Dalle particelle alle ONDE

- Finora abbiamo considerato la DINAMICA di STATI di sistemi fisici che descrivono il trasporto sia di MATERIA che di ENERGIA da un punto A $\rightarrow$ B

ESEMPIO: PALLA
ORBITA PIANETA

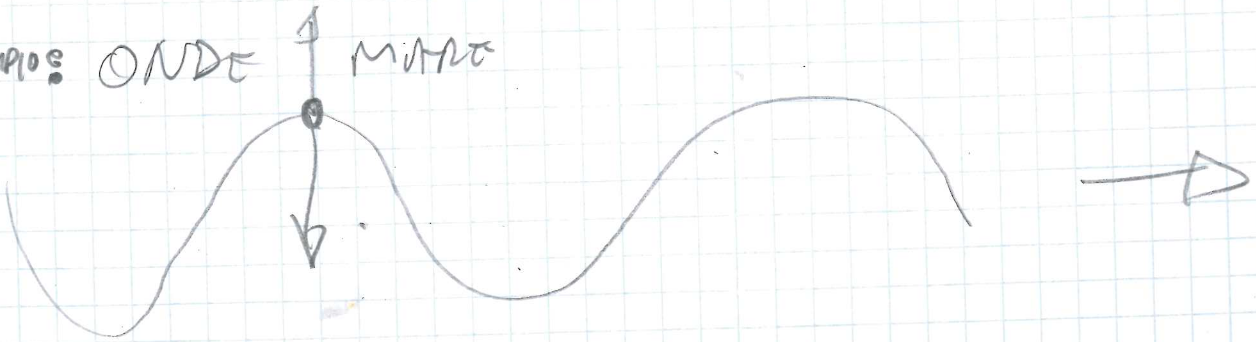
- Esistono anche STATI della materia che descrivono il Trasporto di sole ENERGIA da un punto A $\rightarrow$ B $\Rightarrow$ $\boxed{\text{ONDE}}$

ESEMPI

- ONDE MARE
- ONDE ACUSTICHE
- ONDE EM
- ONDE GRAVITAZIONALI

ONDE MARE, ONDE ACUSTICHE $\rightarrow$ { ONDE MECCANICHE NECESSITANO DI UN MEZZO MECCANICO

ESEMPIO: ONDE MARE



Fin pomande:
Un'onda è una $\boxed{\text{perturbazione}}$
di un CAMPO $\vec{E}(\vec{r}, t)$
intorno alla configurazione
di EQUILIBRIO!
la perturbazione viene
descritta da una
$\boxed{\text{FUNZIONE D'ONDA}}$
$\mathcal{E}(x, y, z, t)$

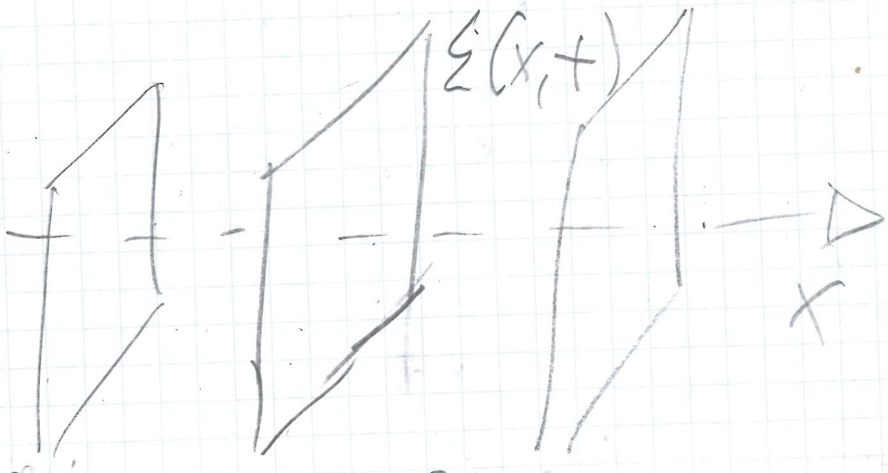
- le onde sono caratterizzate da una
  - DIREZIONE DI PROPAGAZIONE
  - VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE $\bar{V}$

- Per semplicità noi prenderemo in considerazione solo il caso di ONDE PIANE

la perturbazione ha lo stesso valore per tutti i piani ORTOGONALI alla direzione di propagazione

$\xi(x,t)$ direzione di propagazione

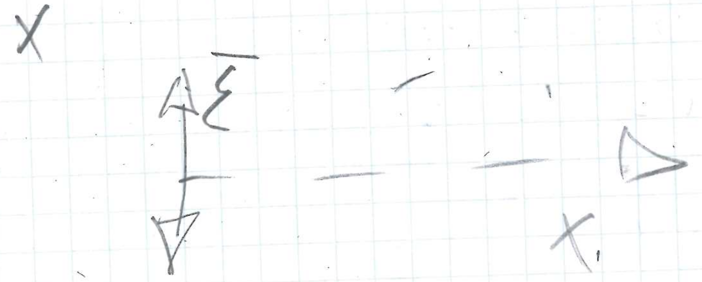
on X



Possono essere

TRASVERSALI : il vettore spostamento vibra nel piano ORTOGONALE a

ESEMPIO ONDE EM



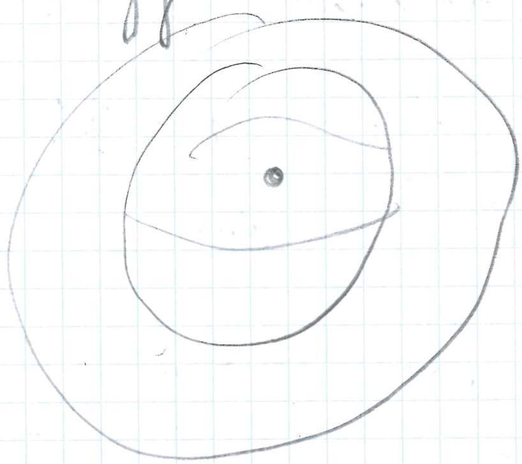
LONGITUDINALI il vettore spostamento vibra lungo la DIREZIONE DI propagazione

