VERIFICA

Verifica di fine parte · Le onde e il suono

Tempo indicativo: 100 minuti · Punteggio totale: 100 punti

Fisica 4 · Parte V · Le onde e il suono · versione 1.0
Verifica: Verifica di fine parte · Le onde e il suono · pagine 379–384 del volume completo · estratto per lo studio

La verifica riguarda i capitoli 12 e 13. È ammessa la calcolatrice scientifica. Scrivi sempre le formule che usi, i passaggi e le unità di misura: un risultato senza unità è incompleto. Esprimi i risultati con un numero di cifre significative coerente con i dati. Dove non è indicato diversamente usa $g = 9{,}8\ \text{m/s}^2$ e, per la velocità del suono nell'aria, $v = 343\ \text{m/s}$ (aria ferma a 20 °C) oppure $v \approx (331 + 0{,}6\,t)\ \text{m/s}$, con t in °C; $I_0 = 10^{-12}\ \text{W/m}^2$. Nelle formule delle onde in una corda la tensione è F_T, per non confonderla con il periodo T.

Parte A · Domande a scelta multipla (10 domande, 2 punti ciascuna)

1. ● Una massa attaccata a una molla oscilla su un piano orizzontale senza attrito. Nell'istante in cui la molla è al massimo allungamento, la massa ha:
   - **A.** velocità massima e accelerazione nulla
   - **B.** velocità nulla e accelerazione massima, diretta verso la posizione di equilibrio
   - **C.** velocità nulla e accelerazione nulla
   - **D.** velocità nulla e accelerazione massima, diretta verso l'esterno

2. ● Da un'altura distante 500 m due persone emettono nello stesso istante un fischio acuto e un grido grave. A chi ascolta arrivano:
   - **A.** prima il fischio acuto, perché ha frequenza maggiore
   - **B.** prima il grido grave, perché ha lunghezza d'onda maggiore
   - **C.** insieme, perché la velocità del suono dipende dal mezzo e non dalla frequenza
   - **D.** prima il suono più intenso

3. ●● Su una fotografia di un'onda in una corda due creste successive distano 1,2 m; un punto della corda compie 5 oscillazioni complete in 2,0 s. La velocità di propagazione dell'onda è:
   - **A.** 0,48 m/s
   - **B.** 2,4 m/s
   - **C.** 6,0 m/s
   - **D.** 3,0 m/s

4. ●● Una corda lunga 0,90 m, fissata ai due estremi, vibra in un'onda stazionaria con 4 nodi, estremi compresi. La lunghezza d'onda è:
   - **A.** 0,60 m
   - **B.** 0,45 m
   - **C.** 0,30 m
   - **D.** 1,8 m

5. ● Senti la voce di una persona che parla nel corridoio, accanto alla porta aperta dell'aula, ma da dove sei seduto non la vedi. Il motivo principale è che:
   A. la lunghezza d'onda del suono è confrontabile con la larghezza della porta, quella della luce è molto più piccola
   B. il suono è più veloce della luce
   C. la luce, per propagarsi, ha bisogno di un mezzo
   D. il suono si riflette sulle pareti, la luce no

6. ●● L'ampiezza delle oscillazioni di una massa attaccata a una molla ideale viene raddoppiata. L'energia meccanica dell'oscillatore e il suo periodo:
   A. l'energia raddoppia, il periodo non cambia
   B. l'energia quadruplica, il periodo raddoppia
   C. l'energia quadruplica, il periodo non cambia
   D. l'energia raddoppia, il periodo raddoppia

