

Principis Físics dels Ultrasons i de l'efecte Doppler

Ecointervencionisme en Reumatologia

Pla d'Estudis InterAc



Acadèmia
de Ciències Mèdiques
de Catalunya i Balears
(Barcelona)

Organització:
ECOCAT, Grup de treball
Societat Catalana de Reumatologia

*per la Universitat de Girona, la Universitat de Lleida, la Universitat Rovira i Virgili, la Universitat de Vic–Universitat Central de Catalunya, la Universitat Autònoma de Barcelona i la Universitat Internacional de Catalunya.



Manuel Moreno Lupiañez
Professor Titular
Departament de Física
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) Barcelona



Principis físics dels ultrasons i de l'efecte Doppler

Manuel Moreno

manuel.moreno@upc.edu

**Dep. de Física
Universitat Politècnica de Catalunya**

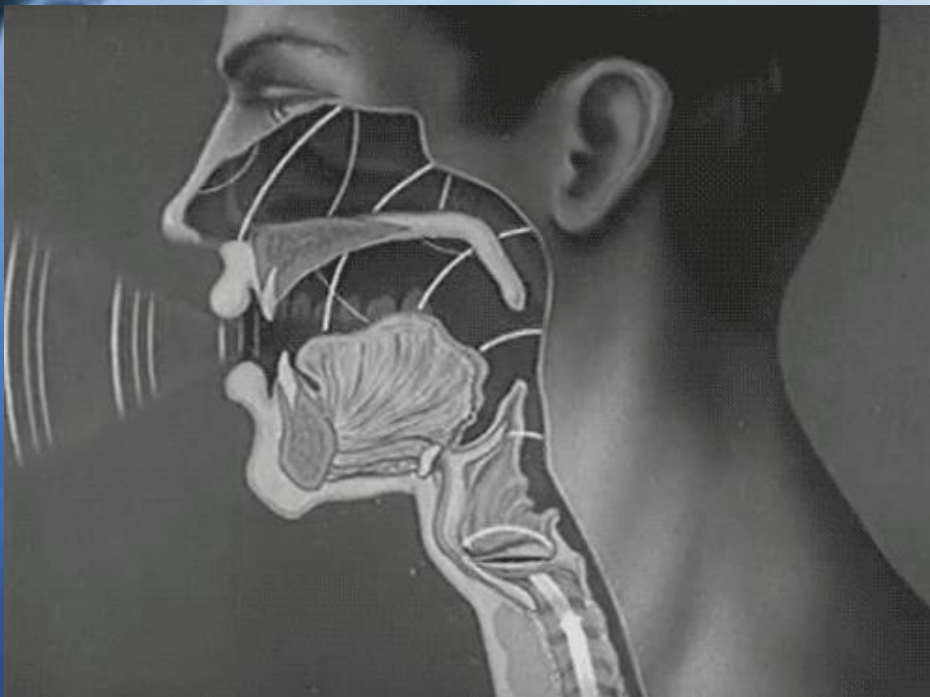
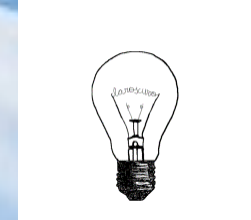
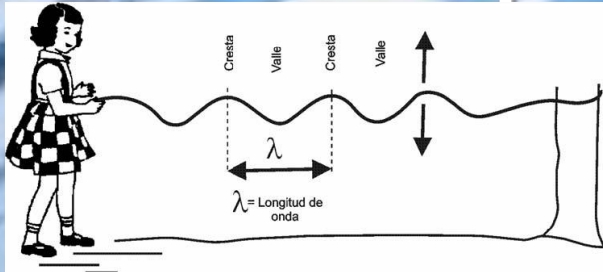


Contingut

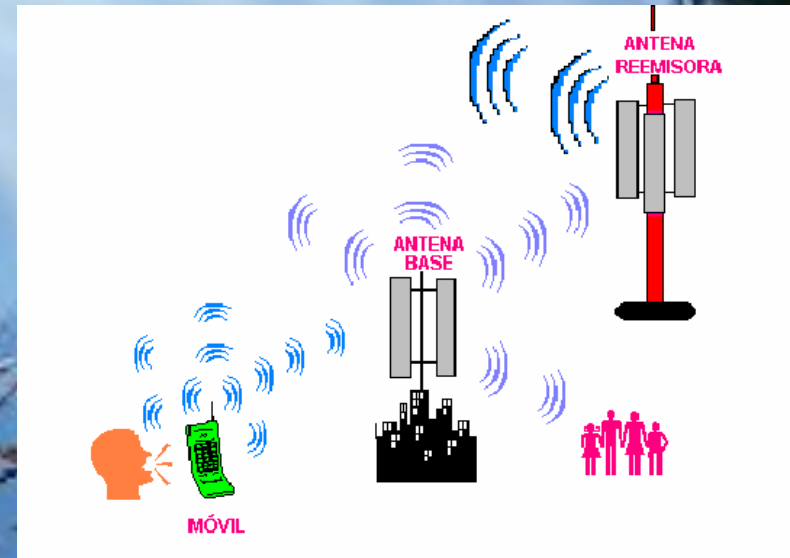
- Ones per tot arreu. Generalitats
- Ultrasons i ratpenats:
 - característiques físiques
 - aplicacions
- L'efecte Doppler



Ones per tot arreu



Ones
mecàniques:
so, aigua, corda

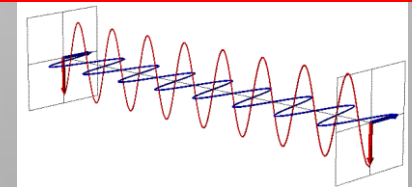
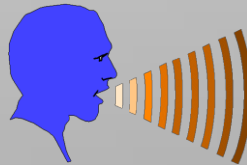


Ones
electromagnètiques:
ràdio, TV, UV, X, llum

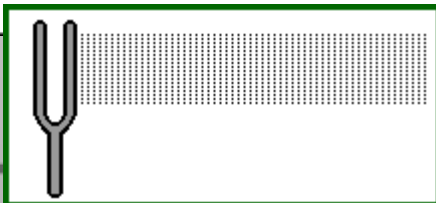
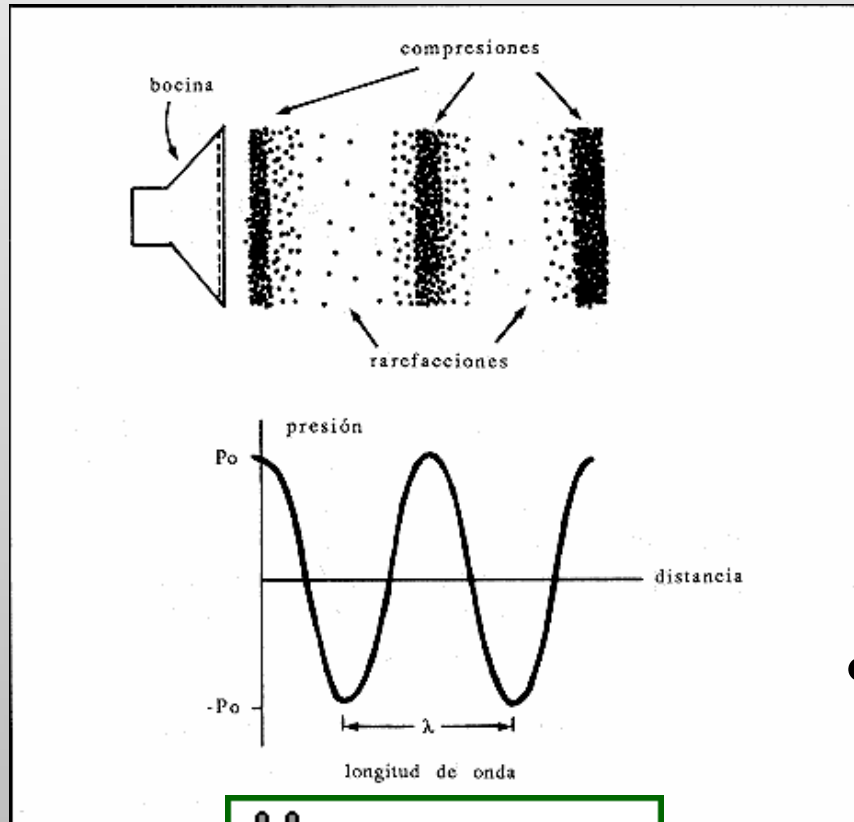
Ones mecàniques vs electromagnètiques

- Longitudinals i transversals
- v propagació depèn del medi i del tipus d'ona
- Requereixen un medi per propagar-se
- Causa: variació periòdica d'una magnitud física (so: pressió)
- Transporten: energia i quantitat de moviment
- Presenten: reflexió, refracció, difracció i interferència

- Transversals
- v propagació = velocitat de la llum
- No requereixen medi de propagació
- Causa: vibració simultània dels camps elèctrics i magnètics
- Transporten: energia i quantitat de moviment
- Presenten: reflexió, refracció, difracció i interferència

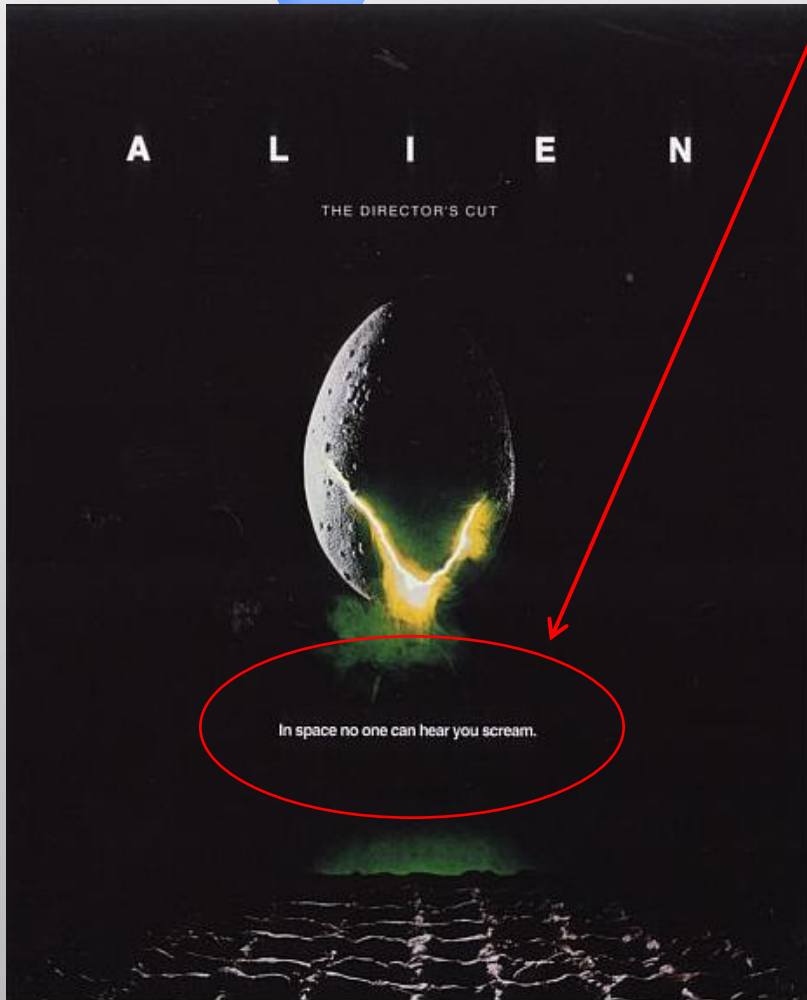


El so



- **Ona acústica o sonora** = ona mecànica longitudinal a través d'un fluid o medi elàstic generada pel moviment vibratori d'un cos
 - Causa: variacions de la pressió i densitat del medi
 - Relació velocitat v , freqüència f , i longitud d'ona λ :
$$v = \lambda \cdot f$$
- **So** = sensació que perceben els òrgans auditius dels animals causada per una ona acústica.

