

El Físic visita la Biología

Índex

Capítol 1. Dimensions, massa, moviment i respiració (del gosset a l'elefant)	1
Capítol 2. Acústica (Hola! Em sents?)	21
Capítol 3. La respiració	41
Capítol 4. Mecànica del pols cardíac	61
Capítol 5. Biomecànica (Més resistent que el granit)	85
Capítol 6. Òptica biològica	99
Capítol 7. Bioelectromagnetisme (Electricitat viva)	127

Capítol 1. Dimensions, massa, moviment i respiració (del gosset a l'elefant)

Hi ha un enorme tret...

A.S. Griboiédov, *La desgràcia de tenir massa enginy*

- 1.1 Introducció
- 1.2 Massa del cos i mode de vida
 - 1.2.1 Estímul, resposta i massa: temps de reacció
 - 1.2.2 Freqüència dels passos...
 - 1.2.2.1 ... i treball dels músculs...
 - 1.2.3 Animals semblants
- 1.3 Qui salta més alt i nada més ràpid
 - 1.3.1 Tots salten igual...
 - 1.3.2 El peix gran nada més ràpidament...
- 1.4 Caminar, córrer i rodar
 - 1.4.1 Adults i xiquets de passeig
 - 1.4.2 La roda
- 1.5 Massa i energia
 - 1.5.1 Metabolisme
 - 1.5.2 Consum energètic i massa
 - 1.5.3 Refredament d'un cos (Llei de Newton)
 - 1.5.4 Voracitat dels animals...
 - 1.5.5 Efectes de les medicines:
 - variació temporal de la concentració
- 1.6 La manera de respirar determina la massa de l'animal
 - 1.6.1 Respiració via la superfície del cos
 - 1.6.2 Llei de la difusió
 - 1.6.3 Organismes rudimentaris: anàlisi dimensional

1.1 Introducció

(Física) Magnitud és...

El regne animal és ric i variat. Ens deixa esbalaïts no solament pel nombre d'espècies diferents sinó, també, per les envergadures i les grandàries dels animals. En efecte, en comparar entre si els animals que pertanyen a una mateixa classe, per exemple els mamífers terrestres, resulta que les masses varien des dels 3 g de la musaranya fins a les 3 tones (3×10^6 g) de l'elefant. En el regne dels pardals les diferències són un poc menors, però també impressionants: des del colibrí —pardal mosca—, la massa del qual és d'1 g, fins a l'estruç africà, amb una massa de 100 kg ($= 10^5$ g).

És evident que dimensions i massa del cos guarden una estreta relació amb el mode de vida de l'animal. Quines lleis físiques generals determinen aquesta relació?

(Física) Ordre de magnitud és...

Q1) Quantes ordres de magnitud² hi ha entre la massa dels mamífers? I la dels ocells?³

(Física) Massa és...

i es mesura en...

Q2) Quantes ordres de magnitud hi ha entre la distància de la teua casa a la UA i als antípodes?

Q3) Contesta el full "Lleis d'escala" (cap. 11, Practicing Physics, Hewitt)

1.2 Massa del cos i mode de vida

(Física) Velocitat és...

i es mesura en...

Dades biològiques⁴

Quan observem el comportament de l'elefant en el parc zoològic pareix com si tots els moviments estigueren retardats artificialment, com en una pel·lícula alentida. Tenim una impressió diametralment oposada si observem un ratolí: els seus moviments són ràpids i àgils.

Aquests exemples suggereixen que el ritme de vida i el rellotge biològic depenen de la massa de l'animal. En efecte, l'elefant pot arribar a superar els 70 anys, mentre que el ratolí només en viu 2 o 3. L'embaràs de l'elefanta és de 18 a 22 mesos; en el cas del ratolí, aquest període és de 23 dies.

La velocitat del rellotge biològic és diferent no sols per a les diverses espècies d'animals, sinó que també pot variar en un mateix organisme durant el seu creixement. Els xiquets de pit, per exemple, dormen diverses vegades al dia; els xiquets de 2 a 5 anys ho fan dues vegades, i nosaltres, una sola vegada. Així, quan el xiquet creix, el període de la marxa del seu rellotge biològic augmenta fins a 24 hores.

² Sobre el formatat i l'estructura del text...

Les caixes que apareixen a la dreta del text, tipus "(Física) Magnitud és...", pretenen reforçar el fet que aquest és un llibre de física per a estudiants/tes de biologia i, per tant, hi remarcarem els conceptes físics que es van fent servir per explicar dades biològiques.

³ Les qüestions numerades, Q1, Q2, que s'intercalen al llarg del text pretenen ajudar a fer una lectura pausada i entenedora del text.

⁴ Els paràgrafs que continguin, bàsicament, informació biològica i no física, es marcaran amb una ratlla vertical a l'esquerra i s'escriuran amb lletra més menuda.

Com podem explicar la dependència que hi ha entre el desenvolupament de diferents activitats biològiques o físiques (caminar, alenar, dormir, nadar, etc.) i la massa de l'animal?

1.2.1 Estímul, resposta i massa: temps de reacció

Deduirem ací la relació que enllaça la massa de l'animal i el temps de reacció d'un animal als estímuls externs. És evident que el temps de reacció depèn de les dimensions del cos de l'animal i de la velocitat de propagació de l'excitació pels seus nervis (capítol 7è). La velocitat de propagació de l'impuls nerviós per als diferents mamífers és aproximadament la mateixa, per això el temps de reacció de l'animal ha de ser directament proporcional a les dimensions lineals.

Q4) Explica l'afirmació anterior.

Investigacions diverses han demostrat que la longitud dels animals augmenta amb la massa M del cos de manera directament proporcional a $M^{1/4}$ ($= M^{0.25}$). Per tant, si l'impuls nerviós es propaga a una velocitat constant en tots els mamífers, el temps necessari per a la reacció als estímuls és proporcional a la longitud del cos i, per tant, proporcional a $M^{0.25}$.

$$t_{\text{reacció}} \propto M^{1/4} \quad (1)$$

Q5) Segons aquesta relació, quant de temps més tarda a reaccionar una serp que un ratolí, si els estímulen en l'extrem oposat al cap? Repeteix el càlcul suposant que el temps de reacció és proporcional a la longitud del cos. (Quina relació entre $t_{\text{reacció}}$ i M hi hauria en aquest darrer cas, en lloc de la (1)?)

Q6) Experiment senzill: atrapada d'un bitllet i temps de reacció humana.

S'ha mesurat que la freqüència de les contraccions cardíaques i de la respiració dels diferents mamífers també varia proporcionalment a $1/M^{1/4}$ ($= M^{-0.25}$),

$$\text{freqüència (cardíaca i respiratòria)} \propto M^{-1/4} \quad (2)$$

Fins ara no s'ha aconseguit explicar aquesta relació tan simple.

Q7) Fes una gràfica qualitativa de com varia el temps de resposta d'un animal i el ritme cardíac amb la massa a la vista de les relacions (1) i (2).

1.2.2 Freqüència dels passos...

Per què el ratolí quan corre fa un nombre molt major de passos per minut que l'elefant? Aquestes diferències en els ritmes d'animals grans i petits no sols són característiques dels mamífers. En la taula 1 es representa com varia la freqüència d'aleteig per a ocells de massa diferent. S'hi veu que l'aleteig dels ocells grans és molt menys freqüent que el dels petits.

Dada experimental:

longitud del cos $\propto$

(massa del cos) $^{1/4}$

Dada experimental:

velocitat de propagació de l'impuls nerviós $\approx$ constant

(Física) Temps de caiguda lliure és...

es mesura en...

i es calcula així:

$$t = \sqrt{2h/g} \quad g = 10 \text{ m s}^{-2}$$

(Física) Freqüència és...

i es mesura en...

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

Taula 1. Massa del cos i freqüència d'aleteig dels ocells.

Ocell	Massa del cos (kg)	Freqüència d'aleteig (Hz)
Grifó	8	2
Cornella	0.6	4
Teuladí	0.03	10
Colibrí	0.003	50

Investigacions més minucioses han demostrat que, en disminuir la massa del cos de l'ocell, aquesta freqüència augmenta proporcionalment a $M^{-0.25}$,

$$\text{freqüència del moviment (aleteig, caminar)} \propto M^{-1/4} \quad (3)$$

Q8) Representa en paper mil·limetrat (o, simplement, quadriculat) les dades de la taula 1 i verifica la relació (3), de dues maneres: a) representant directament la freqüència en funció de la massa, b) representant el logaritme de la freqüència en funció del logaritme de la massa.

Q9) Representa en paper log-log (doblement logarítmic) les dades de la taula 1 i verifica la relació (3).

1.2.3 ... i treball dels músculs...

La regla general que assenyalava que els animals grans requereixen més temps que els petits per a fer un moviment del mateix tipus es pot explicar si analitzem el treball fet pel múscul durant la contracció.

Els músculs

L'estructura d'un múscul de l'esquelet es representa en la fig. 1. El múscul consta d'una multitud de cèl·lules musculars (fibres); el seu diàmetre és de 0.01 mm a 0.1

mm; la longitud pot arribar a alguns centímetres. Aquestes fibres inclouen fibril·les musculars fines que tenen un estriat característic, determinat per la periodicitat de l'estructura longitudinal.

La fibril·la consta de segments repetits, anomenats sarcòmers, separats per les línies (discos). La longitud del sarcòmer en el múscul relaxat és d'uns 2.5 μm . Cap als dos costats del disc Z s'estenen filaments molt fins (d'uns 0.005 μm de diàmetre) i en els espais entre aquests entren filaments més grossos (el seu diàmetre és de vora 0.01 μm). La longitud dels filaments grossos (de miosina) és d'uns 1.5 μm , i la dels fins (d'actina) va d'1 a 1.3 μm .

Els filaments fins i grossos estan units entre si per enllaços transversals intermoleculars. Quan el múscul es contrau, per exemple, aquests enllaços s'estructuren de forma que els filaments grossos s'esmunyen entre els fins, introduint-se a major profunditat en els espais entre aquests, de manera que la distància entre els discos Z disminueix.

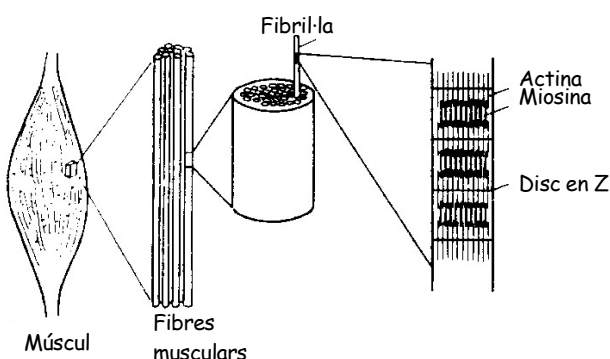


Fig. 1. Estructura d'un múscul de l'esquelet

La força desenvolupada pel múscul depèn de l'àrea de la secció transversal (per això les maromes d'un vaixell són gruixudes) i, per tant, la força màxima depèn del nombre de fibril·les que caben en l'àrea donada. La relació de la força màxima desenvolupada pel múscul a l'àrea de la secció transversal varia entre límits molt petits i, per regla general, va de 40 a 60 N/cm². Durant la contracció del múscul la longitud de cada sarcòmer no pot disminuir més que 1 µm i, per tant, el valor màxim d'escurçament de tot el múscul ha de ser proporcional a la longitud del múscul. Per aquesta raó, el treball fet pel múscul, que és igual al producte de la força pel valor de l'escurçament, ha de ser proporcional al volum (o, el que és equivalent, a la massa) del múscul. De la relació

$$\text{treball (del múscul)} \propto \text{volum} \propto \text{massa (del múscul)} \quad (3')$$

es dedueix que el quocient treball/massa, (que es llegeix: "treball per unitat de massa") és una constant, que anomenarem W ,

$$W = \frac{\text{treball que fa el múscul}}{\text{massa del múscul}} = \text{constant} \quad (4)$$

Q10) Fes una estimació de la força màxima que pot fer el teu braç per unitat d'àrea dels músculs del braç. Compara el resultat amb el valor 40-60 N/cm² que dona el text.

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

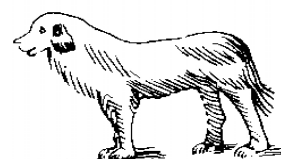
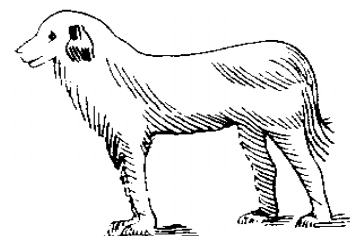


Fig. 2. Animals semblants

1.2.4 Animals semblants

Suposem ara que disposem d'un grup d'animals semblants en tots els aspectes i que es diferenciï els uns dels altres tan sols per la massa (veges la fig. 2). La massa d'un d'aquests animals és M i la massa del múscul, la contracció del qual fa moure el cos, és CM , en què C és una constant sense dimensions per a tot aquest grup d'animals (òbviamment, $C < 1$). Si, segons l'eq. (4), una unitat de massa del múscul és capaç de fer el treball W , resulta que el treball fet per tot el múscul és igual a WCM . Suposem que aquest treball s'inverteix a comunicar la velocitat v a la part del cos⁵ que té la massa C_1M , en què C_1 és una altra constant adimensional per al mateix grup d'animals. Per a donar la velocitat v a la massa C_1M és necessari consumir l'energia $\frac{1}{2} C_1Mv^2$ (perquè aquesta és l'energia cinètica que té la massa C_1M movent-se a la velocitat v). Si igulem aquesta energia a la feta pel múscul, n'obtenim

$$\frac{1}{2} C_1Mv^2 = WCM$$

per tant

$$v = \sqrt{\frac{2WC}{C_1}} \quad (5)$$

Q11) Comprova que les dimensions de l'eq. (5) són correctes.

(Física) Dimensions d'una magnitud són...

(Física) Números adimensionals són: π , e , 1, 345, $-\ln 2$, etc.

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

⁵ Pensem en una vaca que remena la cua, o en un mico que mou només les extremitats, o en una gasela que corre, etc.

De l'expressió (4) es dedueix que els animals semblants poden accelerar les parts corresponents del cos fins a arribar a velocitats iguals, independentment de les masses respectives.

Apliquem ara aquesta conclusió als peus de l'animal: animals anàlegs poden accelerar les extremitats fins a arribar a velocitats iguals i, per consegüent, córrer amb la mateixa velocitat, independentment de la grandària de cada animal.

Tanmateix, la longitud del pas de cada individu pertanyent a aquest grup d'animals semblants és proporcional a les dimensions lineals de l'individu; és a dir, a $M^{1/3}$.

Q12) Explica l'afirmació anterior.⁶

Per això, la freqüència dels passos d'animals semblants que es mouen a la mateixa velocitat ha de ser directament proporcional a $M^{-1/3}$,

$$\text{freqüència del moviment (aleteig, caminar)} \propto M^{-1/3} \quad (6)$$

Q13) Explica l'afirmació anterior.⁷ Fixa't que el temps que tarda un animal a fer un pas és directament proporcional a la longitud del pas i inversament proporcional a la velocitat que duu.

Per tant, no hem obtingut exactament la relació freqüència $\propto M^{-1/4}$ que havíem anunciat al principi del capítol, sinó freqüència $\propto M^{-1/3}$, però l'hem explicada qualitativament.⁸

Evidentment, aquestes avaluacions quantitatives no poden aplicar-se estrictament a l'anàlisi comparativa dels moviments de, per exemple, un ratolí i un elefant, si més no perquè les formes dels seus cossos disten molt de ser semblants. Tanmateix, els raonaments anteriors permeten explicar qualitativament la relació entre la massa i el mode de vida de l'animal.

En resum, hem explicat la relació freqüència $\propto M^{-1/4}$ fent servir el treball que fan els músculs en comunicar una energia de moviment a l'animal, i en veure que la velocitat de moviment és constant per a tots els animals semblants. Per tant, la freqüència del moviment és proporcional a la velocitat del moviment dividida per les dimensions del pas, i el quocient resulta proporcional a $M^{-1/3}$.

⁶ Solució: el pas és proporcional a la longitud de l'animal, i la longitud és proporcional a l'arrel cúbica del volum i, per tant, a l'arrel cúbica de la massa.

⁷ Solució: el temps entre passos és el quocient de la longitud dels passos per la velocitat. La longitud va com l'arrel cúbica de la massa, i la velocitat és independent de la massa, segons l'eq. (32). La freqüència és la inversa del temps entre passos.

⁸ La discrepància entre la teoria, eq. (6) i el resultat experimental, eq. (3), es deu, en general, al fet que els animals grans no són exactament semblants als petits, i les seues grandàries augmenten de manera directament proporcional a $M^{1/4}$ i no a $M^{1/3}$.

1.3 Qui salta més alt i nada més ràpid

Farem ara anàlisis similars per veure de què depèn la capacitat de saltar i de nadar d'animals semblants.

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

1.3.1 Tots salten igual...

El saltamartí, que mesura poc més d'1 cm, salta a la mateixa altura que la llagosta, que té unes dimensions cinc vegades majors. El cangur ratolí (hypsiprimno), animal de grandària semblant a la d'un conill, pot saltar a la mateixa altura que el conegut cangur. Per què animals de forma anàloga salten a la mateixa altura sense importar-ne les grandàries?

(Física) El principi de conservació d'energia diu...

La resposta a aquesta pregunta podem obtenir-la si recorrem una altra vegada a l'expressió (5), la velocitat que provoca en un animal el treball que fan els músculs. Recordem que en aquesta expressió no apareix la massa de l'animal.

Sabem que l'altura màxima a la qual munta un cos llançat verticalment, en contra de l'acció de la gravetat, és

$$h_{\max} = \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

en què $g = 10 \text{ m/s}^2$ és l'acceleració de la gravetat.

Q14) Demuestra l'afirmació anterior aplicant el principi de conservació d'energia...

Q15) Per què diu altura màxima en l'eq. (7)?

Q16) Per què representem l'altura amb la lletra h?

(Física) Acceleració de la gravetat: és l'acceleració que adquiririen tots els cossos en caiguda lliure (si no hi hagués fregament per l'aire).

Si substituïm en la fórmula (5) $C_1 = 1$ (i així considerem tota la massa M de l'animal que es mou a la velocitat v), obtenim que els animals anàlegs són capaços d'accelerar els seus cossos fins a velocitats iguals i, per tant, saltar a la mateixa altura,

$$h_{\max} = \frac{WC}{g} \quad (8)$$

Aquesta altura depèn del treball que fan els músculs per unitat de massa del cos, W , i de la massa de múscul que tenen per unitat de massa del cos, C . Per a animals semblants, aquestes dues magnituds tenen valors pareguts i, per això, l'expressió anterior ens diu que els dos salten a la mateixa altura.

(Física) Força de resistència o de fricció és...
i es mesura en...

(Física) Llei de Stokes del fregament...

1.3.2 El peix gran nada més ràpidament...

Un refrany rus diu: "Està el lluç en el riu perquè el carpí daurat mai s'adorma. Està clar que el lluç sempre "es farà" amb el carpí daurat si aquest no pot amagar-se a temps en algun lloc. Igual passarà amb qualsevol altre peix més petit. Per quina raó pot nadar a més velocitat un peix gran que un de petit?

Suposem que un peix es desplaça una distància Δx durant un temps Δt ; és a dir, es mou a la velocitat

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (9)$$

Per respondre aquesta pregunta, a més del treball de les aletes del peix, hem de tenir en compte la resistència que oposa l'aigua al moviment. La força de resistència que venç un peix quan es mou per l'aigua, per a una determinada forma del cos, és proporcional a l'àrea de la secció transversal del peix, S , i al quadrat de velocitat a què es mou, v^2 ,

$$\text{força}_{\text{fricció}} = k_1 S v^2 \quad (10)$$

en què k_1 és un coeficient constant. Aquesta expressió de la força de fregament s'anomena llei de Stokes.

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

Q16') Comprova que l'expressió anterior de la força és raonable: pensa (o, millor, fes l'experiment) en la teua mà que recorre una banyera plena d'aigua: mou la mà ràpidament i lentament, i mou-la de cantell i perpendicular al pla de la mà. Explica allò que observes, pel que fa a la dificultat relativa de cada moviment.

La potència P que inverteix el peix durant el moviment es calcula a partir del treball que fa per vèncer la força de fregament (o de resistència, o de fricció); aquest treball és el producte de la força pel desplaçament, Δx ,

$$\text{treball} = \text{força} \times \Delta x \quad (11)$$

La potència P desenvolupada per aquesta força que actua durant el temps Δt és el treball fet per unitat de temps,

$$P = \text{potència} = \text{treball} / \Delta t$$

Si juntem les expressions (9-11), obtenim que

$$P = k_1 S v^2 v \quad (12)$$

D'altra banda, com s'ha demostrat en l'eq. (3'), el treball o la potència màxima desenvolupada per cada múscul de l'animal ha de ser proporcional al volum del múscul. És obvi que aquesta conclusió és vàlida per a tots els músculs de l'organisme, i escriurem

$$P = k_2 V \quad (13)$$

en què V és el volum del cos del peix, i k_2 una constant. Si igulem les expressions (12) i (13) (potència generada pels músculs = potència consumida en vèncer el fregament), obtenim

$$v = C \sqrt[3]{\frac{V}{S}} \quad (14)$$

en què el coeficient $C = (k_2/k_1)^{1/3}$ no depèn de la grandària del peix. Suposem que v_1, v_2, V_1, V_2, S_1 i S_2 són velocitats, volums i àrees de la secció transversal d'un peix gran i d'un peix petit, respectivament. L'expressió (14) permet escriure

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[3]{\frac{V_1 S_2}{V_2 S_1}} \quad (15)$$

Si considerem semblants les formes del peix gran i del peix petit, i les longituds respectives iguals a L_1 i L_2 , podem afirmar que

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{L_1^3}{L_2^3} \quad \frac{S_1}{S_2} = \frac{L_1^2}{L_2^2} \quad (16)$$

Per consegüent, l'expressió (15) es pot escriure

$$\frac{v_1}{v_2} = \sqrt[3]{\frac{L_1}{L_2}} \quad (17)$$

És a dir, com major siga la longitud (o grandària) d'un peix, a major velocitat podrà nadar. Si tenim en compte que la longitud del cos del lluç és d'1 m, aproximadament, i la del carpi daurat de 0.1 m, les possibilitats de caure el carpi daurat en la gola del lluç, com diu el refrany rus, són ben grans.

Q17) Calcula quantes vegades té més energia cinètica un lluç que un carpi daurat si naden a la mateixa velocitat (i, per tant, el lluç no nada a la velocitat màxima).

Q18) Calcula quantes vegades consumeix més energia un lluç que un peix daurat, en recórrer 100 m en una persecució a mort. Repeteix el càlcul, per unitat de massa del peix.

1.4 Caminar, córrer i rodar

1.4.1 Adults i xiquets de passeig

Quan no tenim pressa, anem a peu. Però si veiem que fem tard, correm. Mentre caminem, almenys un peu està sempre, obligatòriament, en contacte amb el terra. A diferència del procés de caminar, durant una carrera hi ha intervals curts de temps en els quals la persona no està en contacte amb el terra. Per aquesta causa, aquest mode de desplaçar-se representa una successió de salts.

La velocitat màxima a la qual pot caminar una persona adulta és de prop de 2.5 m/s. La carrera permet accelerar considerablement la velocitat de desplaçament, i en un esportista pot arribar a 10 m/s.

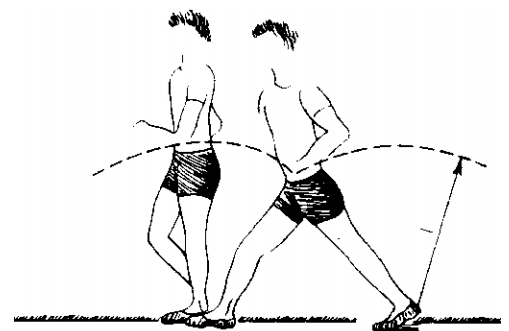


Fig. 3. El canvi en la posició del centre de gravetat al caminar es mostra amb una línia de traços.

Taula 2. Eficàcia del moviment de diferents animals i mitjans de transport
 A) Espècie de l'animal o tipus de mitjà de transport B) Eficàcia del moviment
 A) Espècie d'animal B) Eficàcia o mitjà de transport del moviment
 (10^{-2} kg m/J)

Persona amb bicicleta 160

Salmó 60

Persona en una cadira de rodes 42

Cavall 40

Persona a peu 32

Automòbil 30

Colom 25

Ovella 24

Gos 16

Avió a propulsió 16

Helicòpter 7

Colibrí 6

Conill 5

Abella 2

Ratolí 0.6

Un quadre molt comú és el dels pares que, quan tenen pressa, estiren de la mà dels xiquets, i aquests, com que no poden seguir el ritme, es veuen obligats a córrer. Per quina raó han de córrer els xiquets per a assolir la mateixa velocitat que els adults que caminen?

Examinem com canvia la posició del centre de gravetat d'una persona que camina, fig. 3. El centre de gravetat ocupa la posició més baixa quan els dos peus es troben en contacte amb el terra. La posició més alta del centre de gravetat correspon al moment en què la cama que està en contacte amb el terra es troba en posició vertical. D'aquesta manera, quan caminem, el centre de gravetat, disposat en la part inferior del cos, un poc per avall del melic, es mou per l'arc d'una circumferència el radi de la qual pot considerar-se igual a la longitud de la cama.

Sabem que un cos que es mou a la velocitat v per una circumferència de radi l té una acceleració dirigida al centre d'aquesta circumferència i igual a v^2/l . Sobre la persona que camina actuen dues forces: la gravetat (allò que anomenem pes) i la reacció de suport que fa la Terra. La resultant d'aquestes dues forces és la força centrípeta.

Q19) Fes un esquema de les dues forces esmentades i de la força resultant.

(Física) Centre de gravetat és...
i es mesura en...

Evidentment, el valor de la força resultant no pot superar el valor de la força de la gravetat (perquè és la resta de dues forces). Per això, en caminar, ha d'observar-se la desigualtat $mv^2/l < mg$, en què m és la massa de la persona que camina; és a dir, que

$$v < \sqrt{gl} \quad (18)$$

Com que la cama d'una persona adulta mesura prop de 0.9 m, l'expressió (18) dóna una velocitat màxima del moviment de 3 m/s, cosa que concorda amb el valor esmentat abans.

(Física) Acceleració centrípeta és...
i es mesura en ...

(Física) Pes és ...
i es mesura en...

Q20) Quina relació hi ha entre les velocitats màximes del caminar d'una persona adulta i d'un/a xiquet/a?

Els xiquets tenen les cames més curtes que els adults i, per tant, la velocitat màxima del seu caminar és menor. Per això, per a no retardar-se quan passen amb els adults, els xiquets amb freqüència han de córrer (és interessant fer notar que també entre els animals quadrúpedes es pot deduir una relació com la (18) entre la velocitat màxima del caminar i la longitud de les extremitats).

1.4.2 La roda

Moltes de les coses que ha inventat la humanitat es troben en la natura (vol en l'aire, natació subaquàtica, vol a reacció, paracaigudes, etc.). Aleshores, per què no trobem la roda en la natura? Per què els cavalls galopen en lloc de lliscar en patins de rodes? Per què no hi ha peixos amb hèlices en lloc d'aletes?

Els sistemes rotatoris presenten dos avantatges principals: 1) permeten substituir el fregament de lliscada pel de rodament, que normalment és menor; 2) l'energia cinètica no fluctua en el moviment, s'hi manté constant.

Q21) Compara les forces de fricció amb el terra que actuen sobre un cotxe parat, sobre un que té les rodes bloquejades i que empentem, sobre un que circula, i sobre un que derrapa.

Si avaluem l'eficàcia d'un mitjà de transport com la relació entre la massa que té i l'energia invertida per a recórrer una unitat de distància (quocient de la massa moguda a l'energia que es gasta per unitat de camí recorregut), resulta que per a un/a ciclista l'eficàcia del moviment és d'uns 1.6 kg m/J. Per a una persona caminant, l'eficàcia és de 0.32 kg m/J. Fins i tot, una persona que té els cos paralitzat i que es mou en una cadira de rodes té major eficàcia de moviment (0.42 kg m/J) que la que passeja a peu.

Q22) Avaluu l'eficàcia d'una persona caminant (pensa, per exemple, en l'energia que es necessita per passar del repòs a la velocitat v), i compara el resultat amb el de la taula 2.

De les dades de la taula 2 per a anar amb bicicleta, cadira de rodes, automòbil i avió, es dedueix que l'eficàcia del moviment, definida de la manera anterior, disminueix amb l'augment de la massa del mitjà de transport (per altra banda, l'eficàcia per a la natació, que no es mostra en la taula 2, és més alta que per al vol). Si comparem els vehicles amb rodes amb les persones que caminen o amb el cavall, ens podem preguntar: per quina raó no utilitzen rodes els animals? La causa és la impossibilitat de tenir una roda viva, que necessita una afluència constant de sang des de fora.⁹

I per què no utilitzen els animals per al seu desplaçament rodes o hèlices fetes de materials biològics que no requereixen una afluència constant de substàncies nutritives, per exemple, l'os? Aquesta difícil qüestió no la contestarem ací. Però, així i tot, es podria moure el llop pel bosc amb major rapidesa en patins de rodes?

Evidentment, no. Els avantatges relacionats amb el desplaçament sobre rodes desapareixen immediatament quan abandonem l'asfalt i passem a un terreny sense camins petjats. La raó és que, en primer lloc, el fregament de rodament comença a créixer (per exemple, per a la sorra aquest fregament és 10 vegades major que per al formigó) i, en segon lloc, els sortints que apareixen al llarg del camí posen limitacions a les dimensions mínimes de la roda, perquè l'altura màxima de l'obstacle no ha de superar la meitat del radi de la roda.

(Física) Fregament o fricció és...

i es mesura en...

i n'hi ha de tres tipus: fricció estàtica, dinàmica i de rodadura..

(Física) Fluctuacions d'una magnitud són...

⁹ Tanmateix, hi ha excepcions, com ara els flagells giratoris dels bacteris, que són filaments proteics, de 0.2 µm de diàmetre, que no necessiten l'abastiment d'oxigen ni de substàncies nutritives.

Q23) Explica l'afirmació anterior.

El que hem exposat permet comprendre la raó per la qual els animals no tenen rodes —simplement, no les necessiten!

1.5 Massa i energia

Tots hem vist alguna vegada un hàmbster, i amb quina voracitat menja. Durant un dia, aquest petit rosegador pot menjar una quantitat d'aliments igual al seu pes, mentre que la ració diària de l'elefant constitueix tan sols 1/10 de la seua massa, encara que la component calòrica dels aliments de l'elefant quasi no es diferencia de la del rosegador, ja que els dos mengen exclusivament vegetals. Aleshores, de què depèn la quantitat d'aliments que necessita un animal per mantenir l'activitat vital normal?

1.5.1 Metabolisme

(Física) L'energia d'enllaç
d'una molècula és...
i es mesura en...

Les reserves d'energia que obtenim amb els productes alimentaris s'emmagatzemen en forma d'energia dels enllaços químics de les molècules. Els processos amb l'ajut dels quals alliberem aquesta energia s'anomenen metabolisme, i la velocitat amb la qual lliurem l'energia es denomina intensitat del metabolisme. El metabolisme pot ser aeròbic, és a dir, desenvolupar-se únicament amb un subministrament ininterromput d'oxigen a l'organisme; per contra, el metabolisme anaeròbic no necessita la presència d'oxigen. El metabolisme aeròbic, en comparació amb l'anaeròbic, proporciona a l'organisme major quantitat d'energia a partir de la mateixa quantitat d'aliments i subministra la major part de les nostres despeses energètiques. Quan un animal canvia de l'estat de repòs al de moviment, augmenta la necessitat d'oxigen. Els animals de sang calenta consumeixen més oxigen que els animals de sang freda perquè els primers, en trobar-se en un medi ambient relativament fred, perden sense interrupció la calor del cos per convecció i radiació.

Investigacions realitzades amb els animals de sang calenta (mamífers i pardals) han demostrat que hi ha una relació entre la massa M d'aquests animals i el consum Q d'oxigen que fan en una unitat de temps:

$$Q \propto M^{3/4} \quad (19)$$

Per tant, el consum d'oxigen per unitat de massa del cos i per unitat de temps, q , té aquesta dependència en M ,

$$q = \frac{Q}{M} \propto M^{-1/4} \quad (20)$$

Per a una persona, q va de 0.06 a 0.6 mm³ O₂/(g s).

Q23') Quants grams d'oxigen consumeixes en una hora? I quants mols d'aire?

(Física) Convecció és...

(Física) Radiació és...

1.5.2 Consum energètic i massa

Tractem ara d'explicar la dependència (20) que hi ha entre el consum d'oxigen i la massa de un animal. La temperatura en els animals de sang calenta es manté constant a costa de l'alliberament de calor en els processos del metabolisme. El consum per l'organisme d'1 cm³ d'oxigen ve acompanyat del desprendiment de 20 J d'energia tèrmica, amb la particularitat que la quantitat de calor lliurat no depèn del tipus d'aliments. Si suposem que l'animal té forma d'esfera¹⁰ de radi R, la quantitat de calor lliurat a l'organisme com a resultat dels processos metabòlics serà, per unitat de temps,

$$20 \rho \frac{4}{3} \pi R^3 q \quad (\text{en joules}) \quad (21)$$

en què ρ és la densitat de l'animal.

Q24) Comprova que l'expressió anterior té les dimensions correctes.

$1 \text{ cm}^3 \text{ O}_2 \rightarrow 20 \text{ J}$

(Física) Densitat és...

i es mesura en...

(Física) Llei de Newton del refredament...

1.5.3 Refredament d'un cos (Llei de Newton)

Com que la temperatura del cos es manté constant, la quantitat d'energia tèrmica que produeixen els processos metabòlics en l'organisme ha de ser igual a la quantitat de calor transferida des de l'animal cap al medi ambient. La quantitat de calor J que passa en una unitat de temps des del cos més calent cap al més fred, quan aquests entren en contacte (com ara el cos humà i l'ambient) és directament proporcional a l'àrea de contacte S, a la diferència de temperatures ΔT_x i a la conductibilitat tèrmica del medi que els uneix, κ , i és inversament proporcional al gruix de la capa d'aquest medi, Δx , de manera que:

$$J = S \kappa \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (22)$$

Aquesta expressió s'anomena Llei de Newton del refredament.

Q25) Explica què significa l'expressió anterior quan poses, per exemple, un peix en l'aigua.

Q26) Quines dimensions té la conductibilitat tèrmica, a la vista de l'eq. (22)?

Q26') Un amic, professor d'institut, diu que una classe de 40 alumnes és com una estufa d'1 kW. Quanta potència i quanta energia emets tu en una hora?

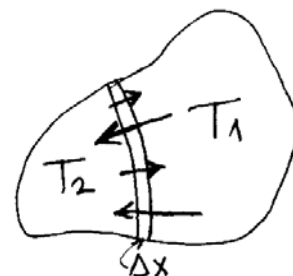


Fig. 4. El cos que està a major temperatura, T_1 , cedeix energia en forma de calor al cos que està més fred, a temperatura T_2 , a través de la paret de gruix Δx .

¹⁰ Biòloga/biòleg, no et rigues i llig el pròleg del llibre El cavall esfèric, citat en la bibliografia. És més fàcil calcular el volum d'una esfera que el d'una persona o animal real. I el resultat que obtindrem és qualitativament suficient.

Es pot considerar que, en canviar la grandària de l'animal esfèric, les magnituds κ i $\Delta T/\Delta x$ resten constants. En aquest cas $J = 4\pi R^2 k$, en què $k = \kappa \Delta T/\Delta x$ és una constant. Si iguaem la quantitat de calor que es lliura en l'organisme durant els processos metabòlics a la calor que perd el cos a través de la superfície, eq. (21) i eq. (22), obtenim:

$$\rho \frac{80}{3} \pi R^3 q = 4\pi R^2 k$$

d'on resulta que

$$q = \frac{3k}{20} \frac{1}{R\rho} \quad (23)$$

Com que la massa de l'animal és

$$M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3 \quad (24)$$

eliminem R de la eq. (23) i obtenim, finalment, que el consum d'oxigen per unitat de massa i de temps és

$$q = \frac{3k}{20} \left(\frac{4\pi}{3\rho^2} \right)^{1/3} M^{-1/3} \propto M^{-1/3} \quad (25)$$

D'aquesta manera, l'anàlisi del balanç de l'energia tèrmica produïda i eliminada en animals semblants duu a la conclusió que la quantitat d'oxigen consumida per una unitat de temps i de massa d'aquests animals ha de disminuir en forma inversament proporcional a la massa elevada a $1/3$. Així expliquem qualitativament el fet experimental esmentat en l'apartat sobre el metabolisme.

La discrepància entre la teoria, eq. (25), i el resultat experimental (20), es deu, en general, al fet que els animals grans no són semblants als petits i les seues grandàries augmenten de manera directament proporcional a $M^{1/4}$ i no a $M^{1/3}$ (Veges la nota¹¹ a peu de pàgina).

1.5.4 Voracitat dels animals...

Després d'haver donat la interpretació de la relació (20), podem interpretar la voracitat del hámster i altres animals de la manera següent. Com que $q \propto M^{-1/4}$, una unitat de massa del hámster requereix molt més oxigen que la mateixa unitat de massa de l'elefant. Com que tot l'oxigen que consumeix l'animal és per a l'oxidació de les substàncies nutritives, la quantitat d'aliments necessària per al hámster, si comptem respecte a la unitat de massa del cos, ha de ser molt major que la magnitud corresponent per a l'elefant.

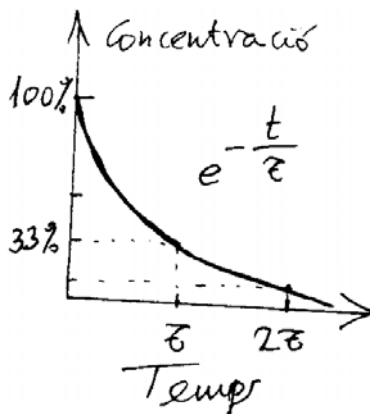


Fig. 5. Variació de la concentració del medicament en la sang després d'administrarlo.

¹¹ Volum i massa són proporcionals, si la densitat és constant, i com podem dir que volum V i dimensions L (grandària) estan relacionats per $V \propto L^3$, per això $L \propto V^{1/3}$.

1.5.5 Efectes de les medicines: variació temporal de la concentració

La discussió anterior sobre el metabolisme, podem aprofitar-la per a un altre exemple. Tots sabem que, per a tenir efecte i curar-nos, les medicines s'han de prendre diverses vegades al dia. Així es manté la concentració constant en la sang, perquè la medicina es destrueix en l'organisme. En la fig. 5 es representa com varia la concentració dels preparats medicinals en la sang d'una persona o d'un animal, després d'administrar-los una sola vegada.

La disminució de la concentració del medicament es pot aproximar per una exponencial, d'exponent negatiu, i que conté el temps dividit per una constant de temps, τ_{destr} , constant que també té dimensió de temps

$$\text{Concentració} \propto e^{-\frac{t}{\tau_{\text{destr}}}} \quad (26)$$

La constant de temps de destrucció del medicament en l'organisme, τ_{destr} , determina la velocitat de disminució de la concentració després d'administrar-lo una sola vegada. Evidentment, la velocitat de destrucció del medicament en l'organisme ha de ser proporcional a la intensitat dels processos metabòlics. Per això¹², es pot suposar que aquesta constant biològica ha de ser proporcional a $M^{0.25}$, eq. (20). Aquesta dependència, $\tau_{\text{destr}} \propto M^{1/4}$, s'ha descobert, efectivament, en investigacions realitzades amb animals que tenen masses milions de vegades diferents.

(Física) La constant de temps d'un procés exponencial és...
i es mesura en...

Anècdota (tràgica)

Podem esmentar un cas tràgic ocorregut pel desconeixement de la dependència entre τ_{destr} i M . Des del punt de vista científic el preparat al·lucinogen LSD, dietilamida de l'àcid lisèrgic, és molt interessant per als psiquiatres i neurofisiòlegs, ja que provoca visions peculiars en persones normals. Alguns investigadors van decidir estudiar la reacció de l'elefant a aquest preparat i van agafar la quantitat de LSD que provoca ràbia en els gats, van multiplicar aquesta quantitat per les vegades que és major la massa de l'elefant que la del gat i van considerar que la dosi del preparat administrat hauria de ser directament proporcional a la massa de l'animal. L'administració d'aquesta dosi de LSD a un elefant li va causar la mort en 5 minuts. La conclusió que van trobar els autors fou que els elefants tenen una sensibilitat gran al preparat en qüestió, quan realment ells van cometre un "error d'elefant".

Q27) Si la dependència fóra $\tau_{\text{destr}} \propto M$, l'elefant de la història hauria viscut més o menys temps?

¹² Com que el consum per unitat de temps és $q \propto M^{-1/4}$, el temps que tarda a consumir-se és $1/q \propto M^{1/4}$.

1.6 La manera de respirar determina la massa de l'animal

(Física) El procés de difusió és...

Fins ara hem examinat la massa del cos com una variable independent, i hem considerat que aquesta determina la freqüència dels ritmes biològics, el mode de vida, la velocitat de reacció de l'animal i la intensitat del metabolisme. És cert aquest plantejament? Sí, és cert si la quantitat d'oxigen que entra a l'organisme és suficient per a satisfer totes les necessitats. Tots els mamífers tenen un *dispositiu*, únic en el seu gènere, que succiona l'aire des del medi ambient: els pulmons. En l'organisme d'una persona, la superfície dels pulmons en què té lloc l'intercanvi dels gasos entre la sang i l'aire (l'oxigen passa de l'aire a la sang i el biòxid de carboni passa de la sang a l'aire) és de 80 a 90 m². Aquest valor supera gairebé en 100 vegades la superfície del cos. Per això, la difusió de l'oxigen per la superfície dels pulmons, cap a la sang, és més que suficient per a cobrir les necessitats de l'organisme.

Q28) Fes una estimació de la superfície del teu cos.

1.6.1 Respiració via la superfície del cos

Amb tot, no tots els animals tenen, ni de ben lluny, òrgans respiratoris especials. Així, per exemple, els cucs no tenen òrgans de respiració i utilitzen l'oxigen que es difon de l'aire a l'organisme de l'animal a través de tota la superfície del cos. Quines són les restriccions que imposa la grandària de l'animal a aquest mode d'entrada d'oxigen en l'organisme?

Els cucs tenen un sistema sanguini. La sang circula per tot el cos i s'utilitza per a recol·lectar oxigen de la superfície del cuc, a través de la qual penetra des de l'atmosfera, i fer-lo arribar a tots els altres teixits. Quina és la grandària màxima d'un cuc?

Suposem (de nou, per a simplificar els càlculs) que el cuc té forma de cilindre de radi r i avaluem la quantitat d'oxigen que entra en el segment del cuc de longitud l . Si, com abans, q és la quantitat d'oxigen consumida per una unitat de massa del cuc i per unitat de temps, aleshores la necessitat d'oxigen, per segon, Z , d'aquest segment del cuc és:

$$Z = \pi r^2 l \rho q \quad (27)$$

(Física) Pressió parcial és...
i es mesura en...

Q29) Comprova que les dimensions de l'equació anterior són correctes.

1.6.2 Llei de la difusió

El procés de difusió de l'oxigen, des de l'atmosfera cap a l'interior del cuc, està subjecte a la llei de la difusió. Aquesta llei assenyalava que el volum de gas, Y , que es difon d'un medi a l'altre en la unitat de temps a través de la superfície A , és proporcional a l'àrea d'aquesta superfície, al coeficient de permeabilitat B per a aquest gas i a $\Delta P/\Delta h$, en què ΔP és la diferència de pressions parcials del gas en els dos medis i Δh és el gruix de la regió que separa els medis:

$$Y = AB \frac{\Delta P}{\Delta h} \quad (28)$$

Q30) Quines dimensions té el coeficient de permeabilitat?

Ja que $A = 2\pi r l$, en igualar (27) i (28), obtenim

$$r = \frac{2B \Delta P}{\rho q \Delta h} \quad (29)$$

Avaluem el radi màxim del cos del cuc per a $q = 0.017 \text{ mm}^3/(\text{g s})$. Si no tenim en compte el fet que el cuc està cobert per una capa fina de cutícula, llavors B és el coeficient de permeabilitat del teixit viu per a l'oxigen, $B \approx 2.2 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/(\text{Pa s})$. En l'atmosfera, la pressió parcial de l'oxigen és aproximadament d'un 20%, i la pressió atmosfèrica és d'uns 10^5 Pa . Evidentment, el valor màxim de ΔP per al cuc que es troba en l'atmosfera no pot ser major que $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ (suposant que el cuc no conté gens d'oxigen), i el valor mínim de Δh ha de ser pròxim al gruix d'una cèl·lula, és a dir, aproximadament 0.05 mm . En aquest cas, si suposem que $\rho = 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ (una densitat semblant a la del cos humà i a la de l'aigua), tenim, per al radi màxim del cos del cuc, $r_{\text{màx}} = 10 \text{ mm}$.

Q31) Comprova els càlculs anteriors: opera també amb les unitats de les magnituds.

Q32) Explica l'afirmació anterior sobre $\Delta P_{\text{màx}}$ i el valor pres per a ρ .

Així, doncs, podem esperar que el diàmetre del cos dels cucs arribi als 2 cm. En efecte, cucs d'aquesta grandària s'han descobert en les zones tropicals d'Amèrica del Sud. La massa d'aquests cucs pot arribar, fins i tot, a 1 kg.

Q33) Quina longitud tenen els cucs sudamericans que s'acaben d'esmentar?

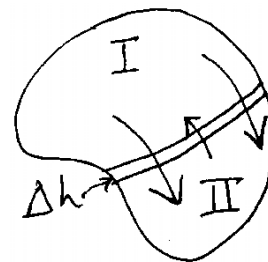


Fig. 6: Un gas es difon, a través de la paret de gruix Δh , de la regió I, on té major pressió parcial, a la regió II, on la pressió parcial d'aquest gas és menor.

(Física) Pressió atmosfèrica és ...
i es mesura en ...

Organismes sense sistema sanguini ni òrgans respiratoris

Però en la natura hi ha éssers més primitius encara que els cucs, com ara la majoria dels organismes que viuen en medi aquós. Aquests organismes estan mancats no sols d'òrgans respiratoris, sinó també de sistema sanguini. En aquest cas, l'organisme només pot assolir grandàries considerables si té forma filiforme aplanada.

(Física) Utilitat de l'anàlisi dimensional per a...

1.6.3 Organismes rudimentaris: anàlisi dimensional

Utilitzem els mètodes de l'anàlisi dimensional i veiem com depèn de q el gruix d d'aquests éssers que no tenen sistema sanguini ni òrgans respiratoris. De què pot dependre el gruix d'éssers semblants? Es pot imaginar que com major siga la pressió parcial de l'oxigen P_o en el medi ambient i la permeabilitat B per a l'oxigen del teixit viu, major gruix pot tenir l'espècie analitzada (els organismes rudimentaris). El segon factor de què dependrà d està representat per la magnitud ρq , que determina quina quantitat d'oxigen necessita l'animal per centímetre cúbic de teixit i per unitat de temps. Com major és ρq , més prim ha de ser el cos de l'organisme. Així, podem escriure l'equació següent

$$d \propto \frac{P_o^\alpha B^\beta}{(\rho q)^\gamma} \quad (30)$$

en què les constants α , β i γ no estan encara determinades. Com que les dimensions de les magnituds de l'eq. (43) són $[d] = m$, $[P_o] = Pa$, $[\rho q] = m^{-3} s^{-1}$ i $[B] = m^2/(Pa s)$, la condició que la dimensió del primer i del segon membres de l'expressió (30) siga la mateixa dóna $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{2}$.

Q34) Comprova l'afirmació anterior.

Així, es pot suposar que el gruix característic d dels organismes rudimentaris que no tenen sistema circulatori ni òrgans respiratoris especials ha de venir donat per

$$d \leq b \sqrt{\frac{BP_o}{\rho q}} \quad (31)$$

en què b és una constant que depèn de la forma de la secció transversal de l'animal. Es pot demostrar que per als organismes filiformes $b = 4$, i per als aplanats $b = 2\sqrt{2}$. La substitució en l'expressió (31) dels valors $q = 0.03 \text{ mm}^3/(g s)$, $B = 2.2 \times 10^{-10} \text{ mm}^2/(Pa s)$, $P_o = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$ i $\rho = 10^{-3} \text{ g/mm}^3$, ens dóna $d \approx 2 \text{ mm}$, el que correspon al gruix màxim d'aquest tipus d'organismes rudimentaris que es troben en els rius, llacs i mars.

Q35) Explica el valor de les magnituds usades i comprova el valor de d .

Q36) Per a què serveix l'anàlisi dimensional?

1.7 Física (conceptes)

Concepte	Capítol
----------	---------

Acceleració centrípeta	1r
Acceleració	1r
Acceleració de la gravetat	1r
Adimensional (magnitud)	1r
Caiguda lliure (temps de)	1r
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
Densitat	1r
Difusió	1r
Dimensions d'una magnitud	1r
Energia (principi de conservació)	1r
Energia cinètica	1r
Energia d'enllaç d'una molècula	1r
Energia potencial	1r
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
Fricció (força)	1r
Fricció (Llei de Stokes)	1r

Gas (pressió parcial)	1r
Gravetat (acceleració)	1r
Llei de Newton del refredament	1r
Llei de Stokes del fregament	1r
Magnitud	1r
Magnitud (ordre)	1r
Massa	1r
Newton (Llei del refredament)	1r
Número adimensional	1r
Ordre de magnitud	1r
Parcial (pressió)	1r
Permeabilitat (coeficient)	1r
Pes	1r
Potència	1r
Pressió atmosfèrica	1r
Pressió parcial d'un gas	1r
Principi de conservació de l'energia	1r
Radiació	1r
Reacció (força)	1r
Refredament (Llei de Newton)	1r
Resistència (força)	1r
Resultant (força)	1r
Stokes (Llei de fricció)	1r
Temps (constant de)	1r
Temps de caiguda lliure	1r
Treball	1r
Velocitat	1r

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 rodonetes
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.

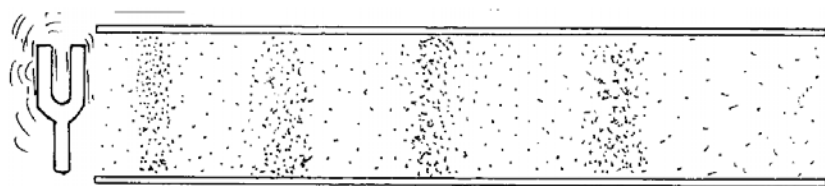


Fig. 1. El so que emet un diapasó es propaga per l'aire, o per qualsevol medi, en forma d'ones de pressió (de compressions i dilatacions). En la figura es mostra la propagació de so per un tub.

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:

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} P_i \\ P_t &= \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} P_i \end{aligned} \quad (4)$$

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...

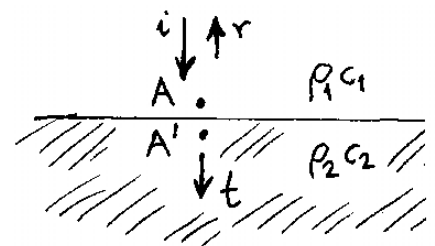


Fig. 2. Reflexió d'una ona sonora en el límit de separació de dos medis: i, ona incident; r, ona reflectida; t, ona transmesa.

(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_i 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).

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

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).

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 figurem 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.

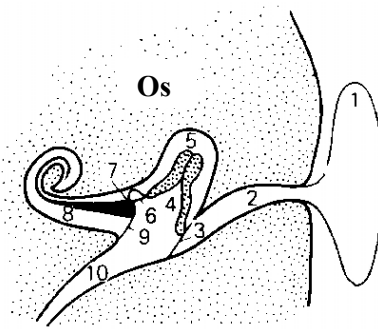


Fig. 3. Representació esquemàtica de l'oïda d'una persona: 1, pavelló de l'orella; 2, conducte auditiu; 3, membrana del timpà; 4, martell; 5, enclusa; 6, estrep; 7, membrana de la finestra oval; 8, caragol; 9, membrana de la finestra rodona, i 10, trompa d'Eustaqhi.

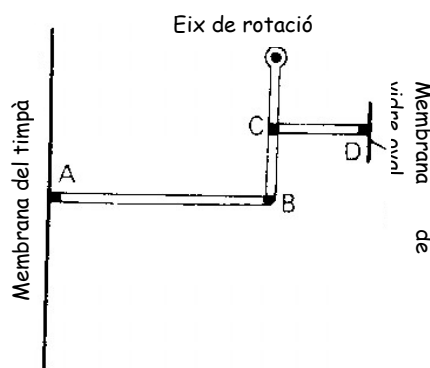


Fig. 4. Equivalent mecànic de l'oïda mitjana. Per a un angle de rotació determinat al voltant de l'eix, el desplaçament de la barra CB provoca un desplaçament doble de la barra AB que la CD.

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'estrenyiment 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... $\approx 10^{-11} \text{ m}$

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
$2 \cdot 10^3$	160	Lesions mecàniques de la membrana del timpà
$2 \cdot 10^2$	140	Llindar de dolor de l'oïda
2	100	Taller en funcionament; automòbil
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Soroll en una oficina; conversa
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Cambra molt silenciosa
$2 \cdot 10^{-5}$	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.

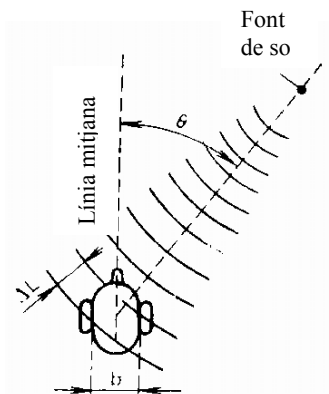


Fig. 5a. Un dels mètodes de determinació de la direcció de la font de so: interval temporal.

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 $\Delta t = \Delta L/c$. 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:

$$\Delta t = \Delta L/c = (b/c) \sin \theta \quad (10)$$

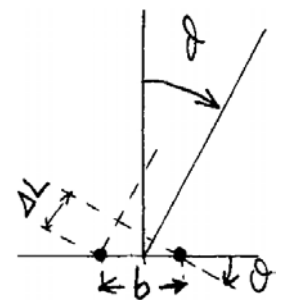


Fig. 5b. Notació utilitzada en la fig. 5a.

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 $\Delta t_{\max} = \dots$ 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: $c = \lambda/T = \lambda\nu$).

...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.

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

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...

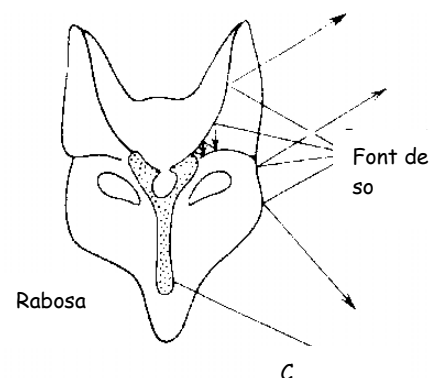
Una persona utilitza inconscientment al mateix temps els dos mètodes de localització de la font de so. En general, a una diferència en la intensitat del so d'aproximadament un 10% correspon una demora temporal en l'arribada de l'ona sonora (a l'oïda més allunyada) de $18 \mu\text{s}$.²²

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.

