

EFFETTO DOPPLER

Effetto Doppler: scoperto dal fisico austriaco Christian Johan Doppler (1843).

Variazione della frequenza di un'onda quando la sorgente ed il ricevitore si muovono uno rispetto all'altro.

Es.: colore dell'onda luminosa proveniente da una stella; frequenza di un suono nel range udibile (sirena di treno in avvicinamento/allontanamento); onde radar per la misura della velocità di un'automobile; barca in movimento contro corrente o nel verso della corrente.

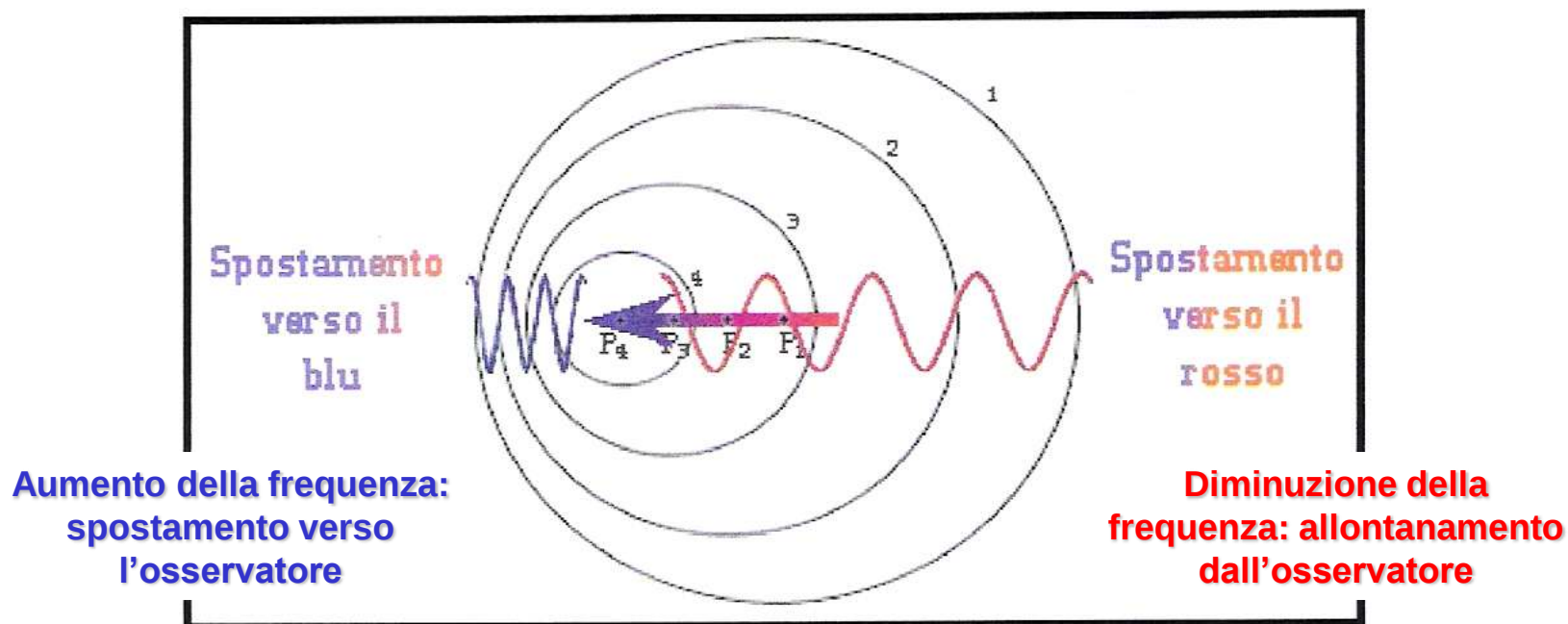
L'effetto Doppler (shift Doppler, frequenza Doppler) si ha sia che l'osservatore ("ascoltatore") si muova rispetto alla sorgente (sonora), sia che la sorgente si muova rispetto ad un osservatore in posizione fissa.

DOPPLER - USO CLINICO

Uso clinico dell'effetto Doppler (primi impieghi negli anni '60): misura non invasiva del flusso sanguigno, anche in vasi periferici, ottenuta dallo shift dell'onda ultrasonica emessa da trasduttore.

Il fascio ultrasonico attraversa i tessuti ed incontra i **globuli rossi** del sangue circolante all'interno dei vasi.

I globuli rossi, avendo dimensioni inferiori alla lunghezza d'onda del fascio ultrasonico, si comportano come riflettori non speculari e **diffondono l'onda ultrasonica in tutte le direzioni** (diffusione di Rayleigh) e quindi anche al trasduttore .



MODO DOPPLER

Quando un'onda è riflessa su un oggetto in movimento, la parte riflessa cambia la propria frequenza in funzione della velocità dell'oggetto (effetto Doppler). L'ammontare del cambiamento della frequenza dipende dalla velocità del bersaglio.

Doppler shift (Variazione di frequenza)

f_0 = Frequenza onda incidente

C = Velocità di propagazione del suono nel tessuto umano (1540 m/s)

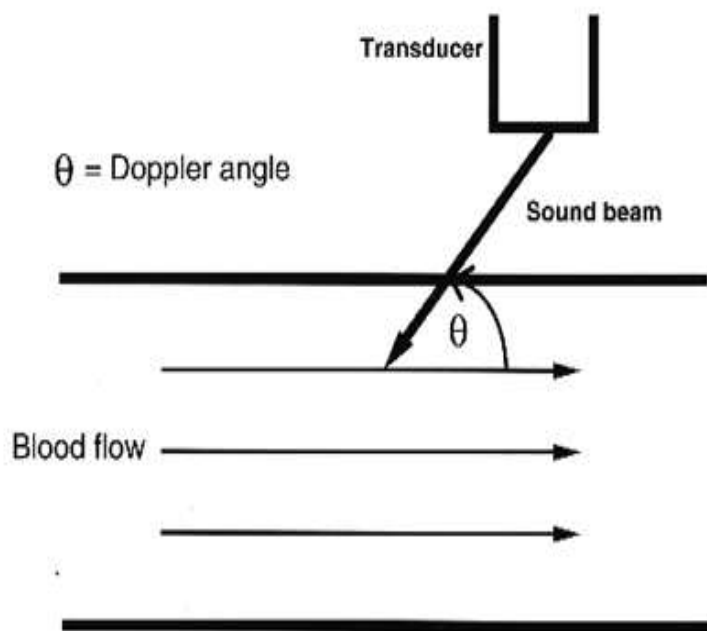
V = Velocità di bersaglio

Θ = Angolo di incidenza del fascio ultrasonoro con il bersaglio.

Il computer dell'ecografo, conoscendo la differenza di frequenza, può calcolare la velocità del mezzo su cui l'onda si è riflessa, mentre la profondità è nota dal tempo impiegato.

