

**BIOS**  
RESEARCH GROUP

**BIOS**  
RESEARCH GROUP  
TUZLA



**BIOS**  
RESEARCH GROUP

## ŠKOLA BAZIČNOG ULTRAZVUKA ABDOMENA

### FIZIKA ULTRAZVUKA

prof.dr. Suad Kunosić

06.04.2026

UZ

PRIRODA  
ZVUČNIH TALASA

GENERATOR  
UZ

POJAVE KOJE  
OMOGUĆAVAJU  
UZ

DIJAGNOSTIČKI  
POSTUPAK

ELASTOGRAFIJA

OBRADA  
SIGNALA

BIOLOŠKI  
EFEKTI

ANN U UZ DIJAGNOSTICI

UZ



# ULTRAZVUČNI TALASI U MEDICINSKOJ DIJAGNOSTICI

- Priroda zvučnih talasa
- Generator ultrazvuka
- Pojave koje omogućuju primjenu ultrazvuka u medicini
- Dijagnostički postupak
- Načini prikazivanja signala
- Biološki efekti upotrebe ultrazvuka

## ***PRIRODA ZVUČNIH TALASA***

- Šta nazivamo zvukom?
- Kako djelimo zvučne talase ?
  - područje čujnog zvuka
  - područje infrazvuka
  - područje ultrazvuka

### ***Područje čujnog zvuka***

- Opseg frekvencija od 16 Hz – 20 kHz
- Navedene frekvencije u interakciji sa slušnim sistemom čovjeka uzrokuju fiziološki osjećaj zvuka !!!
- Čovjek proizvodi zvukove pomoću glasnica u grlu i usne šupljine, a čuje zvukove pomoću slušnog sistema u uhu.

□ ***Fizikalni parametri tona (objektivno mjerljivi parametri)***

frekvencija oscilovanja izvora  
brzina širenja talasa u sredini  
intenzitet  
frekventni spektar

□ ***Fiziološki osjećaj zvuka (parametri subjektivne prirode)***

visina tona  
boja tona  
glasnoća tona

Brojna ispitivanja sprovedena na dobrovoljcima posve ispravnog sluha, omogućila su postavljanje empirijskih funkcionalnih veza između fizikalnih parametara tona i odgovarajućih parametara osjećaja zvuka.

# INFRAZVUK

- ❑ Frekvencije ispod 16 Hz.

- ❑ Kakvi su to talasi i kako nastaju ???

Mehanički talasi koji nastaju kod potresa ili promjenom atmosferskog pritiska !!

- ❑ Da li možemo registrovati ili reagovati na takve promjene ?!

Naši unutrašnji organi reaguju na te talase, što osjećamo kao glavobolju ili neke fiziološke smetnje.

## Ultrazvuk

- ❑ Područje frekvencije iznad 20 kHz
- ❑ Da li ljudski organizam može registrovati ultrazvučne talase ??

U ljudskom organizmu nema receptora za ovakve talase !!

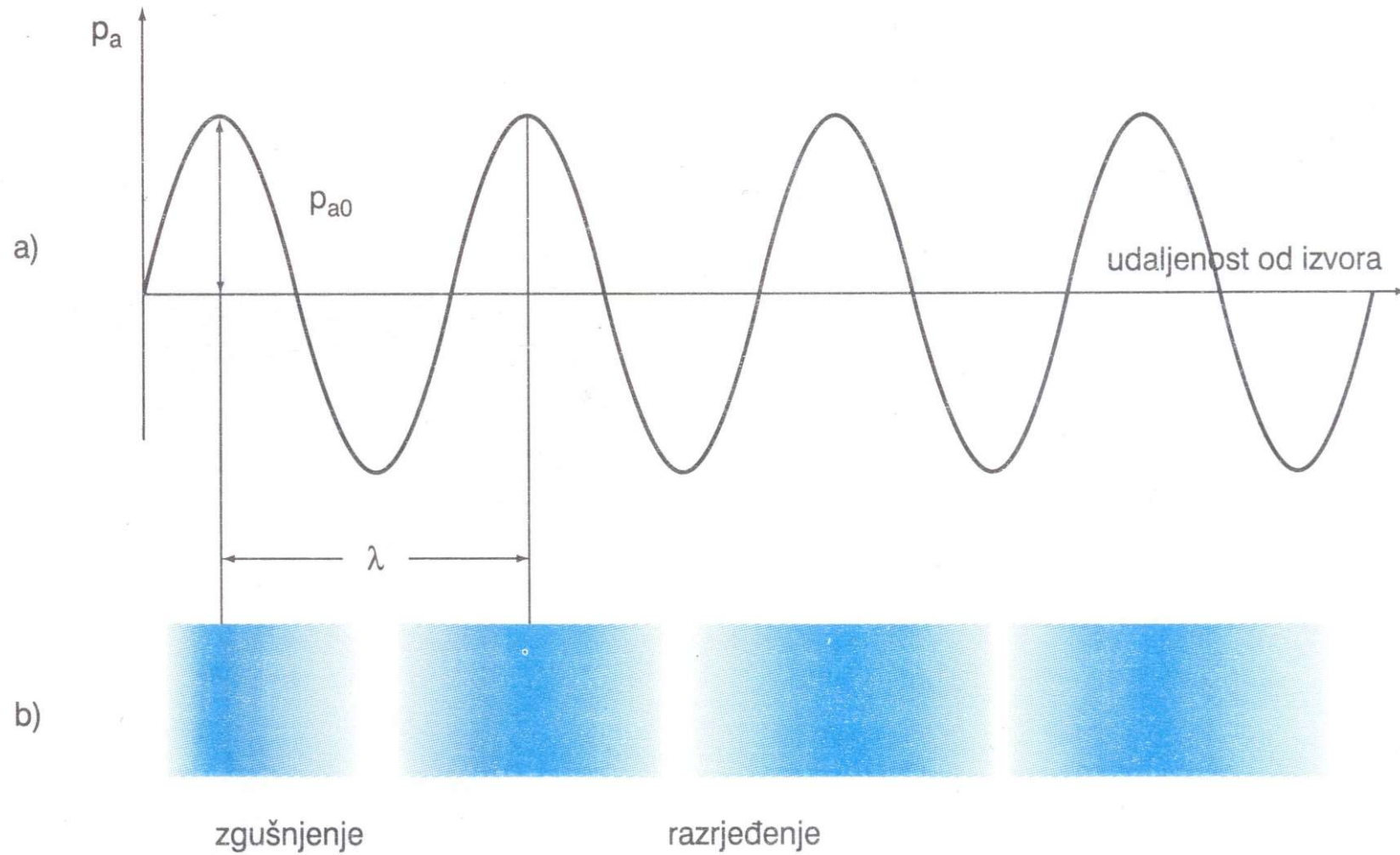
- ❑ Područje primjene ultrazvučnih talasa u medicini:

ultrazvučna dijagnostika (2 MHz – 20 MHz-50MHz)

terapija (0,75 – 3 MHz)



# Priroda zvučnog talasa



**Lokalne promjene gustine izvor su i lokalnih promjena pritiska, pa se zvučni talas može posmatrati i kao pravilna promjena pritiska i gustine u sredstvu kroz koje se širi.**

**Promjenu pritiska u sredini zbog zvučnog talasa nazivamo akustičnim pritiskom.**

**Šta određuje brzinu širenja talasa u nekoj sredini ??**

✓ **elastična svojstva sredine**

✓ **gustina sredine**

**Brzina zvuka u različitim sredinama**

✓ **u vazduhu je najmanja**

✓ **u homogenim tečnostima raste sa porastom viskoznosti**

✓ **u čvrstoj elastičnoj sredini zavisi od gustine i Youngovog modula elastičnosti.**

**Tablica 4-1.** Akustičke osobitosti bioloških tkiva

	Gustoća $\text{kg/m}^3$	Brzina $\text{m/s}$	zvučni otpor $\text{kg/m}^2\text{s}$	$\alpha$ $\text{dB/cm}$
zrak	1,29	344	430	11,9
pluća	400	650	$0,26 \times 10^6$	
mast	920	1467	$1,33 \times 10^6$	0,60
voda	1000	1520	$1,48 \times 10^6$	$2,2 \times 10^{-3}$
mozak	1030	1504–1612	$1,55\text{--}1,66 \times 10^6$	0,85
bubreg	1040	1558	$1,62 \times 10^6$	0,78
jetra	1566	1566	$1,66 \times 10^6$	0,96
mišići	1070	1561–1626	$1,67\text{--}1,74 \times 10^6$	1,3 – 3,2
kost	1380–1810	2717–4077	$3,75\text{--}7,38 \times 10^6$	11,3 – 20

- ✓ Kako viskoznost tečnosti i gustina tvari zavise o temperaturi, i brzina širenja zvuka je funkcija temperature !!!
- ✓ U biološkim tkivima (nehomogena sredina) zavisnost brzine zvuka o viskoznosti i gustine može biti vrlo složena funkcija.
- ✓ Akustični otpor koristimo da opišemo različitost bioloških tkiva prema provođenju zvučnog talasa

$$Z = \rho v$$

- ✓ Širenje zvuka je prijenos energije oscilovanja izvora u prostoru preko čestica sredine !

$$E = \frac{m \cdot \omega_0^2 \cdot A^2}{2}$$

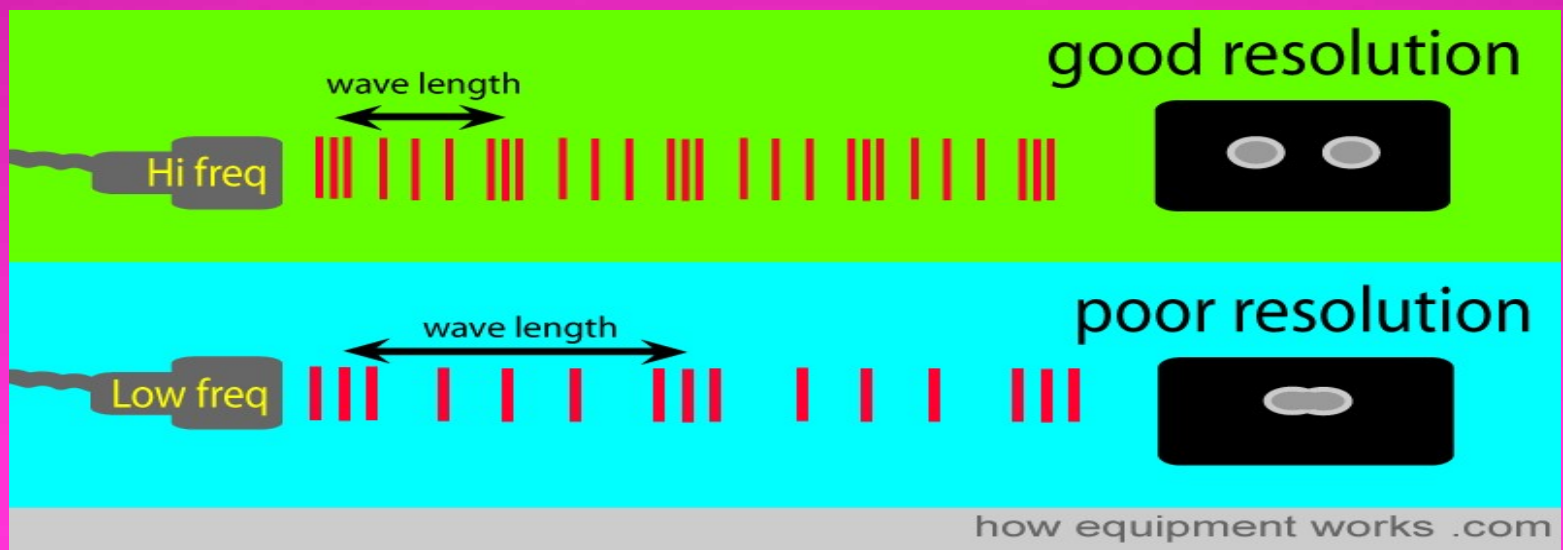
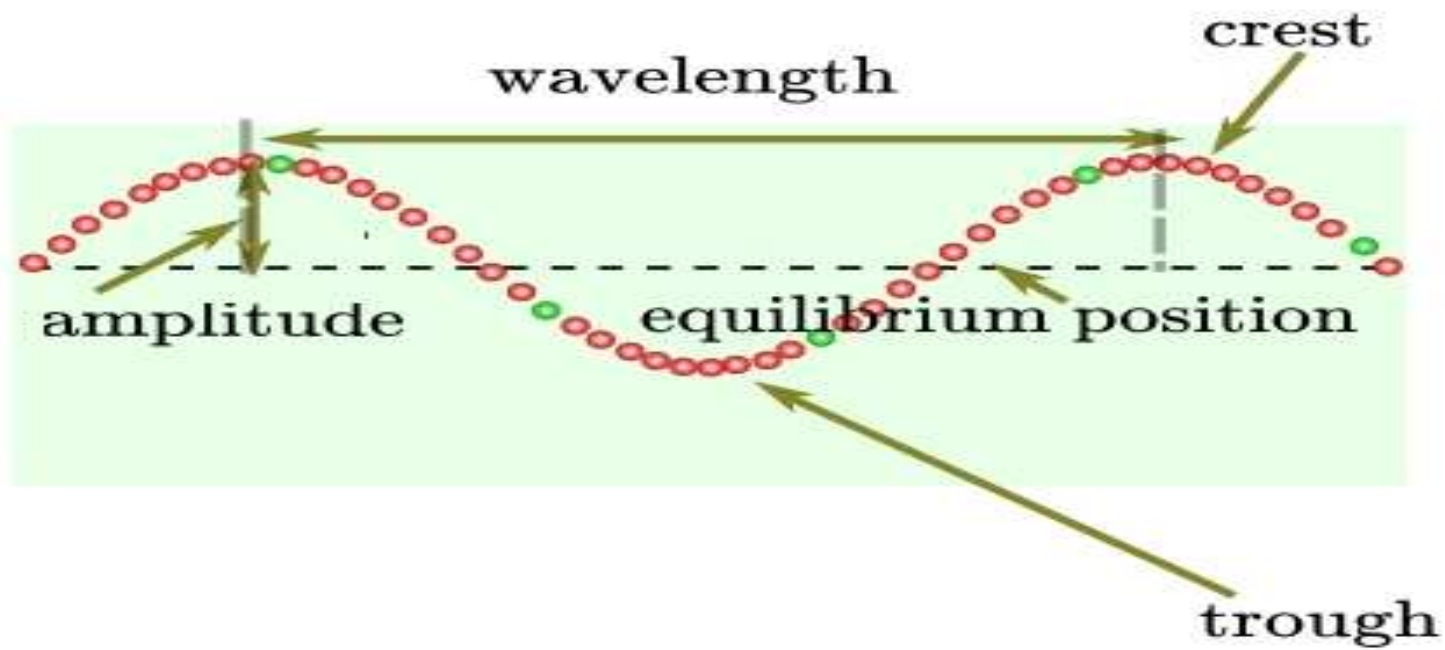
Intenzitet zvučnog talasa:

$$I = \frac{1}{2} \cdot A^2 \cdot \omega_0^2 \cdot \rho \cdot v$$

✓ Pomaci čestica iz položaja ravnoteže su manji za višu frekvenciju !!!  
Intenzitet harmonijskog talasa prikazan zavisno o amplitudi akustičkog pritiska:

$$I = \frac{p_{a0}^2}{2 \cdot \rho \cdot v}$$

- **Talasna dužina ultrazvuka je obrnuto proporcionalna njegovoj frekvenciji.**
- **frekvencije od 1,5 MHz, talasna dužina je 1 mm, a kod 3 MHz je 0,5 mm.**



how equipment works .com

## JEDNAČINA ZVUČNOG TALASA

$$x(t, r) = A \cdot \sin \omega(t - \tau) = A \cdot \sin \omega\left(t - \frac{r}{v}\right) = A \cdot \sin \cdot 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right) = A \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot r)$$

- Zvučni talas (harmonijski i neharmonijski)
- Kakav je utrazvučni talas u medicinskoj dijagnostici ???

Harmonijski !!!

## PROMJENA PRITISKA U SREDINI KROZ KOJU SE ŠIRI ZVUČNI TALAS

$$p_a(t, r) = p_{a0} \cdot \sin \cdot 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$$

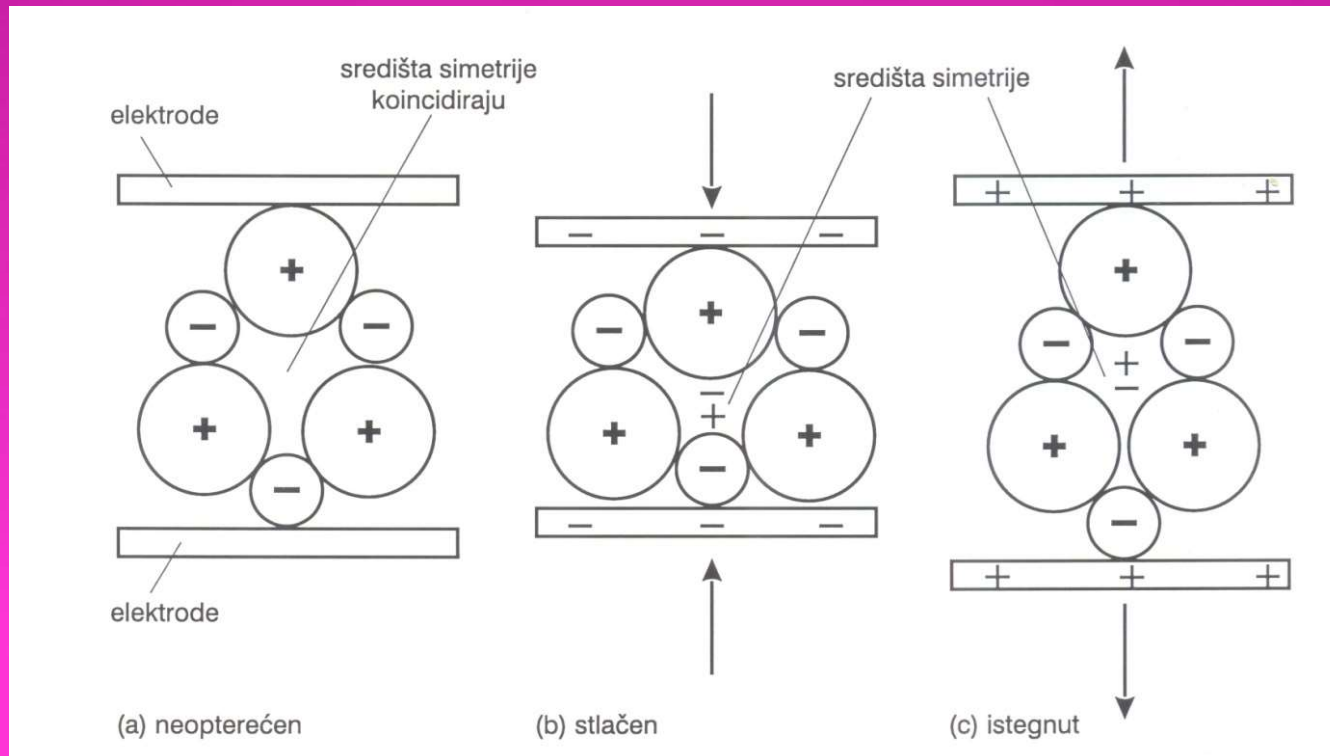
$$p = p_0 + p_{a0}$$

- U dijagnostici se koristi ultrazvuk intenziteta u intervalu između 10 i  $10^3$  W/m<sup>2</sup>

# Generator ultrazvuka

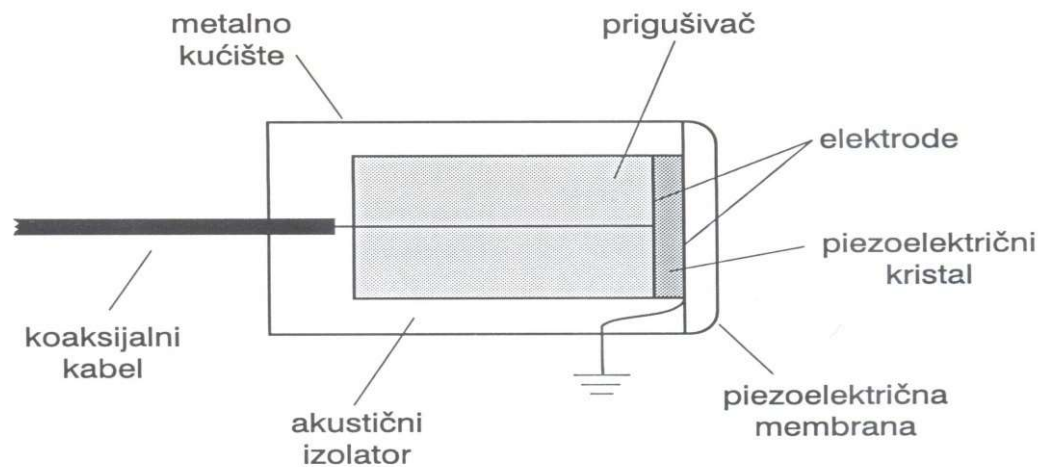
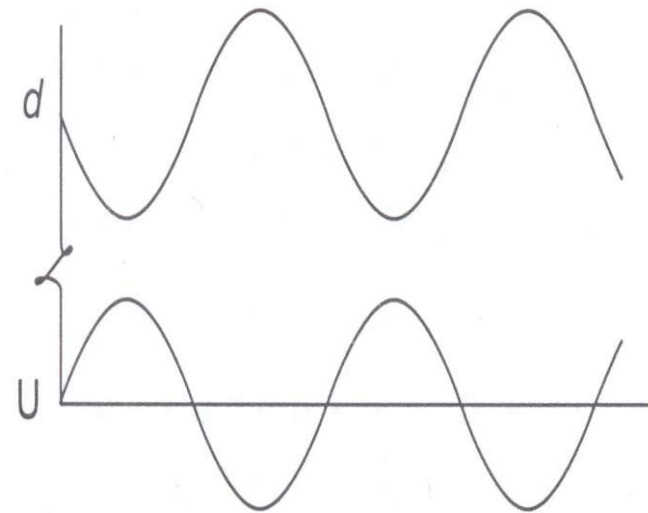
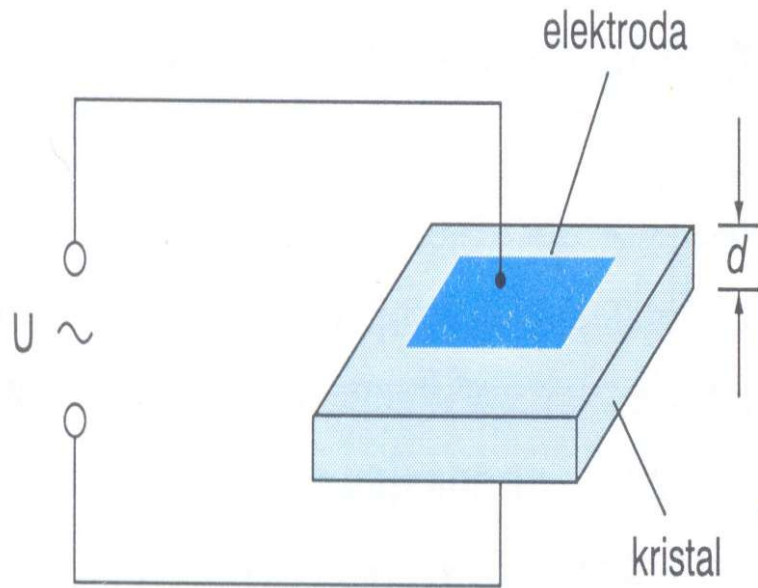
□ Šta su izvori ultrazvučnih talasa ??

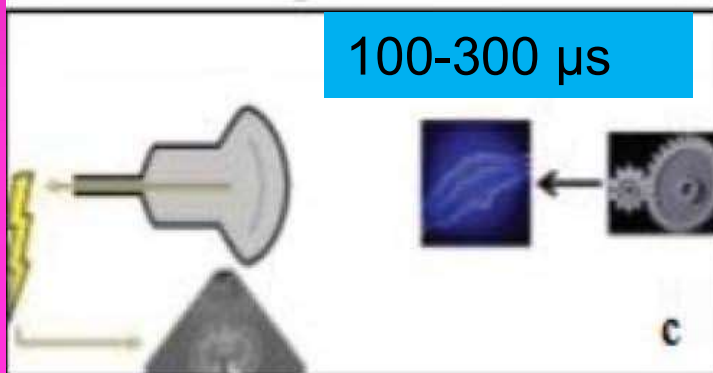
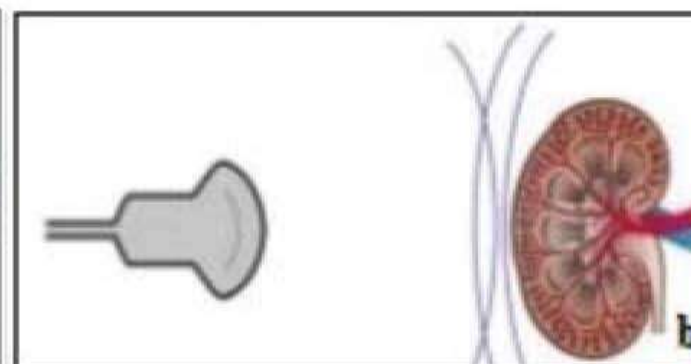
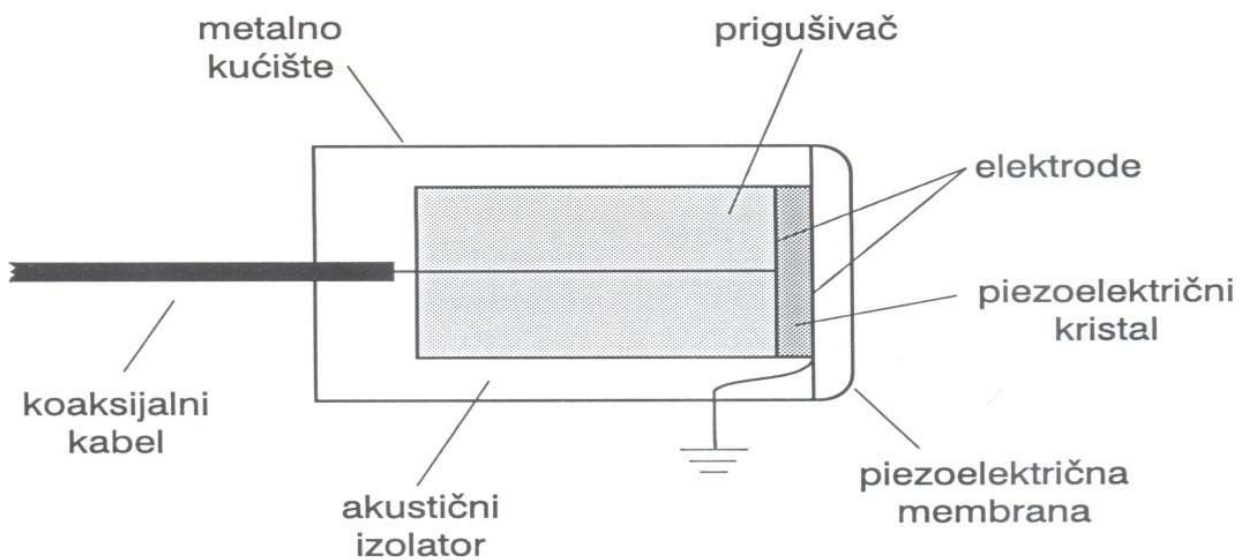
Piezoelektrični kristali (kvarc ili sintetička keramika – olovni cirkonantni titanat) oni mjenjaju veličinu u električnom polju.





