8 Onde

Se si perturba un punto di un mezzo esteso (per esempio lanciando un sasso in uno specchio d'acqua), la perturbazione si estende ai punti circostanti: si tratta di un *fenomeno ondulatorio*.

Un'onda è un'oscillazione che si propaga nello spazio trasportando energia, ma non materia.

Appoggiando un tappo di sughero su uno specchio d'acqua e provocando un'onda, si nota che il tappo oscilla verticalmente, ma non ha spostamenti orizzontali: la materia non viene trasportata dall'onda.

8.1 Classificazione delle onde esistenti in natura

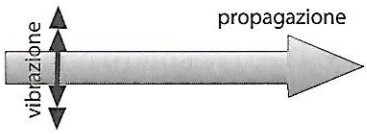
Le onde si distinguono in:

- **onde meccaniche**: il meccanismo della loro propagazione ha origine dalle proprietà elastiche del mezzo in cui si trasmettono; **hanno bisogno di un mezzo nel quale propagarsi**; non si propagano nel vuoto (le onde acustiche sono un esempio di onde meccaniche);
- **onde elettromagnetiche**: il meccanismo della loro propagazione ha origine dalle proprietà dei campi elettrici e magnetici; **non** hanno bisogno di un mezzo nel quale propagarsi; si propagano anche nel vuoto (si pensi alla luce del Sole che giunge fino a noi attraversando 150.000.000 di chilometri di spazio pressoché vuoto).

Le onde si dividono anche in trasversali e longitudinali:

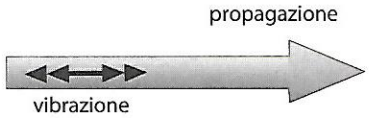
- **onde trasversali**: la direzione di vibrazione è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda;
- **onde longitudinali**: la direzione di vibrazione è parallela alla direzione di propagazione dell'onda.

Onde trasversali



Le onde sull'acqua e la luce sono onde di tipo trasversale.

Onde longitudinali



Il suono è un fenomeno ondulatorio costituito da onde longitudinali.

Le *onde meccaniche* possono propagarsi indifferentemente nei solidi, nei liquidi e negli aeriformi. In particolare si ha:

- nei solidi si propagano sia onde meccaniche longitudinali che trasversali;
- nei gas e all'interno dei liquidi si propagano solo onde meccaniche longitudinali;
- sulla superficie dei liquidi si propagano solo onde meccaniche trasversali.

Mentre le onde meccaniche necessitano di un mezzo per propagarsi, le onde elettromagnetiche viaggiano indifferentemente nel vuoto e nella materia: la luce, per esempio, si propaga anche nei liquidi e, in misura minore, nei solidi.

8.2 | Caratteristiche di un'onda

Periodo *T*

Tempo necessario a compiere un'oscillazione completa (si misura in secondi).

Lunghezza d'onda λ

Distanza percorsa dall'onda in un periodo (si misura in metri).

Frequenza ν

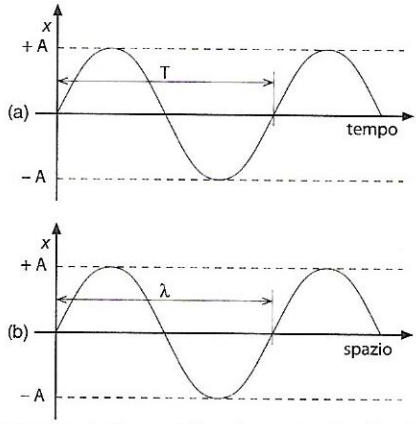
Numero di oscillazioni al secondo (si misura in hertz).

Velocità v

È la velocità con cui si propaga l'energia trasportata dall'onda (si misura in m/s).

Ampiezza *A*

Per le onde meccaniche corrisponde al massimo spostamento di una particella dalla sua posizione di equilibrio.



Rappresentazione dell'andamento di un'onda sinusoidale nel tempo (a) e nello spazio (b).

La figura (a) rappresenta l'oscillazione di un punto *x* al variare del tempo, mentre la figura (b) è un'immagine del profilo dell'onda in un istante *t* fissato.

In entrambi i casi il risultato è una sinusoide, data la natura oscillatoria del fenomeno.

Il periodo e la frequenza di un'onda esprimono proprietà intrinseche dell'onda mentre la lunghezza d'onda, la velocità e l'ampiezza dipendono dal mezzo nel quale l'onda si propaga.

Valgono le seguenti relazioni notevoli:

$$\left.\begin{array}{l} T = 1/\nu \\ v = \lambda/T \end{array}\right\} \Rightarrow \quad v = \nu \cdot \lambda$$

La lunghezza d'onda delle onde elettromagnetiche viene spesso misurata in **angstrom** (simbolo: Å) dove $1\ \text{Å} = 10^{-10}\ \text{m}$.

Una corda orizzontale vincolata negli estremi viene fatta vibrare. A metà della corda è legato un fiocchetto rosa, che oscilla intorno alla posizione di equilibrio con una frequenza di 2 Hz.

Quanto vale la velocità di propagazione della vibrazione lungo la corda se la distanza orizzontale tra un massimo e un minimo successivi è 2 m?

La frequenza è legata al periodo dalla relazione:

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{2\ \text{Hz}} = 0{,}5\ \text{s}$$

La distanza tra un massimo e un minimo successivi è metà della lunghezza d'onda (che invece è la distanza tra due massimi successivi o, analogamente, due minimi successivi), per cui $\lambda = 4\ \text{m}$. Si trova quindi che la velocità di propagazione vale:

$$v = \frac{\lambda}{T} = 8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Si calcoli la frequenza di un'onda avente una lunghezza d'onda pari a 6000 Å e una velocità pari a quella della luce, c = 300.000 km/s.

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{300.000\ \text{km/s}}{6000 \cdot 10^{-13}\ \text{km}} = 50 \cdot 10^{13}\ \text{Hz}$$

© Alpha Test

8.2.1 | Fase di un'onda

L'oscillazione regolare di un punto x intorno a una posizione di equilibrio costituisce un moto armonico. Un'onda può essere quindi studiata come moto armonico di un punto la cui distanza dalla posizione di equilibrio è detta *elongazione*.