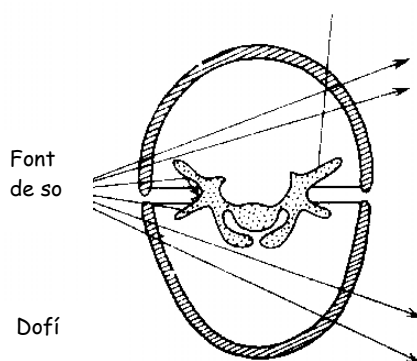


Fig. 6. Elements del cap que permeten localitzar la font de so en l'aire, en el cas d'una rabosa, i en l'aigua, quan es tracta d'un dofí. Els ossos del crani i el pavelló de l'orella creen una ombra acústica en l'aire. En l'aigua, aquesta ombra acústica és creada per les foses aèries nasals.

(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.

(Física) Gradient de pressió és...

i es mesura en...

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 desfament 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'Eustaqi (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'Eustaqi 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.

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 (λ) corresponen les freqüències dels ultrasons que emet una rata penada? (Recorda que la velocitat de propagació de l'ona, la freqüència i la λ 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 incomprensible 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.

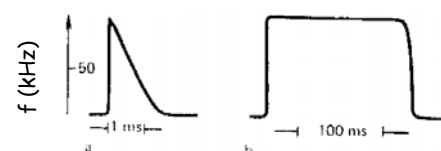


Fig. 8. Variació de la freqüència de les oscil·lacions en dos tipus d'impulsos ultrasònics emesos per les rates penades.

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 brusc 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 distints 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) 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 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.

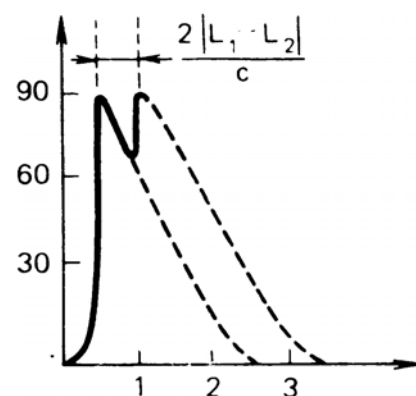


Fig. 9: Variació de la freqüència de les oscil·lacions ultrasòniques en l'impuls reflectit de dos objectes allunyats de la rata penada, a les distàncies L_1 i L_2 respectivament.

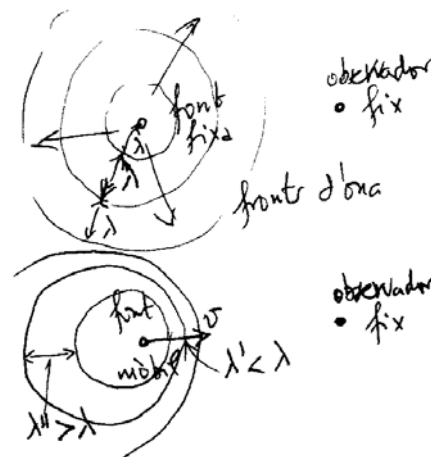


Fig. 10. Esquema per explicar l'efecte Doppler. a) Els fronts d'ona, observats pel maquinista d'un tren. b) Els fronts d'ona, observats per una persona que veu apropar-se (dreta) o allunyar-se (esquerra) el tren.

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.

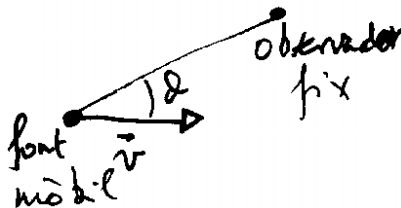


Fig. 11. Variables usades en l'eq. (11).

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

Capítol 3. La respiració

(Està aspirant més profundament
—està emocionada, està emocionat!)

Dum spiro, spero²⁷

- 3.1 La vida és combustió
- 3.2 Els pulmons
- 3.3 Consum energètic: treball en alenar
- 3.4 Respiració i bombolles de sabó
- 3.5 Tensió superficial
 - 3.5.1 Mesura de la tensió superficial
 - 3.5.2 Tensió superficial i esferes
 - 3.5.3 Depèn α de l'àrea?
 - 3.5.4 L'experiment dels globus inflats
 - 3.5.5 Mesura de la dependència $\alpha(S)$
 - 3.5.6 α i concentració d'impureses
 - 3.5.7 Histèresi
- 3.6 Excepcions: pulmons sense substàncies tensoactives
 - 3.6.1 Els animals de sang freda
 - 3.6.2 Els pardals
 - 3.6.3 Zona morta dels pulmons dels mamífers
 - 3.6.4 Circulació de l'aire i respiració dels mamífers
 - 3.6.5 Circulació de l'aire i respiració: els pardals
 - 3.6.6 Contracorrent: mètode barat i còmode
per als pardals (i els peixos)
- 3.7 Respiració i òrgans vitals
 - 3.7.1 Alenar sota l'aigua: els animals
 - 3.7.2 A fer el bus
 - 3.7.3 Alenar mesclades de gasos
 - 3.7.4 Bombolles d'aire en els teixits
 - 3.7.5 Formació de bombolles
 - 3.7.6 Bombolles... de nitrogen...
 - 3.7.7 Cruixits d'ossos dels dits...
 - 3.7.8 Respirar aigua
 - 3.7.9 Pulmons que bombegen aire o aigua?
- 3.8 Física (conceptes)

²⁷ Mentre visc, espere.

3.1 La vida és combustió

Aquestes paraules, "La vida és combustió", pertanyen als famosos científics francesos del segle XVIII, A. Lavoisier i P. Laplace.

...en general, la respiració no és més que una combustió lenta de carboni i hidrogen, que és totalment similar a allò que ocorre en una làmpada o candela enceses; des d'aquest punt de vista, els animals que respiren són vertaders cossos combustibles que es cremen i es consumeixen... Un podria dir que aquesta analogia entre combustió i respiració no ha escapat a l'observació dels poetes o, millor, dels filòsofs de l'antiguitat, els quals la van comentar i la van interpretar. Aquest foc robat al cel, aquesta torxa de Prometeu, no representa solament una idea enginyosa i poètica, és una imatge fidel de les operacions de la Natura, almenys pel que fa als animals que respiren; un pot dir, doncs, amb els antics, que la torxa de la vida s'il·lumina en el moment que un nou-nat respira per primera vegada i no s'extingeix sinó amb la mort.²⁸

En efecte, quin factor, sinó la incessant combustió, pot explicar el fet que la temperatura del nostre cos siga constant i supere quasi sempre la temperatura del medi ambient? Lavoisier i Laplace consideraven que el "forn" escalfador de l'organisme es trobava en el pulmó, en què el carboni del teixit viu, igual que en una estufa ordinària, entrava en reacció química amb l'oxigen de l'aire, formava gas carbònic i, com a resultat d'aquesta reacció, s'alliberava la calor necessària. En realitat, la reacció en què participa l'oxigen es desenvolupa no sols en les cèl·lules del pulmó, sinó també en totes les cèl·lules de l'organisme als quals arriba l'oxigen que subministra la sang. A més a més, el procés que es desenvolupa en l'organisme amb la participació de l'oxigen, i que ens abasteix d'energia (en particular, de calor), no té res en comú amb la reacció de combustió directa del carboni, sinó que representa una llarga cadena de reaccions químiques en les quals, precisament, el CO_2 és un dels productes finals.

Tanmateix, algunes vegades, per a simplificar, és possible considerar el nostre organisme com un forn que consumeix diàriament prop de 0.5 kg d'oxigen, i allibera durant aquest temps quasi la mateixa quantitat de diòxid de carboni.

Q1) Quin volum ocupa l'oxigen que consumim cada dia?

Si prosseguim l'analogia proposada per Lavoisier i Laplace, resulta que en aquest "forn" el pulmó fa el paper de "respirador" a través del qual entra l'oxigen i de xemeneia per a l'eixida del gas carbònic. És interessant recordar que, ja en el segle XVII, el físic anglès R. Boyle, que va descobrir una de les lleis dels gasos, afirmava que la sang, quan passa a través dels pulmons, "s'allibera de bafos nocius". De quina manera els pulmons, que ocupen tan sols un 5% del volum del cos, assolixen aquesta tasca?

Q2) Quin volum aproximat tenen, doncs, els pulmons? (Cubica el teu cos, fig. 1).²⁹



Fig. 1. Volum d'un cos humà (cubicat).

(Física/química) La combustió és...

(Física) Relació massa-volum en un gas...

²⁸ Biografia d'Armand Seguin i Antoine Lavoisier, Oeuvres de Lavoisier, 1789.

²⁹ Més endavant donem una xifra més exacta, quan parlem de zona morta dels pulmons.

3.2 Els pulmons

En la fig. 2 es representa esquemàticament el pulmó d'una persona i les vies transportadores d'aire, o vies respiratòries, per les quals l'espai interior del pulmó manté la comunicació amb l'atmosfera. Les vies que asseguren l'entrada de l'aire consten de les fosses nasals, en les quals l'aire aspirat s'escalfa i s'humiteja, de la laringe, la tràquea i dos bronquis que condueixen l'aire al pulmó dret i esquerre. Cada bronqui pot presentar més de quinze ramificacions que es fraccionen en bronquis més petits, bronquíols, abans d'acabar en bossetes microscòpiques, alvèols, rodejades d'una espessa xarxa de vasos sanguinis.

Els alvèols: una persona adulta n'arriba a tenir uns 300 milions; representen uns saquets plens d'aire (fig. 3). El diàmetre mitjà dels alvèols és d'uns 0.1 mm, i el gruix de les parets és de 0.4 μm . La superfície total dels alvèols dels pulmons d'una persona és de prop de 90 m².

Q3) Fes un esquema a escala dels alvèols i les parets, i de la capa de sang que els envolta (veges el paràgraf següent).

Q4) Explica com pot ser tan gran aquesta àrea (suposa que els alvèols són esfèrics i compara el resultat amb els 90 m²).

Q5) (Relació àrea/volum) Fem una excursió en el terreny dels fractals: estudia les propietats matemàtiques de figures "monstre" (com ara la corba de Koch o l'estoreta de Sierpinsky).

En cada instant, en els vasos sanguinis que entrellacen els alvèols hi ha uns 70 ml de sang; el gas carbònic es difon d'aquesta sang als alvèols, mentre que l'oxigen entra en direcció oposada. L'enorme superfície dels alvèols dóna la possibilitat de reduir a 1 μm el gruix de la capa de sang que intercanvia els gasos amb l'aire intraalveolar, cosa que permet, en menys d'1 s, saturar aquesta capa de sang amb oxigen, i així es purifica de l'excés de diòxid de carboni.

Q6) Quants àtoms caben en una micra?

Hem d'assenyalar que en la respiració participen no sols els pulmons, sinó també tota la superfície del cos humà: la pell, des dels talons fins al cap. La pell respira amb més intensitat en el pit, en l'esquena i en l'abdomen i aquestes parts superen en intensitat de respiració els pulmons. Així, per exemple, una unitat de superfície d'aquesta pell pot absorbir un 28% més d'oxigen i desprendre un 54% més de CO₂ que en els pulmons. Aquesta superioritat es deu que la pell "respira" aire pur, mentre que el pulmó el ventilem malament (veges més endavant l'apartat Excepcions: pulmons...). Així i tot, la contribució de la pell a la respiració d'una persona és ínfima en comparació amb els pulmons, ja que la superfície total del cos és menor de 2 m² i no supera el 3% de la superfície total dels alvèols pulmonars.

Q7) Fes una estimació de la superfície de la pell del teu cos.

Q8) Explica el 3% que acabem d'esmentar al text.

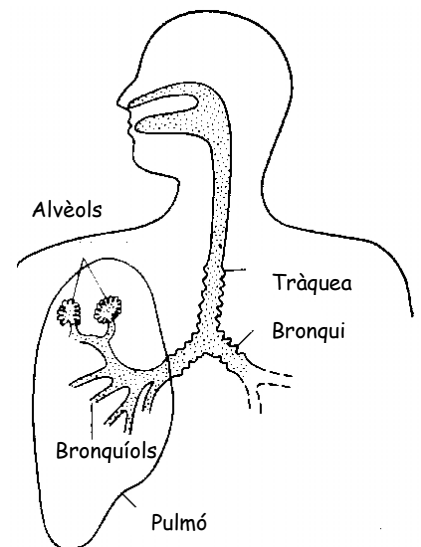


Fig. 2. Representació esquemàtica dels pulmons i de les vies respiratòries d'una persona.

(Física) Relació àrea/volum o dimensions...

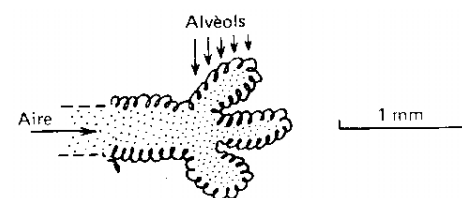


Fig. 3. Ramificacions en els extrems del pulmó, els alvèols.

(Física) Fractals són...

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

(Física) Treball de les
forces elàstiques és...
Posa exemples de forces
elàstiques...

(Física) Fluids en règim
laminar o turbulent...

(Física) Pas de règim laminar
a turbulent...

(Física) La centrifugadora es
basa en...

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

(Física) Pressió i esfera
elàstica: de què depèn...

(Física) Mòdul de Young és...
i es mesura en...

3.3 Consum energètic: treball en alenar

Quan aspirem, el volum dels pulmons augmenta perquè entra aire de l'atmosfera. En la pràctica, com que els alvèols són la part més elàstica del pulmó, tots els canvis de volum dels pulmons durant l'aspiració i l'exhalació es produeixen a costa dels canvis corresponents del volum dels alvèols. Durant l'aspiració, els alvèols s'eixamplen i durant l'exhalació es contrauen. Cada dia fem eixamplar els alvèols dels nostres pulmons unes 15000 vegades, i fem un treball mecànic que representa del 2% al 25% del total de despeses energètiques. Què determina la magnitud d'aquest treball?

Q9) Dedueix la xifra de 15000...

El treball que fem durant la respiració es consumeix en superar diversos tipus de forces de resistència. La part més considerable del treball s'inverteix a eixamplar els pulmons. En segon lloc ve el treball consumit per desplaçar l'aire cap als alvèols per les vies conductores. El flux d'aire pot tenir caràcter laminar o turbulent i les despeses energètiques són diferents en cada cas. L'estructura de les fosses nasals és tal que s'hi generen fluxos turbulents d'aire aspirat. Això és necessari per a escalfar amb major eficàcia l'aire i per separar les partícules estranyes que conté, igual que fa una centrifugadora. La turbulència en el flux d'aire aspirat apareix també en els nombrosos punts de ramificació de l'arbre bronquial. Com que el corrent laminar de gas es transforma en turbulent quan augmenta la velocitat, és evident que la significació relativa de les forces de resistència durant la respiració depèn de la freqüència amb què respirem normalment. Es pot demostrar que aquesta freqüència, unes 15 aspiracions per minut, implica despeses energètiques mínimes durant la respiració (és a dir, que la natura fa bé les coses).

Q10) Expressa la freqüència de respiració en Hz.

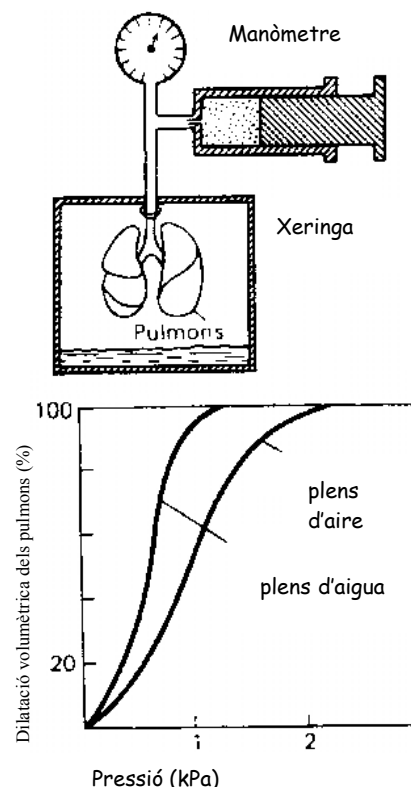
3.4 Respiració i bombolles de sabó

El 1929, el suís Nihirgard va demostrar, fig. 4, que la pressió necessària per inflar els pulmons pot reduir-se considerablement si els pulmons s'omplien de dissolució fisiològica; és a dir, de dissolució salina pròxima per la seua composició al líquid intercel·lular. Si es considera que cada alvèol és una esfera buida rodejada de membrana elàstica, ens diu la física que la pressió de l'aire requerida per a mantenir aquesta esfera en estat inflat està totalment determinada pel diàmetre de l'esfera, pel gruix de la membrana i per un coeficient elàstic (el mòdul de Young), sense dependre del tipus de gas que conté l'esfera.

Però l'experiment de la fig. 4 mostra que la pressió de l'aire i la de l'aigua fan dilatacions diferents dels pulmons. La contradicció entre les dades experimentals obtingudes per Nihirgard i la teoria física de dilatació de les esferes elàstiques es va resoldre en descobrir que la superfície interior dels alvèols està recoberta d'una capa fina de líquid, la qual modifica substancialment les propietats mecàniques dels alvèols. Vegem per què.

Q11) Analitza les dades de la fig. 4. Fes una taula que continga unes 3 o 4 files i que represente les dades de la figura. En quin factor augmenta la dilatació en passar d'aire a aigua? En quin percentatge augmenta la pressió del pulmó respecte de la pressió atmosfèrica?

(Física) Un manòmetre és...



3.5 Tensió superficial

Considerem un líquid exposat a l'aire. Examinem la capa de líquid que es troba en la superfície límit amb l'aire (fig. 5) i que conté molècules com la M_2 . Sobre la molècula M_1 , que es troba dins el líquid, actuen forces d'atracció per part de les molècules veïnes disposades simètricament al voltant de la primera. Per consegüent, la resultant de totes aquestes forces que actuen sobre M_1 és igual a zero. En canvi, la resultant de les forces de les molècules de líquid que actuen sobre la molècula M_2 no és igual a zero, i està dirigida cap a l'interior del líquid, perpendicularment a la superfície, ja que les forces d'atracció de les molècules que hi ha per baix de M_2 no estan compensades. Per aquesta causa, per a desplaçar les molècules des del si del líquid cap a la superfície és necessari fer un treball, per superar les forces de cohesió entre les molècules.

D'aquesta manera, les molècules que formen la capa superficial de líquid tenen, en comparació amb altres molècules disposades a major profunditat, energia potencial. És evident que el valor d'aquesta energia potencial U_{pot} , per al cas de contacte entre un líquid determinat i un gas a través de la superfície S , ha de ser proporcional a la magnitud d'aquesta superfície:

$$U_{\text{pot}} = \alpha \cdot S \quad (1)$$

en què α és el coeficient de proporcionalitat, la seua dimensió és N/m o J/m², i que duu el nom de *coeficient de tensió superficial*.

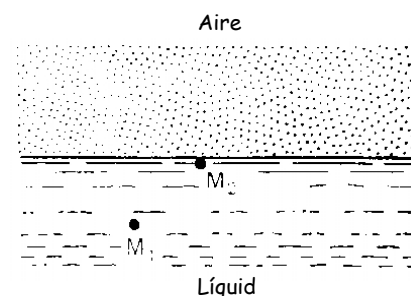


Fig. 5. (a) Superfície de separació entre un líquid i l'aire.

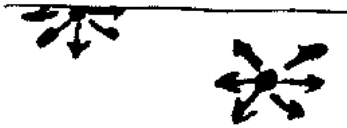


Fig. 5. (b) Forces sobre una molècula superficial i sobre una molècula profunda en un líquid.

(Física) Forces i resultant d'un conjunt de forces...

Una força es mesura en...
i té dimensions de...

(Física) Forces de cohesió són...
i es mesuren en...

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

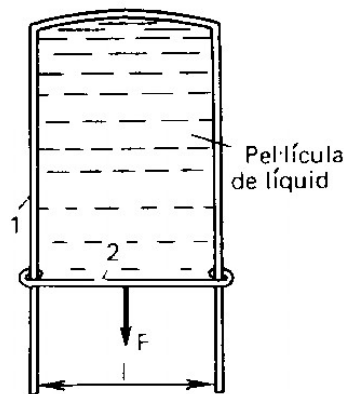


Fig. 6. Dispositiu per a la determinació del coeficient de tensió superficial: 1, fil d'aram en forma de Π ; 2, envà lliscador.

Q12) Comprova que les dimensions anteriors són correctes.

El coeficient de tensió superficial està determinat, simultàniament, per les propietats del líquid mateix i del gas que es troba a sobre d'aquest, i també per la temperatura del medi ambient.

3.5.1 Mesura de la tensió superficial

El terme *tensió superficial* deu l'origen al mètode més fàcil i antic de determinació del valor de α (veges la fig. 6). Submergim en el líquid investigat un fil d'aram amb forma de Π pel qual s'esmuny un envà fi i, després, extraïem del líquid el fil d'aram. En l'espai limitat per tots els costats pels fils d'aram, es forma una pel·lícula de líquid, la qual, quan s'esforça a disminuir la seua energia potencial (i, per consegüent, també la seua superfície) començarà a desplaçar l'envà mòbil de manera que l'àrea limitada pel fil d'aram es redueixca. Amb la fi d'equilibrar la tensió de la pel·lícula i mantenir fixa la posició de l'envà, es necessita una força F la qual, com és possible demostrar, és igual a $2\alpha l$, en què l és la longitud de l'envà. D'aquesta manera, si F i l són coneguts (mesurats), es pot calcular α . Per a l'aigua, $\alpha_{H_2O} = 7 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$, i per al líquid intercel·lular, $\alpha = 5 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$.

Q13) Comprova que les dimensions de α en l'expressió $F = 2\alpha l$ són correctes.

3.5.2 Tensió superficial i esferes

Per a apreciar el paper de la tensió superficial en la mecànica de l'alvèol analitzem una pel·lícula de líquid que té forma d'esfera (una bombolla). Igual que en la pel·lícula plana, les forces de tensió superficial, en aquest cas, tendeixen a reduir la superfície de l'esfera i comprimeixen l'aire que s'hi troba a dins. Com a conseqüència, la pressió de l'aire dins l'esfera formada per una pel·lícula líquida sempre resulta un poc major que la pressió atmosfèrica. El valor d'aquest excés depèn del radi R de l'esfera, i pot determinar-se si utilitzem la fórmula de Laplace:

$$\Delta P = \frac{4\alpha}{R} \quad (2)$$

Q14) Fes un esquema de l'equilibri de forces que actuen sobre les parets elàstiques d'una bombolla de sabó o d'un globus inflat.

A partir de la fórmula de Laplace calcularem el valor de l'excés de pressió necessària per a inflar l'alvèol durant l'aspiració. Suposem que el valor de α per al líquid que cobreix la superfície interior de l'alvèol és igual a $5 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}$, el que correspon al coeficient de tensió superficial del líquid intercel·lular. Si suposem que el radi és $R = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$, obtenim que $\Delta P = 4 \cdot 10^3 \text{ Pa}$.

Q15) Comprova el càlcul i compara aquest valor amb la pressió atmosfèrica. Quin % representa?

El valor de ΔP que ens dóna la fórmula de Laplace és doble que el vertader per al nostre problema, ja que la pel·lícula de líquid alveolar està en contacte amb l'aire tan sols per un costat, l'interior. Per això, el vertader valor de ΔP serà d'uns 2000 Pa. Quan comparem aquest valor amb el de la pressió necessària per a inflar el pulmó (veges la fig. 4), resulta clar que, sinó tota, almenys una part considerable d'aquesta pressió es gasta a superar les forces de tensió superficial. Per consegüent, precisament la diferència entre les dues corbes de la fig. 4 representa l'aportació de les forces de tensió superficial a l'elasticitat del pulmó. Per a una aspiració ordinària, el volum dels pulmons d'una persona augmenta, aproximadament, fins a un 40% o 50% del seu volum màxim. Com deduem de la fig. 4, l'aportació de les forces de tensió superficial, en aquest interval de la variació del volum dels pulmons, és de més del 30%.

Q16) Explica l'afirmació anterior. D'on ve el 30%?

3.5.3 Depèn α de l'àrea?

Però la cosa no és tan simple. Com hem dit, l'elasticitat del pulmó depèn, en un grau important, de les forces de tensió superficial. Tanmateix, encara no hem explicat per què l'aportació de la tensió superficial augmenta amb l'increment del volum del pulmó (veges la fig. 4), tot i que, com es desprèn de la fórmula de Laplace, el valor de ΔP ha de disminuir quan creix R . A més a més, la utilització de les forces de tensió superficial per a explicar les propietats mecàniques del pulmó crea algunes dificultats en la interpretació de la interacció entre els alvèols veïns. Vegem aquesta dificultat, en primer lloc.

3.5.4 L'experiment dels globus inflats

En la fig. 7 es dóna una representació esquemàtica de dos alvèols veïns de grandària diferent. Suposem, primerament, que les cavitats aèries dels alvèols no tenen comunicació entre si (veges la fig. 7a). En aquest cas, d'acord amb la llei de Laplace, la pressió P_1 de l'aire en l'alvèol esquerre serà major que la pressió P_2 en l'alvèol dret. Per aquesta causa, tot just deixem oberta la clau que uneix les cavitats aèries dels alvèols, l'aire des de l'alvèol esquerre començarà a passar al dret, fins que la pressió en els dos s'iguali (veges la fig. 7b). D'aquesta manera, quan les cavitats aèries dels alvèols desiguals s'uneixen, el de radi major sempre s'inflarà, mentre que el de menor radi es reduirà. És evident que tal interacció entre alvèols veïns conduiria a la reducció de tots els alvèols de menor grandària del pulmó i a la dilatació excessiva (i a la ruptura) d'alvèols més grans i, com a conseqüència, el pulmó ja no podria complir les seues funcions. Bé, i aleshores, com respirem nosaltres?

En aquesta anàlisi de la interacció entre alvèols veïns hem considerat a priori que el coeficient de tensió superficial de distints alvèols és idèntic i no depèn de l'estat —inflat o reduït— en què es troben. En efecte, per als líquids comuns el coeficient de tensió superficial no depèn de les dimensions de la superfície. Tanmateix, per a un líquid que conté impureses, α depèn de l'àrea de la superfície divisòria amb el gas.

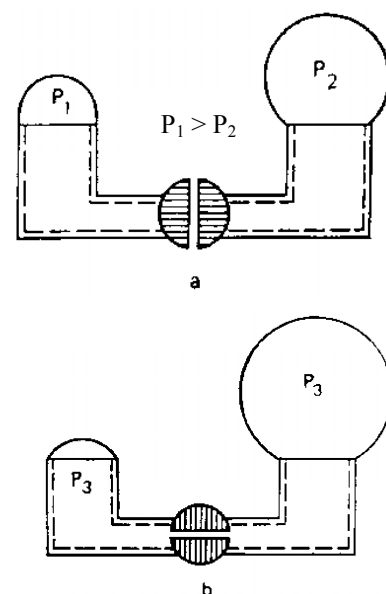
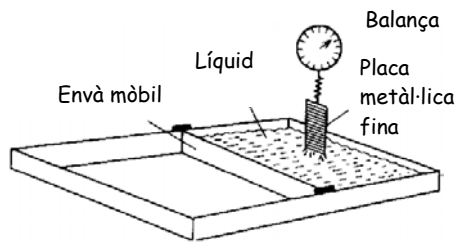


Fig. 7. Representació esquemàtica de dos alvèols veïns que tenen radis diferents: a) cavitats aèries dels alvèols quan estan aïllades les unes de les altres; b) quan estan unides.

(Física) Fes l'experiment dels dos globus iguals inflats a un radi diferent i units per un tub que els posa en comunicació com en la fig. 7.



3.5.5 Mesura de la dependència $\alpha(S)$



En la fig. 8 s'il·lustra un muntatge per mesurar la dependència de la tensió superficial respecte de l'àrea de la superfície del líquid. S'hi veu un cubell dividit en dos compartiments mitjançant un envàs mòbil, i un dispositiu que permet mesurar ininterrompudament el coeficient α del líquid que omple el compartiment dret del cubell.

La mesura del coeficient de tensió superficial es fa de la manera següent. Submergim verticalment en el líquid una vora d'una placa metàl·lica fina (veges la fig. 8). Si el líquid humiteja³⁰ el material del qual està feta la placa, el líquid comença a ascendir al llarg de la placa i es forma un menisc còncav. Com a resultat, la superfície del líquid augmenta i les forces de tensió superficial, en el seu afany de tornar l'àrea de la superfície a les dimensions inicials, actuen sobre la placa amb una força resultant dirigida cap avall i proporcional a α , com es representa en la fig. 5. D'aquesta manera, el pes de la placa humitejada pel líquid s'incrementa en una magnitud proporcional al coeficient de tensió superficial.

El muntatge de la fig. 8 ha permès demostrar que el coeficient de tensió superficial del líquid que humiteja per dins els alvèols depèn substancialment de l'àrea de contacte d'aquest líquid amb l'aire (fig. 9). Com s'observa en la fig. 9, durant el creixement cíclic (amb una freqüència de 0.2 Hz) i la subsegüent disminució de l'àrea de la superfície del líquid, que reproduïx la variació de l'àrea dels alvèols durant l'aspiració i l'exhalació, respectivament, el coeficient α del líquid alveolar no roman constant, i canvia d'uns $3 \cdot 10^{-3}$ a uns $5 \cdot 10^{-2}$ N/m. A títol de comparació, en el mateix gràfic es mostra que el valor de α de l'aigua pura, per a les mateixes variacions de l'àrea de la superfície, és constant.

Q17) Quantes vegades ocorre el cicle de la fig. 9 per minut?

Q18) Què significa la paraula respectivament del paràgraf anterior?

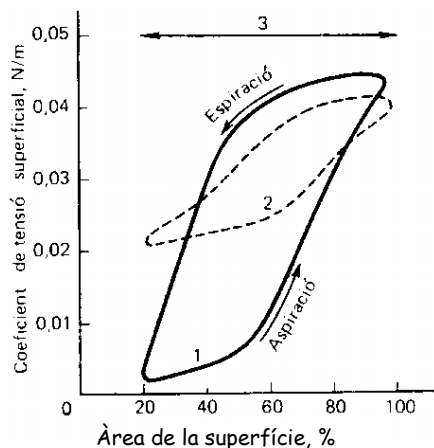


Fig. 9. Coeficient de tensió superficial en funció de l'àrea de contacte del líquid amb l'aire (les mesures s'han fet amb el muntatge de la fig. 8). 1, líquid alveolar d'una persona sana; 2, líquid alveolar obtingut dels nounats incapaces de respirar per ells mateixos; 3, aigua pura. Les fletxes indiquen la variació en el temps de les magnituds obtingudes durant l'aspiració i l'exhalació.

3.5.6 α i concentració d'impureses

Però la natura, una altra vegada, ho preveu tot. La substància continguda en forma d'impuresa, en el líquid que humiteja per dins la superfície dels alvèols, regula de tal manera la magnitud de la tensió superficial que el coeficient α és mínim al principi de l'aspiració i màxim al final. Per això, tot i que el diàmetre dels alvèols al principi de l'aspiració és molt petit, l'aportació de les forces de tensió superficial no és gran. Aquest fet permet inflar els alvèols reduïts amb una pressió relativament petita. Al mateix temps, l'augment de α a mesura creix el radi de l'alvèol impedeix que aquest s'infla desmesuradament al final de l'aspiració, i prevé d'aquesta manera la ruptura de l'alvèol. A més a

³⁰ Que un líquid humitegi o no un material determinat depèn de les relacions entre els coeficients de tensió superficial en les superfícies límit: 1) líquid-aire, 2) líquid-material, 3) material-aire.

més, aquesta dependència de α respecte a la grandària de l'alvèol estabilitza les relacions entre els alvèols veïns i impedeix que entre en acció el mecanisme de decreixement/creixement il·limitat mostrat en la fig. 7.

Com fan disminuir les impureses el coeficient de tensió superficial del líquid i el converteixen en una funció de l'àrea de la superfície?

Q19) Si poses una agulla, amb compte, sobre la superfície de l'aigua, ocorren coses diferents segons l'aigua siga clara i neta o continga sabó. Què té a veure amb la tensió superficial?

Per regla general, l'estructura química d'aquestes impureses és molt pròxima al sabó ordinari, i formen una pel·lícula fina en la superfície de l'aigua. Si la concentració de la impuresa és alta, aquesta pot cobrir tota la superfície de l'aigua amb una capa contínua i, aleshores, $\alpha_{\text{líquid}} = \alpha_{\text{impuresa}}$. En el cas que la concentració de la impuresa siga insuficient per a cobrir tota la superfície, el coeficient de tensió superficial del líquid tindrà un valor entre el corresponent a l'aigua i a la impuresa, $\alpha_{\text{H}_2\text{O}} > \alpha_{\text{líquid}} > \alpha_{\text{impuresa}}$. En aquestes condicions, el creixement de la superfície del líquid conduirà a la disminució de la concentració superficial de la impuresa i a l'augment de α , que s'aproparà a $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$. És evident que amb la disminució de la superfície del líquid la tensió superficial canviarà en sentit contrari, cap a α_{impuresa} .

3.5.7 Histèresi

L'anàlisi de les variacions de α amb l'àrea durant l'aspiració i l'exhalació (veges la fig. 9) demostra que el valor de α , tot i que coincideix en els punts finals, té valors diferents en els punts intermedis. La dependència desfasada (retardada) del coeficient de tensió superficial respecte a l'àrea s'anomena *histèresi*³¹. I quan més alta és la freqüència de les variacions cícliques de la superfície del líquid, major és el fenomen d'histèresi.

(Física) Histèresi és ...

Origen biològic

Quina és la causa del fet que, per a la mateixa superfície del líquid, el valor de α durant l'aspiració sempre siga major que durant l'exhalació? Aquest fenomen està relacionat amb el fet que una part de la impuresa que disminueix la tensió superficial es troba dissolta en les capes més profundes de líquid. Aquesta quantitat d'impuresa dissolta en l'interior del líquid es troba en equilibri dinàmic amb les molècules d'impuresa de la superfície; de manera que, quan augmenta la concentració de la impuresa en la superfície (per disminuir la superfície, en reduir-se el volum de l'alvèol), una part d'aquesta se'n "va" cap a l'interior del líquid, i viceversa. Tanmateix, aquest equilibri no s'estableix instantàniament. En conseqüència, al principi de l'aspiració, per exemple, un augment ràpid de la superfície està acompanyat d'un increment brusc de α perquè les impureses dissoltes en el volum no tenen temps d'eixir a la superfície. L'equilibri entre les molècules d'impuresa s'estableix tan sols al final de l'aspiració (o l'exhalació), cosa que explica l'existència de la histèresi en la dependència de la tensió superficial respecte de l'àrea de la superfície.

(Física) Substàncies tensoactives són...

³¹ La paraula *histèresi*, provinent del grec, significa 'quedar-se endarrerit'.

D'on apareixen en el pulmó les substàncies que disminueixen la tensió superficial i fan més fàcil la respiració? Aquestes substàncies les sintetitzen cèl·lules especials que es troben en les parets dels alvèols. La síntesi d'aquestes substàncies, anomenades *tensoactives*, es produeix durant tota la vida d'una persona, del naixement a la mort.

Nounats amb problemes

En les ocasions, poc freqüents, en què els pulmons del nounat estan privats (totalment o parcial) de les cèl·lules que produeixen substàncies tensoactives, el bebè és incapaç de fer la primera aspiració, i mor. Malauradament, prop de mig milió de nounats moren en el món cada any per aquesta causa. En la fig. 9 es mostra la dependència entre el coeficient de tensió superficial del líquid dels pulmons d'aquests nounats i l'àrea de la superfície. El valor mínim de α quan hi ha síntesi deficient de substàncies tensoactives és quasi 8 vegades major que el normal, cosa que fa impossible la respiració pròpia.

Q20) D'on ve el factor 8?

3.6 Excepcions: pulmons sense substàncies tensoactives

De qualsevol manera, molts animals que respiren amb pulmons no es veuen afectats, en absolut, pel fet que els seus alvèols no contenen substàncies tensoactives.

3.6.1 Els animals de sang freda

En primer lloc, ens estem referint als animals de sang freda (les granotes, els fardatxos, les serps i els cocodrils). Com que aquests animals no han de gastar energia per a l'escalfament del cos, la demanda d'oxigen es redueix en un ordre de magnitud, aproximadament, en comparació amb els animals de sang calenta. Per aquesta causa, també l'àrea dels pulmons, a través de la qual es fa l'intercanvi dels gasos entre la sang i l'aire, és menor en els animals de sang freda que en els de sang calenta. Així, per exemple, en els pulmons de la granota, 1 cm^3 d'aire té una superfície de contacte amb els vasos sanguinis de tan sols 20 cm^2 , mentre que en una persona el mateix volum d'aire intercanvia els gasos amb la sang a través d'una superfície de prop de 300 cm^2 .

Q21) En quants ordres de magnitud és menor la relació àrea/volum del pulmó per a un animal de sang freda que per a una persona?

La disminució relativa de l'àrea del pulmó per unitat de volum en els animals de sang freda està relacionada amb el fet que el diàmetre dels alvèols és, aproximadament, 10 vegades major que en els animals de sang calenta. Però de la llei de Laplace, eq. (2), es desprèn que l'aportació de les forces de tensió superficial és inversament proporcional al radi de l'alvèol. Per aquesta causa, el gran radi dels alvèols dels animals de sang freda dona la possibilitat d'inflar-los fàcilment, fins i tot quan en les superfícies interiors no estan presents les substàncies tensoactives.

Q22) Explica l'afirmació anterior.

Q23) Quin radi aproximat té, doncs, l'alvèol d'un animal de sang freda?

3.6.2 Els pardals

El segon grup d'animals, amb pulmons sense substàncies tensoactives, són els pardals. Els pardals són animals de sang calenta i estil de vida ben animat. Les despeses energètiques dels pardals i dels mamífers d'igual massa són semblants. També és gran, doncs, la quantitat d'oxigen requerida pels pardals. Els pulmons d'aquests tenen la capacitat, única en el seu gènere, de saturar la sang amb oxigen durant un vol a gran altura (de prop de 6000 m) en què la concentració d'oxigen és 2 vegades menor que al nivell de la mar.

Q24) Comprova amb l'equació baromètrica

(concentració a l'altura h) = (concentració a l'altura zero) $\cdot e^{-h/8 \text{ km}}$

que la concentració d'oxigen es redueix en un 50% a 6 km d'altura sobre el nivell del mar.

Qualsevol mamífer, també els humans, quan va a parar a aquesta altura, comença a experimentar l'escassetat d'oxigen i limita bruscament l'activitat, el moviment i, de vegades, fins i tot se sumeix en un estat de sopor profund (comatós). Aleshores, com aconsegueixen els pulmons dels pardals respirar i saturar la sang amb oxigen, sense utilitzar-hi les substàncies tensoactives, millor que ho podem fer nosaltres, els mamífers?

Autocrítica

Ha arribat el moment de l'autocrítica. Què hi ha de dolent en els nostres pulmons? En primer lloc, no tot l'aire aspirat participa en l'intercanvi dels gasos amb la sang. L'aire que, al final de l'aspiració, es troba en la tràquea i els bronquis no podrà lliurar l'oxigen a la sang i prendre d'aquesta el diòxid de carboni, perquè aquests òrgans estan quasi exempts de vasos sanguinis. Per aquesta causa, el volum dels pulmons ocupat per la tràquea i els bronquis, (junt amb el volum de les vies respiratòries superiors, se sol denominar *zona morta*.

3.6.3 Zona morta dels pulmons dels mamífers

Habitualment, la zona morta en els pulmons d'una persona té un volum de prop de 150 cm³. Hem d'assenyalar que l'existència d'aquesta zona no solament impedeix que la quantitat corresponent d'aire fresc arribi a la superfície interior dels alvèols, rica en vasos sanguinis, sinó que també disminueix la concentració mitjana de l'oxigen que arriba als alvèols. Això ocorre perquè al principi de cada aspiració en els alvèols entra l'aire que ve de la zona morta, i aquesta és precisament l'última porció d'aire que s'acaba d'exhalar. Per aquesta causa, la concentració d'oxigen en l'aire que entra en els alvèols al principi de l'aspiració és baixa, i no es diferencia de la concentració que té l'aire exhalat.

Q25) Quin % del volum dels pulmons és zona morta?

El volum de la zona morta es pot augmentar artificialment si respirem a través d'un tub llarg. Si fem la prova, podem comprovar que s'hi fa necessari augmentar la profunditat (el volum) de les alenades. És obvi que, en el límit, en el cas de fer el volum de la zona morta igual a l'aspiració màxima possible (és a dir, de prop de 4.5 dm³), resulta que després d'unes quantes aspiracions la persona començarà a asfixiar-se, perquè deixarà d'entrar aire fresc en els alvèols. Així que l'existència de zona morta en el sistema respiratori dels mamífers és un "descuit" evident per part de la natura.

Q26) Per què es parla abans de probabilitat i de volum de les alenades com a sinònims?

Q27) Quin és el volum dels pulmons, a la vista d'allò que hem assenyalat més amunt?

3.6.4 Circulació de l'aire i respiració dels mamífers

Quan la natura va crear els pulmons dels mamífers va cometre també una segona errada, perquè el moviment de l'aire en els pulmons canvia de direcció quan passa de l'aspiració a l'exhalació. Per aquesta causa, els pulmons pràcticament no actuen quasi la meitat del temps, ja que l'aire fresc no entra en els alvèols durant la fase d'exhalació. Com a resultat, cap al final de l'exhalació la concentració de l'oxigen en l'aire alveolar disminueix una vegada i mitja en comparació amb la concentració en l'atmosfera. Com que, durant l'aspiració, l'aire aspirat ric en oxigen es mescla en els alvèols amb l'aire que s'hi trobava anteriorment, la mescla obtinguda —la qual, precisament, és la que intercanvia els gasos amb la sang— conté oxigen en concentració menor que l'atmosfèrica. Per aquesta causa, per als mamífers, la saturació de la sang amb oxigen sempre serà menor que en el cas hipotètic que l'aire haguera passat a través dels pulmons només en una sola direcció, independentment de la fase de respiració.

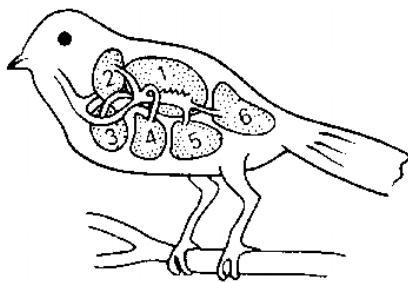


Fig. 10. Sistema respiratori del pardal: a) pulmons; b) 6 bosses aèries.

3.6.5 Circulació de l'aire i respiració: els pardals

Per descomptat, en els pulmons dels mamífers, la tràquea dels quals serveix simultàniament per a l'entrada i per a l'eixida de l'aire, és impossible fer aquest moviment unidireccional de la mescla respiratòria. En els pardals, en canvi, la natura va assolir la perfecció, una altra vegada. A més dels pulmons ordinaris, els pardals tenen un sistema complementari que consta de cinc o més parelles de bosses d'aire comunicades amb els pulmons. Les cavitats d'aquestes bosses es ramifiquen profusament en el cos i penetren en alguns ossos; de vegades, fins i tot en els ossets petits de les falanges dels dits. Com a resultat, el sistema respiratori de l'ànec ocupa prop del 20% del volum del cos (el 2% correspon als pulmons i el 18%, a les bosses d'aire), mentre que en una persona representa tan sols un 5%. Les bosses aèries no solament disminueixen la densitat del cos, sinó també contribueixen a insuflar l'aire en una sola direcció a través dels pulmons.

Q28) Quins són els 4 trets característics del sistema respiratori dels pardals?

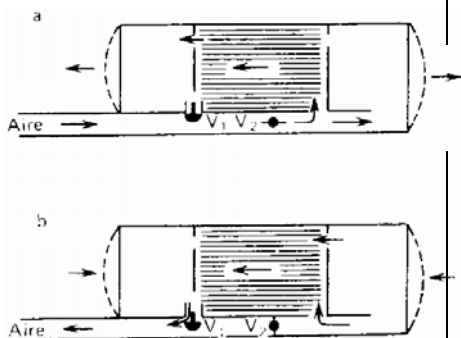


Fig. 11. Moviment de l'aire en el sistema respiratori del pardal: a), aspiració; b) exhalació. (V1 i V2 són les vàlvules que canvien el moviment de l'aire).

En la fig. 10 es representa el sistema respiratori dels pardals, que consta dels pulmons i de diverses bosses aèries comunicades amb els pulmons. El pulmó del pardal, a diferència del d'un mamífer, té una estructura de tubs fins oberts pels dos costats i connectats paral·lelament; aquests tubs estan rodejats de vasos sanguinis. Durant l'aspiració, els volums de les bosses d'aire davanteres i posteriors augmenten. Les bosses davanteres no es comuniquen amb el bronqui principal durant l'aspiració i es plenen d'aire que ix dels pulmons (fig. 11a). Durant l'exhalació, el volum de totes les bosses disminueix, es restableix la comunicació de les bosses davanteres amb el bronqui principal, mentre que per a les bosses posteriors aquesta comunicació es tanca. Com a resultat, l'aire a través del pulmó del pardal flueix, durant l'exhalació, en la mateixa direcció que durant l'aspiració (fig. 11b). Aquesta circumstància permet als pardals enriquir millor la sang d'oxigen.

Q29) Explica la fig. 10.

Durant la respiració dels pardals, varien tan sols els volums de les bosses d'aire, mentre que el volum del pulmó és pràcticament constant. I com que no hi ha necessitat d'inflar el pulmó, s'entén per què els pulmons dels pardals no tenen substàncies tensoactives: ací, aquestes no serveixen per a res.

3.6.6 Contracorrent: mètode barat i còmode per als pardals (i els peixos)

La natura, en l'intent d'augmentar al màxim la concentració d'oxigen en la sang dels pardals durant els vols a altures grans, va recórrer a un artífici nou: la direcció del moviment de la sang en els vasos del pulmó és oposada a la del flux d'aire a través del pulmó. Aquest mètode de contracorrent per a saturar la sang amb oxigen és molt més eficaç que quan la sang i l'aire es mouen a través dels pulmons en una sola direcció.

Considerem l'exemple següent. Suposem que dos tubets, que imiten el vas sanguini i el tub conductor d'aire del pulmó del pardal —disposats l'un al costat de l'altre— entren en contacte (fig. 12). A través de la superfície de contacte entre el vas sanguini i el tubet conductor d'aire, es pot difondre l'oxigen a la sang a partir de l'aire i, en direcció oposada, el diòxid de carboni. La sang que està a punt d'abandonar el pulmó (la part dreta de la fig. 12) està en contacte amb l'aire que acaba d'entrar en el pulmó i en el qual la concentració d'oxigen encara no ha disminuït. A mesura que l'aire passa a través dels pulmons perd oxigen i se satura amb diòxid de carboni. Per aquesta causa, quan la sang es mou pel vas, entra en contacte amb els volums d'aire fresc cada vegada més rics en oxigen, circumstància que dóna a la sang l'oportunitat de saturar-se amb oxigen fins al valor màxim possible. El mateix mecanisme permet a la sang alliberar l'excés de gas carbònic de forma més ràpida que en el cas dels mamífers.³²

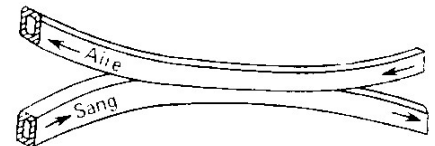


Fig. 12. Representació esquemàtica del sistema a contracorrent de saturació de la sang amb oxigen, en els pulmons del pardal.

3.7 Respiració i òrgans vitals

Per a les persones i altres animals superiors la respiració i el batec del cor són sinònims de vida. El cor i els pulmons proveeixen l'animal de la quantitat necessària d'energia, subministren oxigen als teixits i evacuen el diòxid de carboni. Per aquesta causa, l'aturada de la respiració o de la circulació sanguínia representen un perill gran per a la vida d'un animal. Tanmateix, no tots els teixits requereixen en igual mesura l'alimentació ininterrompuda d'oxigen. Si, amb l'ajuda d'un torniquet, s'interromp la circulació de la sang en un braç o en una cama durant un hora o més temps, no es provocaran lesions en els teixits d'aquests òrgans. Els ronyons també poden suportar interrupcions en l'abastiment de sang. Desafortunadament, tant el cor com el cervell són summament sensibles a l'escassetat d'oxigen. Per aquesta raó, l'asfíxia o l'aturament del cor durant uns quants minuts condueixen a canvis en els seus teixits.

(Física) Concentració de saturació és...

³² És interessant saber que la natura va aplicar el sistema anterior, a contracorrent, no sols als pardals que estan obligats a afrontar l'escassetat d'oxigen durant els vols a altures grans, sinó també en les agalles dels peixos que utilitzen l'oxigen dissolt en aigua, en què la concentració és unes 30 vegades menor que en l'atmosfera.

3.7.1 Alenar sota l'aigua: els animals

Sabem que el gat, el gos, la llebre i altres mamífers que viuen en la superfície de la Terra, expiren uns quants minuts després d'haver-los submergit per complet en l'aigua. Tanmateix, l'ànec pot suportar una capbussada sota l'aigua de 10 a 20 minuts de durada; la foca, de 20 minuts o més, i algunes espècies de balenes estan en la profunditat de l'oceà per més d'una hora. Com poden fer-ho?

Experiments fets amb foques han demostrat que quan "bussegen" se'ls retarda bruscament el ritme cardíac (fins a 1/10 de la freqüència habitual). Això passa immediatament després de submergir les foses nasals sota l'aigua. El mateix fenomen ocorre en els pingüins, cocodrils, tortugues, ànecs i tots els altres animals que respiren aire però que passen un cert temps sota l'aigua. És interessant notar que en els peixos voladors, les agalles dels quals deixen de funcionar quan salten de l'aigua o se'ls hi trau per força, les contraccions del cor també es retarden considerablement. Aquest retard brusc del ritme cardíac en condicions d'anòxia (manca d'oxigen) permet a tots aquests animals reduir considerablement el consum d'oxigen pel cor, el qual és el consumidor principal d'aquest gas en l'organisme.

Per a evitar que durant la capbussada l'abastiment de sang en el cor i el cervell caiga per davall el nivell admissible, el diàmetre dels vasos dels altres òrgans (excepte el cor i el cervell) disminueix considerablement. Per aquesta causa, fins i tot per a la petita freqüència de les contraccions del cor, l'abastiment de sang al cor i al cervell dels animals bussejadors és encara insuficient. El mateix mecanisme de regulació de la circulació de la sang durant la capbussada es genera, com a resultat d'un entrenament, en l'organisme dels pescaters de perles els quals poden estar sota l'aigua durant diversos minuts, fins i tot a 30 m.

3.7.2 A fer el bus

I què podem fer nosaltres, els que no tenim les aptituds dels pescaters de perles? Com pot una persona comuna penetrar en els enigmes de les profunditats de la mar? El primer aparell que es va utilitzar per a romandre sota l'aigua va ser un tub que comunicava la boca de la persona amb l'atmosfera. El tub respiratori l'utilitzaven ja els antics grecs i romans, i Leonardo da Vinci el va perfeccionar tot proveint-lo d'un disc de suro situat de tal manera que l'extrem superior del tub sempre sobreísquera de l'aigua, per a assegurar la respiració lliure de la persona. La longitud del tub era d'un metre. El tub de Leonardo da Vinci no estava destinat per a la natació subaquàtica, sinó per a *caminar sota l'aigua*. El gran savi considerava que aquest aparell es podia utilitzar en la mar de les Índies per a *pescar perles*. Hem de dir que les larves d'alguns insectes, que habiten en el fons de tolls o petits dipòsits d'aigua, tenen una espècie de tub respiratori. Quan trauen el tubet a la superfície, poden respirar sense abandonar el llot.

Aquest recurs del tub l'utilitzaven sovint els indis³³ per amagar-se del enemics sota la superfície de l'aigua i respirar a través d'una tija buida de jonc. Tanmateix, aquest mètode és possible solament quan la profunditat d'immersió no supera 1.5 m. Si la profunditat d'immersió és major, la diferència entre la pressió de l'aigua que comprimeix el tòrax, i la de l'aire dins d'aquest, s'incrementa fins a tal punt que ja no podem augmentar el volum del tòrax durant l'aspiració i emplenar els pulmons d'aire fresc. Per aquesta causa, quan ens trobem a una profunditat major que 1.5 m, solament és possible respirar aire que s'haja comprimit a la pressió de l'aigua que està a la profunditat donada. Precisament amb aquest fi, els submarinistes porten botelles

³³ Com apareix en les novel·les de Fenimore Cooper.

d'aire comprimit. Tanmateix, la immersió a profunditats diferents requereix que siga distinta la pressió de l'aire aspirat. Així, per exemple, a la profunditat de 10 m la pressió ha de ser de 200 kPa, i a la profunditat de 40 m, de 500 kPa.

Q30) A quantes atmosferes equival la pressió de l'aire aspirat a 10 m i a 40 m de profunditat d'immersió?

Q31) Quina pressió hi ha sobre el cos d'un submarinista que estiga a 10 m o a 40 m de profunditat?

3.7.3 Alenar mescles de gasos

Desafortunadament, l'experiència en l'ús d'escafandres autònoms ha demostrat que no és possible submergir-se a més de 40 m. A major profunditat la/el submarinista es veu obligat a respirar aire comprimit a una pressió superior a 5 atm, a la qual la concentració d'oxigen supera en més de 5 vegades la concentració en l'atmosfera, cosa que provoca la intoxicació amb l'oxigen.

A pressió atmosfèrica, una persona pot respirar oxigen pur tan sols durant unes 24 hores. Si la inhalació de l'oxigen és més prolongada, es produeix una pulmonia que acaba amb la mort. Si es respira oxigen pur comprimit a 2 o 3 atm durant unes 2 hores, es produeixen trastorns de coordinació de moviments, de l'atenció i de la memòria.

Amb la finalitat d'evitar l'acció tòxica de l'oxigen per als submarinistes que se submergeixen a profunditats grans es preparen mescles respiratòries especials amb un percentatge d'oxigen menor que en l'aire atmosfèric. Però a pressions tan altes el nitrogen que entra en la composició de la mescla respiratòria pot causar una acció narcòtica. A més a més, és molt difícil respirar les mescles que contenen nitrogen a profunditats de prop de 100 m, ja que la densitat del gas aspirat, comprimit a 10 atm, supera en 10 vegades la densitat de l'aire atmosfèric. Aquesta densitat tan alta del gas aspirat transforma l'acte de respiració, habitualment imperceptible i de fàcil execució, en un procés penós d'introducció forçada de l'aire en els pulmons. Per això, quan la profunditat supera 40 m els bussos solen respirar una mescla d'oxigen i heli. A pressions tan altes, l'heli no presenta propietats narcòtiques i té una densitat aproximadament 7 vegades menor que la del nitrogen.³⁴

Q32) Explica per què l'heli té una densitat 7 vegades menor que l'aire.

