CAPITOLO

13

Il suono

Ogni suono che ascolti è una piccola onda di pressione che ha attraversato l'aria per arrivare fino a te: la voce di un amico, il tuono lontano, una corda di violino.

OBIETTIVI

1. Descrivere il suono come onda longitudinale di pressione e spiegare perché richiede un mezzo materiale.
2. Usare la velocità del suono nei diversi mezzi e la sua dipendenza dalla temperatura per calcolare distanze ed eco.
3. Collegare altezza, intensità e timbro a frequenza, potenza per unità di superficie e armoniche; usare la legge dell'inverso del quadrato e i decibel.
4. Calcolare le frequenze di corde e canne aperte e chiuse, interpretare gli intervalli pitagorici come rapporti di frequenze e usare i battimenti.
5. Applicare le formule dell'effetto Doppler per sorgente e osservatore in moto e descrivere qualitativamente il cono di Mach.
6. Misurare la velocità del suono con un tubo di risonanza e valutarne l'incertezza.

INDICE DEL CAPITOLO

13.1 Il suono, un'onda di pressione 2
13.2 Altezza, intensità e timbro 5
13.3 Eco, riverbero e acustica degli spazi 10
13.4 Gli strumenti musicali 11
13.5 L'effetto Doppler 16

Fisica 4 · Parte V · Le onde e il suono · versione 1.0
Capitolo 13: Il suono · pagine 353–378 del volume completo · estratto per lo studio

Nel buio di un temporale vedi il lampo e cominci a contare: uno, due, tre... Il tuono arriva qualche secondo dopo, anche se lampo e tuono nascono nello stesso istante, dalla stessa scarica. Il pipistrello che caccia al tramonto «vede» gli insetti con le orecchie; il medico guarda un bambino non ancora nato con un fascio di suoni che nessuno può sentire; la sirena di un'ambulanza cambia nota nel momento in cui ti passa davanti. Sono quattro fenomeni diversi con un'unica protagonista: un'onda che si propaga nell'aria.

Il suono è l'onda meccanica più importante della nostra vita quotidiana. In questo capitolo userai gli strumenti del capitolo 12 per capire quanto veloce va, che cosa distingue un suono forte da uno debole e un violino da un flauto, perché certe note «stanno bene insieme», come avevano scoperto i pitagorici, e che cosa succede quando la sorgente si muove.

13.1 Il suono, un'onda di pressione

13.1.1 Una vibrazione che si propaga

Appoggia le dita sulla gola mentre parli, o sfiora la membrana di un altoparlante acceso: senti che vibrano. Ogni suono nasce da un corpo che vibra. Quando la membrana dell'altoparlante avanza, spinge e comprime lo strato d'aria che ha davanti; quello strato spinge il successivo, e così via. Quando la membrana arretra, lascia dietro di sé una zona in cui l'aria è più rarefatta. Si forma così una successione di compressioni, zone in cui la pressione e la densità dell'aria sono un po' maggiori di quelle dell'ambiente, e di rarefazioni, in cui sono un po' minori (capitolo 12), che si allontanano dalla sorgente (Figura 13.1).

Il **suono** è dunque un'onda meccanica **longitudinale**: le molecole d'aria oscillano avanti e indietro nella stessa direzione in cui l'onda si propaga, ciascuna intorno alla propria posizione di equilibrio, e non viaggiano dalla sorgente all'orecchio. Come ogni onda, il suono trasporta energia e non materia: quando un altoparlante suona, il vento non si alza. Poiché ciò che oscilla è la pressione, il suono si descrive anche come un'onda di pressione: la distanza fra due compressioni successive è la lunghezza d'onda λ, e in un punto fisso la pressione oscilla con la frequenza f della sorgente. Le variazioni sono piccolissime rispetto alla pressione atmosferica, circa 101 000 Pa.

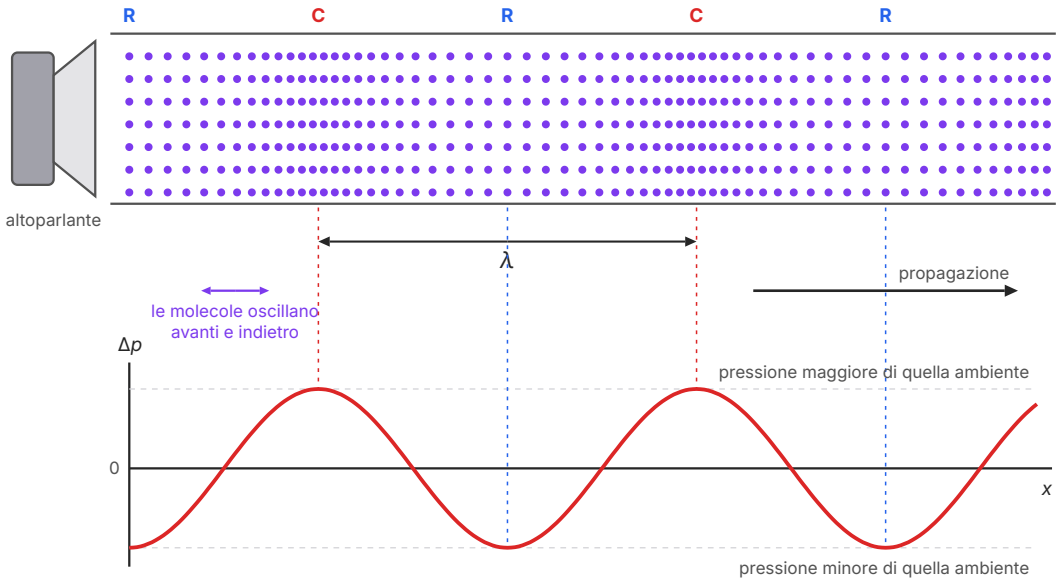


Figura 13.1 Un'onda sonora in un tubo, fotografata in un istante (lo spostamento delle molecole è esagerato). In alto: gli strati d'aria, spostati dalle loro posizioni di equilibrio, si addensano nelle compressioni (C) e si diradano nelle rarefazioni (R); la distanza fra due compressioni successive è la lunghezza d'onda λ. In basso: la differenza Δp fra la pressione dell'aria e quella ambiente lungo il tubo, calcolata per un'onda sinusoidale; è massima nelle compressioni e minima nelle rarefazioni.

L'idea che il suono si propaghi come un'onda è antica. Vitruvio, architetto dell'età di Augusto, nel *De architectura* (V, 3) paragona la voce ai cerchi che si allargano su uno stagno quando vi si getta un sasso, aggiungendo che la voce, a differenza dei cerchi d'acqua, si propaga anche in altezza: oggi diremmo che i suoi fronti d'onda sono sfere, non cerchi.

13.1.2 Serve un mezzo

Se il suono è un'oscillazione di molecole, senza molecole non può esistere. Nel Seicento, con le prime pompe pneumatiche, si provò a mettere un campanello o un orologio a suoneria in un recipiente di vetro e a togliere l'aria: man mano che il vuoto si fa più spinto il suono si affievolisce fino a diventare quasi impercettibile, mentre si vede benissimo il martelletto che continua a battere. La luce attraversa il vuoto, il suono no. Per questo nello spazio non si sentono esplosioni, e gli astronauti comunicano via radio.

Il suono si propaga invece in qualsiasi mezzo materiale: nei gas, nei liquidi e nei solidi. Se appoggi l'orecchio a un tavolo e un compagno gratta con un'unghia l'altra estremità, lo senti più forte attraverso il legno che attraverso l'aria.

13.1.3 La velocità del suono

Come per tutte le onde (capitolo 12), la velocità del suono dipende dal mezzo, non dalla sorgente: un fischio acuto e un rombo grave, prodotti insieme, arrivano insieme. Nell'aria secca a 20 °C il suono percorre circa **343 m/s**; a 0 °C circa 331 m/s. Fra questi valori, e un po' oltre, vale con buona approssimazione la relazione empirica

$$v \approx (331 + 0{,}6\,t)\ \text{m/s} \qquad (t \text{ in } ^\circ\text{C})$$

La velocità cresce con la temperatura perché, come dice il modello del gas perfetto (capitolo 9), in un gas più caldo le molecole sono più veloci e trasmettono più in fretta l'urto alle vicine. Nei liquidi e nei solidi le particelle sono molto più vicine e legate fra loro, e il suono è molto più veloce: circa 1480 m/s nell'acqua dolce, 1520 m/s nell'acqua di mare, circa 5900 m/s nell'acciaio (Tabella A.6 in Appendice).

Il valore di 343 m/s spiega il ritardo del tuono. La luce del lampo arriva praticamente subito (impiega pochi milionesimi di secondo per qualche kilometro), il suono no: impiega circa 3 s per percorrere 1 km (343 m/s × 3 s ≈ 1030 m). Contando i secondi fra lampo e tuono e dividendo per tre si ottiene la distanza del fulmine in kilometri.

ESEMPIO SVOLTO

Quanto è lontano il temporale?

Problema. In una sera d'estate a 20 °C Chiara vede un lampo e sente il tuono 6,0 s dopo. a) A che distanza è caduto il fulmine? b) Quale errore si commette trascurando il tempo impiegato dalla luce? c) Di quanto cambierebbe il risultato se l'aria fosse a 0 °C?

Soluzione. a) Il suono si muove di moto uniforme: $d = v\,\Delta t = 343\ \text{m/s} \times 6{,}0\ \text{s} \approx 2{,}1 \times 10^{3}\ \text{m}$, cioè circa 2,1 km (la regola del «diviso tre» dà 2 km). b) La luce percorre 2,1 km in $d/c = 2058\ \text{m} / (3{,}00 \times 10^{8}\ \text{m/s}) \approx 7 \times 10^{-6}\ \text{s}$, un milionesimo del ritardo misurato: è del tutto trascurabile. c) Con 331 m/s: $d = 331\ \text{m/s} \times 6{,}0\ \text{s} \approx 2{,}0 \times 10^{3}\ \text{m}$. La differenza, circa 70 m, è minore dell'incertezza con cui si conta il tempo a mente; e la regola del «diviso tre» dà 2 km, in accordo con il calcolo.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Acustica, la parte della fisica che studia il suono, viene dal greco ἀκουστικός, «che riguarda l'udito», dal verbo ἀκούω, «udire».

