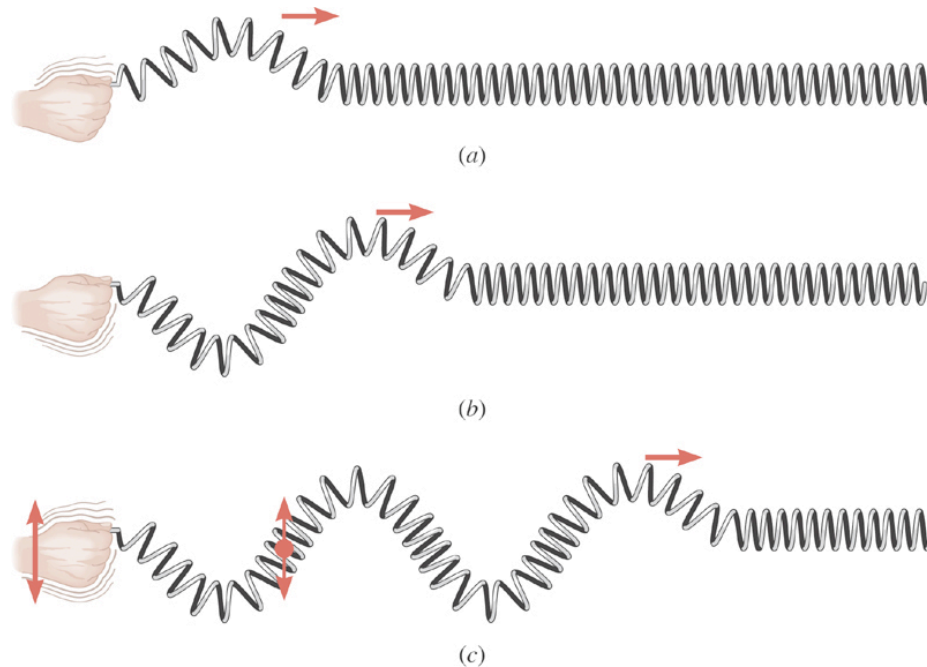


# *Capitolo 12*

## *Le onde e il suono*

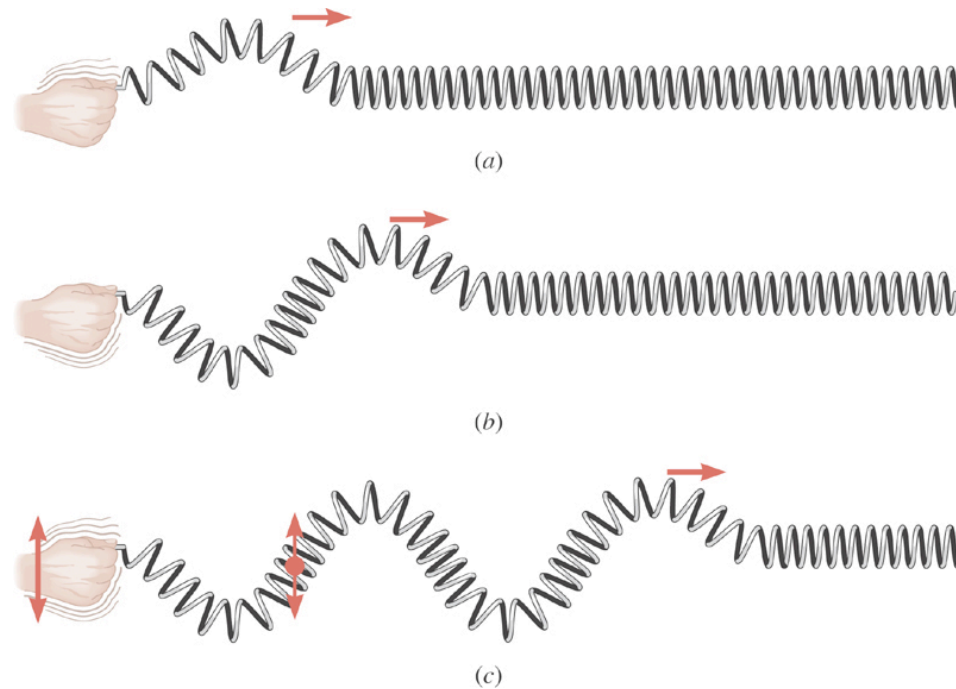
## 12.1 *La natura delle onde*

1. Un'onda è una perturbazione che si propaga nello spazio.
2. Un'onda trasporta energia da un posto a un altro.



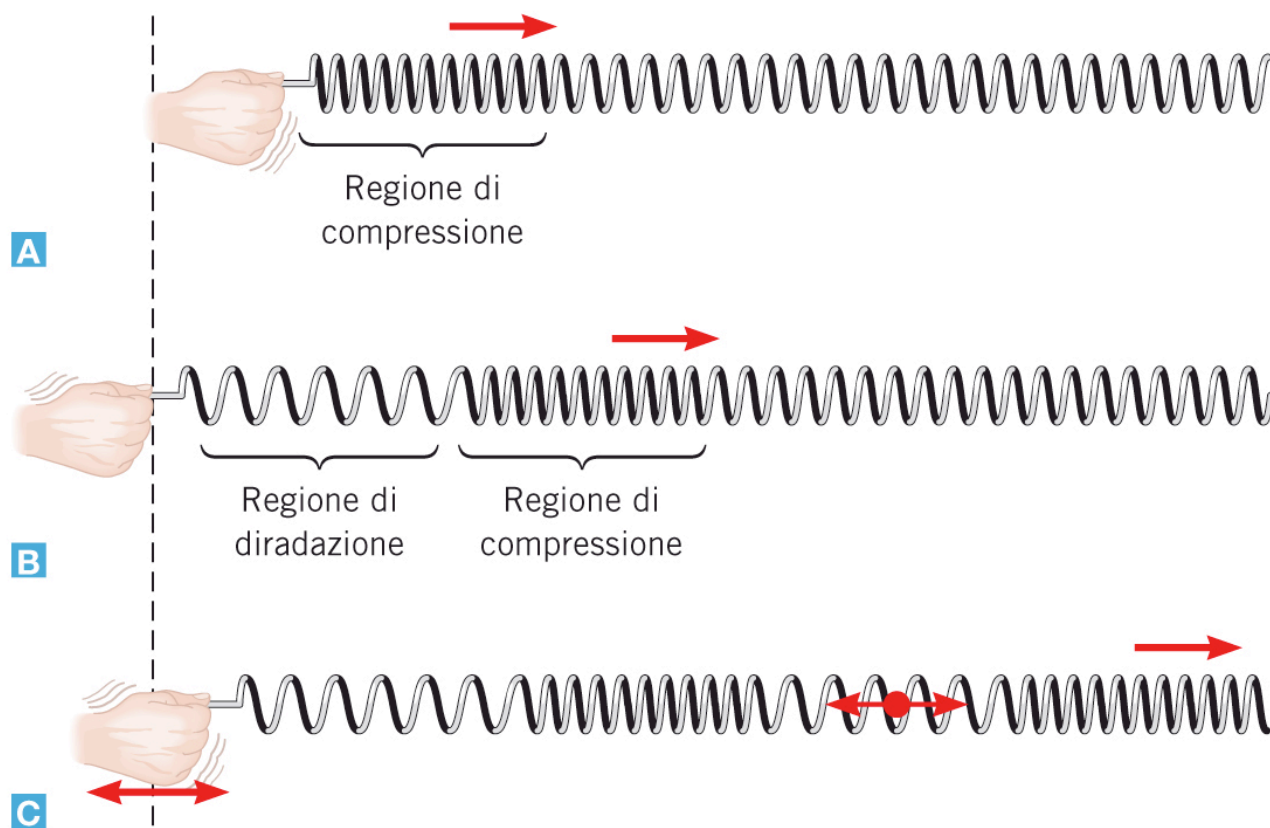
## 12.1 *La natura delle onde*

### *Onda trasversale*



## 12.1 La natura delle onde

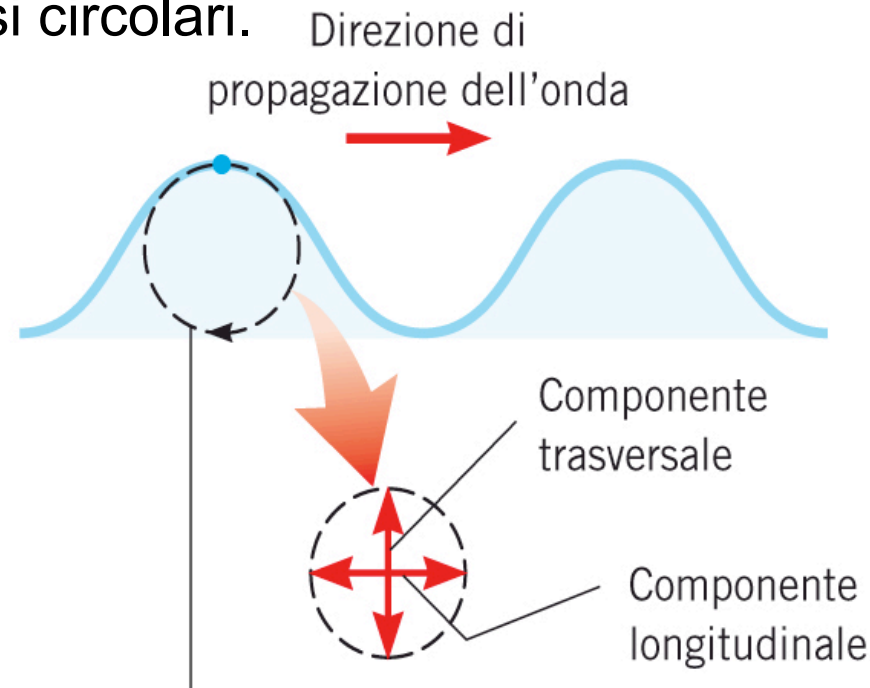
### ***Onda longitudinale***





## 12.1 La natura delle onde

Le onde sull'acqua non sono né trasversali né longitudinali, perché le particelle vicino alla superficie dell'acqua descrivono traiettorie quasi circolari.

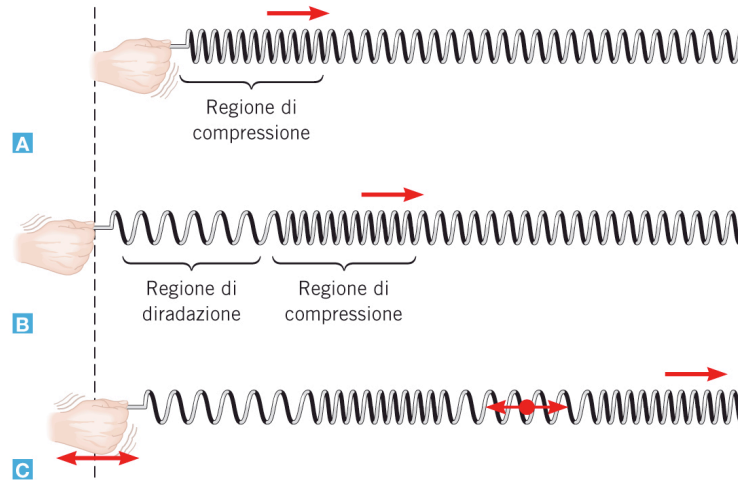
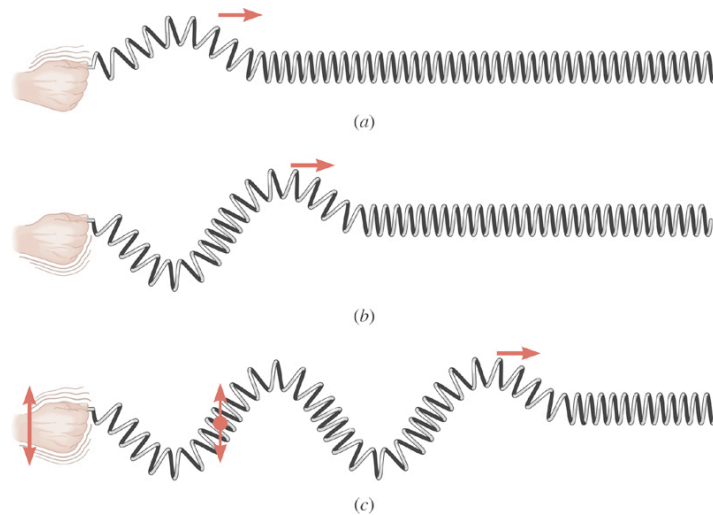