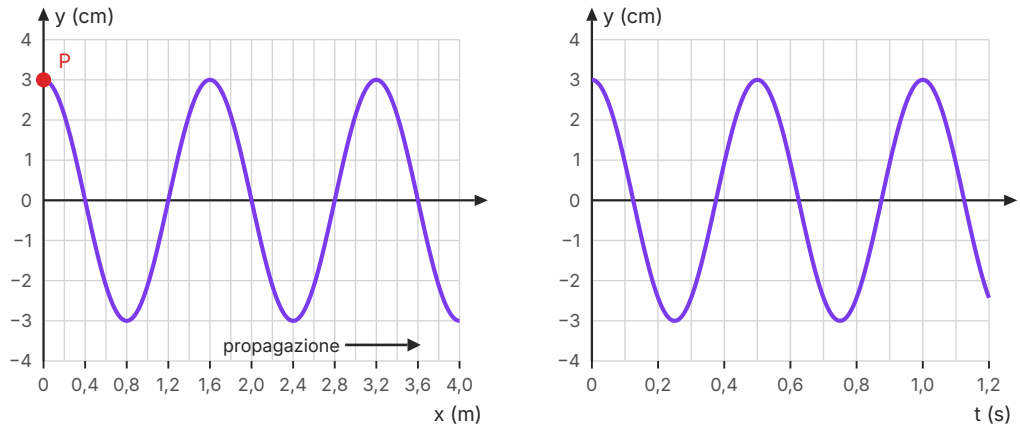
7. ●● In un punto della sala un violino produce, da solo, un livello sonoro di 62 dB. Dieci violini uguali, suonando insieme in modo indipendente, producono nello stesso punto circa:
   A. 620 dB
   B. 65 dB
   C. 68 dB
   D. 72 dB

8. ● Un flauto e un violino suonano lo stesso la di 440 Hz con lo stesso livello sonoro, eppure li distingui. Che cosa è diverso nei due suoni?
   A. le armoniche presenti e la loro intensità relativa, cioè il timbro
   B. la frequenza fondamentale
   C. la velocità con cui il suono si propaga nell'aria
   D. la lunghezza d'onda della fondamentale

9. ● Un'automobile si avvicina, suonando il clacson, a un pedone fermo sul marciapiede. Rispetto alla frequenza emessa dal clacson, la frequenza percepita:
   A. è maggiore sia per il pedone sia per il guidatore
   B. è maggiore per il pedone e uguale per il guidatore
   C. è minore per il pedone e uguale per il guidatore
   D. è uguale per entrambi

10. ● Due diapason di 256 Hz e 260 Hz vengono fatti vibrare insieme. Si sentono:
    A. 2 battimenti al secondo
    B. 258 battimenti al secondo
    C. 4 battimenti al secondo
    D. 516 battimenti al secondo

Parte B · Esercizi (5 esercizi, 6 punti ciascuno)



a) forma della corda a t = 0 **b) spostamento di P nel tempo**

Figura V5.1 Un'onda armonica che si propaga verso destra lungo una corda (andamento calcolato). a) La forma della corda all'istante $t = 0$. b) Lo spostamento y del punto P della corda, che si trova in $x = 0$, in funzione del tempo.

11. ●● **(6 punti)** Un pendolo semplice e un oscillatore formato da un corpo di 0,300 kg attaccato a una molla hanno, sulla Terra, lo stesso periodo di 1,50 s. a) Quanto è lungo il pendolo (2 punti)? b) Quanto vale la costante elastica della molla (2 punti)? c) I due oscillatori vengono portati su Marte, dove $g \approx 3{,}7\ \text{m/s}^2$. Quale periodo ha ciascuno? Spiega la differenza (2 punti).

12. ●● **(6 punti)** La Figura V5.1 mostra un'onda armonica che si propaga verso destra lungo una corda pesante, di densità lineare 0,50 kg/m. a) Leggi sui grafici l'ampiezza, la lunghezza d'onda e il periodo, indicando da quale grafico ricavi ciascuna grandezza (2 punti). b) Calcola la frequenza e la velocità di propagazione (2 punti). c) Calcola la tensione della corda. Se la tensione venisse quadruplicata, quale lunghezza d'onda avrebbe un'onda prodotta con la stessa frequenza (2 punti)?

13. ●● **(6 punti)** In montagna, con l'aria a 10 °C, un escursionista batte le mani davanti a una parete di roccia e sente l'eco dopo 0,80 s. a) Calcola la velocità del suono (1 punto). b) A quale distanza dalla parete si trova l'escursionista (2 punti)? c) Avvicinandosi alla parete, a quale distanza da essa smetterebbe di sentire un'eco distinta? Perché (2 punti)? d) Perché in un'aula, battendo le mani, non si sente un'eco ma il suono si prolunga (1 punto)?

