



Claudio Bonechi (clavicordo)

Cosa sono le onde - 1/3

9 February 2025

Indice

- [1 Premessa](#)
- [2 Introduzione](#)
 - [2.1 I due tipi di onda](#)
- [3 Onde meccaniche](#)
 - [3.1 Origine dell'elasticità](#)
 - [3.2 Propagazione delle onde meccaniche](#)
 - [3.3 Propagazione delle onde e loro tipologie](#)
 - [3.4 Velocità di propagazione delle onde meccaniche](#)
 - [3.5 Propagazione e proprietà del mezzo](#)
 - [3.6 Analogie tra Onde meccaniche e Onde EM](#)
 - [3.7 Pendolo](#)
- [4 Fine della prima parte](#)

Premessa

Le onde sono un fenomeno familiare; basti pensare a quelle che si formano sull'acqua. Ma la mente di noi elettrici corre alle onde elettromagnetiche e alle oscillazioni della corrente alternata (benché le oscillazioni non siano propriamente onde).

Tuttavia, comprendere a fondo la fisica dei fenomeni ondulatori non è affatto semplice: questo campo abbraccia discipline vastissime, dalla fisica quantistica in su, rendendo impossibile trattarlo nella sua interezza.

Ho raccolto questi appunti cercando di soffermarmi sugli aspetti che mi sono sembrati più rilevanti, se non fondamentali. Inevitabilmente, molti argomenti sono stati tralasciati, sia per ragioni di sintesi, sia per i limiti delle mie competenze. Anche se quanto ho scritto non dovesse risultare utile a nessuno, per me sarà stato comunque un valido esercizio mentale.

Per maggiore chiarezza espositiva, ho voluto usare sempre il simbolo * per indicare la moltiplicazione: mi scuso per la perdita di leggerezza grafica che ne risulta.

Questa prima parte contiene generalità sulle onde.

Nella seconda parte vengono esaminati:

- 1-Equazione delle onde
- 2-Aspetti energetici delle onde
- 3-Un esempio pratico di calcolo

Nella terza parte saranno presenti:

1. 1-Aspetti della propagazione delle onde
2. 2-Alcuni elementi di acustica
3. 3-Analogie

Introduzione

Per cominciare ci si può chiedere da dove viene il termine “**onda**”. L’origine del nome italiano, è latina: “*unda*” indicava anche “acqua in movimento”, a sua volta riconducibile alla radice indoeuropea (*s*)*undh*, che significa "muoversi" o "agitarsi", ed è collegata al concetto di movimento fluido. Nel vocabolario Treccani troviamo 7 significati diversi, riferiti a vari campi del sapere; noi scegliamo quello scientifico:

“Nel linguaggio scientifico, con riferimento a un determinato mezzo fisico (l’acqua, l’aria, ecc.) o al vuoto, indica l’andamento generalmente periodico, più o meno regolare, col quale una perturbazione determinatasi in un punto del mezzo si propaga nello spazio ad esso circostante; e anche la perturbazione medesima (correntemente, è sinonimo di oscillazione, ma questo termine designa propriamente fenomeni locali, mentre l’onda viaggia nello spazio)”.

Dunque, a differenza di un semplice movimento oscillatorio di un pendolo che ondeggia ma non si sposta peronde, il concetto di onda fisica implica immediatamente anche la **propagazione** nello spazio. Le onde, infatti, trasportano **energia**, sia che si tratti di **onde progressive** che si spostano in una sola direzione, sia di **onde stazionarie** che si manifestano in uno spazio definito: le prime trasportano energia, mentre le seconde la conservano localmente. L’**onda più semplice**, quella in cui la grandezza di interesse oscilla tra due valori estremi stabili (massimo e minimo) è rappresentata con una **sinusoide**.

[Onda sinusoidale in funzione dello spazio](#)

Onda sinusoidale in funzione dello spazio

[Onda sinusoidale in funzione del tempo](#)

Onda sinusoidale in funzione del tempo

Cosa rappresentano gli assi cartesiani?

L'asse **orizzontale** può rappresentare lo **spazio** in cui si muove l'onda o il **tempo**, mentre l'asse **verticale** rappresenta la **grandezza fisica che varia** (in funzione dello spazio o del tempo). Questa può essere l'intensità, lo spostamento (*displacement*) di **una** particella di materia, la pressione in **un** punto, la velocità di una particella in **un** punto, o un'altra grandezza, purché riferita sempre a **un solo punto** dello spazio o a **un solo istante di tempo**. (Vedremo in seguito la definizione di "particella").