ESEMPIO onde sonore

ONDE SFERICHE:

la perturbazione ha lo stesso valore in una superficie sferica di raggio r

$\xi(r,t)$



Si può mostrare che nel caso in cui le perturbazioni siano PICCOLE DEVIAZIONI RISPETTO ALLA CONFIGURAZIONE DI EQUILIBRIO DEL MEZZO la funzione d'onda è una soluzione di una EQUAZIONE DIFFERENZIALE LINEARE ALLE DERIVATE PARZIALI (LINEAR PDE)

$$\boxed{\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}}$$

D'ALEMBER

EQUAZIONE D'ONDA DI

BIGNAMINO DELLE PDE (o più)

Data una funzione di DUE VARIABILI $f(x, y)$ definiamo la sua derivata parziale rispetto a x

$$f_x = \frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta x, y) - f(x,y)}{\Delta x}$$

ANALOGAMENTE

$$f_y = \frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{f(x, y+\Delta y) - f(x,y)}{\Delta y}$$

Nello stesso modo si possono definire derivate successive. Derivate 2°

$$\begin{cases} f_{xx} = \dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \lim_{\Delta x \to 0} \dfrac{f_x(x+\Delta x, y) - f_x(x,y)}{\Delta x} \\[2ex] f_{yy} = \dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \lim_{\Delta y \to 0} \dfrac{f_y(x, y+\Delta y) - f_y(x,y)}{\Delta y} \\[2ex] f_{xy} = f_{yx} = \lim_{\Delta x \to 0} \dfrac{f_y(x+\Delta x, y) - f_y(x,y)}{\Delta x} \end{cases}$$

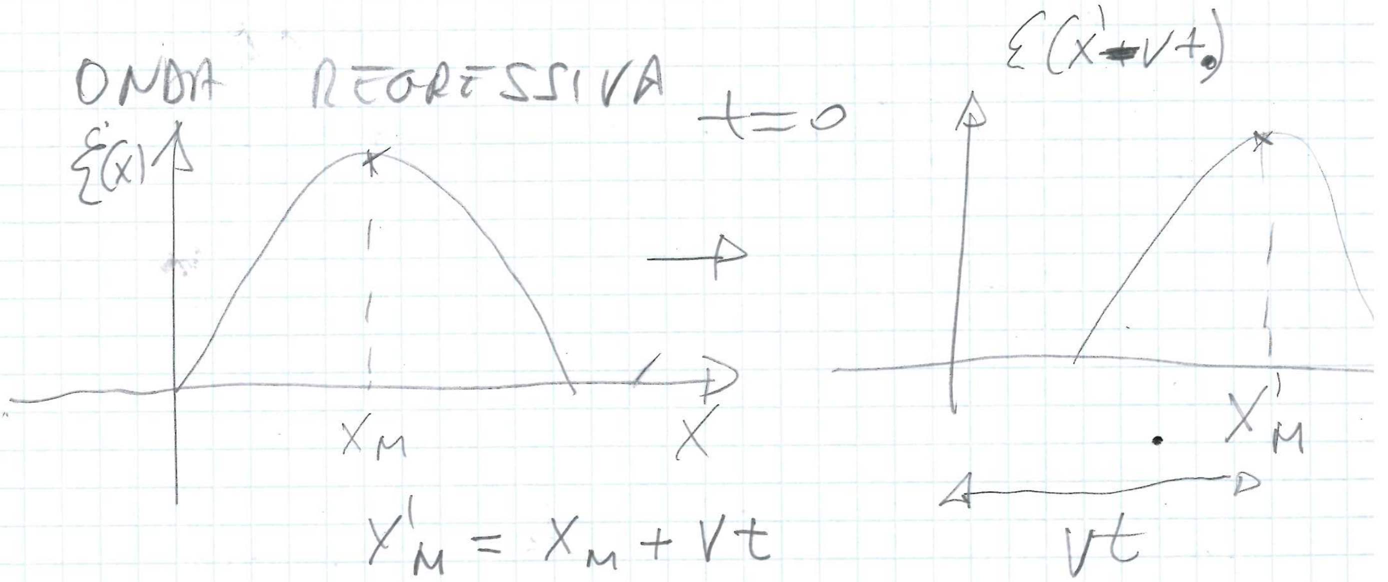
Una PDE è una equazione differenziale in cui compaiono derivate parziali

Si può dimostrare che la soluzione più generale della PDE di D'Alembert è una combinazione di un'onda

PROGRESSIVA $\xi(x - vt)$

REGRESSIVA $\xi(x + vt)$

ONDA REGRESSIVA



$$x'_M = x_M + vt$$

Si propaga lungo il verso positivo dell'asse x SENZA CAMBIARE FORMA

TRASLAZIONE RIGIDA della funzione d'onda lungo x positivo

ANALOGAMENTE onda REGRESSIVA

$$\xi(x + vt)$$

Propaga lungo verso negativo dell'asse x

BIGNAMINO DELLE PDE (o più)

