



Luigi Togliani

Liceo Scientifico
"Belfiore", Mantova

Intensità di segnali acustici e luminosi

(Pervenuto il 26.06.01, approvato il 13.12.02)

ABSTRACT

An experimental procedure is described for studying how certain subjective quantities, such as the perceived intensities of light and sound, depend on the observer's distance from the source.

Introduzione

Su quasi tutti i libri di testo si tratta delle grandezze che misurano l'intensità di un segnale acustico e di un segnale ottico, distinguendo anche tra la registrazione oggettiva e quella soggettiva di queste grandezze. Si passa poi a fissare, spesso senza fornire particolari motivazioni, il legame esistente tra l'intensità del segnale e la distanza tra un ricevitore e la sorgente che emette il segnale stesso.

Nel breve percorso didattico che segue, ho cercato di mettere a fuoco un itinerario di laboratorio che si può affiancare alla trattazione teorica dell'argomento, prendendo in esame il livello sonoro (acustica) e l'illuminamento di una superficie (ottica) e studiando la loro dipendenza dalla distanza dalla sorgente.

Ho eseguito gli esperimenti descritti insieme ad alcuni miei studenti di una quarta liceo scientifico nei locali e con le apparecchiature della nostra scuola.

Livello sonoro e distanza

Abbiamo usato come sorgente sonora un vecchio microfono Phywe, con una membrana vibrante di circa 5 cm di diametro. Il microfono era collegato ad un generatore di frequenze Phywe (portata 10^3 Hz) e ad un oscilloscopio a raggi catodici Philips PM-3110; quest'ultimo consentiva di controllare il valore della frequenza del suono emesso. Per misurare il livello sonoro abbiamo adoperato un fonometro digitale Center 320 che consentiva letture di livello sonoro da 50 dB a 100 dB, per frequenze comprese tra 31,5 Hz e 8 kHz. La sensibilità dello strumento, fornita dalla ditta, è di 1 dB (decibel).

Il fonometro, con il sensore puntato verso la membrana vibrante del microfono, consentiva di raccogliere il segnale acustico e di valutarne il livello sonoro espresso in dB. Fonometro e microfono, montati su appositi sostegni, erano fissati ciascuno ad un cavaliere mobile su un banco ottico (v. figura 1).

L'esperimento è stato eseguito nello scantinato della scuola, in quanto era il luogo meno disturbato. Infatti il rumore di fondo si attestava qui intorno ai 30 dB mentre nel laboratorio il valore era di almeno 50 dB.

L'esperimento consiste semplicemente nel registrare il livello sonoro mostrato sul display del fonometro al variare della distanza tra il microfono e il fonometro stesso. La prova era stata effettuata utilizzando un suono di frequenza abbastanza costante pari circa a (172 ± 3) Hz, ricavata grazie alla lettura del periodo sullo schermo dell'oscilloscopio. Precedenti prove erano state effettuate

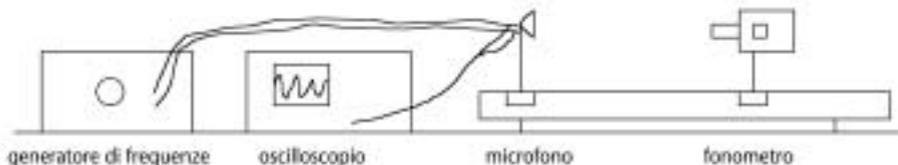


Figura 1: l'assetto sperimentale usato per i segnali sonori.

r (cm)	r ² (cm ²)	1/r ² (m ⁻²)	β (dB)	I (W/m ²)
4,7±0,2	22±2	450±4	90±1	0,0010±0,0003
8,4±0,2	71±3	142±6	85±1	0,00032±0,00008
12,8±0,2	164±5	61,0±0,8	80±1	0,00010±0,00003
20,7±0,5	(43±1)10	23±1	76±1	0,00004±0,00001
32,0±0,5	(102±3)10	9,8±0,1	72±1	0,000016±0,000004
42,1±0,5	(177±4)10	5,6±0,1	68±1	0,000006±0,000002
54,5±0,5	(297±5)10	3,37±0,06	66±1	0,000004±0,000001

Tabella 1: distanza, livello sonoro e intensità sonora.

con frequenze di circa 330 Hz e 400 Hz.

In tabella 1 sono riportati i valori della distanza *r*, con il reciproco del suo quadrato $1/r^2$; infine appaiono i valori del livello sonoro β e dell'intensità sonora *I*.

In figura 2 appare il grafico di β in funzione di $1/r^2$: si nota un andamento curvilineo che può ricordare quello di una curva logaritmica. Per verificarlo procedo nel seguente modo.

