

FISICA

Onde

MOTO ONDULATORIO

*Autore: **prof. Pappalardo Vincenzo***

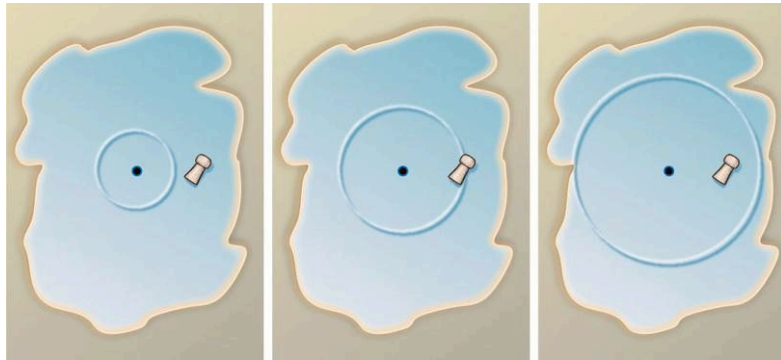
*docente di **Matematica e Fisica***



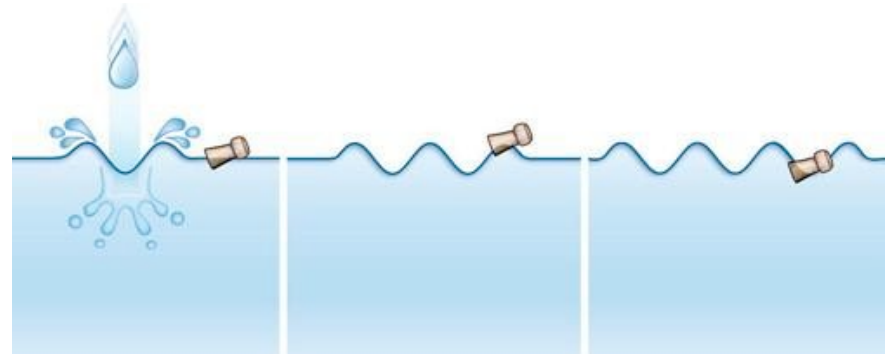
Concetto di onda

Osserviamo cosa succede quando una goccia d'acqua (o altro corpo) cade su uno specchio d'acqua:

La perturbazione creata dalla goccia (increspature circolari) si muove verso l'esterno.



Un tappo che galleggia sull'acqua, oscilla su e giù in verticale. Lo stesso accade alle molecole di acqua



Ma se le molecole di acqua non si spostano in avanti, e quindi se l'onda non trasporta materia, cosa trasporta?

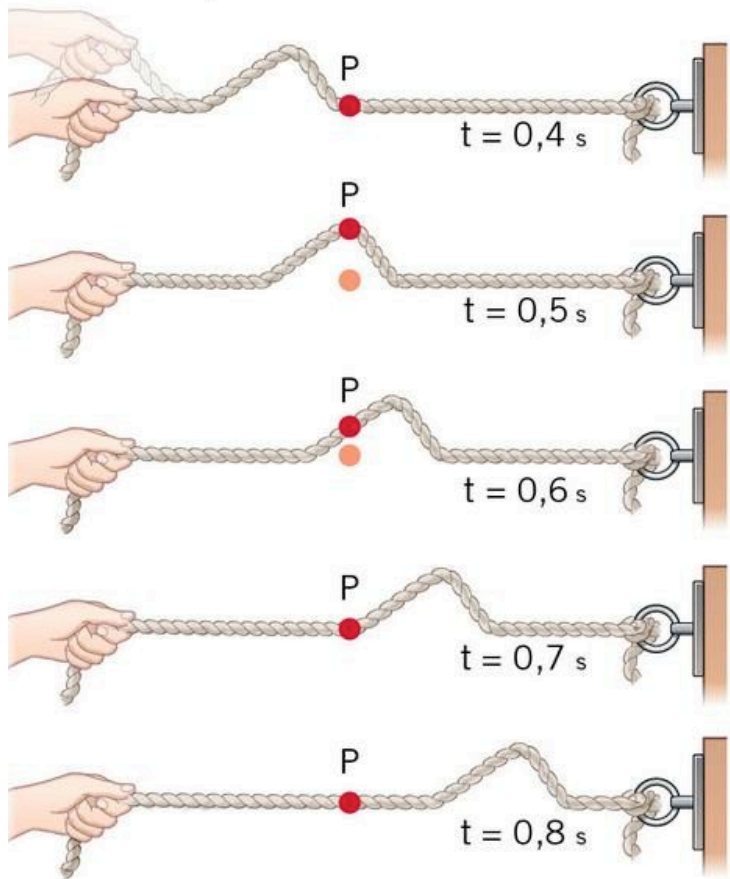
L'onda è la propagazione di una perturbazione nella quale si ha trasporto di energia, senza che vi sia trasporto di materia.

Le onde sono caratterizzate dalla vibrazione di qualche quantità fisica (l'acqua è il mezzo materiale in cui l'onda si propaga) prodotta da un corpo (la goccia è la sorgente dell'onda).

Le onde si suddividono in:

- **Onde meccaniche (onde elastiche)**: la propagazione della perturbazione necessita di un mezzo materiale solido, liquido o aeriforme, e consiste nella propagazione di vibrazioni meccaniche generate da una sorgente opportuna.

Esempio



L'onda, cioè la deformazione, si muove lungo la corda. Ciascun punto oscilla in su e in giù attorno alla posizione in cui si trovava prima della perturbazione.

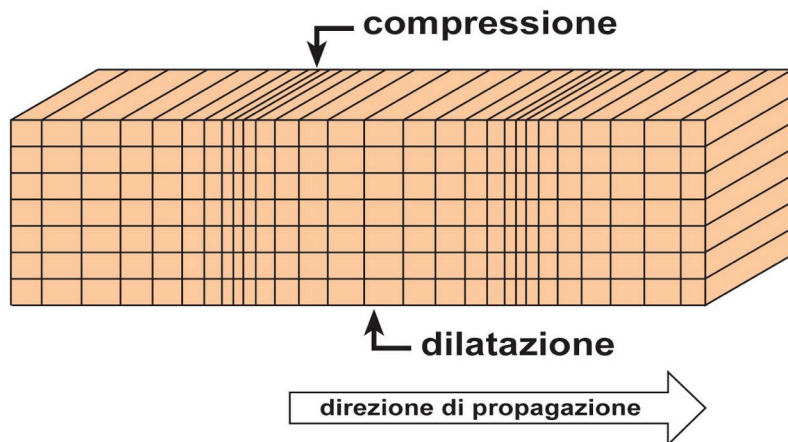
Non c'è trasporto di materia, ma l'onda porta con sé energia; infatti, i punti della corda raggiunti dall'onda acquistano energia cinetica (perché si mettono in movimento)

In questo esempio la corda è il mezzo materiale in cui l'onda si propaga, mentre la mano è la sorgente dell'onda, cioè la sua causa.

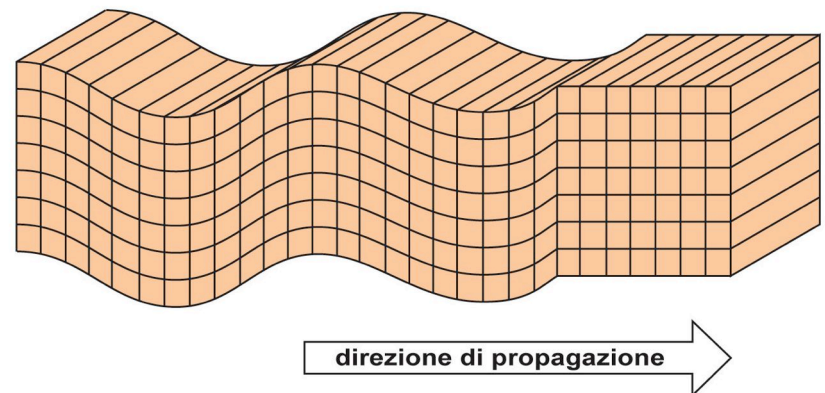
Se il movimento della mano (la sorgente) è periodico, la perturbazione che produciamo assume la forma di *un'onda periodica*. Un tipo particolarmente interessante di onda periodica è l'**onda armonica**, che si genera quando la sorgente oscilla di moto armonico (e nell'ipotesi che il mezzo nel quale l'onda si propaga sia perfettamente elastico).

Esempi di onde meccaniche sono il suono e i terremoti.

ONDA LONGITUDINALE

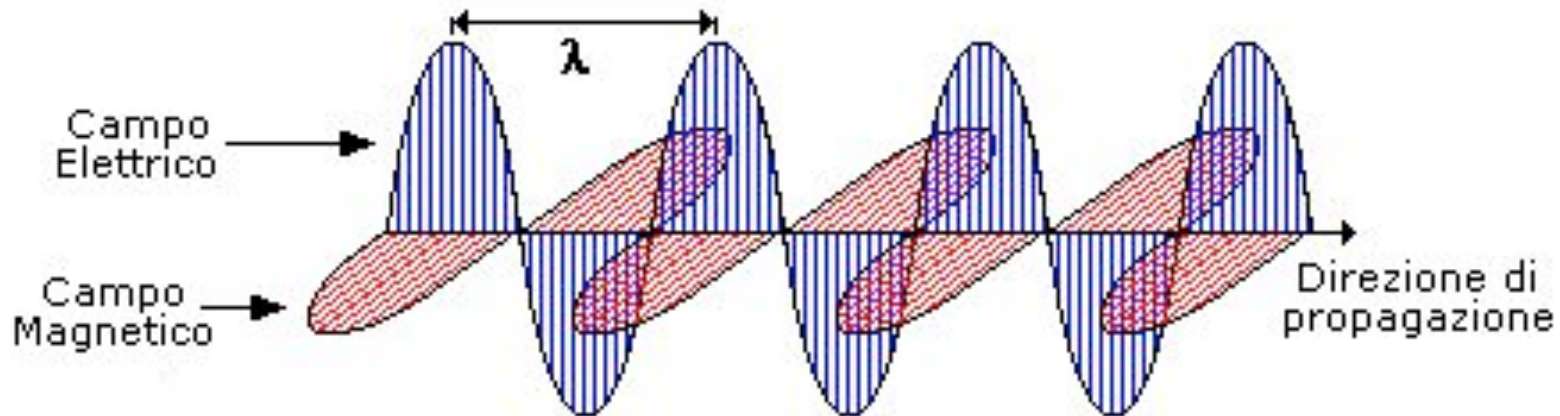


ONDA TRASVERSALE



- **Onde elettromagnetiche:** la sorgente è costituita da campi elettrici e magnetici variabili nel tempo e la propagazione può avvenire sia nella materia sia nel vuoto.

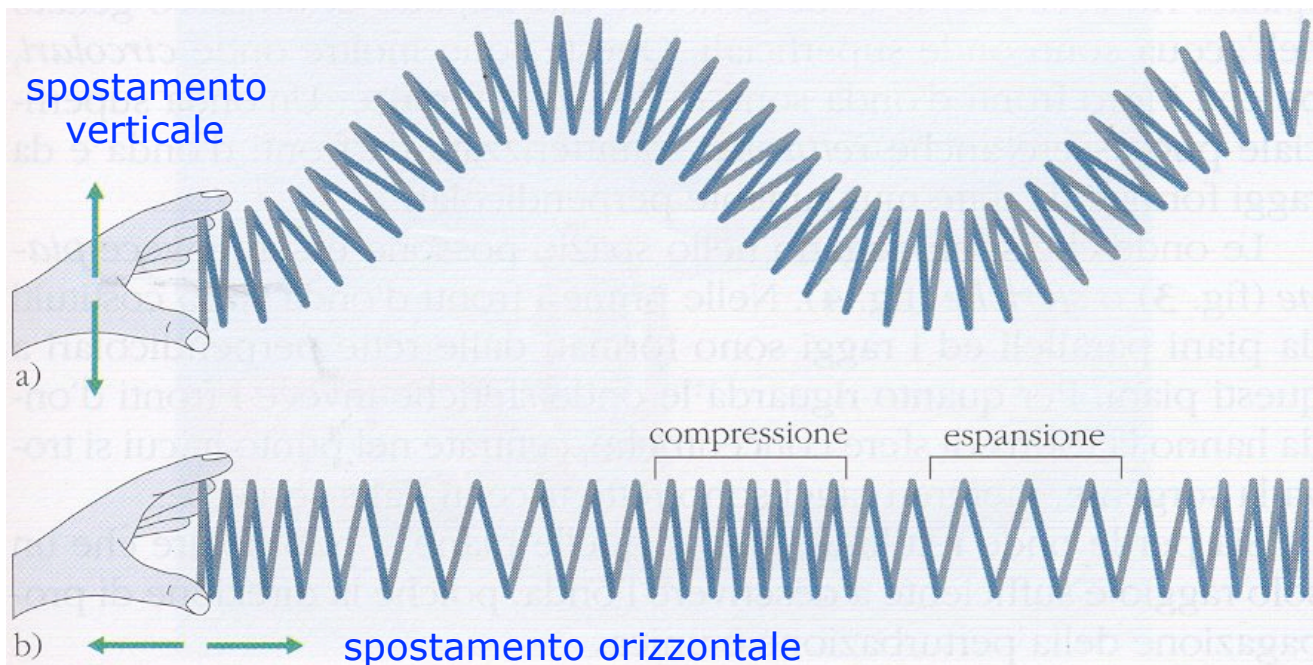
Esempi di onde elettromagnetiche sono la luce, i raggi X, le onde radio, ecc.



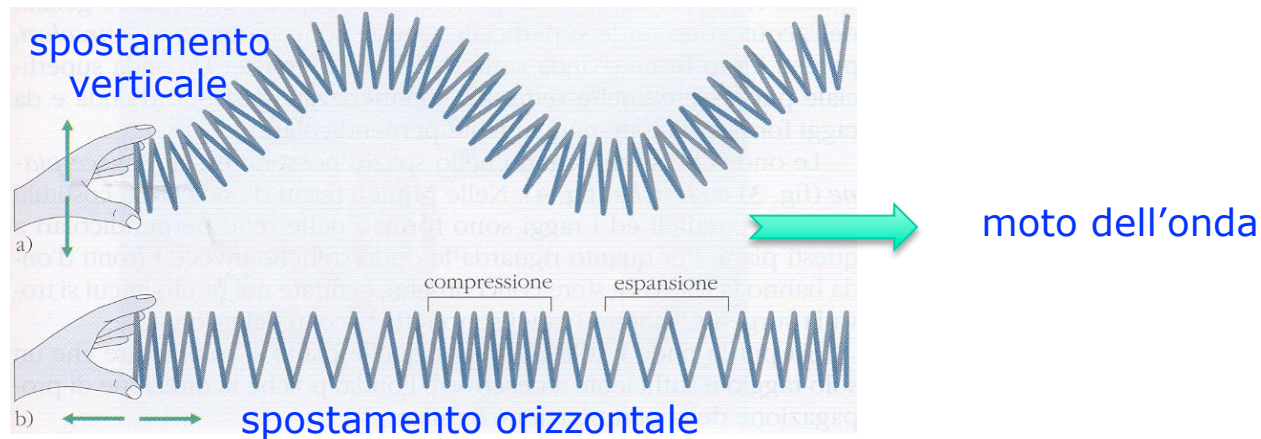
A sua volta, un'onda può essere:

Onda trasversale e longitudinale

Un'onda è detta **trasversale** se ogni punto del mezzo nel quale si propaga compie vibrazioni in direzione perpendicolare alla direzione di propagazione. È detta invece **longitudinale** se le vibrazioni avvengono nella stessa direzione lungo la quale l'onda si propaga.



Esempio

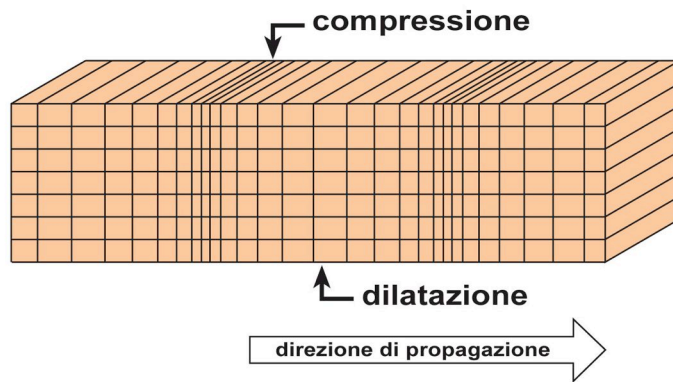


Se con la mano muoviamo un estremo della molla trasversalmente alla sua lunghezza imprimendo ad esso un'oscillazione periodica, vediamo che i punti della molla sono raggiunti, uno dopo l'altro, dalla perturbazione e anch'essi oscillano trasversalmente.

Se invece esercitiamo con la mano una compressione periodica sulla molla (e dunque applichiamo un movimento parallelo alla sua lunghezza) vediamo che le vibrazioni avvengono nella direzione di propagazione dell'onda.