A l'espai ningú pot escoltar els teus crits...



- Les explosions a l'espai són insonores. Ho ha entès senyor Lucas?

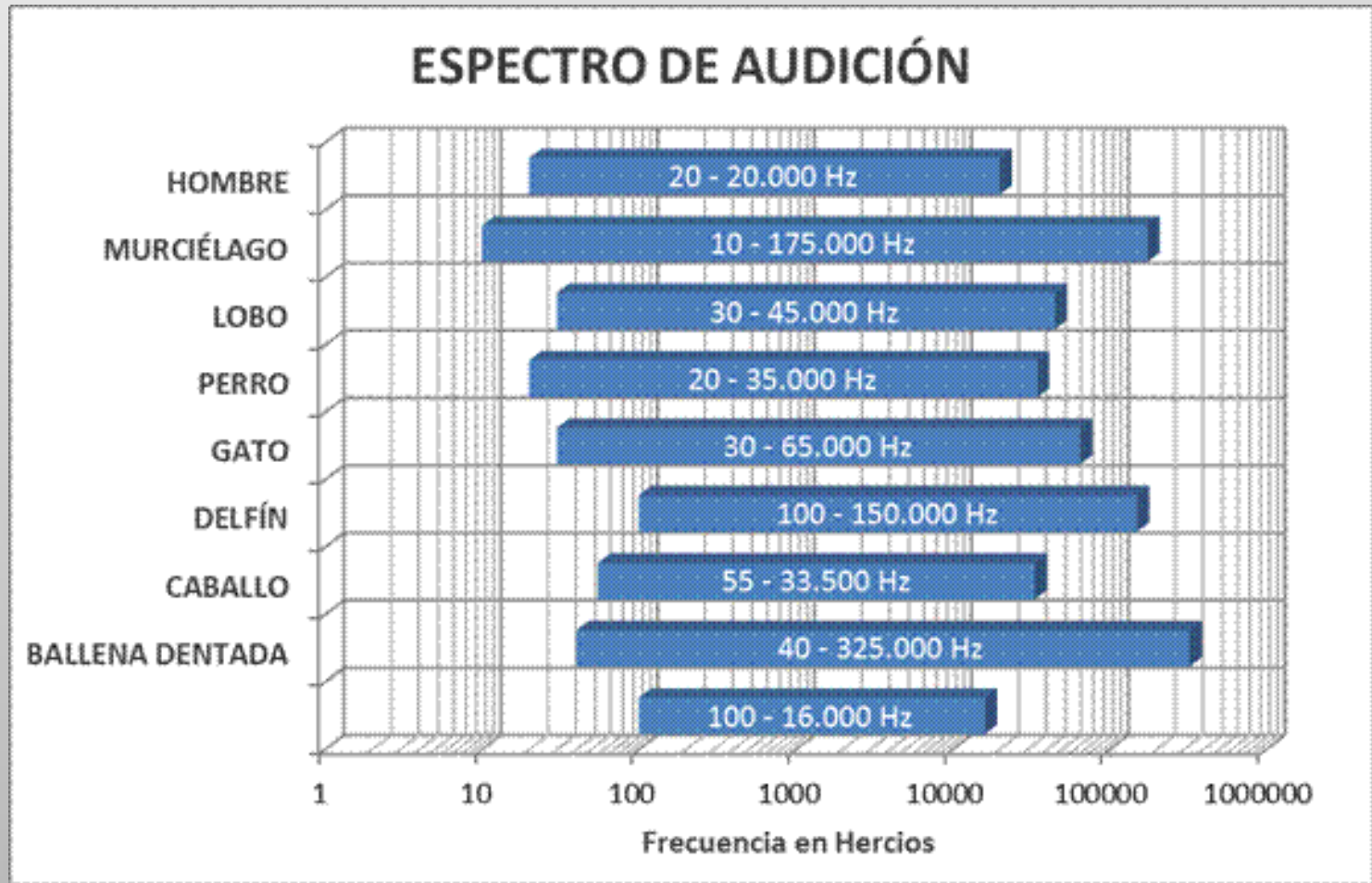


Alien, el 8º pasajero (R. Scott, 1979)



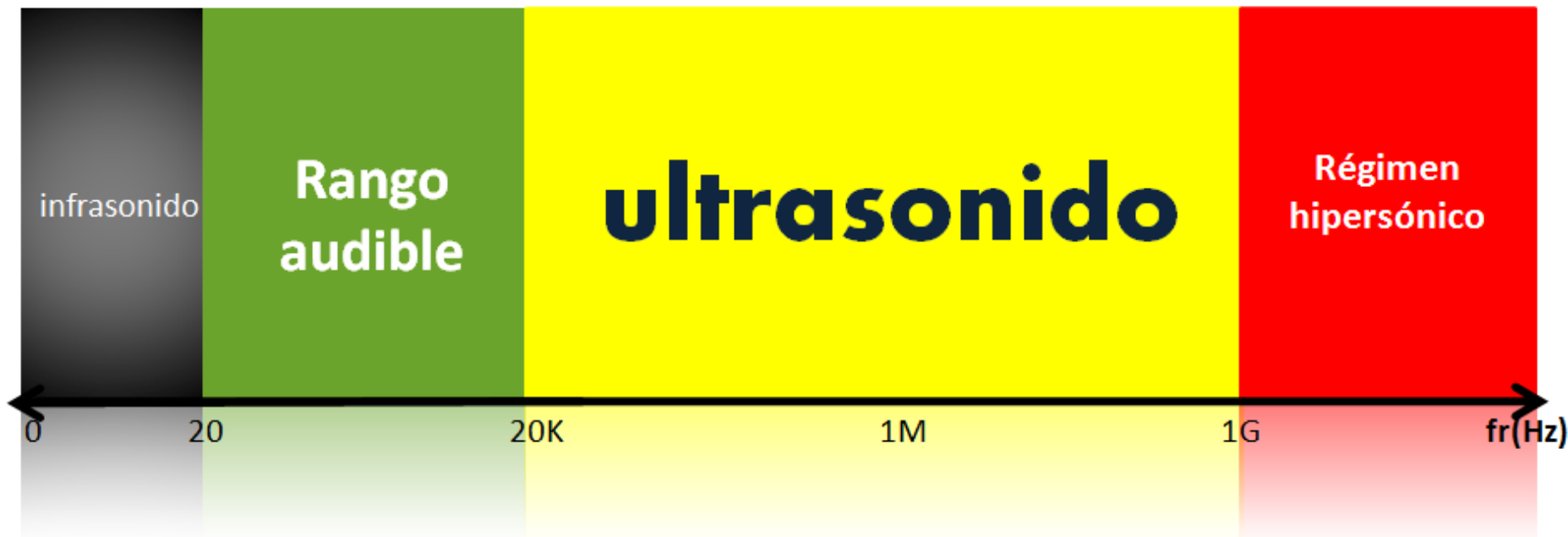
UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Rang d'audició



Ultrasons

- Ones sonores amb una freqüència superior a la màxima audible: $f > 20\,000\text{ Hz}$
 - 1 Hertz és un cicle per segon



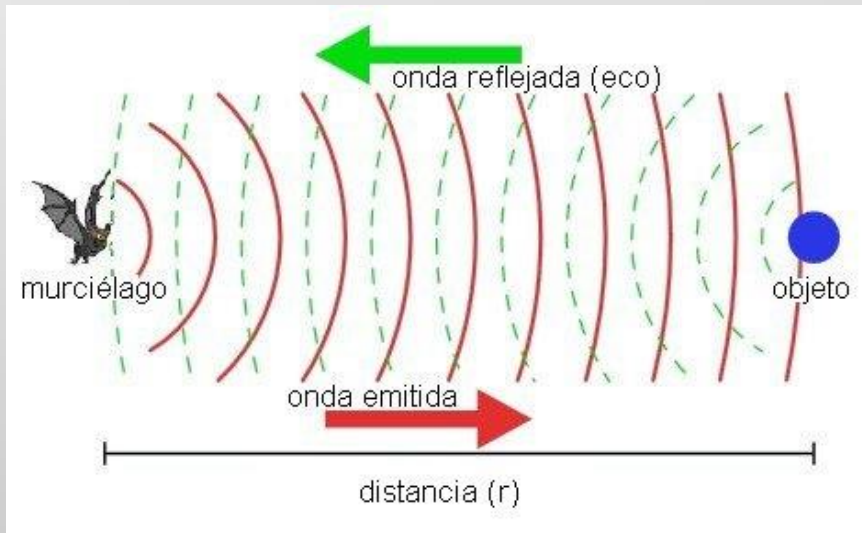
Ratpenats: veure d'oïdes



ecolocalització

Ecolocalització (D. Griffin, 1938)

Ultrasons i ratpenats



- Per què els rat penats utilitzen ones sonores d'alta freqüència?