Se l'asse orizzontale rappresenta lo **spazio**, la figura rappresenterà un fermo immagine in un'istante di **tempo**.

Se l'asse orizzontale rappresenta il **tempo**, la figura rappresenterà un fermo immagine di un punto fisso dello **spazio**.

L'onda **progressiva** più semplice è funzione **sinusoidale** sia del tempo che dello spazio. La figura sottostante rappresenta l'onda in due istanti successivi, a cui corrispondono anche due punti diversi nello spazio posti lungo una semiretta che ha origine nella sorgente di energia ondosa e che definisce la direzione di propagazione (l'asse orizzontale rappresenta lo spazio).

[Onda progressiva in funzione dello spazio in due istanti di tempo diversi](#)

Onda progressiva in funzione dello spazio in due istanti di tempo diversi

Poiché per descrivere matematicamente le onde si usano le **funzioni sinusoidali**, il cui argomento è un angolo, occorre trasformare in **angolo** sia il **tempo** che lo **spazio lineare**: lo si fa tramite il concetto di velocità angolare " ω " per il tempo, mentre per lo spazio si usa il "numero d'onda k " che coinvolge la "lunghezza d'onda" indicata con " λ ", come vedremo meglio in seguito.

Essendo l'onda funzione di due variabili, spazio e tempo, è possibile anche una rappresentazione tridimensionale, sebbene più complessa da visualizzare come la figura sottostante.

[Onda progressiva 3D](#)

Onda progressiva 3D

I due tipi di onda

Le **onde meccaniche** si propagano in un mezzo materiale (gassoso, liquido o solido) e comportano il movimento di una **massa** (ad esempio un certo volume di gas), che avviene a una certa **velocità**. Poiché l'energia cinetica è proporzionale alla massa e al quadrato della velocità, o più precisamente al loro prodotto; ne segue che all'**onda** è associata una certa **energia** che viene appunto **propagata**.

Le **onde elettromagnetiche** (onde EM) invece si propagano **anche nel vuoto**. Le cariche elettriche generano il campo elettrico, mentre il loro movimento crea il campo magnetico. L'energia elettromagnetica è proporzionale al prodotto dei due campi, entrambi vettoriali (da cui i caratteri in grassetto). Poiché nella propagazione EM il valore del campo induzione magnetica **B** è uguale a quello del campo elettrico **E** diviso per la velocità "della luce nel vuoto" c , ($B=E/c$), l'energia contenuta in un certo volume di spazio **vuoto** attraversato da un'onda sinusoidale EM è proporzionale al **quadrato dell'ampiezza** del campo elettrico (**E^2**). La velocità c della luce nel vuoto rappresenta il limite massimo con cui può avvenire il trasferimento di energia. In mezzi diversi dal vuoto la velocità di propagazione si abbassa, secondo i valori della permeabilità magnetica e della permittività elettrica.

Per non complicarci troppo la vita, ci limitiamo a considerare **mezzi di propagazione "isotropi"**, ossia quelli in cui i parametri descrittivi, come densità, permeabilità, comprimibilità, etc., restano invariati in tutte le direzioni. Nei gas (salvo eccezioni) e nella maggior parte dei liquidi questo è generalmente vero, mentre nei solidi, in particolare quelli cristallini, l'isotropia non è garantita. Ad esempio, il **legno** è un materiale **anisotropo**, e questa caratteristica ha un ruolo fondamentale in acustica e nella costruzione degli strumenti musicali.

Infine, ci limiteremo a considerare onde meccaniche ed elettromagnetiche, tralasciando altre tipologie, come le onde gravitazionali (perturbazioni dello spazio-tempo), le onde di calore e altre classi di fenomeni ondulatori più specifici.

In realtà, il mio interesse si concentra soprattutto sulle onde meccaniche... forse perché sono alla base della musica?

Onde meccaniche

È il tipo di onde che vediamo al mare e che ci appaiono subito molto complicate: sono numerose e, solo in particolari condizioni, possiamo riconoscere schemi ondulatori semplici, come nel caso delle increspature generate da un sasso lanciato in uno stagno o dal passaggio di una piccola barca in un mare perfettamente calmo.

[Onde nel mare](#)

Onde nel mare

D'altra parte, siamo costantemente circondati da onde invisibili ma onnipresenti: le onde sonore. Queste sono oscillazioni della pressione dell'aria, originate da movimenti oscillatori o rotatori di corpi presenti nell'ambiente circostante o da altri fenomeni fisici, che si comportano come sorgenti di suono.

