11 giugno 2007 lunedì - FISICA 2 - prof. MORESCO MAURIZIO h 18:15 ÷ 19:45

Lezione n° 17 di 20

ONDE ARMONICHE PIANE

Torniamo qui ad occuparci delle onde armoniche ma in modo più compiuto. Abbiamo visto che la legge che governa la propagazione in una corda è conforme alla equazione di d'Alembert

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

sia che questa si propaghi nel verso positivo (+) che (−) negativo.

Le soluzioni all'equazione differenziale del II° ordine assegnata, omogenea ed a coefficienti costanti, sono tutte le combinazioni lineari delle due soluzioni particolari

$$\left.\begin{array}{l}\xi_1(x-vt)\\ \xi_2(x+vt)\end{array}\right\}$$

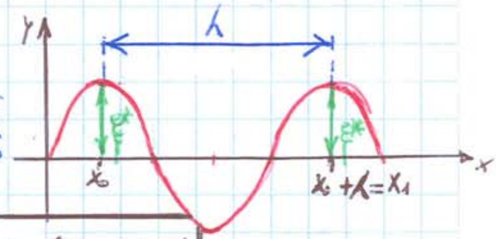
detta questa anche equazione d'onda $\xi(x,t) = \xi_{01} \cdot \xi_1(x-vt) + \xi_{02} \cdot \xi_2(x+vt)$

Se le funzioni ξ_1 e ξ_2 sono rappresentate da seno e coseno

$$\left.\begin{array}{l}\xi_1 = \xi_0 \sin(x-vt)\\ \xi_2 = \xi_0 \cos(x+vt)\end{array}\right\}$$

abbiamo ciò che si definisce un'onda piana armonica

Ma attenzione che l'argomento della funzione sin/cos è un "numero puro", mentre $x \mp vt$ ha le dimensioni di una lunghezza [m], ecco che il tutto va moltiplicato per K che porta le dimensioni di $[m^{-1}]$



K = periodicità spaziale = NUMERO DI ONDE

$$\boxed{\begin{cases}\xi_1 = \xi_0 \sin(Kx - Kvt)\\ \xi_2 = \xi_0 \cos(Kx + Kvt)\end{cases}}$$

Capiamo meglio cos'è K!

Facciamo l'ipotesi semplificativa che l'equazione d'onda sia sinusoidale, cioè valga
$\begin{cases}\xi_1 = \xi_0 \sin(Kx)\\ \xi_2 = \xi_0 \cos(Kx) = 0\end{cases}$
per un dato valore x_0 l'onda ha ampiezza ξ^*, la quale ampiezza si ripete nel punto x_1 per la periodicità della funzione seno, vale cioè

$\xi^* = \xi_0 \sin(Kx_0) = \xi_0 \sin(Kx_1)$ per soddisfare l'uguaglianza i due argomenti di seno devono essere identici perciò

$K(x_0) = K(x_1)$ e se $x_0 \neq x_1$ deve risultare $Kx_1 - Kx_0 = K(x_1 - x_0) = 2\pi$

la distanza $(x_1 - x_0)$ rimane fissa ed immutabile lungo tutta l'onda ed è scrivibile in *

* $\lambda = (x_1 - x_0)$, → $K\lambda = 2\pi$

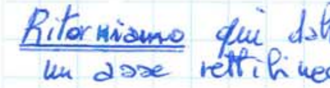
da cui si deduce che il parametro K rappresenta il numero di lunghezze di onda λ che stanno su di una distanza eguale a 2π

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

λ = LUNGHEZZA D'ONDA è questa una lunghezza fisica misurabile, ed è perciò molto importante

K = numero di onde in un periodo 2π, è un parametro legato a λ dalla precedente, e forse un po' meno importante di quest'ultimo; ma nei calcoli lo si ritrova spesso -