Sui testi si trova la relazione tra il livello sonoro β e l'intensità sonora *I*, che risulta essere la definizione stessa di livello sonoro. Essa può essere espressa in forma logaritmica (base 10):

$$\beta = \beta_0 \log (I/I_0), \tag{1}$$

o in forma esponenziale:

$$I = I_0 10^{\frac{\beta}{\beta_0}}, \tag{2}$$

essendo β_0 la soglia minima di udibilità e I_0 l'intensità sonora minima udibile. Per convenzione:

$$\beta_0 = 10 \text{ dB}, I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}.$$

Dalla (1) scende la seguente definizione di dB. Si chiama livello sonoro di 1 bel = 10 dB quello del suono, percepito dall'orecchio umano, emesso da una sorgente di intensità sonora 10^{-11} W/m^2 . Il livello di 1 dB è ovviamente la decima parte del livello di 1 bel.

Con la (2) è stato possibile calcolare i valori di *I*. Gli errori nella colonna di *I* sono stati ricavati col metodo della semidispersione, utilizzando un'interpolazione lineare. Ad esempio, per

$$r = (4,7 \pm 0,2) \text{ cm}, \quad \beta/\beta_0 = 9,0 \pm 0,1,$$

i valori minimo e massimo di *I* sono rispettivamente:

$$I_{min} = 10^{-12} 10^{8,9} \text{ W/m}^2 = 0,00079 \text{ W/m}^2, I_{max} = 10^{-12} 10^{9,1} \text{ W/m}^2 = 0,00126 \text{ W/m}^2;$$

quindi

$$I = (0,0010 \pm 0,0003) \text{ W/m}^2.$$

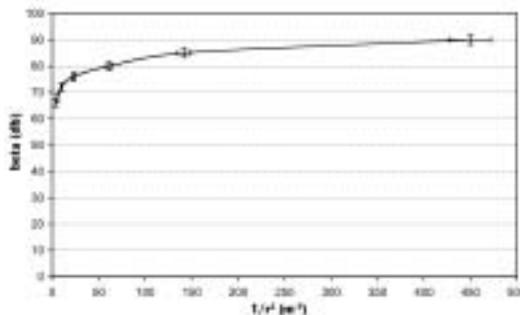


Figura 2: livello sonoro e inverso del quadrato della distanza.

Dall'esame di figura 3 si nota che i dati sperimentali sono ben allineati: la retta di regressione lineare, passante per l'origine degli assi cartesiani con pendenza di circa 0,022 W, presenta un coefficiente di correlazione lineare pari a 0,999. Questo conferma l'ipotesi precedentemente avanzata e la nota relazione tra intensità sonora I e distanza r :

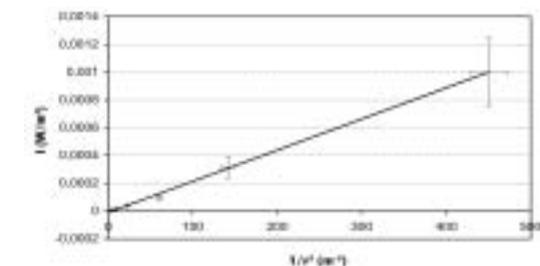


Figura 3: intensità sonora e inverso del quadrato della distanza della distanza.

$$I = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (3)$$

In conclusione l'analisi sperimentale ci fornisce una conferma di quanto noto per via teorica: l'intensità sonora è inversamente proporzionale al quadrato della distanza, mentre il livello sonoro è proporzionale al logaritmo dell'intensità. Ciò è conforme alle caratteristiche del nostro sistema uditivo e, di conseguenza, del fonometro usato.

Illuminamento e distanza

Come sorgente di luce abbiamo adoperato una semplice lampadina ad incandescenza da 6 V montata in un proiettore da laboratorio ed alimentata da un apposito generatore di f.e.m. a bassa tensione della Phywe. Una lente convergente da +5 diottrie consentiva di focalizzare il fascio luminoso sul foro di un diaframma posto davanti al sistema sorgente - lente. Così facendo l'apertura del diaframma funge da sorgente puntiforme, requisito essenziale per trattare il legame tra illuminamento e distanza. L'illuminamento E (lx) era registrato dal sensore di un luxmetro. Proiettore, lente, diaframma e sensore del luxmetro erano fissati ad appositi sostegni (il sensore è stretto in un morsetto), anch'essi montati su altrettanti cavalieri mobili su un banco ottico (vedi figura 4).