14. ●● **(6 punti)** Una sirena d'allarme, in cima a un palo, emette ugualmente in tutte le direzioni; trattala come una sorgente puntiforme e trascura l'assorbimento dell'aria e le riflessioni. A 10 m dalla sirena il livello sonoro è 100 dB. a) Calcola l'intensità del suono a 10 m (2 punti). b) Calcola la potenza sonora della sirena (2 punti). c) A quale distanza il livello scende a 60 dB, quello di una conversazione tranquilla (2 punti)?

15. ●● **(6 punti)** Una canna d'organo è lunga 0,85 m ed è chiusa a un estremo; l'aria è a 20 °C. a) Calcola la frequenza fondamentale (2 punti). b) Quali sono le due frequenze successive che la canna può emettere? Perché mancano le armoniche pari (2 punti)? c) Quanto dovrebbe essere lunga una canna aperta ai due estremi con la stessa frequenza fondamentale (2 punti)?

Parte C · Problemi e domanda sulla fonte (50 punti in totale)

16. ●●● **(13 punti)** La corda del la di un violino è lunga 32,5 cm fra i due punti fissi, ha densità lineare $6{,}0 \times 10^{-4}$ kg/m ed è tesa con una forza di 48,0 N. a) Calcola la velocità delle onde sulla corda (2 punti). b) Calcola la frequenza fondamentale e quelle della seconda e della terza armonica (3 punti). c) La violinista suona la corda a vuoto insieme a un diapason da 440 Hz. Quanti battimenti al secondo sente? Deve tendere o allentare la corda, e quale tensione serve perché i battimenti spariscano (4 punti)? d) Calcola la lunghezza d'onda, nell'aria a 20 °C, del suono di 440 Hz e confrontala con la lunghezza d'onda del modo fondamentale sulla corda: perché sono diverse, se la frequenza è la stessa (2 punti)? e) Con la corda accordata a 440 Hz, a quale distanza dal ponticello la violinista deve premere la corda con il dito per ottenere la quinta superiore, 660 Hz (2 punti)?

17. ●●● **(13 punti)** Un microfono fermo a bordo pista registra il suono del motore di un'auto da corsa che passa in linea retta, a velocità e regime del motore costanti: 500 Hz mentre l'auto si avvicina, 400 Hz mentre si allontana. L'aria è ferma, a 20 °C. a) Spiega perché la frequenza emessa dal motore è compresa fra i due valori registrati (2 punti). b) Scrivi le due relazioni dell'effetto Doppler per la sorgente in moto e ricava da esse la velocità dell'auto, in m/s e in km/h (4 punti). c) Calcola la frequenza emessa dal motore (2 punti). d) Quale frequenza sente il pilota? Perché (2 punti)? e) Calcola il numero di Mach dell'auto. Che cosa cambierebbe, per il suono che arriva al microfono, se una sorgente passasse a Mach 1,5 (3 punti)?

18. ●● **(12 punti)** Due altoparlanti A e B, affiancati, sono collegati allo stesso amplificatore ed emettono in fase lo stesso suono puro di 343 Hz, nell'aria a 20 °C. Un ascoltatore si trova nel punto P, a 4,00 m da A e a 4,50 m da B. a) Calcola la lunghezza d'onda (2 punti). b) Calcola la differenza di cammino in P: in P il suono è forte o debole (3 punti)? c) Qual è la frequenza più bassa per cui in P si ha interferenza costruttiva (3 punti)? Indica le prime tre frequenze per cui in P si ha interferenza distruttiva (2 punti). d) Anche in condizioni di interferenza distruttiva, in P il silenzio non è mai completo. Indica due motivi, uno dei quali legato alle distanze di P dai due altoparlanti (2 punti).