Eco viene dal greco ἠχώ, «suono riflesso». Nel mito Eco è la ninfa che può solo ripetere le ultime parole che sente (Ovidio, *Metamorfosi* III).

Infrasuono e **ultrasuono** sono formati con due preposizioni latine: *infra*, «sotto», e *ultra*, «oltre, al di là»: sono i suoni sotto e oltre i limiti di frequenza dell'udito umano.

Armonico viene dal greco ἁρμονικός, da ἁρμονία, «connessione, accordo»: prima di indicare l'accordo dei suoni, la giuntura fra due parti che si incastrano bene.

13.2 Altezza, intensità e timbro

Due suoni possono differire in tre modi: uno può essere più acuto dell'altro, più forte, oppure «suonare» diverso, come la stessa nota sul pianoforte e sulla tromba. A ciascuna caratteristica corrisponde una grandezza dell'onda.

13.2.1 L'altezza e i limiti dell'udito

L'**altezza** di un suono è la caratteristica per cui lo diciamo acuto o grave, e dipende dalla **frequenza**: più alta la frequenza, più acuto il suono. Il la usato per accordare gli strumenti ha frequenza 440 Hz. L'orecchio umano percepisce suoni con frequenze comprese fra circa **20 Hz e 20 000 Hz**; il limite superiore si abbassa con l'età, e molti adulti non sentono più i suoni sopra i 15 000 Hz. Con $v = \lambda f$, nell'aria questi limiti corrispondono a lunghezze d'onda da circa 17 m a circa 1,7 cm.

Le onde di pressione con frequenza minore di 20 Hz si chiamano **infrasuoni**: li producono i terremoti, le eruzioni, il mare in tempesta, e alcuni animali, come gli elefanti, li usano per comunicare a grande distanza. Quelle con frequenza maggiore di 20 000 Hz si chiamano **ultrasuoni**. I pipistrelli emettono ultrasuoni di decine di kilohertz e ne ascoltano l'eco per localizzare ostacoli e prede al buio: è l'**ecolocalizzazione**. Già alla fine del Settecento Lazzaro Spallanzani, a Pavia, aveva mostrato che i pipistrelli si orientano con l'udito e non con la vista; che usassero ultrasuoni si scoprì solo nel Novecento.

Lo stesso principio è usato dal **sonar** delle navi, che misura la profondità del fondale o localizza oggetti sommersi dal tempo di andata e ritorno di un impulso sonoro, e dall'**ecografia**, che usa ultrasuoni di alcuni megahertz: nei tessuti molli, dove il suono va a circa 1540 m/s, la loro lunghezza d'onda è inferiore al millimetro, e per questo distinguono dettagli piccoli (un'onda aggira gli oggetti molto più piccoli della sua lunghezza d'onda: è la diffrazione del capitolo 12).

13.2.2 L'intensità e la legge dell'inverso del quadrato

Un'onda sonora trasporta energia. Per misurare quanta ne arriva in un punto si immagina una piccola superficie di area S, perpendicolare alla direzione di propagazione, e si considera la potenza P (l'energia al secondo, Fisica 3, capitolo 15) che la attraversa. L'**intensità** dell'onda è la potenza per unità di superficie:

$$I = \frac{P}{S} \qquad (\mathrm{W/m^2})$$

Una sorgente piccola rispetto alle distanze in gioco, che emette ugualmente in tutte le direzioni, si chiama sorgente puntiforme. Se il mezzo non assorbe energia, la potenza P che emette attraversa per intero ogni sfera centrata sulla sorgente; a distanza r si distribuisce sulla superficie della sfera, $4\pi r^2$, e l'intensità è

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

È la stessa legge dell'inverso del quadrato incontrata per la gravitazione (capitolo 4): raddoppiando la distanza l'intensità diventa un quarto, triplicandola un nono (Figura 13.2). All'aperto la diminuzione è anche un po' più rapida, perché l'aria assorbe energia; in una stanza le pareti riflettono il suono e la legge non vale.

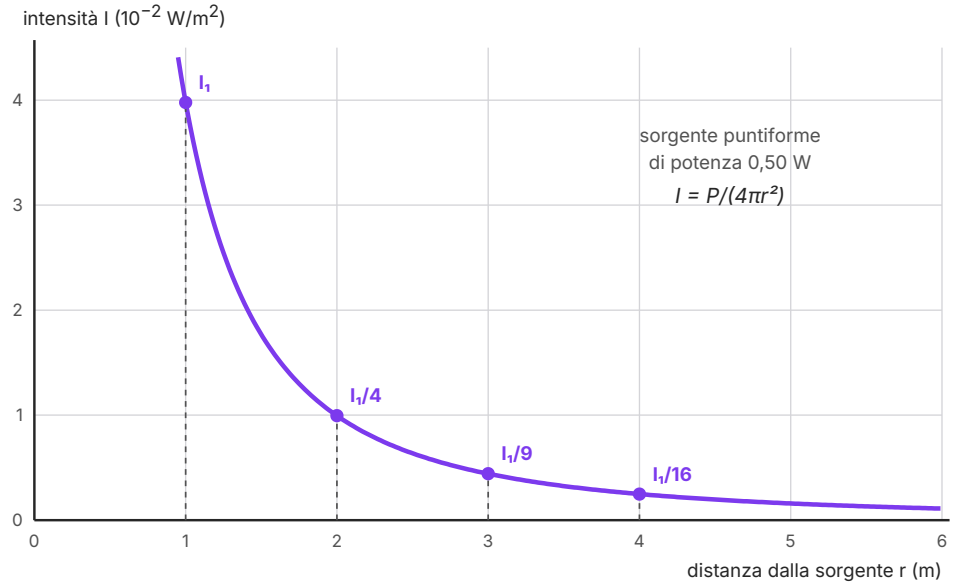


Figura 13.2 Intensità del suono in funzione della distanza per una sorgente puntiforme di potenza 0,50 W, calcolata con $I = P/(4\pi r^2)$ trascurando l'assorbimento dell'aria. A 1 m l'intensità I_1 vale circa $4{,}0 \times 10^{-2}$ W/m^2; a 2, 3 e 4 m si riduce a un quarto, un nono e un sedicesimo.

13.2.3 Il livello di intensità sonora: i decibel

L'orecchio percepisce intensità di appena 10^{-12} W/m^2 e sopporta, con dolore, intensità di circa 1 W/m^2, mille miliardi di volte maggiori. E non le percepisce in proporzione: un suono dieci volte più intenso ci sembra solo «un gradino» più forte, e un suono cento volte più intenso un altro gradino ancora. Per questo si usa una scala che conta le *potenze di dieci* del rapporto fra l'intensità I e un'intensità di riferimento $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2, vicina alla minima udibile. Lo strumento matematico che conta le potenze di dieci è il logaritmo.

DA RICORDARE

Strumenti matematici: il logaritmo in base 10

Il **logaritmo in base 10** di un numero positivo x, scritto $\log x$, è l'esponente a cui bisogna elevare 10 per ottenere x: se $10^a = x$, allora $\log x = a$. Così $\log 1000 = 3$, perché $10^3 = 1000$; $\log 10 = 1$; $\log 1 = 0$; $\log 0{,}01 = -2$. Per le potenze di dieci il logaritmo è semplicemente l'esponente.

Poiché $10^a \cdot 10^b = 10^{a+b}$, moltiplicare un numero per 10 aggiunge 1 al suo logaritmo, moltiplicarlo per 100 aggiunge 2; in generale $\log(x \cdot y) = \log x + \log y$. Per i numeri che non sono potenze di dieci si usa il tasto **log** della calcolatrice: $\log 2 \approx 0{,}30$ (infatti $10^{0{,}30} \approx 2$), $\log 3{,}2 \approx 0{,}51$. L'operazione inversa, «quale numero ha logaritmo a?», si fa con il tasto $\mathbf{10^x}$: il numero è 10^a. Il logaritmo lo studierai per intero in matematica; qui ti basta saperlo usare così.

Il **livello di intensità sonora** β di un suono di intensità I è

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad I_0 = 10^{-12}\ \text{W/m}^2$$

e si misura in **decibel** (dB), un decimo del bel, l'unità che prende il nome da Alexander Graham Bell. Per $I = I_0$ si ha $\log 1 = 0$ e quindi $\beta = 0$ dB: è la **soglia di udibilità**, per un suono di 1000 Hz. Ogni volta che l'intensità si moltiplica per 10, il livello aumenta di 10 dB; se si moltiplica per 100, di 20 dB; se raddoppia, di $10 \log 2 \approx 3$ dB. Una conversazione tranquilla a un metro di distanza ha circa 60 dB, cioè un'intensità 10^6 volte quella di riferimento, 10^{-6} W/m^2. Intorno ai 120 dB (1 W/m^2) il suono diventa doloroso: è la **soglia del dolore** (Figura 13.3).