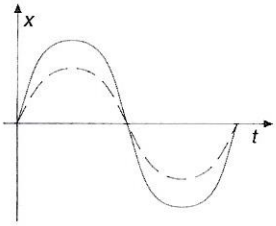
Come si è visto (§ 3.11.2) la legge oraria che il punto segue nella sua oscillazione è del tipo:

$$x(t) = A \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \varphi)$$

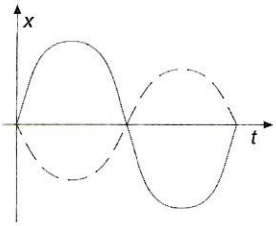
dove:

- A è l'ampiezza dell'onda, ed è il massimo valore dell'elongazione;
- ω è la pulsazione: $\omega = 2\pi/T = 2\pi\nu$
- $(\omega \cdot t + \varphi)$ è detta **fase** dell'onda e φ è la **fase iniziale**.

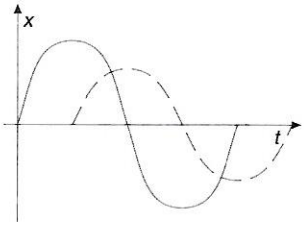
Due onde possono avere stessa frequenza, lunghezza d'onda e velocità, ma avere fase diversa, come illustrato nelle figure seguenti.



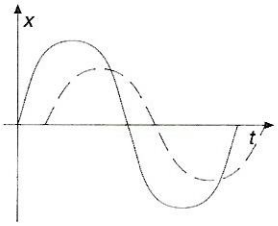
Onde in concordanza di fase: quando l'elongazione della prima è massima lo è anche quella della seconda.



Onde in opposizione di fase: quando l'elongazione della prima onda è massima, quella della seconda è minima.



Onde in quadratura di fase: la seconda è in ritardo rispetto alla prima di un quarto di periodo, per cui quando l'elongazione della prima ha un massimo, quella della seconda è nulla.



Onde sfasate in maniera casuale: la prima onda è in anticipo di fase rispetto alla seconda, che viene di conseguenza detta in ritardo di fase.

8.2.2 | Fronti d'onda

Il **fronte d'onda** è la superficie ipotetica formata da tutti i punti che, a un dato istante, hanno lo stesso valore di fase.

Per le onde nel piano (bidimensionali) il fronte d'onda è una linea e non una superficie (le circonferenze delle onde sull'acqua sono fronti d'onda), mentre per le onde nello spazio (tridimensionali) il fronte d'onda è una superficie.

Il fronte d'onda è in ogni punto **perpendicolare** alla direzione di propagazione dell'onda.

In un fronte d'onda, i punti oscillanti si trovano alla stessa distanza dalla sorgente, spostati in maniera uguale dai rispettivi centri di oscillazione, ed hanno stessa velocità e stessa accelerazione. I fronti d'onda vengono anche detti **superfici d'onda**. In base alla forma dei fronti d'onda si può fare un'ulteriore classificazione delle onde in onde lineari (monodimensionali), piane e circolari (bidimensionali), sferiche (tridimensionali).

8.2.3 | Intensità di un'onda

Si è già detto che un'onda trasporta energia; l'*intensità di un'onda* è la quantità di energia che, nell'unità di tempo, attraversa l'unità di superficie disposta perpendicolarmente alla direzione di propagazione (si misura in watt/m^2). L'energia e quindi l'intensità di un'onda sono proporzionali al quadrato dell'ampiezza e al quadrato della frequenza ($I = k \cdot \nu^2 \cdot A^2$).

Se r_1 e r_2 sono le distanze di due punti dalla sorgente dell'onda e I_1 e I_2 sono le rispettive intensità dell'onda nei due punti, valgono le seguenti relazioni:

per le onde lineari e piane $I_1 = I_2$ → l'intensità di un'onda lineare e di un'onda piana è costante.

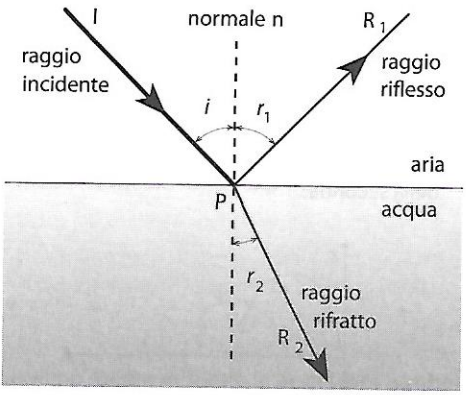
per le onde circolari $I_1/I_2 = r_2/r_1$ → l'intensità di un'onda circolare è inversamente proporzionale alla distanza.

per le onde sferiche $I_1/I_2 = r_2^2/r_1^2$ → l'intensità di un'onda sferica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

8.3 | Fenomeni tipicamente ondulatori

8.3.1 | Riflessione e rifrazione

Quando un'onda incontra, sul suo cammino, una superficie di separazione tra due mezzi di densità diversa, il raggio viene parzialmente riflesso e parzialmente rifratto da tale superficie. In figura sono rappresentati i fenomeni della riflessione e della rifrazione di un raggio di luce nel passaggio aria-acqua.



Leggi della riflessione

- Il raggio incidente I, il raggio riflesso R_1 e la normale n giacciono sullo stesso piano.
- L'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione: $i = r_1$.

Se $i = 0$, il raggio incidente si riflette su se stesso.

Leggi della rifrazione

Quando un'onda passa da un mezzo di densità ρ_1 a un mezzo di densità ρ_2 la sua direzione di propagazione cambia: si allontana o si avvicina alla normale alla superficie di separazione tra i due mezzi a seconda che ρ_1 sia maggiore o minore di ρ_2. Insieme alla direzione di propagazione cambia anche la velocità di propagazione dell'onda nei due mezzi. Il fenomeno descritto prende il nome di *rifrazione*. Nella figura precedente, è riportata la rifrazione di un raggio di luce nel passaggio aria-acqua. Il raggio che si propaga nel nuovo mezzo (acqua) si avvicina alla normale della superficie di separazione dei due mezzi. L'angolo di incidenza i è maggiore dell'angolo di rifrazione r_2.

