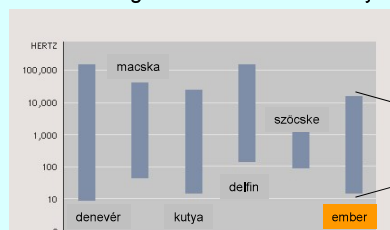


# Hang - ultrahang

Hallható hangok frekvenciatartománya



20 Hz – 20 kHz

Ultrahang:  $f > 20 \text{ kHz}$

Gyakorlatban: 0,8 – 15 MHz

Infrahang:  $f < 20 \text{ Hz}$

## Piezelektromos hatás



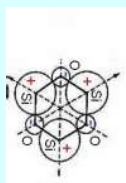
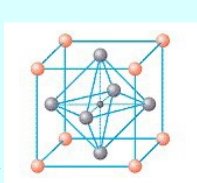
Mechanikai deformáció (nyomás) hatására

**elektromos feszültség**

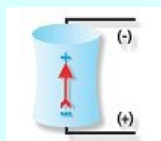
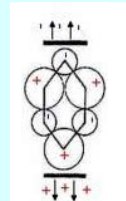
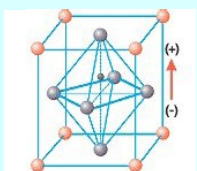
## Ultrahang előállítás

*Inverz piezelektromos hatás*

Piezelektromos  
kristály tipikus  
szerkezet

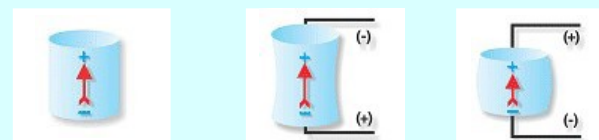


Az elektromos  
potenciál- különbség  
deformációt okoz



## Ultrahang előállítás

*Inverz piezelektromos hatás*

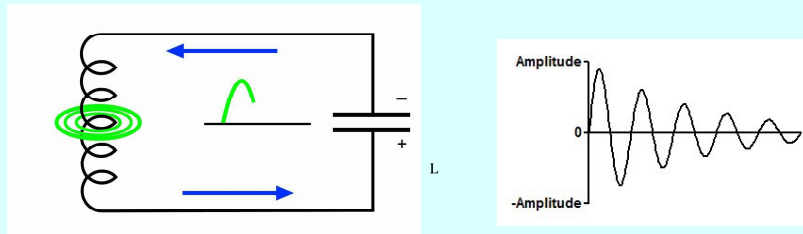


periodikus (szinuszos) elektromos jel

periodikus deformáció rezgés

**mechanikai rezgés**

## Oszcillátor – LC-kör



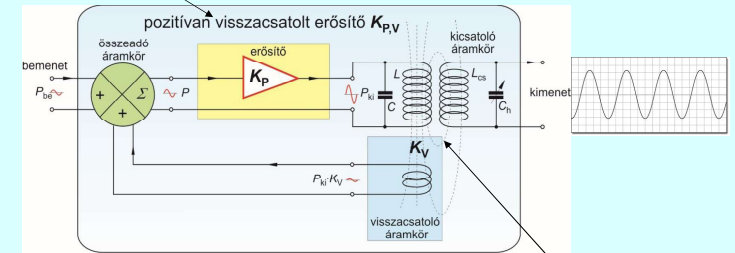
L : induktivitás [H] azaz [ $\text{s} \cdot \Omega^{-1}$ ]

$$L \sim A N^2$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

## Elektromos jelforrás: szinuszoszcillátor

$$A_f = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{A}{1 - A \cdot \beta}$$



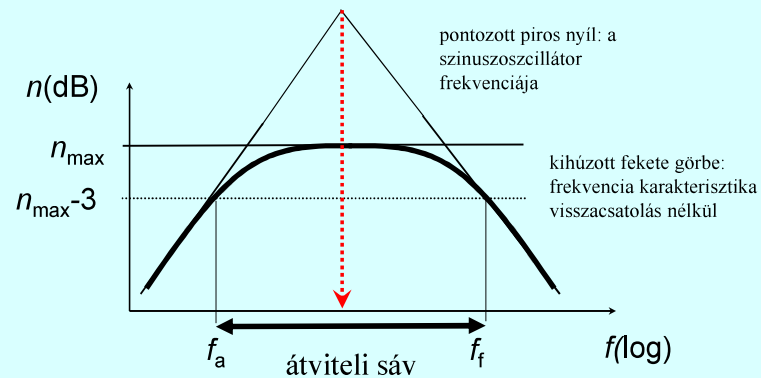
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

## Elektromos jelforrás: szinuszoszcillátor

pozitív módon visszacsatolt erősítő

$$A_{U, \text{visszacsatolt}} = \frac{A_U}{1 - \beta A_U}$$

$\beta A_U = 1$ , erősítés= „végtelen”  $\Rightarrow$  szinuszoszcillátor  
bemenő jel: nincs, kimenet: szinuszos feszültség