Data una funzione di DUE VARIABILI $f(x,y)$ definiamo la sua derivata parziale rispetto a x

$$f_x = \frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta x, y) - f(x,y)}{\Delta x}$$

ANALOGAMENTE

$$f_y = \frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{\Delta y \to 0} \frac{f(x, y+\Delta y) - f(x,y)}{\Delta y}$$

Nello stesso modo si possono definire derivate successive. Derivate 2°

$$\begin{cases} f_{xx} = \dfrac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \lim\limits_{\Delta x \to 0} \dfrac{f_x(x+\Delta x, y) - f_x(x,y)}{\Delta x} \\ f_{yy} = \dfrac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \lim\limits_{\Delta y \to 0} \dfrac{f_y(x, y+\Delta y) - f(}{\Delta y} \\ f_{xy} = f_{yx} = \lim\limits_{\Delta x \to 0} \dfrac{f_y(x+\Delta x, y) - f_y(}{\Delta x} \end{cases}$$

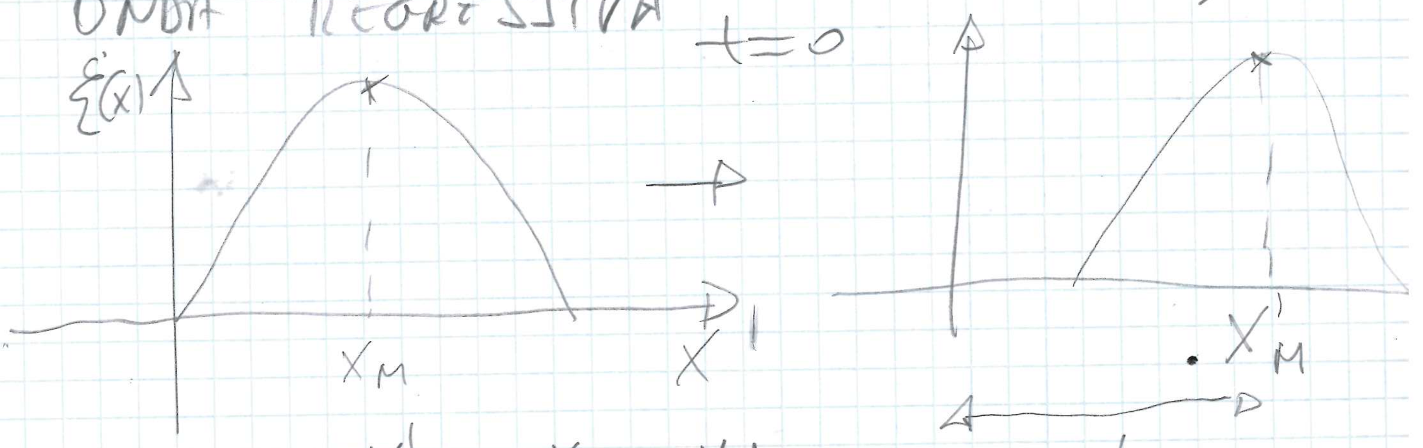
Una PDE è una equazione differenziale in cui compaiono derivate parziali

Si può dimostrare che la soluzione più generale della PDE di D'Alembert è una combinazione di un'onda

PROGRESSIVA $\xi(x - vt)$

REGRESSIVA $\xi(x + vt)$

ONDA REGRESSIVA $t = 0$



$$x'_M = x_M + vt$$

Si propaga lungo il verso positivo dell'asse x SENZA CAMBIARE FORMA

TRASLAZIONE RIGIDA della funzione d'onda lungo x positivo

ANALOGAMENTE onda REGRESSIVA

$$\xi(x + vt)$$

Propaga lungo verso negativo dell'asse x

Dimostrazione

$\xi(x-vt)$

$z = x - vt$

$\xi(z)$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial \xi}{\partial x} = \dfrac{d\xi}{dz}\dfrac{\partial z}{\partial x} = \dfrac{d\xi}{dz} \\[2ex] \dfrac{\partial \xi}{\partial t} = \dfrac{d\xi}{dz}\dfrac{\partial z}{\partial t} = -v\dfrac{d\xi}{dz} \end{cases}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\left\{\frac{d\xi}{dz}\right\} = \frac{d}{dz}\left(\frac{d\xi}{dz}\right)\frac{\partial z}{\partial x}$$

$$= \frac{d^2\xi}{dz^2}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t}\left[-v\frac{d\xi}{dz}\right\} = -\frac{d}{dz}\left(v\frac{d\xi}{dz}\right($$

$$\frac{\partial z}{\partial t} = v^2\frac{d^2\xi}{dz^2}$$

Segue

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

C.V.D.