L'elasticità e il ruolo nelle onde meccaniche

La proprietà fondamentale che governa i fenomeni oscillatori meccanici è l'**elasticità**. Le onde meccaniche, infatti, comportano la deformazione di un mezzo materiale, e la capacità del mezzo di opporsi o di ripristinare tali deformazioni è determinata proprio dalla sua elasticità. Sebbene questa sia la principale responsabile della propagazione delle onde, non è l'unica proprietà coinvolta. Anche la **densità** (rapporto tra massa e volume) gioca un **ruolo chiave**, insieme a fattori come rigidità, viscosità e temperatura, che qui non approfondiremo.

[elasticità.jpeg](#)

elasticità.jpeg

Dal punto di vista fisico, l'elasticità di un materiale dipende dalle interazioni microscopiche tra le particelle che lo compongono, in particolare dalla natura e dalla configurazione delle forze intermolecolari o interatomiche.

- Nei **solidi** gli atomi o le molecole sono disposti in configurazioni stabili, come reticoli cristallini o strutture amorfe. Quando il materiale viene deformato (es. compresso, stirato o piegato), le posizioni relative degli atomi cambiano, causando variazioni nelle forze di legame. Queste forze agiscono come microscopiche molle, opponendosi alla deformazione e tendendo a riportare il materiale alla sua configurazione iniziale.
- Nei **fluidi** (cioè **liquidi** e **gas**) l'elasticità è legata alla resistenza alla **compressione**. Le molecole, libere di muoversi, subiscono comunque forze attrattive e repulsive che contrastano la compressione del volume. Una differenza fondamentale tra liquidi e gas è proprio la resistenza alla compressione, che nei gas è molto inferiore rispetto ai liquidi. A prima vista, i liquidi sembrano incompressibili, ma se lo fossero del tutto, non potrebbero supportare la propagazione delle onde.

Misurare l'elasticità: il modulo di comprimibilità

L'elasticità si misura attraverso il **modulo di comprimibilità** (o compressibilità) **K**, definito come l'incremento di pressione necessario a causare una variazione relativa di densità. Esso ha le dimensioni di una **pressione** ed è espresso in **Pascal (Pa)**, laddove $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Se si vuole misurare la pressione in atmosfere (atm), bisogna considerare che $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$ (circa 10^5 Pa).

Ad esempio, il **K dell'acqua** è circa $2,2 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ o 2,2 GigaPascal (GPa). Ciò significa che per comprimere l'acqua dell'1% del suo volume, è necessario applicare una pressione di circa 22 MPa (circa 220 atm). Questo valore indica che l'acqua è estremamente resistente alla compressione, tanto da essere considerata **quasi incompressibile** nella pratica.

Nei **solidi**, il modulo di comprimibilità assume denominazioni diverse a seconda del tipo di deformazione:

- **Modulo di Young**: misura la resistenza alla compressione lineare ed è definito come il rapporto tra la **forza perpendicolare** applicata su una sezione e la densità lineare dell'allungamento risultante.
- **Modulo di taglio**: descrive la resistenza a una forza applicata tangenzialmente alla superficie del materiale, detta anche **forza tangenziale**.

Si possono definire altri moduli di elasticità a seconda delle condizioni specifiche del materiale.

Dai dati sperimentali, emerge che il rapporto tra il modulo di comprimibilità dell'acqua e quello dell'aria è di circa 20.000:1, mentre il rapporto tra quello del diamante e dell'acqua è di circa 200:1.

[Tab K](#)

Tab K

Elasticità e propagazione delle onde sonore L'elasticità dell'acqua permette la propagazione delle onde sonore, motivo per cui possiamo percepire i suoni anche sott'acqua. Un esempio pratico di questo principio è il **Sonar** (Sound Navigation and Ranging), una tecnologia che sfrutta le onde sonore per navigare, misurare distanze e rilevare oggetti sommersi. Il suo funzionamento è analogo a quello del **Radar** (Radio Detection and Ranging), che utilizza invece le onde EM per rilevamenti nello spazio.

Origine dell'elasticità

L'elasticità di un materiale dipende dalle forze interne che ne determinano la capacità di resistere e reagire alle deformazioni.

