

Capítol 2. Acústica (Hola! Em sents?)

La vida sense música
és un viatge pel desert.
Pat Conroy

- 2.1 Introducció
- 2.2 Conceptes bàsics d'acústica
 - 2.2.1 Ones sonores: caracterització
 - 2.2.2 Impedància acústica
 - 2.2.3 Reflexió, transmissió de so
 - 2.2.4 Intensitat (energia) d'una ona
 - 2.2.5 Canvi de medi
 - 2.2.6 Amplitud d'oscil·lació al pas d'una ona
- 2.3 Com sentim?
 - 2.3.1 L'oïda mitjana
 - 2.3.2 Sorolls sota l'aigua
 - 2.3.3 Llindar d'audició
 - 2.3.4 Sensibilitat de l'oïda
 - 2.3.5 Intensitat del so en decibels
- 2.4 Eh! On estàs?
 - 2.4.1 Primer mètode de localització
 - 2.4.2 Segon mètode de localització
 - 2.4.3 En concret: persones, animals...
 - 2.4.4 Sons en l'aigua: persones, balenes i dofins
 - 2.4.5 Els insectes i els sons
 - 2.4.6 ... i les granotes...
- 2.5 Localitzadors animals
 - 2.5.1 Ultrasons
 - 2.5.2 Impulsos ultrasònics dels rats penats
 - 2.5.3 Ecolocalització per impulsos variables
 - 2.5.4 Ecolocalització per impulsos constants
 - 2.5.5 Efecte Doppler
 - 2.5.6 Efecte Doppler i rates penades
 - 2.5.7 Altres espècies animals...
 - 2.5.8 Ecolocalització i ceguesa
- 2.6 Física (conceptes)

Una plaqueta planeta
amb un foradet
i de vores rodones
Què és?
Endevinalla popular rusa

2.1 Introducció

Quasi tot el que passa a la Terra genera un so. El so és ubic i penetra pertot arreu. A diferència de la llum, el so pot *salvar* barreres sòlides i no transparents a la llum, i contornejar-les amb facilitat. El so pot estimular els receptors mecànics, relativament senzills i que tenen una bona sensibilitat, del sistema auditiu dels animals. El so també aporta informació a un animal sobre els esdeveniments que tenen lloc lluny, on l'ull no pot accedir. El so, d'una banda, prevé la fera sobre l'apropament de la seua presa i, de l'altra, ofereix a la presa l'última possibilitat d'evitar aquest infortunat encontre.

Per aquestes causes, no és d'estranyar que el so tinga un paper clau en la vida de tots els animals vertebrats i, també, dels invertebrats més actius, és a dir, de molts insectes.



Fig. 1. El so que emet un diapasó es propaga per l'aire, o per qualsevol medi, en forma d'ones de pressió (de compressions i dilatacions). En la figura es mostra la propagació de so per un tub.

2.2 Conceptes bàsics d'acústica

Abans de passar a l'anàlisi dels mecanismes que constitueixen la base de la capacitat d'oïr, cal que ens assabentem dels conceptes fonamentals de la ciència del so, l'acústica.

Com a exemple més simple de font de so pot servir un diapasó oscil·lant com el de la fig. 1. Però, què és el so?

Si fem vibrar les branques del diapasó es generen ones de pressió que es propaguen per tots els costats (i que percep l'òrgan de l'oïda). Així, definim el so com una seqüència d'ones de compressió i de rarefacció que es propaguen en el medi que ens envolta (l'aire). Hem d'assenyalar que la pressió en l'ona sonora oscil·la respecte al valor de la pressió atmosfèrica mitjana, i l'amplitud relativa d'aquestes oscil·lacions no supera, normalment, el 0.5%.

Q1) Si la pressió atmosfèrica és, normalment, de 101300 Pa (uns 100 kPa), quina serà la sobrepressió (o depressió) típica que es produeix al pas d'una ona sonora?

Q2) Què pesa més, un llibre deixat pla sobre la taula o plantat sobre un costat o de punta? Quin fa més pressió sobre la taula?

(Física) El so és...

(Física) El so es caracteritza per...

(Física) La pressió es defineix així...

Q3) Què és la pressió atmosfèrica?

Cal tenir en compte que quan es propaga l'ona sonora no es produeix un flux unidireccional de molècules d'aire en cap direcció de l'espai, és a dir, les molècules no es desplacen a distàncies finites pel fet que hi passe una ona: les molècules simplement tenen un moviment d'oscil·lació, de vaivé, imposat per l'ona sonora que es propaga. Aquest moviment de vaivé se suma al moviment que sempre tenen les molècules de qualsevol medi, i que anomenem *moviment d'agitació tèrmica*.

(Física) Agitació tèrmica és...

(Física) Ones sonores són...

Q4) Afegeix a les molècules de l'esquema de la fig. 1 un vector que represente la velocitat d'agitació tèrmica i un altre que represente la velocitat causada pel pas de l'ona sonora.

2.2.1 Ones sonores: caracterització

Els paràmetres principals de l'ona sonora són la freqüència, l'amplitud (o intensitat) i la velocitat de propagació.

La freqüència de l'ona és el nombre d'oscil·lacions completes que provoca en les partícules, per segon. La freqüència de l'ona sonora ve determinada totalment per les característiques de la font de so i per la velocitat del moviment d'aquesta font respecte del receptor acústic (efecte Doppler, que veurem més endavant).

L'amplitud de l'ona sonora és la màxima separació que provoca en les molècules respecte de les posicions d'equilibri (les posicions d'equilibri són les que tenien les molècules abans del pas de l'ona). L'amplitud del so en un punt donat depèn no sols de la potència de la font i de la distància a aquesta, sinó també de les propietats del medi pel qual es propaga (de l'absorció que té, per exemple).

La velocitat de propagació de l'ona és la distància que recorre cada front d'ones per unitat de temps. La velocitat de propagació de l'ona sonora és un paràmetre que depèn tan sols de les característiques del medi en què es propaga. Cal fer notar que la velocitat de l'ona (és a dir, la velocitat del moviment col·lectiu de les molècules del medi) és molt superior a la velocitat d'oscil·lació que provoca el pas de l'ona sobre aquestes molècules del medi.

De quines característiques del medi depèn la propagació de l'ona sonora? Es pot demostrar que, en una ona sonora que es propaga per un medi material de densitat ρ a velocitat c , hi ha la relació següent entre els valors mitjans de la pressió provocada per l'ona, ΔP , i de la velocitat v de desplaçament (d'oscil·lació) de les molècules del medi¹³:

$$v = \frac{\Delta P}{\rho c} \quad (1)$$

(Física) Freqüència és...
amplitud és...
velocitat de propagació és...
i depenen de...

(Física) Velocitat mitjana és...
i es mesura en...

(Física) Densitat és...
i es mesura en...

¹³ La deducció d'aquesta expressió es pot veure qualitativament en l'equació anterior a la 4.16, en la pàg. 417 del text *Física General*, de J. Català, si fem $v \sim (2\pi) A/T$, en què A és l'amplitud d'oscil·lació de les molècules d'aire al pas del so i T , el període d'oscil·lació.

Com ja hem indicat abans, ΔP és la pressió de l'ona sonora (pressió acústica), que s'entén com la diferència entre la pressió que hi ha al pas de l'ona per un punt donat i la pressió atmosfèrica mitjana en el medi¹⁴.

Q5) Comprova que les dimensions de l'eq. (1) són correctes.

Q6) Fes una estimació de la velocitat v per a les molècules d'aire i les de l'os (veges la taula 1), i compara-les amb la velocitat del so en l'aire i en l'os, respectivament.

ΔP és la pressió acústica.
Escriurem, simplement, P .