Analogamente per $\xi(x+vt)$

ESSENDO LA PDE LINEARE
VALE IL PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

se ξ_1, ξ_2, ξ_3 ....
sono soluzioni della PDE
ogni combinazione lineare
con coefficienti costanti sono
ANCORA soluzione

$$\xi = c_1 \xi_1 + c_2 \xi_2 + \dots$$

In particolare si dimostra
che la SOLUZIONE
PIÙ GENERALE della
PDE delle onde è
data da

$$\xi = c_1 \, \xi(x - vt) + c_2 \, \xi(x+vt)$$

PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE (ONDE LINEARI) descritte cioè da PDE LINEARI

La sovrapposizione di due (o più) onde ξ_1, ξ_2 è data da $\xi = \xi_1 + \xi_2$

ONDE ARMONICHE

Un' ONDA ARMONICA è descritta da una funzione d'onda

$$\xi'(x,t) = \xi_0 \sin k(x - vt) = \xi_0 \sin(kx - \omega t)$$

$\boxed{\omega = kv}$

oppure

$$\xi(x,t) = \xi_0 \cos k(x - vt) = \xi_0 \cos(kx$$

$\xi_0 \rightarrow$ AMPIEZZA

$k \rightarrow$ vettore d'onda

$\omega \rightarrow$ pulsazione o frequenza ang di ... indice

- La LUNGHEZZA D'ONDA λ

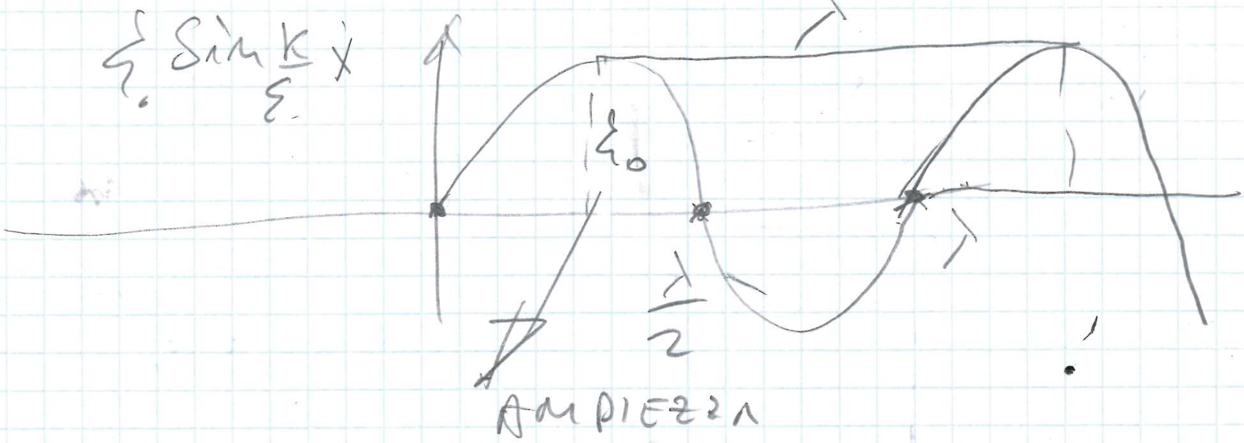
$$= \frac{2\pi}{K} \Rightarrow K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

PERIODICITÀ SPAZIALE DELL'ONDA

$t = \text{cost}$ (per esempio $t=0$

$$\xi(x, t=0) = \xi_0 \sin Kx = \xi_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} x$$

$\xi_0 \sin \frac{k}{\xi} x$



- PERIODO

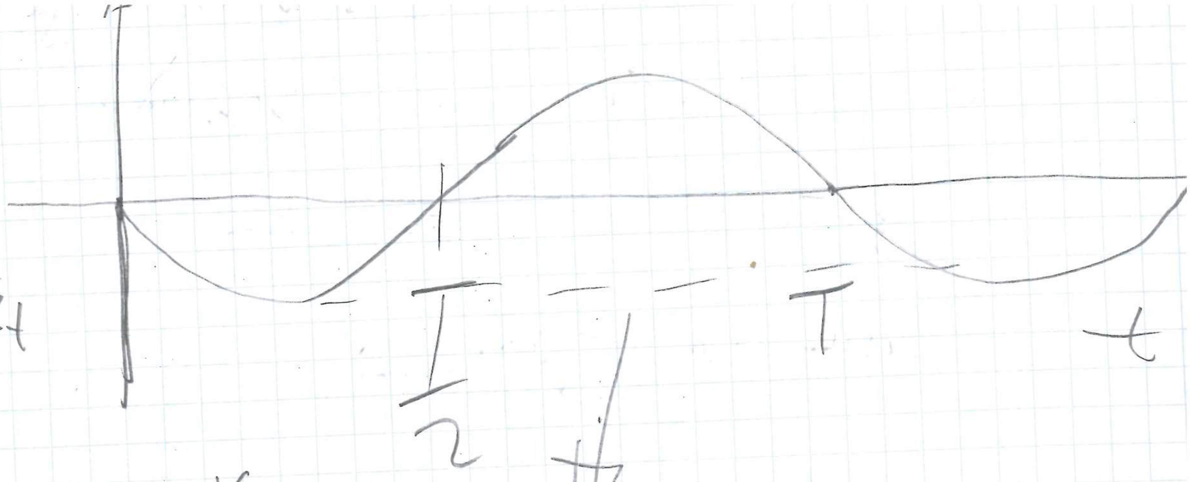
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Periodicità TEMPORALE

$x = \text{costante} = 0$

$$\xi(x=0, t) = \xi_0 \sin(-\omega t)$$

$$= -\xi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$$



$-\xi_0 \sin \frac{2\pi}{T} t$

se fissiamo x

$\Rightarrow$ legge oraria di un OSCILLATORE ARMONICO

T

Da $T = \frac{2\pi}{\omega}$ $\qquad \lambda = \frac{2\pi}{K}$

$\omega = K V$ segue

$$\boxed{\lambda = VT}$$

lunghezza d'onda è la distanza percorsa in un periodo.

