

La Luce - Elementi di Ottica

1. Introduzione

La **luce** (dal latino, *lux, lucis*) è l'agente fisico che rende visibili gli oggetti. Il termine luce si riferisce alla porzione dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano, ma può includere altre forme della radiazione elettromagnetica.

L'**ottica** è la parte della fisica che descrive il comportamento e le proprietà della luce e l'interazione della luce con la materia.

L'ottica di solito studia il comportamento delle radiazioni alle frequenze del visibile, dell'infrarosso e dell'ultravioletto; tuttavia si incontrano fenomeni analoghi nelle frequenze dei raggi X, delle microonde, delle onde radio e di altre gamme della radiazione elettromagnetica.

Nel corso dei secoli passati si sono avvicendate diverse teorie volte a dare spiegazione delle luce e dei fenomeni luminosi. Ricordiamo la **Teoria Corpuscolare**, formulata da Isaac Newton nel XVII secolo, secondo la quale la luce viene vista come composta da piccole particelle di materia (corpuscoli) emesse in tutte le direzioni. Successivamente si è affermata la **Teoria Ondulatoria** della luce, elaborata da Christiaan Huygens nel 1678. In base a tale teoria la luce viene vista come un'onda che si propaga (in maniera del tutto simile alle onde del mare o a quelle acustiche) in un mezzo, chiamato *etere*, che si supposeva pervadere tutto l'universo ed essere formato da microscopiche particelle elastiche. La teoria ondulatoria permetteva di spiegare molto bene un gran numero di fenomeni, in misura superiore alla teoria precedente di Newton.

Abbiamo poi visto che Maxwell alla fine del XIX secolo scoprì che le onde luminose sono elettromagnetiche e non necessitano di un mezzo per la trasmissione, mostrando che la luce visibile è una delle parti in cui viene suddiviso lo spettro elettromagnetico. Per la grandissima maggioranza delle applicazioni questa teoria è ancora utilizzata al giorno d'oggi, ma agli inizi del secolo scorso, per interpretare alcuni fenomeni fisici che non potevano essere spiegati con la teoria elettromagnetica, si comprese che l'energia associata alle onde luminose (a e tutte le onde elettromagnetiche) non potesse variare con continuità, ma in maniera discontinua, discreta: nacque così la **Teoria Quantistica** della luce, secondo la quale la luce si può suddividere in tanti *quanti* di energia, detti **fotoni**. I fotoni, secondo le teorie attuali, a volte agiscono come onde, a volte agiscono come particelle.

2. Sorgenti di luce

Sorgenti di luce sono tutti i corpi che emettono radiazioni luminose. Le sorgenti luminose si distinguono in *sorgenti primarie*, che brillano di luce propria, e *sorgenti secondarie*, che brillano invece di luce riflessa e/o diffusa. Sorgente primaria per eccellenza è per noi la stella Sole; altre sorgenti di luce primaria sono le lampade dei vari tipi, i tubi fluorescenti, il laser, le lucciole che romanticamente illuminano le sere e le notti di questo magico (seppure stressante) mese di maggio. Vi consiglio di trascorrere qualche momento in buona compagnia a vedere le lucciole, e per qualche istante, il mondo vi apparirà in una prospettiva diversa.

3. Corpi trasparenti, opachi, traslucidi

Un corpo è *trasparente* quando viene attraversato dalla luce: sono corpi trasparenti l'aria, l'acqua, il vetro, il diamante.

Un corpo è invece *opaco* quando esso non viene attraversato dalla luce: sono opachi il legno, i muri, il cartone.

Esistono infine i *corpi traslucidi*, che si lasciano attraversare dalla luce ma non permettono di distinguere la sorgente da cui essa proviene: sono traslucidi ad esempio i vetri smerigliati, alcune stoffe leggere, il plexiglas bianco.

4. Propagazione rettilinea della luce

Le onde elettromagnetiche emesse da una sorgente puntiforme si propagano in maniera circolare, (onde sferiche) come le onde generate su uno stagno quando un sasso colpisce la superficie. La luce ha lunghezze d'onda piccolissime, dell'ordine delle centinaia di nanometri (il rosso, ad esempio corrisponde ad un'onda elettromagnetica di $0,7 \mu\text{m}$, ovvero 0,7 millesimi di millimetro). A lunghezze d'onda così piccole le onde elettromagnetiche, pur propagandosi in tutte le direzioni, localmente si propagano in maniera rettilinea, assumendo il comportamento di raggi. Intendiamo allora con raggio di luce un fascio di luce molto sottile, che rappresentiamo con una retta e che indica il tragitto che la luce compie per andare da un punto all'altro. Raggi di luce sono visibili nelle fessure delle finestre, oppure a volte all'alba o al tramonto quando il Sole è nascosto dalle nubi.