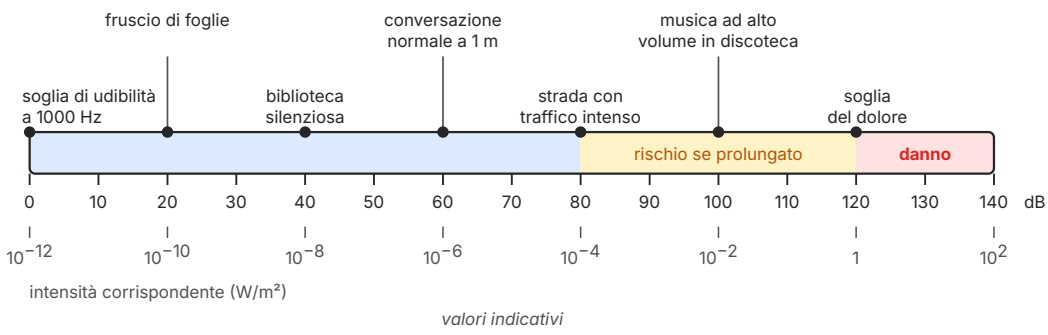


Figura 13.3 La scala dei decibel, con alcuni livelli sonori tipici (valori indicativi: i livelli reali dipendono dalla sorgente e dalla distanza). Sotto la scala, l'intensità corrispondente: ogni 10 dB in più l'intensità si moltiplica per 10, ogni 20 dB per 100. Sopra circa 120 dB il suono provoca dolore e danni immediati all'udito.

ERRORE FREQUENTE

Due sorgenti, doppio dei decibel?

«Un altoparlante produce 70 dB; due altoparlanti uguali ne producono 140.» No. Due sorgenti uguali e indipendenti raddoppiano l'*intensità*, e raddoppiare l'intensità aggiunge solo 10 log 2 ≈ 3 dB: il livello passa da 70 a circa 73 dB. Per salire da 70 a 80 dB servono dieci altoparlanti; per arrivare a 140 dB ce ne vorrebbero dieci milioni. I decibel non si sommano: si sommano le intensità, e poi si torna ai decibel.

ESEMPIO SVOLTO

Allontanarsi da chi parla

Problema. A 1,0 m da Luca, che parla con voce normale, il livello sonoro è 60 dB. Considera la voce una sorgente puntiforme e trascura l'assorbimento dell'aria e le riflessioni. a) Qual è l'intensità a 1,0 m? b) Quale potenza sonora emette Luca? c) Quale livello misuri a 4,0 m?

Soluzione. a) Da $\beta = 10 \log(I/I_0)$: $\log(I/I_0) = 60/10 = 6$, quindi $I = 10^6 \cdot 10^{-12}$ W/m^2 $= 1{,}0 \times 10^{-6}$ W/m^2. b) $P = I \cdot 4\pi r^2 = 1{,}0 \times 10^{-6}$ W/m^2 $\times\, 4\pi \times (1{,}0\text{ m})^2 \approx 1{,}3 \times 10^{-5}$ W: una potenza minuscola, circa un centomillesimo di watt. c) A distanza quadrupla l'intensità è $4^2 = 16$ volte minore: $I = 6{,}3 \times 10^{-8}$ W/m^2, e $\beta = 10 \log(6{,}3 \times 10^4) \approx 48$ dB.

Controllo. Si può ragionare direttamente in decibel: dividere l'intensità per 16 toglie 10 log 16 ≈ 12 dB, e 60 − 12 = 48 dB. Ogni raddoppio della distanza toglie circa 6 dB (l'intensità diventa un quarto: −3 dB due volte).

13.2.4 Il timbro

Un la di 440 Hz suonato da un diapason, da un violino e da un clarinetto ha la stessa altezza, e si può fare in modo che abbia anche lo stesso livello sonoro; eppure distinguiamo subito i tre strumenti. La differenza è nella *forma* dell'onda. Il diapason produce un'onda quasi perfettamente sinusoidale, un suono puro; uno strumento musicale produce invece, insieme alla frequenza fondamentale f_1, che determina l'altezza percepita, anche le armoniche $2f_1$, $3f_1$, … (capitolo 12), ciascuna con la propria intensità. Il **timbro** è la caratteristica che distingue suoni della stessa altezza e intensità, e dipende da quali di queste frequenze sono presenti e con quale intensità relativa.

COLLEGAMENTI

Scienze: l'orecchio e la salute dell'udito

Il suono, convogliato nel condotto uditivo, fa vibrare la membrana del timpano; tre ossicini, martello, incudine e staffa, trasmettono le vibrazioni all'orecchio interno, dove la **coclea**, un condotto a chiocciola pieno di liquido, contiene migliaia di cellule ciliate: zone diverse della coclea rispondono a frequenze diverse, e le cellule trasformano le vibrazioni in segnali nervosi.

Le cellule ciliate danneggiate non si rigenerano: un'esposizione prolungata a suoni intensi, come la musica ad alto volume in cuffia, può causare una perdita di udito permanente. Per questo la normativa europea sulla sicurezza del lavoro impone misure di protezione quando l'esposizione media su una giornata lavorativa supera gli 80–85 dB. Ricorda che +3 dB significano il doppio dell'intensità, cioè dell'energia che arriva all'orecchio in ogni secondo: ascoltare a 88 dB per mezz'ora espone l'orecchio alla stessa energia sonora che 85 dB per un'ora.

13.3 Eco, riverbero e acustica degli spazi

13.3.1 L'eco

Quando incontra un ostacolo esteso, una parete di roccia o la facciata di un edificio, il suono si riflette, come ogni onda (capitolo 12). Se l'onda riflessa arriva all'orecchio abbastanza tempo dopo quella diretta, la percepiamo come una ripetizione distinta: è l'**eco**. L'orecchio separa due suoni brevi se li separa almeno circa un decimo di secondo; in un tempo minore li fonde in uno solo. In 0,1 s il suono percorre 343 m/s × 0,1 s ≈ 34 m, e poiché deve andare fino all'ostacolo e tornare, la distanza minima per un'eco distinta è

$$d_{\text{min}} = \frac{v \cdot 0{,}1\ \text{s}}{2} \approx \frac{343\ \text{m/s} \times 0{,}1\ \text{s}}{2} \approx 17\ \text{m}$$

Misurando il tempo di andata e ritorno di un suono breve, un battito di mani o un impulso del sonar, si ricava la distanza dell'ostacolo: $d = v\,\Delta t/2$. È lo stesso calcolo del pipistrello e del sonar.

13.3.2 Il riverbero

In una stanza le pareti sono più vicine di 17 m: le riflessioni arrivano dopo pochi centesimi di secondo e, invece di un'eco, prolungano il suono, che si spegne poco a poco mentre a ogni riflessione una parte dell'energia viene assorbita. Questo prolungamento è il **riverbero**. Una chiesa grande, con pareti di pietra che riflettono quasi tutto, ha un riverbero lungo, anche di alcuni secondi: un coro vi suona pieno, ma un discorso diventa confuso perché ogni sillaba si sovrappone alla coda delle precedenti. Un'aula con tende e pannelli assorbenti ne ha uno breve: progettare una sala significa scegliere forme e materiali adatti alla musica o alla parola.

COLLEGAMENTI

Storia dell'arte e latino: l'acustica del teatro antico

Il teatro di Epidauro, del IV secolo a.C., è celebre perché una parola pronunciata nell'orchestra si sente fino alle ultime file. La fisica di questo capitolo spiega in buona parte il risultato: la cavea è ripida, e il suono diretto raggiunge ogni spettatore passando sopra le teste delle file inferiori; la pietra dei gradini riflette il suono verso il pubblico; il teatro è all'aperto, senza pareti che producano riverbero, e lontano dai rumori.

Nel libro V del *De architectura* Vitruvio descrive (V, 5) dei vasi di bronzo, che chiama con un nome greco *echea* (ἠχεῖα), da collocare in nicchie sotto i gradini, accordati secondo gli intervalli musicali, perché la voce, colpendoli, risuoni più chiara. Quanto questi vasi fossero davvero efficaci è ancora discusso: il passo resta però una delle prime riflessioni scritte sull'acustica di un edificio.

13.4 Gli strumenti musicali

Ogni strumento musicale ha una parte che vibra: una corda, una colonna d'aria, una membrana. Le frequenze che uno strumento produce sono quelle delle sue **onde stazionarie** (capitolo 12), che si formano solo per le lunghezze d'onda che «entrano» esattamente fra i due estremi.

13.4.1 Le corde

In una corda di lunghezza L fissata ai due estremi, che sono nodi, le onde stazionarie possibili hanno $\lambda_n = 2L/n$ e quindi frequenze

$$f_n = n\frac{v}{2L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

dove v è la velocità delle onde *sulla corda*, che dipende dalla tensione F_T e dalla densità lineare μ ($v = \sqrt{(F_T/\mu)}$, capitolo 12), non la velocità del suono nell'aria. Una corda pizzicata o strofinata vibra contemporaneamente nella frequenza fondamentale $f_1 = v/(2L)$ e in molte armoniche, e il suo timbro dipende da quanto ciascuna è intensa. Il violinista accorcia la corda premendola con il dito e ottiene note più acute; una corda più spessa (μ maggiore) suona più grave, una corda più tesa più acuta.