L'informazione della velocità è presentata a monitor con **codifica a colori** (normalmente rosso e blu) a seconda se si tratti di velocità in avvicinamento o in allontanamento; l'intensità del colore è questa volta legata alla frequenza dell'onda di ritorno. Uso tipico è lo studio vascolare (flussimetro).

ANGOLO DI INSONAZIONE



$\theta = 90^\circ \Rightarrow$ non è apprezzabile alcun segnale Doppler

$\theta = 0^\circ \Rightarrow$ condizione ottimale

$40^\circ \leq \theta \leq 60^\circ \Rightarrow$ condizione di lavoro

Angolo di incidenza fra il fascio ultrasonico e la direzione del flusso. (parallela all'asse del vaso).

Equazione Doppler:

$$Df = 2 f v \cos \theta / c$$

Df = frequenza dello shift Doppler (differenza fra la frequenza in trasmissione e quella in ricezione)

f = frequenza trasmessa

v = velocità del sangue

c = velocità del suono

θ = angolo fra il fascio ultrasonico e la direzione del flusso sanguigno

Da cui:

$$v = \frac{Df c}{2 f \cos \theta}$$

È la velocità del sangue

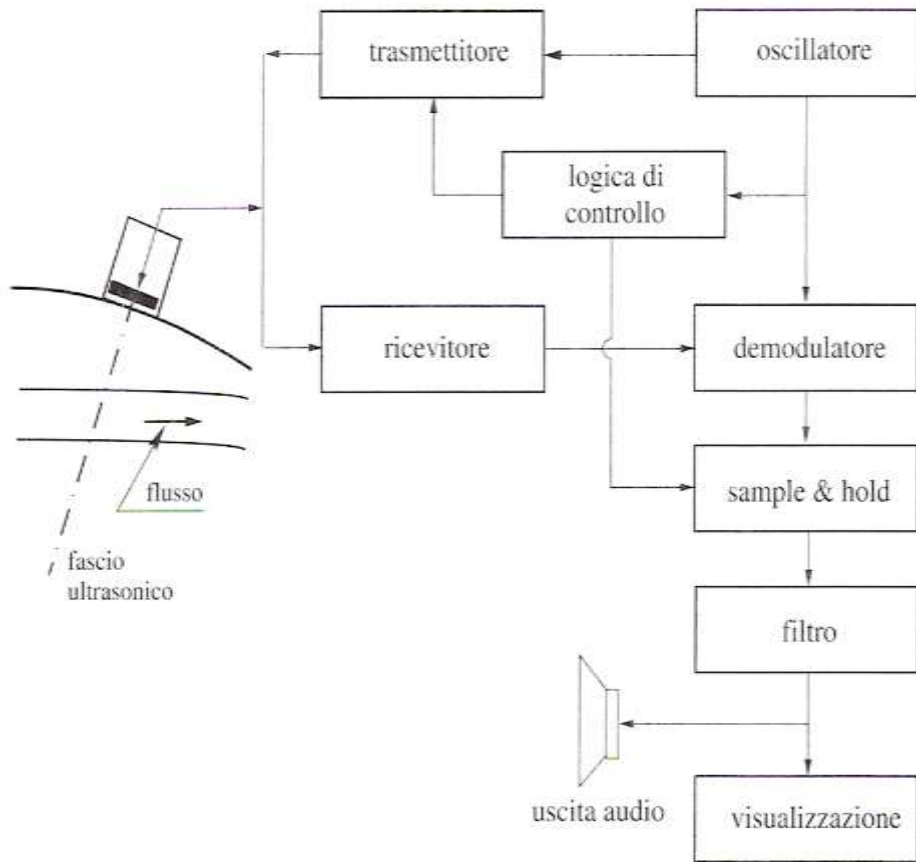
SISTEMA DI EMISSIONE

DOPPLER PULSATO : il trasduttore è costituito da un unico cristallo che funziona sia da emettitore che da ricevitore. Il funzionamento dipende dalla scelta di:

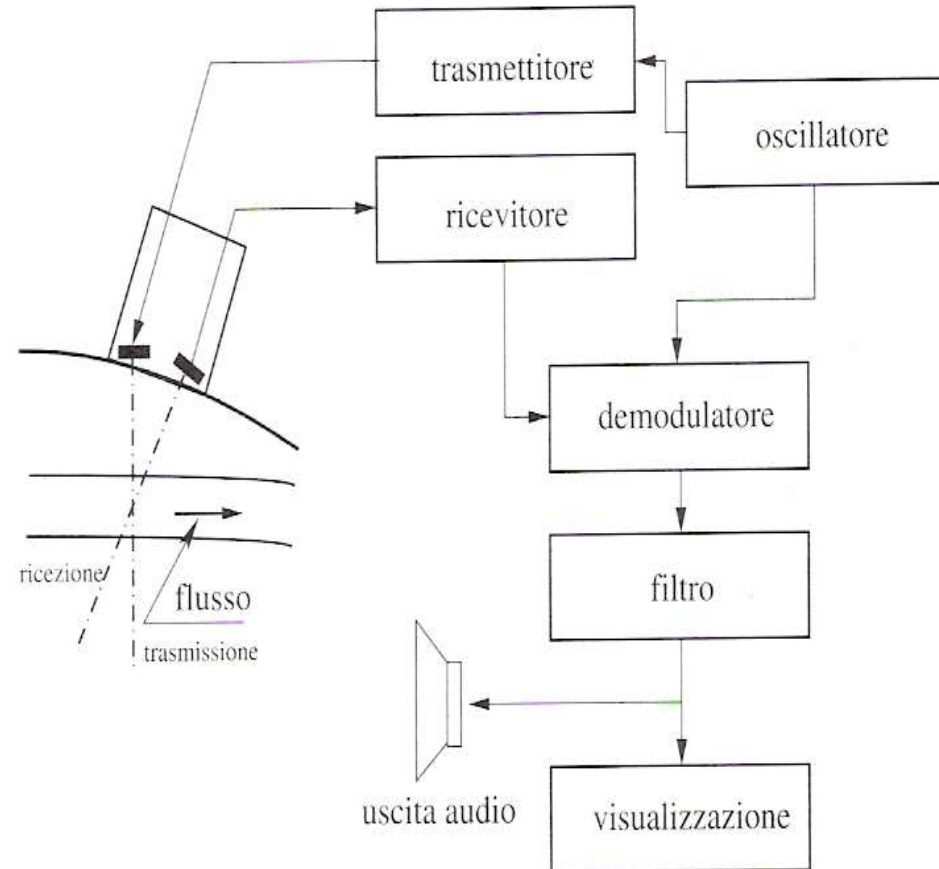
- Frequenza del trasduttore: inversamente proporzionale alla profondità di esplorazione, a causa dell'attenuazione.
- Frequenza di ripetizione degli impulsi (PRF): direttamente proporzionale alla risoluzione spaziale, inversamente alla profondità.
- Angolo di insonazione: angolo fra il fascio ultrasonico e la direzione del flusso; più piccolo è l'angolo, migliore è la misura della velocità

DOPPLER CONTINUO : la sonda è costituita da due cristalli, uno emittente e l'altro ricevente. L'impulso è quindi inviato continuamente e la sua frequenza di emissione (PRF) è elevatissima, consentendo di rilevare velocità altrettanto elevate. C'è il problema della localizzazione spaziale dei segnali rilevati.

