Onde elastiche

Mauro Saita
e-mail: maurosaita@tiscalinet.it

[1].

Queste note costituiscono un elenco sintetico e non esaustivo degli argomenti trattati a lezione. Non hanno lo scopo di sostituire il libro di testo, bensì di integrarlo.

[1]Nome del file "tex": onde_meccaniche_2013.tex

1 Onde elastiche

1. `Onde.`

   Un'`onda` è una perturbazione che si propaga (nello spazio, nel piano, lungo una retta) trasportando energia e quantità di moto, ma senza trasporto di materia.

2. `Onde elastiche e onde elettromagnetiche.`

   Le *onde elastiche* sono quelle onde che per propagarsi necessitano di un mezzo (una corda, una molla, l'aria, un solido eccetera). Le *onde elettromagnetiche* (le onde radio, la luce, i raggi infrarossi, ultravioletti, i raggi X eccetera) si propagano anche nel vuoto con velocità $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Possono attraversare anche mezzi materiali ma in tal caso la velocità di propagazione diminuisce.

   Un'onda si dice *trasversale* se la direzione di oscillazione dei suoi punti è perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. Sono onde trasversali quelle generate da un sasso gettato nell'acqua, le onde generate dal movimento verticale di una corda tesa, le onde elettromagnetiche. Un'onda si dice *longitudinale* se la direzione di oscillazione dei suoi punti è parallela alla direzione di propagazione dell'onda. Sono onde longitudinali quelle generate dalla compressione di una molla, il suono.

3. `Onda armonica semplice.`

   Uno dei modi più semplici per generare una *singola* onda è quello di imprimere all'estremità di una corda tesa orizzontalmente un semplice movimento verticale (da O a $+A$, da $+A$ a $-A$ e infine da $-A$ a O) detto *impulso.* Ogni singola particella della corda rimane ferma fino a che non viene raggiunta dall'impulso che le è stato impresso: la particella inizia allora a muoversi in direzione verticale per un breve intervallo di tempo e poi di nuovo si ferma.

   Si supponga ora che l'impulso impresso alla corda descriva un moto armonico semplice di periodo T. L'onda che si genera nella corda è detta *onda armonica semplice* e il suo grafico è una sinusoide. Se si immagina di scattare una fotografia all'istante T la configurazione della corda sarà la seguente

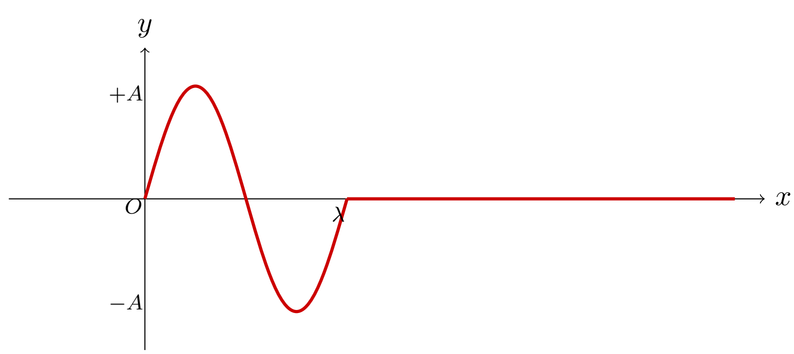

Figura 1: Configurazione della corda all'istante T. La lunghezza d'onda è pari a λ.

e la sua equazione è

$$y = \begin{cases} A \sin\left(\dfrac{2\pi}{\lambda} x\right) & \text{se } 0 \le x \le \lambda \\ \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

Con il trascorrere del tempo l'onda rappresentata in figura 1 si propaga nella direzione dell'asse x con velocità costante $\mathbf{v}$. Pertanto al tempo $T+t$ il grafico dell'onda è traslato orizzontalmente verso destra del vettore $\mathbf{v}t$; la sua configurazione è questa

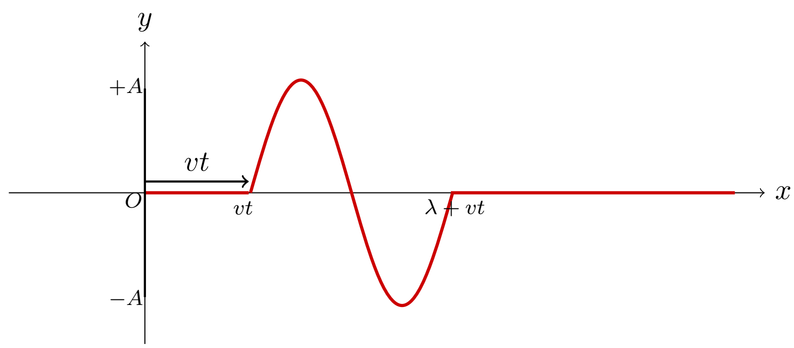

Figura 2: Configurazione dell'onda al tempo $T + t$.