13.4.2 Le canne aperte e chiuse

Negli strumenti a fiato vibra una colonna d'aria. Un'onda sonora si riflette anche all'estremità aperta di una canna, dove l'aria interna incontra l'aria libera; lì la pressione resta quella ambiente e le molecole oscillano con la massima ampiezza: un'estremità aperta è un ventre di spostamento. All'estremità chiusa, invece, l'aria non può spostarsi: è un nodo. In una canna aperta

ai due estremi, come un flauto, ci sono due ventri, e le frequenze sono le stesse della corda, con v velocità del suono nell'aria: $f_n = n\,v/(2L)$. In una canna chiusa a un estremo, con un nodo e un ventre, il modo più semplice contiene un quarto di lunghezza d'onda ($\lambda_1 = 4L$), il successivo tre quarti, poi cinque quarti (Figura 13.4):

$$f_n = (2n - 1)\,\frac{v}{4L} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

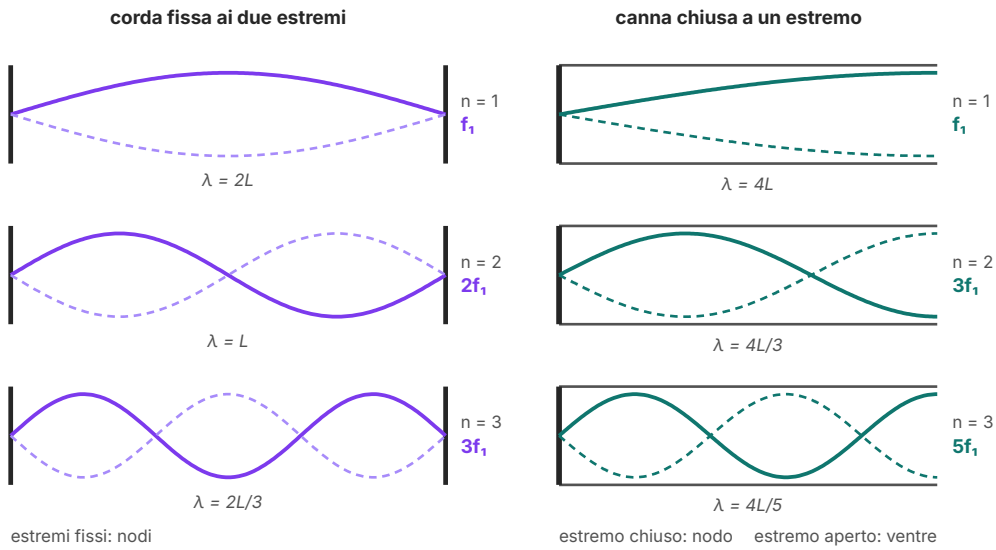


Figura 13.4 I primi tre modi di vibrazione di una corda fissa ai due estremi (a sinistra) e di una canna chiusa a un estremo e aperta all'altro (a destra), calcolati per la stessa lunghezza L. Le curve indicano l'ampiezza dell'oscillazione lungo la corda e, nella canna, l'ampiezza dello spostamento dell'aria: nodo all'estremo chiuso, ventre all'estremo aperto. La corda ha tutte le armoniche, f_1, $2f_1$, $3f_1$; la canna chiusa solo quelle dispari, f_1, $3f_1$, $5f_1$.

Una canna chiusa ha quindi due particolarità: a parità di lunghezza suona un'ottava sotto la canna aperta (la sua fondamentale è $v/(4L)$ invece di $v/(2L)$) e possiede solo le armoniche dispari, il che le dà un timbro più cupo. Una canna d'organo aperta lunga 2,0 m ha fondamentale 343 m/s / (2 × 2,0 m) ≈ 86 Hz; chiusa in cima, la stessa canna scende a circa 43 Hz. Un flauto traverso si comporta come una canna aperta lunga circa 65 cm: $f_1 \approx 343/(2 \times 0{,}65)$ Hz ≈ 264 Hz, vicino al do centrale del pianoforte (262 Hz). Aprendo i fori si accorcia la colonna d'aria che vibra e la nota sale.

13.4.3 Pitagora e il monocordo

La scoperta più antica della fisica matematica riguarda proprio le corde. La tradizione attribuisce a Pitagora (VI secolo a.C.) e alla sua scuola l'osservazione che due corde uguali, ugualmente

tese, producono suoni gradevoli insieme, **consonanze**, quando le loro lunghezze stanno in rapporti di numeri interi piccoli: 2 : 1 per l'**ottava**, 3 : 2 per la quinta, 4 : 3 per la quarta. Lo strumento per verificarlo è il monocordo, una cassa con una sola corda tesa e un ponticello mobile che la divide in due parti. Che la scoperta risalga davvero a Pitagora non si può dimostrare: ce la trasmettono autori molto più tardi, come Nicomaco di Gerasa (II secolo d.C.) e Boezio (VI secolo d.C.), insieme a leggende come quella dei martelli di un fabbro che avrebbero suonato in accordo. I rapporti, invece, sono esatti.

Oggi sappiamo leggerli come rapporti di frequenze. Poiché $f_1 = v/(2L)$, a parità di tensione e di corda la frequenza è inversamente proporzionale alla lunghezza: dimezzare la corda raddoppia la frequenza. La Tabella 13.1 mostra gli intervalli pitagorici a partire da una nota di 220 Hz.

Tabella 13.1 Gli intervalli consonanti della tradizione pitagorica, per una corda che, intera, dà una nota di 220 Hz (un la). Il rapporto fra le lunghezze è l'inverso di quello fra le frequenze.

Intervallo	Lunghezza della corda (frazione dell'intera)	Rapporto di frequenze	Frequenza della nota più acuta (Hz)
unisono	1	1 : 1	220
quarta	3/4	4 : 3	293,3
quinta	2/3	3 : 2	330
ottava	1/2	2 : 1	440

Perché proprio questi rapporti suonano bene? Una spiegazione viene dalle armoniche. La nota di 220 Hz ha armoniche a 440, 660, 880 Hz…; la sua quinta, a 330 Hz, ha armoniche a 660, 990 Hz…: la terza armonica della prima e la seconda della seconda coincidono, a 660 Hz. Due note con molte armoniche in comune suonano fuse e stabili; armoniche vicine ma non coincidenti producono battimenti, che l'orecchio sente come una ruvidezza.

APPROFONDIMENTO

Il comma pitagorico e il temperamento equabile

Con le quinte pitagoriche si può costruire un'intera scala: salendo di quinta in quinta (moltiplicando ogni volta la frequenza per 3/2) e riportando le note nella stessa ottava (dividendo per 2), dopo dodici quinte si dovrebbe tornare alla nota di partenza, sette ottave più in alto. Ma i conti non tornano: $(3/2)^{12} \approx 129{,}75$, mentre $2^7 = 128$. Le dodici quinte superano le sette ottave di un fattore $129{,}75/128 \approx 1{,}0136$, piccolo ma udibile: è il **comma pitagorico**. Non esiste quindi una scala in cui tutte le quinte e tutte le ottave siano perfette.

La soluzione oggi più diffusa è il **temperamento equabile**: l'ottava è divisa in dodici semitoni uguali, ciascuno con rapporto di frequenze pari alla radice dodicesima di 2, circa 1,0595 (con la calcolatrice: $1{,}0595^{12} \approx 2$). Le ottave sono perfette, ma la quinta equabile ha rapporto $2^{7/12} \approx 1{,}4983$ invece di 1,5: leggermente «stretta», abbastanza poco perché l'orecchio la accetti. In cambio si suona in tutte le tonalità con la stessa accordatura.

La tradizione dei martelli di Pitagora offre anche una lezione di metodo. Nel Cinquecento Vincenzo Galilei, musicista e padre di Galileo, fece la prova con pesi appesi a corde uguali, e trovò che per ottenere l'ottava i pesi non devono stare nel rapporto 2 : 1, ma 4 : 1. È ciò che prevede la fisica: f è proporzionale a $v = \sqrt{(F_T/\mu)}$, e per raddoppiare f bisogna quadruplicare la tensione.

13.4.4 I battimenti

Due suoni di frequenze uguali, emessi insieme, si sommano sempre allo stesso modo. Ma se le frequenze f_1 e f_2 sono vicine e non uguali, per il principio di sovrapposizione (capitolo 12) le due onde passano periodicamente dall'essere in fase, e rinforzarsi, all'essere in opposizione, e quasi annullarsi. Si sente un suono di frequenza intermedia la cui intensità cresce e cala regolarmente: sono i **battimenti** (Figura 13.5). Il numero di battimenti al secondo, la frequenza di battimento, è la differenza fra le due frequenze:

$$f_b = |f_1 - f_2|$$

I battimenti sono lo strumento più preciso dell'accordatore. Si suona la corda insieme a un diapason di riferimento: finché si sentono battimenti la corda è stonata, e più sono lenti più si è vicini all'intonazione; quando spariscono, le frequenze coincidono.

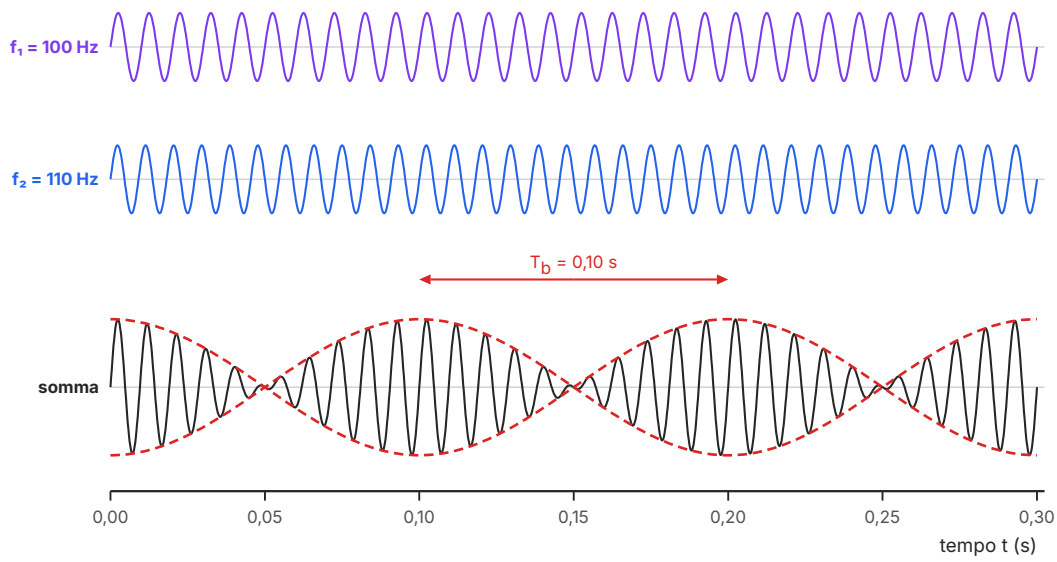


Figura 13.5 I battimenti, calcolati per due onde della stessa ampiezza con frequenze f_1 = 100 Hz e f_2 = 110 Hz. In basso la loro somma: l'ampiezza (inviluppo tratteggiato) passa dal doppio a zero e di nuovo al doppio con periodo T_b = 0,10 s, cioè 10 volte al secondo, pari a $|f_1 - f_2|$ = 10 Hz.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere un grafico di battimenti

Problema. a) Nella Figura 13.5, quanti massimi dell'inviluppo ci sono fra 0 e 0,30 s, e quale frequenza di battimento se ne ricava? b) Quante oscillazioni complete compie la prima onda in quell'intervallo, e quante la seconda? Che relazione c'è con i battimenti? c) Un'accordatrice suona una corda di violino insieme a un diapason da 440 Hz e conta 12 battimenti in 4,0 s. Quali frequenze può avere la corda? Tendendola un po', i battimenti rallentano: quale delle due era quella giusta?