SISTEMI DOPPLER



Schema di sistema Doppler pulsato



Schema di sistema Doppler continuo

COLOR DOPPLER E DOPPLER PULSATO

Color Doppler (si hanno informazioni sulla velocità media del mezzo - adatto per un volume di studio ampio)

Doppler Pulsato (si ottiene lo spettro di tutte le velocità presenti nel mezzo, con la loro importanza - adatto per uno studio su un particolare).

Nella modalità Doppler, il sistema fornisce normalmente anche un segnale udibile che simula il flusso del sangue; si tratta comunque di un segnale virtuale che non esiste, utilizzato solo per comodità (si può conoscere quanto riprodotto sul monitor anche senza guardarlo).

Le immagini ecografiche sono a bassa risoluzione, tipicamente 256x256 ad 8 bit/pixel. Di solito il radiologo effettua la diagnosi direttamente sul monitor, passando alla stampa solo per documentazione

TIPI DI FLUSSO

Tipi di flusso

A) Flusso piatto:

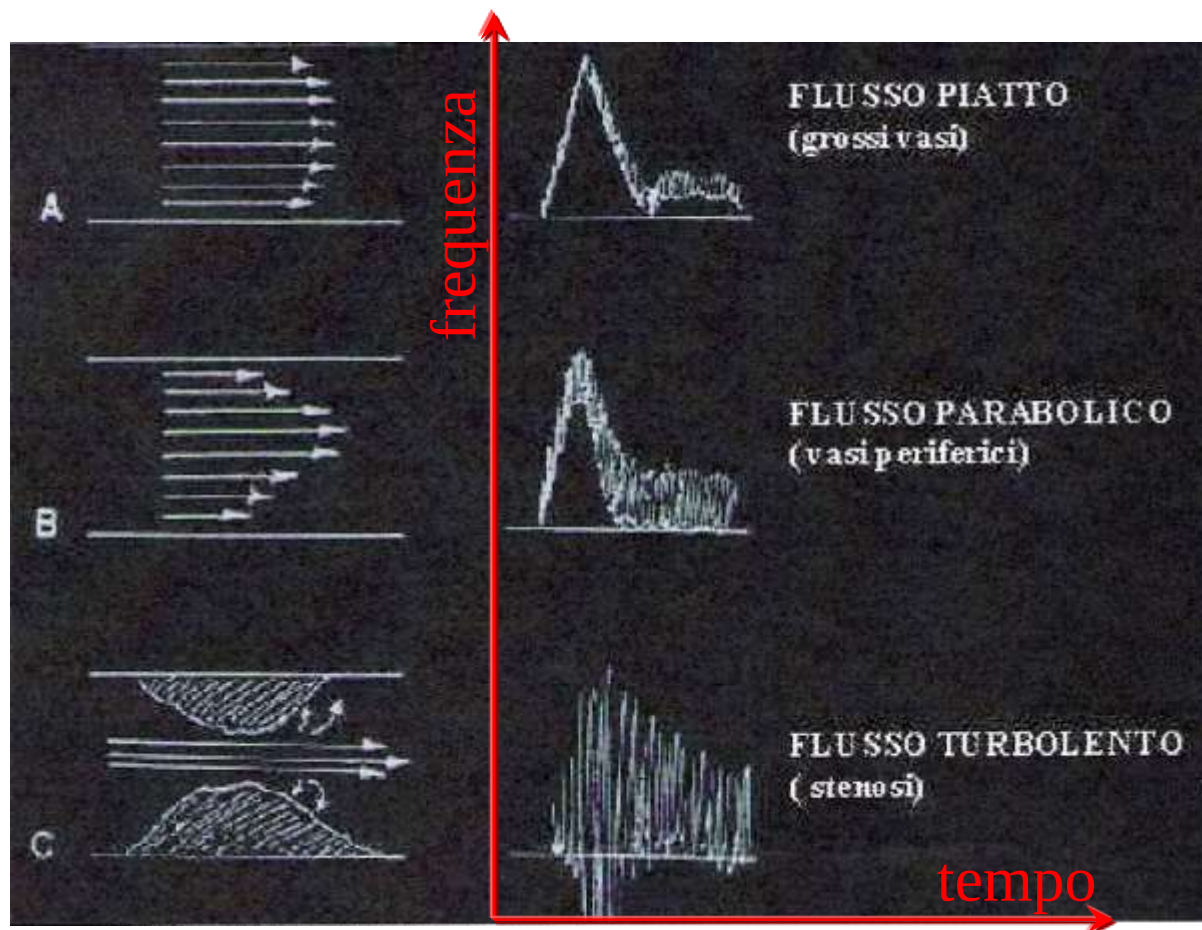
i diversi strati concentrici del flusso si muovono a velocità omogenea (spettro ristretto come nei grossi vasi).

B) Flusso a profilo parabolico:

in cui la velocità media e la massima divergono (spettro allargato come nelle arterie di piccolo calibro). Durante la sistole il flusso è più veloce e uniforme e in diastole rallenta provocando un allargamento dello spettro.

C) Stenosi del vaso:

aumento della velocità in tale sede e comparsa di **flusso turbolento** più a valle con scomparsa della finestra spettrale.



Si rappresenta lo **spettrogramma** del segnale Doppler ultrasonico, i cui massimi sono legati alla velocità massima del flusso

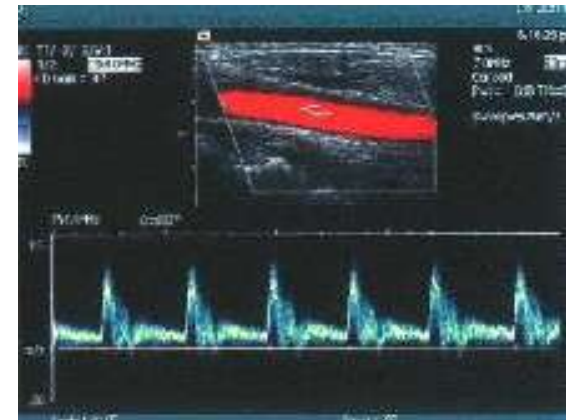
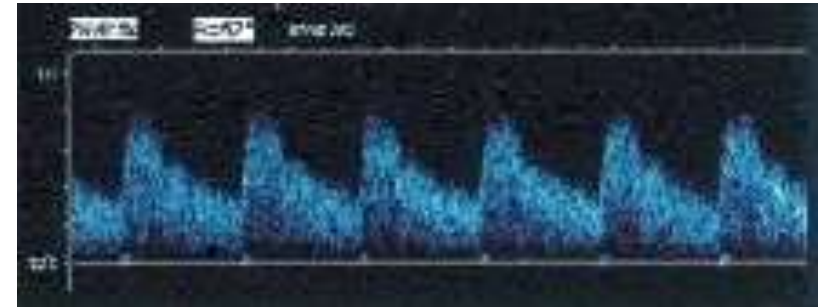
ECO DOPPLER

L'**eco-Doppler** fornisce informazioni indirette sul flusso, analizzando lo spettro delle frequenze contenute in un piccolo volume di sangue selezionato elettronicamente.