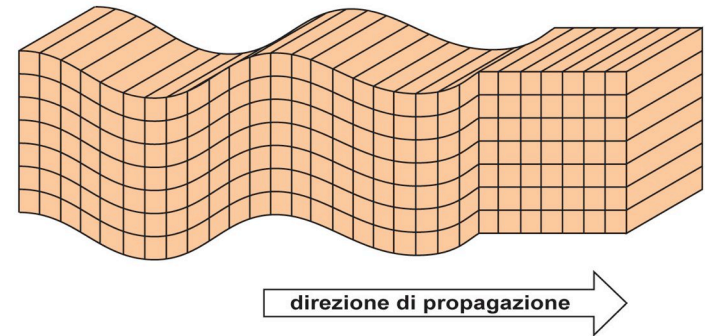
Esempi

ONDA LONGITUDINALE

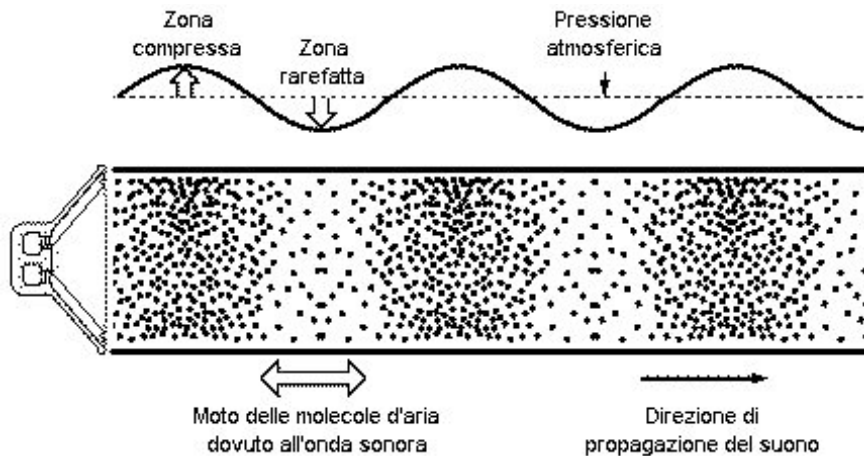


onde
sismiche

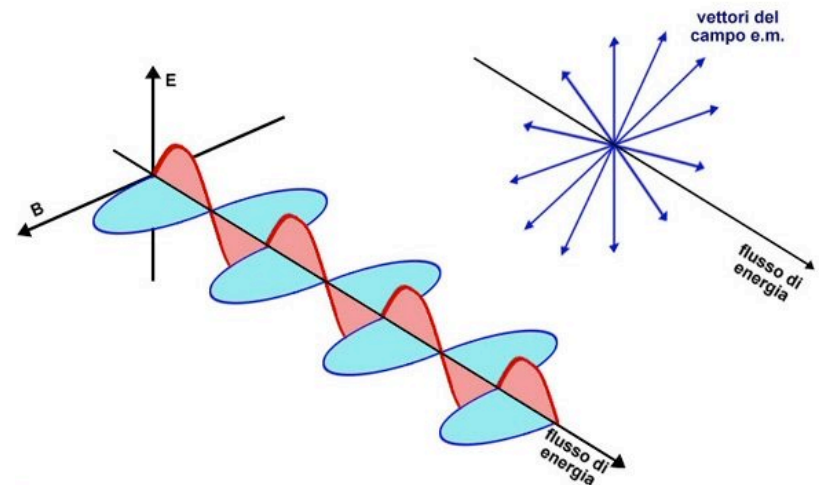
ONDA TRASVERSALE



onde sonore



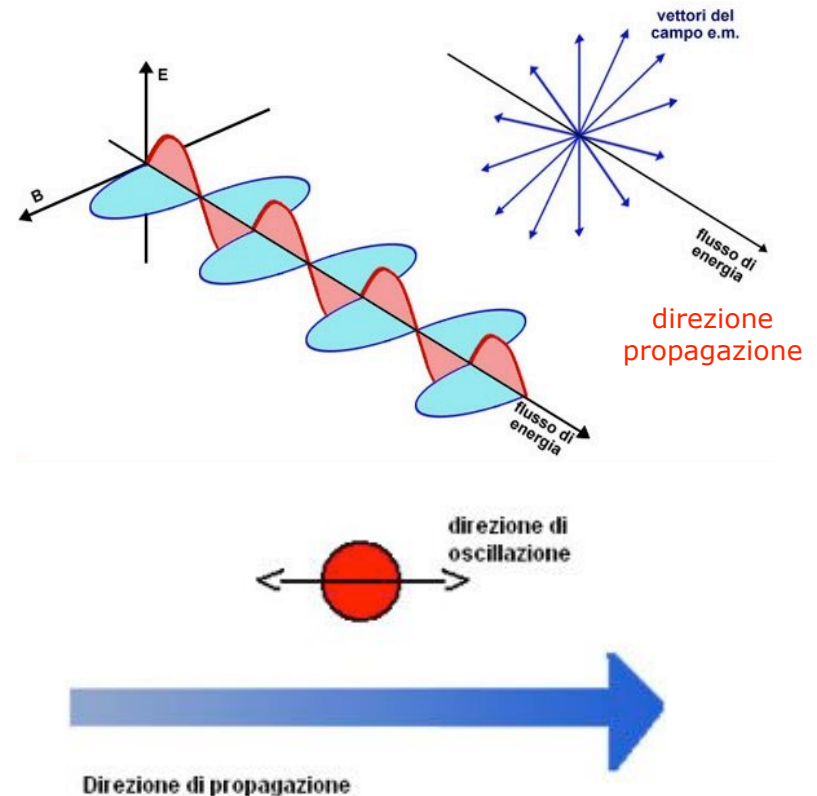
onde elettromagnetiche



Nei solidi si possono avere sia onde trasversali sia onde longitudinali (le onde sismiche sono sia trasversali che longitudinali; le onde sonore sono soltanto longitudinali). Nei fluidi si propagano solo onde longitudinali (fanno eccezione le onde che si producono *sulla superficie* di un liquido).

Le onde elettromagnetiche sono onde trasversali.

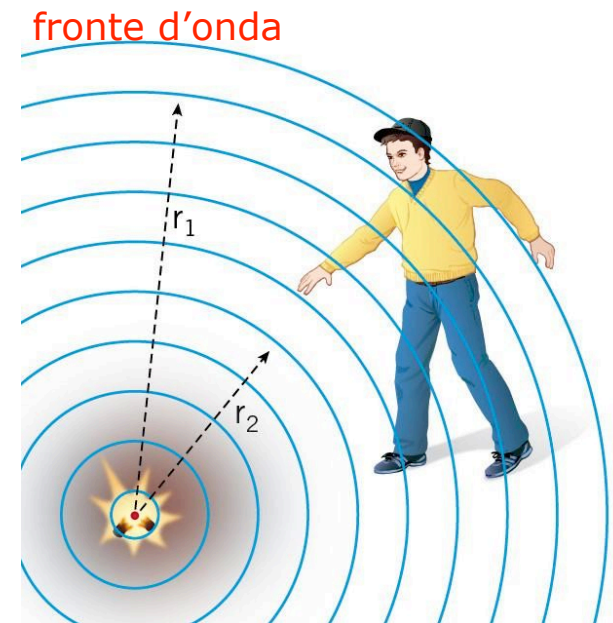
Le vibrazioni delle onde longitudinali possono avvenire lungo un'unica direzione (quella di propagazione), le vibrazioni delle onde trasversali possono avvenire in tutte le direzioni contenute nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda.



Caratteristiche delle onde

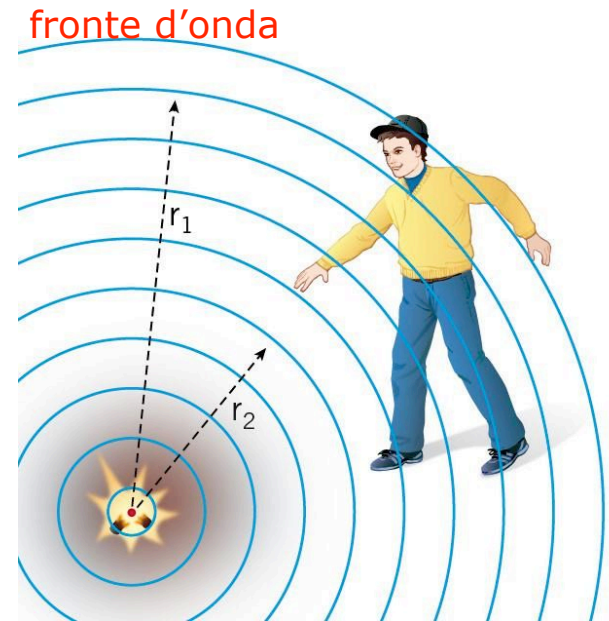
Le onde si possono propagare in un mezzo unidimensionale (come una corda), in un mezzo bidimensionale (come la membrana di un tamburo) e anche nello spazio tridimensionale, come accade alle onde sonore nell'aria.

Nello scoppio di un petardo, la grandezza fisica che oscilla è la pressione dell'aria; l'onda acustica si propaga radialmente in tutte le direzioni. Tutti i punti che si trovano a distanza r dallo scoppio sono investiti dall'onda nello stesso istante e formano un fronte d'onda.



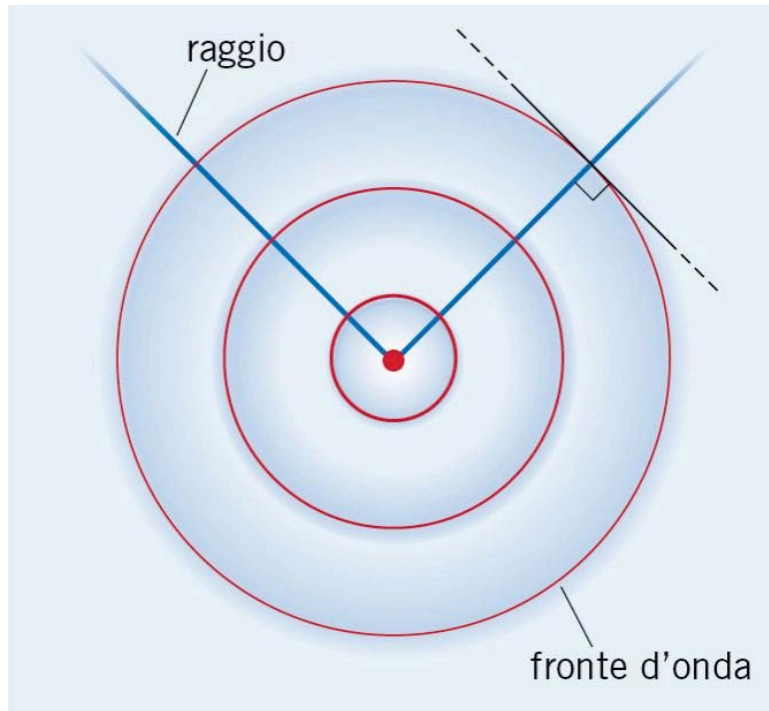
Fronte d'onda

E' l'insieme dei punti che vibrano concordemente, in modo tale che per ciascuno di essi lo spostamento dalla posizione di equilibrio assuma lo stesso valore in ogni istante (la grandezza oscillante ha lo stesso valore).

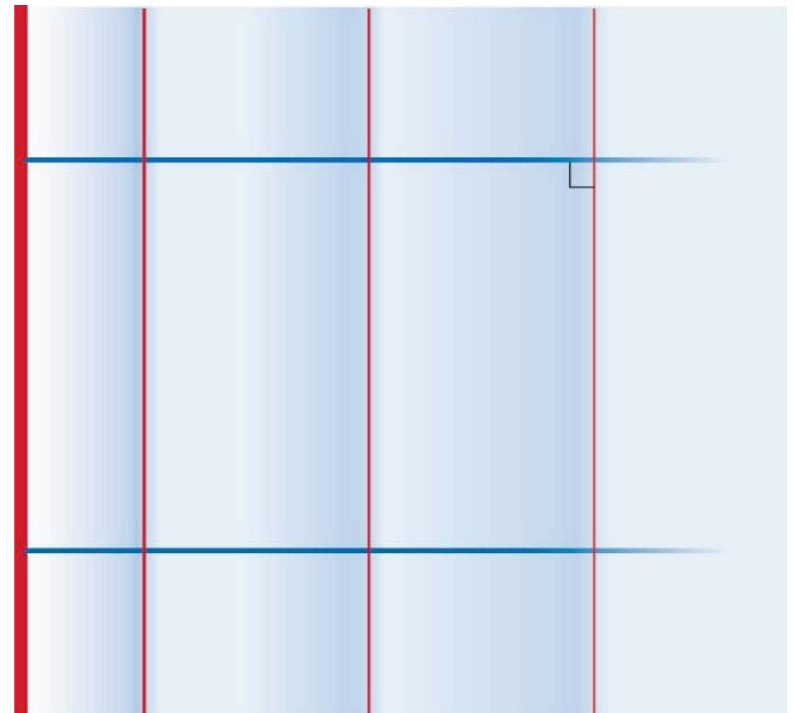


In un mezzo omogeneo e isotropo (che presenta cioè le stesse proprietà fisiche in tutti i punti e lungo tutte le direzioni) la direzione di propagazione dell'onda è sempre perpendicolare al fronte d'onda. Possiamo quindi identificare la direzione di propagazione considerando una retta normale ai fronti d'onda, che viene comunemente chiamata **raggio**.

Si chiamano raggi dell'onda le rette perpendicolari ai fronti d'onda. Il raggio di un'onda permette di visualizzare la propagazione del moto dell'onda.

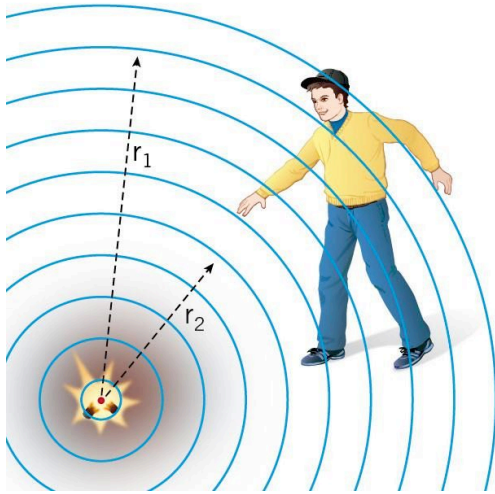


In un'onda circolare i raggi sono semirette che escono dalla sorgente dell'onda.

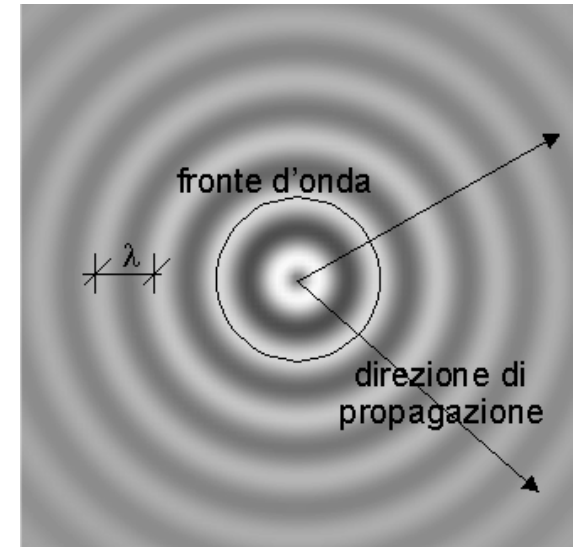


In un'onda piana i raggi sono segmenti di retta paralleli tra loro.

Tipi di fronti d'onda

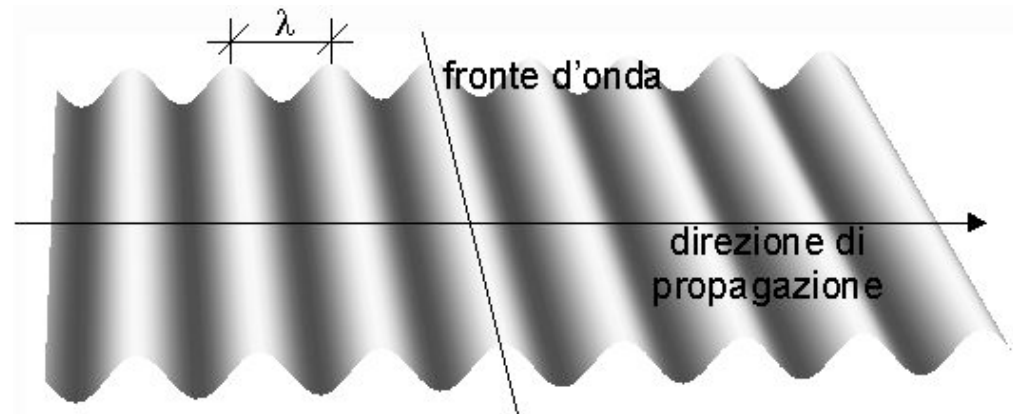


onda circolare: onda che si propaga su una superficie (i fronti d'onda sono circonferenze).

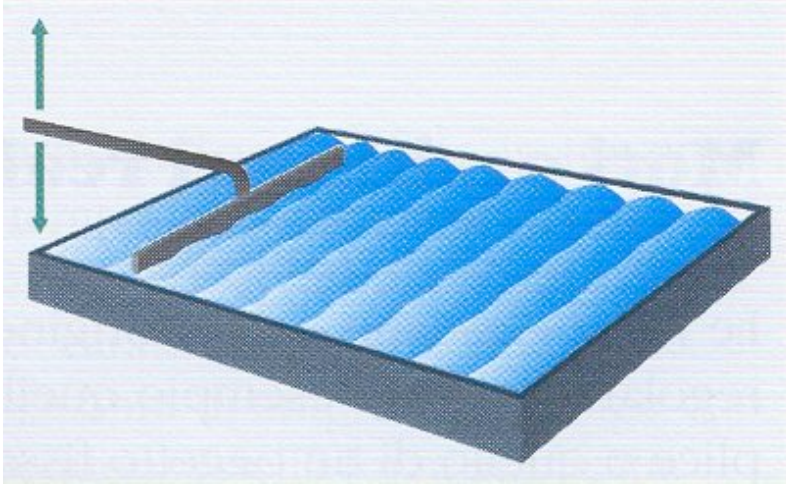


onda sferica: onda che si propaga nello spazio (i fronti d'onda sono sfere concentriche)

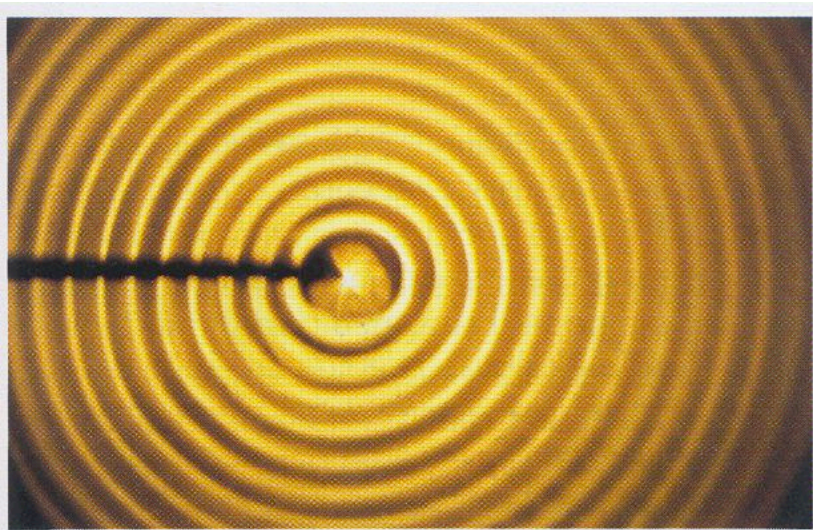
Onda piana: onda che si propaga anche nello spazio (i fronti d'onda sono costituiti da piani paralleli)



laboratorio



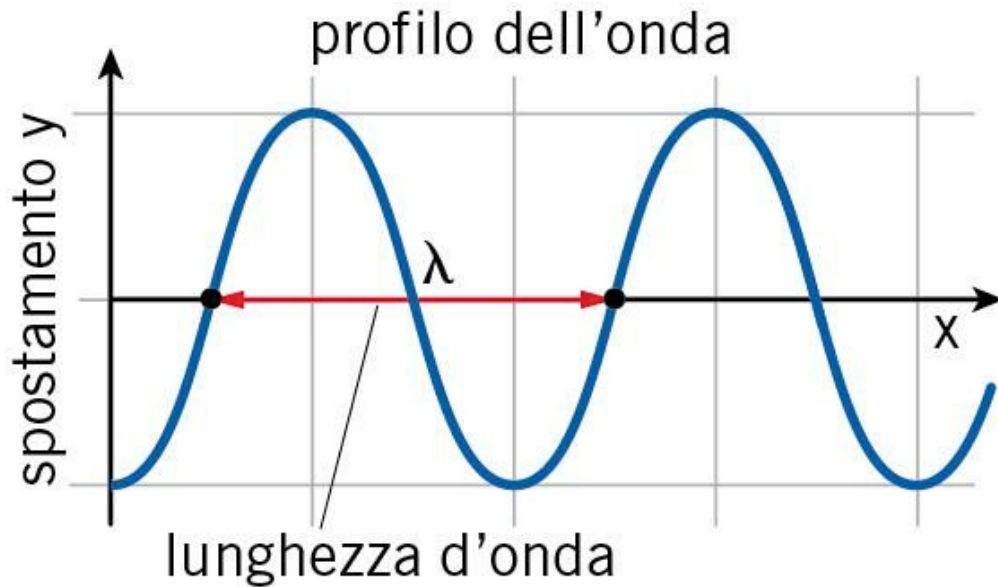
ondoscopio: è costituito da un recipiente di forma rettangolare contenente acqua e avente come fondo una lastra di vetro trasparente.