L'equazione dell'onda diventa

$$y = \begin{cases} A \sin \dfrac{2\pi}{\lambda}(x - vt) & \text{se } vt \le x \le \lambda + vt \\ \\ 0 & \text{altrove} \end{cases}$$

4. `Equazione d'onda armonica.`

   Posto $v = \dfrac{\lambda}{T}$, l'uguaglianza

$$y = A \sin \frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)$$

diventa

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t\right) \tag{1.1}$$

L'uguaglianza (1.1) si chiama *equazione d'onda armonica*. Essa dipende da due variabili: la variabile spaziale x e la variabile temporale t

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

Se si fissa il tempo.

In un prefissato istante di tempo t_0, la funzione $y = y(x, t_0)$ dipende della sola variabile x. Quindi la funzione $y = y(x, t_0)$ fornisce lo spostamento subito da ogni punto del mezzo di ascissa x nell'istante prefissato t_0. Il grafico di tale funzione (nel piano xy) è l'istantanea del treno di onde all'istante t_0.

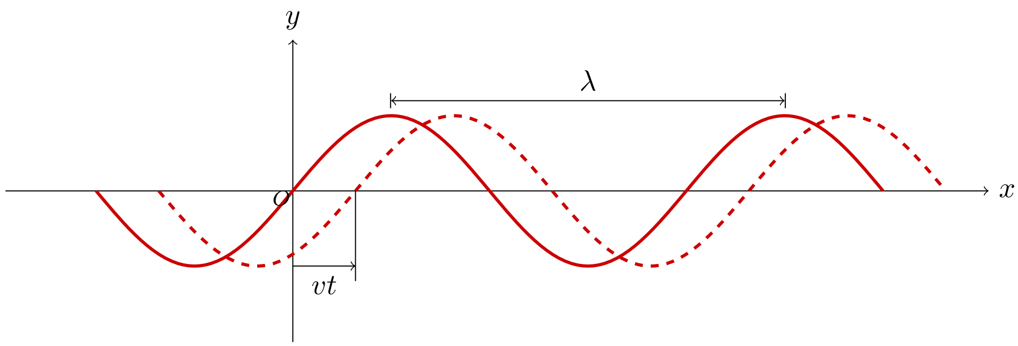

Figura 3: Grafico dell'onda all'istante $t = 0$ (linea rossa continua) e grafico dell'onda all'istante t (linea rossa tratteggiata).

La funzione $y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t_0\right)$ assume gli stessi valori in x, $x + \lambda$, $x + 2\lambda$ ... (Esercizio). La lunghezza d'onda λ è il *periodo spaziale* dell'onda.

Se si fissa lo spazio.

Se si fissa l'attenzione su un punto specifico del mezzo, per esempio sul punto di ascissa x_0, la funzione $y = y(x_0, t)$ dipende dalla sola variabile t; tale funzione fornisce la legge oraria del punto del mezzo di ascissa x_0. Il grafico di tale funzione sta nel piano ty.

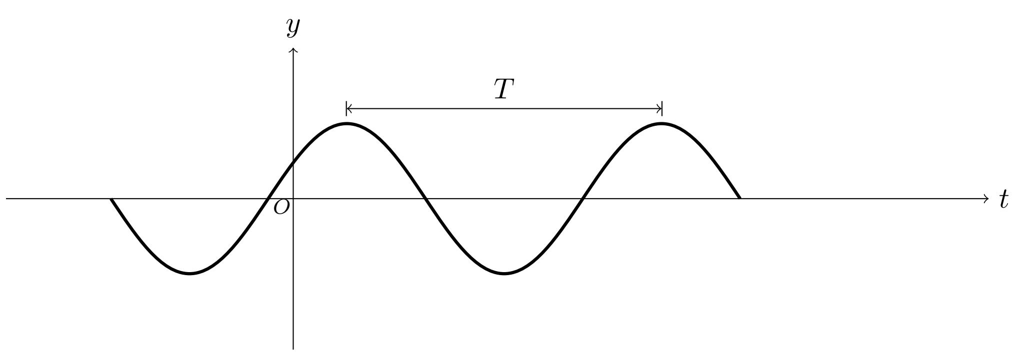

Figura 4: Legge oraria del punto del mezzo di ascissa x_0.