19. ●● **(12 punti) Domanda sulla fonte.** Nella Giornata prima dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638), Galileo racconta che, raschiando con uno scalpello una piastra d'ottone, a volte sentiva un fischio e vedeva sulla piastra una fila di sottili segni paralleli («virgolette») equidistanti. Poi scrive: «Ho anco tal volta tra le corde del cimbalo notatone due unisone alli due sibili fatti strisciando al modo detto, e de i più differenti di tuono, de i quali due precisamente distavano per una quinta perfetta; e misurando poi gl'intervalli delle virgolette dell'una e dell'altra strisciata, si vedeva, la distanza che conteneva quarantacinque spazii dell'una, contenere trenta dell'altra, quale veramente è la forma che si attribuisce alla diapente.» Poco prima, nella stessa Giornata, aveva enunciato la conclusione generale: «dico che non è la ragion prossima ed immediata delle forme de gl'intervalli musici la lunghezza delle corde, non la tensione, non la grossezza, ma sì bene la proporzione de i numeri delle vibrazioni e percosse dell'onde dell'aria che vanno a ferire il timpano del nostro orecchio, il quale esso ancora sotto le medesime misure di tempi vien fatto tremare» (testo dell'Edizione Nazionale; *diapente*, dal greco διὰ πέντε, «attraverso cinque [note]», è il nome antico della quinta). a) Spiega con parole tue che cosa afferma il secondo passo. Con il linguaggio del capitolo 13, da quale grandezza dipende l'intervallo fra due suoni (3 punti)? b) Ogni segno sulla piastra corrisponde a una vibrazione dello scalpello. Supponi che nelle due strisciate lo scalpello si muova alla stessa velocità, 0,50 m/s, e che in un tratto di 3,0 cm ci siano 45 spazi nella prima e 30 nella seconda. Calcola le due frequenze e il loro rapporto, e spiega perché Galileo riconosce in quei numeri la quinta. Quale ipotesi, non dichiarata nel passo, serve perché il ragionamento funzioni (4 punti)? c) Con $f_1 = v/(2L)$ e $v = \sqrt{(F_T/\mu)}$ spiega in che modo la lunghezza, la tensione e la «grossezza» di una corda agiscono sull'altezza del suono soltanto attraverso la frequenza. Per ottenere l'ottava con due corde della stessa lunghezza e tensione, Galileo afferma che quella più grave deve pesare quattro volte di più, a parità di lunghezza: verificalo (3 punti). d) Come verificheresti oggi, in laboratorio o con un telefono, che due note a distanza di quinta hanno frequenze nel rapporto $3:2$ (2 punti)?

Griglia di valutazione Punti per sezione.

Sezione	Contenuto	Punti
Parte A	domande 1–10 × 2 punti	20
Parte B	esercizi 11–15 × 6 punti	30
Parte C	problemi 16 (13), 17 (13), 18 (12); domanda sulla fonte 19 (12)	50
Totale		**100**

Dal punteggio al voto Corrispondenza indicativa fra punteggio e voto in decimi.

Punteggio	0–24	25–34	35–44	45–54	55–64	65–74	75–84	85–94	95–100
Voto	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Soluzioni

1. B (2 punti). Agli estremi la massa si ferma per un istante (velocità nulla); lo spostamento è massimo e, nel moto armonico, l'accelerazione è proporzionale allo spostamento e opposta a esso: è massima e diretta verso l'equilibrio.

2. C (2 punti). La velocità del suono è fissata dal mezzo (e dalla sua temperatura), non dalla frequenza né dall'intensità: i due suoni arrivano insieme, dopo circa 500 m / 343 m/s ≈ 1,5 s.

3. D (2 punti). $\lambda = 1{,}2$ m; $f = 5/(2{,}0\text{ s}) = 2{,}5$ Hz; $v = \lambda f = 1{,}2\text{ m} \times 2{,}5\text{ Hz} = 3{,}0$ m/s.

4. A (2 punti). Con 4 nodi, estremi compresi, la corda contiene 3 fusi, cioè $n = 3$ mezze lunghezze d'onda: $\lambda = 2L/3 = 2 \times 0{,}90\text{ m} / 3 = 0{,}60$ m.

5. A (2 punti). La diffrazione è evidente quando l'apertura è confrontabile con la lunghezza d'onda: il suono (λ da centimetri a metri) aggira lo spigolo della porta, la luce (λ inferiore al millesimo di millimetro) praticamente no.

6. C (2 punti). $E = \tfrac{1}{2}kA^2$: con ampiezza doppia l'energia è 4 volte maggiore. Il periodo $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$ non dipende dall'ampiezza.

7. D (2 punti). Dieci sorgenti uguali e indipendenti danno un'intensità 10 volte maggiore, cioè $10 \log 10 = 10$ dB in più: 62 dB + 10 dB = 72 dB. I decibel non si sommano.