Nota: per simplificar l'escriptura, a partir d'ara escriurem P en lloc de ΔP , quan ens referim a la pressió acústica (l'excés de pressió provocat localment pel pas del so).

2.2.2 Impedància acústica

El producte ρc , que apareix en el denominador de l'eq. (1), s'anomena impedància acústica del medi. Si reescrivim l'eq. (1) així,¹⁵ $P = \rho c v$, es veu que com major és la impedància acústica del medi menors han de ser els valors de les velocitats de desplaçament de l'aire per a produir la mateixa pressió acústica. En el procés de l'audició, el so ha de travessar diversos medis materials fins a arribar a l'oïda. És convenient considerar la impedància acústica per a l'anàlisi de la transferència d'una ona d'un medi material a un altre. En la taula 1 tenim valors per a l'aire, l'aigua i alguns teixits biològics.

Taula 1. Impedància acústica d'alguns medis materials.

Material	Densitat ρ ($\times 10^3$ kg/m ³)	Velocitat del so c ($\times 10^2$ m/s)	Impedància acústica ρc (N s/m ³)
Aire	$1.29 \cdot 10^{-3}$	3.31	430
Aigua	1	14.8	$1.48 \cdot 10^6$
Múscul	1.04	15.8	$1.64 \cdot 10^6$
Greix	0.92	14.5	$1.33 \cdot 10^6$
Os	1.9	40.4	$7.68 \cdot 10^6$

(Física) Reflexió d'una ona és...

Q7) A quina distància està una tempesta si tardem 5 s a sentir el tro, des que veiem el llampec? (suposa dues situacions: que estem a la platja, tant dins com fora l'aigua).

¹⁴ Aquesta expressió és anàloga a l'obtinguda en l'anàlisi de la propagació d'una ona polsant per una artèria (veges el capítol 4t).

¹⁵ Recorda que sempre que escriurem P en aquest capítol ens referirem a ΔP , l'augment o disminució de pressió produïdes al pas de l'ona sonora (i que sol ser inferior a un 0.5 % de la pressió que hi ha al medi en absència de l'ona).

2.2.3 Reflexió, transmissió de so

Quan el so troba en el camí de propagació la superfície de separació de dos medis, una part de l'ona sonora s'hi reflecteix, mentre que la resta passa a l'altre medi (es transmet).

L'ona sonora reflectida és el que anomenem eco. Què determina l'amplitud de l'ona sonora reflectida? Analitzem la propagació del so des d'un medi d'impedància acústica petita (aire) cap a un medi d'impedància gran (aigua). Per a simplificar, suposem que la direcció de propagació de l'ona sonora és perpendicular al pla de separació dels dos medis (fig. 2). És evident que la pressió acústica en els punts A i A' que es troben immediatament per sobre i per baix de la superfície de separació serà pràcticament idèntica. Tanmateix, la pressió en el punt A representa la suma de les pressions de l'ona sonora incident (P_i) i de la reflectida (P_r). Per això, si designem amb P_t la pressió de l'ona sonora que passa al medi segon (ona transmesa), tenim la igualtat:

$$P_t = P_i + P_r \quad (2)$$

Volem escriure P_r i P_t en funció de P_i . Les velocitats de les partícules del medi en els punts A i A' també han de ser iguals, ja que en el cas contrari un medi hauria penetrat en l'altre i el pla límit no estaria ben definit. La partícula del medi 1 que es troba en el punt A participa simultàniament de dos moviments: del de l'ona sonora incident i del de l'ona reflectida. Per això, la velocitat v_A d'aquesta partícula serà igual a la diferència de les dues velocitats, i es pot escriure, si partim de la relació (1), que

$$v_A = \frac{P_i - P_r}{\rho_1 c_1}$$

Al mateix temps, la velocitat d'una partícula en el punt A' és $v_{A'} = P_t / (\rho_2 c_2)$. Si igualem v_A i $v_{A'}$ obtenim:

$$\frac{P_t}{\rho_2 c_2} = \frac{P_i - P_r}{\rho_1 c_1} \quad (3)$$

Ja tenim un sistema de dues equacions, (2) i (3), amb dues incògnites, P_r i P_t , que podem resoldre per a obtenir:

$$P_r = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} P_i \quad (4)$$

$$P_t = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} P_i$$

Q8) Dedueix les expressions anteriors i explica què prediuen si $\rho_1 = \rho_2$ i si $c_1 = c_2$, o si $\rho_1 c_1 = c_2 \rho_2$.

(Física) Transmissió d'una ona és...

(Física) L'eco és...

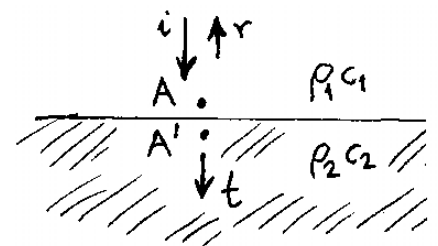


Fig. 2. Reflexió d'una ona sonora en el límit de separació de dos medis: i, ona incident; r, ona reflectida; t, ona transmesa.

(Física) Canvi de fase en la reflexió és...

De les expressions (4) deduïm que les pressions de les ones sonores reflectida i transmesa estan determinades completament pels valors de les impedàncies acústiques dels medis¹⁶. A més a més, com major siga la relació $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$, major serà l'amplitud de l'ona reflectida (i, per tant, menor serà la fracció d'ona transmesa).

Q9) Comprova l'afirmació anterior. Fes un esquema de P_t i P_r en funció del quocient $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$. (ajut: reescriu primer les expressions anteriors dividint numerador i denominador per $\rho_1 c_1$).

Per tant, quan una ona incideix des d'un medi de baixa impedància acústica a un medi de molta major impedància acústica, es transmet només una petita fracció de la intensitat de l'ona incident.

(Física) Variació sinusoidal d'una magnitud és...

2.2.4 Intensitat (energia) d'una ona

Una ona sonora representa un flux direccional d'energia mecànica. En general, es pot suposar que la pressió de l'ona sonora en un punt del medi material varia en funció del temps de forma sinusoidal, i amb una freqüència f ; és a dir,

$$P(x, t) = P_0(x) \sin(2\pi ft) \quad (5)$$

$P_0(x)$ és l'amplitud de la vibració (el valor màxim de la sobrepressió que es produeix al pas de l'ona sonora).

Q10) Fes un esquema de la funció anterior (n'hauràs de fer dos, un per a un temps constant t i en funció de x , i l'altre per a una posició donada, x , i en funció de t).

(Física) Energia de l'ona és...
i es mesura en...

Es pot demostrar que la intensitat de l'ona –és a dir– la quantitat d'energia transferida per una ona sonora en la unitat de temps, a través de la unitat de superfície perpendicular a la direcció de propagació, val

$$I = \frac{P_0^2}{2\rho c} \quad (6)$$

Calculem la intensitat de les ones reflectides i transmeses en un canvi de medi de propagació, com en la fig. 2. Si escrivim una equació com la (5) per a cada una de les tres ones de la fig. 2 (r , i , t), amb les expressions (4) i (6) es poden obtenir les expressions per a la intensitat d'energia de les ones sonores reflectida i transmesa:

$$I_r = \left(\frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2 I_i \quad (7)$$

$$I_t = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} I_i$$

(Fixa't que el canvi de fase que comentem darrere l'eq. (4) no afecta la intensitat de l'ona reflectida, que és sempre positiva!).

Q11) Demuestra les relacions anteriors.

¹⁶ Fixa't que si $\rho_1 c_1 > \rho_2 c_2$, l'eq. (4) indica que el signe de P_r és contrari al de P_i . Això significa que quan l'ona incident passa per una sobrepressió, per exemple, l'ona reflectida té una depressió, i a la inversa. Tècnicament es diu que una ona reflectida sobre un medi material menys "dens" pateix un canvi de fase.

