

UNITA' 4

ONDE MECCANICHE

Sono fenomeni fisici che si manifestano come perturbazioni che si propagano attraverso un mezzo materiale, trasportando energia senza il trasporto di materia. Necessitano di un mezzo fisico per propagarsi.

Possono essere suddivise a seconda della direzione in cui le particelle del mezzo di spostano rispetto alla direzione di propagazione dell'onda:

Trasversali: le particelle si muovono perpendicolarmente alla direzione di propagazione (onde elettromagnetiche)

Longitudinali: nella stessa direzione dell'onda (onde sonore)

La propagazione di un'onda è sostenuta dalle forze di interazione tra le particelle del mezzo, che trasferiscono l'energia da una particella all'altra. Sebbene la materia stessa non si sposti lungo tutta la direzione dell'onda, ogni particella oscilla attorno alla sua posizione di equilibrio.

Le **onde meccaniche** sono considerate anche come onde elastiche (movimento da forze elastiche). Si diffondono in vari tipi di mezzi e la loro velocità di propagazione dipende dalle proprietà fisiche del mezzo come densità e elasticità. In un mezzo più denso e rigido si propaga più velocemente, meno denso o più morbido la velocità diminuisce.

L'**oscillatore armonico** è uno dei modelli che descrive la generazione delle onde: è costituito da un corpo che oscilla attorno a una posizione di equilibrio sotto l'influenza di una forza di richiamo che è direttamente proporzionale allo spostamento dalla posizione di equilibrio e agisce nel verso opposto rispetto allo spostamento —> espressa dalla legge di Hooke: $F = -k \cdot x$

L'accelerazione risultante secondo il principio della dinamica: $a = -k/m \cdot x$

Questa forza e acc. Provocano un moto periodico e sinusoidale che è il moto armonico.

PROPAGAZIONE DELL'ONDA —> sinusoidale

Quando un corpo oscilla intorno ad un punto di equilibrio la perturbazione che si genera si propaga lungo il mezzo come un'onda. In un oscillatore armonico lineare il movimento di ogni punto del mezzo avviene in modo trasversale

FREQUENZA: numero di oscillazioni complete in un secondo, e l'inverso del periodo e si misura in Hertz. $f = 1/T$ se aumenta f il T diminuisce (invers. Proporz.)

PERIODO: il tempo necessario per compiere un'oscillazione completa, il tempo per tornare alla stessa posizione con lo stesso spostamento dopo aver fatto un'oscillazione completa. $T = 1/f$

PULSAZIONE: misura della velocità con cui il sistema oscilla, espressa in radianti per secondo e ci indica quanto velocemente avviene un ciclo completo di oscillazione in termini angolari. È legata alla frequenza d'onda, ma la pulsazione misura quante oscillazioni angolari si compiono in un secondo, cioè quante volte l'onda percorre un angolo di 2π radianti. FORMULA

LUNGHEZZA D'ONDA è la distanza tra due punti consecutivi successivi che si trovano nella stessa fase del movimento, come due creste (punti di massima altezza) o due valli (minima). Essere descritta anche come la distanza spaziale che un'onda percorre in un ciclo completo. La lunghezza d'onda è correlata alla velocità di propagazione dell'onda e alla frequenza f d'onda tramite la

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

La velocità di propagazione è la v con cui l'onda si muove nel mezzo. Dipende dalle proprietà del mezzo in cui si propaga, in un'onda meccanica: tensione, densità e elasticità

$$v = f \cdot \lambda$$

Per una v costante, se la f aumenta la lunghezza d'onda diminuisce

LA VELOCITÀ DELL'ONDA SU UNA CORDA tesa dipende dalla tensione e della sua massa per unità di lunghezza

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

Maggiore T maggiore v , maggiore densità e minore v

LA VELOCITA DELL'ONDA SONORA dipende dalla temperatura e dalle proprietà (densità)

$$v = \lambda \cdot p \rho$$

p = pressione

ρ = densità lineare della corda

LA VELOCITA DELL'ONDA IN UN FLUIDO sulla superficie dell'acqua la v dipende dalla profondità e lunghezza d'onda

$$v = g \cdot \lambda$$

AMPIEZZA è la massima distanza dalla posizione di equilibrio di un punto del mezzo, quanto questo punto si sposta durante l'oscillazione