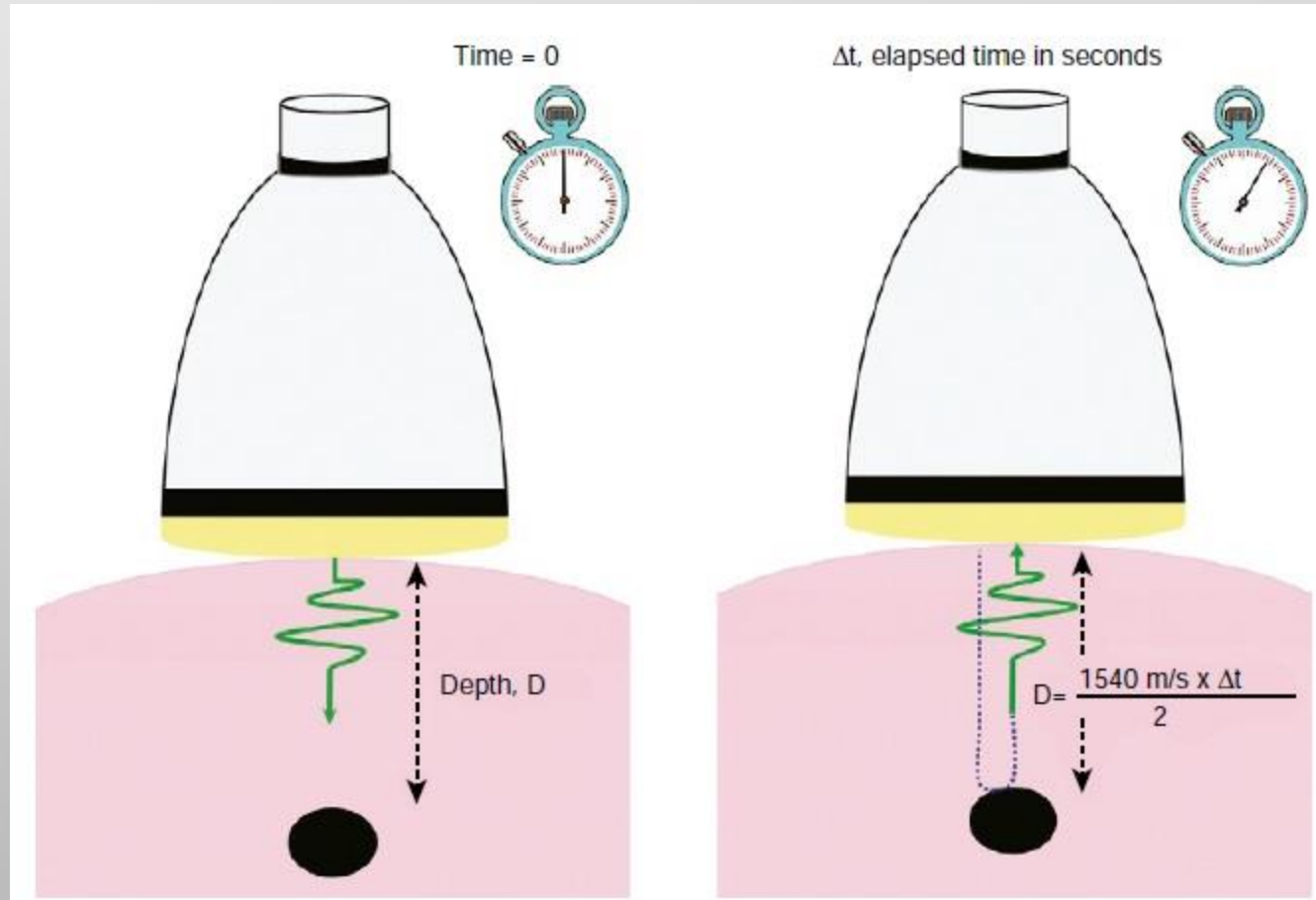
$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{344 \text{ m/s}}{120\,000 \text{ Hz}} = 0,29 \text{ cm}$$

- l'ona sonora només pot ser pertorbada per objectes de mida comparable a la longitud d'ona.
- Distància de l'objecte:

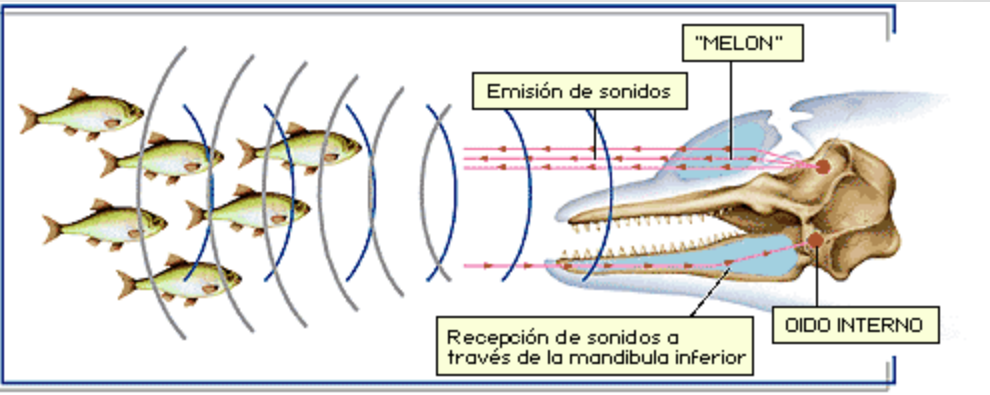
$$r = v \cdot \Delta t / 2$$



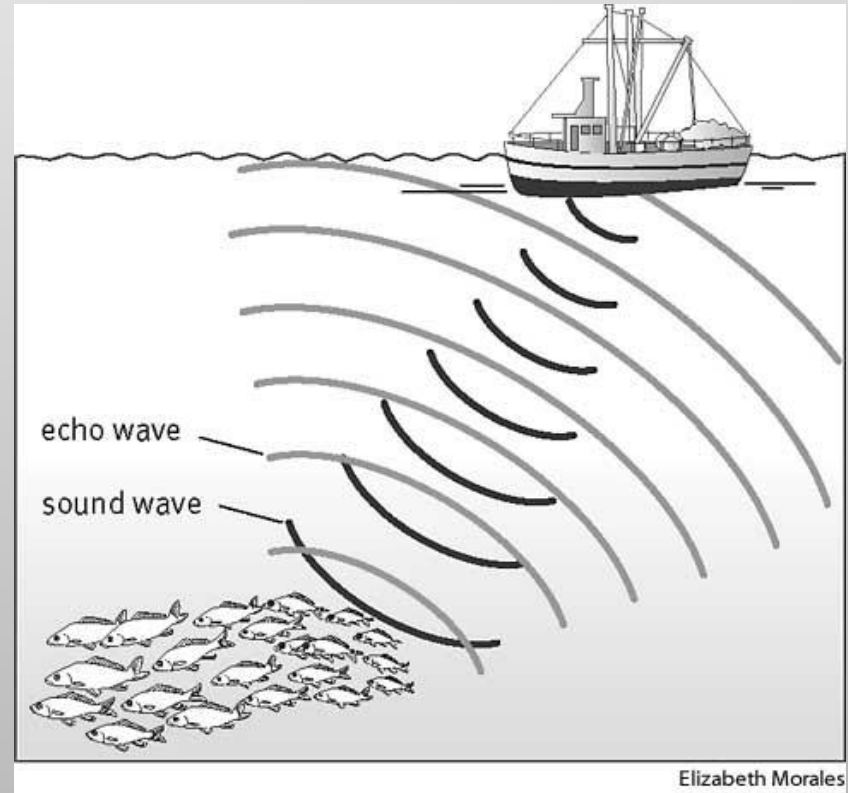
Ultrasons: profunditat



Dels dofins al *sonar*



Ecolocalització dofins



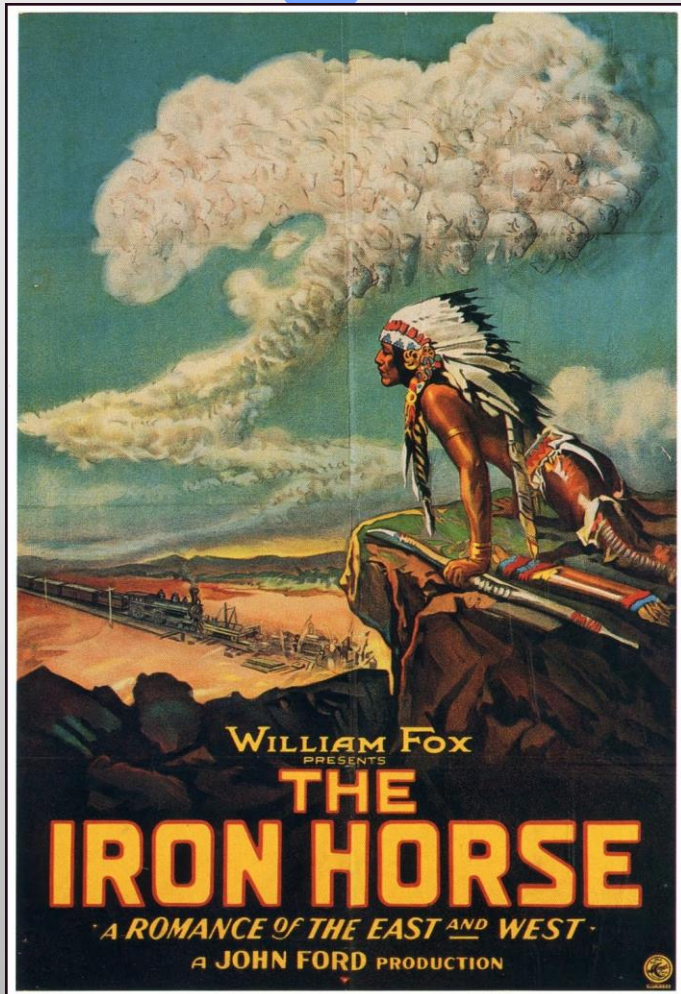
Elizabeth Morales

SONAR ***Sound Navigation And Ranging***
(navegació per so)(1912...)