Una particella vicina alla superficie dell'acqua descrive una traiettoria circolare quando è investita da un'onda

## 12.2 Onde periodiche

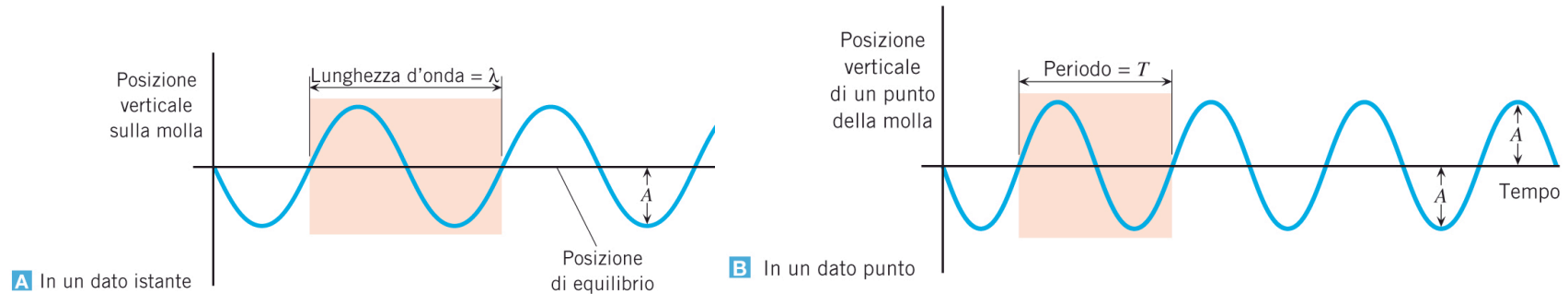
Le **onde periodiche** sono costituite da *cicli*, cioè da fenomeni che si ripetono uguali a se stessi con un ritmo regolare.

Nelle due figure in basso, per esempio, un ciclo completo delle onde è costituito da un'oscillazione armonica di ogni punto della molla intorno alla sua posizione di equilibrio.



## 12.2 Onde periodiche

Un **ciclo** è la parte colorata di rosa.



L'**ampiezza  $A$  dell'onda** è lo spostamento massimo dalla posizione d'equilibrio di un punto del mezzo in cui si propaga l'onda.

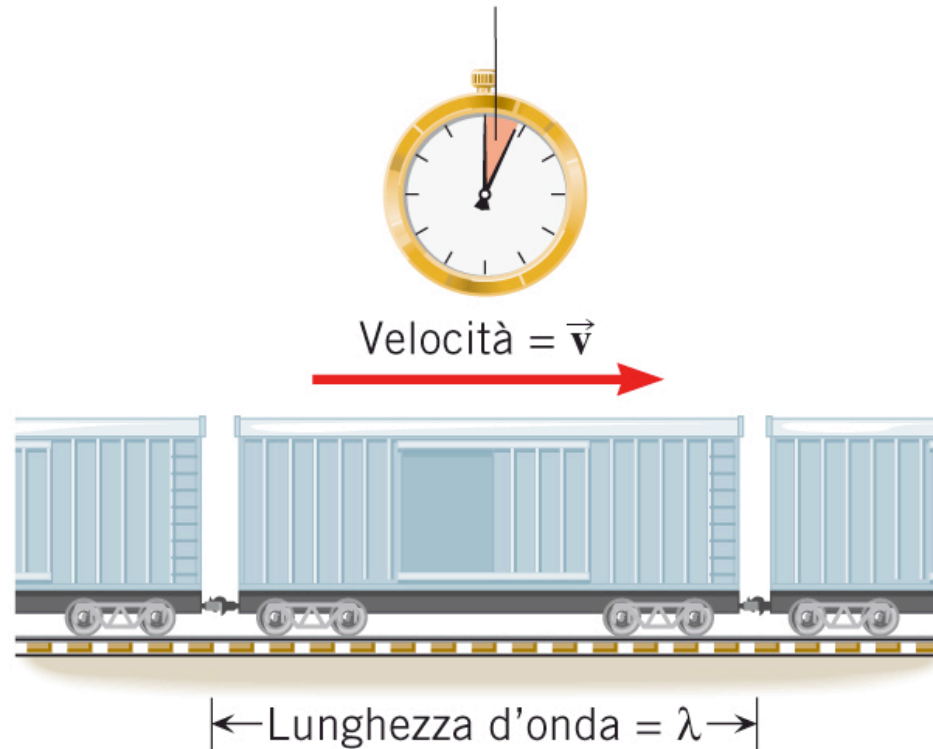
La **lunghezza d'onda  $\lambda$  (lambda)** è la lunghezza di un ciclo ed è uguale alla distanza tra due creste successive, o tra due ventri successivi.

Il **periodo  $T$**  è l'intervallo di tempo in cui viene compiuta un'oscillazione completa.

Il periodo e la frequenza sono legati dalla relazione:  $f = \frac{1}{T}$

## 12.2 Onde periodiche

Il tempo impiegato da un vagone per attraversare l'incrocio è il periodo  $T$



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

## 12.2 Onde periodiche

### **Esempio 1** La lunghezza d'onda delle onde radio

Le onde radio AM e FM sono onde trasversali costituite da perturbazioni di tipo elettromagnetico che si propagano a  $3,00 \cdot 10^8$  m/s.

Una stazione radio trasmette onde radio AM con una frequenza di 1230 kHz e onde radio FM con una frequenza di 91,9 MHz.

Calcola la lunghezza d'onda di ciascuno dei due tipi di onde.

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



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

## 12.2 Onde periodiche

AM

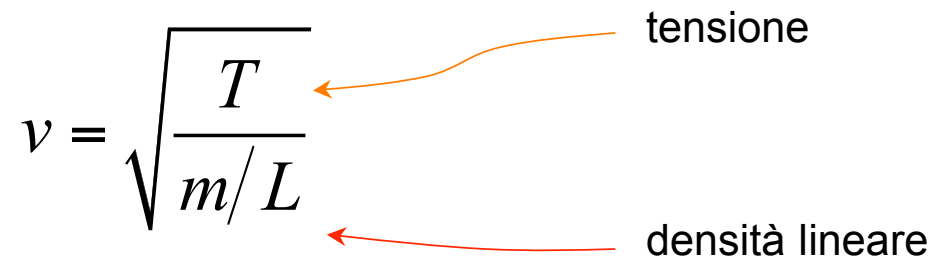
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1230 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 244 \text{ m}$$

FM

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{91,9 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 3,26 \text{ m}$$

## 12.2 Onde periodiche

In una corda sottoposta a una tensione  $T$ , la velocità di propagazione di un'onda trasversale aumenta all'aumentare di  $T$  e diminuisce all'aumentare della massa per unità di lunghezza ( $m/L$ ) della corda.

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}}$$


tensione

densità lineare

## 12.2 Onde periodiche

### **Esempio 2 Velocità delle onde sulle corde di una chitarra**

Quando si pizzica la corda di una chitarra, su di essa si propagano onde trasversali. La lunghezza delle corde fra i due estremi fissi è 0,628 m. La massa della corda del *mi* acuto è 0,208 g, mentre quella del *mi* grave è 3,32 g. In entrambe la tensione è 226 N. Calcola le velocità di propagazione delle onde nelle due corde.





## 12.2 Onde periodiche

*mi* acuto

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} = \sqrt{\frac{226 \text{ N}}{(0,208 \cdot 10^{-3} \text{ kg}) / (0,628 \text{ m})}} = 826 \text{ m/s}$$

*mi* grave

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} = \sqrt{\frac{226 \text{ N}}{(3,32 \cdot 10^{-3} \text{ kg}) / (0,628 \text{ m})}} = 207 \text{ m/s}$$

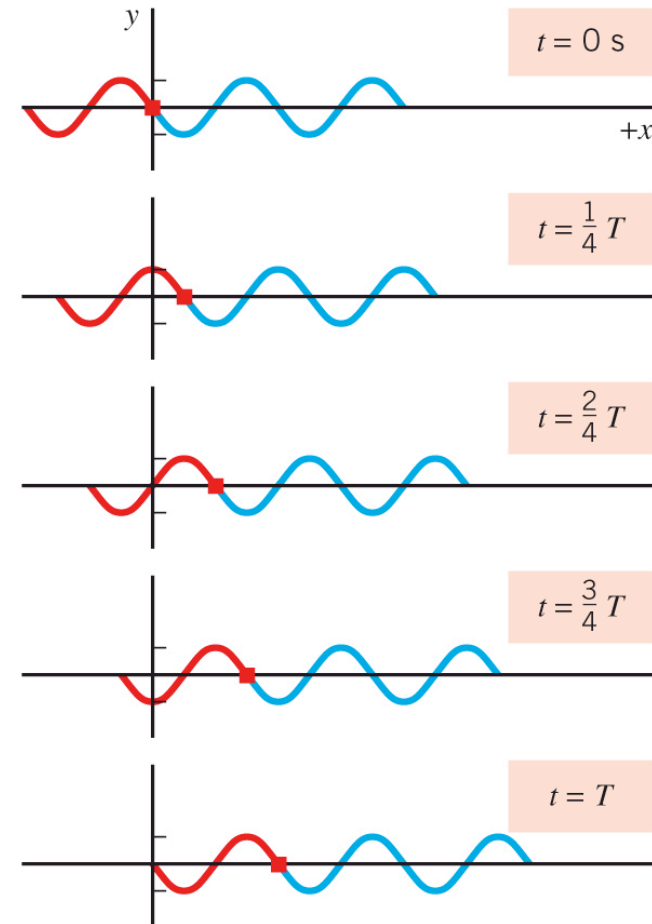


## 12.3 La descrizione matematica di un'onda

Consideriamo una particella a distanza  $x$  dall'origine del sistema di riferimento; lo spostamento  $y$  di questa particella in ogni istante  $t$  in cui transita un'onda di ampiezza  $A$ , frequenza  $f$  e lunghezza d'onda  $\lambda$  è:

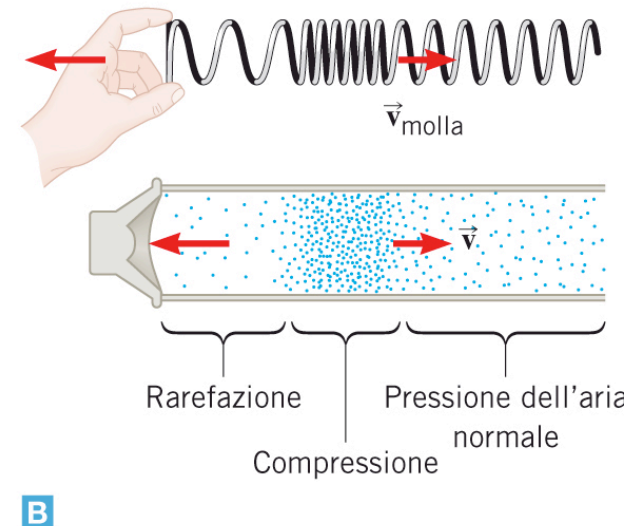
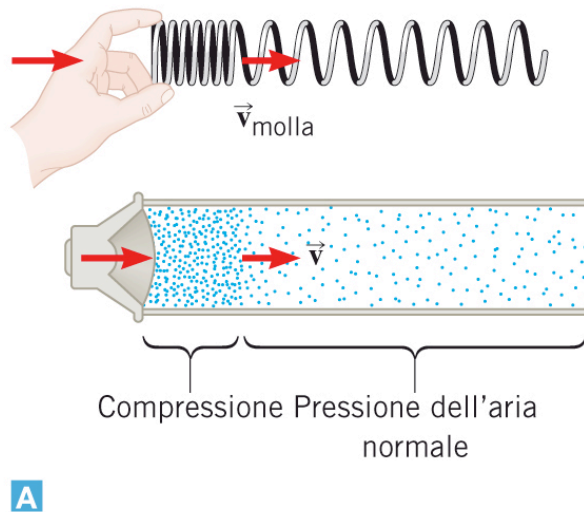
Onda che si propaga verso  $+x$        $y = A \sin \left( 2\pi f t - \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$