# Generator ultrazvuka





195  $\mu$ s

1-10 kHz

- ✓ Efikasnost pretvaranja mehaničke u električnu energiju i obratno jako zavisi o geometrijskim osobinama piezoelektričnog kristala.
- ✓ Oblikom izvora određuje se veličina polja snimanja a debljinom kristala frekvencija ultrazvučnog talasa.

## NAJBOLJI PIEZOELEKTRIČNI KRISTALI ZA UZ

❖ *PMN-PT (Lead Magnesium Niobate – Lead Titanate single crystal)*

❖ ***PZT-5H (Lead Zirconate Titanate – “mekana” varijanta)***

Zlatni standard (2–15 MHz).

Dobri piezo koeficijenti ( $d_{33} \approx 500\text{--}700$  pC/N) - stabilne performanse.

❖ ***PMN-PT kompozit (PMN-PT kristal + epoksi polimer)***

Zašto je revolucionaran

***Najnaprednije sonde nove generacije -“Matrix Array” i “High-Definition”***

## Pojave koje omogućuju primjenu ultrazvuka u medicini

❑ Na čemu se temelji upotreba ultrazvučnih talasa u medicini ?

Ona je utemeljena na saznanju da se udaljenosti između površina na kojima se događa refleksija talasa mogu odrediti mjerenjem vremena povratka reflektovanih talasa zvuka !!!

❑ Vremena između pojedinih odbijenih talasa oslikavaju prostorni raspored površina sa kojih se talasi odbijaju !!!

❑ U medicinskoj dijagnostici koriste se ultrazvučni talasi dovoljno male talasne dužine, pa je rezolucija za posmatranje struktura u tkivima zadovoljavajuća.

❑ Ultrazvukom “vidimo” samo one detalje na kojima se talas odbija.

❑ Ultrazvučni talas će se reflektovati sa neke površine samo ako je ona veća od njegove talasne dužine.

□ Kolagena vlakna apsorbiraju ultrazvuk 4 puta više od mišića, a kost 10 puta više od mišića.

□ Koeficijent apsorbcije:

$$A = \frac{A_0}{e}; A = A_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

$$\frac{A_0}{e} = A_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$$

$$\ln e = \alpha \cdot x$$

$$\alpha = \frac{1}{x}$$

Koeficijent apsorbcije, prvenstveno zavisi od frekvencije ultrazvuka i impedancije apsorbera.

□ Raste sa kvadratom frekvencije za: vodu, većinu čvrstih tijela i kosti  
lobanje a linearno raste za meka tkiva(krv, moždano tkivo).

□ S povećanjem impedancije apsorbera stepen apsorbcije se smanjuje.

□ Intenzitet zvučnog talasa srazmjeran je kvadratu amplitude talasa, pa se smanjenje intenziteta takođe može prikazati eksponencijalnom funkcijom:

$$I = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot x}$$

## Debljina poluapsorpcije

□ Dubina prostiranja u tkivu na kojoj će intenzitet zvučnog talasa  $I$  biti jednaka polovini svoje početne vrijednosti  $I_0$  naziva se debljina poluapsorpcije:

$$I = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot x}$$

$$\frac{I_0}{2} = I_0 \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot x_{1/2}}$$

$$\ln \frac{1}{2} = -2 \cdot \alpha \cdot x_{1/2}$$

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{2 \cdot \alpha}$$



☐ Za zvuk frekvencije 1 MHz u vodi:  $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$  i  $x_{1/2} = 14 \text{ m}$ .  
(Stepen pretvaranje mehaničke energije oscilovanja u toplotu, kod molekula vode mali) !!!!

☐ Biološki mediji:

✓ Krv:  $\alpha = 2,1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  i  $x_{1/2} = 16,5 \text{ cm}$ .

✓ Moždano tkivo:  $\alpha = 9,8 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  i  $x_{1/2} = 3,5 \text{ cm}$ .

✓ Kost:  $\alpha = 1,38 \cdot 10^{-1} \text{ cm}^{-1}$  i  $x_{1/2} = 0,25 \text{ cm}$ .

Apsorpcijski koeficijent kod bioloških medija i nekoliko puta veći zbog prisustva rezonancije makromolekula na mehaničke podražaje zvučnih talasa !!!!

Smanjenje intenziteta zvučnih talasa tj. dubine prodiranja talasa u tkivo je posljedica:

✓ **refleksije** (atenuacija ne zavisi od frekvencije)

✓ **apsorbcije** (apsorbcija energije veća što je frekvencija veća)

- ❑ Viša frekvencija poželjna u dijagnostici, zbog bolje rezolucije !!!
- ❑ Povećana apsorpcija, znači ograničenje visine dijagnostičke frekvencije, a time i rezolucije !!!!!

## Odbijanje i lom zvučnih talasa

Ultrazvučni talasi se na granici dvije sredine reflektuju i transmituju.

Šta se dešava u slučaju kada su dva tkiva (sredine) različite gustoće?

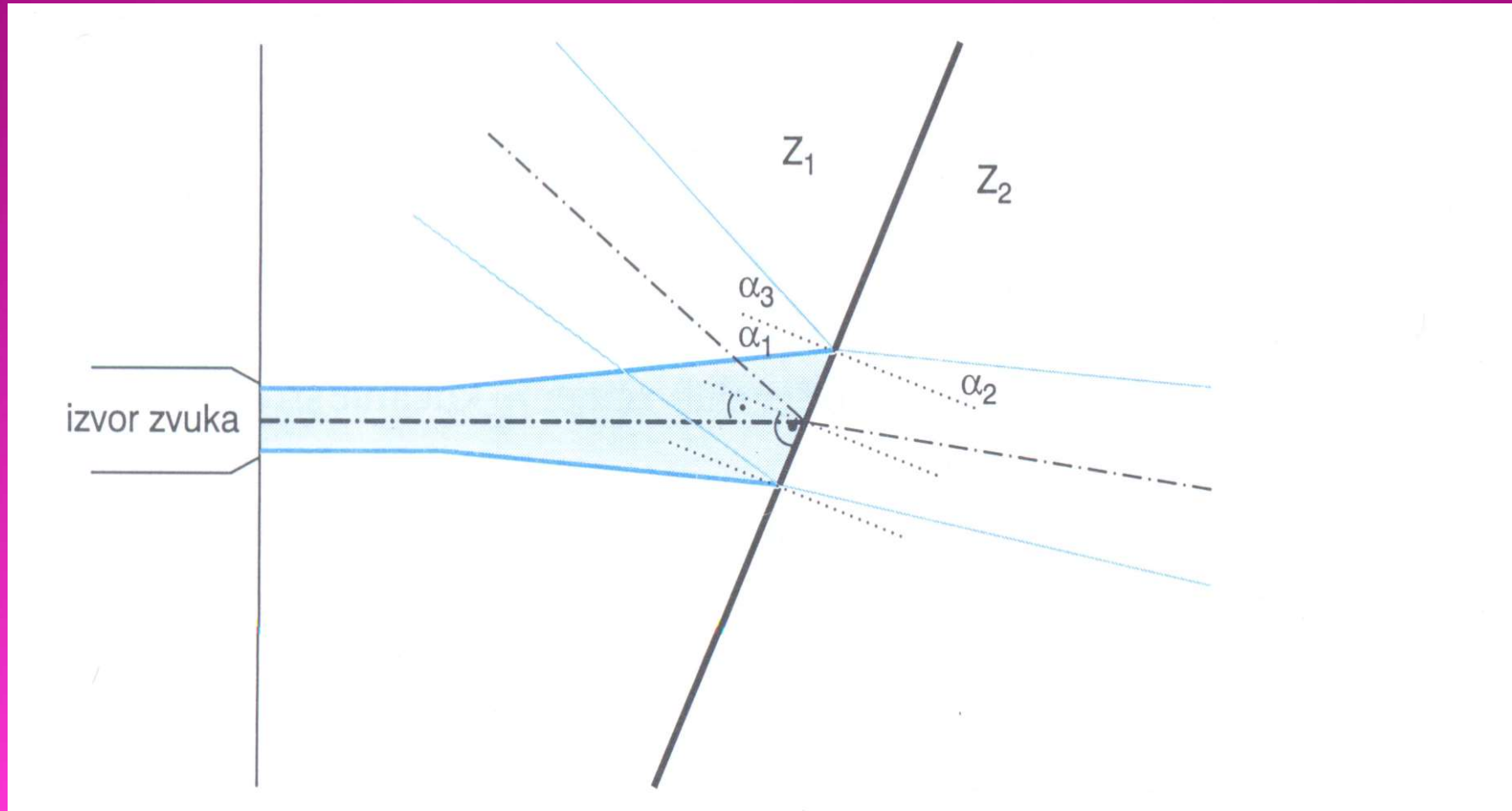
Širenje UZ talasa pod ovim uslovima zavisi o akustičnom otporu (impedanciji) tkiva i kada je razlika veća biće slabija transmisija, veća refleksija i koncentracija toplote na mjestima gdje se spajaju reflektovani i nadolazeći talasi !!!

Gdje je najveća razlika akustičnih otpora ???

✓ Između ultrazvučne glave i površine tijela

✓ Kost i mekih tkiva.

## Refleksija i transmisija zvučnog talasa na glatkoj granici dva tkiva različitih akustičnih otpora



$$\alpha_{UPADNO} = \alpha_{REFLEKTOVANO}$$

$$\frac{\sin \alpha_{UPADNO}}{v_1} = \frac{\sin \alpha_{TRANSMITOVANO}}{v_2}$$

Stepen refleksije:

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(Z_2 \cos \alpha_1 - Z_1 \cos \alpha_2)^2}{(Z_2 \cos \alpha_1 + Z_1 \cos \alpha_2)^2}$$

a kako je  $R+T = 1$ , odnosno  $I_r + I_t = I_0$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2 \cdot \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2}{(Z_2 \cos \alpha_1 + Z_1 \cos \alpha_2)^2}$$

Najveći prijenos energije za:

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$$

Najveći prijenos energije za:

$$\alpha_1 i \alpha_2 = 0^0$$

Kada talasi padaju okomito na granicu dvije sredine vrijedi:

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

□ Kada je ugao upada različit od  $0^0$  , samo se okomite komponente talasnih oscilacija mijenjaju na granici dvije sredine.