La funzione $y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t_0\right)$ assume gli stessi valori in t, $t + T$, $x + 2T$ ... (Esercizio). Il periodo dell'onda $T = \frac{2\pi}{\omega}$ è il *periodo spaziale* dell'onda.

——— ——— ———

L'equazione d'onda armonica si scrive, in forma compatta così

$$y = A\sin(kx - \omega t) \tag{1.2}$$

dove $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ è il *numero d'onda* (numero di lunghezze d'onda contenute in una distanza pari a 2π) e $\omega = \frac{2\pi}{T}$ è la *pulsazione*. Inoltre lunghezza d'onda e periodo sono legati dalla relazione $\lambda = vT$. Ne segue

$$\lambda f = v \tag{1.3}$$

Nell'equazione (1.2) si suppone che al tempo $t = 0$ e in $x = 0$ lo spostamento y sia nullo ma ovviamente non è sempre così. L'equazione d'onda armonica, nella sua forma più generale è

$$y = A\sin(kx - \omega t - \Phi) \tag{1.4}$$

dove Φ è detta *costante di fase*.

5. `Velocità di propagazione dell'onda.`

   La velocità v di propagazione di un'onda è $v = \dfrac{\lambda}{T}$, cioè lunghezza d'onda (λ) diviso periodo (T). Quindi

   $$v = \lambda f$$

   dove f è la frequenza di oscillazione.

   Per un'onda elastica di data frequenza la velocità di propagazione v dipende esclusivamente dalle caratteristiche fisiche del mezzo, cioè dalle sue proprietà elastiche e inerziali. Ad esempio, nel caso di onde che si propagano lungo una corda tesa l'elasticità del mezzo (la corda) si misura mediante la sua tensione F: aumentando la tensione aumenta la forza elastica di richiamo che si esercita su un elemento della corda quando questo si trova in una posizione diversa da quella di equilibrio. La proprietà inerziale si misura mediante la densità (lineare) μ della corda (μ è la massa per unità di lunghezza).

   Sperimentalmente si verifica che

   $$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \tag{1.5}$$

6. `Interferenza.` Con il termine di interferenza si intendono tutti quei fenomeni che si verificano quando in una certa regione dello spazio si sovrappongono sistemi di onde che provengono da sorgenti distinte (e con direzioni di propagazione che possono essere diverse tra loro).

7. `Principio di sovrapposizione.`

Si verifica sperimentalmente che due perturbazioni ondulatorie aventi direzioni di propagazione differenti possono “attraversarsi” e poi proseguire nel loro cammino senza influenzarsi reciprocamente: un sistema di onde, dopo essere stato attraversato da un altro, mantiene le stesse caratteristiche che aveva in precedenza.

Nella zona di sovrapposizione, lo spostamento istantaneo di un punto del mezzo (rispetto alla sua posizione di equilibrio) è dato dalla somma algebrica degli spostamenti che gli verrebbero impressi separatamente dalle singole perturbazioni (*principio di sovrapposizione*).

L’applicabilità del principio di sovrapposizione è limitata al non superamento dei limiti di elasticità del mezzo, cioè il principio è valido se le “forze di richiamo”del mezzo si mantengono proporzionali agli spostamenti, secondo la legge di Hooke.

Interferenza di due sistemi di onde armoniche con stessa direzione, ampiezza e frequenza.

Si considerino due sistemi di onde armoniche che si propagano nella stessa direzione, con uguale ampiezza e frequenza ma con una differenza di fase pari a Φ. Le due equazioni d’onda sono

$$y_1 = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) \tag{1.6}$$

$$y_2 = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t - \Phi\right) \tag{1.7}$$

Per il principio di sovrapposizione l’onda risultante è data dalla somma delle due onde componenti, cioè

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right) + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t - \Phi\right) \end{aligned} \tag{1.8}$$

Utilizzando le formule di prostaferesi si ottiene

$$y = \left[2A\cos\frac{\Phi}{2}\right] \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t - \frac{\Phi}{2}\right) \tag{1.9}$$

L’onda risultante ha ampiezza $2A\cos\frac{\Phi}{2}$ e pulsazione (frequenza e lunghezza d’onda) uguale a quella delle onde componenti.

<u>Analisi di due casi particolari.</u>

- $\Phi = 0$. Le due onde componenti y_1 e y_2 sono in fase; a ogni cresta di y_1 corrisponde una cresta di y_2 e a ogni gola di y_1 corrisponde una gola di y_2 (e viceversa). L'onda risultante $y = y_1 + y_2$ ha ampiezza $2A$ e stessa pulsazione di y_1 e y_2.