Inoltre per la frequenza ν

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{V}{\lambda}$$

$\nu \rightarrow$ cicli al secondo

SFASAMENTO DI DUE ONDE

$$\xi_1 = \xi_0 \sin(kx - \omega t + \Delta\phi)$$

SFASAMENTO RECAT
TRA DUE ONDE

ANALISI DIMENSIONALE

$$\lambda = [L] \Rightarrow m$$

$$T = [T] \rightarrow sec$$

$$\omega = \left[\frac{2\pi}{T}\right] = \frac{Rad}{sec}$$

$$\nu = \left[\frac{1}{T}\right] = \frac{1}{sec} = Hz$$

$$\boxed{\text{ONDE SONORE}}$$

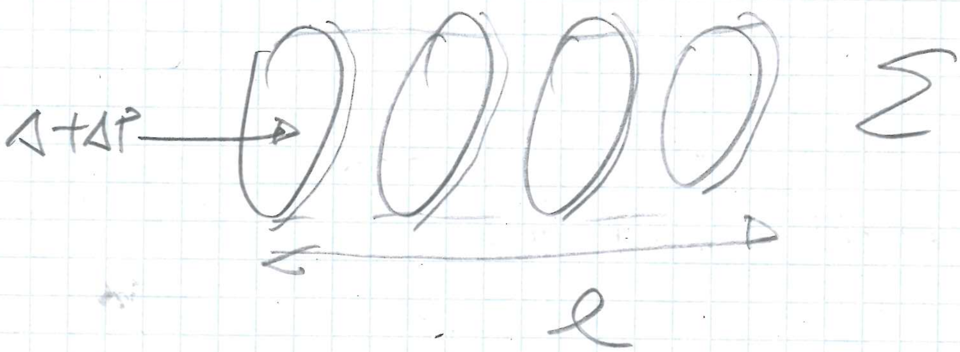
Ogni volta che perturbiamo un MEZZO ELASTICO (EQUILIBRIO) generiamo un' ONDA ELASTICA

ESEMPI { MARE, STRUMENTI MUSICALI

Un caso particolarmente interessante sono le ONDE SONORE che sono generate dalle proprietà elastiche dell' aria

Prendiamo un cilindro d'aria lunghezza l e di sezione Σ su cui agisce una pressione di equilibrio p.

Se perturbiamo la pressione $p + \Delta p$ si genera un'onda di COMPRESSIONE / RAREFAZIONE DEL GAS



Δp genera una una variazione di lunghezza δl dell'elemento di GAS VICINO $\Rightarrow$ variazione relativa di volume

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Sigma \Delta l}{\Sigma l} = \frac{\Delta l}{l}$$

$\Rightarrow$ la variazione di volume genera una variazione di densità del GAS

$$\rho V = m = cost$$

$$\Delta \rho V + \rho \Delta V = 0 \Rightarrow \frac{\Delta \rho}{\rho} = -\frac{\Delta V}{V}$$

⇒ il volumetto compresso poi si espande comprimendo quello adiacente e così via; si genera in questo modo un'ONDA PIANA

- di pressione ΔP
- di densità $\Delta \rho$
- di spostamento s

le variazioni $\Delta P, \Delta \rho, s$ avvengono lungo la direzione di propagazione dell'onda quindi un'onda LONGITUDINALE

La velocità dell'onda dipende dalle proprietà ELASTICHE del mezzo

$$\Delta P = -\beta \frac{\Delta V}{V} = \beta \frac{\Delta \rho}{\rho}$$

$\Downarrow$

Modulo di compressibilità del GAS

Si dimostra che

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

La densità varia con la temperatura e $T = 20°C$

obtiene $v = 343 \frac{m}{s}$

Esempi di generatori di onde acustiche

- voce
- strumenti musicali

$\boxed{\text{ONDE SONORE ARMONICHE}}$

Usando per esempio un DIAPASON possiamo generare un'onda ARMONICA PURA (unica frequenza

spostamento

$$S(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad \frac{\lambda}{T} = V$$

- l'onda di spostamento genera l'onda di pressione

considerando $l = \Delta x$

$$\Delta P = -\beta \frac{\Delta l}{l} \qquad \Delta l = \Delta s$$

$$\frac{\Delta l}{l} \xrightarrow[\Delta x \to 0]{} \frac{\partial s}{\partial x}$$

$$\Delta P = -\beta k A \cos(kx - \omega t)$$

ONDA DI PRESSIONE

$$k = \frac{\omega}{v} \qquad \beta = \rho v^2$$

$$\Delta p = - \rho \omega v A \cos(kx - \omega t)$$

$$= - \rho \omega v A \sin\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

ONDA DI PRESSIONE SFASATA DI $\frac{\pi}{2}$ (QUADRATURA)

rispetto a onda di spostam.

