

# Ultrasonografie

**Dopplerovské techniky - princip,  
teoretické základy ovládání  
přístroje - tipy a triky**

Foukal J.

Klinika radiologie a nukleární medicíny FN Brno a LF MU

# Dopplerův princip

- Johann Christian Doppler (1803-1853)



- fyzik a matematik
- princip formulován v roce 1842, Praha
- platí pro všechny druhy vlnění

# Dopplerův princip

přibližuje-li se zdroj zvuku o konstantní výšce (frekvenci) tónu směrem k pozorovateli, vnímá pozorovatel výšku tónu vyšší, rozdíl mezi frekvencemi záleží na rychlosti pohybu



$f_p$  - pozorovatel přijímaná frekvence vlnění

$c$  - rychlost šíření vlnění v daném prostředí

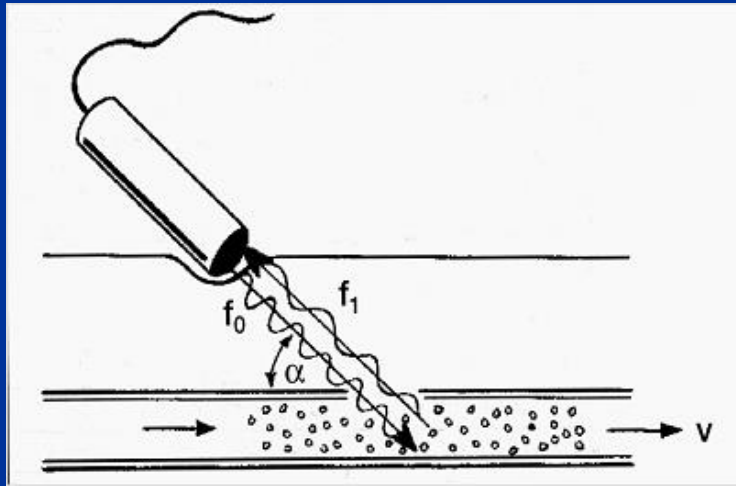
$v$  - rychlost pohybu zdroje směrem k pozorovateli

$f_v$  - zdrojem vyslaná frekvence vlnění

$$f_p = \frac{c}{c - v} \cdot f_v$$

# Dopplerův efekt - frekvenční posun

- rozdíl frekvence vyslané a přijaté ( $\Delta f = f_0 - f_1$ )
- velikost frekvenčního posuvu je přímo úměrná **frekvenci**, **rychlosti krevního toku** a **kosinu úhlu**, který svírá směr UZ vln a tok krve
  - kritická mez nad  $60^\circ$
- výpočet rychlosti pohybujících se elementů



$$\Delta f = \frac{2 f_0 v \cos \alpha}{c}$$

$\Delta f$  – frekvenční posuv

$c$  – rychlost šíření uz vlnění

$f_0$  – frekvence sondy

$\alpha$  – úhel insonace

$v$  – rychlost toku



# Dopplerův efekt - frekvenční posuv

$$\Delta f = \frac{2 f_0 v \cos \alpha}{c}$$

Oblast průtoku	Střední rychlost proudu (mm/s)
Vlásečnice	0,4–1
Velké žíly	100
Aorta	300

- spektrum posuvů při rychlostech snímaných při UZ vyšetření a použité frekvenci sondy je v rozmezí stovek až tisíců Hz

sonda 5 MHz

rychlost toku krve 30cm/s

$\cos 60^\circ = 0,5$

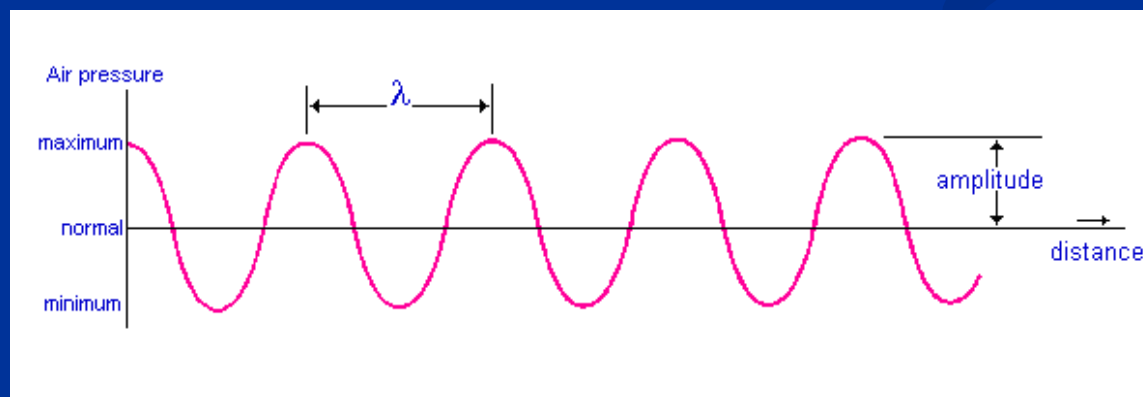
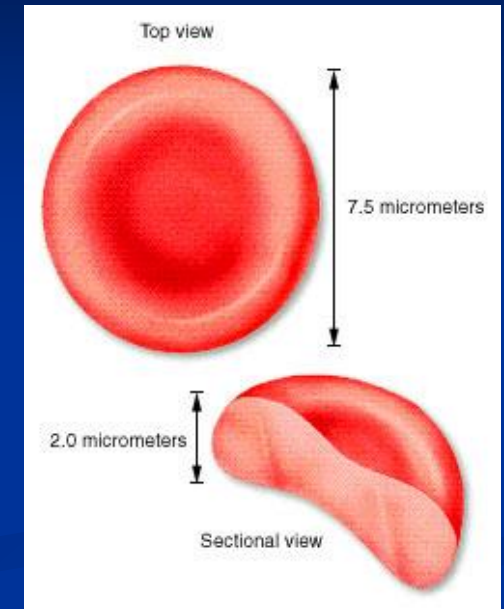
$$\Delta f = \frac{2 \cdot 5000000 \text{ s}^{-1} \cdot 0,3 \text{ ms}^{-1} \cdot 0,5}{1580 \text{ ms}^{-1}} = 949 \text{ s}^{-1} (\text{Hz})$$

1580 ms<sup>-1</sup>

rychlost šíření zvuku v měkkých tkáních

# Rayleighův-Tyndallův rozptyl

- od čeho se UZ vlny v cévách odráží?
- velikost erytrocytů ( $7 \times 2 \mu\text{m}$ )
- vlnová délka UZ 5 MHz =  $300 \mu\text{m}$
- anechogenní krev

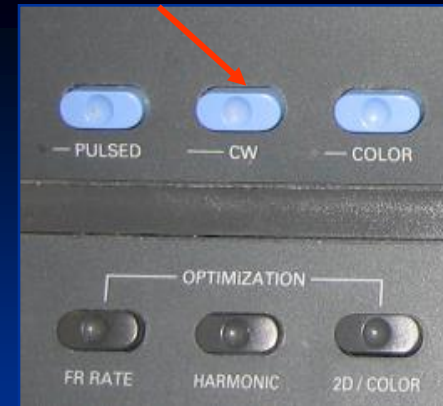


# Dopplerovské zobrazení

- změna **frekvence** je determinována rychlostí
- **intenzita** přijatého signálu je determinována množstvím pohybujících se elementů (např. krvinek)

# kontinuální Doppler

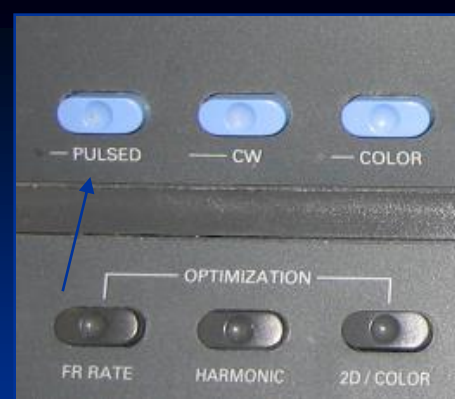
- dopplerovské systémy s kontinuální nosnou vlnou (CW)
- nejjednodušší zařízení
- chybí axiální rozlišení, tj. nelze určit hloubka, ze které signál přichází
- dva elektroakustické měniče (krystaly)
  - vysílač
  - přijímač
- oba měniče jsou vůči sobě skloněny ve velmi tupém úhlu
- v oblasti zájmu se překrývají
- je-li v oblasti zájmu více cév  $\Rightarrow$  záchyt **signálu ze všech cév** oblasti  $\Rightarrow$  součet signálu  $\Rightarrow$  nelze odlišit rychlost toku v jednotlivých cévách
- využití: tužkové Dopplery, cévní chirurgie
- měří **libovolně velké rychlosti**



# pulzní Doppler

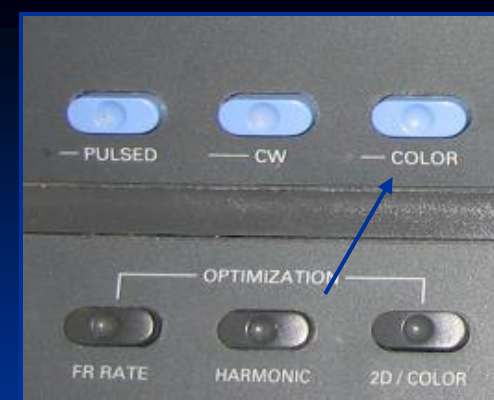
- pulzní dopplerovské systémy (PW)
- jeden elektroakustický měnič, který střídavě ultrazvukové vlnění vysílá a přijímá
- sonda pracuje ve střídavém, tj. pulzním režimu
- rytmus vysílání se označuje jako opakovací frekvence a je v horní oblasti frekvencí omezen dobou potřebnou ke zpětnému návratu odraženého signálu
- doba mezi vysláním a přijmem ultrazvukového impulsu je úměrná vzdálenosti cévy od ultrazvukové sondy
- umožňuje záznam rychlostního spektra toku krve v cévě
- vyšší mechanická energie

*1/1000 vysílač, 999/1000 přijímač*



# barevný Doppler

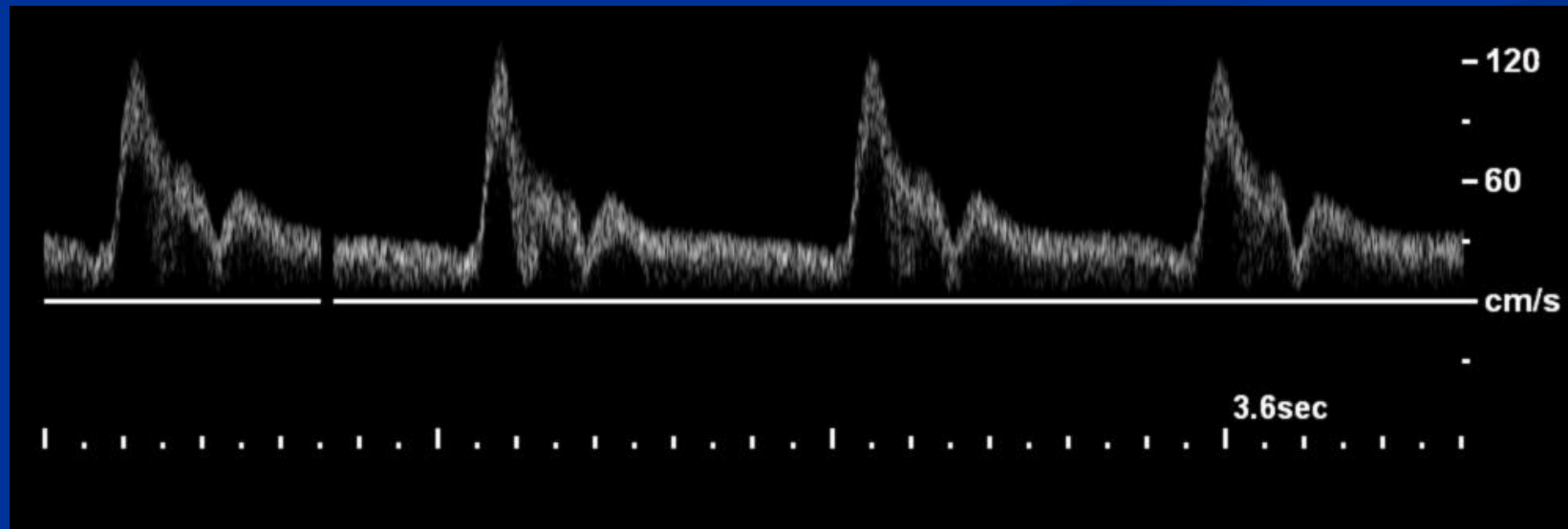
- barevné dopplerovské mapování průtoku, *Color Doppler Imaging (CDI), Color Flow Mapping (CFM)*
- v B-obrazu je definovaná **výseč**, ze které je dopplerovská informace o pohybu (rychlosti toku) analyzována a zobrazena v podobě **barevných pixelů**, které jsou zakomponovány do nezávislého B-obrazu
- sběr dat podél jedné linie **minimálně 3x** – snížení FR
  - průměrný frekv. posun
- **VÝHODY:**
  - snadná identifikace cévy, zobrazí tok i v malých cévách
  - určení **směru toku** krve - **barva**
  - **semikvantitativní**, přibližně stanoví rozsah **rychlostí**
    - **odstín**
- **NEVÝHODY:**
  - zobrazení **střední rychlosti** toku
  - ↓ citlivost pro **pomalé toky**
  - sklon k barevným **artefaktům** při pohybu
  - ↓ **frame rate** (50-150ms)