Onda che si propaga verso  $-x$        $y = A \sin \left( 2\pi f t + \frac{2\pi x}{\lambda} \right)$



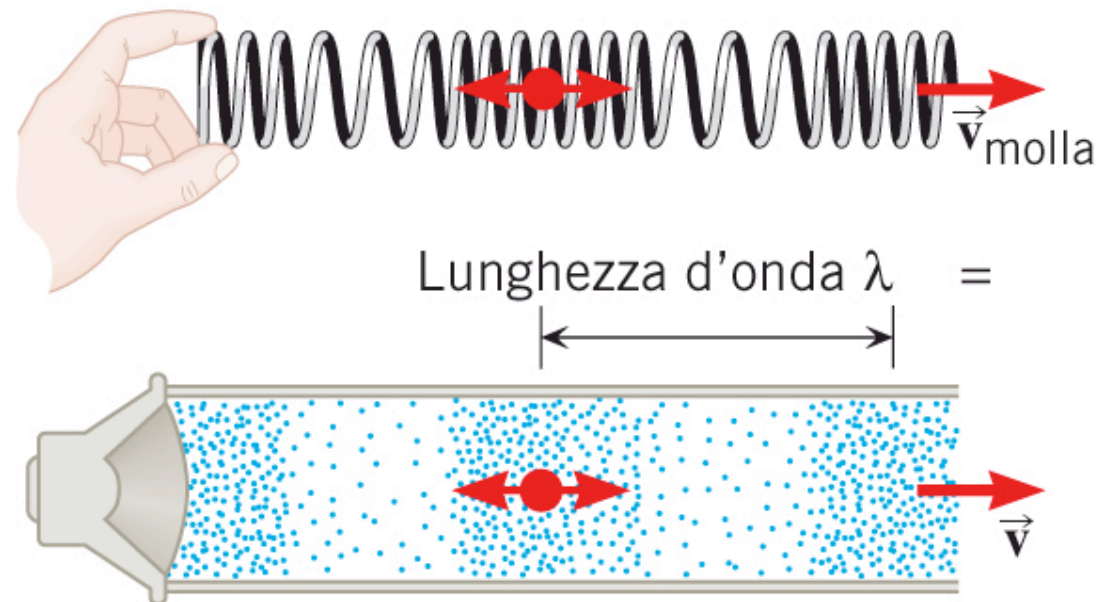
## 12.4 La natura del suono

### ONDE SONORE LONGITUDINALI



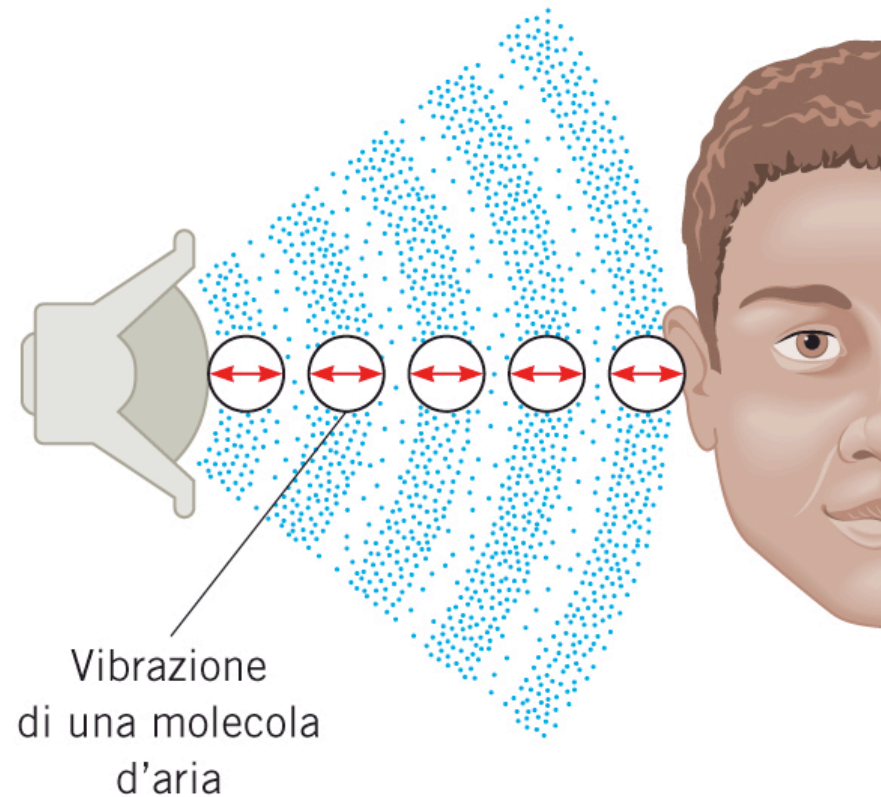
## 12.4 La natura del suono

La lunghezza d'onda  $\lambda$  è uguale alla distanza tra i centri di due compressioni successive o di due rarefazioni successive.



## 12.4 *La natura del suono*

Le compressioni e le rarefazioni generate dall'altoparlante non trasportano le molecole dell'aria, ma le fanno oscillare attorno alla loro posizione d'equilibrio.



## 12.4 *La natura del suono*

### LA FREQUENZA DI UN'ONDA SONORA

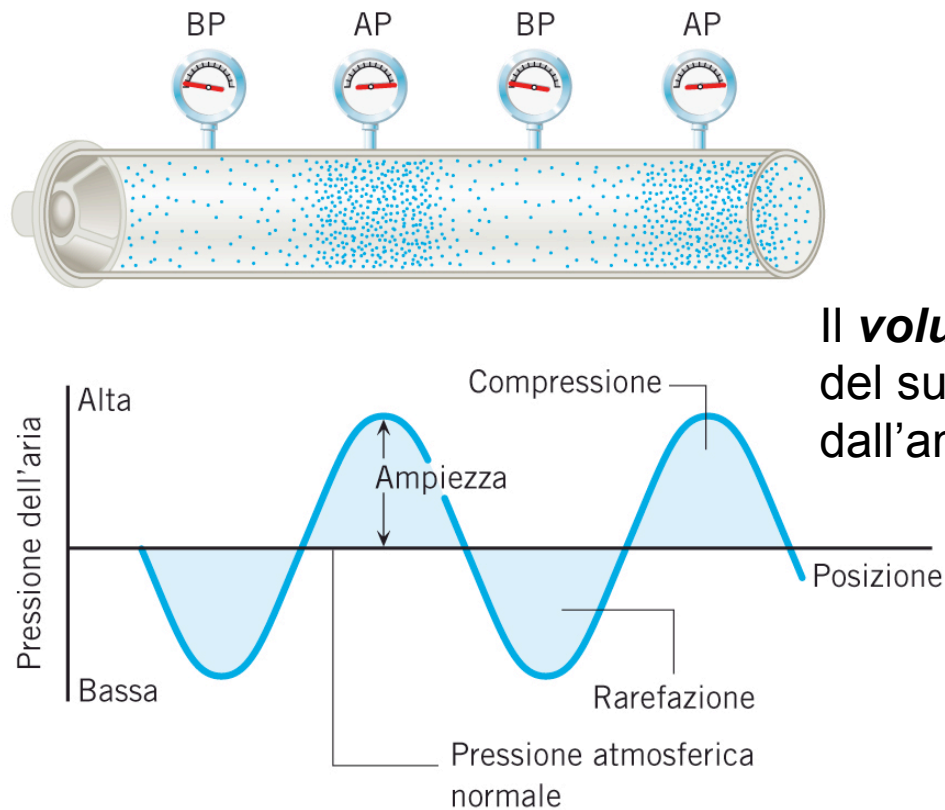
La **frequenza** dell'onda è il numero di cicli che passano in un secondo in uno stesso punto del mezzo in cui l'onda si propaga.

Un suono si dice **puro** quando le particelle investite dall'onda sonora oscillano con moto armonico.

Il nostro cervello interpreta le frequenze rilevate dall'orecchio in termini di una qualità soggettiva detta **altezza**: un suono con una frequenza fondamentale alta è interpretato come un suono alto o **acuto**, mentre un suono con una frequenza fondamentale bassa è interpretato come un suono basso o **grave**.

## 12.4 La natura del suono

### L'AMPIEZZA DELLA PRESSIONE DELL'ONDA SONORA



Il **volume** è una caratteristica del suono che dipende principalmente dall'ampiezza della pressione dell'onda.

## 12.4 *La natura del suono*

Il suono si propaga a velocità molto diverse nei gas, nei liquidi e nei solidi.

Sostanza	Velocità (m/s)
<b>Gas</b>	
Aria (a 0 °C)	331
Aria (a 20 °C)	343
Biossido di carbonio (a 0 °C)	259
Elio (a 0 °C)	965
Ossigeno (a 0 °C)	361
<b>Liquidi</b>	
Acqua dolce (a 20 °C)	1482
Acqua di mare (a 20 °C)	1522
Alcol etilico (a 20 °C)	1162
Cloroformio (a 20 °C)	1004
Mercurio (a 20 °C)	1450
<b>Solidi</b>	
Acciaio	5960
Piombo	5010
Rame	1960
Vetro (Pyrex)	5640

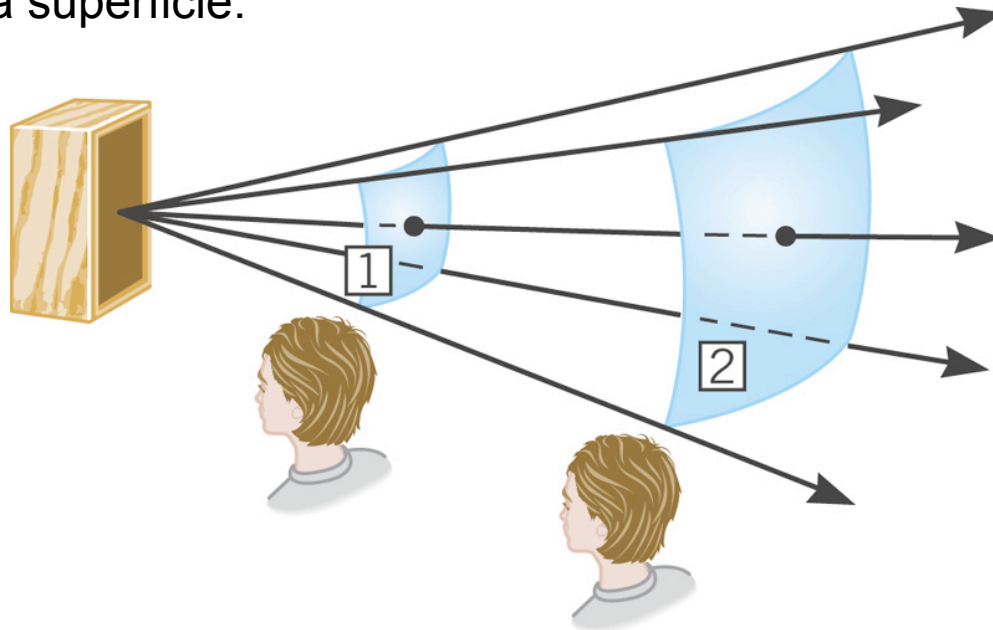


## 12.5 L'intensità del suono

Le onde sonore trasportano energia che può essere usata per compiere lavoro.

La quantità di energia trasportata in un secondo da un'onda è chiamata **potenza** dell'onda

L'**intensità di un suono**  $I$  è definita come rapporto tra la potenza sonora media che attraversa perpendicolarmente una data superficie e l'area  $A$  della superficie.