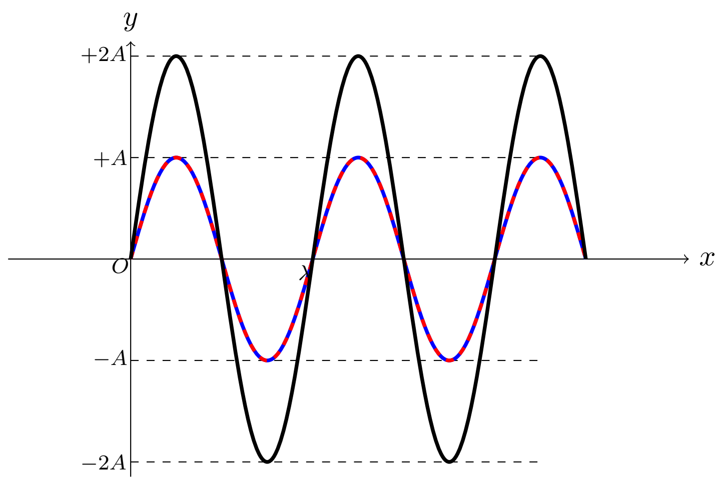

Figura 5: Interferenza costruttiva. Le onde y_1 e y_2, di colore rosso e blu, sono in fase. L'onda risultante $y = y_1 + y_2$ è quella di colore nero.

- $\Phi = \pi$. Le due onde componenti y_1 e y_2 sono in opposizione di fase; a ogni cresta di y_1 corrisponde una gola di y_2 e a ogni gola di y_1 corrisponde una cresta di y_2 (e viceversa). L'onda risultante $y = y_1 + y_2$ ha ampiezza nulla.

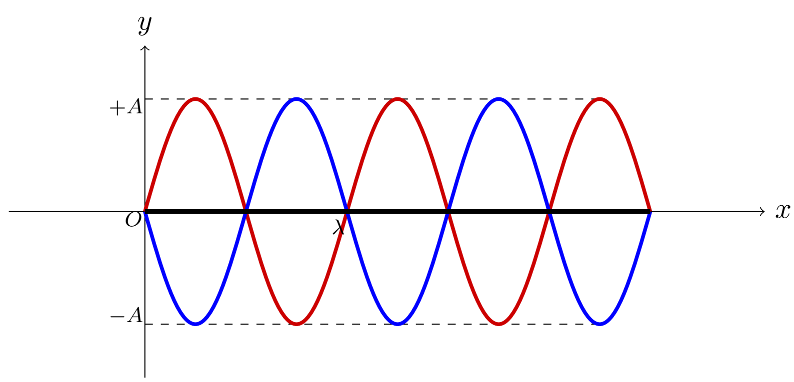

Figura 6: Interferenza distruttiva. L'onda y_1 è quella di colore rosso mentre y_2 ha colore blu. L'onda risultante $y = y_1 + y_2$ è nulla.

8. `Onde stazionarie. (Il caso di onde che si propagano lungo una corda)`

   Onde riflesse. Si ricordi l'esperimento realizzato in laboratorio in cui un'onda (incidente) si propaga lungo una corda tesa preventivamente fissata a un'estremità. Quando l'onda raggiunge il morsetto di bloccaggio questo genera un'onda (riflessa) che si propaga in verso opposto lungo la corda. L'onda riflessa risulta capovolta rispetto all'onda incidente (la spiegazione di questo fatto è lasciata per esercizio).

In modo analogo, se un treno di onde incide sul morsetto di bloccaggio quest ultimo genera un treno di onde riflesse. Onde incidenti e onde riflesse si sommano secondo il principio di sovrapposizione.

Le equazioni di due treni di onde che si propagano lungo una corda con frequenza, velocità e ampiezza uguali ma in *versi opposti* sono

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t) \tag{1.10}$$

$$y_2 = A \sin(kx + \omega t) \tag{1.11}$$

La risultante è

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t) \\ &= 2A(\sin kx)(\cos \omega t) \end{aligned}$$

L'uguaglianza

$$y = 2A(\sin kx)(\cos \omega t) \tag{1.12}$$

è l'equazione di un'*onda stazionaria.* Si consideri ora una particella della corda, per esempio quella che occupa la posizione x_0: essa vibra (in direzione verticale) di moto armonico semplice e l'ampiezza della vibrazione è

$$2A(\sin kx)$$

L'ampiezza di oscillazione di ogni singola particella della corda *non* è la stessa per tutte le particelle. Ciò che caratterizza un'onda stazionaria è proprio questo fatto: *l'ampiezza di oscillazione di ogni singola particella della corda varia con la posizione della particella stessa.*