Le informazioni sono espresse attraverso una **curva spettrale** ed un **segnale acustico**.

L'**eco-color Doppler**, la più recente innovazione tecnologica nella diagnostica con ultrasuoni, visualizza in modo diretto ed in tempo reale il flusso all'interno dei vasi codificandolo **a colori**.

Permette all'operatore di identificare presenza, direzione e comportamento del flusso.



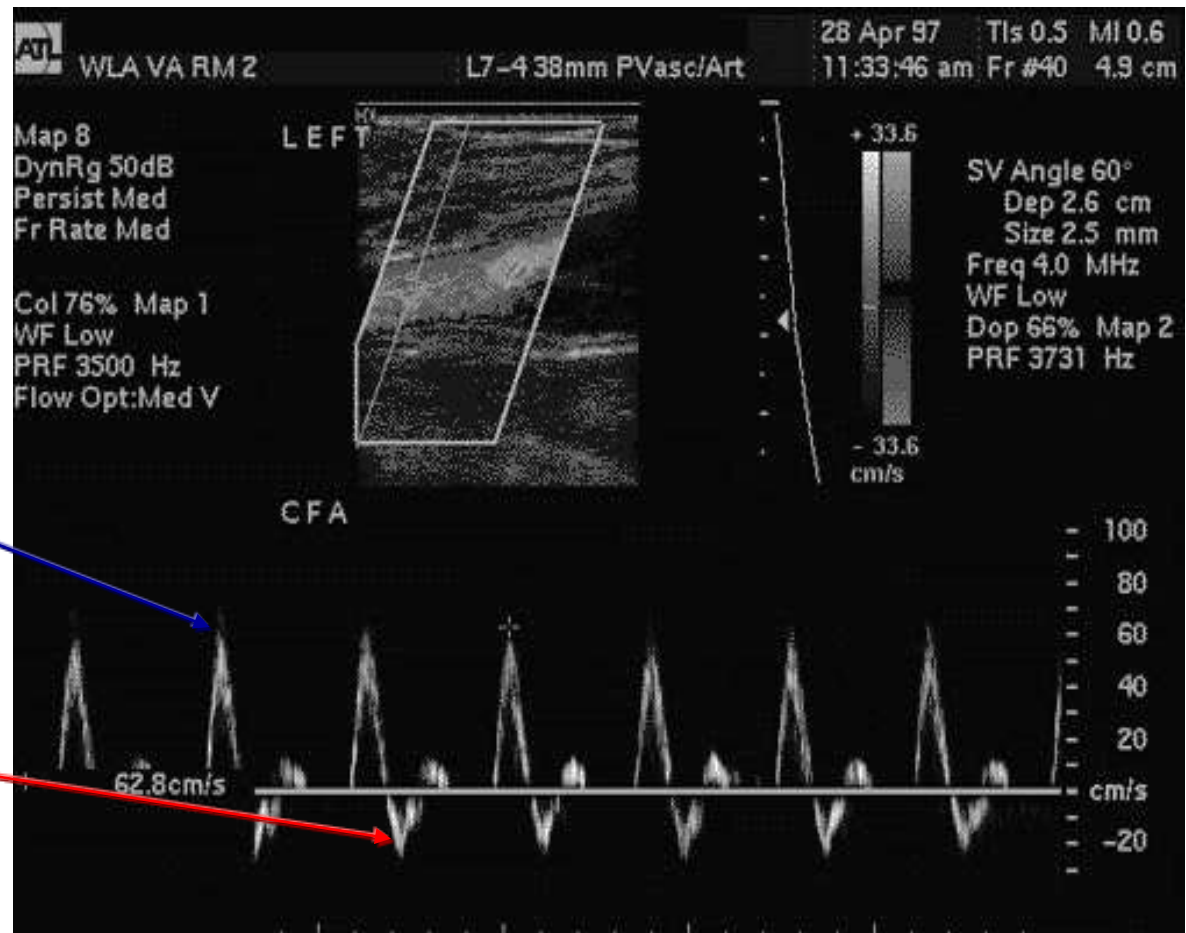
Quando necessario indirizza la valutazione quantitativa del flusso permettendo il calcolo della velocità dei globuli rossi o di una serie di indici indiretti, semiquantitativi, che esprimono le caratteristiche di resistenza al flusso dei diversi territori vascolari.

GATED DOPPLER (PULSATO)

Il Doppler pulsato consente di selezionare un volume nel vaso e di visualizzarlo con un'immagine in scala di grigi, mostrando lo spettro del range di tutte le velocità del sangue in funzione del tempo.

L'ampiezza del segnale è proporzionale al n. di globuli rossi ed è indicata da gradazioni di grigio.

Pulsed Doppler US. Le velocità sono indicate dalla scala sulla ds.. Deflessioni sopra la linea di base indicano un **flusso verso il trasduttore**, mentre quelle sotto la linea di base indicano un **flusso in direzione opposta**.



ECOCOLORDOPPLER ARTERIOSO

L'Eco-Color-Doppler permette lo studio sia della morfologia (anatomia) che dei flussi (emodinamica) delle arterie.

E' possibile attraverso di esso studiare il diametro e lo spessore della parete dell'arteria oltre alle caratteristiche del flusso, quali la velocità e la direzione del sangue. L'uso del colore permette di ricostruire in tempo reale, sull'immagine anatomica ottenuta con il bidimensionale, le mappe dei flussi ematici all'interno delle arterie esaminate. Con questa particolare diagnostica possono essere studiate le principali arterie del capo e del collo:

- le **arterie carotidi** comuni (destra e sinistra) che risalgono il collo, in prossimità della mandibola si suddividono nell'arteria carotide interna che irrori gli organi contenuti nella cavità cranica e l'arteria carotide esterna che si distribuisce alla superficie esterna del cranio e del viso.

- le **arterie vertebrali** decorrono nella regione posteriore del collo dentro un canale osseo formato dalle vertebre cervicali e da qui, attraverso il foro occipitale, entrano nel cranio e si uniscono tra loro per formare il tronco basilare che a sua volta si divide nelle due arterie cerebrali posteriori. I due sistemi, il vertebro-basilare ed il carotideo, si congiungono alla base del cervello formando un poligono arterioso cosiddetto del Willis.