(Física) Energia mecànica és ...
i es mesura en ...

Q12) Comprova que les dimensions de l'eq. (6) són correctes i fes un càlcul d'ordre de magnitud.

Q13) Demuestra que l'energia de l'ona incident es conserva (no es perd); és a dir, que $I_i = I_r + I_t$.

2.2.5 Canvi de medi

(Física) Variació sinusoidal d'una magnitud és...

Suposem que l'ona sonora passa de l'aire a l'aigua. En aquest cas, $\rho_1 c_1 = 430 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$ i $\rho_2 c_2 = 1.48 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^3$. En substituir en (6) aquests valors de les impedàncies acústiques, obtenim $I_r = 0.999 I_i$ i $I_t = 0.001 I_i$. D'aquesta manera, quan el so passa de l'aire a l'aigua, el 99.9 % de tota l'energia acústica és reflectida per la superfície de l'aigua. Òbviament, això també es vàlid per a l'ona sonora que passa de l'aigua a l'aire.

Q14) Explica l'afirmació anterior: per què val el mateix resultat en els dos casos contraris (aire \rightarrow aigua i aigua \rightarrow aire)?

Q15) Calcula el % de la intensitat sonora que es reflecteix en arribar el so de l'aigua al múscul.

Q16) Fes un esquema de la fracció de so transmesa en funció del quocient $\rho_2 c_2 / \rho_1 c_1$, entre els valors 0 i ∞ .

De la representació de la intensitat de so transmès i reflectit en funció del quocient d'impedàncies dels dos medis concloem que una bona transmissió de so requereix que les impedàncies dels medis contigus siguin quasi iguals, mentre que si són molt diferents, la major part de l'energia de l'ona incident és tornada al medi inicial per reflexió.

2.2.6 Amplitud d'oscil·lació al pas d'una ona

Finalment, l'últim concepte de l'acústica que necessitem per a avaluar el sistema auditiu dels animals és l'amplitud mitjana A de les desviacions de les molècules del medi quan es propaga l'ona sonora. Si utilitzem l'expressió (1) per a les ones sonores de forma sinusoidal (veges la nota corresponent a peu de pàgina), obtenim que:

$$A = \frac{P_0}{2\pi f \rho c} \quad (8)$$

en què f és la freqüència del so i P_0 està definida en l'eq. (5).

Q17) Comprova que les dimensions de l'equació anterior són correctes i fes una estimació del valor de la magnitud A per a un cas típic.

2.3 Com sentim?

En la fig. 3 es representa el tall de l'oïda d'una persona. Aquest òrgan consta de tres parts: oïda externa, oïda mitjana i oïda interna. L'oïda externa comprèn el pavelló de l'orella i el conducte auditiu extern que desemboca en aquest. Els elements de l'oïda externa serveixen per a conduir l'energia de les ones sonores al timpà, la membrana que obtura totalment el conducte auditiu extern en l'extrem interior.

La membrana del timpà i la cadena de tres ossets de l'oïda (enclusa, martell i estrep) —que són elements de l'oïda mitjana— transmeten les vibracions acústiques a l'element de l'oïda interna anomenat caragol, en què aquestes es transformen en una seqüència d'impulsos nerviosos que van al cervell pel nervi auditiu.

L'oïda interna és una cavitat tancada disposada en el temporal del crani. Únicament en la zona de les finestres oval i rodona hi ha membranes elàstiques que es poden bombar. Tota la cavitat de l'oïda interna està plena de líquid. L'últim dels ossets de l'oïda mitjana —l'estrep— ve fixat a la membrana de la finestra oval, i d'aquesta manera transmet les vibracions acústiques al medi líquid de l'oïda interna. Les vibracions acústiques que es propaguen en l'oïda interna des de la finestra oval cap a la finestra rodona deformen les cèl·lules piloses especials, l'excitació de les quals inicia les sensacions auditives.

2.3.1 L'oïda mitjana

Per a comprendre el principi d'operació de l'oïda mitjana, primerament ens figurarem que no la tenim. Com es modificarà en aquest cas la nostra oïda? Si les ones provinents de l'aire incidiren directament sobre la finestra oval de l'oïda interna, l'energia de l'ona transmesa a través de la membrana constituiria tan sols el 0.1% de l'energia inicial, atès que les impedàncies acústiques de l'aire i del líquid que emplena l'oïda interna es diferencien en més de 1000 vegades. Per tant, els elements de l'oïda mitjana serveixen per a fer mínimes les pèrdues d'energia que ocorren durant la transmissió del so des de l'oïda externa cap a l'interior.

La membrana del timpà d'una persona té una àrea de 0.7 cm^2 , aproximadament. Aquesta membrana està lligada a la membrana de la finestra oval mitjançant els ossos de l'oïda¹⁷; l'àrea de la membrana és tan sols de 0.03 cm^2 . D'aquesta manera, l'oïda mitjana treballa com un transformador de la pressió, i augmenta la pressió acústica sobre la membrana de la finestra oval unes 40 vegades, aproximadament, en comparació amb la pressió que actua sobre la membrana del timpà. A més a més, com s'observa en la fig. 4, l'amplitud dels desplaçaments de la membrana del timpà resulta ser dues vegades major que l'amplitud de les vibracions de la finestra oval.

Q18) Explica l'afirmació anterior (veges la nota a peu de pàgina, que explica l'equivalent mecànic de l'oïda).

¹⁷ El sistema de palanques format pels 3 ossets de l'oïda és equivalent al dispositiu representat en la fig. 4, en el qual la força que actua al llarg de l'eix AB és dues vegades menor que la que actua sobre la finestra oval al llarg del CD.

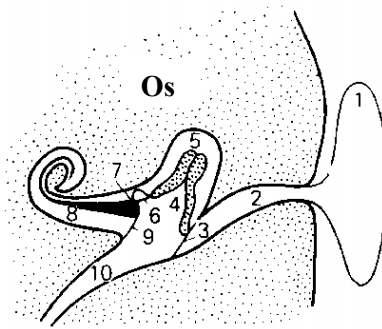


Fig. 3. Representació esquemàtica de l'oïda d'una persona: 1, pavelló de l'orella; 2, conducte auditiu; 3, membrana del timpà; 4, martell; 5, enclusa; 6, estrep; 7, membrana de la finestra oval; 8, caragol; 9, membrana de la finestra rodona, i 10, trompa d'Eustaqüi.

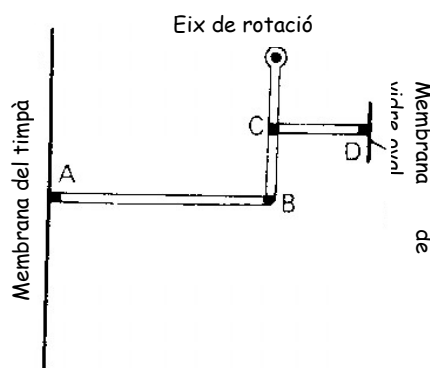


Fig. 4. Equivalent mecànic de l'oïda mitjana. Per a un angle de rotació determinat al voltant de l'eix, el desplaçament de la barra CB provoca un desplaçament doble de la barra AB que la CD.