Le particelle che hanno oscillazione massima ($2A$) sono quelle per cui si ha $\sin kx = \pm 1$, cioè $kx = \frac{\pi}{2} + n\pi$ dove $n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$

Ricordando che $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ si ottiene $\frac{2\pi}{\lambda} x = \frac{\pi}{2} + n\pi$, cioè

$$x = \frac{\lambda}{4} + n\frac{\lambda}{2} \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

Pertanto, i punti della corda che hanno oscillazione massima (pari a $2A$) sono

$$x = \frac{\lambda}{4}, \quad x = \frac{\lambda}{4} + \frac{\lambda}{2} = \frac{3}{4}\lambda, \quad x = \frac{\lambda}{4} + \lambda = \frac{5}{4}\lambda, \quad x = \frac{\lambda}{4} + 3\frac{\lambda}{2} = \frac{7}{4}\lambda \quad \ldots$$

Essi si chiamano *ventri*: il primo si trova a un quarto della lughezza d'onda, gli altri sono intervallati di mezza lunghezza d'onda.

Le particelle che hanno oscillazione nulla sono quelle per cui si ha $\sin kx = 0$, cioè $kx = n\pi$ dove $n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$. Ponendo, anche in questo caso, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ si ottiene

$$x = n\frac{\lambda}{2} \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

ovvero

$$x = 0, \quad x = \frac{\lambda}{2}, \quad x = \lambda, \quad x = \frac{3}{2}\lambda \ldots$$

Questi punti si chiamano *nodi* e anche essi sono intervallati di mezza lunghezza d'onda ($\frac{\lambda}{2}$). Un ventre e un nodo adiacenti distano $\frac{\lambda}{4}$, cioè un quarto della lunghezza d'onda.

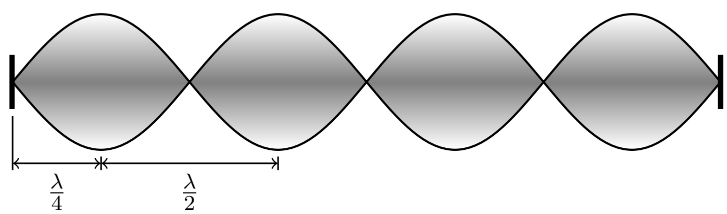

Figura 7: Onde stazionarie.

Affinchè si possa realizzare un'onda stazionaria è necessario che la semilunghezza d'onda sia contenuta un numero intero n di volte nella lunghezza della corda; in altre parole, si hanno onde stazionarie quando

$$L = n\frac{\lambda}{2}, \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

dove L è la lunghezza della corda.

Quindi le lunghezze d'onda possibili affinchè si realizzi un'onda stazionaria sono tutte e sole quelle date dall'uguaglianza

$$\lambda = \frac{2L}{n}, \qquad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$$

9. `Risonanza.`

Il fenomeno di risonanza si verifica tutte le volte che un sistema fisico viene sottoposto a sollecitazioni di frequenza uguale a una delle frequenze proprie del sistema stesso. In questa situazione le vibrazioni del sistema assumono ampiezze crescenti. Se l'ampiezza di oscillazione supera i carichi di rottura del sistema esso viene irreversibilmente danneggiato e in certi casi il sistema può collassare. In rete è possibile trovare molti video che descrivono questo fenomeno, per esempio

- *Tacoma Narrows Bridge* (Tacoma,1940). La risonanza, dovuta al vento trasversale, ha causato oscillazioni di ampiezza via via crescente, fino al collasso dell'intera struttura.

http://www.youtube.com/watch?v=qDcnEPekWpk

- *Millenium Bridge* (Londra, 2000). Dopo l'inaugurazione venne chiuso per due anni durante i quali si realizzarono degli ammortizzatori allo scopo di controllare la risonanza laterale del ponte dovuta ai passi dei pedoni.

http://www.youtube.com/watch?v=gQK21572oSU

- Il ponte sul fiume Volga (Stalingrado, 2009). Il forte vento ha reso necessaria la chiusura del ponte per motivi di sicurezza.