Soluzione. a) L'inviluppo ha massimi a 0, 0,10, 0,20 e 0,30 s: il periodo dei battimenti è T_b = 0,10 s e $f_b = 1/T_b$ = 10 Hz, uguale a 110 Hz − 100 Hz. b) In 0,30 s la prima onda compie 100 Hz × 0,30 s = 30 oscillazioni, la seconda 110 Hz × 0,30 s = 33: la seconda «guadagna» un'oscillazione ogni 0,10 s, e ogni volta che ne ha guadagnata una intera le due onde tornano in fase. Tre oscillazioni guadagnate, tre battimenti. c) f_b = 12/4,0 s = 3,0 Hz, quindi la corda ha 440 + 3,0 = 443 Hz oppure 440 − 3,0 = 437 Hz. Tendere la corda ne aumenta la frequenza; se i battimenti rallentano, la frequenza si sta avvicinando a 440 Hz dal basso: la corda era a **437 Hz**.

Controllo. Se fosse stata a 443 Hz, aumentandone la frequenza la differenza con 440 Hz sarebbe cresciuta e i battimenti sarebbero diventati più rapidi.

13.5 L'effetto Doppler

Il rombo di una moto da corsa, acuto mentre arriva, si fa di colpo più grave mentre si allontana; il pilota sente invece sempre la stessa nota. Il cambiamento della frequenza percepita dovuto al moto della sorgente o dell'osservatore rispetto al mezzo si chiama **effetto Doppler**, dal fisico austriaco Christian Doppler, che lo propose nel 1842. Nel 1845 il meteorologo olandese Christophorus Buys Ballot lo verificò per il suono con un esperimento musicale, con trombettisti su un treno in corsa e musicisti fermi lungo la linea che ne valutavano la nota.

13.5.1 Sorgente in moto

Una sorgente ferma emette onde di frequenza f: i fronti d'onda sono sfere concentriche, ugualmente distanziate di $\lambda = v/f$ in tutte le direzioni. Se la sorgente si muove con velocità v_s, ogni fronte è emesso da una posizione un po' più avanzata del precedente, e resta centrato nel punto in cui è nato (Figura 13.6, a). Davanti alla sorgente i fronti si affollano: in un periodo $T = 1/f$ l'onda avanza di $v\,T$, ma la sorgente le corre dietro per un tratto $v_s T$, quindi la distanza fra due fronti diventa $\lambda' = (v - v_s)T$. Un osservatore fermo davanti alla sorgente riceve onde che viaggiano alla solita velocità v (la velocità dipende dal mezzo, non dalla sorgente) ma più ravvicinate, quindi con frequenza $f' = v/\lambda'$ maggiore. Dietro alla sorgente vale il contrario.

$$f' = f \cdot \frac{v}{v \mp v_s} \qquad (- \text{ se la sorgente si avvicina, } + \text{ se si allontana})$$

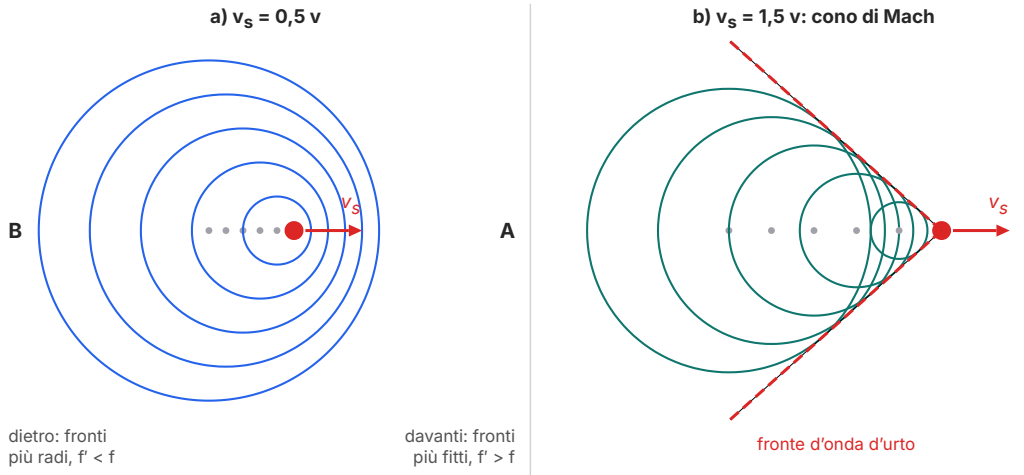


Figura 13.6 Fronti d'onda emessi a intervalli uguali da una sorgente (punto rosso) che si muove verso destra, calcolati con la velocità del suono v uguale in tutte le direzioni; i punti grigi sono le posizioni da cui ciascun fronte è stato emesso. a) Con v_s = 0,5 v i fronti sono più fitti davanti alla sorgente (osservatore A: frequenza maggiore) e più radi dietro (osservatore B: frequenza minore). b) Con v_s = 1,5 v la sorgente supera le proprie onde: i fronti si inviluppano in un cono, il cono di Mach, lungo il quale si concentra l'onda d'urto.

13.5.2 Osservatore in moto

Ora la sorgente è ferma e l'osservatore le va incontro con velocità v_o. I fronti d'onda sono quelli regolari di una sorgente ferma, ma l'osservatore, correndo loro incontro, ne incontra più di f al secondo: rispetto a lui i fronti, distanti λ, arrivano con velocità $v + v_o$. Allontanandosi ne incontra meno. Quindi

$$f' = f \cdot \frac{v \pm v_o}{v} \qquad (+ \text{ se l'osservatore si avvicina, } - \text{ se si allontana})$$

In tutti i casi vale una regola semplice: **quando sorgente e osservatore si avvicinano la frequenza percepita aumenta, quando si allontanano diminuisce**. Ma le due formule non sono uguali: muoversi alla stessa velocità non dà lo stesso effetto se si muove la sorgente o l'osservatore, perché per il suono non conta solo il moto relativo dei due, ma anche il moto di ciascuno rispetto all'aria, il mezzo in cui l'onda si propaga. E in nessun caso cambia la frequenza che la sorgente *emette*: la sirena suona sempre la stessa nota, è l'onda che arriva all'orecchio a essere diversa.

ESEMPIO SVOLTO

La sirena dell'ambulanza

Problema. La sirena di un'ambulanza emette un suono di 700 Hz. L'ambulanza viaggia a 25 m/s (90 km/h) su una strada rettilinea; l'aria è ferma, a 20 °C. a) Quale frequenza sente un pedone fermo sul marciapiede mentre l'ambulanza si avvicina, e quale mentre si allontana? b) L'ambulanza ora è ferma con la sirena accesa e un ciclista le va incontro a 10 m/s: quale frequenza sente?

Soluzione. a) Sorgente in moto: avvicinamento, $f' = 700\ \text{Hz} \times 343/(343 - 25) = 700\ \text{Hz} \times 343/318 \approx 755\ \text{Hz}$; allontanamento, $f' = 700\ \text{Hz} \times 343/(343 + 25) = 700\ \text{Hz} \times 343/368 \approx 652\ \text{Hz}$. Al passaggio la nota scende di circa 100 Hz: è il salto che senti per strada. b) Osservatore in moto, in avvicinamento: $f' = 700\ \text{Hz} \times (343 + 10)/343 \approx 720\ \text{Hz}$.

Controllo. Le frequenze sono maggiori di 700 Hz in avvicinamento, minori in allontanamento. Il rapporto $v/(v - v_s)$ è un numero puro, quindi f' ha l'unità di f.

Con l'**ecografia Doppler** il medico misura la velocità del sangue nei vasi, perché gli ultrasuoni riflessi dai globuli rossi in movimento tornano con frequenza cambiata; con lo stesso principio, ma con onde radio (le studierai il prossimo anno), funzionano i radar che misurano la velocità dei veicoli.

13.5.3 Il muro del suono e il cono di Mach

Se la sorgente si muove alla velocità del suono, i fronti emessi in avanti non riescono ad allontanarsi da essa e si accumulano in un'unica zona di pressione elevatissima: è il cosiddetto «muro del suono». Il rapporto fra la velocità di un oggetto e quella del suono si chiama **numero di Mach**, dal fisico e filosofo austriaco Ernst Mach: un aereo a Mach 2 vola a velocità doppia di quella del suono nell'aria che attraversa.