Ritorniamo qui dalla "Fisica classica" che l'equazione di un moto armonico semplice lungo un asse rettilineo ha equazione $X(t) = A \sin(\omega t + \phi)$; nel nostro caso $A = \xi_0$ e considerato che in $t=0$ $X(0) = A \sin\phi$ deve essere $\phi = 0$ in definitiva l'equazione che ci interessa si scrive come

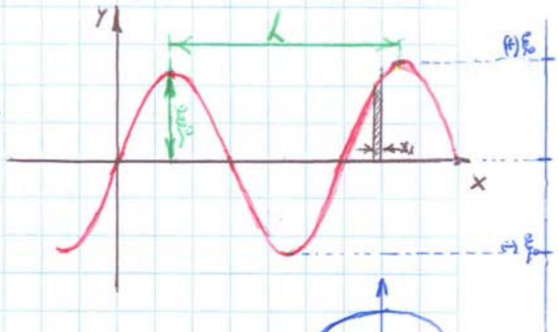


$$y = y_0 \sin(\omega t)$$

ed il moto si svolge in un segmento di lunghezza $2\xi_0$, con centro l'origine o, periodo 2π di FASE INIZIALE $\phi = 0$ e pulsazione ω; vediamo meglio cosa vale ω

Preso un generico punto x_1 sull'asse, l'equazione d'onda si può scrivere come

$$\xi(x_1, t) = \xi_0 \sin K(x_1 - vt) = \xi_0 \sin(Kx_1 - Kvt)$$

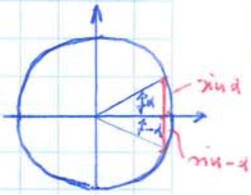


se cogliamo ora che il punto sia origine del moto $\rightarrow x_1 = 0$
l'equazione diventa

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

ma ricordo che vale $\sin(-\alpha) = (-)\sin\alpha$

$$= (-)\,\xi_0 \sin(Kvt)$$



è questa ancora una volta l'equazione di un moto armonico semplice sull'asse y tipo $y = y_0 \sin(\omega t)$, ove vale $y_0 = \xi_0$ che è l'ampiezza, la fase $\phi = 0$ e per far esattamente coincidere le due equazioni è necessario eguagliare anche l'argomento della funzione seno

$$Kvt = \omega t \qquad \boxed{\omega = Kv} \leftarrow \text{PULSAZIONE } [s^{-1}]$$

La pulsazione ω del moto armonico **NON** va confusa con una velocità angolare ω^{rad} e, la dimensione della pulsazione è $[s^{-1}]$ ricavabile da $\frac{1}{m}\frac{m}{s} = \frac{1}{s} = Kv$

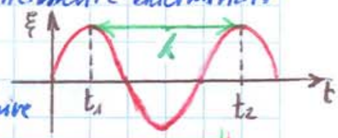
Altra cosa da osservare qui è la velocità v, non è questa la velocità di propagazione dell'onda nel suo moto longitudinale lungo l'asse x, ma rappresenta la velocità del moto armonico e dunque lungo l'asse y

$$\boxed{K = \frac{2\pi}{\lambda}} \qquad \boxed{\omega = Kv}$$

Ricapitolando i parametri che definiscono esattamente il moto armonico sono 4

- K il numero di onde in un periodo 2π
- λ la lunghezza d'onda
- ω la pulsazione d'onda
- v la velocità (di oscillazione)

Legati tra loro attraverso K $\quad \omega = Kv = \frac{2\pi}{\lambda} v$
e se almeno due sono noti i restanti due rimangono esattamente determinati



Se ora considero due istanti successivi t_1 e t_2 tali che $\omega(t_2 - t_1) = 2\pi$; posso definire

$$t_2 - t_1 = T = \frac{2\pi}{\omega} \quad \text{PERIODO dell'onda} \quad T = \frac{2\pi}{Kv} = \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{\lambda} v} = \frac{\lambda}{v} \longrightarrow \boxed{T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{\lambda}{v} \;\Big|\; \lambda = vT}$$

$$\nu = \frac{1}{T} \quad \text{FREQUENZA dell'onda} \quad \nu = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{Kv}{2\pi} = \frac{\frac{2\pi}{\lambda} v}{2\pi} = \frac{v}{\lambda} \longrightarrow \boxed{f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{v}{\lambda} \;\Big|\; f\lambda = v}$$

da fare attenzione alle dimensioni della frequenza $f = \nu$ che è nel SI riconosciuto come Hertz $[Hz]$, rimane dunque fisicamente un $(\text{tempo})^{-1}$, ma non è misurato in secondi.