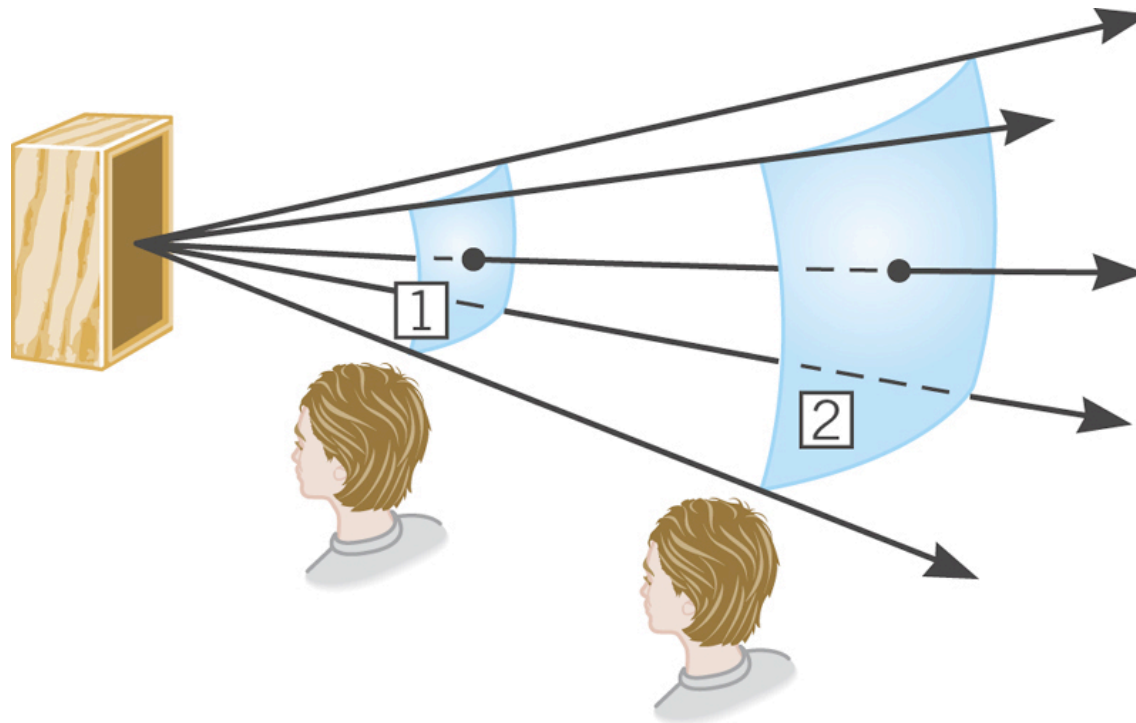
$$I = \frac{\bar{P}}{A}$$

## 12.5 *L'intensità del suono*

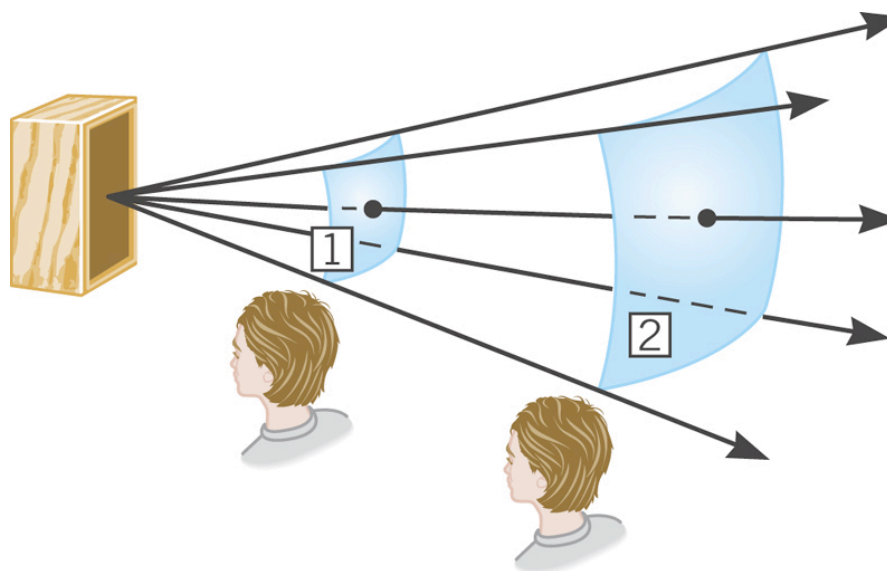
### **Esempio 3** Suoni da un altoparlante

L'altoparlante genera una potenza sonora di  $12 \cdot 10^{-5} \text{ W}$  che attraversa perpendicolarmente le superfici indicate con 1 e 2, di area rispettivamente  $A_1 = 4,0 \text{ m}^2$  e  $A_2 = 12 \text{ m}^2$ .

Calcola l'intensità del suono in ciascuna delle due superfici.



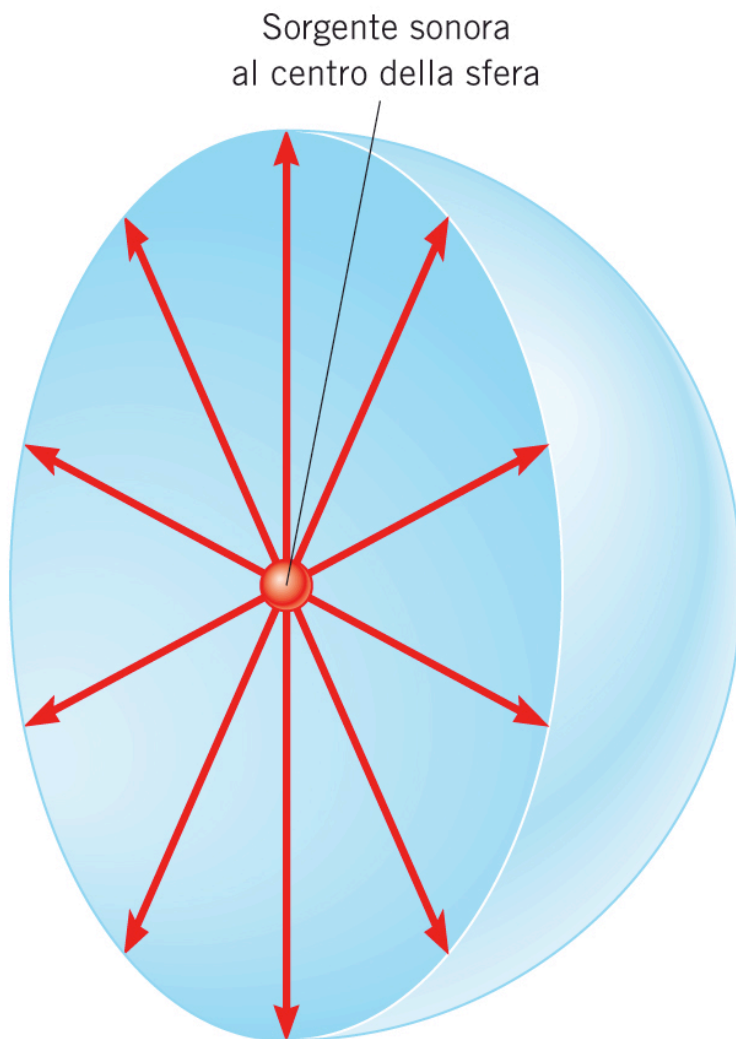
## 12.5 *L'intensità del suono*



$$I_1 = \frac{\bar{P}}{A_1} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{4,0 \text{ m}^2} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

$$I_2 = \frac{\bar{P}}{A_2} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{12 \text{ m}^2} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

## 12.5 *L'intensità del suono*



Potenza della sorgente sonora

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

area della sfera

## 12.5 *L'intensità del suono*

L'intensità minima  $I_0$  di un suono puro con una frequenza di 1000 Hz che può essere percepita da un orecchio umano è  $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Questo valore dell'intensità è chiamato **soglia minima udibile**.

All'altro estremo si trova la **soglia massima sopportabile** (o **soglia del dolore**), che è circa  $10 \text{ W/m}^2$ , ma già un'esposizione continua a suoni di intensità superiore a  $1 \text{ W/m}^2$  provoca dolori e danni permanenti all'apparato uditivo.

## 12.5 *L'intensità del suono*

La nostra percezione del volume di un suono dipende dall'intensità sonora secondo una relazione che non è lineare ma logaritmica. Per questa ragione si sceglie di misurare l'intensità con cui percepiamo un suono di intensità  $I$  mediante il **livello di intensità sonora**  $\beta$ , così definito:

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left( \frac{I}{I_o} \right)$$

$$I_o = 1,00 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Nel Sistema Internazionale il livello di intensità sonora è espresso in **decibel (dB)**.

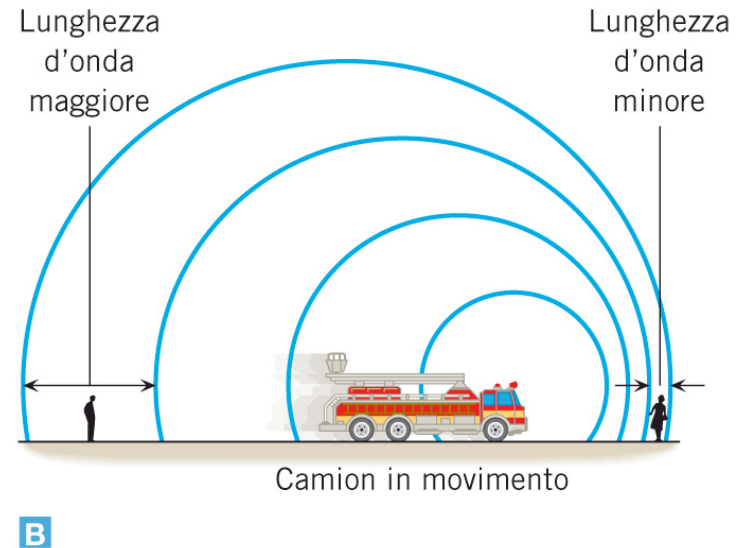
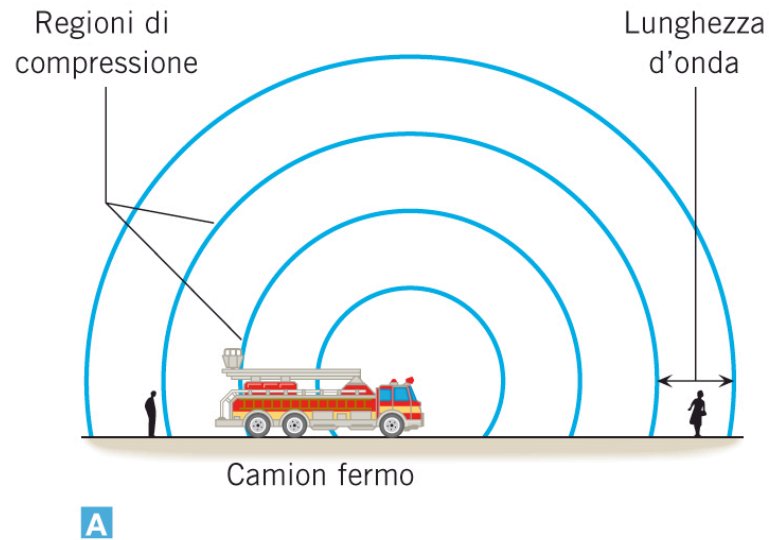
## 12.5 L'intensità del suono

$$\beta = (10 \text{ dB}) \log \left( \frac{I}{I_o} \right)$$

$$I_o = 1,00 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

	Intensità sonora $I$ ( $\text{W/m}^2$ )	Livello di intensità sonora $\beta$ (dB)
Soglia di udibilità	$1,0 \cdot 10^{-12}$	0
Fruscio di foglie	$1,0 \cdot 10^{-11}$	10
Bisbiglio	$1,0 \cdot 10^{-10}$	20
Conversazione normale (a 1 metro)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	65
Interno di un'automobile nel traffico	$1,0 \cdot 10^{-4}$	80
Rumore di un'automobile senza marmitta	$1,0 \cdot 10^{-2}$	100
Concerto rock dal vivo	1,0	120
Soglia del dolore	10	130