3.7.4 Bombolles d'aire en els teixits

Tanmateix, les dificultats (i perills) que aguaiten la/el submarinista que se submergeix a una gran profunditat no sols estan sota l'aigua, sinó també immediatament després de pujar a la superfície. Els bussos que pugen ràpidament d'una gran profunditat comencen a experimentar aviat un dolor fort de les articulacions. Aquesta malaltia d'ocupació dels bussos rep el nom de *malaltia de les cambres de submersió* o,

³⁴ Els bussos se submergeixen cada vegada a més profunditat. Han d'instal·lar i substituir, per exemple, torres petroleres en la mar, on el petroli és més barat ja que els jaciments es troben a poca profunditat. Els bussos que instal·len les torres en la mar del Nord han de treballar, de vegades, a una profunditat de prop de 300 m, i respiren mescles gasoses comprimides a 3000 kPa.

simplement, mal dels bussos, i es deu a la formació de bombolles de gas en els teixits, que són també causa d'oclusió de petits vasos sanguinis.

D'on provenen aquestes bombolles de gas? Sorgeixen, anàlogament a com es formen bombolles en una ampolla de soda que s'obri, quan disminueix la pressió sobre un líquid que s'ha saturat de gas a una pressió gran.³⁵

Q33) Comprova l'afirmació —feta en la nota a peu de pàgina— que una disminució de 50 kPa equival a 6 km d'altura.

3.7.5 Formació de bombolles

En la formació d'una bombolla, s'hi donen dues etapes successives:

- 1) formació d'una bombolla molt petita en un punt en què *no hi havia res*, i
- 2) creixement de la bombolla.

La segona etapa, el creixement de la bombolla de gas durant una disminució brusca de la pressió atmosfèrica, és fàcil d'explicar mitjançant la llei de Boyle-Mariotte.

Q34) Explica l'afirmació anterior.

(Física) Nuclis de condensació a una tempesta són...

La primera etapa, el mecanisme de formació d'una bombolla de gas molt petita a partir *de no res*, no està encara ben estudiada. És clar que és imprescindible la presència dels nuclis per al procés de formació de les bombolles, ja que en l'aigua pura les bombolles de gas, en general, no es formen, fins i tot en cas de reduir bruscament, fins a mil vegades, la pressió del gas sobre la superfície de l'aigua. Es considera que en els teixits de l'organisme, en condicions normals, sempre hi ha els anomenats *nuclis*, que poden convertir-se en punts de formació de bombolles molt petites de gas. És possible que com a nuclis puguin intervenir les bombolles de gas estables (que no canvien les seues dimensions) presents en els teixits.

La *malaltia de les cambres* de submersió es pot prevenir si la pujada del bus des de profunditats grans es fa a un ritme suficientment lent i amb les pauses necessàries. Aquestes pauses durant la pujada permeten que el gas dissolt es difonga a través del teixit als vasos sanguinis, pels quals el gas, juntament amb la sang, entra en els pulmons, i des d'aquests ix a l'atmosfera sense arribar a formar bombolles.³⁶

³⁵ La malaltia de les cambres de submersió és possible també durant una pujada ràpida (en avió a gran altura) i en una cambra no hermètica. En aquest cas, el perill de la malaltia de les cambres de submersió sorgeix durant una disminució brusca de la pressió igual a 50 kPa, aproximadament, cosa que correspon a una altitud major de 6000 m. Es van registrar diversos casos d'aquesta malaltia entre els pilots que volaven en una cabina que no era hermètica i a altures de 2500 m. Tanmateix, el dia anterior al vol totes aquestes persones es van dedicar a la pràctica del submarinisme i utilitzaven un escafandre autònom. És evident que, encara abans del vol, l'organisme dels pilots contenia petites bombolles d'aire que començaven a expandir-se, i revelaven la seua presència després d'una disminució significativa de la pressió atmosfèrica. Per aquesta causa, als pilots se'ls recomana no començar a pilotar l'avió fins que passen 24 hores de la natació subaquàtica.

³⁶ La malaltia de les cambres de submersió no es produeix durant la pujada brusca des d'una profunditat menor de 9 m. Una permanència a la profunditat de 30 m durant una hora requereix aturar-se dos minuts a la profunditat de 6 m, i durant 24 minuts a la profunditat de 3 m. En els casos en què els bussos treballen diàriament a una profunditat major que 100 m en el curs de tota la jornada de treball, no s'ha de disminuir la pressió de l'aire que aquests aspiren ni tan sols en les hores de descans després del retorn a la superfície, perquè aquest procés requeria diverses hores. Per aquesta causa, en els intervals entre les immersions els bussos descansen en cambres de pressió especials instal·lades en els vaixells.

3.7.6 Bombolles... de nitrogen...

La major part de les bombolles de gas són de nitrogen, ja que l'oxigen es consumeix energèticament per les cèl·lules de l'organisme. El perill de desenvolupament de la *malaltia de les cambres de submersió* es pot disminuir si, en lloc de nitrogen, utilitzem heli per a alenar, que és menys soluble en l'aigua i en les grasses, i que té una velocitat de difusió unes quantes vegades major que el nitrogen. La major velocitat de difusió de l'heli dona la possibilitat de reduir el temps de pujada del bus a la superfície.³⁷

Q35) Per què té l'heli una velocitat de difusió major que el nitrogen?

3.7.7 Cruixits d'ossos dels dits...

La formació de les bombolles de gas en el líquid durant la disminució brusca de la pressió exterior està relacionada també amb un altre fenomen que observem en l'organisme. En la nostra *època de nervis* s'ha difós àmpliament l'hàbit de *cruixir amb els dits* en moments d'emoció. Durant molt de temps no es podia esbrinar quina era la causa del so de cruixit que fem quan estirem les articulacions. Molta gent creia que aquest so el produïen els ossos. Tanmateix, una detallada investigació ha establert que la causa d'aquests cruixits són les bombolles de gas que es formen i es trenquen en el líquid que emplena la bossa articular. Quan estirem l'articulació, el volum de la bossa articular augmenta i, en conseqüència, disminueix la pressió, i el líquid *lubricant* —líquid que hi ha en l'articulació— comença a bullir. Les bombolles de gas que es formen conflueixen amb altres de majors i es trenquen fent el so de cruixit que sentim. Quan els ossos tornen a la posició normal, el gas és absorbit lentament pel líquid. Aquest procés transcorre durant uns 15 minuts i, en acabant, és possible tornar a fer cruixir les articulacions.

3.7.8 Respirar aigua

Totes les dificultats enumerades anteriorment i relacionades amb la permanència d'una persona sota l'aigua sorgeixen perquè s'hi respira aire comprimit. I què ocorrerà si fem que una persona "respire" utilitzant aigua, com els peixos? És clar que la concentració de l'oxigen en l'aigua que es troba en equilibri amb l'atmosfera és molt menor que en l'aire (més de 20 vegades menor).

Q36) Explica aquesta afirmació.

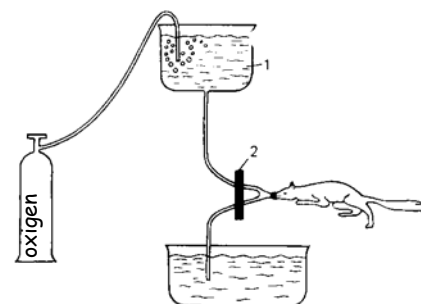


Fig. 13. Muntatge per a "respirar" amb aigua saturada d'oxigen: 1, dissolució aquosa salina de composició pròxima a la sang; 2, vàlvula que tanca el tub inferior, durant l'aspiració, i el superior, durant l'exhalació.

³⁷ Tanmateix, resulta que les mescles d'heli i oxigen asseguren el treball normal dels bussos només fins a profunditats de 400 m. Amb el successiu augment de la pressió, la densitat de la mescla arriba a ser tan alta que fa impossible la respiració.

Des del 1983 comença a usar-se hidrogen, el gas més lleuger, en les mescles gasoses per als bussos. La mescla conté un 49% d'H₂, 49% d'He i 2% d'O₂. Es recomana respirar aquesta mescla només a profunditats majors de 250 m. Per aquesta raó, quan s'assoleix la profunditat esmentada, la mescla gasosa que s'alena inicialment se sotmet a un canvi lent, i se substitueix l'heli per l'hidrogen. Naturalment, la mescla gasosa que inclou hidrogen i oxigen presenta perill d'explosió. La probabilitat, però, que la mescla explote és molt petita, ja que la relació entre els volums de l'oxigen i de l'hidrogen està lluny de la que representa perill d'explosió (1:2, respectivament). Al mateix temps, en la superfície —on aquests gasos estan emmagatzemats i es fa la mescla— la probabilitat d'explosió és molt major, fet que obliga a prendre mesures de precaució.

Tanmateix, també aquesta concentració serà suficient per a saturar d'oxigen la sang fins al nivell normal —durant el contacte de l'aigua amb la sang. A més a més, si es vol, és possible augmentar la concentració d'oxigen en l'aigua *aspirada* si deixem passar a través d'aquesta oxigen pur, i no aire.

És evident que quan quan un submarinista *aspira* aigua que conté oxigen dissolt ja no hi ha necessitat de compensar l'augment de la pressió exterior durant la immersió, perquè d'acord amb la llei de Pascal la pressió de l'aigua dins dels pulmons sempre serà igual a la pressió exterior. Per aquesta causa, els esforços necessaris per a l'aspiració no canviaran amb la profunditat d'immersió. La utilització de l'aigua com a portadora d'oxigen dissolt evita el perill d'intoxicació per oxigen, ja que és possible aconseguir que la concentració de l'oxigen en l'aigua *aspirada* siga constant i igual a la concentració en l'atmosfera. Per la mateixa causa, desapareix el perill d'aparició de la *malaltia de les cambres de submersió*.

En la fig. 13 s'il·lustra esquemàticament un muntatge que permet "respirar" aigua saturada amb oxigen. D'aquesta manera, gossos i ratolins podien viure durant unes quantes hores "respirant" aigua. Aquests animals finalment morien perquè augmentava la concentració de diòxid de carboni en la sang per damunt el límit admissible.

(Física/química) La viscositat és...

(Física) Solubilitat és...

(Física) Llei de Bernoulli...

(Física) Un fluid és...

3.7.9 Pulmons que bombegen aire o aigua?

El muntatge de la fig. 13, tot i que satisfà per complet la necessitat d'oxigen de l'animal, no assegura suficientment l'eliminació del diòxid de carboni format en l'organisme. En condicions normals (en estat de repòs), cada litre d'aire exhalat pels mamífers conté prop de 50 ml de CO_2 , i la solubilitat d'aquest gas en aigua és tal que cada litre, en les mateixes condicions, no pot contenir més de 30 ml de CO_2 . Per aquesta causa, per a evacuar tot el diòxid de carboni que es forma en l'organisme és necessari "bombejar" a través dels pulmons uns volums d'aigua quasi dues vegades majors que els volums necessaris d'aire. D'acord amb la llei de Bernoulli, la diferència de pressió requerida per al moviment, a velocitat determinada, d'un medi líquid (o gasós) —és a dir, d'un fluid— a través d'un tub de longitud i diàmetre coneguts, ha de ser proporcional a la viscositat d'aquest medi. I com que la viscositat de l'aigua és unes 30 vegades major que la de l'aire, resulta que la "respiració" amb aigua requerirà un consum d'energia aproximadament 60 vegades major.

Q37) D'on ix aquest valor, 60?

Q38) Explica breument quin significat té la magnitud viscositat i com la vas mesurar al laboratori de Física.

Així, la natura ens ha dotat de pulmons que són impossibles d'utilitzar en les profunditats marítimes, i per a la investigació d'aquestes profunditats hem d'utilitzar un batiscaf (embarcació submergible) o un submarí.

Per aquesta causa, l'oceà mundial, amb una profunditat mitjana de prop de 3 km i un àrea que ocupa un 70% de la superfície del planeta, no està pràcticament estudiat avui dia. I malgrat que en gener de 1960 J. Piccard i Walsh van assolir, en el batiscaf *Trieste*, el fons de la fosa de les Filipines (la profunditat de la qual supera els 11 km), els éssers humans han deixat menys petjades al fons dels mars, a 1 km de profunditat, que a la superfície de la Lluna.

3.8 Física (conceptes)

Concepte	Capítols	1r – 3r
----------	----------	---------

Acceleració centrípeta	1r	Fractals	3r
Acceleració	1r	Fregament (força)	1r
Acceleració de la gravetat	1r	Freqüència	1r
Adimensional (magnitud)	1r	Freqüència d'una ona	2n
Agitació tèrmica	2n	Fricció (força)	1r
Amplitud d'oscil·lació d'una ona	2n	Fricció (lleis de Stokes)	1r
Amplitud d'una ona	2n	Gas (pressió parcial)	1r
Àrea/volum i dimensions	3r	Gradient de pressió	2n
Bernoulli (lleis, fluids)	3r	Gravetat (acceleració)	1r
Caiguda lliure (temps de)	1r	Histèresi	3r
Canvi de fase en la reflexió	2n	Intensitat d'una ona	2n
Centre de gravetat	1r	Laminar (règim, fluids)	3r
Centrifugadora	3r	Laplace (fórmula, diferència de pressió en esfera elàstica)	3r
Centrípeta (acceleració)	1r	Longitud d'ona	2n
Coefficient de permeabilitat	1r	Llei de Bernoulli (fluids)	3r
Coefficient de tensió superficial	3r	Llei de Newton del refredament	1r
Cohesió (forces)	3r	Llei de Stokes del fregament	1r
Combustió	3r	Magnitud	1r
Concentració de saturació	3r	Magnitud (ordre)	1r
Condensació, nuclis	3r	Massa	1r
Conservació de l'energia (principi)	1r	Massa-volum d'un gas	3r
Constant de temps (d'un procés)	1r	Mòdul elàstic de Young	3r
Convecció	1r	Moviment tèrmic aleatori	2n
Decibel	2n	Newton (lleis del refredament)	1r
Densitat	1r	Nuclis de condensació	3r
Densitat	2n	Número adimensional	1r
Difracció	2n	Ones sonores	2n
Difusió	1r	Ordre de magnitud	1r
Dimensions d'una magnitud	1r	Parcial (pressió)	1r
Eco	2n	Permeabilitat (coeficient)	1r
Elàstic (mòdul de Young)	3r	Pes	1r
Elàstica (esfera, pressió)	3r	Potència	1r
Energia (principi de conservació)	1r	Potencial (energia)	3r
Energia cinètica	1r	Pressió	2n
Energia d'enllaç d'una molècula	1r	Pressió (gradient)	2n
Energia d'una ona	2n	Pressió atmosfèrica	1r
Energia mecànica	2n	Pressió en una esfera elàstica	3r
Energia potencial	1r	Pressió parcial d'un gas	1r
Energia potencial	3r	Principi de conservació de l'energia	1r
Esfera elàstica (fórmula de Laplace, diferència de pressió)	3r	Radiació	1r
Esfera elàstica (pressió)	3r	Reacció (força)	1r
Fase (canvi en la reflexió)	2n	Reflexió d'una ona	2n
Fluctuacions	1r	Reflexió i canvi de fase	2n
Fluids en règim laminar	3r	Refredament (lleis de Newton)	1r
Fluids en règim turbulent	3r	Règim laminar (fluids)	3r
Força	1r	Règim turbulent (fluids)	3r
Força (resultant)	3r	Relació àrea-volum i dimensions	3r
Força de la gravetat (pes)	1r	Relació massa-volum d'un gas	3r
Força de reacció	1r	Resistència (força)	1r
Força de resistència o fricció	1r	Resultant (força)	1r
Força resultant	1r	Resultant d'unes forces	3r
Forces de cohesió	3r	Saturació, concentració	3r
Fórmula de Laplace (diferència de pressió en esfera elàstica)	3r	Sinusoidal (variació)	2n

So	2n	Transició de règim laminar a turbulent (fluids)	3r
Solubilitat	3r	Transmissió d'una ona	2n
Soroll blanc	2n	Treball	1r
Stokes (llei de fricció)	1r	Treball	3r
Substàncies tensoactives	3r	Turbulent (règim, fluids)	3r
Superficial (tensió)	3r	Variació sinusoidal	2n
Temps (constant de)	1r	Velocitat	1r
Temps de caiguda lliure	1r	Velocitat de propagació d'una ona	2n
Tensió superficial (coeficient)	3r	Velocitat mitjana	2n
Tensoactives, substàncies	3r	Young (mòdul elàstic)	3r
Tèrmic (moviment d'agitació)	2n		
Transductor	2n		

Capítol 4. Mecànica del pols cardíac

El cor... quan es comprimeix i s'eixampla alternativament per a expulsar i admetre la sang, genera el pols o el batec que repercuteix en totes les venes palpitants del cos.

(Diccionari de la llengua catalana)

- 4.1 El cor, què és?
- 4.2 Les artèries i el pols
 - 4.2.1 La sang
 - 4.2.2 Els eritròcits
 - 4.2.3 Moviment de la sang i batecs
- 4.3 Velocitat de l'ona polsant
 - 4.3.1 Acceleració de la sang
 - 4.3.2 Dilatació de l'artèria
 - 4.3.3 Velocitat de propagació de l'ona polsant
 - 4.3.4 Elasticitat i edat
- 4.4 Reflexió de les ones polsants
- 4.5 Aneurisma
- 4.6 Circulació de la sang en la girafa i medicina còsmica
 - 4.6.1 Biologia còsmica
 - 4.6.2 Forces d'inèrcia
 - 4.6.3 Inèrcia i rigidesa dels vasos sanguinis
 - 4.6.4 Vestit antigravetat
 - 4.6.5 Animals "horitzontals"
 - 4.6.6 Les girafes hipertòniques
- 4.7 Mesurament de la pressió de la sang i de la velocitat del flux sanguini
 - 4.7.1 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode electromagnètic
 - 4.7.2 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de dilució de l'indicador
 - 4.7.3 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de la concentració d'oxigen
 - 4.7.4 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode ultrasònic
- 4.8 El color de la sang i la llei de conservació de l'energia
- 4.9 Física (conceptes)

4.1 El cor, què és?

El cor, quantes associacions evoca aquesta paraula que té tants sentits! Valor, ànim, esperit, caràcter, amor, afecte, centre d'una cosa, etc.

En el món primitiu ja es van adonar, en tallar els caps del bestiar en canal, d'un petit saquet muscular albergat en el centre del pit i que es contraïa rítmicament durant uns quants minuts en el cos de l'animal mort.

La simultaneïtat de la mort i l'aturada cardíaca va ser la causa de la identificació del cor d'una persona amb la seua ànima. Per això, ja en l'*Odissea* d'Homer trobem expressions com ara: "lamentar amb el cor", "omplir el cor de valor", "el desig del cor", etc.

El funcionament del cor es va començar a estudiar molt més tard. El 1628 el metge anglès Harvey va establir que el cor servia de bomba per a enviar sang pels vasos, i va calcular la quantitat de sang que hi envia el cor durant cada contracció. La massa de sang que el cor expulsa a les artèries durant dues hores supera considerablement la massa del cos humà. A partir d'aquest fet, Harvey va arribar a la conclusió que al cor, que fa de bomba hidràulica, retorna contínuament la mateixa sang.³⁸

El descobriment de Harvey va provocar una discussió llarga i acalorada...³⁹

Q0) Quants litres de sang bombeja el cor per minut, a la vista del que diem més amunt?

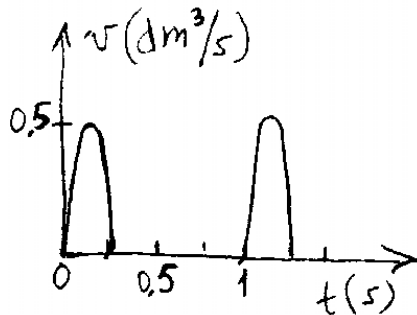


Fig. 1. Funcionament del cor considerat com una bomba. Velocitat de bombeig de la sang en funció del temps.

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

4.2 Les artèries i el pols

En l'actualitat, tot el món sap que el cor és una bomba que treballa en règim d'impuls amb una freqüència ≈ 1 Hz. Durant cada impuls, que dura uns 0.25 s, el cor d'una persona adulta té temps per a expulsar a l'aorta prop de 0.1 dm^3 (0.1 litre) de sang (fig. 1).

Q1) Explica per què parlem de dos temps, 0.25 i 1 s (1 Hz^{-1}).

Q2) Dedueix el valor esmentat de 0.1 dm^3 a partir de les dades de la fig. 1 (i compara'l amb el resultat de la Q0).

Q3) Compara la massa de sang posada en moviment en dues hores amb la massa del teu cos.

Des de l'aorta, la sang va cap als vasos més estrets, que s'anomenen *artèries*; aquestes transporten la sang a la perifèria.⁴⁰

³⁸ Harvey va utilitzar com a model del cor una bomba especial que s'utilitzava per a evacuar aigua de les mines, i no una bomba ordinària amb vàlvules.

³⁹ ... ja que des del temps d'Aristòtil es considerava que el moviment de la sang en l'organisme es feia per afluència (formació contínua) i reflux (desaparició). Ni Descartes, tot i que estava conforme amb la teoria de la circulació de Harvey, compartia la seua opinió sobre el paper del cor en aquest procés. Descartes considerava el cor com el que avui es podria comparar amb una màquina de vapor o, fins i tot, amb un motor de combustió interna. Opinava que el cor era una font de calor que escalfava la sang durant el pas per l'interior, i la sang mantenia aquesta calor en tot el cos; creia també que aquesta calor, des de l'inici de la vida d'una persona, es concentrava en les parets del cor. Així, només entrar la sang en la cavitat cardíaca, començava a bullir d'immediat i, en forma de vapor, passava al pulmó, en què era refredada contínuament per l'aire. En el pulmó, "els vapors es condensaven i tornaven a transformar-se en sang".

4.2.1 La sang

La sang és una suspensió de diferents cèl·lules en dissolució aquosa. La major part de les cèl·lules de la sang són els eritròcits, que n'ocupen prop del 45% del volum; cada mm^3 de sang conté vora 5 milions d'eritròcits. El volum ocupat pels altres elements (leucòcits i trombòcits) no supera un 1%. Dins els eritròcits trobem l'hemoglobina: un complex de la proteïna globina amb un grup orgànic (hemo) que conté un àtom de ferro. L'hemoglobina dóna el color roig als eritròcits (i a tota la sang), i l'aptitud de l'hemoglobina de combinar-se reversiblement amb l'oxigen assegura la gran capacitat de combinació de la sang amb oxigen⁴¹. Un litre de sang sense eritròcits pot combinar tan sols 3 ml d'oxigen (a pressió atmosfèrica), però un litre de sang normal és capaç de combinar-ne 200 ml. Aquesta aptitud és la que permet que la sang acompleixi la funció principal, la d'abastir d'oxigen les cèl·lules de l'organisme.

Q4) En quants ordres de magnitud augmenta la capacitat de la sang de combinar oxigen gràcies als eritròcits?

Q5) Quina concentració d'oxigen en sang és possible?

4.2.2 Els eritròcits

Els eritròcits són discos bicòncaus molt flexibles (fig. 2), tenen una membrana molt prima (7.5 nm) i contenen líquid, una dissolució quasi saturada d'hemoglobina. Tot i que el diàmetre dels eritròcits és de vora $8 \mu\text{m}$, aquests poden passar, sense destruir-se, per capil·lars que tenen un diàmetre de $3 \mu\text{m}$. En passar es deformen enormement, i s'assemblen a un casquet de paracaigudes, o s'enrotllen en forma de tub. Com a resultat, la superfície de contacte de l'eritròcit amb la paret del capil·lar augmenta mentre passa per aquest, (en comparació amb el moviment de l'eritròcit no deformat) i també augmenta la velocitat d'intercanvi dels gasos.

Q6) Explica les dues afirmacions anteriors (augment de superfície de contacte i de velocitat d'intercanvi).

Com expliquem l'aptitud dels eritròcits de deformar-se amb facilitat? Es pot demostrar que un cos de forma esfèrica té, per a un volum donat, la superfície mínima. Això significa que si l'eritròcit tinguera forma esfèrica, aleshores, per a qualsevol deformació, l'àrea de la membrana hauria d'augmentar. Per consegüent, també la flexibilitat dels eritròcits esfèrics es limitaria a la rigidesa de la seua membrana cel·lular. Però com que un eritròcit no té forma esfèrica, la seua deformació pot no estar acompanyada de variació de l'àrea de la superfície de la membrana i, com a conseqüència, l'eritròcit, sense dificultat –és a dir, sense sotmetre la membrana a tensions–, és capaç de prendre formes molt diverses.

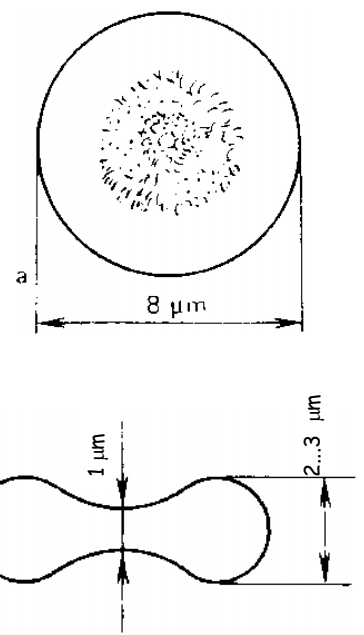


Fig. 2. Eritròcit: a) vist des de dalt; b) vista lateral.

Relació àrea-volum

⁴⁰ L'ètim grec de la paraula *artèria* significava 'conduïte aeri'. Se sap que en els animals morts la major part de la sang es troba en les venes, o siga, en els vasos pels quals la retorna sang al cor. Per això, les venes dels cadàvers són inflades i les artèries, aplanades. Si fem un tall en una artèria, aquesta immediatament s'emplena d'aire i pren forma cilíndrica. Sembla que aquesta circumstància va originar el nom de conduïte aeri d'aquest vas sanguini.

⁴¹ Un dels científics que va estudiar el mecanisme pel qual la sang cedeix l'oxigen als teixits de l'organisme va ser Christian Bohr, pare del famós físic Niels Bohr. La relació que va descobrir entre la capacitat de la sang de combinar-se amb oxigen i la concentració dels ions hidrogen s'anomena efecte de Bohr.

(Física) El mòdul de Young és...
i es mesura en...

S'ha descrit una malaltia hereditària de la sang (esferocitosis) en la qual els eritròcits tenen forma esfèrica i el seu diàmetre és d'unes 6 μm . La membrana d'aquests eritròcits, durant el moviment pels capil·lars fins, sempre es troba en estat tens i amb freqüència es trenca. El resultat és que el nombre d'eritròcits en la sang dels malalts és més baix i tots pateixen anèmia.

Q7) A la vista dels paràgrafs anteriors, explica per què està tensa la membrana d'un eritròcit si la persona pateix esferocitosis.

4.2.3 Moviment de la sang i batecs

El moviment de la sang pels vasos és un procés bastant complicat. La paret de l'aorta, com totes les artèries, és molt elàstica; té un mòdul de Young $E \approx 10^6 \text{ N/m}^2$, que és unes 10^5 vegades menor que el dels metalls.

Q8) A la vista de la definició de mòdul d'elasticitat de Young d'un cos, E , com la relació entre la tensió de tracció (la força que s'aplica per unitat de superfície del cos) i l'allargament del cos que provoca per unitat de longitud,

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{F}{S} \quad (1)$$

per què és menys elàstic un material que té un mòdul de Young més gran?

Q9) Calcula quant s'estira un fil metàl·lic llarg del qual et penges (inventa't les dades que necessites).

(Física) Una ona és...
i es caracteritza per...

(Física) Velocitat de l'ona de deformació de l'artèria és...
i es mesura en...

(Física) Velocitat de l'ona de compressió de la sang és...
i es mesura en...

Per això, quan la sang entra en l'aorta, aquesta comença a eixamplar-se fins que l'afluència de sang cessa. Les forces elàstiques de la paret eixamplada de l'aorta tendeixen a fer-la tornar a les dimensions inicials i expulsen la sang a una part de l'artèria més allunyada del cor (el corrent invers està previngut per una vàlvula). Aquesta nova part de l'artèria s'eixampla i tot es repeteix de nou. Si la deformació de la paret de l'artèria es registra simultàniament en dos punts allunyats del cor, resultarà que aquesta deformació aconsegueix els valors màxims en diferents instants de temps. Com més lluny del cor estiga el punt de registre, més tard arribarà al màxim la deformació del vas. Per això, després de cada contracció del cor una ona de deformació es propaga al llarg de l'artèria i cap a la perifèria, igual que les ones es propaguen per una corda tensa pertorbada (com per una corda de guitarra) o per la superfície de l'aigua quan s'hi llança una pedra. Si posem un dit sobre l'artèria que es troba prop de la superfície del cos (per exemple, en el canell), percebem les ones com a batecs.

Hem d'assenyalar que la velocitat de propagació de l'ona de deformació d'un vas sanguini es diferencia considerablement de la velocitat de propagació d'una ona de compressió en la sang. La velocitat d'una ona de compressió en la

sang és igual a la velocitat de propagació del so, de centenars de metres per segon, mentre que les ones de deformació de les artèries recorren per segon no més d'uns quants metres.⁴²

4.3 Velocitat de l'ona polsant

L'ona de deformació de les parets de l'artèria, que es propaga al llarg d'aquesta, rep el nom d'ona polsant. Es va mesurar la velocitat de propagació de l'ona polsant tan sols a principis del segle XX, quan van aparèixer els primers instruments enregistradors de resposta ràpida (sense inèrcia). El valor de la velocitat oscil·la de 5 a 10 m/s i supera en 10 vegades la velocitat mitjana del moviment de la sang pels vasos sanguinis.

Q10) Compara aquesta velocitat amb la d'un cotxe.

Q11) Per què es parla de dues velocitats?

Q12) Imagina una cadena de 100 m. Si estires bruscament un poc d'un extrem, quina velocitat és major: la de transmissió de l'estirada entre un extrem i l'altre o la velocitat a la qual es mou cada baula?

La velocitat de propagació de l'ona polsant depèn de l'elasticitat de la paret arterial i, per això, pot servir d'indici de la presència o no de malalties. Analitzem tot seguit, amb més detall, el procés de propagació de l'ona polsant i trobem l'expressió matemàtica per a la velocitat de propagació.

Q13) Per què intervé l'elasticitat arterial en la velocitat de propagació de l'ona de deformació?

Imaginem, fig. 3, que l'artèria té un diàmetre exterior d i té forma de cilindre molt llarg (per poder menysprear els efectes dels límits). Posarem que les parets del cilindre tenen un gruix h i estan fetes d'un material que té un mòdul de Young E . Suposem també que la pressió P de la sang en un punt que està a la distància x_0 del cor varia amb el temps de la manera que mostra la fig. 4, i que θ és la velocitat de propagació de l'ona polsant.

Q14) Explica què significa el temps x_0/θ i què són τ_1 i τ_2 (fig. 4).

Si considerem que l'ona polsant es propaga al llarg del vas, sense esmorteir-se, a la velocitat θ , aleshores la distribució de la pressió al llarg del vas tindrà la forma de la fig. 5. D'aquesta figura es desprèn que la sang, en un punt donat de l'artèria, es mourà només si a través d'aquest punt passa l'ona

(Física) Inèrcia és...

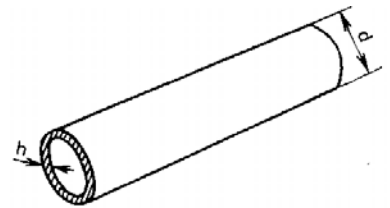
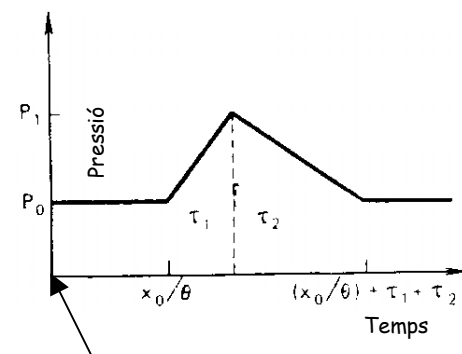


Fig. 3. Representació esquemàtica d'una artèria.

(Física) L'efecte dels límits és...



Començament de l'expulsió de la sang des del cor

Fig. 4. Variació temporal (postulada en el model) de la pressió de la sang en un punt de l'artèria allunyat del cor a una distància x_0 .

⁴² Es va aprendre a mesurar la freqüència, el ritme i l'amplitud del pols d'una persona molt abans de conèixer l'origen d'aquest pols. En el III mil·lenni a. de la n.e., l'emperador xinès Hoam-Tou i el metge de la cort Li-Pe es valien del registre del pols per a fer-ne un diagnòstic. La senzillesa de la mesura del pols (no hi ha necessitat d'instruments, tan sols un cronòmetre) el converteix en un dels principals indicis de l'estat de la salut, fins i tot en l'actualitat.

polsant. Un moviment d'impuls de la sang com aquest es dona en les artèries grans que ixen del cor, i en les quals es pot prescindir de l'extinció de l'ona polsant. Anem a veure la propagació de l'ona polsant en aquests vasos.

Q15) Explica per què el punt de baixada de la corba de les fig.4 i 5 està en $(x_0/\theta) + \tau_1 + \tau_2$ i en x_0 , respectivament, i no en $x_0 + \theta(\tau_1 + \tau_2)$.

4.3.1 Acceleració de la sang

Sobre la sang que es troba en l'etapa de pressió ascendent de la fig. 4 actua una força de compressió que accelera aquesta massa de sang. Calcula l'acceleració que provoca aquesta pressió. En l'instant de temps x_0/θ , calculat des del començament de la contracció del cor, sobre la massa de sang que es troba entre les seccions transversals $x_0 - \theta\tau_1$ i x_0 , al llarg de l'eix de l'artèria, actuarà una força igual a la diferència de les forces de pressió aplicades a aquestes seccions transversals,

$$(P_1 - P_0) \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

Q12) Dedueix l'expressió anterior.

Com que la massa de sang que hi ha entre les seccions anteriors és igual a

$$\rho \theta \tau_1 \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

Q17) Dedueix l'expressió anterior.

en què ρ és la densitat de la sang, resulta que, de la segona llei de Newton ($F = m \cdot a$), és possible obtenir el valor de l'acceleració d'aquesta massa de sang,

$$a_+ = \frac{P_1 - P_0}{\rho \theta \tau_1} \quad (4)$$

Q18) Dedueix l'expressió anterior i comprova que és dimensionalment correcta.

Si menyspreem la velocitat de moviment de la sang, per ser petita en comparació amb la velocitat de propagació de l'ona polsant (com ja hem indicat en l'inici de la secció *Velocitat de l'ona polsant*), la massa de sang situada prop del punt x_0 es mourà durant el temps τ_1 amb l'acceleració a_+ ; després d'això, el moviment de la sang començarà a fer-se més lent, mentre que l'acceleració negativa corresponent (a_-) actua durant l'interval de temps τ_2 de la fig. 4, podem deduir que arribarà a ser

$$a_- = \frac{P_1 - P_0}{\rho \theta \tau_2} \quad (5)$$

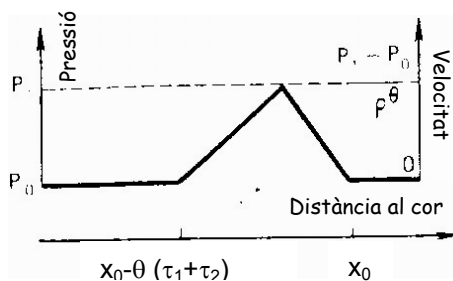


Fig. 5a. Distribució espacial de la pressió (eix esquerre) i de la velocitat de la sang (eix dret), al llarg de l'artèria, després d'un interval de temps x_0/θ des del començament de l'expulsió de la sang des del cor cap a l'aorta. (θ) és la velocitat de l'ona polsant. Fixa't que la representació de la fig. 4 és en funció del temps i aquesta és en funció de la distància.

Moviment de la sang



Fig. 5b. Representació esquemàtica de la dilatació de l'artèria quan es propaga l'ona polsant.

El resultat és que durant l'interval de temps τ_1 , quan la pressió en el punt x_0 va augmentant, la sang que es troba en aquesta zona eleva la velocitat des de zero fins a $a \cdot \tau_1$.

Q19) Explica la diferència entre la velocitat θ (de l'ona) i la velocitat $a \cdot \tau_1$ o $a \cdot \tau_2$ (de la sang)

(Física) La 2a llei de Newton indica que...

i serveix per a...

En l'interval següent de temps τ_2 , la velocitat de la sang en el punt donat disminuirà en $(P_1 - P_0)/(\rho\theta)$ i tornarà a zero.

Q20) Mostra que el quocient $(P_1 - P_0)/(\rho\theta)$ té dimensions de velocitat.

Per això, la distribució de la velocitat al llarg del vas en el temps x_0/θ tindrà l'aspecte de la fig. 5.

4.3.2 Dilatació de l'artèria

Per quina raó augmenta el volum de sang que hi ha entre la secció que va del punt $x_0 - \theta \cdot (\tau_1 + \tau_2)$ al punt x_0 , en l'interval de temps entre $(x_0/\theta) - \tau_1 - \tau_2$ i x_0/θ ? L'augment es deu al fet que la quantitat de sang que arriba a aquesta porció de l'artèria supera la quantitat de sang que n'ix. La velocitat de la sang que abandona aquesta porció de l'artèria, durant aquest lapse, és igual a zero (no ix sang), però la velocitat de la sang que afluïx és distinta de zero, i el valor mitjà de la velocitat per a aquest interval de temps $(\tau_1 + \tau_2)$ val

$$\frac{P_1 - P_0}{2\rho\theta} \quad (6)$$

Q21) Demuestra l'equació anterior.

D'aquesta manera, durant l'interval de temps $\tau_1 + \tau_2$, la velocitat d'afluència de la sang a la porció de l'artèria esmentada anteriorment supera, en valor mitjà, la velocitat de reflux en el valor donat per l'eq. (6).

Com que la sang és pràcticament incompressible, l'augment de volum de l'artèria, ΔV , es pot obtenir en multiplicar l'increment de la velocitat d'afluència sobre la velocitat de reflux, per l'àrea de la secció transversal del vas i per l'interval de temps:

$$\Delta V = \frac{P_1 - P_0}{2\rho\theta} \frac{\pi d^2}{4} (\tau_1 + \tau_2) \quad (7)$$

Q22) Comprova que l'expressió anterior té les dimensions correctes.

D'altra banda, si considerem que el diàmetre de la porció eixemplada de l'artèria augmenta en Δd en valor mitjà, en comparació amb la part restant; aleshores, si menyspreem termes quadràtics $(\Delta d)^2$ en comparació amb $d \cdot \Delta d$, tenim

$$\Delta V = \frac{\pi d \Delta d}{2} \theta (\tau_1 + \tau_2) \quad (8)$$

Q23) Explica per què es poden negligir termes quadràtics.

4.3.3 Velocitat de propagació de l'ona polsant

Quan igulem (7) i (8), obtenim l'expressió següent per a la velocitat de propagació de l'ona polsant

$$\theta = \sqrt{\frac{P_1 - P_0}{\Delta d / d} \frac{1}{4\rho}} \quad (9)$$

(Física) Cinemàtica és...

Dinàmica és...

Q24) Comprova que aquesta expressió té les dimensions correctes.

En aquesta expressió, obtinguda a partir de les lleis de la cinemàtica i de la dinàmica del moviment de la sang pel vas, apareix la deformació relativa de les parets del vas, $\Delta d/d$, l'augment de la pressió de la sang en el vas, $P_1 - P_0$, i la densitat de la sang, ρ . La relació entre les primeres dues magnituds es pot trobar a partir de la llei de Hooke, la qual lliga la magnitud de la deformació relativa del material amb la força que provoca aquesta deformació, a través del mòdul de Young, E .

(Física) La llei de Hooke estableix que...

Q25) Expressa matemàticament la llei de Hooke.

L'expressió definitiva per a la velocitat de propagació de l'ona polsant és, doncs,

$$\theta = \sqrt{\frac{Eh}{d\rho}} \quad \text{velocitat de l'ona polsant} \quad (10)$$

Q26) Comprova les dimensions d'aquesta expressió.

Si suposem que $h/d = 0.1$, $E = 10^6 \text{ N/m}^2$ i $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$, l'expressió anterior dona el valor $\theta \approx 10 \text{ m/s}$, valor pròxim al valor mitjà mesurat experimentalment de la velocitat de propagació de l'ona polsant.

Q27) Explica el valor de les magnituds anteriors i comprova que el càlcul és correcte.

4.3.4 Elasticitat i edat

Investigacions anatòmiques mostren que la magnitud h/d varia poc d'una persona a una altra i, pràcticament, no depèn del tipus d'artèria. Per això, si tenim en compte el caràcter constant de h/d , es pot considerar que la velocitat de l'ona polsant varia tan sols quan canvia l'elasticitat de la paret de l'artèria; és a dir, el mòdul de Young, E . Amb l'edat, i també durant les malalties acompanyades d'un augment del mòdul de Young de la paret de les artèries (hipertensió i arteriosclerosi), θ pot augmentar de 2 a 4 vegades en comparació amb l'estat normal (taula 1). Aquesta circumstància permet utilitzar la mesura de θ per fer diagnòstics.⁴³

⁴³ La fórmula (10) per a la velocitat de propagació de les ones polsants en les artèries va ser deduïda per primera vegada per l'anglès Young en 1809. Avui recordem Young per la teoria ondulatoria de la llum i, d'altra banda, perquè el mòdul d'elasticitat dels materials duu el seu nom. Però va ser també autor de treballs clàssics en el camp de la

Q28) Per què augmenta E amb l'edat? Per què augmenta, aleshores, θ ?

Taula 1. Variació de la velocitat de propagació de l'ona polsant per la part toràcica de l'aorta d'una persona, en funció de l'edat i la pressió sanguínia mitjana.

	p (kPa) =	6.5	13	19.5	26
edat: 20-24	θ (m/s) =	3.3	3.6	4.5	5.7
36-42		3.5	4.9	6.7	8.9
71-78		4.6	7.6	11.1	14.7

4.4 Reflexió de les ones polsants

Com ocorre a totes les ones, les ones polsants de les artèries tenen la capacitat de reflectir-se en els llocs en què varien les condicions de propagació. Per a les ones polsants, aquests llocs són les zones de ramificació de les artèries (fig. 6a). L'ona reflectida en el punt de ramificació se suma a la primària i, com a resultat, la corba de variació de la pressió de la sang en el vas presenta dues crestes⁴⁴ (fig. 6b).

Q29) Fes aquest càlcul per a les dades de la fig. 6b.

De vegades, la corba de variació de la pressió en el vas sanguini té més de dos màxims, fet que indica el caràcter múltiple de reflexió de l'ona polsant.

L'ona polsant reflectida, igual que la primària, està acompanyada d'una deformació de la paret de l'artèria. Tanmateix, mentre que l'energia de deformació elàstica de les parets, creada per la propagació de l'ona primària, es transforma en energia cinètica de moviment de la sang des del cor cap a la perifèria, l'ona reflectida impedeix el flux normal de la sang. Per això, la reflexió de les ones arterials dificulta el funcionament normal del sistema de circulació sanguínia.

De què depèn l'amplitud de l'ona polsant reflectida? Suposem que l'ona polsant troba en el camí de propagació una ramificació igual a la de la fig. 6. En aquest cas, la variació ΔP de la pressió en el lloc de bifurcació ha de ser igual a la suma de les pressions creada per les ones incident (ΔP_{inc}) i reflectida (ΔP_{ref}); és a dir,

$$\Delta P_{inc} + \Delta P_{ref} = \Delta P \quad (11)$$

És evident que la massa de sang que afluïx al lloc de bifurcació amb l'ona polsant⁴⁵ ha de ser igual a la suma de les masses que reflueixen amb les ones polsants per les artèries B i C, i podem escriure⁴⁶

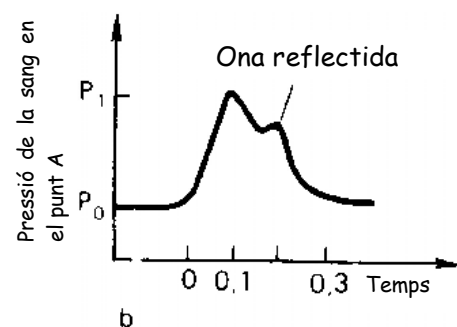
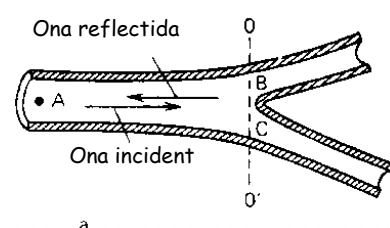


Fig. 6. Sorgiment de l'ona polsant reflectida en el lloc de la ramificació de l'artèria: a) tall de l'artèria ramificada; b) variació de la pressió arterial quan hi ha una reflectida.

teoria de la circulació de la sang. Young fou una personalitat extraordinària: als 2 anys sabia llegir i als 14 parlava a la perfecció 10 idiomes, tocava quasi tots els instruments musicals i tenia habilitats pròpies d'un artista de circ. Durant tota la seua vida va combinar dues professions: metge practicant i físic.

⁴⁴ A partir de l'interval entre els màxims en la corba de pressió, i coneguda la velocitat de propagació de l'ona polsant, és possible avaluar la distància que separa el punt de ramificació del punt de registre de la pressió.

⁴⁵ Recorda que l'ona polsant se superposa al moviment (flux) ordinari de la sang.

⁴⁶ Examinarem tan sols el transport de la sang per l'ona polsant; és a dir, no tenim en compte la component constant de la velocitat de moviment de la sang, ja que aquest moviment no influeix en el procés de reflexió de l'ona polsant.

$$M_{inc} - M_{ref} = M_B + M_C \quad (12)$$

en què M_{inc} i M_{ref} són les masses de sang transportades en una unitat de temps a través de la secció OO' de l'artèria A per les ones incident i reflectida, respectivament, i M_B i M_C , les velocitats de transferència de la massa de la sang per l'ona polsant al principi de les artèries B i C, respectivament. Com hem demostrat abans, fig. 5, i eq. (4) o (5), la variació de la velocitat de la sang quan passa l'ona polsant és igual a

$$\Delta v = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (13)$$

on ΔP és la variació de la pressió durant la propagació de l'ona polsant. Per consegüent, la massa de la sang transportada per l'ona polsant en una unitat de temps a través de la secció transversal S del vas és igual a

$$M = \Delta v \cdot S \cdot \rho \quad (14)$$

Q30) Explica l'expressió anterior.

Si tenim en compte (13) i (14), l'expressió (12) es pot escriure així:

$$\frac{\Delta P_{inc}}{\theta_A} S_A - \frac{\Delta P_{ref}}{\theta_A} S_A = \frac{\Delta P}{\theta_B} S_B + \frac{\Delta P}{\theta_C} S_C \quad (15)$$

en què θ_A , θ_B , i θ_C són les velocitats de l'ona polsant per les artèries A, B i C, respectivament, i S_A , S_B i S_C , les seccions transversals d'aquestes artèries. Quan resollem les eq. (15) i (11) obtenim

$$\frac{\Delta P_{ref}}{\Delta P_{inc}} = \frac{\frac{S_A}{\theta_A} - \left(\frac{S_B}{\theta_B} + \frac{S_C}{\theta_C} \right)}{\frac{S_A}{\theta_A} + \left(\frac{S_B}{\theta_B} + \frac{S_C}{\theta_C} \right)} \quad (16)$$

D'aquest resultat es pot deduir que l'ona reflectida no està present si el numerador del segon membre en l'eq. (15) s'anul·la.

Q31) Calcula el % reflectit per a $d_A = 2.5 \text{ cm}$, $d_B = 1 \text{ cm}$, i $d_C = 1.5 \text{ cm}$.

Si considerem que la velocitat de propagació de l'ona polsant no varia després de la ramificació, ja que h/d i E romanen invariables, aleshores $\theta_A = \theta_B = \theta_C$ i l'ona reflectida estarà absent a condició de què

$$S_A = S_B + S_C \quad (17)$$

Cal assenyalar que la major part de les ramificacions de les artèries grans satisfà en un grau o altre la igualtat (17), que requereix que la secció transversal del canal sanguini siga constant abans i després de la ramificació. Per tant, l'ona no pateix reflexió, normalment. Tanmateix, en alguns casos la igualtat (17) no es dona, i ara veurem què implica aquesta circumstància.

4.5 Aneurisma

Després de cada contracció del cor en l'aorta augmenta la pressió sanguínia⁴⁷, les parets de l'aorta es dilaten i a través seu es propaga l'ona polsant. Aquesta dilatació rítmica de la paret es repeteix prop de 10^5 vegades al dia i 2500 milions de voltes, aproximadament, durant tota la vida.

Q32) Explica d'on ixen els valors 10^5 o 2500×10^6 .

En principi, l'estructura de la paret de l'aorta és capaç de resistir aquests colps hidràulics rítmics. Tanmateix, en algunes ocasions, la paret de l'aorta no els suporta, comença a dilatar-se i forma un aneurisma. Una vegada iniciada, la dilatació tendeix a augmentar cada vegada més i, finalment, l'aneurisma es trenca i causa la mort. La probabilitat de formació de l'aneurisma augmenta amb l'edat.

El lloc on es forma habitualment l'aneurisma és la part abdominal de l'aorta, un poc per damunt la ramificació (fig. 7). L'aneurisma apareix en la zona de reflexió de l'ona polsant, on l'aorta es ramifica. Com hem demostrat abans —eq. (16)—, l'amplitud de l'ona reflectida és proporcional a la diferència entre l'àrea de la secció transversal del vas abans de la ramificació, i l'àrea de la secció total després de la ramificació. Amb l'edat, aquesta diferència augmenta per causa de l'estrenyiment de les artèries perifèriques. Com a resultat, s'incrementa l'amplitud de l'ona polsant reflectida, cosa que duu a una dilatació major de les parets de l'aorta en aquest lloc.

El creixement de l'aneurisma és una manifestació de la llei de Laplace, l'astrònom i matemàtic francès que va descobrir la relació entre la tensió T que dilata la paret del vas sanguini⁴⁸, el radi R del vas, el gruix h de la paret del vas i la pressió P dins el vas

$$T = PR/h \quad (18)$$

S'utilitza amb més freqüència una altra notació de la llei de Laplace; en el primer membre s'escriu el producte $T \cdot h$, que és numèricament igual a la força que dilata la paret del vas per unitat de longitud. Si escrivim $T \cdot h = T'$, la llei de Laplace s'expressa així

$$T' = PR \quad (19)$$

A partir de la llei de Laplace observem que quan augmenta P ha d'augmentar també T , fet que ens porta a la dilatació de la paret i a l'increment del radi R del vas. Però com que resulta que el volum de la paret de l'aorta és constant, l'augment del radi de l'aorta ha d'estar acompanyat de l'aprimament de la paret. Per això, quan augmenta P també ha d'augmentar la relació R/h , fet que implica un creixement encara major de T , i així successivament. D'aquesta manera, qualsevol augment de la pressió arterial sembla que ha de provocar un creixement en allau de R i una disminució de h , que conduirà al trencament de l'aneurisma. Per què, aleshores, aquest fenomen es produeix en realitat molt rarament i, per general, tan sols en edat avançada?

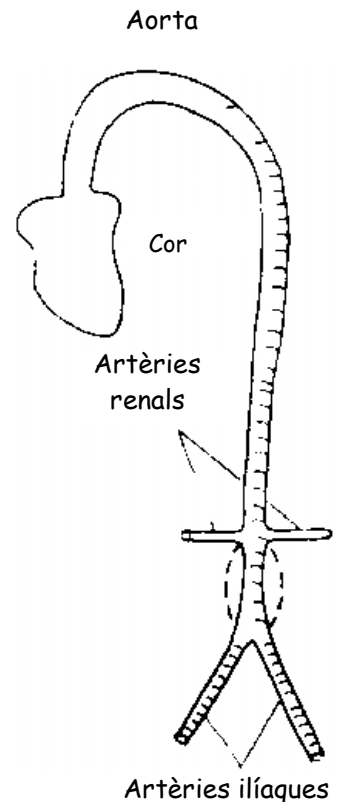


Fig. 7. Lloc de l'aparició de l'aneurisma de l'aorta (designat amb traços).

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

⁴⁷ Ací i en endavant entenem com a pressió de la sang la diferència entre la pressió vertadera i l'atmosfèrica. Precisament aquesta diferència és la que dilata els vasos sanguinis i dóna la possibilitat a la sang de circular a través seu.

⁴⁸ La tensió es defineix com la relació entre la força aplicada i l'àrea de la secció transversal de la paret del vas, $T = F/S$, en la notació de l'eq. (1).

(Física) La llei de Laplace indica que...

La causa de l'aparició de l'aneurisma no és només l'increment de l'amplitud de la pressió arterial, sinó també el canvi de les propietats mecàniques de la paret arterial. L'aorta d'una persona té un diàmetre interior d'uns 2.5 cm, i el gruix de la paret és de 2 mm. Aquesta paret té cèl·lules amb dos tipus principals de materials elàstics: elastina i col·lagen. En la paret no dilatada del vas, les fibres colàgenes no estan totalment redreçades. Per això, per a deformacions petites, l'elastina —que és de fàcil dilatació— determina l'elasticitat de la paret de l'aorta. En canvi, per a deformacions grans, les propietats mecàniques de la paret de l'aorta estan determinades pel col·lagen, que té una rigidesa molt major que l'elastina. Per aquesta causa, la dependència del radi de l'aorta respecte de la tensió T' que dilata les parets es pot aproximar mitjançant dues rectes i té la forma de la fig. 8. En edat avançada, les propietats del col·lagen varien, aquest esdevé menys rígid, i la paret de l'aorta arriba a ser fàcilment dilatada (veges la corba de traços i punts de la fig. 8).

A partir de les característiques elàstiques de la paret de l'aorta i de la llei de Laplace, podem trobar les variacions del radi del vas quan canvia la pressió sanguínia. Com que el valor de R està relacionat linealment amb T' per l'equació de Laplace (19) i, d'altra banda, s'ha de satisfer la relació $R(T')$ que dóna l'elasticitat de la paret de l'aorta, resulta que, per a cada P , el valor corresponent de R es pot obtenir quan trobem l'ordenada del punt d'intersecció de la corba contínua (o, alternativament, la corba de traços i punts) en la fig. 8 amb la recta de traços. Quan augmenta P , la inclinació de la línia de traços disminueix i s'aproxima a la inclinació de la porció *col·làgena* de la corba contínua. Quan aquestes pendents arriben a ser iguals, no hi ha punt d'intersecció de les rectes (el valor de R creix amb desmesura), cosa que correspon al creixement en allau i al trencament de l'aneurisma.