A partir de l'eq. (1), escrita així, $\rho c = \Delta P/v$, es pot definir la impedància acústica d'un medi com la relació entre l'amplitud de la pressió i la del desplaçament de les partícules del medi, en un punt donat, durant la propagació de l'ona sonora. De tot el que hem dit sobre el funcionament de l'oïda mitjana es dedueix que la impedància acústica de l'oïda al nivell de la membrana del timpà és 80 vegades menor que la impedància al nivell de la finestra oval, i s'apropa al valor de la impedància acústica de l'aire. Així, l'oïda mitjana fa concordar les impedàncies acústiques de l'oïda interna i de l'aire, i això fa disminuir considerablement l'amplitud de l'ona sonora reflectida en la membrana del timpà. D'aquesta manera, doncs, el so es transmet millor cap a l'oïda interna.

2.3.2 Sorolls sota l'aigua

L'oïda dels mamífers terrestres, adaptada per a la recepció de les ones sonores propagades en el medi aeri, funciona malament sota l'aigua. La raó és que la impedància acústica de l'aigua és 1000 vegades major, aproximadament, que la de l'oïda mitjana; per això el so es reflecteix quasi completament en la membrana del timpà.¹⁸

L'oïda de les balenes i dels dofins està adaptada perfectament per a escoltar els sons de la mar. La unió dels ossets de l'oïda entre si i les dimensions d'aquests ossets en l'organisme dels mamífers marins, a diferència dels mamífers terrestres, són tals que l'amplitud de les vibracions de la membrana de la finestra oval supera considerablement l'amplitud de les vibracions de la membrana del timpà. Com a resultat, la impedància acústica de l'oïda al nivell de la membrana del timpà augmenta i s'aproxima a la impedància de l'aigua. D'aquesta manera, l'oïda mitjana de les balenes i dels dofins, igual que la dels animals terrestres, té un valor de la impedància acústica pròxim a la impedància del medi en què s'escolta, cosa que permet transmetre una energia acústica major a l'oïda mitjana.

2.3.3 Llindar d'audició

L'estructura òptima de l'oïda mitjana i l'alta sensibilitat de les cèl·lules piloses de l'oïda interna donen la possibilitat, a molts animals, de percebre vibracions acústiques de tan baixa amplitud que es troben fora dels límits de sensibilitat dels sistemes acústics moderns. Així, per exemple, la intensitat mínima del so que és capaç de captar l'oïda humana és d'uns 10^{-12} W/m^2 per la freqüència de 3 kHz, i la intensitat màxima del so que l'oïda encara és capaç de suportar es troba prop d' 1 W/m^2 .

Q19) Quants ordres de magnitud d'intensitat de so és capaç de percebre l'oïda humana?

¹⁸ La manca d'acomodació de l'oïda humana per a percebre els sons subaquàtics va motivar la creença dels nostres avantpassats que el món subaquàtic era el món del silenci. D'ací prové, també, l'expressió mut *com el peix*. Fins i tot la idea mateixa que els peixos poden comunicar-se amb l'ajut dels sons va obtenir l'ampli reconeixement dels científics tan sols en la dècada dels 40, quan el desenvolupament de la flota submarina va originar la creació de sistemes hidroacústics especials.

Tanmateix, ja Leonardo da Vinci va proposar escoltar els sons aquàtics, prement l'oïda contra el rem submergit en l'aigua. La impedància acústica de la fusta humida és pròxima a la de l'aigua, i l'estreyniment del rem en la direcció des de la pala cap al puny el converteix en transductor de la pressió, anàleg a l'oïda mitjana (veges les fig.3 i fig. 4). Tots aquests fets fan que les ones sonores subaquàtiques experimenten una reflexió insignificant, es propaguen pel rem i arriben a l'os del crani prop de l'oïda; les vibracions d'aquest os provoquen les vibracions corresponents del líquid de l'oïda interna i les sensacions acústiques. Els pescadors que recorren a aquest mètode per a escoltar els sons subaquàtics saben que els peixos són tremends xerraires.

2.3.4 Sensibilitat de l'oïda

(Física) Un transductor és...

(Física) Moviment tèrmic aleatori és...

(Física) Soroll blanc és...
i s'anomena així perquè...

Per fer-nos una idea sobre la sensibilitat de la nostra oïda, farem servir les fórmules (6) i (8) per trobar l'amplitud mitjana mínima (A_{mit}) dels desplaçaments sinusoidals de les molècules d'aire causats per l'ona sonora que es propaga. La substitució de $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ (intensitat llindar d'audició), $\rho = 1.3 \text{ kg/m}^3$, $c = 330 \text{ m/s}$ i $f = 3 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ dona A_{mit} ...¹⁹

Q20) Fes tu el càlcul.

Per a comparar, hem de dir que el diàmetre de l'àtom d'hidrogen és igual a 10^{-10} m, aproximadament. D'aquesta manera, l'amplitud mitjana mínima dels desplaçaments sinusoidals de les molècules de l'aire en l'ona sonora que percebem encara com a so constitueix tan sols una dècima part del diàmetre de l'àtom d'hidrogen.

Realment no hauríem guanyat res si la nostra oïda haguera sigut unes quantes vegades més sensible, ja que amb una sensibilitat tan gran percebríem els moviments tèrmics aleatoris de les molècules de l'aire. En aquest cas, sentiríem els sons que ens interessin sobre el rerefons d'un brunzit constant, l'anomenat *soroll blanc*, que no inclou cap informació útil.

2.3.5 Intensitat del so en decibels

Per a avaluar la força (la intensitat) d'un so, a més de l'expressió (8) o la (6), s'utilitza sovint la magnitud L definida de la manera següent

$$L = 20 \log \frac{P}{P_{min}} \quad (9)$$

en què P és l'amplitud de l'ona de pressió acústica i P_{min} és l'amplitud de la pressió acústica corresponent al llindar d'audibilitat mitjà d'una persona. La magnitud L és adimensional, però amb el fi de distingir-la d'altres magnituds adimensionals li donem la dimensió de decibel (dB). En la taula 2 es donen els valors de L corresponents a uns quants valors de P.

Q21) La intensitat d'una ona sonora és proporcional al quadrat de l'amplitud de l'ona, eq. (6) i eq. (8). a) Reescriu l'eq. (9) en termes de l'amplitud de l'ona, fent servir l'eq. (8). b) Fes el mateix tot substituint P per I, eq. (6). c) Reescriu l'eq. (9) aïllant P en funció de la resta de magnituds, i descriu verbalment l'expressió que obtingues.

(Física) El decibel s'anomena així en honor de...
i no es fa servir el bel perquè...

¹⁹... $\approx 10^{-11}$ m

Taula 2. Intensitat del so i amplitud de l'ona de pressió acústica corresponent.

Amplitud de la pressió acústica (N/m ²)	Intensitat del so (dB)	A què correspon en la vida diària
2·10 ³	160	Lesions mecàniques de la membrana del timpà
2·10 ²	140	Llindar de dolor de l'oïda
2	100	Taller en funcionament; automòbil
2·10 ⁻²	60	Soroll en una oficina; conversa
2·10 ⁻⁴	20	Cambra molt silenciosa
2·10 ⁻⁵	0	Llindar d'audibilitat

Q22) Dedueix alguns valors d'intensitat del so (en dB) a partir de la taula 2. Si no és possible, fes el contrari: dedueix P_{min} a partir dels dB i de P.

Quan la intensitat del so és a prop de 60 dB o més, la persona pot distingir dos sons de diferent força solament en el cas que la intensitat es diferencie en més de 0.5 dB. Si la intensitat del so és d'uns 30 dB, la persona distingeix el so quan la intensitat es diferencia en més d'1 dB. I, finalment, a prop del llindar d'audibilitat podem distingir dos tons acústics d'igual freqüència tan sols si la diferència en la intensitat no és menor de 6 dB.

Q23) Fes una gràfica de la intensitat dels sons en funció dels dB de diferència que han de tenir per tal de poder-los apreciar com a distints.