## 12.6 L'effetto Doppler

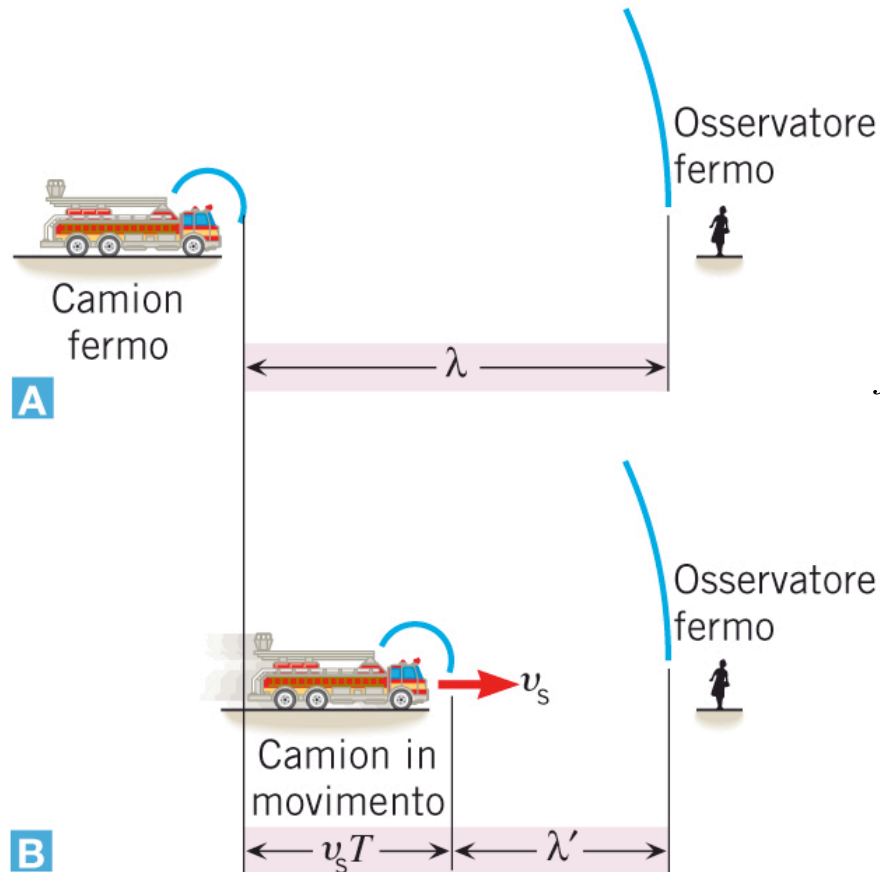


**L'effetto Doppler** è la variazione di frequenza del suono rilevato dal ricevitore perché la sorgente sonora e il ricevitore hanno velocità diverse rispetto al mezzo in cui il suono si propaga.



## 12.6 L'effetto Doppler

### SORGENTE IN MOTO



$$\lambda' = \lambda - v_s T$$

$$f_r = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_s T} = \frac{v}{v/f_s - v_s/f_s}$$

$$f_r = f_s \left( \frac{1}{1 - v_s/v} \right)$$

## 12.6 *L'effetto Doppler*

***Sorgente in moto  
verso un osservatore fermo***

$$f_r = f_s \left( \frac{1}{1 - v_s/v} \right)$$

***Sorgente che si allontana  
da un osservatore fermo***

$$f_r = f_s \left( \frac{1}{1 + v_s/v} \right)$$

## 12.6 L'effetto Doppler

### **Esempio 5 Il fischio di un treno che passa**

Mentre un treno ad alta velocità sta viaggiando a una velocità di 44,7 m/s (161 km/h) il macchinista attiva l'avvisatore acustico che emette un fischio di frequenza di 415 Hz.

La velocità del suono è 343 m/s. Quali sono le frequenze dei suoni percepiti da una persona ferma a un passaggio a livello quando:

- a) il treno si sta avvicinando?
- b) il treno si sta allontanando?

$$f_r = f_s \left( \frac{1}{1 - v_s/v} \right)$$

$$f_r = f_s \left( \frac{1}{1 + v_s/v} \right)$$

## 12.6 L'effetto Doppler

Treno in avvicinamento

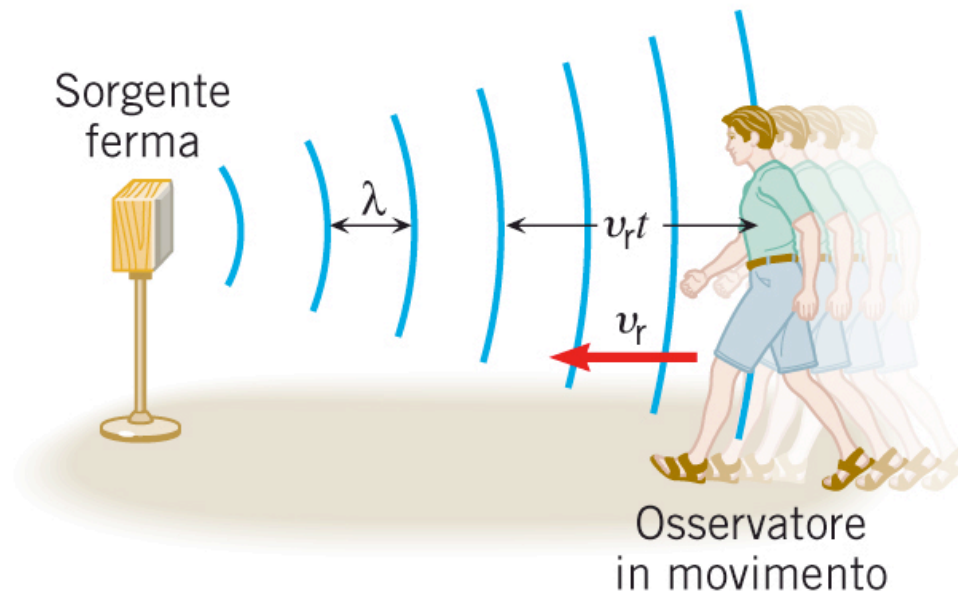
$$f_r = (415 \text{ Hz}) \left( \frac{1}{1 - \frac{44,7 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} \right) = 477 \text{ Hz}$$

Treno in allontanamento

$$f_r = (415 \text{ Hz}) \left( \frac{1}{1 + \frac{44,7 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} \right) = 367 \text{ Hz}$$

## 12.6 L'effetto Doppler

### OSSERVATORE IN MOTO



$$f_r = f_s + \frac{v_r}{\lambda} = f_s \left( 1 + \frac{v_r}{f_s \lambda} \right) = f_s \left( 1 + \frac{v_r}{v} \right)$$

## 12.6 *L'effetto Doppler*

***Osservatore che si avvicina  
a una sorgente ferma***

$$f_r = f_s \left( 1 + \frac{v_r}{v} \right)$$

***Osservatore che si allontana  
da una sorgente ferma***

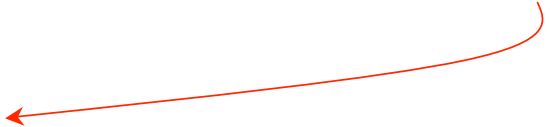
$$f_r = f_s \left( 1 - \frac{v_r}{v} \right)$$

## 12.6 L'effetto Doppler


### CASO GENERALE

$$f_r = f_s \left( \frac{1 \pm \frac{v_r}{v}}{1 \mp \frac{v_s}{v}} \right)$$

Numeratore: il segno + si applica quando l'osservatore si muove verso la sorgente

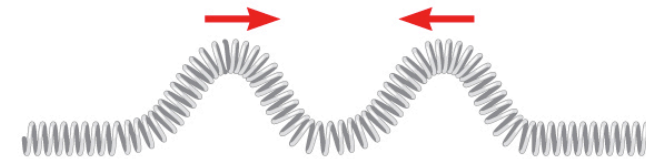


Denominatore: il segno – si applica quando l'osservatore si muove verso la sorgente

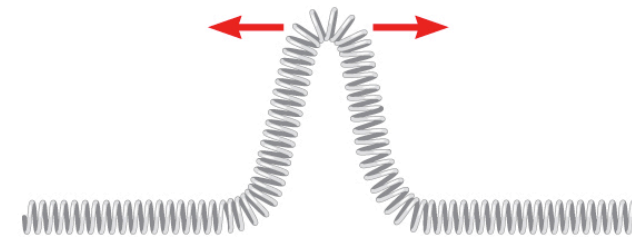


## 12.7 Il principio di sovrapposizione

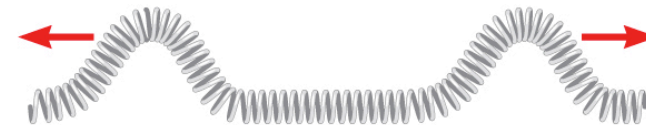
Quando si incontrano, i due impulsi si combinano senza disturbarsi e la molla assume una forma uguale alla somma delle forme degli impulsi individuali.



**A** Inizio della sovrapposizione



**B** Sovrapposizione totale

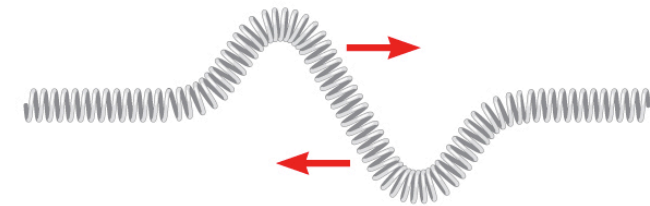


**C** Gli impulsi si allontanano



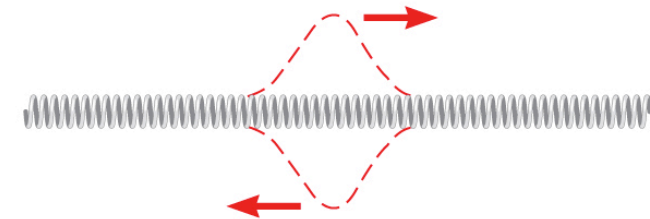
## 12.7 Il principio di sovrapposizione

Quando si incontrano, i due impulsi si combinano senza disturbarsi e la molla assume una forma uguale alla somma delle forme degli impulsi individuali.



A

Inizio della sovrapposizione



B

Sovrapposizione totale



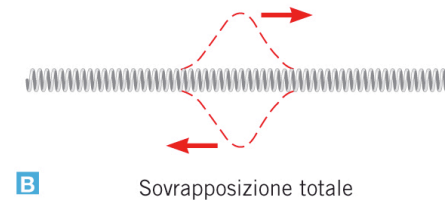
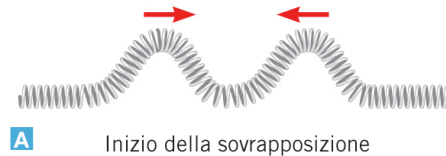
C

Gli impulsi si allontanano

## 12.7 Il principio di sovrapposizione

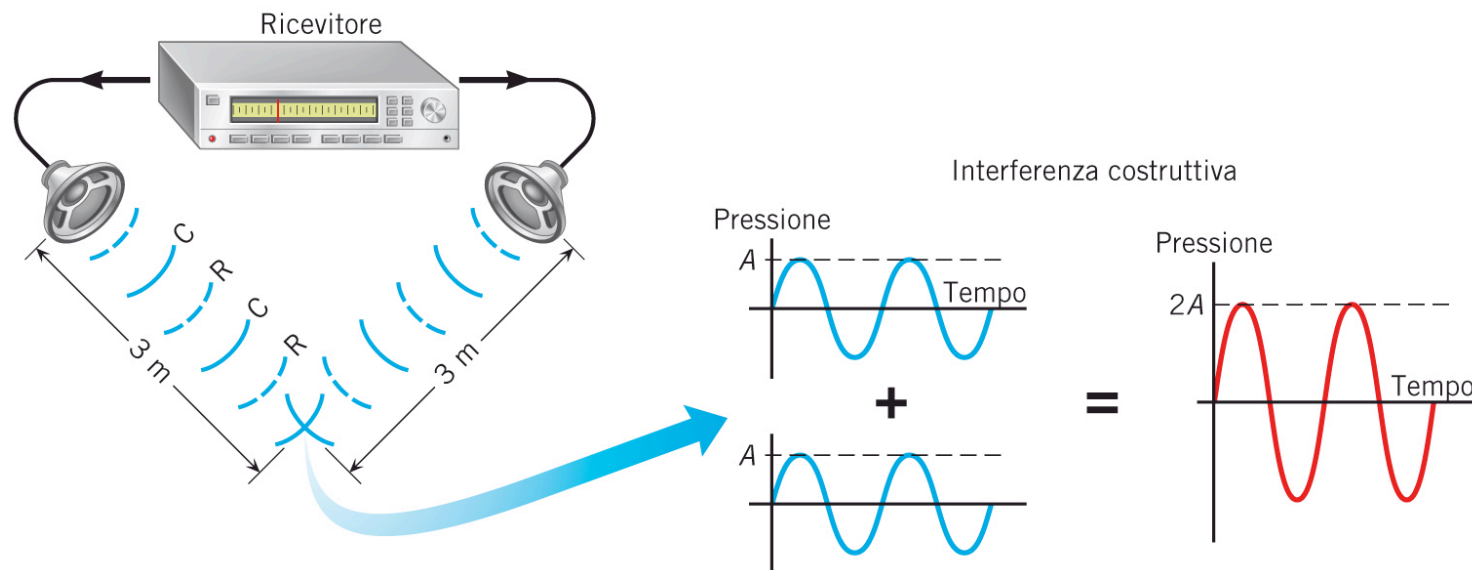
### PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE

Quando due o più onde sono presenti contemporaneamente in uno stesso punto, la perturbazione in quel punto è la somma delle perturbazioni prodotte dalle singole onde.