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Velocitat de les ones sonores



- Les ones sonores (el so i els ultrasons) es propaguen a **velocitat constant**.
- Però **depèn del medi** per on es propaguen: densitat, temperatura, compressibilitat, elasticitat
 - aire (en condicions normals): 340 m/s ($\approx 1\,195\text{ km/h} = \text{Mach } 1$)
 - aigua: $1\,435\text{ m/s} \approx 4$ vegades en aire
 - ferro: $5\text{ km/s} \approx 15$ vegades en aire
- $v \text{ líquids} = (\text{mòdul compressibilitat} / \text{densitat})^{1/2}$
 - $v_{\text{aigua de mar}} > v_{\text{aigua}}$
- $v \text{ sòlids: velocitat} = (\text{mòdul Young} / \text{densitat})^{1/2}$
 - $v_{\text{ferro}} > v_{\text{plom}}$

Velocitat del so en teixits

Table 1-1 Wave Propagation Speed and Acoustic Impedances for Materials Encountered or Used in Ultrasonic Imaging

Medium	Speed of Sound (m/s)	Acoustic Impedance (megaRayls _{MKS})
<i>Materials encountered when imaging the body</i>		
Muscle	1580	1.645-1.7
Liver	1570-1578	1.65-1.66
Kidney	1560	1.62-1.64
Vitreous humor (eye)	1520	1.52
Blood	1550-1584	1.61-1.68
Water at 20° C	1482	1.48
Fat	1430-1450	1.33-1.38
Bone	3198-3500	6.36-7.8
Air	330	0.0004
<i>Piezoelectric materials used in transducer probes (sample values)</i>		
Quartz	5000	13.3
Polymers (PVDF)	2200	3.92
Composites (1-3)	3000	18.0

PVDF, polyvinylidene fluoride; Rayls_{MKS}, kg m⁻² s⁻¹.

Data from Webb A: Ultrasound imaging. In Webb A (ed): Introduction to Biomedical Imaging. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2003:107-156; Szabo TL (ed): Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out. London, Elsevier Academic Press, 2004.

- $c_{\text{teixit humà}} \approx 1540 \text{ m/s}$
($\approx c_{\text{aigua}}$)
- **Impedància acústica:** resistència que oposa un medi a la propagació de les ones sonores.
 - producte velocitat ona per la densitat del medi
(m/s kg/m³ = kg m⁻²s⁻¹ $\equiv$ rayl)

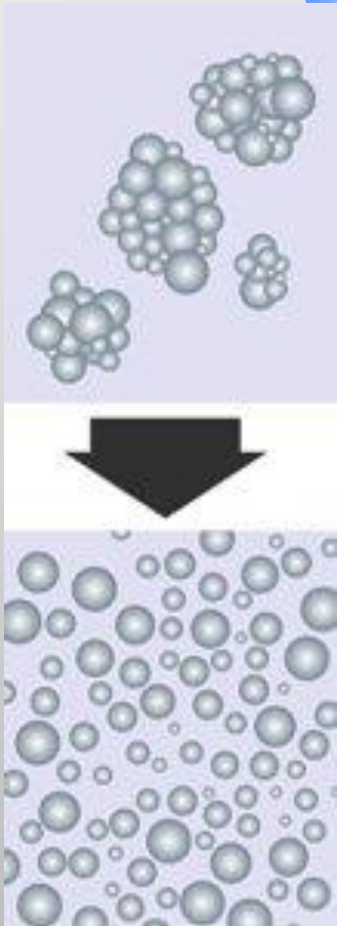
$$Z = c \cdot \rho$$



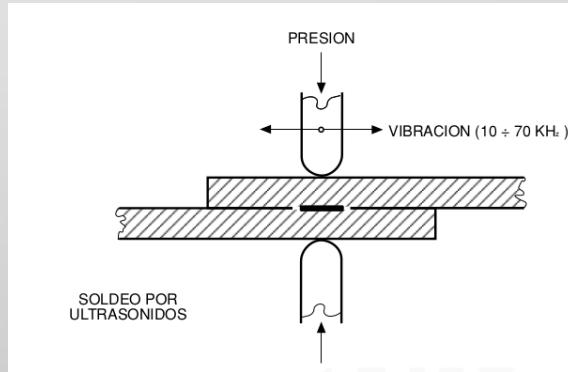
Ultrasons: propagació

- Ultrasons en aplicacions mèdiques:
 - freqüències típiques: **3-20 MHz**
 - abdominal: 3-10 MHz
 - múscul-esquelètic: 8-20 MHz
 - medi de propagació és el teixit humà.
- Teixit dens transmet l'ona de so de manera més eficient que el teixit menys dens.
- Teixit inelàstic (tumors, cicatrius) impedeix la propagació, mentre el teixit elàstic permet el pas amb més facilitat.
- Ossos i calcificacions, són més densos, però transmeten els ultrasons malament per la seva baixa compressibilitat (manca d'elasticitat) i alta reflectivitat.
- Els ultrasons no poden viatjar a través de les interfícies gasoses (reflexió total)

Ultrasons: aplicacions



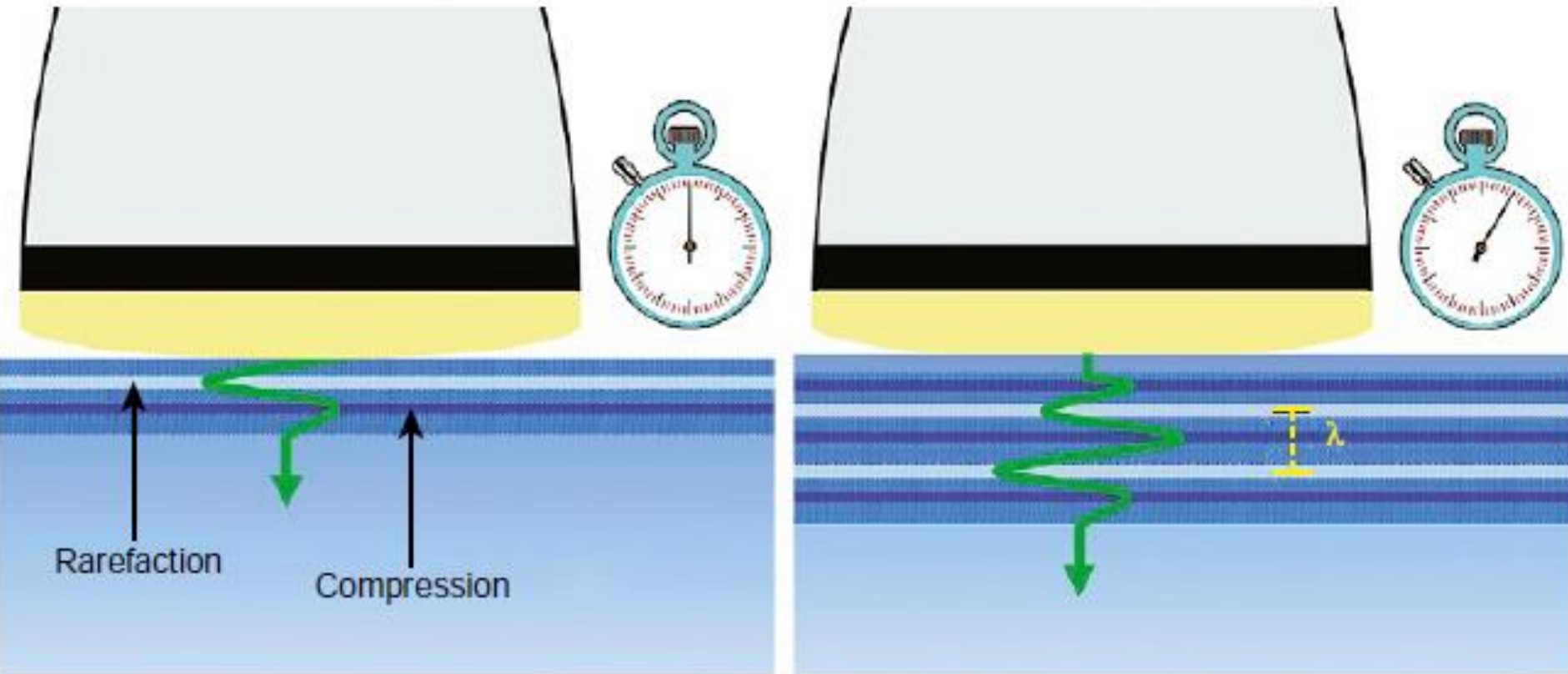
Desaglomerament de sòlids



Soldadura

- Aplicacions tecnològiques:
 - baixa intensitat: travessen objectes sense produir modificacions
 - detecció de falles en sòlids; dispersió de pigments, pintures...
 - mitjana intensitat: destrucció de bacteris i microorganismes
 - neteja de vidres i material de laboratori, component electrònics...
 - molt alta intensitat:
 - soldadures metàl·liques...
- Aplicacions mèdiques:
 - freqüències típiques: **3-20 MHz**
 - medi de propagació = teixit humà.
 - no invasius
 - imatges en temps real