Le onde possono essere prodotte facendo vibrare una punta (onde circolari) o una sbarretta (onde rettilinee). In entrambi i casi le onde prodotte sono periodiche e di tipo armonico.

Grandezze che descrivono un'onda

Introduciamo alcune grandezze fondamentali per descrivere le caratteristiche di un'onda periodica di tipo armonico.



LUNGHEZZA D'ONDA λ

La lunghezza d'onda è la distanza fra due massimi (o minimi) consecutivi del profilo della perturbazione lungo la direzione di propagazione dell'onda.

Dopo ogni λ l'onda periodica torna a riprodursi identica a se stessa.

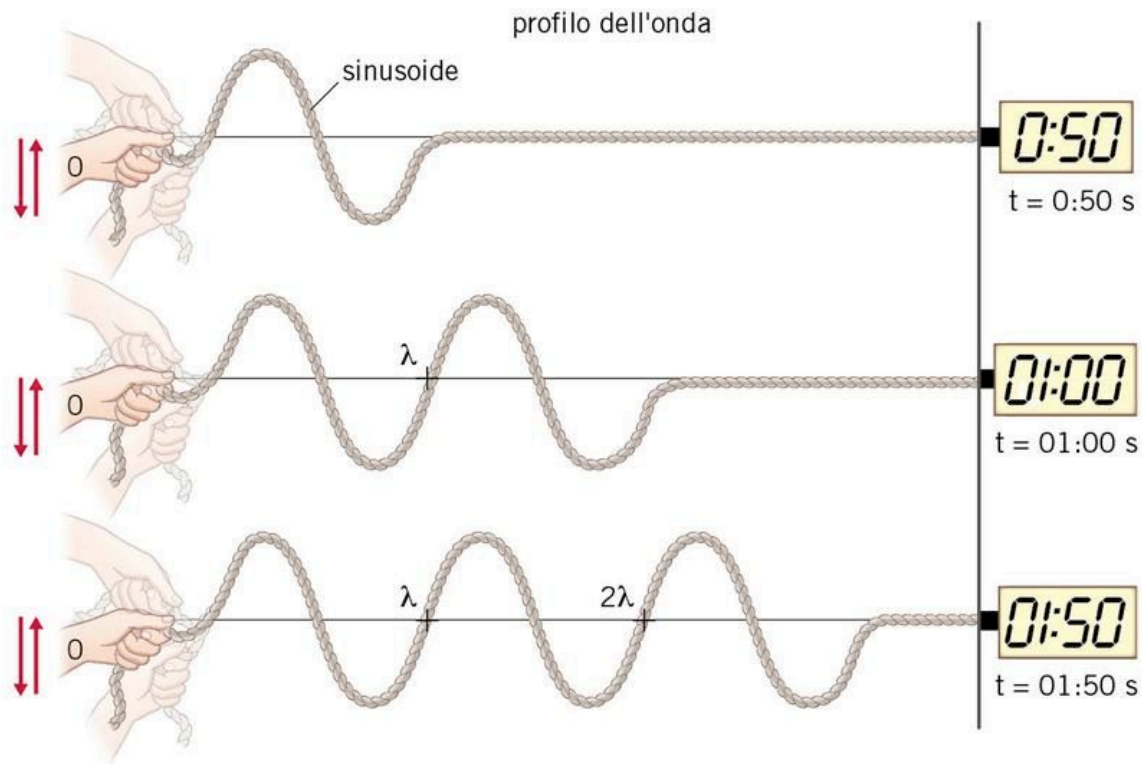


AMPIEZZA A

Il massimo allontanamento di un punto oscillante dalla sua posizione di equilibrio.



Un'onda del mare, in cui le creste distano 3 m tra loro ha una lunghezza d'onda di 3 m. Se le creste sono sollevate di 1 m rispetto al livello normale dell'acqua, l'ampiezza è di 1 m.



$$T = 0,5 \text{ s}$$

$$f = 2 \text{ Hz}$$

PERIODO T

E' l'intervallo di tempo che un punto del mezzo materiale impiega a compiere una oscillazione completa. Dopo il periodo T il moto si ripete con identiche caratteristiche.

FREQUENZA f

E' il numero di oscillazioni che l'onda descrive nell'unità di tempo (1 s):

$$f = 1/T$$

Nell'intervallo di tempo di un periodo T l'onda percorre la distanza di una lunghezza d'onda λ . Quindi l'onda periodica si propaga alla velocità.

VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE

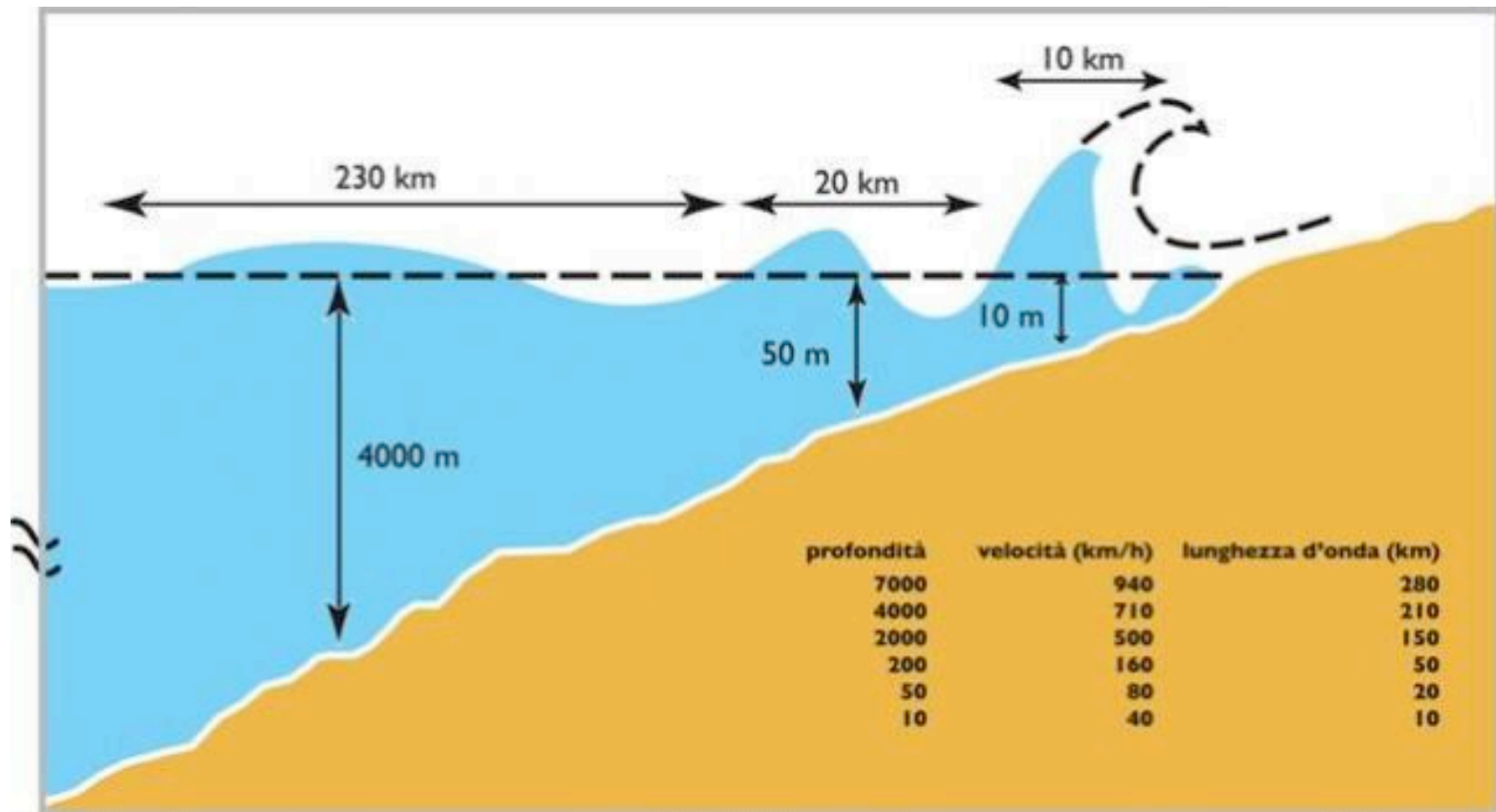
La velocità di propagazione di un'onda armonica è il rapporto fra la lunghezza d'onda λ e il periodo T dell'onda:

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

La velocità di propagazione dell'onda varia con la natura e le caratteristiche del mezzo perturbato e conseguentemente cambia anche la lunghezza d'onda, legata alla velocità, dove T e f sono invece indipendenti dal mezzo.

ESEMPIO - La velocità delle onde sulla superficie dell'acqua varia con la profondità dell'acqua.

propagazione tsunami



In una corda la velocità aumenta all'aumentare della tensione. La velocità inoltre è minore se la densità lineare della corda è maggiore.

La velocità delle onde trasversali di piccola ampiezza è espressa dalla relazione:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

T = tensione

μ = densità lineare

La velocità con cui si propaga un'onda longitudinale in un fluido omogeneo è:

$$v = \sqrt{\frac{C}{\rho}}$$

C = è una costante chiamata modulo di compressione del mezzo

ρ = densità del fluido in equilibrio

Vogliamo ora determinare l'equazione di un'onda che si propaga in un mezzo materiale.

Per descrivere un'onda abbiamo bisogno di una funzione che descriva la forma dell'onda, ossia una funzione del tipo:

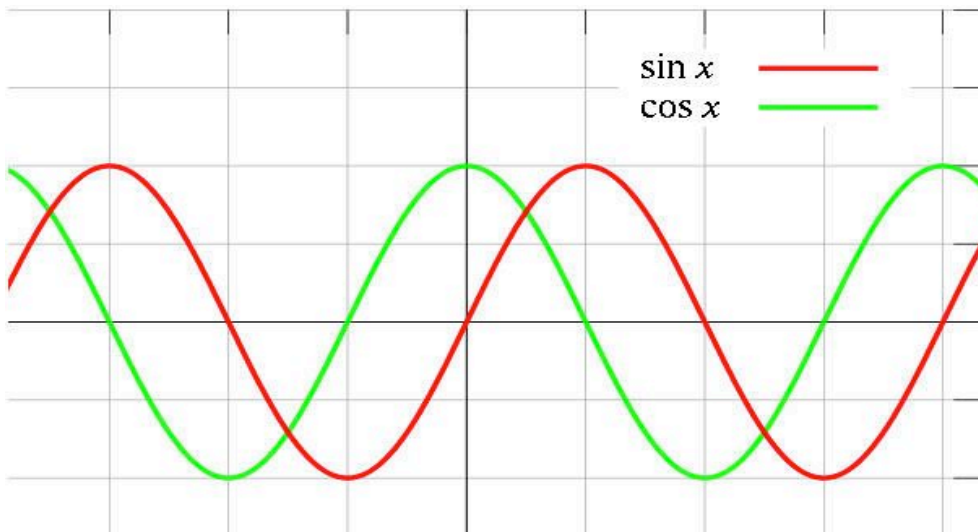
$$y=f(x,t)$$

in cui y rappresenta lo spostamento verticale (nel caso della corda) di ogni punto P della corda in funzione del tempo t e della posizione x di P lungo la corda.

Nonostante le molte diversità esistenti fra i vari tipi di onde, la stessa descrizione matematica si può applicare a qualsiasi onda di tipo armonico.

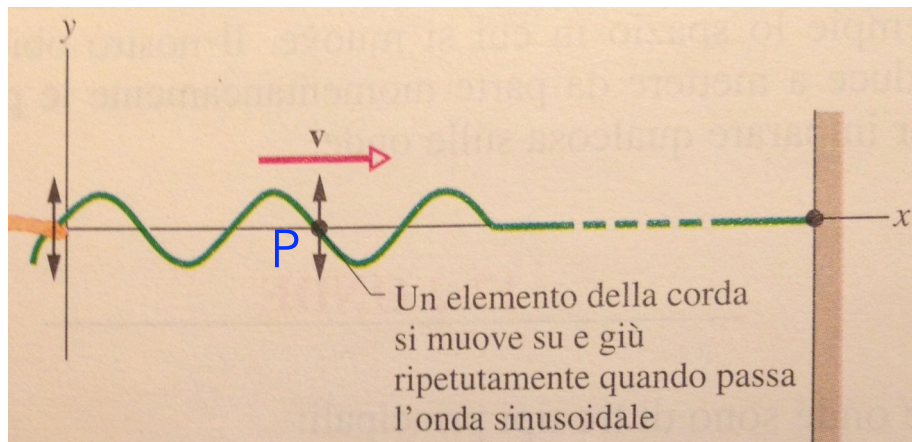
Per semplicità, prenderemo in considerazione solo le onde unidimensionali (propagazione lungo una sola direzione), e trascureremo per ora quei fenomeni (la riflessione, la rifrazione, l'interferenza, ecc.) che si verificano ogni qualvolta la libera propagazione delle oscillazioni viene ostacolata da una disomogeneità del mezzo.

In genere la forma dell'onda si può descrivere, in maniera equivalente, sia come una funzione seno ($y=\sin x$) sia come una funzione coseno ($y=\cos x$):



Noi ci serviremo della funzione coseno ($y=\cos x$).

Consideriamo un'onda armonica che si propaga su una corda.



Il punto fissato P si allontana dalla posizione di riposo nel tempo secondo la seguente legge:

**EQUAZIONE DI UN'ONDA
ARMONICA (variazione di y al
variare del tempo)**

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

A = ampiezza

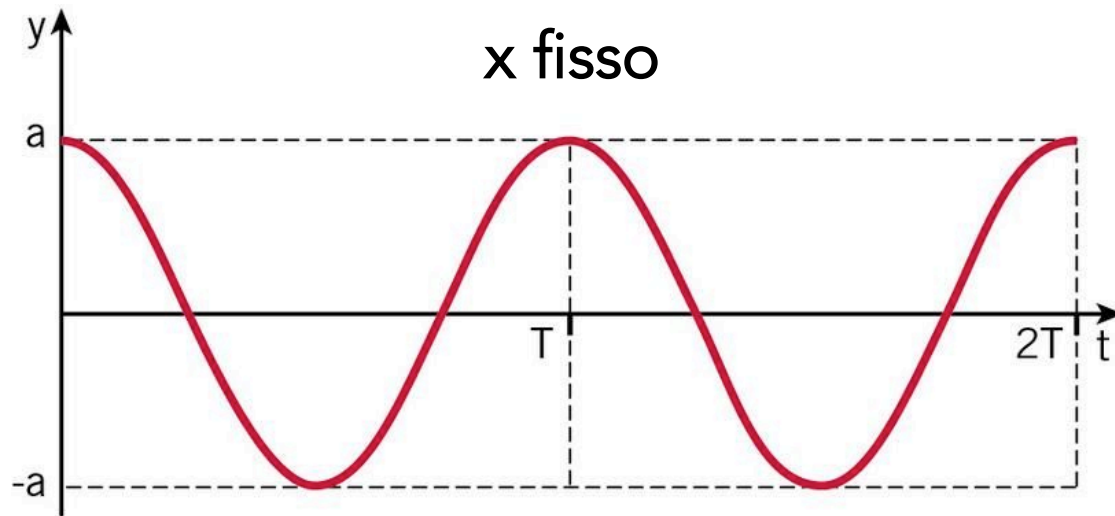
$\omega = 2\pi / T \rightarrow$ pulsazione

$\omega t + \varphi_0 \rightarrow$ fase dell'onda

$\varphi_0 \rightarrow$ fase iniziale

y = spostamento (posizione verticale del punto rispetto alla quota di equilibrio della corda)

Il grafico che descrive l'equazione dell'onda, ossia lo spostamento trasversale y di ogni elemento della corda in funzione del tempo, è una funzione chiamata cosinusoide:



**EQUAZIONE DI UN'ONDA
ARMONICA**

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Grafico posizione-tempo
che descrive il moto
verticale di un punto della
corda lungo cui si propaga
un'onda armonica.