## Ultrahang detektálása

### Piezelektromos hatás



Mechanikai deformáció (nyomás) hatására

**elektromos feszültség**

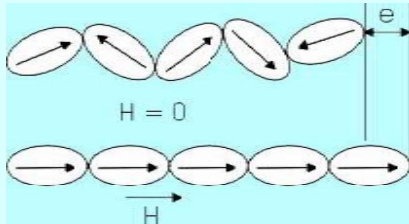
**Ultrahang transzducer kettős funkciója:**

**Adás** – elektromos jelből ultrahang (inverz piezelektromos hatás)

**Vétel** – ultrahangból elektromos jel (piezelektromos hatás)

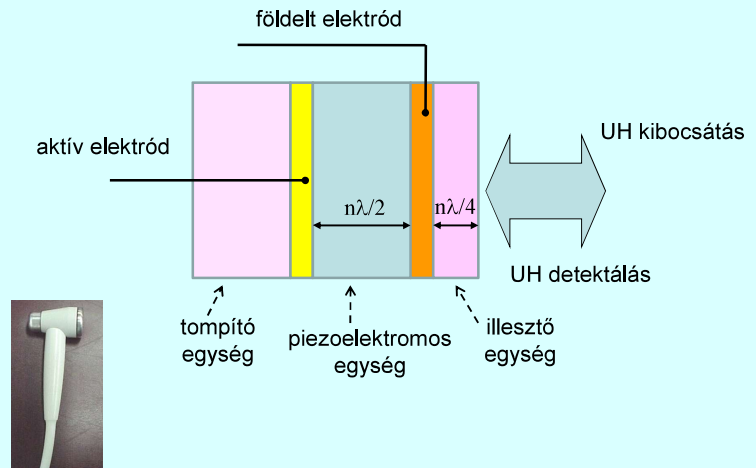
## Ultrahang előállítás

### Magnetostrikció



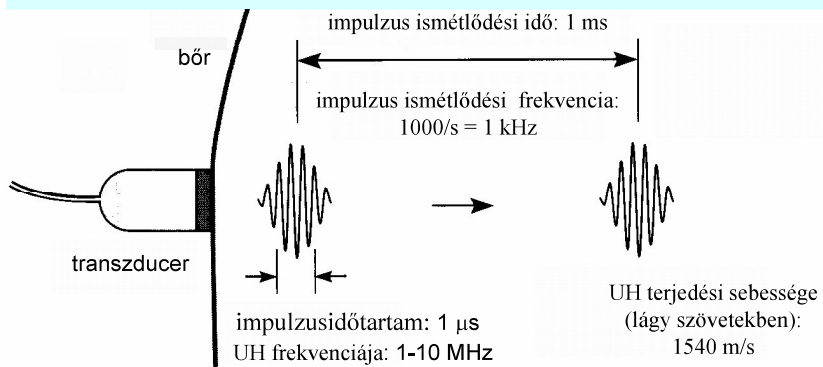
ferromágneses anyagok (pl. Co) viselkedése  
mágneses térben.

### Az ultrahang-fej felépítése

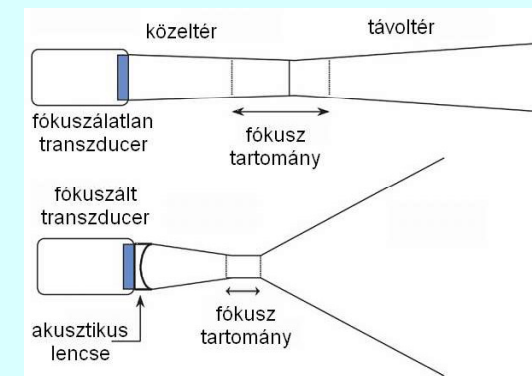


### Az UH impulzusok jellemzői

transzducer: adó és vevő egyben  
időbeli szétválasztás – folyamatos hullám helyett impulzusok



### Fókuszálás



Fókuszáláskor a nyaláb divergenciája nő a távoltérben és  
romlik a mélységélesség.

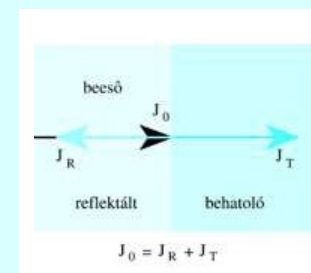
## Az ultrahang orvosi alkalmazásainak alapjai

*Terápia* – alapja az ultrahang elnyelődése

*Diagnosztika* – alapja az ultrahang reflexiója

## Az ultrahang reflexiója

Visszaverődés



$$R = \frac{J_R}{J_0}$$

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

Ha  $R \approx 1 \implies$  teljes visszaverődés

## Az ultrahang reflexiója

anyag	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [1/GPa]	$c$ [m/s]	$Z$ [kg/(m <sup>2</sup> ·s)]
levegő	1,3	7650	331	0,00043·10 <sup>6</sup>
tüdő	400	5,92	650	0,26·10 <sup>6</sup>
zsír	925	0,51	1470	1,42·10 <sup>6</sup>
lágyszövet	1060	0,40	1540	1,63·10 <sup>6</sup>
szemlencse	1140	0,34	1620	1,84·10 <sup>6</sup>
csontvelő	970	0,36	1700	1,65·10 <sup>6</sup>
csont, porózus	1380	0,08	3000	2,2 – 2,9·10 <sup>6</sup>
csont, tömör	1700	0,05	3600	6,12·10 <sup>6</sup>