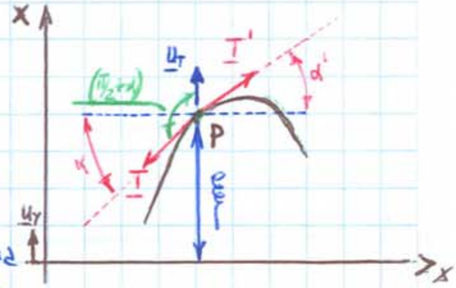
Dimensioni dei parametri principali

$K = [m^{-1}]$	$\omega = \frac{[rad]}{[s]} = [s^{-1}]$
$\lambda = [m]$	$T = [s]$
$v = \frac{[m]}{[s]}$	$f = \nu = [s^{-1}] = [Hz]$

PROPAGAZIONE ENERGIA ONDE

La propagazione di un campo che descrive un'onda si accompagna sempre alla propagazione di energia; lo si può ben vedere considerando un piccolo tratto di corda tesa dm, per questa si misura un'energia cinetica $dE_k = \frac{1}{2} dm\, v^2$ che se paragonata allo stato di quiete in cui $dE_k = \frac{1}{2} dm\, v^2 = 0$ giustifica quanto affermato. L'energia propagata perviene nel punto dai precedenti; vediamo come studiare il caso

Esaminiamo dunque l'intorno infinitesimo dl di un punto P di una corda (caso specifico dunque, nelle ipotesi già viste in precedenza



$\alpha \neq \alpha'$ mentre $\underline{T} + \underline{T}' = 0$

vale a dire che se taglio in P la corda per mantenere l'equilibrio alla forza $\underline{T}'$ ne devo sostituire una uguale e che deve essere al contempo uguale e contraria a $\underline{T}$ applicata immediatamente prima. La forza $\underline{T}$ abbiamo visto essere legata allo spostamento ds della corda perciò forza · spostamento = lavoro

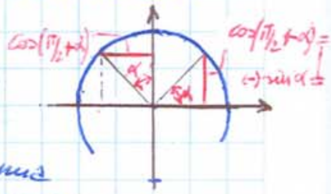
$$dW = \underline{F}\, d\underline{s} = \underline{T}\, d\underline{s}$$
$$= \underline{T}\, d\xi\, \underline{u}_Y$$
$$= \underline{T}\, d\xi\, \underline{u}_T$$
$$= T\, d\xi \cos(\pi/2 + \alpha) =$$

nell'ipotesi di α piccolo $F \begin{cases} dF_x = 0 \\ dF_Y = T(\operatorname{tg}\alpha' - \operatorname{tg}\alpha) \neq 0 \end{cases}$

non vi è spostamento lungo asse x

vi è solo spostamento lungo asse y $\rightarrow ds = d\xi\, \underline{u}_Y$ posto $\underline{u}_T = \underline{u}_Y$ e considerato che T forma con la verticale un angolo pari ad $(\pi/2 + \alpha)$

e ricordando che $\underbrace{\cos(\pi/2+\alpha) = (-)\sin\alpha}$



$$\underbrace{dW = (-)\, T \sin\alpha\, d\xi}$$

Ma non è il lavoro la relazione interessante; stiamo cercando una relazione diversa, guardiamo alla potenza che per definizione si scrive