Per a la gent jove es manifesta una inclinació així de gran de la recta de traços si la pressió és de prop de 130 kPa (1000 mm de Hg), valor que supera de 6 a 8 vegades la pressió arterial típica.

En les persones d'edat avançada la rigidesa de la paret de l'aorta pot disminuir quasi 5 vegades, i la pressió arterial pot elevar-se fins a 26 kPa (200 mm de Hg), cosa que fa més possible l'aparició i el trencament de l'aneurisma. En la gràfica 8 això correspon a la corba de traços i punts, que té major pendent en la zona de col·lagen.

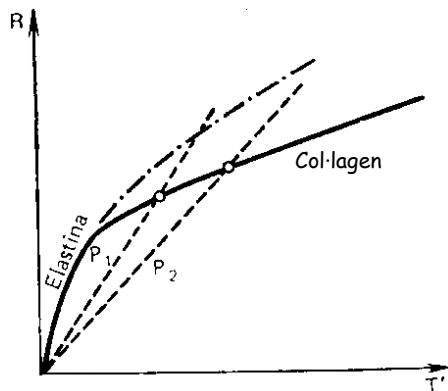
Q33) Comprova la relació entre els valors 130 kPa i 1000 mmHg esmentats en el text.

4.6 Circulació de la sang en la girafa i medicina còsmica

4.6.1 Biologia còsmica

Qui no ha somiat a volar al cosmos i observar la Terra des del vast espai? Aquest somni, per desgràcia, només es pot convertir en realitat per a algunes persones. La professió de cosmonauta és molt complicada i també perillosa, tot i que milers de persones preparen el vol còsmic i resolen problemes relacionats. Una part considerable d'aquests problemes pertanyen a la biologia, al nou camp de la biologia còsmica.

Fig. 8. Dependència entre el radi R de l'aorta i la tensió T' que estira les parets. La corba contínua en negre és la del material biològic. La corba a traços i punts correspon a edats avançades. La recta, per a cada P , és la llei (física) de Laplace.



La primera prova que ha d'afrontar el cosmonauta quan s'enlaira és l'acceleració a la qual és sotmès, amb la nau, quan pren velocitat ràpidament. Durant la posada en òrbita de la nau com a satèl·lit artificial de la Terra, i durant uns 5 minuts, sobre el cosmonauta actua una acceleració que pot variar d'1 g a 7 g. Podem dir que el pes del cosmonauta durant l'enlairament de la nau pot assolir un valor sèptuple. Les acceleracions també es fan sentir durant el retorn a la Terra, quan el cosmonauta entra en les capes denses de l'atmosfera. És natural que l'augment del pes del cosmonauta dificulte els seus moviments. Serà molt difícil alçar una mà, que haurà augmentat 7 vegades de pes, per a connectar un commutador del tauler de comandament. Per aquesta raó, en els períodes en què actuen sobrecàrregues és a dir, durant l'enlairament de la nau i durant la frenada, la majoria de les operacions relacionades amb el comandament de la nau han de ser automatitzades.

Tanmateix, la dificultat de moviment quan augmenta el pes del cosmonauta és només un dels aspectes —que se suporta amb facilitat relativa— de l'acció de les acceleracions en el vol còsmic. Són molt més perillosos els desplaçaments de molts teixits i d'alguns òrgans interns, que ocorren en la direcció de les forces d'inèrcia.

(Física) Forces d'inèrcia són ..

4.6.2 Forces d'inèrcia

Com a exemple d'acció d'aquestes forces pot servir la caiguda dels passatgers en un autobús durant una frenada molt brusca. Les forces d'inèrcia estan dirigides en sentit oposat a l'acceleració del cos. En funció de la densitat dels òrgans interns, de la disposició i l'elasticitat dels lligaments amb els teixits envoltants, les forces d'inèrcia poden ocasionar diversos trastorns de les funcions de l'organisme.

És evident que la part més mòbil de l'organisme és la sang. Per això, les anomalies més importants durant l'acció de les acceleracions es produeixen en el sistema de circulació de la sang. Si l'acceleració està dirigida de la pelvis al cap, l'acció de les forces d'inèrcia provoca el reflux de la sang des dels vasos del cap i l'afluència als òrgans de la part inferior del cos. En resulten possibles trastorns de la vista i, fins i tot, desmaís. Si l'acceleració actua durant un minut amb aquesta orientació, el valor màxim no ha de superar 3 g si no es volen causar trastorns greus.

Q34) En quant de temps has d'alçar (o baixar) una mà si vols provocar que patisca una acceleració d'1 g? I de 3 g?

Q35) A quina acceleració equival un colp de mà sobre la taula?

4.6.3 Inèrcia i rigidesa dels vasos sanguinis

Si les parets dels vasos sanguinis tingueren rigidesa absoluta, l'acció de les forces d'inèrcia no conduiria a la redistribució de la sang en l'organisme. Tots els efectes de les acceleracions en el sistema de circulació de la sang estan relacionats amb l'elevada extensibilitat de les parets dels vasos sanguinis; per aquesta extensibilitat, la variació de la pressió de la sang pot canviar el volum dels vasos sanguinis i també el volum de la sang que contenen.

Sabem que la pressió de l'aigua d'un recipient que es troba en el camp gravitatori de la Terra augmenta amb la profunditat, de manera que per cada 10 cm de profunditat la pressió s'incrementa en 1 kPa.

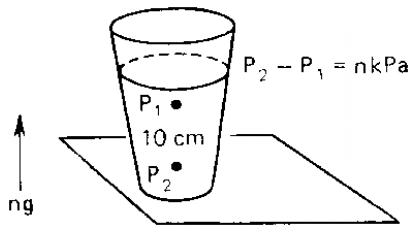


Fig. 9. Variació de la diferència de pressió hidrostàtica entre dos punts durant l'acceleració del líquid.

(Física) Acceleració 3g és...

Q36) Comprova aquest valor (quina és la pressió atmosfèrica normal?)

Si el recipient es mou amb l'acceleració ng , la pressió de l'aigua disminuirà en n kPa en la direcció del vector d'aquesta acceleració per cada 10 cm (fig. 9). La pressió arterial de la sang en una persona sana al nivell del cor és de 16 a 18 kPa, i en posició asseguda el cap està uns 40 cm per dalt el cor; per això, en absència d'acceleracions, la pressió de la sang en les artèries grans del cap va de 12 a 14 kPa, i resulta suficient per produir-ne la dilatació.

Q37) Explica i comenta aquests valors de distàncies i diferències de pressió.

Durant un moviment amb una acceleració de 3 g en direcció de la pelvis al cap, la pressió arterial en els vasos del cap disminueix en 12 kPa i arriba a ser, pràcticament, igual a l'atmosfèrica.

Q38) Explica l'afirmació anterior (recorda que la pressió de la sang és, realment, una sobrepressió respecte de l'atmosfèrica).

Els vasos sanguinis es desinflen i el flux de sang disminueix bruscament. Per això, per a aquestes acceleracions (3 g) les cèl·lules del cervell comencen a tenir escassetat d'oxigen, fet que condueix a la pèrdua del coneixement.

Per la mateixa raó, la pressió en els vasos de les extremitats inferiors creix durant les acceleracions orientades cap a dalt, i pot assolir 75 kPa per a 3 g.

Q39) Explica el valor anterior.

L'augment de la pressió arterial, més del quàdruple, provoca una dilatació desmesurada. El resultat és que el volum de la sang en les parts inferiors del cos augmenta, i en les superiors disminueix. A més a més, sota l'impacte de l'enorme pressió, a partir dels vasos de la part inferior del cos i a través de les parets d'aquests vasos, comença a colar-se aigua que penetra en els teixits circumdants. Aquest procés condueix a l'inflament dels peus, a un edema.

4.6.4 Vestit antigravetat

Com és possible assegurar la circulació normal de la sang en un/a cosmonauta o en un/a pilot d'avió de propulsió a doll, durant l'acció de les acceleracions? La solució més senzilla és disposar la persona de manera que les seues dimensions en la direcció del vector d'acceleració siguin mínimes. En aquest cas, la pressió arterial en les diferents parts del cos es diferencia molt poquet i no hi haurà redistribució de la sang. Aquesta és la causa del fet que els cosmonautes s'enlairen i aterren en posició mig asseguda.⁴⁹

Però què poden fer els pilots d'avions de propulsió a doll? Quan fan maniobres brusques, aquests no poden trobar-se en posició jaient perquè, en aquest instant, han de controlar l'aparell. El que fa el pilot és posar-se un vestit molt ajustat que continga aigua entre les capes interior i exterior. Així, durant les acceleracions la pressió de l'aigua en qualsevol porció d'aquest vestit variarà en el mateix valor que la pressió en

⁴⁹ És interessant recordar que els protagonistes de la novel·la de Jules Verne *De la Terra a la Lluna*, escrita en 1870, arriben a la mateixa conclusió (cal volar de costat, gitat). Podem considerar que en aquesta novel·la es van tocar, per primera vegada, els problemes principals de la medicina còsmica.

els vasos sanguinis pròxims. Per això, tot i que la pressió en el vas sanguini continuarà creixent, el vas ja no és dilatarà més. No es produirà una redistribució de la sang. Aquesta indumentària rep el nom de vestit antigravetat i s'empra amb èxit en cosmonàutica i en l'aviació supersònica.

La moda fa que els joves duguen pantalons texans estrets, roba anàloga al vestit antigravetat⁵⁰.

4.6.5 Animals "horitzontals"

La majoria dels animals de la Terra són "horitzontals", i el cervell i el cor, —dos dels òrgans més importants—, els tenen a un mateix nivell. Aquesta disposició és ben raonable ja que el cor no necessita fer un esforç addicional per a proveir de sang el cervell. Però els humans no som animals horitzontals. Per això, la nostra pressió arterial és relativament alta. Alguns ocells també són "hipertònics", com ara el gall; també és el cas de la girafa.

El cor dels animals típicament "horitzontals" no pot assegurar l'abastiment de sang al cervell, si la postura es desvia de la natural. Per exemple, si un conill o una serp es posen en posició vertical, perdran molt aviat el sentit a causa de l'anèmia del cervell.

4.6.6 Les girafes hipertòniques

En l'organisme de la girafa es pot trobar una analogia⁵¹ amb el vestit antigravetat. La necessitat que té la girafa de dur a la Terra un vestit còsmic s'explica per la seua estatura insòlitàment alta, que pot arribar a 5.5 m. El cor de la girafa es troba a una altura d'uns 2.5 m; per aquesta causa, els vasos sanguinis dels peus han de suportar l'enorme pressió de tota aquesta columna de líquid.

Q40) Calcula la sobrepressió arterial que té una girafa en els peus.

Què salva, aleshores, els peus de la girafa de l'aparició d'un edema? Entre els vasos dels peus de la girafa i la pell sòlida hi ha gran quantitat de líquid intercel·lular el qual, de la mateixa manera que l'aigua en el vestit antigravetat, prevé els vasos contra la dilatació excessiva. Però de quina manera pot pujar la sang al nivell del cervell en el cos de la girafa; és a dir, a 3 m per damunt el nivell del cor? Si la girafa tinguera al nivell del cor la mateixa pressió arterial que una persona, llavors la pressió al nivell del cap seria menor que l'atmosfèrica i la sang no podria circular a través del cervell. Per això no és estrany que la girafa siga *hipertònica*. La seua pressió arterial al nivell del cor pot assolir 50 kPa. Aquest és el preu que paga la girafa per l'estatura.

(Física) Pressió arterial és...
i es mesura en...

Q41) Demostra l'afirmació segons la qual la pressió en el cap d'una girafa arribaria a ser menor que l'atmosfèrica si no fóra hipertònica.

⁵⁰ Els metges diuen que el pantaló molt ajustat pot ajudar les víctimes d'accidents que pateixen traumes greus per baix de la cintura a evitar la caiguda brusca de la pressió arterial, cosa que passa, habitualment, durant la pèrdua de sang. En un cas, un jove de 22 anys va tenir en un accident automobilístic un trauma en la pelvis i en la part inferior de l'abdomen. El jove només sentia dolor en el lloc del trauma. El seu estat va romandre estable durant 25 minuts, fins al moment que el metge, per descobrir el trauma, li va llevar els pantalons texans, que estaven tan ajustats que va haver de tallar-los. Immediatament després, les cames i l'abdomen van començar a inflar-se pel flux de la sang, la pressió arterial en les extremitats superiors va disminuir fins a anul·lar-se i el jove va perdre el coneixement.

⁵¹ Això no vol dir que la girafa siga un foraster còsmic!

4.7 Mesurament de la pressió de la sang i de la velocitat del flux sanguini

Un dels índexs principals del funcionament del cor és la pressió amb la qual impel·leix la sang als vasos. La pressió arterial es va mesurar per primera vegada pel clergue anglès Hailes en 1733.

Són interessants les circumstàncies que van portar Hailes al descobriment de la pressió arterial. Abans d'estudiar les forces que impulsen la sang dels animals a moure's, Hailes va dedicar uns anys a la investigació de les plantes i a veure què feia pujar la saba des de les arrels cap a les fulles dels arbres.⁵² Com que es considerava que la saba de les plantes feia en l'arbre el mateix paper que la sang en l'animal, Hailes va començar a estudiar la circulació sanguínia.

Amb aquesta finalitat, va prendre un tub flexible i va connectar l'artèria femoral d'un cavall a un tub llarg de llautó col·locat en posició vertical i amb l'extrem superior obert. Quan va llevar el subjectador del tub de connexió, la sang va passar amb ímpetu de l'artèria al tub de llautó i va començar a omplir-lo fins a pujar prop de 2 m. La pressió de la columna de sang que es trobava en el tub de llautó s'equilibrava per la pressió arterial i corresponia a prop de 20 kPa.

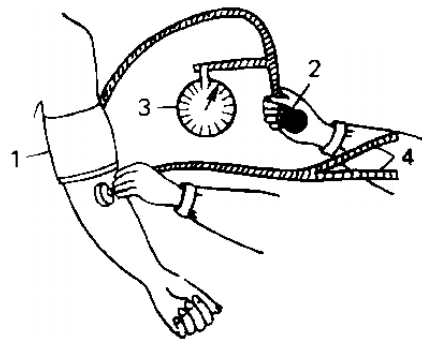


Fig. 10. Mètode de Riva-Rocci-Korotkov per a mesurar la pressió arterial d'una persona: 1, maniquet ple d'aire comprimit; 2, pera amb una vàlvula per a insuflar l'aire al maniquet; 3, manòmetre per a mesurar la pressió de l'aire; 4, fonendoscopi per a auscultar els tons de Korotkov.

Q42) Explica aquesta afirmació.

El nivell de la sang en el tub de llautó no era constant, i oscil·lava amb la freqüència de les contraccions del cor entre els valors màxim (sistòlic) i mínim (diastòlic). La pressió sistòlica corresponia a la contracció del cor, i la diastòlica, a l'estat relaxat.⁵³

El mètode proposat per Hailes⁵⁴ implicava una considerable pèrdua de sang, a més del risc per al pacient. Per aquesta causa, amb l'ajut d'aquest mètode es podia mesurar la pressió arterial sols en experiments amb animals. El desig de crear un mètode de mesura de la pressió arterial idoni per a una persona va induir el metge italià Riva-Rocci a inventar en 1896 un aparell que està en ús fins avui (fig. 10). Aquest aparell s'utilitza ordinàriament per a mesurar la pressió sanguínia en l'artèria humeral. Ja que l'artèria humeral amb el braç baixat es troba al nivell del cor, resulta que la pressió de la sang en aquesta artèria coincideix amb la pressió sanguínia en la part de l'aorta més pròxima al cor.

El mètode de Riva-Rocci es basa en la mesura de la pressió exterior necessària per a subjectar l'artèria. Amb aquest fi sobre el braç del pacient es posa un maniquet buit de goma i amb qualsevol bomba s'augmenta la pressió de l'aire en el mànec fins que desaparega el pols en l'artèria de l'avantbraç (en l'artèria radial). La pressió de l'aire en el mànec en el moment de desaparició de les ones polsants en l'artèria radial (quan en aquesta cessa el flux de sang) ha de ser igual a la pressió sistòlica de la sang.

En 1905, el metge rus Korotkov va modificar el mètode de Riva-Rocci de manera que oferira la possibilitat de mesurar també la pressió diastòlica de la sang. Korotkov va proposar auscultar les ones polsants de l'artèria radial amb l'ajuda d'un fonendoscopi.⁵⁵ Si la pressió de l'aire en el maniquet s'eleva per damunt de la pressió sistòlica per baixar-la després, lentament, amb l'ajuda d'una vàlvula especial,

⁵² Va publicar el llibre *Estàtica de les plantes*.

⁵³ Hailes exposa el que hem vist en el segon tom del seu tractat *Hemostàtica*.

⁵⁴ Tanmateix, a Hailes no solament li va interessar el moviment dels líquids, sinó també el de l'aire. També en aquest àmbit les seues idees van trobar realització pràctica. Per a lluitar contra la calor sufocant en els locals tancats va proposar, per primera vegada, instal·lar ventiladors semblants a molins de vent.

⁵⁵ Aquest aparell consta d'una membrana sensible i dos maniguets flexibles que condueixen les vibracions acústiques cap a les membranes del timpà de l'oïda.

aleshores a una pressió igual a la sistòlica apareixen sons característics. L'origen d'aquests sons, que es denominen *tons de Korotkov*, està relacionat amb el caràcter complex de propagació de l'ona polsant per l'artèria parcialment comprimida. Quan la pressió en el manigueta és menor que la diastòlica, l'artèria comença a deixar passar sang, sense cap obstacle, i els tons de Korotkov desapareixen. Per aquesta raó, la pressió en el manigueta corresponent a la desaparició dels tons de Korotkov es pren per pressió diastòlica.

Sovint, per a formar-nos una idea del funcionament del sistema cardiovascular, resulta insuficient mesurar les freqüències del pols i la pressió arterial. L'estat malaltís de qualsevol òrgan pot estar relacionat amb la disminució del flux de sang a través de l'artèria que abasta de sang aquest òrgan. En aquests casos, per a establir el diagnòstic correcte és necessari mesurar la velocitat del flux de sang a través d'aquesta artèria (és a dir, el volum de la sang que passa per l'artèria per unitat de temps). Un dels primers a investigar la velocitat de moviment de la sang pels vasos va ser el metge i físic francès Poiseuille. És interessant el fet que la llei que duu el seu nom –i que relaciona la velocitat de moviment del líquid a través d'un tub capil·lar amb el radi, longitud i gradient de pressió en el tub– va representar una generalització dels treballs experimentals fets per Poiseuille en els vasos sanguinis dels animals. Tanmateix, l'aplicació de la llei de Poiseuille per al mesurament del flux sanguini en les artèries d'una persona és pràcticament impossible, perquè en aquest cas és necessari conèixer el diàmetre interior de l'artèria, els valors de la pressió de la sang en dos punts de l'artèria i la viscositat de la sang. És evident que l'obtenció d'aquestes dades converteix aquest mètode en *cruent* i, amb freqüència, inaplicable.

(Física) La llei de Poiseuille indica que...

(Física) Inducció electromagnètica és...

(Física) Camp magnètic és...
i es mesura en...

4.7.1 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode electromagnètic

En l'actualitat, la velocitat del flux sanguini a través dels vasos es determina, en la majoria dels casos, amb dos mètodes: el mètode electromagnètic i el mètode de dilució de l'indicador. El mètode electromagnètic està basat en la llei de la inducció electromagnètica: si el vas sanguini es disposa en un camp magnètic de manera que el camp magnètic siga perpendicular a l'eix del vas, la sang (és a dir, el medi conductor), quan es mou al llarg del vas, creuarà les línies de força del camp magnètic i es generarà un camp elèctric. El vector d'intensitat del camp elèctric generat serà perpendicular al camp magnètic i a la velocitat de moviment de la sang, i el valor màxim de la diferència de potencial entre punts diametralment oposats del vas serà proporcional al producte de la velocitat del flux sanguini pel camp magnètic. Per això, si els paràmetres del camp magnètic no varien en el procés de la investigació, el valor de la FEM que s'hi registra resulta ser proporcional a la velocitat del flux sanguini a través del vas.⁵⁶

(Física) Línies de força d'un camp són ..

(Física) Camp elèctric és ...
i es mesura en ...

(Física) Diferència de potencial (ddp) és...
i es mesura en...

⁵⁶ És important destacar que ja en 1832 Faraday, un dels creadors de la teoria electromagnètica, en l'intent de comprovar la validesa de la llei d'inducció electromagnètica per als líquids conductors, volia mesurar la diferència de potencial entre les vores oposades del riu Tàmesi, la diferència que s'hi genera quan flueixen les aigües en el camp magnètic de la Terra. En aquell moment Faraday no va aconseguir el seu propòsit, però 20 anys després el seu compatriota Wollaston, amb instruments anàlegs, va descobrir que la diferència de potencial entre les costes oposades del canal de la Mànega variava en correspondència amb els corrents de la marea.

(Física) Força electromotriu (FEM) és...

i es mesura en...

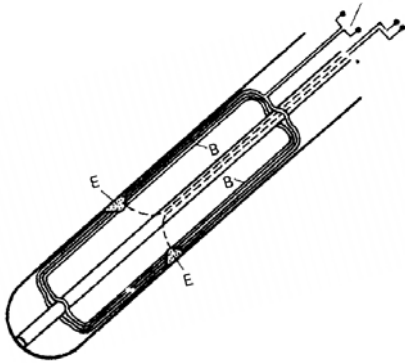


Fig. 11. Catèter proveït de captador electromagnètic de la velocitat del flux sanguini.

(Física) Els elèctrodes són...

Des de 1930 s'utilitza el mètode electromagnètic per a l'estudi de la velocitat del flux sanguini amb un catèter proveït de captador electromagnètic de velocitat de flux sanguini, fig. 11. Dins el catèter hi ha una bobina (B) que genera un camp magnètic dirigit perpendicularment a l'eix del catèter.

En la superfície exterior del catèter es disposen dos elèctrodes (E) per a mesurar la FEM que hi apareix. Els elèctrodes estan orientats de manera que la recta que els uneix siga paral·lela al pla de les espirals de la bobina. Un catèter d'aquest tipus té un diàmetre exterior d'1 o 2 mm i pot introduir-se en moltes artèries humanes sense canviar, pràcticament, la velocitat del flux de sang. Per regla general, el valor del camp magnètic d'aquests captadors és de vora 10^{-3} T i, com a conseqüència, la FEM registrada, a velocitats ordinàries, no acostuma superar 10^{-5} V. Tanmateix, tot i que el senyal de sortida del captador és molt petit, el mètode electromagnètic ha trobat, en l'actualitat, una àmplia aplicació en les investigacions clíniques i de laboratori.

4.7.2 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de dilució de l'indicador

El mètode de dilució de l'indicador permet calcular la velocitat del flux sanguini a través del vas si es coneix la quantitat d'indicador (colorant o d'altra substància) introduït en la sang i la seua concentració en qualsevol punt del vas. En la majoria dels casos s'utilitzen com a indicadors diversos colorants inofensius per a l'organisme, el color dels quals es diferencia substancialment del color de la sang. En aquests casos, la concentració de l'indicador es determina de forma fotomètrica, mesurant la coloració del vas a contraluz. De vegades, el paper d'indicador el fa una dissolució fisiològica refredada de clorur sòdic. La concentració d'aquest indicador es pot avaluar a partir de la temperatura de la sang en el vas.

Imaginem un segment suficientment llarg d'un vas sanguini. F és la velocitat del flux de sang a través seu. Suposem que, amb la sang, se subministra l'indicador amb una velocitat I . Si c és la concentració de l'indicador en el segment del vas, tenim la relació següent

$$I = cF \quad (20)$$

que permet calcular F si coneixem I i c . Hem d'assenyalar que el mètode de dilució de l'indicador dóna dades correctes per a la velocitat del flux sanguini sols en el cas que l'indicador, quan abandona amb la sang el segment donat del vas, s'evacua de la sang (per exemple, pels ronyons). En cas contrari, la concentració de l'indicador en la sang augmentarà progressivament, i el càlcul de F per la fórmula (20) conduirà a resultats exagerats.

En la modificació més difosa del mètode, s'hi introdueix una quantitat coneguda d'indicador en el vas sanguini durant un lapse breu (≈ 1 s). En aquest cas, la concentració $c(t)$ de l'indicador en el vas ja no és constant, i varia anàlogament a com indica la fig. 12. Si la velocitat del flux sanguini a través del vas F es considera constant, aleshores, durant un temps Δt passarà al costat del captador una quantitat d'indicador igual a $c(t)F\Delta t$. La quantitat total d'indicador que passa pel vas junt al captador serà

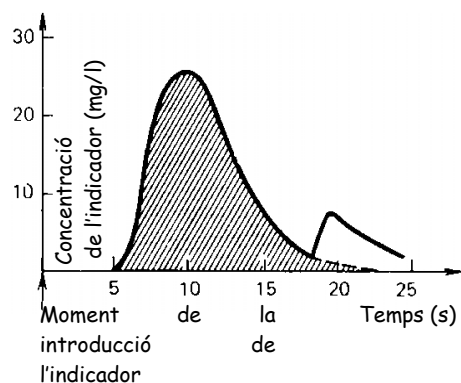


Fig. 12. Variació de la concentració de l'indicador en la sang després d'una sola injecció (àrea ratllada). La cresta més tardana en la corba de la dreta representa la segona aparició de la mateixa quantitat d'indicador, que ha fet la circulació completa.

$$Q = F \int_0^{\infty} c(t) dt \quad (21)$$

Si coneixem aquesta quantitat, obtenim F de

$$F = \frac{Q}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (22)$$

en què el denominador és numèricament igual a l'àrea sota la corba en la fig. 12. El valor d'aquesta àrea podem trobar-lo per integració numèrica o, simplement, pesant la part de paper que es troba entre la corba $c(t)$ i l'eix d'abscisses en la fig. 12.

4.7.3 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode de la concentració d'oxigen

El mètode més antic d'estudi de la velocitat del flux sanguini, que també s'utilitza actualment, va ser proposat pel fisiòleg alemany Fick en 1870. Per a determinar la quantitat de sang F llançada pel cor en una unitat de temps (és a dir, la velocitat de flux de sang en tot l'organisme) Fick va mesurar la concentració d'oxigen en la sang arterial (c_A) i venosa (c_V), i també la quantitat d'oxigen Q consumida per l'organisme en una unitat de temps.

És evident que la quantitat d'oxigen obtinguda per l'organisme per unitat de volum de sang arterial és $c_A - c_V$. Si per l'organisme passen en una unitat de temps F volums de sang, la quantitat d'oxigen consumida per l'organisme per unitat de temps és $Q = F(c_A - c_V)$. D'altra banda, la magnitud Q es pot determinar en una persona si es mesura la concentració de l'oxigen en l'aire aspirat i així obtenim F

$$F = \frac{Q}{c_A - c_V} \quad (23)$$

Tanmateix, hem de fer notar que el mètode de Fick només és aplicable per a investigar la velocitat del flux sanguini a través del cor.

4.7.4 Mesurament de la velocitat de la sang: mètode ultrasònic

En l'actualitat ha obtingut gran difusió el mètode ultrasònic de mesura de la velocitat lineal del moviment de la sang. En aquest mètode es fa ús de l'efecte Doppler d'acord amb el qual la freqüència de les vibracions acústiques percebudes depèn de la velocitat del moviment de la font de so respecte al receptor acústic (veges el capítol 2n). En la fig. 13 s'il·lustra el muntatge corresponent per al mesurament de la velocitat de la sang. S'hi fan servir dos cristalls piezoelèctrics, l'un per a generar les vibracions ultrasòniques i l'altre per a mesurar l'ultrasò dissipat per la sang. Per regla general, la freqüència de l'ultrasò utilitzat es troba en l'interval d'1 a 10 MHz. Les partícules de la sang

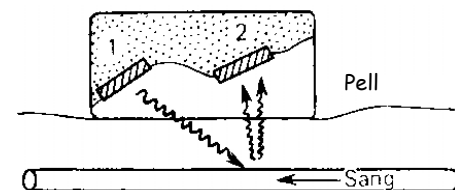


Fig. 13. Mètode ultrasònic de mesura de la velocitat de moviment de la sang pel vas: 1, emissor de l'ultrasò; 2, receptor de l'ultrasò. Les línies ondulades mostren esquemàticament la propagació de l'ona sonora des de l'emissor i des de les ones dissipades per la sang en moviment.

(Física) Ultrasons són ...

que dissipen l'ultrasò –i, per tant, serveixen de fonts secundàries, mòbils, d'aquest– són els eritròcits, que tenen unes dimensions de vora $5\ \mu\text{m}$. Quan mesurem la diferència entre les freqüències de l'ultrasò emès i del dissipat per la sang, és possible calcular la velocitat del moviment de la sang, sempre que es coneguen la disposició del vas respecte al captador i la velocitat de l'ultrasò en el medi.⁵⁷

(Física) L'efecte Doppler és...

(Física) La piezoelectricitat és...

Podem assenyalar que el mètode ultrasònic dona la possibilitat de determinar només la velocitat lineal del moviment de la sang i no la velocitat del flux sanguini (veges el que l'hem dit a principi del capítol). Evidentment, aquesta última es pot calcular multiplicant la velocitat del moviment de la sang per l'àrea de la secció transversal del vas. Lamentablement, en la majoria dels casos, avaluar l'àrea de la secció transversal d'un vas sanguini amb suficient exactitud resulta difícil. En aquestes ocasions, el mètode ultrasònic pot proporcionar informació només sobre les variacions relatives de la velocitat del flux sanguini, si es considera que l'àrea de la secció transversal del vas roman invariable.

Q43) Resumeix esquemàticament els mètodes anteriors de mesurament de la pressió de la sang.

4.8 El color de la sang i la llei de conservació de l'energia

(Física) La llei de conservació de l'energia diu que...

La llei de conservació de l'energia va ser formulada amb precisió per primera vegada en 1842 pel metge i naturalista alemany Mayer. Les circumstàncies en les quals va ser descoberta resulten bastant insòlites. En 1840, Mayer, com a metge d'un vaixell, va emprendre una llarga navegació cap a l'illa de Java. El mètode de guariment més difós en aquella època era la sagnia, i el metge solia, doncs, observar la sang venosa dels malalts. Mayer va observar que quan més s'aproximava el vaixell a les càlides latituds tropicals, el color de la sang venosa dels mariners es feia més roja que a Europa. Aquest fet evidenciava que en la sang venosa d'una persona quedava més oxigen en les latituds meridionals que en les latituds del Nord. Evidentment, la concentració d'oxigen en la sang arterial era la mateixa per a les diferents latituds, i depenia tan sols de la concentració d'oxigen en l'atmosfera. Basant-se en aquesta circumstància, Mayer va arribar a la conclusió que una persona, en condicions de clima fred, consumia més oxigen. Per consegüent, per a mantenir la mateixa temperatura del cos quan feia fred es necessitava una oxidació major de productes alimentaris.

Tanmateix, Mayer comprenia que l'energia despesa durant l'oxidació dels productes alimentaris es consumia no sols per a mantenir la temperatura del cos constant, sinó també quan la persona feia treball mecànic. Aquest fet significava que havien d'existir relacions determinades entre la quantitat de calor generada en l'organisme i el treball mecànic que es feia durant un

⁵⁷ Tot i que sembla senzill el mesurament de la velocitat del moviment de la sang amb l'efecte Doppler, la seua utilització requereix l'aplicació d'aparells electrònics especials que permeten registrar variacions de freqüència de només 0.001% de la irradiada.

interval donat de temps. Mayer va deduir que a una quantitat determinada de calor havia de correspondre un valor determinat de treball mecànic realitzat.

La idea sobre l'equivalència de la calor i del treball va captivar Mayer immediatament. En una carta a un amic psiquiatra afirma:

"Aquesta teoria no pot considerar-se, de cap manera, obtinguda com a resultat d'una investigació sistemàtica. Després que jo, amb deler constant i perseverança, em vaig posar a estudiar la fisiologia de la sang durant el viatge a les Índies Orientals, les observacions sobre els canvis de l'estat fisiològic de la tripulació en les zones tropicals i sobre el procés d'aclimatació em van donar molt de material complementari per a discórrer... Si en la nostra època una persona vol aconseguir una comprensió clara dels problemes fisiològics, no podem passar sense el coneixement de la física...⁵⁸ Per aquesta raó m'he dedicat ací a la física, i he manifestat un interès tan viu pel problema en qüestió que poc m'interessa ja aquest apartat raconet de la Terra. Hi ha gent que, per aquest motiu, es pot riure de mi, però jo preferia romandre en el vaixell on podia treballar sense interrupcions i on diverses vegades em va sobrevenir la inspiració... Aquests temps han passat, però les comprovacions mentals posteriors d'aquesta idea... em deien que aquesta és la veritat que no sols s'intueix subjectivament, sinó que es pot demostrar també de manera objectiva".

D'ací endavant, la vida de Mayer va prendre un rumb infeliç. Van haver-hi moltes discussions sobre la prioritat en el descobriment de la llei de conservació de l'energia. Aquesta circumstància, i les contrarietats domèstiques, van afectar la ment del científic. En 1851 va ser internat en un asil per a boigs, i tot i que va eixir en passar un temps, la ment de Mayer va romandre anormal fins a la seua mort.

⁵⁸ El subratllat és meu (traductor/adaptador) per a fer-vos meditar en la necessitat i l'interès que té estudiar física en la carrera de Biològiques (i d'altres).

4.9 Física (conceptes)

Concepte	Capítols	1r – 4t
----------	----------	---------

Acceleració centrípeta	1r	magnitud	(FEM)		
Acceleració	1r	Dinàmica	4t	Força resultant	1r
Acceleració	4t	Doppler (efecte)	4t	Forces de cohesió	3r
Acceleració de la	1r	Eco	2n	Fórmula de Laplace	3r
gravetat		Efecte Doppler	4t	(diferència de pressió	
Adimensional	1r	Efectes dels límits	4t	en esfera elàstica)	
(magnitud)		Elàstic (mòdul de	3r	Fractals	3r
Agitació tèrmica	2n	Young)		Fregament (força)	1r
Amplitud d'oscil·lació	2n	Elàstic (mòdul de	4t	Freqüència	1n
d'una ona		Young)		Freqüència	4t
Amplitud d'una ona	2n	Elàstica (esfera,	3r	Freqüència d'una ona	2n
Àrea/volum (relació)	4t	pressió)		Fricció (força)	1r
Àrea/volum	i 3r	Elèctric (camp)	4t	Fricció (Llei de Stokes)	1r
dimensions		Elèctrodes	4t	Gas (pressió parcial)	1r
Bernouilli (Llei, fluids)	3r	Electromotriu (força,	4t	Gradient de pressió	2n
Caiguda lliure (temps	1r	FEM)		Gravetat (acceleració)	1r
de)		Energia (Llei	4t	Histèresi	3r
Camp de força (línies)	4t	conservació)		Hooke (Llei)	4t
Camp elèctric	4t	Energia (principi de	1r	Inducció	4t
Camp magnètic	4t	conservació)		electromagnètica	
Canvi de fase en la	2n	Energia cinètica	1r	Inèrcia	4t
reflexió		Energia d'enllaç d'una	1r	Intensitat d'una ona	2n
Centre de gravetat	1r	molècula		Laminar (règim, fluids)	3r
Centrifugadora	3r	Energia d'una ona	2n	Laplace (fórmula,	3r
Centrípeta	1r	Energia mecànica	2n	diferència de pressió	
(acceleració)		Energia potencial	1r	en esfera elàstica)	
Cinemàtica	4t	Energia potencial	3r	Laplace (Llei)	4t
Coefficient de	1r	Esfera elàstica	3r	Límits (efecte dels)	4t
permeabilitat		(fórmula de Laplace,		Línies de força d'un	4t
Coefficient de tensió	3r	diferència de pressió)		camp	
superficial		Esfera elàstica	3r	Longitud d'ona	2n
Cohesió (forces)	3r	(pressió)		Llei conservació	4t
Combustió	3r	Fase (Canvi en la	2n	energia	
Concentració de	3r	reflexió)		Llei de Bernouilli	3r
saturació		FEM (força	4t	(fluids)	
Condensació, nuclis	3r	electromotriu)		Llei de Hooke	4t
Conservació de	1r	Fluctuacions	1r	Llei de Laplace	4t
l'energia (principi)		Fluids en règim	3r	Llei de Newton (2a)	4t
Conservació energia	4t	laminar		Llei de Newton del	1r
(Llei)		Fluids en règim	3r	refredament	
Constant de temps	1r	turbulent		Llei de Poiseuille	4t
(d'un procés)		Força	1r	Llei de Stokes del	1r
Convecció	1r	Força (línies d'un	4t	fregament	
Decibel	2n	camp)		Magnètic (camp,	4t
Densitat	1r	Força (resultant)	3r	inducció)	
Densitat	2n	Força de la gravetat	1r	Magnitud	1r
Diferència de	4t	(pes)		Magnitud (ordre)	1r
potencial		Força de reacció	1r	Massa	1r
Difracció	2n	Força de resistència o	1r	Massa-volum d'un gas	3r
Difusió	1r	fricció		Mòdul de Young	4t
Dimensions d'una	1r	Força electromotriu	4t	Mòdul elàstic de Young	3r

Moviment tèrmic	2n	Refredament (lleis de Newton)	1r	Tèrmic (moviment d'agitació)	2n
Newton (2a llei)	4t	Règim laminar (fluids)	3r	Tesla	4t
Newton (lleis del refredament)	1r	Règim turbulent (fluids)	3r	Transductor	2n
Nuclis de condensació	3r	Relació àrea/volum	4t	Transició de règim laminar a turbulent (fluids)	3r
Número adimensional	1r	Relació àrea/volum i dimensions	3r	Transmissió d'una ona	2n
Ones sonores	2n	Relació massa-volum d'un gas	3r	Treball	1r
Ordre de magnitud	1r	Resistència (força)	1r	Treball	3r
Parcial (pressió)	1r	Resultant (força)	1r	Turbulent (règim, fluids)	3r
Permeabilitat (coeficient)	1r	Resultant d'unes forces	3r	Ultrasons	4t
Pes	1r	Saturació,	3r	Variació sinusoidal	2n
Piezoelectricitat	4t	concentració		Velocitat	1r
Poiseuille (lleis)	4t	Segona llei de Newton	4t	Velocitat de propagació d'una ona	2n
Potència	1r	Sinusoidal (variació)	2n	Velocitat mitjana	2n
Potencial (diferència)	4t	So	2n	Velocitat ona compressió sang	4t
Potencial (energia)	3r	Solubilitat	3r	Velocitat ona deformació artèria	4t
Pressió	2n	Soroll blanc	2n	Young (mòdul de)	4t
Pressió (gradient)	2n	Stokes (lleis de fricció)	1r	Young (mòdul elàstic)	3r
Pressió arterial	4t	Substàncies tensoactives	3r		
Pressió atmosfèrica	1r	Superficial (tensió)	3r		
Pressió en una esfera elàstica	3r	Temps (constant de)	1r		
Pressió parcial d'un gas	1r	Temps de caiguda lliure	1r		
Principi de conservació de l'energia	1r	Tensió	4t		
Radiació	1r	Tensió superficial (coeficient)	3r		
Reacció (força)	1r	Tensoactives, substàncies	3r		
Reflexió d'una ona	2n				
Reflexió i canvi de fase	2n				

Capítol 5. Biomecànica (Més resistent que el granit)

No són els llistons
els que cruixen,
són els ossets.

De S. Ya. Marshák

- 5.1 Natura i evolució
 - 5.1.1 Ossos i esquelet
 - 5.1.2 Força dels músculs
 - 5.1.3 Disseny de l'esquelet: compressió, tracció i flexió
 - 5.1.4 Relació pes/resistència d'un cable: tracció/compressió
 - 5.1.5 Flexió (Mira, l'interior és buit!)
 - 5.1.6 Ossos i animals
- 5.2 Resistència dels ossos
 - 5.2.1 Composició
 - 5.2.2 Reserva de resistència
- 5.3 L'os sotmès a l'acció del corrent elèctric
 - 5.3.1 Pèrdua de calci
 - 5.3.2 Modificació de forma i massa de l'os
 - 5.3.3 Efecte del camp elèctric
- 5.4 La física del karate
 - 5.4.1 Força i temps d'impacte
- 5.5 I per a què serveixen els tendons?
 - 5.5.1 Moviments periòdics i energia
 - 5.5.2 Els músculs
 - 5.5.3 Experiment casolà
- 5.6 Física (conceptes)

5.1 Natura i evolució

Tots nosaltres som fruit de l'evolució. La natura, durant milions d'anys, ha fet experiments abans de donar-nos la forma que tenim en l'actualitat. Tanmateix, no ens correspon a nosaltres jutjar sobre els resultats d'aquest experiment en l'esfera intel·lectual, ja que per a l'avaluació objectiva de les capacitats mentals d'una persona és necessari saber l'opinió al respecte d'altres éssers racionals. Ara per ara, però, aquest contacte amb extraterrestres no està establert. D'altra banda, sí que podem ser absolutament objectius quan discutim els elements de l'estructura mecànica del nostre cos i comparar-ne les característiques amb els paràmetres dels elements anàlegs usats en la tècnica i la construcció.

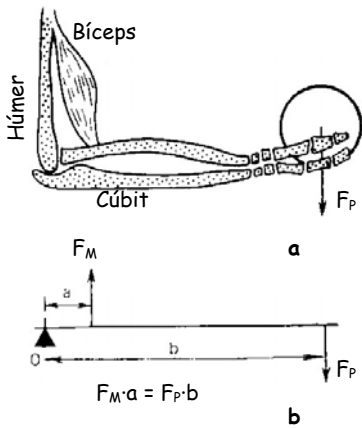


Fig. 1. a) Una mà sostenint una bola de pes F_M . b) Solució del problema sobre el mode de sostenir amb la mà la càrrega o el pes F_P (F_M és la força desenvolupada pel bíceps).

(Física) La biomecànica és...

(Física) Moment d'una força...
i es mesura en...

Q1) Comenta les afirmacions anteriors.

5.1.1 Ossos i esquelet

L'esquelet, que consta aproximadament de 200 ossos, serveix d'armadura del cos. La majoria d'aquests ossos, excepte els del crani i la pelvis, estan units entre si de manera que, durant el moviment, la disposició relativa pot canviar. Els ossos es posen en moviment mitjançant músculs de l'esquelet, cadascun dels quals es fixa a dos ossos distints. Durant l'excitació del múscul la seua longitud disminueix i l'angle entre els ossos corresponents de l'esquelet disminueix també.

5.1.2 Força dels músculs

En la fig. 1 es representen les condicions d'un dels problemes més simples de la biomecànica, el de la retenció de càrrega mitjançant la mà. Per les longituds conegudes dels ossos del muscle i l'avantbraç, i per la magnitud de la càrrega, podem calcular l'esforç desenvolupat pel múscul.⁵⁹ Obtenim la solució a partir de la igualtat dels moments de la força del múscul (F_M) i de la força que fa la càrrega (F_P) respecte del punt de suport O .

5.1.3 Disseny de l'esquelet: compressió, tracció i flexió

Així i tot, fins avui dia, moltes qüestions concernents a la mecànica del cos humà no han trobat respostes exhaustives.

Q2) Calcula la força aproximada que fa el bíceps per sostenir un pot de llet.

Q3) Què li ocorre a F_M si la distància a augmenta?

⁵⁹ Un problema anàleg va ser plantejat i resolt per primera vegada pel geni renacentista Leonardo da Vinci. Artista, enginyer i científic al mateix temps, da Vinci sempre s'interessava per la constitució del cos humà i pels mecanismes que formen la base dels moviments d'una persona. En l'actualitat aquest problema no supera les possibilitats de qualsevol alumne/a de l'escola secundària.

Si a un enginyer mecànic se li plantejara el problema de dissenyar l'esquelet d'una persona, exigiria immediatament que li explicaren per a què es necessita cada osset. En efecte, la forma, les dimensions i l'estructura interna de cada os han d'estar determinades per la funció que tinga en l'esquelet. Aleshores, com funcionen els nostres ossos? Igual que qualsevol element de construcció, els ossos de l'esquelet funcionen fonamentalment per a suportar esforços de compressió i tracció, i també per a flexió. Aquests dos règims de treball plantegen requisits molt diferents als ossos de l'esquelet. Sabem que és bastant difícil esquinçar un llumí o una tija de palla quan els estirem al llarg de l'eix, mentre que quasi no costa treball trencar-los una vegada estan doblats.

(Física) *Compressió és...*

Tracció és...

Flexió és...

Q4) Explica l'afirmació anterior.

Moltes vegades, tant en les estructures d'enginyeria, com en els esquelets dels animals, és desitjable tenir una combinació de resistència mecànica amb lleugeresa. Com es pot abastar la màxima resistència mecànica d'una estructura, si la massa és prefixada i la resistència mecànica del material és coneguda? Aquest problema no presenta dificultats grans si l'element de l'estructura ha de treballar o bé per a tracció longitudinal o bé, tan sols, per a compressió.

5.1.4 Relació pes/resistència d'un cable: tracció/compressió

En efecte, suposem, per exemple, que és necessari penjar una càrrega en un cable de longitud determinada. La resistència mecànica del cable serà igual a la de la part més fina i, per tant, el pes del cable serà mínim per a una àrea igual a aquesta secció fina, mantinguda en tota la longitud del cable.⁶⁰ La forma d'aquesta secció no té importància perquè la resistència al trencament és proporcional al valor de l'àrea de la secció transversal del cable.

Q5) Explica l'afirmació anterior.

5.1.5 Flexió (Mira, l'interior és buit!)

Però si l'element de l'estructura funciona també en flexió (veges, per exemple, el cúbit en la fig. 1), és més complicada la recerca de la màxima resistència mecànica per a una massa constant.

Suposem que una biga horitzontal de longitud prefixada ha de suportar una càrrega determinada (fig. 2). En aquest cas, la resistència de la biga a la flexió depèn en grau màxim de la forma de la secció transversal. Examinem diversos perfils simples d'aquesta secció i tractem d'aclarir per a quin d'aquests pot tenir un pes mínim la biga capaç de suportar la càrrega

⁶⁰ En altres paraules, si un cable té seccions diferents, la resistència al trencament la determina la secció menor de totes.

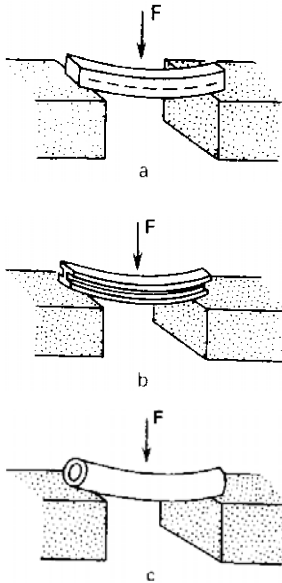


Fig. 2. Recerca de l'estructura òptima d'una biga que contrarreste la força F . a) Biga massissa. b) Biga en H . c) Biga cilíndrica buida.

prefixada. Com es mostra en la fig. 2a, la biga, per acció de la força, es doble de manera que les capes superiors es comprimeixen, mentre que les inferiors s'estiren. En el centre de la biga hi ha una capa (o, més correctament, una superfície) la longitud de la qual no varia durant la flexió de la biga. En la fig. 2a, aquesta capa neutra està marcada per la línia de traços. El material que es troba en aquesta capa no treballa, és a dir, no es deforma, i tan sols fa més pesada la biga. Per aquesta raó, una part del material de prop d'aquesta capa neutra es pot eliminar sense perjudicar molt la resistència mecànica de la biga que treballa en aquestes condicions.

Hem trobat una de les solucions del problema de minimitzar la massa de l'estructura, si mantenim la resistència mecànica constant (fig. 2b). Tanmateix, aquesta solució és admissible solament per a les bigues de secció rectangular, mentre que els ossos de l'esquelet tenen, per regla general, secció rodona (o quasi rodona).

Q6) Per què és diferent una biga rectangular d'una cilíndrica?

Per als ossos —quan partim de les mateixes consideracions— l'estructura òptima serà la d'un os amb el *nucli* parcialment absent perquè la capa cilíndrica prop de l'eix de l'os no experimenta deformacions substancials durant la flexió, i solament n'augmenta la massa (fig. 2c).

5.1.6 Ossos i animals

És lògic que també la natura, en el procés de l'evolució, haja recorregut a aquest mètode de disminuir la massa d'una persona i dels animals, tot i conservant la resistència de l'esquelet. Aquest fenomen s'ha manifestat de manera més clara en els ocells, els quals, més que altres animals, estan interessats a disminuir la massa. El primer que es va fixar en aquesta circumstància va ser el físic italià Borelli, qui, en 1679, va assenyalar que "el cos de l'ocell és més lleuger —d'un mode no proporcional— que el d'una persona o de qualsevol quadrúpede... per què els ossos dels ocells són porosos, buits i amb parets fines fins al límit". Per exemple, el rabiforcat, un ocell amb unes ales de 2 m, té tan sols un esquelet de 110 g de massa.

Però els ossos dels animals sense ales també són buits. Les mesures demostren, per exemple, que per a l'os tubular més gran de l'esquelet, el fèmur, la relació entre el diàmetre interior de la secció transversal i el diàmetre exterior, quan es tracta de la rabosa, d'una persona, del lleó i de la girafa, val entre 0.5 i 0.6. Aquest fet dona la possibilitat a tots els animals (i, per descomptat, a les persones) de disminuir en un 25%, aproximadament, la massa de l'esquelet, i de conservar la mateixa resistència mecànica.

(Física) Resistència d'un material és...

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

Q7) Comenta aquest 25%.

5.2 Resistència dels ossos

Abans d'elogiar la natura per ser competent en els problemes de resistència de materials, calcularem si els nostres ossos són suficientment resistents. La taula 1 mostra els valors de les tensions crítiques per a les quals es trenca la integritat dels diferents materials sotmesos a compressió i tracció, i també els mòduls de Young corresponents.

(Física) Mòdul de Young és...
i es mesura en...

Q8) Quan és més resistent un material, si té un mòdul de Young gran o petit?

Encara que sembla sorprenent, per la resistència mecànica l'os és inferior tan sols a l'acer, i resulta molt més resistent que el famós granit i el formigó. Com s'explica aquesta resistència mecànica tan alta del material ossi?

Taula 1. Característiques mecàniques d'alguns materials

Material	Resistència a la compressió (N/mm ²)	Resistència a la tracció (N/mm ²)	Mòdul de Young ($\times 10^2$ N/mm ²)
Acer	552	827	2070
Os	170	120	179
Acer	552	827	2070
Granit	145	4.8	517
Porcellana	552	55	-
Roure	59	117	110
Formigó	21	2.1	165

Q9) Comenta per a quins usos (que impliquen resistència del material) es fan servir els materials de la taula 1.

5.2.1 Composició

L'os és un material format per dos components completament diferents: col·lagen i substància mineral.⁶¹ El col·lagen és, també, un dels components principals del teixit conjuntiu (el principal component dels tendons). El percentatge més alt del component mineral de l'os són les sals de calci. El calci representa el 22% de la quantitat total d'àtoms de l'os. En els altres teixits del cos (músculs, cervell, sang, etc.) el nombre d'àtoms de calci està entre el 2% i el 3%. Dels elements químics que té en abundància el nostre organisme, el calci és el més pesat, cosa que permet detectar-lo fàcilment en els ossos amb l'ajut de raigs X.

(Física/Química) Sals de calci són...

(Física) Raigs X són...

Q10) Quins altres elements principals constitueixen l'organisme?

⁶¹ Com a exemple de material compost pot servir el plàstic de fibra de vidre, format per una mescla de fibres de vidre i de resina.

(Física/Química) Component inorgànic és...

(Física/Química) Àcid acètic és...

(Física) El vidre és ...

(Física) El cristall és...

Qualsevol dels components principals de l'os es pot eliminar amb facilitat sense canviar, en la pràctica, la forma de l'os. Si, per exemple, introduïm l'os molt de temps en una dissolució al 5% d'àcid acètic, tots els components inorgànics, fins i tot les sals de calci, es dissolen en l'àcid. L'os que resta, i que consta, principalment, de col·lagen, és ben elàstic, com un cordó de goma i podrà enrotllar-se en forma d'anell. Si, pel contrari, l'os es crema, tot el col·lagen es consumirà i restarà solament el component inorgànic.

La causa de l'alta resistència mecànica de l'os resideix en la seua composició. Molts materials comuns (no compostos) que són durs, són també fràgils. Tots hem vist com es trenca el vidre. Si donem un colp al vidre, s'hi formen clivelles, a partir de les quals s'esquerda el vidre. Si no hi ha temps perquè es formen les clivelles, com succeeix durant l'impacte d'una bala, el vidre no es trenca, a excepció de la zona de l'impacte. Per tant, la resistència mecànica de molts materials seria molt major si l'estructura d'aquests materials impedira l'aparició i la propagació de clivelles. La presència de col·lagen en l'os, o siga, d'un material que té una elasticitat alta, serveix d'obstacle per a la propagació de clivelles en l'os. Al mateix temps, la duresa de l'os està assegurada pels cristalls de substàncies minerals dipositats en la superfície de les fibres col·làgenes.

Q11) Explica la diferència entre vidre i cristall.

La naturalesa composta de l'os la indica també el baix valor del seu mòdul de Young, en comparació amb els materials homogenis que tenen la mateixa duresa (veges taula 1).

5.2.2 Reserva de resistència

Quina és la reserva de resistència dels nostres ossos? La part central de l'húmer d'una persona té una secció transversal d'uns 3.3 cm^2 . Si ens fem servir de les dades de la taula 1, és fàcil demostrar que el pes màxim de la càrrega que pot suportar aquest os, si es troba en posició vertical i treballa en compressió, és pròxim a 60000 N.

Q12) Fes aquest càlcul.

Igualment es pot demostrar que la força màxima que pot suportar el mateix os, si aquesta força s'aplica a l'extrem lliure i perpendicularment a l'eix, estarà prop de 5500 N.⁶²

Q13) Fes aquesta estimació.

Q14) Fes un esquema, a escala aproximada, de l'húmer.

Q16) Quin moment màxim de forces suporta l'os?

⁶² El diàmetre exterior de l'os és igual a 28 mm, el diàmetre interior és de 17 mm i la longitud és de 200 mm.