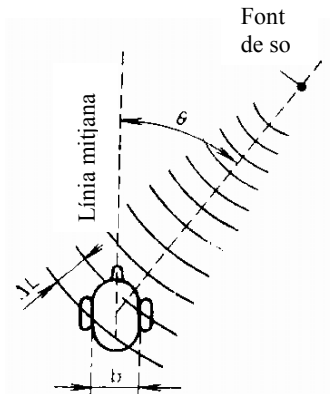


Fig. 5a. Un dels mètodes de determinació de la direcció de la font de so: interval temporal.

2.4 Eh! On estàs?

Per a molts animals és important no sols sentir el so, sinó també determinar-ne la procedència. Hi ha dos mètodes principals per a determinar la direcció cap a la font de so, i els dos requereixen dos receptors acústics (oïdes).

2.4.1 Primer mètode de localització

El primer mètode consisteix a determinar el retard temporal de l'arribada d'un mateix component de l'ona sonora a dues oïdes (fig. 5). Si la diferència de distància entre les oïdes i la font del so és ΔL, el temps extra que tarda a arribar el so a l'oïda més allunyada és Δt = ΔL/c. Si b és la distància entre les dues oïdes i θ l'angle que fa la font del so amb la normal a la cara de la persona (el pla mitjà del cap), fig. 5, escriurem:

$$\Delta t = \Delta L/c = (b/c) \sin \theta \tag{10}$$

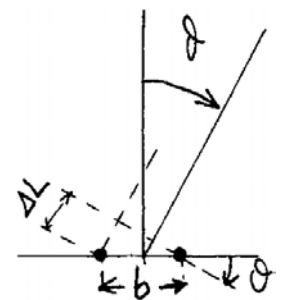


Fig. 5b. Notació utilitzada en la fig. 5a.

És evident que serà major el valor d'aquest retard com major siga l'angle que formen la direcció cap a la font amb la línia mitjana del cap. Per a una persona, la distància entre les oïdes és igual, en valor mitjà, a uns 17 cm. Per això, el valor màxim del retard (quan l'ona sonora es propaga perpendicularment al pla mitjà del cap) és $\Delta t_{\text{màx}} = \dots$ ²⁰

Q24) Calcula'l tu, el temps extra que tarda a arribar el so a l'oïda més allunyada de la font de so.

És sorprenent la capacitat de les nostres oïdes i del cervell de treballar conjuntament en la captació de retards del so que són menors de 0.1 ms. Les persones entrenades poden, fins i tot, determinar la desviació de la font de so respecte al pla mitjà del cap, si l'angle és menor d'1° o 2°; és a dir, poden captar un retard temporal de prop de 10 μs. És evident que aquest mètode de determinació de la direcció cap a la font de so resulta més útil per als animals grans, que tenen les oïdes més apartades l'una de l'altra.

Q25) Quantes vegades més és capaç de captar retards de sons una persona entrenada que una "normal"?

2.4.2 Segon mètode de localització

*(Física) Longitud d'ona és...
i es mesura en...*

El segon mètode per a determinar la posició d'una font de so consisteix en la mesura de la diferència en la intensitat del so que arriba a una i altra oïda. Per a vibracions acústiques amb longitud d'ona de menys d'uns 15 cm...

Q26) Calcula el valor de la freqüència mínima²¹ dels sons de què estem parlant... (recorda que: $c = \lambda/T = \lambda v$).

*(Física) Difracció és...
i l'ombra per difracció és...*

...el cap humà representa un obstacle considerable perquè té dimensions comparables o majors que la longitud d'ona del so, i els fenòmens de difracció són molt importants. Per aquesta causa, darrere el cap es forma una ombra acústica en què la intensitat del so serà menor que en el costat oposat. Si la font de so està desplaçada respecte del pla mitjà del cap, aleshores una de les nostres oïdes es trobarà en la zona de l'ombra acústica, i l'altra fora d'aquesta zona. Com a resultat, les intensitats de les ones sonores que incideixen sobre les dues oïdes seran desiguals.

L'experiència diària ens ha ensenyat a utilitzar aquesta diferència en la intensitat del so per a determinar la direcció cap a la font de so amb una precisió d'1° a 2°, en el cas de sons de freqüència suficientment elevada.

²⁰... $0.17/330 = 5 \cdot 10^{-4}$ s

²¹... $0.17/330 = 5 \cdot 10^{-4}$ s

2.4.3 En concret: persones, animals...

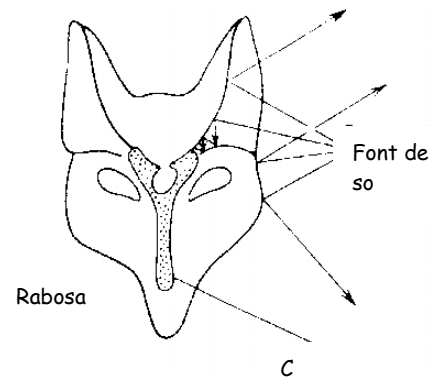
Una persona utilitza inconscientment al mateix temps els dos mètodes de localització de la font de so. En general, a una diferència en la intensitat del so d'aproximadament un 10% correspon una demora temporal en l'arribada de l'ona sonora (a l'oïda més allunyada) de $18 \mu\text{s}$.²²

Q27) Demuestra la relació entre el retard de $18 \mu\text{s}$ i els 3 o 4° que esmentem a peu de pàgina.

Q28) Si la font del so està a 1 km de distància del cap de la persona, quina distància separa entre ells 2 fronts que fan 4° des del cap?

Hem d'assenyalar que els animals petits (els ratolins, per exemple) poden accedir tan sols al segon mètode de localització de la font de so, ja que el primer requeriria de tenir la capacitat de mesurar els intervals de temps amb una exactitud d' $1 \mu\text{s}$, un valor inconcebible per al sistema nerviós. L'extraordinària sensibilitat dels mamífers petits als sons d'alta freqüència crea les condicions necessàries per a la utilització del segon mètode de detecció, basat en l'ombra acústica.

Q28) Explica per què un ratolí no pot usar el primer mètode de detecció de la direcció de la font del so, i per què se'n parla de sons d'alta freqüència.



2.4.4 Sons en l'aigua: persones, balenes i dofins

Una persona que es troba sota l'aigua, i prop d'una llanxa motora en moviment, experimenta una sensació insòlita. Es trobe on es trobe aquesta llanxa, és com si estiguera al seu costat: l'audibilitat del motor no canvia quan girem el cap en l'aigua. És a dir, una persona que submergeix el cap en l'aigua no pot determinar la direcció de la font de so sense dispositius especials. L'explicació d'aquest fet radica en què, en l'aigua, els ossos del crani no generen ombra acústica ja que la seua impedància acústica és pròxima a la impedància de l'aigua. Per això, en l'aigua, les ones sonores arriben igual de bé a les dues oïdes i priven la persona de la possibilitat d'orientar-se pel so amb l'ajuda del segon mètode.

El sistema auditiu de les balenes i dels dofins està ben adaptat per a l'orientació subaquàtica amb l'ajuda del so. Les cavitats aèries existents en el seu crani generen ombres acústiques (per la gran diferència entre les impedàncies acústiques de l'aigua i l'aire) que separen espacialment les dues oïdes (fig. 6). Aquesta circumstància els permet determinar sota l'aigua la direcció cap a la font de so, amb l'ús dels mètodes que hem descrit.