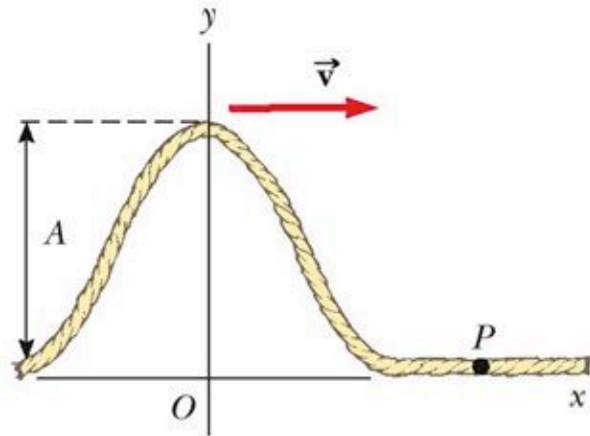
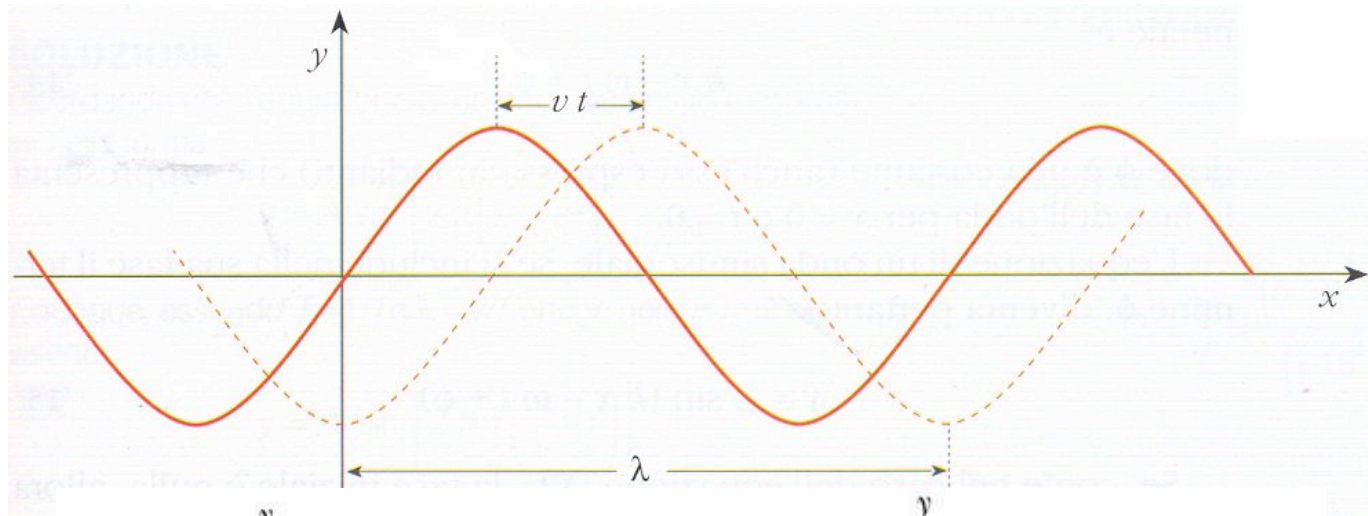
A = ampiezza

$\omega = 2\pi / T \rightarrow$ pulsazione

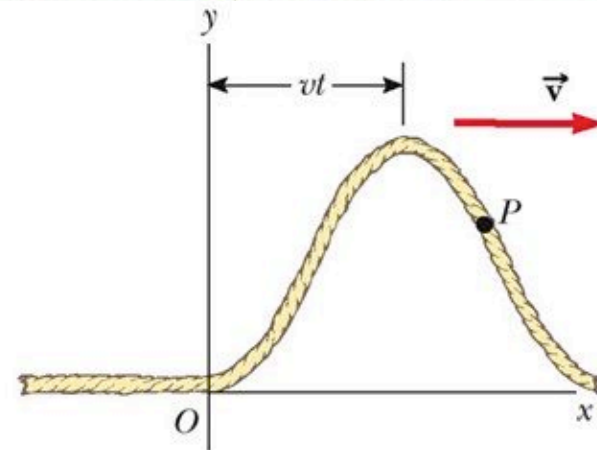
$\omega t + \varphi_0 \rightarrow$ fase dell'onda

$\varphi_0 \rightarrow$ fase iniziale

Profilo di un'onda sinusoidale nell'istante $t = 0$ (linea continua) e dopo un tempo t in cui l'onda si è propagata con velocità v percorrendo una distanza vt (linea tratteggiata)

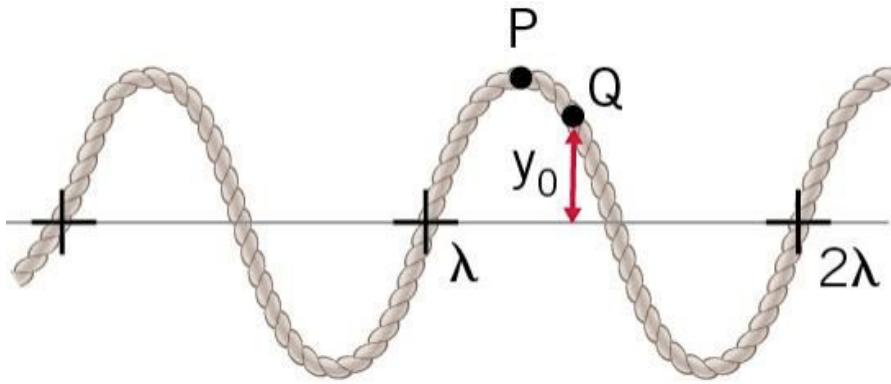


(a) Pulse at $t = 0$



(b) Pulse at time t

significato fase iniziale φ_0



La figura mostra la corda all'istante $t=0$ s. In tale istante il punto P si trova alla massima quota e, quindi, il suo moto è descritto dalla formula precedente con $\phi_0=0$.

Un altro punto Q, nello stesso istante $t=0$ s, si trova a una generica y_0 . Anche Q si muove di moto armonico, ma tale moto è sfasato rispetto a quello di P.

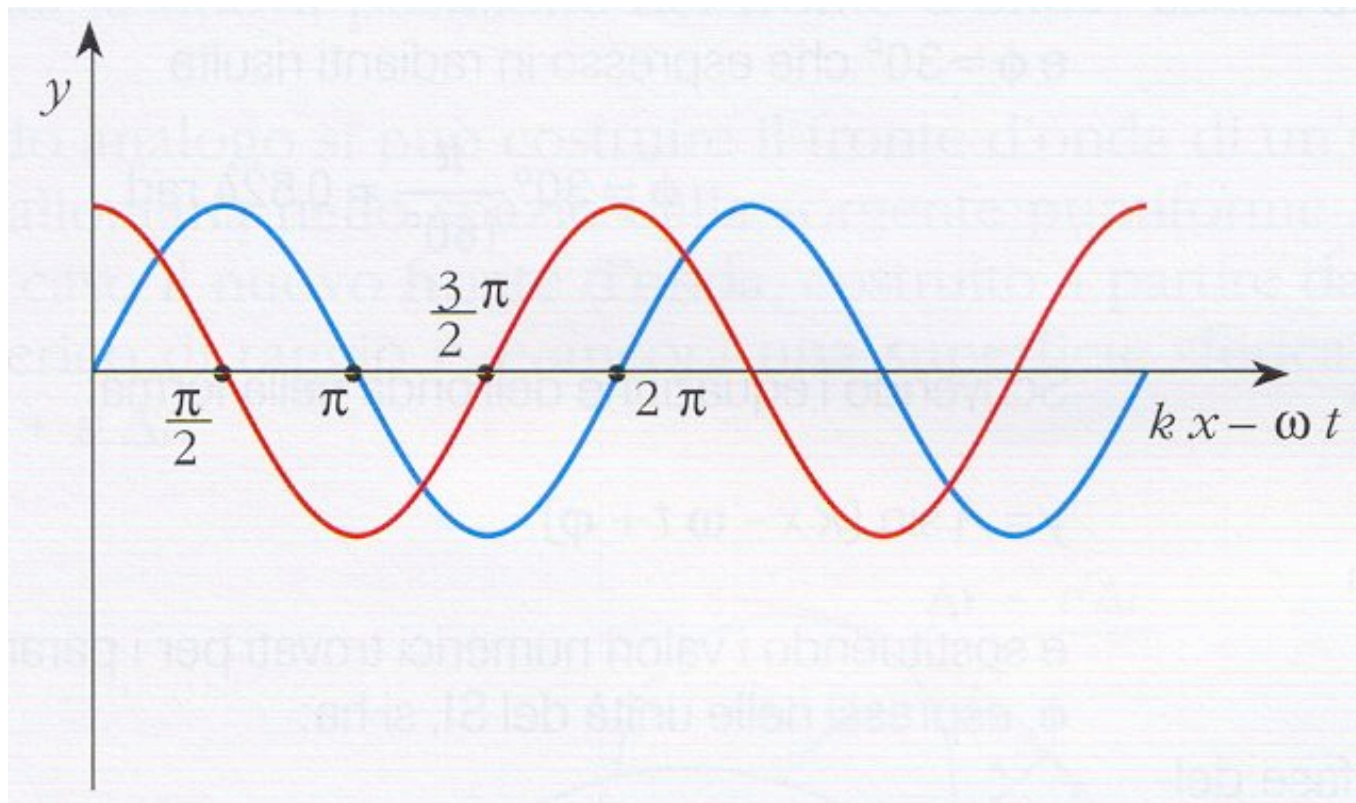
La legge che descrive il moto di Q è la stessa di quella di P, ma ϕ_0 è diverso in quanto varia da punto a punto della corda.

Ma quanto vale ϕ_0 per il punto Q (e in generale per qualunque punto sfasato rispetto a P)?

Si sostituisce $y=y_0$ e $t=0$ nell'equazione dell'onda:

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0) \xrightarrow[y=t=0]{y=y_0} y_0 = A \cos \varphi_0 \xrightarrow[\varphi_0]{\text{condizione per}} \cos \varphi_0 = \frac{y_0}{A}$$

Esempio: L'onda descritta rossa è *sfasata* di un angolo pari a $\pi/2$ rispetto all'onda blu



Un'onda si propaga su una corda e ha ampiezza $A=0,466$ m e periodo $T=1,82$ s. Il punto P della corda si trova, all'istante $t=0$ s, alla quota massima della sua oscillazione. Calcolare:

1) la fase di un punto Q che all'istante $t=0$ s si trovi alla quota $y_0=0,3$ m;

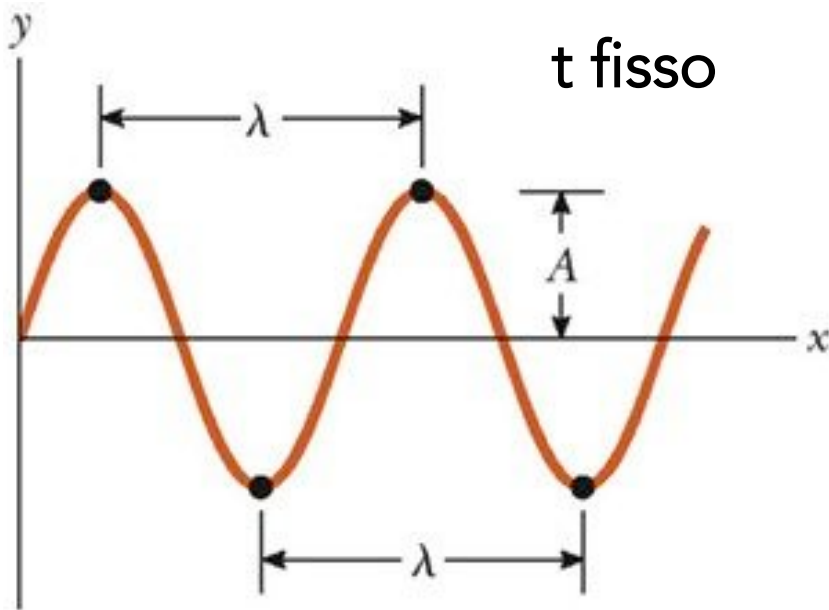
2) Il valore della quota y_1 del punto P all'istante $t=2,19$ s

$$1) \cos \varphi_0 = \frac{y_0}{A} = \frac{0,3}{0,466} \cong 0,644 \xrightarrow{\text{da cui}} \varphi_0 \cong 50^\circ$$

$$2) y_1 = A \cos \omega t \xrightarrow{\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1,82} \cong 3,45 \text{ rad/s}} y_1 = 0,466 \cdot \cos(3,45 \cdot 2,19) = 0,466 \cdot \cos 7,56 = 0,135 \text{ m}$$

L'equazione precedente descrive come varia lo spostamento y di un punto P fissato al variare del tempo. Adesso fissiamo il tempo t e **studiamo il profilo dell'onda al variare della posizione x** . Ossia, vogliamo fissare la forma dell'onda all'istante t (istantanea fotografica all'istante t).

Il profilo di un'onda armonica ha ancora la forma di una cosinusoidale (o di una sinusoidale):



**EQUAZIONE DI UN'ONDA
ARMONICA (variazione di y al
variare di x)**

$$y = A \cos(kx + \omega_0)$$

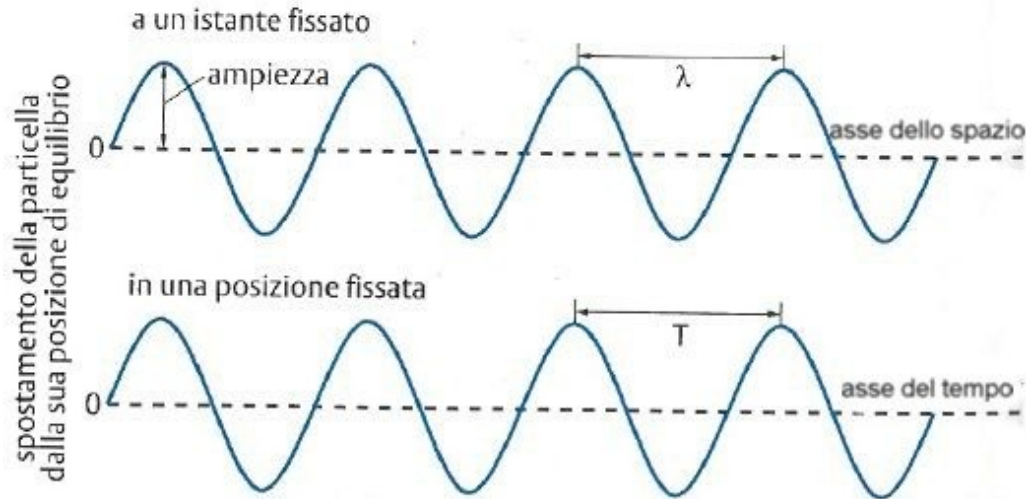
y = quota di un punto rispetto
alla posizione di equilibrio

A = ampiezza

$k = 2\pi / \lambda \rightarrow$ numero d'onda
(periodicità onda nello spazio)

$kx + \omega_0 \rightarrow$ fase dell'onda

Riepilogo



EQUAZIONE DI UN'ONDA
ARMONICA (variazione di y al
variare di t)

$$y = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

EQUAZIONE DI UN'ONDA
ARMONICA (variazione di y al
variare di x)

$$y = A \cos(kx + \omega_0)$$

**EQUAZIONE GENERALE DI
UN'ONDA ARMONICA (variazione di
 y nel punto x e al tempo t)**

$$y = A \sin(kx \pm \omega t + \phi)$$

+ onda progressiva (si propaga in avanti
nel verso positivo dell'asse x)

- onda regressiva (si propaga all'indietro
nel verso negativo dell'asse x)

y = quota verticale

A = ampiezza

$\omega = 2\pi / T \rightarrow$ pulsazione

$k = 2\pi / \lambda \rightarrow$ numero d'onda

$kx \pm \omega t + \varphi_0 \rightarrow$ fase dell'onda

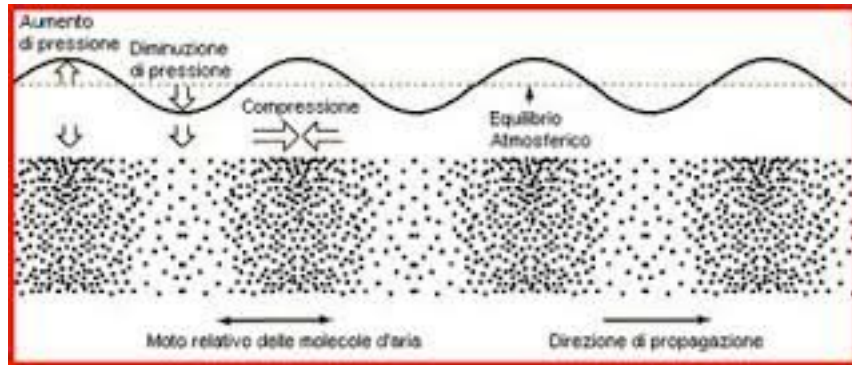
$\varphi_0 \rightarrow$ fase iniziale

Le formule di questo paragrafo valgono anche per altri tipi di onde: ciò che cambia è il significato fisico della variabile y .

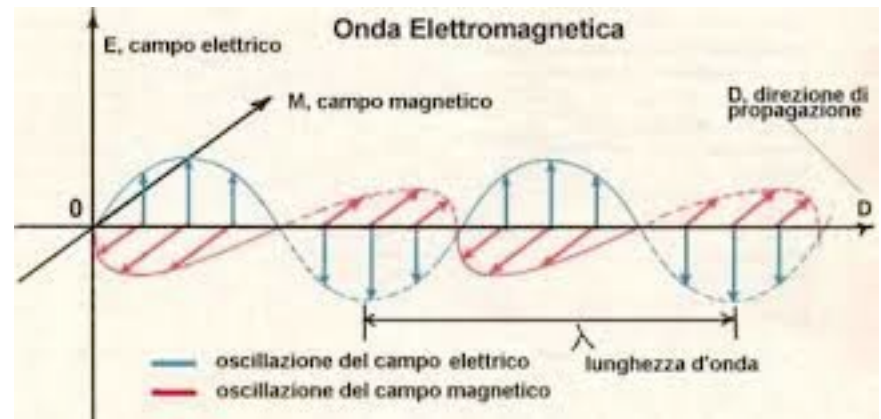
Una volta definita la grandezza rappresentata da y , si sa che tipo di onda si sta esaminando.

Per l'onda che si trasmette lungo una sbarra d'acciaio, la grandezza fisica che oscilla y è la variazione di densità del materiale; per un'onda sonora y può essere una variazione di pressione, per un'onda radio y è il valore di un campo elettrico.