Valgono le leggi:

- il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale n sono complanari;
- $\dfrac{\text{sen}\,i}{\text{sen}\,r_2} = \text{costante} = n_{1,2}$, dove $n_{1,2} = n_2/n_1$ è detto *indice di rifrazione relativo* del mezzo 2 rispetto al mezzo 1, mentre n_1 e n_2 sono gli *indici di rifrazione assoluti* dei mezzi 1 e 2. Il vuoto ha indice di rifrazione $n = 1$.

Indicando con v_1 e v_2 le velocità dell'onda nei mezzi 1 e 2, si dimostra che:

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} \Rightarrow \frac{v_1}{v_2} = \frac{\text{sen}\,i}{\text{sen}\,r_2}$$

Quanto vale la velocità della luce in un mezzo con indice di rifrazione 1,5?
Dati due mezzi 1 e 2 aventi indici di rifrazione assoluti n_1 e n_2, detta v_1 la velocità della luce nel mezzo 1 e v_2 la velocità della luce nel mezzo 2, secondo le leggi della rifrazione si ha:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

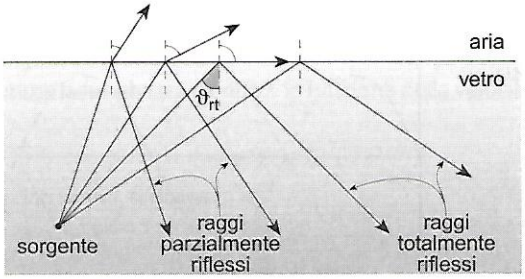
Prendendo come mezzo 1 il vuoto (che ha indice di rifrazione 1) e come mezzo 2 quello con indice di rifrazione 1,5, è possibile calcolare v_2:

$$\frac{c}{v_2} = \frac{n_2}{1} \quad \Rightarrow \quad v_2 = \frac{c}{n_2} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1{,}5} = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

La velocità della luce diminuisce all'aumentare dell'indice di rifrazione del mezzo in cui si propaga.
Se un'onda passa da un mezzo dove si muove più velocemente a un altro dove si muove meno velocemente, l'angolo di incidenza è più grande di quello di rifrazione e il raggio si avvicina alla normale alla superficie.

8.3.2 | Riflessione totale

Quando un raggio luminoso passa da un mezzo più denso a uno meno denso, la velocità aumenta e il raggio rifratto si allontana dalla normale alla superficie di separazione dei due mezzi: se l'angolo di incidenza aumenta, aumenta anche l'angolo di rifrazione.



Esiste un *angolo di riflessione totale* ϑ_{rt} oltre al quale il raggio viene totalmente riflesso.

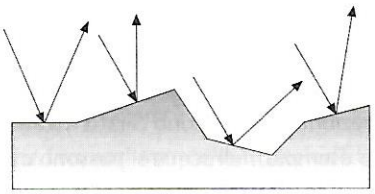
Per tale angolo vale $\text{sen}\,\vartheta_{rt} = n_2/n_1$, dove n_1 e n_2 sono rispettivamente l'indice di rifrazione del primo e del secondo mezzo.

Si calcoli l'angolo di riflessione totale nel passaggio vetro-aria, sapendo che l'indice di rifrazione del vetro vale circa 1,5.

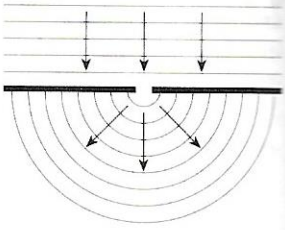
$$\text{sen}\,\vartheta_{rt} = n_2/n_1 = 1/1{,}5 \quad \Rightarrow \quad \vartheta_{rt} = 41{,}81°$$

8.3.3 | Diffusione

Se il raggio incidente colpisce una superficie non ben levigata, viene riflesso in direzioni differenti a seconda dell'inclinazione della parte di superficie colpita.
Se con una torcia si illumina una parete, il raggio riflesso non *rimbalza* sulla parete formando un angolo di riflessione uguale a quello di incidenza, ma viene diffuso in tutte le direzioni, illuminando tutta la stanza.



8.3.4 | Diffrazione



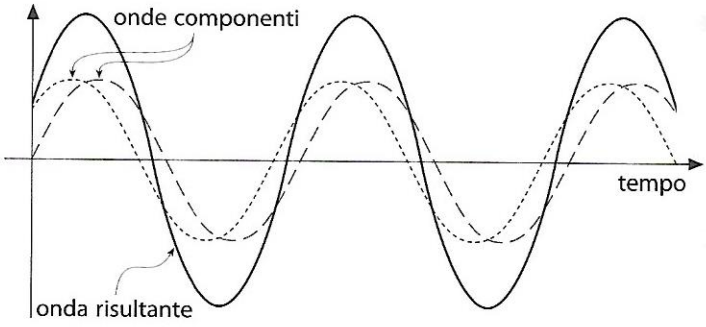
Le onde possono anche presentare delle deviazioni della direzione di propagazione, dette fenomeni di diffrazione. Il fenomeno è particolarmente evidente quando l'onda incontra un ostacolo o una fenditura le cui dimensioni sono confrontabili con quelle della lunghezza d'onda.

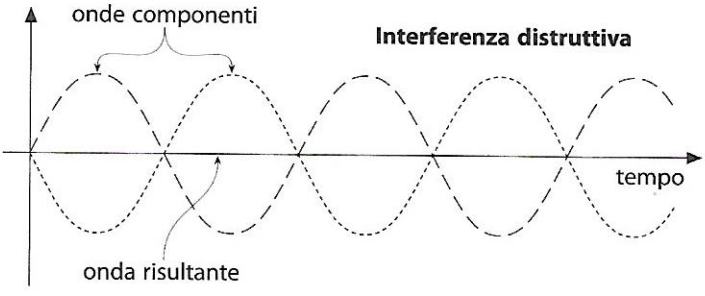
Quando un'onda incontra un ostacolo sul suo cammino, il fronte dell'onda si deforma in modo tale da aggirare l'ostacolo. Se l'onda colpisce una fenditura (si veda la figura), la fenditura si comporta come una sorgente puntiforme da cui si originano onde nuove (**principio di Huygens-Fresnel**).

