

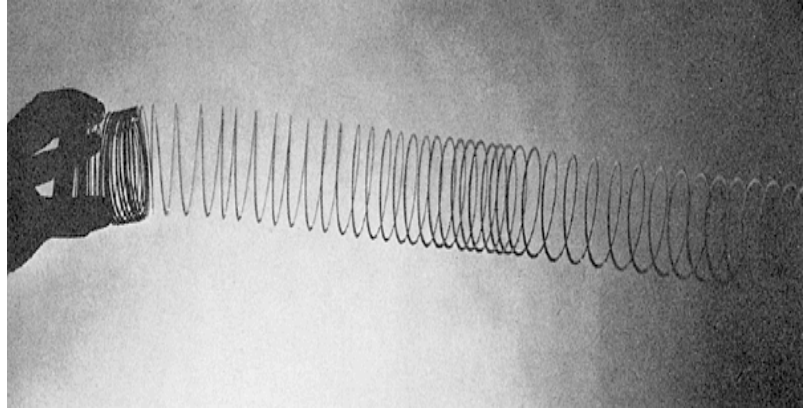
Il concetto di onda e le sue proprietà fondamentali

Si può definire un'onda come **una qualunque perturbazione che si propaga nello spazio trasportando energia**.

Un'onda **trasporta energia** ma **non trasporta materia**.

Esempi di onde

Le onde del mare, una corda che vibra, una molla che oscilla, il suono, la luce.



Vi sono onde che **si propagano in un mezzo materiale** (l'acqua o la molla) e onde che **si propagano nel vuoto** (la luce).

Tipologia di onda

A seconda delle caratteristiche le onde si possono classificare in vari modi.

In relazione al mezzo in cui si propagano e della caratteristica fisica che usiamo per rappresentarla:

- onde elastiche
- radiazione elettromagnetica

Riguardo alla loro direzione vettoriale di propagazione, si suddividono in:

- onde trasversali
- onde longitudinali

Riguardo alla propagazione, si hanno:

- onde piane
- onde sferiche
- onde cilindriche

Riguardo alle dimensioni del mezzo in cui si propagano:

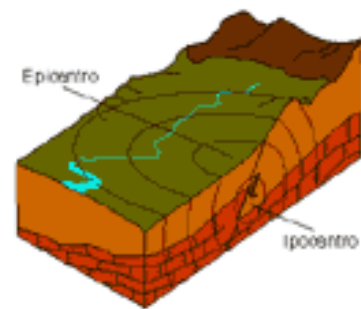
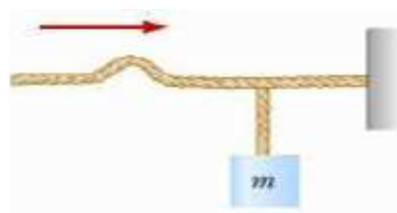
- Onde unidimensionali o lineari
- Onde bidimensionali
- Onde tridimensionali

Onde elastiche e onde elettromagnetiche

➤ Onde elastiche

Le onde che per propagarsi hanno bisogno di un mezzo materiale si dicono **onde elastiche** (si chiamano così perché si propagano grazie alle proprietà elastiche del mezzo materiale in cui hanno origine) o anche **onde meccaniche** (perché consistono nella propagazione di vibrazioni meccaniche del mezzo considerato). Le onde elastiche possono propagarsi nei solidi e nei fluidi.

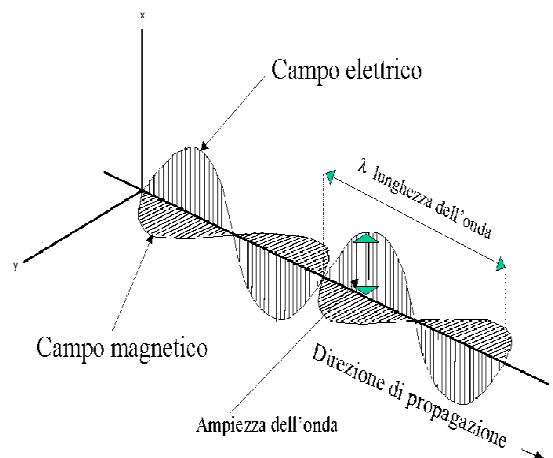
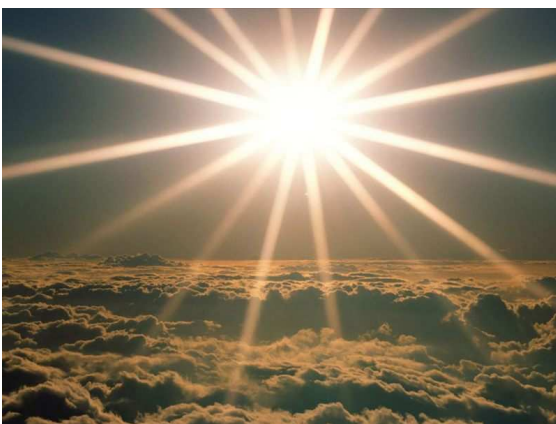
Sono esempi di onde elastiche, le onde che si formano scuotendo l'estremità di una molla o di una corda tesa, le onde sonore, le onde sismiche.



➤ Onde elettromagnetiche

Le onde che per propagarsi non richiedono la presenza di un mezzo materiale si dicono **onde elettromagnetiche**. Le onde elettromagnetiche viaggiano nel vuoto alla velocità c pari a 299 792 458 m/s (velocità della luce).