Se la sorgente è più veloce del suono, supera le proprie onde. I fronti emessi nei diversi istanti si sovrappongono lungo la superficie di un cono che ha il vertice nella sorgente e si allarga dietro di essa, il **cono di Mach** (Figura 13.6, b): più la sorgente è veloce, più il cono è stretto. Lungo la sua superficie viaggia un'**onda d'urto**, un brusco salto di pressione; quando passa su di noi sentiamo il *bang* sonico, un colpo secco simile a un'esplosione, che non nasce solo quando l'aereo «rompe il muro» ma accompagna tutto il volo supersonico. Lo stesso disegno, in due dimensioni, è la scia a V di una barca più veloce delle onde che produce sull'acqua.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: la velocità del suono con un tubo di risonanza

Materiali. Un tubo di vetro o di plastica trasparente lungo circa 1 m e di diametro interno 3 cm, aperto in alto e immerso in basso nell'acqua di un cilindro graduato alto (oppure collegato con un tubo di gomma a un serbatoio che si alza e si abbassa); tre diapason da 384, 440 e 512 Hz con un martelletto di gomma; un metro a nastro; un termometro.

Procedimento. Il tubo con l'acqua è una canna chiusa a un estremo, la superficie dell'acqua, e di lunghezza variabile. 1) Tieni il diapason da 440 Hz, vibrante, appena sopra l'imboccatura. 2) Partendo con il tubo quasi pieno, abbassa lentamente l'acqua: a una lunghezza ℓ_1 della colonna d'aria il suono si rinforza nettamente, perché la frequenza del diapason coincide con la fondamentale della canna (prima risonanza). 3) Più in basso trovi una seconda risonanza, a ℓ_2 (Figura 13.7). 4) Misura ℓ_1 e ℓ_2 dal bordo del tubo alla superficie dell'acqua; ripeti con gli altri diapason; misura la temperatura dell'aria. Il ventre si forma un po' fuori dal tubo, quindi ℓ_1 è un po' meno di $\lambda/4$; ma la differenza $\Delta\ell = \ell_2 - \ell_1 = \lambda/2$ non risente di questo effetto. Dunque $v = \lambda f = 2f\Delta\ell$.

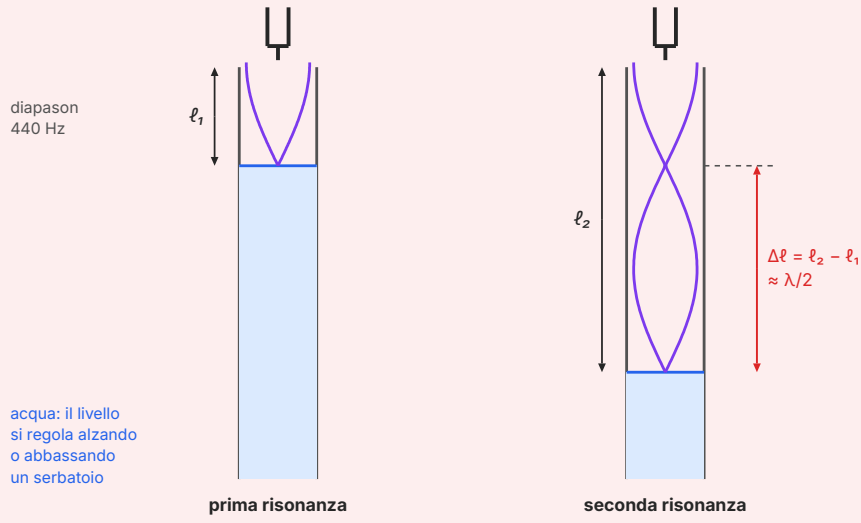


Figura 13.7 Il tubo di risonanza alla prima e alla seconda risonanza con un diapason da 440 Hz (schema). Le curve viola indicano l'ampiezza dello spostamento dell'aria: nodo sulla superficie dell'acqua, ventre poco sopra l'imboccatura. Fra le due risonanze la colonna d'aria si allunga di mezza lunghezza d'onda.

Tabella 13.2 Dati di un gruppo: lunghezze della colonna d'aria alle prime due risonanze (incertezza ± 0,5 cm ciascuna, quindi ± 1,0 cm sulla differenza); temperatura dell'aria (22 ± 1) °C. La velocità è calcolata con $v = 2f\Delta\ell$, con l'incertezza propagata.

f (Hz)	ℓ_1 (cm)	ℓ_2 (cm)	$\Delta\ell$ (cm)	v (m/s)
384	21,8	66,1	44,3	340 ± 8
440	18,5	58,1	39,6	349 ± 9
512	16,1	49,6	33,5	343 ± 10

Che cosa concludere. Le tre misure, ottenute con frequenze diverse, sono compatibili fra loro: la velocità del suono non dipende dalla frequenza. La media è circa 344 m/s, con una semidispersione di circa 4 m/s: $v = (344 \pm 4)$ m/s, in ottimo accordo con il valore atteso a 22 °C, $331 + 0{,}6 \times 22 \approx 344$ m/s. Da $\Delta\ell/2 - \ell_1$ si ricava anche di quanto il ventre sporge oltre l'imboccatura: fra circa 0,4 e 1,3 cm, in media poco meno di 1 cm, cioè una frazione del diametro del tubo.

Sicurezza. Non battere il diapason su superfici dure né sul vetro: usa il martelletto di gomma. Asciuga subito l'acqua versata.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: tabella con unità e incertezze, calcolo di v per ogni diapason con l'incertezza propagata, media e semidispersione, confronto con il valore atteso alla temperatura misurata (compatibilità), errori sistematici (individuazione del massimo di intensità a orecchio, menisco dell'acqua, temperatura dell'aria nel tubo).

IN SINTESI

Le leggi del capitolo

Velocità del suono: $v = \lambda f$; nell'aria $v \approx (331 + 0{,}6\,t)$ m/s, 343 m/s a 20 °C: dipende dal mezzo e dalla sua temperatura, non dalla frequenza. Distanza dall'eco: $d = v\Delta t/2$.

Intensità: $I = P/S$ (W/m^2), la potenza che attraversa l'unità di superficie; per una sorgente puntiforme $I = P/(4\pi r^2)$: a distanza doppia, intensità quattro volte minore.

Livello di intensità sonora: $\beta = 10\log(I/I_0)$, con $I_0 = 10^{-12}$ W/m^2, in decibel: ×10 nell'intensità dà +10 dB, ×2 dà circa +3 dB.

Corde e canne aperte: $f_n = n\,v/(2L)$, tutte le armoniche; **canne chiuse a un estremo:** $f_n = (2n - 1)v/(4L)$, solo le armoniche dispari (Hz).

Battimenti: $f_b = |f_1 - f_2|$: il numero di rinforzi al secondo è la differenza delle frequenze.

Effetto Doppler: sorgente in moto $f' = f \cdot v/(v \mp v_s)$ (− in avvicinamento); osservatore in moto $f' = f \cdot (v \pm v_o)/v$ (+ in avvicinamento): avvicinandosi la frequenza percepita aumenta, allontanandosi diminuisce.

SINTESI

- Il suono è un'onda meccanica longitudinale: compressioni e rarefazioni del mezzo che si propagano trasportando energia, non materia. Non si propaga nel vuoto.
- La velocità del suono dipende dal mezzo: nell'aria circa 343 m/s a 20 °C e 331 m/s a 0 °C, e cresce con la temperatura; è molto maggiore nei liquidi e nei solidi. Il tuono ritarda di circa 3 s per kilometro.
- L'altezza dipende dalla frequenza; l'orecchio umano sente fra circa 20 Hz e 20 000 Hz. Sotto ci sono gli infrasuoni, sopra gli ultrasuoni, usati da pipistrelli, sonar ed ecografia.
- L'intensità è la potenza per unità di superficie, $I = P/S$; per una sorgente puntiforme $I = P/(4\pi r^2)$, la legge dell'inverso del quadrato.
- Il livello di intensità sonora $\beta = 10 \log(I/I_0)$ si misura in decibel: 0 dB è la soglia di udibilità, circa 120 dB la soglia del dolore; due sorgenti uguali danno 3 dB in più, non il doppio dei decibel.
- Il timbro distingue suoni della stessa altezza e intensità e dipende dalle armoniche presenti e dalla loro intensità.
- L'eco è un suono riflesso percepito distinto; richiede un ostacolo ad almeno circa 17 m. A distanze minori le riflessioni producono il riverbero, che l'acustica di una sala deve controllare.
- Le frequenze di uno strumento sono quelle delle sue onde stazionarie: corde e canne aperte $f_n = n\,v/(2L)$, canne chiuse a un estremo $f_n = (2n - 1)v/(4L)$, solo armoniche dispari.
- La tradizione pitagorica lega le consonanze a rapporti di numeri piccoli: ottava 2 : 1, quinta 3 : 2, quarta 4 : 3, oggi letti come rapporti di frequenze; il comma pitagorico impedisce una scala con tutte le quinte perfette, e il temperamento equabile lo distribuisce.
- Due suoni di frequenze vicine producono battimenti con frequenza $f_b = |f_1 - f_2|$, usati per accordare gli strumenti.
- Nell'effetto Doppler la frequenza percepita aumenta quando sorgente e osservatore si avvicinano e diminuisce quando si allontanano; le formule per la sorgente e per l'osservatore in moto sono diverse, e la frequenza emessa non cambia.
- Una sorgente più veloce del suono produce un cono di Mach, lungo il quale viaggia un'onda d'urto: il bang sonico.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Nell'aria il suono è un'onda:
   - **A.** trasversale, in cui le molecole oscillano perpendicolarmente alla direzione di propagazione
   - **B.** longitudinale, in cui le molecole oscillano nella direzione di propagazione
   - **C.** che trasporta l'aria dalla sorgente all'orecchio
   - **D.** che si propaga anche nel vuoto, ma più lentamente

2. ● In quale di questi mezzi il suono è più veloce?
   - **A.** aria a 0 °C
   - **B.** aria a 20 °C
   - **C.** acqua di mare
   - **D.** acciaio

3. ● Un'onda sonora di frequenza 30 kHz è:
   - **A.** un infrasuono
   - **B.** un suono molto grave
   - **C.** un ultrasuono
   - **D.** un suono udibile da tutti gli esseri umani