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt}\left((-) T \sin\alpha\, d\xi\right)$$ anche se α varia, qui lo possiamo assumere come costante

$$= (-) T \sin\alpha \left(\frac{d\xi}{dt}\right)$$ ← velocità di spostamento dell'ampiezza lungo asse y

se ritorniamo qui alla ipotesi di α piccolo $\alpha \approx 0 \rightarrow \sin\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha$

ma $\operatorname{tg}\alpha = \frac{\partial \xi}{\partial x}$ per quanto già visto perciò

$$\underbrace{P = (-)\, T \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial t}}$$

Ma la potenza così com'è ancora non riesco ad usarla nei calcoli operativi. Devo ricordare allora l'equazione di un'armonica sinusoidale (senza onda riflessa) e derivo

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

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial x} = K \xi_0 \cos(Kx - \omega t) \\ \frac{\partial \xi}{\partial t} = (-)\omega \xi_0 \cos(Kx - \omega t) \end{cases} =$$

$$\underbrace{\frac{\partial \xi}{\partial x} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} = (-)\, \omega K \xi_0^2 \cos^2(Kx - \omega t)}$$

$$\underbrace{= \overset{(+)}{(-) T (-)} K\omega\, \xi_0^2 \cos^2(Kx - \omega t)}$$

ecco qui riconoscibile nella funzione $\cos(Kx - \omega t)$ un'armonica del tipo $f(x - vt)$ e, ciò significa che la potenza dell'onda si propaga con la stessa velocità v dell'onda stessa

Introducendo qui il concetto di valor medio, ossia anche se il $\cos^2$ oscilla tra $0 \div 1$ il suo valor medio è $1/2$, possiamo qui definire

$$\boxed{\langle P \rangle = \frac{1}{2} T K \omega\, \xi_0^2}$$ ← POTENZA MEDIA CORDA

Nella realtà la potenza oscilla come $\cos^2$ da zero ad uno nei calcoli si considera il suo valor medio di $1/2$

La potenza di una corda non è proporzionale all'ampiezza ξ_0 massima dell'onda che la percorre ma al suo quadrato ξ_0^2

Fare attenzione che introducendo il valor medio $1/2$ si fa riferimento ad un periodo dell'onda, ed è perciò a tale escursione che si riferisce la potenza media $\langle P \rangle$

Il risultato determinato per la potenza $\langle P\rangle = \frac{1}{2} T K \omega \xi_0^2$, seppur interessante, è limitato al caso dell'onda di una corda; per farlo dobbiamo riesaminare i parametri che caratterizzano l'equazione $(T; K; \omega; \xi)$ e notare che mentre (K, ω, ξ) sono legati al moto armonico, la tensione T unico tra tutti è caratteristico dell'onda di una corda; vediamo di "eliminarlo".

$$v = \sqrt{\frac{T}{m_\ell}} \longrightarrow T = m_\ell v^2 \longrightarrow \langle P\rangle = \frac{1}{2} m_\ell v^2 K \omega \xi_0^2 = \frac{1}{2} m_\ell \, \omega \xi_0^2 v \underbrace{(K v)}_{\omega} = \frac{1}{2} m_\ell \, \omega^2 \xi_0^2 v$$

Se ora considero la corda e dico
S = sezione ortogonale all'asse
l = lunghezza di 1 m

$$m_\ell = \rho \tau = \rho S \cdot 1 = \rho S$$

$$\langle P\rangle = \frac{1}{2} \underbrace{\rho S}_{m_\ell} \, \omega^2 \xi_0^2 v$$

è questa la potenza che si propaga in un mezzo a densità ρ attraverso la superficie S.