# spektrální záznam

- časový průběh rychlosti
- podél jediné vertikální obrazové linie jsou vysílány opakované impulzy
- dopplerovská informace o rychlosti toku
- analyzována a zobrazena jako **dopplerovské spektrum**



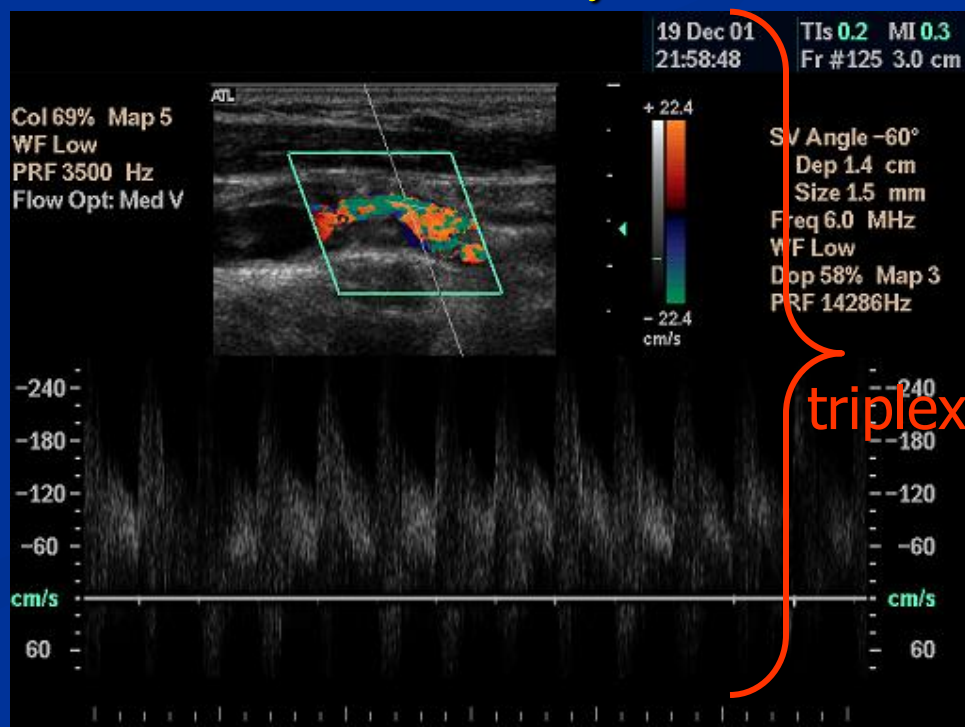
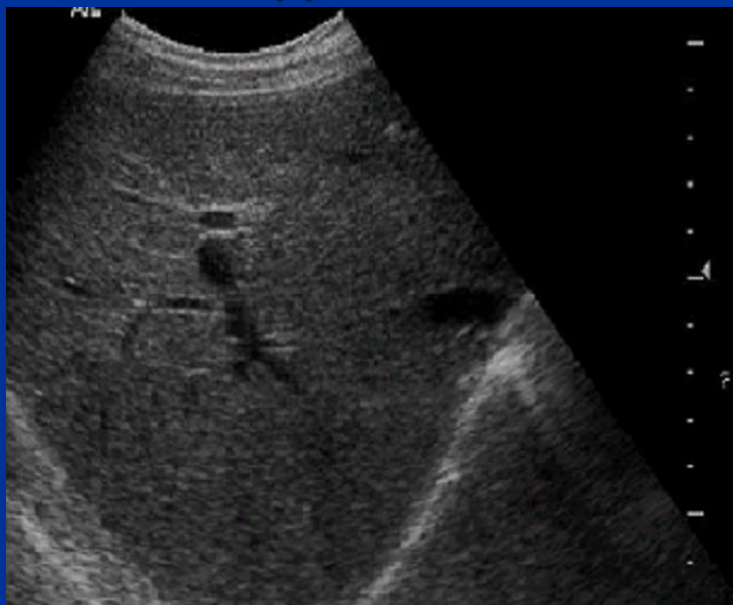
# duplexní a triplexní zobrazení

## ■ duplexní

- kombinace dvojrozměrného dynamického zobrazení (**B-mode**) a **pulsního** dopplerovského měření

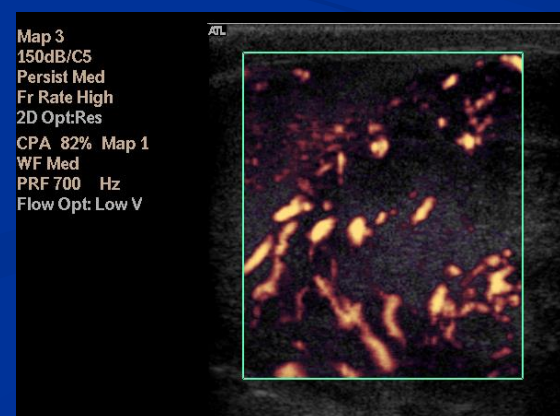
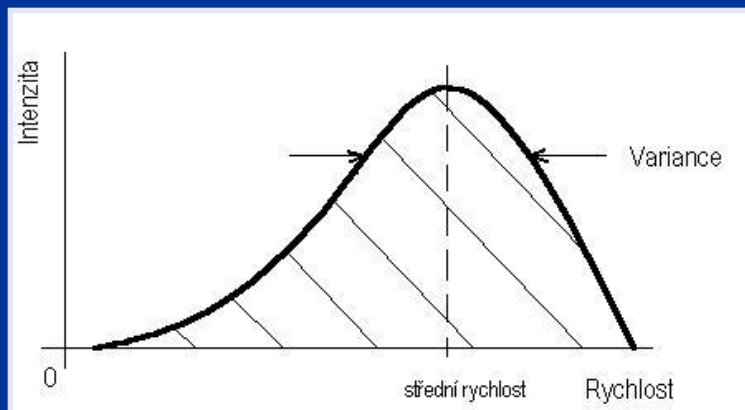
## ■ triplexní

- kombinace **B zobrazení** se **spektrální** křivkou a **barevným** dopplerem



# energetický Doppler

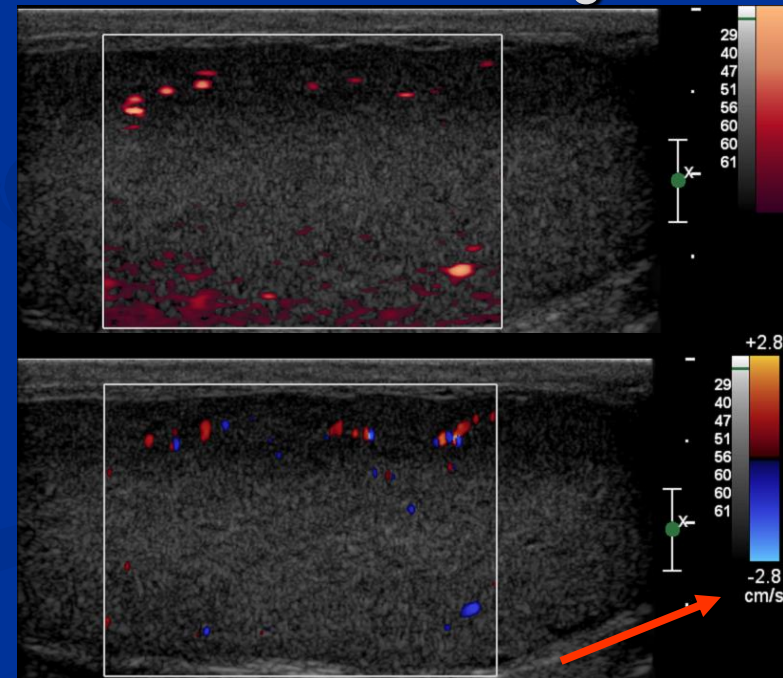
- *Color Doppler Energy (CDE), Color Power Angio (CPA), Color Amplitude Imaging (CAI), Color Angiography, Doppler Power Mode, Power Mapping, Amplitude Mapping.*
- zobrazuje celou energii dopplerovského signálu
  - úměrná ploše vymezené spektrální křivkou
- **nezávislost na**
  - **dopplerovském úhlu** (kromě 90°)
  - **rychlosti**
- umožní zobrazit větší dynamický rozsah energie = i **velmi pomalé toky**



# energetický Doppler

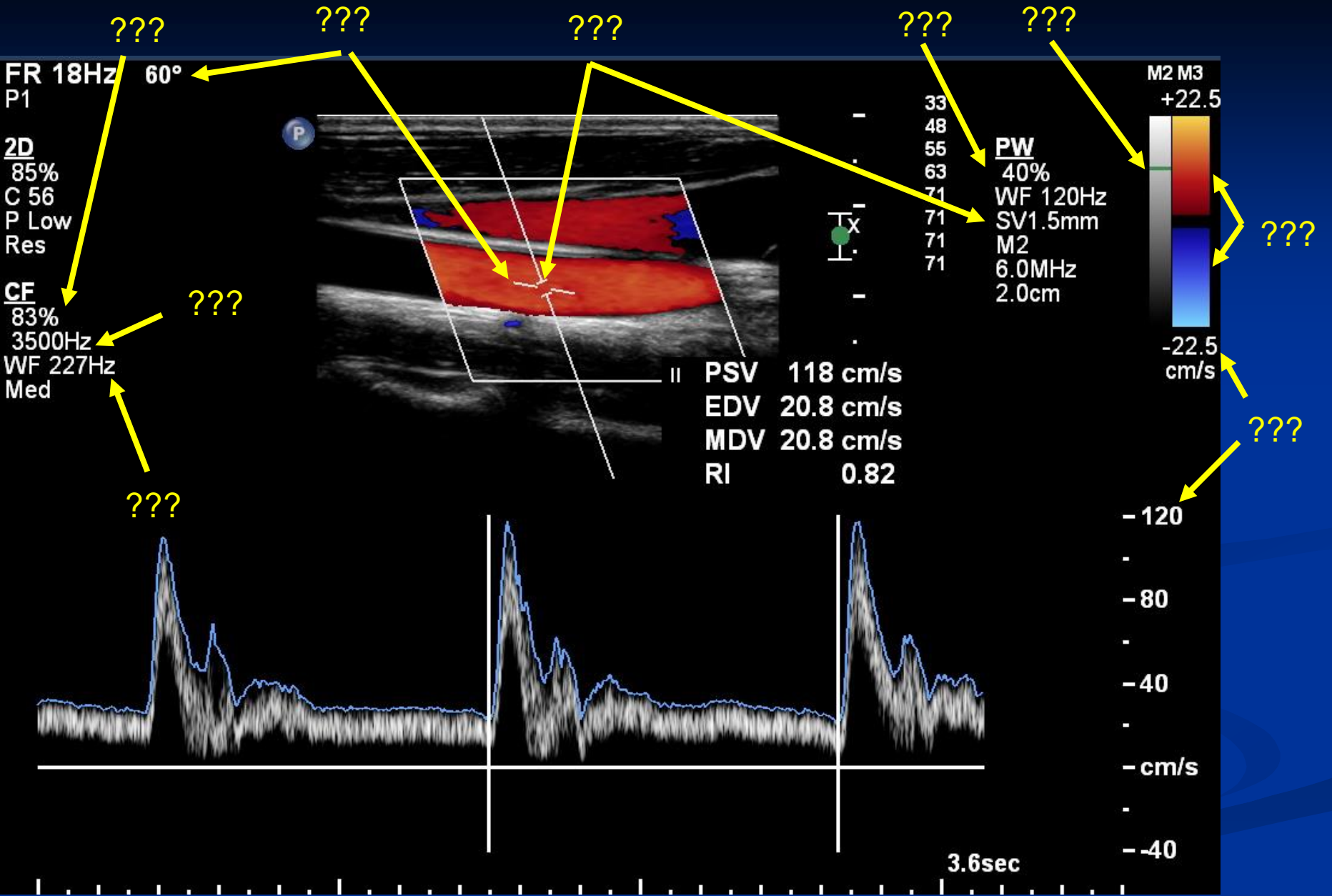
- pouze jedna barva
- barevný **odstín** pixelu
  - přímo odpovídá **amplitudě** (energii) dopplerovského signálu
  - vyjadřuje množství pohybujících se elementů
- neovlivněn Nyquistovým limitem  $\Rightarrow$  nedochází k aliasing efektu
- vysoká citlivost k artefaktům
- ~~neurčí směr toku ani rychlost~~

