



ŠKOLA BAZIČNOG ULTRAZVUKA ABDOMENA

FIZIKA ULTRAZVUKA

prof.dr. Suad Kunosić

05.10.2026

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 ??

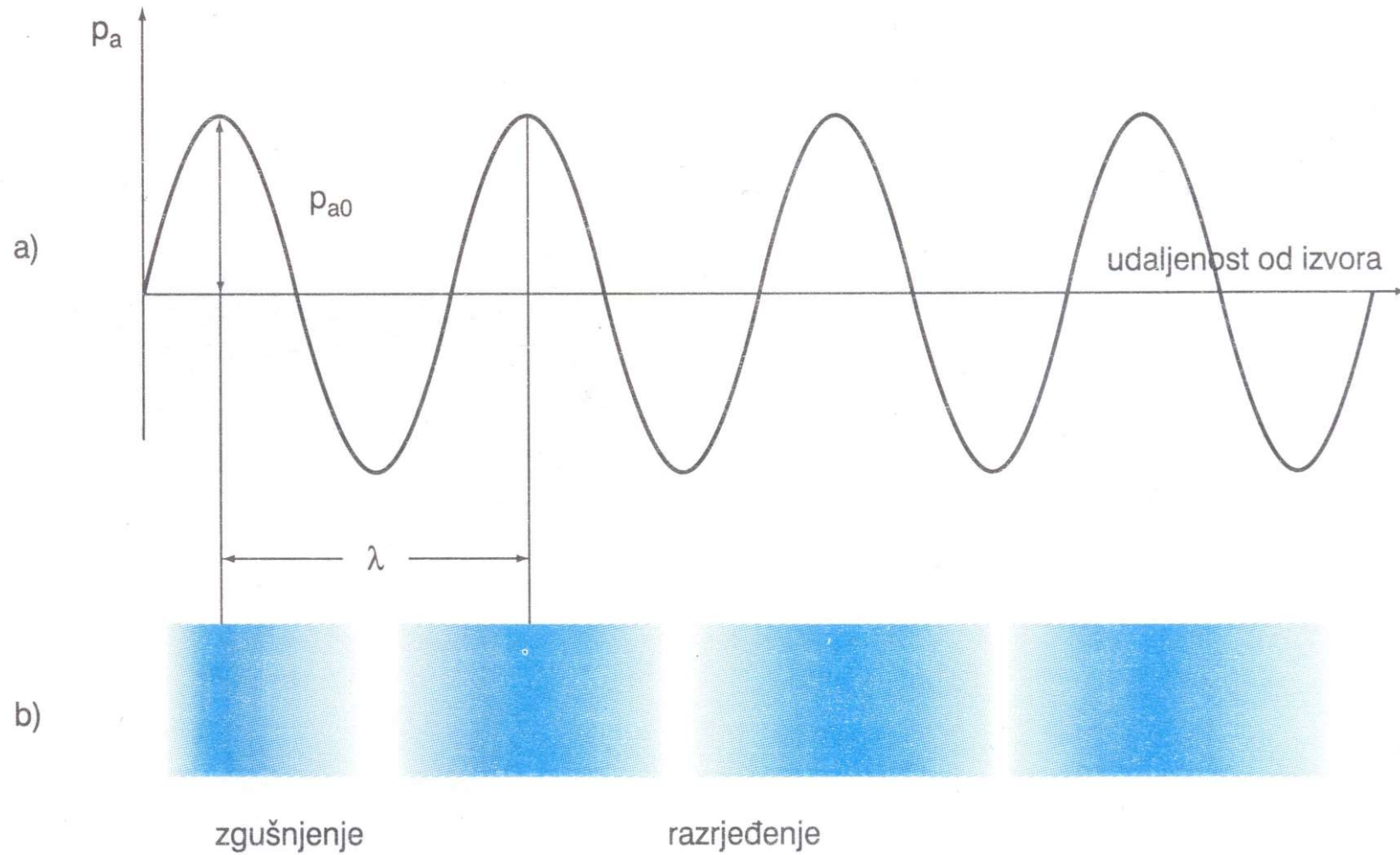
U ljudskom organizmu nema receptora za ovakve talase !!

- ❑ 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 kg/m^3	Brzina m/s	zvučni otpor $\text{kg/m}^2\text{s}$	α 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 !

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

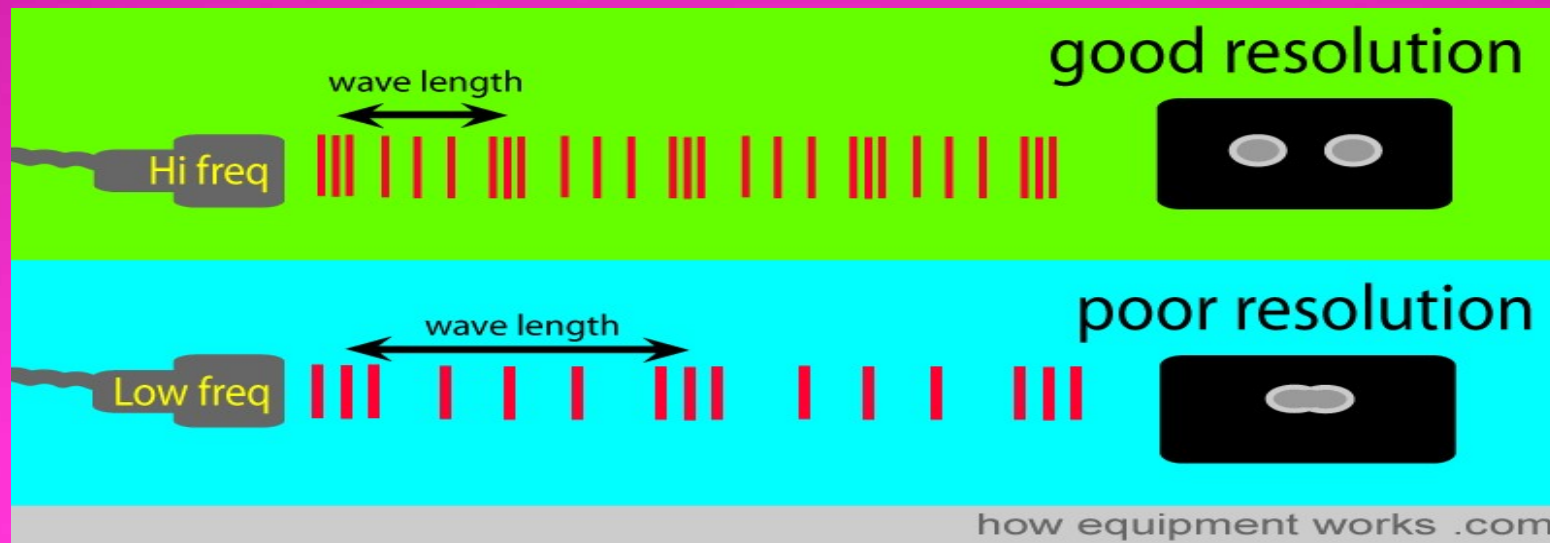
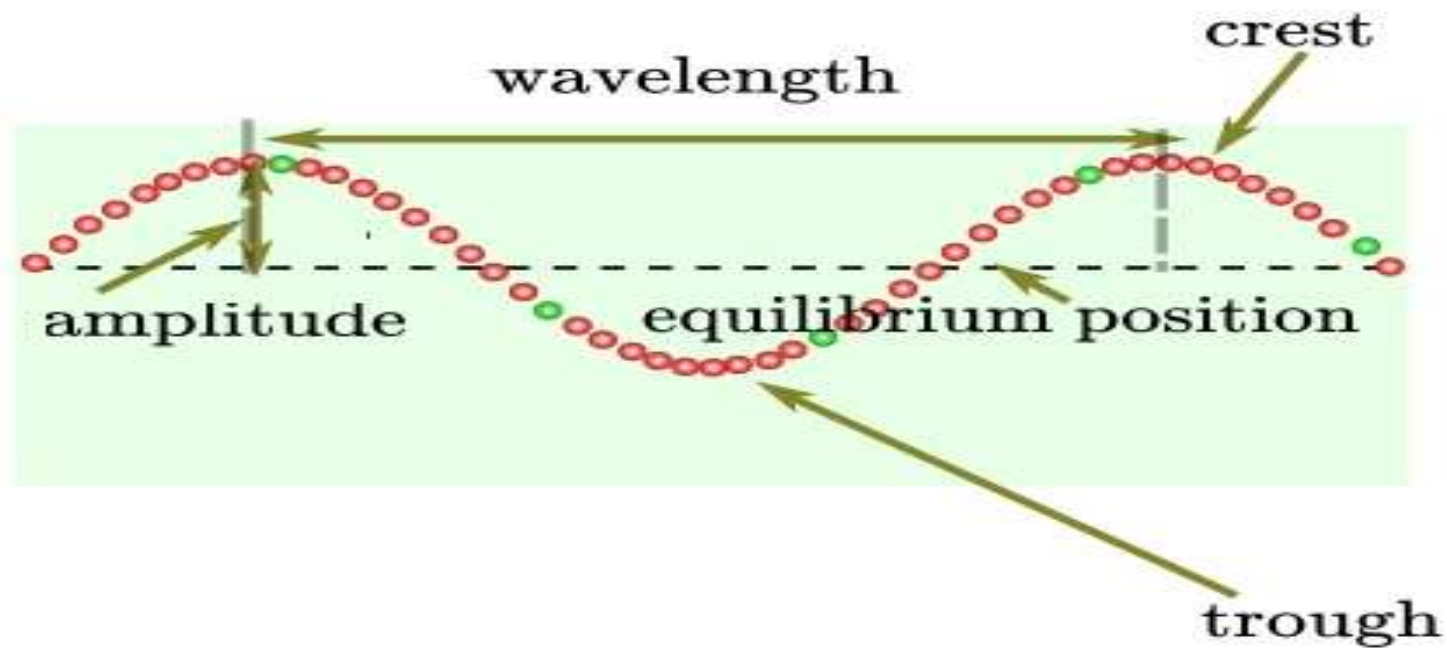
Intenzitet zvučnog talasa:

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

✓ 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.



JEDNAČINA ZVUČNOG TALASA

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

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

Harmonijski !!!