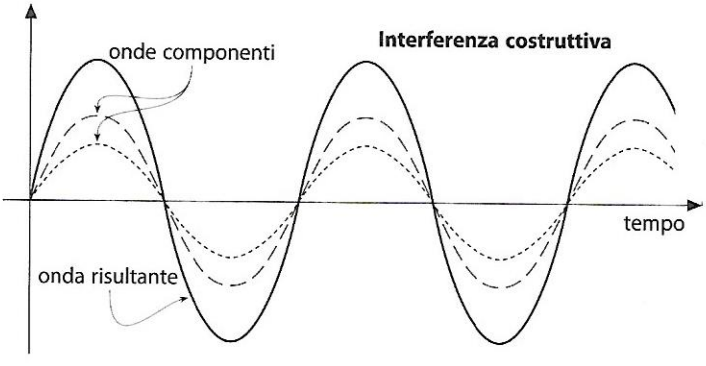
8.3.5 | Interferenza

Si considerino due onde che si propagano in un mezzo con uguale frequenza e relazione di fase costante (onde generate da sorgenti coerenti). L'elongazione di un punto del mezzo dove le onde si sovrappongono è data dalla somma delle elongazioni dovute alle singole onde.

Tale fenomeno prende il nome di *interferenza*: si parla di interferenza costruttiva o distruttiva a seconda che le onde siano in concordanza o in opposizione di fase.







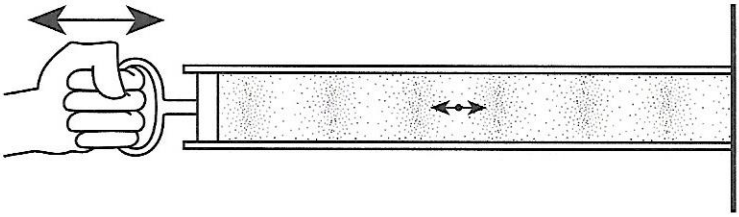
Onde stazionarie

Sono onde che si originano dalla sovrapposizione di due onde di uguale ampiezza che si propagano in direzioni opposte; sono caratterizzate dalla presenza di punti fissi detti *nodi*.

Per esempio, nell'acqua si possono osservare in prossimità di una parete verticale sulla quale le onde si riflettono: si ha infatti sovrapposizione tra l'onda incidente e l'onda riflessa.

8.4 | Onde sonore

Il suono è un'onda meccanica che ha bisogno di un mezzo nel quale propagarsi. Nei fluidi è un'*onda elastica longitudinale* costituita da una serie di strati in cui il fluido è alternativamente compresso e rarefatto (come rappresentato in figura); nei *solidi* è costituito da onde *trasversali* e *longitudinali*.



Le onde acustiche sono onde meccaniche: non si propagano nel vuoto.

Perché un'onda acustica sia *udibile* bisogna che la sua frequenza ν soddisfi la condizione $16\ \text{Hz} < \nu < 20.000\ \text{Hz}$. Se $\nu < 16$ Hz si parla di *infrasuoni*; se $\nu > 20.000$ Hz si parla di *ultrasuoni*.

Quando viene prodotto un suono, le molecole di materia prossime alla sorgente cominciano a vibrare; la vibrazione viene trasmessa alle molecole vicine, poi da queste alle successive e così via.

La velocità con cui la vibrazione si propaga è diversa a seconda del mezzo: nell'aria secca vale 331,4 m/s; nell'aria in condizioni ambientali ordinarie vale 340 m/s; nei liquidi è maggiore (1450 m/s nell'acqua); nei solidi è ancora più alta (5130 m/s nel ferro).

Se un suono si propaga in un certo mezzo con una velocità di 500 m/s e ha una frequenza di 100 Hz, la sua lunghezza d'onda vale:
La relazione che esprime la lunghezza d'onda λ in funzione della velocità v e della frequenza ν è la seguente:

$$\lambda = v/\nu$$

per cui, utilizzando i dati forniti, si ricava:

$$\lambda = \frac{500}{100}\frac{\text{m/s}}{\text{Hz}} = 5\ \text{m}$$

8.4.1 | Caratteri distintivi del suono

- **Altezza:** un suono si dice alto (*acuto*) o basso (*grave*) a seconda che la sua frequenza sia elevata o bassa. Il suono più grave percepibile dall'orecchio umano ha una frequenza di 16 Hz.
- **Intensità:** è l'energia trasportata dall'onda nell'unità di tempo per unità di superficie. Poiché l'intensità di un'onda sferica è inversamente proporzionale al quadrato della distanza (§ 8.2.3), un suono è sempre più debole man mano che ci si allontana dalla sorgente.

  L'*intensità del suono* si misura in watt/m^2. L'*intensità di sensazione sonora* si misura invece in bel: due suoni differiscono di un bel quando l'uno è dieci volte più intenso dell'altro. Di solito si preferisce usare un sottomultiplo del bel pari a 1/10 bel = decibel (dB).
  - Soglia dell'udibile: minima intensità sonora percepibile dall'uomo = 0 dB.
  - Soglia del dolore: massima intensità sonora tollerata dall'uomo ≈ 120 dB.
- **Timbro:** è legato alla forma dell'onda. Due strumenti musicali differenti possono eseguire la medesima nota con la stessa frequenza e intensità: ciò che rende i due suoni diversi è il loro timbro.
- **Suono e rumore:** mentre i suoni sono onde acustiche *periodiche*, **i rumori mancano di periodicità**. Se la risultante di più suoni non ha un carattere periodico, si ha solo rumore.