Il luxmetro, digitale, è il modello 1334 della ditta TES. È stato usato con la portata di 2000 lx. La sensibilità è dell'1% sulla lettura. Lo strumento presenta il picco nella curva della sensibilità spettrale per un segnale ottico di lunghezza d'onda pari a circa 550 nm.

Con una cordella metrica si misurava la distanza tra il diaframma - che fungeva da sorgente puntiforme - e la parte centrale del sensore, facendo in modo che il cono luminoso avesse l'asse passante il più possibile per il centro del sensore e che il cono di luce venisse interamente intercettato dal sensore stesso. Per assicurare il verificarsi di queste condizioni, abbiamo dovuto operare con distanze comprese tra 15 cm e 45 cm circa.

Le prove sono state effettuate in condizioni di oscuramento non completo per potere eseguire le letture degli strumenti; tuttavia, rispetto alla situazione di buio totale, non si riscontravano differenze sostanziali nella lettura del luxmetro.

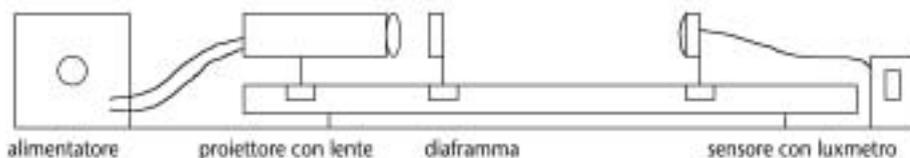


Figura 4: l'assetto sperimentale per i segnali ottici.

I risultati relativi ad un esperimento illuminamento - distanza con la sorgente alimentata a circa 6 V sono riportati in tabella 2 e nei grafici delle figure 5 e 6. Invece, in figura 7, appare il grafico dell'illuminamento in funzione del reciproco del quadrato della distanza per una seconda prova, effettuata alimentando la lampadina a circa 4 V di tensione. Dall'esame delle figure 6 e 7 si nota che l'andamento dei grafici è rettilineo, come confermato dalla buona approssimazione fornita dalle rette di regressione lineare. Tali rette, passanti per l'origine, esprimono la proporzionalità diretta tra illuminamento E e inverso del quadrato della distanza $1/r^2$, confermando la nota legge di Lambert

$$E = I/r^2 \quad (4)$$

ove I è l'intensità luminosa della sorgente, espressa in candele (cd).

La definizione di candela, unità fondamentale S.I., è quella riportata su quasi tutti i manuali.

Per le altre grandezze fotometriche richiamo le definizioni presenti sulla maggior parte dei testi.

Il flusso luminoso Φ attraverso una superficie è l'energia per unità di tempo che attraversa tale superficie; il flusso si misura in lumen (lm). L'angolo solido Ω è la parte di spazio delimitata da una superficie conica; è espresso dal rapporto $\Omega = S/r^2$ tra la porzione S di superficie sferica di raggio r intercettata dal cono e il quadrato del raggio della superficie sferica stessa; l'angolo solido si misura in steradiani (sr) ed assume come valore massimo 4π sr. L'intensità luminosa I è data dal rapporto

E (lx)	r (m)	$\frac{1}{r^2}$ (m ⁻²)
25 ± 1	0,45 ± 0,01	4,9 ± 0,2
35 ± 1	0,36 ± 0,01	7,7 ± 0,4
64 ± 1	0,31 ± 0,01	10,4 ± 0,7
124 ± 1	0,25 ± 0,01	16 ± 1
186 ± 2	0,20 ± 0,01	25 ± 3
246 ± 2	0,17 ± 0,01	34 ± 4
280 ± 3	0,16 ± 0,01	39 ± 5

Tabella 2: illuminamento e distanza.

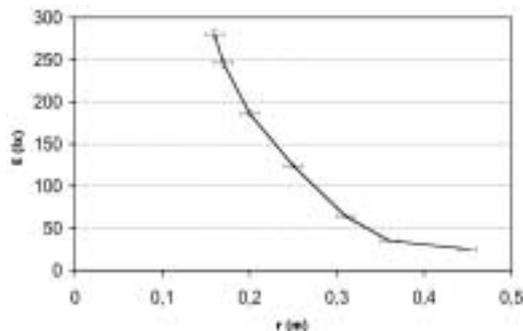


Figura 5: illuminamento e distanza.

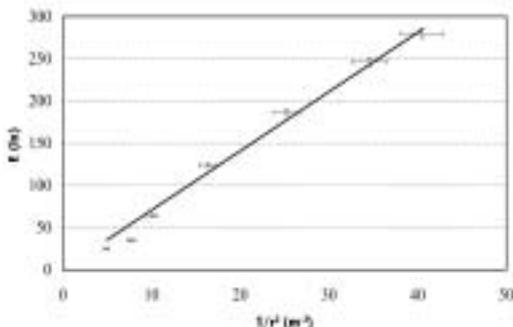


Figura 6: illuminamento e inverso del quadrato della distanza: I prova.