Ha  $R \approx 1 \implies$  teljes visszaverődés

határfelület	R
izom/vér	0,0009
zsír/máj	0,006
zsír/izom	0,01
csont/izom	0,41
csont/zsír	0,48
lágyszövet/levegő	0,99

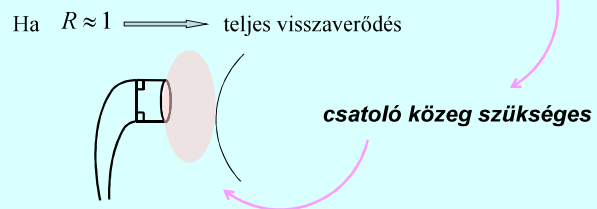
## Az ultrahang reflexiója

anyag	$c$ (m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$Z$ (kg/m <sup>2</sup> s)
pulpa	1570	1000	1,6 · 10 <sup>6</sup>
dentin	3800	2000	7,6 · 10 <sup>6</sup>
zománc	6250	3000	18,8 · 10 <sup>6</sup>
Al	6300	2700	17 · 10 <sup>6</sup>
boroszilikát	5300	3570	18,9 · 10 <sup>6</sup>
amalgám	4350	7750	33,7 · 10 <sup>6</sup>

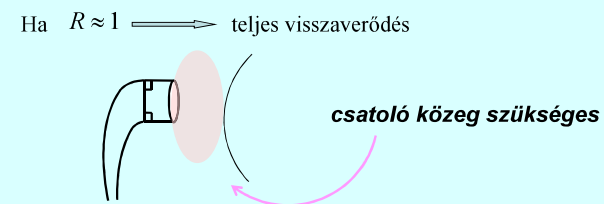
határfelület	R
zománc/dentin	0,18
dentin/pulpa	0,43
amalgám/dentin	0,40

## Az ultrahang reflexiója

anyag	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [1/GPa]	$c$ [m/s]	$Z$ [kg/(m <sup>2</sup> s)]	határfelület	R
levegő	1,3	7650	331	0,00043·10 <sup>6</sup>	izom/vér	0,0009
tüdő	400	5,92	650	0,26·10 <sup>6</sup>	zsír/máj	0,006
zsír	925	0,51	1470	1,42·10 <sup>6</sup>	zsír/izom	0,01
lágyszövet	1060	0,40	1540	1,63·10 <sup>6</sup>	csont/izom	0,41
szemlencse	1140	0,34	1620	1,84·10 <sup>6</sup>	csont/zsír	0,48
csontvelő	970	0,36	1700	1,65·10 <sup>6</sup>	lágyszövet/levegő	0,99
csont, porózus	1380	0,08	3000	2,2 – 2,9·10 <sup>6</sup>		
csont, tömör	1700	0,05	3600	6,12·10 <sup>6</sup>		



## Az ultrahang reflexiója

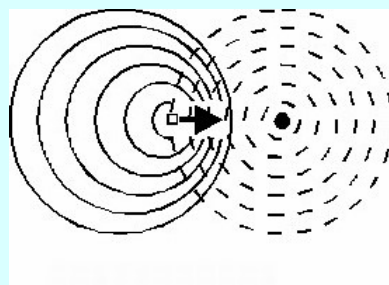
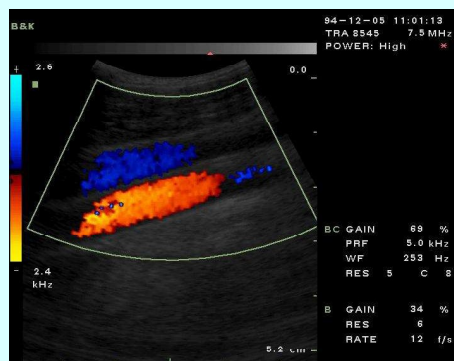


Optimális csatolás:

$$Z_{csat} = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$$

$$Z_{csatológél} \sim 6,5 \cdot 10^6 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

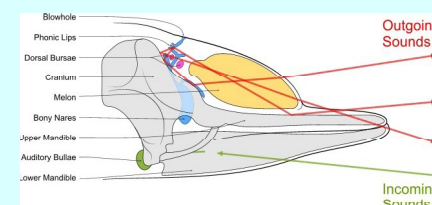
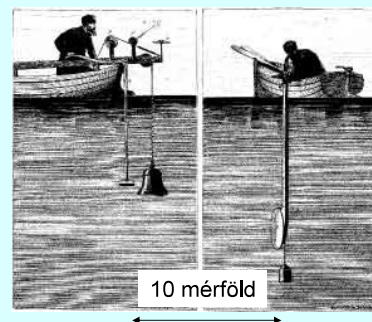
## Az ultrahangos képalkotás, A-, B- és M-képek. Doppler-echo