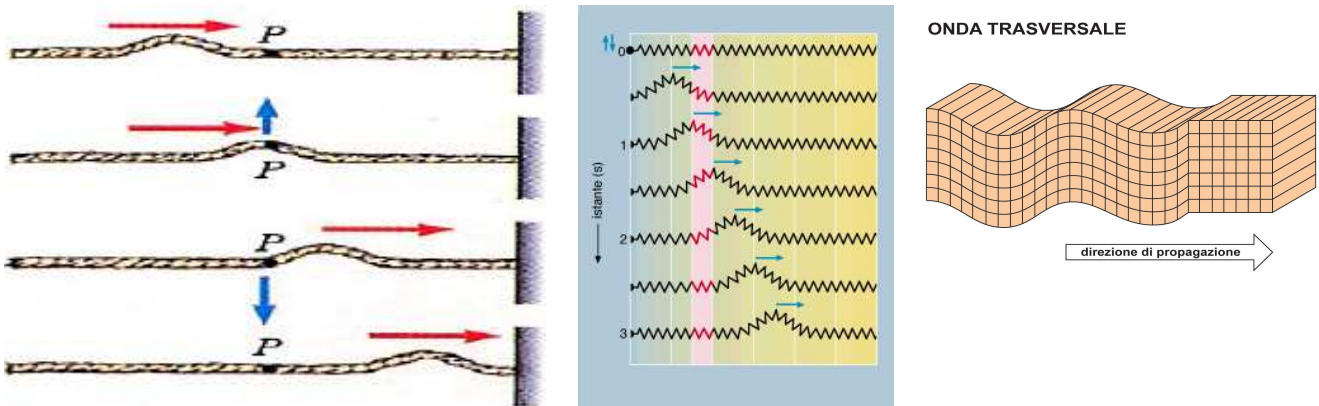
Esempi di onde elettromagnetiche sono la luce, i raggi ultravioletti, i raggi X, le onde radio.



Onde longitudinali e onde trasversali

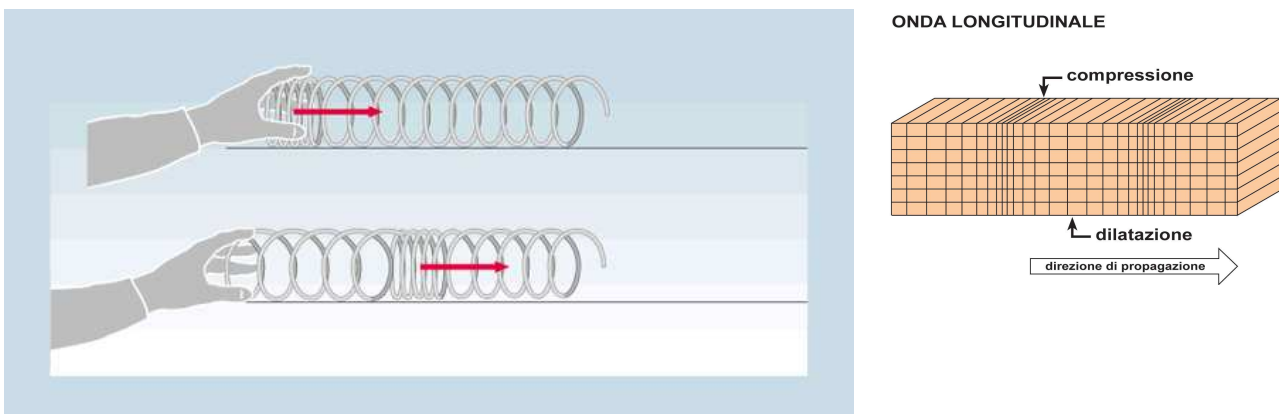
➤ Onda trasversale

Un'onda si dice **trasversale** quando la direzione della perturbazione è **perpendicolare** alla direzione di propagazione dell'onda (sono onde trasversali quelle elettromagnetiche, quelle generate in una corda tesa della quale si scuota un estremo, quelle che si propagano nelle corde di un violino o di una chitarra).



➤ Onda longitudinale

Un'onda si dice **longitudinale** quando la direzione della perturbazione è **parallela** alla direzione di propagazione dell'onda (per es., le onde sonore si propagano producendo compressioni e rarefazioni dell'aria nella direzione in cui si stanno muovendo).



Nei solidi si possono avere sia onde trasversali che onde longitudinali, nei fluidi si possono trasmettere solo onde longitudinali.

Onde periodiche

Un'onda si dice **periodica** se si ripete identica dopo un intervallo di tempo costante.

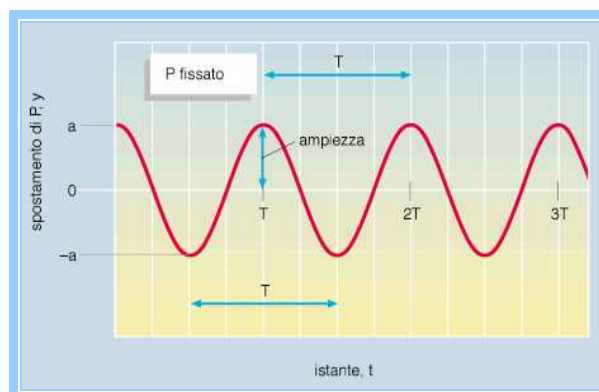
Le grandezze utilizzate per caratterizzare un'onda periodica, in particolare di tipo armonico, sono:

1. **Periodo T** : è il più piccolo intervallo di tempo (quello di un'oscillazione completa) dopo il quale il moto riassume le stesse caratteristiche in ogni punto del mezzo in cui si propaga l'onda.
2. **Frequenza f** : rappresenta il numero di vibrazioni complete che avvengono in un secondo.