http://www.youtube.com/watch?v=yQbSWnstQLA

- Per quanto riguarda il fenomeno di *risonanza acustica* si veda

http://www.youtube.com/watch?v=qy1c5_vYTVo

10. `Battimenti.` Si considerino due onde armoniche di uguale ampiezza e diversa pulsazione (si supponga, ad esempio, $\omega_1 > \omega_2$)

$$y_1 = A\sin(k_1 x + \omega_1 t)$$

$$y_2 = A\sin(k_2 x + \omega_2 t)$$

e si fissi un punto x, diciamo $x = 0$, del quale si vogliono studiare gli spostamenti (le oscillazioni) in funzione del tempo. Le equazioni delle due onde assumono la forma

$$y_1 = A\sin(\omega_1 t)$$

$$y_2 = A\sin(\omega_2 t)$$

Per il principio di sovrapposizione si ottiene

$$\begin{aligned} y &= y_1 + y_2 \\ &= A\left[\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t)\right] \\ &= 2A\left[\cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t\right) \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right)\right] \end{aligned}$$

Se le due onde hanno frequenze quasi uguali, cioè se $\omega_1 \approx \omega_2$ l'argomento $\frac{\omega_1-\omega_2}{2}$ del coseno è un numero piccolo mentre l'argomento $\frac{\omega_1+\omega_2}{2}$ del seno è un numero grande. L'onda risultante ha per pulsazione la media aritmetica delle pulsazioni componenti

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

mentre l'ampiezza della vibrazione è fornita dal termine

$$2A \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t\right)$$

In figura è rappresentato il grafico di una funzione di questo tipo.

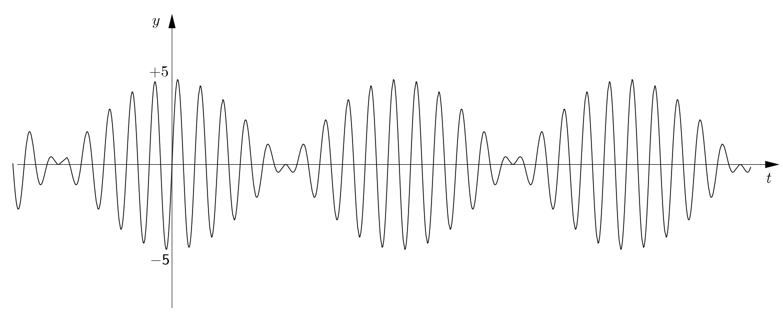

Figura 8: Grafico della funzione $\mathbb{R} \xrightarrow{f} \mathbb{R}$, $f(t) = 5\cos(0.2t)\sin(4t)$.

Dalla rete: http://www.youtube.com/watch?v=i7gcaDXdr94

2 Il suono

11. `Onde sonore.`

Le onde sonore che si propagano in un mezzo gassoso (per esempio, nell'aria) sono generate dalle vibrazioni meccaniche di un corpo (per esempio un diapason). Le molecole d'aria vicine al corpo vibrante iniziano a oscillare e causano una variazione locale della pressione atmosferica. Lungo tutte le direzioni uscenti dalla sorgente si generano *onde di pressione*, cioè zone di compressione dell'aria che si alternano a zone di rarefazione.

- L'onda sonora è *longitudinale* in quanto l'oscillazione delle molecole d'aria avviene nella stessa direzione di propagazione dell'onda.

- Se il mezzo di propagazione è isotropo l'onda è *sferica*; essa si propaga con la medesima velocità lungo tutte le direzioni uscenti da una sorgente puntiforme.

12. `Velocità del suono.`

• La velocità del suono in un mezzo elastico varia al variare della temperatura. A 0 C° la velocità del suono nell'aria è $331,4$ m/s ($1193,04$ km/h) mentre a 20 C°

$$\texttt{velocità del suono} = 343,8 \text{ m/s}$$

cioè $1236,24$ km/h. La dipendenza della velocità dalla temperatura si può interpretare così: le oscillazioni delle molecole d'aria si trasmettono tanto più rapidamente quanto più alta è la loro energia cinetica media; quest'ultima è a sua volta proporzionale alla temperatura. In ultima analisi la velocità dipende da una proprietà "elastica" del mezzo. D'ora in poi, salvo avviso contrario, si farà riferimento alla temperatura di 20 C°.

• La velocità del suono varia al variare del mezzo di propagazione: nell'acqua è di 1484 m/s, nel vetro di 5300 m/s e nel granito di 6200 m/s.

• Lunghezza d'onda delle onde sonore nell'aria.

Esempio. Se una sorgente sonora emette un suono con frequenza di 440 Hz (il 'La' centrale della scala musicale) la lunghezza d'onda dell'onda sonora è

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343,8 \text{ m/s}}{440 \text{ Hz}} = 0,78 \text{ m}$$

13. `Limiti di udilibilità dell'orecchio umano.`

L'orecchio umano è in grado di percepire suoni con frequenze molto diverse: da circa 20 Hz fino a 20000 Hz. Con il crescere dell'età si perde la capacità di sentire le alte frequenze (esperienza in laboratorio).