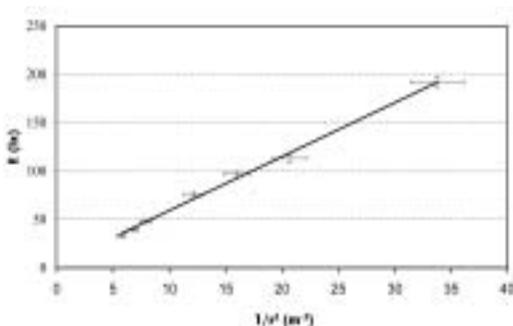


Figura 7: illuminamento e inverso del quadrato della distanza: II prova.

$I = \Phi/\Omega$. L'illuminamento E di una superficie S è il rapporto $E = \Phi/S$; E si esprime in lux (lx).

Dalle definizioni e dalle relazioni riportate segue la legge di Lambert:

$$E = \Phi/S = I\Omega/S = I\Omega/(\Omega r^2) = I/r^2.$$

Va detto che la legge di Lambert assume l'espressione della (4) solo se si considera la superficie ricevente ortogonale ai raggi luminosi, come si verificava sostanzialmente nel nostro esperimento.

Le pendenze delle rette delle figure 6 e 7 sono rispettivamente:

$(7,3 \pm 0,2)$ lx m², con una tensione di circa 6 V;

$(5,9 \pm 0,2)$ lx m², con una tensione di circa 4 V.

È evidente che, in base alla legge di Lambert, tali pendenze esprimono le intensità luminose della lampadina nei due casi esaminati.

Conclusioni

Gli esperimenti trattati in questo articolo confermano le leggi di dipendenza dalla distanza che differenziano il caso del segnale acustico da quello del segnale ottico. In entrambi i casi le grandezze in questione – livello sonoro, illuminamento – esprimono valutazioni “soggettive” del segnale, legate cioè alla qualità della sua ricezione da parte dell'uomo e le unità rispettive – decibel, lux – sono definite proprio seguendo questa impostazione; di conseguenza gli strumenti adoperati – fonometro, luxmetro – sono stati tarati su tali unità.

Ringraziamenti

In chiusura voglio esprimere un ringraziamento ai miei studenti della Classe 4^a C P.N.I. – anno scolastico 2000/01 – del Liceo Scientifico “Belfiore” di Mantova: Elena Castellani, Giulio Girondi, Emanuele Goldoni, Giovanni Inglisha, Chiara Mantovani, Davide Melfi, Eugenia Oczoli, Federico Perini, Eleonora Zanasi, per essersi lasciati coinvolgere dall'interesse e dall'entusiasmo che questa attività di laboratorio ha suscitato.

Va detto che, per questo percorso sperimentale, gli studenti sopra indicati hanno conseguito il 1° posto nel concorso “Premio per il miglior esperimento di Fisica” indetto dal Dipartimento di Fisica dell'Università di Parma; la premiazione è avvenuta a Parma il 25 giugno 2001.

È caratteristico della mentalità militarista considerare come essenziali i fattori non umani (le bombe, le basi strategiche, il possesso delle materie prime e così via) mentre l'essere umano, i suoi desideri e i suoi pensieri, vengono considerati poco importanti e secondari ... L'individuo viene degradato a semplice strumento, diventa materiale umano. I fini normali delle umane aspirazioni svaniscono in tale luce. Al loro posto la mentalità militarista eleva a finalità autonoma il nudo potere (una delle più strane illusioni di cui l'uomo possa cadere vittima). Al giorno d'oggi la mentalità militarista è ancor più pericolosa di un tempo perché le armi di offesa sono diventate molto più potenti. Essa conduce necessariamente ad una guerra preventiva. L'insicurezza generale che va di pari passo con questa provoca il sacrificio dei diritti civili del cittadino di fronte al preteso benessere dello stato ... Non vedo altro modo di uscire dalle attuali condizioni se non quello di una lungimirante, onesta e coraggiosa politica che si prefigga lo scopo di ristabilire la sicurezza su basi internazionali. Speriamo che si trovino uomini, in numero sufficiente e dotati di forza morale, che guidino la nazione su questo cammino fino a quando le circostanze esterne imporranno ad essa una funzione di guida. Allora problemi quali quello che abbiamo ora discusso cesseranno di esistere.

(1947 - “The American Scholar”)

R. Fieschi, *Albert Einstein*, Edizioni Cultura della Pace, Firenze, 1987