směrový energetický Doppler



# **Dopplerovská USG - nastavení parametrů**

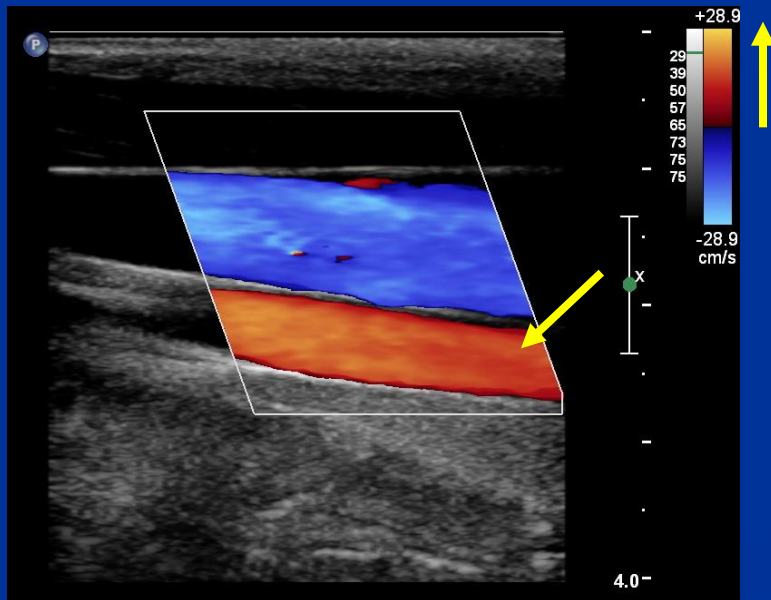






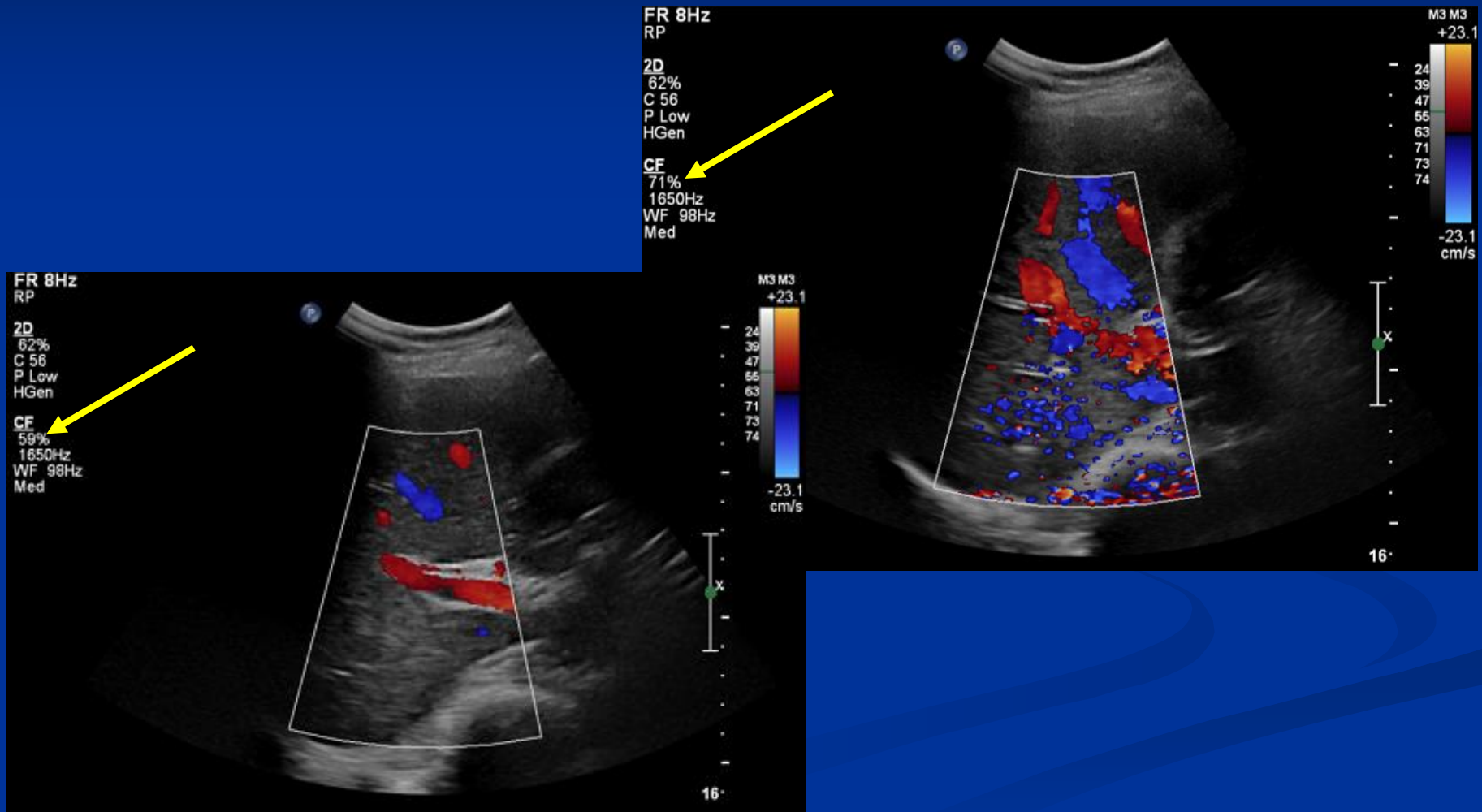
# Konvence značení

- směr průtoku při pohybu k sondě (od sondy) - **BART**
- průtok směrem **k sondě** je zobrazen ve spektru **nad nulovou linií**
- průtok směrem **od sondy** je zobrazen ve spektru **pod nulovou linií**



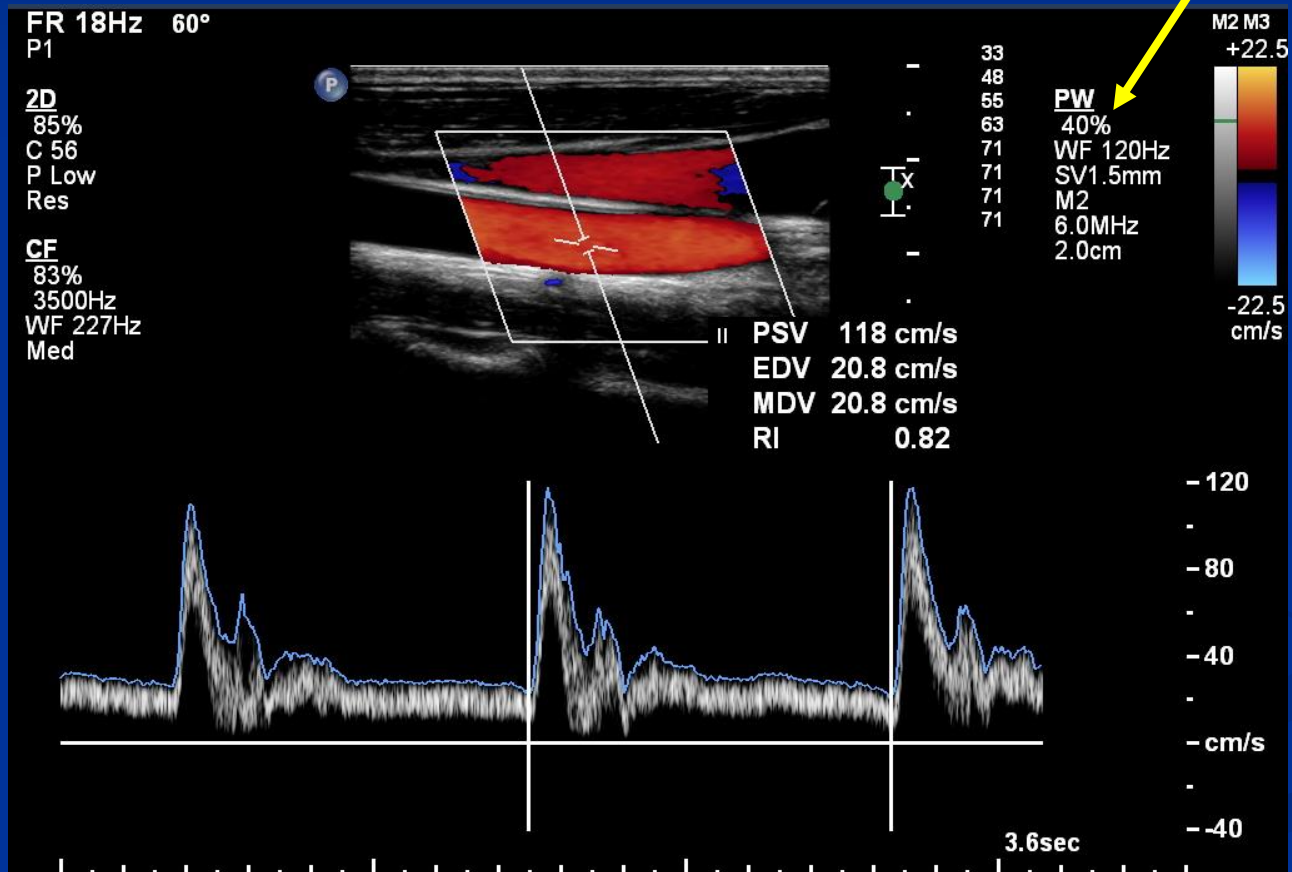
# Color gain

- nezávisle od 2D Gain



# PW gain

- nezávisle od 2D Gain, Color Gain



# Priorita barevného záznamu

- *Color versus Gray Scale, Gray Scale - Color Supression, Color versus Echo Priority, Write Priority*
- prahová hodnota intenzity v B módu
- dopplerovské signály v místech vyšší intenzity ignorovány
- ↓ priorita – potlačí barvu v okolí cévy
- ↑ priorita – zobrazí barvu z echogenní / drobné cévy



# Citlivost barevného záznamu

- *color sensitivity, pulse number, line density*

Line Density

Low

- počet UZ impulzů podél vertikální obrazové linie (min. 3)

- více impulzů (např. 14 impulsů/linii)

- vyšší barevná citlivost (pomalé toky – skrotum, lýtkové žíly)

- ↓ frame rate

- méně impulzů (7-9)

- ↓ citlivost - jen rychlé toky

- ↑ frame rate (echokardiografie)

# Perzistence barevného záznamu

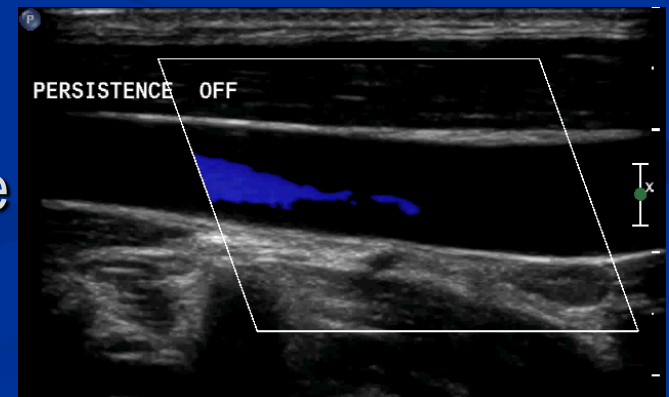
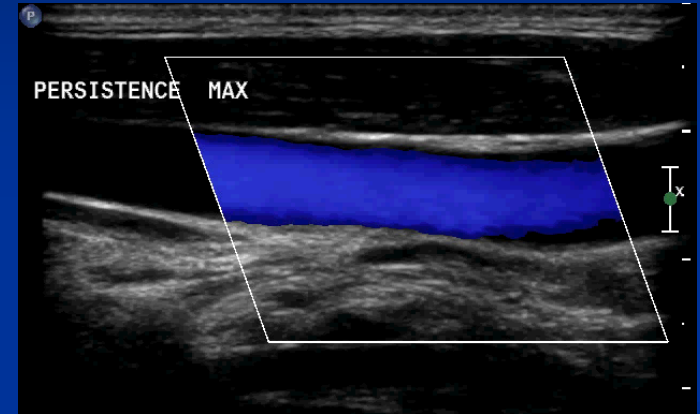
- *color persistence, frame averaging*