L'ENERGIA trasporta dall'onda e direttamente proporzionale al quadrato dell'ampiezza

$$E \propto A^2$$

Le onde armoniche semplici rappresentano il comportamento delle meccaniche $\rightarrow$ funzione sinusoidale e possono essere descritte: $y(x,t) = A \cdot \cos(kx - \omega t + \varphi)$

$y(x,t)$ è la posizione di un'aparticella del mezzo in funzione della posizione x lungo la direzione di propagazione e del tempo

k è il numero d'onda, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

φ è la fase iniziale che determina la posizione iniziale della particella

Questa equazione descrive un'onda che oscilla regolarmente e che si propaga lungo il mezzo con velocità definita. La forma dell'onda è periodica e sinusoidale cioè si ripete in modo regolare

Un **onda armonica semplice** è caratterizzata da un movimento **periodico** e **sinusoidale** in cui le particelle del mezzo si spostano attorno alla loro posizione di equilibrio, l'onda si propaga trasportando energia attraverso il mezzo senza che le particelle si spostino permanentemente. Sono utilizzate per studiare fenomeni di interferenza, risonanza e trasporto di energia e per descrivere

-Onde sonore che si propagano attraverso l'aria le cui frequenze determinano il tono del suono

-Onde su una corda tesa dove ogni punto della corda oscilla perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda

IL VETTORE D'ONDA descrive la propagazione delle onde in particolare armoniche ed rappresenta una grandezza vettoriale che descrive la direzione e lunghezza d'onda indicando come l'onda si propaga attraverso lo spazio. La sua grandezza è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda e la sua direzione coincide con la direzione di propagazione dell'onda

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

La lunghezza del vettore d'onda è legata alla f .

Può essere scomposto nelle sue componenti lungo le direzioni degli assi x, y, z

La lunghezza del vettore:

$$|\vec{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Maggiore è la lunghezza d'onda, minore sarà la lunghezza del vettore d'onda

IL VETTORE D'ONDA IN UN ONDA PIANA che si propaga in una direzione definita

$$y(x,t) = A \cdot \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

k è il vettore d'onda che determina la direzione di propag.

x è la posizione del punto nello spazio

Il prodotto scalare tra $\vec{k} \cdot \vec{x}$ rappresenta il contributo spaziale del vettore d'onda determinando come si propaga nel tempo e nello spazio.

La direzione del vettore d'onda è la direzione lungo cui si propaga l'onda, e il suo modulo è invers. proporz. alla lunghezza d'onda.

È utilizzato nelle onde meccaniche e elettromagnetiche, sonore e di luce.

Le onde trasversali su una corda sono esempi classici di onde che si propagano lungo una sola direzione (monodimensionali) dove le particelle del mezzo oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda.

Le particelle della corda si spostano su e giù (in verticale) mentre l'onda in orizzontale lungo la corda: direzione di propagazione dell'onda è lungo la corda mentre la direzione di oscillazione delle particelle è perpendicolare a questa.

L'onda trasversale può essere descritta come un'onda armonica la cui legge oraria:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

INTERFERENZA: quando due onde si sovrappongono possono rinforzarsi o annullarsi a seconda della fase relativa tra le onde.

RIFLESSIONE: quando un'onda arriva a un punto di incidenza parte dell'onda può essere riflessa indietro lungo la corda.

RISONANZA: quando una corda è forzata a vibrare a una certa frequenza essa può risonare cioè oscillare con un A maggiore.

ONDE IN UN CONDOTTO ACUSTICO si propagano lungo una sola direzione.

Le onde sonore sono onde longitudinali che si propagano in un mezzo attraverso il movimento di compressione e rarefazione delle particelle del fluido. Quando un punto del fluido si comprime le particelle adiacenti vengono spostate creando una regione ad alta pressione, quando il punto si espande si forma una regione a bassa pressione.