14. `Tubo di interferenza (di Quinke).`

Descrizione. Il treno d'onde prodotto da un'unica sorgente sonora si divide, segue due percorsi di diversa lunghezza lungo il tubo e poi si ricongiunge nel punto di uscita. Variando la lunghezza dei percorsi si creano condizioni di interferenza costruttiva e di interferenza distruttiva.

Caso di una sorgente di 1700 Hz. La lunghezza d'onda è $\lambda = \frac{343,8 \text{ m/s}}{1700 \text{ Hz}} \approx 0,20$ m; quindi allungando uno dei due *percorsi* del tubo di $\Delta l = \frac{\lambda}{2}, \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \ldots$ si ha interferenza distruttiva (silenzio). Viceversa per $\Delta l = 0, \lambda, 2\lambda, \ldots$ si ha interferenza costruttiva (massima sonorità).

15. `Effetto Doppler.`

L'effetto Doppler consiste nella differenza tra la frequenza percepita da un ricevitore e la frequenza effettivamente emessa da una sorgente quando tra ricevitore e sorgente vi è moto relativo.

Si consideri la seguente situazione: sorgente S e ricevitore R si muovono lungo la congiungente SR con velocità inferiori alla velocità v di propagazione delle onde nel mezzo; occorre distinguere due casi.

1. *Sorgente in moto e ricevitore fermo rispetto al mezzo* (figura 9).

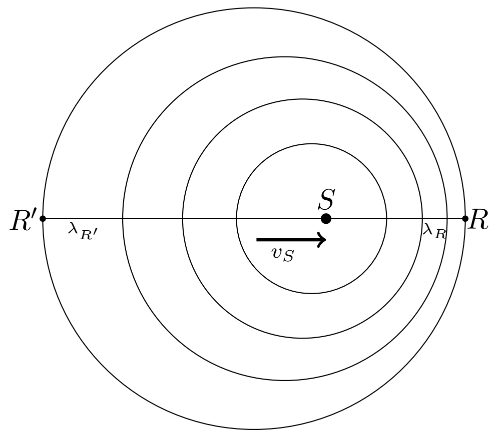

Figura 9: Effetto Doppler. La sorgente si avvicina al ricevitore R e si allontana da R'.

Siano λ, f e T la lunghezza d'onda, la frequenza e il periodo delle onde emesse da S.

Se la sorgente si muove orizzontalmente da sinistra verso destra con velocità v_S e si *avvicina* al ricevitore i fronti d'onda si "addensano" in prossimità di R. La lunghezza d'onda λ_R misurata da R risulta essere

$$\lambda_R = \lambda - v_S T = \frac{v}{f} - \frac{v_S}{f} = \frac{v - v_S}{f} \tag{2.1}$$

mentre la frequenza percepita è

$$f_R = \frac{v}{\lambda_R} = \frac{v}{v - v_S} f \tag{2.2}$$

Le uguaglianze (2.1) e (2.2) valgono sia quando sorgente e ricevitore si avvicinano sia quando si allontanano: basta scegliere $v_S > 0$ in caso di avvicinamento e $v_S < 0$ in caso di allontanamento.

2. *Sorgente ferma rispetto al mezzo e ricevitore in moto* .

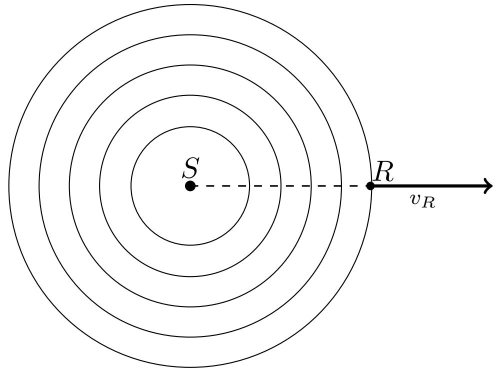

Figura 10: Effetto Doppler. Il ricevitore si allontana dalla sorgente.

Si supponga che R si stia allontanando dalla sorgente (ferma) con velocità v_R. In questo caso la lunghezza d'onda misurata da R coincide con la lunghezza d'onda che lo stesso ricevitore misurerebbe se fosse in quiete

$$\lambda_R = \lambda \tag{2.3}$$

mentre la frequenza percepita è

$$f_R = \frac{v - v_R}{\lambda} = \frac{v - v_R}{v}\, f \tag{2.4}$$

In caso di allontanamento del ricevitore $v_R > 0$ e $0 < \dfrac{v - v_R}{v} < 1$; di conseguenza la frequenza percepita è minore rispetto a quella effettivamente emessa dalla sorgente.