5. Velocità della luce nel vuoto e nei materiali trasparenti

La velocità della luce nel vuoto è indicata con il simbolo c .

Più volte nel corso degli ultimi secoli si è proceduto alla misurazione della velocità della luce. A partire da Römer, nel 1676, diversi fisici hanno prodotto misure via via più precise. Fizeau nel 1849 trovò per c il valore di 313.000 km/s. Un anno dopo Foucault trovò il valore di 298.000 km/s. Nel 1887 Michelson esprime il valore di 299.700 km/s.

Abbiamo già detto che tale valore coincideva esattamente con il valore della velocità delle onde elettromagnetiche nel vuoto ricavato teoricamente dalle equazioni di Maxwell: di qui venne la conferma che la luce fosse nient'altro che un'onda elettromagnetica.

Oggi si assume che la velocità della luce (e di ogni altra onda elettromagnetica) nel vuoto sia una costante universale, pari a

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}} = 299.792.458 \frac{m}{s} \quad \left(c \cong 300.000 \frac{km}{s} \right)$$

Sperimentalmente si verifica che nei mezzi trasparenti la velocità della luce è minore della velocità nel vuoto.

Il rapporto tra la velocità c della luce nel vuoto e la velocità v della luce nel mezzo si chiama **indice di rifrazione del mezzo** e si indica con il simbolo n :

$$n = \frac{c}{v}$$

Invertendo la relazione precedente si ha

$$v = \frac{c}{n}$$

I valori degli indici di rifrazione delle varie sostanze si trovano in opportune tabelle:

Materiale	Indice di rifrazione n (rispetto alla luce gialla del Sodio)
Aria	1,000294
Idrogeno	1,000139
Acqua	1,33
Glicerina	1,47
Plexiglas	1,48
Vetro	1,50 ÷ 1,70
Cloruro di sodio	1,53
Calcite	1,658
Diamante	2,43

L'indice di rifrazione di un corpo qualsiasi che sia gas, liquido o solido non è costante ma dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione che lo colpisce. Per questo motivo nella tabella gli indici di rifrazione sono riferiti ad una particolare lunghezza d'onda. Se questa variasse, gli indici sarebbero differenti.

6. Raggi riflessi e raggi rifratti

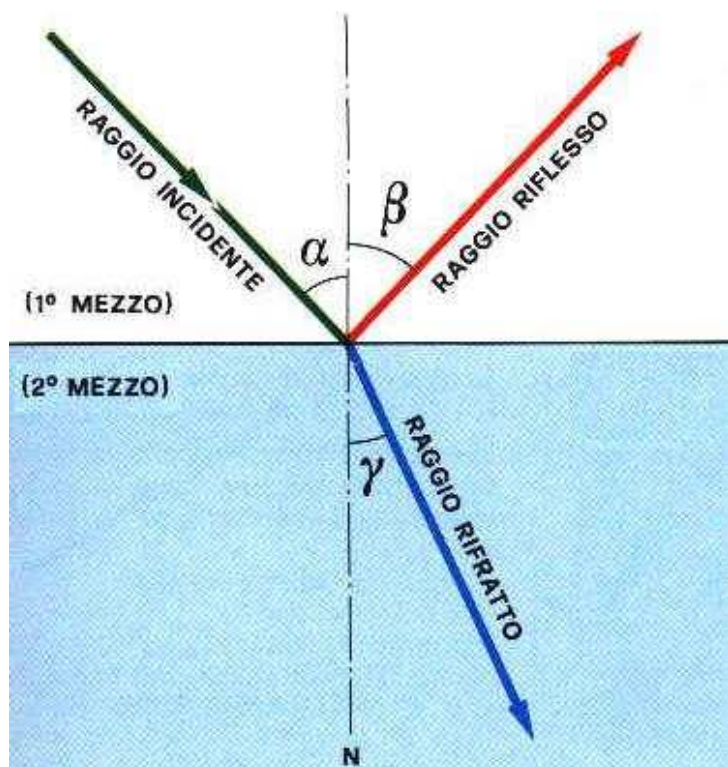
La luce viene emessa da sorgenti primarie (sole, lampadina, fiamma ecc.) e si propaga nei mezzi trasparenti, compreso il vuoto. La **propagazione diretta** è quella che procede indisturbata dalla sorgente.