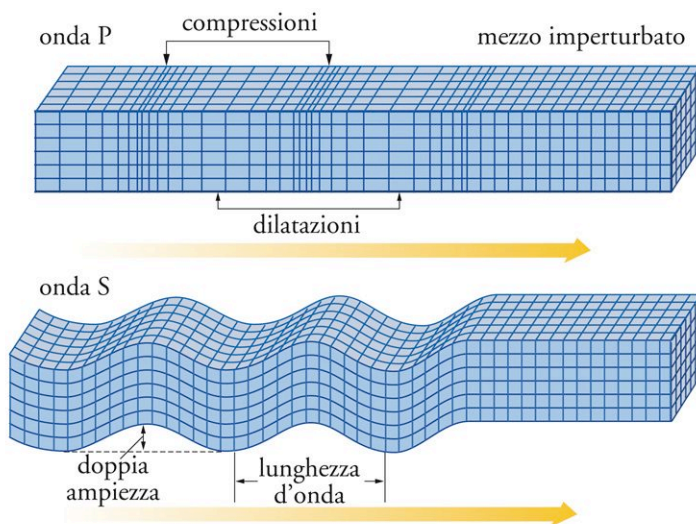
onda sonora: y può essere una variazione di pressione



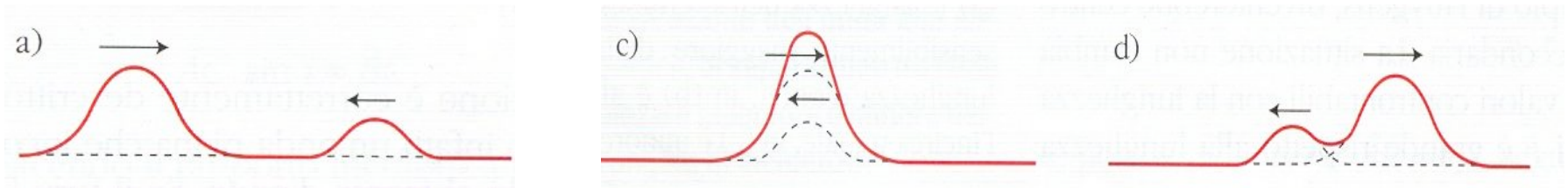
onda e.m.: y è la variazione di un campo elettromagnetico



onde sismiche: onde meccaniche che sfruttano le proprietà elastiche del mezzo materiale per la loro propagazione



Occupiamoci dei fenomeni legati alla propagazione di due onde distinte che si incontrano nella stessa regione di spazio. Vediamo, per esempio, cosa accade con due perturbazioni che si propagano lungo la stessa corda.

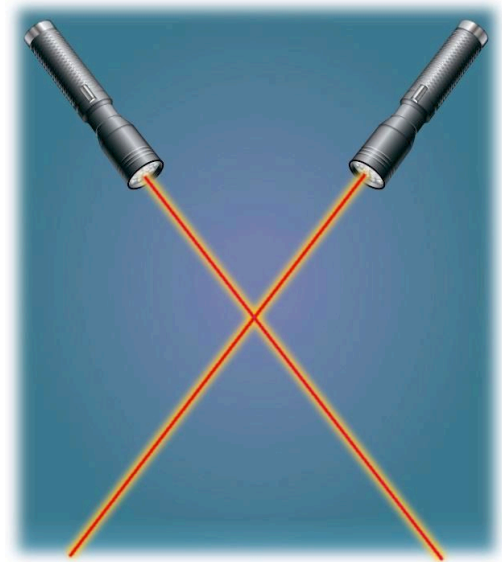


- Nell'istante in cui le onde si incontrano (fig. c), gli spostamenti y si sommano, cosicché lo spostamento risultante è la somma degli spostamenti considerati singolarmente.
- Dopo l'incontro (fig. d) le onde continuano il loro moto senza mutare né forma né velocità (ciascuna perturbazione si comporta come se si propagasse da sola lungo la fune).

Questo fenomeno può essere verificato anche con le onde sonore (onde meccaniche): è possibile percepire e distinguere i suoni dei diversi strumenti di un'orchestra proprio perché ciascuno di essi non è modificato dalla presenza degli altri.

Lo stesso accade quando si incrociano due fasci laser (onde elettromagnetiche): la luce di ciascun fascio procede indisturbata dopo avere attraversato l'altro fascio.

In entrambi gli esempi, le onde rispettano il principio di sovrapposizione.

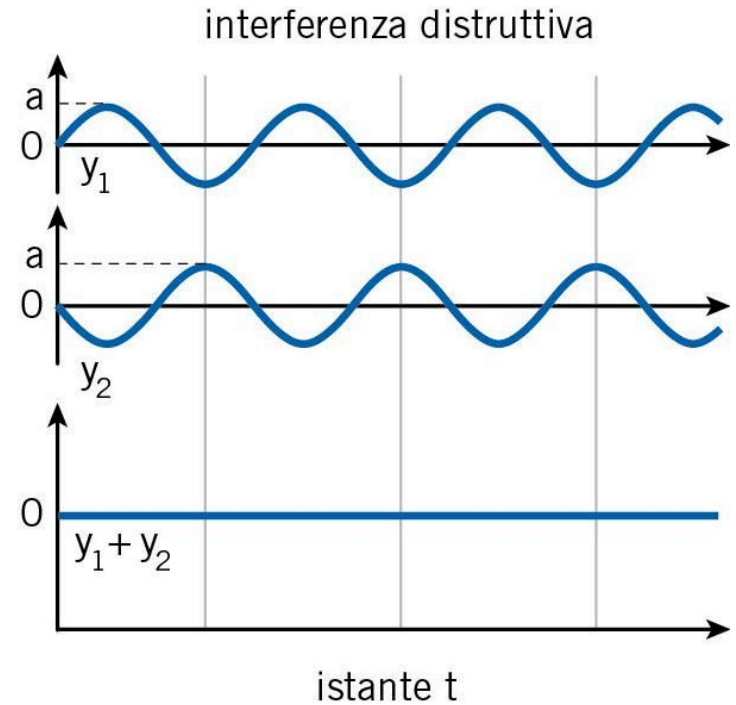
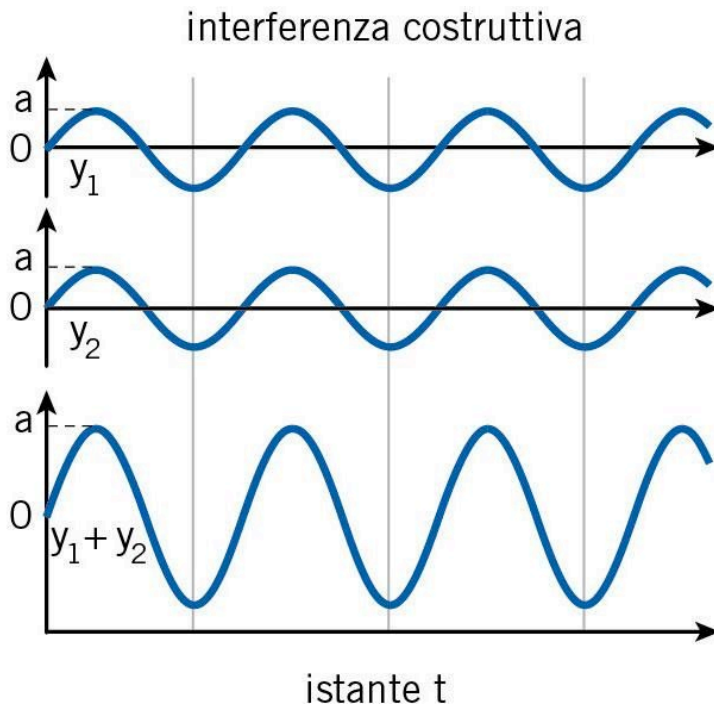


PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

Due o più onde che si propagano nello stesso mezzo in un dato istante, generano una perturbazione che è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde in quel punto e in quell'istante.

Due o più onde che si sovrappongono nello stesso mezzo materiale danno origine al fenomeno dell'**interferenza**.

Si ha **interferenza costruttiva** quando gli effetti di due o più onde si rafforzano a vicenda; nel caso opposto si ha **interferenza distruttiva**.



Interferenza di onde armoniche che si propagano su una retta

Per semplicità consideriamo due onde armoniche che si propagano nella stessa direzione e che abbiano stessa frequenza e stessa ampiezza. E per la prima onda scegliamo come fase iniziale $\varphi_0=0$.

Le equazioni delle due onde in un punto fissato, al trascorrere del tempo, sono:

$$y_1 = A \cos(\omega t) \qquad y_2 = A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Per il principio di sovrapposizione, l'onda risultante è descritta dall'equazione:

$$y = y_1 + y_2 = A \cos(\omega t) + A \cos(\omega t + \varphi_0)$$

Trascurando i passaggi algebrici, si ricava che:

$$y = A_0 \cos\left(\omega t + \frac{\varphi_0}{2}\right) \quad \text{dove : } A_0 = 2A \cos \frac{\varphi_0}{2}$$

In sintesi, componendo due onde armoniche si ottiene ancora un'onda armonica che ha la stessa frequenza delle onde di partenza e che segue un andamento cosinusoidale.

E ancora:

$$\text{se } \varphi_0 = 2k\pi \text{ (k intero)} \rightarrow \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) = |1| \rightarrow |A_0| = 2A$$

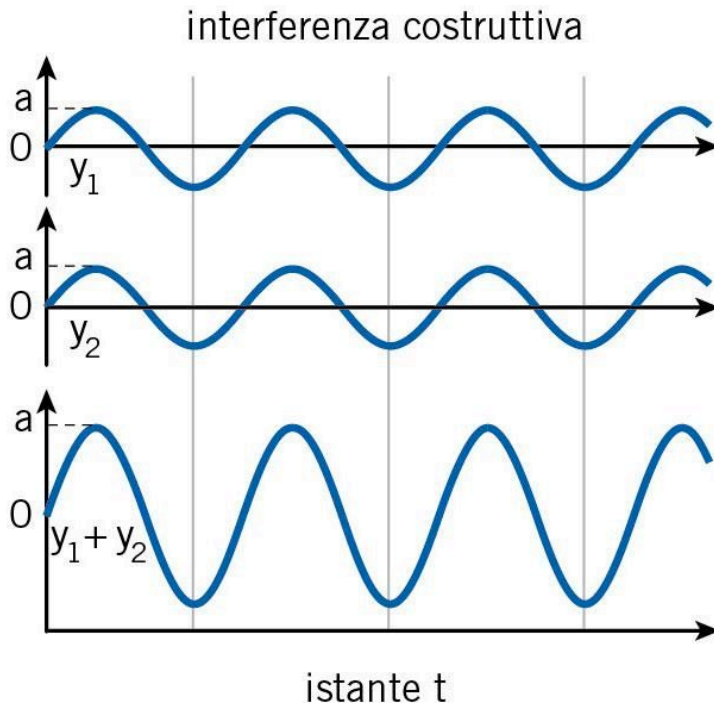
interferenza
costruttiva $y=y_1+y_2$

$$\text{se } \varphi_0 = (2k+1)\pi \text{ (k intero)} \rightarrow \cos\left(\frac{\varphi_0}{2}\right) = 0 \rightarrow A_0 = 0$$

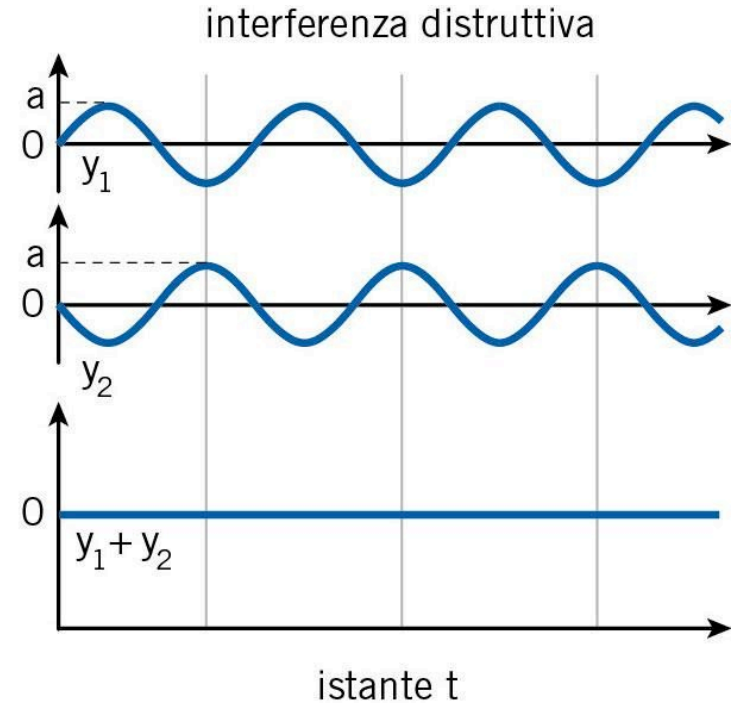
interferenza
distruttiva $y=0$

La differenza tra le fasi di due onde si chiama **sfasamento**. Nel nostro esempio la fase della prima onda è 0, per cui lo sfasamento è: $\Delta\varphi = \varphi_0$.

interferenza costruttiva: onde in fase ($\Delta\varphi = 2k\pi$). L'ampiezza dell'onda risultante è in ogni punto la somma delle ampiezze delle singole onde.



Interferenza distruttiva: onde in opposizione di fase ($\Delta\varphi = (2k+1)\pi$). L'ampiezza dell'onda risultante è nulla (al massimo di un'onda corrisponde il minimo dell'altra).

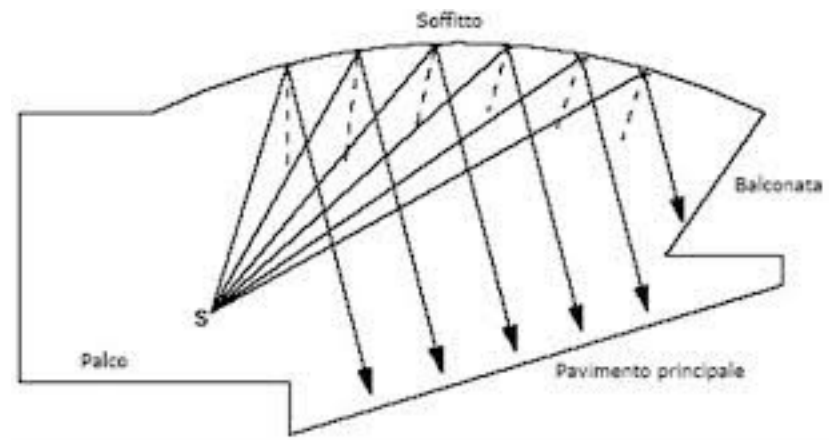


esempio: sovrapposizione onde sonore

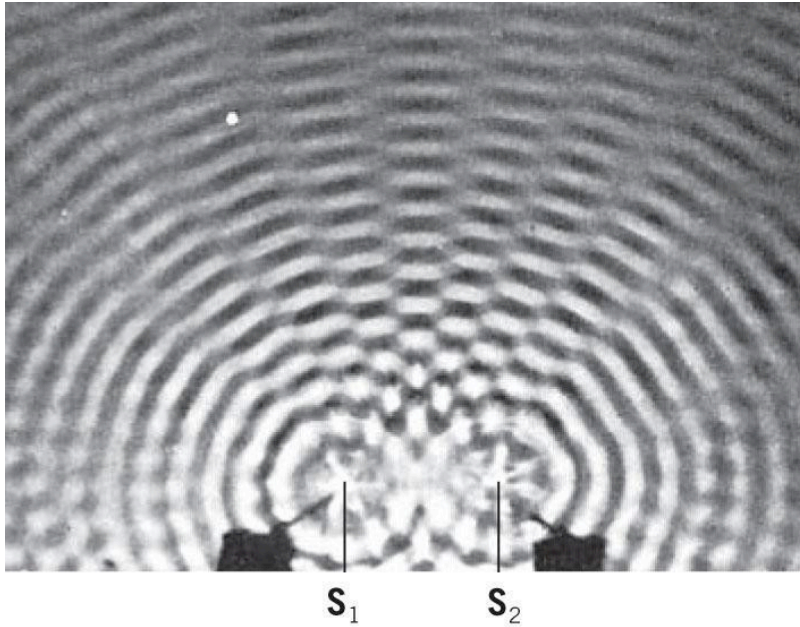
La sovrapposizione di due onde sonore uguali e in opposizione di fase nello stesso punto si annullano a vicenda e producono una situazione di silenzio.

Per esempio, nei concerti tenuti al chiuso può capitare di «sentire male» perché nel punto in cui ci si trova giungono due onde che producono interferenza distruttiva: quella diretta dagli strumenti e quella riflessa dal soffitto, che arriva con un poco di ritardo.

Le sale da concerto e i teatri sono progettati in modo da tenere in considerazione l'interferenza fra onde sonore e assicurare così l'acustica migliore.



Interferenza in un piano e nello spazio

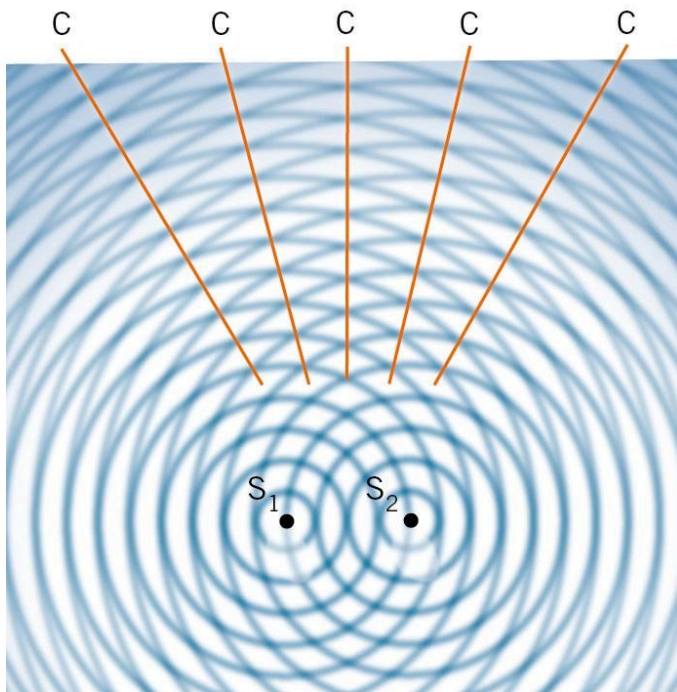


Le due punte che oscillano in fase sono un esempio di sorgenti coerenti di onde.