AMPIEZZA

$$(\Delta p)_{MAX} = \rho v \omega A$$

$\boxed{\text{ONDA DI DENSITÀ}}$

$$\Delta p = \rho v^2 \frac{\Delta \rho}{\rho} = v^2 \Delta \rho$$

$$\Rightarrow \Delta \rho = \frac{\Delta p}{v^2}$$

INTENSITÀ DELL'ONDA

ENERGIA TRASPORTATA DALL'ONDA

$W_E \Rightarrow$ ENERGIA / UNITÀ DI volume

- quantità di energia che passa nella sezione Σ nell'intervallo di tempo $\Delta t \Rightarrow \Delta x = v \Delta t$

$$\Delta E = W_T \Sigma . \Delta x = W_T \Sigma v \Delta t$$

Potenza $P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = W_I \, V \, \Sigma$

Energia meccanica di un oscillatore con massa Δm è costante ed è dato che

$$\Delta U = \frac{1}{2} \Delta m \, \omega^2 A^2$$

COINCIDE CON IL VALOR MEDIO

$$W_I = \frac{\Delta U}{\Delta V} = \frac{\Delta U}{\frac{\Delta m}{\rho}} = \frac{1}{2} \rho \, \omega^2 A^2$$

Per cui

$$P = \frac{1}{2} \rho \, \omega^2 A^2 V \, \Sigma$$

Intensità dell'onda: energia che passa nell'unità di tempo nella sezione Σ per unità di tempo ed area

$$\boxed{I = \frac{1}{2} \rho \, \omega^2 A^2 V}$$

LIVELLO SONORO

FIG. 9.19 < soglia udibilità
soglia dolore

livello sonoro $\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$

- DECIBEL

... di rivello sopra ...
di lavoro 10 dB

EFFETTO DOPPLER

Quando sorgente e rivelatore sono in quiete uno rispetto all'altro la lunghezza d'onda misurata è la distanza tra due picchi

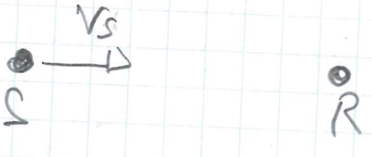
Fig 9.22

λ_0

$\nu_0 = \frac{v}{\lambda_0}$, T_0

$\Rightarrow$ Se c'è un MOTO RELATIVO tra sorgente e rivelatore

velocità relativa DELLA SORGENTE $v_s < v$
(verso positivo AVVICINAMENTO)



lunghezza corta di $v_s T$

La lunghezza d'onda misurata dal rilevatore

$$\lambda_R = \lambda_0 - v_s T_0$$

$$= \frac{V}{\nu_0} - \frac{V_S}{\nu_0} = \frac{V - V_S}{\nu_0} = \frac{V - V_S}{V} \lambda_0$$

per la frequenza abbiamo invece

$$\nu_R = \frac{V}{\lambda_R} = \frac{V}{V - V_S} \nu_0 \,, \quad \lambda_R = \frac{V - V_S}{V} \lambda_0$$

AVVICINAMENTO RELATIVO $V_S > 0$

$$\frac{V - V_S}{V} < 1 \qquad \begin{cases} \lambda_R < \lambda_0 \\ \nu_R > \nu_0 \end{cases}$$

ALLONTANAMENTO RELATIVO $V_S < 0$

$$\frac{V - V_S}{V} > 1 \qquad \begin{cases} \lambda_R > \lambda_0 \\ \nu_R < \nu_0 \end{cases}$$

SE INVECE RIVELATORE SI MUOVE

SI TROVA velocità V_R

$$\nu_R = \frac{V - V_R}{V} \nu_0$$

se R si avvicina $V_R < 0$

$$\nu_R > \nu_0$$

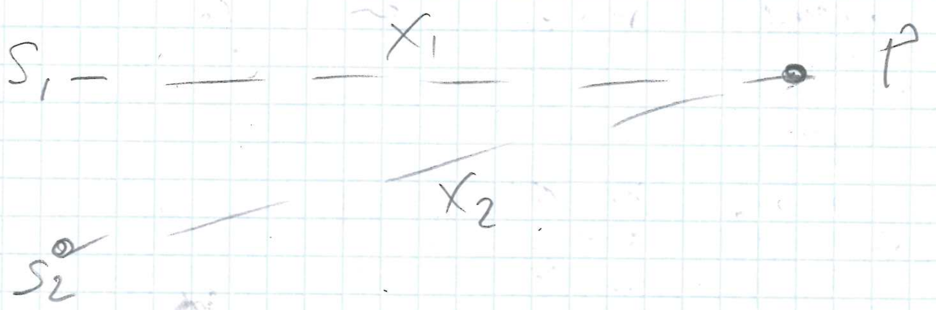
se R si allontana

$$\nu_R < \nu_0$$

INTERFERENZA

Si verifica quando due o più ONDE si sovrappongono in modo COERENTE (lo sfasamento delle due onde non varia nel tempo in un punto dello spazio P)

STESSA FREQUENZA



$$s_1(x,t) = A \sin(kx_1 - \omega t)$$

$$s_2(x,t) = A \sin(kx_2 - \omega t)$$

Le due onde son sfasate di

$$\Delta\phi = k(x_2 - x_1)$$

INFATTI

$$s_2(x,t) = A \sin(k_1 x_1 - \omega t + \Delta\phi)$$

Per il P d S. l'onda risultante è

$$s(x,t) = s_1(x,t) + s_2(x,t)$$

$$= A\left[\sin(kx_1 - \omega t) + \sin(kx_2 - \omega t)\right]$$

usando le formule di prostaferesi

$$\sin\alpha + \sin\beta = 2\cos\left(\frac{\alpha-\beta}{2}\right)\sin\frac{\alpha+\beta}{2}$$

$$S(x,t) = 2A\sin\left(k\frac{x_1+x_2}{2} - \omega t\right)$$
$$\cos k\frac{(x_1-x_2)}{2}$$