Ultrasons: ones de pressió en el medi



Ultrasons: resolució

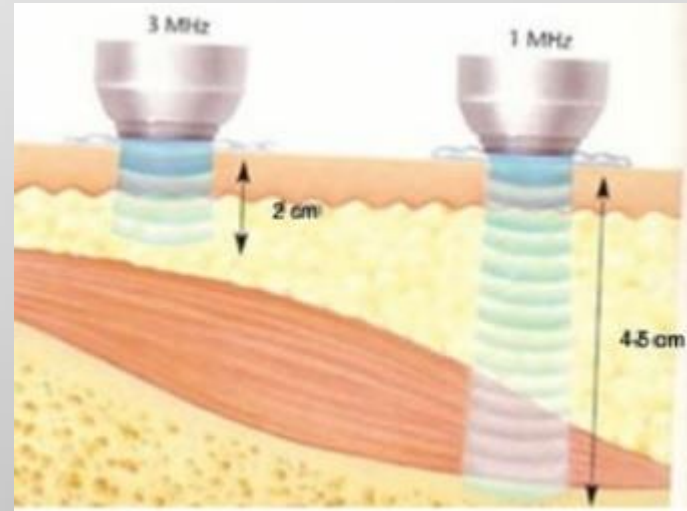
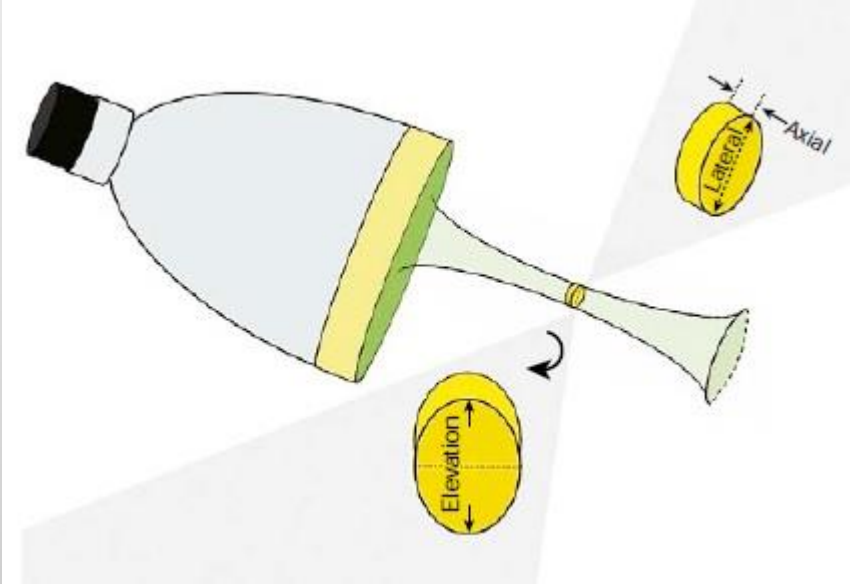
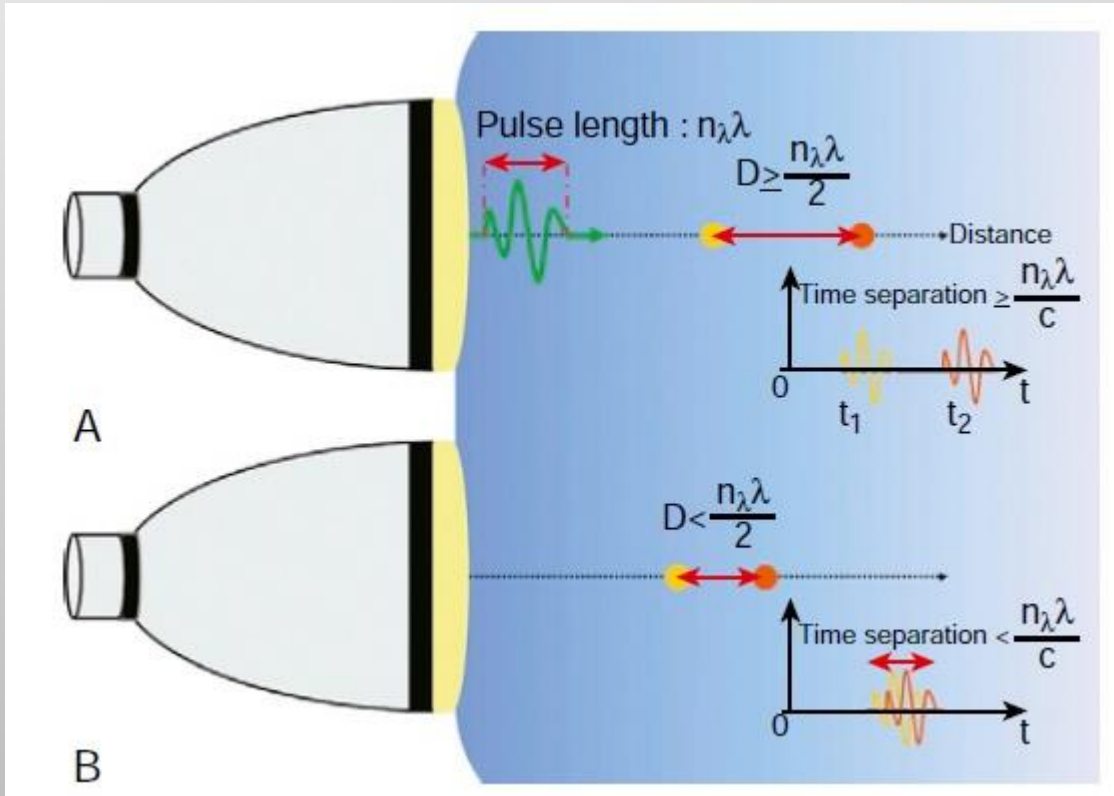


Table 1 · Reference values for resolution and penetration depth as a function of frequency

Frequency (MHz)	Resolution (mm)		Penetration depth (mm)
	Axial	Lateral	
3.5	1	2	160
5	0.6	1.2	100
7.5	0.4	0.8	50

Ultrasons: resolució axial



- Resolució axial:
 - longitud del puls d'ultrasons: $n\lambda$
 - D : distància entre 2 estructures
- Bona resolució quan: $D > n\lambda/2$
- Separació temporal entre ecos $> n\lambda/c$
 - Ex: puls $1,5\lambda$ a 1 MHz
→ res. axial ≈ 1 mm
 - 10 MHz → res. axial $\approx 0,1$ mm

Ultrasons: resolució

Table 1-3 Size Ranges of Structures Encountered in Ultrasound Studies

Structure*	Typical Diameter (mm)
Red blood cells	0.0074-0.0094 (by 0.002 thick)
White blood cells	0.007-0.022
Myocardial fiber bundles	0.01-0.03
Renal corpuscles	0.1-0.2
Portal triad	0.5

*Wavelengths in biologic tissue for 1- and 20-MHz ultrasound are approximately 1.5 and 0.077 mm, respectively.

Modified from Shung K, Thieme G (eds): Ultrasonic Scattering in Biological Tissues. London, CRC Press, 1993.

$$\lambda \approx D$$

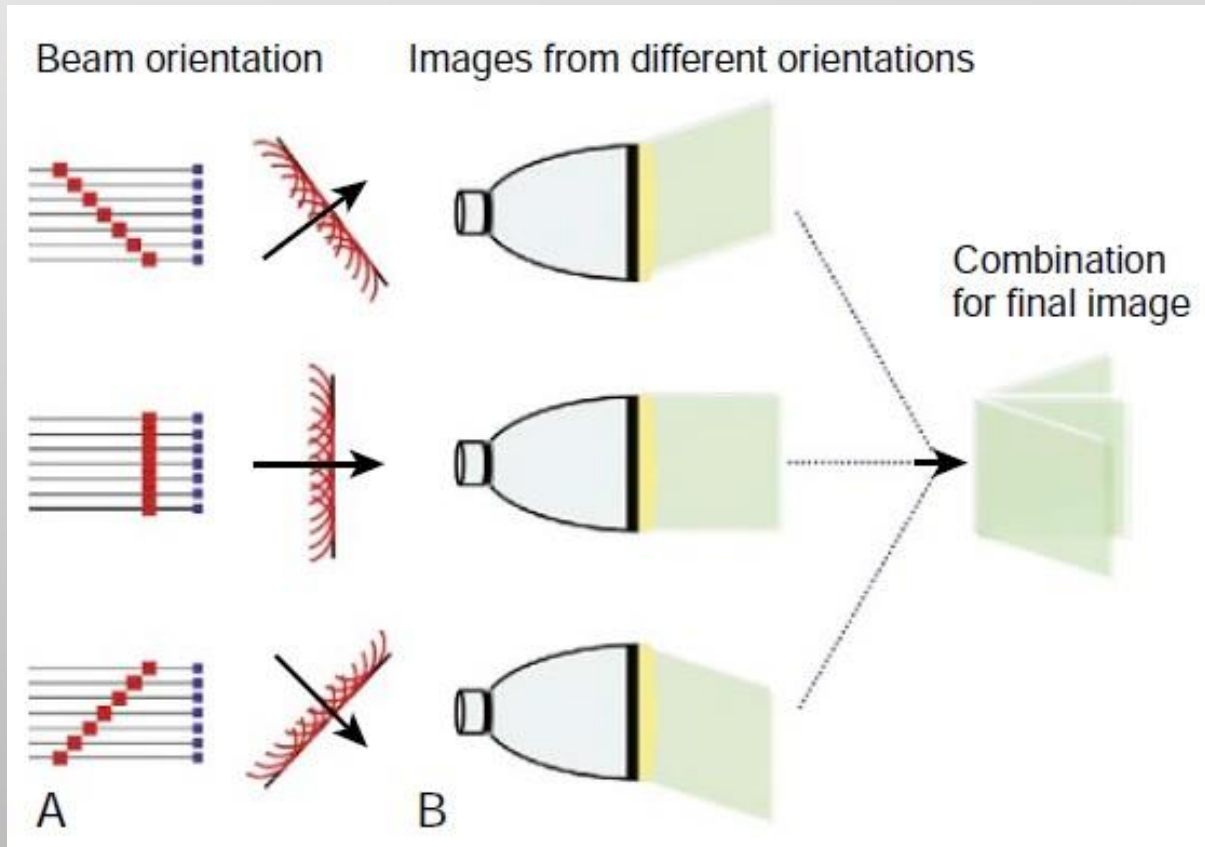
$$1\text{-}20 \text{ MHz} \rightarrow \lambda = 1,5\text{-}0,077 \text{ mm}$$



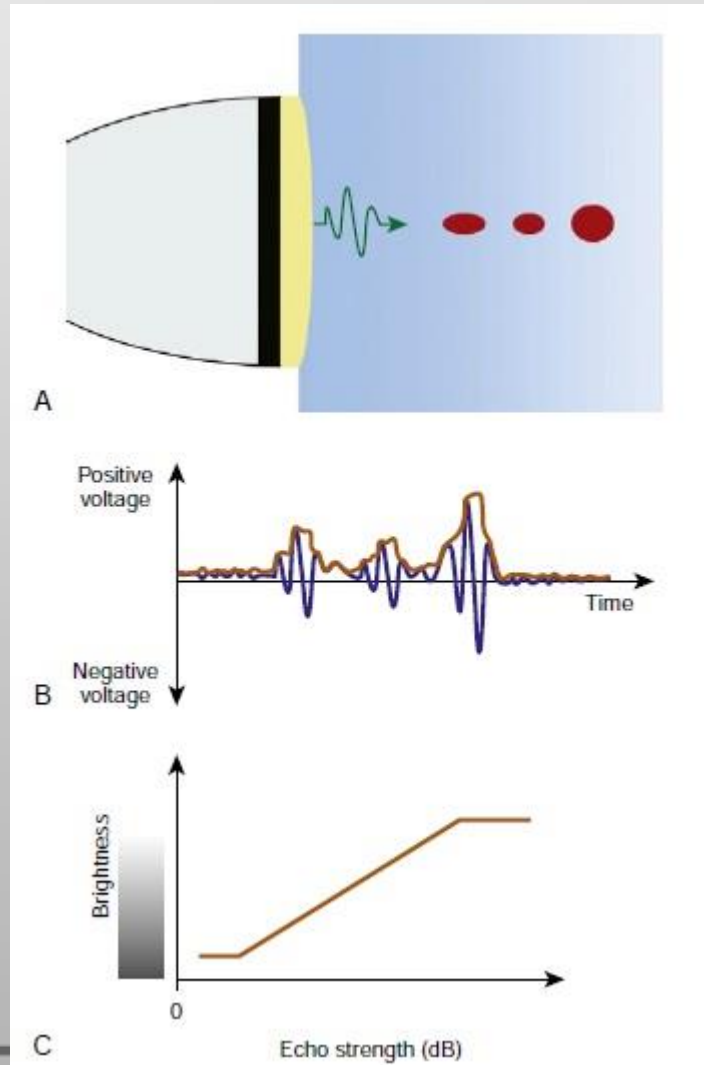
UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Ultrasons: composició d'imatges

- Orientació dels feixos amb angles diferents i combinació final.