- ↑ persistence

- lepší **poměr S/Š**
- snažší detekce krátce trvajících hemodynamických dějů
- lepší **vykreslení cévních kontur**

- nevýhody:

- **stírání** variací barevného obrazu v čase
- pulzatilní x žilní tok

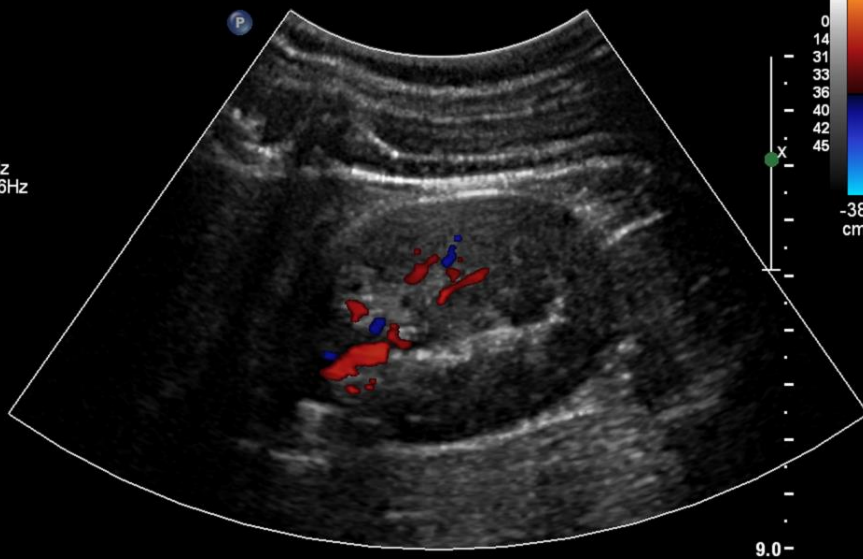




# Výseč vs. frame rate

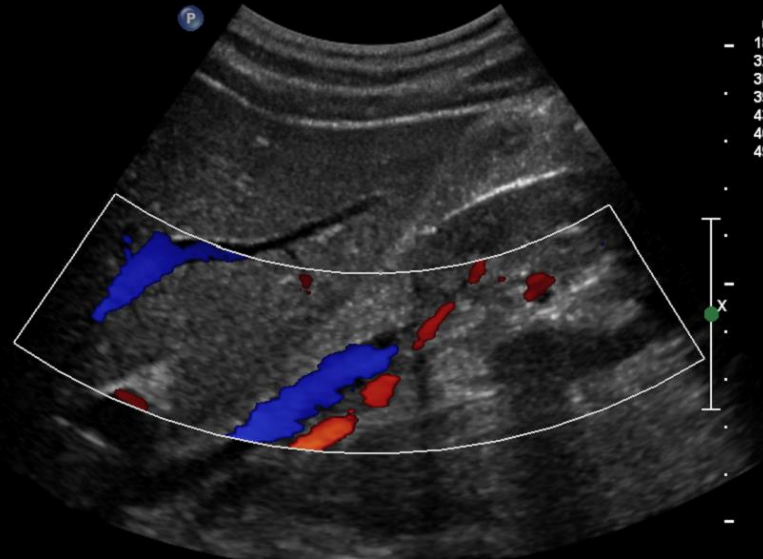
FR 5Hz

2D  
34%  
C 55  
P Med  
HGen  
CF  
59%  
3250Hz  
WF 146Hz  
Med



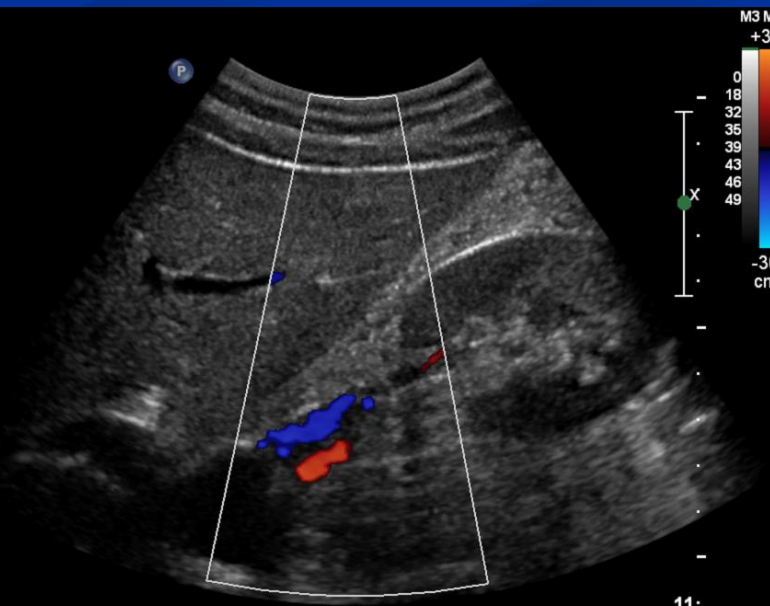
FR 9Hz

2D  
37%  
C 55  
P Med  
HGen  
CF  
59%  
2200Hz  
WF 109Hz  
Med



FR 14Hz

2D  
37%  
C 55  
P Med  
HGen  
CF  
59%  
2400Hz  
WF 120Hz  
Med

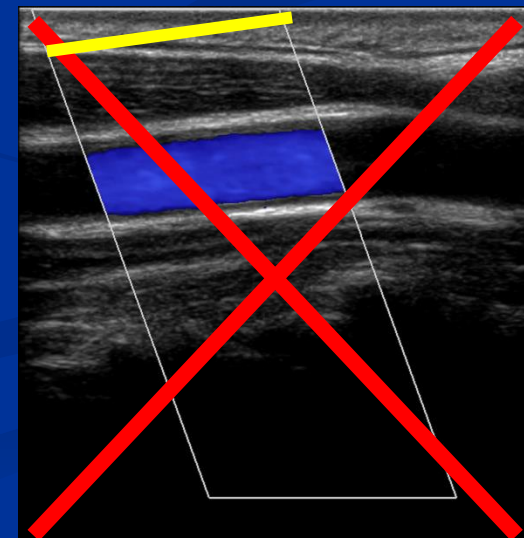
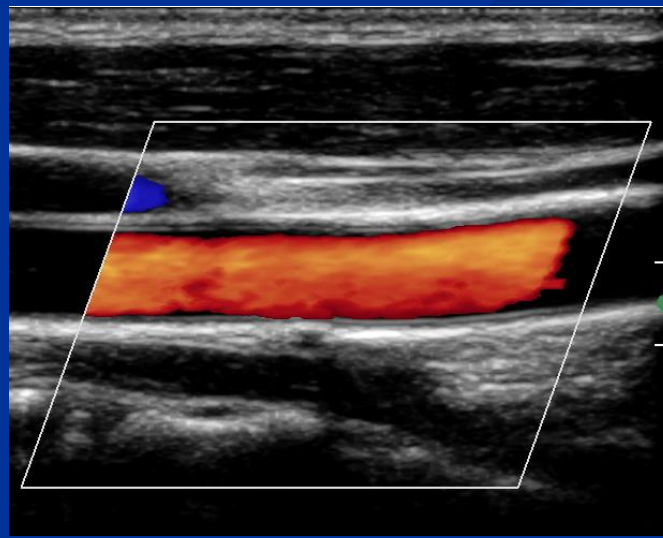
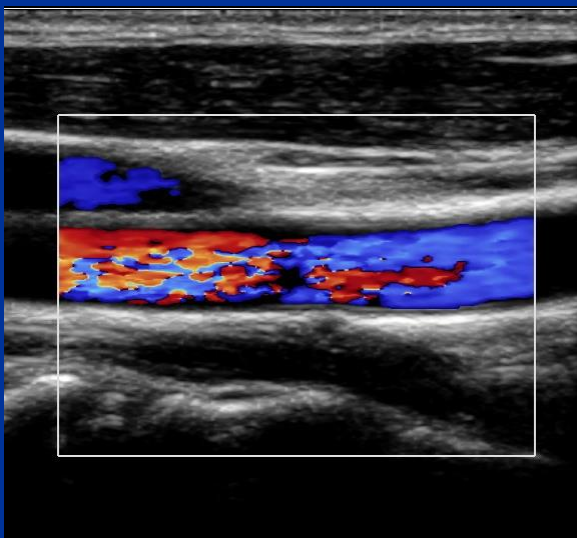
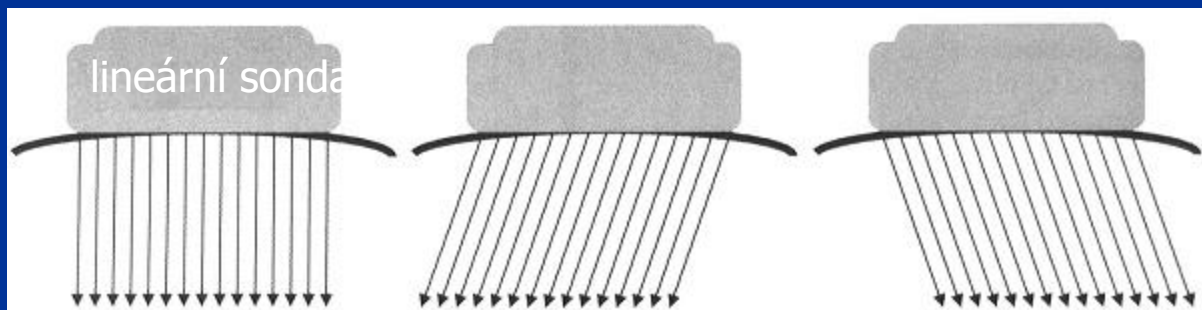


11

11

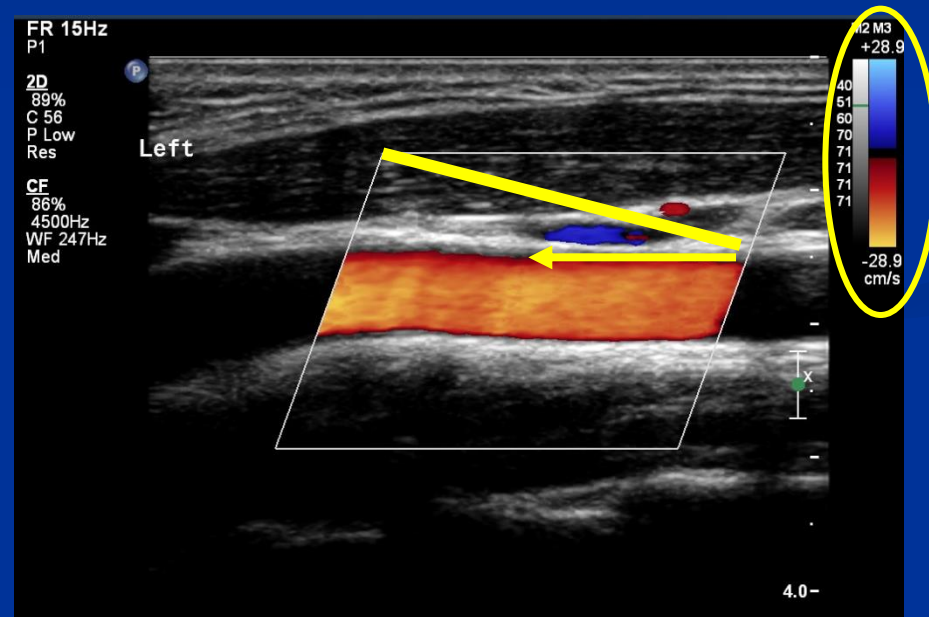
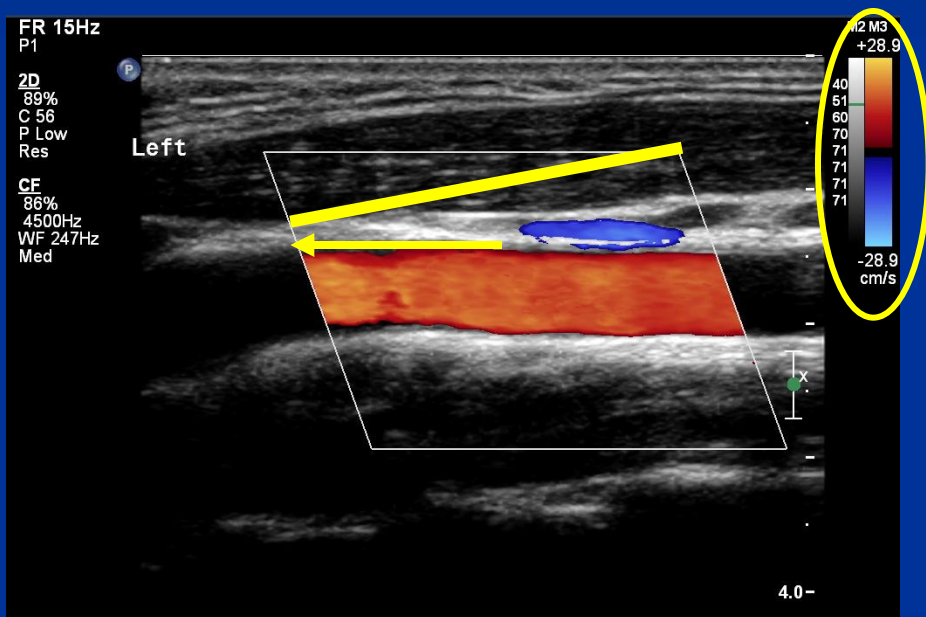
# Steering