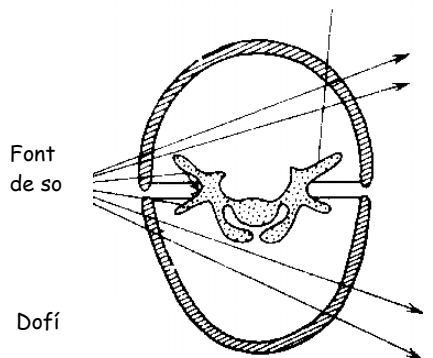


Fig. 6. Elements del cap que permeten localitzar la font de so en l'aire, en el cas d'una rabosa, i en l'aigua, quan es tracta d'un dofí. Els ossos del crani i el pavelló de l'orella creen una ombra acústica en l'aire. En l'aigua, aquesta ombra acústica és creada per les foses aèries nasals.
(C) són les cavitats aèries nasals.

²² Per aquesta causa, si artificialment, per exemple, la sensibilitat de l'oïda que es troba dins l'ombra acústica es fa disminuir en un 10%, aleshores quan la persona determina la direcció cap a la font de so s'equivocarà sistemàticament en 3° o 4° .

2.4.5 Els insectes i els sons

A la vista del que hem dit, sembla que han de sorgir entre els insectes dificultats insuperables en la determinació de la direcció cap a la font de so. Fem-ne una anàlisi breu. El gruix del cos del saltamartí²³ és de menys d'1 cm, i la longitud d'ona del so que produeix és de prop de 8 cm (freqüència de ...²⁴).

Q29) Calcula aquesta freqüència...

Per aquesta causa, el saltamartí mateix no crearà ombra acústica per al xerric del seu veí i, a més a més, fins i tot la possessió de dos òrgans auditius disposats en els diferents costats del cos tampoc li donaria la possibilitat de determinar on està xerricant el veí. Tanmateix, els saltamartins es troben sense cap dificultat els uns als altres, i utilitzen només senyals sonores. Amb aquest fi, s'ajuden de l'estructura especial dels seus òrgans auditius.

Els saltamartins, com altres insectes, tenen els òrgans auditius disposats en les extremitats davanteres, un poc més davall dels *genolls*. Una membrana especial, o membrana del timpà, serveix d'element sensitiu. Tanmateix, a diferència dels mamífers (veges la fig. 3), en el saltamartí l'ona sonora pot actuar sobre la membrana del timpà pels dos costats, perquè la superfície interior també comunica amb l'atmosfera a través d'un orifici estret anomenat estigma (fig. 7). En aquest cas, la desviació de la membrana del timpà serà proporcional a la diferència de les pressions que fa el so pels dos costats; és a dir, a la diferència de les pressions entre els punts A i B de la fig. 7. Com que les dimensions de l'òrgan auditiu del saltamartí (i la distància AB) sempre són petites en comparació amb la longitud d'ona del so, la força resultant que actua sobre la membrana del timpà serà proporcional al gradient de pressió en l'ona sonora que es propaga.

Q30) Explica l'afirmació anterior.

Per tant, l'òrgan auditiu, que és sensible al gradient de pressió, ajuda el saltamartí a determinar la direcció cap a la font de so. Quan la direcció de la propagació del so és perpendicular al pla de les membranes (dels òrgans esquerre i dret), l'amplitud de les vibracions de les dues membranes és màxima; tanmateix, les seues vibracions tenen un desfasament de 180°. En canvi, si la direcció de l'ona sonora és paral·lela al pla de les membranes, aleshores, com és evident, no hi haurà vibracions de les membranes. D'aquesta manera, quan confronta l'amplitud i la fase de les vibracions de les membranes dels dos òrgans auditius, el saltamartí sap el lloc on es troba la font de so.

2.4.6 ... i les granotes...

En l'organisme d'altres animals petits es pot trobar, també, un principi anàleg de localització de la font de so. En la granota, per exemple, l'ona sonora penetra a través de la membrana del timpà d'una oïda, passa per la trompa d'Eustaqui (veges la fig. 3) i actua sobre la superfície interior de la membrana del timpà de l'altra oïda. Així, doncs, l'òrgan auditiu de la granota també és sensible al gradient de pressió. La trompa d'Eustaqui d'una persona és molt estreta i, per regla general, està plena de líquid. Per això, nosaltres som incapaços d'utilitzar aquest mecanisme per a determinar la font de so.

(Física) Gradient de pressió és...

i es mesura en...

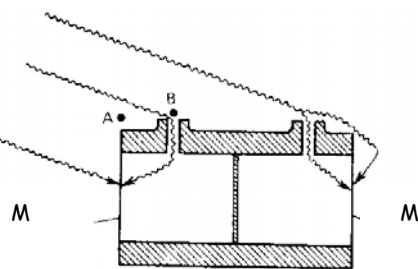


Fig. 7. Tall esquemàtic de l'òrgan auditiu del saltamartí. M és la membrana de l'oïda (esquerre i dreta).

²³ Saltamartí o llagostí o llagosta.

²⁴... 4 a 5 kHz

2.5 Localitzadors animals

La parla humana i l'ecolocalització (o detecció per eco) són dos dels exemples més brillants d'utilització del so en la natura. L'ecolocalització està desenvolupada al màxim entre les rates penades, animals de vida nocturna. L'ecolocalització els substitueix la vista. És interessant saber que els principis d'ecolocalització es van usar en els radars i en els sonars abans d'haver-los descobert en els animals. Tanmateix, l'habilitat amb què els rats penats separen la informació a partir de l'eco dels senyals emesos és fantàstica. Quan analitzen els senyals reflectits, les rates penades no sols són capaces de detectar (de "veure") els objectes que els envolten, sinó també poden determinar la distància fins a aquests, i l'azimut, les dimensions i el caràcter de la superfície reflectant. La majoria de les rates penades són insectívores. L'ecolocalització els permet caçar mosquits que són captats en vol a raó de dos per segon.

2.5.1 Ultrasons

L'oïda humana respon a sons de freqüències entre uns pocs Hz i 20000 Hz. Els senyals emesos per les rates penades es troben totalment fora d'aquest rang i dins l'interval ultrasònic (de 20 a 100 kHz), cosa que explica, precisament, la considerable tardança en el descobriment d'aquest fenomen. La petita longitud d'ona del so produït ofereix la possibilitat de rebre senyals d'eco provinents d'objectes molt diminuts. Per exemple, la rata penada, en foscor total, pot descobrir un fil d'aram de 0.1 mm de diàmetre.

Q31) A quin interval de longitud d'ona (l_o) corresponen les freqüències dels ultrasons que emet una rata penada? (Recorda que la velocitat de propagació de l'ona, la freqüència i la l_o de l'ona estan relacionades per $\lambda = v/f$).

Gràcies al localitzador ultrasònic algunes rates penades poden caçar no solament insectes, sinó també peixos que es troben prop de la superfície de l'aigua. Durant molt de temps resultava incompreensible com ho assolien, ja que la impedància acústica del cos dels peixos quasi no es diferencia de la impedància de l'aigua. Per aquesta causa, aparentment, els peixos no haurien de reflectir els senyals acústics. Tanmateix, no és del tot així, perquè el cos del peix té una veixiga natatòria plena d'aire que, precisament, converteix el peix en "visible" per al localitzador ultrasònic de la rata penada.

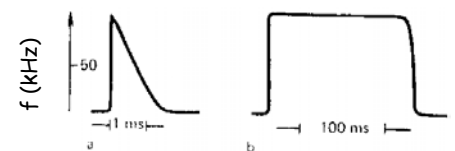


Fig. 8. Variació de la freqüència de les oscil·lacions en dos tipus d'impulsos ultrasònics emesos per les rates penades.

2.5.2 Impulsos ultrasònics dels rats penats

Les rates penades poden emetre impulsos ultrasònics de forma diferent. Dos tipus de rates penats són els més difosos i estudiats. Les del primer tipus utilitzen impulsos ultrasònics en què la freqüència de les vibracions disminueix en el transcurs de l'impuls des de 100 kHz fins a 20 kHz (fig. 8a). La freqüència de la seqüència d'aquests impulsos pot variar de 10 a 200 Hz i la seua durada varia en l'interval de 0.5 a 5 ms.