- Nei **solidi** l'elasticità è dovuta alle forze di coesione tra atomi o molecole, che tendono a mantenere la struttura compatta e a contrastare le forze esterne; quando un solido viene deformato, le distanze tra gli atomi cambiano temporaneamente, ma le forze di legame cercano di riportare il materiale alla configurazione iniziale, come una molla che si contrae e si espande. In particolare, se viene applicata una forza, le particelle si spostano leggermente dalla loro posizione di equilibrio, ma la forza attrattiva tra di esse le spinge a ritornare alla configurazione originaria una volta rimossa la perturbazione.
- Nei **solidi cristallini** gli atomi sono disposti in un reticolo regolare. La forma e la simmetria del reticolo influenzano la capacità di deformazione elastica del materiale.
- Nei **materiali amorfi** (come il vetro) la disposizione disordinata delle particelle conferisce proprietà elastiche differenti rispetto ai cristalli.

- Nei **fluidi** (liquidi e gas) l'elasticità è associata alla resistenza alla compressione (descritta dal modulo di comprimibilità). Poiché le molecole nei fluidi sono libere di muoversi, non oppongono resistenza a forze di taglio, ma reagiscono a variazioni di pressione.
- Nei **polimeri**, l'elasticità dipende dalla configurazione delle catene molecolari, che possono allungarsi e poi ritornare alla loro forma originale grazie alla loro struttura flessibile.

A livello atomico, la deformazione di un materiale modifica le densità elettroniche e le distanze tra gli atomi, alterando l'energia totale del sistema. La forza elastica che si oppone alla deformazione è il risultato diretto di queste variazioni.

Propagazione delle onde meccaniche

L'elasticità di un mezzo materiale consente la propagazione delle onde meccaniche. Ciò significa che quando un materiale subisce una perturbazione locale – come una compressione, uno stiramento o uno spostamento – **l'energia** fornita si trasmette **da una zona all'altra**, rispettando il principio di conservazione dell'energia. In altre parole, l'energia da **locale** diventa **estesa**, ovvero da inizialmente confinata in un punto si distribuisce progressivamente nel mezzo.

Applicando una forza in un punto di un mezzo elastico, si genera una deformazione locale:

- **Nei solidi**, la perturbazione modifica la posizione degli atomi rispetto alla loro configurazione di equilibrio.
- **Nei fluidi**, provoca variazioni locali di pressione e densità.

L'elasticità del mezzo crea un'energia potenziale che fornisce la forza di ripristino:

- Gli atomi o le molecole circostanti oppongono resistenza alla deformazione a causa delle forze di legame intermolecolari o interatomiche.
- La forza di ripristino tende a riportare il sistema alla sua configurazione iniziale, ma nel farlo, sposta le particelle adiacenti, propagando così l'onda.

Poiché parliamo di mezzi isotropi, nella maggior parte dei casi le onde emesse da una sorgente puntiforme sono **onde sferiche**, ossia i fronti d'onda sono superfici sferiche concentriche che si espandono da una sorgente puntiforme. La forma sferica è dovuta alla simmetria della propagazione in tutte le direzioni dello spazio. Se il raggio della sfera considerata è abbastanza grande, una porzione di onda può essere assimilata a un'**onda piana**. Se la sorgente non è puntiforme, la forma dei fronti d'onda può essere piana, cilindrica o di altra forma.

Onde e particelle del mezzo

Sebbene sia più intuitivo immaginare le onde come fronti d'onda in movimento nello spazio, nella descrizione delle onde meccaniche si adotta il concetto di **particelle del mezzo materiale**, analizzando il comportamento di una singola particella. Questo approccio permette di comprendere e descrivere anche l'evoluzione del fronte d'onda.

Il termine "particella" qui non si riferisce a entità subatomiche. Con "**mezzo**" si intende l'insieme delle unità microscopiche che compongono la sostanza in cui l'onda si propaga.

- **Nei fluidi** (gas e liquidi), le particelle del mezzo sono **atomi** o **molecole** libere.
- **Nei solidi cristallini o amorfi**, le particelle sono **atomi** o **ioni** legati da interazioni di coesione.

L'onda si propaga trasferendo energia da particella a particella attraverso forze elastiche (nei solidi e nei liquidi) o variazioni di pressione (nei gas). Tuttavia, le particelle del mezzo **non** viaggiano con l'onda, ma oscillano attorno a una **posizione di equilibrio fissa** nel tempo.

Propagazione delle onde e loro tipologie

Onde meccaniche

Quando una perturbazione, ovvero un'energia fornita al mezzo, si propaga, le particelle del mezzo rispondono alla forza di ripristino esercitando a loro volta forze sulle particelle vicine. Questo processo genera due principali tipi di onde, a seconda delle proprietà del mezzo materiale:

- **Onde longitudinali:** le particelle oscillano nella stessa direzione della propagazione dell'onda, alternando zone di compressione e rarefazione. Questo tipo di onda si verifica in gas, liquidi e solidi.