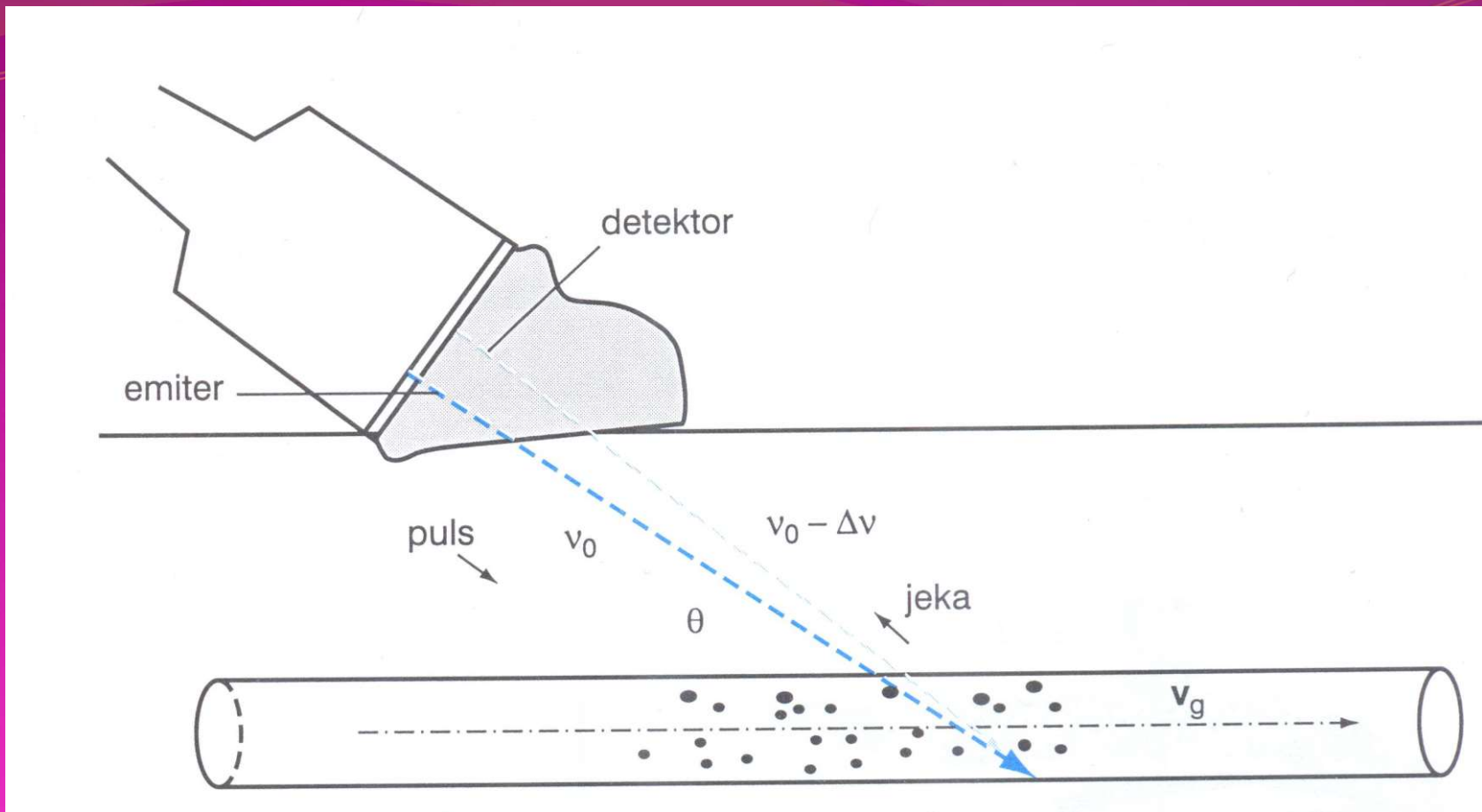
□ Snažna refleksija:

$$Z_2 > Z_1, \quad Z_2 < Z_1$$

□ Totalna refleksija događa se na granici između dva sredstva sa jako različitim zvučnim otporima (kost i zrak).

□ Šta određuje stepen prijenosa energije ?

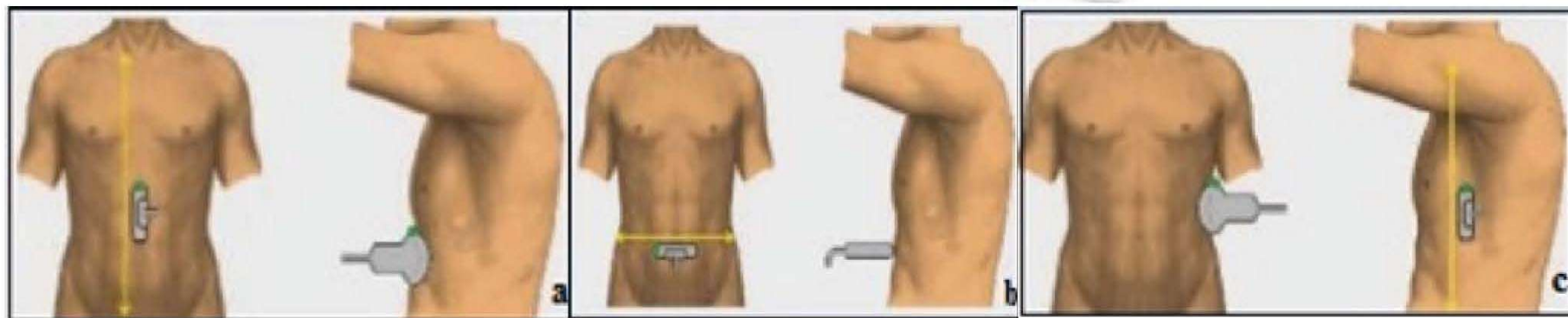
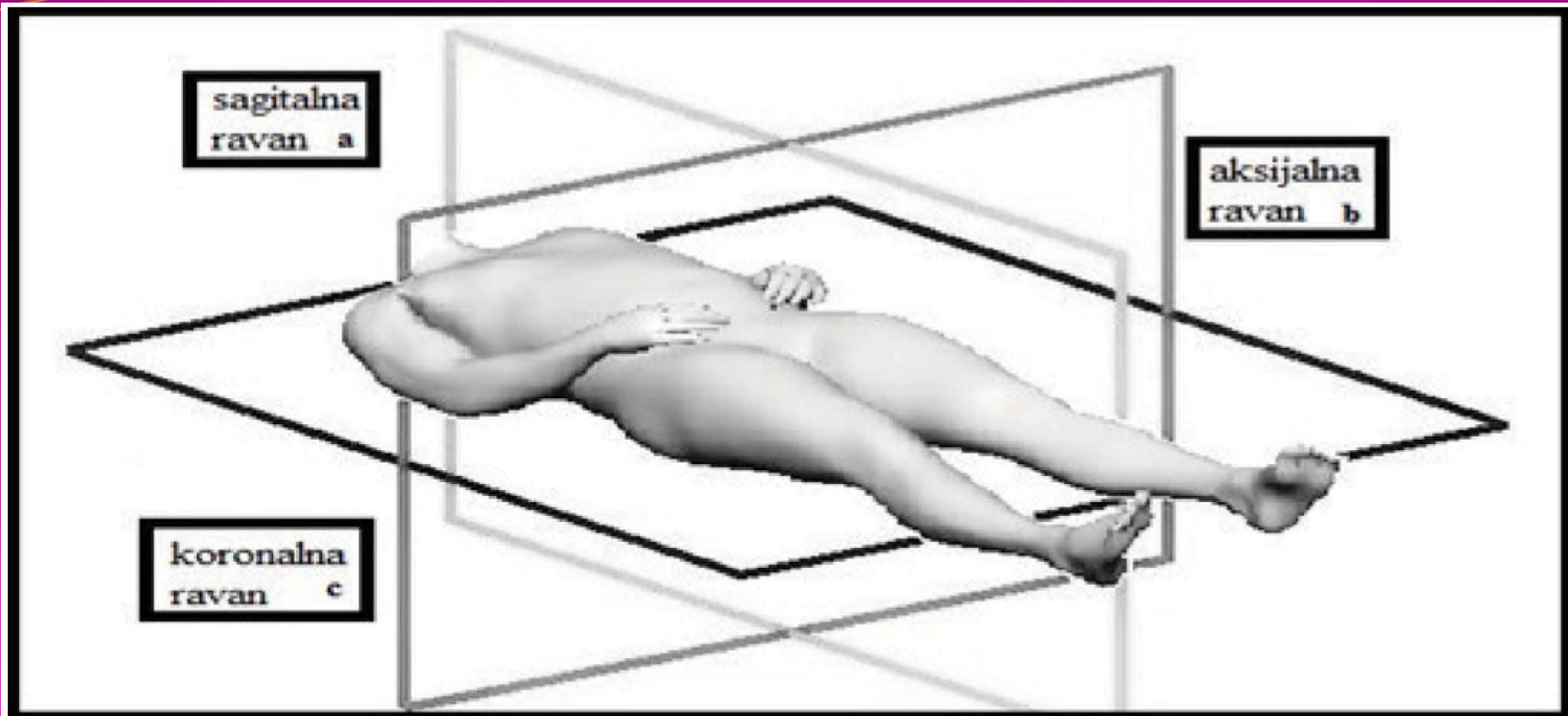
Razlika između zvučnih otpora !!!!



- ❖ hitno stanje voda;
- ❖ ulje (biljno ili mineralno)      hidrosolubilni gel !!!!!

$$\Delta f = f_0 \frac{2 \cdot v_g \cdot \cos \theta}{c}$$





## DIJAGNOSTIČKI POSTUPAK

- Apsorbcijska metoda
- Metoda jeke, ehosonografija
- Rezolucija pri snimanju metodom jeke

## Ehosonografija

❑ ***Prednost ove metode u dijagnostici neupitna.***

❑ ***Šta se mjeri ovom metodom ???***

Mjeri se vrijeme potrebno puls u Z talasa da od sonde dođe do reflektujuće površine unutar tkiva i natrag.

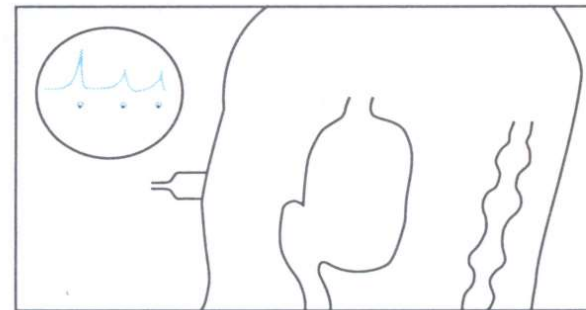
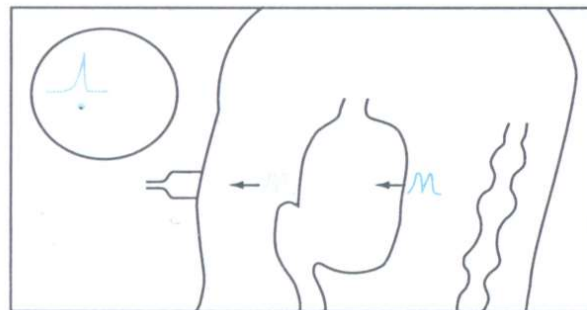
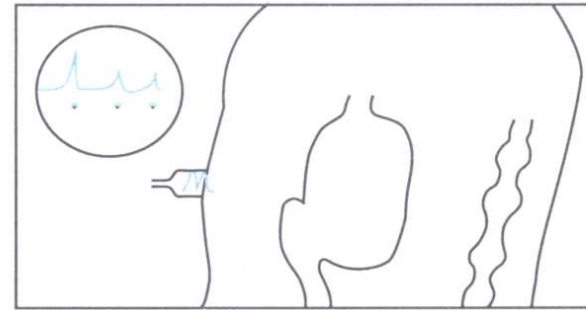
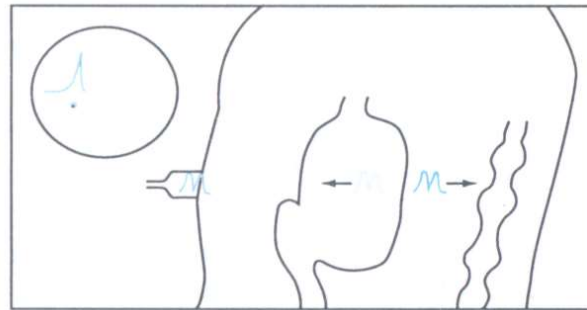
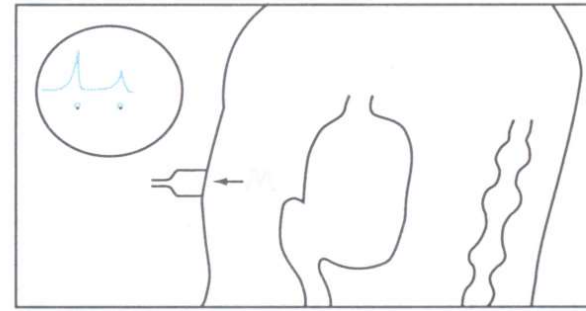
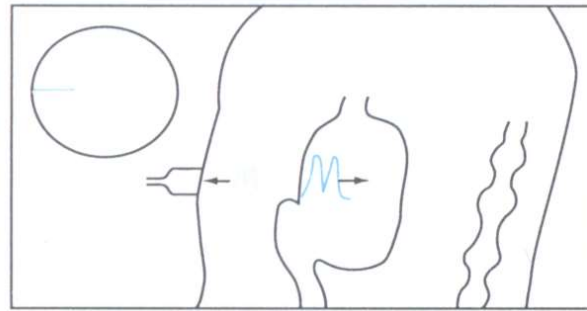
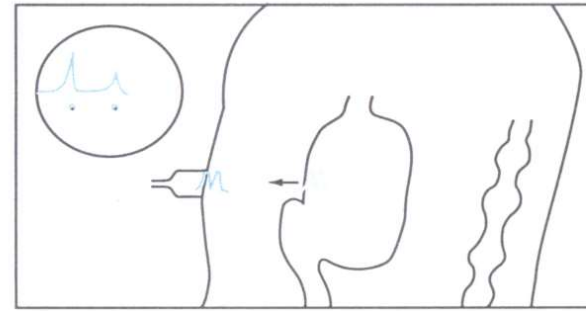
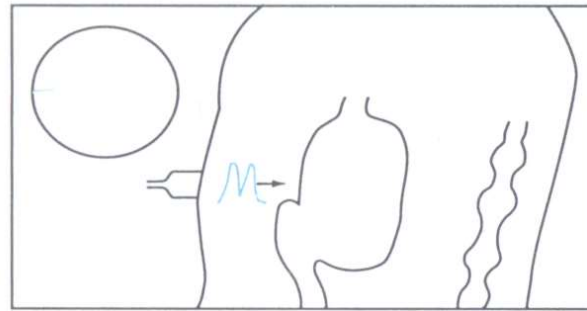
❑ ***Od čega zavise intenzitet i amplituda reflektovanog talasa ??***