Q32) Explica per què es parla en el paràgraf anterior de dos intervals de freqüències i d'un interval de temps (100-200 kHz, 10-200 Hz, 0.5-5 ms).

Els representants del segon tipus de rates penades emeten impulsos ultrasònics de més de 100 ms de durada, amb la particularitat de què la freqüència de les vibracions en aquestes és constant durant tot l'impuls (fig. 8b). A més a més, l'exactitud amb la qual es manté la freqüència de les vibracions en tals impulsos és fenomenal, prop de 0.05%. Per què utilitzen les rates penades aquests tipus d'impulsos ultrasònics per a l'ecolocalització?

2.5.3 Ecolocalització per impulsos variables

Com l'experiència quotidiana ens ensenya, la natura mai no fa res debades. Examinem primerament els principis d'ecolocalització utilitzats per les rates penades del primer tipus. Suposem que c és la velocitat del so, i L_1 i L_2 , les distàncies des de la rata penada fins a dos objectes qualsevol que es troben en el camí de propagació de l'ona sonora. És obvi que l'impuls reflectit del primer objecte regressarà a la rata penada en l'interval de temps $2L_1/c$, mentre que el mateix impuls reflectit del segon objecte, més allunyat, retornarà en un temps $2L_2/c$.

Suposem que la freqüència de les vibracions en l'impuls emès per la rata penada fóra constant. Si la durada de l'impuls superara $2(L_2 - L_1)/c$, els impulsos reflectits dels dos objectes, quan se sumaren, donarien com a resultat un impuls ultrasònic de la mateixa freqüència, però de durada un poc major. D'aquesta manera, si s'utilitzaren impulsos consistents en vibracions ultrasòniques de freqüència invariable, l'impuls reflectit portaria informació solament de la distància fins al més pròxim dels dos objectes, si aquests objectes no estigueren separats més que una distància $\approx c\tau/2$, en què τ és la durada de l'impuls. Ja que els lligaments vocals²⁵ del rat penat no li permeten emetre impulsos acústics més curts que 0.5 ms, resulta que dos objectes, separats l'un de l'altre per una distància menor de 10 cm, es percebrien per aquests animals com un sol objecte. És possible que en el cervell de la rata penada es produeixi una imatge tan borrosa del món que l'envolta? No, això no ocorre...

Q33) Explica l'afirmació anterior: ... menor de 10 cm ... com un sol objecte.

La nitidesa de la imatge que observa l'animal augmenta considerablement ja que en el curs de cada impuls la freqüència de les vibracions emeses per les rates penades d'aquest tipus té temps per a disminuir diverses vegades (fig. 8a). Quan aquest impuls, modulad en freqüència, és reflectit per dos objectes diferentment allunyats, retorna al rat penat com un impuls, l'estructura interna del qual es representa en la fig. 9. L'augment bruscat de les vibracions ultrasòniques en l'interval de temps $2|L_1 - L_2|/c$, després de l'arribada del

²⁵ A causa de la seua acció tan ràpida, els músculs dels lligaments vocals de les rates penades ocupen el primer lloc entre tots els tipus de músculs dels animals coneguts.

primer impuls reflectit, permet a la rata penada traure la conclusió que hi ha dos objectes en el camí de propagació de l'ona sonora.²⁶

2.5.4 Ecolocalització per impulsos constants

Analitzarem ara la possibilitat d'utilització dels impulsos del segon tipus amb els mateixos fins (veges la fig. 8b). Si parlem amb propietat, a aquest segon tipus de sons és difícil fins i tot anomenar-los impulsos, ja que la seua durada, de vegades, pot ser major que l'interval que els separa. Aquests impulsos llargs, evidentment, no poden utilitzar-se per a l'ecolocalització, ja que el senyal reflectit retornarà a la rata penada abans que haja finalitzat el senyal emés, circumstància que dificultarà l'anàlisi del senyal reflectit. I, d'altra banda, la freqüència constant de les vibracions ultrasòniques en aquests impulsos no permetrà separar els ecosenyal reflectits de distintes objectes. És possible que hàgem trobat un defecte en la natura? No, solament l'hem suggerit. Hem oblidat que la rata penada fa ús del seu localitzador en vol, mentre es desplaça a una velocitat d'uns quants m/s. Precisament, el moviment de la rata penada posa en funcionament el seu sistema d'ecolocalització basat en impulsos com el representat en la fig. 8b. Però abans hem de parlar de l'efecte, sobre el so que escoltem, del moviment de la font de so.

Q34) A quina velocitat va un cotxe per ciutat, en m/s? Compara-la amb la d'una rata penada, ≈ 5 m/s.

2.5.5 Efecte Doppler

Quan escoltem el so d'un tren apreciem variacions en el to (freqüència) segons s'aproxime o s'allunye. El to del xiulet de la locomotora que s'apropa és molt més alt que quan s'allunya. Aquests canvis en la freqüència de les ones quan hi ha un moviment relatiu del focus emissor (al tren, per exemple) respecte del receptor (l'oïda) s'anomena efecte Doppler. Aquest efecte és comú per a totes les ones i s'explica de la manera següent.

Quan s'aproxima el tren que xiula, la longitud d'ona (λ_0) de les vibracions acústiques que es propaguen per l'aire (i que podria mesurar el llaurador que escolta el xiulet) ha de ser menor que la λ_0 mesurada per una persona que viatja en la cabina del maquinista del tren. Aquesta cosa ocorre perquè el moviment del tren que s'aproxima *escurça* en $T \cdot v$ la longitud d'ona del so que hem sentit, fig. 10 (T és el període de les vibracions acústiques i v la velocitat del tren). El moviment del tren quan s'allunya "allarga" en la mateixa magnitud la longitud d'ona del so escoltat des de fora del tren. Per això, quan estem a l'andana ens sembla que el to del xiulet del tren es fa més baix quan el tren s'allunya a gran velocitat de nosaltres.

Q35) Explica la fig. 10.

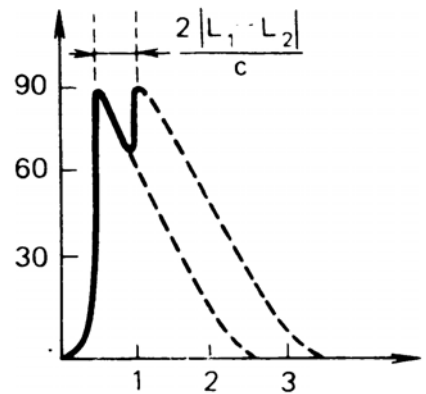


Fig. 9: Variació de la freqüència de les oscil·lacions ultrasòniques en l'impuls reflectit de dos objectes allunyats de la rata penada, a les distàncies L_1 i L_2 respectivament.

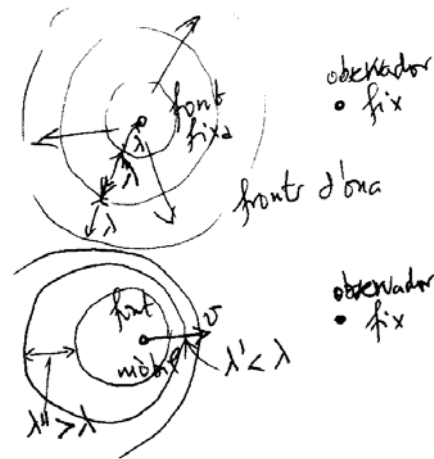


Fig. 10. Esquema per explicar l'efecte Doppler. a) Els fronts d'ona, observats pel maquinista d'un tren. b) Els fronts d'ona, observats per una persona que veu apropar-se (dreta) o allunyar-se (esquerra) el tren.