La relazione fra periodo e frequenza è la seguente:

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

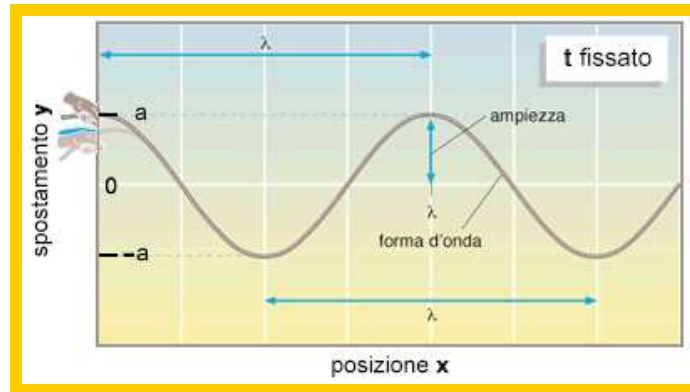
L'unità di misura della frequenza rappresentata da un'oscillazione al secondo, si chiama **hertz (Hz)**.



Rappresentazione temporale dell'onda

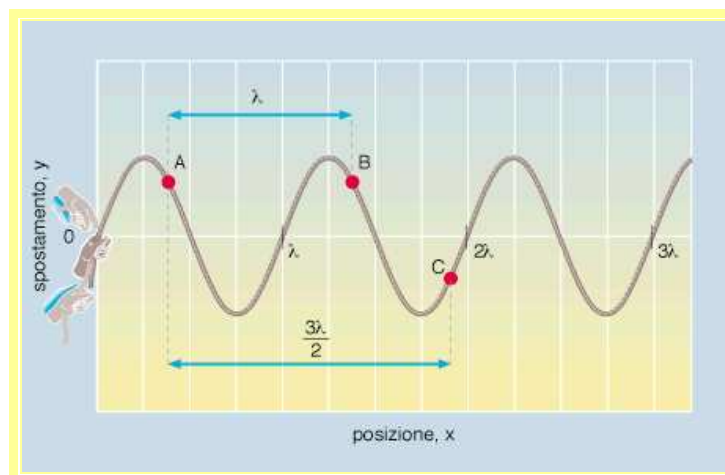
3. **Lunghezza d'onda λ** : è la distanza percorsa dall'onda in un periodo o anche la distanza minima fra due punti in cui lo spostamento dalla configurazione di equilibrio assume lo stesso valore.
4. **Ampiezza**: rappresenta il massimo spostamento dalla posizione di equilibrio ed è uguale sia per gli spostamento positivi che per quelli negativi.

Se l'onda è armonica si ottiene una sinusoide che rappresenta il diagramma orario del moto.



Rappresentazione spaziale dell'onda

Nella figura che segue è rappresentata la configurazione assunta in un certo istante da una molla lungo la quale si propaga un'onda trasversale di tipo armonico nella direzione dell'asse orizzontale; le coppie di punti **A** e **B** si dicono **in fase**, nel senso che si trovano nelle stesse condizioni spaziali ed energetiche; i punti come **B** e **C** sono invece **in opposizione di fase**, ossia sfasati di mezzo periodo l'uno rispetto all'altro.



La **velocità di propagazione** di un'onda di lunghezza d'onda λ , e di periodo T viene espressa dal rapporto:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

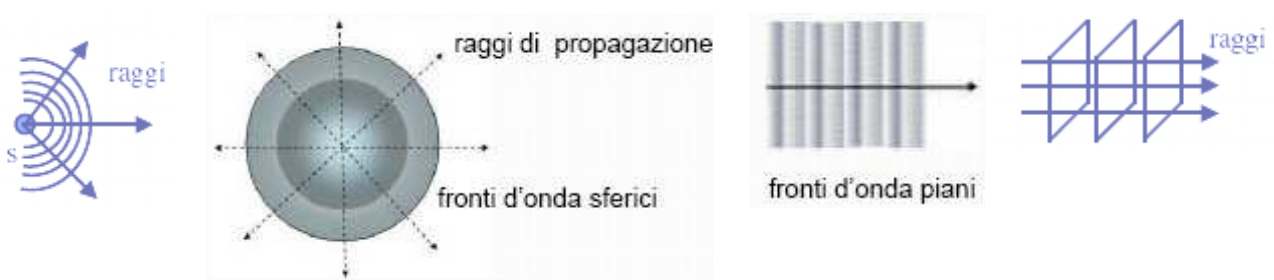
Fronte d'onda e raggi

Si chiama **fronte d'onda** l'insieme di tutti i punti che vengono simultaneamente raggiunti dalla perturbazione.

A seconda della forma del fronte d'onda le onde si dividono in:

- **ONDE CIRCOLARI:** se i fronti d'onda sono delle circonferenze. E' il caso di delle onde prodotte sulla superficie dell'acqua quando la sorgente è puntiforme.
- **ONDE RETTILINEE:** se i fronti d'onda sono linee parallele. E' il caso di onde circolari che a grande distanza dalla sorgente possono essere considerate rettilinee.
- **ONDE SFERICHE:** se i fronti d'onda sono superfici sferiche concentrata. E' il caso delle onde sonore prodotte da una piccola sorgente in un fluido omogeneo.
- **ONDE PIANE:** se i fronti d'onda sono piani fra loro paralleli. E' il caso delle onde sferiche che, a grandi distanze dalla sorgente, possono essere considerate piane per una limitata regione di spazio.

Si chiamano **raggi dell'onda** l'insieme delle semirette uscenti dalla sorgente e perpendicolari al fronte d'onda.



Equazione delle onde armoniche

Per descrivere un'onda periodica in movimento bisogna considerare una funzione di due variabili, la posizione orizzontale x e il tempo t . La rappresentazione analitica di tale funzione è:

$$y = a \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

Essa esprime lo spostamento dalla posizione di equilibrio in funzione del tempo e della distanza dalla sorgente.

Propagazione delle onde

Ogni qualvolta un treno di onde periodiche si propaga in un mezzo il moto vibratorio si mantiene finché l'onda o incontra un ostacolo a causa del quale non può più progredire oppure raggiunge un oggetto o una fenditura o un altro mezzo, che perturba il suo moto e ne muta la velocità. Quando si verifica questa situazione l'onda continua a propagarsi.