## Echo elv

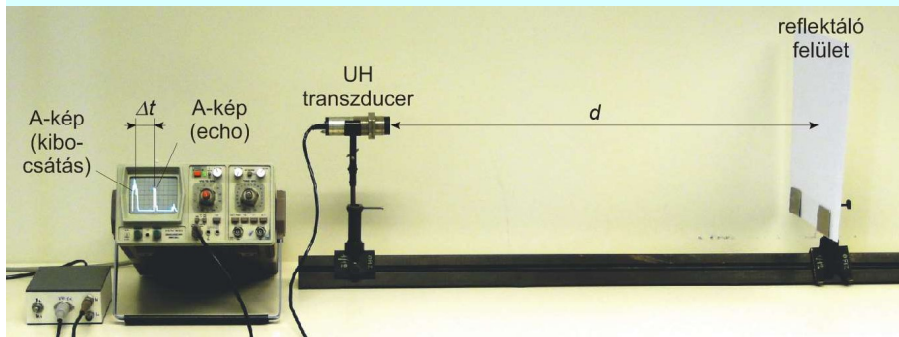
1794 Spallanzani:  
denevérek tájékozódása

1822 Colladen megméri a  
hang terjedési sebességét



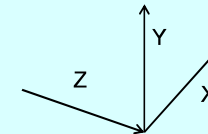
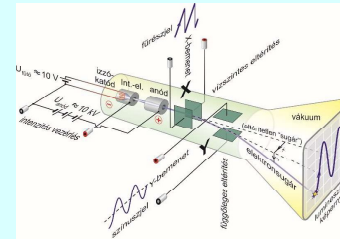
palackorrú delfin

## Echo elv - képképzés



$$c\Delta t = d + d = 2d$$

speciális transzducerből levegőbe is kicsatolható az UH intenzitás egy része



Eltérítés /  
szabályozás

A-kép

X

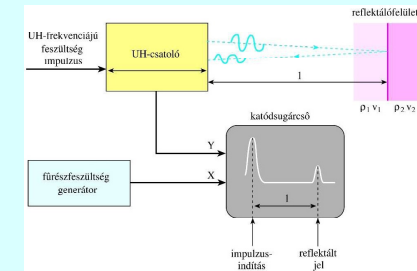
Idő (→ axiális  
távolság)

Y

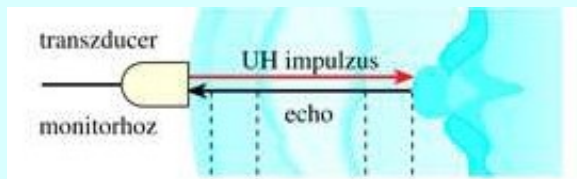
Amplitúdó (→  $I_{refl}$ )

Z

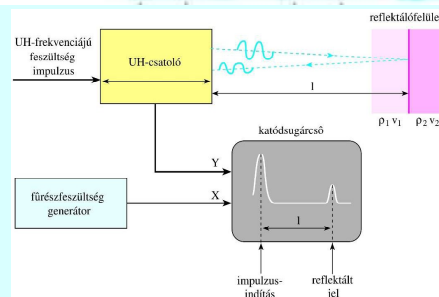
(Fényesség)



## A-kép - Amplitúdó



csak egydimenziós  
lehet

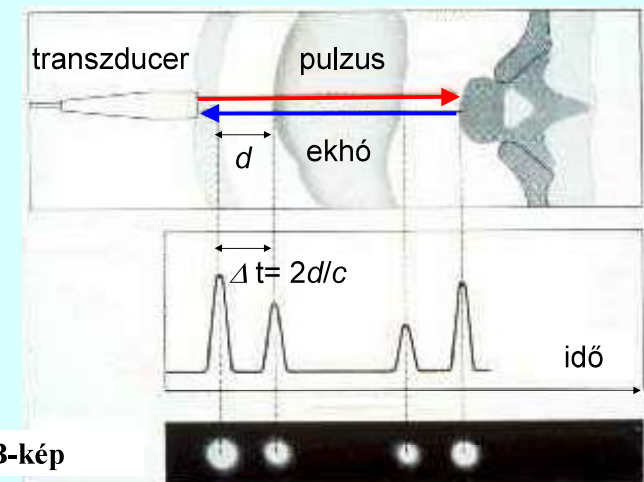


$$c\Delta t = d + d = 2d$$

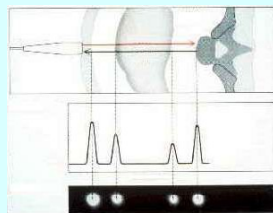
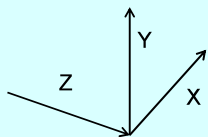
## B-kép - Brightness=fényesség