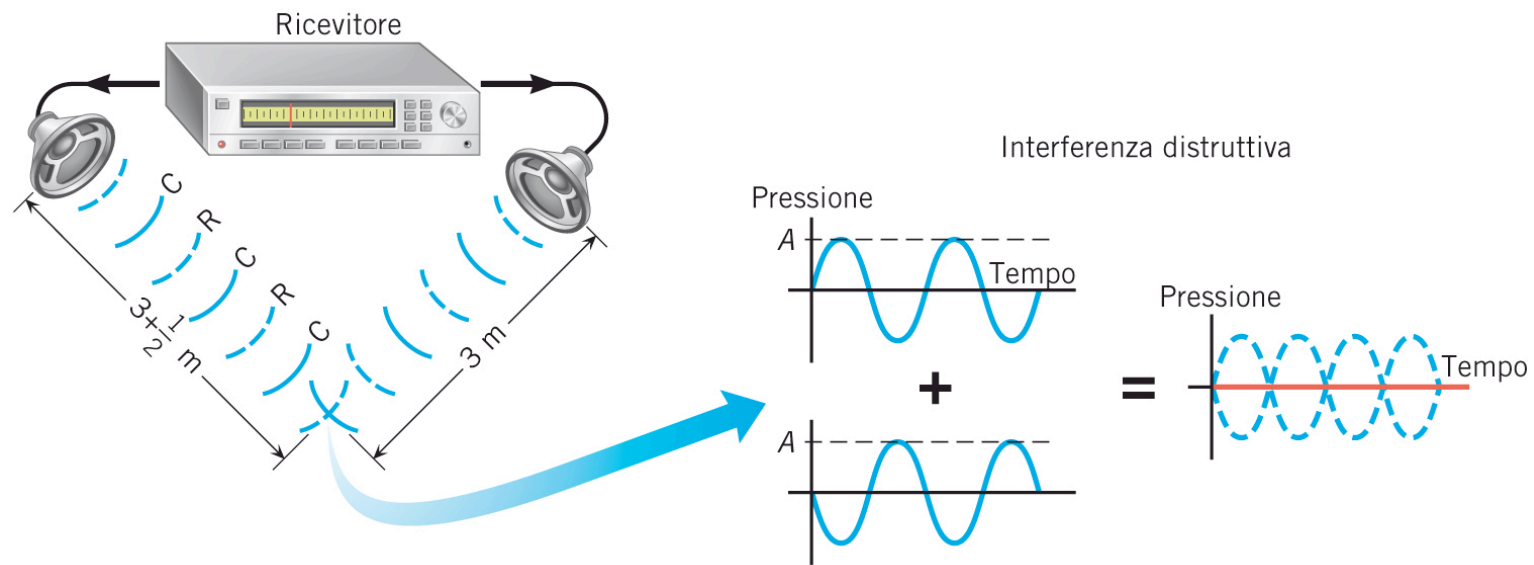
## 12.8 *Interferenza e diffrazione di onde sonore*

Quando due onde si combinano in modo che una compressione si sovrappone sempre a una compressione e una rarefazione si sovrappone sempre a una rarefazione, si dice che sono **in fase** (o **in concordanza di fase**) e che danno luogo a **interferenza costruttiva**.

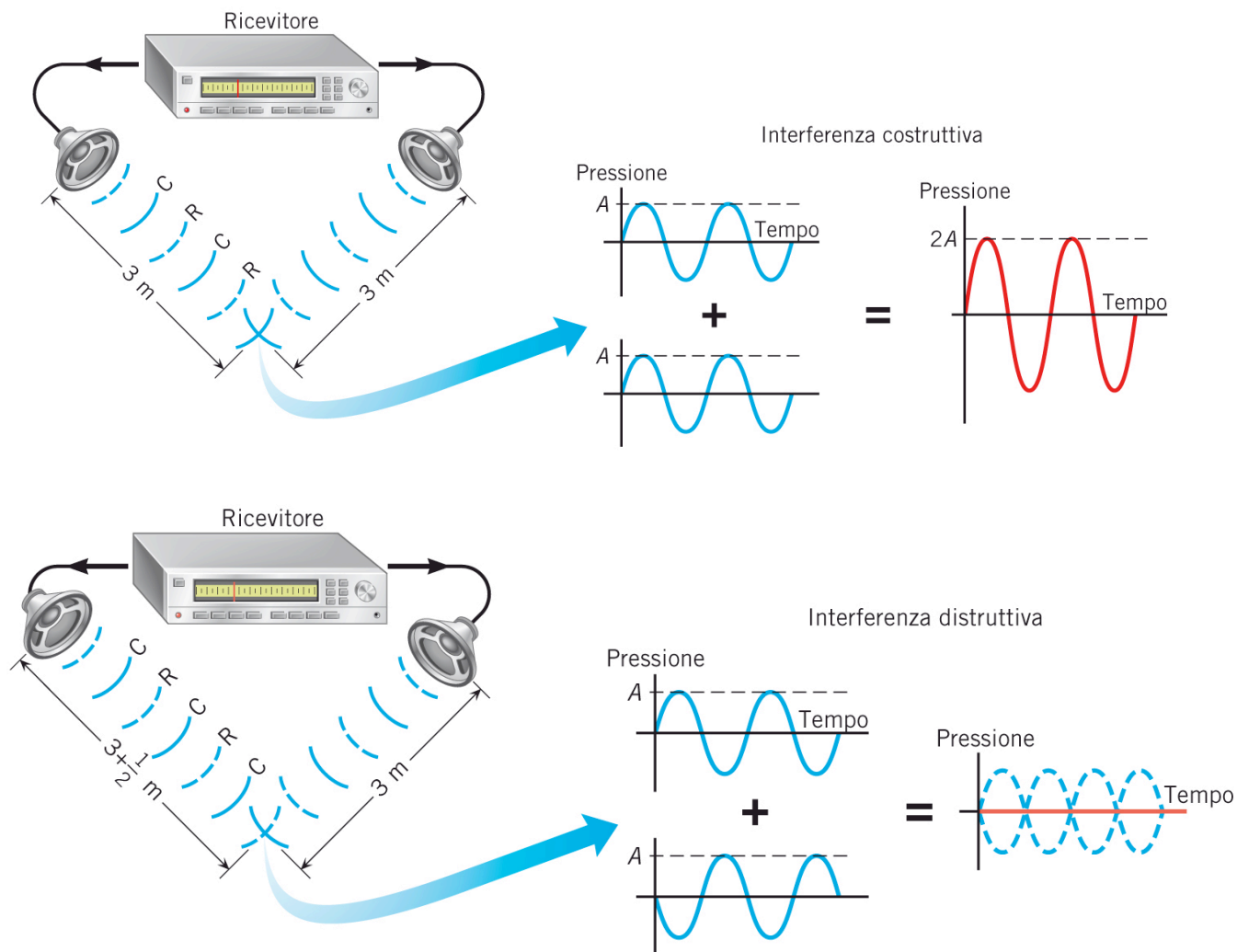


## 12.8 *Interferenza e diffrazione di onde sonore*

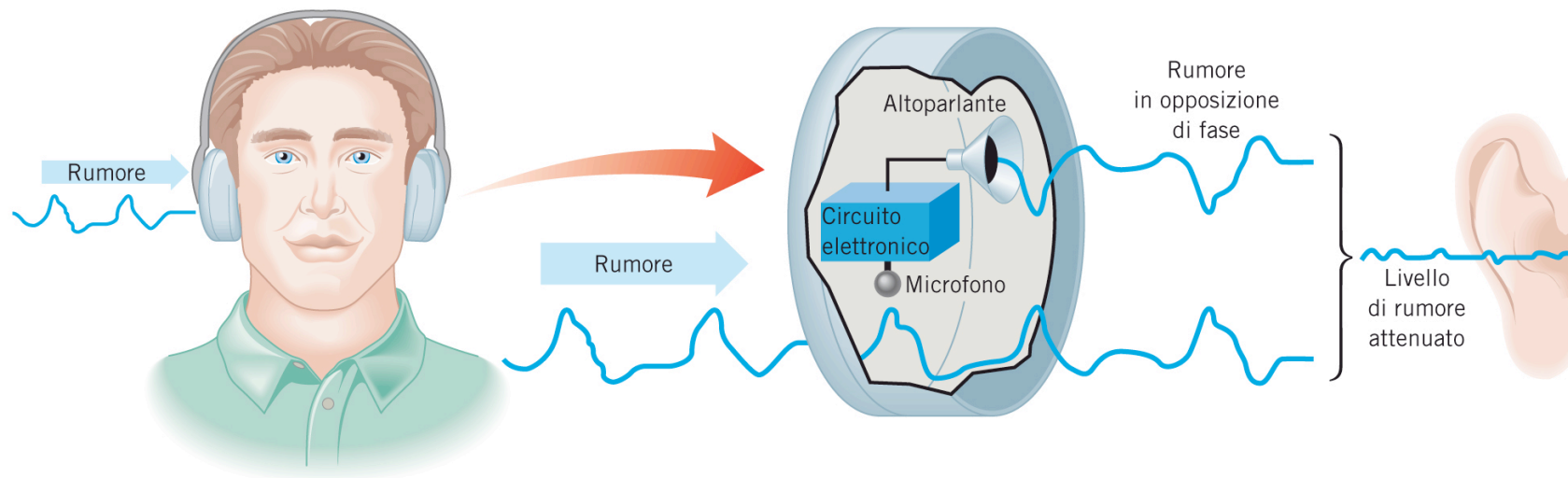
Quando due onde si combinano in modo che una compressione si sovrappone sempre a una rarefazione, si dice che sono **in opposizione di fase** e che danno luogo a **interferenza distruttiva**.



## 12.8 Interferenza e diffrazione di onde sonore



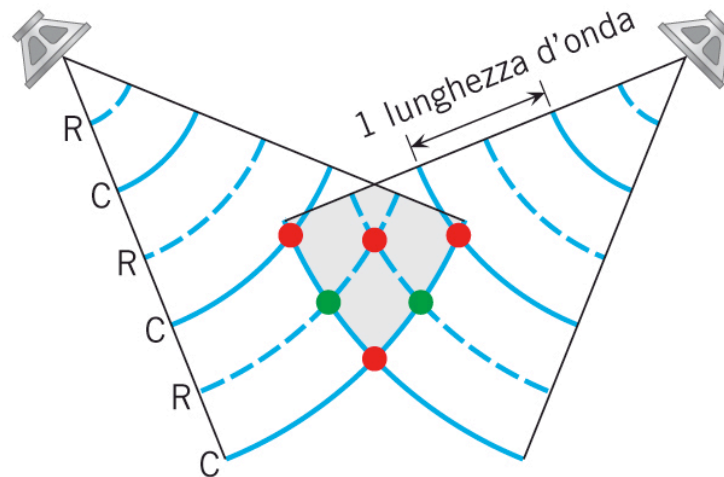
## 12.8 *Interferenza e diffrazione di onde sonore*



## 12.8 *Interferenza e diffrazione di onde sonore*

Quando due sorgenti sonore sono in fase, una differenza di cammino rispetto al punto di sovrapposizione pari a zero oppure a un numero intero (1, 2, 3,...) di lunghezze d'onda produce un fenomeno di **interferenza costruttiva**.