- lineární sondy
- malá možnost sklopení
- elektronické sklopení dopplerovských vln



# Steering

- Automatická inverze barevného spektra



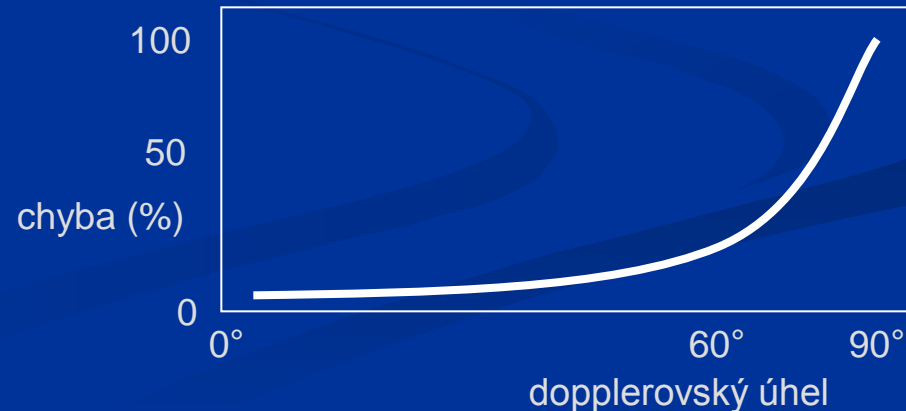
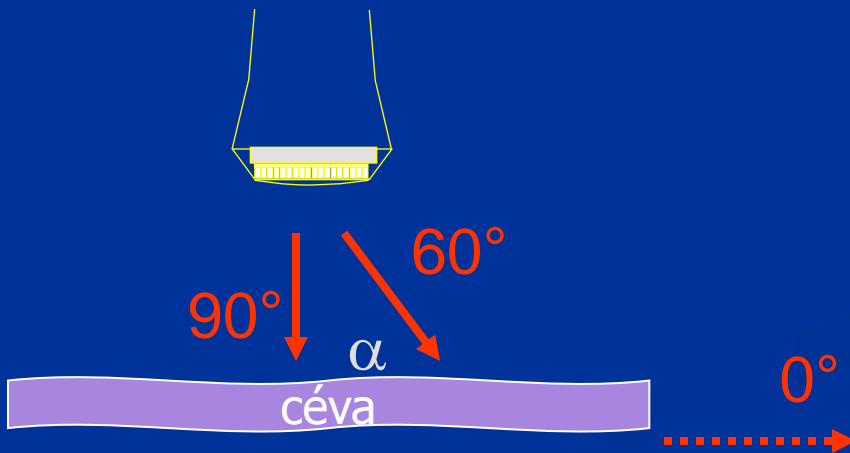
# Dopplerovský úhel

- úhel mezi směrem vysílaných **UZ vln** a směrem **toku krve**
- $\alpha = 0^\circ$  = maximum frekvenčního posuvu ( $\cos 0^\circ = 1$ )
- úhel  $> 60^\circ$  ~ riziko chyby, nelze přesně kvantifikovat toky
- $90^\circ$  ~ žádný signál ( $\cos 90^\circ = 0$ )
- $90^\circ$  ~ krev není vůči sondě v pohybu

$$v = \frac{\Delta f}{2 f_0 \cdot c \cdot \cos \alpha}$$

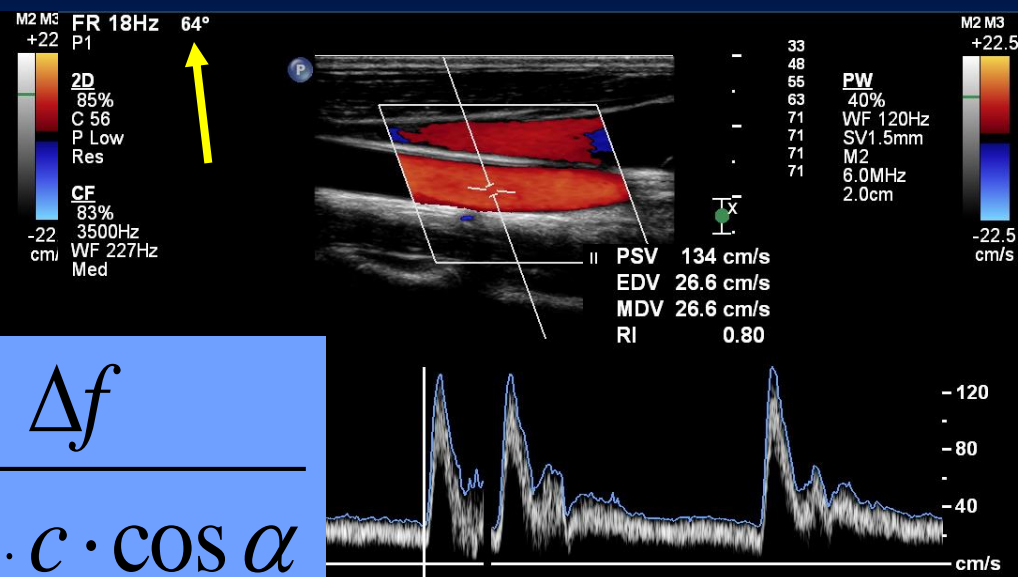
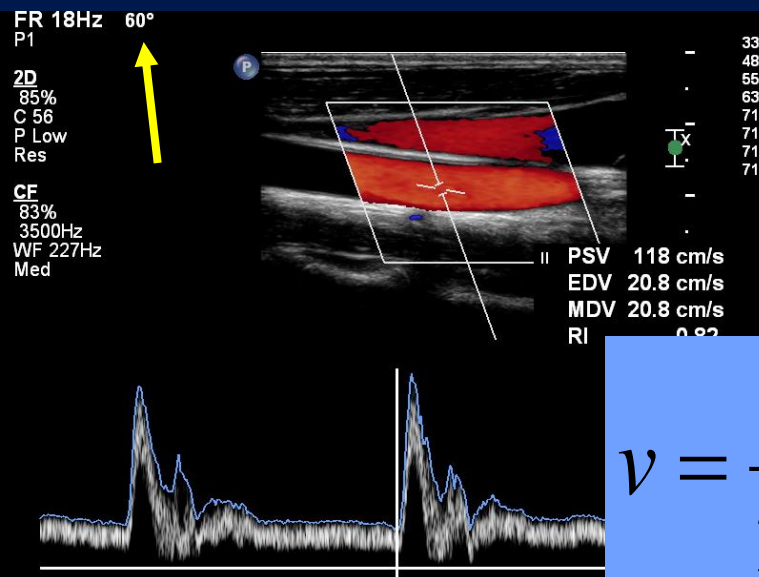
Využívat co nejmenší úhel!!!

Nevyšetřovat při dopplerovském úhlu  $> 60^\circ$ !!!

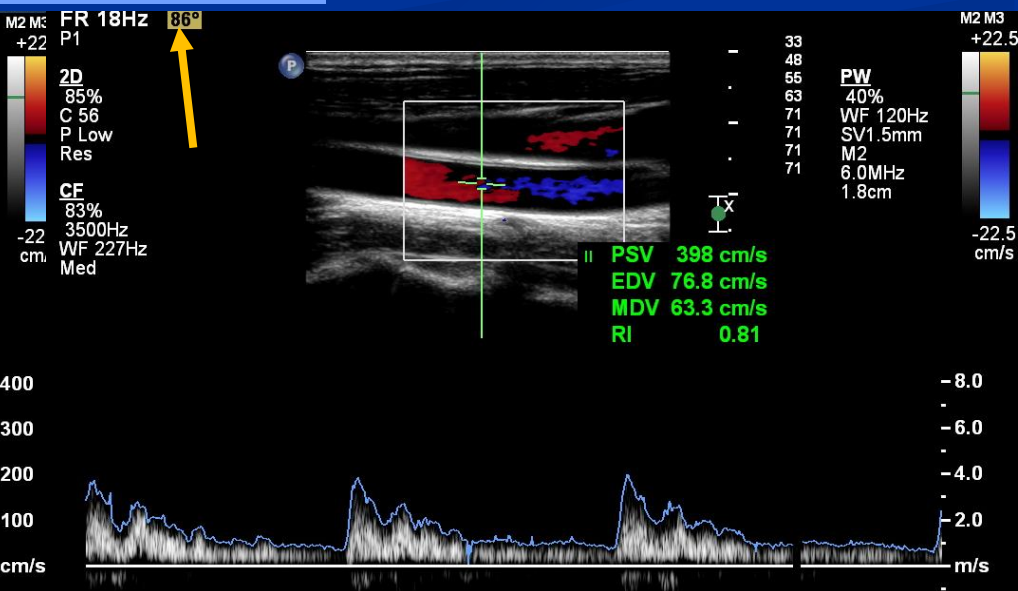
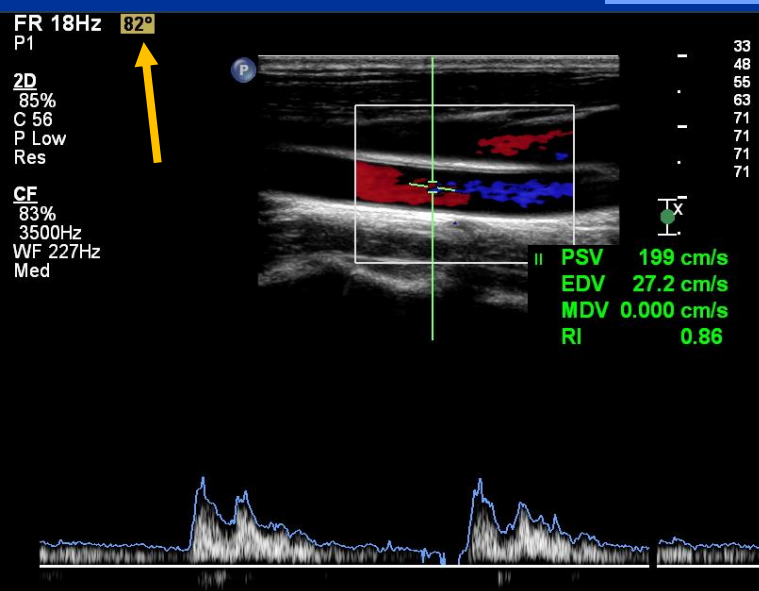