²⁶ En aquest cas, la durada de l'impuls emés ja no determina la nitidesa de la imatge donada per l'eco, com passa quan s'utilitzen els impulsos que consten de vibracions ultrasòniques de freqüència constant.

Es pot demostrar que la variació de la freqüència de les vibracions acústiques que provoca l'efecte Doppler, Δf , està determinada per l'expressió:

$$\Delta f = f_0 \frac{\frac{v}{c} \cos \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (11)$$

en què f_0 és la freqüència de les vibracions mesurada en el sistema que es mou juntament amb la font; c és la velocitat del so, i θ és l'angle entre la direcció de moviment de la font, v , i la recta que ix de la font del so i acaba en el punt d'observació, fig. 11.

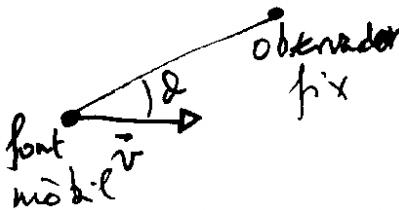


Fig. 11. Variables usades en l'eq. (11).

Q36) Escriu l'expressió anterior per a Δf en els casos següents: $\theta = 0$, $\pi/2$ i π , i explica els resultats que obtingues.

Q37) En quin dels 3 casos anteriors és major la variació de freqüència produïda per l'efecte Doppler?

2.5.6 Efecte Doppler i rates penades

Suposem que la rata penada que es mou a la velocitat v , respecte als objectes que l'envolten, emet vibracions ultrasòniques de freqüència f_0 . En aquest cas, a causa de l'efecte Doppler, la freqüència de les vibracions ultrasòniques incidents sobre els objectes immòbils serà igual a $f_0 + \Delta f$, en què Δf es determina per l'expressió (11). Pel mateix efecte Doppler, l'ultrasó reflectit és percebut, per la rata penada que vola, com a vibracions d'una freqüència incrementada, de nou, en Δf ; per tant, el so reflectit arriba a l'animal a una freqüència $f_0 + 2 \Delta f$. Com que la velocitat del vol de la rata penada és, en mitjana, de prop de 5 m/s, i la freqüència de l'ultrasó que emet és d'uns 80 kHz, resulta que la diferència $2 \Delta f$ entre les freqüències de l'ultrasó emés i rebut després d'haver-se reflectit és menor d'un 3%. Aquesta diferència de freqüències conté informació sobre la posició dels objectes circumdants respecte a la direcció de moviment de la rata penada.

Q38) Comprova el càlcul anterior.

Per a poder valer-se d'aquest mètode d'ecolocalització la rata penada no sols ha d'emetre l'ultrasó de freqüència constant (amb una precisió de centèsimes de tant per cent), sinó que també ha de posseir la capacitat de distingir freqüències que es diferencien les unes de les altres en 0.1%.

D'aquesta manera, l'ecolocalització per l'efecte Doppler per uns tipus de rates penades i per impulsos variables per altres tipus, els permet orientar-se sense haver de recórrer a l'ajuda de la vista.

2.5.7 Altres espècies animals...

Tanmateix, la natura no sols es va preocupar de proveir de localitzadors ultrasònics a les rates penades sinó que també va pensar en les víctimes. Així, per exemple, algunes papallones nocturnes —presa freqüent de les rates penades— tenen l'òrgan auditiu

especialment sensible a aquelles freqüències, precisament, que utilitzen les rates penades per a l'ecolocalització. Altres papallones utilitzen com a protecció senyals ultrasònics: provoquen interferències que dificulten el treball de localització de les rates penades i les espanten.

És conegut que els vampirs que ataquen persones, cavalls i altres animals de granja, poques vegades aconsegueixen el plaer d'assaborir la sang del gos. Aquest fet s'explica perquè els gossos tenen capacitat de sentir l'ultrasó (en aquesta capacitat es basen moltes intervencions dels gossos en el circ) i quan descobreixen el vampir que s'aproxima saben protegir-se.

2.5.8 Ecolocalització i ceguesa

L'ecolocalització utilitzada per les rates penades pot ajudar les persones cegues. Els biofísics assagen dispositius fets en forma d'auriculars que emeten permanentment impulsos ultrasònics i reben els ecosenyals reflectits del objectes circumdants. Un element especial del dispositiu transfereix els ecosenyals rebuts a l'interval de freqüència audible i, després, els transmet als auriculars. Si una persona s'entrena durant un cert temps, pot aprendre amb l'ajuda d'aquest localitzador ultrasònic, fins a cert grau, a "veure" amb els ulls tancats.

2.6 Física (conceptes)

Concepte	Capítols	1r o 2n
Acceleració centrípeta	1r	
Acceleració	1r	
Acceleració de la gravetat	1r	
Adimensional (magnitud)	1r	
Agitació tèrmica	2n	
Amplitud d'oscil·lació d'una ona	2n	
Amplitud d'una ona	2n	
Caiguda lliure (temps de)	1r	
Canvi de fase en la reflexió	2n	
Centre de gravetat	1r	
Centrípeta (acceleració)	1r	
Coefficient de permeabilitat	1r	
Conservació de l'energia (principi)	1r	
Constant de temps (d'un procés)	1r	
Convecció	1r	
Decibel	2n	
Densitat	1r	
Densitat	2n	
Difracció	2n	
Difusió	1r	
Dimensions d'una magnitud	1r	
Eco	2n	
Energia (principi de conservació)	1r	
Energia cinètica	1r	
Energia d'enllaç d'una molècula	1r	
Energia d'una ona	2n	
Energia mecànica	2n	
Energia potencial	1r	
Fase (Canvi en la reflexió)	2n	
Fluctuacions	1r	
Força	1r	
Força de la gravetat (pes)	1r	
Força de reacció	1r	
Força de resistència o fricció	1r	
Força resultant	1r	
Fregament (força)	1r	
Freqüència	1r	
Freqüència d'una ona	2n	
Fricció (força)	1r	
Fricció (Llei de Stokes)	1r	
Gas (pressió parcial)	1r	
Gradient de pressió	2n	
Gravetat (acceleració)	1r	
Intensitat d'una ona	2n	
Longitud d'ona	2n	
Llei de Newton del refredament	1r	
Llei de Stokes del fregament	1r	
Magnitud	1r	
Magnitud (ordre)	1r	
Massa	1r	
Moviment tèrmic aleatori	2n	
Newton (Llei del refredament)	1r	
Número adimensional	1r	
Ones sonores	2n	
Ordre de magnitud	1r	
Parcial (pressió)	1r	
Permeabilitat (coeficient)	1r	
Pes	1r	
Potència	1r	
Pressió	2n	
Pressió (gradient)	2n	
Pressió atmosfèrica	1r	
Pressió parcial d'un gas	1r	
Principi de conservació de l'energia	1r	
Radiació	1r	
Reacció (força)	1r	
Reflexió d'una ona	2n	
Reflexió i canvi de fase	2n	
Refredament (Llei de Newton)	1r	
Resistència (força)	1r	
Resultant (força)	1r	
Sinusoidal (variació)	2n	
So	2n	
Soroll blanc	2n	
Stokes (Llei de fricció)	1r	
Temps (constant de)	1r	
Temps de caiguda lliure	1r	
Tèrmic (moviment d'agitació)	2n	
Transductor	2n	
Transmissió d'una ona	2n	
Treball	1r	
Variació sinusoidal	2n	
Velocitat	1r	
Velocitat de propagació d'una ona	2n	
Velocitat mitjana	2n	