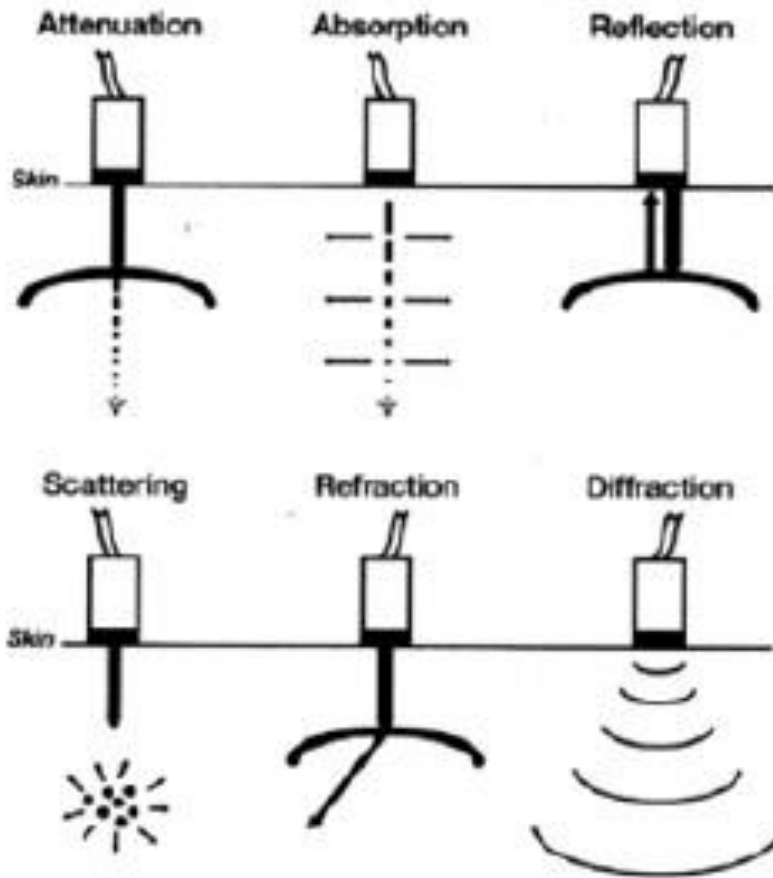
Ultrasons: formació d'imatges



- Compressió logarítmica i representació en una escala de grisos dels ecos rebuts.

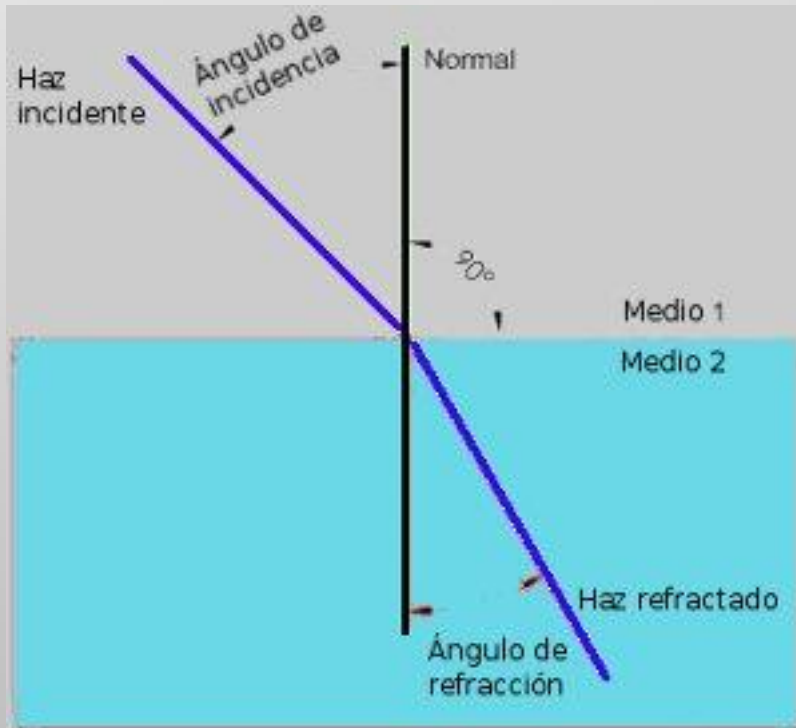


Ultrasons: interacció amb el medi (teixit)



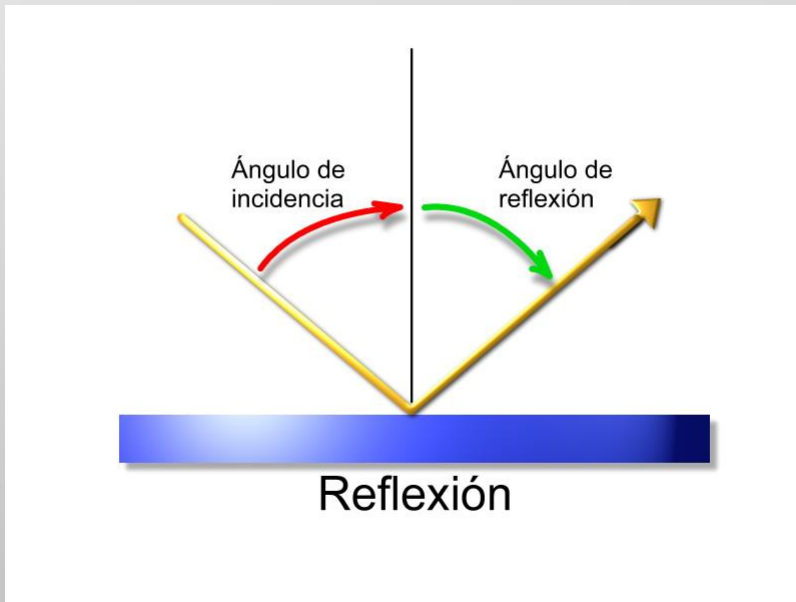
- absorció i atenuació: “pèrdua” d’ones i la conversió de l’energia en calor. Límit de seguretat. Compensació de l’energia perduda (Time Gain Compensation).
- dispersió (*scattering*): reflexions aleatòries en superfícies rugoses (obtenció d’imatges de contorns d’òrgans arrodonides)

Ultrasons: interacció amb el medi (teixit)



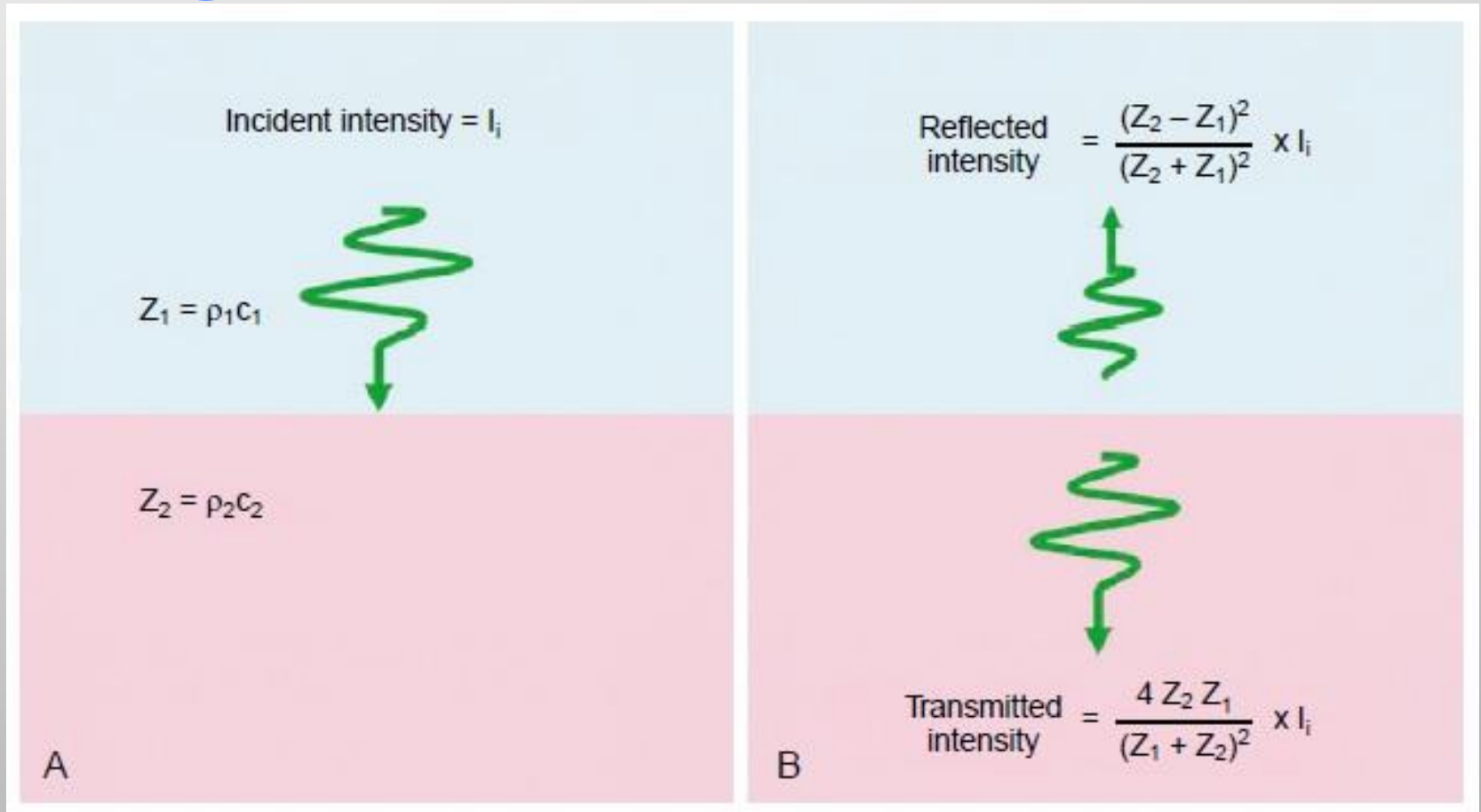
- refracció: desviament de les ones un cert angle quan penetren en un altre medi. Més pronunciat en els medis d'alta impedància acústica.
- difracció: desviament de les ones en trobar un obstacle o una escletxa. Important quan la seva mida és de l'ordre de λ .