A-kép

egydimenziós B-kép



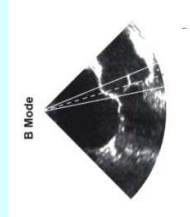
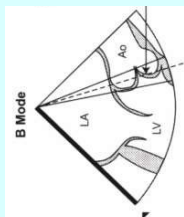
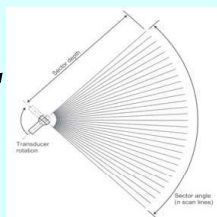
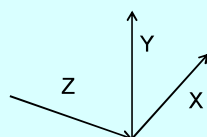
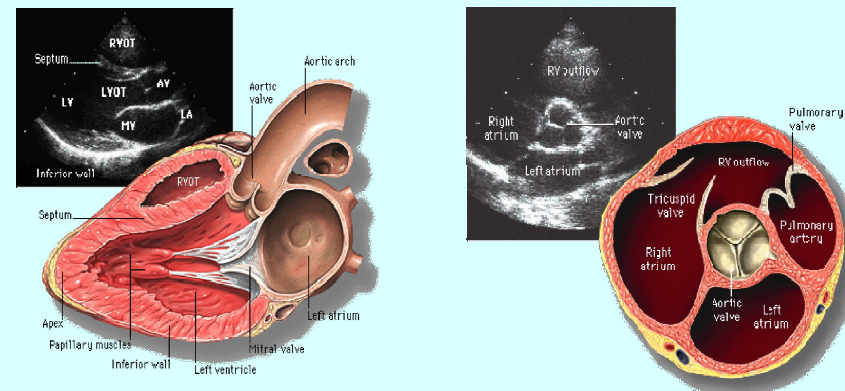




Eltérítés / szabályozás	A-kép	egydimenziós B-kép
X	Idő ( $\rightarrow$ axiális távolság)	Idő ( $\rightarrow$ axiális távolság)
Y	Amplitúdó ( $\rightarrow I_{ref}$ )	-
Z	(Fényesség)	Fényesség ( $\rightarrow I_{ref}$ )

## B-kép - Brightness=fényesség

### kétdimenziós B-kép – direkt tomográfia



### Eltérítés / szabályozás

X

Y

Z

### kétdimenziós B-kép

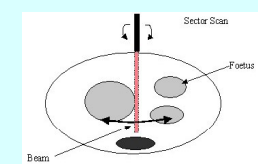
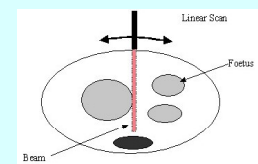
Idő ( $\rightarrow$  axiális távolság)

Laterális távolság

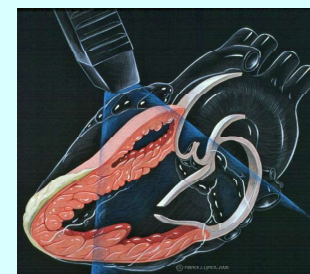
Fényesség ( $\rightarrow I_{ref}$ )