[Onda longitudinale](#)

Onda longitudinale

- **Onde trasversali:** le particelle oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione, rispondendo a forze di taglio. Questo fenomeno avviene solo nei solidi, poiché i fluidi non oppongono resistenza alle forze di taglio.

[Onda trasversale](#)

Onda trasversale

Onde meccaniche superficiali: un caso particolare

Un esempio comune di onde meccaniche è quello delle onde che si formano alla superficie di uno **stagno** quando vi gettiamo un **sasso**. A prima vista, queste onde

appaiono **trasversali**, ma in realtà il moto delle particelle d'acqua non è puramente trasversale né puramente longitudinale, bensì ellittico.

[Sasso-nello-stagno](#)

Sasso-nello-stagno

Le onde che osserviamo sulla superficie dei liquidi sono chiamate onde superficiali e risultano da una combinazione di oscillazioni longitudinali e trasversali. Queste onde sono particolarmente complesse da studiare, poiché dipendono dalle proprietà elastiche del mezzo e dalle condizioni al contorno. Tuttavia, all'interno del liquido, la propagazione dell'energia avviene in modo prevalentemente longitudinale

Nonostante siano le onde più facilmente osservabili, le onde superficiali sono tra le più complesse esistenti in natura e il loro studio richiede modelli avanzati, che esulano dallo scopo di questo articolo.

Alcuni esempi di onde meccaniche includono:

- **Onde sonore nell'aria:** le variazioni di pressione, dovute alla compressione e rarefazione del mezzo, si propagano sotto forma di onde longitudinali sferiche. La propagazione del suono dipende dalla resistenza elastica del gas alla compressione.
- **Onde in una corda tesa:** la tensione elastica delle corde permette la propagazione di onde trasversali lungo il materiale.
- **Onde sismiche:** nella crosta terrestre si propagano sia onde longitudinali (onde P), dovute alla compressione e alla dilatazione del materiale, sia onde trasversali (onde S), che si muovono perpendicolarmente alla direzione di propagazione e sono possibili solo grazie alla rigidità elastica della crosta terrestre.

Onde EM

Le onde **EM** sono **esclusivamente trasversali**. I vettori campo magnetico $\mathbf{H} = (1/\mu) * \mathbf{B}$ e campo elettrico $\mathbf{E}$ sono tra loro perpendicolari, ed entrambi sono anche perpendicolari alla direzione di propagazione.

[Onde EM](#)

Onde EM

Linearità

Nella maggior parte dei casi le onde possono essere trattate, come **fenomeni lineari**, almeno entro certi limiti. Questo significa che possono essere studiate con una certa facilità applicando il **principio di sovrapposizione**, secondo il quale l'effetto combinato

di più onde è dato dalla semplice somma delle singole onde, senza che si verifichino interazioni non lineari significative.

In termini pratici, ciò implica che l'onda risultante mantiene una proporzionalità con le onde individuali, senza distorsione o modulazioni non lineari. Questo principio semplifica notevolmente l'analisi delle onde in sistemi anche complessi, attraverso l'uso della **Trasformata di Fourier** (sulla quale non mi soffermo).

Tuttavia esistono **limiti quantitativi** oltre ai quali la **linearità** non è più **valida** e bisogna ricorrere a **modelli non lineari**, molto più complessi da trattare

In **acustica**, ad esempio, certi **fenomeni non lineari** che riguardano la vibrazione di vari materiali presenti nell'ambiente sono spesso responsabili di **distorsioni** del suono, non sempre facili da considerare e da analizzare.

Un fenomeno basato sulla sovrapposizione: i battimenti

Un'applicazione interessante del principio di sovrapposizione è il fenomeno dei **battimenti**, che si verifica quando due onde sinusoidali di frequenze leggermente diverse si sovrappongono.

Il risultato è una **variazione periodica dell'ampiezza** dell'onda risultante, percepita in acustica come un suono di ampiezza pulsante o, in altri contesti, come un'oscillazione di intensità.

[Battimenti](#)

Battimenti

Per chi ha familiarità con le telecomunicazioni, i battimenti possono essere considerati un caso particolare di **modulazione di ampiezza**: la variazione dell'ampiezza è determinata dalla differenza tra le frequenze delle due onde sovrapposte.