PROMJENA PRITISKA U SREDINI KROZ KOJU SE ŠIRI ZVUČNI TALAS

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

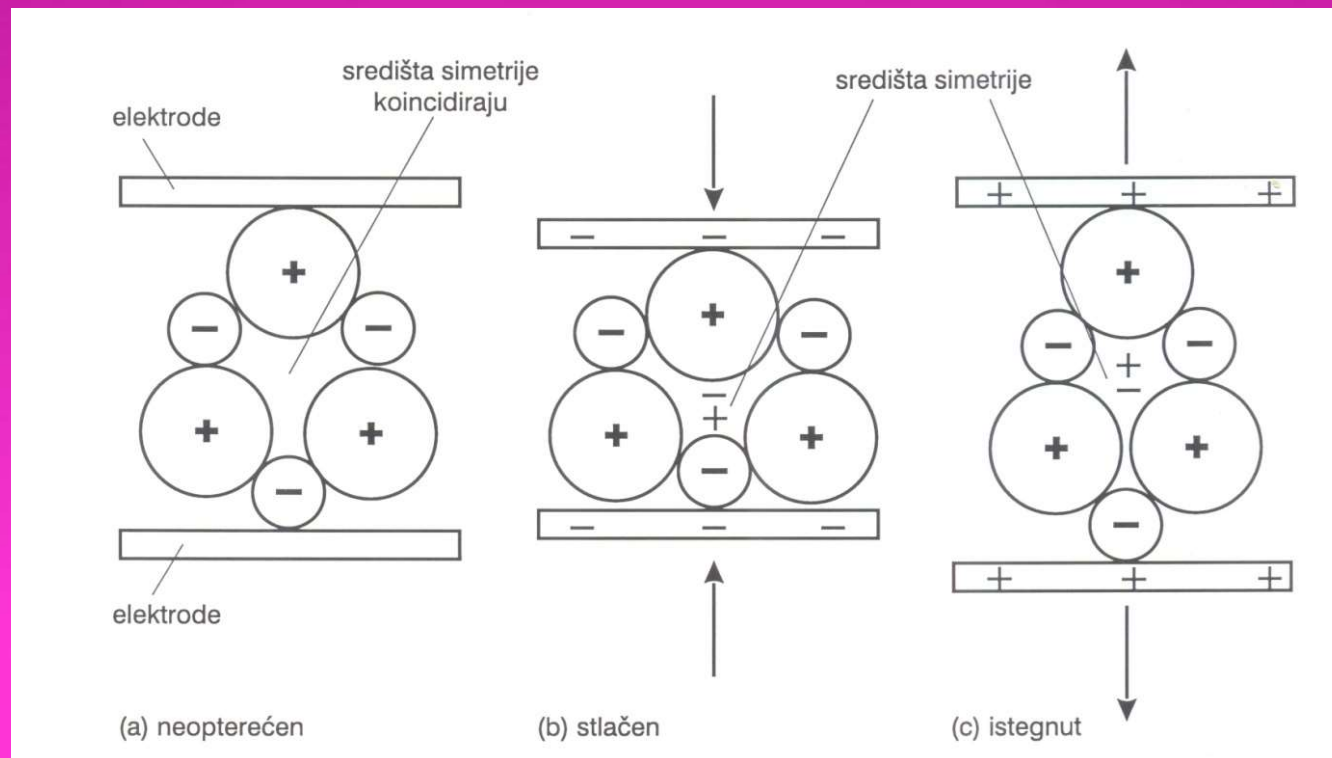
$$p = p_0 + p_{a0}$$

- ☐ U dijagnostici se koristi ultrazvuk intenziteta u intervalu između 10 i 10^3 W/m^2

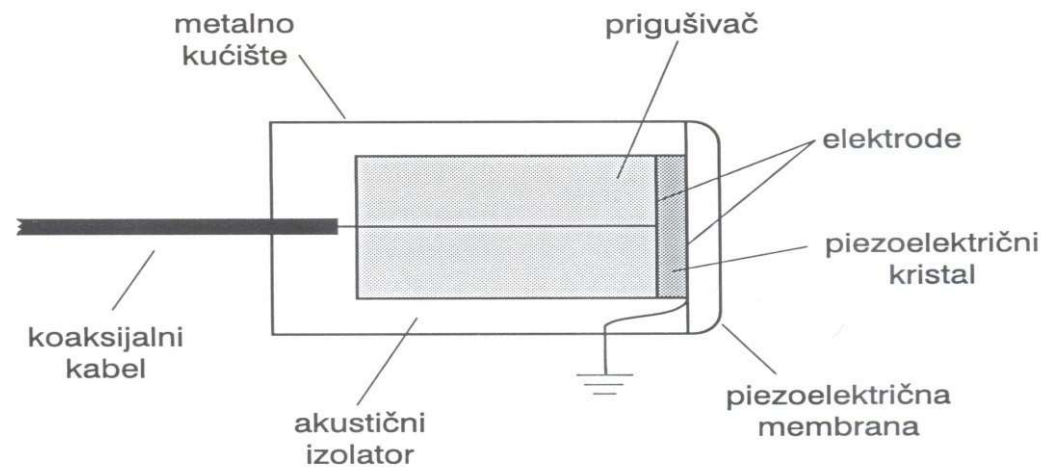
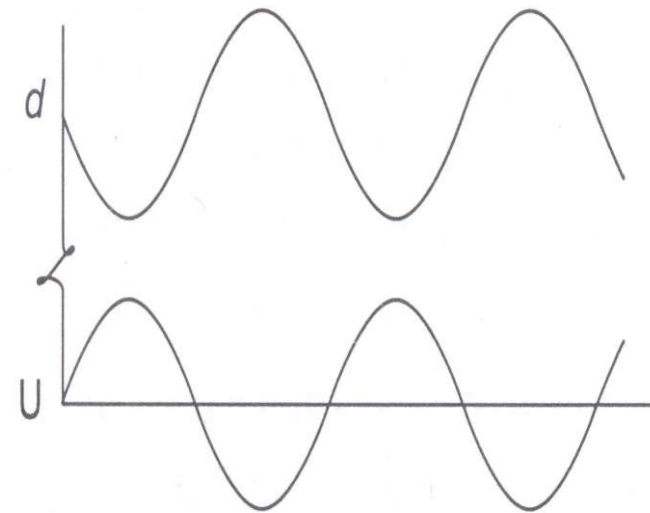
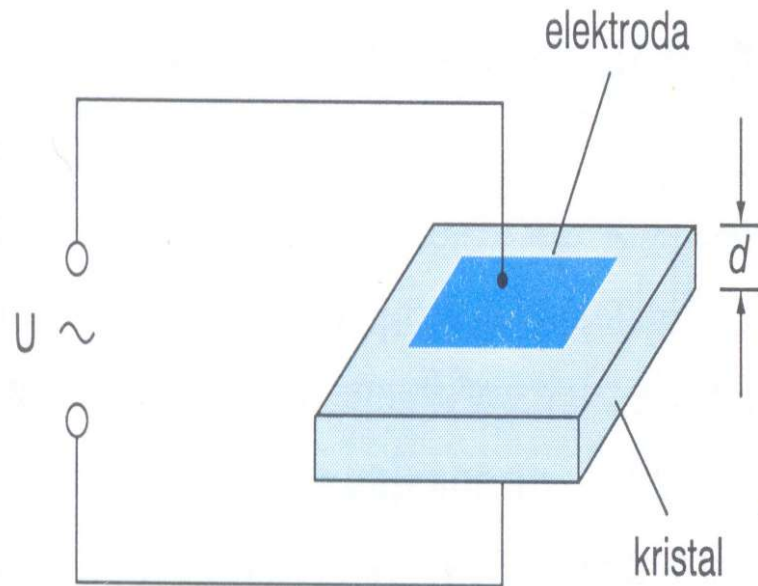
Generator ultrazvuka

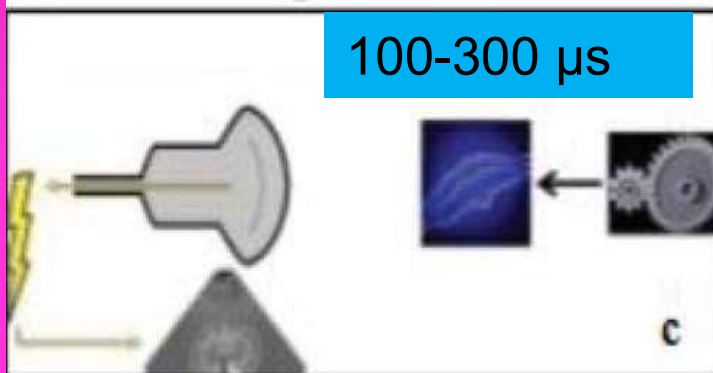
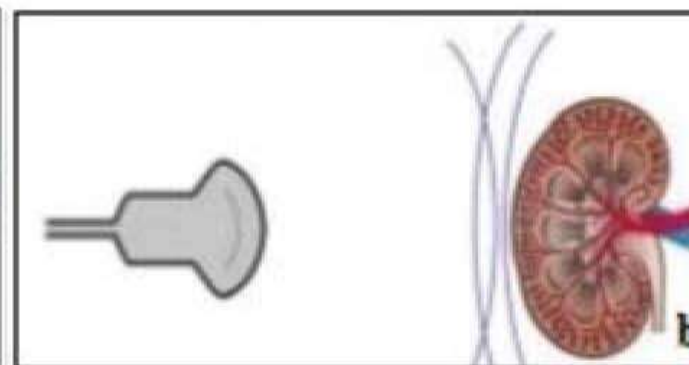
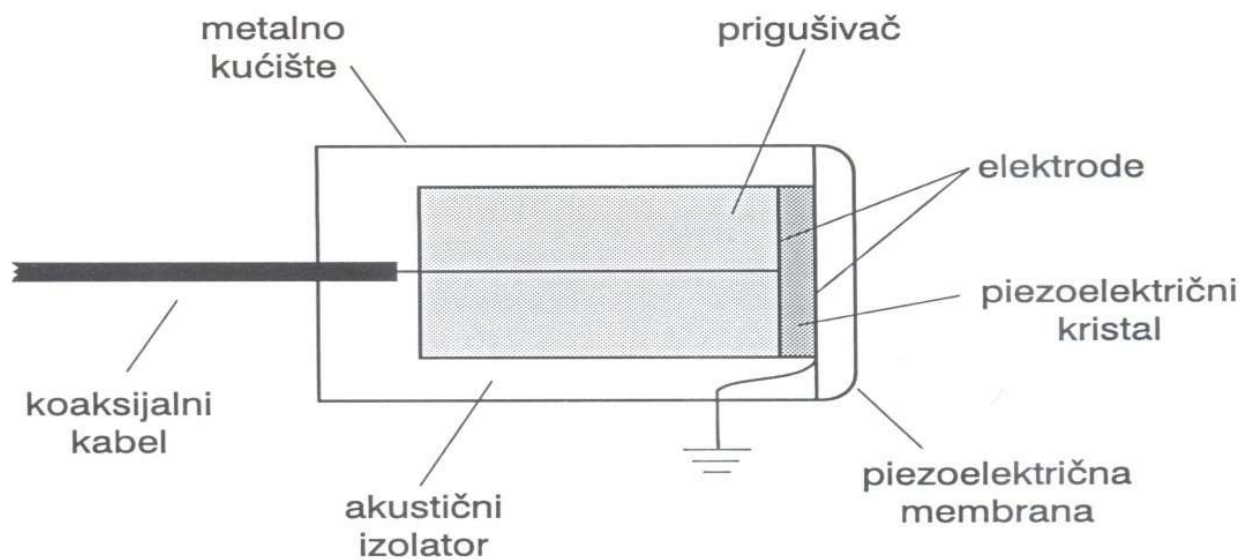
❑ Šta su izvori ultrazvučnih talasa ??

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



Generator ultrazvuka





$195 \mu s$

$1-10 \text{ kHz}$

- ✓ 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)*

- ✓ Najveća piezoelektrična osjetljivost ($d_{33} = 1500\text{--}2800 \text{ pC/N}$)
- ✓ Vrlo visok coupling faktor ($k_{33} \approx 0.90$) !!!!!
- ✓ Širok frekvencijski opseg - izuzetno fina rezolucija slike, posebno kod visokih frekvencija.
- ✓ Savršen za 3D/4D sonde –kardio –intravaskularne- visoko rez dijagnost

osjetljiviji na temperaturu (Curie oko 130°C).

(GE, Philips, Siemens).

❖ *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.

Iako se obrađuje u različite geometrije - kombinuje sa matching slojevima i backing materijalima za optimizaciju slike.

Niža osjetljivost od PMN-PT i sadrži olovo
medicinske sonde — abdominalne, ginekološke, karotidne, opšte dijagnostika

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

Zašto je revolucionaran

-kombinuje PMT-PT kristal i nisku akustičnu impedancu epoksija –bolji prenos energije u tkivo!!!