l'ampiezza dell'onda in P è ora

$$S_0 = 2A\cos\frac{k}{2}(x_1-x_2) = 2A\cos\frac{}{}$$
$$= 2A\cos$$

$$\Delta\phi = k(x_1-x_2) = \frac{2\pi}{\lambda}(x_1-x_2)$$

L'AMPIEZZA DIPENDE DA $\Delta\phi$

$\Rightarrow$ posizione del punto P

In particolare l'ampiezza sarà

$\boxed{\text{massima}}$ quando

$$\Delta\phi = 2m\pi \rightarrow \boxed{x_1-x_2 = m\lambda}$$

INTERFERENZA COSTRUTTIVA

MINIMA quando

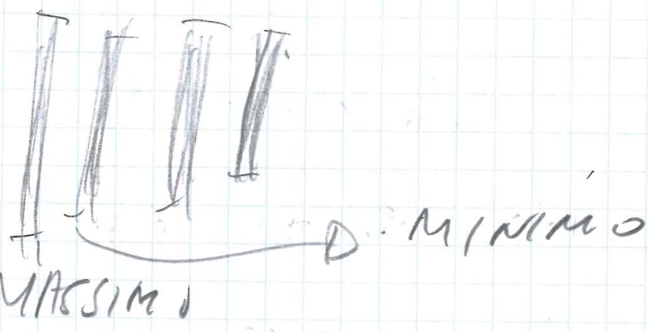
$$\Delta\phi = (2m+1)\pi \rightarrow x_1-x_2 = (2m+1)$$

$m \in \mathbb{Z}$ INTERFERENZA DISTRUTTIVA

FIGURE DI INTERFERENZA

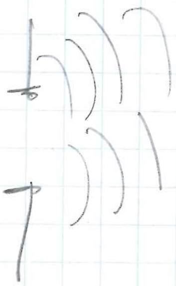
In generale la quantità $\Delta\phi = k(x_1-$ si chiama DIFFERENZA DI CAMMINO OTTICO.

⇒ se per qualche ragione in una regione si sposta le onde osservo sovrapponendosi con cammini ottici differenti si formano le cosiddette figure di interferenza costituite da MASSIMI E MINIMI DI INTENSITÀ CHE SI SUSSEGUONO.



ESEMPI:

- ARCOBALENO
- DIFFRAZIONE
- ONDE DEL MARE

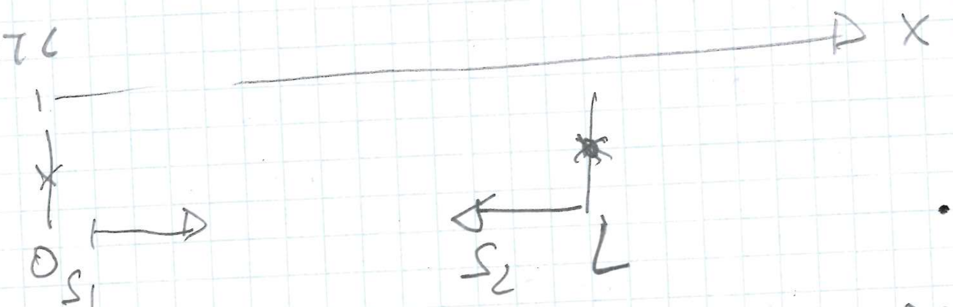


ONDE STAZIONARIE

Quando due onde si propagano in verso OPPOSTO può succedere che si formi un'ONDA STAZIONARIA ⇒ OSCILLAZIONE COLLETTIVA del sistema senza un vero propagarsi dell'ONDA.

ES: strumenti musicali ⇒ FISICA ACUSTICA

Esempio particolarmente importante:
CORDA VIBRANTE con gli estremi FISSI. ES: CORDA DI CHITARRA, PIANOFORTE ETC



$$s_1(x,t) = A \sin(kx - \omega t) \quad \text{PROGR.}$$

$$s_2(x,t) = A \sin(kx + \omega t) \quad \text{REGR}$$

$$s(x,t) = s_1 + s_2 = 2A \sin kx \cdot \cos \omega t$$

⇒ si separa la dipendenza fra x, t

l'onda risultante è stazionaria
l'ampiezza dipende dal punto x

$$A(x) = 2A \sin kx$$

se la corda viene fissata agli estremi abbiamo

$$\begin{cases} \sin 0 = 0 & \text{IDENTITÀ} \\ \sin KL = 0 \end{cases} \Longrightarrow \sin \frac{2\pi}{\lambda} L = 0$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} L = n\pi$$

$$\boxed{\lambda_n = \frac{2L}{n}}$$

$K = n\pi$

Tensione

Mentre la frequenza

$$\boxed{\nu_n = \frac{V}{\lambda} = n \frac{V}{2L}}$$

$V = \sqrt{\frac{T}{\rho}}$

densità lineare

⇒ La corda può vibrare solamente con una serie di MODI DI VIBRAZIONE DISCRETI multipli di una FREQUENZA (ARMONICA) FONDAMENTALE

⇒ SERIE ARMONICA (ARMONICHE SUCCESSIVE)