In genere, qualunque sia il tipo di onde, l'ulteriore propagazione può avvenire con tre modalità distinte corrispondenti a tre fenomeni diversi: la **riflessione**, la **rifrazione** e la **diffrazione**, che in certe particolari condizioni possono anche verificarsi simultaneamente.

Riflessione

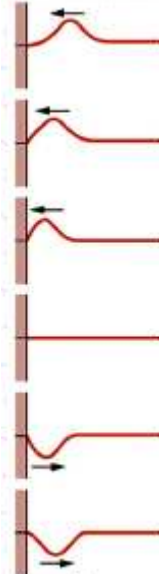


Dato un sistema di onde, ci proponiamo di studiare la riflessione provocata da un ostacolo che delimita i confini del mezzo dove si propaga la perturbazione.

1° Esempio

Consideriamo una corda tesa rigidamente saldata per un estremo a un gancio fissato a una parete che rappresenta l'ostacolo. Applichiamo all'altro estremo

un rapido impulso in modo da provocare un'oscillazione verso l'alto, chiamata cresta; si origina così un'onda che si propaga con una certa velocità lungo la corda. Arrivata all'estremo fisso, l'oscillazione si riflette in modo che l'ampiezza e la velocità rimangono all'incirca costanti, mentre il profilo dell'onda appare capovolto.



2° Esempio

Consideriamo le onde che si possono formare sulla superficie di un liquido. A tal fine immaginiamo di avere un **ondoscopio** (dispositivo costituito da un recipiente di forma rettangolare avente per fondo una lastra di vetro perfettamente trasparente).



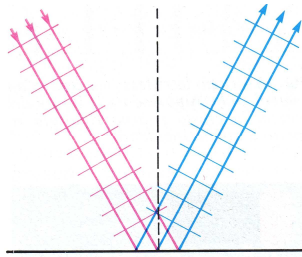
Facendo vibrare con frequenza uniforme mediante un motorino una leggera sbarretta o una punta è possibile produrre un sistema di onde. Con la sbarretta si produrranno onde piane, con la punta si otterrà un sistema di onde circolari, ma saranno ambedue periodiche e di tipo armonico.

Se, dopo aver disposto sotto il fondo trasparente un foglio di carta bianca che funge da schermo, si illumina la vaschetta dall'alto, le onde possono essere visualizzate attraverso una successione di zone alternativamente chiare e scure: le zone chiare corrispondono alle **creste** delle onde, quelle scure alle **gole**.

Ciò premesso, si può osservare che **un'onda, qualunque sia la natura e la forma, quando incontra un ostacolo viene in parte riflessa, tornando indietro come se provenisse da un'altra sorgente.**

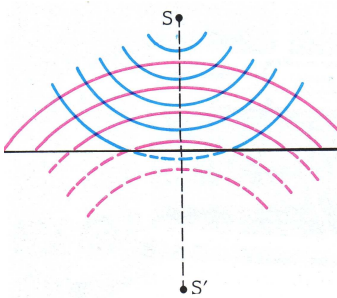
Esempi

1.



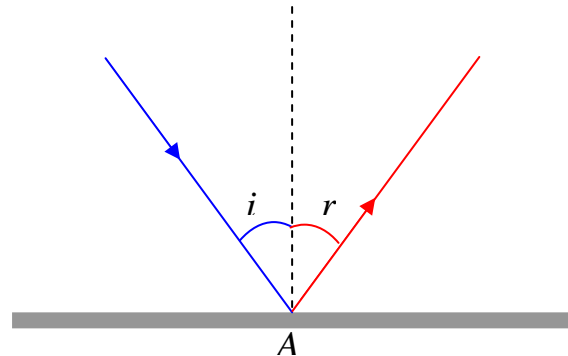
Riflessione da parte di una superficie piana di un treno di onde piane, rappresentate da una successione di superfici d'onda e da un insieme di raggi perpendicolari alle superfici d'onda.

2.



Riflessione di un'onda circolare. Le onde riflesse, sempre circolari e aventi per centro il punto S' , simmetrico di S rispetto alla superficie riflettente, appaiono come una successione di onde provenienti da una sorgente fittizia posta in S' .

3.



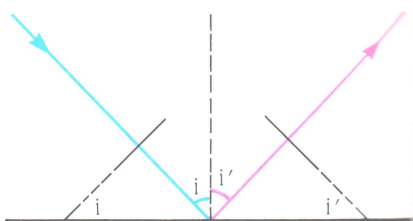
In questa figura, per semplicità, è stata identificato il treno d'onde con un solo raggio incidente a cui corrisponde un solo raggio riflesso.

In ogni caso, si trova sperimentalmente che il fenomeno della riflessione segue due leggi:

1^a legge: *il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie di incidenza giacciono nello stesso piano.*

2^a legge: *l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.*

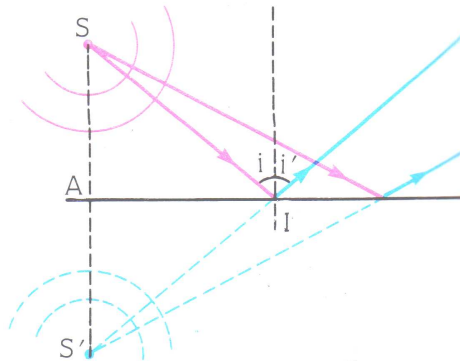
Per angolo di incidenza si intende quello formato dal raggio incidente con la normale alla superficie nel punto di incidenza e per angolo di riflessione quello formato dal raggio riflesso con la stessa normale.



Nel caso di un'onda piana si vede chiaramente che, dall'uguaglianza dell'angolo i di incidenza con l'angolo i' di riflessione, segue anche l'uguaglianza degli angoli che l'onda incidente e l'onda riflessa formano con la superficie di riflessione e viceversa.