8.4.2 | Il fenomeno dell'eco

Quando un'onda sonora urta contro una parete viene riflessa e torna verso la sorgente. Può accadere che un ascoltatore posto in prossimità della sorgente senta l'onda sonora come se provenisse dal punto dove si è avuta la riflessione. Questo effetto è detto eco.

Affinché si abbia eco, il suono originale e il suono riflesso devono pervenire all'ascoltatore con un intervallo di almeno un decimo di secondo (altrimenti si parla di *rimbombo*). È inoltre necessario che l'intensità dell'onda sonora diminuisca poco durante il tragitto di andata e ritorno, il che si realizza quando l'assorbimento a cui va incontro è minimo. Per questo il fenomeno dell'eco è evidente in luoghi spaziosi e vuoti, come in montagna, dove i pendii fungono da superfici riflettenti.

Si calcoli la distanza minima dalla parete riflettente a cui è necessario porsi per udire il fenomeno dell'eco.

Indicando con d la distanza tra la sorgente del suono e la parete riflettente, per tornare alla sorgente l'onda copre una distanza pari a $2d$. Sapendo che nell'aria il suono viaggia a una velocità di circa 340 m/s, il tempo impiegato per percorrere l'intero tragitto è pari a:

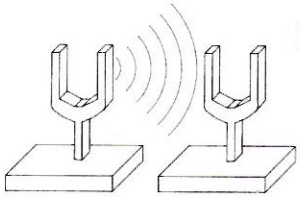
$$t = 2d/v$$

Uguagliando tale tempo al tempo minimo per distinguere i due suoni, che è pari a 0,1 s, si ricava la distanza d minima perché si abbia eco:

$$2d = v \cdot t \quad \Rightarrow \quad d = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{340\ \text{m/s} \cdot 0{,}1\ \text{s}}{2} = 17\ \text{m}$$

8.4.3 | Risonanza

Il diapason è uno strumento costituito da una barretta d'acciaio piegata a U, sostenuta da un manico. La sua particolarità è la capacità di emettere un'onda sonora avente un'unica frequenza. Si prendano ora due diapason uguali e si faccia vibrare uno solo dei due. Dopo pochi secondi, anche l'altro comincerà a vibrare emettendo lo stesso suono. Questo fenomeno prende il nome di *risonanza* ed è proprio non solo delle onde acustiche, ma di qualunque tipo di onda.

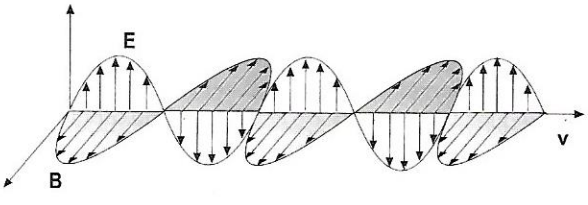


Un corpo in grado di emettere un'onda di una certa frequenza, cioè dotato di una propria frequenza di oscillazione, si mette a vibrare quando è colpito da un'onda avente proprio quella frequenza.

A causa del fenomeno della risonanza, alle truppe militari si comanda di rompere il passo della marcia quando passano sopra un ponte. Potrebbe infatti accadere che la frequenza propria di oscillazione del ponte sia uguale a quella del passo di marcia: in questo caso si assisterebbe a un'amplificazione dell'oscillazione del ponte e, nel caso peggiore, alla sua rottura.

8.5 | Onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali formate da un campo elettrico e un campo magnetico che si propagano vibrando perpendicolarmente tra loro e perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda.



© Alpha Test

Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali che si propagano anche nel vuoto.
La loro velocità nel vuoto è una costante pari a $3 \cdot 10^8$ m/s = 300.000 km/s; viene indicata con la lettera c.

La luce visibile è un'onda elettromagnetica con lunghezza d'onda λ compresa fra 380 nm (violetto) e 760 nm (rosso). La natura ondulatoria della luce è in accordo con il fatto che presenta i fenomeni della riflessione (§ 8.3.1), della diffrazione (§ 8.3.4) e dell'interferenza (§ 8.3.5), tipici delle onde.

Uno dei risultati della fisica moderna è stato però quello di mostrare che la luce (e con essa tutte le onde elettromagnetiche) ha in realtà una *doppia natura: ondulatoria e corpuscolare.*

I corpuscoli costituenti la luce si chiamano *quanti di luce* o *fotoni*: **la loro energia è direttamente proporzionale alla frequenza** secondo la relazione seguente.

$$E = h \cdot \nu$$

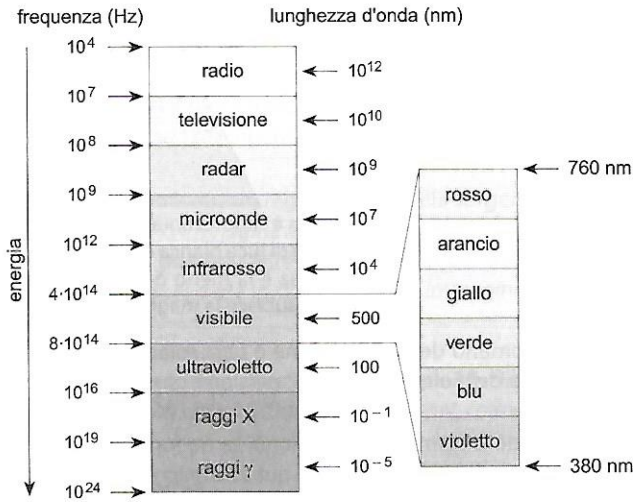
dove h è detta costante di Planck. Quindi **con la luce si propaga energia**.

Un'onda elettromagnetica è tanto più energetica quanto maggiore è la sua frequenza.

I raggi infrarossi sono meno energetici della luce visibile, che a sua volta è meno energetica degli ultravioletti. Con l'aumentare dell'energia di un'onda elettromagnetica, aumenta anche la probabilità di subire dei danni da esposizione alla radiazione stessa.