La relazione non è più legata intimamente al caso specifico della corda, ma vi è ancora il parametro S che ci riporta al caso specifico, allo scopo definiamo

$$\boxed{\langle I\rangle = \frac{\langle P\rangle}{S} = \frac{1}{2} \rho (\omega \xi_0)^2 v}$$

POTENZA (media) PER UNITA' di AREA

Se facciamo qui un po' di analisi dimensionale si nota che $(\omega \cdot \xi_0) = m/s$ cioè una velocità infatti deve risultare

$$\rho (\omega \xi_0)^2 v = \frac{Kg}{m^3} \frac{m^2}{s^2} \frac{m}{s} = \underbrace{\left(\frac{Kg \cdot m}{s^2}\right)}_{N} m \frac{1}{s} \frac{1}{m^2} = \underbrace{N \cdot m}_{J} \frac{1}{s} \frac{1}{m^2} = \left(\frac{J}{s}\right) \frac{1}{m^2} = \frac{W}{m^2}$$ potenza per unità di area

La conferma di ciò viene anche dalla generica equazione di un moto armonico $x = x_0 \sin(\omega t)$ se deriso ottengo una velocità $v = \frac{dx}{dt} = \underbrace{(\omega x_0)}_{\text{VELOCITA'}} \underbrace{\cos(\omega t)}_{\text{N° PURO}}$; tutto ciò per dire che:

se considero l'unità di volume $\tau = 1 m^3$ del mezzo a densità ρ la sua massa vale $m = \rho$, e pertanto

$$\boxed{w = \frac{1}{2} \rho (\omega \xi_0)^2 = \frac{1}{2} \rho v^{*2}}$$

ENERGIA CINETICA PER UNITA' DI VOLUME

ecco che la potenza (media) per unità di area vale $\boxed{\langle I\rangle = w v}$ e dipende dalla densità di energia per unità di volume w

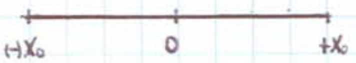
v = velocità propagazione onda

Ricapitoliamo le due importanti proprietà, valide per qualsiasi tipo di onda armonica

- l'intensità (media) di un'onda è proporzionale al quadrato dell'ampiezza del campo $I \propto \xi_0^2$
- l'intensità (media) di un'onda si ottiene moltiplicando la densità di energia per unità di volume (w) per la velocità v di propagazione dell'onda $I = w \cdot v$

Accenniamo qui al caso del moto armonico di equazione

$$\begin{cases} x = x_0 \sin(\omega t) \\ v = (\omega x_0) \cos(\omega t) \end{cases}$$



se vale $(\omega t) = 0 \longrightarrow \cos(\omega t) = 1 \longrightarrow$ energia cinetica massima
se vale $(\omega t) = 1 \longrightarrow \cos(\omega t) = 0 \longrightarrow$ energia cinetica nulla

ESERCIZIO n° 16.1 pagina 481

Un filo teso ha una massa $m = 0,24\ Kg$ ed una lunghezza $L = 2,5\ m$ _ Si vogliono produrre onde armoniche che abbiano ampiezza $A = 0,05\ m$, lunghezza d'onda $\lambda = 0,5\ m$, che si propagano sul filo alla velocità $v = 20\ m/s$ - Calcolare la potenza P_{gen} del generatore, trascurando gli attriti _

RISOLVO

L'ampiezza A del testo è ciò che noi abbiamo indicato con ξ_0 -

La potenza cercata vale $\langle P\rangle = \frac{1}{2} T K \omega \xi_0^2$ e per calcolarla è necessario

- risolvere il moto armonico dell'onda calcolando K ed ω
- determinare la tensione T applicata alla corda

MOTO DELL'ONDA

Ricorrendo al $\omega = Kv$ si ricava $K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{5\cdot10^{-1}} = 4\pi \simeq 12,57$

$$= \frac{2\pi}{\lambda} v = \frac{2\pi}{5\cdot10^{-1}} \cdot 2\cdot10 = 80\pi \simeq 251,3\ rad/s = \omega$$