4. ●● Ti allontani da una sorgente puntiforme, passando da 2 m a 6 m. Trascurando l'assorbimento dell'aria, l'intensità del suono che ricevi:
   - **A.** diventa un nono
   - **B.** diventa un terzo
   - **C.** diventa un sesto
   - **D.** resta la stessa, perché la potenza della sorgente non cambia

5. ●● Il livello sonoro di un suono passa da 40 dB a 60 dB. La sua intensità è diventata:
   - **A.** 20 volte maggiore
   - **B.** 100 volte maggiore
   - **C.** 1,5 volte maggiore
   - **D.** 2 volte maggiore

6. ● Il timbro di un suono dipende:
   - **A.** soltanto dalla frequenza fondamentale
   - **B.** soltanto dall'intensità
   - **C.** dalla velocità del suono nel mezzo
   - **D.** da quali armoniche sono presenti e con quale intensità relativa

7. ●● Una canna chiusa a un estremo ha frequenza fondamentale f_1. Le altre frequenze che può emettere sono:
   A. $3f_1$, $5f_1$, $7f_1$, ...
   B. $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, ...
   C. $2f_1$, $4f_1$, $6f_1$, ...
   D. nessuna: una canna chiusa emette solo la fondamentale

8. ●● Un'ambulanza con la sirena accesa si allontana da te, che sei fermo. Quale affermazione è corretta?
   A. la sirena emette una frequenza più bassa del normale
   B. senti una frequenza più alta di quella emessa
   C. senti una frequenza più bassa di quella emessa
   D. non cambia nulla, perché tu sei fermo

Vero o falso

9. ● Due suoni con la stessa frequenza fondamentale ma timbro diverso hanno la stessa altezza. V / F

10. ● Due altoparlanti uguali che, accesi da soli, producono ciascuno 70 dB in un punto, accesi insieme producono in quel punto 140 dB. V / F

11. ●● Il suono si propaga più velocemente nell'aria calda che nell'aria fredda. V / F

12. ●● Nell'effetto Doppler, un osservatore che va verso una sorgente ferma a 30 m/s sente la stessa frequenza che sentirebbe stando fermo con la sorgente che gli va incontro a 30 m/s. V / F

13. ●● Per udire distintamente l'eco di un battito di mani bisogna essere ad almeno circa 17 m dalla parete che lo riflette. V / F

Applicare

14. ● Durante un temporale, a 20 °C, il tuono arriva 4,5 s dopo il lampo. A che distanza è caduto il fulmine?

15. ● Calcola la lunghezza d'onda, nell'aria a 20 °C, dei suoni di 20 Hz e di 20 000 Hz, i limiti dell'udito umano.

16. ● Un ecografo usa ultrasuoni di 2,0 MHz; nei tessuti molli il suono si propaga a circa 1540 m/s. Calcola la lunghezza d'onda.

17. ●● Calcola il livello di intensità sonora di un suono di intensità $3{,}2 \times 10^{-5}\ \mathrm{W/m^2}$.

18. ●● In un locale il livello sonoro è 95 dB. Quanto vale l'intensità del suono?

19. ●● Usa la Figura 13.2: a) leggi l'intensità a 2 m e a 4 m dalla sorgente e verifica che il loro rapporto è 4; b) a quale distanza l'intensità è un nono di quella a 1 m?

20. ● Completa: «L'altezza di un suono dipende dalla sua _____ ; il livello di intensità sonora si misura in _____ ; le onde sonore con frequenza minore di 20 Hz si chiamano _____ ; il numero di battimenti al secondo è uguale alla _____ fra le due frequenze.»

Problemi

21. ●●● La corda del la di una chitarra è lunga 0,65 m (fra il capotasto e il ponticello) e ha frequenza fondamentale 110 Hz. a) Calcola la velocità delle onde sulla corda. b) Quali sono le frequenze della seconda e della terza armonica? c) Qual è la lunghezza d'onda nell'aria, a 20 °C, del suono fondamentale? Perché è diversa da quella delle onde sulla corda? d) La corda ha densità lineare $\mu = 5{,}0 \times 10^{-3}$ kg/m: con quale tensione è tesa? (Ripassa il capitolo 12.)

22. ●●● Un sistema di altoparlanti, che puoi trattare come una sorgente puntiforme, emette una potenza sonora di 2,0 W. Trascura l'assorbimento dell'aria e le riflessioni. a) Calcola l'intensità e il livello sonoro a 10 m. b) A quale distanza il livello scende a 85 dB? c) Quale livello si avrebbe a 10 m con due sistemi uguali accesi insieme?

23. ●●● Un treno passa senza fermarsi in una stazione a 30 m/s suonando la tromba, che emette 520 Hz; l'aria è ferma, a 20 °C. a) Quali frequenze sente un viaggiatore fermo sul marciapiede mentre il treno si avvicina e mentre si allontana? b) Di quanto scende la nota al passaggio? c) Se invece fosse la tromba della stazione, ferma, a suonare 520 Hz, quale frequenza sentirebbe un passeggero del treno che le va incontro a 30 m/s? Confronta con il risultato di a) e spiega.

24. ●●● Un musicista accorda la corda di una chitarra con un diapason da 440 Hz e sente 3 battimenti al secondo. Tende un po' di più la corda e i battimenti diventano 5 al secondo. a) Qual era la frequenza della corda prima della correzione, e quale dopo? b) Che cosa deve fare il musicista per accordarla?

25. ●● Il sonar di una nave invia un impulso sonoro verso il fondo del mare e ne riceve l'eco dopo 1,6 s. Nell'acqua di mare il suono si propaga a 1520 m/s. a) Quanto è profondo il mare in quel punto? b) Un banco di pesci rimanda un'eco dopo 0,20 s: a che profondità si trova? c) Perché lo stesso calcolo con 343 m/s darebbe un risultato sbagliato?

Ragionare e argomentare

26. ●●● Vitruvio, nel *De architectura* (V, 3), scrive: «La voce è un soffio d'aria che scorre, reso percepibile all'udito dall'urto. Si muove per infiniti cerchi, come quando in un'acqua ferma si getta un sasso e nascono innumerevoli cerchi d'onde, che si allargano dal centro quanto più possono [...]. Ma nell'acqua i cerchi si muovono soltanto sul piano, in larghezza; la voce invece procede in larghezza e sale gradualmente anche in altezza» (traduzione della redazione). Che cosa afferma il passo sulla natura del suono? Che cosa c'è di corretto, alla luce di questo capitolo, e che cosa di impreciso (pensa a ciò che «scorre» e a che tipo di onda è il suono)? Come mostreresti in laboratorio che il suono non è un «soffio» che si sposta dalla sorgente all'orecchio?

27. ●● Stima di ordini di grandezza. Una persona che parla con voce normale produce circa 60 dB a 1 m. a) Stima la potenza sonora della sua voce. b) Quante persone dovrebbero parlare insieme per emettere in tutto una potenza sonora di 1 W? c) Che cosa ti dice il risultato sull'energia trasportata dal suono, rispetto a quella che consumano gli apparecchi di casa?

28. ●● Trova l'errore. Per calcolare la frequenza fondamentale di una canna d'organo lunga 0,50 m, chiusa a un estremo, uno studente scrive: «$f_1 = v/(2L) = 343\ \text{m/s} / (2 \times 0{,}50\ \text{m}) = 343\ \text{Hz}$». Spiega l'errore e correggi il risultato. Qual è la frequenza immediatamente superiore che la canna può emettere?

PER APPROFONDIRE

- [GAL] G. Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, Giornata prima: le pagine finali sulle corde vibranti, sulle consonanze e sul legame fra l'altezza di un suono e il numero delle vibrazioni.
- [HUY] C. Huygens, *Traité de la lumière*, capitolo I: per spiegare la propagazione della luce Huygens parte da quella del suono nell'aria, e confronta le loro velocità.
- [FEY] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. I: i capitoli sul suono e sui battimenti, con l'analisi dei suoni musicali in armoniche.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sulle onde sonore, con molti esempi su decibel, strumenti musicali ed effetto Doppler.

Glossario del capitolo

Altezza
Caratteristica per cui un suono è acuto o grave; dipende dalla frequenza.

Battimenti
Variazione periodica dell'intensità prodotta da due suoni di frequenze vicine; la frequenza di battimento è $|f_1 - f_2|$.

Comma pitagorico
Piccolo scarto, rapporto circa 1,0136, fra dodici quinte pitagoriche $(3/2)^{12}$ e sette ottave 2^7.

Cono di Mach
Superficie conica, con il vertice in una sorgente più veloce del suono, lungo cui si sovrappongono i fronti d'onda e viaggia l'onda d'urto.

Consonanza
Combinazione di due suoni che, emessi insieme, suonano fusi e gradevoli; nella tradizione pitagorica corrisponde a rapporti di numeri interi piccoli: ottava 2 : 1, quinta 3 : 2, quarta 4 : 3.

Decibel
Unità del livello di intensità sonora (dB): +10 dB corrispondono a un'intensità dieci volte maggiore.

Eco
Suono riflesso da un ostacolo, percepito distinto da quello diretto; richiede almeno circa 0,1 s di ritardo, cioè un ostacolo ad almeno circa 17 m.

Effetto Doppler
Variazione della frequenza percepita dovuta al moto della sorgente o dell'osservatore rispetto al mezzo: aumenta in avvicinamento, diminuisce in allontanamento.

Infrasuoni e ultrasuoni
Onde sonore di frequenza rispettivamente minore di circa 20 Hz e maggiore di circa 20 000 Hz, non udibili dall'uomo.

Intensità sonora
Potenza trasportata dall'onda per unità di superficie perpendicolare alla propagazione, $I = P/S$, in $\mathrm{W/m^2}$.