8.5.1 | Classificazione delle onde elettromagnetiche

Lo schema a lato riporta una classificazione delle onde elettromagnetiche al variare della loro frequenza e quindi della loro lunghezza d'onda. Si noti che le onde radio, l'ultravioletto, la luce visibile, gli infrarossi, le microonde e i raggi X sono tutte onde elettromagnetiche che differiscono per frequenza e lunghezza d'onda.



Facendo riferimento allo schema precedente, si verifichi a quale campo dello spettro elettromagnetico appartiene una radiazione che nel vuoto ha lunghezza d'onda pari a 1 cm.
Anzitutto si trasforma la lunghezza d'onda data in nanometri:

$$1 \text{ cm} = 10^{-2} \text{ m} = 10^{-2} \cdot 10^9 \text{ nm} = 10^7 \text{ nm}$$

La radiazione data appartiene al campo delle microonde.

8.5.2 | Dispersione

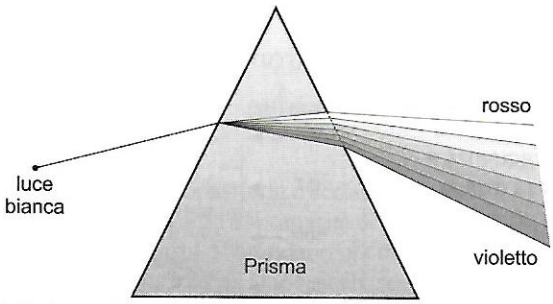
Le luce bianca del Sole è un insieme di onde elettromagnetiche aventi frequenze comprese tra $3{,}8 \cdot 10^{14}$ Hz e $7{,}6 \cdot 10^{14}$ Hz. A tale spettro di frequenze corrisponde uno spettro di colori che vanno dal rosso al violetto.

Il rosso ha frequenza minore, e quindi lunghezza d'onda maggiore, del violetto. Prima del rosso, non visibile dall'occhio umano, si ha l'infrarosso; dopo il violetto si ha l'ultravioletto.

Quando un'onda luminosa colpisce un corpo trasparente, subisce il fenomeno della rifrazione. L'indice di rifrazione varia però a seconda della frequenza dell'onda e quindi ogni colore subisce una diversa rifrazione.

Colore	Lunghezza d'onda (Å)
violetto	3800-4200
indaco	4200-4500
blu	4500-5000
verde	5000-5700
giallo	5700-5900
arancione	5900-6100
rosso	6100-7600

Un fascio di luce bianca, quando subisce il fenomeno della rifrazione, si scompone nelle sue componenti monocromatiche. Il fenomeno descritto prende il nome di **dispersione della luce**.



Nella figura è rappresentato il fenomeno della dispersione di un fascio di luce bianca che attraversa un prisma di vetro: la luce rossa è la meno deviata, mentre la luce violetta è quella che subisce la maggior deviazione.

Il fenomeno della dispersione è particolarmente evidente nel caso dell'arcobaleno, dove la luce bianca del Sole subisce la dispersione passando attraverso le goccioline d'acqua sospese nell'atmosfera.
Quando si forma un arcobaleno, se ne forma sempre uno gemello parallelo, con i colori invertiti rispetto al primo. Purtroppo quest'ultimo è di solito poco visibile, ma se si ha un buon campo visivo, si riesce spesso a intravederne almeno l'inizio o la fine.

8.5.3 | Intensità luminosa e intensità di illuminazione

Si definisce **intensità luminosa** *I* di una sorgente l'energia che questa emette in un secondo. Si misura in watt o anche in **candele** (simbolo: cd), dove una candela è 1/60 della radiazione emessa da 1 cm^2 di superficie totalmente assorbente (corpo nero) portato alla temperatura di fusione del platino (1769 °C) che si trova alla pressione di 1 Pa.

L'**intensità di illuminazione** *E* di una sorgente è invece l'energia che arriva in un secondo su un metro quadrato di superficie. L'unità di misura dell'intensità di illuminazione è il **lux** (simbolo: lx), definito come l'intensità di illuminazione prodotta da una sorgente di intensità luminosa di una candela su una superficie posta a 1 m di distanza.

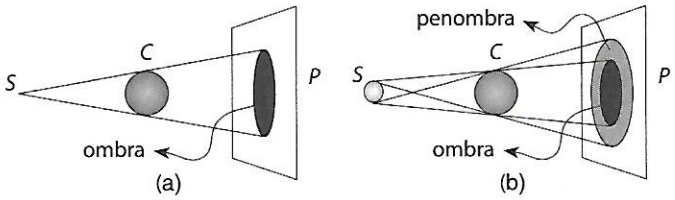
Si può dimostrare che l'intensità di illuminazione è direttamente proporzionale all'intensità luminosa della sorgente e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra schermo e sorgente (legge di Lambert).

© Alpha Test

8.6 | Ottica geometrica

Per ottica geometrica si intende lo studio delle onde luminose e dei fenomeni riguardanti la loro propagazione nell'approssimazione che la lunghezza d'onda sia piccola rispetto alle dimensioni degli ostacoli e delle fenditure incontrati, in modo da poter trascurare l'effetto della diffrazione.

Poiché la luce si propaga in linea retta, nell'ottica geometrica si preferisce parlare di raggi e disegnare le onde come linee rette continue aventi la stessa direzione e verso della propagazione dell'onda. I raggi di luce, ogni volta che incontrano una superficie, subiscono i fenomeni della riflessione e della rifrazione: in base alla geometria della superficie incontrata e alle proprietà dei mezzi attraversati dai raggi, si presentano vari casi ed effetti. Un effetto della propagazione in linea retta della luce è la formazione di ombre e penombre. Nella figura sono rappresentati i casi di sorgente luminosa puntiforme (a) ed estesa (b).



Se la sorgente è puntiforme, si forma un'ombra scura dietro il corpo opaco *C*; se la sorgente è estesa, oltre a una zona di ombra vera e propria, corrispondente alla regione dove nessuno dei raggi uscenti da *S* arriva a colpire lo schermo *P*, esiste anche una zona di penombra, dove una parte dei raggi non viene intercettata da *C* e arriva a *P*.