Quando un raggio di luce incontra la superficie di separazione di due mezzi trasparenti, per esempio aria e acqua, si verificano due fenomeni diversi, la *riflessione* e la *rifrazione*.

Affinché i due fenomeni si verificano occorre però che la microrugosità della superficie di separazione sia molto piccola rispetto alla lunghezza d'onda (quest'ultima, per la luce visibile, va da $0,4 \mu\text{m}$ a $0,7 \mu\text{m}$). Per chiarire, una superficie lucida come quella di un vetro trasparente da finestra ha tipicamente una microrugosità abbastanza piccola per dar luogo a riflessione e rifrazione, un vetro smerigliato no.

Nella figura a lato chiamiamo **raggio incidente** il raggio di luce iniziale che dall'aria giunge in prossimità del vetro; una parte del raggio si riflette e torna indietro nell'aria (**raggio riflesso**), l'altra prosegue nel vetro subendo una deviazione (**raggio rifratto**).

Indichiamo con α , β e γ gli angoli che i raggi incidente, riflesso e rifratto formano rispettivamente con la retta N normale (perpendicolare) al piano di separazione nel punto di incidenza.



6.a. Riflessione

Se il vetro è però annerito da una parte esso diventa uno specchio e quindi si costituisce una superficie riflettente. In tal caso la maggior parte della luce viene riflessa.

La riflessione è regolata da due leggi, enunciate dal “solito” tuttofare Cartesio.

1ª legge della riflessione: il raggio incidente, il raggio riflesso e la retta normale al punto di incidenza sono situati nello stesso piano.

2ª legge della riflessione: l’angolo di riflessione (β) è uguale all’angolo di incidenza (α).

$$\alpha = \beta$$

6b. Rifrazione

Anche la rifrazione è governata da due leggi:

1ª legge della rifrazione: è analoga alla 1ª legge della riflessione e afferma che il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale nel punto di incidenza appartengono allo stesso piano.

2ª legge della rifrazione (nella forma di *Snell*): indicati con n_1 e n_2 gli indici di rifrazione dei due mezzi a contatto (aria e acqua, nel nostro esempio), gli angoli di incidenza (α) e di rifrazione (γ) sono legati dalla seguente relazione:

$$\frac{\text{sen } \gamma}{\text{sen } \alpha} = \frac{n_1}{n_2}$$

pertanto, la legge di Snell afferma che *il rapporto tra i seni goniometrici dei due angoli rifratto e incidente è uguale al rapporto inverso degli indici di rifrazione nei due mezzi.*

Esempio numerico. Vediamo come, utilizzando la legge di Snell, si possa calcolare l’angolo del raggio rifratto a partire dall’angolo del raggio incidente.

$$\frac{\text{sen } \gamma}{\text{sen } \alpha} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \text{sen } \gamma = \frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen } \alpha$$

Supponiamo che un raggio di luce arrivi in prossimità dell’acqua con un angolo di 40° . Sapendo che l’indice di rifrazione dell’aria è $n_1 = 1$ e che l’indice di rifrazione dell’acqua è $n_2 = 1,33$, si ha:

$$\text{sen } \gamma = \frac{n_1}{n_2} \cdot \text{sen } \alpha = \frac{1}{1,33} \cdot \text{sen } 40^\circ = \frac{1}{1,33} \cdot 0,6428 = 0,4833$$

In conclusione, abbiamo ottenuto che:

$$\text{sen } \gamma = 0,4833$$

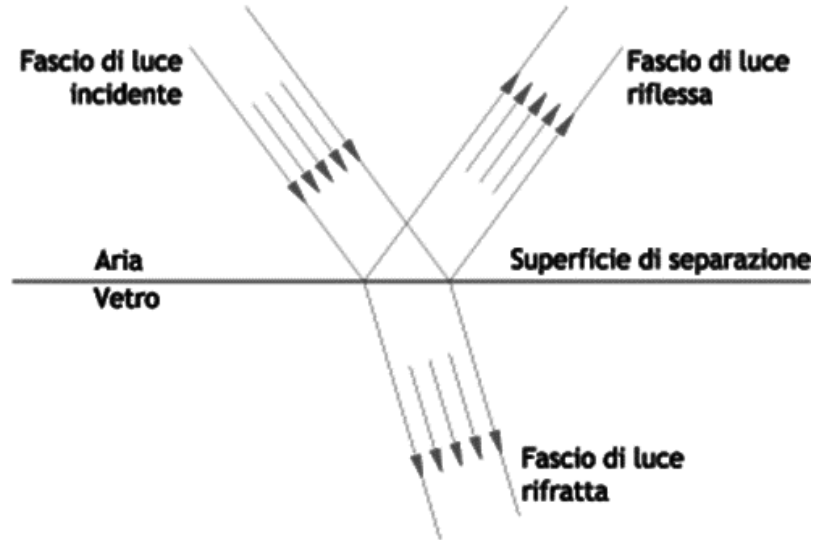
Abbiamo ottenuto una equazione goniometrica elementare: occorre trovare quell’angolo il cui seno è 0,4833; esso risulta pari a $28,9^\circ$.