Velocità di propagazione delle onde meccaniche

La **velocità di propagazione** di un'onda, indipendentemente dalla sua natura, è definita come la **velocità con cui la perturbazione** (non la materia, ribadisco) si sposta **attraverso il mezzo**. In altre parole, corrisponde alla velocità con cui i **fronti dell'onda** avanzano nel mezzo lungo la direzione di propagazione, sia per l'onda **longitudinale** sia per quella **trasversale**.

Per descrivere matematicamente semplice un'onda nel modo più semplice, si considera lo **spostamento di una particella** idealizzata come un **“punto materiale”**: Tuttavia, se le dimensioni della particella (atomo o molecola) sono comparabili con la lunghezza

dell'onda, tale semplificazione non è più valida; ma questo caso esula dalla presente trattazione.

Lo **spostamento** del punto materiale è indicato solitamente con u e rappresenta una funzione di due variabili: la posizione nello spazio x e il tempo t .

Questa funzione permette di descrivere con precisione l'evoluzione della perturbazione nel tempo e nello spazio.

$$u = u(x, t)$$

La velocità è il rapporto tra spostamento e tempo, o più precisamente la derivata dello spostamento rispetto al tempo. Lo stesso è per una particella:

$$v_{particella} = \partial u / \partial t$$

dove il segno ∂ sta per “differenziale parziale”, perché la funzione u è di due variabili. Questa velocità varia nel tempo:

- È zero nei punti in cui la particella raggiunge un massimo o a un minimo dell'oscillazione (i punti in cui il moto si inverte).
- Raggiunge invece il valore massimo quando la particella attraversa la posizione di equilibrio, dove lo spostamento è nullo (ma la velocità è massima).

L'onda che si propaga **non** è necessariamente **periodica**: per esempio se imprimiamo un **impulso "positivo"** (cioè una perturbazione che rapidamente sale e scende tornando al livello iniziale) in un punto S a una corda fissata a un estremo, si genera un'onda **isolata**, tipicamente a forma di campana.

Questa perturbazione si propaga lungo la corda senza ripetersi periodicamente, a differenza di un'onda sinusoidale continua. L'energia dell'impulso si trasmette attraverso il mezzo, spostando localmente le particelle della corda, che successivamente tornano alla loro posizione di equilibrio per effetto della forza elastica.

Se la corda è perfettamente elastica e non presenta dissipazione, l'impulso manterrà la sua forma mentre viaggia lungo il mezzo. Tuttavia, in presenza di dispersione o attrito, la sua ampiezza potrebbe diminuire e la forma potrebbe cambiare nel tempo.

Consideriamo una generica perturbazione $y=y(x, t)$ dal profilo iniziale $y(x)$ come in figura, che ha un massimo all'istante $t=0$ che presenta un massimo in una certa posizione x_0 . Il ragionamento che segue è valido per qualunque forma di profilo d'onda.

[Perturbazione iniziale in una corda](#)

Perturbazione iniziale in una corda

Supponendo che la perturbazione si sposti nel verso positivo dell'asse x senza modificare la sua forma, significa che ogni punto dell'onda si sposta rigidamente con una certa velocità v . Da ciò segue che, dopo un intervallo di tempo t successivo a $t=0$, il massimo in x_0 si troverà in una nuova posizione $x=x_0+v*t$. La perturbazione si muove con velocità v nel tempo e quindi $u(x,t)$ risulta traslata nell'asse x della quantità $v*t$ e cioè $u(x,t) = u(x-v*t)$

[Spostamento della perturbazione iniziale in una corda](#)

Spostamento della perturbazione iniziale in una corda

La grandezza v è chiamata "velocità di propagazione".

Da questo punto in avanti, per semplicità ci concentreremo solo sulle **onde periodiche**.

Un'onda periodica è una perturbazione che si ripete identica a sé stessa a intervalli regolari di spazio e tempo.

La forma matematica più semplice per descrivere un'onda periodica è un'onda sinusoidale, espressa come:

$$u(x,t) = A * \cos(k*x - \omega * t).$$

Immaginiamo un'onda trasversale su una corda descritta dalla funzione sinusoidale soprastante.

[onda sinusoidale](#)

onda sinusoidale

In questa equazione, A è l'ampiezza massima dello spostamento, mentre $k=2*\pi/\lambda$ è il cosiddetto "numero d'onda" che rappresenta la "**periodicità spaziale**", ossia il numero di oscillazioni dell'onda per unità di lunghezza, mentre λ è la "lunghezza d'onda" (*wavelength*) o "periodo spaziale". Analogamente la velocità angolare (o "pulsazione") $\omega = 2*\pi/T = 2*\pi*f$ definisce la **periodicità temporale**, dove T è il "periodo temporale" dell'onda.