Intenzitet (o razlici u zvučnim otporima granice refleksije)

Amplituda (i o apsorpciji zvučne energije na putu prostiranja)

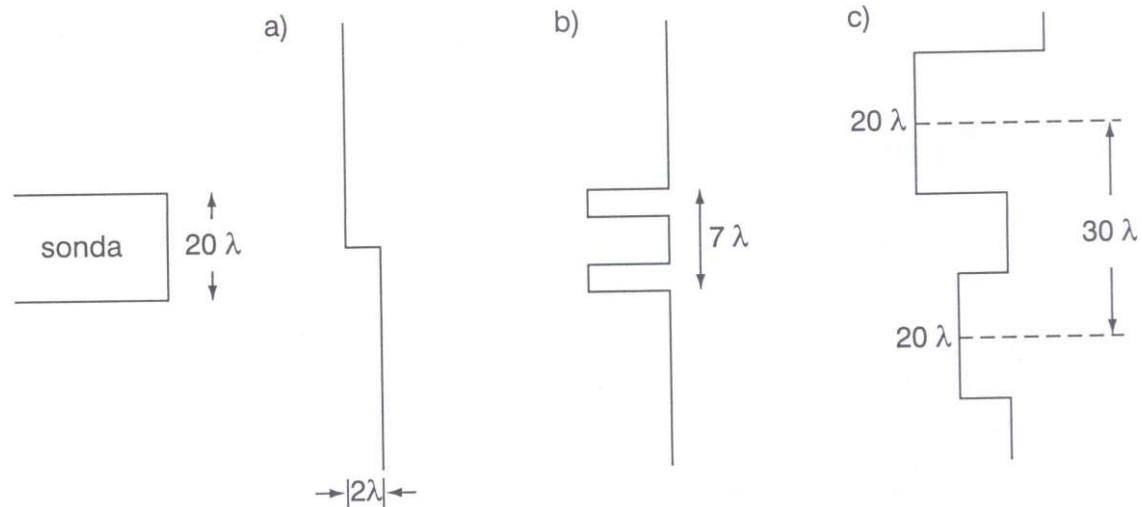
❑ ***Šta ima neprocjenjivu vrijednost u ovoj dijagnostičkoj metodi ??***

Vrijeme izmjereno između reflektovanih talasa sa različitih ploha u organizmu !!!!!



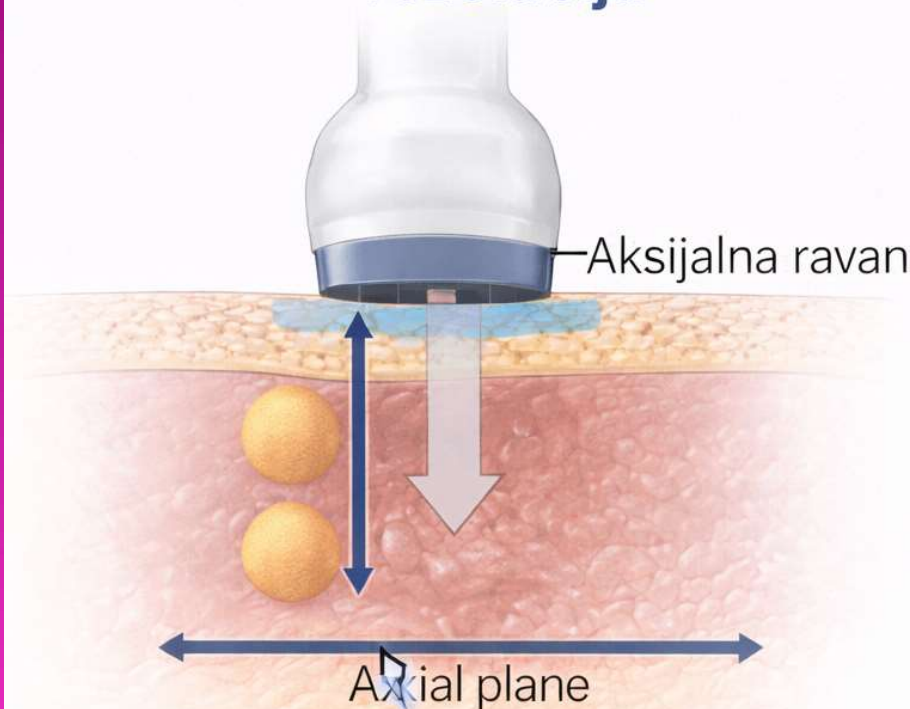
## Rezolucija pri snimanju metodom jeke

- ❑ Brzina zvuka u tkivu je 1500 m/s ili 1,5  $\mu\text{m/ms}$ .
- ❑ Elektroničkim krugovima mogu se tačno mjeriti vremenski intervali od 10 ns, što je pri širenju UZ kroz homogeno sredstvo oko 15  $\mu\text{m}$ .
- ❑ Preciznost mjerenja udaljenosti u ultrazvučnoj dijagnostici i oslikavanju je ograničena malom promjenom brzine zvuka u različitim tkivima.
- ❑ Longitudinalna rezolucija je minimalna mjerljiva udaljenost između dvije reflektirajuće površine na putu širenja zvučnog talasa i ograničena je dužinom zvučnog pulsa.



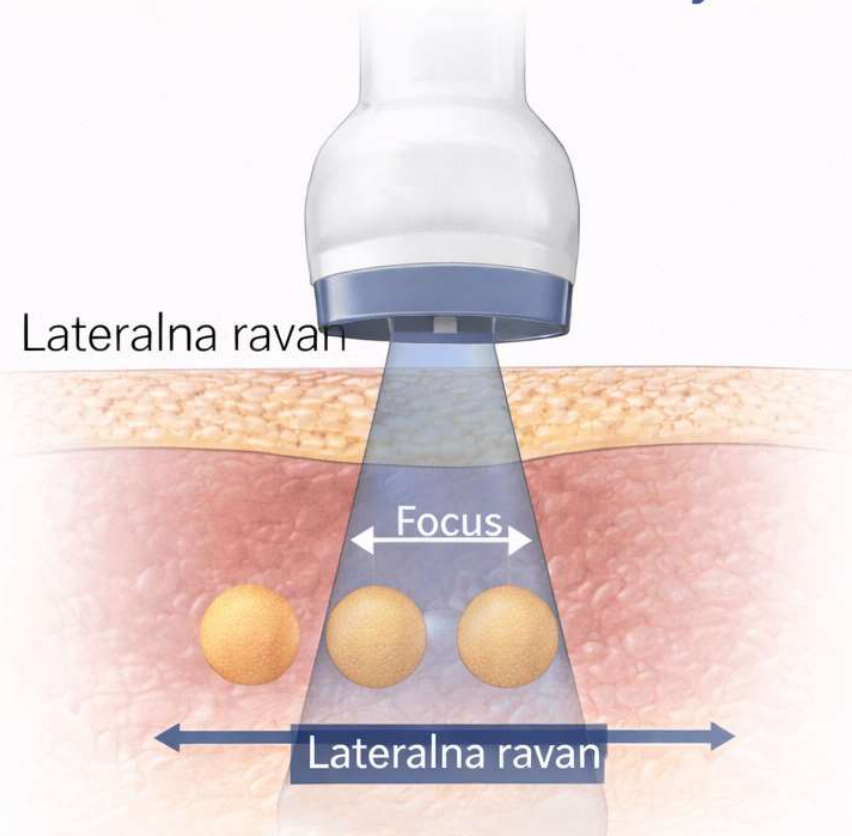
- Longitudinalna rezolucija (određena:  $\lambda$ ,  $d$ )
- Lateralna rezolucija zavisi od širine UZ snopa
- Za velike strukture

## Aksijalna (Longitudinalna) rezolucija



Sposobnost razlikovanja objekata jedan iznad drugog

## Lateralna rezolucija



Sposobnost razlikovanja objekata jedan pored drugog

## Aksijalna rezolucija

**Dobar!**



## Lateralna rezolucija

**Loš!**





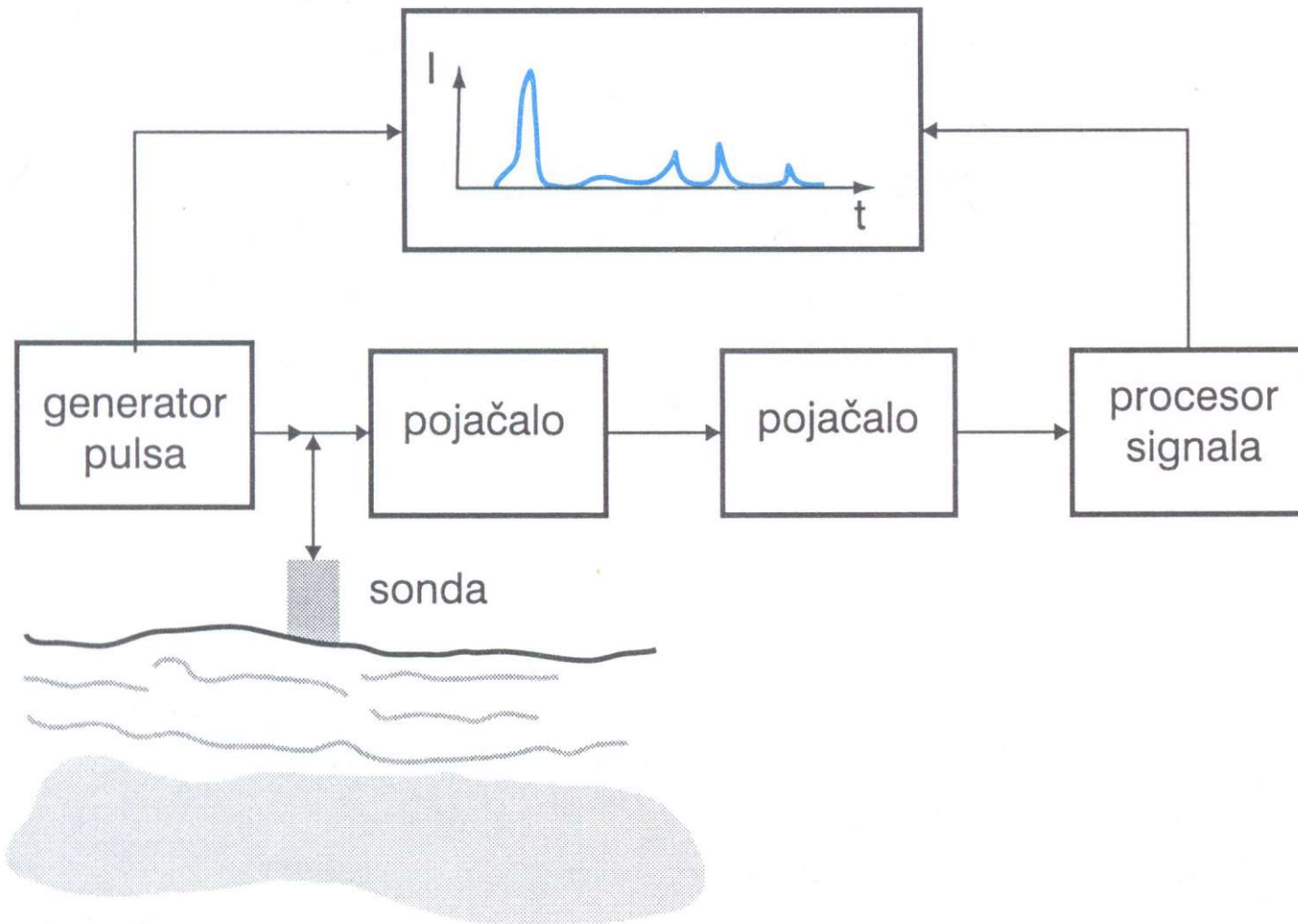
- ✓ voda ( $f = 1.5$  MHz, rezolucija 1-2mm)
- ✓ dječija kardiologija ( $f = 7$  MHz, rezolucija 0,5-1 mm)
- ✓ oftamologija (do  $f = 20$  MHz, rezolucija bolja od 0,1-0,2 mm)