8. A (2 punti). Stessa frequenza fondamentale (stessa altezza), stessa intensità e stessa velocità nell'aria, quindi stessa lunghezza d'onda della fondamentale: cambia la forma dell'onda, cioè quali armoniche sono presenti e con quale intensità (il timbro).

9. B (2 punti). Per il pedone la sorgente si avvicina: $f' = f \cdot v/(v - v_s) > f$. Il guidatore si muove insieme al clacson: la sua distanza dalla sorgente non cambia, quindi riceve un fronte d'onda per ogni periodo di emissione e sente la frequenza emessa.

10. C (2 punti). $f_b = |f_1 - f_2| = 260\text{ Hz} - 256\text{ Hz} = 4$ Hz: 4 battimenti al secondo.

11. a) Da $T = 2\pi\sqrt{(l/g)}$: $l = gT^2/(4\pi^2) = 9{,}8\text{ m/s}^2 \times (1{,}50\text{ s})^2/39{,}48 \approx 0{,}559$ m (2 punti). b) Da $T = 2\pi\sqrt{(m/k)}$: $k = 4\pi^2 m/T^2 = 39{,}48 \times 0{,}300\text{ kg}/(1{,}50\text{ s})^2 \approx 5{,}26$ N/m (2 punti). c) Pendolo: $T = 2\pi\sqrt{(0{,}559\text{ m} / 3{,}7\text{ m/s}^2)} \approx 2{,}4$ s; molla: ancora 1,50 s (1 punto). Il periodo del pendolo dipende da g, perché è il peso a richiamarlo verso l'equilibrio; quello della molla dipende solo da m e k, perché la forza di richiamo è quella elastica (1 punto).

12. a) Dal grafico a), la fotografia: ampiezza $A = 3{,}0$ cm e lunghezza d'onda $\lambda = 1{,}6$ m (distanza fra le creste in $x = 0$ e $x = 1{,}6$ m). Dal grafico b), la storia di P: periodo $T = 0{,}50$ s (distanza fra i massimi in $t = 0$ e $t = 0{,}50$ s); anche qui $A = 3{,}0$ cm (2 punti). b) $f = 1/T = 1/(0{,}50\text{ s}) = 2{,}0$ Hz; $v = \lambda/T = 1{,}6\text{ m} / 0{,}50\text{ s} = 3{,}2$ m/s (2 punti). c) Da $v = \sqrt{(F_T/\mu)}$: $F_T = \mu v^2 = 0{,}50\text{ kg/m} \times (3{,}2\text{ m/s})^2 \approx 5{,}1$ N (1 punto). Con tensione quadrupla la velocità raddoppia, 6,4 m/s; la frequenza, fissata dalla sorgente, resta 2,0 Hz, quindi $\lambda = v/f = 6{,}4\text{ m/s} / 2{,}0\text{ Hz} = 3{,}2$ m: la lunghezza d'onda raddoppia (1 punto).

13. a) $v \approx (331 + 0{,}6 \times 10)$ m/s = 337 m/s (1 punto). b) Il suono va alla parete e torna: $d = v\Delta t/2 = 337\text{ m/s} \times 0{,}80\text{ s} / 2 \approx 135$ m (2 punti). c) L'orecchio distingue due suoni brevi solo se sono separati da almeno circa 0,1 s: $d_{min} = 337\text{ m/s} \times 0{,}1\text{ s} / 2 \approx 17$ m. Più vicino alla parete l'eco arriva troppo presto e si fonde con il suono diretto (2 punti). d) Le pareti distano meno di 17 m: le riflessioni arrivano dopo pochi centesimi di secondo e, invece di separarsi, prolungano il suono, che si spegne poco a poco: è il riverbero (1 punto).

14. a) $\log(I/I_0) = 100/10 = 10$, quindi $I = 10^{10} \times 10^{-12}\text{ W/m}^2 = 1{,}0 \times 10^{-2}\text{ W/m}^2$ (2 punti). b) $P = I \cdot 4\pi r^2 = 1{,}0 \times 10^{-2}\text{ W/m}^2 \times 4\pi \times (10\text{ m})^2 \approx 13$ W (2 punti). c) Da 100 dB a 60 dB il livello scende di 40 dB: l'intensità diventa 10^4 volte minore. Per la legge dell'inverso del

quadrato la distanza deve crescere di $\sqrt{(10^4)} = 100$ volte: $r = 100 \times 10$ m $= 1{,}0 \times 10^3$ m, circa 1 km (in realtà meno, perché l'aria assorbe una parte dell'energia) (2 punti).