L'ottica geometrica, una volta ipotizzato che la luce si propaga in linea retta, si interessa dell'interazione tra onde luminose e materiali aventi proprietà riflettenti e rifrangenti. In generale si ha una sorgente luminosa, detta anche *punto oggetto*, un corpo riflettente e/o rifrangente, e un *punto immagine* dove si forma l'immagine dell'oggetto.

Per costruire tale immagine è necessario considerare almeno due raggi uscenti dalla sorgente e seguirli nel loro cammino: il punto dove essi si incontrano è detto *immagine reale* dell'oggetto. Non è detto però che i raggi convergano e si incontrino in un punto; essi possono altresì divergere. In tal caso l'immagine è ottenuta dall'intersezione dei prolungamenti dei raggi: si parla in questo caso di *immagine virtuale*.

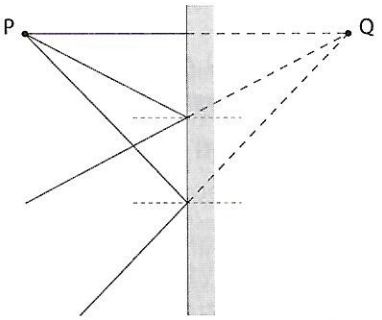
8.6.1 | Specchi

Il primo caso di applicazione dell'ottica geometrica affrontato in questo capitolo riguarda l'interazione fra luce e superfici perfettamente riflettenti: gli specchi. Questi ultimi si distinguono in *piani*, *concavi* e *convessi*.

Specchi piani

Uno specchio piano è una lastra piana ricoperta di un sottile strato d'argento che la rende totalmente riflettente.

Per costruire l'immagine di un oggetto puntiforme è sufficiente far partire dall'oggetto due raggi diretti verso lo specchio. Ciascuno di essi verrà riflesso secondo le leggi della riflessione. Poiché i due raggi divergono, l'intersezione si ha tra i loro prolungamenti. Si tratta di un'immagine virtuale. In figura è rappresentata la riflessione di un oggetto puntiforme in uno specchio piano: l'oggetto puntiforme (P) e la sua immagine (Q) si trovano da parti opposte rispetto allo specchio e alla stessa distanza da questo. Si tratta di un'immagine virtuale.



In uno specchio piano, le immagini sono sempre virtuali, diritte, simmetriche, hanno le stesse dimensioni dell'oggetto e sono poste alla stessa distanza dell'oggetto dalla superficie riflettente.

Un comune specchio di casa è uno specchio piano. Guardandosi allo specchio, si vede la propria immagine virtuale (dall'altra parte dello specchio), avente le stesse dimensioni, alla stessa distanza dallo specchio. Se si alza il braccio destro, l'immagine solleva il sinistro (simmetria).

L'immagine di un libro in uno specchio piano è alta 30 cm quando il libro dista 1 m dallo specchio. Quanto è alta l'immagine se il libro viene posto a 2 m di distanza dallo specchio?
La risposta corretta è 30 cm; le dimensioni dell'immagine creata da uno specchio piano sono infatti sempre uguali a quelle dell'oggetto.

Specchi sferici

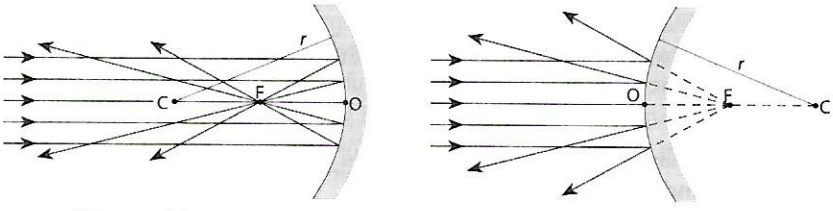
Uno specchio può essere creato anche da superfici curve riflettenti: si parla in tal caso di specchio sferico se la superficie è una calotta sferica. Gli specchi sferici si dividono in specchi concavi e convessi a seconda che la superficie riflettente sia quella interna o esterna alla calotta.

specchio concavo specchio convesso

Il centro della sfera di cui lo specchio è parte prende il nome di **centro ottico**, mentre il punto centrale della calotta sferica è il **vertice**. L'**asse ottico** è la retta passante per il centro e il vertice, mentre il **punto focale** o **fuoco** è il punto dell'asse ottico in cui viene riflesso un fascio di raggi paralleli all'asse stesso.

Negli **specchi concavi** i raggi paralleli all'asse ottico principale convergono nel **punto focale** F che si trova a metà fra il centro di curvatura C e il vertice O dello specchio (figura a). La **distanza focale** *f* è la distanza fra il punto focale e lo specchio. Gli specchi concavi sono anche detti **convergenti**.

Viceversa, negli **specchi convessi** i raggi paralleli all'asse ottico principale divergono (figura b) e la luce sembra provenire dal punto focale, che si trova *dietro il vertice dello specchio*. Anche in questo caso il punto focale F si trova a metà fra il centro di curvatura C e lo specchio. Gli specchi convessi sono anche detti **divergenti**.



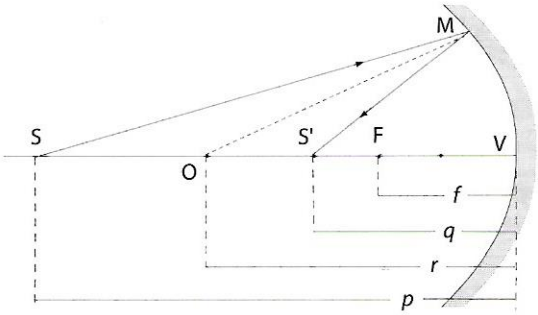
(a) specchio concavo (b) specchio convesso

Riflessione di raggi paralleli all'asse ottico principale in uno specchio concavo e in uno convesso.