## Načini prikazivanja signala

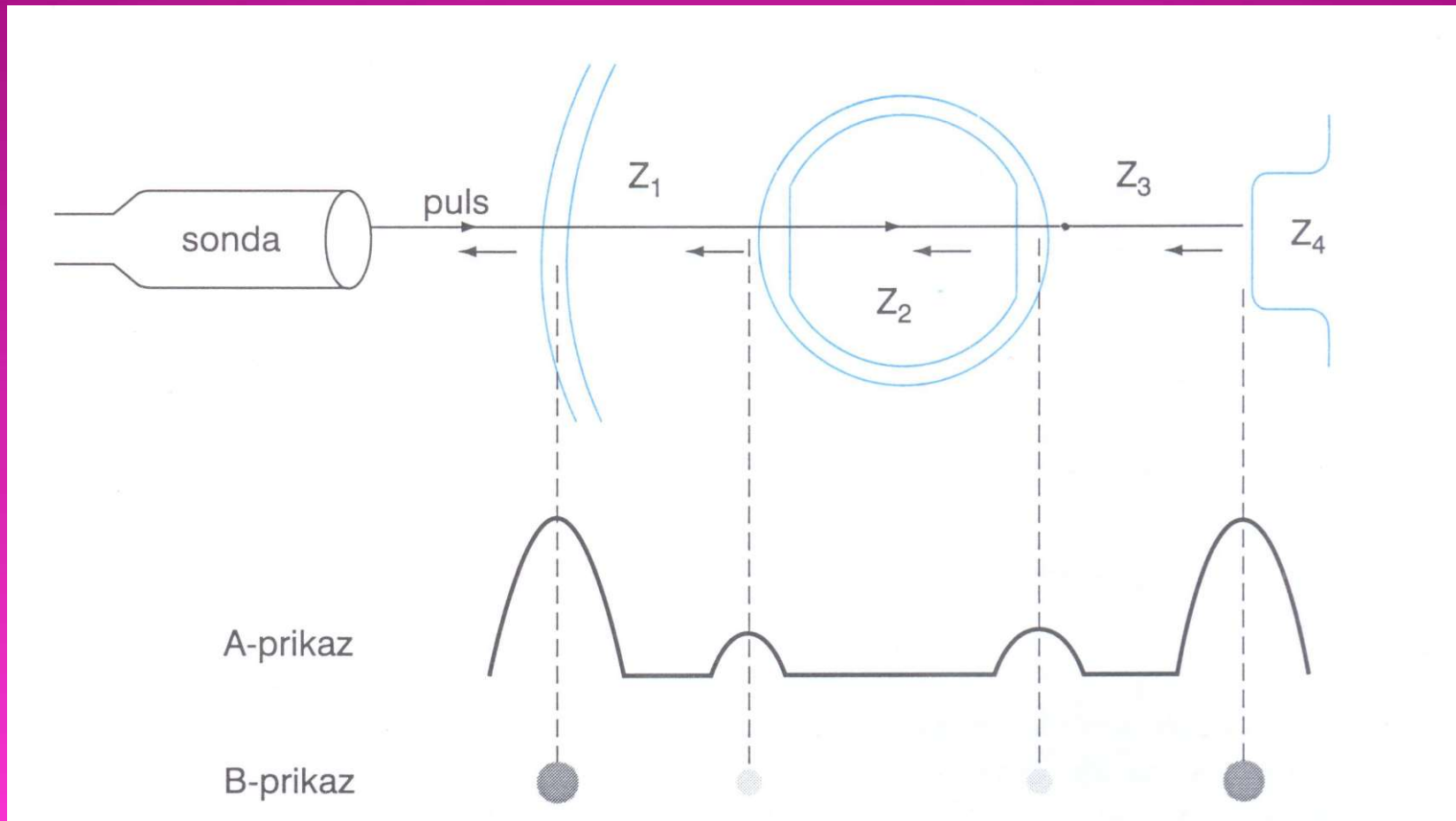
Nekoliko je načina prikazivanja reflektovanih ultrazvučnih talasa, koje prijemnik mjeri kao napon na piezoelektričnom kristalu.

### A-način prikaza

- ✓ Označava prikaz amplituda reflektovanih talasa u zavisnosti od vremena pobude prijemnika.
- ✓ Koristi se u oftamologiji za određivanje dimenzije oka u smjeru neke ose.

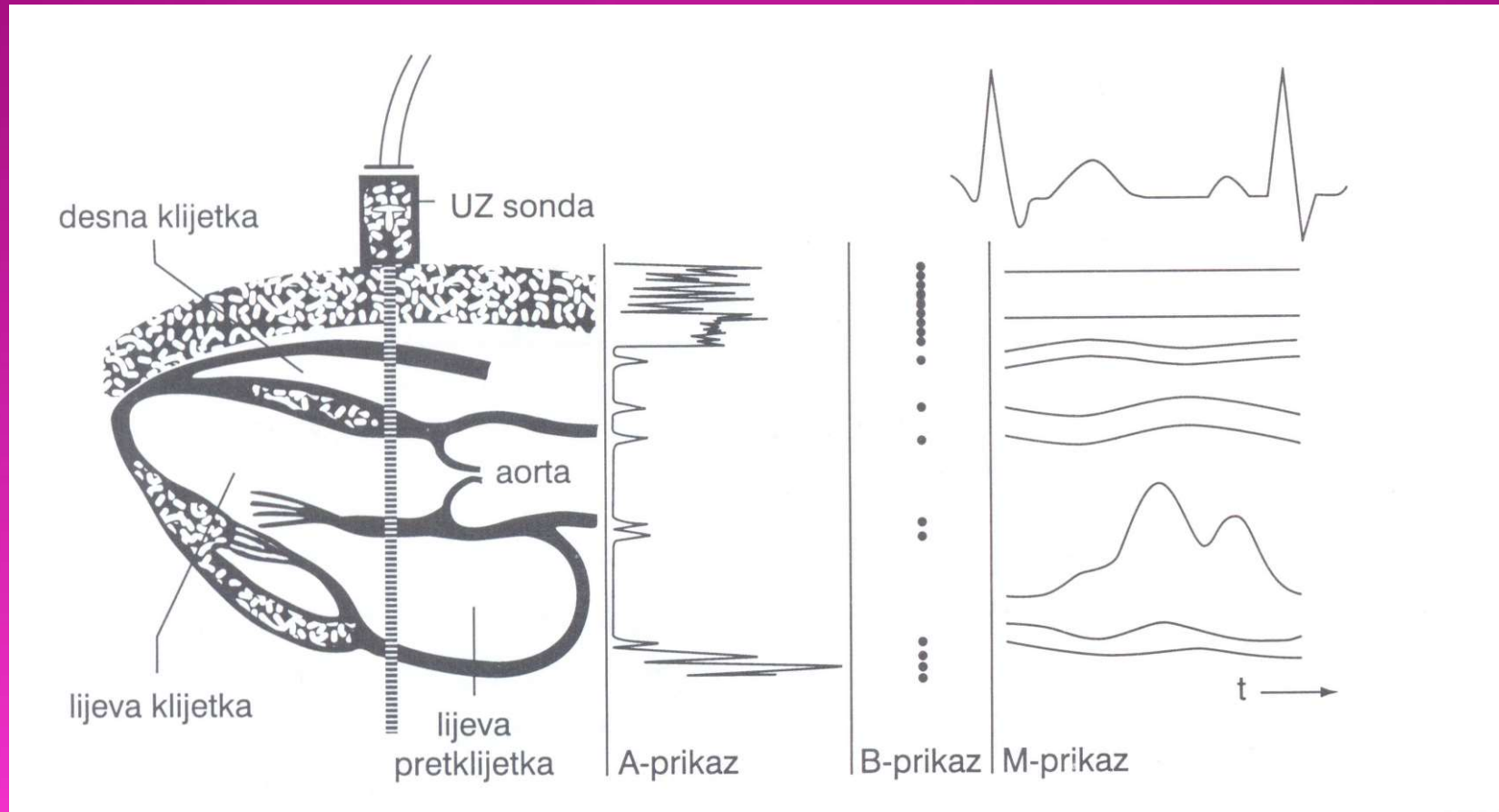


## B – način prikaza



□ B – način jeste prikazivanje ultrazvučne jeke kao tačke na ekranu osciloskopa.

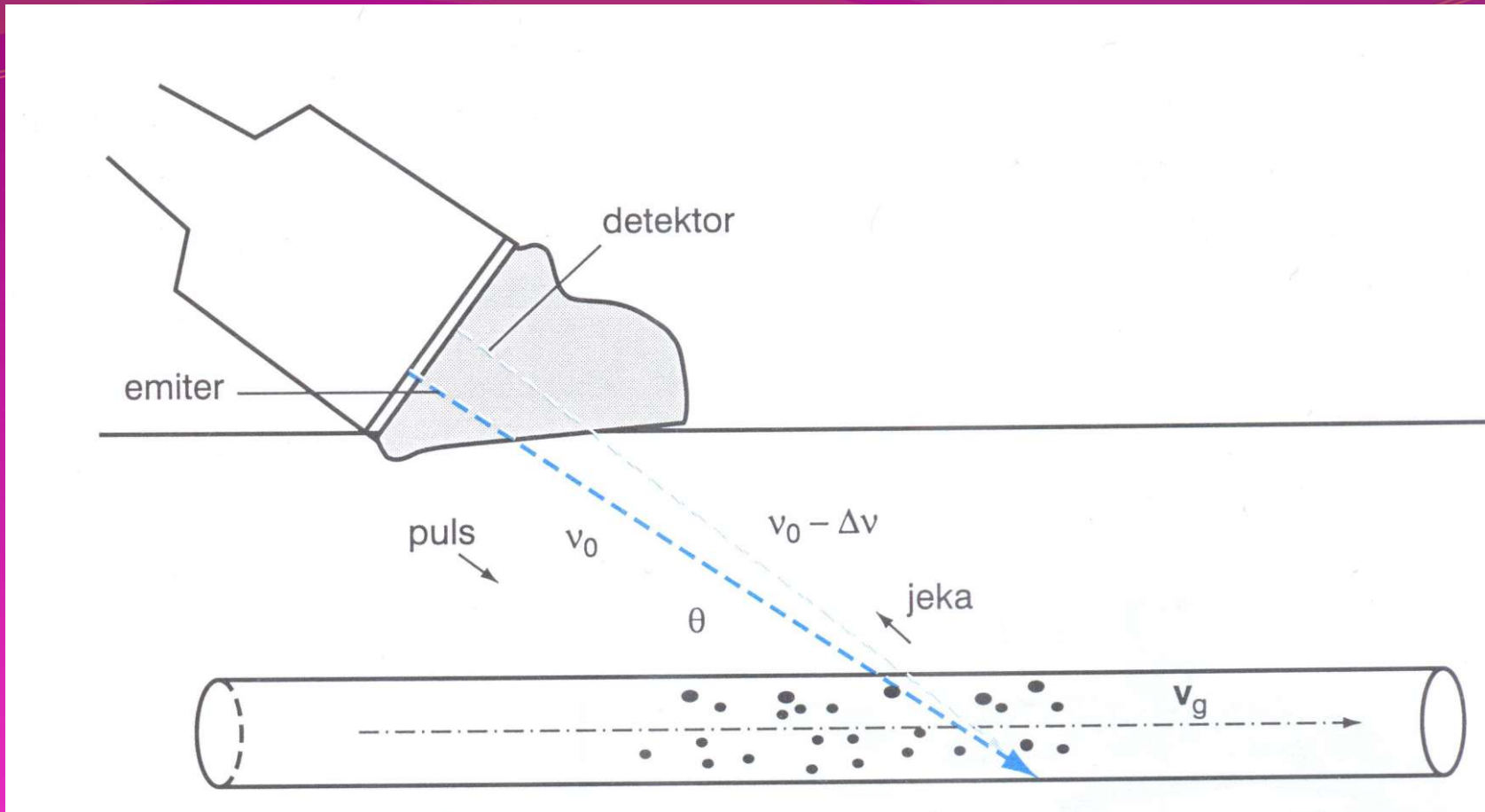
## M –način snimanja



□ M način je prikazivanje kretanja granice refleksije u funkciji vremena.

## Metoda mjerenja Dopplerova pomaka

- ❑ Mjerenjem promjene frekvencije reflektovanog talasa zbog Dopplerovog efekta mogu se dobiti informacije o kretanju unutrašnjih organa i o brzini protoka krvi.
  
- ❑ Promjeni frekvencije doprinosi samo ona komponenta kretanja granice refleksije koja je na pravcu prostiranja zvučnog talas.



$$\Delta f = f_0 \frac{2 \cdot v_g \cdot \cos \theta}{c}$$

❑ Za polagana i kompleksna kretanja M – način prikaza ima prednost nad upotrebom Dopplerovog pomaka.

❑ Za snimanje brzih kretanja, kao što je protok krvi, metoda mjerenja putem Dopplerova pomaka je apsolutni izbor !!!!