15. a) Canna chiusa: $f_1 = v/(4L) = 343$ m/s / (4 × 0,85 m) ≈ 101 Hz (2 punti). b) $f_n = (2n - 1)v/(4L)$: $3f_1 \approx 303$ Hz e $5f_1 \approx 504$ Hz (1 punto). All'estremo chiuso c'è sempre un nodo e a quello aperto un ventre, quindi nella canna entra un numero dispari di quarti di lunghezza d'onda (λ/4, 3λ/4, 5λ/4, ...): le armoniche pari non sono possibili (1 punto). c) Canna aperta: $f_1 = v/(2L') = v/(4L) \Rightarrow L' = 2L = 1{,}7$ m (2 punti).

16. a) $v = \sqrt{(F_T/\mu)} = \sqrt{(48{,}0 \text{ N} / 6{,}0 \times 10^{-4} \text{ kg/m})} = \sqrt{(8{,}0 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{s}^2)} \approx 283$ m/s (2 punti). b) $f_1 = v/(2L) = 282{,}8$ m/s / (2 × 0,325 m) ≈ 435 Hz (1 punto); $f_2 = 2f_1 \approx 870$ Hz, $f_3 = 3f_1 \approx 1305$ Hz, circa 1,31 kHz (2 punti). c) $f_b =$ 440 Hz − 435 Hz ≈ 5 battimenti al secondo (1 punto). La corda è troppo grave: per alzarne la frequenza bisogna aumentare la velocità delle onde, cioè tendere la corda (1 punto). Per $f_1 = 440$ Hz serve $v = 2Lf_1 = 2 \times 0{,}325$ m × 440 Hz = 286 m/s, quindi $F_T = \mu v^2 = 6{,}0 \times 10^{-4}$ kg/m × (286 m/s)$^2 \approx 49{,}1$ N, circa 1,1 N in più (2 punti). d) Nell'aria $\lambda = v_{suono}/f = 343$ m/s / 440 Hz ≈ 0,780 m; sulla corda $\lambda_1 = 2L = 0{,}650$ m (1 punto). La frequenza è la stessa, perché l'aria vibra al ritmo della corda, ma la velocità di propagazione è fissata dal mezzo: 286 m/s sulla corda, 343 m/s nell'aria; la lunghezza d'onda $\lambda = v/f$ si adatta (1 punto). e) A parità di tensione e di corda f è inversamente proporzionale alla lunghezza che vibra: per $f = 660$ Hz = (3/2) × 440 Hz serve $L' = (2/3) \times 32{,}5$ cm ≈ 21,7 cm. Il dito va premuto a 21,7 cm dal ponticello, cioè a 10,8 cm dall'altro estremo (2 punti).

17. a) Mentre l'auto si avvicina il microfono riceve fronti d'onda più ravvicinati e una frequenza maggiore di quella emessa; mentre si allontana, più radi e una frequenza minore: la frequenza emessa f sta fra 400 Hz e 500 Hz (2 punti). b) Avvicinamento: 500 Hz $= f \cdot v/(v - v_s)$; allontanamento: 400 Hz $= f \cdot v/(v + v_s)$ (1 punto). Dividendo membro a membro f e v si semplificano: $500/400 = (v + v_s)/(v - v_s)$, cioè $5(v - v_s) = 4(v + v_s)$, da cui $v_s = v/9$ (2 punti). $v_s = 343$ m/s / 9 ≈ 38,1 m/s, cioè 38,1 × 3,6 ≈ 137 km/h (1 punto). c) Dalla prima relazione: $f = 500$ Hz × $(v - v_s)/v = 500$ Hz × (343 − 38,1)/343 ≈ 444 Hz; controllo con la seconda: 444 Hz × 343/(343 + 38,1) ≈ 400 Hz (2 punti). d) Il pilota si muove insieme al motore: la sua distanza dalla sorgente non cambia, quindi riceve un fronte d'onda per ogni periodo di emissione e sente la frequenza emessa, circa 444 Hz (2 punti). e) Numero di Mach $= v_s/v = 38{,}1/343 \approx 0{,}11$: l'auto è molto più lenta del suono, e i fronti d'onda la precedono sempre (1 punto). Una sorgente a Mach 1,5 supera le proprie onde: i fronti si inviluppano nel cono di Mach, lungo il quale viaggia un'onda d'urto. Prima del passaggio del cono il microfono non riceve alcun suono della sorgente; al suo arrivo registra un brusco salto di pressione, il bang sonico, e solo dopo comincia a sentire il suono emesso dalla sorgente (2 punti).