Širok bandwidth (spektar f) i mala refleksija –bolja oštrina i dublja slika

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 apsorpcije:

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

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

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

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

Koeficijent apsorpcije, 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)

✓ **apsorbacije** (apsorbacija 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?

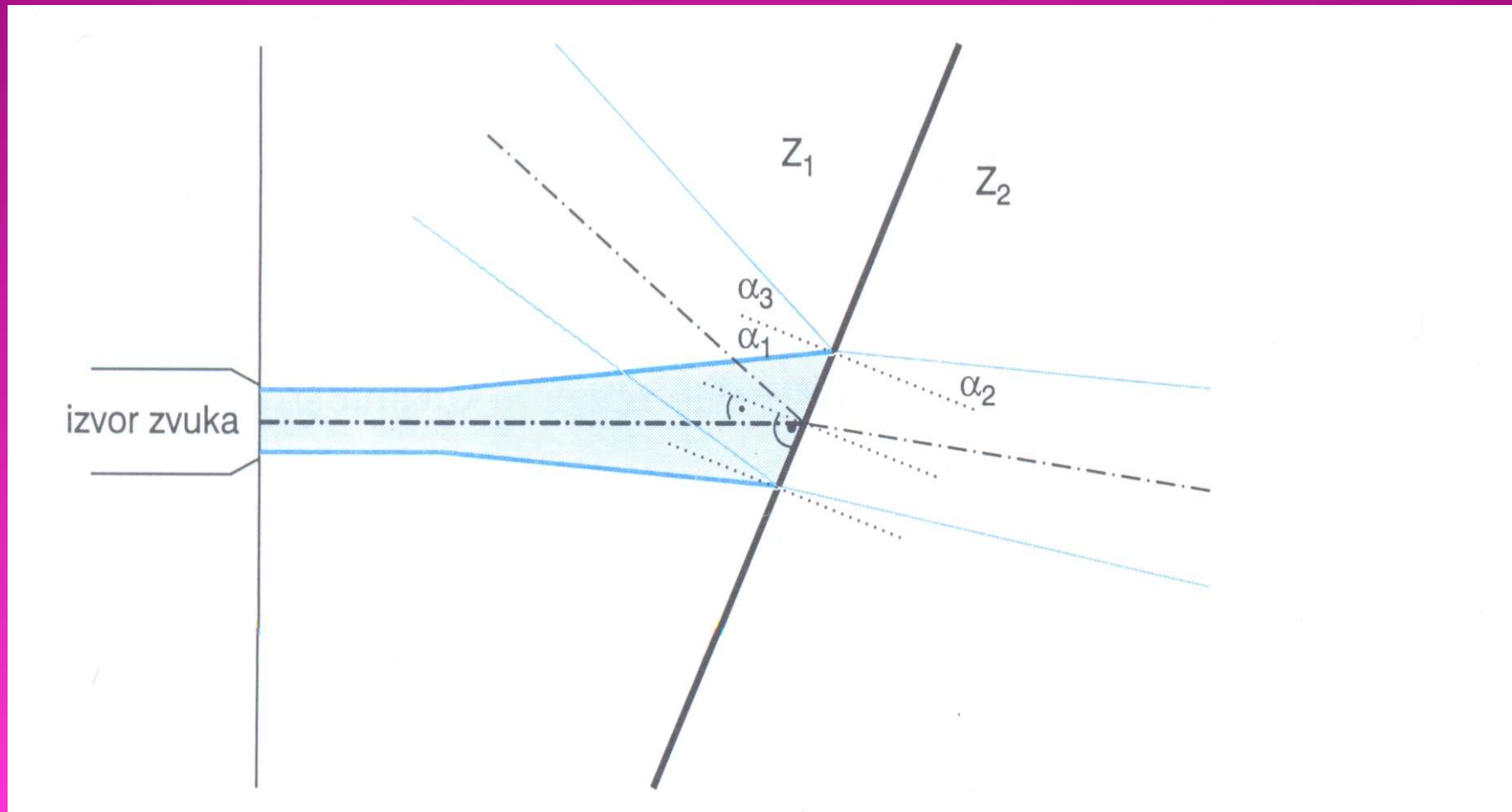
Širenje UZ talasa pod ovim uslovima zavisi o akustičnom otporu (impedanciji) tkiva i kada je razlika veća biće slabija transmisija, veća refleksija i koncentracija toplote na mjestima gdje se spajaju reflektovani i nadolazeći talasi !!!

❑ 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:

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

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° , samo se okomite komponente talasnih oscilacija mijenjaju na granici dvije sredine.

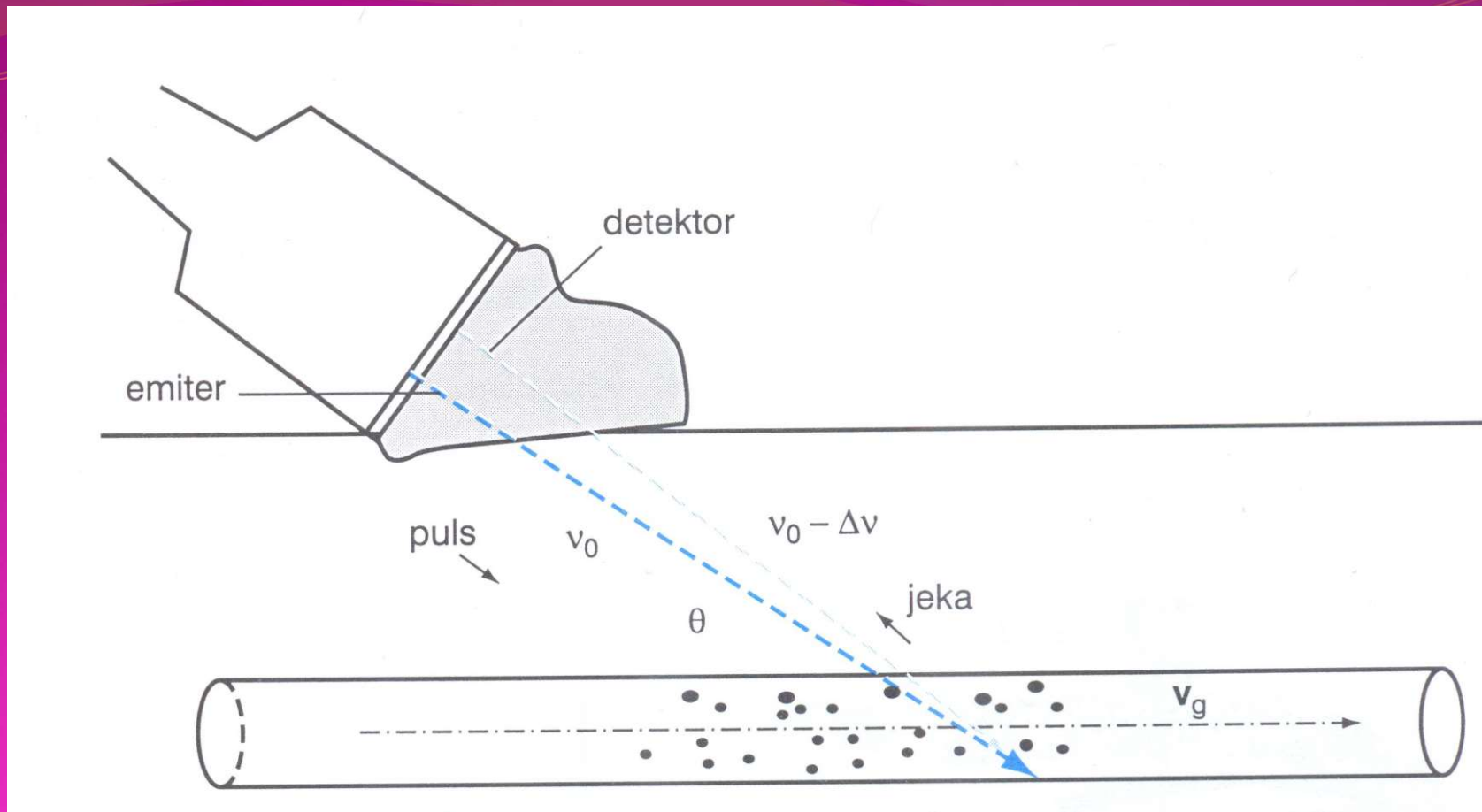
□ Snažna refleksija:

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

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

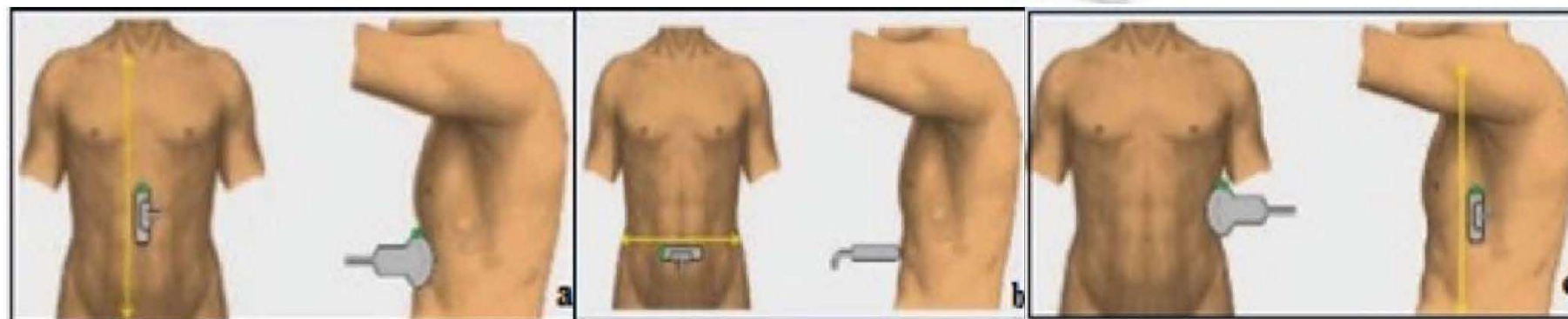
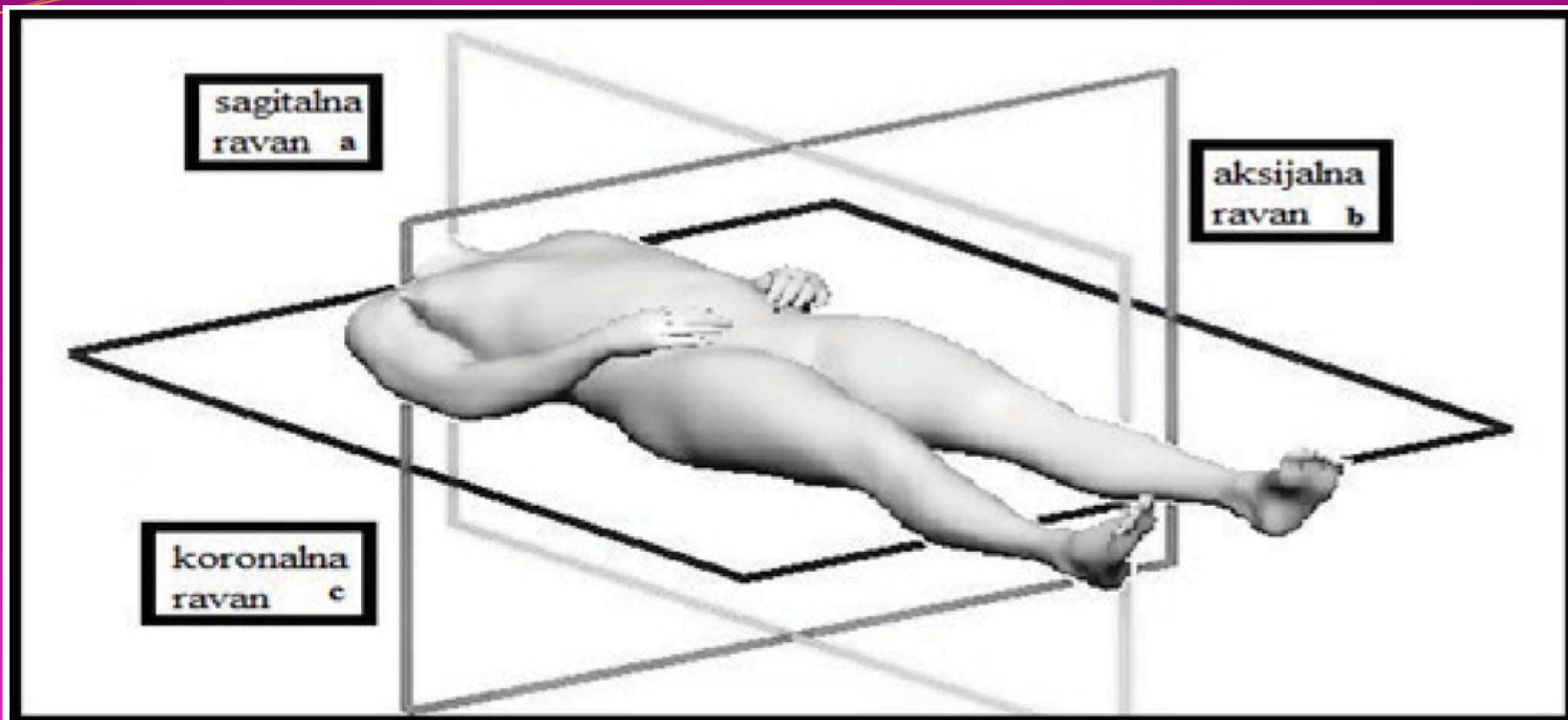
□ Šta određuje stepen prijenosa energije ?