La relazione tra v , densità e temperatura del fluido è analizzata attraverso l'impedenza acustica e la v del suono nel mezzo.

Quando le onde sonore si propagano in un condotto la loro v è influenzata dalla geometria del condotto. Se il condotto ha una sezione variabile, la v del flusso del fluido può variare. Secondo la

legge della continuità, la portata deve rimanere costante il che implica che se la sezione del condotto si riduce la v del fluido aumenta.

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2$$

|
-> sezioni trasversali

Applicazioni: sistemi di ventilazione, strumenti musicali a fiato e acustica nelle sale concerti.

LA SOVRAPPOSIZIONE LINEARE di onde armoniche descrive come 2 o più onde possono combinarsi per formare un'onda risultante. È alla base dell'interferenza e diffrazione ed è valido per onde che seguono il principio di sovrapposizione lineare.

Il principio di sovrapposizione afferma che quando 2 o più onde si incontrano nello stesso punto dello spazio, la dislocazione totale di un punto del mezzo è la somma delle dislocazioni dovute a ciascuna onda individuale. Le onde non si influenzano tra loro ma la loro somma è una combinazione lineare delle funzioni che le descrivono.

Nelle onde armoniche la dislocazione di un punto in funzione del tempo $y(x,t)$ è la somma delle dislocazioni dovute a ciascuna onda: $y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) \dots$

Le onde armoniche sono onde che descrivono funzioni sinusoidali e se si propagano nello stesso mezzo con f , fasi diverse la loro somma può essere una funzione sinusoidale.

$$y(x,t) = A_1 \cos(kx - \omega t + \varphi_1) + A_2 \cos(kx - \omega t + \varphi_2)$$

Se sommiamo i coseni:

$$y(x,t) = A_{\text{totale}} \cos(kx - \omega t + \varphi_{\text{totale}})$$

L'INTERFERENZA DELLE ONDE MECCANICHE è un fenomeno che si verifica quando due o più onde che si propagano attraverso un mezzo si sovrappongono, influenzandosi (musica, acustica).

Quando due o più onde meccaniche si incontrano in un punto nello spazio la loro

sovrapposizione può produrre una nuova onda che a seconda della fase relativa tra le onde l'interferenza può essere costruttiva, distruttiva o una combinazione di entrambi.

Costruttiva: le due onde sono in fase (quando la fase relativa tra di esse è un multiplo intero di 2π) causando un'amplificazione dell'onda risultante, l'A totale sarà > delle A individuali.

Distruttiva: le due onde sono in opposizione di fase (quando la fase relativa è un multiplo dispari di π) causando una diminuzione della A totale, se le due onde hanno la stessa A e sono perfettamente in opposizione di fase allora l'onda risultante può annullarsi completamente.

LE ONDE STAZIONARIE sono un fenomeno di interferenza che si verifica quando due onde di uguale f e A, ma direzione opposta, si sovrappongono nello stesso mezzo.

A differenza delle onde progressive che trasportano energia da un punto all'altro le stazionarie NON trasportano energia ma si limitano ad oscillare localmente.

Affinché due onde siano stazionarie devono rispettare delle condizioni.

- **stessa f e A**
- **Propagazione in versi opposti:** una delle due onde deve essere l'onda riflessa dell'altra
- Mezzo con **estremi vincolanti:** estremità fissa, chiusa e libera
- L'interferenza tra l'onda incidente e quella riflessa crea un pattern fisso di **nodi** (A e sempre 0, $\sin(kx)=0$) e **ventri** (A massima, $\sin(kx)=+o-1$). I nodi sono punti di annullamento totale dell'oscillazione e i ventri può ti di massima oscillazione
- **Assenza di trasporto energetico:** l'energia può essere convinta nella regione di propagazione senza spostarsi, perché a causa dell'interferenza l'energia si trasferisce uniformemente tra nodi e ventri

Equazione dell'onda stazionaria

$$y(x,t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t)$$

Corda tesa vincolata a entrambe le estremità: si formano onde stazionarie solo per lunghezze d'onda tali che la corda ospiti un numero intero di mezze lunghezze d'onda $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$, $n = 1, 2, 3$