- Ampia applicazione dell'Eco-Doppler si ha anche per lo studio del sistema arterioso degli arti inferiori:

- **L'aorta addominale** al di sotto dei reni si divide in due grossi vasi: l'arteria Iliaca esterna e l'arteria Iliaca Interna. Mentre l'Iliaca interna va ad irrorare gli organi genitali, quella esterna prosegue il suo decorso verso le gambe modificando via via il suo nome in arteria femorale, poplitea e tibiale (che a sua volta si divide in arteria tibiale anteriore e posteriore) fino ai piedi.

APPLICAZIONI

Stenosi, placche, ulcerazioni, dissecazioni

Doppler transcranico

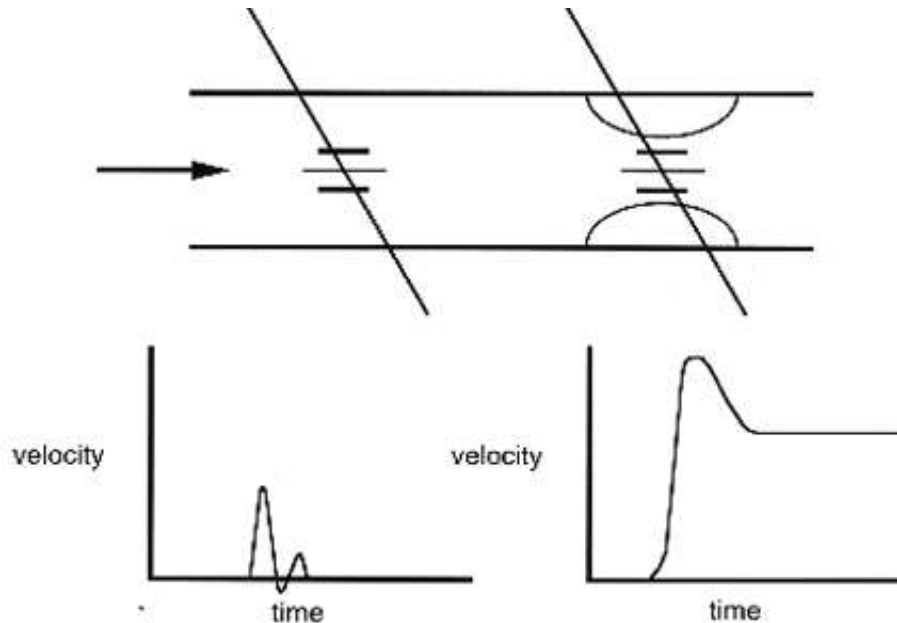
Vasospasmo (aneurisma)

Occlusione vasale (arteriosclerosi)



Color Doppler
di una carotide

DOPPLER – USO DIAGNOSTICO



STENOSI

Calcolo del rapporto della velocità di picco sistolica (**peak systolic velocity, PSV**). Si valutano le PSV nella zona di restringimento del vaso (a ds.) e in una zona normale vicina (a sin.). Il rapporto è dato dal valore di PSV nella zona di restringimento diviso per quello nella zona normale.

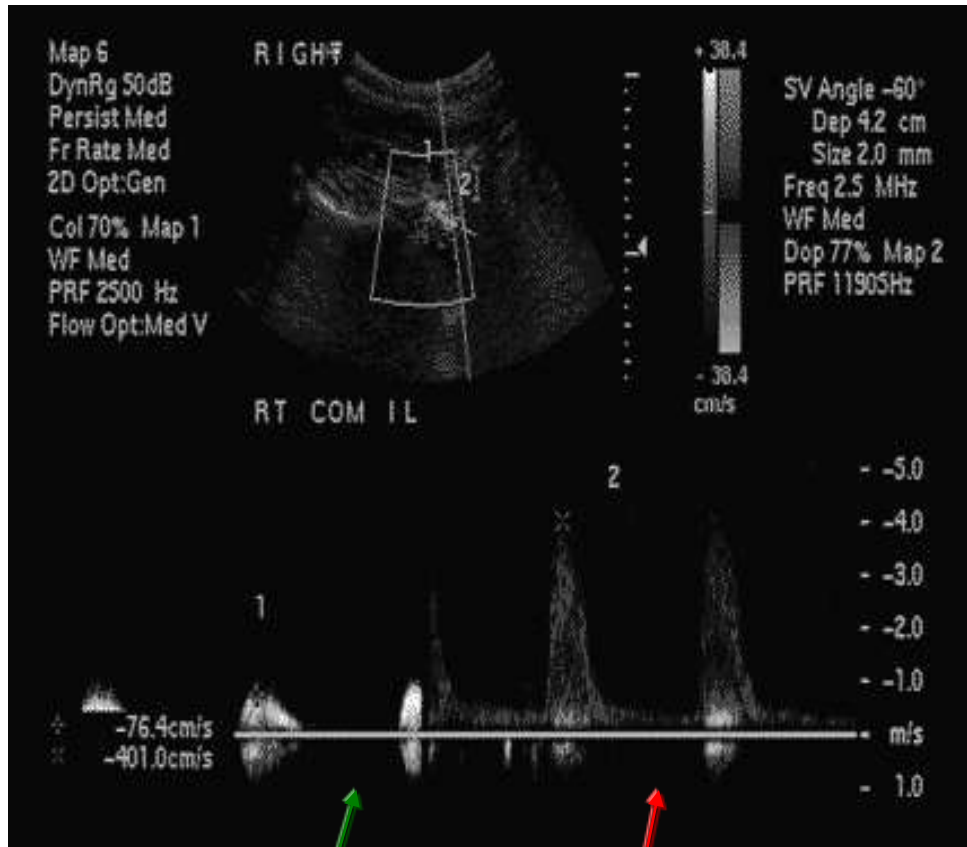
STENOSI

Se il lumen di un'arteria è ristretto, la **velocità del flusso sanguigno cresce nella stenosi** (principio di continuità del flusso).

Il criterio Doppler principale per la diagnosi di una stenosi arteriale è quindi basato sull'individuazione di un **incremento nella PSV** con il Doppler pulsato.

La misura del rapporto fra la PSV nella zona di indagine e quello nella zona prossimale, non stenotica, è un criterio di valutazione diagnostica efficace.

Un rapporto > 2 indica una stenosi emodinamicamente significativa (50% o maggiore) ed un rapporto 3.7 - 4 indica una stenosi al 75% o più.



Stenosi, Doppler pulsato. La velocità intrastenotica è **elevata** (ds), in confronto a quella **normale**, prestenotica (sin).

COLOR VS DOPPLER PULSATO



Color Doppler è utile per fare una mappa dei vasi e individuare zone di possibile stenosi (aliasing o restringimento del vaso). Le zone sospette vengono poi analizzate con il Doppler pulsato che fornisce lo spettrogramma nella zona stenotica e nelle sue immediate vicinanze, consentendo il calcolo del rapporto PSV.