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 pulsu UZ talasa da od sonde dođe do reflektujuće površine unutar tkiva i natrag.

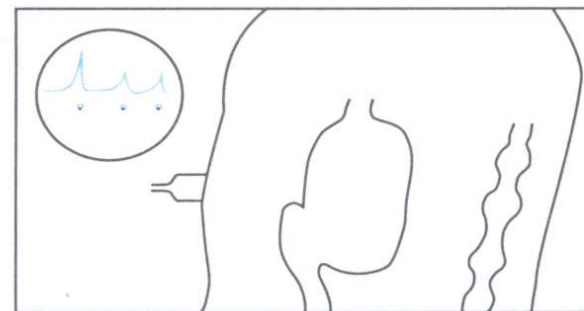
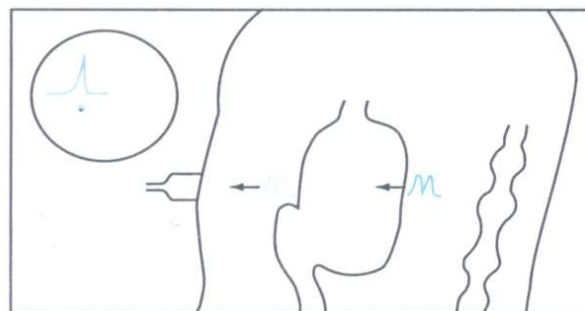
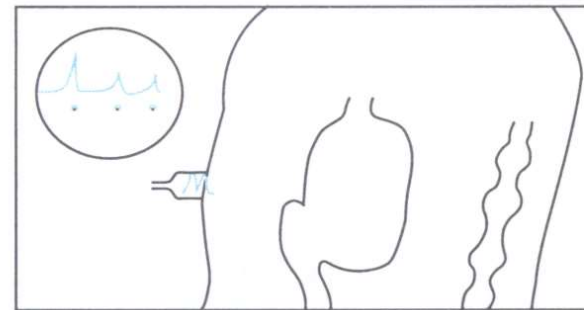
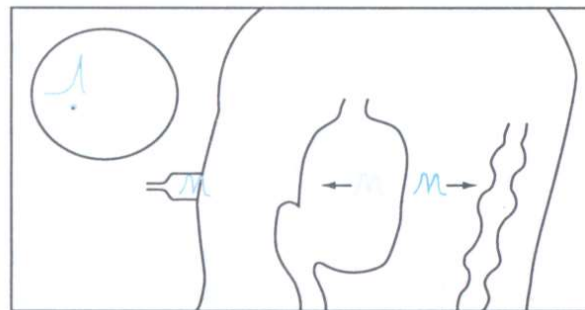
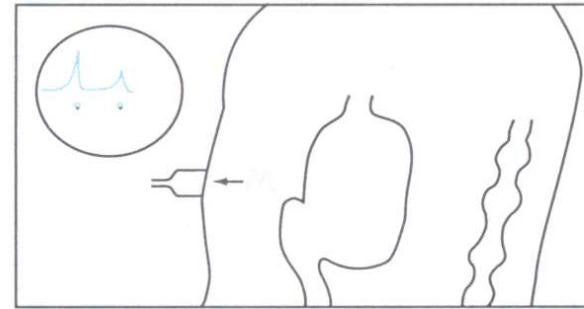
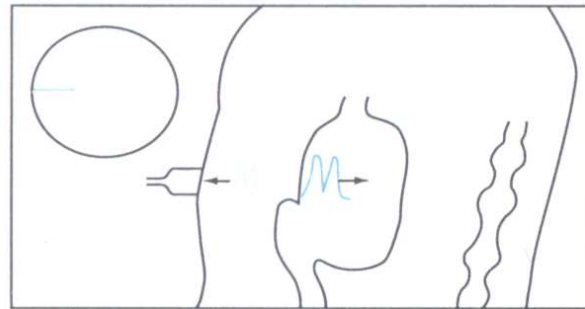
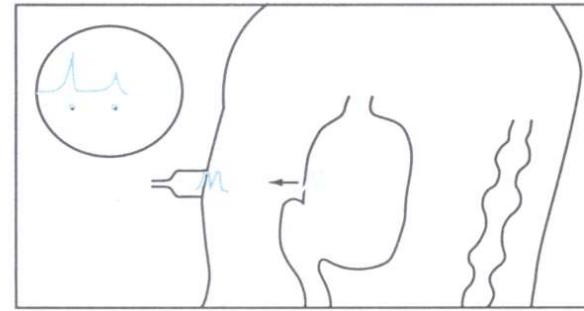
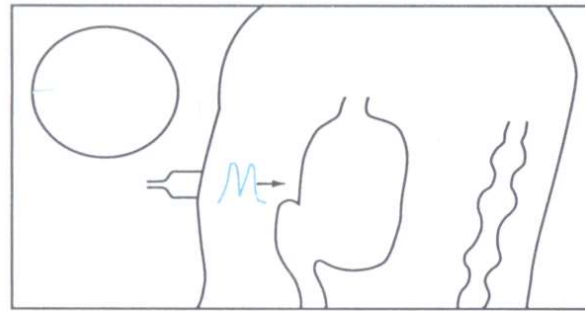
❑ ***Od čega zavise intenzitet i amplituda reflektovanog talasa ??***

Intenzitet (o razlici u zvučnim otporima granice refleksije)

Amplituda (i o apsorbciji zvučne energije na putu prostiranja)

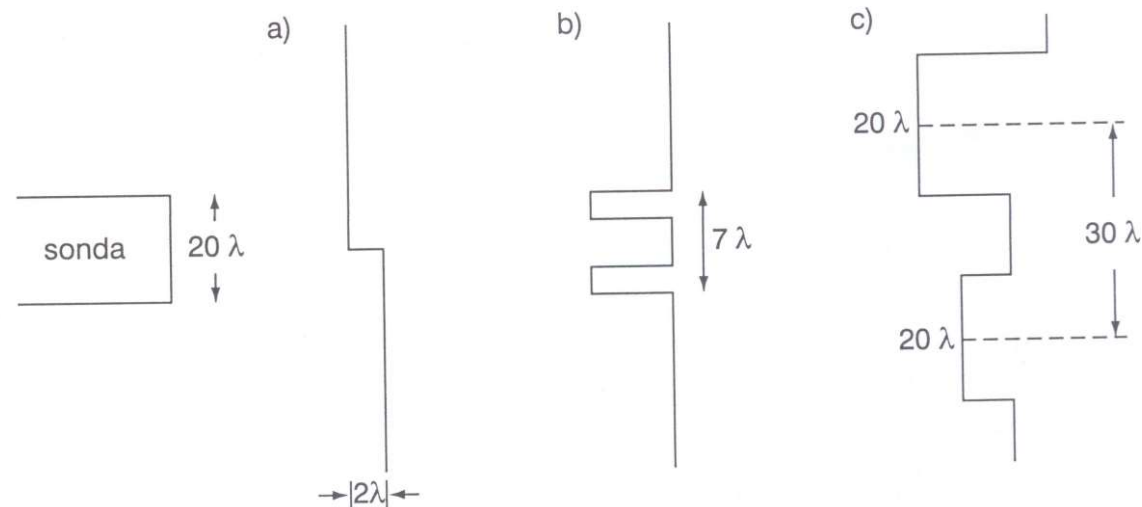
❑ ***Šta ima neprocjenjivu vrijednost u ovoj dijagnostičkoj metodi ??***

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



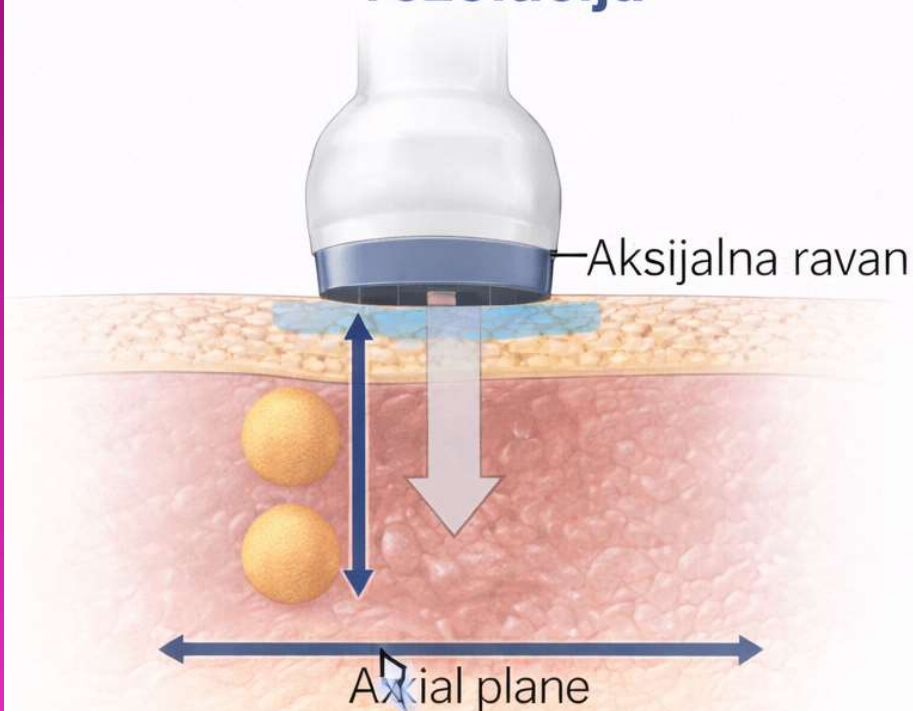
Rezolucija pri snimanju metodom jeke

- ❑ 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 μm .
- ❑ 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.