Livello di intensità sonora
$\beta = 10 \log(I/I_0)$, con $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$; si misura in decibel.

Riverbero
Prolungamento di un suono dovuto alle riflessioni ravvicinate sulle pareti di un ambiente chiuso.

Suono
Onda meccanica longitudinale di compressioni e rarefazioni che si propaga in un mezzo materiale; non si propaga nel vuoto.

Temperamento equabile
Accordatura che divide l'ottava in dodici semitoni uguali, di rapporto pari alla radice dodicesima di 2 (circa 1,0595).

Timbro
Caratteristica che distingue suoni della stessa altezza e intensità; dipende dalle armoniche presenti e dalla loro intensità relativa.

Soluzioni

1. B. Le molecole oscillano avanti e indietro lungo la direzione di propagazione, formando compressioni e rarefazioni; l'onda trasporta energia, non aria (C), e non si propaga nel vuoto (D).

2. D. Circa 5900 m/s nell'acciaio, contro circa 1520 m/s nell'acqua di mare e 331–343 m/s nell'aria.

3. C. 30 kHz = 30 000 Hz supera il limite superiore dell'udito umano, circa 20 000 Hz.

4. A. La distanza triplica (da 2 m a 6 m): per la legge dell'inverso del quadrato l'intensità si divide per $3^2 = 9$.

5. B. +20 dB corrispondono a un fattore $10^{20/10} = 10^2 = 100$ nell'intensità.

6. D. Il timbro distingue suoni della stessa altezza e intensità, e dipende dalla composizione in armoniche.

7. A. Con un nodo all'estremo chiuso e un ventre all'estremo aperto entrano solo 1, 3, 5, … quarti di lunghezza d'onda: $f_n = (2n - 1)v/(4L)$, solo armoniche dispari.

8. C. Sorgente che si allontana: $f' = f\,v/(v + v_s) < f$. La frequenza emessa non cambia (A è falsa); conta il moto della sorgente rispetto all'aria, anche se l'osservatore è fermo.

9. V. L'altezza è determinata dalla frequenza fondamentale; il timbro dipende dalle armoniche.

10. F. Si raddoppia l'intensità, e il livello aumenta di $10 \log 2 \approx 3$ dB: circa 73 dB.

11. V. Nell'aria $v \approx (331 + 0{,}6\,t)$ m/s: le molecole di un gas più caldo sono più veloci e trasmettono più in fretta la perturbazione.

12. F. Osservatore in moto: $f' = f(v + 30)/v$; sorgente in moto: $f' = f\,v/(v - 30)$. Con $v = 343$ m/s e $f = 520$ Hz, per esempio, si ottengono circa 565 Hz e 570 Hz: il suono si propaga nell'aria, e conta il moto di ciascuno rispetto al mezzo.

13. V. L'orecchio separa due suoni distanziati di almeno circa 0,1 s; in 0,1 s il suono percorre circa 34 m, andata e ritorno: $d_{\min} \approx 17$ m.

14. $d = v\Delta t = 343$ m/s × 4,5 s ≈ $1{,}5 \times 10^3$ m = 1,5 km (con la regola pratica: 4,5/3 = 1,5 km).

15. $\lambda = v/f$: per 20 Hz $\lambda = 343$ m/s / 20 Hz ≈ 17 m; per 20 000 Hz $\lambda = 343$ m/s / 20 000 Hz ≈ $1{,}7 \times 10^{-2}$ m = 1,7 cm.

16. $\lambda = v/f = 1540$ m/s / ($2{,}0 \times 10^6$ Hz) ≈ $7{,}7 \times 10^{-4}$ m = 0,77 mm.

17. $\beta = 10 \log(3{,}2 \times 10^{-5}/10^{-12}) = 10 \log(3{,}2 \times 10^7) = 10 \times (7 + 0{,}51) \approx 75$ dB.

18. $I = I_0 \cdot 10^{\beta/10} = 10^{-12}$ W/m² × $10^{9{,}5} \approx 3{,}2 \times 10^{-3}$ W/m².

19. a) Dal grafico: a 2 m circa $1{,}0 \times 10^{-2}$ W/m², a 4 m circa $0{,}25 \times 10^{-2}$ W/m² (valori calcolati: $9{,}9 \times 10^{-3}$ e $2{,}5 \times 10^{-3}$ W/m²); il rapporto è 4, perché la distanza è raddoppiata. b) Un nono dell'intensità a 1 m, circa $0{,}44 \times 10^{-2}$ W/m²: a **3 m**, perché $3^2 = 9$.

20. frequenza; decibel; infrasuoni; differenza.

21. a) $v = 2Lf_1 = 2 \times 0{,}65$ m × 110 Hz ≈ 143 m/s ≈ $1{,}4 \times 10^2$ m/s. b) $f_2 = 2f_1 = 220$ Hz; $f_3 = 3f_1 = 330$ Hz. c) $\lambda = 343$ m/s / 110 Hz ≈ 3,1 m. La frequenza è la stessa (la impone la corda che vibra), ma la velocità nell'aria è diversa da quella sulla corda, quindi è diversa anche $\lambda = v/f$ (sulla corda $\lambda_1 = 2L = 1{,}3$ m). d) Da $v = \sqrt{(F_T/\mu)}$: $F_T = \mu v^2 = 5{,}0 \times 10^{-3}$ kg/m × (143 m/s)² ≈ $1{,}0 \times 10^2$ N.

22. a) $I = P/(4\pi r^2) = 2{,}0$ W / ($4\pi \times (10$ m)²) ≈ $1{,}6 \times 10^{-3}$ W/m²; $\beta = 10 \log(1{,}59 \times 10^9) \approx 92$ dB. b) 85 dB corrispondono a $I = 10^{-12} \times 10^{8{,}5}$ W/m² ≈ $3{,}16 \times 10^{-4}$ W/m²; $r = \sqrt{(P/(4\pi I))} = \sqrt{(2{,}0\text{ W} / (4\pi \times 3{,}16 \times 10^{-4}\text{ W/m}^2))} \approx 22$ m. c) L'intensità raddoppia: β ≈ 92 dB + 3 dB = 95 dB.

23. a) Sorgente in moto. In avvicinamento: $f' = 520$ Hz × 343/(343 − 30) = 520 Hz × 343/313 ≈ 570 Hz; in allontanamento: $f' = 520$ Hz × 343/373 ≈ 478 Hz. b) La nota scende di circa 570 − 478 ≈ 92 Hz. c) Osservatore in moto verso la sorgente: $f' = 520$ Hz × (343 +

30)/343 ≈ 565 Hz, un po' meno dei 570 Hz di a). Per il suono non conta solo il moto relativo: conta chi si muove rispetto all'aria. Se si muove la sorgente cambia la distanza fra i fronti d'onda; se si muove l'osservatore cambia la rapidità con cui li incontra.

24. a) $f_b = 3$ Hz: la corda era a 437 Hz o a 443 Hz. Tendendola la sua frequenza aumenta; poiché i battimenti diventano più rapidi, la differenza con 440 Hz è cresciuta: la corda era già sopra, a **443 Hz**, e ora è a **445 Hz**. (Se fosse stata a 437 Hz, salendo si sarebbe avvicinata a 440 Hz e i battimenti avrebbero rallentato.) b) Deve allentare la corda, abbassandone la frequenza finché i battimenti spariscono.

25. a) Il suono va al fondo e torna: $d = v\Delta t/2 = 1520$ m/s × 1,6 s / 2 ≈ $1{,}2 \times 10^3$ m. b) $d = 1520$ m/s × 0,20 s / 2 = 152 m ≈ $1{,}5 \times 10^2$ m. c) Il sonar lavora in acqua, dove il suono è circa 4,4 volte più veloce che nell'aria: con 343 m/s si otterrebbero profondità circa 4,4 volte minori.

26. Traccia. Vitruvio afferma che la voce si propaga a partire dalla sorgente come i cerchi di uno stagno, ma in tutte le direzioni, anche verso l'alto. È corretta l'idea di onda e anche quella dei fronti d'onda «sferici», non piani; è corretto che sia l'aria colpita a trasmettere il suono. È impreciso, invece, che la voce sia un «soffio che scorre»: l'aria non viaggia dalla sorgente all'orecchio, le molecole oscillano intorno alla loro posizione; inoltre nell'acqua dello stagno le onde sono in parte trasversali, mentre il suono nell'aria è longitudinale. Prova possibile: un altoparlante che suona forte davanti alla fiamma di una candela fa tremolare la fiamma avanti e indietro, ma non la spegne né la piega stabilmente in avanti come farebbe un soffio; oppure si misura che il suono attraversa un vetro o una parete, dove nessun «soffio» passa, e non attraversa il vuoto.

27. Traccia. a) A 1 m, 60 dB corrispondono a $I = 10^{-6}$ W/m^2; $P = I \cdot 4\pi r^2 \approx 1 \times 10^{-5}$ W (più precisamente $1{,}3 \times 10^{-5}$ W). b) 1 W / $1{,}3 \times 10^{-5}$ W ≈ 8×10^4: circa centomila persone, l'ordine di grandezza di uno stadio pieno che parla. c) La potenza sonora è piccolissima: una lampadina a LED consuma qualche watt, un forno più di mille. L'orecchio è sensibile a potenze minime; quasi tutta l'energia di uno strumento o di un altoparlante si trasforma in energia interna, solo una piccola parte in suono.

28. Lo studente ha usato la formula della canna aperta (o della corda). In una canna chiusa a un estremo la fondamentale contiene un quarto di lunghezza d'onda, $\lambda_1 = 4L$: $f_1 = v/(4L) = 343$ m/s / (4 × 0,50 m) ≈ 172 Hz, un'ottava sotto il valore sbagliato. La frequenza successiva è la terza armonica: $f = 3f_1 \approx$ 515 Hz (non $2f_1$, che in una canna chiusa manca).