L'argomento della funzione coseno, ovvero l'**angolo** $\Phi=k*x-\omega*t$ è detto "**fase**" (o "angolo di fase") e rappresenta la posizione istantanea dell'onda nello spazio e nel tempo.

Per capire come l'onda si muove, imponiamo che un punto particolare dell'onda si sposti senza cambiare la sua fase. Per determinare la velocità con cui un punto specifico

dell'onda si muove senza cambiare fase (ad esempio, una cresta o un nodo), imponiamo che la fase rimanga costante nel tempo:

$$\Phi = k \cdot x - \omega \cdot t = \text{costante}.$$

Deriviamo rispetto al tempo

$$\partial \Phi / \partial t = k \cdot \partial x / \partial t - \omega = 0$$

Poiché la velocità di propagazione dell'onda è la velocità con cui un punto a fase costante si sposta nello spazio, cioè $v = \partial x / \partial t$ otteniamo:

$$k \cdot v - \omega = 0 \text{ e cioè } v = \omega / k \text{ oppure } v = \lambda \cdot f$$

Dunque:

La **velocità di propagazione** dell'onda è:

$$v = \partial x / \partial t = \lambda \cdot f.$$

La **velocità della particella** è:

$$v_{\text{particella}} = \partial u / \partial t = A \cdot \omega \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t).$$

Da questa espressione si nota che la **velocità** della particella (ossia la velocità con cui essa oscilla attorno alla posizione di equilibrio):

- è **massima** nei punti di equilibrio (attraversamento del valore medio), dove il seno vale +/- 1
- è **nulla** nei punti di massimo e minimo dello spostamento, dove il seno vale 0.

Propagazione e proprietà del mezzo

Il **fronte d'onda** si muove con velocità $v = \partial x / \partial t$, mentre le particelle del mezzo oscillano intorno alla loro posizione di equilibrio con velocità $v_{\text{particelle}} = \partial u / \partial t$ senza essere trasportate dall'onda. L'onda trasmette **energia** e **informazione**, ma **non materia**. Se il mezzo è omogeneo, la **velocità di propagazione** rimane **costante**.

La **velocità di propagazione** di un'onda meccanica dipende dalle **proprietà fisiche** del mezzo in cui si propaga. In particolare, essa è influenzata da:

- **Densità** del mezzo ρ : una maggiore densità implica una maggiore inerzia delle particelle, rallentando la propagazione dell'onda.

- **Elasticità** del mezzo, espressa dal modulo di comprimibilità K nei fluidi o da altre costanti elastiche nei solidi. Un mezzo più rigido (con K maggiore) consente all'onda di propagarsi più velocemente.

Nei fluidi, la velocità dell'onda è data dalla relazione: $v = \sqrt{K/\rho}$ dove:

- **K** rappresenta la resistenza alla deformazione del materiale (maggiore K , maggiore la velocità).
- **ρ** rappresenta la massa per unità di volume (o "massa volumica") del materiale (maggiore ρ , minore la velocità).

Entrambi questi parametri dipendono dalla **temperatura**.

Ad esempio:

La velocità del suono nell'aria è di 331,2 m/s a 0 °C, mentre aumenta a 343,4 m/s a 20 °C. Nell'acqua (a 20 °C) la velocità del suono è molto più alta, circa 1485 m/s, grazie alla maggiore rigidità del liquido rispetto all'aria.

Velocità delle onde elettromagnetiche

La velocità v delle onde elettromagnetiche è influenzata dalle proprietà elettromagnetiche del mezzo attraverso cui si propagano, in particolare dalla permittività ϵ e dalla permeabilità μ . Vale la seguente relazione: $v = 1/\sqrt{\epsilon \cdot \mu}$.

Analogie tra Onde meccaniche e Onde EM

Possiamo ora tracciare un'analogia tra le grandezze che descrivono le onde meccaniche e quelle elettromagnetiche. Sebbene i fenomeni siano molto diversi, entrambe le onde trasportano energia e coinvolgono proprietà del mezzo (per le onde meccaniche) o dello spazio (per le onde elettromagnetiche).

- La **permittività** ϵ svolge un ruolo simile a quello del modulo di elasticità K nelle onde elastiche, descrivendo la "resilienza" del mezzo al campo elettrico. Essa determina quanto il campo elettrico può deformare il materiale.
- La **permeabilità** μ ha una funzione analoga a quella della densità ρ nelle onde elastiche, descrivendo l'"inerzia elettromagnetica" che il campo magnetico deve superare. Essa misura la capacità del materiale di rispondere a un campo magnetico.