Quando due sorgenti sonore sono in fase, una differenza di cammino rispetto al punto di sovrapposizione pari a mezza lunghezza d'onda o a un numero intero di lunghezze d'onda più mezza lunghezza d'onda ( $\frac{1}{2}$ ,  $1\frac{1}{2}$ ,  $2\frac{1}{2}$ , ...) produce un fenomeno di **interferenza distruttiva**.

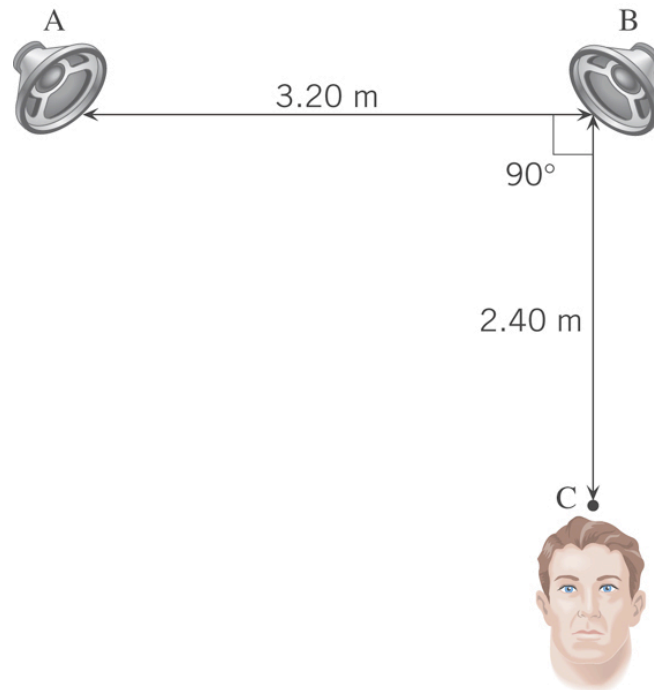


## 12.8 *Interferenza e diffrazione di onde sonore*

### **Esempio 6 Che cosa sente un ascoltatore?**

I due altoparlanti emettono in fase due suoni identici di frequenza 214 Hz e velocità 343 m/s.

L'ascoltatore sente un suono intenso o non sente alcun suono?





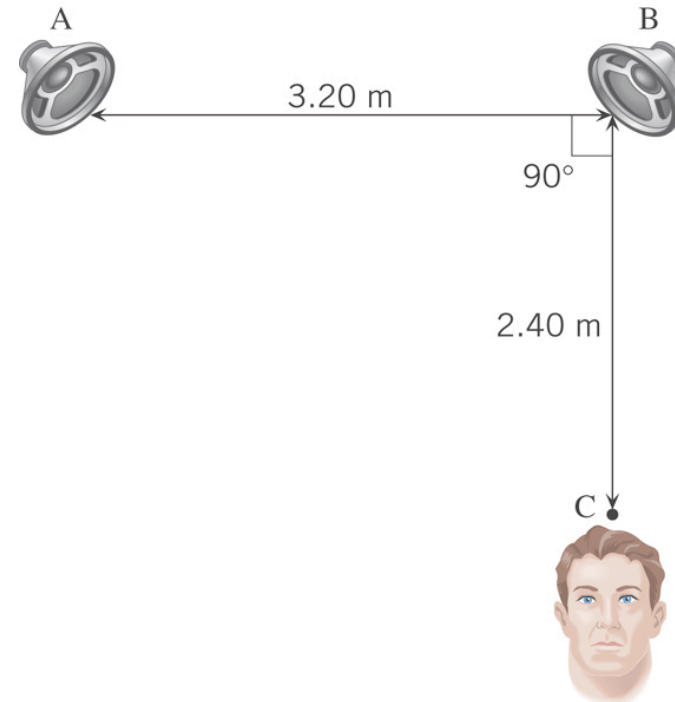
## 12.8 Interferenza e diffrazione di onde sonore

Calcolo della differenza di cammino.

$$\sqrt{(3,20 \text{ m})^2 + (2,40 \text{ m})^2} - 2,40 \text{ m} = 1,60 \text{ m}$$

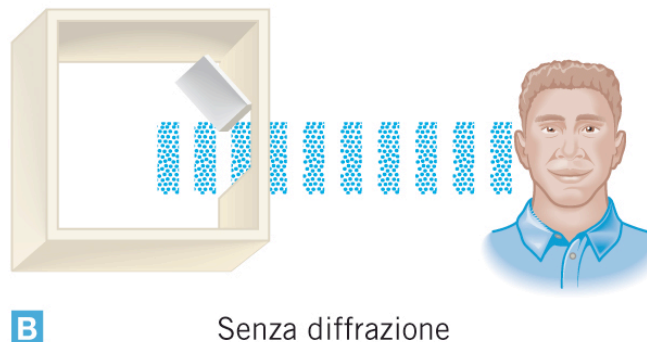
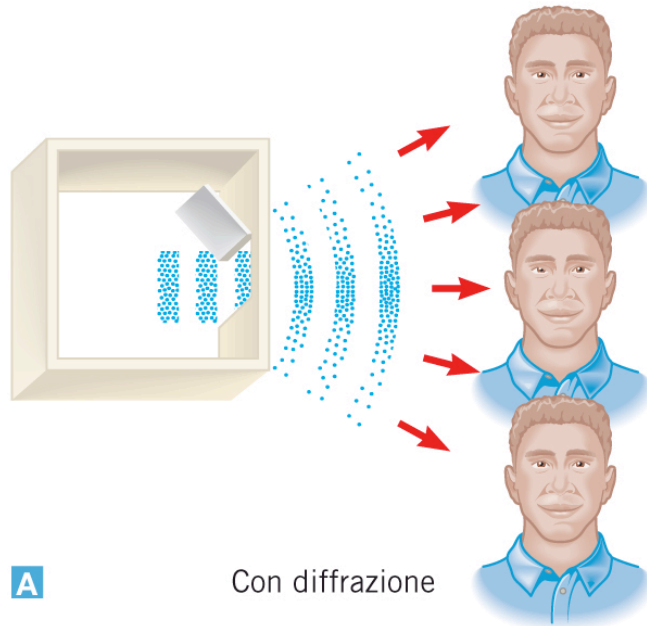
Calcolo della lunghezza d'onda.

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{343 \text{ m/s}}{214 \text{ Hz}} = 1,60 \text{ m}$$



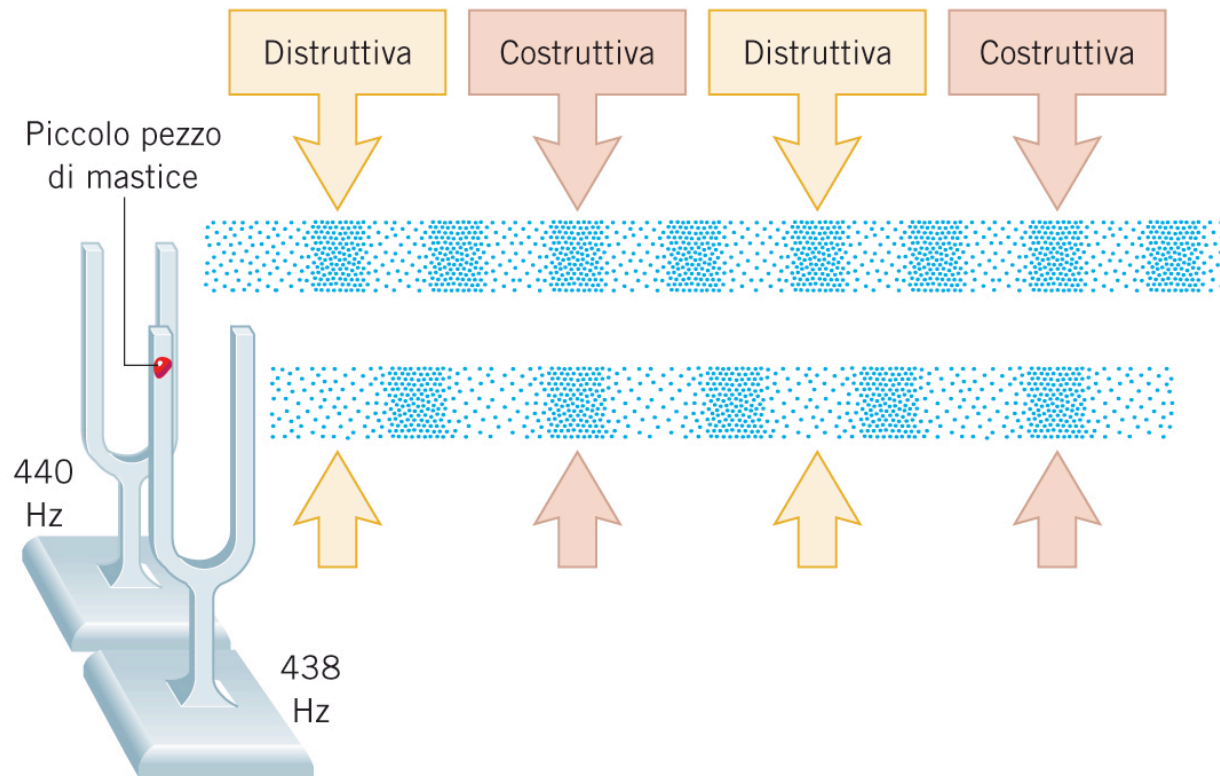
Poiché la differenza di cammino è pari a una lunghezza d'onda, nel punto C si ha interferenza costruttiva e l'ascoltatore sente un suono intenso.

## 12.8 *Interferenza e diffrazione di onde sonore*



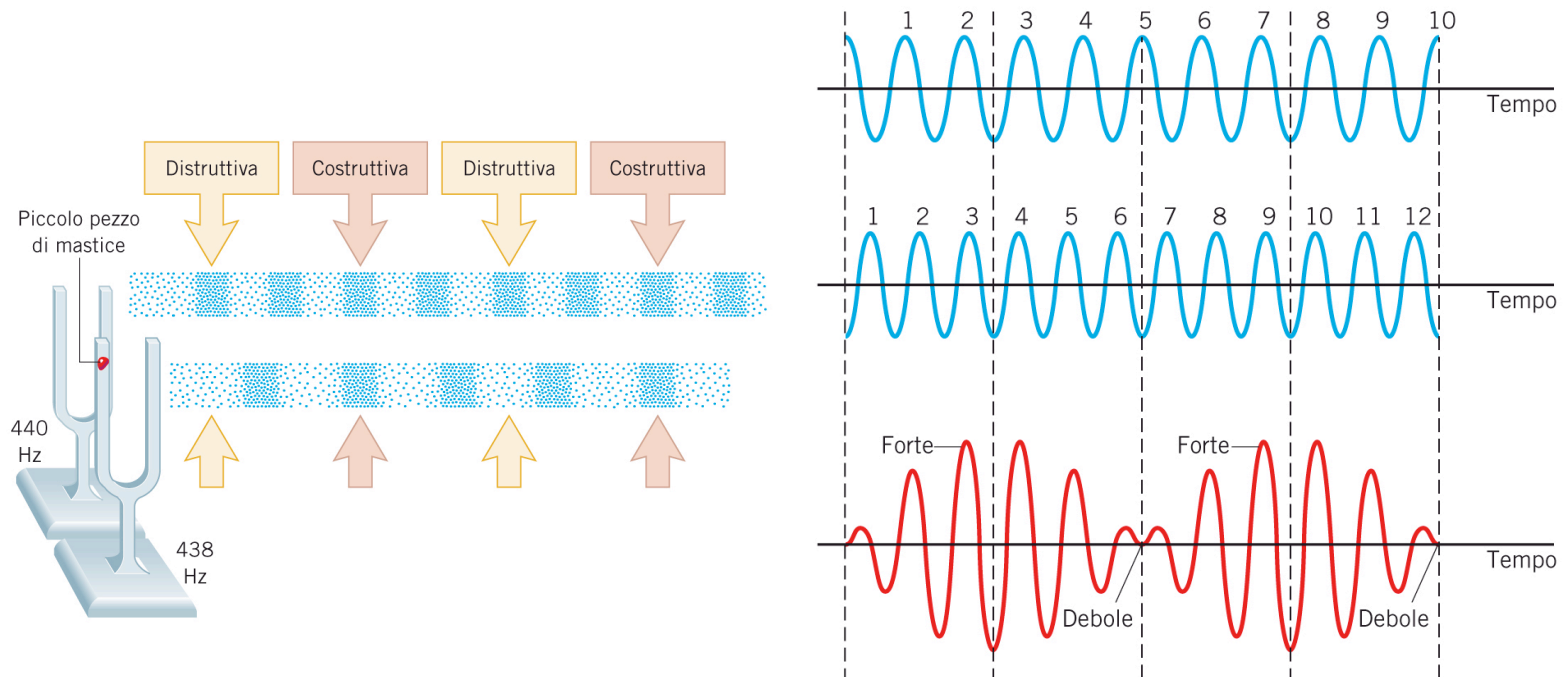
La deviazione dalla direzione di propagazione di un'onda attorno a un ostacolo o ai bordi di una fenditura è chiamata **diffrazione**.