# Dopplerovský úhel + chyba 4°

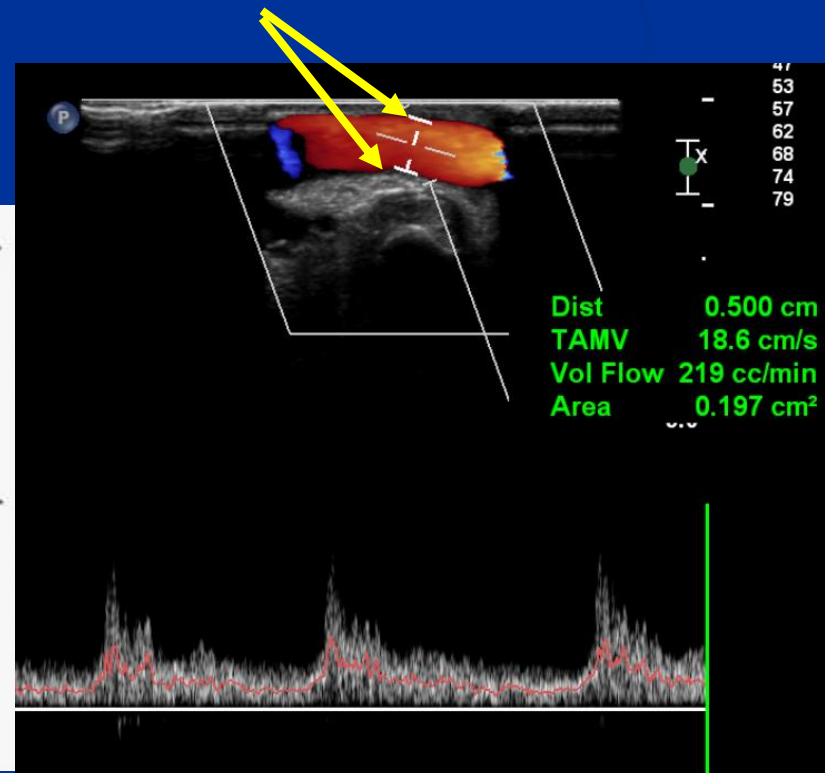
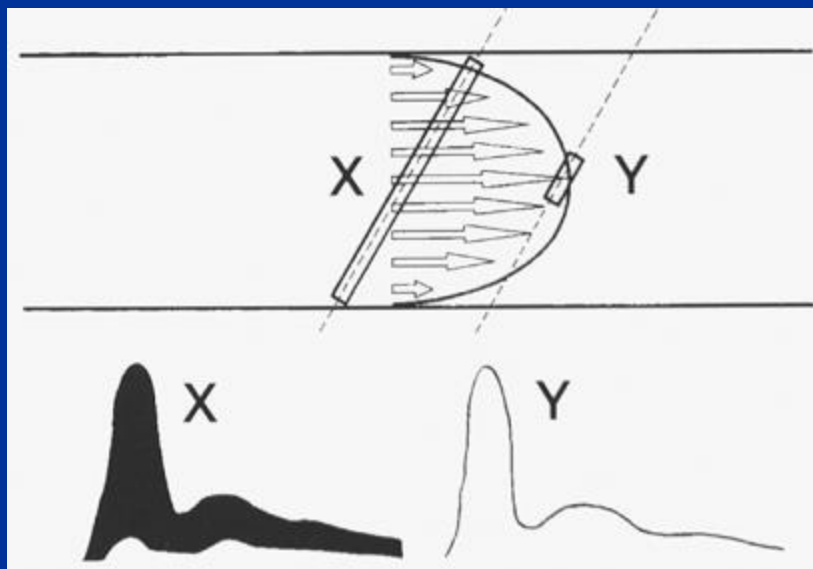


$$v = \frac{\Delta f}{2f_0 \cdot c \cdot \cos \alpha}$$



# Vzorkovací objem

- oblast, kde se měří signál (rychlost toku)
  - nastavuje se umístění, tj. **hloubka**
  - **velikost**
    - podle šíře cévy
    - co chceme hodnotit





# Frekvence vzorkování signálu

- *PRF, Scale*
- vzorkovací frekvence  $\cong$  počet UZ impulsů za sekundu
- Shannon-Kotelnikovův vzorkovací teorém
  - vzorkovací frekvence musí být minimálně **dvojnásobkem nejvyšší frekvence**, kterou zobrazujeme
  - první signál se musí vrátit před vysláním dalšího
- mezní hodnota  $\sim$  Nyquistův limit

10 min

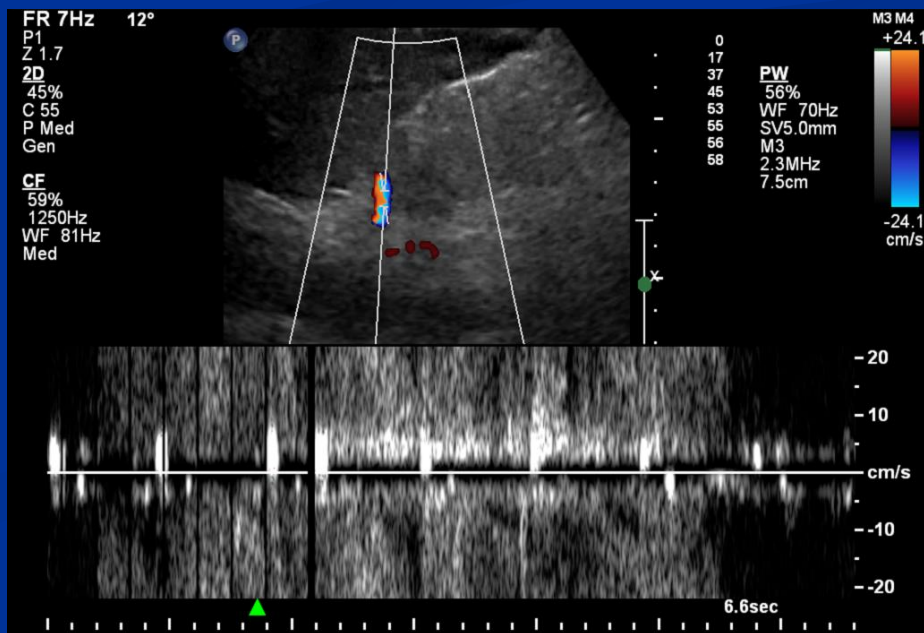
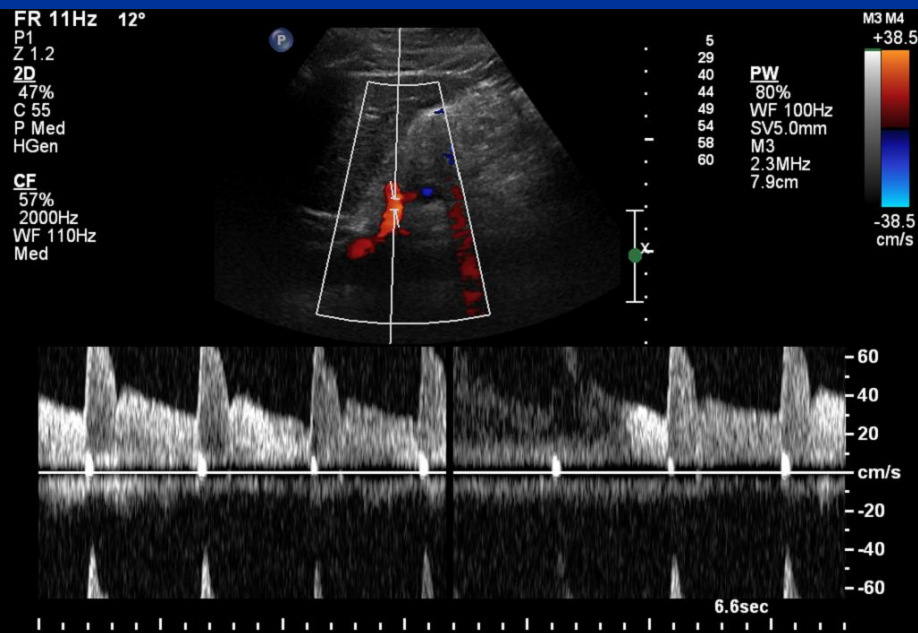
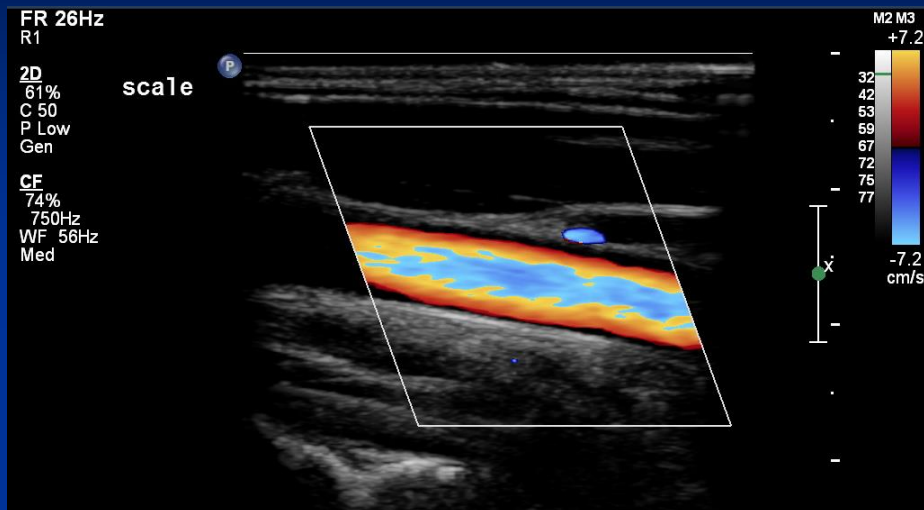


50 min



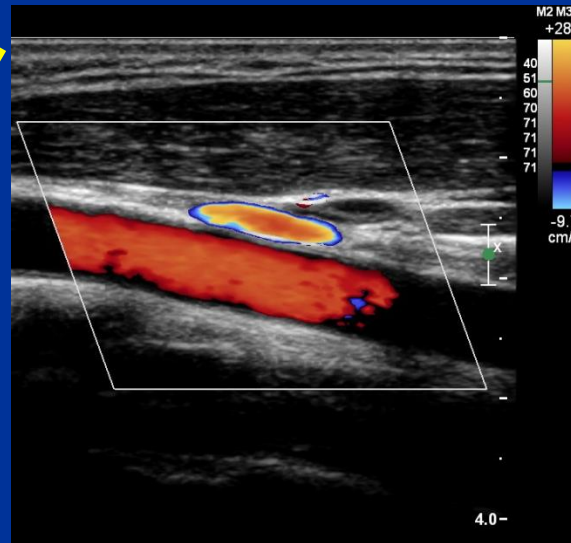
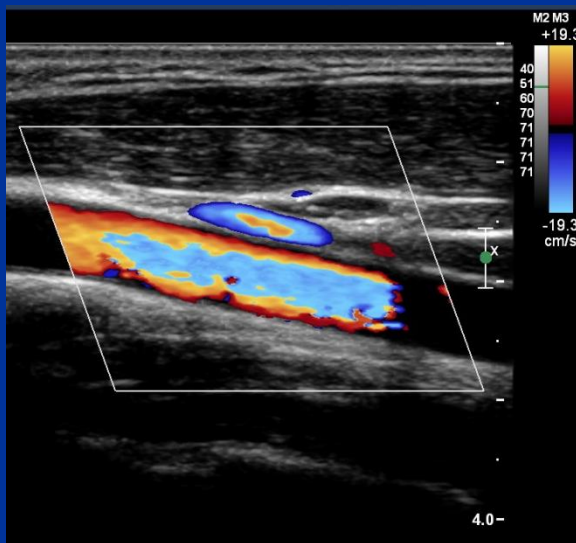
# Aliasing efekt

- „přestřelování“
- podstatná **ztráta** informace, její **zkreslení**
- platí pro **barevné** i spektrální **zobrazení**
- závisí na
  - PRF
  - rychlosti toku
  - úhlu cévy k UZ svazku