TENSIONE CORDA

Ricorrendo alla nota $v = \sqrt{\frac{T}{m_\ell}}$ ove la massa lineica vale $m_\ell = \frac{m}{L} = \frac{24\cdot10^{-2}}{2,5} = 0,096\ Kg/m$

$$T = m_\ell v^2 = \frac{L}{m} v^2 = 0,096 \cdot 4\cdot10^2 \simeq 38,4\ N = T$$

La potenza cercata vale $\langle P\rangle = \frac{1}{2} TK\omega\xi_0^2 = \frac{1}{2}\times38,4\times12,57\times251,3\times0,05^2 = 151,6\ W$

$$= \frac{1}{2}\rho(\omega\xi_0)^2 v = \frac{1}{2}\times0,096\times(251,3\times0,05)^2\cdot20 =$$

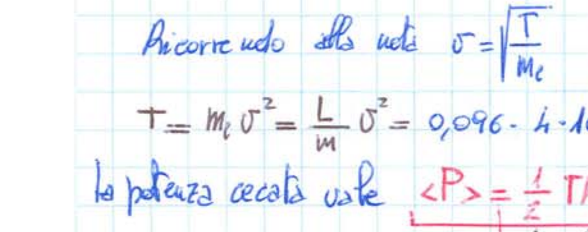
TRUCCHETTO!!!

E' abbastanza difficile ricordare $\omega = Kv$, per il calcolo della velocità, però ricordando la frequenza come $\omega = 2\pi f \rightarrow 2\pi f = Kv = \frac{2\pi}{\lambda} v \rightarrow f = v/\lambda \rightarrow \boxed{f\lambda = v}$ più facile da ricordare che $\omega = Kv$

ESERCIZIO n° 16.2 pagina 481

Un filo di massa $m = 0,24\ Kg$ e lungo $L = 60\ cm$, è sottoposto ad una tensione $T = 80\ N$ _ Un oscillatore elettrico che funziona alla frequenza di $f = 50\ Hz$ genera onde meccaniche sul filo. La potenza dell'oscillatore è $P_{gen} = 350\ W$ _ Calcolare l'ampiezza A delle oscillazioni

RISOLVO



Utilizziamo ancora la relazione $P = \frac{1}{2} m_\ell(\omega\xi_0)^2 v$ ma al contrario. Calcoliamo dunque

$$m_\ell = \frac{m}{L} = \frac{0,24}{0,6} = 0,4\ Kg/m$$

$\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314\ rad/s$ mentre per la velocità dalla nota $v = \sqrt{\frac{T}{m_\ell}}$

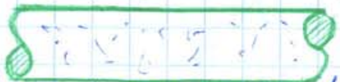
$v = \sqrt{\frac{T}{m_\ell}} = \sqrt{\frac{80}{0,4}} = \sqrt{200} \simeq 14.1\ m/s$ abbiamo tutti gli elementi per calcolare l'ampiezza

$$\xi_0 = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{2P}{v m_\ell}} = \frac{1}{314}\sqrt{\frac{2\times350}{14,1\times0,4}} = 0,0355\ m \simeq 3,55\ cm$$

ONDE SONORE (cenni)

Delle onde sonore vedremo solo alcune relazioni semplici: sono queste dovute alla perturbazione locale delle molecole dalla loro posizione di equilibrio.
La perturbazione si propaga lungo 3 campi:

- ξ DI SPOSTAMENTO lungo la direzione di propagazione $\xi = \xi_0 \sin(Kx - \omega t)$
- p DI PRESSIONE $P - P_0 = P_0 \sin(Kx - \omega t + \phi)$
- ρ DI DENSITA' $\rho - \rho_0 = \Delta\rho \sin(Kx - \omega t + \phi)$



$$\boxed{v = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}}}$$

è questa la relazione che lega la velocità di propagazione dell'onda con il mezzo in cui si diffonde; $\beta = \rho \frac{\partial p}{\partial \rho}$ MODULO DI COMPRESSIBILITÀ DEL GAS ha dimensioni di una pressione $[Pa] = \frac{N}{m^2}$

La rapidità con cui avviene il fenomeno induce a ritenere ADIABATICI i processi di compressione ed espansione del gas, e se questo è considerato gas ideale ($PV = nRT$) attraverso la nota PV^γ, valevole appunto per processi adiabatici REVERSIBILI conduce alla