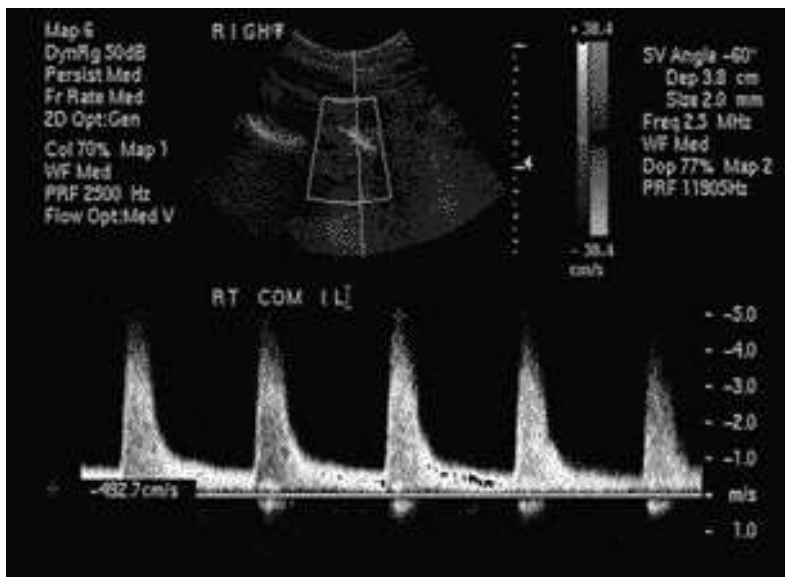
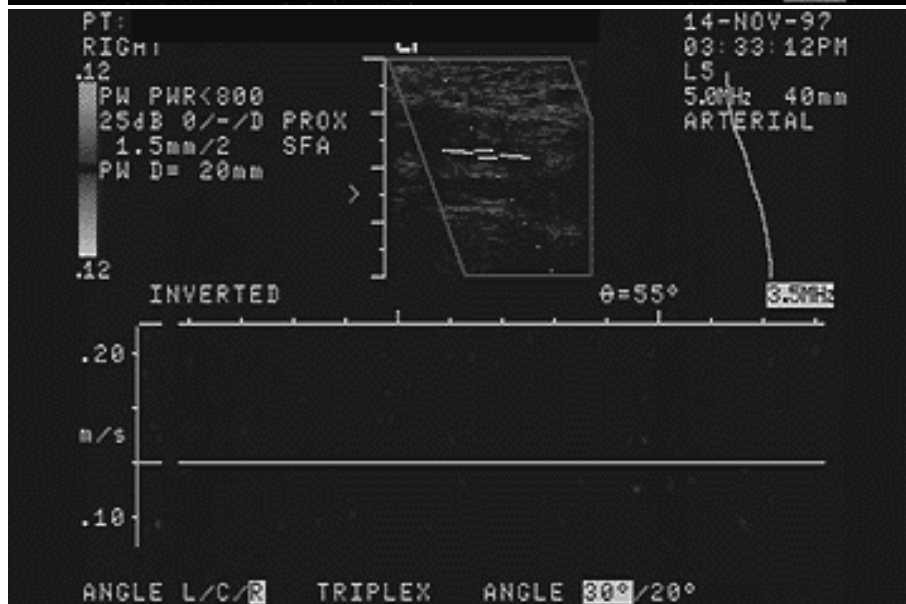
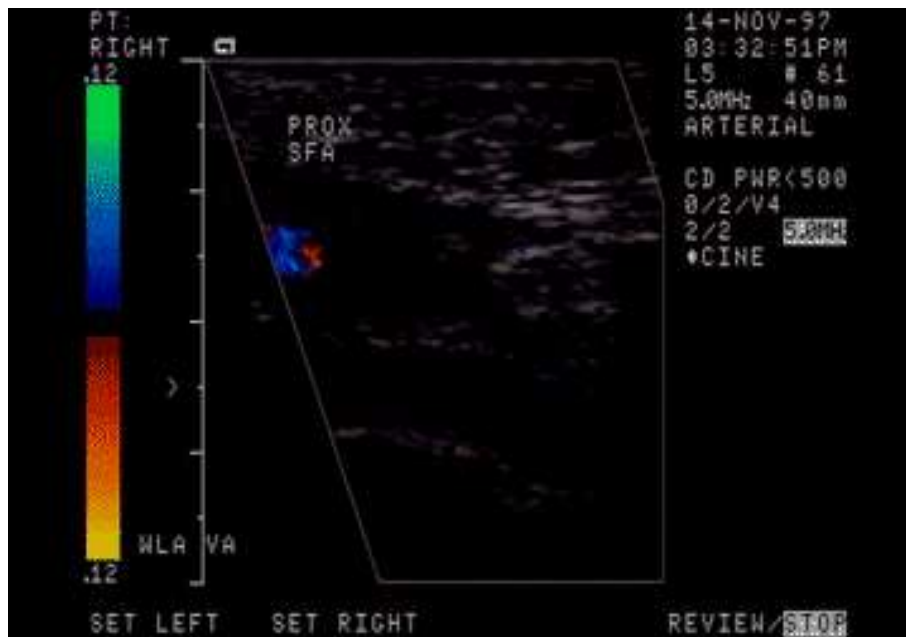


Fig. in alto: Stenosi con aliasing, color Doppler. Notare aliasing nell'arteria iliaca, indicativo di una zona di shift ad alta frequenza e possibile stenosi.

Fig. in basso: Doppler Pulsato US dell'anomalia della fig. precedente. C'è un valore elevato di PSV (>400 cm/sec). La velocità prestenotica è di 80 cm/sec, e il rapporto PSV è pari a 5, consistente con una stenosi $> 75\%$.



La diagnosi di occlusione tramite Doppler è abbastanza semplice e consiste nella mancanza di flusso rivelabile sia tramite Color Doppler che Doppler pulsato.

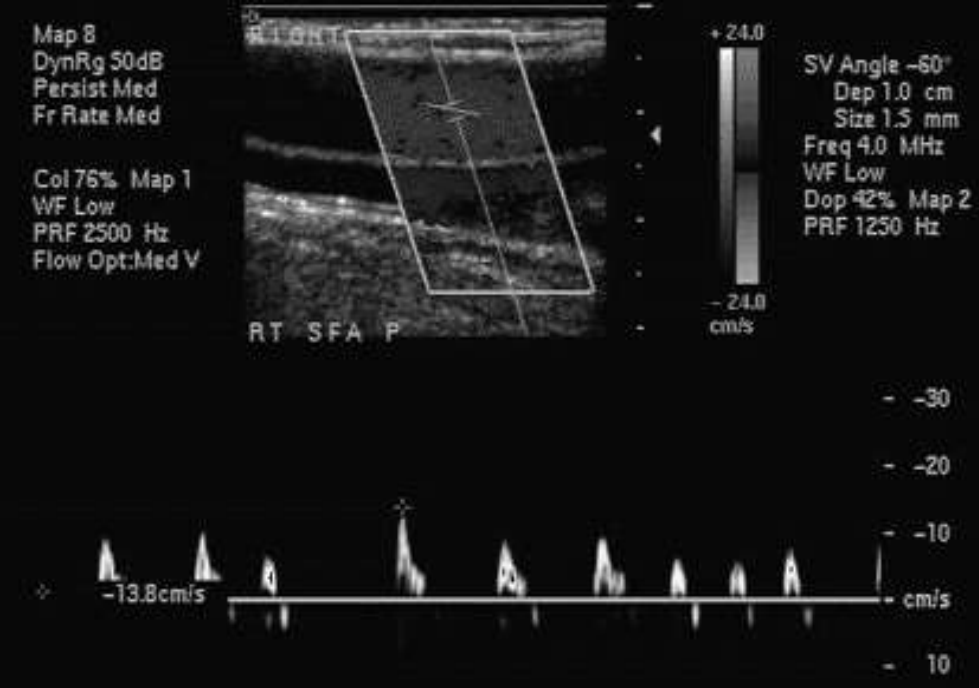
E' fondamentale che tale assenza di flusso non sia dovuta a fattori tecnici.