# ELASTOGRAFIJA

- **Klasični ultrazvuk nam govori kako tkivo izgleda. Elastografija nam govori kako se ono ponaša pod opterećenjem – odnosno koliko je tvrdo. To je, u suštini, digitalna palpacija dubokih organa.”**

## Šta je elastografija?

Neinvazivna metoda za procjenu **krutosti tkiva**

“Virtualna palpacija” pomoću ultrazvuka

- ◆ **Zašto je važna?**

Bolesti mijenjaju mehanička svojstva tkiva

Npr. jetra:

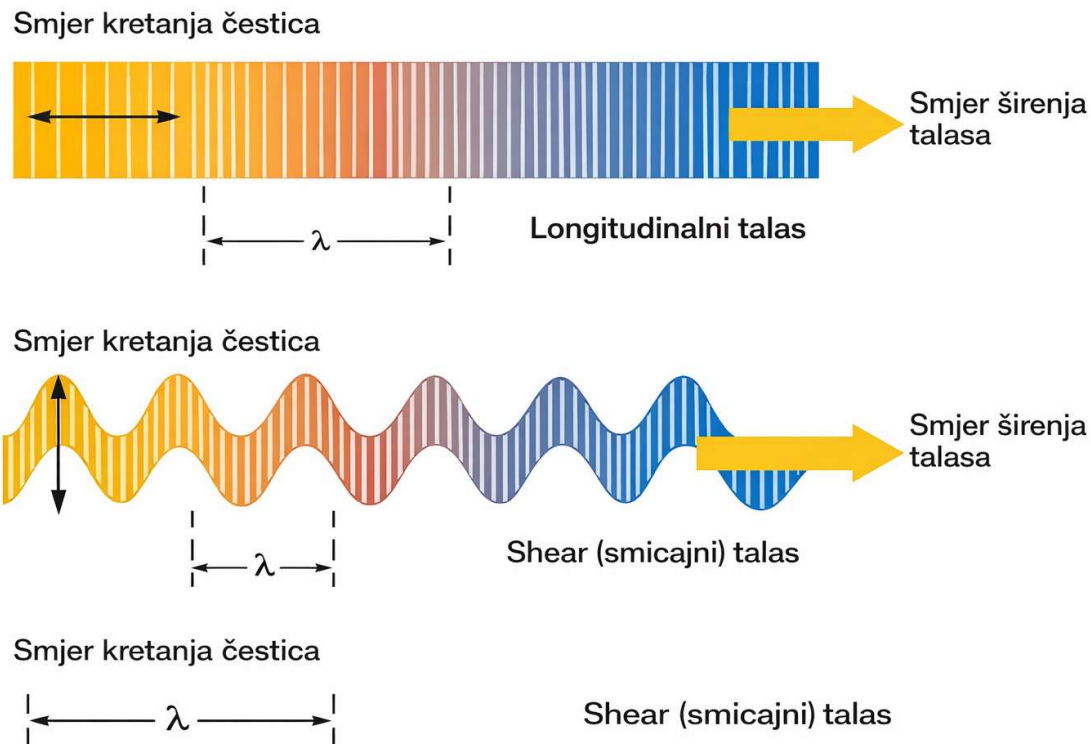
normalna → mekana

fibroza/cirroza → tvrda

- ◆ **Ključna ideja:**

- ➔ **Tvrđe tkivo → brže širenje shear talasa**





**Dva tipa talasa:**

**Longitudinalni → slika ( $\approx 1540$  m/s)**

**Shear wave → krutost (1–10 m/s)**

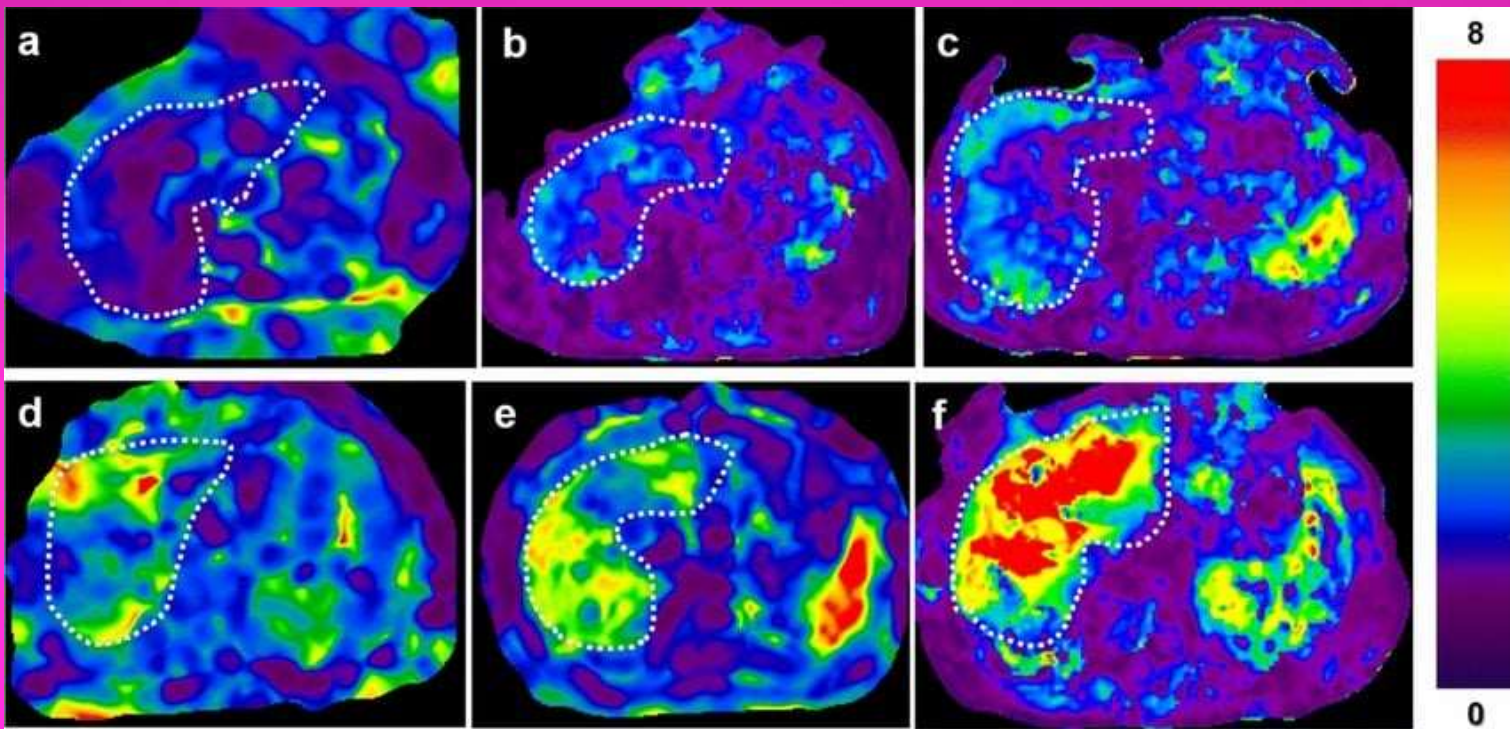
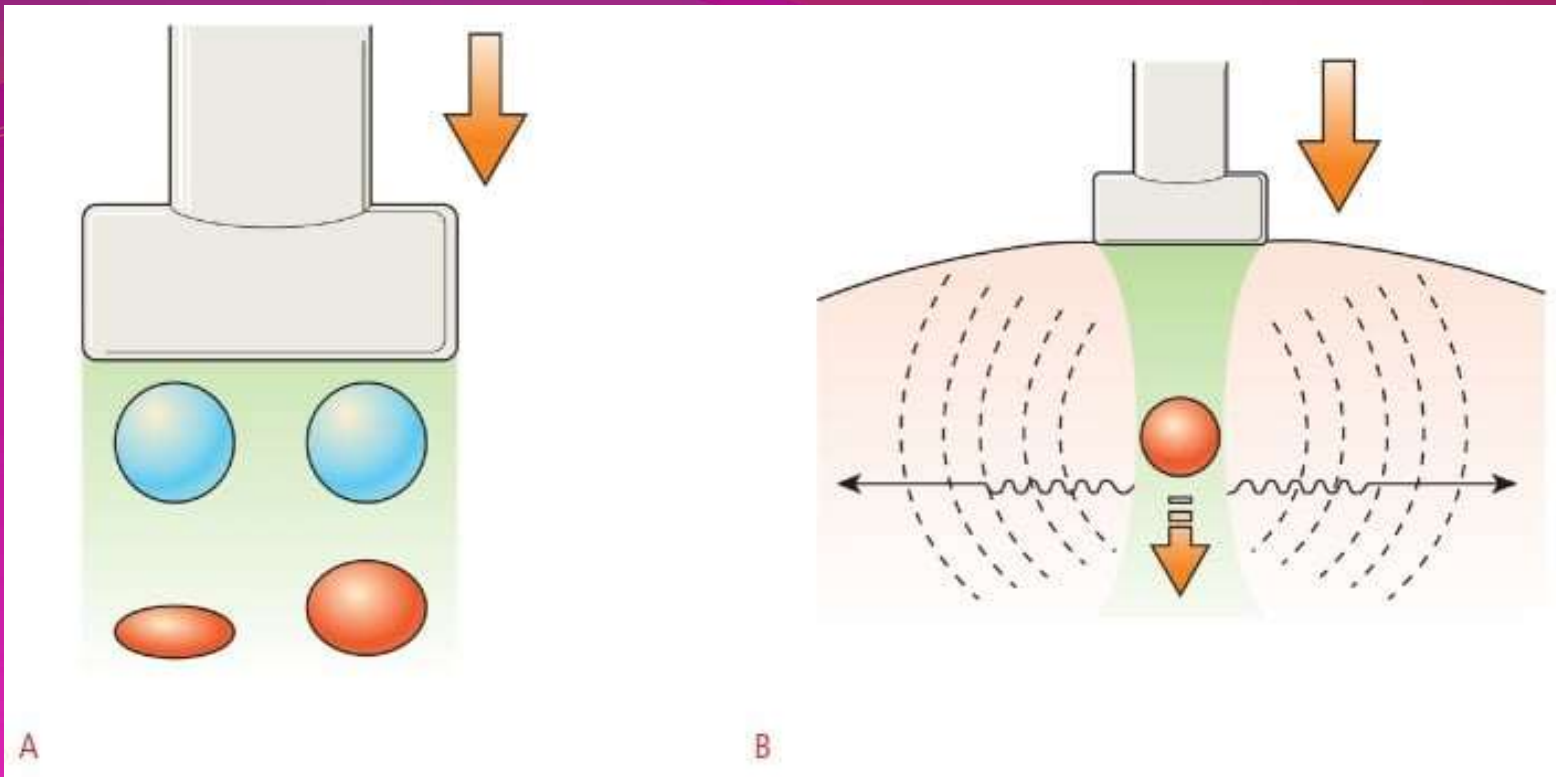
👉 **Zdravo tkivo = mekše**

👉 **Bolest (fibroza, tumor) = tvrđe**

**Rezultat se prikazuje:**

**u bojama (plavo = mekano, crveno = tvrdo)**

**ili numerički (kPa – kilopaskali)**



*Shear wave elastografija se zasniva na mjerenju brzine poprečnih talasa kroz tkivo. Ta brzina je direktno povezana sa modulom elastičnosti, odnosno Youngovim modulom.”*

Jednostavno:

brzina  $\uparrow$   $\rightarrow$  tvrdoća  $\uparrow$   
izražava se u kPa

Jetra (najvažniji primjer):

F0–F1  $\rightarrow$  mekana jetra

F2–F3  $\rightarrow$  umjerena fibroza

F4  $\rightarrow$  ciroza (tvrda jetra)

Tipične vrijednosti:

~5–6 kPa  $\rightarrow$  normalno

12–14 kPa  $\rightarrow$  ciroza

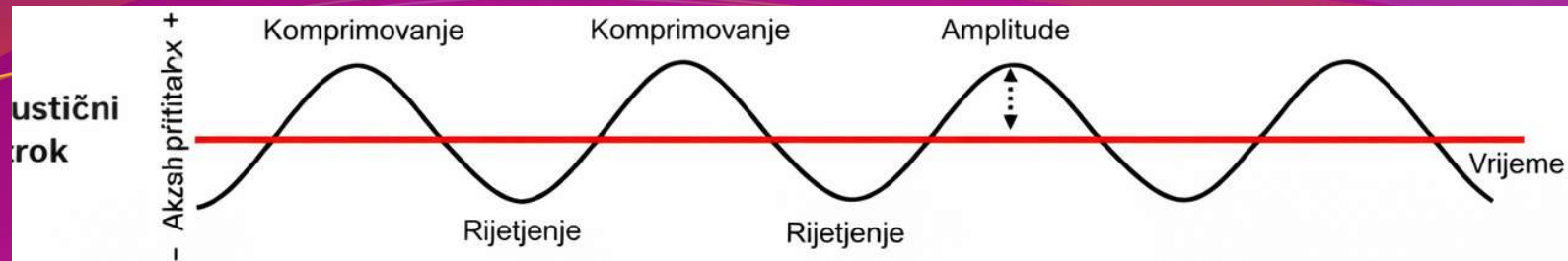
**“Zamislite želatinu i kamen. Ako pošaljemo talas kroz želatinu, on ide sporo jer se materijal lako deformiše. Kroz kamen talas ide brzo jer je materijal rigidan. Elastografija radi upravo to – mjeri koliko brzo talas prolazi kroz tkivo i iz toga zaključuje koliko je tkivo tvrdo.”**