## 12.9 Battimenti



L'interferenza di due onde sonore con frequenze leggermente diverse genera variazioni periodiche dell'intensità del suono chiamate **battimenti**.

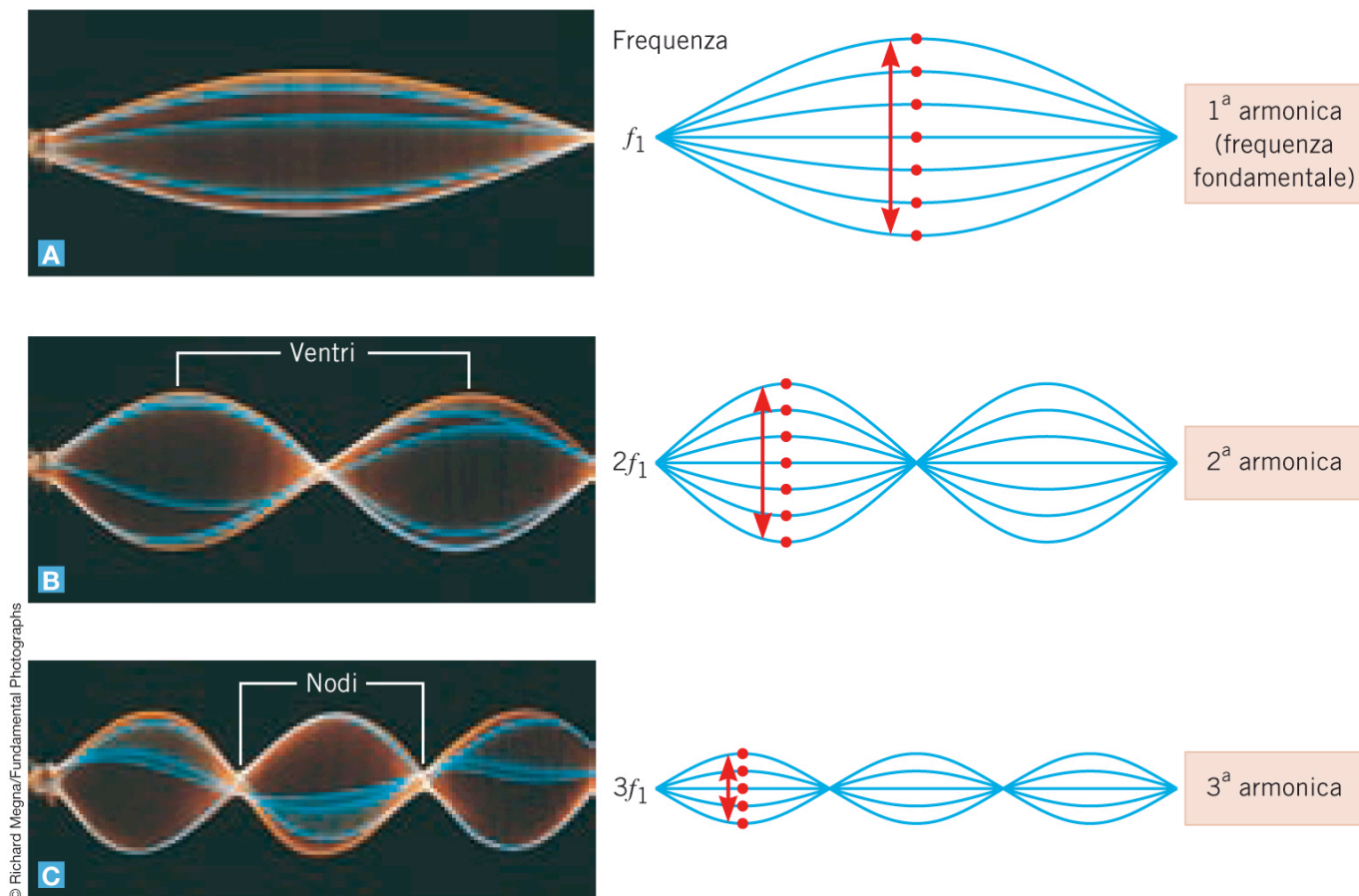
## 12.9 Battimenti



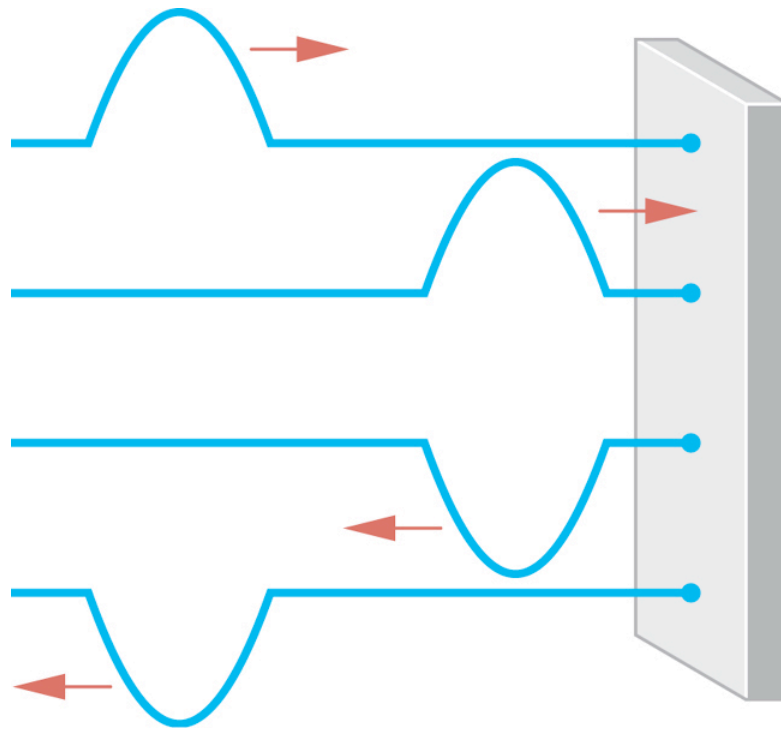
La frequenza dei battimenti è uguale alla **differenza** tra le frequenze dei due suoni.

## 12.10 Onde stazionarie

### Modi normali delle onde stazionarie trasversali.



## 12.10 Onde stazionarie

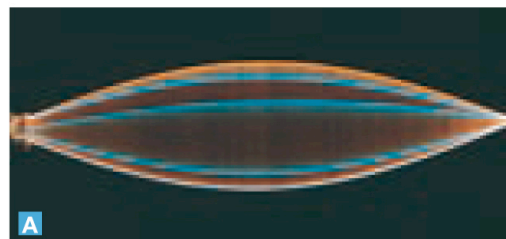


Quando il mezzo ciclo d'onda che viaggia verso la parete a destra viene riflesso dalla parete, diventa un mezzo ciclo d'onda che viaggia verso sinistra ed è capovolto.

Se non si riesce a far vibrare la corda con la frequenza corretta, i cicli nuovi e quelli precedenti tendono a cancellarsi a vicenda quando si sovrappongono.

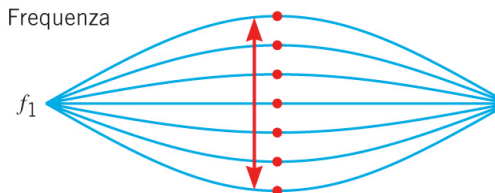
Quando le vibrazioni della mano hanno la frequenza giusta, ogni nuovo ciclo provoca la formazione di un'onda stazionaria di grande ampiezza.

## 12.10 Onde stazionarie

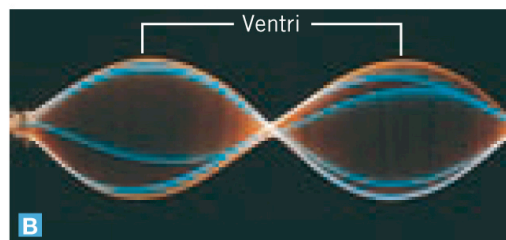


Frequenza

$f_1$



1<sup>a</sup> armonica  
(frequenza  
fondamentale)

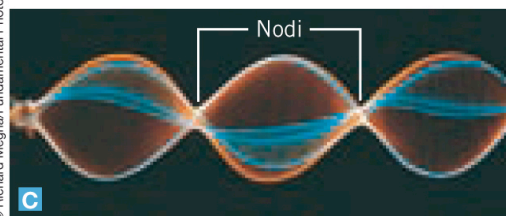


$2f_1$



2<sup>a</sup> armonica

© Richard Megna/Fundamental Photographs



$3f_1$



3<sup>a</sup> armonica

***Corda fissata  
a entrambi gli estremi***

$$f_n = n \left( \frac{v}{2L} \right) \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$

## 12.10 Onde stazionarie

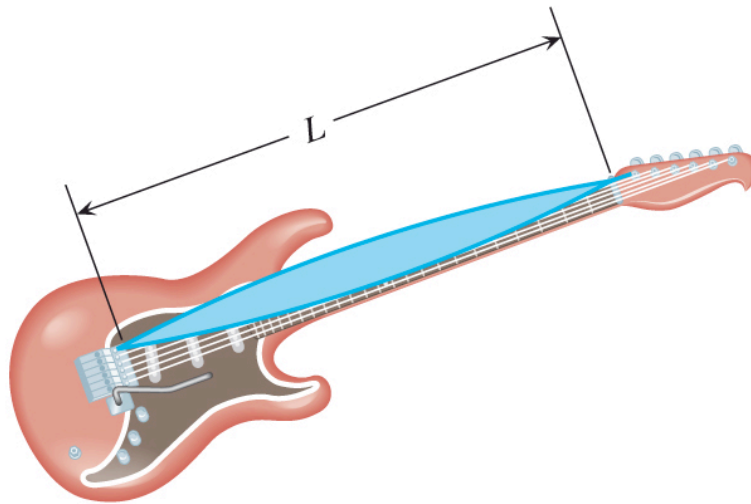
### **Esempio 7 Suonare una chitarra**

Quando è pizzicata, la corda più pesante di una chitarra produce la nota *mi*. Un chitarrista vuole che la corda emetta il *mi* dell'ottava superiore. Per ottenere questo risultato deve premere il tasto giusto prima di pizzicare la corda.

Calcola la distanza  $L$  tra il tasto su cui premere la corda e il ponte della chitarra.

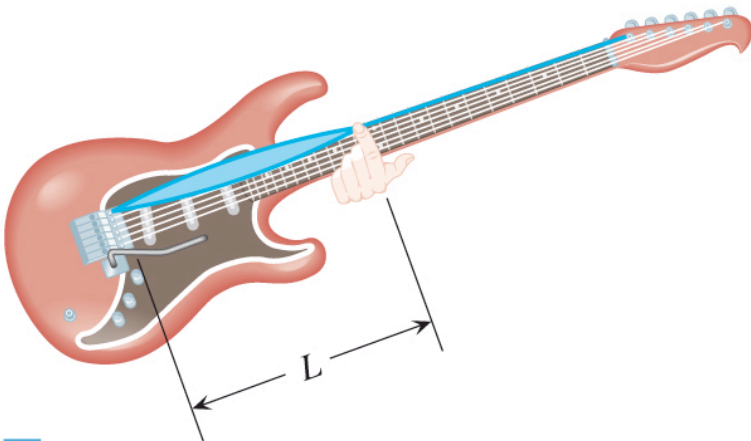


## 12.10 Onde stazionarie



A

$$f_n = n \left( \frac{v}{2L} \right) \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$



B