Il PRF deve essere posto a valori abbastanza bassi da consentire di rilevare un segnale a bassa velocità causato dall'occlusione.

La presenza di placche dense calcificate, la compressione dei vasi, e stenosi severa oltre il limite di rivelabilità Doppler sono causa di falsi-positivi.

Una diagnosi falsa-negativa può essere dovuta all'erronea interpretazione del flusso ad alta velocità di vasi collaterali paralleli al segmento occluso.

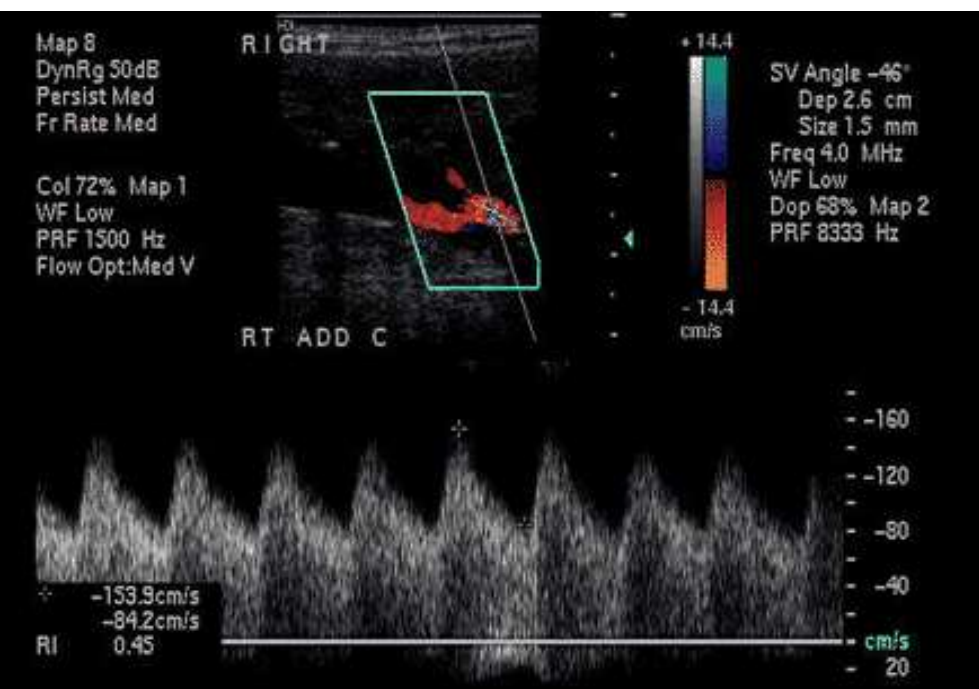
Occlusione: Color Doppler e Doppler Pulsato. Si noti l'assenza di flusso, dovuta all'occlusione



Doppler Pulsato, in prossimità di una lesione importante. Si noti la perdita di flusso in diastole e la bassa velocità sanguigna.

In presenza di un'occlusione acuta, possono venire trasmesse all'occlusione pulsazioni spurie, tali da produrre segnali Doppler stretti, a bassa velocità che non rappresentano il flusso vero del sangue.

La forma d'onda distante dall'occlusione mostra spesso un andamento a bassa resistenza con perdita di flusso retrogrado in diastole e intenso flusso anterogrado in sistole.

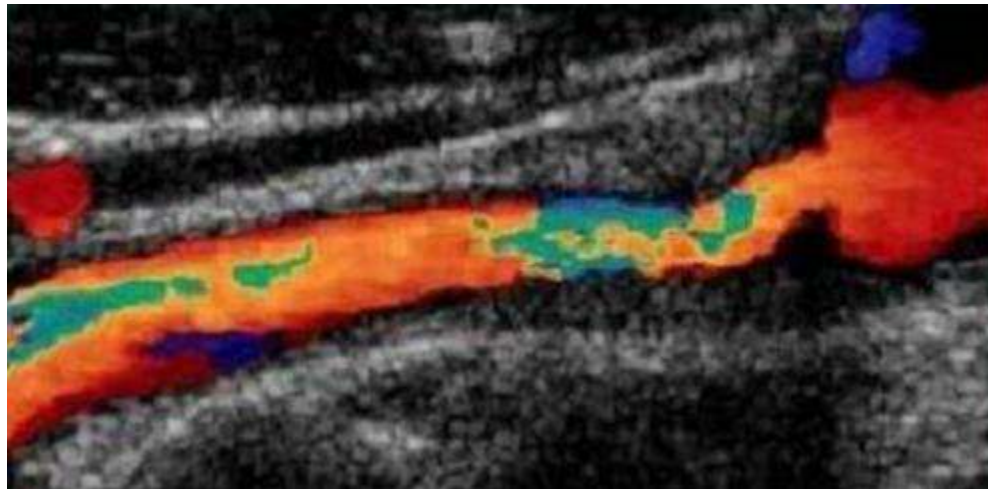


Occlusione - Doppler Pulsato. Bassa resistenza distante dalla lesione importante.

La **malattia aterosclerotica** è la patologia più frequentemente studiata sia per il distretto dei tronchi sovraortici che per quello degli arti inferiori. La placca carotidea (ateroma) è la lesione aterosclerotica più frequente. Con il Doppler può essere eseguito uno studio morfologico della placca e una stima di quanto la placca sia in grado di ostruire il flusso sanguigno (stenosi).

Le stenosi importanti possono spiegare i disturbi del circolo cerebrale ma è molto importante lo studio delle caratteristiche della superficie della placca ateromatosa perché da essa dipende la potenzialità emboligena. Una placca che di base non ostruisce il flusso di sangue, può diventare ugualmente pericolosa perché dalla sua ulcerazione possono partire degli emboli (aggregati piastrinici) che chiudono i vasi periferici più piccoli con grave danno sul nutrimento del cervello. La conseguenza in questi casi può essere l'ictus e la paralisi.

Altre indicazioni all'esecuzione dell'esame riguardano l'ipertensione arteriosa (pressione alta), le cardiopatie, l'ipercolesterolemia, le malattie neurologiche, la cefalea (mal di testa) e le vertigini (capogiri).