Conseguenze della 2^a legge (nel caso di un'onda circolare o sferica.)

Nella figura che segue, S è una sorgente puntiforme e SI è un raggio incidente su una superficie di riflessione.



S' è l'intersezione del prolungamento del raggio riflesso con la normale SA alla superficie. I triangoli rettangoli SAI e $S'AI$ hanno il cateto AI in comune e gli angoli acuti in I uguali in quanto complementari degli angoli uguali i e i' .

Essi sono perciò uguali e di conseguenza SA è uguale a $S'A$, cioè S' è il punto simmetrico di S rispetto alla superficie di riflessione.

Poiché il ragionamento è stato fatto per un generico raggio incidente SI , possiamo concludere: al fascio omocentrico di raggi incidenti uscenti da S corrisponde dopo la riflessione un fascio di raggi ancora omocentrico con centro in S' , precisamente un fascio di raggi i cui prolungamenti passano tutti per S' .

Quindi a un treno di onde circolari o sferiche emesse da S corrisponde dopo la riflessione un treno di onde ancora circolari o sferiche con centro nel punto S' , simmetrico di S rispetto alla superficie di riflessione.

A queste conclusioni siamo pervenuti tenendo conto che l'angolo di incidenza i è uguale all'angolo di riflessione i' .

Viceversa, dal fatto che un'onda circolare o sferica si riflette generando ancora un'onda circolare o sferica con centro in S' , simmetrico a S , segue che l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione.

Rifrazione

Quando un'onda elastica attraversa la superficie di separazione di due mezzi caratterizzati da una *diversa velocità di propagazione* della perturbazione, essa (se l'angolo di incidenza è diverso da zero) cambia direzione.

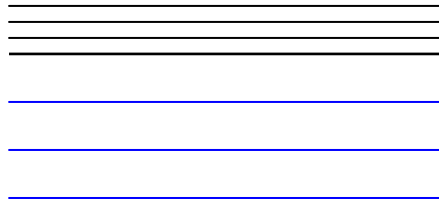
Tale fenomeno si indica con il nome di **rifrazione**.

Per verificare il fenomeno disponiamo sul fondo di un ondoscopio una lastra di plexiglass, in modo che l'acqua risulti meno profonda nella zona in corrispondenza della lastra.

Produciamo un treno di onde piane il cui *fronte d'onda sia parallelo alla linea di divisione* delle due zone di acqua.

Si nota che nella seconda zona, dove l'acqua è meno profonda, le onde sono ancora parallele a quelle della prima zona, però sono più vicine fra loro rispetto alle onde incidenti.

Questo fatto evidenzia che, con il diminuire della profondità, diminuisce la lunghezza d'onda.



Poiché con l'ausilio di uno stroboscopio è possibile fermare "contemporaneamente" il movimento delle onde nelle due zone di acqua, possiamo affermare che le onde incidenti e quelle rifratte hanno la stessa frequenza. Tale proprietà è una conseguenza del fatto che le frequenze delle onde nelle due zone di acqua dipendono solo dalla frequenza della sorgente.

Indicando con λ_1, v_1 e λ_2, v_2 i parametri che caratterizzano rispettivamente l'onda incidente e quella rifratta si ha:

$$\lambda_1 \cdot f = v_1 \quad \text{e} \quad \lambda_2 \cdot f = v_2$$

che possiamo anche scrivere facendo il rapporto ed eliminando la frequenza:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

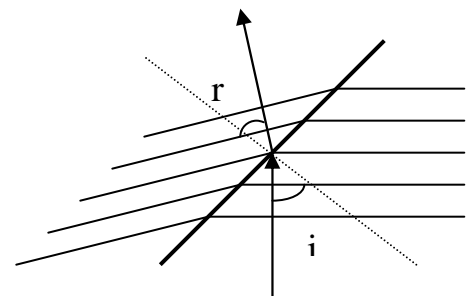
Se $v_2 < v_1 \Rightarrow \lambda_2 < \lambda_1$.

Ossia, **la velocità di propagazione delle onde di una determinata frequenza è minore dove l'acqua è meno profonda ed è maggiore dove l'acqua è più profonda.**

Disponiamo ora la lastra di plexiglass sul fondo dell'ondoscopio in modo che **la linea di divisione formi un angolo non nullo con le onde incidenti.**

Considerando come prima un treno di onde piane, si vede chiaramente che le onde rifratte, oltre ad essere più vicine tra loro nella zona d'acqua meno profonda a causa della minore velocità di propagazione, sono anche diversamente inclinate rispetto al fascio incidente.

Indichiamo con **i** l'**angolo di incidenza** e con **r**, l'**angolo di rifrazione** (l'angolo che il corrispondente raggio rifratto forma con la stessa normale).



Si può osservare che ogni qualvolta **un treno di onde passa da una zona più profonda a una meno profonda, l'angolo di rifrazione risulta più piccolo dell'angolo di incidenza**; ciò è connesso al fatto che al diminuire della velocità di propagazione della perturbazione, caratterizzata sempre da un trasporto di

energia, i fronti d'onda tendono ad assumere una direzione parallela alla linea di separazione.

Ripetendo più volte le misure per diversi valori dell'angolo di incidenza, senza modificare la frequenza delle onde né la profondità delle due zone di acqua, si trova che il rapporto:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \text{costante}$$

al variare dell'angolo di incidenza.