FIGURA 9.31

Suono: sovrapposizione di armoniche

fondamentale ed armoniche successive

Soluzione può essere ottenuta dalla Equazione di D'ALEMBERT SEPARANDO le variabili e imponendo le condizioni al contorno $S(x,t)$

$$\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \frac{1}{V^2}\frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = 0$$

$$S(t, x=0) = S(t, x=L) = 0$$

$\boxed{\text{BATTIMENTI}}$

- ANALISI DI FOURIER DEL SUONO
- TIMBRO DEL SUONO

Fenomeno di INTERFERENZA TEMPORALE tra due onde di pulsazioni molto vicine

$$\omega_1 = 2\pi\nu_1$$
$$\omega_2 = 2\pi\nu_2$$

che arrivano in P dalla stessa direzione. Prendo punto FISSO P $\boxed{x=}$

$S_1 = A \sin \omega_1 t$ $\qquad$ $S_2 = A \sin \omega_2 t$

$$S = S_1 + S_2 = A \sin(\omega_1 t) + A \sin(\omega_2 t)$$
$$= 2A \cos \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \ \sin \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t$$

$$\Omega = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} \qquad \omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

$$S = 2A \cos \Omega t \ \sin \omega t$$

FIG 9.38

MODULAZIONE DI AMPIEZZA
con frequenza $\Omega \ll \omega_1, \omega_2$

l'intensità del suono

$$I = I_{MAX} \cos^2 \Omega t$$

$\Downarrow$
FREQUENZA DOPPIA

FREQUENZA BATTIMENTO

$$\nu_b = |\nu_1 - \nu_2|$$

Per esempio se

$\nu_1 = 438\ Hz$ $\quad \nu_2 = 442\ Hz$

$\nu_B = 4\ Hz$

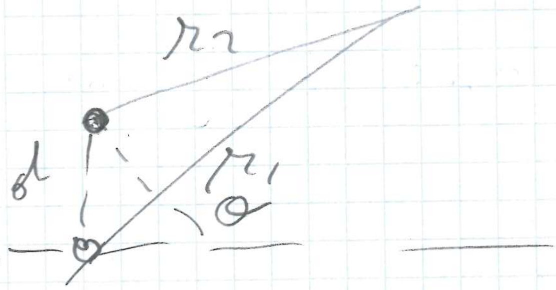
$\Rightarrow$ L'ORECCHIO UMANO SENTE VARIARE l'intensità 4 volte al secondo

INTERFERENZA TRA DUE ALTOPARLANTI

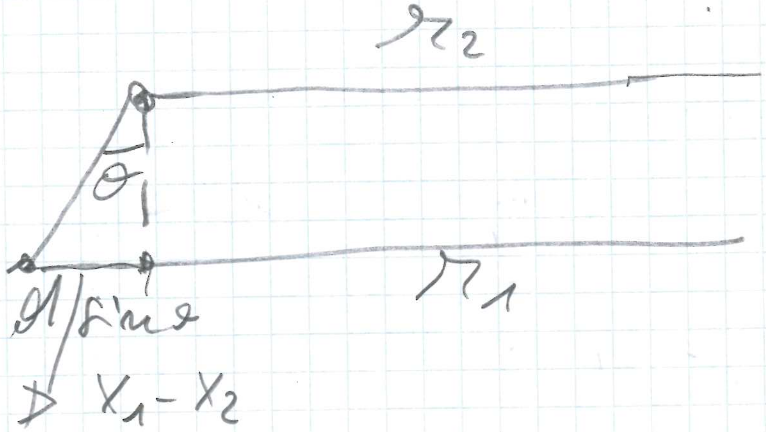
Altoparlanti $d = 2\,m$ emettono onde acustiche $\nu = 344\,Hz$.

$V = 344\,m/s$

Determinare le direzioni che mostrano e MINIMI DI INTERFERENZA.



Se $r_1, r_2 \gg d$ possiamo pensare r_1, r_2 PARALLELI



$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = d\sin\theta$$

$$d\sin\theta = m\lambda \qquad \text{MASSIMI}$$

$$\sin\theta = m\frac{\lambda}{d}$$

$$d\sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2} \qquad \text{MINIMI}$$

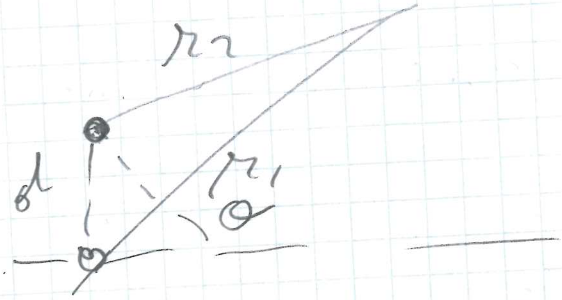
$$\sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$

INTERFERENZA TRA DUE ALTOPARLANTI

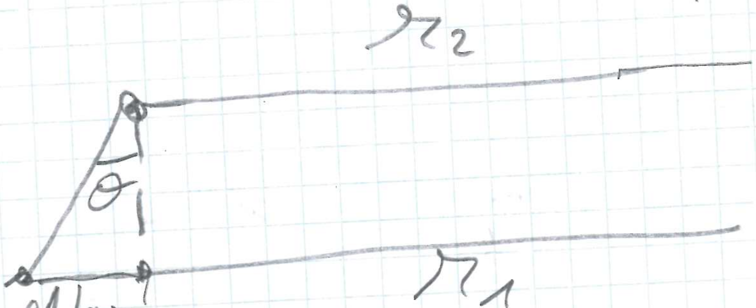
ALTOPARLANTI $d = 2m$ emettono onde acustiche $\nu = 344$ Hz.

$V = 344$ m/s

Determinare le direzioni che mostra
e MINIMI DI INTERFERENZA.



Se $r_1, r_2 >> d$ possiamo pensare r_1, r_2 PARALLELI



$d \sin\theta$

$\to x_1 - x_2$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_1 - r_2) = d \sin\theta$$

$$d \sin\theta = m\lambda$$ MASSIMI

$$\sin\theta = m\frac{\lambda}{d}$$

$$d \sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$ MINIMI

$$\sin\theta = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$$