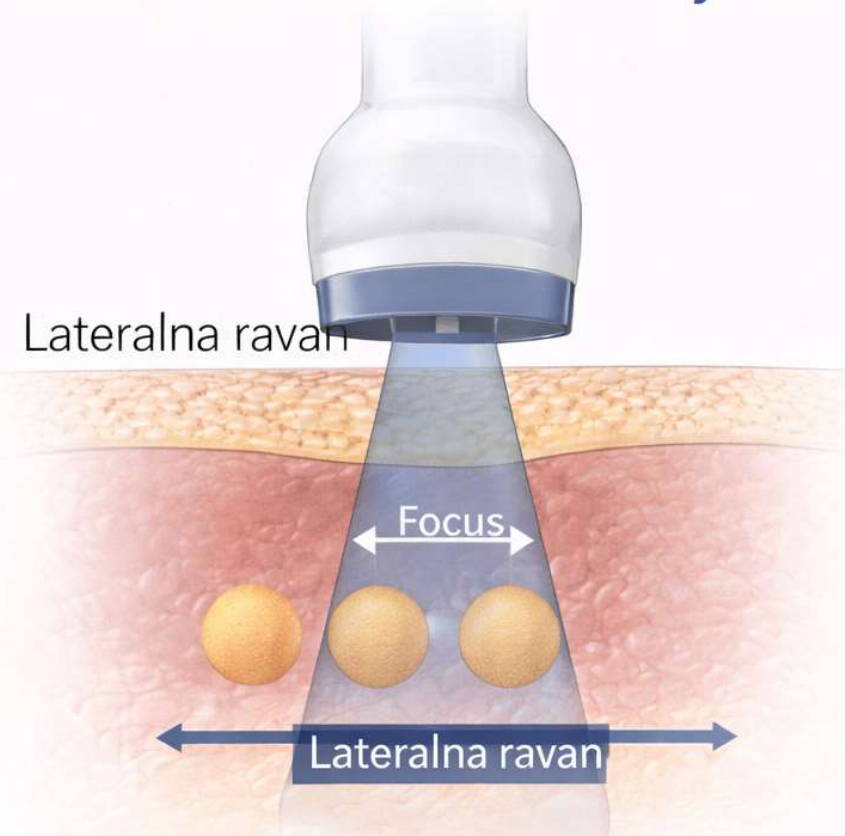
- ☐ Longitudinalna rezolucija (određena: λ , d)
- ☐ Lateralna rezolucija zavisi od širine UZ snopa
- ☐ Za velike strukture

Aksijalna (Longitudinalna) rezolucija



Sposobnost razlikovanja objekata jedan iznad drugog

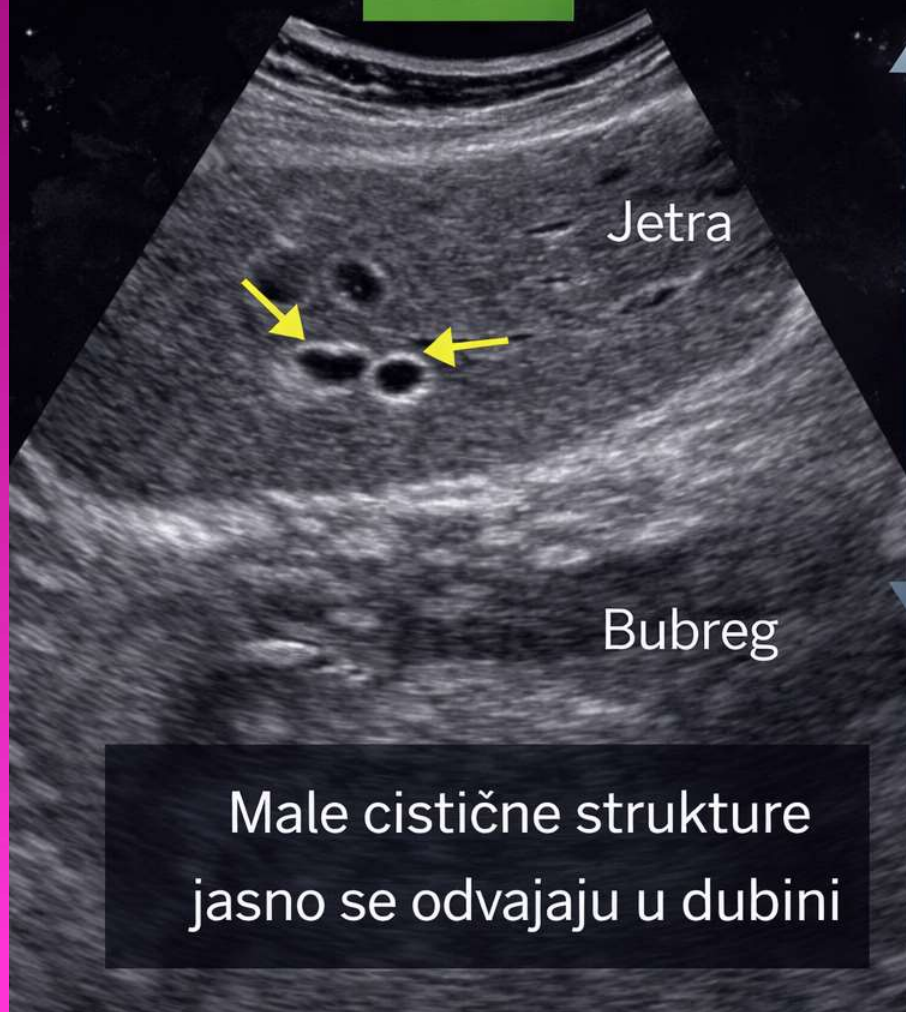
Lateralna rezolucija



Sposobnost razlikovanja objekata jedan pored drugog

Aksijalna rezolucija

Dobar!



Lateralna rezolucija

Loš!



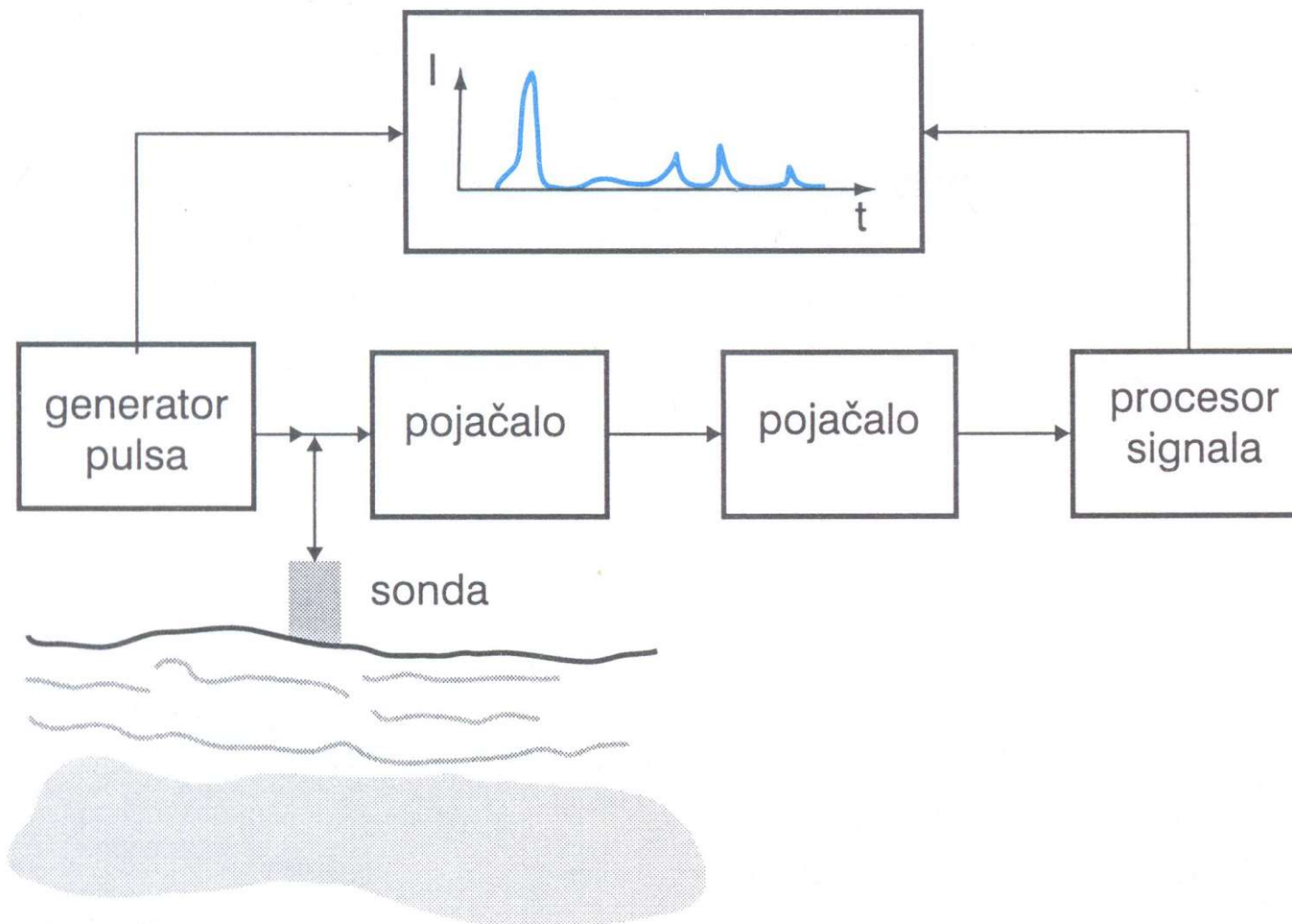
- ✓ voda ($f = 1.5$ MHz, rezolucija 1-2mm)
- ✓ dječija kardiologija ($f = 7$ MHz, rezolucija 0,5-1 mm)
- ✓ oftamologija (do $f = 20$ MHz, rezolucija bolja od 0,1-0,2 mm)