$\alpha = 20{,}055$ per l'aria, determinato sperimentalmente

T = in gradi Kelvin

$$\boxed{v = \alpha\sqrt{T}}$$

La velocità di propagazione di un'onda sonora in un gas dipende solo
- DALLA SUA TEMPERATURA ASSOLUTA T
- DAL TIPO DI GAS IN CUI SI PROPAGA α

ESERCIZIO n° 16.3 pagina 481

Un'onda sonora piana armonica di pulsazione $\omega = 2\cdot10^3$ rad/s ed intensità $I = 10^{-6}\ W/m^2$, si può propagare in aria ed in acqua, per le quali la densità e velocità di propagazione sono rispettivamente $\rho_1 = 1{,}29\ kg/m^3$; $v_1 = 344\ m/s$; $\rho_2 = 10^3\ kg/m^3$ e $v_2 = 1493\ m/s$. Calcolare:

a) la lunghezza d'onda λ_i nei due mezzi
b) l'ampiezza A_i dell'onda di spostamento
c) l'ampiezza dell'onda di pressione Δp_i

RISOLVO

Con a disposizione l'intensità dell'onda possiamo usare $I = \frac{1}{2}\rho(\omega\xi_0)^2 v$ però il primo quesito chiede il n° di onde

$$\omega = Kv = \frac{2\pi}{\lambda} v \rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{\omega} v$$

$$\lambda_{AIR} = \frac{2\pi}{2\cdot10^3} 344 = 1{,}08\ m$$

$$\lambda_{H_2O} = \frac{2\pi}{2\cdot10^3} 1943 = 4{,}68\ m$$

$$\xi = \frac{1}{\omega}\sqrt{\frac{2I}{\rho v}}$$

$$\xi_{AIR} = \frac{1}{2\cdot10^3}\sqrt{\frac{2\cdot10^{-6}}{1{,}29\cdot344}} = 5\cdot10^{-4}\sqrt{\frac{2}{1{,}29\cdot3{,}44}\cdot10^{-8}} = 3.36\cdot10^{-8}\ m$$

$$\xi_{H_2O} = \frac{1}{2\cdot10^3}\sqrt{\frac{2\cdot10^{-6}}{10^{+3}\cdot1493}} = 5\cdot10^{-4}\sqrt{\frac{2}{1{,}493}\,10^{-}} = 5.79\cdot10^{-10}\ m$$

Il quesito (c) non è stato da noi studiato, ma viene risolto attraverso una semplice formula

$$\boxed{(\Delta p_{max}) = \rho\,\omega\,\xi\,v}$$

AMPIEZZA ONDA DI PRESSIONE

$$(\Delta p)_{max\ AIR} = 1{,}29\cdot2\cdot10^3\cdot3{,}36\cdot10^{-8}\cdot344 = 0{,}03\ Pa$$

$$(\Delta p)_{max\ H_2O} = 10^3\cdot2\cdot10^3\cdot5{,}79\cdot10^{-7}\cdot1493 = 1{,}73\ Pa$$

PRESSIONE SONORA MASSIMA

FUORI TEMA

- temperatura dell'aria: dalla $v = \alpha\sqrt{T} \rightarrow T = \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 = \left(\frac{344}{20{,}055}\right)^2 = 294.22\,K \simeq 21°C$
- Frequenza $f = \frac{\omega}{2\pi} = f_{AIR} = f_{H_2O} = 318\ Hz$
- periodo $T = \frac{1}{F} = 0{,}003\ s = 3\ ms$
- LIVELLO SONORO in decibel; assunto che la soglia minima di udibilità $I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$ nell'aria

$$\boxed{B = 10\log_{10}\frac{I}{I_0}} \rightarrow B = 10\log\frac{10^{-6}}{10^{-12}} = 10\log 10^6 = 10\cdot6 = 60\,dB$$