Possiamo ripetere il discorso fatto per diversi angoli di incidenza; osserviamo che, passando dall’aria all’acqua, il raggio rifratto ha un angolo sempre minore di quello incidente. Se il raggio incidente ha un angolo di 90° (orizzontale), il raggio rifratto uscirà con un angolo di 49° .

Indice rifrazione aria = 1										
Indice rifrazione acqua = 1,33										
angolo incidente	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
angolo riflesso	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
angolo rifratto	0°	8°	15°	22°	29°	35°	41°	45°	48°	49°

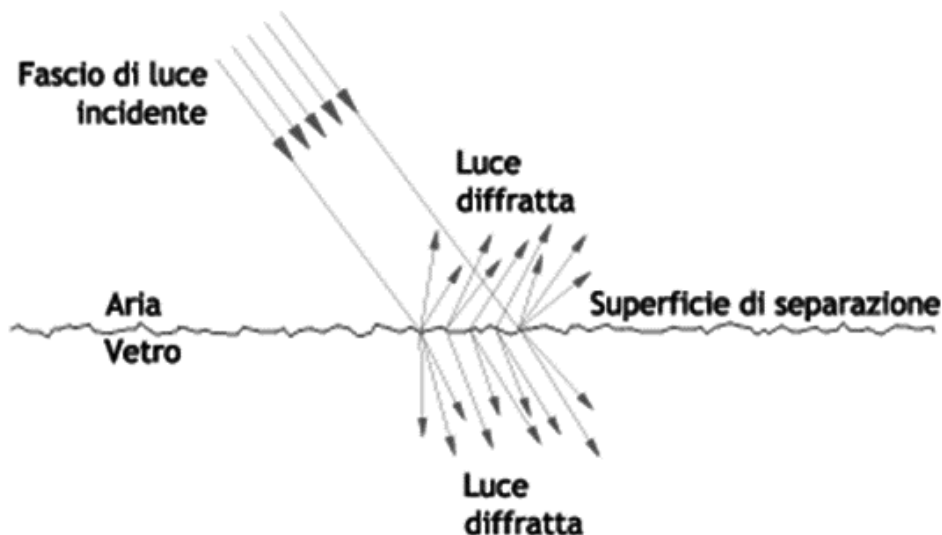
7. Diffrazione della luce

Nel paragrafo precedente abbiamo visto che se un fascio di luce, costituito da raggi paralleli, incide su una superficie liscia (con rugosità inferiori alla lunghezza d'onda), una frazione del fascio di luce incidente viene riflessa e rimane nel mezzo di partenza come rimbalzando sulla superficie di separazione (*riflessione*) mentre la parte restante attraversa la superficie e si propaga nel secondo mezzo (*rifrazione*). Si osservi in proposito la figura seguente:



Viene denominata *diffrazione* ogni modalità di propagazione della luce che sia diversa dalla *propagazione diretta*, dalla *riflessione* e dalla *rifrazione*. In particolare, si consideri un fascio di luce che incida su un vetro smerigliato (non liscio, ovvero con rugosità superiori alla lunghezza d'onda della luce).

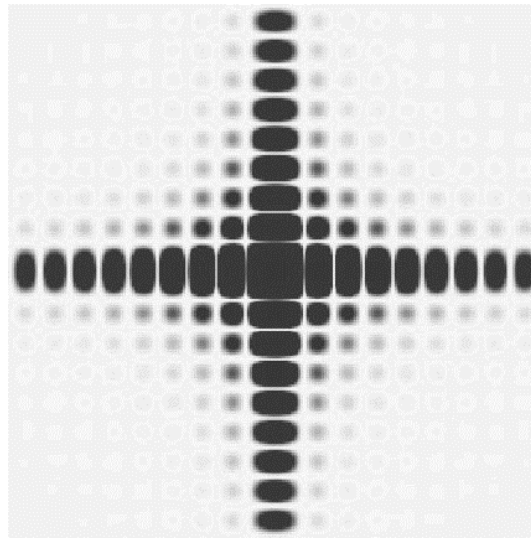
Con riferimento alla figura seguente, si osservano sia raggi luminosi che restano nel primo mezzo, sia altri che passano nel secondo, ma essi non procedono in senso ordinato, cioè parallelamente come nel caso della superficie liscia, bensì si suddividono e procedono in direzioni apparentemente scorrelate tra loro e rispetto alle direzioni di provenienza.