Načini prikazivanja signala

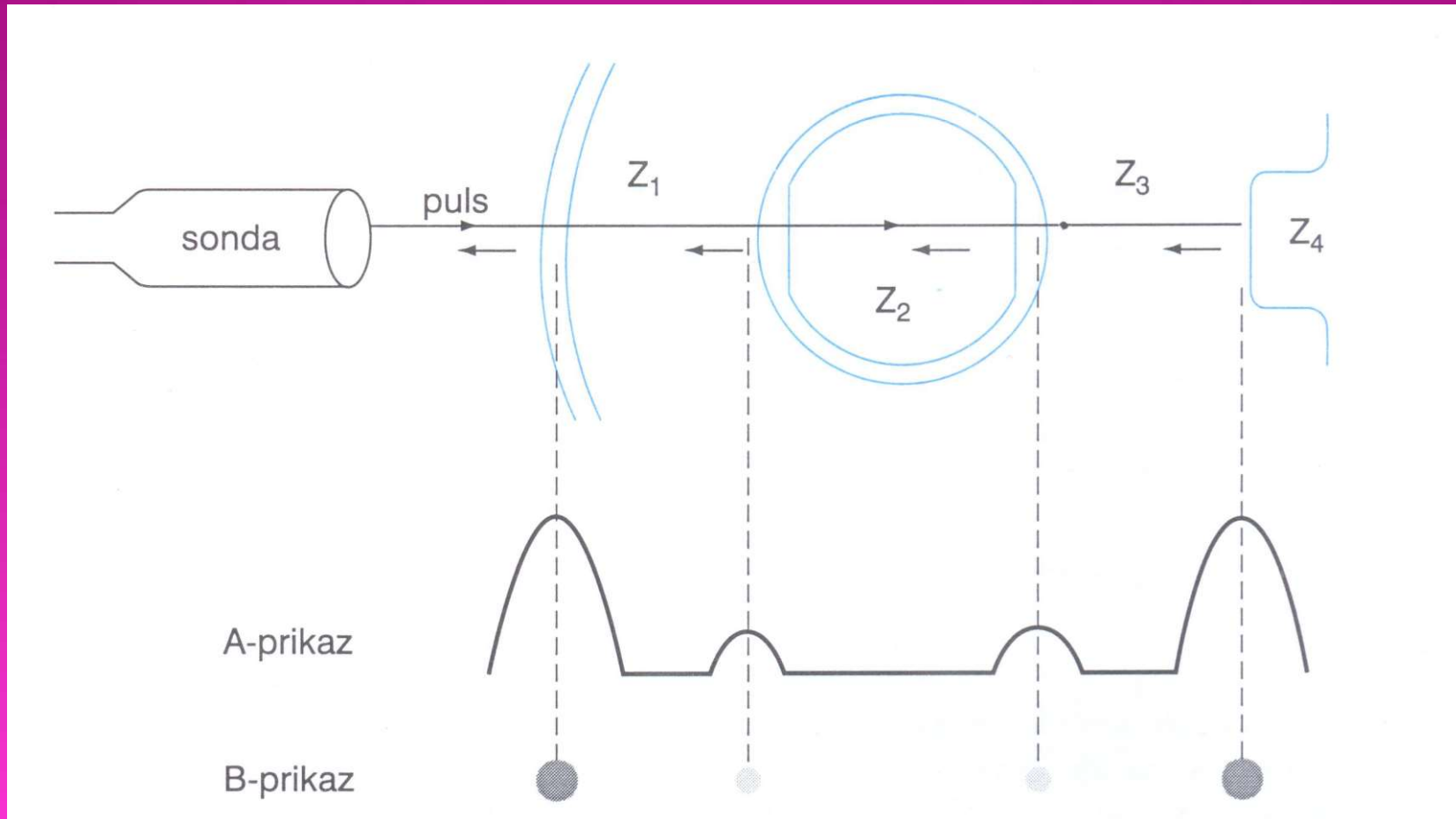
Nekoliko je načina prikazivanja reflektovanih ultrazvučnih talasa, koje prijemnik mjeri kao napon na piezoelektričnom kristalu.

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.

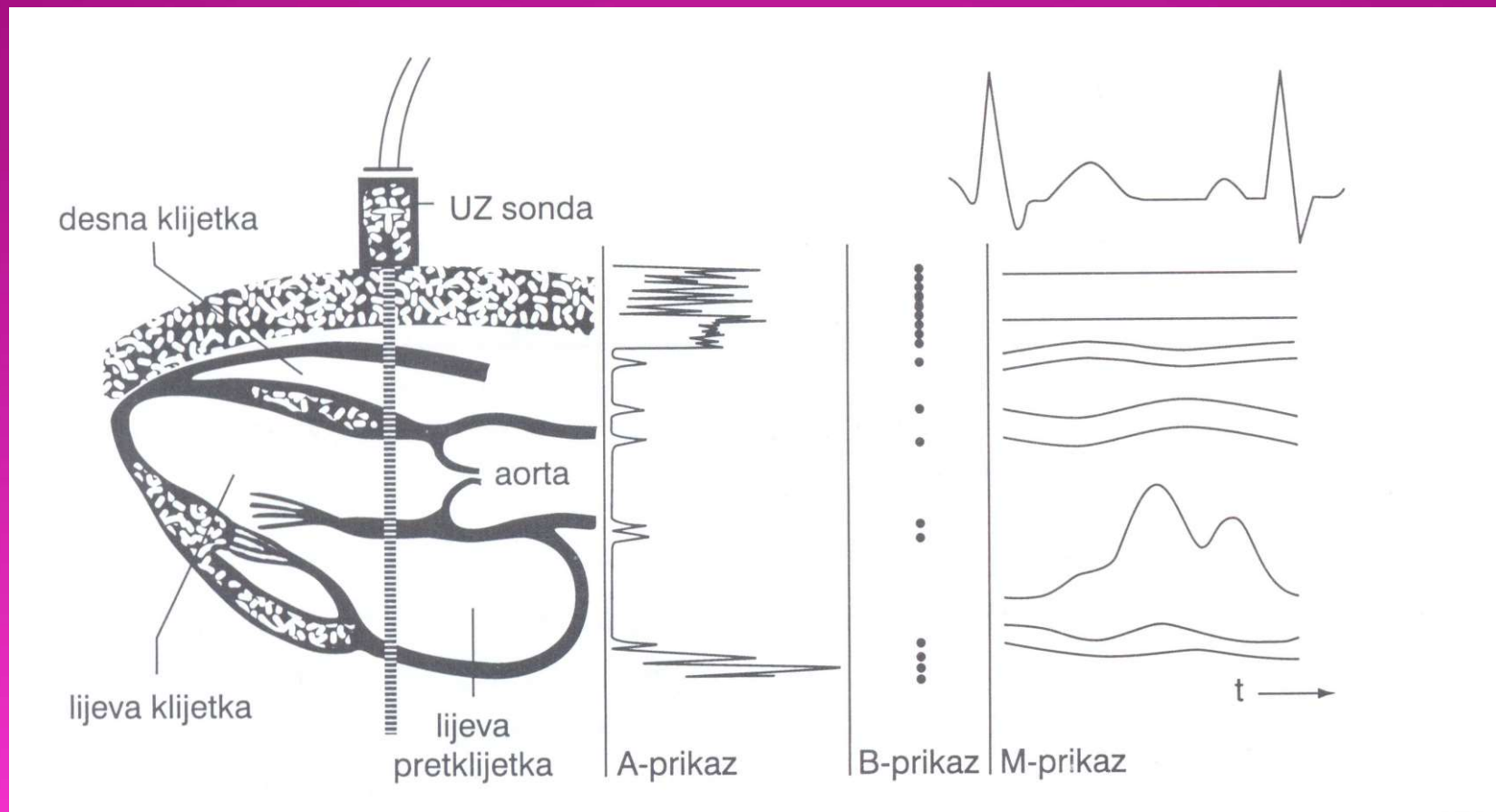


B – način prikaza



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

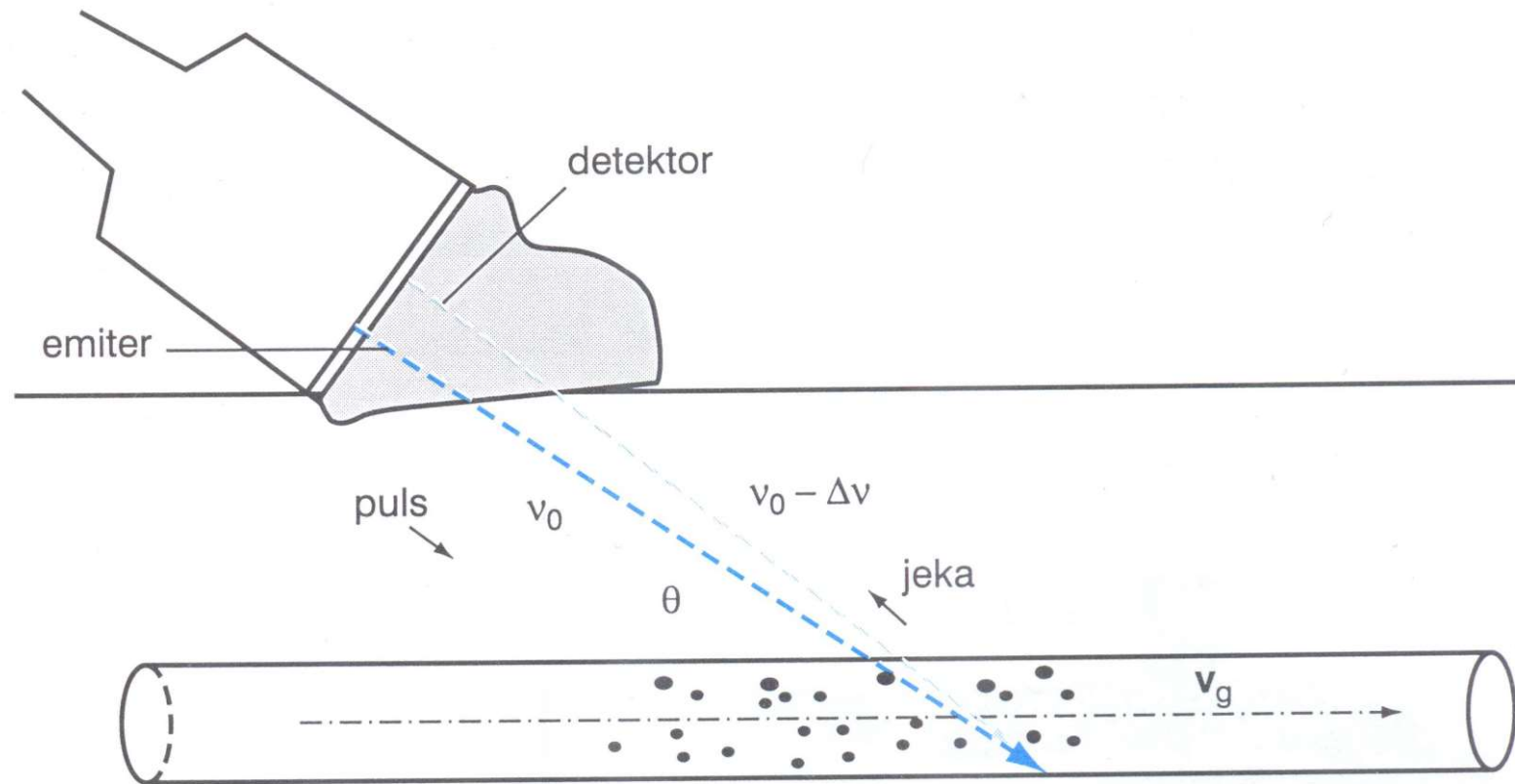
M –način snimanja



❑ 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

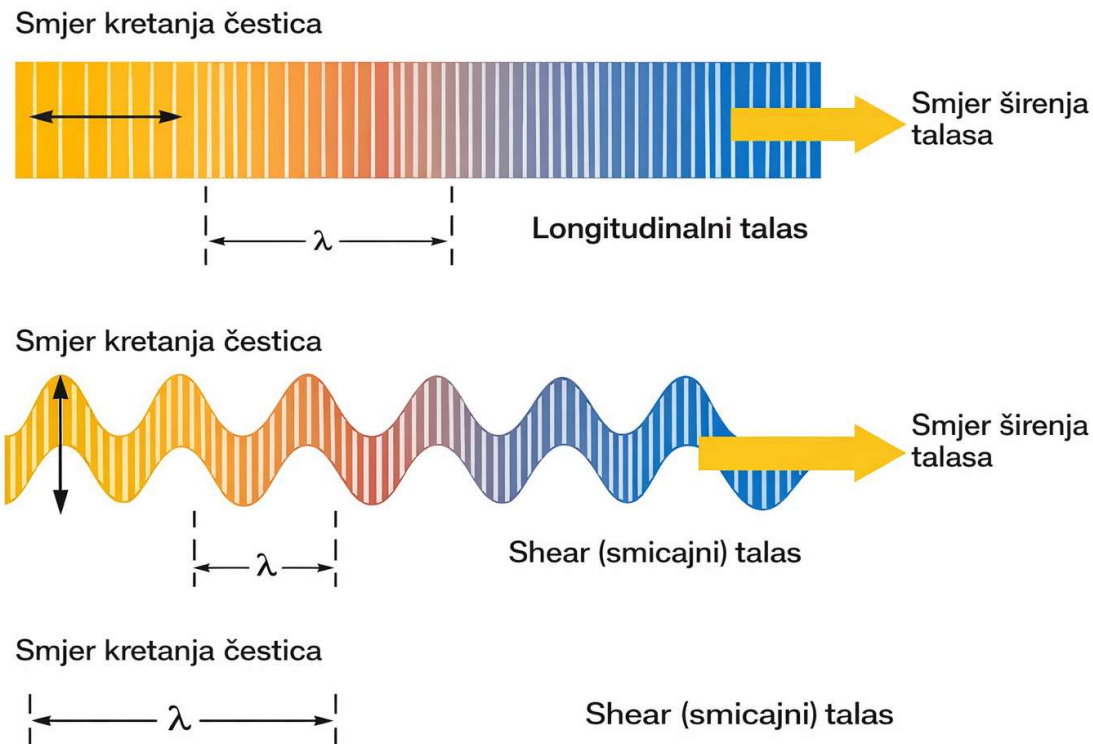
Npr. jetra:

normalna → mekana

fibroza/cirroza → tvrda

- ◆ **Ključna ideja:**

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



Dva tipa talasa:

Longitudinalni → slika (≈ 1540 m/s)

Shear wave → krutost (1–10 m/s)

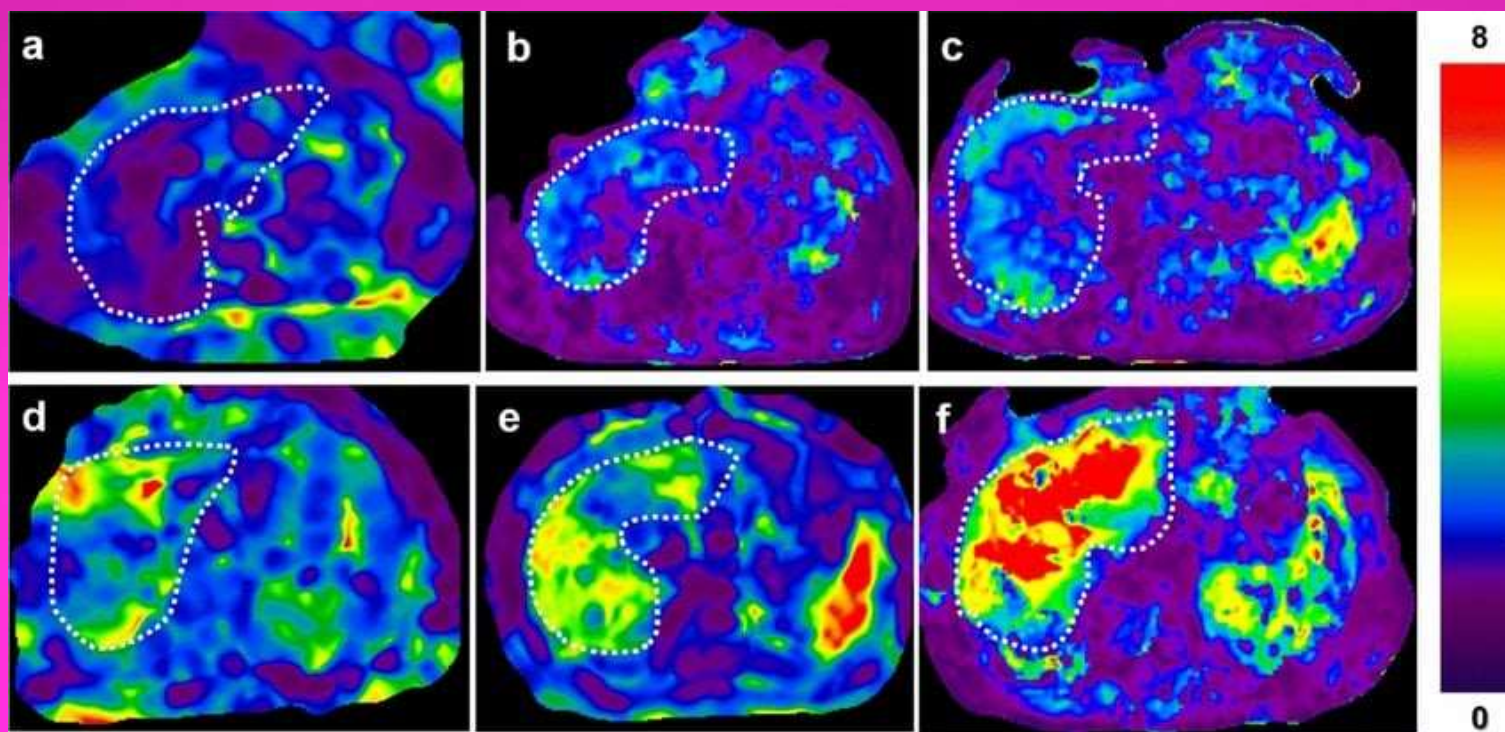
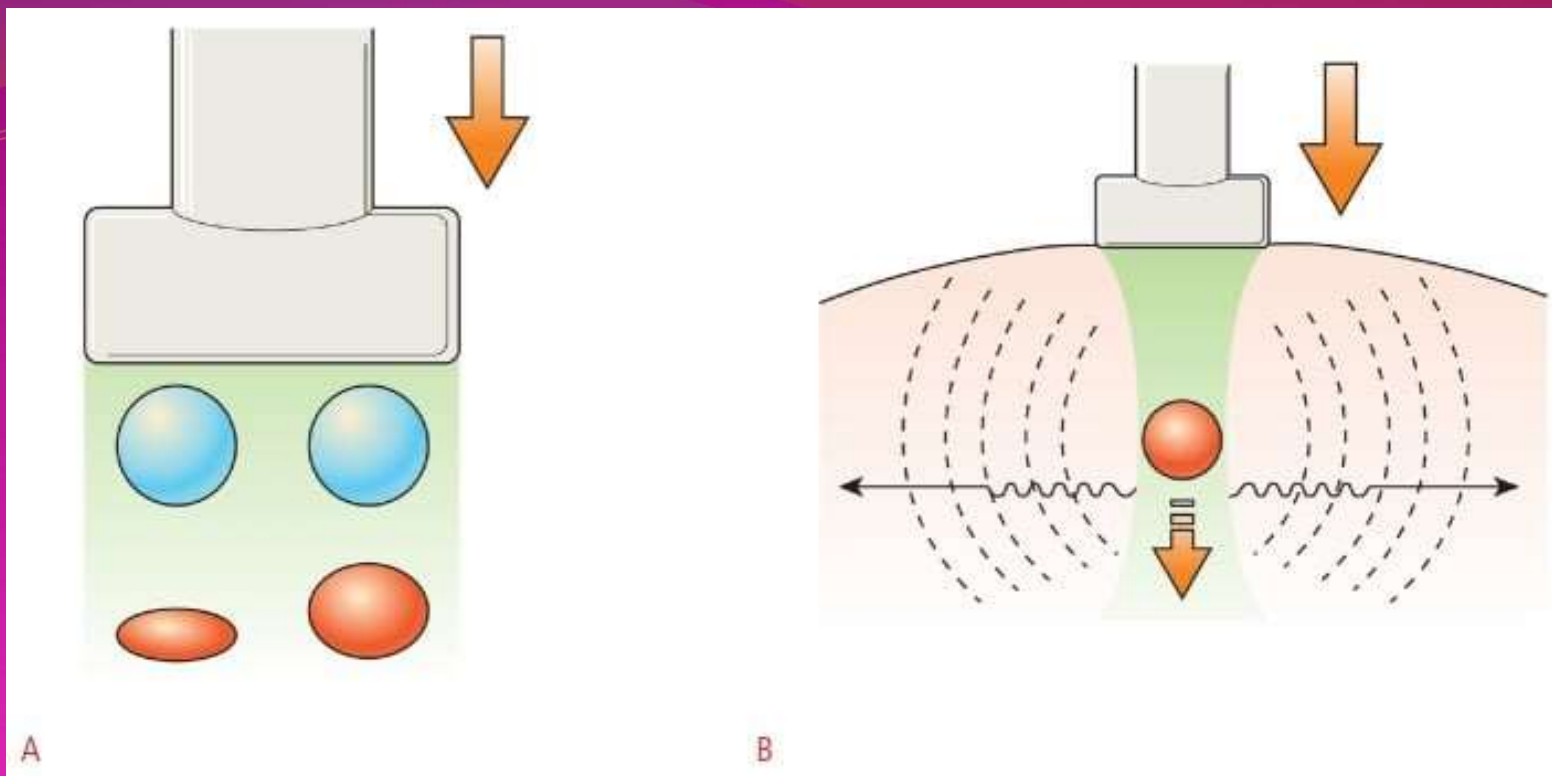
👉 **Zdravo tkivo = mekše**

👉 **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

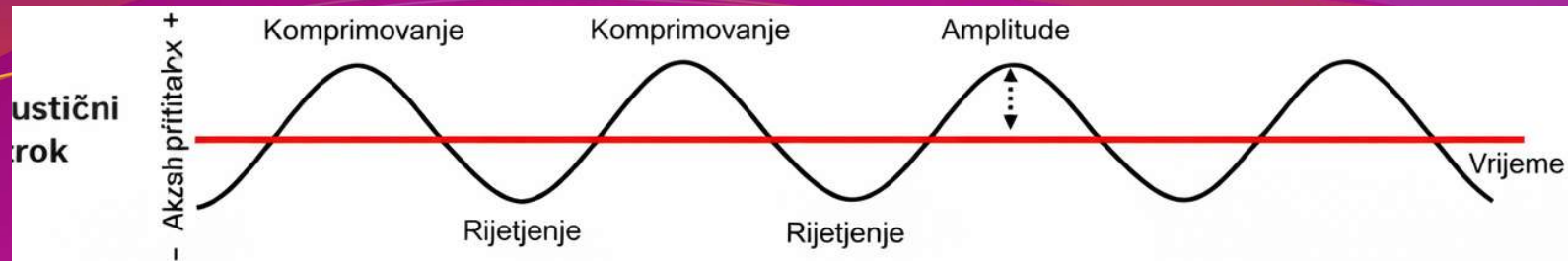
“Zamislite želatinu i kamen. Ako pošaljemo talas kroz želatinu, on ide sporo jer se materijal lako deformiše. Kroz kamen talas ide brzo jer je materijal rigidan. Elastografija radi upravo to – mjeri koliko brzo talas prolazi kroz tkivo i iz toga zaključuje koliko je tkivo tvrdo.”