L'uguaglianza (2.4) vale anche quando il ricevitore si avvicina alla sorgente pur di scegliere $v_R < 0$. La quantità $\dfrac{v - v_R}{v}$ risulta maggiore di uno e pertanto la frequenza percepita è maggiore rispetto a quella emessa dalla sorgente.

Le uguaglianze (2.2) e (2.4) si possono sintetizzare in un'unica formula

$$f_R = \frac{v - v_R}{v - v_S}\, f \tag{2.5}$$

Osservazioni.

1. Se $v_R = v_S$ (stesse intensità e stesso verso) allora $f_R = f$

2. L'uguaglianza (2.5) non è simmetrica e quindi *non è simmetrico l'effetto Doppler*. Esempi.

16. `Onda d'urto`

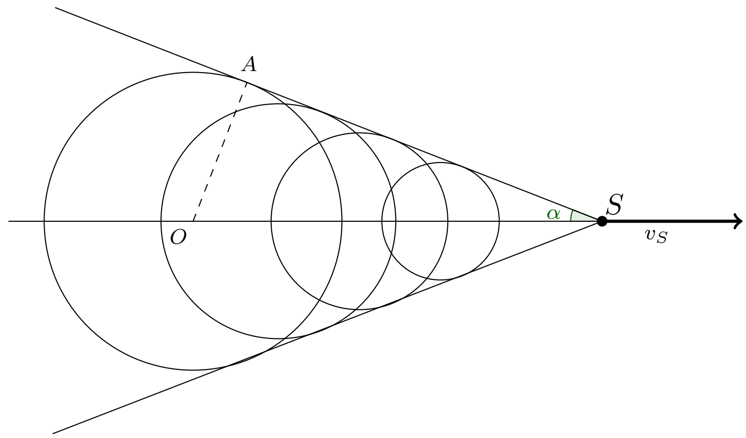

Figura 11: Onda d'urto.

Si verifica quando la velocità v_S della sorgente supera la velocità di propagazione delle onde. Da $v_S > v$ segue che la sorgente precede i fronti d'onda. Si forma così un fronte d'onda conico che inviluppa i singoli fronti d'onda, con il vertice nella sorgente. Con riferimento alla figura 11: $OA = vt$, $OS = v_S t$ e $\sin\alpha = \frac{v}{v_S}$, dove α è l'angolo di semiapertura del cono. Il numero $\frac{v_S}{v}$ si chiama *numero di Mach*.

Il fronte conico costituisce l'onda d'urto; in certi casi, l'addensarsi su di esso dei fronti delle onde di pressione, può causare variazioni di pressione tali da causare effetti distruttivi.

Esempi: la scia creata da un motoscafo, i 'bang' provocati dal passaggio di un aereo supersonico, l'onda d'urto provocata dall'esplosione di una bomba (i cui frammenti si allontanano inizialmente a velocità superiore a quella del suono).

3 Fenomeni legati alla propagazione di onde

17. `Principio di Huygens.` Si consideri una sorgente S di onde sferiche. Ogni punto dello spazio raggiunto dalla perturbazione ondulatoria si comporta a sua volta come una nuova sorgente di onde nei confronti di quelle zone del mezzo non ancora investite dalla perturbazione. In altre parole, ogni punto del fronte d'onda si comporta come una nuova sorgente di onde. Le "nuove" onde hanno le stesse caratteristiche dell'onda primaria (stessa lunghezza d'onda, stessa frequenza e velocità).

18. `Diffrazione.` La diffrazione è il fenomeno in base al quale le onde riescono ad aggirare gli ostacoli, propagandosi dietro di essi anche in direzioni diverse da quella di provenienza.

    Nel caso della luce si chiama *diffrazione* qualunque deviazione di un raggio luminoso non imputabile a riflessione o rifrazione (Arnold Sommerfeld, Optics, Academic press, New York,1954).

    - Una fenditura avente dimensioni lineari confrontabili con la lunghezza d'onda, si comporta come una nuova sorgente (Principio di Huygens). Nella regione di spazio circostante essa genera onde in tutte le direzioni.

    - Ai bordi di un ostacolo si generano sistemi di onde che permettono al fronte d'onda principale di ricomporsi a una certa distanza dietro l'ostacolo, come se l'ostacolo non fosse esistito.

    - La diffrazione delle onde sonore ci permette di udire suoni provenienti da sorgenti che si trovano dietro ostacoli e aperture di dimensioni dell'ordine del metro.