5.3 L'os sotmès a l'acció del corrent elèctric

5.3.1 Pèrdua de calci

Des de temps molt antics l'os es va utilitzar per a la fabricació de les més distintes ferramentes. La causa de tan àmplia aplicació de l'os resideix en la seua estabilitat davant les accions exteriors. Tanmateix, l'os és sorprenentment variable en un organisme viu, ja que és part del teixit viu de l'organisme. Durant tota la nostra vida les cèl·lules òssies velles moren i són rellevades per cèl·lules noves. Aquest fet és especialment patent en els primers trenta anys de vida, quan té lloc el creixement dels ossos de l'esquelet. Sabem que l'os creix allà on actua una càrrega a sobre, i es reabsorbeix en els llocs on la càrrega falta. S'ha demostrat que els pacients que estan permanentment en el llit, sense moure's, perden prop de 0.5 g de calci cada dia, fet que testimonia la disminució de la massa dels ossos. En els primers vols còsmics, en condicions d'ingravedesa els astronautes perdien fins a 3 g de calci diàriament.⁶³

5.3.2 Modificació de forma i massa de l'os

De quina manera pot canviar l'os la forma i la massa segons la magnitud de la càrrega que hi actua? Un paper important en aquesta cadena d'autoregulació pertany a les variacions del camp elèctric en el teixit ossi. Com s'ha demostrat, l'os presenta propietats piezoelèctriques, i, per tant, la seua deformació està acompanyada de l'aparició d'un camp elèctric.

Q17) Quines aplicacions té la piezoelectricitat?

En aquest cas, la superfície estirada de l'os es carrega positivament en relació amb la comprimida. Si l'os treballa en flexió —com es representa en la fig. 3— la superfície còncava es carrega negativament, mentre que la superfície convexa té càrrega positiva. La intensitat del camp elèctric per a les situacions de càrregues ordinàries no sol superar els 0.5 V/cm. D'altra banda, en deformacions prolongades com la de la fig. 3, l'os és capaç de canviar de forma; és a dir, es construeix el teixit ossi en els segments còncavs i es destrueix en els convexos. Com a resultat, l'os s'adreja.

Q18) Quina implicació tindrà per al caminar d'una persona que les cames se sotmeten a deformacions prolongades?

La comparació d'aquestes dades amb els resultats dels mesuraments elèctrics esmentats més amunt va donar lloc a una hipòtesi sobre la influència del camp elèctric en el procés de nova formació de teixit ossi. Al principi, aquesta hipòtesi va ser comprovada en experiments amb animals: si es deixava passar corrent elèctric (durant alguns mesos) a través d'un os, la

(Física) El cristall és...

(Física) Camp elèctric és...
i es mesura en....

(Física) Piezoelectricitat és ...

(Física/Matemàtiques)
Concavitat i convexitat és ...

(Física) El cristall és ...

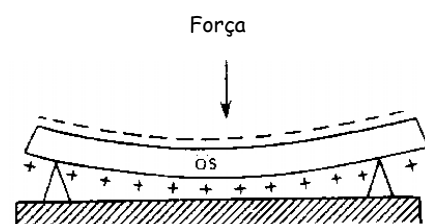


Fig. 3. Càrregues elèctriques que sorgeixen en la superfície d'un os deformat.

⁶³ A conseqüència d'això molts especialistes posaven en dubte la possibilitat dels vols còsmics prolongats. Tanmateix, s'han elaborat programes especials d'entrenament físic que creen la càrrega necessària sobre el teixit ossi i que han dut a una disminució considerable de les pèrdues de calci en condicions d'ingravedesa.

(Física) El camp elèctric es pot mesurar en N/C i en V/m , que són equivalents.

(Física) El volt és...

(Física) Una hipòtesi científica és...

(Física) El corrent elèctric és i es mesura en...

(Física) Elèctrode positiu (o negatiu) és...

(Física) Línia de força d'un camp elèctric és...

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

(Física) Amplitud és ...

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

massa de la substància òssia augmentava a prop de l'elèctrode negatiu. La intensitat del camp elèctric que feia falta era semblant a la que es genera durant les deformacions naturals de l'os.

Q19) Per què es parla indistintament de camp elèctric i de corrent elèctric en els paràgrafs anteriors?

5.3.3 Efecte del camp elèctric

L'acció del camp elèctric sobre el creixement del teixit ossi pot explicar-se de la manera següent. Sabem que en el procés de formació de l'os primerament apareixen noves fibres col·làgenes que, més tard, es cobreixen de cristalls de substància mineral. S'ha demostrat que l'orientació i l'aglutinació de les fibres col·làgenes pot accelerar-se en un camp elèctric; així, les fibres aglutinades sota l'acció del camp extern s'orienten perpendicularment a les línies de força del camp elèctric en els voltants de l'elèctrode negatiu. El procés d'aglutinació i d'orientació de les fibres col·làgenes és notable després de cinc minuts d'haver connectat el camp elèctric, per a corrents comparables amb els presents en un os deformat. Per aquesta raó, és evident que el camp elèctric que es genera durant la deformació de l'os com a conseqüència de l'efecte piezoelèctric és capaç d'orientar les fibres col·làgenes que es formen i així provocar el creixement del teixit ossi.⁶⁴

Q20) Quantes càrregues elèctriques passen pels pacients en el tractament indicat en la nota anterior a peu de pàgina?

5.4 La física del karate

Per a il·lustrar la resistència dels ossos d'una persona analitzarem la lluita del karate. Tots hem vist com un karateka trenca trossos de fusta o de formigó. Aquesta imatge ens resulta sorprenent, però fins i tot un novençà en karate, després d'un breu entrenament, seria capaç de trencar amb la mà nua un tros de fusta, i després d'entrenar-se, tota una pila.

La tècnica del karate va ser elaborada a l'illa d'Okinawa. Els japonesos, quan van conquerir l'illa en el segle XVII, van confiscar als aborígens tot tipus d'armes i van prohibir-ne la fabricació i importació. Per a la seua defensa els habitants de l'illa van elaborar un sistema de tècniques de lluita amb l'ajuda de mà (te) buida (kara). Els mètodes de karate es diferencien considerablement de les tècniques occidentals d'autodefensa sense armes. Un boxejador de l'Occident transmet un impuls gran a tota la massa del seu adversari i així el fa caure a terra; per contra, el karateka

⁶⁴ Algunes clíniques van començar en 1971 a aplicar amb èxit un camp elèctric per al tractament de les fractures dels ossos. Aquest mètode fa servir l'empelt d'elèctrodes especials sota la pell (fig. 4) i s'aplica solament en els casos en què el tractament tradicional (amb fixament) no aporta efectes positius durant uns quants anys. Per al 84% dels pacients, el pas de corrent continu (de 10 a 20 μA) provocava en 3 mesos la unió de les parts de l'os fracturades.

concentra el seu colp sobre una porció molt petita del cos, i procura consumir-lo a una profunditat no major d'1 cm i sense que l'amplitud del colp siga gran. Per això, el colp del karateka pot destruir amb facilitat, els teixits i els ossos de l'adversari. Un karateka ben entrenat és capaç de transmetre en un colp, durant uns milisegons, una potència igual a diversos quilovats.

Q21) Per què l'amplitud del colp del karateka no ha de ser gran?

Q22) Fes el càlcul de la potència anterior. Què implica? Compara-la amb altres potències d'ús diari (cotxe, bombeta elèctrica, rentadora elèctrica, etc.).

Com pot una mà nua trencar objectes tan sòlids com trossos de roure o formigó sense fracturar-se? Tractarem d'avaluar l'energia W_{trenc} necessària per al trencament d'un tros de material, de fusta, per exemple. Si utilitzem la llei de Hooke per a descriure la deformació de la fusta, i la fórmula per a calcular l'energia potencial emmagatzemada en un moll comprimit, és possible obtenir l'expressió següent

$$W_{\text{trenc}} = \frac{VT^2}{2E} \quad (1)$$

en què apareixen propietats de la fusta: V , el volum; T , l'esforç màxim que suporta, i E , el mòdul de Young. La fórmula (1) confirma les consideracions intuïtives del fet que com més gran és la fusta, més difícil és trencar-la. De la mateixa fórmula s'infereix que com més elàstic és el material de la fusta, més treball necessitem per a trencar-la, ja que per a estirar-la o deformar-la es consumeix una energia gran. Per regla general, els karatekes utilitzen en les exhibicions maons de formigó amb dimensions d'uns $0.4 \times 0.2 \times 0.05 \text{ m}^3$.

Q23) Quant pesa aquest maó?

Si tenim en compte les dades de la taula 1 i la fórmula (10), es pot obtenir que, per a aquests maons, $W_{\text{trenc}} \approx 0.55 \text{ J}$. La velocitat de la mà del karateka en colpejar és d'uns 12 m/s, aproximadament, i la seua massa és de 0.7 kg.

Q24) Explica per què aquests valors són raonables.

Per consegüent, l'energia que transmet la mà en el moment del colp és d'uns 50 J.

Q25) Calcula aquest valor de l'energia.

Així, la mà del karateka té la suficient reserva d'energia com per a trencar el maó de formigó.

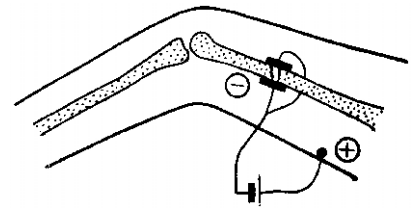


Fig. 4. Tractament elèctric de les fractures dels ossos.

(Física) La llei de Hooke diu que ..

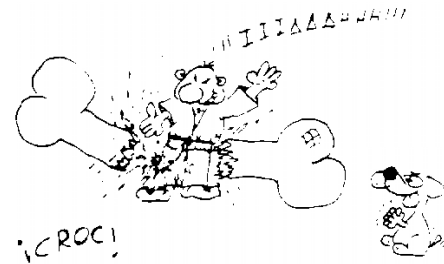


Fig. 5. Karateka. (De *Primers auxilis*, Angel Montes)

Per què no es fractura la mà del karateka durant el colp contra el maó de formigó? En part, perquè la resistència mecànica de l'os és molt més gran que la del formigó. La filmació ràpida del puny en el moment del colp demostra que el retardament (la desacceleració) durant el contacte amb el maó és d'uns 4000 m/s^2 .

Q26) Quantes vegades és major aquesta desacceleració que l'acceleració de la gravetat?

Per tant, la força que fa el maó sobre el puny, la massa del qual és de 0.7 kg , ha de ser igual a 2800 N .

Q27) Explica el càlcul de la força.

Si substituïm el puny en l'instant del colp per un os de 6 cm de llarg i 2 cm de diàmetre, i el fixem pels 2 extrems, la força que pot suportar el centre de l'os és de 25000 N .

Q28) D'on ix aquest valor?

Aquesta força és, aproximadament, vuit vegades major que la que actua sobre el puny del karateka durant el trencament dels maons de formigó. Tanmateix, la mà del karateka té encara més possibilitats de resistir colps com aquests, ja que, a diferència del maó de formigó, la mà no està fixa pels extrems i el colp no cau exactament sobre el seu centre. A més a més, entre l'os i el maó de formigó sempre hi ha teixit elàstic (de la mà) que esmorteix el colp.

Q29) Per què ajuda el teixit elàstic?

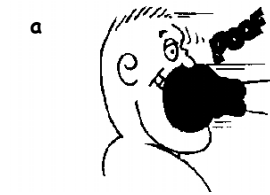
En conclusió, no podem al·legar la fragilitat dels nostres ossos per a justificar la nostra irresolució quan ens proposen que fem de karatekes. Els ossos no fallaran.

5.4.1 Força i temps d'impacte

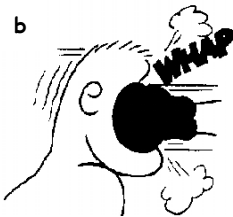
És curiós el fet que per a un boxejador que rep un colp és convenient tractar de prolongar el temps de contacte, mentre que per a un karateka és millor que l'impacte de la mà ocorregui durant el menor temps possible. No ens sembla això una contradicció?

No hi ha contradicció perquè el que és millor per al boxejador és molt diferent del que és millor per al karateka. Per al boxejador que rep el colp, és millor reduir la força que li fan, i ho pot aconseguir si fa màxim el temps d'impacte. Per al karateka és millor augmentar la força que fa, i ho pot aconseguir si redueix allò mínim el temps d'impacte.

Q30) Explica la relació entre temps d'impacte i força.



$F \Delta t = \text{canvi en el moment}$



$F \Delta t = \text{canvi en el moment}$

Fig. 6 (Fig. 5.5 de Hewitt). En els dos casos, l'impuls de la mandíbula del boxejador redueix el moment lineal del colp. a) El boxejador s'allunya mentre li colpeja el guant, i així augmenta el temps de contacte. b) El boxejador es mou cap al guant, i redueix el temps de contacte.

5.5 I per a què serveixen els tendons?

5.5.1 Moviments periòdics i energia

Molts moviments que fem són, normalment, periòdics. Entre aquests moviments estan caminar, córrer, esquiar, patinar, la flexió, etc. Durant aquests moviments les diverses parts del cos es mouen de manera irregular. Quan caminem o correm, per exemple, cadascun dels peus, alternativament, redueix la seua velocitat a zero quan entra en contacte amb el sòl i frena, per tant, el desplaçament del cos (fig. 7a). Posteriorment, en separar-se el mateix peu del terra, amb un impuls, accelerem aquest moviment. Si volguérem moure un cotxe d'aquesta manera, seria necessari prémer ara l'accelerador ara el fre amb una freqüència de prop d'1 Hz. El consum de combustible augmentaria bruscament per aquest moviment d'impuls i frenada, ja que part de l'energia cinètica de l'automòbil es transforma en calor durant la frenada.

Q31) Explica aquesta afirmació.

És el córrer d'una persona i d'un animal tan poc econòmic com el moviment d'aquest cotxe hipotètic? És clar que no. S'han fet experiments en què una persona corria per una plataforma tensomètrica especial que permetia enregistrar tots els components de les forces que actuaven sobre la corredora. Es poden avaluar les despeses energètiques del corredor amb les dades obtingudes i amb la filmació simultània, si suposem que les pèrdues d'energia cinètica de la fase de frenada es transformen totalment en calor.

D'altra banda, les vertaderes despeses energètiques es poden calcular a partir del mesurament de la velocitat de consum d'oxigen pel corredor, perquè se sap quina quantitat d'energia es desprèn de l'organisme si consumeix 1 g d'oxigen. Quan es van comparar aquestes dues avaluacions, va resultar que les veritables despeses energètiques durant la carrera són dues o tres vegades menors que les calculades amb els mesuraments tensomètrics.

5.5.2 Els músculs

D'aquesta manera, la suposició que l'energia cinètica es transforma totalment en calor en la fase de frenada no és vàlida. Una part d'aquesta energia, durant l'interval de temps que va de la fase a) a la b) de la fig. 7, es conserva en els teixits elàstics dels peus en forma d'energia potencial de deformació. En la fase c) aquesta energia emmagatzemada en els tendons es transforma de nou en energia cinètica, igual que passa quan una pilota de goma rebotja en la paret.

Q32) Explica el símil de la pilota.

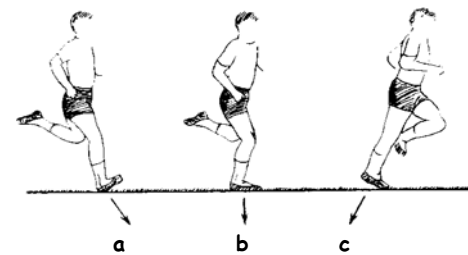


Fig. 7. Direcció de la força (es designa amb la fletxa) que fa el corredor sobre el terra durant diferents fases de la carrera: a, fase de frenada; b, moviment uniforme; c, fase d'acceleració.

(Física) Energia potencial és...
Energia cinètica és...
i es mesuren en...

(Física) Energia mecànica és...

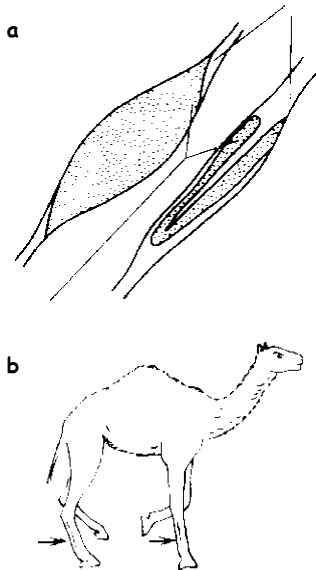


Fig. 8. a) Tipus diferents de músculs adaptats per a la contracció i arreglament d'energia mecànica. b) Les fletxes indiquen la disposició dels músculs que serveixen de "magatzems" d'energia mecànica durant la carrera del camell.

Els músculs de les extremitats i els tendons que els lliguen amb els ossos intervenen com a teixits que fan com de *molls* i es converteixen en reserves d'energia mecànica. Els tendons conserven més l'energia potencial que els músculs, perquè les forces de fregament intern són molt petites i prop del 90% d'aquesta energia es pot tornar a transformar en energia cinètica. A més a més, els tendons tenen major rigidesa que els músculs i es poden estirar fins a un 6% de la seua longitud inicial sense provocar lesions notables, mentre que per als músculs aquest estirament màxim és tan sols d'un 3%.

Totes aquestes propietats dels tendons els converteixen en magatzems principals d'energia mecànica durant una carrera, o quan fem altres moviments cíclics.

Les propietats dels tendons són més o menys iguals per a tots els animals, però les extremitats dels ungulats⁶⁵ estan òptimament adaptades per a conservar l'energia mecànica. Alguns músculs de les parts inferiors de les potes d'aquests animals consten pràcticament només de tendons. Com a exemple d'aquesta utilització dels tendons poden servir les parts inferiors de les extremitats del camell, quasi sense fibres musculars (fig. 8). En el peu d'una persona el tendó més potent és el d'Aquil·les sobre el qual, durant una carrera, pot actuar una força de tracció de fins a 4000 N.

5.5.3 Experiment casolà

Cadascun de nosaltres pot comprovar, amb facilitat, que l'energia s'emmagatzema en els nostres peus com en un moll comprimit o estirat. Fes el següent: posa't ajupit i dobra fortament els genolls. Es pot notar, immediatament, que és molt més fàcil tornar a la posició vertical si adrecem les cames d'un colp, que si ho fem després de romandre ajupits un segon o més. Aquest fenomen es pot explicar perquè quan doblem els genolls una part dels músculs està tibant i controla el seu moviment cap a baix, i els seus tendons estan estirats. Si abans d'adreçar-se no es dóna als tendons la possibilitat d'escurçar-se, l'energia potencial reservada en aquests es transformarà en cinètica. En canvi, si permetem als tendons escurçar-se abans que la persona torne a la posició vertical, aleshores aquesta energia es transformarà en calor.

S'han fet els mateixos experiments amb persones a les quals es mesurava el consum d'oxigen. Se'ls demanava que d'ajupiren i s'adreçaren immediatament després de doblar completament els genolls; d'altra banda, havien de fer-ho amb un retard d'un segon i mig. Els resultats han confirmat la impressió subjectiva que hem discutit: en el primer cas, la persona sotmesa a prova consumia un 22% menys oxigen.

Q33) Fes aquest experiment casolà i explica la conclusió que se'n trau.

⁶⁵ Ungulats: 'Ordre de mamífers on s'inclouen totes les espècies herbívores, les extremitats de les quals acaben en peülles o cascs. Per exemple, les ovelles o els cavalls'.

5.6 Física (conceptes)

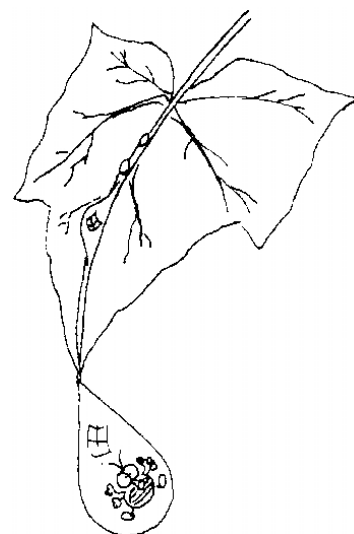
Concepte	Capítols	1r - 5è
Acceleració centrípeta	1r	Corrent elèctric 5è
Acceleració	1r	Cristall 5è
Acceleració	4t	Decibel 2n
Acceleració de la gravetat	1r	Densitat 1r
Àcetic (àcid)	5è	Densitat 2n
Àcid acètic	5è	Diferència de potencial 4t
Adimensional (magnitud)	1r	Difracció 2n
Agitació tèrmica	2n	Difusió 1r
Amper (unitat)		Dimensions d'una magnitud 1r
Amplitud d'oscil·lació d'una ona	2n	Dinàmica 4t
Amplitud d'una ona	2n	Doppler (efecte) 4t
Àrea/volum (relació)	4t	Eco 2n
Àrea/volum i dimensions	3r	Efecte Doppler 4t
Bernouilli (llei, fluids)	3r	Efectes dels límits 4t
Biomecànica	5è	Elàstic (mòdul de Young) 3r
Caiguda lliure (temps de)	1r	Elàstic (mòdul de Young) 4t
Calci (sals)	5è	Elàstica (esfera, pressió) 3r
Camp de força (línies)	4t	Elèctric (camp) 4t
Camp elèctric	4t	Elèctric (camp) 5è
Camp elèctric	5è	Elèctric (corrent) 5è
Camp magnètic	4t	Elèctrode (-, +) 5è
Canvi de fase en la reflexió	2n	Elèctrodes 4t
Capa neutra (en flexió)	5è	Electromotriu (força, FEM) 4t
Centre de gravetat	1r	Energia (llei de conservació) 4t
Centrifugadora	3r	Energia (principi de conservació) 1r
Centrípeta (acceleració)	1r	Energia cinètica 1r
Cinemàtica	4t	Energia cinètica 5è
Cinètica (energia)	5è	Energia d'enllaç d'una molècula 1r
Coeficient de permeabilitat	1r	Energia d'una ona 2n
Coeficient de tensió superficial	3r	Energia mecànica 2n
Cohesió (forces)	3r	Energia mecànica 5è
Combustió	3r	Energia potencial 1r
Component inorgànic	5è	Energia potencial 3r
Compressió	5è	Energia potencial 5è
Concavitat	5è	Esfera elàstica 3r
Concentració de saturació	3r	(fórmula de Laplace, diferència de pressió) 3r
Condensació, nuclis	3r	Esfera elàstica 3r
Conservació de l'energia (principi)	1r	(pressió) 3r
Conservació energia (llei)	4t	Fase (Canvi en la reflexió) 2n
Constant de temps (d'un procés)	1r	FEM (força) 4t
Convecció	1r	electromotriu) 4t
Convexitat	5è	Flexió 5è
		Flexió (capa neutra) 5è
		Fluctuacions 1r
		Fluids en règim laminar 3r
		Fluids en règim turbulent 3r
		Força 1r
		Força (línies d'un camp) 4t
		Força (línies) 5è
		Força (moment) 5è
		Força (resultant) 3r
		Força de la gravetat (pes) 1r
		Força de reacció 1r
		Força de resistència o fricció 1r
		Força electromotriu (FEM) 4t
		Força resultant 1r
		Forces de cohesió 3r
		Fórmula de Laplace (diferència de pressió en esfera elàstica) 3r
		Fractals 3r
		Fregament (força) 1r
		Freqüència 1r
		Freqüència 4t
		Freqüència d'una ona 2n
		Fricció (força) 1r
		Fricció (llei de Stokes) 1r
		Gas (pressió parcial) 1r
		Gradient de pressió 2n
		Gravetat (acceleració) 1r
		Hipòtesi 5è
		Histèresi 3r
		Hooke (llei) 4t
		Hooke (llei) 5è
		Impuls 5è
		Inducció 4t
		electromagnètica 4t
		Inèrcia 4t
		Inorgànic (component) 5è
		Intensitat d'una ona 2n
		Joule (unitat) 4t
		Kilogram (unitat) 4t
		Laminar (règim, fluids) 3r
		Laplace (fórmula, diferència de pressió en esfera elàstica) 3r
		Laplace (llei) 4t
		Límits (efecte dels) 4t
		Línies de força 5è
		Línies de força d'un camp 4t
		Longitud d'ona 2n
		Llei conservació 4t

energia		Potencial (energia)	3r	Tensió	4t
Llei de Bernoulli (fluids)	3r	Potencial (energia)	5è	Tensió	5è
Llei de Hooke	4t	Pressió	2n	Tensió superficial (coeficient)	3r
Llei de Hooke	5è	Pressió (gradient)	2n	Tensoactives, substàncies	3r
Llei de Laplace	4t	Pressió arterial	4t	Tèrmic (moviment d'agitació)	2n
Llei de Newton (2a)	4t	Pressió atmosfèrica	1r	Tesla	4t
Llei de Newton del refredament	1r	Pressió en una esfera elàstica	3r	Tracció	5è
Llei de Poiseuille	4t	Pressió parcial d'un gas	1r	Transductor	2n
Llei de Stokes del fregament	1r	Principi de conservació de l'energia	1r	Transició de règim laminar a turbulent (fluids)	3r
Magnètic (camp, inducció)	4t	Radiació	1r	Transmissió d'una ona	2n
Magnitud	1r	Raigs X	5è	Treball	1r
Magnitud (ordre)	1r	Reacció (força)	1r	Treball	3r
Massa	1r	Reflexió d'una ona	2n	Turbulent (règim, fluids)	3r
Massa-volum d'un gas	3r	Reflexió i canvi de fase	2n	Ultrasons	4t
Mecànica (energia)	5è	Refredament (Llei de Newton)	1r	Unitat: amper	
Metre (unitat)		Règim laminar (fluids)	3r	Unitat: joule	
Mòdul de Young	4t	Règim turbulent (fluids)	3r	Unitat: kilogram	
Mòdul elàstic de Young	3r	Relació àrea/volum	4t	Unitat: metre	
Mol (unitat)	5è	Relació àrea/volum i dimensions	3r	Unitat: mol	
Moment d'una força	5è	Relació massa-volum d'un gas	3r	Unitat: newton	
Moviment tèrmic aleatori	2n	Resistència (força)	1r	Unitat: pascal	
Negatiu (elèctrode)	5è	Resistència d'un material	5è	Unitat: segon	
Neutra (capa, en flexió)	5è	Resultant (força)	1r	Unitat: volt	
Newton (2a llei)	4t	Resultant d'unes forces	3r	Unitat: watt	
Newton (Llei del refredament)	1r	Sals de calci	5è	Variació sinusoidal	2n
Newton (unitat)		Saturació, concentració	3r	Velocitat	1r
Nuclis de condensació	3r	Segon (unitat)		Velocitat de propagació d'una ona	2n
Número adimensional	1r	Segona llei de Newton	4t	Velocitat mitjana	2n
Ones sonores	2n	Sinusoidal (variació)	2n	Velocitat ona compressió sang	4t
Ordre de magnitud	1r	So	2n	Velocitat ona deformació artèria	4t
Parcial (pressió)	1r	Solubilitat	3r	Vidre	5è
Pascal (unitat)		Soroll blanc	2n	Volt	5è
Permeabilitat (coeficient)	1r	Stokes (Llei de fricció)	1r	Volt (unitat)	
Pes	1r	Substàncies tensoactives	3r	Watt (unitat)	
Piezoelectricitat	4t	Superficial (tensió)	3r	X (raigs)	5è
Piezoelectricitat	5è	Temps (constant de)	1r	Young (mòdul de)	4t
Poiseuille (Llei)	4t	Temps de caiguda	1r	Young (mòdul elàstic)	3r
Positiu (elèctrode)	5è	lliure		Young (mòdul)	5è
Potència	1r				
Potència	5è				
Potencial (diferència)	4t				

Capítol 6. Òptica biològica

Tinc una corretja
que arriba al cel,
i al seu entorn, no.

Endevinalla popular russa ⁶⁶



6.1 Com es formen les imatges?

- 6.1.1 La retina
- 6.1.2 El punt cec

6.2 Física de la visió

- 6.2.1 Bastons òptics
- 6.2.2 Absorció de llum
- 6.2.3 Densitat de molècules de rodopsina
- 6.2.4 Polarització de la llum
- 6.2.5 Absorció de llum polaritzada

6.3 Miralls

- 6.3.1 Reflexió de la llum en capes fines
- 6.3.2 Espills de capes múltiples
- 6.3.3 Miralls vius
- 6.3.4 Per a què aquests espills en els ulls dels animals?

6.4 Ull termòmetre

- 6.4.1 Finestra del visible
- 6.4.2 "Visió" tèrmica
- 6.4.3 Sensibilitat de "l'ull" tèrmic
- 6.4.4 Temps de reacció en una font de IR
- 6.4.5 Direccionalitat

6.5 Ommatidi (Un manual d'òptica)

- 6.5.1 Resolució d'un sistema òptic
- 6.5.2 Direcció de l'objecte
- 6.5.3 Volum de l'ull

6.6 Brúixola solar per a qualsevol temps

- 6.6.1 Com s'orienten formigues i abelles
- 6.6.2 Orientació per llum polaritzada

6.7 Plantes guies de llum (fibres òptiques)

6.8 Física (conceptes)

⁶⁶ Els ulls.

6.1 Com es formen les imatges?

La vista és el sentit més important per a una persona, ja que la major part de la informació sobre el món que ens envolta l'obtenim des dels receptors fotosensibles que es troben en la retina de l'ull (fig. 1). El primer en comprendre que la imatge del món exterior es forma en la retina va ser l'astrònom alemany Kepler (1600).⁶⁷

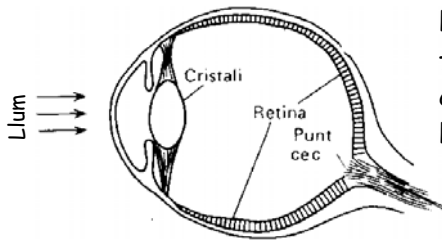


Fig. 1. Estructura de l'ull d'una persona.

Q1) Resumeix els models de visió que hi havia abans de Kepler.

6.1.1 La retina

Kepler va ser el primer a enunciar que veure significa percebre la irritació de la retina provocada per la imatge invertida i disminuïda que s'hi forma de l'objecte. El savi considerava que cada punt d'un objecte que mirem no emet un raig únic sinó un con sencer de llum. Aquests cons lluminosos que parteixen de tots els punts de l'objecte entren en l'ull i, després de la refracció dels raigs pel cristallí, es transformen en cons de llum convergents els vèrtexs dels quals es troben en la retina, i creen en aquesta les imatges dels punts corresponents.

Q2) Fes un esquema dels cons, ull i retina... tal com s'esmenten en el text.

(Física) Una imatge és...

(Física) Un receptor fotosensible (o fotoreceptor) és...

Kepler va suposar també que en la retina hi ha una substància molt "fina" i que quan la llum incideix sobre aquesta substància es descompon. Va donar el nom de *púrpura visual* a aquesta substància. La hipòtesi de Kepler sobre l'existència en la retina d'una substància que es descompon sota l'impacte de la llum només va ser confirmada a finals del segle XIX.

⁶⁷ Kepler va arribar a aquesta conclusió per l'any 1604, abans que ell mateix descobrís les lleis principals del moviment dels cossos celestes. Els predecessors de Kepler consideraven que l'òrgan que percep la llum és la lent de l'ull; és a dir, el cristallí. Però aquesta afirmació presentava un problema irresoluble: de quina manera podien cabre les imatges d'objectes grans en el diminut globus ocular?

Per a escapar d'aquest cul-de-sac els precursors de Kepler van suggerir que la lent tan sols era estimulada per aquells raigs de llum que incidien perpendicularment sobre la seua superfície. Així resolien també un altre problema: com distingeix l'ull dos raigs que incideixen en un mateix punt de la lent si parteixen de diferents punts de l'objecte?

La segona contradicció amb què es trobaven els precursors de Kepler, segons sembla insuperable, era que la imatge de l'objecte havia d'estar invertida en la retina. Per a esquivar aquesta contradicció es va enunciar que en l'ull hi ha zones que no donen la possibilitat de creuar-se els raigs o que els refracten doblement.

6.1.2 El punt cec

Una aportació considerable a la comprensió del treball de l'ull com un instrument òptic la va fer també un altre físic famós, Mariotte.⁶⁸ El 1666, en la conferència de l'Acadèmia, el científic va presentar un informe consagrat al descobriment del *punt cec* o *punt de Mariotte* en la retina de l'ull: és el punt d'entrada del nervi òptic. En aquest lloc de la retina manquen els fotoreceptors i, per això, quan la imatge de l'objecte incideix sobre el punt cec, l'objecte es torna invisible.⁶⁹

Q3) Explica què és el punt cec.

6.2 Física de la visió

6.2.1 Bastons òptics

En la fig. 2 es representa esquemàticament un bastó o bastonet òptic; és a dir, una cèl·lula fotoreceptora de l'ull. Aquestes cèl·lules estan presents en la retina dels vertebrats. Quan penetra la llum pel bastonet òptic a través de la superfície frontal, incideix sobre una "pila" de discos de membrana de dues capes que contenen el pigment visual rodopsina (conegut també com a púrpura visual).

La sensibilitat dels fotoreceptors a la llum s'explica per la descomposició de la rodopsina, per l'acció de la llum, en dos integrants: el retinol i l'opsina. Com a resultat d'aquesta reacció química s'exciten els fotoreceptors i tot seguit es propaguen els impulsos nerviosos pel nervi òptic cap al cervell.

La sensibilitat del pigment visual a la llum és tan gran que és suficient un fotó per a desintegrar una molècula de rodopsina. En la foscor el retinol i l'opsina tornen a transformar-se en rodopsina.

La tasca fonamental del pigment visual és l'absorció de la llum. Com més empaquetades estiguen les molècules de rodopsina, més quantitat de llum absorbirà el fotoreceptor i millor veurà l'ull tot i que hi haja una il·luminació dèbil. Quina és la densitat d'empaquetatge de les molècules de rodopsina en la membrana dels discos fotosensibles?

6.2.2 Absorció de llum

Sense aprofundir en els detalls del mecanisme d'absorció del quant de llum per la molècula de rodopsina, es pot considerar simplement que una part d'aquesta molècula no és transparent i, per tant, absorbeix la llum. L'àrea d'aquesta part de la molècula no transparent a la llum constitueix tan sols una porció insignificant de l'àrea total de la molècula, ja que el fotó és absorbit solament en el cas que interaccione amb un àtom ben concret de la molècula. Per això es pot suposar que les dimensions de la part no transparent de la molècula no han de superar les dimensions d'un àtom ($\approx 10^{-8}$ cm), i la seua àrea serà $\sigma \approx 10^{-16}$ cm².

⁶⁸ Mariotte va ser un dels fundadors i primers membres de l'Acadèmia de Ciències de París, conegut pels treballs dedicats a la física dels gasos i líquids.

⁶⁹ Mariotte va repetir aquest experiment en presència del rei i els cortesans, i els va ensenyar a veure's els uns als altres sense cap.

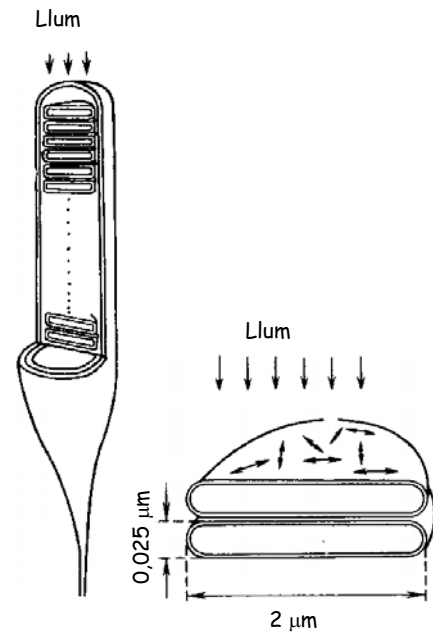


Fig. 2. (a) Tall d'un bastonet visual dels animals vertebrats, i (b) imatge augmentada dels discos fotosensibles que conté. Les fletxes de dues puntes ($\longleftrightarrow$) en la membrana dels discos indiquen les direccions dels eixos elèctrics de les molècules de rodopsina.

(Física) Una lent és...

(Física) La refracció és...

(Física) La reflexió és...

(Física) Sensibilitat és...

(Física) Un fotó és...

(Física) Absorció de la llum és...

(Física) Un quant és...

(Física) Una substància transparent és ...

(Física) La llei de Lambert-Beer indica que...

(Física) La uma (o uam) és...

Q4) Explica el significat de σ en comparació amb l'àrea total de la molècula.

Es pot demostrar que si I és la intensitat de llum que incideix sobre una capa de substància que té un gruix d , aleshores la intensitat de la llum que passa a través d'aquesta capa (llum transmesa, I_t) és

$$I_t = I e^{-\sigma c d} \quad (1)$$

on c és la concentració de les molècules absorbidores de llum i σ la secció definida anteriorment.

Q5) Fes un esquema de la funció anterior.

Q6) Comprova que l'eq. (1) és dimensionalment correcta.

L'expressió (1) defineix el procés d'absorció de la llum per la substància i s'anomena *fórmula Lambert-Beer*. Aquesta llei es pot utilitzar per a avaluar la densitat d'una substància, com ara veurem. Evidentment, com majors siguin els valors de σ i c per a una substància donada, més densa serà la substància des del punt de vista òptic.

Q7) Explica l'afirmació anterior.

6.2.3 Densitat de molècules de rodopsina

Avaluem el valor màxim de la densitat òptica que es pot obtenir si utilitzem la substància constituïda per molècules anàlogues a la de rodopsina, que tenen una massa molecular de prop de 50 000 uma. El diàmetre d'aquestes molècules és d'uns 5×10^{-7} cm i el seu volum és d'uns 0.75×10^{-19} cm³.

Q8) Calcula el volum a partir del diàmetre.

Q9) Quants àtoms té la molècula si pren unes dimensions atòmiques $\sim 10^{-8}$ cm, com hem dit en el càlcul de σ ?

Si l'empaquetatge de les molècules en la substància és màxim, i s'apreten les unes contra les altres com boles en un calaix, encara resta per utilitzar-se prop d'un quart del volum total.

Q10) Calcula el volum buit que hi ha entre una esfera i un cub que la incloga. És el 25%?

Per això, la concentració màxima possible $c_{\text{màx}}$ de molècules anàlogues a la rodopsina és pròxima a 10^{19} cm⁻³.

Q11) D'on ix aquest nombre?

Si suposem que $\sigma_{\max} = 10^{-16} \text{ cm}^2$ i substituïm $c_{\max}$ i $\sigma_{\max}$ en la (1), obtenim que per al màxim empaquetatge de les molècules de rodopsina $I_t(d) = I e^{-1000 d}$, quan d es mesura en cm. La densitat òptica d'aquest empaquetatge de les molècules és tal que, en termes aproximats, el 99% de la llum incident és absorbida per una capa de substància el gruix de la qual és tan sols de 40 μm .

Q12) D'on ixen aquests valors?

Experiments fets amb la retina han demostrat que $\sigma \approx 1.6 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$. Per això, hi ha motius per a considerar que l'àrea de la part no transparent de la molècula de rodopsina és pròxima al límit físic.

Q13) Per què es parla ací de les proximitats al límit físic?

Q14) En quin percentatge difereix aquest valor mesurat de l'estimació teòrica de σ ?

En resum, doncs, la concentració de molècules de rodopsina en la membrana dels discos fotoreceptors és només lleugerament inferior al límit físic $c_{\max}$, i així, amb una capa de pigment visual d'uniques quantes micres, s'assegura l'absorció quasi completa de la llum incident.

6.2.4 Polarització de la llum

La fórmula (1) es pot utilitzar si s'admet que l'única condició per a l'absorció del fotó es que incideix sobre la part no transparent de la molècula de rodopsina. Però realment això no és cert. Com sabem, la llum és una ona electromagnètica el vector de propagació de la qual ($\mathbf{k}$), juntament amb els vectors camp elèctric ($\mathbf{E}$) i camp magnètic ($\mathbf{B}$), constitueix una tríade de vectors mútuament perpendiculars (fig. 3). El pla on estan els vectors $\mathbf{B}$ i $\mathbf{k}$ es denomina normalment *pla de l'ona electromagnètica polaritzada* o *pla de polarització de la llum*.

En molts casos, però, la llum que incideix en els nostres ulls no té un pla de polarització determinat, perquè normalment utilitzem fonts de llum no polaritzada, com ara el Sol o un llum incandescent habitual (una bombeta elèctrica). El pla de polarització de les ones electromagnètiques emeses per aquestes fonts varia de direcció ininterrompudament, i el vector $\mathbf{E}$ pot tenir totes les direccions possibles que estan en un pla perpendicular al vector $\mathbf{k}$.

6.2.5 Absorció de llum polaritzada

L'absorció del fotó per la molècula és conseqüència de la interacció del camp elèctric del fotó amb les partícules carregades de la molècula. La probabilitat que el fotó siga absorbit per la molècula depèn de l'angle que el vector $\mathbf{E}$ forma amb l'eix elèctric de la molècula. Si la direcció i el sentit del vector $\mathbf{E}$ coincideixen amb l'eix elèctric de la molècula, la probabilitat d'absorció del fotó és màxima. Si el vector $\mathbf{E}$ és perpendicular a l'eix de la molècula, aquesta

(Física) Una micra (o micròmetre) és...

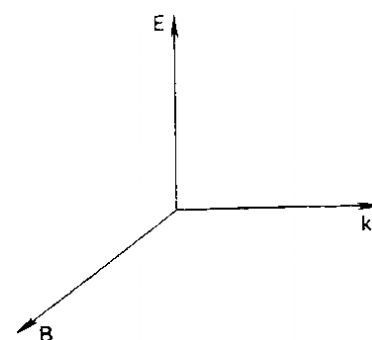


Fig. 3. Relació entre els vectors elèctrics ($\mathbf{E}$), magnètic ($\mathbf{B}$) i el de velocitat ($\mathbf{k}$) de l'ona lluminosa.

(Física) Una oem és...

(Física) El vector de propagació d'una oem és...

(Física) El camp elèctric és...

(Física) El camp magnètic és...

(Física) El pla de polarització és...

no absorbirà el fotó fins i tot en el cas que aquest incideixca en la part no transparent de la molècula. Per a altres angles φ entre el vector $\mathbf{E}$ i l'eix elèctric de la molècula, la probabilitat d'absorció del fotó varia proporcionalment al cosinus, $\cos \varphi$.

Q15) Per què apareix la funció $\cos \varphi$?

Tornem una altra vegada a la fig. 2. Les molècules de rodopsina en el bastonet visual formen capes molt fines (d'unes $0.005 \mu\text{m}$) en les membranes fotosensibles, i ho fan de manera que els eixos elèctrics d'aquestes molècules sempre estan en el pla perpendicular a la direcció de la llum i, per tant, en el pla que comprèn el vector $\mathbf{E}$. És evident que aquesta disposició de les molècules de rodopsina augmenta considerablement la probabilitat que absorbesquen fotons en comparació amb el cas que la rodopsina es trobara en una dissolució, en la qual l'orientació de les seues molècules seria arbitrària (en totes direccions, no únicament en plans perpendiculars al raig de llum com en la fig. 2).

Q16) Què tenen d'especial les dissolucions?

(Física) Interferència és...

Es pot demostrar que en l'últim cas prop d'un terç de molècules no participarien en l'absorció de la llum perquè els seus eixos elèctrics serien perpendiculars a la direcció i sentit del vector $\mathbf{E}$.

6.3 Miralls

Hi ha poques persones que no experimenten la sensació de por quan veuen en la foscor, de sobte, els ulls brillants d'un gat. Un altre fenomen que ens sorprèn són les brillants escames dels peixos fora l'aigua, amb els seus reflexos. Els dos fenòmens, els ulls ardents del gat i la brillantor de les escames del peix, apareixen gràcies a la capacitat d'alguns teixits biològics de reflectir la llum.

6.3.1 Reflexió de la llum en capes fines

Molts animals tenen superfícies que reflecteixen bé la llum. Aquestes superfícies, sense ser metàl·liques, reflecteixen la llum de manera semblant a les superfícies de metall polit. En tots aquests casos la reflexió és el resultat de la interferència de les ones lluminoses en pel·lícules fines, fig. 4, fenomen que discutirem tot seguit.

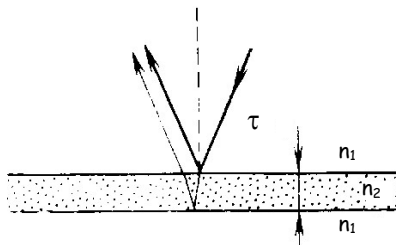


Fig. 4. Reflexió de la llum des d'una placa (pel·lícula) planoparal·lela.

Q17) Explica la fig. 4.

Tothom ha vist bombolles de sabó o un toll de gasolina sobre un carrer mullat i ha vist el bell espectre de colors que reflecteixen. Una pel·lícula prima, com és una bombolla de sabó, té dues superfícies molt juntes (la superfície

interior i l'exterior de la bombolla). La coloració de les bombolles apareix per interferència de les ones reflectides en les dues superfícies de la pel·lícula, fig. 4. La llum que es reflecteix en una de les superfícies pot anul·lar la que es reflecteix en l'altra i, d'aquesta manera, alguns colors (components de la llum blanca del Sol) hi manquen en la reflexió.

Q18) Explica les frases anteriors.

Per què la reflexió des de la pel·lícula siga màxima, les dues ones reflectides han de trobar-se desfasades l'una respecte a l'altra en una magnitud que ha de ser múltiple de 2π rad (radians). Hem d'adonar-nos que l'ona lluminosa, quan es reflecteix per un medi que té densitat òptica gran (és a dir, amb un índex de refracció n gran, major que el del medi d'incidència), canvia la seua fase en π rad; d'altra banda, si la reflexió de l'ona es fa des d'un medi òpticament menys dens, no hi haurà canvi de fase en l'ona reflectida. Per això en el cas d'incidència estrictament vertical de l'ona lluminosa sobre la pel·lícula, per a obtenir la reflexió màxima el gruix òptic de la pel·lícula (el producte del gruix geomètric d per l'índex de refracció, n) ha de ser igual a:

$$nd = p \frac{\lambda}{4} \quad p = 1, 2, 3... \quad (2)$$

on p és un nombre natural, i λ és la longitud d'ona de la llum.

Q19) Comprova que l'eq. (2) és dimensionalment correcta.

Q20) Dedueix l'expressió (2).

El gruix mínim d'aquesta pel·lícula és $\lambda/4$ i la relació entre la intensitat de la llum reflectida i la incident és d'uns quants tants per cent (un 8% per a una pel·lícula fina d'aigua suspesa en l'aire, com en una bombolla de sabó).

6.3.2 Espills de capes múltiples

Quan apliquem consecutivament a una superfície llisa de determinat material diverses pel·lícules fines, de manera que els valors de les densitats òptiques de les pel·lícules veïnes es diferencien però el seu gruix òptic siga igual a $\lambda/4$, és possible fer pròxim a la unitat el coeficient de reflexió del sistema, si el nombre d'aquestes pel·lícules és de prop de deu (fig. 5).

Q21) Explica què li ocorre (reflexions i refraccions) a un raig de llum que penetra per l'estructura de la fig. 5.

Els miralls de capes múltiples per a dispositius òptics van començar a fabricar-se a finals dels anys 40. Normalment, aquest procediment consisteix a aplicar al suport del futur espill, alternativament, capes fines de fluorur de magnesi ($n = 1.36$) i de sulfat de zinc ($n = 2.4$) i això es fa per condensació dels vapors de les sals corresponents. Si s'hi apliquen materials de manera

(Física) Un radiant és...

(Física) Fase d'una ona és...

(Física) Diferència de fase és...

(Física) Índex de refracció és ...

(Física) Coeficient de reflexió és ...

(Física) Gruix òptic és ...

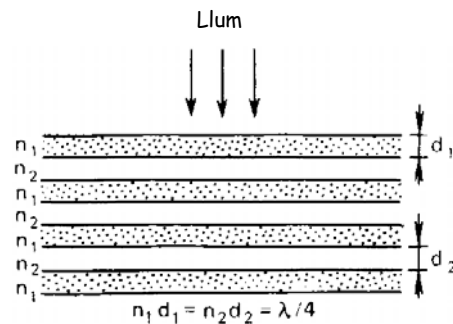


Fig. 5. Estructura d'un mirall de capes múltiples.

que tinguen índexs de refracció ben diferents, és possible disminuir molt el nombre de capes de l'espill, ja que el coeficient de reflexió de llum des de la superfície límit de dos medis és igual a

$$r = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (3)$$

en què n_1 i n_2 són els índexs de refracció d'aquests medis.

Q22) Fes una representació esquemàtica del coeficient de reflexió r en funció del quocient d'índexs de refracció (suggeriment: divideix primer numerador i denominador per un dels dos índexs).

Els espills de pel·lícules fines que tenen capes múltiples tenen una propietat de la qual manquen els espills metàl·lics comuns, que és que acolorixen la llum reflectida. Aquest fenomen s'explica perquè el coeficient de reflexió màxim s'aconsegueix només per a la llum de la part de l'espectre electromagnètic per a la qual el gruix òptic de les pel·lícules és $\lambda/4$. Per això, si la llum que incideix sobre l'espill de capes múltiples és acolorida uniformement i es percep, per tant, com llum blanca, en la llum reflectida restaria la part de l'espectre per a la qual és vàlida la igualtat (2). A més a més, el color del mirall de capes múltiples depèn de l'angle d'incidència de la llum i es desplaça en el sentit de la regió blava de l'espectre quan disminueix aquest angle.

Q23) Explica l'afirmació anterior.

6.3.3 Miralls vius

Després d'aquesta incursió per la teoria dels espills de pel·lícules fines multicapa, retornem a les analogies *vives*. Per a crear superfícies especulars en els organismes vius, la natura utilitza els següents parells de materials:

Aigua ($n = 1.34$), cristalls de guanina ($n = 1.83$)

Aire ($n = 1.0$), cristalls de quitina ($n = 1.56$)

*Aigua - cristalls de quitina*⁷⁰

(Física) Superfície especular és...

Les superfícies especulars estructurades de la manera que mostra la fig. 5 les observem en alguns animals d'aigües profundes (mol·luscos i crustacis), en la superfície posterior de l'ull, darrere la retina (fig. 6).

⁷⁰ L'índex de refracció de la quitina és semblant al del vidre (1.5 a 1.8). Per això s'està investigant la possible utilització de la quitina per a la fabricació de lents de contacte. La quitina necessària es podria obtenir a partir de les deixalles de la indústria de conserves de crancs de mar (de les closques). Les lents de contacte fetes de quitina serien totalment innòcues, i no provocarien reaccions al·lèrgiques.

6.3.4 Per a què aquests espills en els ulls dels animals?

Ja en l'edat mitjana se sabia que la vista d'una persona està lligada amb l'enfocament i amb aquest fi s'utilitzava una lent. En aquest període es van començar a utilitzar les ulleres. Aviat, també els espills es van convertir en una part inalienable dels dispositius òptics (telescopis, llargavistes, etc.). Tanmateix, abans que els espills de capes múltiples trobaren aplicacions tecnològiques, es considerava que els animals no utilitzaven per a l'enfocament el principi especular, perquè per a tal fi necessitaven disposar de superfícies metàl·liques polides. Ben recentment, però, s'ha demostrat que en alguns organismes el funcionament de l'ull es basa en l'òptica especular.

És suficient observar l'esquema de l'ull de la pinta marina, fig. 6, un mol·lusc que viu en una petxina bivalva en el fons de la mar, per a comprendre que aquest ull no veuria res sense el mirall de capes múltiples. En efecte, és sorprenent observar que la lent d'aquest ull està en contacte amb la retina. Tal estructura significa que la lent crea la imatge enfocada darrere la retina. Si no fóra per l'espill, que fa retornar els raigs de llum a la retina i aconsegueix l'enfocament, en la retina no s'obtingria una imatge nítida. D'aquesta manera, l'aplicació de dos sistemes d'enfocament —una lent i un espill esfèric de capes múltiples— dona la possibilitat d'obtenir una imatge nítida de l'objecte amb una disminució considerable del volum de l'ull.

Q24) Què té a veure el volum ací?

A més a més, amb aquest sistema d'enfocament la llum passa dues vegades a través de la retina, cosa que augmenta substancialment la sensibilitat de l'ull.

Q25) Què hi té a veure la sensibilitat?

Aquesta darrera propietat de l'ull és la més útil per als animals d'aigües profundes, que han d'orientar-se en condicions d'il·luminació extraordinàriament feble.

Una estructura important de l'ull que millora la visió nocturna de molts animals terrestres que mantenen un mode de vida nocturn és el tapetum, un espill pla sui generis pel qual, precisament, els ulls del gat emeten llum en la foscor. El *tapetum*, igual que l'espill esfèric en l'ull de la pinta marina, contribueix al fet que la porció de la llum que ha passat a través de la retina sense incidir sobre els fotoreceptors tinga la possibilitat de caure en la retina una vegada més. Per aquesta causa, en part, l'ull del gat pot veure els objectes circumdants amb una il·luminació 6 vegades inferior a la que necessitem nosaltres. Un espill anàleg s'ha descobert també en alguns peixos.

6.4 Ull termòmetre

6.4.1 Finestra del visible

La majoria dels animals veuen en l'interval de longituds d'ona que va de 350 a 750 nm. Aquestes xifres corresponen a una franja molt estreta en l'espectre de la radiació electromagnètica del Sol, entre el IR i el UV (infraroig i ultraviolat).

Q26) Quina relació hi ha entre λ i ν en una oem?

(Física) Telescopis i llargavistes són...

(Física) Enfocament és...

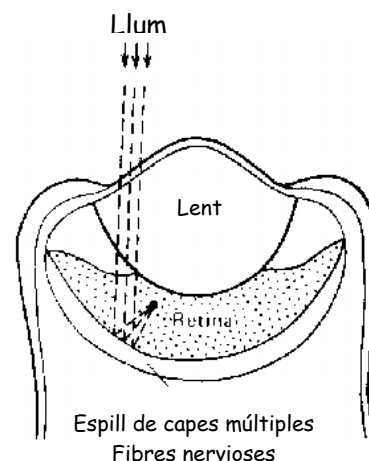


Fig. 6. Estructura de l'ull de la pinta marina. Les línies de traços indiquen la marxa dels raigs lluminosos.

(Física) Una persona normal veu en l'interval de λ de...

(Física) L'espectre de radiació electromagnètica és...

La raó de tal "estretor" és múltiple. Per a les ones més curtes arriba a ser perceptible l'aberració cromàtica de l'ull (dependència de l'índex de refracció del cristal·lí respecte a la freqüència).

(Física) Aberració cromàtica és...

Q27) Per què pot dependre n de ν ?

A més a més, les freqüències de radiació altes ($\lambda < 350$ nm) s'absorbeixen més intensament pels elements de l'ull que es troben davant la retina.

Ara bé, si considerem les ones més llargues ($\lambda > 750$ nm), l'energia de la radiació electromagnètica resulta insuficient per a la reacció fotoquímica en l'ull.

Q28) Explica aquesta afirmació.

(Física) L'energia de la radiació electromagnètica de freqüència ν és...

Tanmateix, els animals homotèrmics (és a dir, de sang calenta) tenen un obstacle més que els impedeix aprofitar la radiació d'ones més llargues: es tracta de la radiació tèrmica que emet el propi cos i que penetra en l'ull des de l'interior del cos i l'abraça completament. Si la retina dels animals homotèrmics fóra igualment sensible a tot l'espectre de la radiació electromagnètica, aquests no veurien res, ja que la pròpia radiació tèrmica (infraroja) eclipsaria els raigs de llum incidents en l'ull.

Una situació completament distinta s'observa en els animals de sang freda: en aquest cas és possible la percepció de l'infraroig.