## B-kép - Brightness=fényesség

### kétdimenziós B-kép



mozgatott transzducer

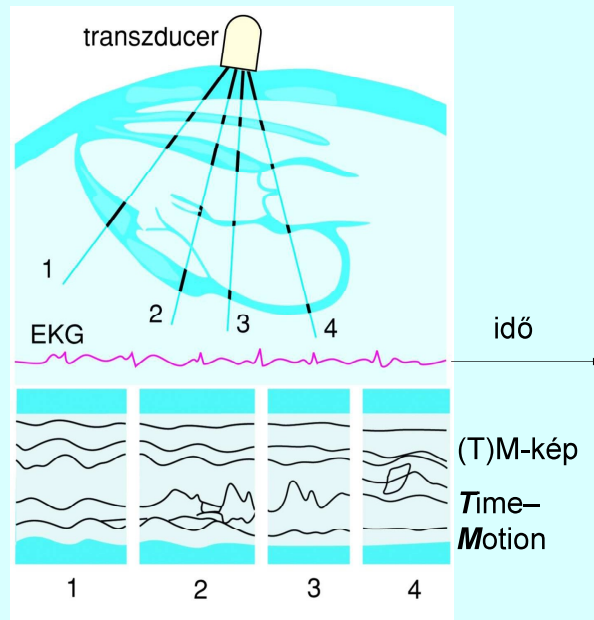


## TM-kép

*Time Motion*

EKG jel  
referenciaként

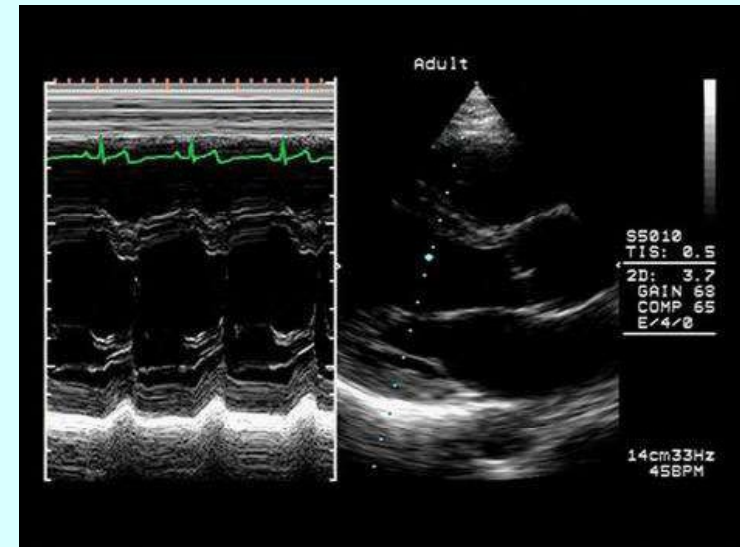
(független)  
egydimenziós B-kép  
időbeli változása



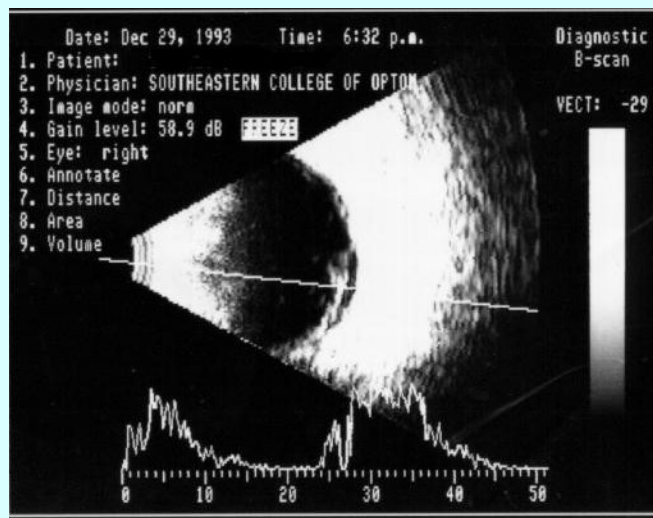
Tkv. VIII.34. ábra

## TM-kép

## B-kép



## Kétdimenziós B-kép és A-kép (szemészeti alkalmazás)



Terjedési  
sebesség  
figyelembe-  
vétele pontos  
távolságok  
meghatáro-  
zására:

cornea: 1641  
m/s

csarnokvíz:  
1532 m/s

humán  
szemlencse:  
1641 m/s

üvegtest:  
1532 m/s

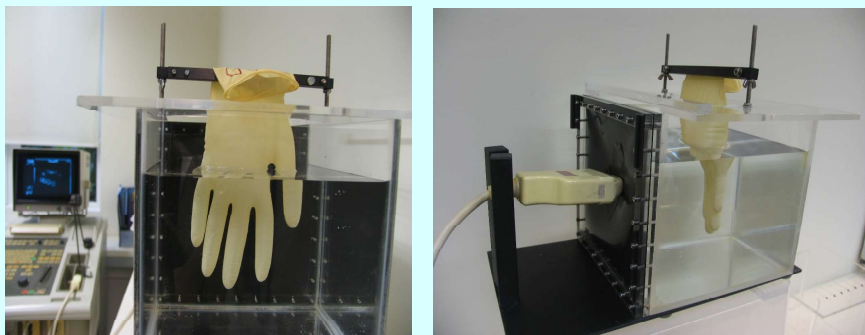
## A valóság és amit az UH-kép mutat



Az objektum



## A valóság és amit az UH-kép mutat

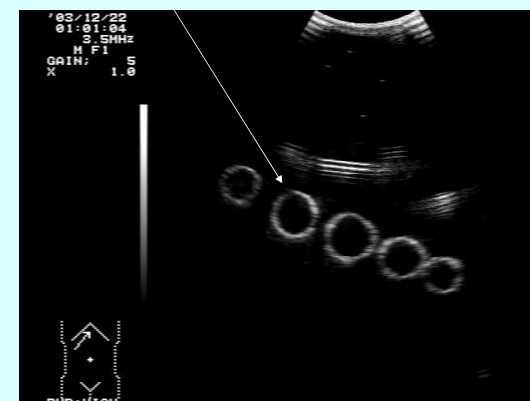


A mérés

## A valóság és amit az UH-kép mutat



A keresztmetszet

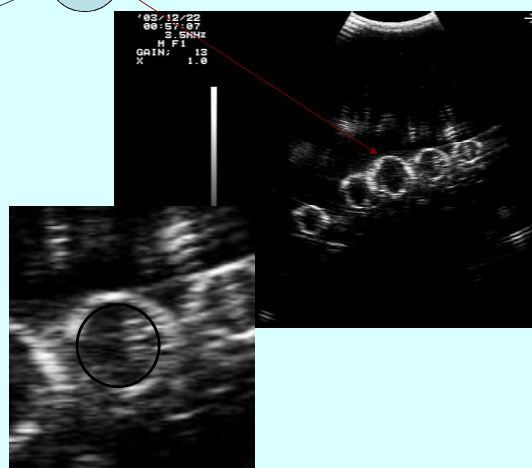


Az eredmény

## A valóság és amit az UH-kép mutat



A keresztmetszet

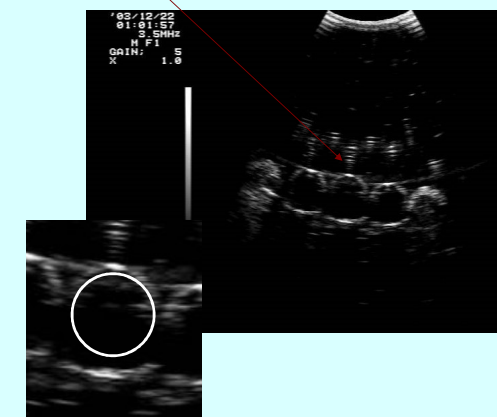


Az eredmény

## A valóság és amit az UH-kép mutat



A keresztmetszet



Az eredmény

## A valóság és amit az UH-kép mutat



A keresztmetszet



Az eredmény

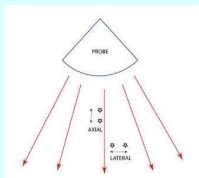
## Feloldási határ, feloldóképesség

A **feloldási határt** ama két pont közötti távolsággal jellemezhetjük, amelyeket az UH segítségével még különálló pontokként detektálhatunk (minél nagyobb az értéke, annál rosszabb a helyzet).

**Felbontóképesség:** a feloldási határ reciproka.

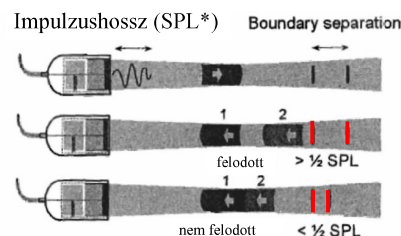
## Feloldási határ, feloldóképesség

A sugárirányú (**axiális**, vagy mélységi) feloldási határ az impulzushossztól függ.



Az echo ne fedjen át a kibocsátott impulzussal – minimális szeparáció  $> \frac{1}{2}$  spl.

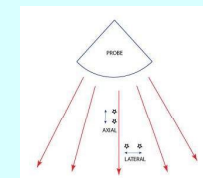
Az impulzushossz fordítottan arányos a frekvenciával



\*spatial pulse length

## Feloldási határ, feloldóképesség

A **laterális** feloldási határ – két szomszédos pont megkülönböztetése a sugárirányra merőleges irányban. A nyálbátmérő, nyálbátdenzitás és az objektum mélységi pozíciója szabja meg.



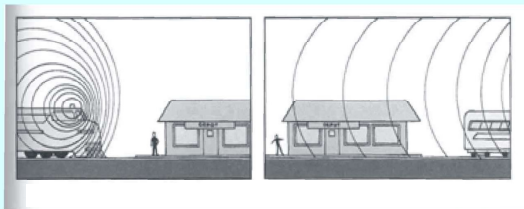
### Jellemző értékek

frekvencia (MHz):	2	15
hullámhossz (izomban) (mm):	0.78	0.1
behatolási mélység (cm):	12	1.6
laterális feloldási határ (mm):	3.0	0.4
axiális feloldási határ (mm):	0.8	0.15

## Doppler-effektus

A forrás és észlelés közeledése vagy távolodása esetében a frekvencia megváltozik.

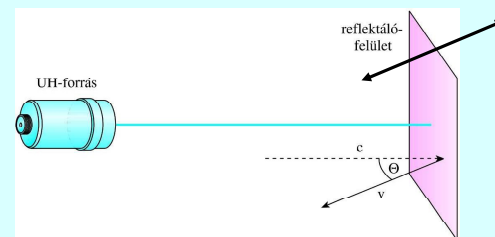
A forrás mozog



$$f' = f \cdot \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

f : eredeti frekvencia  
f' : megváltozott frekvencia  
v : a forrás sebessége  
c : az ultrahang sebessége

## Az ultrahang reflexiója mozgó felszínről



$$f' = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{2v}{c}\right)$$

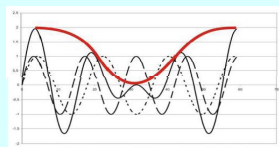
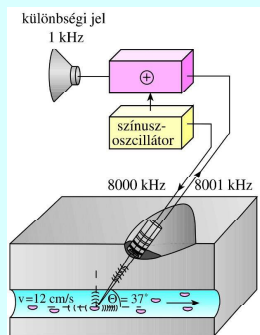
A frekvencia megváltozása arányos a reflektáló felület sebességével.

Doppler-eltolódás

$$f_D = f' - f_0$$

## Áramlási sebesség mérése

Vörösvértestek, mint szórócentrumok.



Közeli frekvenciák szuperpozíciója (összegzése) esetén megjelenik – hallható – a különbségi frekvencia is.