I meccanismi elementari che regolano il fenomeno della la diffrazione vengono studiati riferendosi a oggetti semplici, come *strette fenditure* o *piccoli fori*, sistemi ordinati di solchi (*reticoli*) o di aperture (*griglie*).

Supponiamo ad esempio di proiettare un raggio laser di luce rossa (663 nanometri di lunghezza d'onda) su uno schermo piano posto ad 1 metro di distanza, in maniera diretta: osserveremo che la

sua traccia è un puntino, in virtù del fatto che la luce si propaga in maniera rettilinea. Se però facciamo passare lo stesso raggio laser attraverso una piccolissima apertura quadrata di 2000 per 2000 nanometri (circa tre volte maggiore della lunghezza d'onda), osserveremo sulla superficie non più un puntino, ma la figura riportata di seguito, in negativo.



Nel passare attraverso la fenditura, il fascetto di luce non procede più in maniera rettilinea, ma si allarga andando a formare una specie di croce e invadendo quella che dovrebbe essere una zona d'ombra.

Quando la luce è costretta a passare attraverso aperture o fenditure di dimensioni simili alla sua lunghezza d'onda, essa smette di propagarsi in maniera rettilinea ed è in grado di aggirare gli ostacoli.

È lo stesso fenomeno che si verifica nel caso delle onde sonore quando riusciamo a udire un suono emesso da una sorgente anche se ci troviamo dietro un muro o un ostacolo o in un'altra stanza: è evidente che i suoni si propagano in modo non sempre rettilineo e sono in grado di aggirare gli ostacoli.

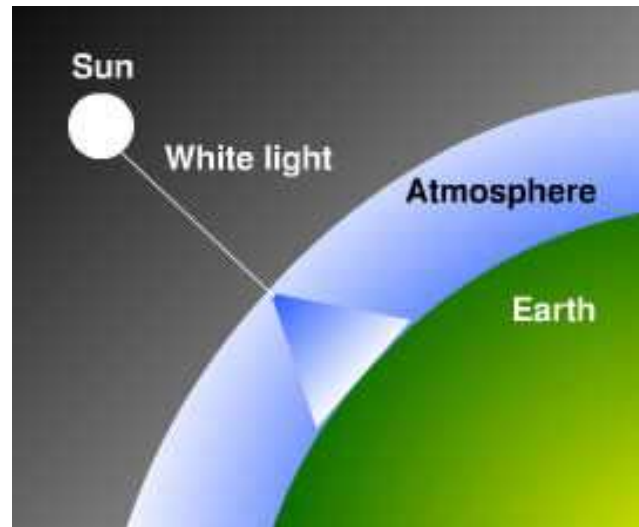
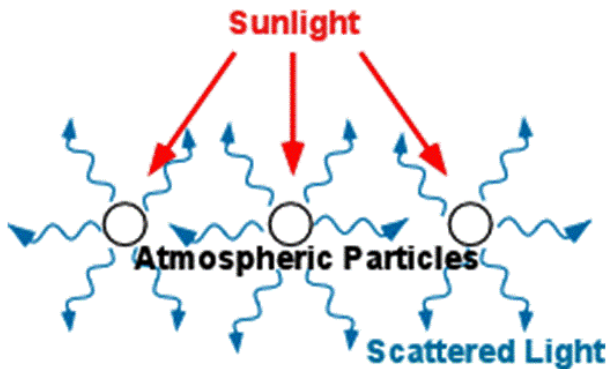
7.a. Diffusione

Per quanto questa terminologia non sia adottata universalmente, per *diffusione* si intende la diffrazione da strutture disordinate come :