Possiamo affermare che tutti i fenomeni di rifrazione sono regolati dalle seguenti due leggi:

1^a legge: il raggio incidente, la normale alla superficie di separazione dei due mezzi e il raggio rifratto giacciono nello stesso piano;

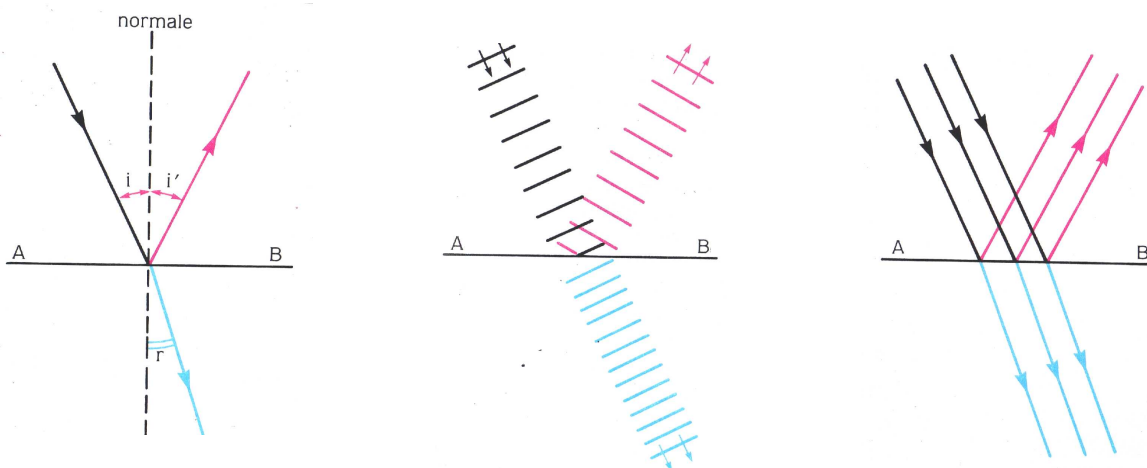
2^a legge: il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante al variare dell'angolo di incidenza, cioè:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = n_{12}$$

dove n_{12} è definito **indice di rifrazione del secondo mezzo rispetto al primo** e dipende dalla particolare coppia di mezzi considerati.

Se l'angolo di rifrazione è più piccolo di quello di incidenza $\Rightarrow n_{12} > 1$ e il secondo mezzo è più frangente del primo.

Un fascio di onde piane incide sulla superficie AB di separazione di due mezzi trasparenti e viene in parte riflesso e in parte rifratto, nella seconda figura il fascio è rappresentato mediante raggi normali ai rispettivi fronti d'onda, nella terza figura si è considerato, per semplicità, un solo raggio incidente, riflesso e rifratto.



Diffrazione

Esaminiamo infine il terzo tipico fenomeno, indicato col nome di **diffrazione**, che caratterizza *la propagazione delle onde dopo che queste incontrano un oggetto o qualche ostacolo munito di un piccolo foro o di una stretta fenditura*.

In ogni caso, a seguito del processo, la forma geometrica dell'onda viene alterata; così, se per esempio consideriamo un treno di onde piane che attraversano un foro, le cui dimensioni sono paragonabili alla lunghezza d'onda del fascio, al di là del foro l'onda muta la sua configurazione: essa infatti tende ad assumere la caratteristica forma sferica come se fosse prodotta da una sorgente puntiforme posta nell'apertura stessa.

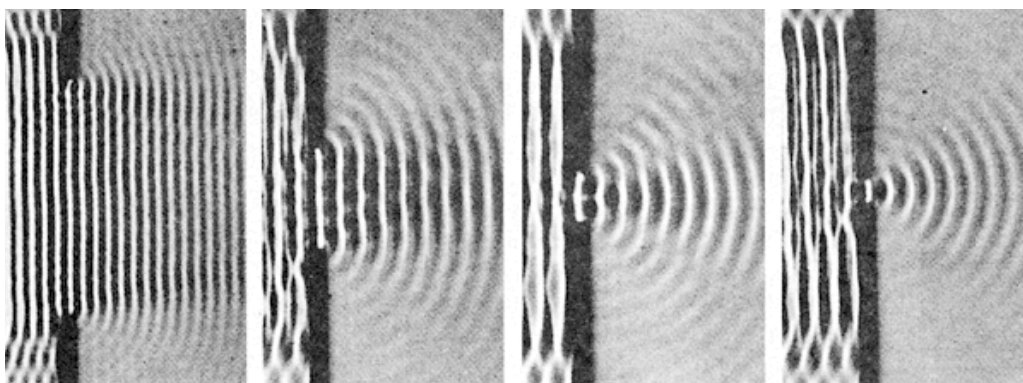
In genere, gli effetti diffrattivi sono tanto più rilevanti quanto più le dimensioni dei fori o degli ostacoli sono confrontabili con la lunghezza d'onda del fascio incidente.

Utilizzando la vaschetta a onde liquide si può verificare sperimentalmente l'entità e la modalità della diffrazione, ponendo sul cammino di un'onda piana di una data lunghezza d'onda o una sbarretta o uno schermo parallelo alle onde incidenti e munito di una fenditura.

Nel caso in cui le dimensioni della fenditura sono più grandi della lunghezza d'onda del fascio, il fronte d'onda dopo la diffrazione, all'incirca ancora rettilineo, è delimitato dalle dimensioni del fascio con i bordi leggermente incurvati e piuttosto sfumati.

Nel caso in cui l'apertura sia paragonabile alla lunghezza d'onda del fascio, il fronte d'onda rifratto si restringe, mentre le onde incominciano a invadere la zona di ombra geometrica.

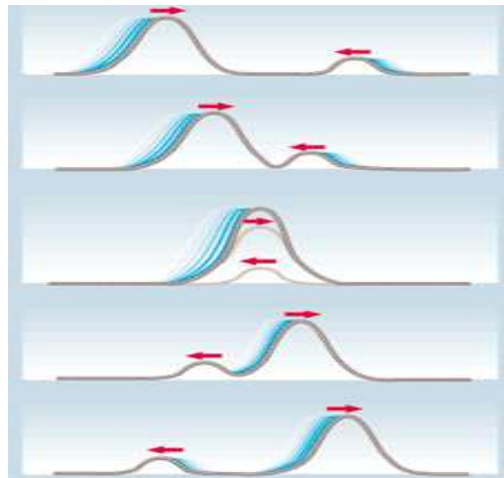
Nel caso in cui le dimensioni dell'apertura sono ancora più piccole della lunghezza d'onda, il fronte d'onda al di là dell'ostacolo assume l'aspetto circolare e la figura di diffrazione tende a occupare tutto lo spazio dietro lo schermo.