Biološka oštećenja

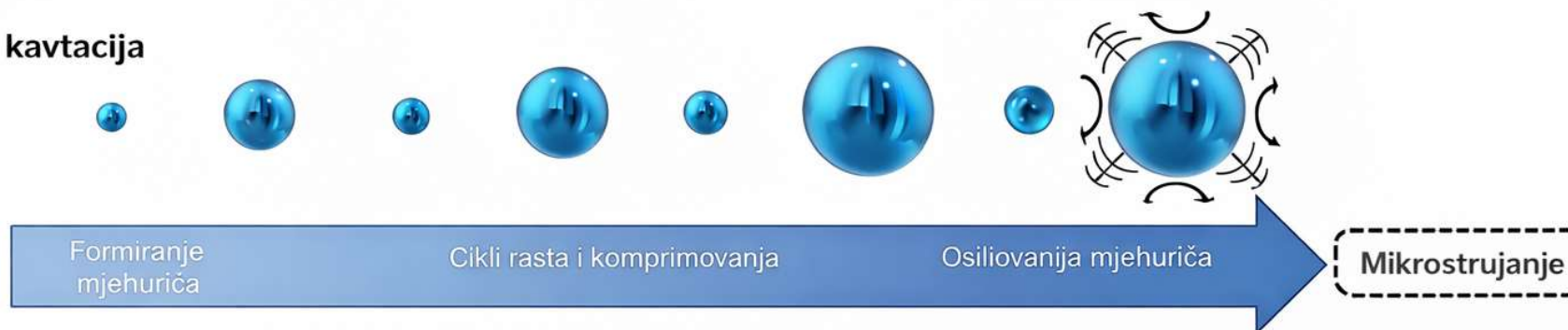
- ☐ Dijagnostički ultrazvuk je neškodljiv za metaboličke procese.
- ☐ U ultrazvučnoj dijagnostici nisu detektovani ni hemijski ni biološki efekti na tkivu.
- ☐ Da li ultrazvuk (ultrazvučna energija) može izazvati biohemijska oštećenja ???
 - ✓ depolimerizacija (izlaganje makromolekula silama koje uzrokuju 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

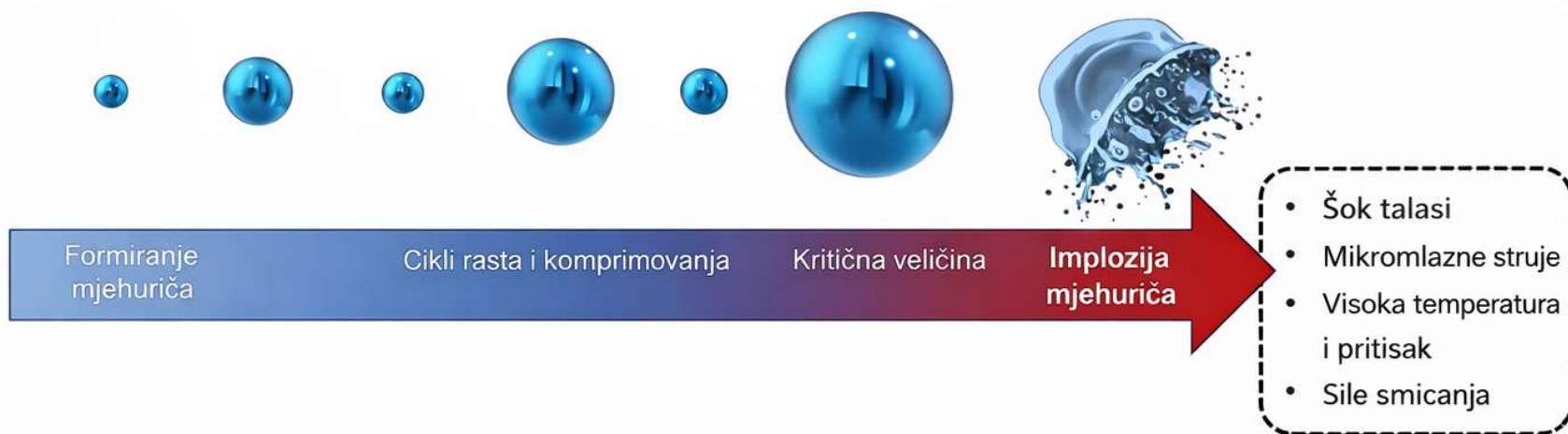
Povećanje od 4 C duže od 5min – potencijalno opasno!



(A) Stablna kavitacija

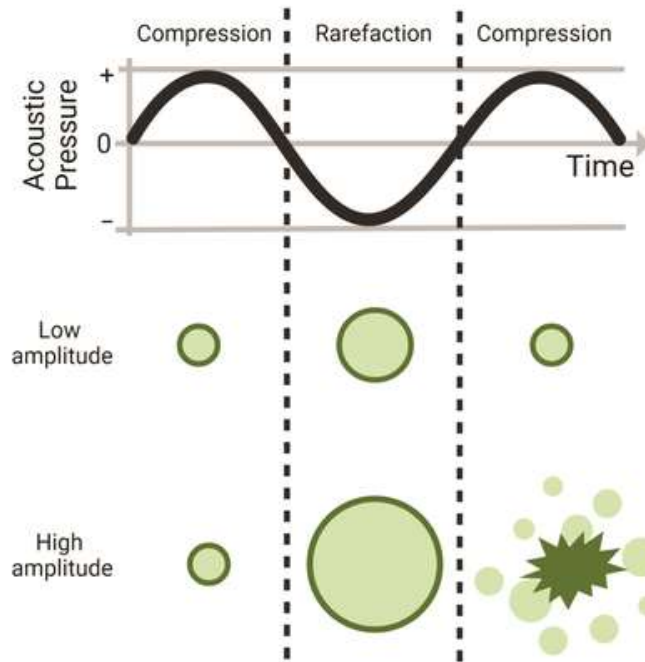
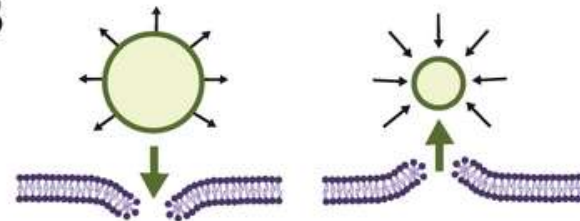
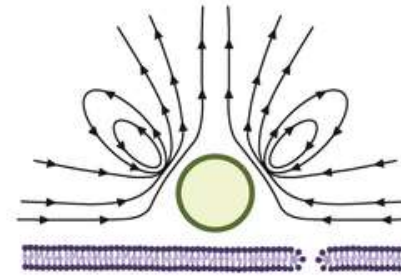
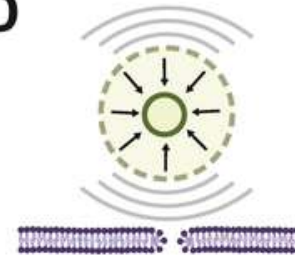
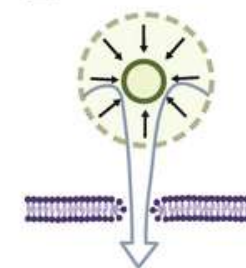
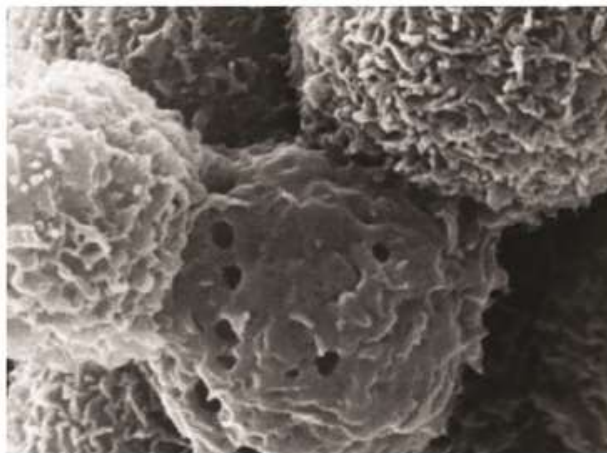
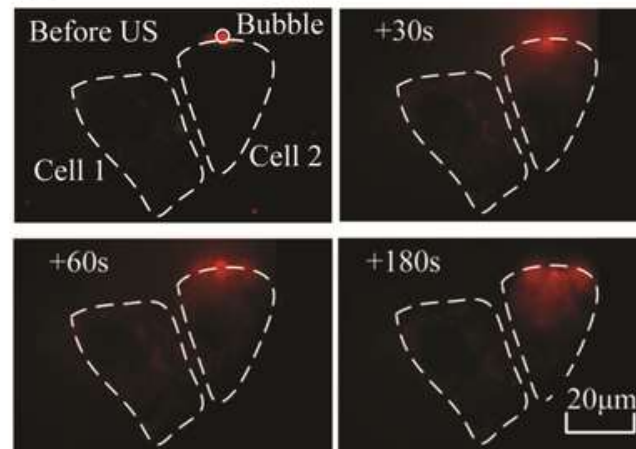


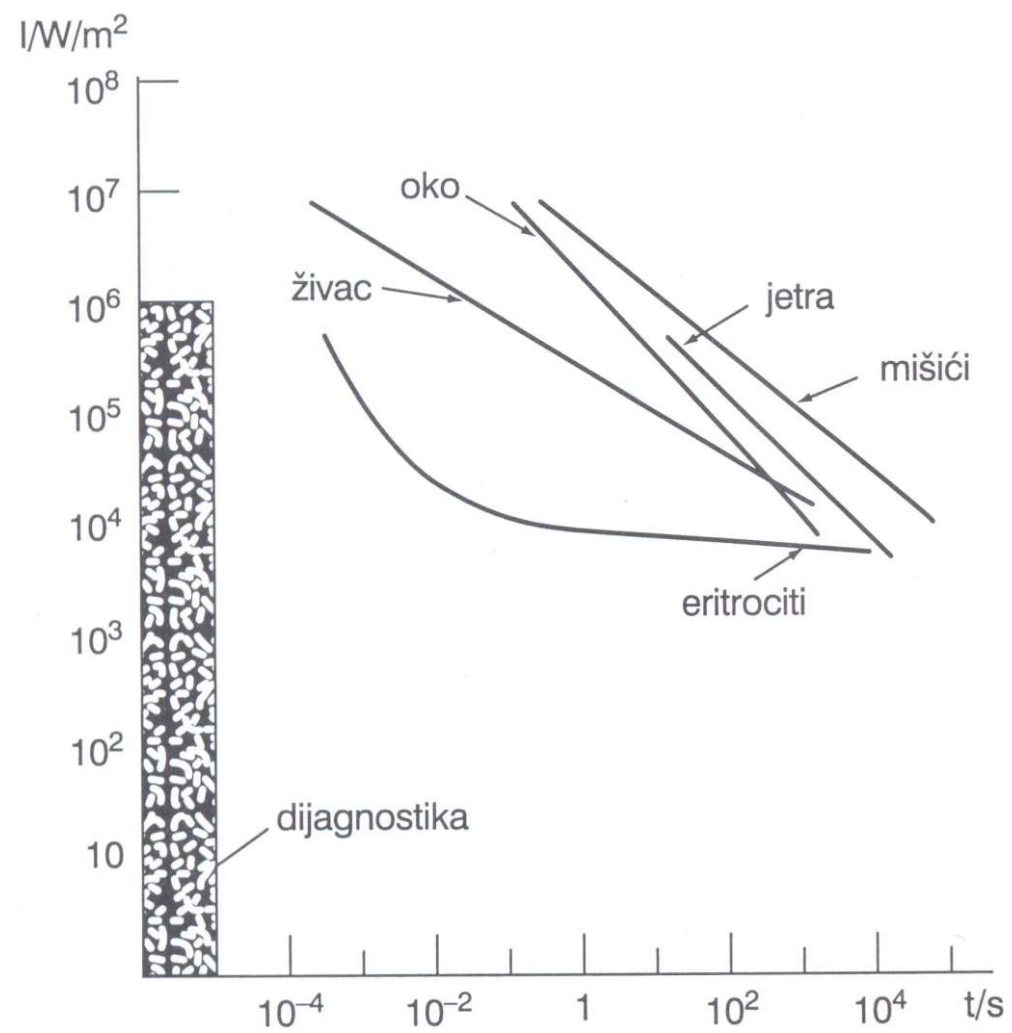
(B) Inertna kavitacija



A

Ultrasound Acoustic Pressure Wave

**B****C****D****E****F****G**





ŠKOLA BAZIČNOG ULTRAZVUKA ABDOMENA

FIZIKA ULTRAZVUKA

prof.dr. Suad Kunosić

05.10.2026