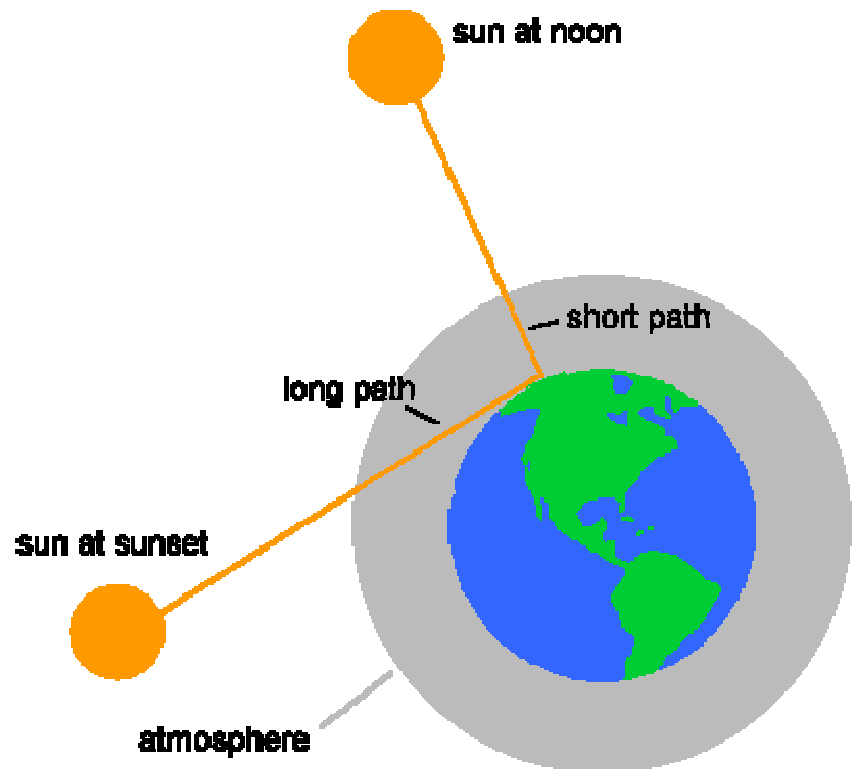
- a) le superfici rugose (con rugosità di dimensioni maggiori della lunghezza d'onda);
- b) i sistemi di particelle (molecole, nubi di goccioline, polveri ecc.).

La quasi totalità della luce che noi vediamo è luce diffusa. La stragrande maggioranza degli oggetti che ci circondano non sono lisci e totalmente trasparenti o riflettenti, ma otticamente rugosi. La luce che proviene dalla sorgenti primarie, Sole, lampade, ecc., giungendo su tali oggetti, viene da essi diffusa e rediretta in tutte le direzioni. È la diffusione che permette ad un oggetto illuminato di diventare una sorgente secondaria, e quindi di essere visto. Se non ci fosse la diffusione (se cioè tutte le superfici fossero otticamente lucide e la luce fosse rinviata solo secondo le leggi della riflessione e della rifrazione) per noi il cielo di giorno sarebbe nero, come in un'immensa notte, in cui si vedrebbero solo il sole, i lampioni delle strade, i fari delle macchine, le stelle, ma non le strade, le cose e il paesaggio.

Perché il cielo è azzurro? Anche il colore azzurro del cielo della Terra si spiega grazie alla diffusione, effettuata in questo caso da parte delle molecole dell'aria nell'alta atmosfera. La luce bianca del sole, composta da radiazioni di tutte le lunghezze d'onda, incide sull'atmosfera terrestre la quale diffonde le radiazioni corrispondenti al colore azzurro dieci volte più intensamente rispetto alle radiazioni corrispondenti al colore rosso; di conseguenza, se guardiamo dritti nel sole, vediamo la luce bianca; mentre se guardiamo in tutte le altre direzioni, vediamo la luce prevalentemente azzurra. In verità la luce maggiormente diffusa dall'atmosfera è quella viola, avente la lunghezza d'onda più piccola di tutte, ma poiché il nostro occhio è poco sensibile al viola, non vediamo questa luce, ma quella azzurra che segue a ruota.