6.4.2 "Visió" tèrmica

(Física) IR (infraroig) és...

(Física) UV (ultraviolat) és...

(Física) Un termoreceptor és...

La sensibilitat a la temperatura es diferencia de totes les altres sensacions perquè per a la majoria dels animals, i també per a una persona, aquest sentit serveix per assegurar el benestar i el confort i no per a orientar-se, trobar aliments o descobrir enemics. Però, ací també hi ha excepcions, com és el cas de xinxes, abelles, mosquits, cararres, escurçons, boes, serp de cascavell i altres rèptils. Aquests animals utilitzen els seus termoreceptors per a obtenir informació sobre objectes ben allunyats. D'aquesta manera, alguns animals xucladors de sang troben els seus futurs "amos": les xinxes són capaces de descobrir animals de sang calenta a una distància de 15 cm.

En els insectes els termoreceptors sensibles per a percebre els senyals tèrmics que arriben des de lluny estan disposats, en la majoria dels casos, en les antenes⁷¹ i, per a determinar la temperatura del sol, en les potetes. Gràcies a l'existència de dues antenes els insectes poden determinar amb gran precisió la direcció cap a la font de calor.

Q29) Per què en necessiten dues, d'antenes?

Quan rep el senyal de la presència de la seua presa de sang calenta, el mosquit, per exemple, canvia la posició del cos fins al moment en què les seues dues petites antenes de 3 mm comencen a enregistrar igual intensitat de radiació infraroja.⁷²

⁷¹ ...les petites banyes flexibles especials del cap.

⁷² Ara per ara, les estructures dels coets interceptors autodirigits als objectes calents (coets o motors dels avions en funcionament) no poden competir amb els insectes en la sensibilitat dels seus instruments.

La serp ix a caçar per la nit quan la foscor oculta la seua presa. S'ha establert que la direcció d'atac de la serp es regula per la calor irradiada pel blanc homoterm. Els "ulls" tèrmics de la serp, que duen el nom de *clots* o *fosses facials*, són òrgans especialitzats sensibles a la radiació infraroja dels objectes externs (fig. 7). Normalment, els *clots facials* estan disposats en la part davantera i un poc més baix dels dos ulls de la serp; però el nombre de clots depèn de l'espècie d'ofidi i pot arribar a 26 (en la pitó).

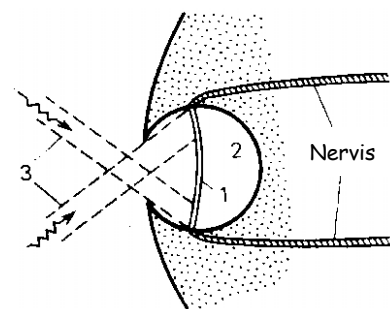


Fig. 7. Tall de l'ull facial de la serp: 1, membrana termosensible; 2, cavitat aèria. La irradiació tèrmica es mostra amb el núm. 3.

6.4.3 Sensibilitat de "l'ull" tèrmic

Les més estudiades són les fosses de la serp de cascavell. L'exactitud amb què aquesta serp —amb els ulls de visió tancats, i aprofitant els ulls tèrmics— ataca una font de calor (per exemple, una làmpada engegada) és d'un angle de 5°. I pel que fa a la sensibilitat de la fossa facial, és tan gran que permet descobrir la mà d'una persona o un ratolí viu a la distància de 0.5 m, situació que correspon a una intensitat de radiació infraroja de prop de 0.1 mW/cm² (per a fer-hi una comparació, assenyalem que la intensitat de la radiació IR del Sol en un dia d'hivern en la latitud de Moscou és d'uns 50 mW/cm²). S'ha demostrat que la serp ataca quan la temperatura de la seua membrana sensible de la fossa nasal augmenta tan sols en 0.003°C.

Q30) Quina potència de radiació emet per unitat d'àrea una bombeta de llum visible.

Aleshores, com es pot explicar la sensibilitat tan alta de "l'ull" tèrmic de la serp? És interessant assenyalat que la serp no disposa de cèl·lules receptores, que siguin especialment sensibles a la radiació tèrmica. Cadascun de nosaltres té en la capa superior de la pell terminacions nervioses quasi anàlogues per la seua termosensibilitat. Però ací està precisament la solució: els mamífers (incloses les persones) tenen disposades aquestes terminacions en la pell, a una profunditat de 0.3 mm, mentre que en la serp les terminacions es troben immediatament baix la superfície de la membrana sensible de la fossa facial, a una profunditat de 0.005 mm. I per aquesta raó, encara que la capa superior de la pell despullada del mamífer s'escalfa per la radiació infraroja de la mateixa manera que la membrana de la serp, la sensibilitat de la pell a aquesta radiació infraroja es 20 vegades menor. A més a més, en els mamífers, la major part de l'energia tèrmica es dissipa en els teixits que no contenen termoreceptors, mentre que en la fossa facial de la serp de cascavell, i pels dos costats de la membrana termosensible, hi ha aire que, com sabem, és un bon aïllador tèrmic. D'aquesta manera, l'alta sensibilitat de la fossa facial a la radiació infraroja està condicionada no per l'existència en aquesta de termoreceptors especials, sinó per l'estructura anatòmica inusitada d'aquest òrgan.

(Física) Un aïllador tèrmic és...

(Física) Un cos negre és...

(Física) La llei de Stefan-Boltzmann diu que ...

(Física) Equilibri tèrmic és...

(Física) Un kelvin és...

6.4.4 Temps de reacció en una font de IR

Avaluem el temps de reacció de la serp a l'aparició d'una font de radiació infraroja. Suposem que la membrana termosensible de la serp representa un cos negre que absorbeix tota la radiació que incideix a sobre i emet sols la radiació amb la qual es troba en equilibri tèrmic. La potència W de radiació de la unitat de superfície del cos negre segueix la llei de Stefan-Boltzmann:

$$W = \sigma T^4 \quad (4)$$

en què $\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$, i T_0 és la temperatura del cos, en kelvin.

Q31) Comprova les dimensions de l'equació (4).

Q32) Calcula la potència que emet una bombeta elèctrica que està a 1000 K, i compara-la amb una potència nominal elèctrica típica.

(Física) La llei de conservació de l'energia diu que ..

(Física) Capacitat calorífica és...
i es mesura en...

(Física/matemàtiques) Una equació diferencial és...

Suposem que en l'instant de temps $t = 0$ s'ha connectat prop de la serp una font nova de radiació i la potència de la radiació incident sobre la unitat de superfície de la membrana ha augmentat en S_0 . Com a resultat, la temperatura de la membrana comença a créixer, i al cap d'un temps t després de la connexió de la nova font de radiació aquest increment serà $T(t) = T_0 + \Delta T(t)$. Una temperatura més elevada implicarà un augment ΔW de la potència irradiada per la membrana, que podem calcular així:

$$\Delta W = \sigma (T_0 + \Delta T)^4 - \sigma T_0^4 \approx 4\sigma T_0^3 \Delta T \quad (5)$$

De la llei de la conservació de l'energia s'infereix que la potència S_0 absorbida per la membrana ha de ser igual a la suma de la potència invertida en l'escalfament de la membrana ($c \, dT/dt$, en què c és la capacitat calorífica d'una unitat de superfície de la membrana) i la potència $2\Delta W$ irradiada per una unitat de superfície d'aquesta membrana (el factor 2 apareix perquè la membrana irradia per les dues superfícies). Amb l'expressió (5) i el que hem vist, tenim

$$S_0 = c \frac{d(\Delta T)}{dt} + 8\sigma T_0^3 \Delta T \quad (6)$$

Q33) Comprova les dimensions de l'equació anterior.

Q34) Dedueix l'equació anterior.

L'equació diferencial (6) relaciona la velocitat de variació de la temperatura de la membrana $d(\Delta T)/dt$ i l'increment absolut, ΔT . És evident que la velocitat de variació de la temperatura serà major quant menor siga la relació $c/(8\sigma T_0^3)$.

Q35) Explica aquesta afirmació.

La solució de l'equació (6) és:

$$\Delta T(t) = \frac{S_0 \tau}{c} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (7)$$

amb $\tau = c/(8\sigma T_0^3)$.

Q36) Comprova que és, efectivament, solució de l'eq. (6), i comprova la fig. 8.

(Física) Calor específica és...
i es mesura en ...

El gràfic de la funció $\Delta T(t)$, representat en la fig. 8, mostra que el temps de reacció de la membrana termosensible ha de ser de l'ordre de τ . Si considerem que la membrana té un gruix de 0.000015 m i que la seua calor específica és igual a la calor específica de l'aigua, és a dir, $4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg K)}$,

es pot calcular la capacitat calorífica c per unitat de superfície de la membrana, la qual resulta ser de $72 \text{ J}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Obtenim, per tant, la següent avaluació per al temps de reacció de la serp, $\tau \approx 6 \text{ s}$.

Q37) Comprova els càlculs de les dues magnituds anteriors.

Q38) Demostra a partir de l'eq. (6), o de la (7), que per a temps molt grans, $\Delta T = S_0/(8\sigma T_0^3)$.

6.4.5 Direccionalitat

I com determina la serp la direcció d'atac? Per a tal fi s'ajuda de la forma de la fossa facial. Com mostra la fig. 7, l'estructura de l'ulltermòmetre recorda la cambra fosca utilitzada en els albors de la fotografia per a l'obtenció de imatges. El diàmetre de la membrana termosensible, per regla general, supera en més del doble el diàmetre de l'orifici exterior de la fossa facial. Aquesta circumstància assegura l'enfocament parcial de la imatge en la superfície de la membrana. Però com mostra aquesta figura cada fossa té una capacitat d'enfocament limitada: com mostra la fig. 8 es poden distingir dues fonts infraroges separades únicament en el cas que l'angle entre les direccions cap a aquestes fonts vaja de 30 a 60° .

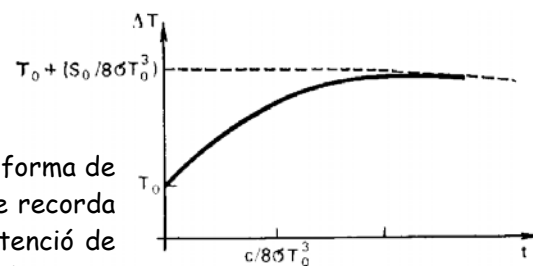


Fig. 8. Variació de la temperatura de la membrana termosensible després de la connexió d'una nova font d'irradiació tèrmica, segons l'eq. (6).

Q39) Explica aquests angles.

Al mateix temps, la utilització simultània per la serp de diversos d'aquests clots, amb diferents zones de reconeixement que s'encavalquen, permet localitzar molt millor la direcció al blanc després que el cervell haja elaborat la informació d'arribada de tots els termoreceptors.

6.5 Ommatidi (Un manual d'òptica)

La història dels insectes té més de 300 milions d'anys. La majoria d'aquests no ha experimentat canvis substancials en les últimes desenes de milions d'anys. Per això, els insectes es poden considerar com a petits "dinosauris vius". Hi ha un nombre immens d'espècies d'insectes. Alguns d'aquests són actius tan sols a la llum solar, altres insectes ho són tant a la llum solar com a l'ombra i d'altres, per fi, només actuen en el crepuscle. Uns insectes com, per exemple, les mosques que (mal)viuen en les nostres cases, volen a gran velocitat i, sense reduir-la, són capaces de fer viratges bruscos. Altres, per exemple la libèl·lula, volen solament en línia recta i durant una llarga estona poden planejar, girant al voltant d'algun lloc concret. Tots aquests insectes confien plenament en la seua vista per salvar-se dels enemics. Malgrat el diferent mode de vida, l'estructura de l'ull per a quasi tots els insectes és igual: és un ull compost (fig. 9). Com funciona aquest ull?

L'ull compost consta d'ommatidis, és a dir, d'ulls simples que "miren" en direccions diferents. Cada ommatidi té la seua pròpia lent que enfoca la llum en diverses cèl·lules fotoreceptores agrupades en un bastonet visual. La llum, quan actua sobre aquestes

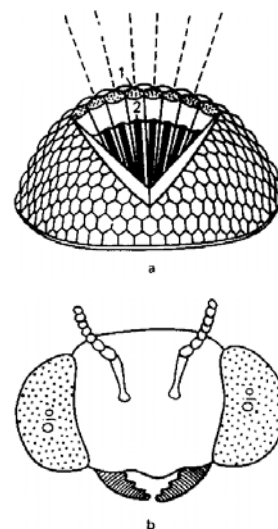


Fig. 9. a) tall esquemàtic de l'ull compost de l'insecte: 1, lent de l'ommatidi; 2, bastonet visual d'un ommatidi individual. Les línies de traços indiquen les direccions dels eixos òptics dels ommatidis veïns. b) Disposició dels ulls en el cap de l'insecte.

cèl·lules, provoca una seqüència d'impulsos nerviosos transmesos al cervell de l'insecte pel nervi òptic.

És evident que l'avantatge principal de l'ull compost radica en el fet que "mira" simultàniament en totes direccions, mentre que molts mamífers, incloses les persones, per a mirar al voltant necessiten girar el cap. Però, per a obtenir aquest avantatge l'ull de l'insecte va sacrificar la nitidesa de la imatge.

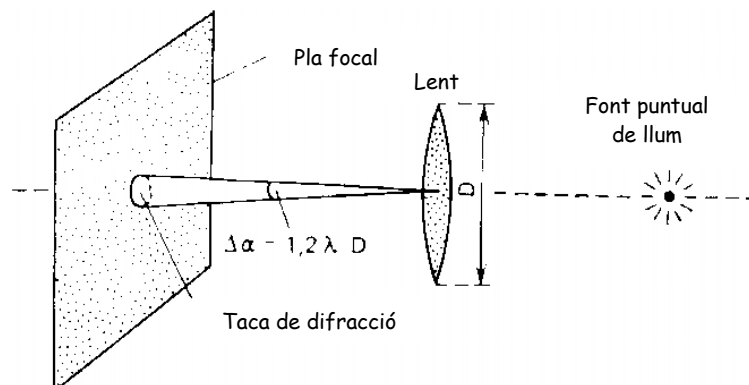
6.5.1 Resolució d'un sistema òptic

En efecte, sabem que la nitidesa de la imatge creada per qualsevol sistema òptic depèn del diàmetre de l'orifici a través del qual entra la llum en aquest sistema. En el cas elemental que l'objecte siga un punt lluminós, el poder resoltiu limitat del sistema òptic fa que la imatge obtinguda en el pla focal de la lent ja no siga un punt, sinó una taca de difracció (fig. 10) amb una obertura angular igual a $\Delta\alpha \approx 1.2 \lambda / D$, on λ és la longitud d'ona de la llum i D el diàmetre de l'objectiu del sistema òptic. Per això, quan davant la lent apareixen 2 punts lluminosos, la distància angular entre els quals és menor que $\Delta\alpha$, resulta que en el pla focal de la lent aquests formen una sola taca de dimensions un poc més grans que si només hi haguera un punt lluminós.

Normalment es pren el criteri que la resolució màxima d'un sistema òptic, (és a dir, les dimensions angulars mínimes de l'objecte que són vistes encara com a punts separats per aquest sistema), és de $2 \Delta\alpha$.

(Física) La resolució d'un sistema òptic és...

Fig. 10. Figura de difracció, imatge de la font puntual de llum obtinguda amb l'ajut d'una lent.



Per regla general, el diàmetre D d'un ommatidi individual no supera 0.03 mm. Això significa que l'angle $\Delta\alpha$ per a l'ommatidi és de prop de 1° , si es pren $\lambda = 5 \times 10^{-4}$ mm. Per fer-hi una comparació assenyalem que el diàmetre de la pupila de l'ull humà, d'aproximadament 5 mm, assegura una resolució òptica quasi 200 vegades major.

Q40) Comprova els dos càlculs anteriors.

Aquest és el preu caríssim que ha de pagar l'ull de l'insecte per la seua vista panoràmica. Tanmateix, fins i tot aquesta resolució òptica de l'ull és suficient per a l'insecte. L'insecte, quan sobrevola un llibre no necessita, com nosaltres, fixar-se en les lletres. L'única tasca de cada ommatidi és proporcionar la informació de si hi ha o no en el seu camp visual algun objecte lluminós i, si tal objecte existeix, donar la seua lluminositat.

L'ommatidi no pot fer res més ja que tan sols té al seu abast unes quantes cèl·lules fotoreceptores amb fibres nervioses diferents per les quals els impulsos nerviosos van al cervell de l'insecte, amb una freqüència proporcional a la lluminositat de l'objecte.

6.5.2 Direcció de l'objecte

De quina manera, doncs, ha d'estar estructurat l'ull de l'insecte perquè pugui trobar la direcció cap a l'objecte lluminós amb la major exactitud? És lògic suposar que l'ull de l'insecte complirà bé amb la tasca plantejada si a cada font puntual de llum li correspon l'excitació d'un o dos ommatidis veïns de l'ull.

Q41) Explica l'afirmació anterior (a més de discutir què ocorre si una mateixa font puntual excita diversos ommatidis, recorda què fa falta per a determinar la posició d'un punt en l'espai).

Amb la finalitat de reduir el camp visual de cada ommatidi és suficient disminuir el diàmetre d del seu bastonet òptic i així fer-lo commensurable amb les dimensions de la figura de difracció (fig. 11). És evident que la disminució del diàmetre del bastonet òptic fins a una dimensió menor que el diàmetre de la figura de difracció no conduirà a l'ulterior estretament del camp visual de l'ommatidi, sinó que, únicament, reduirà la seua fotosensibilitat, ja que el nombre de fotoreceptors en el bastonet disminuirà.

Q42) Explica aquestes afirmacions.

Per aquesta raó hem de considerar que el diàmetre òptim del bastonet òptic de l'ommatidi és $d \approx f \Delta\alpha$, en què f és la distància focal de la lent de l'ommatidi. D'aquesta manera s'aconsegueix l'estretor mínima possible del camp visual de l'ommatidi, igual a $\Delta\alpha$, i és màxima la seua sensibilitat a la llum.

És natural que també en aquesta ocasió la natura haja calculat per endavant totes les variants i que, efectivament, en l'ommatidi d'un insecte el diàmetre del bastonet òptic resulte ser pròxim a la dimensió de la figura de difracció.

Tanmateix, no és suficient assegurar-se de l'estretor del camp visual de cada ommatidi. És necessari estructurar l'ull de tal forma que tan bon punt la font lluminosa abandone el camp visual d'un ommatidi, aquesta font, immediatament, ha d'aparèixer en el camp visual de l'ommatidi veí.⁷³ Per a assolir-ho és suficient que l'angle $\Delta\varphi$ entre els eixos òptics dels ommatidis veïns siga pròxim al diàmetre angular del camp visual d'un ommatidi individual; és a dir,

$$\Delta\varphi \approx \Delta\alpha = 1.2 \frac{\lambda}{D} \quad (8)$$

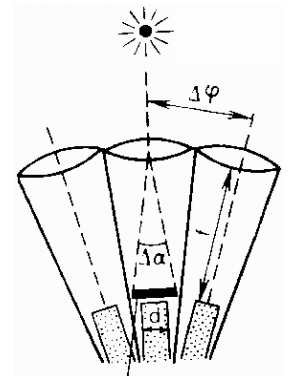


Fig. 11. Esquema explicatiu per a l'anàlisi de les dimensions de l'ommatidi unitari i de les relacions entre els elements veïns de l'ull compost. El bastonet òptic està remarcat amb punts.

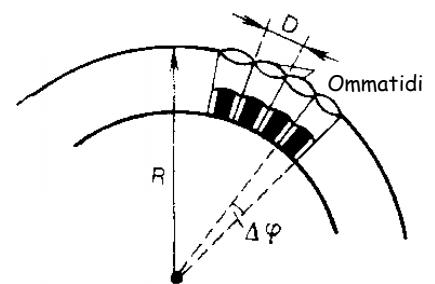


Fig. 12. Esquema explicatiu per al càlcul de la relació (8).

⁷³ L'existència de diversos ommatidis que miraren paral·lelament i, per tant, soren excitats per una mateixa font puntual de llum no correspondria, pel que hem vist, a l'estructura òptima de l'ull i solament augmentaria la seua grandària.

L'anàlisi d'aquestes relacions geomètriques en els ulls de diferents insectes ha demostrat que l'expressió (8), efectivament, és vàlida per a les espècies que són actives durant la llum brillant del dia. És fàcil demostrar que per a un ull que té forma de semiesfera de radi R (fig. 12) hi ha una relació senzilla entre $\Delta\varphi$, D i R :

$$\Delta\varphi \approx \frac{D}{R} \quad (9)$$

Si substituïm (9) en (8) obtenim:

$$D^2 \approx 1.2\lambda R, \quad (10)$$

relació que demostra que les dimensions de la lent de cada ommatidi i , per consegüent, també el nombre d'ommatidis, es determinen unívocament per la grandària global de l'ull. A partir de la fórmula (10) podem avaluar D per a l'ull de l'abella, que té forma de semiesfera de radi igual a $1.2 \mu\text{m}$. Si substituïm $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, obtenim $D = 26.8 \mu\text{m}$, valor que coincideix amb les dades mitjanes de les mesures morfomètriques ($27 \mu\text{m}$).

Q43) Fes el càlcul anterior.

6.5.3 Volum de l'ull

L'ull d'un insecte té un important avantatge més, en comparació amb un ull —d'igual diàmetre— d'un mamífer. Calculem el volum del sistema d'enfocament de l'ull de l'insecte, V_{ins} , i comparem-lo amb el volum corresponent de l'ull del mamífer. El primer és igual al volum d'una capa esfèrica de gruix R

$$V_{\text{ins}} = 2\pi R^2 f \quad (11)$$

en què f és la distància focal de la lent de l'ommatidi.

Es pot demostrar que la distància focal f d'una lent semiesfèrica de radi R és igual a $f = Rn/(n-1)$, en què n és l'índex de refracció de la lent. Per això, el volum V_{mam} del sistema d'enfocament de l'ull del mamífer (fig. 13) és igual al volum de la lent, $2\pi R^3/3$, més el volum de l'espai entre la lent i la retina. Com que la retina es troba en el pla focal de la lent, aquest volum és $\pi R^2(f-R)$ i, per tant,

$$V_{\text{mam}} = \frac{2}{3}\pi R^3 + \pi R^2 \frac{f}{n-1} = \pi R^3 \left(\frac{2}{3} + \frac{1}{n-1} \right) \quad (12)$$

Q44) Comprova aquest resultat.

Si suposem que $R = 1.5 \text{ mm}$, $f = 0.06 \text{ m}$ i $n = 1.5$, obtenim $V_{\text{mam}}/V_{\text{ins}} = 66.5$.

Q45) Fes el càlcul anterior.

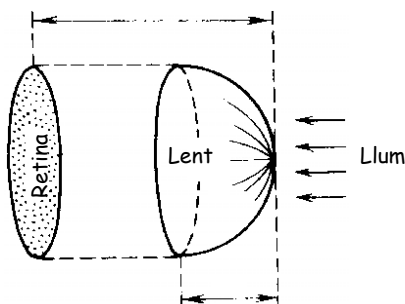


Fig. 13. Esquema explicatiu per al càlcul del volum del sistema d'enfocament de l'ull d'un mamífer.

D'aquesta manera, l'estructura de l'ull de l'insecte no sols li permet mirar simultàniament per tots els costats sinó que, a més, l'ull de l'insecte ocupa un volum quasi 70 vegades menor que l'ull d'un mamífer de la mateixa grandària.

6.6 Brúixola solar per a qualsevol temps

Molta gent sap orientar-se amb l'ajut del Sol i d'un rellotge. Però imagina't que ets al bosc i el Sol s'ha ocultat darrere els arbres. També en aquest cas és possible determinar la posició del Sol al cel. Malauradament, però, les persones no tenen aquesta capacitat i és molt fàcil que s'extravien pel bosc tot just deixen de veure el Sol. Tanmateix, hi ha una àmplia classe d'animals que poden trobar la direcció cap al Sol fins i tot si veuen tan sols una petita porció de cel. Es tracta dels insectes.

6.6.1 Com s'orienten formigues i abelles

Parlem de la formiga que busca el camí cap al formiguer. Si traslladem la formiga 50 m a la dreta del seu camí cap a casa, aquesta continuarà el seu rumb anterior i acabarà a 50 m a la dreta del formiguer. Això ocorre perquè la formiga no enregistra en la memòria la situació del formiguer en l'espai sinó respecte al Sol. Si quan s'allunya del formiguer la formiga ha vist, per exemple, el Sol a l'esquerra, en un moment que forma un angle recte amb la direcció de la marxa, aleshores en el camí de tornada la formiga ha de veure el Sol sota el mateix angle i a la dreta. La formiga segueix cegament les indicacions de la seua brúixola.

Podem fer experiments anàlegs també amb les abelles. No és difícil ensenyar-les a volar cap a una escudella amb almívar, i quan desplacem l'escudella d'un lloc a un altre, podem comprovar que les abelles, igual que les formigues, s'orienten només respecte del Sol.

Fins i tot no és necessari ni que vegem el Sol; per orientar-se només necessiten una petita "finestreta" de cel blau. Les abelles no sols retenen en la memòria el seu itinerari respecte al Sol, sinó que també poden transmetre la informació a les veïnes de l'arna. Quan l'abella col·lectora torna a la seua arna després d'un vol profitós, interpreta una mena de dansa. El llenguatge d'aquesta dansa es va desxifrar el 1945.⁷⁴ Amb la dansa l'abella informa a quina distància de l'arna i en quina direcció es troba la parcel·la rica en nèctar. L'abella, envoltada per les seues germanes, es mou fent un 8 (fig. 13). L'element més informatiu d'aquesta dansa és la línia recta que divideix el 8 pel mig (*línia de recorregut recte*). Mentre es mou per aquesta línia l'abella sacseja el cos com si subratllara, precisament, la importància d'aquest element del 8. La freqüència de les vibracions del cos durant el moviment per la recta és d'uns 15 Hz.

(Física) Una brúixola és...
i serveix per a...

Q46) Quantes vegades sacseja el cos l'abella en 1 s?

Al mateix temps, l'abella fa un petit brunzit amb les ales. Aquesta línia recta indica la direcció cap al lloc de bona recollida de nèctar, en el cas que l'abella interprete la seua dansa en un pla horitzontal. En canvi, si l'abella dansa en un pla vertical dins l'arna, llavors està identificant la direcció cap al Sol amb la línia vertical; per això, la desviació d'aquesta línia recta respecte de la vertical assenyalarà la desviació del camí cap al nèctar respecte a la direcció del Sol. La duració del moviment de l'abella per la

⁷⁴ Pel biòleg alemany Karl von Frisch, qui va rebre el Premi Nobel en 1973 per aquest motiu.

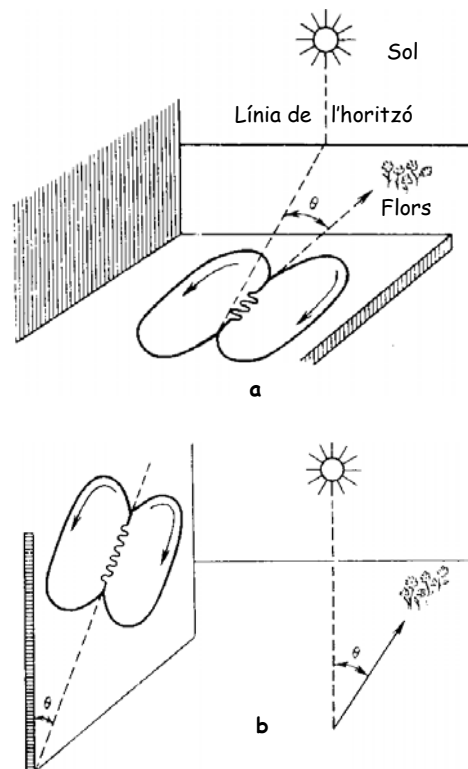


Fig. 14. Dansa de l'abella dins l'arna en un pla horitzontal (a) o vertical (b), que conté informació sobre la direcció cap a la parcel·la rica en nèctar.

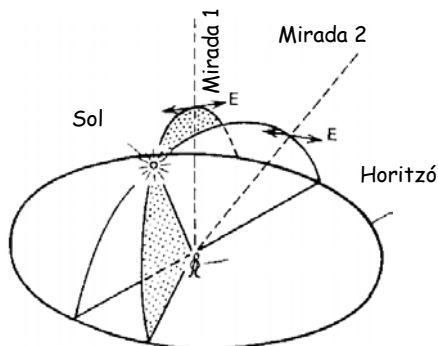


Fig. 15. Direcció del pla de polarització predominant de la llum solar que es dispersa per l'atmosfera. Les fletxes ($\leftrightarrow$) designen les direccions predominants dels camps elèctrics quan examinem dos punts del firmament.

(Física) Font de llum primària i de llum secundària és...

recta és proporcional a la distància des de l'arna fins a aquesta parcel·la; 1 s, per exemple, correspon a 500 m, 4 s corresponen a 2 km, etc. En poc de temps, les abelles que estaven presents durant la dansa de la companya es dirigeixen cap al lloc indicat. La precisió amb la qual les abelles assoleixen el seu objectiu és de prop d'un 20% de la distància real fins al lloc.

Q47) Explica què significa aquesta afirmació.

Els experiments han demostrat que quan els insectes no poden veure el Sol, les seues capacitats extraordinàries de navegació s'expliquen per la sensibilitat dels seus ulls a la posició del pla de polarització de la llum incident. Hem de recordar que els ulls dels mamífers no tenen tanta sensibilitat, perquè els eixos elèctrics de les molècules de rodopsina en el pla de la membrana fotoreceptora estan orientats caòticament (fig. 15).

Q48) Explica què té a veure l'orientació de la rodopsina.

6.6.2 Orientació per llum polaritzada

Anteriorment (veges l'apartat en què parlem de polarització), hem dit que la llum irradiada pel Sol no té cap pla de polarització determinat. Tanmateix la llum solar experimenta dispersió en les molècules i partícules de l'atmosfera terrestre, les dimensions de les quals són menors que la longitud d'ona de la llum. El resultat és que cada punt del firmament que està per damunt de nosaltres es transforma en una font de llum secundària, i aquesta llum resulta ja parcialment polaritzada. La polarització de la llum dispersada per l'atmosfera la va descriure per primera vegada Rayleigh en 1871. La fig. 15 ajuda a trobar la posició del pla de polarització prevalent de la llum dispersada per l'atmosfera, i il·lustra la regla general: l'eix de polarització (la direcció del camp elèctric E) és sempre perpendicular al pla del triangle en els vèrtexs del quals es troben l'observador, el Sol i el punt observat del firmament.

També és possible resoldre el problema invers, o siga, trobar la direcció al Sol si es coneixen els eixos de polarització de dos punts del cel. És evident que la direcció al Sol serà la d'una recta formada per la intersecció de dos plans, cadascun dels quals inclou a l'observador i és perpendicular a l'eix corresponent de polarització de la llum en el punt donat del cel.

Q49) Explica aquest mètode d'orientació cap al Sol.

D'aquesta manera troben la direcció cap al Sol els insectes que tenen ulls sensibles a la direcció de polarització de la llum.

Aleshores, què fa la cèl·lula de la vista de l'insecte sensible a la llum polaritzada? En la fig. 16 es representa la cèl·lula fotoreceptora d'un insecte. El primer que observem en comparar les fig. 2 i 16 és la forma diferent de les membranes fotoreceptores. Si bé en el bastonet òptic dels vertebrats les membranes fotoreceptores formen discos

plans, en els insectes aquestes membranes estan enrotllades i formen tubets llargs (microborrissol). Així s'aconsegueix que els eixos elèctrics de les molècules de rodopsina tinguin la mateixa direcció en tota la cèl·lula fotoreceptora de l'insecte.

Les molècules de rodopsina, orientades en una direcció determinada, poden absorbir tan sols els fotons en els quals la direcció i sentit del vector $\mathbf{E}$ siga paral·lel a l'eix dels microborrissols.

Així, només amb una transformació senzilla (un enrotllament en tub de la membrana plana) la natura ha comunicat al fotoreceptor una propietat qualitativament nova: la de poder percebre llum polaritzada.

6.7 Plantes guies de llum (fibres òptiques)

La llum serveix de font única d'energia a les plantes verdes. Amb l'ajut de la llum, en la planta es formen molècules de substàncies orgàniques indispensables per a la creació de noves cèl·lules. Tanmateix, la llum és per a les plantes no sols una font d'energia, sinó també un senyal regulador, amb el qual poden canviar la seua activitat. L'element de la cèl·lula vegetal sensible a la llum és el pigment⁷⁵ anomenat fitocrom. Les propietats del fitocrom varien segons les condicions en què es troba la planta: si està exposada a la llum o si es troba en la foscor.

La llum de longitud d'ona d'uns 660 nm (roja) fa passar la molècula de fitocrom a l'estat *actiu*, i aquesta forma activa *posa en moviment* tot un complex de reaccions bioquímiques que impulsen el creixement de la planta, la seua orientació respecte a la direcció de la força de la gravetat, respecte del Sol, etc.

La missió principal del fitocrom consisteix a absorbir els raigs de llum. Per això, és lògic suposar que tot el fitocrom s'ha de trobar en la part superior de la planta, en la part aèria. Però això no és del tot correcte. S'ha establert, per exemple, que en el cas de l'avena una porció considerable del fitocrom està concentrada en la part subterrània de la planta, en un lloc on sembla que la seua presència no té sentit. Una quantitat de fitocrom especialment gran està en el nuc o nòdul (un petit engruiximent) disposat a una distància molt menuda sota la superfície de terra, sobre les arrels de la planta (fig. 17). En aquest punt la concentració de fitocrom és unes 10 vegades major que en les parts veïnes de la planta.

En les herbes com l'avena, el nuc que es troba sota terra és el lloc principal on es produeix la divisió interna de les cèl·lules que suposa el creixement de la planta. Aquesta circumstància fa comprensible el fet que el creixement de l'herba i de plantes com l'avena continua fins i tot després d'haver segat la part aèria. La gran concentració de fitocrom en el nuc és necessària per a mantenir l'alta velocitat de les reaccions bioquímiques que porten a la formació de noves cèl·lules.

Tanmateix, el fitocrom no pot iniciar les reaccions bioquímiques sense llum. Aleshores, com pot arribar la llum a la part subterrània de la planta? Resulta que hi ha una *guia de llum* que condueix la llum a la part subterrània de la planta, i que es troba en la tija. Les cèl·lules de la tija formen columnes paral·leles i recorden l'estructura de les guies de llum (fibres òptiques) industrials (fig. 17). Si il·luminem aquesta columna i l'observem amb un microscopi, veurem fosques les parets mentre que l'interior de cada cèl·lula s'il·lumina intensament.

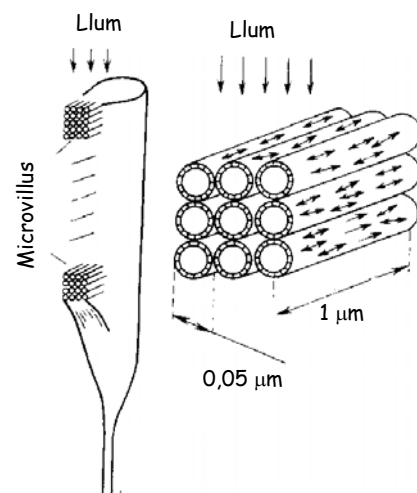


Fig. 16. a) Cèl·lula fotoreceptora de l'ull d'un insecte i b) imatge augmentada dels seus microvillus. Les fletxes de dues puntes (↔) indiquen la direcció dels eixos elèctrics de les molècules de rodopsina.

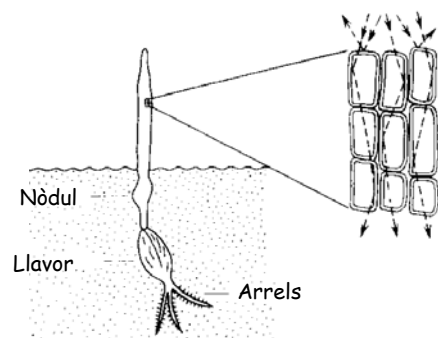


Fig. 17. Parts integrants de la planta herbàcia (esquerra) i disposició de les cèl·lules en la tija (dreta). Les línies de traços assenyalen la marxa dels raigs lluminosos.

⁷⁵ Una substància molt acolorada.

Amb la finalitat de comprovar la capacitat de la tija per a conduir la llum, tallem-ne un tros i doblem-lo lleugerament. Si, quan hem fet això, il·luminem un extrem de la tija amb un feix fi de llum intensa (per exemple, amb el raig d'un làser), l'altre extrem també començarà a emetre llum. Les diferents plantes es diferencien entre si per la capacitat de conduir d'aquesta manera la llum cap a les arrels. Cal tenir en compte que la profunditat màxima a la qual les arrels poden conduir la llum és inferior a uns 4.5 cm. Tanmateix, fins i tot aquesta curta guia de llum és suficient per a proveir de llum la part subterrània de la planta herbàcia.

Les guies de llum (fibres òptiques) produïdes per la indústria tenen un nombre molt gran de fils prims de vidre disposats en paral·lel. Aquestes guies de llum presenten una propietat important: la seua capacitat de conduir la llum es conserva fins i tot en el cas d'esberlar-les tot el llarg que són. La mateixa propietat la tenen les guies de llum "vives".

6.8 Física (conceptes)

Concepte	Capítols	1r - 6è
----------	----------	---------

Aberració cromàtica	6è	superficial		Elèctrode (-, +)	5è
Absorció de llum	6è	Cohesió (forces)	3r	Elèctrodes	4t
Acceleració centrípeta	1r	Combustió	3r	Electromagnètica	6è
Acceleració	1r	Component inorgànic	5è	(energia de la	
Acceleració	4t	Compressió	5è	radiació)	
Acceleració de la	1r	Concavitat	5è	Electromotriu (força,	4t
gravetat		Concentració de	3r	FEM)	
Acètic (àcid)	5è	saturació		Energia (lle	4t
Àcid acètic	5è	Condensació, nuclis	3r	conservació)	
Adimensional	1r	Conservació de	6è	Energia (lle de	6è
(magnitud)		l'energia (lle)		conservació)	
Agitació tèrmica	2n	Conservació de	1r	Energia (principi de	1r
Aïllador tèrmic	6è	l'energia (principi)		conservació)	
Amper (unitat)		Conservació energia	4t	Energia cinètica	1r
Amplitud d'oscil·lació	2n	(lle)		Energia cinètica	5è
d'una ona		Constant de temps	1r	Energia d'enllaç d'una	1r
Amplitud d'una ona	2n	(d'un procés)		molècula	
Àrea/volum (relació)	4t	Convecció	1r	Energia d'una ona	2n
Àrea/volum i	3r	Convexitat	5è	Energia de la radiació	6è
dimensions		Corrent elèctric	5è	electromagnètica	
B , camp magnètic	6è	Cos negre	6è	Energia mecànica	2n
Beer- Lambert (lle)	6è	Cristall	5è	Energia mecànica	5è
Bernoulli (lle, fluids)	3r	Cromàtica (aberració)	6è	Energia potencial	1r
Biomecànica	5è	Decibel	2n	Energia potencial	3r
Boltzmann (Stefan-,	6è	Densitat	1r	Energia potencial	5è
lle)		Densitat	2n	Enfocament	6è
Caiguda lliure (temps	1r	Diferència de fase	6è	Equació diferencial	6è
de)		Diferència de	4t	Equilibri tèrmic	6è
Calci (sals)	5è	potencial		Esfera elàstica	3r
Calor específica	6è	Diferencial (equació)	6è	(fórmula de Laplace,	
Calorífica (capacitat)	6è	Difracció	2n	diferència de pressió)	
Camp de força (línies)	4t	Difusió	1r	Esfera elàstica	3r
Camp elèctric	4t	Dimensions d'una	1r	(pressió)	
<i>Camp elèctric</i>	5è	magnitud		Específica (calor)	6è
Camp elèctric, E	6è	Dinàmica	4t	Espectre de radiació	6è
<i>Camp magnètic</i>	4t	Doppler (efecte)	4t	electromagnètica	
Camp magnètic, B	6è	E , camp elèctric	6è	Espectral (superfície)	6è
Canvi de fase en la	2n	Eco	2n	Fase (canvi en la	2n
reflexió		Efecte Doppler	4t	reflexió)	
Capa neutra (en flexió)	5è	Efectes dels límits	4t	Fase (diferència de)	6è
Capacitat calorífica	6è	Elàstic (mòdul de	3r	Fase d'una ona	6è
Centre de gravetat	1r	Young)		FEM (força	4t
Centrifugadora	3r	Elàstic (mòdul de	4t	electromotriu)	
Centrípeta	1r	Young)		Flexió	5è
(acceleració)		Elàstica (esfera,	3r	Flexió (capa neutra)	5è
Cinemàtica	4t	pressió)		Fluctuacions	1r
Cinètica (energia)	5è	Electromagnètic	6è	Fluids en règim	3r
Coefficient de	1r	(espectre)		laminar	
permeabilitat		Elèctric (camp)	4t	Fluids en règim	3r
Coefficient de reflexió	6è	Elèctric (camp)	5è	turbulent	
Coefficient de tensió	3r	Elèctric (corrent)	5è	Font de llum primària	6è
		Elèctric, camp (E)	6è	Font de llum	6è

secundària		Línies de força d'un	4t	(coeficient)	
Força	1r	camp		Pes	1r
Força (línies d'un	4t	Longitud d'ona	2n	Piezoelectricitat	4t
camp)		Llargavistes	6è	Piezoelectricitat	5è
Força (línies)	5è	Llei de conservació	4t	Pla de polarització	6è
Força (moment)	5è	energia		Poiseuille (llei)	4t
Força (resultant)	3r	Llei de Bernoulli	3r	Polarització (pla)	6è
Força de la gravetat	1r	(fluids)		Positiu (elèctrode)	5è
(pes)		Llei de conservació de	6è	Potència	1r
Força de reacció	1r	l'energia		Potència	5è
Força de resistència o	1r	Llei de Hooke	4t	Potencial (diferència)	4t
fricció		Llei de Hooke	5è	Potencial (energia)	3r
Força electromotriu	4t	Llei de Lambert-Beer	6è	Potencial (energia)	5è
(FEM)		Llei de Laplace	4t	Pressió	2n
Força resultant	1r	Llei de Newton (2a)	4t	Pressió (gradient)	2n
Forces de cohesió	3r	Llei de Newton del	1r	Pressió arterial	4t
Fórmula de Laplace	3r	refredament		Pressió atmosfèrica	1r
(diferència de pressió		Llei de Poiseuille	4t	Pressió en una esfera	3r
en esfera elàstica)		Llei de Stefan-	6è	elàstica	
Fotó	6è	Boltzmann		Pressió parcial d'un	1r
Fotoreceptor	6è	Llei de Stokes del	1r	gas	
Fractals	3r	fregament		Primària (font de llum)	6è
Fregament (força)	1r	Llum (absorció)	6è	Principi de conservació	1r
Freqüència	1r	Magnètic (camp,	4t	de l'energia	
Freqüència	4t	inducció)		Propagació d'una oem	6è
Freqüència d'una ona	2n	Magnètic, camp (<i>B</i>)	6è	(vector)	
Fricció (força)	1r	Magnitud	1r	Quant	6è
Fricció (llei de Stokes)	1r	Magnitud (ordre)	1r	Rad (radiant)	6è
Gas (pressió parcial)	1r	Massa	1r	Radiació	1r
Gradient de pressió	2n	Massa-volum d'un gas	3r	Radiació electromag-	6è
Gravetat (acceleració)	1r	Mecànica (energia)	5è	nètica (energia)	
Gruix òptic	6è	Metre (unitat)		Radiació electro-	6è
Hipòtesi	5è	Micra (micròmetre)	6è	magnètica (espectre)	
Histèresi	3r	Micròmetre (micra)	6è	Radiant (rad)	6è
Hooke (llei)	4t	Mòdul de Young	4t	Raigs X	5è
Hooke (llei)	5è	Mòdul de Young	5è	Reacció (força)	1r
Imatge	6è	Mòdul elàstic de Young	3r	Receptor fotosensible	6è
Impuls	5è	Mol (unitat)	5è	Reflexió	6è
Índex de refracció	6è	Moment d'una força	5è	Reflexió (coeficient)	6è
Inducció	4t	Moviment tèrmic	2n	Reflexió d'una ona	2n
electromagnètica		aleatori		Reflexió i canvi de	2n
Inèrcia	4t	Negatiu (elèctrode)	5è	fase	
Infraroig (IR)	6è	Negre (cos)	6è	Refracció	6è
Inorgànic (component)	5è	Neutra (capa, en	5è	Refracció (índex)	6è
Intensitat d'una ona	2n	flexió)		Refredament (llei de	1r
Interferència	6è	Newton (2a llei)	4t	Newton)	
Interval de visió	6è	Newton (llei del	1r	Règim laminar (fluids)	3r
normal d'una persona		refredament)		Règim turbulent	3r
IR (infraroig)	6è	Newton (unitat)		(fluids)	
Joule (unitat)		Nuclis de condensació	3r	Relació àrea/volum	4t
Kelvin (unitat)	6è	Número adimensional	1r	Relació àrea/volum i	3r
Kilogram (unitat)		oem (ona	6è	dimensions	
Lambert-Beer (llei)	6è	electromagnètica)		Relació massa-volum	3r
Laminar (règim, fluids)	3r	ona electromagnètica-	6è	d'un gas	
Laplace (fórmula,	3r	oem		Resistència (força)	1r
diferència de pressió		Ones sonores	2n	Resistència d'un	5è
en esfera elàstica)		Òptic (gruix)	6è	material	
Laplace (llei)	4t	Ordre de magnitud	1r	Resolució d'un sistema	6è
Lent	6è	Parcial (pressió)	1r	òptic	
Límits (efecte dels)	4t	Pascal (unitat)		Resultant (força)	1r
Línies de força	5è	Permeabilitat	1r	Resultant d'unes	3r

forces		Tèrmic (aïllador)	6è	Unitat: watt	
Sals de calci	5è	Tèrmic (equilibri)	6è	UV (ultraviolat)	6è
Saturació,	3r	Tèrmic (moviment	2n	Variació sinusoidal	2n
concentració		d'agitació)		Vector de propagació	6è
Secundària (font de	6è	Termoreceptor	6è	d'una oem	
llum)		Tesla	4t	Velocitat	1r
Segon (unitat)		Tracció	5è	Velocitat de	2n
Segona llei de Newton	4t	Transductor	2n	propagació d'una ona	
Sensibilitat	6è	Transició de règim	3r	Velocitat mitjana	2n
Sinusoidal (variació)	2n	laminar a turbulent		Velocitat ona	4t
Sistema òptic	6è	(fluids)		compressió sang	
(resolució)		Transmissió d'una ona	2n	Velocitat ona	4t
So	2n	Transparent	6è	deformació artèria	
Solubilitat	3r	(substància)		Vidre	5è
Soroll blanc	2n	Treball	1r	Visió normal (interval)	6è
Stefan-Boltzmann	6è	Treball	3r	Volt	5è
(lleis)		Turbulent (règim,	3r	Volt (unitat)	
Stokes (lleis de fricció)	1r	fluids)		Watt (unitat)	
Substàncies	3r	uam	6è	X (raigs)	5è
tensoactives		Ultrasons	4t	Young (mòdul de)	4t
Superficial (tensió)	3r	Ultraviolat (UV)	6è	Young (mòdul elàstic)	3r
Superfície especular	6è	uma	6è	Young (mòdul)	5è
Telescopis	6è	Unitat: amper			
Temps (constant de)	1r	Unitat: joule			
Temps de caiguda	1r	Unitat: kilogram			
lliure		Unitat: metre			
Tensió	4t	Unitat: mol			
Tensió	5è	Unitat: newton			
Tensió superficial	3r	Unitat: pascal			
(coeficient)		Unitat: segon			
Tensoactives,	3r	Unitat: volt			
substàncies					

Capítol 7. Bioelectromagnetisme (Electricitat viva)

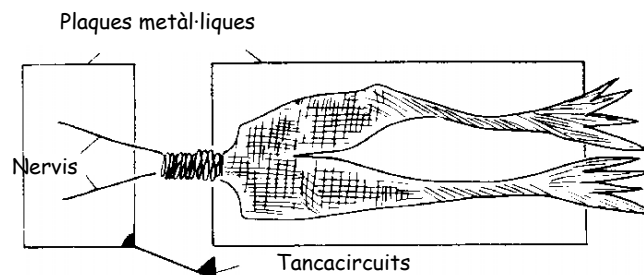
... transformar la força elèctrica en nerviosa.

M. Faraday

- 7.1 Introducció
- 7.2 Història del bioelectromagnetisme
 - 7.2.1 "Electricitat animal": Galvani, Volta, etc.
- 7.3 La membrana cel·lular
- 7.4 Potencial en repòs
 - 7.4.1 Equilibri difusió-camp
 - 7.4.2 Mesurament del potencial de repòs
- 7.5 Excitació de la membrana
 - 7.5.1 Augment explosiu de la permeabilitat
 - 7.5.2 Potencial d'acció
- 7.6 Propagació de l'impuls nerviós
 - 7.6.1 Sistemes humoral i nerviós
 - 7.6.2 Mecanisme de propagació
 - 7.6.3 Propagació sense esmortiment
- 7.7 Nòduls de Ranvier
- 7.8 Zombis i canals de sodi
 - 7.8.1 Acció d'un verí
 - 7.8.2 Tetrodotoxina, 007 i zombis
- 7.9 Fora del nervi
- 7.10 Llampecs vius
 - 7.10.1 "Electricitat animal"
 - 7.10.2 Origen elèctric de la descàrrega dels peixos
 - 7.10.3 Intensitat de les descàrregues: òrgans elèctrics
 - 7.10.4 Sensibilitat a camps elèctrics externs
- 7.11 Electricitat en les plantes
 - 7.11.1 Experiment casolà: pressió osmòtica
 - 7.11.2 Mecanisme d'activitat locomotora en les plantes
- 7.12 Biomagnetisme: Tenen els animals una brúixola magnètica?
 - 7.12.1 Ratolins
 - 7.12.2 Ocells, coloms
 - 7.12.3 Fluctuacions del camp magnètic terrestre
 - 7.12.4 Abelles i camp magnètic
 - 7.12.5 Mesurament del camp magnètic terrestre
 - 7.12.6 Imants permanents en animals
 - 7.12.7 Ferrobacteris
 - 7.12.8 Detecció de materials ferromagnètics en éssers vius
 - 7.12.9 El suïcidi de les balenes
 - 7.12.10 Brúixoles congènites
 - 7.12.11 Algorismes congènits de navegació
 - 7.12.12 Orientació magnètica en les persones
- 7.13 Física (conceptes). Ordenat per concepte

7.1 Introducció

Fig. 1. Esquema de l'experiment de Galvani. L'anàlisi d'aquest experiment va portar a Volta al descobriment de la font de corrent continu. Si toque amb la punta del tancacircuits la placa de la dreta, estic tancant un circuit anàleg al d'una pila i una resistència en sèrie (la "pila" són els nervis de l'animal).



En el curs de més de quatre segles les relacions entre els fenòmens electromagnètics i la vida constituïen l'objecte de moltes discussions acalorades. Tan sols en el segle XX, amb l'aparició d'instruments suficientment sensibles, es va aconseguir demostrar que el desenvolupament de molts processos en l'organisme viu, efectivament, està acompanyat de variacions del camp elèctric. En els últims lustres s'han acumulat nombroses dades que permeten comprovar la gran sensibilitat dels organismes vius al camp electromagnètic. A més a més, els efectes observats no poden explicar-se per l'acció tèrmica d'aquest camp.

Sabem, per exemple, que pot provocar-se narcosi general (pèrdua del coneixement i de la sensació de dolor) si fem passar pel cervell d'una persona impulsos de corrent altern.⁷⁶ La direcció de les línies de força del camp magnètic de la Terra serveix de "brúixola" durant les migracions a distàncies grans de l'anguila atlàntica. Les capacitats de navegació dels coloms es basen en la percepció del camp magnètic de la Terra. El creixement dels ossos del nostre esquelet varia en presència d'un camp elèctric i aquesta circumstància s'utilitza per a guarir fractures...

I es podria fer encara més llarga l'enumeració dels efectes biològics del camp electromagnètic.

7.2 Història del bioelectromagnetisme

(Física) Camp elèctric és...

(Física) Electromagnetisme és...

(Física) Camp magnètic és...

(Física) Camp electromagnètic és...

El pioner en la investigació del paper que exerceix el camp elèctric en l'organisme viu va ser Galvani.⁷⁷ Des de l'any 1775 va començar a interessar-se per la relació que hi ha entre *electricitat i vida*. Un dels assistents del professor, en separar amb l'escalpel l'any 1786 el múscul de la pota d'una granota, va tocar casualment amb l'instrument el nervi que conduïa a aquest múscul. Simultàniament, en la mateixa taula del laboratori estava funcionant una màquina electrostàtica, un generador d'electricitat estàtica, i cada vegada que la màquina produïa una descàrrega el múscul de la granota es contraïa. Galvani va concloure que l'electricitat provocava la contracció del múscul, que d'alguna manera entrava en el nervi.

Galvani va dedicar el lustre següent a l'estudi de la capacitat de diferents metalls de provocar contraccions musculars. Va mostrar, fig. 1, que si el nervi i el múscul es trobaven sobre plaques del mateix metall, el tancament del circuit amb un fil d'aram no produïa cap efecte. En canvi, si les plaques eren de metalls diferents, el tancament del circuit anava acompanyat de contracció muscular.

⁷⁶ Aquest és un mètode d'anestèsia mèdica.

⁷⁷ Luigi Galvani era professor d'anatomia en la Universitat de Bolonya.

7.2.1 “Electricitat animal”: Galvani, Volta, etc.

Galvani va comunicar el seu descobriment en 1791. El científic considerava que les convulsions de la pota de la granota eren causades per “l'electricitat animal” que es generava en el mateix cos de l'animal, mentre que el fil d'aram tan sols servia per a tancar el circuit elèctric.⁷⁸

Volta va repetir els experiments de Galvani, va obtenir els mateixos resultats i, al principi, estava d'acord amb la seua conclusió. Però més tard Volta va prestar atenció al fet que “l'electricitat animal” sols es donava quan el circuit tenia dos metalls diferents. Volta va demostrar que el contacte amb la llengua de dos metalls diferents connectats entre si provocava sensació de sabor. I si tocava amb un full d'estany el globus de l'ull, i subjectava simultàniament en la boca una cullera de plata, el tancament del circuit format per la cullera i el full produïa sensació de llum. En un intent de refutar la tesi de Galvani sobre l'existència de “electricitat animal”, Volta va suggerir que el circuit constituït per dos metalls diferents en contacte amb una dissolució salina hauria de servir de font de corrent continu, a diferència de la màquina electrostàtica, que produïa només descàrregues elèctriques separades.⁷⁹

Tot i que Galvani, poc temps després, va demostrar que de “electricitat animal” existeix també en circuits que no contenen contactes biometàl·lics, es va veure privat de la possibilitat de continuar la disputa amb Volta.⁸⁰ D'aquesta manera, la discussió dels dos compatriotes –diferents per les conviccions polítiques, el temperament i els punts de vista científics– va donar un impuls al desenvolupament de la física i la biologia modernes.