Fenomeni connessi con la propagazione di due onde distinte

❖ Principio di sovrapposizione

Vogliamo ora occuparci di alcuni fenomeni connessi con la propagazione di due onde distinte allorché si incontrano nella stessa regione di spazio. Come semplice esempio vediamo cosa accade quando due onde, raffigurate attraverso le creste, si incontrano durante la loro propagazione nello stesso mezzo costituito da una fune.



Nell'istante in cui le onde si sovrappongono, le ampiezze si sommano, cosicché ogni spostamento, in modo indipendente l'uno dall'altro, porta il proprio contributo alla perturbazione risultante.

Dopo l'interazione le onde, senza essersi reciprocamente disturbate, continuano il loro moto ondoso senza mutare forma e velocità. L'effetto di ciascuna perturbazione rimane lo stesso di quello che si avrebbe se essa si propagasse da sola lungo la fune.

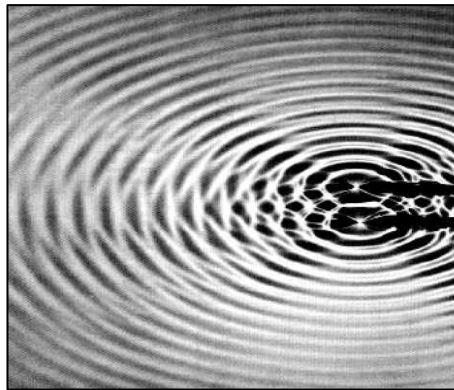
Questo fenomeno si verifica per qualsiasi tipo di onde qualunque sia la natura del mezzo.

La proprietà additiva delle onde costituisce il cosiddetto **principio di sovrapposizione**, che può essere enunciato come segue: **lo spostamento prodotto da più moti ondulatori in un punto e in un certo istante è pari alla somma vettoriale degli spostamenti prodotti dalle onde componenti in quel punto e in quell'istante.**

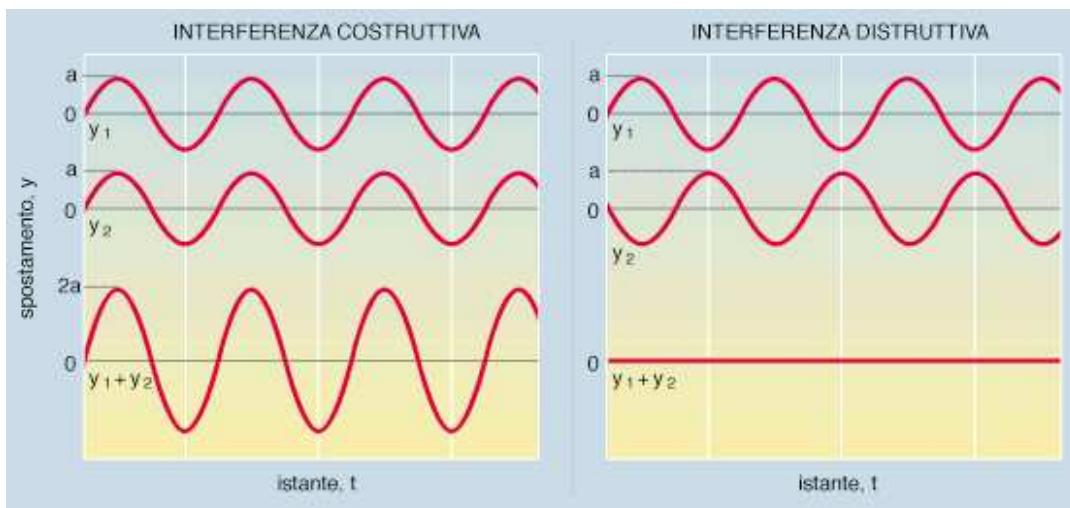
Abbiamo parlato di "somma vettoriale" per contemplare il caso in cui gli spostamenti delle singole onde hanno direzioni distinte. Quando invece gli spostamenti hanno tutti la stessa direzione, consideriamo positivi gli spostamenti verso l'alto e negativi quelli verso il basso.

❖ Interferenza

Una notevole applicazione del principio di sovrapposizione si ha ogni qualvolta si compongono due o più moti ondulatori, praticamente quando due onde che si propagano nello stesso mezzo (superficie d'acqua, corda, aria, ecc.) si incontrano in una data regione dello spazio. Questo fenomeno, chiamato **interferenza**, si verifica non solo per le onde elastiche, ma, come vedremo nel seguito, anche per le onde elettromagnetiche.



Consideriamo a tal proposito due sistemi di onde periodiche longitudinali o trasversali, aventi, per semplicità, la stessa frequenza e la stessa ampiezza.



❖ Interferenza costruttiva

Esaminiamo l'interferenza prodotta da due onde che si propagano sulla superficie dell'acqua nell'ipotesi che le due sorgenti emittenti vibrino in fase, nel senso che nello stesso istante le onde sono caratterizzate dagli stessi spostamenti.