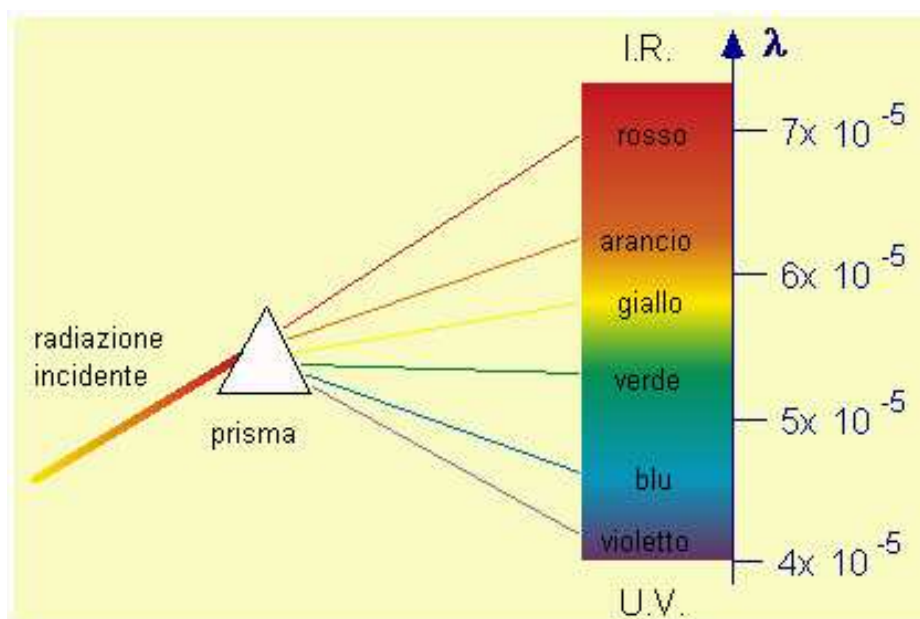
Alba e Tramonto. La luce *non diffusa*, ricca di rosso, si vede soltanto quando il Sole è basso sull'orizzonte, all'alba e al tramonto. In questo caso, infatti, poiché la luce deve attraversare uno strato maggiore di atmosfera, viene fortemente impoverita delle componenti azzurre, blu e viola, così che nella luce che giunge ai nostri occhi risultano preminenti i toni gialli e rossi, caratteristici dei meravigliosi e romantici spettacoli di colori a cui talvolta assistiamo (meglio se in dolce compagnia!).



8. Dispersione

Il fenomeno della dispersione fu evidenziato in maniera scientifica la prima volta da Isaac Newton, quando questi fece passare un fascio di luce bianca solare attraverso un prisma di vetro. La luce del Sole, dopo essere stata doppiamente rifratta dal prisma, si scomponneva nei colori dell'iride, come mostrato nella figura seguente.

La dispersione della luce è dovuta al fatto che l'indice di rifrazione di una sostanza trasparente non è costante per tutte le lunghezze d'onda della luce ma dipende dal colore e cioè dalla lunghezza d'onda della radiazione. Ad esempio, nel caso del vetro, l'indice di rifrazione del violetto è 1,522, del blu è 1,516, del giallo è 1,510 e del rosso è 1,507. Poiché la luce bianca del Sole è formata da onde di ogni lunghezza comprese tra 400 e 700 μm , ogni componente-colore viene rifratta con un angolo di rifrazione diverso: il rosso risulta il meno deviato, mentre il violetto risulta essere il più deviato.



Proprio attraverso il fenomeno della dispersione, fu compreso che la luce bianca è in realtà costituita da una sovrapposizione di più colori differenti. Tale distribuzione di colori venne per primo da Newton denominata spettro, dal latino *spectrum*, che vuol dire spettro o fantasma.

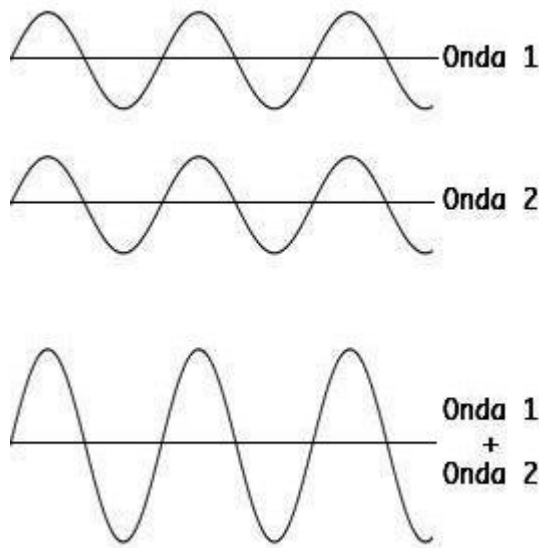
In realtà i colori non sono proprio sette (nella figura manca l'*indaco*), ma vi sono innumerevoli sfumature che vanno dal rosso al violetto. Tra tutte queste sfumature sono identificabili sette gruppi prevalenti, che costituiscono i colori dell'*iride*.

La dispersione della luce si verifica anche in natura con il fenomeno dell'arcobaleno.