Qui portava raó, doncs, en aquesta controvèrsia? Hi ha o no “electricitat animal”? En els últims experiments Galvani va fer ús de dos músculs simultàniament, disposant-los de manera que un nervi d'un múscul es trobava damunt l'altre múscul, fig. 2. Va resultar que per a cada contracció del múscul 1 provocada pel pas del corrent pel seu nervi es contraïa també el múscul 2, com si a través del seu nervi també es deixara passar el corrent. Galvani va concloure, doncs, que el múscul, durant la contracció, servia de font de corrent elèctric. Així va quedar demostrada (per bé que indirectament) l'existència de “electricitat animal”. I tan sols al cap de mig segle, en 1843, el fisiòleg alemany E. Du Bois-Reymond va mostrar per primera vegada l'existència dels camps elèctrics en els nervis.⁸¹

(Física) Una màquina o un generador electrostàtic és...

(Física) Corrent continu és...

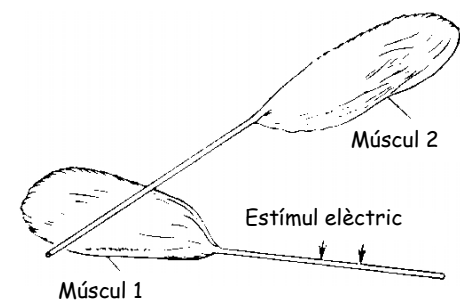


Fig. 2. Esquema de l'experiment de Galvani, en què demostrava l'existència “d'electricitat animal”.

Q1) Fes un esquema breu dels experiments de bioelectricitat esmentats al text.

Què fa, aleshores, de font de “electricitat animal”? Per a contestar aquesta qüestió es va necessitar mig segle més.

(Física) Camp elèctric de perforació d'una membrana és...

i es mesura en ...

⁷⁸ Galvani va enviar una còpia del treball a Alexander Volta, professor de física a Pavia (Itàlia del Nord).

⁷⁹ La suposició de Volta va resultar correcta, i en 1793 va publicar un treball científic en què descrivia la primera font de corrent continu que es va fabricar.

⁸⁰ En 1796 la ciutat de Bolonya va passar sota el control de França i Galvani, que es va negar a reconèixer el nou govern, va ser expulsat de la Universitat. Es va veure obligat a buscar refugi a casa del seu germà, on ja no es va poder dedicar a l'activitat científica, fins a la seua mort en 1798. En 1800 Volta va presentar el seu descobriment davant Napoleó, i va rebre una important remuneració.

⁸¹ Fent servir, amb aquest fi, aparells de mesurament elèctric perfeccionats per ell mateix.

7.3 La membrana cel·lular

(Física) Un ió és...

Tot ésser viu es mostra summent escrupolós tractant-se dels components del medi ambient. Hi contribueix la penetrabilitat selectiva de les membranes cel·lulars d'un organisme viu. La membrana de la cèl·lula representa una espècie de pell pròpia, que té un gruix de $0.01 \mu\text{m}$. Aquesta membrana controla selectivament la velocitat de migració de les molècules cap a dins i cap a fora de la cèl·lula.

Q2) Compara el gruix de la membrana amb la grandària d'un àtom.

(Física) Un mol és...

La membrana determina a quines molècules es permet penetrar en la cèl·lula i quines han de romandre fora dels seus límits. Aquesta activitat de la membrana requereix gran consum d'energia i provoca que la concentració d'alguns ions dins i fora la cèl·lula es puguin diferenciar en desenes i, de vegades, fins i tot en milers de vegades (taula 1).

Taula 1. Concentració d'alguns ions dins i fora de la fibra nerviosa del calamar.

Ió	Concentració, mmol/L	
	dins	fora
Na ⁺	50	460
K ⁺	340	10.4
Cl ⁻	114	590
Ca ²⁺	0.4	10
Mg ²⁺	10	54
Anions orgànics	300	—

Per exemple, la concentració dels ions potassi dins la cèl·lula és quasi 30 vegades major que en el líquid extracel·lular. Per contra, la concentració dels ions sodi dins la cèl·lula és, aproximadament, 10 vegades menor que en l'exterior. Com veurem més endavant, les diferències en les concentracions dels ions potassi i sodi pels dos costats de la membrana són indispensables per a l'existència de camps elèctrics en els organismes vius.

Resulta que, en estat de repòs, la membrana cel·lular és permeable, pràcticament, sols per als ions potassi. Durant l'excitació,⁸² en un lapse molt breu (pròxim a 1 ms per a les cèl·lules nervioses), la membrana es converteix en permeable també per a alguns altres ions. Les cèl·lules nervioses i les dels músculs de l'esquelet comencen a deixar passar a l'interior els ions sodi; les cèl·lules del cor, els ions sodi i calci, i alguns tipus de cèl·lules musculars, sols els ions calci. Aquest comportament de la membrana s'explica per l'existència en aquesta d'un nombre molt gran de *porus* o *canals* (de 10 a 500 per 10^{-6} mm^2) de diferents tipus destinats per a deixar passar distints ions.

⁸² El sentit d'aquesta paraula es desxifrarà un poquet més tard.

Q3) Fes un dibuix a escala del porus i la pell de la membrana (tingues en compte el valor de la secció del canal iònic que esmentem tot seguit).

(Física) Permeabilitat és...

Els millor estudiats són els canals per als ions sodi i potassi. La diferent permeabilitat de la membrana per als ions està relacionada amb la capacitat de captar les molècules d'aigua de distinta manera: un ió sodi atrau cinc molècules d'aigua, mentre que un ió potassi tan sols n'atrau tres. Per aquesta raó, el diàmetre del ió potassi, junt amb "l'abric" de molècules d'aigua, resulta menor que el diàmetre corresponent al ió sodi. L'àrea de la secció transversal del canal iònic de la membrana és de vora $1.5 \times 10^{-13} \text{ mm}^2$.

Q4) Explica què és allò de "l'abric".

Q4') Quin diàmetre té un canal, en nm?

7.4 Potencial en repòs

Vegem a què pot conduir la diferència en les concentracions dels ions potassi als dos costats de la membrana cel·lular, tenint en compte l'alta permeabilitat que presenta per a aquests ions.⁸³ Suposem que hem submergit una cèl·lula amb una membrana permeable només per als ions potassi en un electròlit en el qual la concentració d'aquests ions és menor que dins la cèl·lula. Immediatament després del contacte de la membrana amb la dissolució els ions potassi començaran a sortir de la cèl·lula cap a l'exterior, de la mateixa manera que ix el gas d'un globus inflat.

(Física) Càrrega elèctrica positiva i negativa és...
i es mesura en...

7.4.1 Equilibri difusió-camp

Però cada ió porta amb si mateix una càrrega elèctrica positiva, i com més ions potassi abandonen la cèl·lula, més electronegatiu es farà el seu contingut. Per aquesta raó, sobre cada ió potassi que ix de la cèl·lula actua una força elèctrica que s'oposa a la migració cap a l'exterior.

(Física) Potencial positiu i negatiu és...
i es mesura en...

Q5) Completa la frase: "Com més ions hagen eixit de la cèl·lula... serà el camp elèctric que s'oposa a què n'isquen més".

(Física) Diferència de potencial és...
i es mesura en...

Finalment, s'establirà un equilibri en el qual la força elèctrica que actua sobre el ió potassi en el canal de la membrana serà la mateixa que la força deguda a la diferència de les concentracions dels ions potassi dins i fora de la cèl·lula. És evident que com a resultat d'aquest equilibri entre les dissolucions interior i exterior apareixerà una diferència de potencial. En aquest cas, si considerem com a potencial zero el de la dissolució exterior, el potencial dins la cèl·lula serà negatiu.

(Física) Potencial zero (o nul) és...
i es mesura en...

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

⁸³ Precisament aquest problema se'l va plantejar i el va resoldre el fisiòleg alemany Julius Bernstein, fundador de la teoria membrànica d'excitació (1902).

(Física) El nombre d'Avogadro és...
i val...

(Física) Caiguda de tensió és...
i es mesura en...

(Física) Intensitat del camp elèctric és...
i es mesura en...

(Física) Camp elèctric de perforació d'una membrana és...
i es mesura en...

Q6) Fes un esquema de com varia la concentració de ions K^+ a un costat i l'altre de la cèl·lula.

Aquesta diferència de potencial (ddp) —el més elemental entre els fenòmens bioelèctrics observats— porta el nom de potencial de repòs de la cèl·lula i es pot demostrar que té la forma següent

$$V_r = \frac{RT}{eN_A} \ln \frac{[K^+]_i}{[K^+]_o} \quad (1)$$

en què e és la càrrega de l'electró, N_A el nombre d'Avogadro, R la constant dels gasos i T la temperatura absoluta. $[K^+]_i$ i $[K^+]_o$ són les concentracions dels ions potassi dins i fora de la cèl·lula, respectivament.

Q7) Comprova les dimensions de l'eq. (1).

Q7') Demostra, a partir de l'expressió (1), que el potencial de repòs és sempre positiu.

Si substituïm en l'expressió (1) $[K^+]_i/[K^+]_o = 30$ i $T = 300$ K, obtindrem $E_{pr} = 86$ mV, un valor pròxim als valors trobats experimentalment.

Q8) Justifica els valors que s'han utilitzat i comprova el càlcul.

Cap dir que la caiguda de tensió en la membrana cel·lular és menor de 0.1 V, i es produeix en un segment de vora 10^{-6} cm de longitud. Per aquesta causa, la intensitat del camp elèctric en el si de la membrana pot arribar a valors molt grans, prop de 10^5 V/cm, els quals són pròxims a la intensitat de perforació elèctrica d'aquesta membrana, de 2 a 4×10^5 V/cm.

Q9) Explica tots els valors anteriors.

7.4.2 Mesurament del potencial de repòs

El mesurament de la diferència de potencial elèctric en les cèl·lules vives és una tasca gens simple perquè les cèl·lules són molt petites.⁸⁴ Per això no serveixen les sondes ordinàries que porten els voltímetres, i es fan servir pipetes de vidre (microelectrodes) que tenen un diàmetre en la part més fina (punta) menor d'un micròmetre, fig. 3. La pipeta es plena d'una dissolució d'electròlit fort (per exemple, clorur potàssic trimolar) i el seu contingut, amb l'ajut d'un conductor metàl·lic, es connecta a l'entrada d'un voltímetre que ha de tenir una resistència elevada (més de $10^9 \Omega$) perquè la resistència de la pipeta és, de vegades, vora $10^8 \Omega$.

Q10) Explica per què tenen resistència elèctrica els voltímetres, i per què ha de ser elevada.

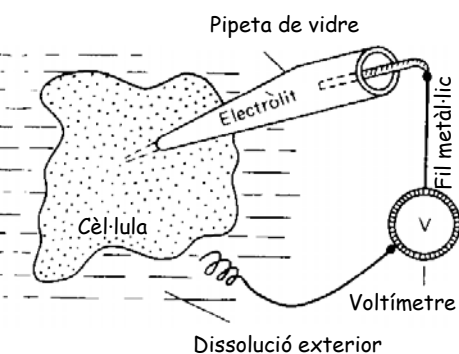


Fig. 3. Mesurament de la diferència de potencial en la membrana d'una cèl·lula viva.

⁸⁴ Per a introduir el microelectrode en la cèl·lula sense lesionar-la fa falta tenir molta destresa.

La intensitat del camp elèctric de la cèl·lula en estat de repòs és distinta de zero tan sols al si de la membrana (entre les superfícies interior i exterior). És a dir, en estat de repòs la diferència de potencial entre dos punts qualsevol del medi extracel·lular o del medi intracel·lular és nul.

(Física) Un voltímetre és...
i serveix per a...

Q11) Explica aquesta afirmació i fes un esquema de com varia el potencial elèctric i el camp elèctric al llarg de la cèl·lula.

És evident que la membrana biològica circumdada pels dos costats per dissolucions d'electròlits pot servir de font de força electromotriu (FEM). Tanmateix, a diferència dels dispositius de corrent continu produïts per la indústria, la font biològica de FEM pot tenir dimensions molt petites, degut al fet que el gruix de la membrana és tan sols de 0.01 a 0.02 μm . Per aquesta raó es treballa en l'actualitat per crear fonts de FEM anàlogues a les membranes biològiques, que poden trobar aplicació en els futurs microordinadors.

(Física) Una resistència elèctrica és...
i es mesura en...

7.5 Excitació de la membrana

Què és, aleshores, l'excitació de la membrana? És l'augment brusc de la permeabilitat dels canals sòdics o potàssics de la membrana. L'augment està acompanyat d'una variació igualment brusca de la diferència de potencial entre les superfícies interior i exterior de la membrana. Els processos d'excitació en cèl·lules diferents es diferencien els uns dels altres només per la velocitat i pel tipus d'ions involucrats.

S'ha estudiat molt bé l'excitació de la cèl·lula nerviosa en la qual el paper més important pertany als ions sodi. El canal sòdic de la membrana de la cèl·lula nerviosa té una estructura molt més complicada que el potàssic; la "capacitat de trànsit" s'incrementa ostensiblement en augmentar el potencial U del medi intracel·lular,⁸⁵ fig. 4.

(Física) Força electromotriu (FEM) és ...
i es mesura en...

7.5.1 Augment explosiu de la permeabilitat

Suposem ara que, d'algun mode, poguérem augmentar U en 20 o 30 mV (per exemple, deixant passar corrent elèctric a través de la cèl·lula).

Q12) Explica aquesta possibilitat.

Tot just augmenta U , la "capacitat de trànsit" del canal sòdic creixerà i en la cèl·lula penetraran un determinat nombre d'ions sodi degut al fet que la concentració iònica fora és més alta que dins. Però cada ió sodi porta una càrrega positiva, cosa que implica un augment encara major de U i, en conseqüència, també un creixement encara major de la capacitat de transició del canal sòdic, etc.

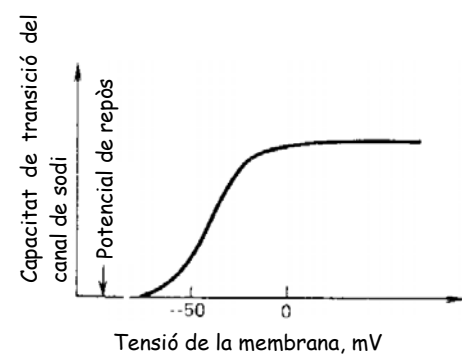


Fig. 4. Variació de la capacitat de transició del canal de sodi en funció de la tensió en la membrana.

⁸⁵ Computat, com hem dit abans, a partir del potencial de la dissolució exterior, que es pren com a zero.

En definitiva, un petit augment inicial ha de portar a un procés ràpid, a mode d'explosió, en el qual la permeabilitat de la membrana per als ions sodi s'incrementa fins als valors màxims possibles, i arriba a ser desenes de vegades major que la permeabilitat per als ions potassi. Aquesta circumstància es deu al fet que el nombre de canals sòdics en la membrana supera en unes 10 vegades el nombre de canals potàssics. Aleshores, si menyspreem la permeabilitat de la membrana per al potassi, és possible calcular el potencial U al final d'aquest procés ràpid. Ens valem de l'expressió (1) i hi substituïm $[K^+]$ per $[Na^+]$, i $[Na^+]/[Na^+]_0$ per 0.1. El salt del potencial durant el temps que dura el procés de transició resulta ser de 0.14 V.

Q13) Comprova els càlculs.

7.5.2 Potencial d'acció

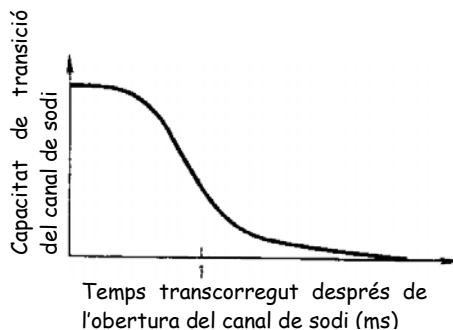


Fig. 5. Variació de la capacitat de transició del canal de sodi en funció de l'interval de temps transcorregut des de l'obertura.

Però el canal de sodi té una particularitat més que el distingeix del potàssic: la capacitat de transició del canal sòdic depèn no sols de la tensió elèctrica en la membrana, sinó també de l'interval de temps transcorregut des de l'obertura. El canal sòdic pot trobar-se en estat obert només durant 0.1 o 1 ms, depenent de la temperatura i el tipus de cèl·lula, fig. 5. I aquesta circumstància implica que la diferència de potencial en la membrana, després del salt brusca de 0.1 V, torna de nou al valor inicial, o siga, al potencial de repòs. També contribueix a un retorn més ràpid de U al potencial de repòs el fet que simultàniament amb la disminució de la permeabilitat del canal sòdic comença a augmentar la permeabilitat dels canals potàssics de la membrana.

El procés descrit d'increment en allau de U i de la consegüent disminució rep el nom de potencial d'acció o impuls nerviós, fig. 6. L'impuls nerviós constitueix la base material del procés d'excitació en el sistema nerviós.⁸⁶

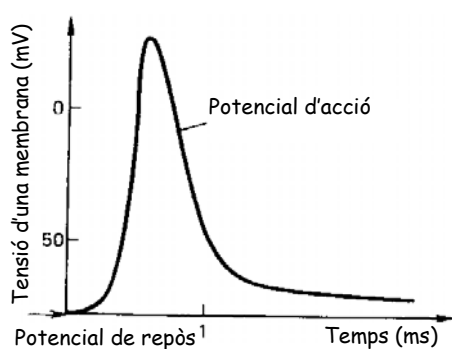


Fig. 6. Variació de la tensió en la membrana durant l'impuls nerviós.

7.6 Propagació de l'impuls nerviós

7.6.1 Sistemes humoral i nerviós

De quin mode comuniquen al cervell els òrgans dels sentits el que passa a l'entorn? I, en general, com intercanvien la informació les diferents parts del nostre organisme? La natura ha inventat amb aquest fi dos sistemes especials de comunicació. El primer sistema, l'humoral,⁸⁷ està basat en la difusió o el transport per tot el organisme, amb el corrent de líquid, de substàncies biològicament actives des del lloc on se sintetitzen. El sistema humoral és l'únic que tenen els protozous i els vegetals.

D'altra banda, els animals multicel·lulars (com també nosaltres) tenen a més un segon sistema, anomenat *nerviós*⁸⁸, que té un nombre molt gran de cèl·lules nervioses amb brots, o siga, fibres nervioses que creuen tot l'organisme, fig. 7. La membrana del cos de la cèl·lula nerviosa s'excita tot just arriben els impulsos nerviosos que provenen de

⁸⁶ Per la investigació de la naturalesa de l'impuls nerviós, els científics anglesos A. Hodgkin i A. Huxley van rebre el Premi Nobel en 1963.

⁸⁷ Del llatí *humor*, 'flúid, líquid'.

⁸⁸ Del llatí *nervus*, 'cordó'.

les cèl·lules veïnes, pels seus brots. Aquesta excitació es propaga a una fibra nerviosa diferent de la cèl·lula, a una velocitat de fins i tot 100 m/s, i es mou així a les cèl·lules, músculs o òrgans veïns.

Q14) Compara aquesta velocitat amb la d'una persona corrent, un cotxe o un avió.

Per tant, el senyal elemental que transmet la informació d'una part a una altra del cos d'un animal és l'impuls nerviós. A diferència dels punts i ratlles de l'alfabet Morse, la durada de l'impuls nerviós és constant (vora 1 ms) i la informació transmesa es pot presentar codificada de manera més capritxosa, en una seqüència d'impulsos com l'esmentat.⁸⁹

Q15) Quina distància viatja l'impuls nerviós durant el temps que dura l'impuls?

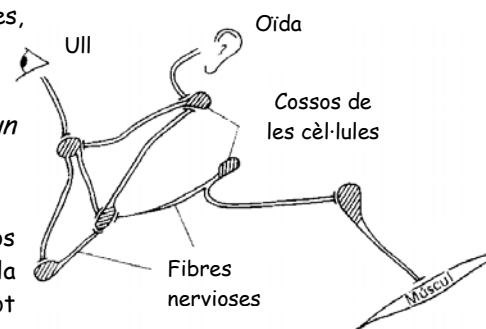


Fig. 7. Esquema dels enllaços entre les cèl·lules nervioses, els òrgans dels sentits i els músculs.

7.6.2 Mecanisme de propagació

Però, per què pot propagar-se l'impuls nerviós? De quines característiques de la fibra nerviosa depèn la velocitat de propagació de l'impuls per la fibra?

Per a contestar aquestes qüestions fa falta analitzar les propietats elèctriques de la fibra nerviosa, que representarem com un cilindre la superfície lateral del qual forma la membrana que separa la dissolució interior de l'electròlit exterior. Aquesta circumstància confereix a la fibra les propietats de cable coaxial, en el qual la membrana cel·lular serveix d'aïllament elèctric. Però la fibra nerviosa és un cable molt dolent. La resistència de l'aïllament d'aquest cable viu és 10^5 vegades menor, aproximadament, que la d'un cable ordinari, ja que el gruix de la membrana és de 10^{-6} cm i el del cable de prop de 10^{-1} cm. A més, "l'ànima" interior del cable viu és una dissolució d'electròlit que té una resistivitat milions de vegades major que la del metall. Per aquesta raó, la fibra nerviosa no excitada està mal adaptada per a la transmissió de senyals elèctrics a distàncies grans.

Es pot demostrar que la tensió en la membrana de la fibra disminueix exponencialment a mesura que ens allunyem de la font de tensió, $\sim e^{-l/\lambda}$, fig. 8. La magnitud λ que entra en l'exponent i que determina el grau d'esmortiment del senyal elèctric en la fibra nerviosa s'anomena constant de longitud de la fibra. El valor de λ depèn del diàmetre de la fibra, d , de la resistència de la membrana, r_m , per l'àrea de la membrana, S , i de la resistivitat del líquid de dins la fibra, ρ_i . Aquesta relació té la forma següent

(Física) Una fibra òptica és...
i serveix per a...

(Física) Un cable coaxial és...
i serveix per a...

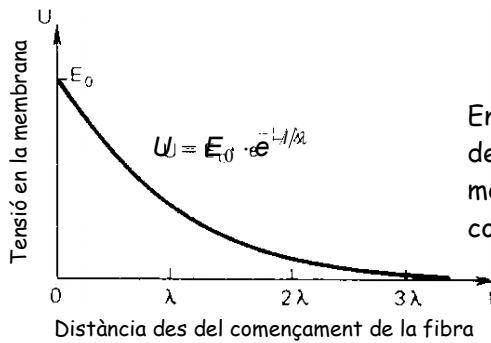
(Física) Un aïllament elèctric és...

(Física) La resistivitat és...
i es mesura en...

⁸⁹ Molts científics del passat van tractar d'explicar el mecanisme de propagació de l'excitació pel nervi. Isaac Newton, en les pàgines de la famosa *Òptica* editada en 1704, va suggerir que el nervi tenia propietats de guia de llum (fibra òptica). Per això, "les vibracions de l'èter que es generen en el cervell per l'esforç de la voluntat podien propagar-se pels tubs capil·lars –sòlids, transparents i homogenis– des dels nervis fins als músculs, fent que aquests es contraguen o s'afluïxen". El fundador de la ciència russa, el primer acadèmic rus M.V. Lomonósov, opinava que la propagació de l'excitació pel nervi ocorria per desplaçament d'un *líquid nerviós summament fi* especial.

La velocitat de propagació de l'excitació pel nervi va ser mesurada per primera vegada pel físic, matemàtic i fisiòleg alemany Helmholtz en 1850, un any després que Fizeau va mesurar la velocitat de la llum.

$$\lambda = \sqrt{\frac{d \cdot S \cdot r_m}{4\rho_i}} \quad (2)$$



Q15) Comprova les dimensions d'aquesta relació.

En l'expressió (2) no apareix la resistivitat del medi que circumda la fibra degut al fet que les dimensions del líquid conductor circumdant superen moltes vegades el diàmetre de la fibra, i la dissolució exterior pot considerar-se equipotencial.

Q16) Explica-ho.

Utilitzant l'eq. (2) podem trobar els valors de λ per a les fibres nervioses del calamar, ben estudiades, que tenen $d \approx 0.1$ mm, $r_m \approx 1000 \Omega \text{ cm}^2$ i $\rho_i \approx 100 \Omega \text{ cm}$. La substitució d'aquests valors dona $\lambda \approx 0.2$ cm.

Q17) Comprova aquest càlcul.

Això significa que a la distància de 0.2 cm del cos de la cèl·lula l'amplitud de l'impuls nerviós ha de disminuir quasi tres vegades.

Q17') Per què 3 vegades?

Com que la longitud de les fibres nervioses dels calamars pot arribar a ser d'uns quants centímetres, l'impuls no podria arribar a l'extrem de la fibra amb intensitat apreciable.

Q18) Explica-ho.

7.6.3 Propagació sense esmortiment

Però, en realitat, això no ocorre i l'impuls nerviós es propaga per tota la fibra sense disminuir l'amplitud degut al fet següent. Anteriorment hem demostrat que un augment de 20 a 30 mV del potencial de la dissolució intracel·lular respecte del potencial exterior condueix al successiu increment d'aquest últim potencial i a l'aparició de l'impuls nerviós en una zona donada de la cèl·lula. Dels càlculs anteriors es desprèn que si en la part inicial de la fibra es genera un impuls nerviós amb una amplitud de 0.1 V, aleshores a la distància λ la tensió en la membrana serà encara major de 30 mV, de forma que també ací apareixerà l'impuls nerviós; successivament, el mateix ocurrerà en la porció següent de la fibra, etc.

Q19) Explica el valor de major de 30 mV que hem comentat.

Per aquesta raó, la propagació de l'impuls per la fibra nerviosa pot comparar-se amb la d'una flama per una metxa de Bickford, però és precís indicar que en el primer cas l'energia necessària és subministrada per la diferència de les

concentracions dels ions potassi i sodi pels dos costats de la membrana, mentre que en el segon cas l'energia ve de la combustió de l'aïllament fàcilment inflamable de la metxa.

És evident que com major siga el valor de la constant de longitud λ , amb major rapidesa es podrà propagar l'impuls nerviós. Com que els valors de r_m i ρ_i són quasi els mateixos per a diferents cèl·lules i animals, resulta que λ i, per consegüent, també la velocitat v de propagació de l'impuls han de dependre, principalment, del diàmetre de la fibra, d , i ha d'augmentar proporcionalment a l'arrel quadrada del diàmetre.

$$v \propto d^{1/2} \quad (3)$$

Q20) Per què és així la relació (3)?

Q21) Quantes vegades augmentaria la velocitat de propagació de l'impuls nerviós si el diàmetre de la fibra es fera 10 vegades major?

Aquesta conclusió està en concordança total amb els resultats dels experiments. La fibra nerviosa gegantina del calamar (amb un diàmetre de prop de 0.5 mm) pot servir d'exemple per a assenyalar com la natura es va aprofitar de la dependència (3). És conegut que per fugir del perill el calamar es val d'un "motor a reacció", expulsant una gran massa d'aigua d'una cavitat. La contracció de la musculatura que posa en moviment aquest mecanisme s'inicia pels impulsos nerviosos que es propaguen per diverses fibres gegantines del calamar, i com a resultat s'aconsegueix una gran velocitat de reacció i el funcionament simultani de tota la musculatura.

Tanmateix, és impossible utilitzar fibres gegantines com aquestes en totes les contrades del sistema nerviós en les quals es requereix una rapidesa en la reacció a partir de l'anàlisi de la informació entrant, ja que aquestes fibres ocuparien massa espai. Per aquesta raó, per als animals més desenvolupats la natura va escollir un camí completament diferent, per a elevar la velocitat de propagació de l'excitació, el qual descriurem molt breument.

7.7 Nòduls de Ranvier

En la fig. 9 es dona la representació esquemàtica (en un tall al llarg de l'eix) de la fibra nerviosa més típica del sistema nerviós humà. Tota la fibra està dividida en segments d'aproximadament 1 mm de longitud, amb la particularitat que al llarg de tota aquesta, i per tots els costats, la fibra està coberta de mielina, una matèria lipoïdal que té bones propietats aïlladores. Entre els segments, en una secció de prop d'1 μ m de longitud, la membrana d'aquesta fibra està en contacte directe amb la dissolució exterior. Aquesta zona on desapareix la beina mielínica porta el nom de nòdul de Ranvier.

Què implica aquesta estructura de la fibra nerviosa? Si tornem a l'eq. (2) per a la constant de longitud λ , podem veure que si creix la resistència de la unitat d'àrea de la membrana (r_m) també ha de créixer el valor de λ i, amb aquest, així mateix, la velocitat de propagació de l'impuls. Aquesta circumstància permet augmentar la velocitat quasi 25 vegades en comparació amb la fibra no mielinitzada del mateix diàmetre.

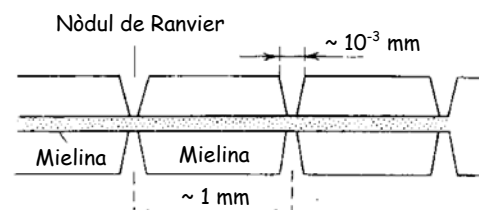


Fig. 9. Fibra nerviosa mielinitzada. (tall de la fibra al llarg de l'eix). Els punts representen l'interior de la fibra limitada per la membrana que cal excitar.

Q22) Com pot augmentar tant r_i ?

A més a més, la despesa d'energia per a la propagació de l'excitació per la fibra mielinitzada és molt menor que la despesa d'energia per a la fibra ordinària, perquè el nombre total d'ions que travessen la membrana és, en el primer cas, menyspreablement petit. Així, la fibra mielinitzada representa un canal de comunicació ràpid i econòmic en el sistema nerviós.

Q23) Explica aquesta afirmació.

7.8 Zombis i canals de sodi

7.8.1 Acció d'un verí

La tetrodotoxina ($C_{11}H_{17}O_8N_3$) és un verí que serveix per a inhibir fortament, per bloqueig, els canals de sodi (porus) de les cèl·lules nervioses. Aquesta és la toxina amb la massa molecular més baixa de totes les conegudes.

Q24) Quina és aquesta massa molecular?

Aquest verí va ser separat per primera vegada del peix fugu, habitant de la mar del Japó i d'altres mars càlides del sud-est d'Àsia. El nom d'aquest verí té el seu origen en la família dels peixos tetradòntids a la qual pertany el fugu.

Encara avui dia, al Japó, menjar els intestins del fugu es considera com el mode més refinat de suïcidar-se. Des de l'any 1927 fins al 1949 van morir vora 2700 persones per emmetzinament amb fugu. La venda d'aquest peix està prohibida en algunes regions del Japó; en altres es permet vendre'l, però sols si el preparen cuiners diplomats.

Encara que sembla estrany, el plat preparat del fugu i conegut amb aquest mateix nom es considera com un menjar exquisit de la cuina japonesa, tot i que alguns aficionats a aquest plat al cap de poc temps han perdut la vida. I malgrat que fa milers d'anys la mala fama del fugu ja era coneguda, fins ara són més que suficients les persones que volen assaborir aquest deliciós plat. Segons sembla, un dels primers europeus que va tenir la sort de provar fugu va ser el navegant anglès James Cook a qui els aborígens van comunicar els riscos d'aquest menjar, però... després que el va prendre.

Un dels que van menjar el peix, relata: "Quan es menja fugu, no són sols les sensacions gustatòries les que s'experimenten. Els vestigis de la tetrodotoxina present en aquest plat provoquem un formigueig agradable i sensació de calor en les extremitats, i també un estat d'eufòria". L'ús imprudent d'aquest exquisit menjar pot causar la mort per aturada de la respiració.

El fugu utilitza la metzina per a espantar altres peixos voràçs. En la pell del fugu hi ha glàndules que segreguen la tetrodotoxina quan alguna cosa irrita el peix. El fetge del fugu també conté tetrodotoxina, i encara no sabem per què el sistema nerviós del peix resta imperceptible a aquesta metzina tan forta.

La tetrodotoxina no sols és present en el fugu. Aquesta metzina se sintetitza també en l'organisme d'algunes espècies de salamandres, granotes, mol·luscos gasteròpodes, crancs i estels de mar. En algunes espècies de polps la tetrodotoxina se segrega per les glàndules que es troben en les ventoses i, per aquesta raó, "l'encaixada de mans"

d'aquest animal representa un perill real fins i tot per a una persona. L'únic que és comú per a animals verinosos tan diferents com el fugu, les salamandres, les granotes i els polps és el fet que tots contenen la tetrodotoxina en els ous. Així resulta evident que la funció principal d'aquesta metzina és protegir la descendència.

7.8.2 Tetrodotoxina, 007 i zombis

Les persones han après fa molt a utilitzar la tetrodotoxina amb fins egoistes. Fins i tot s'esmenta aquesta metzina, que és quasi mil vegades més forta que el cianur potàssic, a les novel·les. Així, per exemple, el conegut protagonista de l'escriptor anglès Ian Fleming, "l'agent 007" James Bond, per poc cau víctima d'aquesta metzina.

Lamentablement la utilització, avui, de la tetrodotoxina en els actes terroristes no és, ni molt menys, una fantasia. Aquesta metzina posseeix una particularitat interessant que atrau les persones amb poca consciència. Es tracta que si la dosi de la tetrodotoxina és un poc menys que la mortal, aquesta deixa a la persona com si estigués morta (falta de respiració i de palpitació cardíaca). Tanmateix, a diferència de la mort vertadera, aquest estat és reversible i quan passen unes hores la persona torna a la vida.

S'ha sabut fa poc que una organització secreta a Haití s'aprofita d'aquesta peculiaritat de la tetrodotoxina per a resoldre les tasques polítiques. A l'infortunat l'enverinen amb una pols que conté la metzina i, després d'haver desaparegut els indicis de vida, el soterrren. La nit següent obrin la tomba i la víctima és reanimada i transportada a algun lloc (plantacions de canya de sucre) on la persona, tornada a nàixer, és utilitzada com a esclau. Les tradicions a Haití són tals que fins i tot si la víctima aconsegueix tornar al seu lloc natal se'l considera com un cadàver viu (zombi), i el deixen completament aïllat.

Q25) Què té a veure tota aquesta secció (zombis...) amb el bioelectromagnetisme? (ajut: busca una única frase rellevant).

7.9 Fora del nervi

Hem establert les causes d'aparició de la diferència de potencial en la membrana de les cèl·lules vives i hem analitzat el procés de propagació de l'impuls per la fibra nerviosa. Tots els fenòmens elèctrics que tractem es desenvolupen tan sols en la membrana de la cèl·lula. Però, què representa, aleshores, el fenomen que va enregistrar E. du Bois-Reymond en 1843, fent servir un galvanòmetre rudimentari que va connectar al nervi? Els microelèctrodes van començar a utilitzar-se tan sols al cap de 100 anys, això significa que el galvanòmetre de du Bois-Reymond enregistra el camp elèctric en la dissolució que envolta el nervi.

Q26) Per què es parla de 100 anys després?

Examinem les propietats de la fibra com a cable i considerem, per facilitar aquesta tasca, que la dissolució exterior d'electròlit és equipotencial. En efecte, la caiguda de tensió en la dissolució exterior ha de ser centenars de vegades menor que dins la fibra, com a conseqüència de les dimensions molt majors del conductor exterior (dissolució). Per tant, no hi ha camp elèctric a l'exterior de la fibra.

(Física) Equipotencial és...
i se'n diu de...

Q27) Explica aquests raonaments.

Un camp elèctric suficientment intens i, per tant, mesurable, sempre es pot trobar al voltant d'una cèl·lula o un òrgan excitat; en particular, quan totes les cèl·lules de l'òrgan s'exciten quasi simultàniament. I això ocorre en el cor. De la mateixa manera que qualsevol altre òrgan intern, el cor està rodejat d'un medi electroconductor (la resistivitat de la sang és d'uns $100 \Omega \text{ cm}$).

Q28) Compara la resistivitat de la sang amb la de la secció de propagació de l'impuls nerviós.

Per això, durant cada excitació el cor s'envolta de camp elèctric. Ens trobem amb la manifestació d'aquest camp elèctric polsant quan ens fem un electrocardiograma; és a dir, un mesurament de la diferència de potencial entre distints punts de la superfície del cos, que apareix durant les contraccions del cor.

Q29) Fes un esquema dels punts del cos en què es posen, normalment, els contactes elèctrics quan es fa un electrocardiograma.

7.10 Llampecs vius

7.10.1 "Electricitat animal"

Les primeres manifestacions de "electricitat animal" que es van conèixer van ser les descàrregues dels peixos elèctrics. El silur elèctric es representava ja en els sepulcres de l'Antic Egipte, i Galeno (130-200 de l. n. e.), que era metge en l'època de les lluites de gladiadors a l'Antiga Roma, recomanava "electroteràpia" amb l'ajut d'aquests peixos.

Una recepta interessant per al tractament elèctric fent servir el peix torpede la va prescriure el metge de l'emperador romà Claudi en el segle I de l. n. e. Aquesta recepta deia, textualment: "El mal de cap, fins i tot si és crònic i insuportable, desapareix si es col·loca un peix torpede negre viu sobre el punt dolorós, i es manté en aquest punt fins que el dolor cesse". També hi havia una recepta anàloga per al tractament de la gota: "Per a qualsevol tipus de gota, quan comencen els dolors convé col·locar baix dels peus un peix torpede negre viu, amb la particularitat que en aquest cas el pacient ha d'estar dempeus sobre sorra humida banyada per l'aigua de mar, i ha de romandre en aquest estat fins que tota la seua cama, per baix del genoll, s'entumesci".

Q30) Quin paper fa la sorra humida?

Per la mateixa època es van fixar també el fet que el colp del peix torpede podia passar per una llança i per un pal de ferro mullats en aigua de mar, i arribar, d'aquesta manera, a persones que no es trobaven en contacte directe amb el peix.

Q31) Quina analogia té aquest fet amb posar els dos dits en un endoll domèstic?

Sabem que hi ha peixos capaços de generar descàrregues elèctriques molt fortes, que entrebanquen els moviments d'altres peixos (els paralitzen), fins i tot a animals de la grandària d'una persona. Els antics grecs creien que el peix torpede podia "fascinar" tant als peixos com als pescadors, i li van donar el nom de *narke*, que significava 'letargia', és a dir, 'peix que provoca letargia'. La paraula *narcòtic* té el mateix origen.

7.10.2 Origen elèctric de la descàrrega dels peixos

Abans d'aparèixer la teoria elèctrica, va gaudir de més èxit la teoria que explicava el colp del peix torpede com a acció mecànica. El naturista francès Réaumur (el seu nom el porta una de les escales de temperatura) estava entre els partidaris d'aquesta teoria.

Q32) Què és l'escala Réaumur de temperatures?

Réaumur suposava que l'òrgan del peix amb el qual assesta el colp és un múscul capaç de contraure's amb molta freqüència. Per aquesta raó el fregament amb aquest múscul pot provocar un entumiment temporal de l'extremitat com succeeix, per exemple, després d'un colp brusc pel colze.

Sols a finals del segle XVIII es van fer experiments que van demostrar la naturalesa elèctrica del colp assestat pel peix torpede. Un element important d'aquests experiments era l'ampolla de Leyden, el condensador elèctric principal d'aquella època. Els que van experimentar personalment les descàrregues de la botella de Leyden i les del peix torpede, van dir que eren molts similars. De la mateixa manera que la descàrrega de l'ampolla de Leyden, el colp del peix torpede pot arribar, simultàniament, a distintes persones agafades de les mans, si una d'aquestes toca el peix torpede.

Els últims dubtes sobre la naturalesa del colp del peix torpede van desaparèixer en 1776, quan es va aconseguir demostrar que, en determinades condicions, aquest colp podia produir una centella elèctrica. Amb aquest finalitat, en el recipient on nedava el peix se submergien parcialment dos fils d'aram metàl·lics de manera que la separació entre aquest fóra la menor possible. S'atreia l'atenció del peix i aquest s'acostava als fils d'aram, fins a donar-los un colp elèctric; de vegades, i simultàniament amb aquest colp, entre els fils d'aram saltaven centelles elèctriques. Per veure millor les centelles l'experiment es feia de nit.

(Física) Un condensador elèctric és...

i es caracteritza per...

Q33) Per què han d'estar molt junts els fils d'aram?

Poc temps després d'aquests experiments s'anunciava en periòdics londinencs que, per pocs diners, un/a podia sotmetre's a "sotragades", descàrregues del peix elèctric. Benjamín Franklin, un dels fundadors de la teoria de l'electricitat, va ser un adepte de la seua aplicació com a curació elèctrica. Per aquesta raó, en la medicina, fins a hores d'ara, la utilització de l'electricitat estàtica porta el nom de *franklinització*.

Q34) Franklin també va inventar el parallamps. Què és?

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

Al començament del segle XIX se sabia ja que la descàrrega dels peixos elèctrics passava a través dels metalls, però no passava a través del vidre o de l'aire. És important assenyalar que en els segles XVIII i XIX els peixos elèctrics es van utilitzar amb freqüència pels físics com a font de corrent elèctric. Faraday, per exemple, estudiant les descàrregues del peix torpede, va demostrar que, en essència, "l'electricitat animal" no es diferenciava, en cap aspecte, d'altres "classes" d'electricitat, i d'aquestes, en aquella època, se'n consideraven cinc: estàtica (obtinguda per fregament), tèrmica, magnètica, química i animal. Faraday considerava que si s'aconseguia comprendre la naturalesa de "l'electricitat animal" es podria "transformar la força elèctrica en nerviosa".

7.10.3 Intensitat de les descàrregues: òrgans elèctrics

L'anguila sud-americana produeix les descàrregues més fortes, i arriben a 500-600 V.

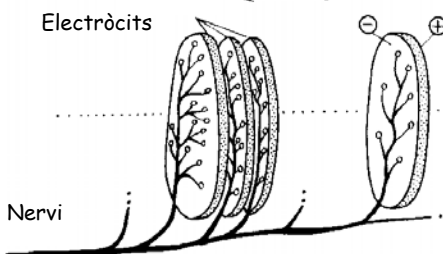
Q35) Compara aquest valor amb la tensió domèstica.

Els impulsos del peix torpede poden tenir una tensió de fins a 50 V i un corrent de descàrrega major de 10 A; és a dir, la potència pot superar els 0.5 kW.

Q36) Fes aquest càlcul.

Intensitat del camp elèctric

Electròcits



Nervi

Fig. 10. Esquema de l'òrgan elèctric d'un peix.

Tots els peixos que generen descàrregues elèctriques utilitzen amb aquest fi òrgans elèctrics especials. En els peixos elèctrics d'"alt voltatge", com ara el peix torpede marítim, l'anguila i el silur d'aigües dolces, aquests òrgans poden ocupar un volum considerable del cos de l'animal. En l'anguila elèctrica, per exemple, aquests òrgans s'escampen quasi al llarg de tot el cos, i arriben a ser a prop del 40 % del volum total del peix.

En l'esquema de l'òrgan elèctric,⁹⁰ fig. 10, veiem que consta d'electròcits, cèl·lules molt aplanades i empaquetades en petites columnes. Els extrems de les fibres nervioses arriben a la membrana d'un dels costats plans de l'electròcit (membrana innervada); per l'altre costat no arriben fibres (membrana no innervada). Els electròcits es reuneixen en una petita columna, amb la particularitat d'estar envoltats els uns i els altres amb membranes de distint signe elèctric.

En l'estat de repòs, el potencial en les dues membranes de l'electròcit és el mateix i pròxim a -80 mV (el medi interior de la cèl·lula està carregat negativament respecte a l'exterior). Per aquesta raó entre les superfícies exteriors de les dues membranes de l'electròcit no hi ha diferència de potencial.

Q37) Fes un esquema de la direcció del camp elèctric que hi ha en l'electròlit en l'estat de repòs.

⁹⁰ En la ratlla elèctrica o torpede, els òrgans elèctrics estan constituïts per cèl·lules multinuclears que tenen forma de disc, denominades electròcits. A més de la seua utilització defensiva i ofensiva, poden utilitzar-se per al reconeixement entre els membres d'una espècie quan no hi ha altres mitjans de comunicació.

Quan arriba l'impuls a l'electròcit pel nervi (aquests impulsos arriben, pràcticament al mateix temps, a tots els electròcits de l'òrgan), aleshores, des de les terminacions nervioses se separa l'acetilcolina que, quan actua sobre la membrana inervada de l'electròcit, fa augmentar la permeabilitat per als ions sodi i alguns altres ions; això condueix a l'excitació de la membrana. Amb l'excitació, la tensió en la membrana inervada de l'electròcit canvia de signe i arriba a uns 70 mV, mentre que la diferència de potencial entre les superfícies exteriors d'un mateix electròcit arriba a ser de 150 mV, aproximadament. Com que els electròcits estan units en una columna, la tensió entre les cèl·lules extremes de la columna serà proporcional al seu nombre.

Q38) Explica aquesta afirmació (pensa en la FEM que hi ha entre dues piles unides en sèrie o en paral·lel).

En l'òrgan elèctric de l'anguila elèctrica el nombre d'electròcits en una columna pot arribar a ser de 5000 a 10000, fet que explica, precisament, la gran tensió de la descàrrega d'aquests peixos. El valor del corrent de descàrrega està determinat pel nombre de columnes en l'òrgan elèctric. El peix torpede porta en cada aleta 45 columnes semblants, i l'anguila elèctrica en té vora 70 per cada costat del cos. Per a evitar que el corrent elèctric que genera l'òrgan elèctric passe pel propi peix, l'òrgan està envoltat per teixit aïllant d'alta resistivitat i està en contacte només amb el medi ambient.

7.10.4 Sensibilitat a camps elèctrics externs

Tanmateix, entre els peixos elèctrics n'hi ha uns que no utilitzen l'òrgan elèctric per a l'atac o la defensa, sinó per a la recerca de la víctima. També pertanyen a aquest grup els taurons, les llampreses i alguns silúrids que tenen una sensibilitat molt elevada respecte a un camp elèctric extern. Sabem que el tauró que nada lliurement és capaç de descobrir el llenguado que s'amaga en la sorra, orientant-se tan sols per la percepció dels potencials bioelèctrics que es generen durant els moviments respiratoris de la presa.

L'òrgan elèctric dels peixos que mostren gran sensibilitat a camps elèctrics externs funciona a una freqüència de centenars de Hertz, i pot crear en la superfície del cos de l'animal oscil·lacions de diferència de potencial iguals a uns quants volts. Aquesta circumstància condueix a l'aparició d'un camp elèctric que es capta pels òrgans especials de l'anomenada línia lateral: els receptors elèctrics, fig. 11. Els receptors elèctrics d'aquests peixos acusen una sensibilitat sorprenent a la intensitat del camp elèctric, i envien impulsos nerviosos al cervell de l'animal quan el valor de la intensitat supera $10 \mu\text{V/m}$. Com que els objectes que es troben dins l'aigua al voltant del peix es diferencien de l'aigua per la conductivitat elèctrica, aquests objectes provoquen una distorsió del camp elèctric. Guiant-se per aquestes distorsions del camp els peixos poden orientar-se en l'aigua tèrbola i descobrir la presa.

Cal assenyalar que, en quasi tots els peixos que utilitzen els òrgans elèctrics per a l'orientació, la cua resta durant la natació pràcticament immòbil. A diferència d'altres peixos, aquests es desplacen en l'aigua exclusivament pel moviment ondulant d'aletes

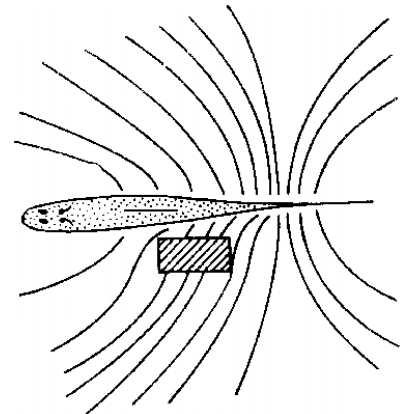


Fig. 11. Distribució de les línies equipotencials del camp elèctric al voltant del peix que té un òrgan elèctric. L'objecte ratllat té una conductivitat elèctrica menor que que el medi circumdant. La intensitat del camp elèctric en la proximitat de la superfície lateral del peix, pel costat de l'objecte, és diferent que per l'altre costat.

(Física) Conductivitat elèctrica és...

i es mesura en...

laterals desenvolupades (peix torpede) o de l'aleta dorsal (lluç del Nil). Com que l'òrgan elèctric d'aquests peixos està disposat en la part cabdal del cos, mentre que els receptors elèctrics es troben en la part mitjana, resulta que amb aquest mode de nadar la intensitat del camp elèctric en la zona dels receptors elèctrics depèn tan sols de la conductivitat elèctrica del medi ambient.

Q39) Explica aquesta afirmació.

Els investigadors japonesos han descobert que immediatament abans d'un fort sisme el silur acusa una sensibilitat inusitada respecte a pertorbacions mecàniques febles, si l'aquàrium es troba està unit mitjançant una derivació amb un dipòsit natural d'aigua. Això s'explica pel fet que entre punts de l'escorça terrestre, en el període precedent al terratrèmol, es generen diferències de potencial percebudes pel silur. La intensitat dels camps elèctrics que es generen, amb freqüència, 8 hores abans d'iniciar-se el sisme, poden arribar a $300 \mu\text{V/m}$, valor més de 10 vegades superior al llindar de sensibilitat d'aquest peix.

Q40) Què és aquest llindar de sensibilitat?

És interessant que fa 2000 anys va aparèixer al Japó una llegenda que deia que el silur podia penetrar sota terra i, desplaçant-s'hi, provocar terratrèmols. Des d'aquells temps el silur s'associa al Japó amb els fenòmens sísmics. Tanmateix, tan sols en el segle XX va cridar l'atenció dels sismòlegs japonesos el comportament dels animals abans dels terratrèmols. Avui dia els mètodes biològics de pronòstic dels sismes han cobrat gran desenvolupament.

És conegut que els peixos que es troben en un aquàrium a través del qual es deixa passar un corrent continu van en direcció a l'ànode, però, sobtadament, sense arribar-ne, s'aturen paralitzats. Això ocorre si la caiguda de tensió al llarg del peix és de vora 0.4 V. Després de desconnectar el corrent, els peixos poden "tornar a la vida" i comencen a nadar de nou. Ara bé, si la caiguda de tensió augmenta fins a 2 V, el peix s'entumeix i mor. La força fascinant de l'ànode s'utilitza amb èxit durant la pesca amb l'ajut d'electricitat. Al mateix temps, el corrent elèctric espanta els peixos que tenen una sensibilitat elevada al corrent (per exemple, els taurons). S'han fet experiments amb l'anomenada *protecció elèctrica* i s'ha constatat el seu impacte sobre els esquals. S'ha establert que el corrent que passa entre dos elèctrodes serveix de barrera per als taurons però és pràcticament imperceptible per a les persones.

7.11 Electricitat en les plantes

Les plantes estan arrelades fermament a terra amb les arrels i, per aquesta causa, amb freqüència, serveixen de patró d'immobilitat. Es diu, per exemple: *immòbil com un roure*. Aquestes idees no són del tot certes, ja que totes les plantes són susceptibles de lentes "flexions de creixements" indispensables per adaptar-se a la il·luminació i a la direcció de la força de la gravetat. Aquests moviments estan condicionats per una velocitat desigual de creixement dels diferents costats d'un òrgan qualsevol. A més, algunes plantes fan moviments periòdics corresponents al dia i a la nit, plegant i obrint les fulles i els pètals de les flors. Altres plantes revelen una activitat locomotora encara més notable i reaccionen amb moviments ràpids a diferents factors externs: llum, substàncies químiques, vibració, el toc, etc. Aquesta *sensibilitat* va contribuir a fer el nom de mimosa púdica proverbial, perquè tot just fregar-la, les seues fulles diminutes es contrauen i baixa el peduncle principal. Algunes plantes insectívores i els circells de la liana també són capaces de reaccionar ràpidament.

De quina forma es produeixen en les plantes moviments tan ràpids? El paper decisiu pertany als processos elèctrics operats en les cèl·lules. En les cèl·lules vegetals, de la mateixa manera que ocorre en una cèl·lula nerviosa o muscular animal, entre les superfícies interior i exterior de la membrana hi ha una diferència de potencial de vora -100 mV degut a la diferent composició iònica dels medis intra i extracel·lular, com també a la dissímil permeabilitat de la membrana a aquests ions. Quan actuen els estímuls externs que hem dit abans, la membrana de la cèl·lula vegetal s'excita i augmenta la permeabilitat per a un dels cations (normalment, el calci). Com a resultat, la tensió en la membrana es redueix quasi a zero, però prompte torna fins al valor inicial. La durada del potencial d'acció pot arribar a ser d'algunes desenes de segons, fig. 12, i es pot propagar d'una cèl·lula a una altra de la mateixa manera que l'impuls nerviós, però a una velocitat molt menor. Per exemple, el potencial d'acció es propaga pel peduncle de la mimosa amb una velocitat de 2 cm/s, aproximadament, i per la fulla de la planta insectívora (anomenada vulgarment *atrapamosques*), amb una velocitat de 10 cm/s.

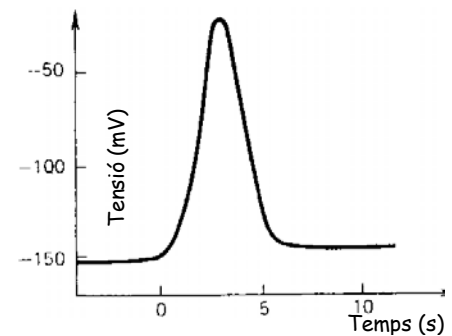


Fig. 12. Potencial d'acció d'una cèl·lula vegetal.

Q41) Compara aquesta velocitat amb la de l'impuls nerviós d'un animal.

El restabliment de la tensió inicial en la membrana de la cèl·lula vegetal després de l'excitació té lloc a causa de l'obertura en la membrana d'uns canals de potassi complementaris, tancats en estat de repòs.

L'augment de la permeabilitat potàssica de la membrana condueix a l'eixida des de la cèl·lula de certa quantitat de ions potassi (dins la cèl·lula la quantitat de potassi és major que fora) i a la restitució de la diferència de potencial normal. Se suposa que l'eixida dels ions potassi de la cèl·lula vegetal durant l'excitació es deu no sols a l'augment de la permeabilitat potàssica de la membrana, sinó també a altres causes encara poc estudiades. Així, cada excitació de la cèl·lula vegetal està acompanyada, durant un cert temps, de la disminució de la concentració d'ions potassi a l'interior de la cèl·lula i d'un augment en l'exterior, el qual, precisament, és la causa de la reacció locomotora.