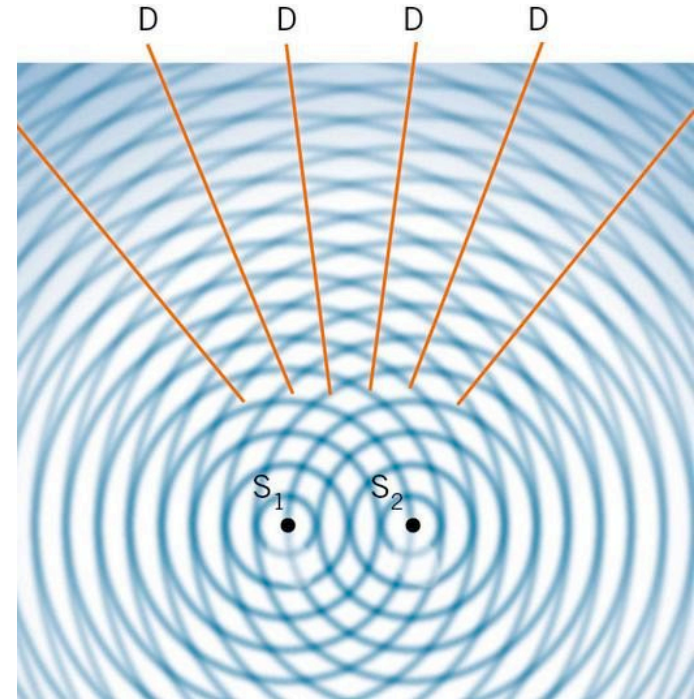
Con un ondoscopio generiamo due onde circolari (onde nel piano), che avranno lo stesso periodo e la stessa lunghezza d'onda λ della sorgente che le ha generate (le due punte dell'ondoscopio). Queste onde si generano nei punti S_1 e S_2 e si propagano contemporaneamente nella bacinella.

Due sorgenti si dicono **coerenti** quando la differenza di fase tra le onde che esse emettono è costante.

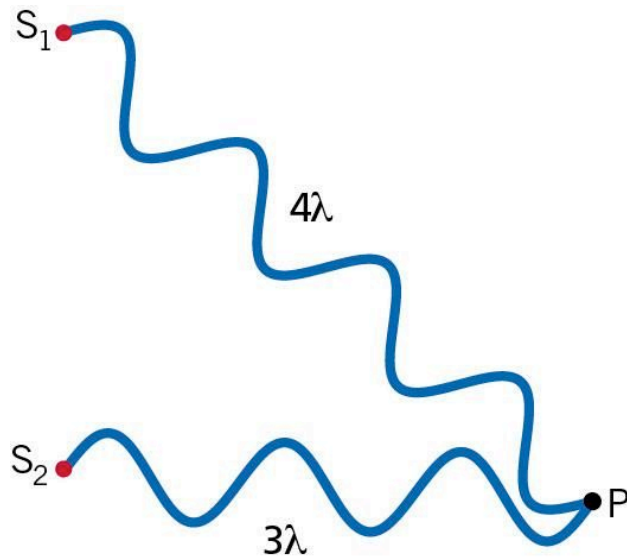
Le increspature sulla superficie dell'acqua generate dalle due sorgenti coerenti formano la cosiddetta **figura di interferenza**, dovuta alla sovrapposizione delle due onde circolari.



Interferenza costruttiva lungo le linee C: l'acqua è molto perturbata, perché giungono insieme (in fase) i massimi e poi i minimi di oscillazione delle due onde.



Interferenza distruttiva lungo le linee D: l'acqua è poco perturbata, perché giungono insieme (non in fase) i massimi e i minimi di oscillazione delle due onde.



Ricaviamo la condizione affinché si abbia un'interferenza costruttiva e distruttiva.

Il punto P dista dalle sorgenti S_1 e S_2 :

$$S_1P = 4\lambda \quad S_2P = 3\lambda \Rightarrow S_1P - S_2P = 4\lambda - 3\lambda = \lambda$$

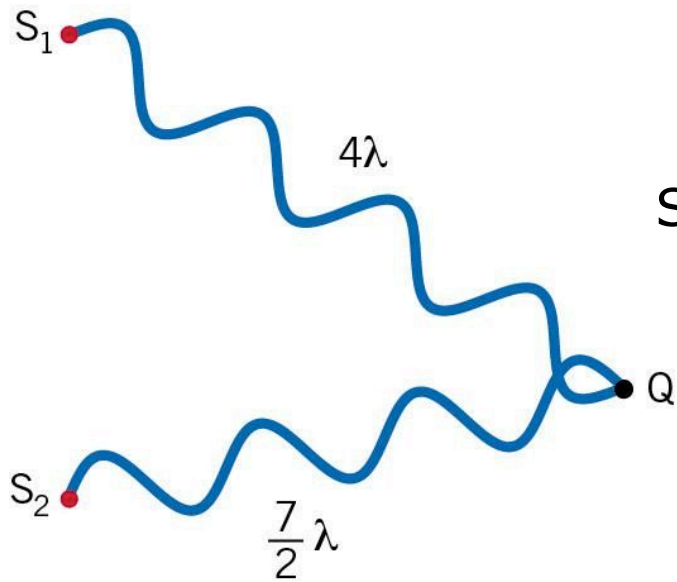
Ossia, le due onde arrivano in P sempre in fase, per cui si ha **interferenza costruttiva**.

In generale:

CONDIZIONE INTERFERENZA COSTRUTTIVA

Se le sorgenti S_1 e S_2 oscillano in fase alla stessa frequenza, in un punto P si ha interferenza costruttiva se le distanze percorse dalle onde per giungere in P soddisfano la relazione:

$$|S_1P - S_2P| = k\lambda \quad (k \text{ intero})$$



Il punto Q dista dalle sorgenti S_1 e S_2 :

$$S_1P = 4\lambda \quad S_2P = \frac{7}{2}\lambda \Rightarrow S_1P - S_2P = 4\lambda - \frac{7}{2}\lambda = \frac{1}{2}\lambda$$

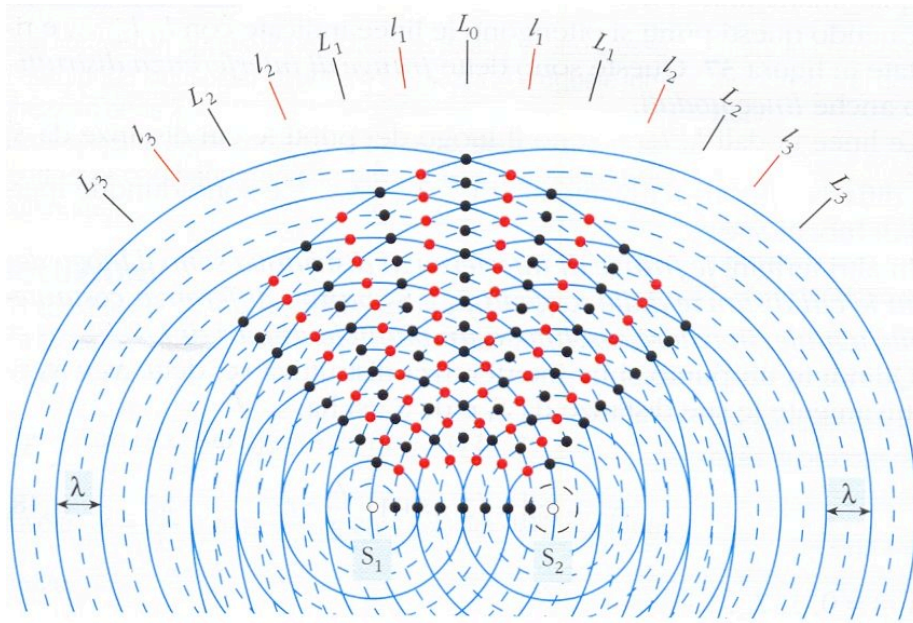
Ossia, le due onde arrivano in P sempre in opposizione di fase, per cui si ha **interferenza distruttiva**.

In generale:

CONDIZIONE INTERFERENZA DISTRUTTIVA

Se le sorgenti S_1 e S_2 oscillano in fase alla stessa frequenza, in un punto P si ha interferenza distruttiva se le distanze percorse dalle onde per giungere in P soddisfano la relazione:

$$|S_1P - S_2P| = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad (k \text{ intero})$$



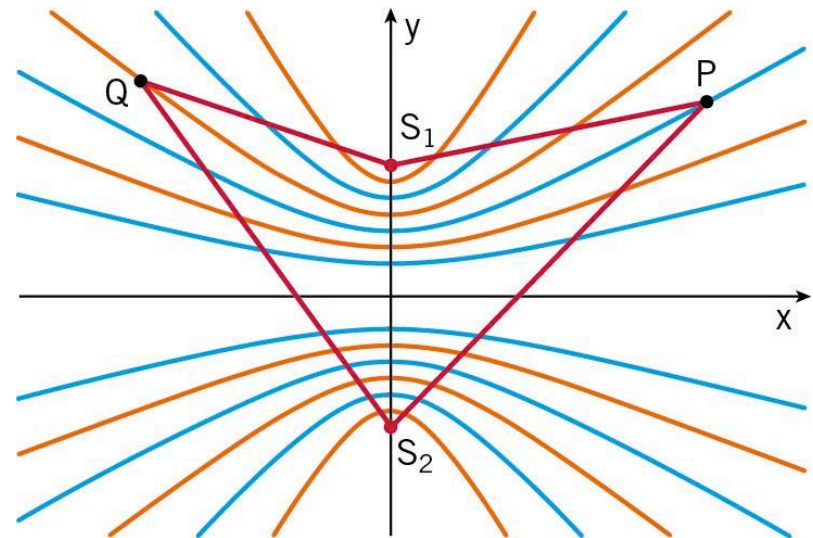
- Punti in cui si ha interferenza costruttiva (frangia interferenza costruttiva)
- Punti in cui si ha interferenza distruttiva (frangia interferenza distruttiva)

Insieme frange interferenza costruttiva e distruttiva si chiama ***figura d'interferenza***.

Per quale figura è vero che $|PS_1 - PS_2| = \text{cost}$?

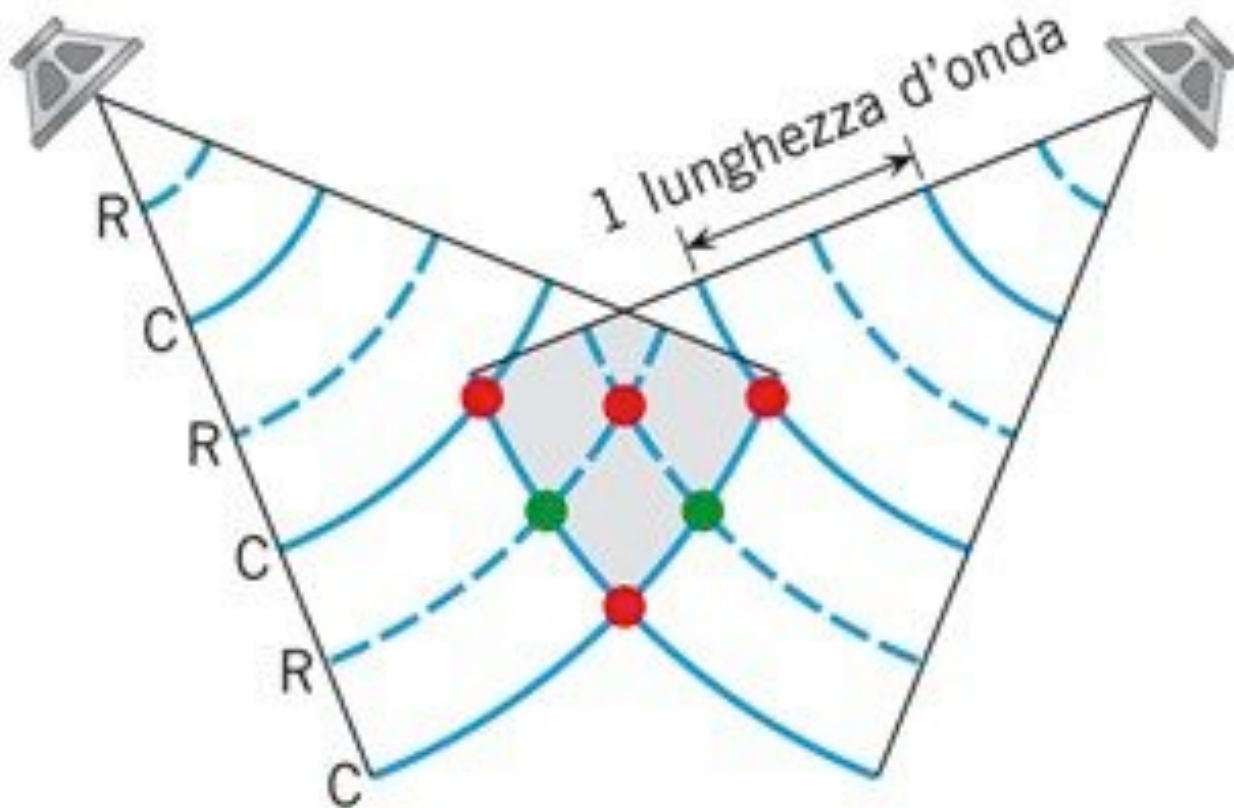
L'iperbole

Quindi i punti P e Q di interferenza costruttiva e distruttiva si trovano su iperboli con i fuochi nelle sorgenti S_1 e S_2 delle onde

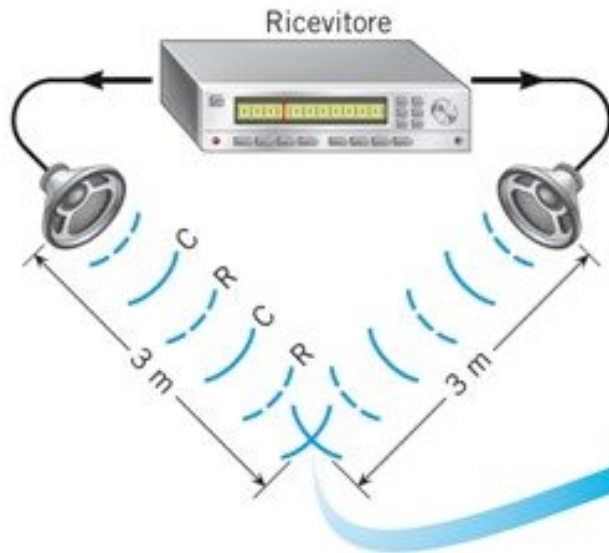


Vediamo più da vicino:

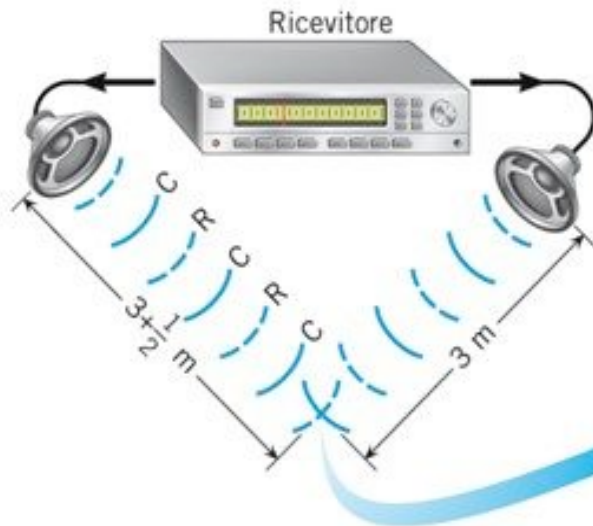
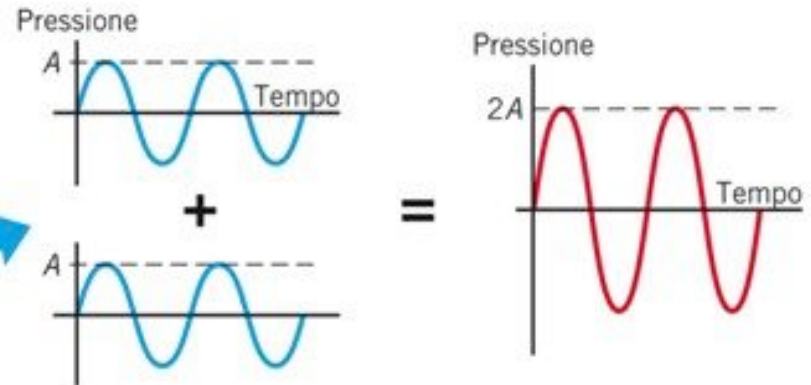
- Punti rossi: punti in cui si ha interferenza costruttiva
- Punti verdi: punti in cui si ha interferenza distruttiva



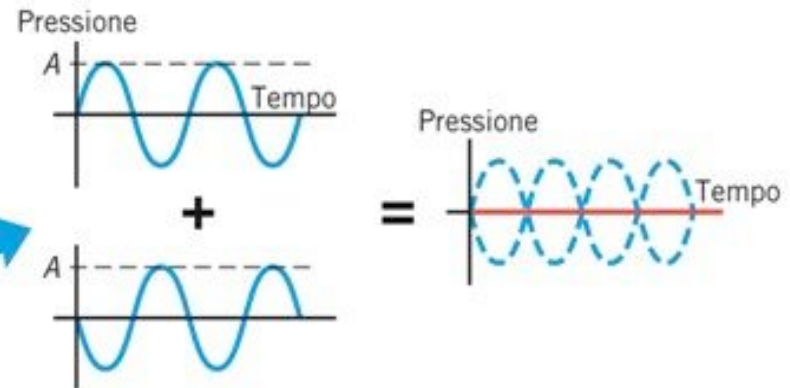
esempio interferenza costruttiva e distruttiva



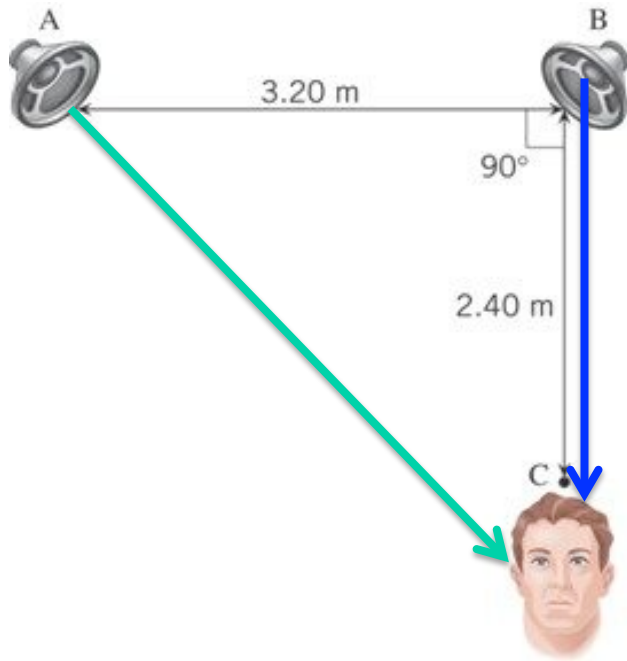
Interferenza costruttiva



Interferenza distruttiva



esempio



I due altoparlanti emettono in fase due suoni identici di frequenza 214 Hz e velocità di 343 m/s. Cosa sente l'ascoltatore, un suono più intenso (interferenza costruttiva) o meno intenso (interferenza distruttiva)?