Ultrasons: interacció amb el medi (teixit)



- **reflexió:** els ultrasons són parcialment reflectits i parcialment refractats pels teixits biològics.
- La imatge d'un òrgan es genera a partir de l'eco retornat segons les diferències d'impedància acústica de les interfícies de separació dels medis.
 - **reflexió mínima:** ΔZ petita (com $Z = \rho c$ i la velocitat del so és la mateixa) $\rightarrow \Delta \rho$ petita:
 $\rho_1 \approx \rho_2$ (analogia bola de billar)
 - **reflexió total:** ΔZ molt gran $\rightarrow \rho_1 \gg \rho_2$

Ultrasons: reflexió



Ultrasons: reflexió

Boundary	% Reflected
Fat/ muscle	1.08
Fat/kidney	0.6
Soft tissue/water	0.2
Bone/fat	49
Soft tissue/air	99

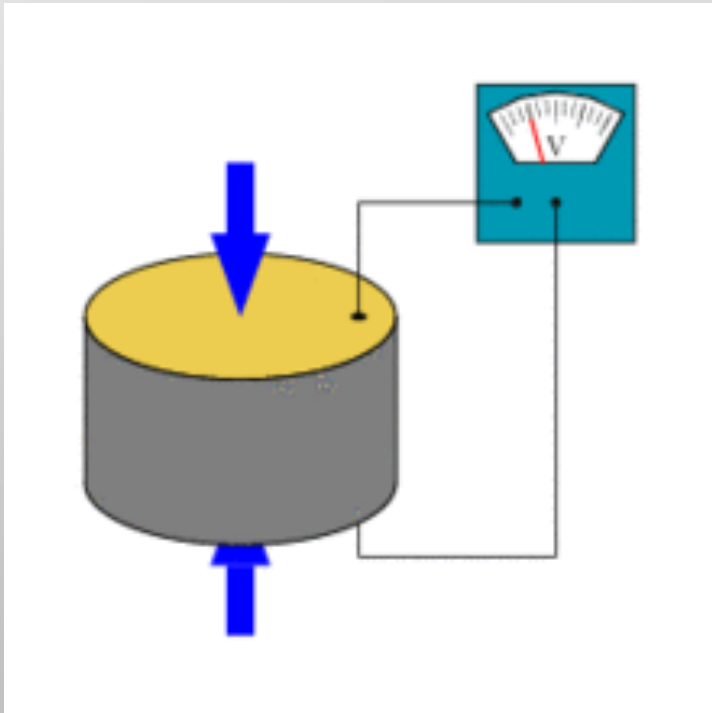
Table 1: Percentage reflection of ultrasound at boundaries: From: Aldrich: Crit Care Med, Volume 35(5) Suppl.May 2007.S131-S137

$$\%R = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \times 100\%.$$

- Interfície aire-teixit: reflexió total (ΔZ o $\Delta \rho$ gran). Tota l'ona es reflecteix.
- Cal un líquid per proporcionar una bona transmissió entre la font d'ultrasons i el teixit.

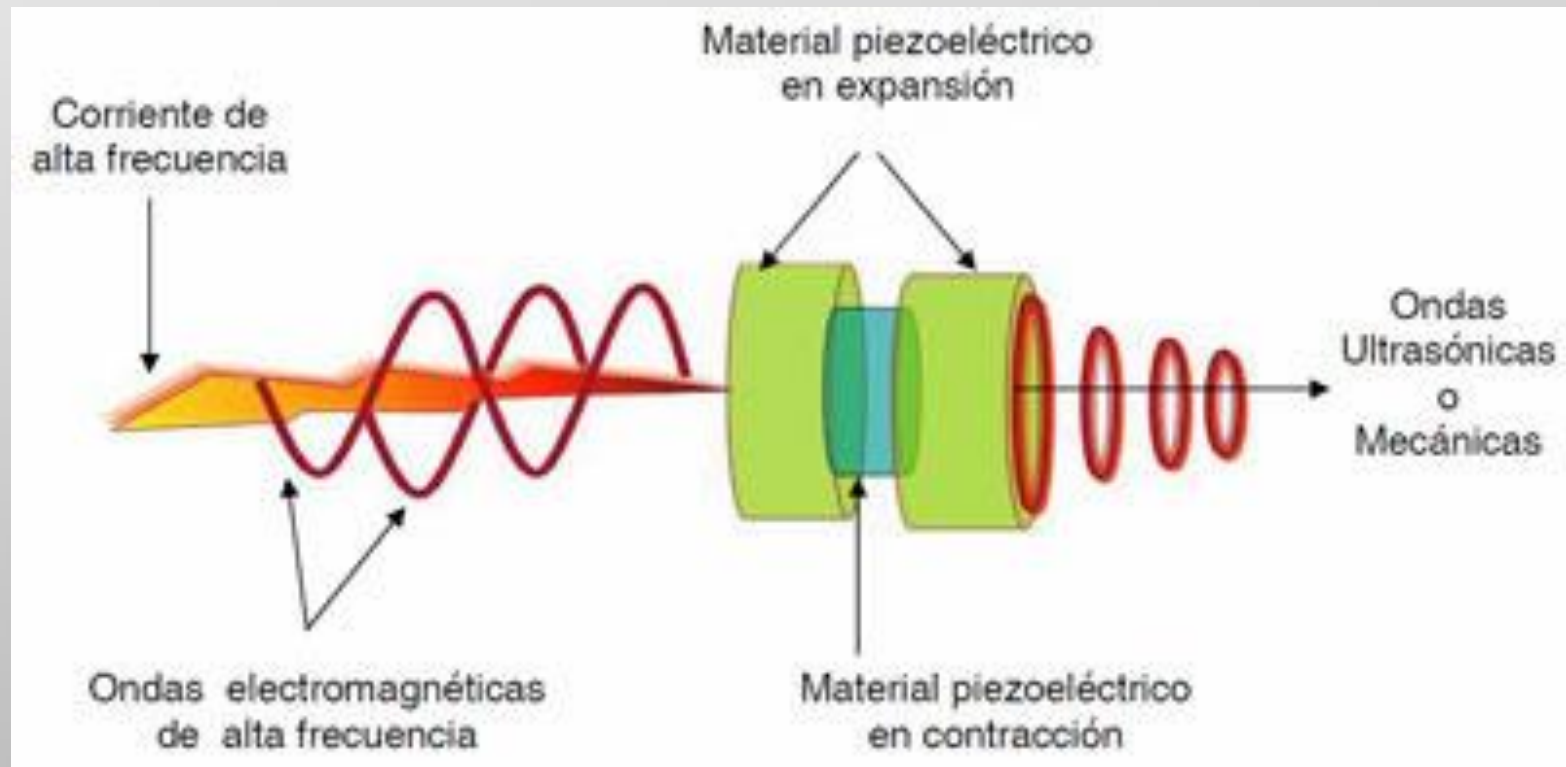


Ultrasons: generació



- La física al rescat:
piezoelectricitat (Pierre i Jacques Curie, 1881; P. Langevin: primer generador ultrasònic, ≈ 1900).
- **Efecte piezoelèctric:**
conversió de la tensió mecànica en electricitat. I a l'inrevés:
deformació quan s'aplica un camp elèctric o potencial
 - cristalls (quars)
 - materials ceràmics
- El mateix transductor actua com a receptor.

Ultrasons: generació



Efecte Doppler

- Canvi en la freqüència aparent d'una ona (sonora o em) degut al moviment de la font emissora respecte de l'observador (Ch. Doppler, 1842)
 - Quan la font s'acosta arriben per segon més ones que les que s'han emès. I menys quan s'allunya.



Speeding-car-horn_doppler_effect_sample.ogg



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA

Efecte Doppler. Exemple

- Una ambulància amb un sirena de 1000 Hz es desplaça a una velocitat $v = 15 \text{ m/s}$ (54 km/h). La freqüència que escolta un peatò en repòs quan:

a) l'ambulància s'allunya:

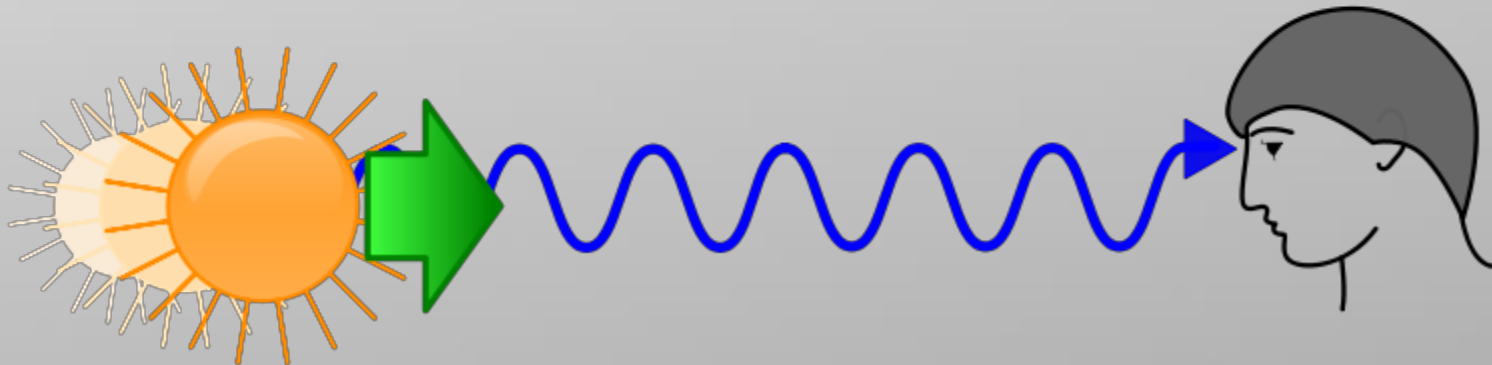
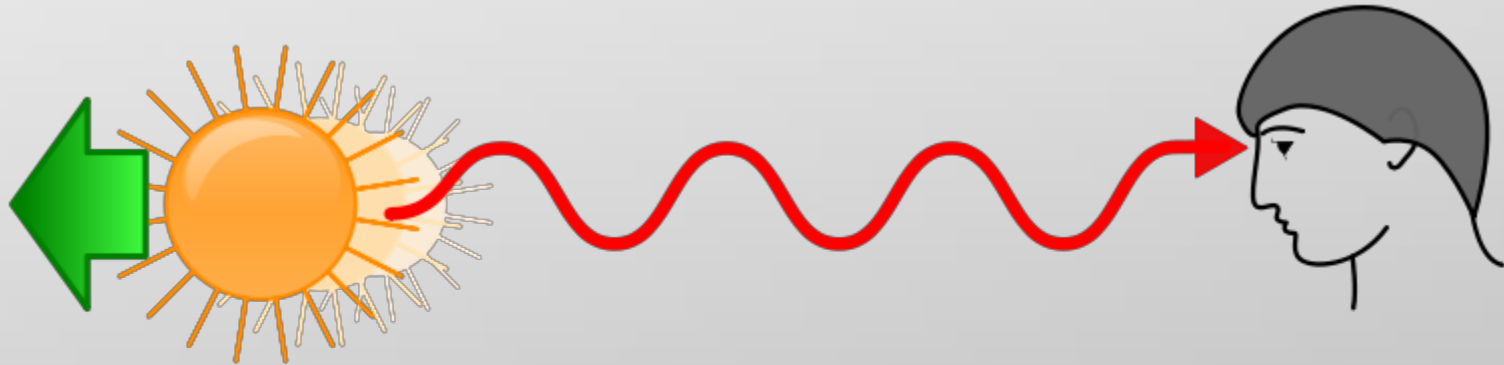
$$f' = f \left(\frac{c}{c + v} \right) = 1000 \text{ Hz} \left(\frac{344 \text{ m/s}}{344 \text{ m/s} + 15 \text{ m/s}} \right) = 958 \text{ Hz}$$

b) l'ambulància s'acosta:

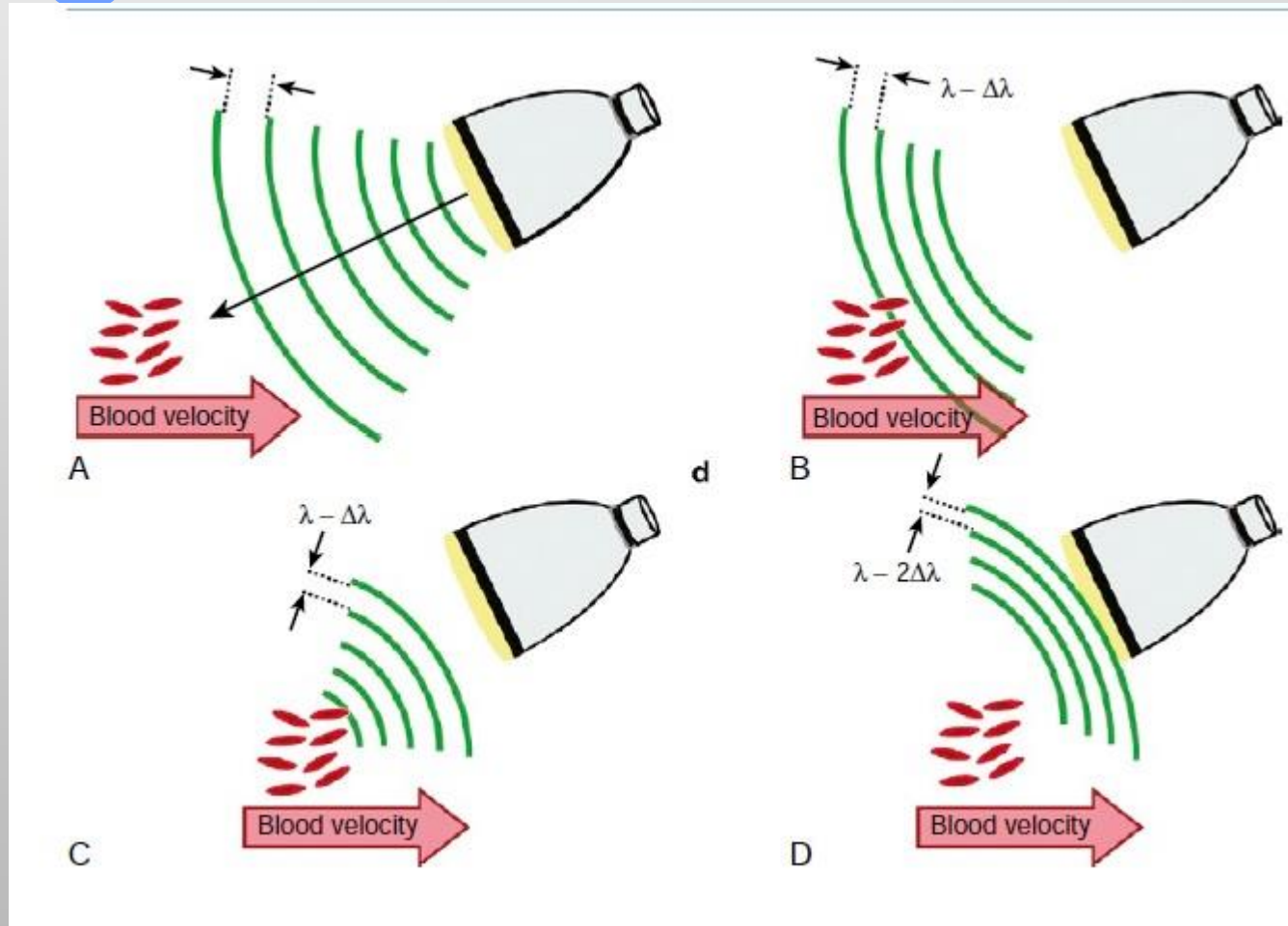
$$f' = f \left(\frac{c}{c - v} \right) = 1000 \text{ Hz} \left(\frac{344 \text{ m/s}}{344 \text{ m/s} - 15 \text{ m/s}} \right) = 1046 \text{ Hz}$$



Efecte Doppler de la llum



Efecte Doppler. Mesura de fluxos

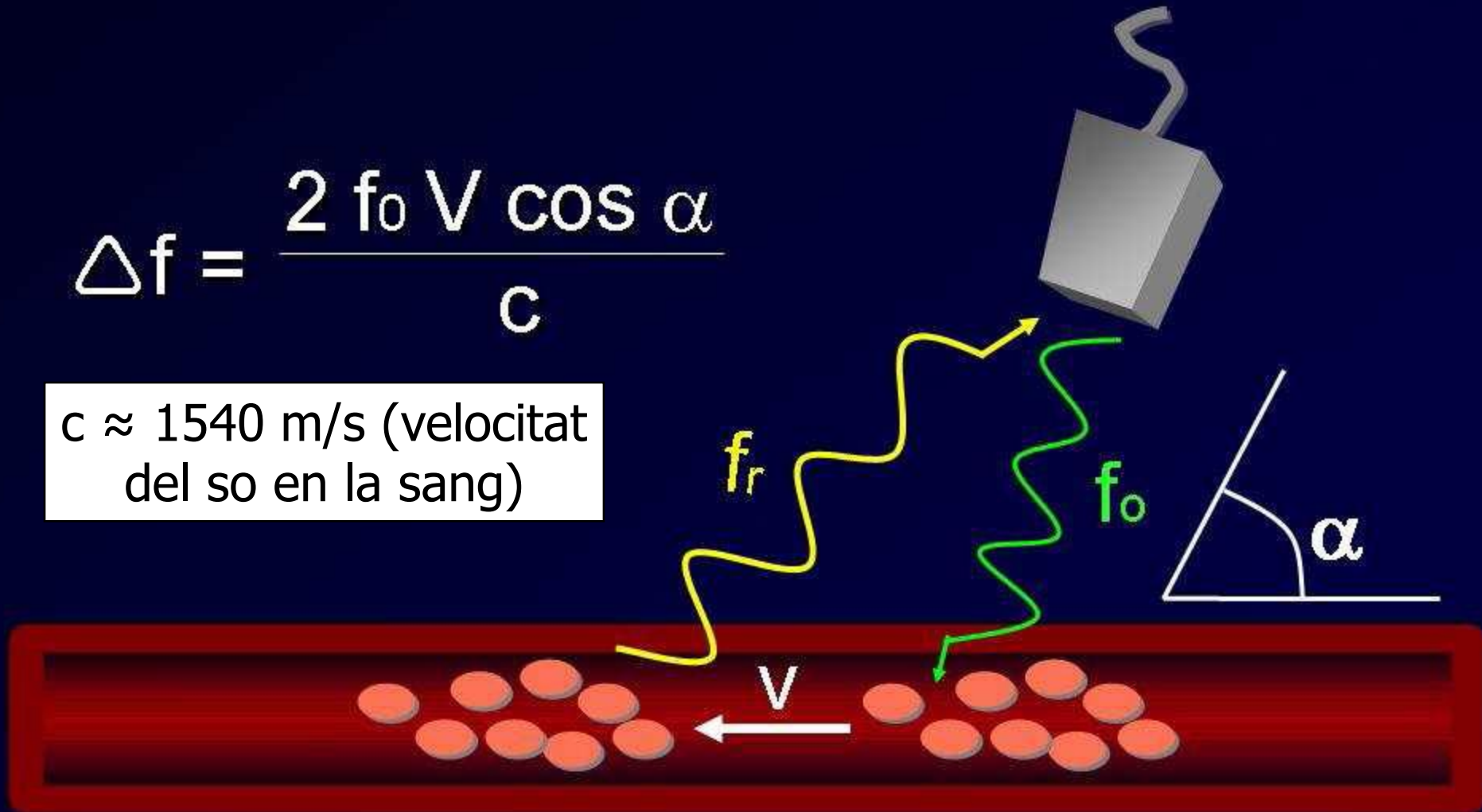


El efecto Doppler en la ecografía

Detectar y evaluar el flujo sanguíneo $\Delta f = f_r - f_o$

$$\Delta f = \frac{2 f_o V \cos \alpha}{c}$$

$c \approx 1540$ m/s (velocitat del so en la sang)



Principis físics dels ultrasons i de l'efecte Doppler

Manuel Moreno

manuel.moreno@upc.edu

**Dep. de Física
Universitat Politècnica de Catalunya**