In entrambi i casi, sia nelle onde elastiche che in quelle elettromagnetiche, la **resilienza** rappresenta la proprietà del materiale di immagazzinare **energia** temporaneamente durante la propagazione dell'onda e di rilasciarla in modo oscillatorio. In generale, il termine "resilienza" si riferisce alla capacità di recupero di un sistema.

Proseguiamo con i confronti.

1. Campo elettrico (**E**) e spostamento elastico (**u**)

- **Campo Elettrico (E):** Nelle onde elettromagnetiche, il campo elettrico rappresenta la componente vettoriale che oscilla trasversalmente rispetto alla direzione di propagazione dell'onda. Questo campo è responsabile dell'interazione elettrica e determina la forza esercitata su cariche elettriche nel campo.
- **Spostamento Elastico (u):** Nelle onde elastiche, u rappresenta lo spostamento delle particelle del mezzo rispetto alla loro posizione di equilibrio. Anche questo è un vettore e, per le onde trasversali, oscilla perpendicolarmente alla direzione di propagazione, mentre nelle onde longitudinali oscilla nella stessa direzione della propagazione, come nel caso delle onde sonore.

Analogia:

$$\mathbf{E} \leftrightarrow \mathbf{u}$$

Sia il campo elettrico sia lo spostamento elastico descrivono lo "stato" del sistema nella propagazione dell'onda.

2. Campo magnetico (**H**) e Deformazione del mezzo ($\partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{x}$)

- **Campo magnetico (H):** nelle onde elettromagnetiche, il campo magnetico è un vettore che oscilla trasversalmente e perpendicolarmente al campo elettrico.
- **Deformazione elastica ($\partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{x}$):** nelle onde meccaniche, la variazione spaziale dello spostamento ($\partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{x}$) è analoga alla variazione spaziale del campo magnetico. Essa misura la deformazione locale del mezzo, che è legata alla tensione (stress) nel materiale.

Analogia:

$$\mathbf{H} \leftrightarrow \partial \mathbf{u} / \partial \mathbf{x}$$

Il campo magnetico e la deformazione rappresentano variazioni spaziali che completano la descrizione del comportamento ondulatorio.

Pendolo

L'oscillazione di un pendolo non è propriamente un'onda, ma ogni onda è una forma di oscillazione. Per questo motivo, possiamo ritrovare nel comportamento ondulatorio

alcune caratteristiche tipiche del moto di un pendolo semplice (massa sospesa a un filo inestensibile e di massa trascurabile, senza attriti).

[Pendolo semplice](#)

Pendolo semplice

Per un pendolo di lunghezza L , la velocità angolare dell'oscillazione è:

$\omega = \sqrt{g/L}$ dove g è l'accelerazione di gravità.

Analogamente, la velocità di propagazione di un'onda elastica è: $v = \sqrt{K/\rho}$ dove K è il modulo di elasticità del mezzo e ρ la sua densità.

Entrambe le relazioni presentano una **radice quadrata di un rapporto tra grandezze fisiche**, il che riflette una caratteristica comune ai sistemi dinamici governati dalle leggi della fisica.

Le radici quadrate compaiono frequentemente nei fenomeni oscillatori e ondulatori perché derivano dalle soluzioni delle equazioni differenziali che descrivono questi sistemi. In particolare, sia nel pendolo sia nelle onde elastiche, il moto è governato dalla competizione tra:

- Una **forza restauratrice**, che spinge il sistema verso la posizione di equilibrio (come la gravità nel pendolo o la tensione nella corda per le onde meccaniche).
- Una **proprietà inerziale**, che resiste al cambiamento dello stato di moto (la massa del pendolo o la densità del mezzo in cui si propaga l'onda).

Questa struttura è simile a quella dell'oscillatore armonico semplice, come nel caso di una molla con costante elastica k e una massa m . Anche qui, l'equazione del moto porta naturalmente a una dipendenza dalla radice quadrata.

L'energia cinetica E_k e quella potenziale E_p sono legate da leggi quadratiche:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad E_p = \frac{1}{2} k x^2$$

L'equazione del moto descrive un bilanciamento tra forze elastiche e inerzia, portando a una relazione quadratica tra le variabili del sistema.

Fine della prima parte

Estratto da "<https://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Clavicordo:prova>"