Formula dei punti coniugati

Si consideri uno specchio concavo di centro ottico O e vertice V, e una sorgente luminosa *S*. Con le leggi della riflessione è possibile costruire il punto immagine di *S*. Esistono delle relazioni precise tra le posizioni di tutti questi punti. Per trovarle, è necessario stabilire una notazione per gli elementi che caratterizzano uno specchio (si veda la figura seguente):

- la *distanza focale f*: è la distanza tra il fuoco F e lo specchio;
- il *raggio di curvatura r*: è la distanza fra il centro ottico O e lo specchio; si ha che $r = 2f$;
- *p*: è la distanza fra l'oggetto e lo specchio;
- *q*: è la distanza fra l'immagine e lo specchio.



Esiste una semplice relazione fra questi elementi detta *formula dei punti coniugati*:

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{2}{r}=\frac{1}{f}$$

La formula dei punti coniugati consente di calcolare la *posizione dell'immagine* a partire dalla posizione dell'oggetto e conoscendo la distanza focale. Il valore di q che si trova può essere sia positivo che negativo.

q positivo → **l'immagine è *reale* (si trova di fronte allo specchio)**
q negativo → **l'immagine è *virtuale* (si trova dietro lo specchio)**

Si definisce **ingrandimento lineare *m*** il rapporto tra un segmento dell'immagine e il corrispondente segmento dell'oggetto. È dunque una quantità **adimensionale.** Si può dimostrare che:

$$m=\frac{q}{p}$$

m positivo → **l'immagine è *capovolta***
m negativo → **l'immagine è *diritta***
Se $|m|<1$ → l'immagine è più piccola dell'oggetto
Se $|m|>1$ → l'immagine è più grande dell'oggetto
Se $|m|=1$ → l'immagine è uguale all'oggetto

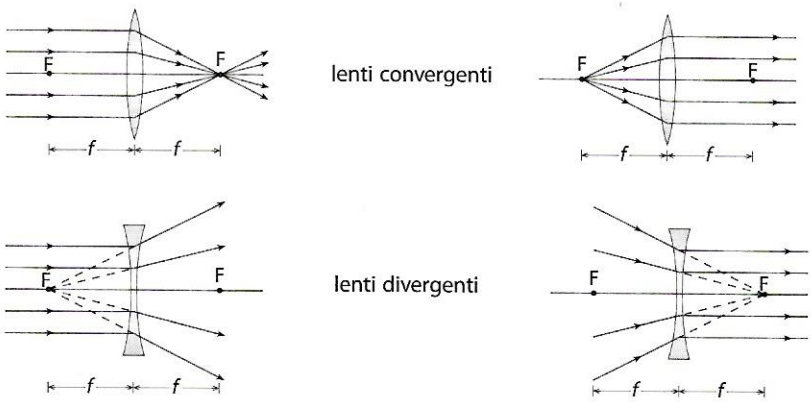
Per costruire l'immagine di un oggetto puntiforme è sufficiente far partire dall'oggetto due raggi diretti verso lo specchio: uno parallelo all'asse ottico, che verrà riflesso nel fuoco, l'altro passante per il centro, che verrà riflesso su se stesso. L'incontro dei due dà l'immagine del punto: può essere davanti allo specchio (immagine reale) o dietro (immagine virtuale).

In particolare, mentre gli specchi concavi danno origine a un'immagine reale o virtuale, diritta o capovolta, più piccola o più grande, in relazione alla posizione dell'oggetto, negli specchi convessi l'immagine è sempre virtuale, diritta e rimpicciolita.

8.6.2 | Lenti sottili

C'è una differenza fondamentale fra lenti e specchi (a parte il fatto che le lenti *rifrangono* la luce, mentre gli specchi la *riflettono*): nel caso delle lenti, le superfici attraversate dalla luce sono due.

Si definisce *sottile* una lente di spessore trascurabile. Dal momento che la luce può attraversare la lente in entrambe le direzioni, la lente ha due punti focali F (uno da ciascun lato della lente) e due distanze focali *f*. Poiché nelle lenti sottili le due distanze focali sono uguali, si parla semplicemente di distanza focale. Si chiamano **lenti convergenti** le lenti in grado di concentrare i raggi che le colpiscono, **lenti divergenti** quelle che li allontanano.



Come per gli specchi, si utilizzano le lettere p, q, f per indicare rispettivamente la distanza dell'oggetto dalla lente, la distanza dell'immagine dalla lente e la distanza focale.

Anche nel caso delle lenti vale la formula dei punti coniugati e si definisce il rapporto di ingrandimento. La formula dei punti coniugati è ancora:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Poiché le lenti hanno due superfici, esse hanno anche due raggi di curvatura r_1 e r_2, che vengono numerati nel "senso di marcia" della luce (cioè r_1 è il raggio di curvatura che i raggi incontrano per primo). La distanza focale è legata alla curvatura della superficie della lente e all'indice di rifrazione n del materiale delle lenti. Questo legame è espresso dall'*equazione degli ottici* (o *equazione dei costruttori di lenti*):

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

dove ciascun raggio di curvatura viene preso con il suo segno: positivo se la sfera è convessa dal lato da cui proviene la luce, negativo in caso contrario.

Si chiama *parte reale* il semispazio che si trova dall'altra parte della lente rispetto all'oggetto. Si chiama *parte virtuale* il semispazio che si trova dalla stessa parte della lente rispetto all'oggetto.
***q positivo* → l'immagine è *reale* (si trova oltre la lente)**
***q negativo* → l'immagine è *virtuale* (si trova davanti alla lente)**

Il rapporto di ingrandimento è ancora:

$$m = \frac{q}{p}$$

Come già detto a proposito degli specchi, un rapporto di ingrandimento positivo si riferisce a immagini capovolte, un rapporto di ingrandimento negativo si riferisce a immagini diritte.

Infine, si definisce **potere convergente** o **potenza** di una lente l'inverso della sua distanza focale:

$$P = \frac{1}{f}$$

P è *positivo* nel caso di lenti convergenti, *negativo* nel caso di lenti divergenti. Esprimendo la distanza focale in metri, il potere convergente, detto anche *potere diottrico*, viene misurato in unità chiamate *diottrie* (dimensionalmente pari al reciproco di una lunghezza).

Una lente convergente avente una distanza focale di 20 cm presenta un potere diottrico pari a + 5 diottrie.