## Biološka oštećenja

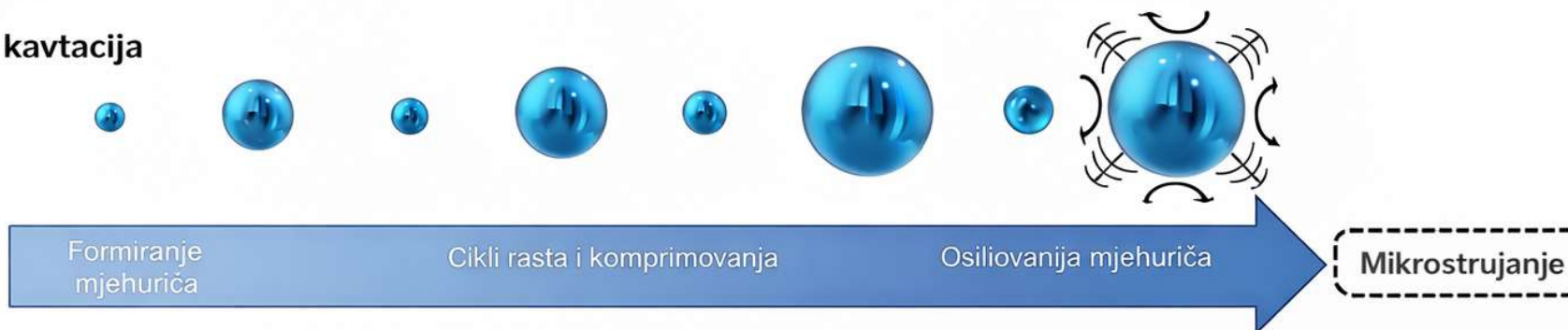
- Dijagnostički ultrazvuk je neškodljiv za metaboličke procese.
- U ultrazvučnoj dijagnostici nisu detektovani ni hemijski ni biološki efekti na tkivu.
- Da li ultrazvuk (ultrazvučna energija) može izazvati biohemijska oštećenja ???
  - ✓ depolimerizacija (izlaganje makromolekula silama koje uzrokuju prekid veza)
  - ✓ kavitacija (stvaranje mjehurića u tekućem mediju-nastanak slobodnih radikala)

Izlaganje fetalnih tkiva UZ bez lokalnog zagrijavanja za 1.5 C (temperatura pacijentice 37 C) neškodljivo

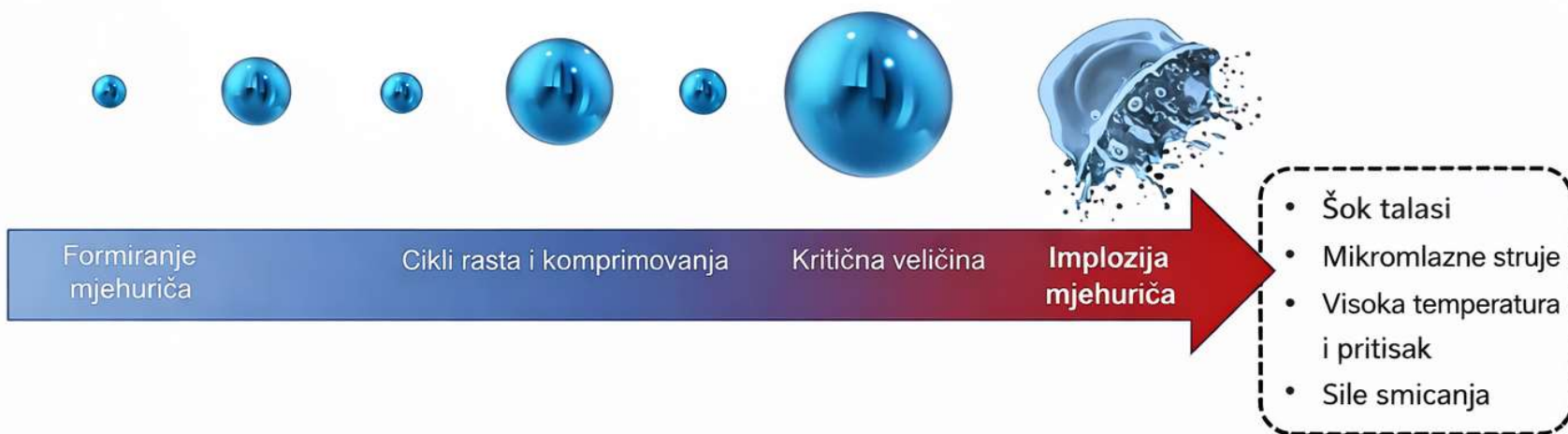
Povećanje od 4 C duže od 5min – potencijalno opasno!



### (A) Stablna kavtacija

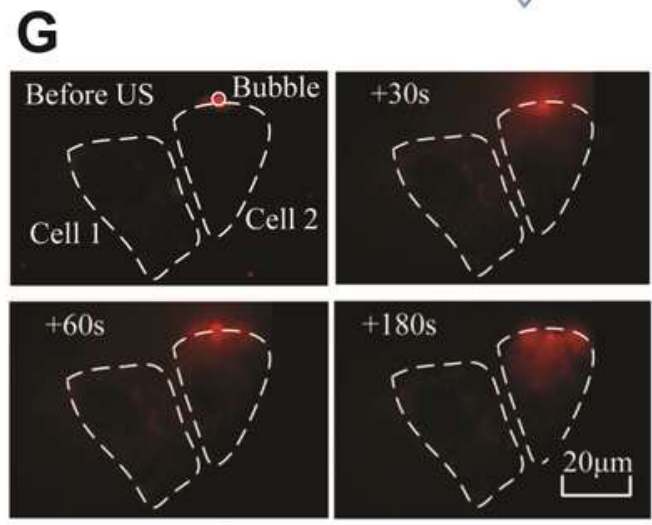
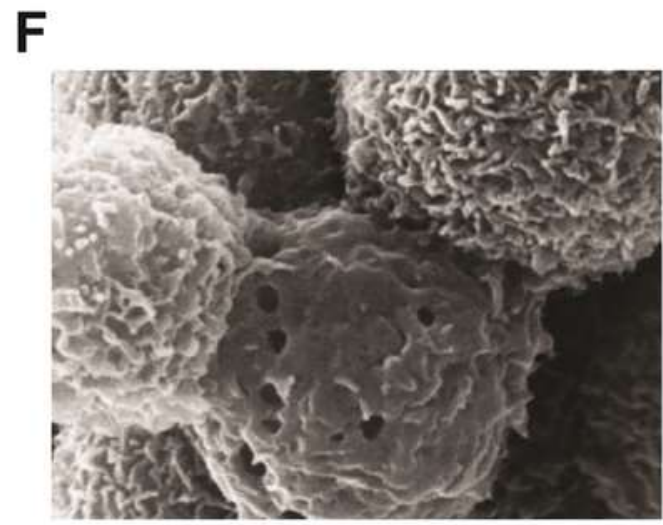
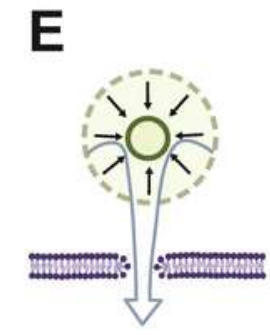
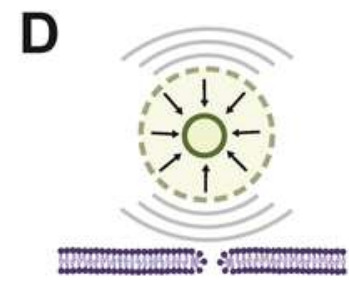
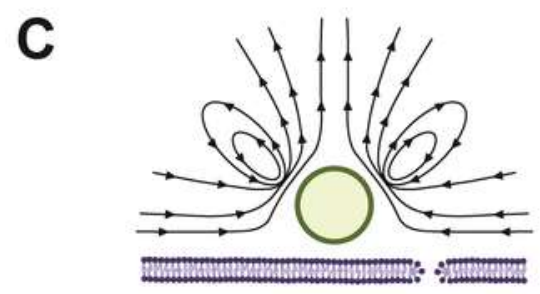
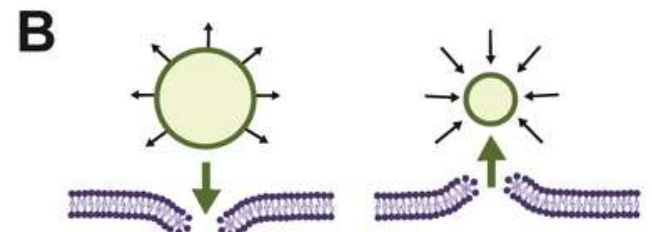
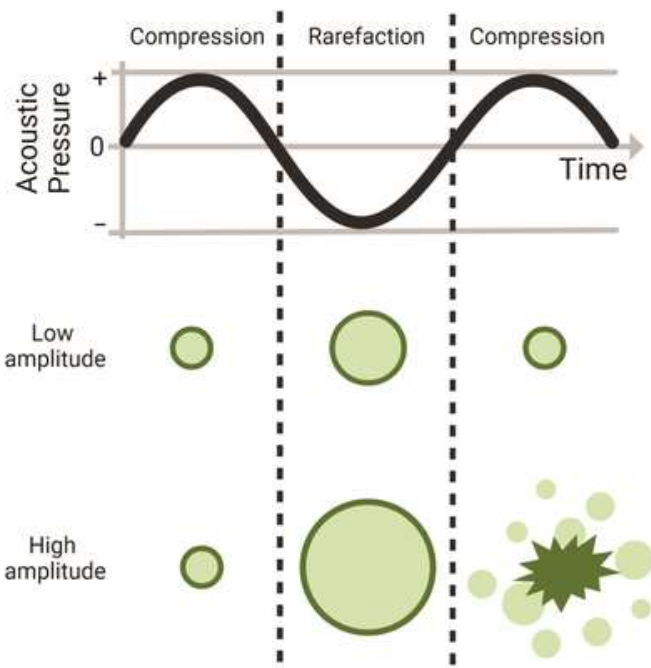


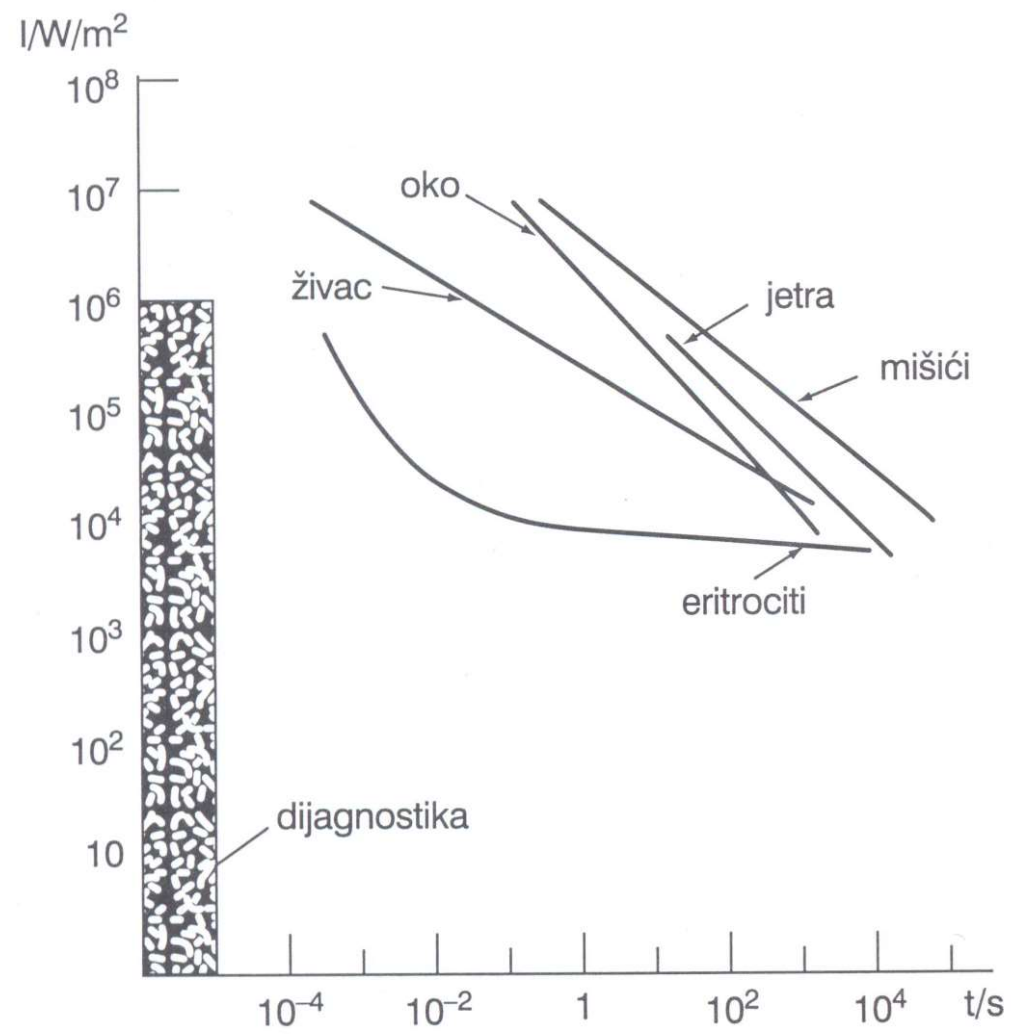
### (B) Inertna kavtacija



# A

## Ultrasound Acoustic Pressure Wave





**BIOS**  
RESEARCH GROUP

**BIOS**  
RESEARCH GROUP  
TUZLA



**BIOS**  
RESEARCH GROUP

## ŠKOLA BAZIČNOG ULTRAZVUKA ABDOMENA

### FIZIKA ULTRAZVUKA

prof.dr. Suad Kunosić

06.04.2026