comportarsi in modo simile ad un prisma, separando i colori della luce per produrre lo spettro che è appunto l'arcobaleno. E' dovuto alla rifrazione e alla riflessione totale dei raggi solari all'interno delle goccioline d'acqua. Ogni raggio di luce che incide su una goccia d'acqua viene prima rifratto sulla superficie, poi all'interno subisce una riflessione totale e infine viene rifratto di nuovo all'uscita (figura 17). La luce esce dalla goccia formando con la direzione dei raggi solari un angolo di 41° per il violetto e 43° per il rosso. Noi percepiamo il fenomeno entro un cono di circa 42° di apertura con il vertice nell'occhio e l'asse parallelo ai raggi solari: di qui la caratteristica forma ad arco. Inoltre poiché l'angolo che forma il violetto è minore del rosso l'arcobaleno ha il violetto all'interno e il rosso all'esterno,.

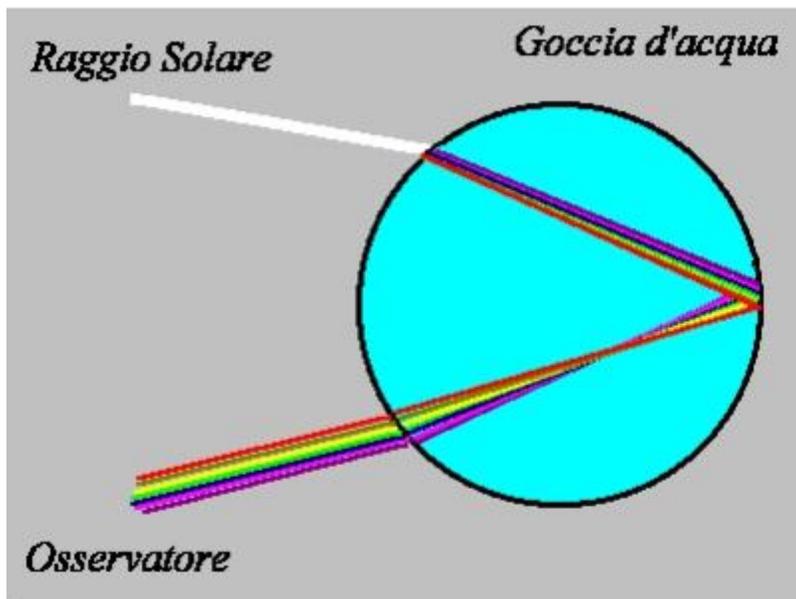


Figura 17. Formazione dell'arcobaleno primario in una goccia di pioggia.

Oltre al fenomeno dell'arcobaleno, ci può capitare di osservare fenomeni simili ad esso come l'"arcobaleno solare", un perfetto cerchio intorno al Sole. In realtà non possiamo parlare di un vero e proprio arcobaleno, ma di un fenomeno noto come alone solare, provocato dalla rifrazione della luce del Sole attraverso cristalli di ghiaccio presenti nell'atmosfera e orientati in modo particolare. Alcune volte l'alone solare può assumere una forma perfettamente circolare, proprio come se si trattasse di un arcobaleno di 360 gradi (figura 18a).

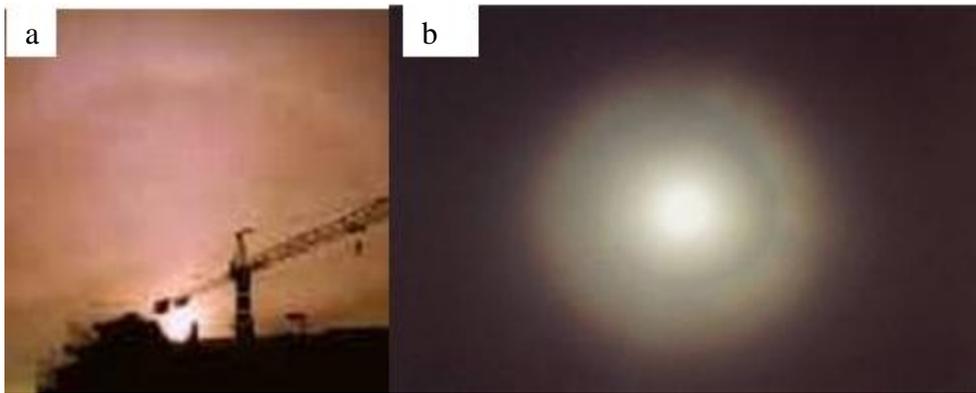


Figura 18. Immagini dell'arcobaleno solare (a) e dell'arcobaleno lunare (b)

Un altro fenomeno particolare è l'arcobaleno lunare (figura 18b); così come di giorno gli arcobaleni sono causati da una particolare rifrazione dei raggi del Sole da parte delle goccioline d'acqua sospese nell'atmosfera dopo la pioggia, di notte si può verificare lo stesso fenomeno, ma con la luce della Luna. In particolare, la goccia si comporta come un prisma, rifrangendo e riflettendo con angoli diversi le diverse componenti cromatiche della luce. Poiché la luce lunare è notevolmente più debole di quella del Sole, anche il relativo arcobaleno risulta scarsamente visibile, ma con un po' di attenzione nelle notti dopo un temporale è possibile vederlo. La sequenza dei colori resta comunque la stessa, poiché la luce della Luna non è altro che quella del Sole, riflessa dal nostro satellite.

Interferenza nella vita quotidiana

Oggi per mostrare l'interferenza della luce si usa il laser, che permette di ottenere facilmente il tipo di luce adatta.



L'interferenza realizzata con i laser viene usata per produrre gli ologrammi, come quelli che compaiono sulle banconote (figura 19 a lato) per rendere più difficile la falsificazione e sulle carte di credito e che danno l'immagine tridimensionale di un oggetto.

Figura 19. Fascia olografica sulle banconote

È un fenomeno di interferenza l'iridescenza che si nota osservando lateralmente un CD illuminato da una lampada. Sulla superficie metallica del CD sono incise sottilissime tracce concentriche che diffondono la luce, e i raggi che provengono da due tracce vicine interferiscono tra loro.

Si basano sull'interferenza della luce anche gli interferometri, strumenti che misurano con precisione lunghezze o variazioni di lunghezza. Se il percorso del raggio luminoso cambia, l'interferometro lo rileva anche su grandi distanze, perché si modificano le figure di interferenza. Dispositivi basati su questo principio vengono utilizzati per seguire i movimenti delle placche geologiche sulla superficie terrestre.

BIBLIOGRAFIA

Giulio Mezzetti "L'uomo dalla natura alla scienza" La Nuova Italia

Bozzi-Pietra –Altomani "materia ed energia" Lattes

Palladino Bosia "La Materia" Paravia

<http://www.diodati.org/>

<http://pctidifi.mi.infn.it/>