Calcoliamo la differenza Δx tra i due cammini AC e BC:

$$AC \xrightarrow{\text{teorema Pitagora}} \sqrt{3,20^2 + 2,40^2} = 4 \text{ m}$$
$$\Delta x = AC - BC = 4 - 2,40 = 1,6 \text{ m}$$

Calcoliamo la lunghezza d'onda:

$$v = \lambda f \rightarrow \lambda = \frac{v}{f} = \frac{343}{214} = 1,60 \text{ m}$$

Poiché è soddisfatta la condizione di interferenza costruttiva:

$$\Delta x = |AC - BC| = k\lambda \xrightarrow[\lambda = 1,6 \text{ m}]{\Delta x = 1,6 \text{ m}} \Delta x = \lambda$$

nel punto C si ha interferenza costruttiva e l'ascoltatore sente un suono più intenso.

Un'onda conserva la sua forma finché si propaga in un mezzo che assorbe in modo trascurabile l'energia trasportata (caso dell'onda su una corda, del suono nell'aria o dell'onda elettromagnetica).

Se però l'onda incontra un ostacolo, una fenditura o una qualsiasi disomogeneità del mezzo, la sua velocità viene modificata. Se supponiamo che la sua energia, comunque, non venga assorbita, l'onda continua ad esistere, ma la sua ulteriore propagazione avviene con modalità differenti. I fenomeni che possono verificarsi sono la *riflessione*, la *rifrazione* e la *diffrazione*.

Prima di affrontare la descrizione di questi diversi processi, enunciamo il principio di *Huygens (1629-1695)*.

Principio di Huygens

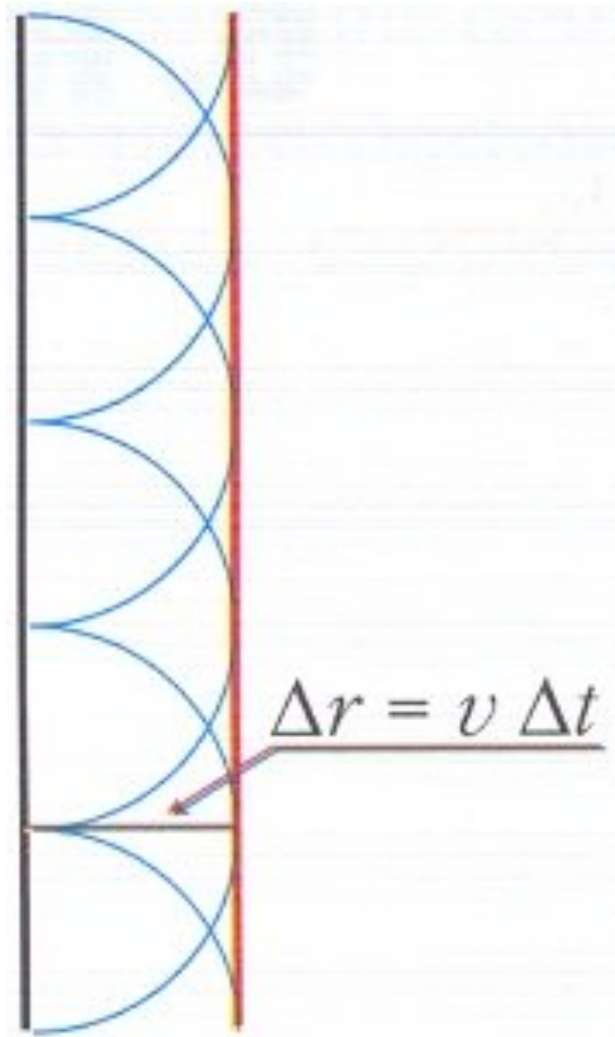
Questo principio permette di interpretare in via teorica i caratteristici fenomeni connessi con la propagazione delle onde.

PRINCIPIO DI HUYGENS

Ogni punto di un fronte d'onda può essere considerato come una sorgente secondaria di onde sferiche, aventi la stessa frequenza della sorgente originaria dell'onda.

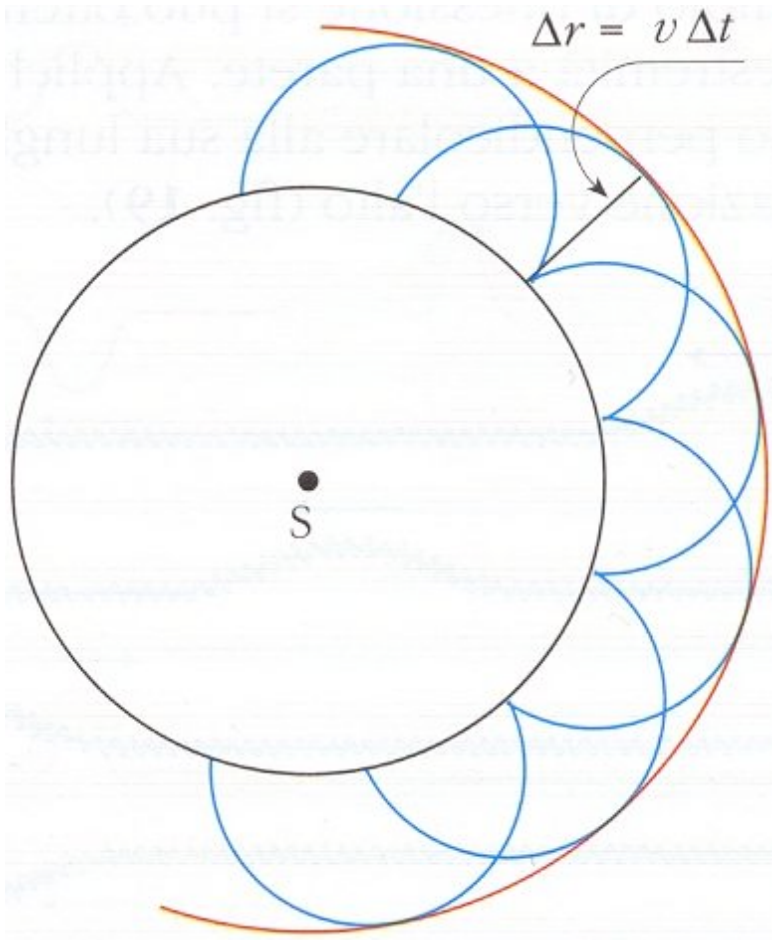
Il nuovo fronte d'onda è l'involuppo delle onde secondarie, cioè la superficie tangente ai fronti d'onda di tutte le onde secondarie.

Il principio di Huygens permette di costruire un nuovo fronte d'onda conoscendo il fronte d'onda precedente.



ESEMPIO - Consideriamo un fronte d'onda piano che si propaga con velocità v in un mezzo omogeneo e isotropo. Questo fronte d'onda è rappresentato in sezione dalla prima linea verticale. Dopo un intervallo di tempo Δt ogni punto del fronte d'onda ha generato un'onda sferica secondaria (principio di Huygens), rappresentata, ciascuna, da un piccolo cerchio di raggio $\Delta r = v \Delta t$.

La tangente ai fronti d'onda delle onde secondarie (seconda linea verticale) rappresenta la nuova posizione del fronte d'onda, che risulta ancora piano.



Esempio - In modo analogo si può costruire il fronte d'onda di un'onda sferica che si allontana nello spazio dalla sorgente puntiforme S . In questo caso il nuovo fronte d'onda, costruito a partire da un fronte d'onda sferico di raggio r , è ancora una superficie sferica, di raggio $r + \Delta r = r + v \Delta t$.

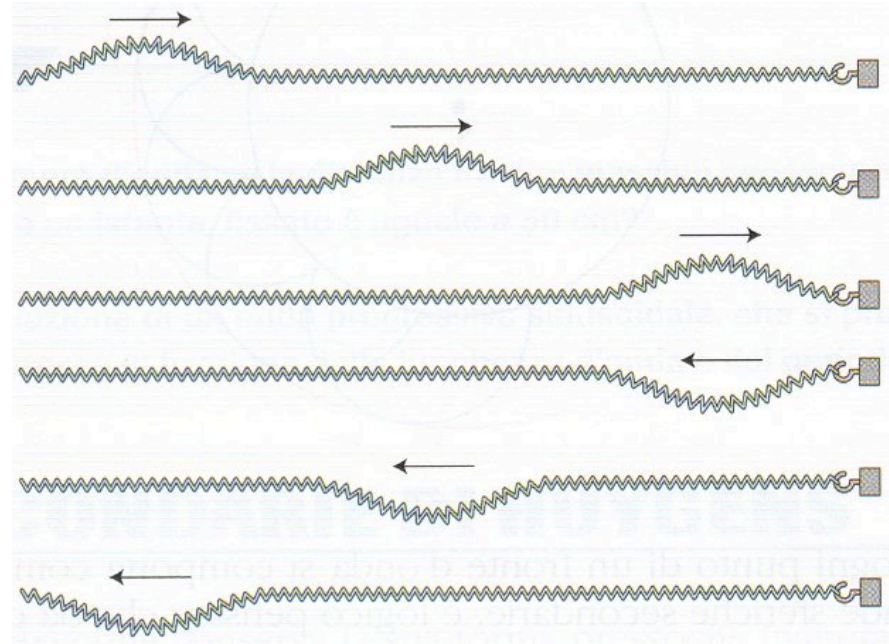
Riflessione e rifrazione

I fenomeni della **riflessione** e della **rifrazione** avvengono quando l'onda, nella sua propagazione, incontra un confine del mezzo in cui si propaga, o in generale una modificazione della natura del mezzo.

Faremo esempi utilizzando onde elastiche, ma le leggi sono di applicazione generale e non dipendono dalla natura delle onde, per cui possono essere applicate, ad esempio, anche alle onde sonore o elettromagnetiche.

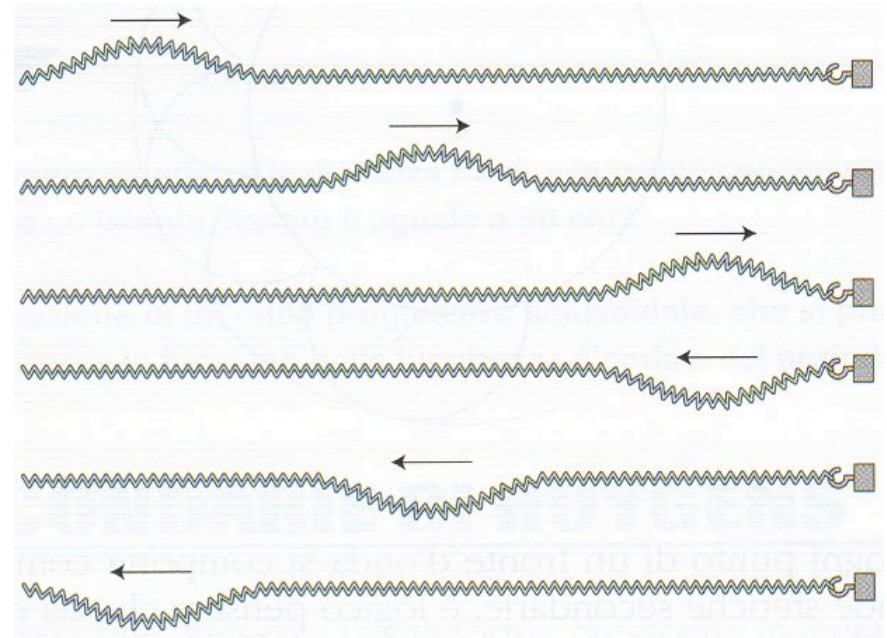
Esempi

Un esempio di **riflessione** si può ottenere mediante una molla fissata per una estremità a una parete. Applichiamo all'altra estremità un rapido impulso in modo da provocare una oscillazione verso l'alto.



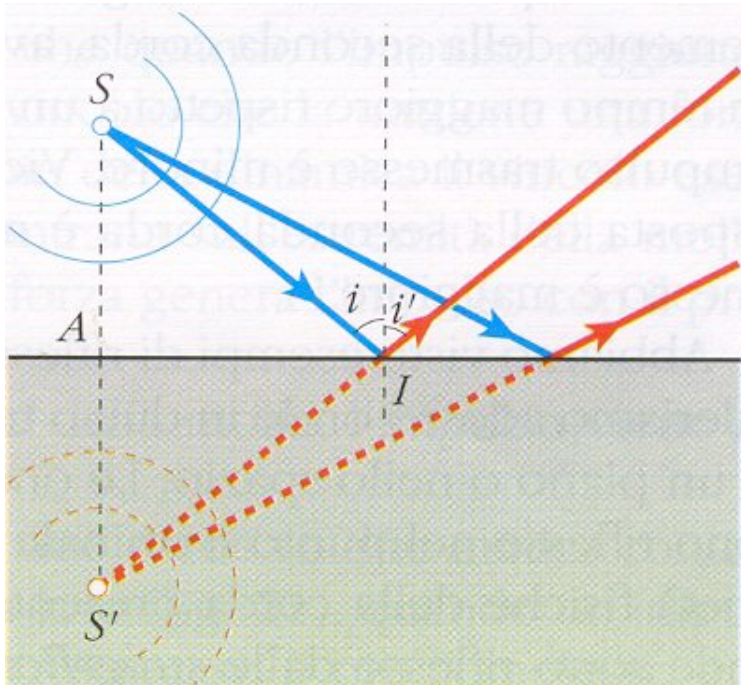
In questo modo si crea un'onda (non periodica) che si propaga lungo la molla a una determinata velocità. Quando l'onda raggiunge l'estremo fisso, viene riflessa in modo che la sua ampiezza e il modulo della sua velocità di propagazione rimangono di valore costante, ma il profilo della perturbazione si capovolge e l'onda si propaga nella direzione opposta, ritornando verso l'estremo libero in cui è stata generata.

Spiegazione - Quando l'impulso raggiunge l'estremità fissa, la molla esercita sul vincolo che la trattiene una forza diretta verso l'alto; per il terzo principio della dinamica il vincolo esercita a sua volta una forza uguale e contraria sull'estremità della molla. Essendo diretta verso il basso, questa forza genera l'impulso con il profilo rovesciato.



Consideriamo adesso onde in due o tre dimensioni (onde che si propagano in un piano o nello spazio).

Sperimentalmente si verifica che, *quando un'onda di qualsiasi natura incontra una superficie riflettente*, il raggio dell'onda incidente e quello dell'onda riflessa soddisfano le seguenti leggi:

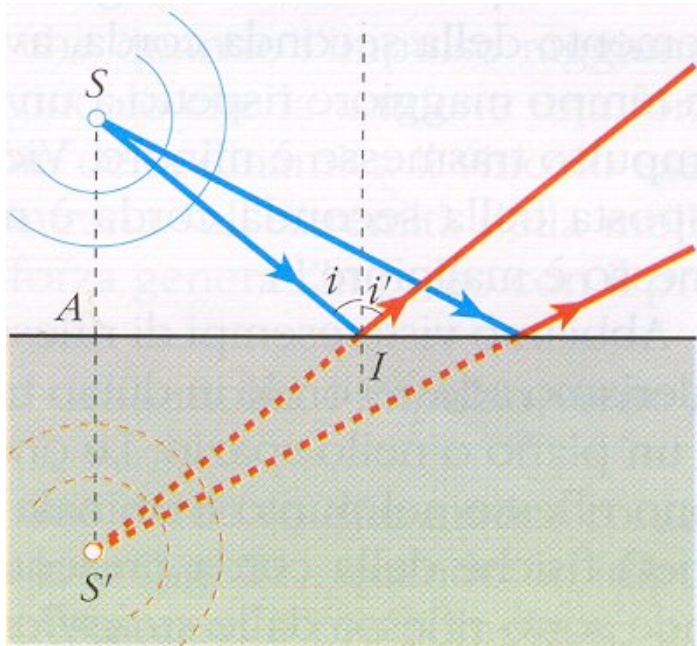


PRIMA LEGGE DELLA RIFLESSIONE

Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale alla superficie riflettente giacciono sullo stesso piano.

SECONDA LEGGE DELLA RIFLESSIONE

L'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali.

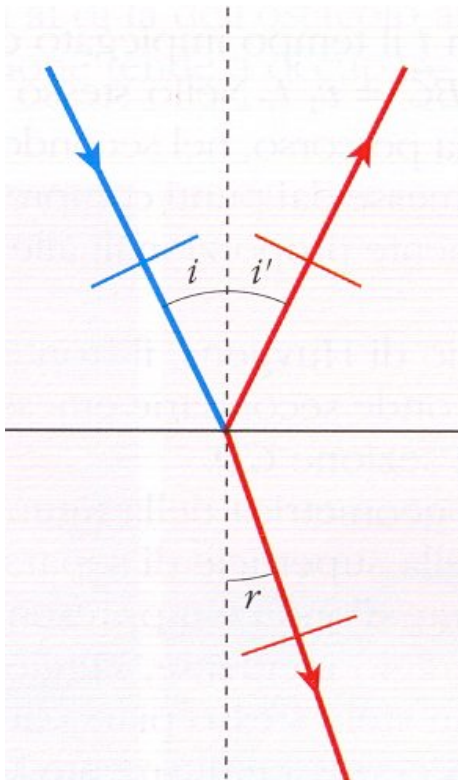


In altri termini, a un'onda sferica o circolare emessa da S corrisponde, dopo la riflessione, un'onda ancora sferica o circolare con centro nel punto S' , simmetrico di S rispetto alla superficie di riflessione. Quindi l'onda riflessa si comporta come se la sua sorgente fosse posta in S' .

Si dimostra geometricamente che le leggi della riflessione possono essere ricavate dal principio di Huygens.