Le onde stazionarie sono rilevanti per la formazione di risonanze in cavità corporee (tratto vocale, timpano o caduta polmonari) dove le cognizioni geometriche determinano le frequenze di risonanza. Anche negli ultrasuoni diagnostici

ONDE STAZIONARIE

Nessuno trasporto di energia lungo il mezzo.
L'energia oscilla tra nodi e ventri

Energia tra nodi (zero) e ventri (massima)

Corda tesa vincolata, tubo chiuso a un'estremità

ONDE PROGRESSIVE

Trasporto di energia dalla sorgente al punto di propagazione

energia che si sposta con l'onda

onde sonore, sull'acqua e luminose

L' **energia associata a un'onda meccanica** riguarda l'energia che viene trasportata dall'onda attraverso il mezzo senza che ci sia un trasporto di materia, trasferiscono energia dal punto in cui si generano a quello in cui l'onda arrivata le particelle del mezzo oscillano attorno alla loro posizione di equilibrio, senza spostarsi permanentemente.

Energia cinetica:

Ogni particella del mezzo che oscilla a causa dell'onda possiede un'energia cinetica legata al suo movimento.

L'Ec di una particella in movimento: $K_E = \frac{1}{2} m v^2$

Energia potenziale elastica:

Poiché il mezzo in cui l'onda si propaga resiste alla deformazione, le particelle possiedono anche energia potenziale elastica mentre sono deformate dalla vibrazione

In una posizione di oscillazione massima: $U_{el} = \frac{1}{2} k x^2$

k = costante elastica della corda, x = spostamento della particella dalla posizione di equilibrio

L' **energia totale** di un'onda meccanica è la somma dell'Ec e potenziale elastica, con Ec che è massima quando la particella passa per la posizione di equilibrio (dove v è massima), e l'energia potenziale che è massima quando la particella è al massimo dello spostamento (dove $v=0$).
L' **energia totale** di un'onda meccanica si conserva, l'energia viene continuamente trasferita tra le particelle che oscillano, ma la somma complessiva rimane costante in assenza di dissipazioni.

$$E_{tot} = \frac{1}{2} \mu A^2 \omega^2$$

la **potenza trasportata da un'onda in un mezzo elastico** è il tasso al quale l'energia associata all'onda viene trasferita attraverso il mezzo, rappresenta la velocità con cui questa energia viene trasferita da una parte all'altra

$$P = \frac{1}{2} \mu A^2 \omega^2 v$$

La potenza dipende dall'ampiezza dell'onda, dal f e dalla velocità di propagazione e cresce con l' A e con la v di propagazione, ed è direttamente proporzionale al quadrato dell' A .

Per un'onda su una corda tesa la potenza dipende dalla tensione della corda e dalla sua densità.

L'**intensità di un'onda** (W/m^2) è una misura della quantità di energia che l'onda trasporta per unità di superficie per un'unità di tempo. Rappresenta il flusso energetico attraverso una superficie che è **perpendicolare** alla direzione di propagazione dell'onda.

La potenza e l'intensità sono legati. La potenza rappresenta la quantità di energia che l'onda trasferisce per unità di tempo, l'intensità descrive la potenza per unità di superficie. $I = P/A$
Per un'onda sinusoidale:

$$I = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 v$$

Laumentata con A ed è direttamente proporzionale alla v di prop. e alla densità del mezzo, per un'onda sonora l'intensità è anche collegata alla pressione acustica.

ONDE ACUSTICHE sono onde meccaniche longitudinali che si trasmettono attraverso la compressione e la rarefazione delle particelle del mezzo materiale in cui si propagano.

1. **Aria (gas):** Il suono si propaga come onda longitudinale dove le molecole d'aria si comprimono e espandono.