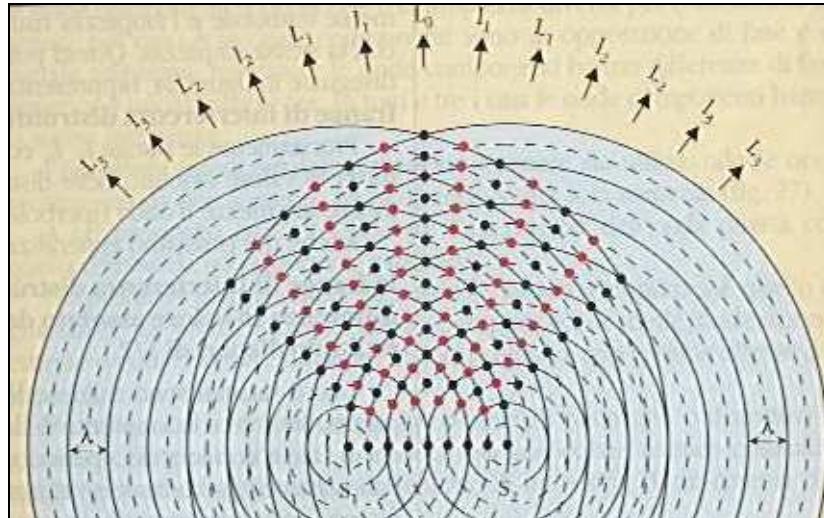


Figura A

Siano S_1 e S_2 le due sorgenti; i sistemi di circonferenze con centri in questi punti rappresentano superfici d'onda che si osservano in un istante arbitrario. Tanto per fissare le idee, possiamo supporre che ciascuna circonferenza a tratto intero rappresenti una cresta dell'onda, cioè il luogo dei punti in cui l'acqua è più alta. La distanza tra due creste, pari alla differenza dei raggi di due circonferenze consecutive, è la lunghezza d'onda λ .

Le circonferenze con centri in S_1 e S_2 , tratteggiate, sono altrettante superfici d'onda: precisamente, le gole d'onda, cioè i luoghi dei punti in cui l'acqua è più bassa.

Le configurazioni riportate nella figura interferenziale non sono immobili, ma si riferiscono solo a un certo istante. Nella figura i pallini neri sono i punti in cui vengono a trovarsi due creste o due gole, cioè i punti dove le onde *interferiscono positivamente*, in quanto le vibrazioni sono in fase e come tali si rafforzano a vicenda.

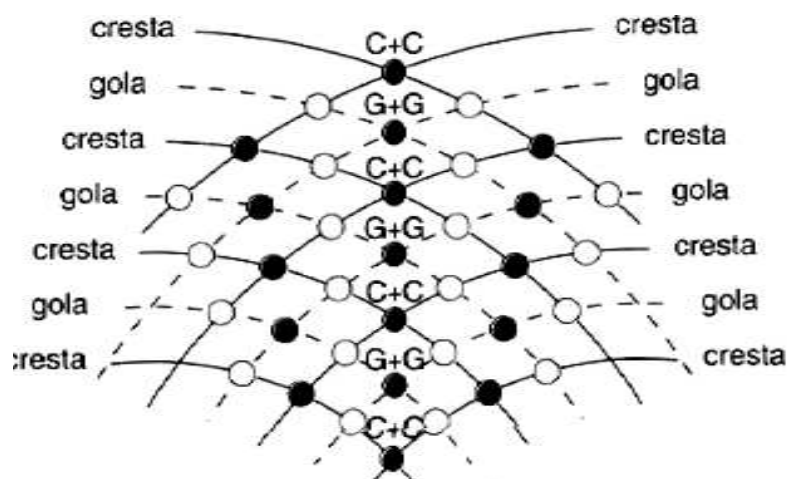


Figura B

Se riuniamo fra loro i **pallini neri** allineati l'uno sopra l'altro, si ottengono le linee L_0, L_1, L_2, \dots

Lungo queste linee si formano le cosiddette **frange di interferenza costruttiva**, in quanto le vibrazioni giungono in fase.

In particolare L_0 , asse del segmento di estremi S_1 e S_2 , rappresenta il luogo dei punti aventi uguale distanza da S_1 e S_2 , mentre le linee L_1 , L_2 , ecc. sono luogo dei punti in cui la differenza delle distanze da S_1 e S_2 , in valore assoluto, è costantemente uguale a una, due, ... lunghezze d'onda e, come tali, sono iperboli di fuochi S_1 e S_2 . Poiché lungo le frange di interferenza costruttiva le vibrazioni giungono in ogni istante in fase e gli spostamenti prodotti dalle due onde si sommano, l'ampiezza dell'onda risultante è il doppio dell'ampiezza di ciascuna delle due onde componenti.

Possiamo allora generalizzare i risultati ottenuti affermando che:

le frange di interferenza costruttiva sono il luogo dei punti tali che la differenza in valore assoluto delle distanze da S_1 e S_2 è costantemente pari a un multiplo intero della lunghezza d'onda λ .

❖ Interferenza distruttiva

Sempre considerando la figura A, i **puntini rossi** indicano il luogo dove giungono una cresta da una sorgente e una gola dall'altra sorgente. Poiché in tali punti le perturbazioni sono in opposizione di fase, l'acqua è praticamente immobile e l'ampiezza risultante è nulla, avendo supposto le onde con la stessa ampiezza. Questi punti, chiamati **nod** e distribuiti su linee, rappresentano il luogo ove si formano le cosiddette **frange di interferenza distruttiva**, dette anche **linee nodali**.

Precisamente le frange sono luogo dei punti tali che la differenza in valore assoluto delle distanze da S_1 e S_2 , è uguale a una, tre, ecc. mezze lunghezze d'onda.

Anche qui possiamo generalizzare, affermando che:

le frange di interferenza distruttiva sono luogo dei punti tali che la differenza in valore assoluto delle distanze da S_1 e S_2 è uguale ad un multiplo dispari di $\lambda/2$.

Questi risultati sono validi se le onde componenti hanno la stessa ampiezza. Se invece le ampiezze delle onde emesse dalle sorgenti, che vibrano in fase e con lo stesso periodo, sono diverse, anche lungo le linee nodali si ha una perturbazione che si propaga con ampiezza uguale alla differenza delle due ampiezze.