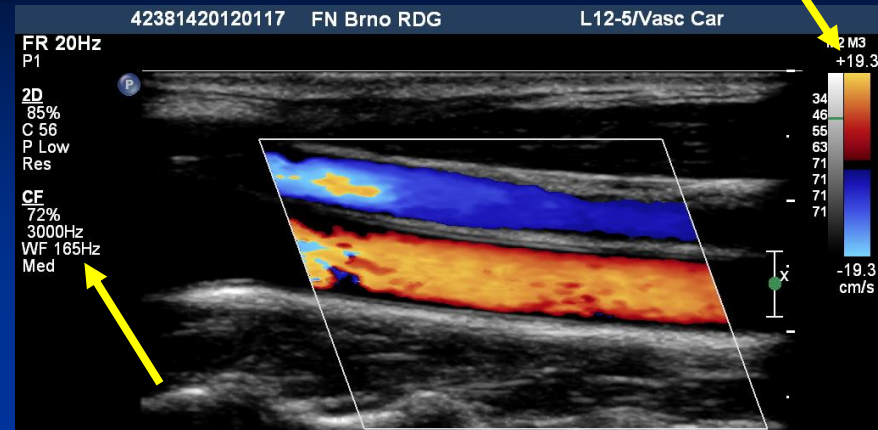
# Baseline

## ■ Pro barevný i spektrální záznam

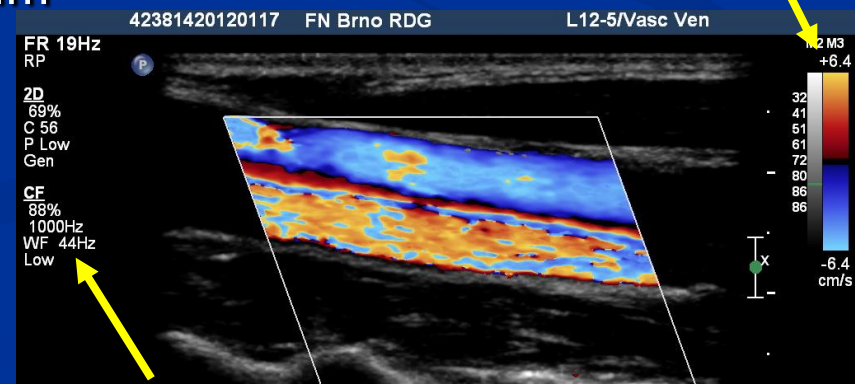


# filtr

- *wall filter, high pass filter, thump filter*
- zdroj signálu
  - krevní tok
  - nízkofrekvenční pohyby měkkých tkání – přenesené pulzace (srdce, cévy), dýchací pohyby



- jednoduchá **elektronická propust**
- vyloučení signálů s nízkou frekvencí, např. 25-200 Hz (až 1500 Hz)
- ! vyloučení i signálů s malým frekvenčním posuvem (pomalé toky, např. v žilách)
- ! mylná diagnostika např. trombózy
- Dynamic Filter





# Měření průtoku

Volume  
Flow

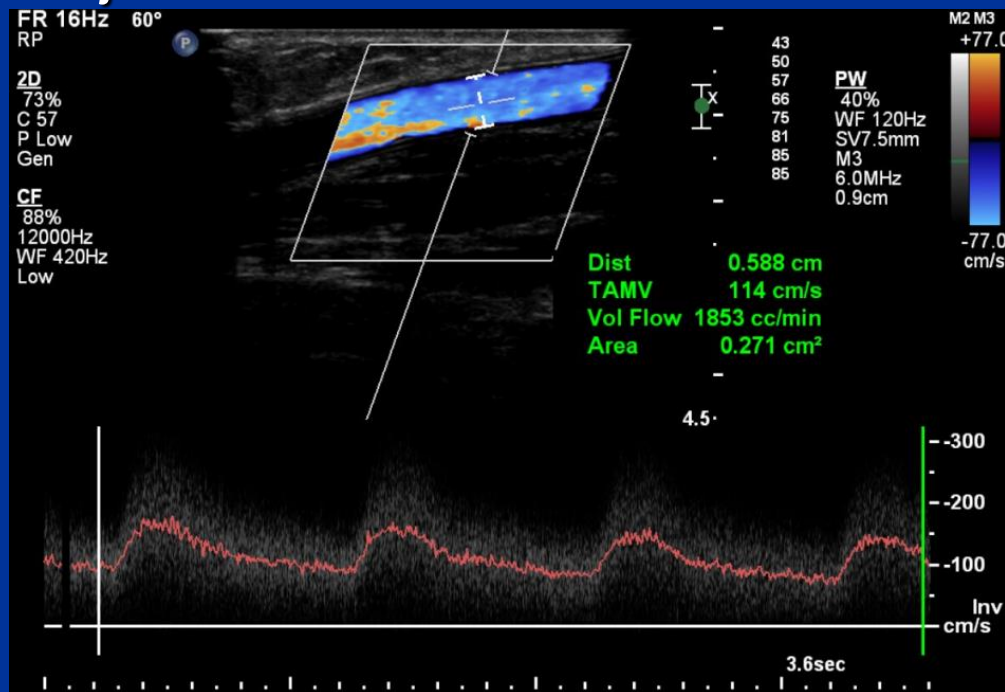
- Při správném nastavení lze změřit **objemový průtok krve** danou cévou

- $Q_v$  [ml/min] =  $TAMV$  [cm/s] x  $S$  [cm<sup>2</sup>] x 60

TAMV.....Time-averaged mean velocity

S.....plocha

- Vzorkovací objem!!





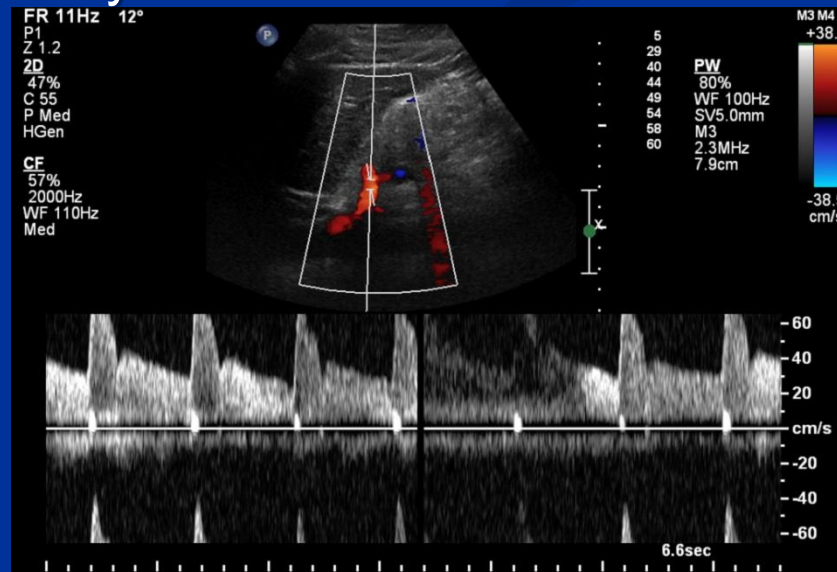
# Artefakty a jejich odstranění

# Odstranění aliasingu

- Úprava **Baseline**
- Zvýšení PRF – **Scale** – má limit
- Mít sample volume **blíže povrchu** (lze mít vyšší PRF)
- Snížení **frekvence sondy** – zmenší se frekvenční posun
  - Volba sondy s nižší frekvencí (**konvexní**)
- Zvýšit **úhel** mezi cévou a UZ svazkem (ale  $< 60^\circ$ )
  - ale ne jen nastavený úhel!

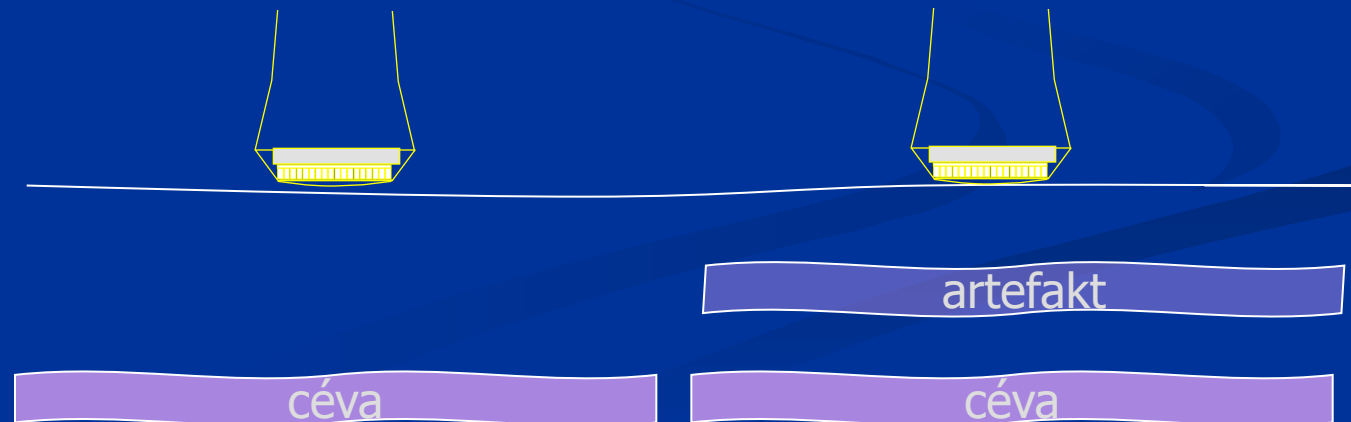
$$\Delta f = \frac{2 f_0 v \cos \alpha}{c}$$

*(Note: A red arrow points to  $f_0$  and a green arrow points to  $\alpha$  in the original image.)*



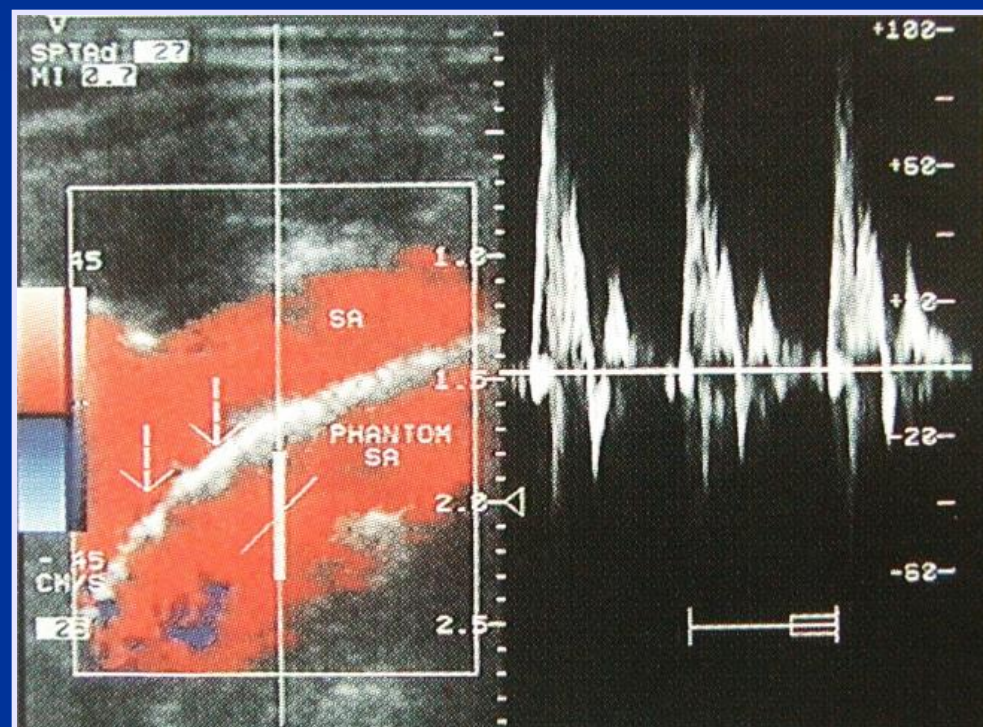
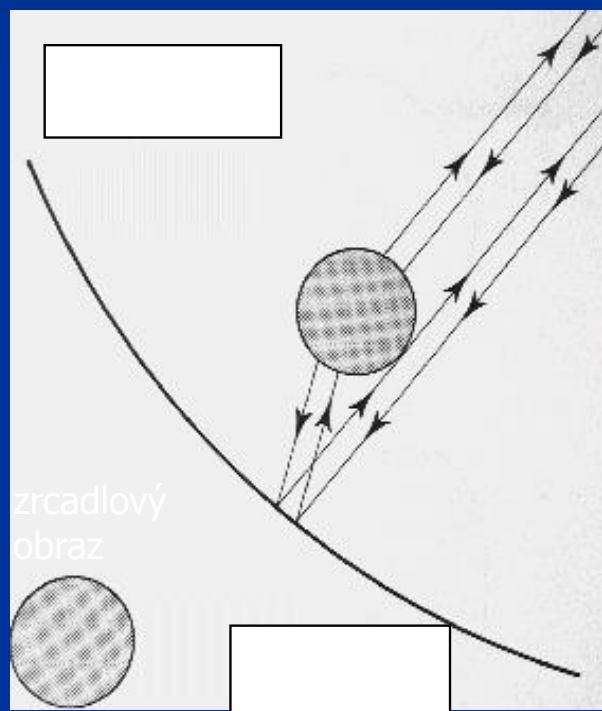
# artefakt vysoké PRF