La v del suono nell'aria = 343 m/s e dipende dalla temperatura, più è alta e più è veloce e dalla densità che più è bassa e più è veloce

2. **Acqua (liquido):** Si propagano con v maggiore rispetto all'aria

La v del suono nell'acqua è 1.482 m/s, l'alta densità dell'acqua consente una propagazione più rapida del suono

3. **Solido:** La v del suono è molto più alta nel ferro 5.130 m/s. La rigidità e densità dei solidi consentono di propagarsi molto velocemente perché le particelle sono più legate e trasmettono vibrazioni più velocemente

Densità del mezzo: maggiore è la d maggiore è la resistenza alla compressione delle particelle ma nei solidi ciò facilita la trasmissione dell'onda

Temperatura: influisce principalmente nei gas, se aumenta anche la v del suono perché le particelle si muovono più velocemente

La relazione tra intensità acustica e percezione sonora riguarda come l'intensità di un'onda sonora venga tradotta dal nostro udito in una percezione soggettiva del suono, che dipende da f e pressurizzazione sonora.

Sebbene l'intensità aumenti in modo continuo la nostra percezione dell'intensità del suono (volume) segue una **scala logaritmica**. Questo significa che un aumento di 10 dB rappresenta un raddoppio della percezione del volume anche se l'intensità fisica del suono è aumentata di 10 volte.

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

L = intensità sonora in decibel

I = intensità acustica dell'onda sonora

I_0 = intensità di riferimento che corrisponde alla soglia minima di udibilità

Soglia minima: soglia di dolore:

Limiti di intensità: la soglia minima è 0 dB che corrisponde a $10^{-12} W/m^2$, appena percepibile, la soglia di dolore 130 dB al di sopra anche perdita dell'udito

Limiti di frequenza: soglia inferiore fino a 20 Hz, anche se le onde infrasoniche (sotto 20) possono essere percepite come vibrazioni o pressioni. La finestra uditiva è tra 20 Hz e 20.000 Hz anche se la sensibilità è maggiore tra 1.000 e 5.000. Soglia superiore oltre i 20.000 = onde ultrasoniche non percepibili all'orecchio umano sebbene delfini o pipistrelli possono.

L'EFFETTO DOPPLER: cambiamento nella frequenza o lunghezza d'onda di un'onda come suono e luce percepito da un osservatore in movimento rispetto alla fonte dell'onda, ed è dovuto al moto relativo fra fonte e osservatore e abbiamo 2 possibilità

- **quando la fonte si avvicina all'osservatore:** la f (suono) percepita dall'osservatore aumenta cioè suono o luce appaiono più alti o con una lunghezza d'onda (luce) più corta. Accade perché le onde vengono compresse dalla fonte che si avvicina riducendo la distanza tra le creste successive. Quando l'ambulanza si avvicina il suono è più acuto

- **quando la fonte si allontana dall'osservatore:** la f percepita dall'osservatore diminuisce e appaiono più bassi e la lunghezza d'onda è più lunga. Le onde vengono allungate dalla fonte che

si allontana aumentando la distanza tra le creste. Quando l'ambulanza si allontana il suono più grave.

Nel caso delle onde sonore o elettromagnetiche la f percepita dal ricevitore f' è legata alla f emessa dalla fonte f

$$f' = f \frac{v \pm v_o}{v \pm v_s}$$

v = velocità dell'onda nel mezzo (suono o luce)

v_o = dell'osservatore, positiva se si avvicina alla fonte

v_s = della fonte, positiva se si allontana dall'osservatore

Ecografia doppler per misurare flusso sanguigno e monitorare il movimento di strutture all'interno del corpo. L'ecografo emette onde sonore ad alta frequenza che quando incontrano il sangue che si muove vengono riflesse indietro dalle cellule del sangue. La frequenza di queste onde riflesse cambia a causa del movimento relativo tra sorgente delle onde (ecografo) e il sangue che si muove (oggetto in movimento)

- quando il sangue si avvicina all'ecografo (flusso in direzione verso l'ecografo) la f delle onde riflesse aumenta (spostamento verso il blu, f più alta)
- Quando si allontana (flusso in direzione opposta) la f delle onde riflesse diminuisce (verso il rosso, f più bassa)

Onde meccaniche: hanno bisogno di un mezzo per propagarsi, onde sonore, del mare, di una corda

Onde elettromagnetiche: non hanno bisogno di un mezzo, luce, onde radio, raggi x, microonde