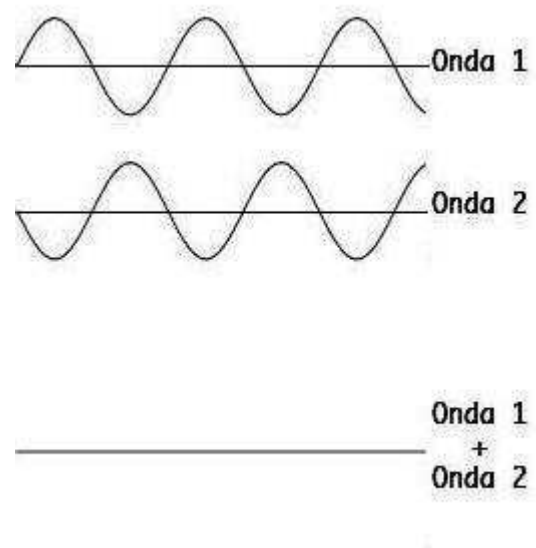
9. Interferenza

Il fenomeno dell'interferenza è dovuto alla sovrapposizione, in un punto dello spazio, di due o più onde. Si osserva che l'intensità dell'onda risultante, in un dato punto dello spazio, può essere maggiore o minore dell'intensità di ogni singola onda di partenza. L'interferenza viene detta **costruttiva**, quando l'intensità risultante è maggiore di ogni singola intensità originaria, o **distruttiva**, quando risulta inferiore.

Consideriamo l'interferenza tra due sole onde aventi la stessa lunghezza d'onda (o equivalentemente la stessa frequenza) e la stessa intensità. Nelle figure seguenti viene mostrata la dipendenza dal tempo di due onde identiche che giungono nello stesso punto dello spazio.



interferenza costruttiva

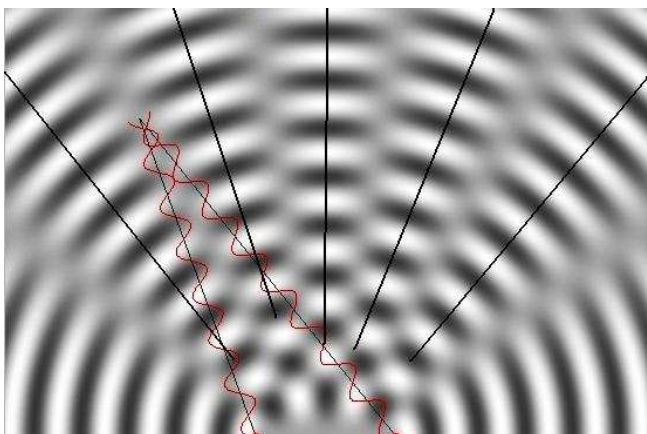


interferenza distruttiva

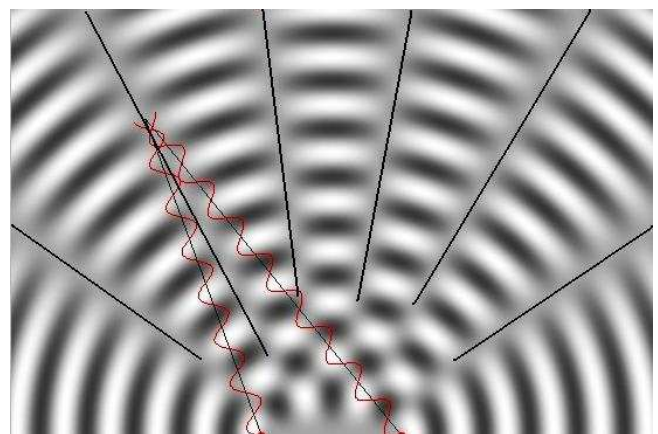
Nel primo caso le onde giungono in **concordanza di fase**. L'effetto risultante è che le due onde si sovrappongono esattamente e l'onda risultante ha ampiezza doppia rispetto alle onde componenti.

Nel secondo caso le onde arrivano in **opposizione di fase**. Le creste di un'onda si sovrappongono agli avvallamenti dell'altra, quindi le due onde si elidono a vicenda e la risultante è nulla.

Quando due sorgenti emettono onde nello spazio, possono esserci regioni in cui l'interferenza è costruttiva (detti **massimi di interferenza**) e altre in cui l'interferenza è distruttiva (detti **minimi di interferenza**).



massimi di interferenza



minimi di interferenza

Le due figure di sopra si riferiscono all'interferenza di due onde circolari in acqua, ma il fenomeno è del tutto analogo nel caso di onde elettromagnetiche. A sinistra sono evidenziate dai segmenti neri i punti in cui le due onde sferiche determinano interferenza costruttiva: le onde risultanti sono più grandi; nella figura di destra sono invece evidenziate i punti dove l'interferenza è distruttiva, caratterizzati da quasi assenza di perturbazione.

fonti: Wikipedia - Sissa Trieste "Chiedi ad Ulisse" – "Fisica per moduli" – Zanichelli "La fisica di Amaldi" – Zanichelli