7.11.1 Experiment casolà: pressió osmòtica

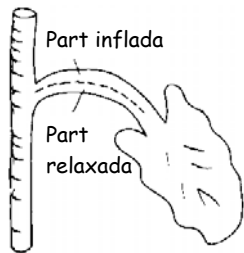
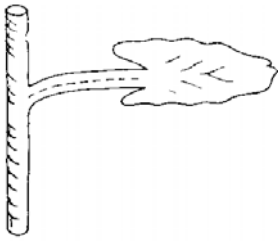
Per a comprendre què provoca la concentració canviant dels ions dins la cèl·lula vegetal es pot fer l'experiment següent. Heu d'agafar un poc de sal comuna i posar-la en un saquet impermeable a la sal, però permeable a l'aigua (per exemple, de cel·lofana).

Després submergiu el saquet amb la sal en una casseroleta plena d'aigua. Aviat ens adonarem que el saquet s'ha inflat. Aquest fenomen ocorre perquè l'aigua penetra en l'interior del saquet per a igualar les pressions osmòtiques dins i fora del saquet.⁹¹ Com a resultat, la pressió hidrostàtica creixent dins el saquet pot trencar-lo.

(Física) pressió osmòtica és...
i es mesura en...

⁹¹ És a dir, pressions proporcionals a les concentracions dels ions dissolts.

7.11.2 Mecanisme d'activitat locomotora en les plantes



Les cèl·lules vegetals vives no són més que dissolucions concentrades de sals rodejades de membrana ben permeable a l'aigua. Quan entren en contacte amb l'aigua comuna, aquestes cèl·lules s'inflen de manera que la pressió en l'interior pot arribar a 5×10^6 Pa. El valor de la pressió intracel·lular i el grau d'inflament de la cèl·lula vegetal depenen de la concentració dels ions dissolts. Per aquesta raó la disminució de la concentració dels ions potassi en l'interior de la cèl·lula durant l'excitació està acompanyada d'una caiguda de pressió intracel·lular.

Si ens fixem, un peduncle d'una fulla té dos grups de cèl·lules disposades longitudinalment, fig. 13, mentre que l'excitació només abraça el grup inferior de cèl·lules. Durant l'excitació la part inferior del peduncle es redueix parcialment i la part superior inflada provoca la seua flexió. Amb aquest mecanisme es pot desenvolupar també el moviment d'altres parts de la planta. I sempre, els senyals elèctrics que s'hi propaguen, com ocorre en els animals, serveixen d'un mitjà important de comunicació entre les distintes cèl·lules per coordinar la seua activitat.

Fig. 13. Mecanisme de l'activitat locomotora de les plantes.

7.12 Biomagnetisme: Tenen els animals una brúixola magnètica?

7.12.1 Ratolins

Sí que en tenen. Tot i que les persones no percebem el camp magnètic que ens envolta, molts animals són capaços de reaccionar fins i tot a petites variacions. Els ratolins forestals, per exemple, poden orientar-se en el bosc per la direcció del camp magnètic terrestre. Es va demostrar així: Tancaven immediatament el ratolí capturat en un contenidor hermètic especial proveït de dues bobines d'electroïmant. Aquestes bobines es disposaven de forma que, en deixar-hi passar un corrent elèctric, era possible invertir la direcció del camp magnètic dins la caixa hermètica. Dos minuts després de la captura del ratolí es traslladava dins la caixa a 40 m al nord del lloc de captura, on el posaven en llibertat i observaven en quina direcció es traslladava en els minuts següents. L'experiment va demostrar que si les bobines de l'electroïmant es trobaven sense corrent, mentre que el ratolí es traslladava, la direcció resultant del moviment del ratolí després de la posada en llibertat coincidia amb la direcció cap al lloc de la captura. En canvi, si la direcció del camp magnètic dins la caixa s'invertia, aleshores, després de l'alliberament el ratolí es movia en el sentit oposat.

(Física) Un electroïmant és...

(Física) Una bobina és...
i s'utilitza per a...

Q42) Com s'aconsegueix invertir el camp magnètic de la bobina?

7.12.2 Ocells, coloms

La intuïció ens diu que els pardals són els que més s'aprofiten del sentit magnètic. En efecte, durant els llargs vols migratoris els pardals han d'afrontar problemes de navegació importants, ja que aquests vols, com a norma, es fan de nit pel perill que representen els atacs dels ocells de rapinya; a més a més, el cel ennuvolat mai no representa un destorb per als ocells de pas. Amb tot, no és molt convenient investigar el sentit magnètic dels ocells migratoris, ja que només en fan ús dues vegades a l'any. Un ocell més còmode per a estudiar el sentit magnètic és el colom missatger, que pot

estar lluny del colomar, fins i tot a centenars de quilòmetres, i trobar inequívocament el camí cap a casa.

Podem vigilar tota la ruta que fa el colom, des del lloc on el solten fins al colomar, col·locant en el cos del pardal un diminut radiotransmissor. El resultat és que la major part del temps els coloms missatgers volen en línia recta, com si veren el colomar a centenars de quilòmetres. Tan sols en els primers 3 minuts, mentre decideixen en quina direcció volar, els coloms canvien amb freqüència el rumb. El mateix succeeix quan falten de 2 a 5 km per arribar al colomar.

El fet que la recerca de la direcció correcta de vol no està relacionada (en el cas dels coloms missatgers) amb la vista, queda demostrat pels resultats dels experiments en els quals els ulls dels ocells es tancaven amb vidres mats especials. Fins i tot amb aquestes vidres els coloms triaven, com abans, la direcció correcta encara que només podien distingir entre el dia i la nit. Aquests coloms "cecs", evidentment, no podien entrar al colomar; allò que feien quan s'acostaven a una distància d'alguns quilòmetres, era interrompre el vol, o passaven volant confusament, d'un lloc a l'altre. De la mateixa manera que els ocells migratoris, els coloms missatgers poden trobar infal·liblement el camí a casa tant per la nit com amb temps ennuvolat.

I bé, quins experiments, precisament, van convèncer definitivament els científics que els pardals, per orientar-se durant vols prolongats, utilitzen el sentit magnètic? En 1971, en posar el biòleg nord-americà Keaten un petit imant al cap d'un colom missatger, aquest va perdre la capacitat de trobar el camí per a tornar a casa. Cal assenyalar que un objecte idèntic per la seua massa i grandària, però sense propietats ferromagnètiques, no impedia al pardal trobar el colomar.

En altres experiments se subjectava al cap del colom una bobina a través de la qual podia passar corrent, canviant d'aquesta forma el signe de la component vertical del camp magnètic de la Terra, la qual està orientada cap avall a l'hemisferi nord i cap amunt a l'hemisferi sud. Aquests experiments van demostrar que una inversió artificial de la component vertical del camp magnètic terrestre duu a la variació de la direcció del vol del colom en 180°.

Q43) Per què es parla de component vertical del camp magnètic terrestre? Quins altres components hi ha?

7.12.3 Fluctuacions del camp magnètic terrestre

Sabem que el camp magnètic de la Terra està subjecte a fortes oscil·lacions perquè té dues fonts: la primera és la mateixa Terra, que és un enorme imant; l'altra font del camp magnètic terrestre la constitueixen els fluxos de partícules carregades (ions) en les capes superiors de l'atmosfera. Les oscil·lacions diàries de la temperatura de l'atmosfera impliquen l'aparició d'alteracions corresponents del flux iònic present a l'atmosfera. Com a resultat, el segon component del camp magnètic de la Terra experimenta oscil·lacions, en el curs de 24 hores, amb una amplitud que va de 3 a 6×10^{-8} T; aquest valor és un 0.1% del valor mitjà del camp magnètic (5×10^{-5} T).

Q44) Comprova aquest càlcul del 0.1%.

Q45) Per què parla de camp mitjà?

Tanmateix, de vegades ens convertim en testimonis de variacions considerables del camp magnètic relacionades amb l'augment de l'activitat solar. El paroxisme de l'activitat solar fa créixer la concentració d'ions a l'atmosfera, i això provoca l'increment del segon component del camp magnètic terrestre. L'amplitud d'aquests canvis bruscos i imprevistos del camp magnètic de la Terra (tempestes magnètiques) pot superar 10^{-6} T.

Q46) Quin % és ara?

Les investigacions evidencien que durant les tempestes magnètiques la capacitat de navegació dels coloms missatgers empitjora considerablement. Els ocells migratoris tenen dificultats anàlogues si es troben, en el camí de retorn a casa, amb anomalies magnètiques al llarg d'alguns quilòmetres –és a dir, amb llocs on el camp magnètic de la Terra varia ostensiblement (de vegades, més de 10^{-6} T). Si l'amplitud de l'anomalia que s'interposa al camí del colom és major de 5×10^{-6} T, l'ocell perd totalment la capacitat d'orientació.

7.12.4 Abelles i camp magnètic

Les abelles tenen una sensibilitat encara major a l'acció del camp magnètic. Els apicultors saben que les abelles silvestres orienten les bresques exactament de la mateixa forma (respecte a la direcció nord-sud) que estaven orientades en l'arna materna. En canvi, si l'arna nova s'emplaça en una zona on hi ha un camp magnètic intens, l'orientació de les bresques s'altera. Per tant, l'aptitud de les abelles de sentir el camp magnètic de la Terra els ajuda a coordinar les "obres de construcció" en la nova arna.

Un altre resultat de la capacitat de les abelles de captar les variacions del camp magnètic és la precisa organització temporal dels treballs en l'arna. En efecte, com poden aquests insectes, amb una exactitud de fins a 15 minuts, observar el període de 24 hores, l'interval amb el qual les abelles abandonen l'arna per a volar a arreplegar el suc de les flors? Fins i tot en dies d'intempèrie, quan les abelles es veuen obligades a romandre dia i nit en l'arna, aquest ritme no es pertorba. Tanmateix, només cal modificar bruscament el camp magnètic en l'arna i s'altera la periodicitat de les eixides de les abelles de les arnes. S'ha arribat a la conclusió que el factor que regula l'activitat de totes les abelles obreres en l'arna és el camp magnètic de la Terra, que varia amb un període de 24 hores (com ja hem dit abans). La velocitat màxima de variació del camp magnètic correspon al migdia, i és superior a 3×10^{-10} T per minut. Aquestes brusques variacions del camp magnètic serveixen, precisament, de senyal perquè les abelles obreres isquen volant.

7.12.5 Mesurament del camp magnètic terrestre

Aleshores, com poden mesurar el camp magnètic els coloms i les abelles? Tècnicament, el camp magnètic es mesura principalment per dos mètodes. O bé es mesura la FEM que es genera entre els extrems d'un conductor que es mou en el camp (efecte Hall), o es mesura el moment mecànic amb el qual el camp tendeix a fer girar un imant paral·lelament a les línies de força.

(Física) Moment (mecànic) de les forces és...

i s'utilitza per a...

Q47) Explica aquesta tendència al gir.

El primer mètode és utilitzat pels taurons i els peixos torpede, amb la particularitat que els receptors elèctrics disposats en la línia lateral d'aquests peixos fan d'instrument elèctric de mesura. Durant el moviment en el camp magnètic, entre els extrems oposats del cos del peixos es genera una FEM que dóna lloc a l'aparició d'un corrent elèctric en l'aigua de mar circumdant. Aquests peixos són capaços, amb l'ajut dels receptors elèctrics, de captar la direcció del camp magnètic de la Terra, desplaçant-se només a la velocitat d'1 cm/s. Tanmateix encara no se sap si utilitzen amb finalitats de navegació la capacitat de sentir el camp magnètic.

(Física) L'efecte Hall és...
i s'utilitza per a...

(Física) Les línies de força són...
i s'utilitzen per a...

Q48) Què té a veure la velocitat del peix ací?

Com ja hem dit, un imant permanent fixat al cap del colom missatger reduïa bruscament la capacitat d'orientar-se en temps nuvolós. És evident que el camp magnètic permanent que es mou amb el colom no deu (d'acord amb la llei de Faraday)⁹² canviar la FEM d'inducció que es genera durant el moviment de l'ocell a través de les línies del camp magnètic de la Terra. Per aquesta raó és poc probable que els coloms missatgers utilitzen la mateixa metodologia que els taurons i els peixos torpede per orientar-se.

Q50) Explica aquesta conclusió.

Així mateix el fet que als pardals i les abelles els manquen receptors elèctrics fa impossible el mesurament del camp magnètic fent servir el primer mètode. A més a més, l'ús està dificultat per la resistivitat elèctrica molt gran de l'aire (en comparació amb l'aigua de mar).

7.12.6 Imants permanents en animals

Per a utilitzar la segona metodologia de mesurament del camp magnètic, en el cos de l'animal han de trobar-se imants permanents. En efecte, fa uns decennis s'han descobert diminuts imants permanents en moltes espècies d'animals (des de bacteris fins a persones). Els ferroimants s'han trobat, primerament, en el cos dels quitons, petits mol·luscos de mar que mengen algues de les roques. Resulta que la major part dels dents d'aquests mol·luscs són cristalls de magnetita ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), una de les substàncies més dures entre les que formen els organismes vius. Per cert que aquest mol·lusc, igual que els coloms, és capaç de trobar perfectament el camí a casa. Es considera que ho fa amb l'ajut dels dents magnètics.

(Física) La llei de Faraday diu que...

7.12.7 Ferrobacteris

Poc temps després d'haver descobert els dents magnètics en els mol·luscos marins es va esbrinar que alguns tipus de bacteris s'orientaven i nadaven preferentment al llarg de les línies del camp magnètic, fins i tot en el cas que el valor d'aquest fóra de poc més de 10^{-5} T. Dins d'aquestes bacteris es va trobar ferro, de manera que els bacteris van rebre el nom de ferrobacteris. Els ferrobacteris contenen ferro en forma de cristalls de vora $0.1 \mu\text{m}$ de grandària (la dimensió dels ferrobacteris és d'alguns micròmetres). La investigació va demostrar que pel seu comportament en un camp magnètic aquests bacteris recorden els materials ferromagnètics amb un sol domini.

(Física) Un ferroimant és...

(Física) Un domini magnètic és...

⁹² Que ens diu que la FEM induïda és igual a la variació del flux del camp magnètic per unitat de temps.

Es pot cultivar, en condicions determinades, tota una colònia de ferrobacteris. Aquests bacteris acumulen ferro quan disminueix la concentració d'oxigen en el medi ambient. Per a una concentració de ferro en un medi com l'aigua dels pantans (1.6 mg/l), els bacteris acumulen una quantitat de ferro tan gran que constitueix vora un 1.5% de la seua massa seca. En aquest cas cada ferrobacteri conté vora 20 cristalls de magnetita disposats com una cadeneta. Els càlculs diuen que el moment magnètic M del bacteri, $M \approx 1.3 \times 10^{-8}$ erg/T, és suficient per a orientar-se en el camp magnètic de la Terra ($B = 5 \times 10^{-5}$ T) a la temperatura ambient (300 K), perquè l'energia $BM = 6.5 \times 10^{-13}$ erg, és bastant major que l'energia tèrmica corresponent, $kT = 4.1 \times 10^{-14}$ erg.

Q51) Repassa els càlculs i explica la conclusió.

És clar que l'orientació d'aquests organismes unicel·lulars rudimentaris en un camp magnètic representa un procés purament passiu i no depèn del "desig" dels bacteris. Per això, els bacteris morts, de la mateixa forma que els vius, s'orienten al llarg de les línies del camp magnètic de la Terra.

Els ferrobacteris estan molt difosos en la natura. En molts dipòsits constitueixen més de la meitat de tot el plàncton bacterià, i al sòl arriben a ser fins al 20% de la microflora. Durant molt de temps va ser un enigma per a què necessitaven aquests bacteris el ferro. En condicions naturals, com a resultat de l'activitat vital d'aquests microorganismes, de vegades té lloc l'embossament de les canonades d'aigua degut al fet que s'hi diposita hidròxid de ferro, insoluble en l'aigua: aquest el produeixen els ferrobacteris. Quin és el paper dels ions ferro en la vida dels ferrobacteris? En el procés d'activitat vital dels bacteris s'acumula peròxid d'hidrogen. Aquesta substància és un intensíssim oxidant i per als bacteris és un verí. En presència de ferro l'acció oxidant del peròxid es dirigeix al metall i no al bacteri. Així el ferro és un neutralitzador del peròxid d'hidrogen, tòxic per als bacteris.

7.12.8 Detecció de materials ferromagnètics en éssers vius

Degut a l'enorme quantitat de cèl·lules dels animals grans, és impossible buscar els materials ferromagnètics fent ús només de la tècnica microscòpica. Amb aquest fi s'utilitza el magnetòmetre, usat normalment pels geòlegs per a avaluar el contingut de menes magnètiques a les roques. La variant moderna d'aquest aparell consta d'una bobina de fil d'aram submergida en heli líquid i d'un amperímetre que mesura el corrent que circula per les espirals. La temperatura baixa de l'heli líquid és suficient perquè el metall de les espirals passe a l'estat de superconductivitat,⁹³ i la resistència elèctrica de la bobina es redueix pràcticament a zero.

Q52) Quina és la temperatura de l'heli líquid?

Si a l'interior d'aquesta bobina s'introdueix un imant permanent, aleshores, d'acord amb la llei de Faraday, en aquesta es genera un corrent elèctric proporcional a la imantació romanent i inversament proporcional a la resistència elèctrica de la bobina.

⁹³ ...la resistència dels metalls superconductors és zero; per això, encara que el camp elèctric siga nul, hi ha corrent.

(Física) Un magnetòmetre és...

(Física) Un amperímetre és...

(Física) La superconductivitat és...

La resistència elèctrica (pròxima a zero) de la bobina permet descobrir amb aquest aparell impureses magnètiques en les mostres, impureses que tenen tan sols 10^4 dominis de material ferromagnètic.

Q53) Per què fa falta utilitzar temperatures tan baixes?

Amb l'ajut del magnetòmetre es va aconseguir mesurar la quantitat de magnetita continguda en una abella, i resulta pròxim a 10^6 dominis. Tots aquests cristalls de magnetita estan disposats en la part davantera de l'abdomen de l'insecte. Mesuraments anàlegs de les mostres de diferents parts del cos del colom missatger van permetre el descobriment de partícules magnètiques grans, de fins a 0.1 mm de grandària, disposades en els músculs del coll. Es va veure que, normalment, al voltant d'aquestes partícules magnètiques es concentra una quantitat considerable de terminacions nervioses sensibles. Es considera que el canvi de la direcció del vol del pardal respecte a les línies de força del camp magnètic ha de provocar la deformació dels teixits que circumden la partícula magnètica. Aquesta deformació es capta per les terminacions nervioses i es transmet al cervell de l'ocell, en què es fa l'anàlisi de la direcció del vol.

7.12.9 El suïcidi de les balenes

En la premsa apareix freqüentment la notícia que balenes i dofins es llancen en massa a les costes d'algun punt de l'oceà. Sabem que els cetacis⁹⁴, igual que els ocells, es guien en les migracions per la direcció de les línies de força del camp magnètic, valent-se amb aquest fi de les partícules magnètiques descobertes en la part davantera del cap. En les latituds tropicals, en les quals el camp magnètic de la Terra és relativament petit, la migració normalment té lloc en la direcció nord-sud.

Q54) Per què és menor el camp magnètic terrestre en latituds tropicals?

L'estudi de les característiques geomagnètiques de les zones de mortalitat en massa dels cetacis ha demostrat que la majoria d'aquestes zones coincideixen amb els punts en què la línia costera de l'oceà està orientada quasi perpendicularment respecte a les línies del camp magnètic. Per això se suposa que la causa que impulsa els cetacis migratoris a tirar-se a la costa radica en la seua incapacitat (en alguns casos) de renunciar a temps a orientar-se per la brúixola magnètica i recórrer a l'ajut dels altres òrgans dels sentits.

Es considera que les balenes es mouen, guiades per la memòria, al llarg de les línies de força del camp magnètic, passant a intervals de temps determinats d'una línia a una altra. Així, per a navegar feliçment necessiten una brúixola i un rellotge. S'ha establert que en les balenes no sols la brúixola és magnètica, sinó també el rellotge. El paper de rellotge el fan les oscil·lacions regulars del camp geomagnètic que tenen lloc pel matí i la nit (com ja hem dit, les abelles en l'arna utilitzen un rellotge anàleg).

Amb tot, a més de les oscil·lacions geomagnètiques regulars es produeixen també les irregulars degudes a l'activitat solar. La majoria de les vegades, les oscil·lacions irregulars ocorren a altes hores de la nit, i en superposar-se sobre el senyal vespertí regular, poden amagar aquest últim. Tanmateix, en el cas que després de semblant

⁹⁴ Cetacis: 'mamífers pisciformes, alguns dels quals de gran volum com la balena'.

"embolic" geomagnètic nocturn, el senyal matinal resulte suficientment precís, la balena "ajusta" el rellotge pel matí i prossegueix la navegació en la direcció correcta.

Per a determinar les causes de la mortalitat en massa de les balenes, la investigadora anglesa M. Klinowska va recórrer a l'arxiu del Museu Britànic on es troben reunides les descripcions de més de 3000 casos semblants des de 1913. La investigadora va establir que la mort en massa de les balenes correspon a les ocasions en les quals les oscil·lacions irregulars del camp geomagnètic es produeixen al matí i eclipsen així, per a la balena, el senyal matinal regular. En aquests casos, per a les balenes que es refien plenament dels seus sistemes de navegació magnètic, sembla com si encara no haguera arribat el matí, el període de 24 hores s'allarga, i es retarda el pas a la següent línia geomagnètica (d'acord amb el seu mapa). Si aquest error es comet vora la costa, el resultat és que les balenes, per inèrcia, hi "encallen".

7.12.10 Brúixoles congènites

L'estudi de la capacitat dels ocells per a orientar-se va dur els científics a la conclusió que les aus migratòries poden determinar el rumb del vol no sols fent servir la brúixola magnètica, sinó també analitzant la posició del Sol o dels estels al firmament. Sembla clar que els ocells utilitzen la brúixola solar i l'estel·lar durant els vols amb el cel ras, mentre que en els casos en què és difícil determinar la disposició dels astres celests els ocells passen al mètode magnètic d'orientació. Aleshores, en quina brúixola confien més els ocells? Quina d'aquestes tres brúixoles és congènita?

Q55) De quines tres brúixoles parlem?

La idea segons la qual els ocells tenen una brúixola congènita és de fa poc temps. Abans es considerava que els ocells no tenien cap necessitat d'una brúixola congènita que fixara el rumb del vol migratori, pel fet que els pollets fan el primer vol amb els ocells adults i els anys posteriors podrien volar guiant-se per la memòria i fent ús del sentit magnètic desenvolupat per aquests moment, i també de les brúixoles solar i estel·lar. Com, aleshores, es podria explicar la capacitat dels petits cucuts els primer any de vida, incubats en nius estranys i que, per aquesta raó, emprenen tot sols el vol migratori? Com, repetim, es podria explicar la seua capacitat de determinar la direcció cap a altres llocs d'hivernada? Sembla que cada pollet de qualsevol ocell migratori té arrelat genèticament el rumb del futur vol.

Per a comprovar-ho, uns científics suecs van fer un experiment amb espècies de papamosques, ocells migratoris que passen l'hivern en la costa occidental d'Àfrica. Als pollets d'aquests ocells, tot just eixir de l'ou, els traslladaven a un lloc on estaven dos mesos i mig fins que començaven a volar. Els científics determinaven les direccions dels primers vols curts dels pollets i va resultar que la direcció final d'aquests vols coincidía amb la direcció cap als llocs de la seua primera hivernada futura (cap l'occident).

7.12.11 Algorismes congènits de navegació

Els mateixos científics es van plantejar la finalitat de trobar l'algorisme congènit que li diu al pollet la direcció del vol migratori. Per als científics, la natura, en implantar genèticament el rumb del vol migratori, ho indica tan sols per a un dels sistemes d'orientació (magnètic o solar). Per això, per a la papamosques és possible algun d'aquests algorismes:

- 1) Si la brúixola congènita és solar, l'algorisme pot ser així: "Al migdia determina la projecció del Sol sobre la línia de l'horitzó, orienta el pit cap a aquest punt i, després, gira 90° en sentit horari. Vola en aquesta direcció. Per no perdre el camí per la nit o quan el cel està ennuvolat, gradua immediatament la brúixola magnètica d'acord amb la solar i determina sota quin angle respecte a la direcció de les línies de força del camp magnètic has de volar".
- 2) Si la brúixola congènita és la magnètica, el programa pot ser així: "Recorda, s'ha de volar sota un angle de 90° que es compta, en sentit antihorari, des de la direcció del camp magnètic fins al lloc de l'eixida de la closca. Per a no perdre el camí durant les tempestes magnètiques, i per damunt de les anomalies geomagnètiques, gradua immediatament la brúixola solar per la magnètica i aclareix en quina direcció respecte al Sol has de volar".

Amb la finalitat de determinar quin dels dos algorismes ha triat la natura i quina brúixola és congènita, es van col·locar durant 12 dies pollets a penes eixits de la closca en un camp magnètic artificial que tenia el mateix valor que el del punt geomagnètic donat, mentre que la direcció estava desplaçada cap a l'est a 90°. En passar dos mesos d'aquest experiment, ja en el camp magnètic normal, els pollets van començar a fer els primers vols curts en direcció cap a les futures hivernades; aleshores es va veure que tots, en lloc de volar cap a l'oest ho feien rumb al nord. És fàcil adonar-se que han de comportar-se d'aquest mode els pollets que utilitzen l'algorisme núm. 2 amb la brúixola magnètica congènita. És evident que l'aplicació de l'algorisme núm. 1 hauria obligat els ocells a volar cap al sud. Així, doncs, la capacitat dels ocells migratoris d'orientar-se pel camp magnètic es congènita.

7.12.12 Orientació magnètica en les persones

Més recentment s'han obtingut dades que permeten suposar que les persones també tenen la capacitat de sentir el camp magnètic. La investigació dels teixits de les persones ha donat la possibilitat de descobrir, en la zona dels nas, partícules magnètiques que per la seua forma i composició són anàlogues a les que tenen altres animals dotats de sentit magnètic.

El fet que alguns individus posseeixen una sensibilitat molt alta davant les variacions del camp magnètic de la Terra serveix de base per a explicar la capacitat de descobrir aigües freàtiques i cossos minerals, utilitzant una "meravellosa vareta de vímet". Aquests personatges, saurins, s'esmenten des de fa segles. Per a descobrir aigües subterrànies i cossos minerals utilitzen una vareta de fusta acabada de tallar, i amb ramificacions en forma de Y. Durant la recerca els saurins orienten la vareta horitzontalment subjectant-la amb les dues mans pels extrems simètrics. Quan l'explorador passa sobre un cos mineral, un tros massís de ferro, per exemple, la vareta comença a girar en les seues mans (probablement, no sense el seu ajut), desviant-se de vegades 90° i 120°.

S'ha demostrat amb experiments realitzats avui dia que tan sols el 20% de les persones tenen capacitat de trobar irregularitats ocultes sota terra. També s'ha demostrat que el tret distintiu dels saurins és l'alta sensibilitat que tenen a les variacions del camp magnètic. Anàlogament a com un imant permanent impedeix que el colom missatger s'oriente, l'acostament d'un imant fort al cap de l'explorador amb vareta inhibeix la capacitat de trobar cossos minerals.

Fins avui no sabem exactament quina és la naturalesa de les forces que fan que la vareta de vímet gire en mans del saurí. Tanmateix, s'ha establert que varetes metàl·liques de la mateixa forma giren en les mans de l'explorador a un angle molt major que les de fusta i de vegades fan, fins i tot, diverses revolucions.

7.13 Física (conceptes). Ordenat per concepte

Concepte	Capítol		
<i>Aberració cromàtica</i>	6è	Capa neutra (en flexió)	5è
Absorció de llum	6è	Capacitat calorífica	6è
Acceleració centrípeta	1r	<i>Càrrega elèctrica positiva o negativa</i>	7è
Acceleració	1r	Centre de gravetat	1r
Acceleració	4t	Centrifugadora	3r
Acceleració de la gravetat	1r	Centrípeta (acceleració)	1r
Acètic (àcid)	5è	Cinemàtica	4t
Àcid acètic	5è	Cinètica (energia)	5è
Adimensional (magnitud)	1r	<i>Coaxial (cable)</i>	7è
Agitació tèrmica	2n	Coeficient de permeabilitat	1r
Aïllador tèrmic	6è	Coeficient de reflexió	6è
<i>Aïllament elèctric</i>	7è	Coeficient de tensió superficial	3r
Amper (unitat)		Cohesió (forces)	3r
<i>Amperímetre</i>	7è	Combustió	3r
Amplitud d'oscil·lació d'una ona	2n	Component inorgànic	5è
Amplitud d'una ona	2n	Compressió	5è
Àrea/volum (relació)	4t	Concavitat	5è
Àrea/volum i dimensions	3r	Concentració de saturació	3r
<i>Avogadro (nombre)</i>	7è	Condensació, nuclis	3r
B , camp magnètic	6è	<i>Condensador elèctric</i>	7è
Beer- Lambert (lleis)	6è	<i>Conductivitat elèctrica</i>	7è
Bernouilli (lleis, fluids)	3r	Conservació de l'energia (lleis)	6è
Biomecànica	5è	Conservació de l'energia (principi)	1r
<i>Bobina</i>	7è	Conservació energia (lleis)	4t
Boltzmann (Stefan-, lleis)	6è	Constant de temps (d'un procés)	1r
<i>Brúixola</i>	7è	<i>Continu (corrent)</i>	7è
<i>Cable coaxial</i>	7è	Convecció	1r
<i>Caiguda de tensió</i>	7è	Convexitat	5è
Caiguda lliure (temps de)	1r	<i>Corrent continu</i>	7è
Calci (sals)	5è	Corrent elèctric	5è
Calor específica	6è	Cos negre	6è
Calorífica (capacitat)	6è	Cristall	5è
Camp de força (línies)	4t	Cromàtica (aberració)	6è
Camp elèctric	4t	Decibel	2n
Camp elèctric	5è	Densitat	1r
<i>Camp elèctric</i>	7è	Densitat	2n
<i>Camp elèctric (intensitat)</i>	7è	Diferència de fase	6è
<i>Camp elèctric de perforació</i>	7è	Diferència de potencial	4t
Camp elèctric, E	6è	Diferencial (equació)	6è
<i>Camp electromagnètic</i>	7è	Difracció	2n
Camp magnètic	4t	Difusió	1r
<i>Camp magnètic</i>	7è	Dimensions d'una magnitud	1r
Camp magnètic, B	6è		
Canvi de fase en la reflexió	2n		
		Dinàmica	4t
		<i>Domini magnètic</i>	7è
		Doppler (efecte)	4t
		E , camp elèctric	6è
		Eco	2n
		Efecte Doppler	4t
		<i>Efecte Hall</i>	7è
		Efectes dels límits	4t
		Elàstic (mòdul de Young)	3r
		Elàstic (mòdul de Young)	4t
		Elàstica (esfera, pressió)	3r
		Electromagnètic (espectre)	6è
		Elèctric (camp)	4t
		Elèctric (camp)	5è
		<i>Elèctric (camp)</i>	7è
		Elèctric (corrent)	5è
		Elèctric, camp (E)	6è
		Elèctrode (-, +)	5è
		Elèctrodes	4t
		<i>Electroimant</i>	7è
		<i>Electromagnètic (camp)</i>	7è
		Electromagnètica (energia de la radiació)	6è
		<i>Electromagnetisme</i>	7è
		Electromotriu (força, FEM)	4t
		Electronegativitat	7è
		<i>Electrostàtic (generador, màquina)</i>	7è
		Energia (lleis de conservació)	4t
		Energia (lleis de conservació)	6è
		Energia (principi de conservació)	1r
		Energia cinètica	1r
		Energia cinètica	5è
		Energia d'enllaç d'una molècula	1r
		Energia d'una ona	2n
		Energia de la radiació electromagnètica	6è
		Energia mecànica	2n
		Energia mecànica	5è
		Energia potencial	1r
		Energia potencial	3r
		Energia potencial	5è
		Enfocament	6è
		Equació diferencial	6è
		Equilibri tèrmic	6è
		<i>Equipotencial</i>	7è

Esfera elàstica	3r	Gas (pressió parcial)	1r	refredament	
(fórmula de Laplace, diferència de pressió)		<i>Generador electrostàtic</i>	7è	Llei de Poiseuille	4t
Esfera elàstica (pressió)	3r	Gradient de pressió	2n	Llei de Stefan-Boltzmann	6è
Específica (calor)	6è	Gravetat (acceleració)	1r	Llei de Stokes del fregament	1r
Espectre de radiació electromagnètica	6è	Gruix òptic	6è	Llum (absorció)	6è
Especular (superfície)	6è	<i>Hall (efecte)</i>	7è	Longitud d'ona	2n
<i>Faraday (llei)</i>	7è	Hipòtesi	5è	<i>Magnètic (camp)</i>	7è
Fase (Canvi en la reflexió)	2n	Histèresi	3r	Magnètic (camp, inducció)	4t
Fase (diferència de)	6è	Hooke (llei)	4t	<i>Magnètic (domini)</i>	7è
Fase d'una ona	6è	Hooke (llei)	5è	Magnètic, camp (B)	6è
FEM (força electromotriu)	4t	<i>Imant (electroimant)</i>	7è	<i>Magnetímetre</i>	7è
<i>Ferroimant</i>	7è	<i>Imant (ferroimant)</i>	7è	Magnitud	1r
<i>Fibra òptica</i>	7è	Imatge	6è	Magnitud (ordre)	1r
Flexió	5è	Impuls	5è	<i>Màquina electrostàtica</i>	7è
Flexió (capa neutra)	5è	Índex de refracció	6è	Massa	1r
Fluctuacions	1r	Inducció electromagnètica	4t	Massa-volum d'un gas	3r
Fluids en règim laminar	3r	Inèrcia	4t	<i>Mecànic (moment)</i>	7è
Fluids en règim turbulent	3r	Infraroig (IR)	6è	Mecànica (energia)	5è
Font de llum primària	6è	Inorgànic (component)	5è	Metre (unitat)	
Font de llum secundària	6è	Intensitat d'una ona	2n	Micra (micròmetre)	6è
Força	1r	<i>Intensitat del camp elèctric</i>	7è	Micròmetre (micra)	6è
<i>Força (línia)</i>	7è	Interferència	6è	Mòdul de Young	4t
Força (línies d'un camp)	4t	Interval de visió normal d'una persona	6è	Mòdul de Young	5è
Força (línies)	5è	Ió	7è	Mòdul elàstic de Young	3r
Força (moment)	5è	IR (infraroig)	6è	<i>Mol</i>	7è
<i>Força (moment)</i>	7è	Joule (unitat)		Mol (unitat)	5è
Força (resultant)	3r	Kelvin (un)	6è	Moment d'una força	5è
Força de la gravetat (pes)	1r	Kilogram (unitat)		<i>Moment d'una força</i>	7è
Força de reacció	1r	Lambert-Beer (llei)	6è	Moviment tèrmic aleatori	2n
Força de resistència o fricció	1r	Laminar (règim, fluids)	3r	Negatiu (elèctrode)	5è
Força electromotriu (FEM)	4t	Laplace (fórmula, diferència de pressió en esfera elàstica)	3r	<i>Negatiu (potencial)</i>	7è
Força resultant	1r	Laplace (llei)	4t	<i>Negativa (càrrega elèctrica)</i>	7è
Forces de cohesió	3r	Lent	6è	Negre (cos)	6è
Fórmula de Laplace (diferència de pressió en esfera elàstica)	3r	Límits (efecte dels)	4t	Neutra (capa, en flexió)	5è
Fotó	6è	<i>Línia de força</i>	7è	Newton (2a llei)	4t
Fotoreceptor	6è	Línies de força	5è	Newton (llei del refredament)	1r
Fractals	3r	Línies de força d'un camp	4t	Newton (unitat)	
Fregament (força)	1r	Llargavistes	6è	<i>Nombre d'Avogadro</i>	7è
Freqüència	1r	Llei conservació energia	4t	Nuclis de	3r
Freqüència	4t	Llei de Bernoulli (fluids)	3r	condensació	
Freqüència d'una ona	2n	Llei de conservació de l'energia	6è	<i>Nul (potencial)</i>	7è
Fricció (força)	1r	<i>Llei de Faraday</i>	7è	Número adimensional	1r
Fricció (llei de Stokes)	1r	Llei de Hooke	4t	oem (ona electromagnètica)	6è
		Llei de Hooke	5è	ona electromagnètica (oem)	6è
		Llei de Lambert-Beer	6è	Ones sonores	2n
		Llei de Laplace	4t	Òptic (gruix)	6è
		Llei de Newton (2a)	4t	Ordre de magnitud	1r
		Llei de Newton del	1r	<i>Osmòtica (pressió)</i>	7è
				Parcial (pressió)	1r
				Pascal (unitat)	

<i>Perforació (camp elèctric)</i>	7è	Règim turbulent (fluids)	3r	laminar a turbulent (fluids)	
<i>Permeabilitat</i>	7è	Relació àrea/volum	4t	Transmissió d'una ona	2n
<i>Permeabilitat (coeficient)</i>	1r	Relació àrea/volum i dimensions	3r	Transparent (substància)	6è
<i>Pes</i>	1r	Relació massa-volum d'un gas	3r	Treball	1r
<i>Piezoelectricitat</i>	4t	Resistència (força)	1r	Treball	3r
<i>Piezoelectricitat</i>	5è	Resistència d'un material	5è	Turbulent (règim, fluids)	3r
<i>Pla de polarització</i>	6è	<i>Resistència elèctrica</i>	7è	uam	6è
<i>Poiseuille (llei)</i>	4t	<i>Resistivitat</i>	7è	Ultrasons	4t
<i>Polarització (pla)</i>	6è	Resolució d'un sistema òptic	6è	Ultraviolat (UV)	6è
<i>Positiu (elèctrode)</i>	5è	Resultant (força)	1r	uma	6è
<i>Positiu (potencial)</i>	7è	Resultant d'unes forces	3r	Unitat: amper	
<i>Positiva (càrrega elèctrica)</i>	7è	Sals de calci	5è	Unitat: joule	
<i>Potència</i>	1r	Saturació, concentració	3r	Unitat: kilogram	
<i>Potència</i>	5è	Secundària (font de llum)	6è	Unitat: metre	
<i>Potència</i>	7è	Segon (unitat)		Unitat: mol	
<i>Potencial (diferència)</i>	4t	Segona llei de Newton	4t	Unitat: newton	
<i>Potencial (energia)</i>	3r	Sensibilitat	6è	Unitat: pascal	
<i>Potencial (energia)</i>	5è	Sinusoïdal (variació)	2n	Unitat: segon	
<i>Potencial positiu o negatiu</i>	7è	Sistema òptic (resolució)	6è	Unitat: volt	
<i>Pressió</i>	2n	So	2n	Unitat: watt	
<i>Pressió (gradient)</i>	2n	Solubilitat	3r	UV (ultraviolat)	6è
<i>Pressió arterial</i>	4t	Soroll blanc	2n	Variació sinusoidal	2n
<i>Pressió atmosfèrica</i>	1r	Stefan-Boltzmann (llei)	6è	Vector de propagació d'una oem	6è
<i>Pressió en una esfera elàstica</i>	3r	Stokes (llei de fricció)	1r	Velocitat	1r
<i>Pressió osmòtica</i>	7è	Substàncies tensoactives	3r	Velocitat de propagació d'una ona	2n
<i>Pressió parcial d'un gas</i>	1r	<i>Superconductivitat</i>	7è	Velocitat mitjana	2n
<i>Primària (font de llum)</i>	6è	Superficial (tensió)	3r	Velocitat ona	4t
<i>Principi de conservació de l'energia</i>	1r	Superfície especular	6è	compressió sang	
<i>Propagació d'una oem (vector)</i>	6è	Telescopis	6è	Velocitat ona	4t
<i>Quant</i>	6è	Temps (constant de)	1r	deformació artèria	
<i>Rad (radiant)</i>	6è	Temps de caiguda lliure	1r	Vidre	5è
<i>Radiació</i>	1r	Tensió	4t	Visió normal (interval)	6è
<i>Radiació electromagnètica (energia)</i>	6è	Tensió	5è	Volt	5è
<i>Radiació electro-magnètica (espectre)</i>	6è	<i>Tensió (caiguda)</i>	7è	Volt (unitat)	
<i>Radiant (rad)</i>	6è	Tensió superficial (coeficient)	3r	<i>Voltímetre</i>	7è
<i>Raigs X</i>	5è	Tensoactives, substàncies	3r	Watt (unitat)	
<i>Reacció (força)</i>	1r	Tèrmic (aïllador)	6è	X (raigs)	5è
<i>Receptor fotosensible</i>	6è	Tèrmic (equilibri)	6è	Young (mòdul de)	4t
<i>Reflexió</i>	6è	Tèrmic (moviment d'agitació)	2n	Young (mòdul elàstic)	3r
<i>Reflexió (coeficient)</i>	6è	Termoreceptor	6è	Young (mòdul)	5è
<i>Reflexió d'una ona</i>	2n	Tesla	4t	<i>Zero (potencial)</i>	7è
<i>Reflexió i canvi de fase</i>	2n	Tracció	5è		
<i>Refracció</i>	6è	Transductor	2n		
<i>Refracció (índex)</i>	6è	Transició de règim	3r		
<i>Refredament (llei de Newton)</i>	1r				
<i>Règim laminar (fluids)</i>	3r				

Física (conceptes). Ordenat per capítol

Concepte	Capítol
----------	---------

Amper (unitat)	conservació)	conservació de
Joule (unitat)	Energia cinètica 1r	l'energia
Kilogram (unitat)	Energia d'enllaç 1r	Radiació 1r
Metre (unitat)	d'una molècula	Reacció (força) 1r
Newton (unitat)	Energia potencial 1r	Refredament (lleis de 1r
Pascal (unitat)	Fluctuacions 1r	Newton)
Segon (unitat)	Força 1r	Resistència (força) 1r
Unitat: amper	Força de la gravetat 1r	Resultant (força) 1r
Unitat: joule	(pes)	Stokes (lleis de 1r
Unitat: kilogram	Força de reacció 1r	fricció)
Unitat: metre	Força de resistència 1r	Temps (constant de) 1r
Unitat: mol	o fricció	Temps de caiguda 1r
Unitat: newton	Força resultant 1r	lliure
Unitat: pascal	Fregament (força) 1r	Treball 1r
Unitat: segon	Freqüència 1r	Velocitat 1r
Unitat: volt	Fricció (força) 1r	Agitació tèrmica 2n
Unitat: watt	Fricció (lleis de 1r	Amplitud d'oscil·lació 2n
Volt (unitat)	Stokes)	d'una ona
Watt (unitat)	Gas (pressió parcial) 1r	Amplitud d'una ona 2n
Acceleració 1r		Canvi de fase en la 2n
centrípeta	Gravetat 1r	reflexió
Acceleració 1r	(acceleració)	Decibel 2n
Acceleració de la 1r	Llei de Newton del 1r	Densitat 2n
gravetat	refredament	Difracció 2n
Adimensional 1r	Llei de Stokes del 1r	Eco 2n
(magnitud)	fregament	Energia d'una ona 2n
Caiguda lliure (temps 1r	Magnitud 1r	Energia mecànica 2n
de)	Magnitud (ordre) 1r	Fase (Canvi en la 2n
Centre de gravetat 1r	Massa 1r	reflexió)
Centrípeta 1r	Newton (lleis del 1r	Freqüència d'una ona 2n
(acceleració)	refredament)	Gradient de pressió 2n
Coeficient de 1r	Número 1r	Intensitat d'una ona 2n
permeabilitat	adimensional	Longitud d'ona 2n
Conservació de 1r	Ordre de magnitud 1r	Moviment tèrmic 2n
l'energia (principi)	Parcial (pressió) 1r	aleatori
Constant de temps 1r	Permeabilitat 1r	Ones sonores 2n
(d'un procés)	(coeficient)	Pressió 2n
Convecció 1r	Pes 1r	Pressió (gradient) 2n
Densitat 1r	Potència 1r	Reflexió d'una ona 2n
Difusió 1r	Pressió atmosfèrica 1r	Reflexió i canvi de 2n
Dimensions d'una 1r	Pressió parcial d'un 1r	fase
magnitud	gas	Sinusoidal (variació) 2n
Energia (principi de 1r	Principi de 1r	So 2n

Soroll blanc	2n	esfera elàstica		electromagnètica	
Tèrmic (moviment d'agitació)	2n	Règim laminar (fluids)	3r	Inèrcia	4t
Transductor	2n	Règim turbulent (fluids)	3r	Laplace (lleï)	4t
Transmissió d'una ona	2n	Relació àrea-volum i dimensions	3r	Límits (efecte dels)	4t
Variació sinusoidal	2n	Relació massa-volum d'un gas	3r	Línies de força d'un camp	4t
Velocitat de propagació d'una ona	2n	Resultant d'unes forces	3r	Llei conservació energia	4t
Velocitat mitjana	2n	Saturació, concentració	3r	Llei de Hooke	4t
Àrea/volum i dimensions	3r	Solubilitat	3r	Llei de Laplace	4t
Bernouilli (lleï, fluids)	3r	Substàncies tensoactives	3r	Llei de Newton (2a)	4t
Centrifugadora	3r	Superficial (tensió)	3r	Llei de Poiseuille	4t
Coeficient de tensió superficial	3r	Tensió superficial (coeficient)	3r	Magnètic (camp, inducció)	4t
Cohesió (forces)	3r	Tensoactives, substàncies	3r	Mòdul de Young	4t
Combustió	3r	Transició de règim laminar a turbulent (fluids)	3r	Newton (2a lleï)	4t
Concentració de saturació	3r	Treball	3r	Piezoelectricitat	4t
Condensació, nuclis	3r	Turbulent (règim, fluids)	3r	Poiseuille (lleï)	4t
Elàstic (mòdul de Young)	3r	Young (mòdul elàstic)	3r	Potencial (diferència)	4t
Elàstica (esfera, pressió)	3r	Acceleració	4t	Pressió arterial	4t
Energia potencial	3r	Àrea/volum (relació)	4t	Relació àrea/volum	4t
Esfera elàstica (fórmula de Laplace, diferència de pressió)	3r	Camp de força (línies)	4t	Segona lleï de Newton	4t
Esfera elàstica (pressió)	3r	Camp elèctric	4t	Tensió	4t
Fluids en règim laminar	3r	Camp magnètic	4t	Tesla	4t
Fluids en règim turbulent	3r	Cinemàtica	4t	Ultrasons	4t
Força (resultant)	3r	Conservació energia (lleï)	4t	Velocitat ona compressió sang	4t
Forces de cohesió	3r	Diferència de potencial	4t	Velocitat ona deformació artèria	4t
Fórmula de Laplace (diferència de pressió en esfera elàstica)	3r	Dinàmica	4t	Young (mòdul de)	4t
Fractals	3r	Doppler (efecte)	4t	Acètic (àcid)	5è
Histèresi	3r	Efecte Doppler	4t	Àcid acètic	5è
Laminar (règim, fluids)	3r	Efectes dels límits	4t	Biomecànica	5è
Laplace (fórmula, diferència de pressió en esfera elàstica)	3r	Elàstic (mòdul de Young)	4t	Calci (sals)	5è
Llei de Bernouilli (fluids)	3r	Elèctric (camp)	4t	Camp elèctric	5è
Massa-volum d'un gas	3r	Elèctrodes	4t	Capa neutra (en flexió)	5è
Mòdul elàstic de Young	3r	Electromotriu (força, FEM)	4t	Cinètica (energia)	5è
Nuclis de condensació	3r	Energia (lleï conservació)	4t	Component inorgànic	5è
Potencial (energia)	3r	FEM (força electromotriu)	4t	Compressió	5è
Pressió en una	3r	Força (línies d'un camp)	4t	Concavitat	5è
		Força electromotriu (FEM)	4t	Convexitat	5è
		Freqüència	4t	Corrent elèctric	5è
		Hooke (lleï)	4t	Cristall	5è
		Inducció	4t	Elèctric (camp)	5è
				Elèctric (corrent)	5è
				Elèctrode (-, +)	5è
				Energia cinètica	5è
				Energia mecànica	5è
				Energia potencial	5è
				Flexió	5è
				Flexió (capa neutra)	5è
				Força (línies)	5è
				Força (moment)	5è
				Hipòtesi	5è
				Hooke (lleï)	5è
				Impuls	5è
				Inorgànic (component)	5è

Línies de força	5è	Espectre de radiació	6è	Resolució	d'un 6è
Llei de Hooke	5è	electromagnètica		sistema òptic	
Mecànica (energia)	5è	Especular	6è	Secundària (font de	6è
Mòdul de Young	5è	(superfície)		llum)	
Mol (unitat)	5è	Fase (diferència de)	6è	Sensibilitat	6è
Moment d'una força	5è	Fase d'una ona	6è	Sistema òptic	6è
Negatiu (elèctrode)	5è	Font de llum	6è	(resolució)	
Neutra (capa, en	5è	primària		Stefan-Boltzmann	6è
flexió)		Font de llum	6è	(llel)	
Piezoelectricitat	5è	secundària		Superfície especular	6è
Positiu (elèctrode)	5è	Fotó	6è	Telescopis	6è
Potència	5è	Fotoreceptor	6è	Tèrmic (aïllador)	6è
Potencial (energia)	5è	Gruix òptic	6è	Tèrmic (equilibri)	6è
Raigs X	5è	Imatge	6è	Termoreceptor	6è
Resistència	d'un 5è	Índex de refracció	6è	Transparent	6è
material		Infraroig (IR)	6è	(substància)	
Sals de calci	5è	Interferència	6è	uam	6è
Tensió	5è	Interval de visió	6è	Ultraviolat (UV)	6è
Tracció	5è	normal d'una persona		uma	6è
Vidre	5è	IR (infraroig)	6è	UV (ultraviolat)	6è
Volt	5è	Kelvin (un)	6è	Vector	de 6è
X (raigs)	5è	Lambert-Beer (llel)	6è	propagació d'una oem	
Young (mòdul)	5è	Lent	6è	Visió normal	6è
<i>Aberració cromàtica</i>	6è	Llargavistes	6è	(interval)	
Absorció de llum	6è	Llei de conservació	6è	<i>Aïllament elèctric</i>	7è
Aïllador tèrmic	6è	de l'energia		<i>Amperímetre</i>	7è
B , camp magnètic	6è	Llei de Lambert-	6è	<i>Avogadro (nombre)</i>	7è
Beer-Lambert (llel)	6è	Beer		<i>Bobina</i>	7è
Boltzmann (Stefan-,	6è	Llei de Stefan-	6è	<i>Brúixola</i>	7è
llel)		Boltzmann		<i>Cable coaxial</i>	7è
Calor específica	6è	Llum (absorció)	6è	<i>Caiguda de tensió</i>	7è
Calorífica	6è	Magnètic, camp (B)	6è	<i>Camp elèctric</i>	7è
(capacitat)		Micra (micròmetre)	6è	<i>Camp elèctric</i>	7è
Camp elèctric, E	6è	Micròmetre (micra)	6è	(intensitat)	
Camp magnètic, B	6è	Negre (cos)	6è	<i>Camp elèctric de</i>	7è
Capacitat calorífica	6è	oem (ona)	6è	<i>perforació</i>	
Coefficient de	6è	electromagnètica)		<i>Camp</i>	7è
reflexió		ona	6è	<i>electromagnètic</i>	
Conservació de	6è	electromagnètica		<i>Camp magnètic</i>	7è
l'energia (llel)		(oem)		<i>Càrrega elèctrica</i>	7è
Cos negre	6è	Òptic (gruix)	6è	<i>positiva o negativa</i>	
Cromàtica	6è	Pla de polarització	6è	<i>Coaxial (cable)</i>	7è
(aberració)		Polarització (pla)	6è	<i>Condensador</i>	7è
Diferència de fase	6è	Primària (font de	6è	<i>elèctric</i>	
Diferencial (equació)	6è	llum)		<i>Conductivitat</i>	7è
E , camp elèctric	6è	Propagació d'una oem	6è	<i>elèctrica</i>	
Electromagnètic	6è	(vector)		<i>Continu (corrent)</i>	7è
(espectre)		Quant	6è	<i>Corrent continu</i>	7è
Elèctric, camp (E)	6è	Rad (radiant)	6è	<i>Domini magnètic</i>	7è
Electromagnètica	6è	Radiació electromag-	6è	<i>Efecte Hall</i>	7è
(energia de la		nètica (energia)		<i>Elèctric (camp)</i>	7è
radiació)		Radiació electro-	6è	<i>Electroimant</i>	7è
Energia (llel de	6è	magnètica		<i>Electromagnètic</i>	7è
conservació)		(espectre)		(camp)	
Energia de la	6è	Radiant (rad)	6è	<i>Electromagnetisme</i>	7è
radiació		Receptor	6è	<i>Electronegativitat</i>	7è
electromagnètica		fotosensible		<i>Electrostàtic</i>	7è
Enfocament	6è	Reflexió	6è	(generador, màquina)	
Equació diferencial	6è	Reflexió (coeficient)	6è	<i>Equipotencial</i>	7è
Equilibri tèrmic	6è	Refracció	6è	<i>Faraday (llel)</i>	7è
Específica (calor)	6è	Refracció (índex)	6è	<i>Ferroimant</i>	7è

<i>Fibra òptica</i>	7è	<i>Magnètic (domini)</i>	7è	<i>Positiu (potencial)</i>	7è
<i>Força (línia)</i>	7è	<i>Magnetòmetre</i>	7è	<i>Positiva (càrrega elèctrica)</i>	7è
<i>Força (moment)</i>	7è	<i>Màquina electrostàtica</i>	7è	<i>Potència</i>	7è
<i>Generador electrostàtic</i>	7è	<i>Mecànic (moment)</i>	7è	<i>Potencial positiu o negatiu</i>	7è
<i>Hall (efecte)</i>	7è	<i>Mol</i>	7è	<i>Pressió osmòtica</i>	7è
<i>Imant (electroimant)</i>	7è	<i>Moment d'una força</i>	7è	<i>Resistència elèctrica</i>	7è
<i>Imant (ferroimant)</i>	7è	<i>Negatiu (potencial)</i>	7è	<i>Resistivitat</i>	7è
<i>Intensitat del camp elèctric</i>	7è	<i>Negativa (càrrega elèctrica)</i>	7è	<i>Superconductivitat</i>	7è
<i>Ió</i>	7è	<i>Nombre d'Avogadro</i>	7è	<i>Tensió (caiguda)</i>	7è
<i>Línia de força</i>	7è	<i>Nul (potencial)</i>	7è	<i>Voltímetre</i>	7è
<i>Llei de Faraday</i>	7è	<i>Osmòtica (pressió)</i>	7è	<i>Zero (potencial)</i>	7è
<i>Magnètic (camp)</i>	7è	<i>Perforació (camp elèctric)</i>	7è		
		<i>Permeabilitat</i>	7è		



UNIVERSITAT D'ALACANT

Vicerectorat d'Estudis i Innovació Educativa
Secretariat de Promoció del Valencià



GENERALITAT
VALENCIANA

CONSELLERIA DE CULTURA
I EDUCACIÓ

Direcció General d'Ordenació
i Innovació Educativa i Política Lingüística