- ↑ PRF – řeší aliasing
  - limitace hloubkou oblastí zájmu
- odrazy zaregistrovány po vyslání dalšího impulsu
- lokalizace zdroje mezi zdroj a skutečnou cévu
- automatická korekce
  - ↓ citlivost k pomalým tokům



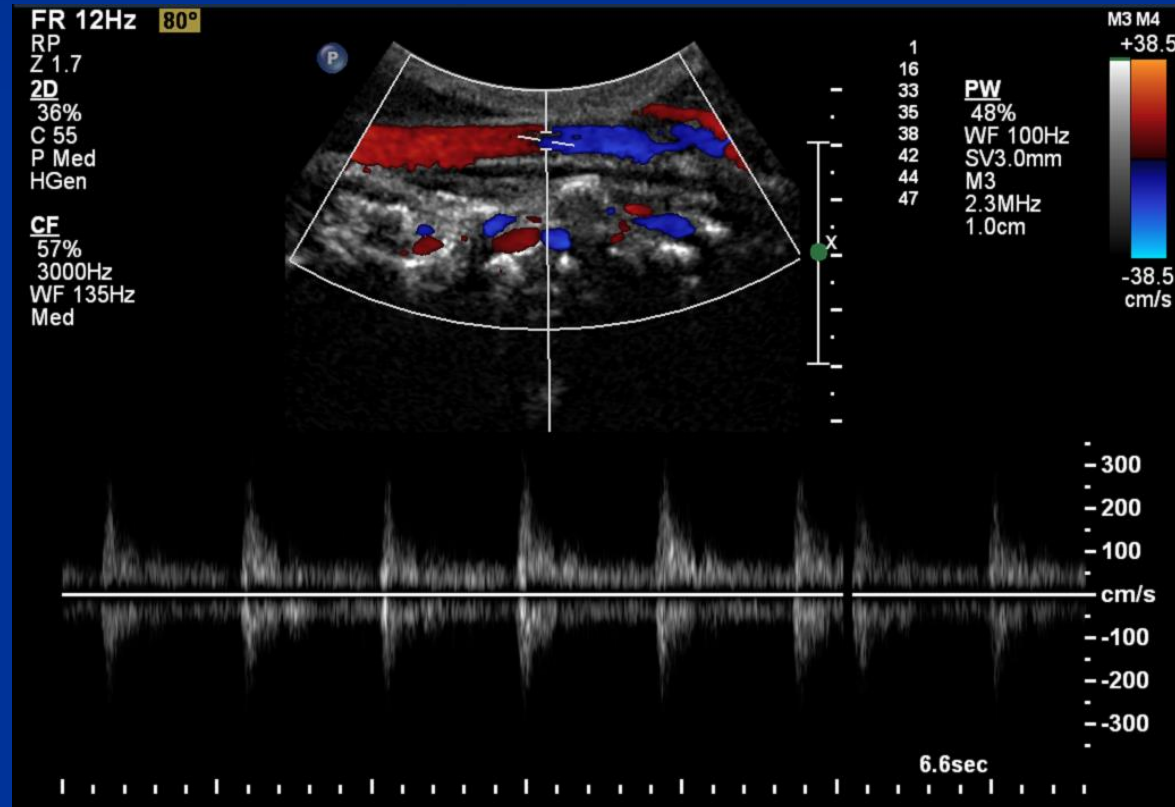
# artefakt zrcadlení

- zrcadlové artefakty
- zdvojení obrazů



# artefakt relativního směru toku

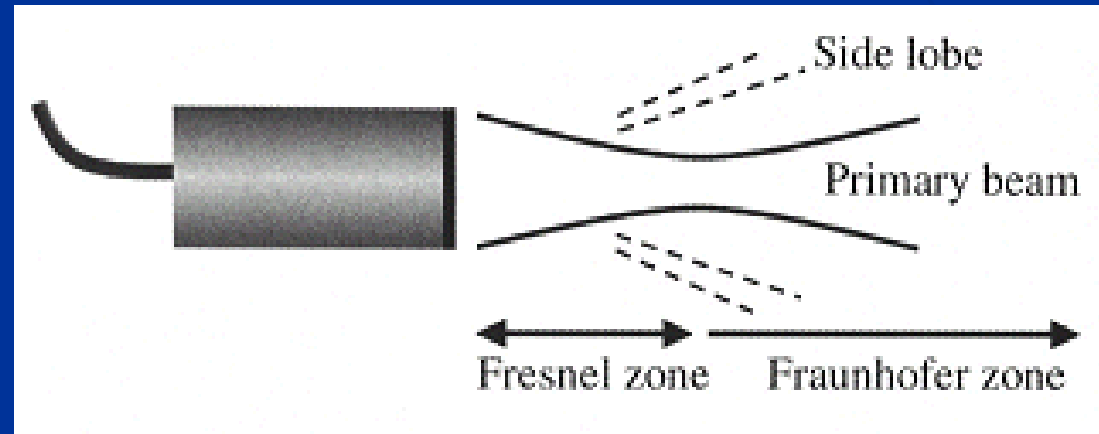
- v různých částech jedné cévy
- protisměrné toky
- vinuté cévy
- karotidy
- sektorová sonda





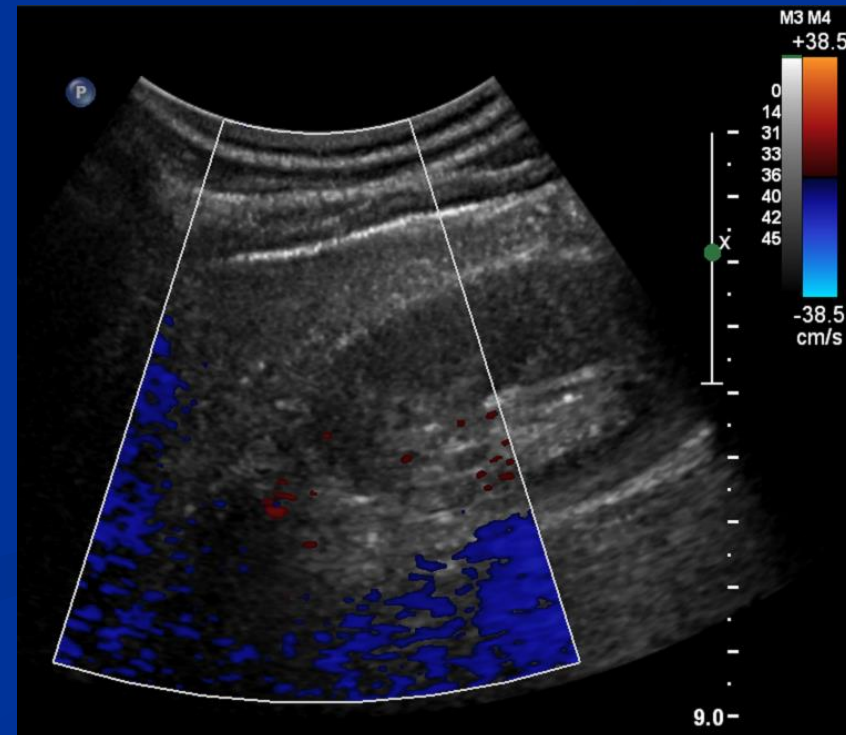
# Artefakt postranních paprsků - Side lobe artifact

- způsobené postranními UZ paprsky, které jsou sice slabší, ale mohou se od výrazně odrazivého rozhraní vrátit zpět a zobrazit jej přímo v ose obrazu



# artefakty pohybové

- srdeční činnost, cévní pulzace, respirace
- $\uparrow$  amplituda  $\sim$   $\uparrow$  intenzita
- $\downarrow$  frekvence, tj. řádově Hz 10, 100
- dopplerovský posuv
- zdroj dopplerovského signálu - nežádoucího
- eliminace - filtr



# Kontrindikace UZ

maximální doporučené intenzity dle FDA a intenzity UZ modalit

Aplikace	$I_{SPTA}^*$ (mW.cm <sup>-2</sup> )	MI
Měkká tkáň, cévy	720	1,9
Kardiologie	430	1,9
Vyšetření plodu	<b>94</b>	1,9
Oftalmologie	17	<b>0,2</b>

Diagnostická modalita	Průměrná $I_{SPTA}^*$ (mW.cm <sup>-2</sup> )	Maximální $I_{SPTA}^*$ (mW.cm <sup>-2</sup> )
Dvojměrné zobrazení	17-95	180
Barevný Doppler	150	510
CW – dopplerovské přístroje	170	800
Pulsní Doppler	<b>1400</b>	4500

\* $I_{SPTA}$  – space peak, time average – časový průměr vrcholových intenzit

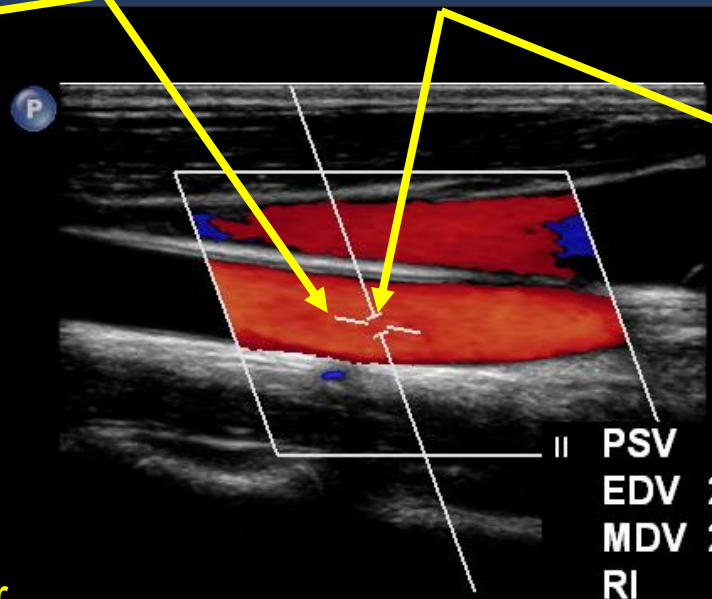
color gain      úhel      vzork. objem      PW gain      priorita barev. záznamu

FR 18Hz  
P1  
  
2D  
85%  
C 56  
P Low  
Res  
  
CF  
83%  
3500Hz  
WF 227Hz  
Med

60°

PRF

wall filtr



33  
48  
55  
63  
71  
71  
71  
71

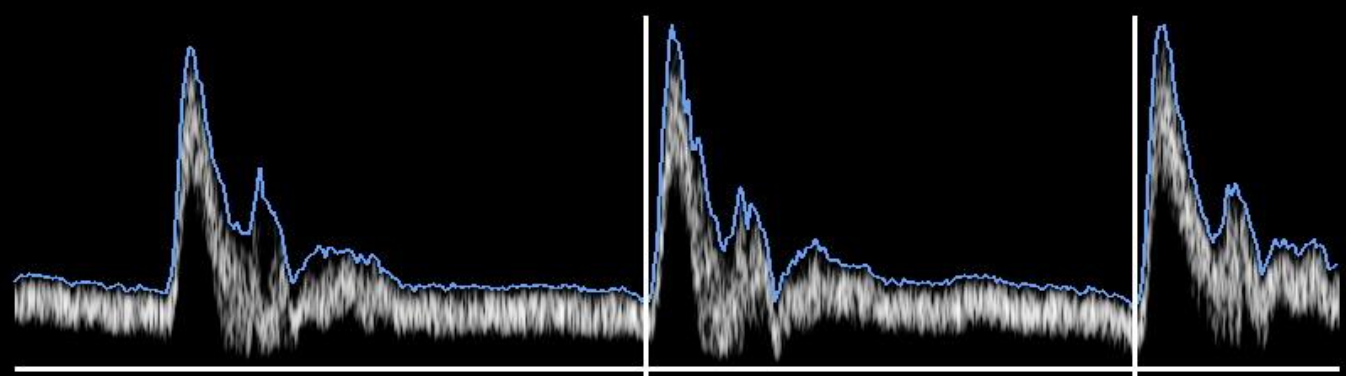
PW  
40%  
WF 120Hz  
SV 1.5mm  
M2  
6.0MHz  
2.0cm



směr toku

PRF (scale)

PSV 118 cm/s  
EDV 20.8 cm/s  
MDV 20.8 cm/s  
RI 0.82



3.6sec

-120  
-80  
-40  
-cm/s  
-40

# Děkuji za pozornost