**Doppler frekvencia** = frekvencia változás = fr. eltolódás

$$f' = f \cdot \left(1 \pm \frac{v_M}{c}\right)$$

álló forrás és mozgó megfigyelő

$$\Delta f = f_D = \pm \frac{v_i}{c} f$$

ha  $v_R \ll c$  ( $i=M$  vagy  $F$ )

$$f' = f_0 \cdot \left(1 \pm \frac{2v_R}{c}\right)$$

mozgó reflektáló tárgy (felület),  
(ha  $v_R \ll c$ )

$$\Delta f = f_D = \pm 2 \frac{v_R}{c} f$$

ha  $v$  és  $c$  nem párhuzamosak, akkor  $v$  helyett  $v \cos \Theta$  írandó képletbe

## CW Doppler berendezés

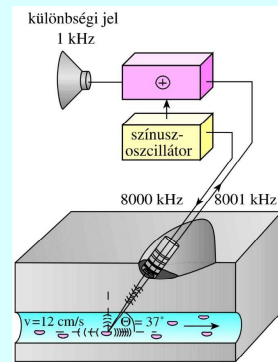
CW: (Continuous Wave) folyamatos hullámú

adó és vevő különválasztva (egymás mellett)

$$|f_D| = 2 \frac{v_R \cos \theta}{c} f$$

pl.  $f=8000$  kHz  
 $v=12$  cm/s  
 $c=1600$  m/s  
 $\theta = 37^\circ$

$\Rightarrow f_D = 1$  kHz  
 (lebegés jelensége)



Tkv. VIII.41. ábra

Egy 9 mm belső átmérőjű artériát vizsgálunk Doppler-ultrahang módszerrel. A kibocsátott ultrahang frekvenciája 8 MHz. A vizsgáló személy által hallott hang átlagos frekvenciája 1200 Hz. Mekkora a vér átlagos sebessége az artériában? Az ultrahang sebessége a testben 1500 m/s, és feltételezzük, hogy az ér tengelyével párhuzamosan halad.

$$|f_D| = 2 \frac{v_R \cos \theta}{c} f$$

$$\frac{|f_D| * c}{2f \cos \theta} = v$$

$$\frac{1200 * 1500}{2 * 8 * 10^6} = v$$

$$v = 11,25 \text{ m/s}$$

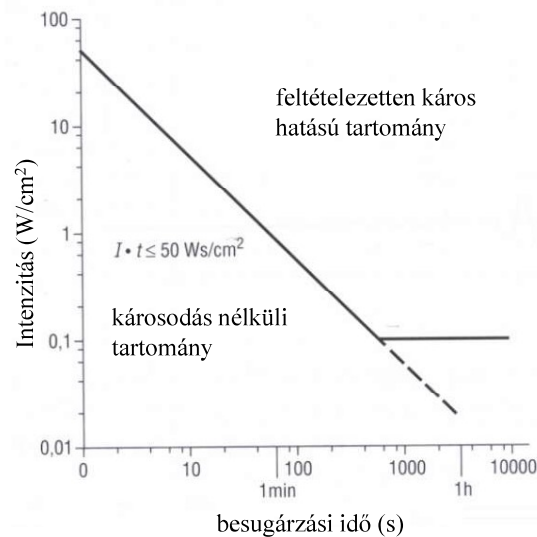
## Intenzitás – biológiai hatás

diagnosztika:

$10 \text{ mW/cm}^2 =$   
 $= 100 \text{ W/m}^2$

vö. fájdalomküszöb:  $10 \text{ W/m}^2$

terápia:  $1 \text{ W/cm}^2$



## UH (mellék)hatásai

### Hőhatás

- Helyi termikus hatás arányos az UH intenzitásával

$$- \frac{dT}{dt} = \frac{2\alpha I}{\rho c}$$

- A sűrűbb izomszövet általában kevésbé melegszik, mint a zsír

### Kavitációs hatás

## Terápiás alkalmazások

- mikromassázs - surlódás
- termikus hatás - súrlódás és abszorpció



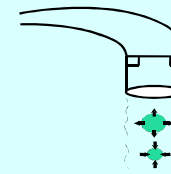
- izomlazítás
- fájdalomcsillapítás
- értágítás



## Fogkő eltávolítás



frekvencia tartomány:  
20 – 45 kHz

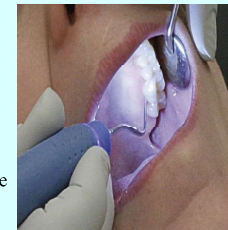


( $J < 300 \text{ mW/cm}^2$ )

Gázbuborékok  
összenyomódása és  
kitágulása

A fogkő kavitáció hatására leválik a  
fogfelszínről.

A hőhatást is figyelembe  
kell venni.



## A hét kérdése

Mit jelent a Doppler-eltolódás?

## Kapcsolódó fejezetek:

*Damjanovich, Fidy, Szöllősi: Orvosi Biofizika*

II. 2.4.  
VIII. 4.2.