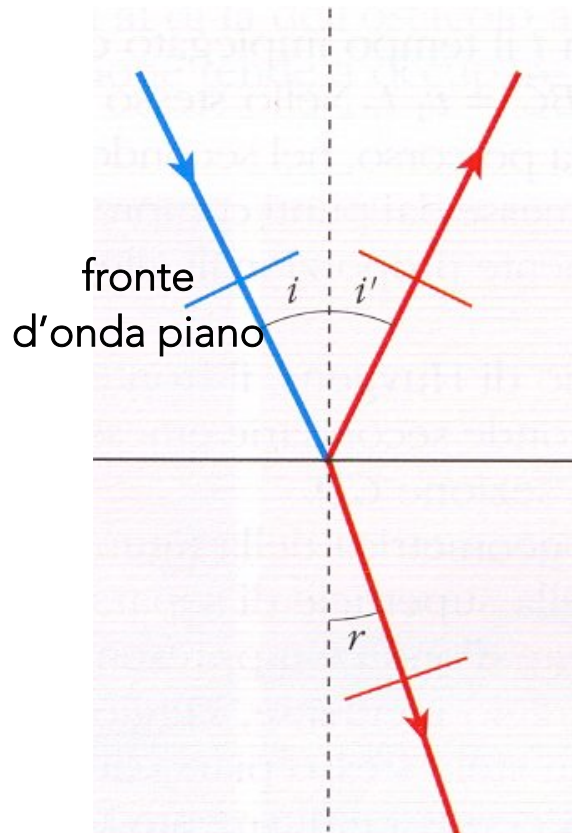
Sperimentalmente si verifica che, *quando un'onda di qualsiasi natura incontra una superficie di separazione tra due mezzi (aria/acqua oppure acqua più profonda/acqua meno profonda), la direzione di propagazione dell'onda cambia nel passaggio da un mezzo all'altro (fenomeno della rifrazione).*

Le leggi della rifrazione sono:



PRIMA LEGGE DELLA RIFRAZIONE

Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale alla superficie di separazione, fra il mezzo in cui si propaga l'onda incidente e quello in cui si propaga l'onda rifratta, giacciono sullo stesso piano.



SECONDA LEGGE DELLA RIFRAZIONE

Il rapporto fra il seno dell'angolo i di incidenza e il seno dell'angolo r di rifrazione è costante ed è uguale al rapporto fra le velocità v_1 e v_2 di propagazione dell'onda, rispettivamente nel primo e nel secondo mezzo:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2} = \text{costante}$$

Si dimostra geometricamente che le leggi della rifrazione possono essere ricavate dal principio di Huygens.

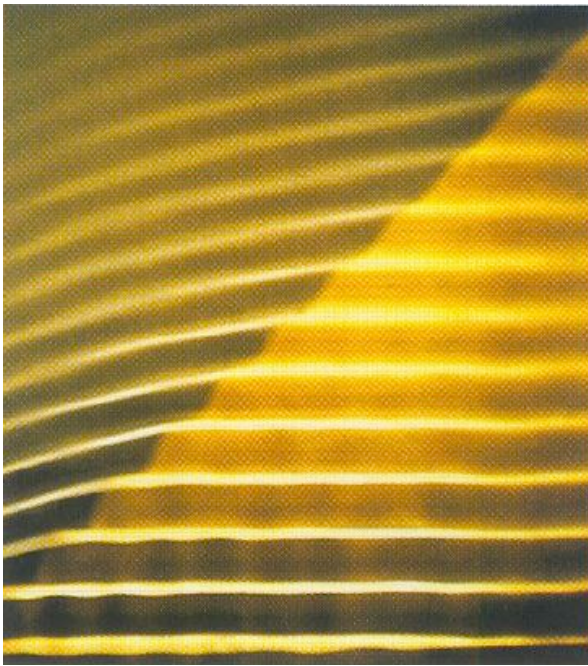
Esempio - rifrazione onde superficiali in acqua

Sperimentalmente (con un ondoscopio) si osserva che nel passaggio dell'onda dalla zona in cui l'acqua è più profonda a quella in cui è meno profonda, *la lunghezza d'onda è minore dove l'acqua è meno profonda* (la frequenza dell'onda non dipende dalle proprietà del mezzo in cui si propaga e coincide con la frequenza con cui oscilla la sorgente). Quindi:



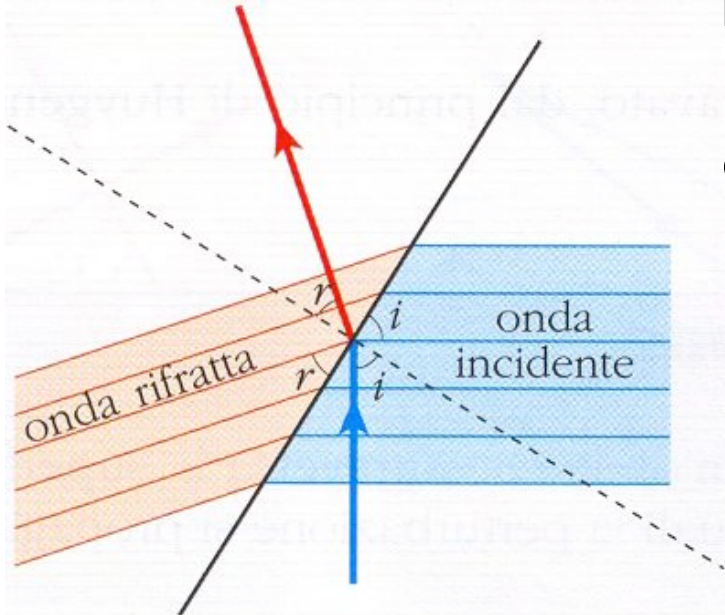
$$v_1 = \lambda_1 f \quad v_2 = \lambda_2 f \Rightarrow \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Essendo $\lambda_2 < \lambda_1$, è anche $v_2 < v_1$, cioè:
la velocità di propagazione delle onde è minore dove l'acqua è meno profonda, maggiore dove l'acqua è più profonda.



Le onde rifratte, oltre ad avere fronti d'onda più vicini fra loro nella zona d'acqua meno profonda, sono anche diversamente inclinate rispetto a quelle incidenti.

Quando l'onda passa dall'acqua più profonda all'acqua meno profonda, l'angolo di rifrazione è più piccolo dell'angolo di incidenza. Infatti, per la legge della rifrazione:

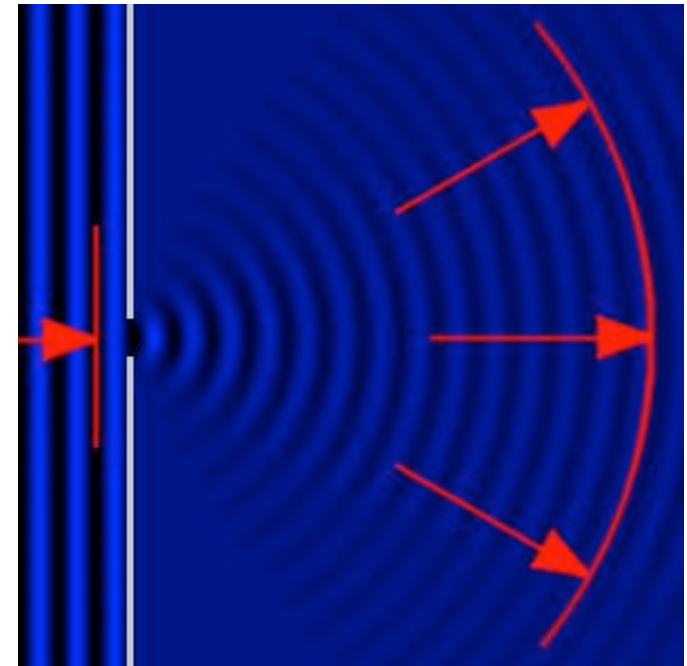
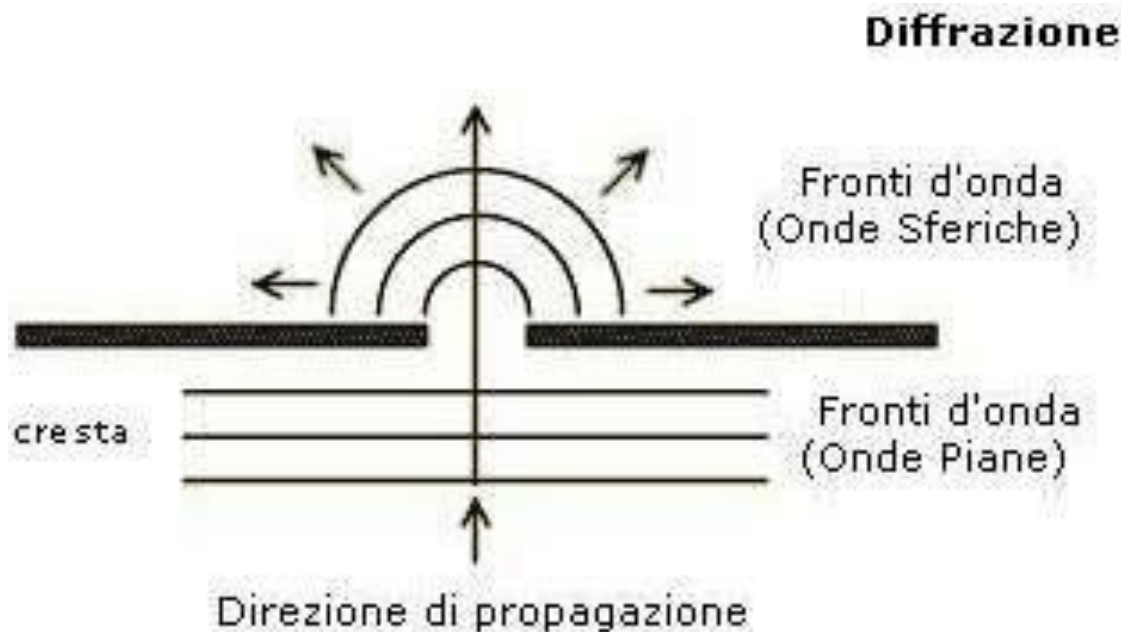


$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} \xrightarrow{\text{da cui}} \text{sen } r = \frac{v_2}{v_1} \text{sen } i$$

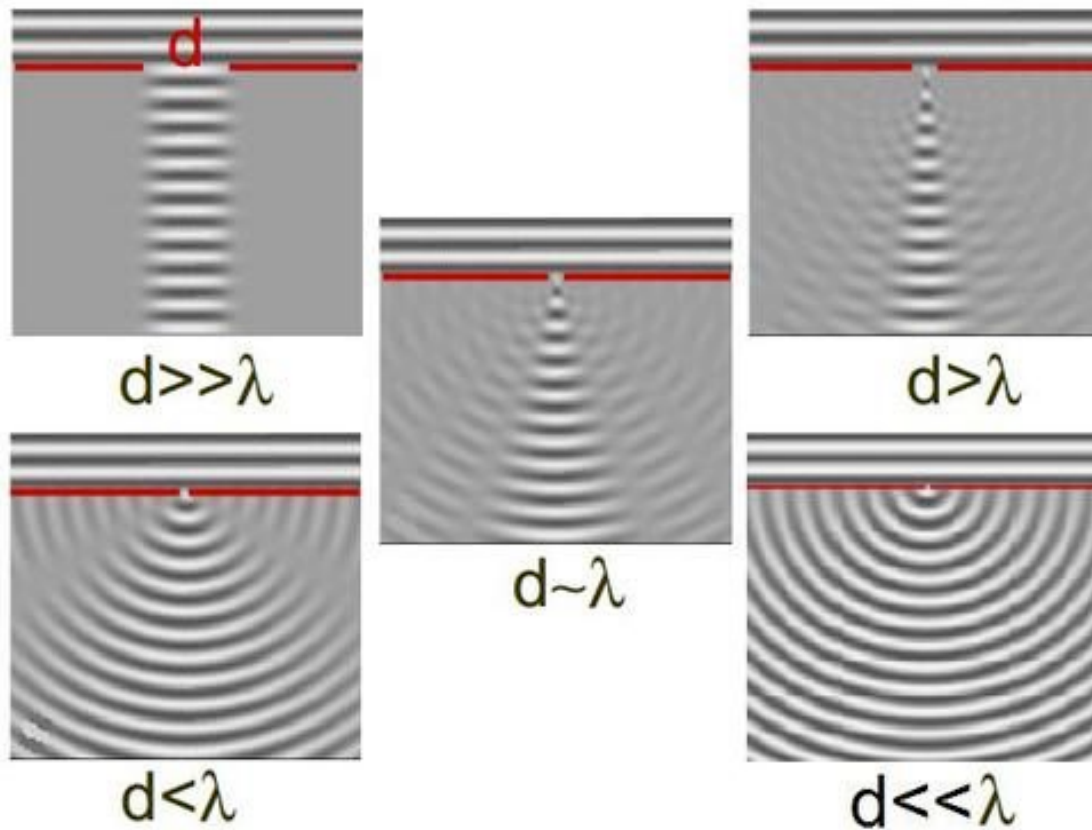
$$\xrightarrow{\text{poichè } v_2 < v_1} \text{sen } r < \text{sen } i \Rightarrow r < i$$

Diffrazione

Se un'onda piana incide su uno schermo dotato di un foro di dimensioni paragonabili alla sua lunghezza d'onda, l'onda che emerge al di là del foro assume una forma sferica, come se fosse prodotta da una sorgente puntiforme posta nell'apertura stessa (l'onda aggira l'ostacolo). Questo fenomeno è detto *diffrazione*.



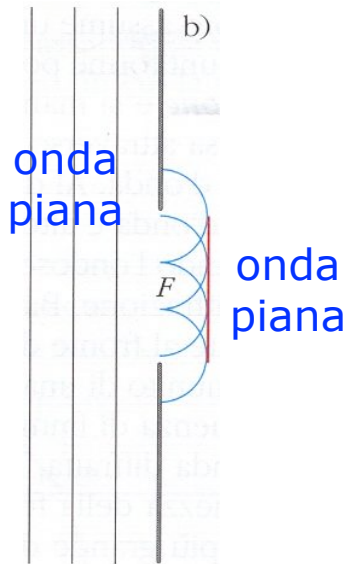
Il fenomeno della diffrazione si manifesta ogni volta che un'onda incontra un ostacolo o passa attraverso un foro di dimensioni non troppo diverse dalla lunghezza d'onda. Al di là dell'ostacolo o del foro la forma geometrica del fronte d'onda è alterata.



Anche il fenomeno della diffrazione è correttamente descritto dal principio di Huygens.



Se il foro fosse puntiforme (o larghezza confrontabile con la lunghezza d'onda), il fronte d'onda al di là dello schermo sarebbe sferico in quanto F , per il principio di Huygens, diventerebbe centro di emissione di un'onda sferica secondaria.



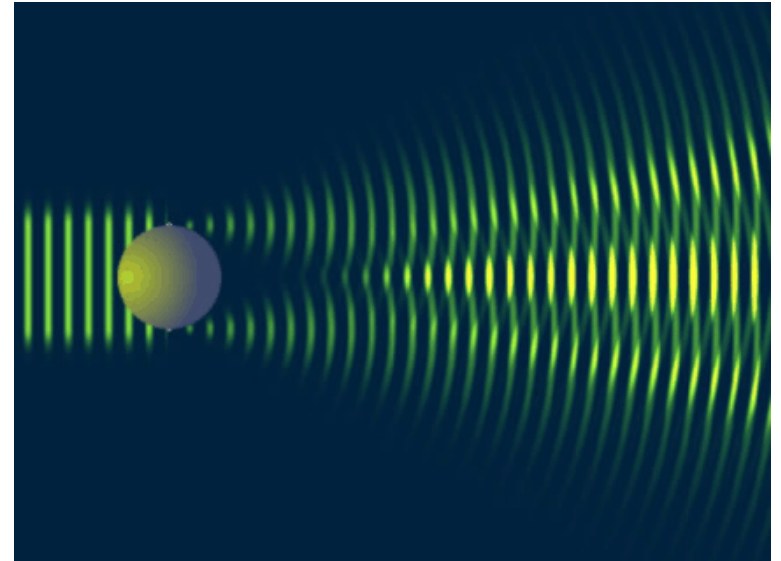
Se la larghezza di F è grande rispetto alla lunghezza d'onda, il fronte d'onda oltre lo schermo, dato dall'involuppo dei fronti d'onda secondari emessi dai punti di F , è piano e il fenomeno della diffrazione diventa trascurabile.

Esempi diffrazione

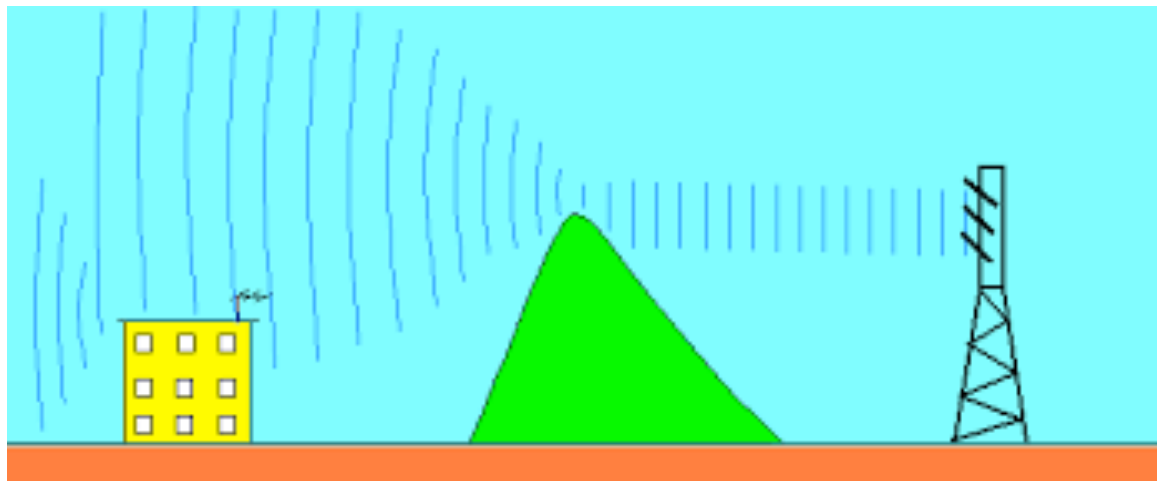
onde marine



ostacolo



onde e.m.



I fenomeni ondulatori della riflessione, rifrazione e diffrazione, saranno approfonditi nel modulo riguardante la luce.