18. a) $\lambda = v/f = 343$ m/s / 343 Hz = 1,00 m (2 punti). b) $\Delta = 4{,}50$ m − 4,00 m = 0,50 m = λ/2, cioè $(n + ½)\lambda$ con $n = 0$ (2 punti): le due onde arrivano in P in opposizione, cresta con avvallamento, e l'interferenza è distruttiva: il suono è debole (1 punto). c) Costruttiva se $\Delta = n\lambda$: la frequenza più bassa corrisponde a $n =$ 1, cioè $\lambda = \Delta = 0{,}50$ m, quindi $f = 343$ m/s / 0,50 m = 686 Hz (3 punti). Distruttiva se $\Delta = (n + ½)\lambda$, cioè $f = (n + ½)v/\Delta$: 343 Hz, 1029 Hz, 1715 Hz (2 punti). d) P è più lontano da B che da A: l'onda di B arriva meno intensa (rapporto delle intensità $(4{,}50/4{,}00)^2 \approx 1{,}27$) e con ampiezza minore, quindi le due onde non si annullano del tutto (1 punto). Inoltre il suono riflesso da pareti, pavimento e oggetti arriva in P per altre vie, con altre differenze di cammino (1 punto).

19. Traccia di risposta. a) Galileo afferma che ciò che determina un intervallo musicale (ottava, quinta, ...) non è direttamente la lunghezza, la tensione o lo spessore delle corde, ma il rapporto fra i numeri di vibrazioni che le due onde sonore compiono nello stesso tempo, vibrazioni che arrivano all'orecchio e fanno vibrare il timpano allo stesso ritmo (2 punti). In linguaggio moderno: l'intervallo dipende dal rapporto delle **frequenze**; l'altezza di un suono è la sua frequenza (1 punto). b) Distanza fra due segni: 3,0 cm / 45 ≈ 0,67 mm nella prima strisciata, 3,0 cm / 30 = 1,0 mm nella seconda. In un secondo lo scalpello percorre 0,50 m e lascia un segno a ogni vibrazione: $f = 0{,}50$ m/s / $6{,}67 \times 10^{-4}$ m = 750 Hz e $f =$

0,50 m/s / $1{,}0 \times 10^{-3}$ m = 500 Hz (2 punti). Il rapporto 750/500 = 45/30 = 3/2 è quello della quinta della tradizione pitagorica, e Galileo trova appunto che i due sibili distavano una quinta (1 punto). L'ipotesi nascosta è che lo scalpello si muova alla stessa velocità nelle due strisciate: solo così i numeri di segni nello stesso tratto stanno come i numeri di vibrazioni nello stesso tempo (1 punto). c) $f_1 = \sqrt{(F_T/\mu)}/(2L)$: lunghezza, tensione e massa per unità di lunghezza cambiano l'altezza solo perché cambiano la frequenza (1 punto). Con L e F_T uguali, f è inversamente proporzionale a $\sqrt{\mu}$; per avere metà frequenza (un'ottava sotto) serve $\sqrt{\mu}$ doppia, cioè μ quadrupla: a parità di lunghezza, la corda più grave deve pesare quattro volte di più, come dice Galileo (2 punti). d) Si suonano le due note davanti a un microfono collegato a un'app che misura la frequenza (o mostra lo spettro) e si confrontano i valori, per esempio 440 Hz e 660 Hz; oppure si suonano insieme e si controlla che la terza armonica della nota più grave e la seconda di quella più acuta coincidano, senza battimenti (2 punti).