DOPPLER IN GRAVIDANZA

La crescita fetale intrauterina è un processo biologico complesso e continuo. Svariati fattori, di origine materna o fetale, possono interferire in tale processo comportando un ritardo della sua fisiologica evoluzione (*ritardo di accrescimento intrauterino* o IUGR).

L'IUGR interessa circa il 7% delle gravidanze e può avere effetti estremamente pericolosi per il feto. Le cause fetali di IUGR sono generalmente legate a patologie congenite, quali *anomalie cromosomiche, genetiche, malformative* o a processi infettivi intrauterini.

Fra le cause materne la più frequente è l'*insufficienza placentare*, cioè una riduzione della capacità funzionale della placenta dovuta a svariati fattori e che si manifesta soprattutto nella seconda metà della gravidanza.

Nel caso in cui la placenta non funzioni in modo corretto inizia una serie di progressivi adattamenti nell'ambiente intrauterino che portano ad una riduzione dell'accrescimento fetale e possono determinarne anche la morte.

Tali modificazioni comportano una alterazione dei flussi sanguigni nel distretto materno-fetale, che si possono indagare attraverso la **flussimetria Doppler**.

Tale indagine si basa sullo **studio dei flussi sanguigni nella madre (arteria uterina) e nel feto (arteria ombelicale, cerebrale, distretto venoso)**.



Arteria uterina



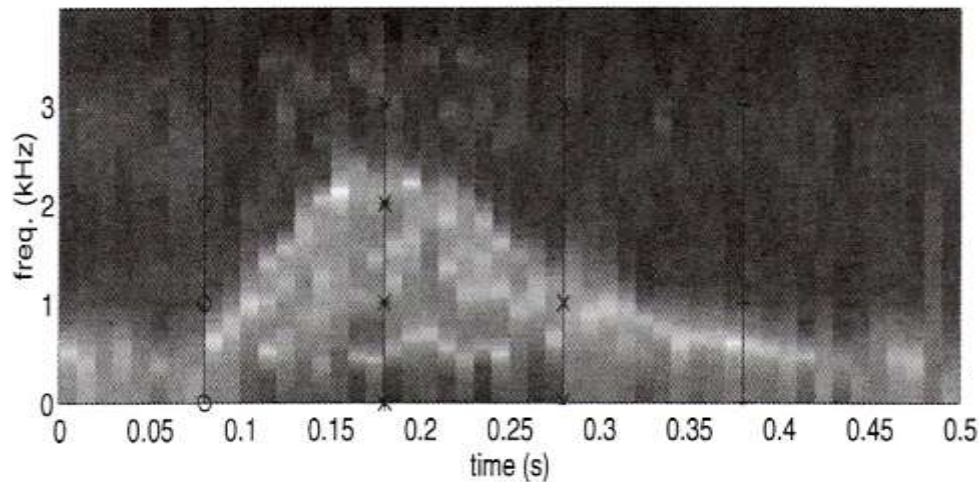
Arteria ombelicale



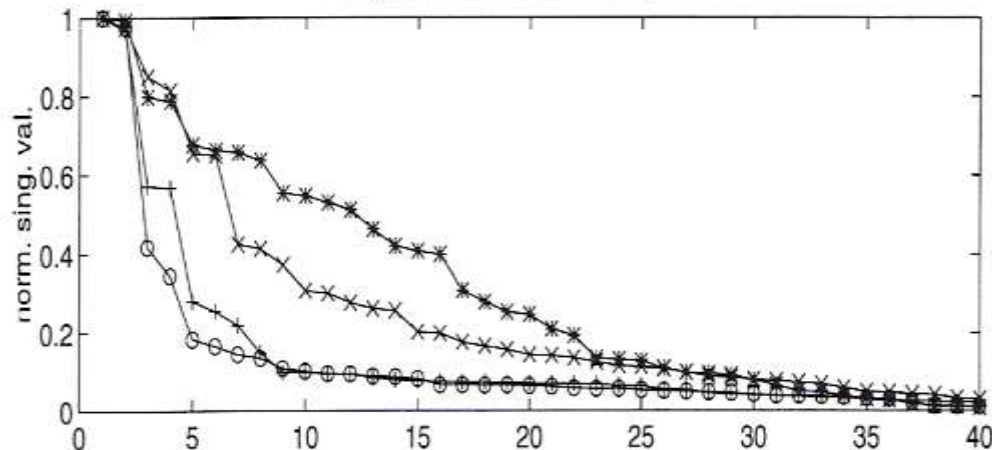
Arteria cerebrale media

DOPPLER ARTERIA OMBELICALE

spectrogram of a Doppler signal



singular values in decreasing order



Stima della velocità massima sanguigna nell'arteria ombelicale materna. Si studia lo **spettrogramma del flusso sanguigno**. I massimi della PSD sono legati alla velocità massima del sangue.

Problema: stima dell'ordine ottimo p (variabile) del **modello AR** per la stima della PSD: maggiore è la variabilità, maggiore è il valore di p stimato.

L'elevata variabilità del segnale richiede frame ridotti (40-80 campioni pari a 5-10ms, con $F_s=8\text{kHz}$). Ordine stimato:

$$o \Rightarrow p = 4$$

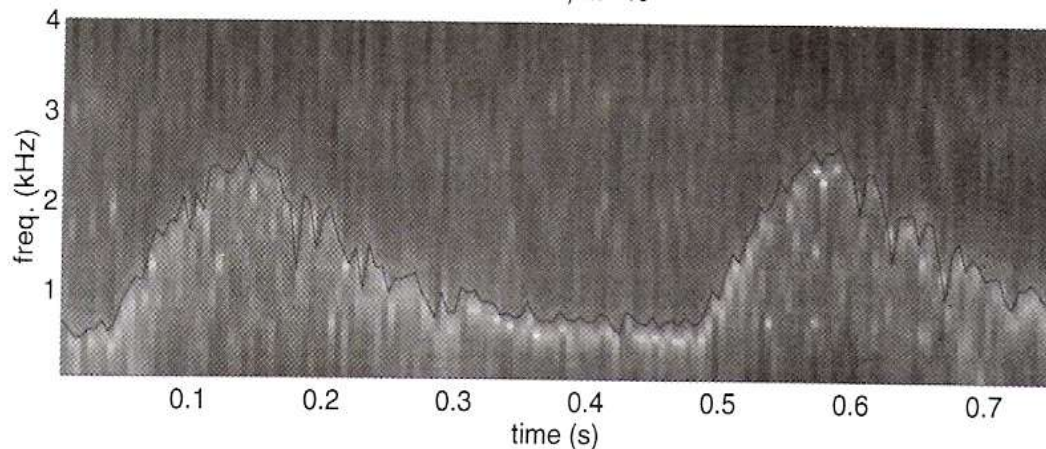
$$* \Rightarrow p = 16$$

$$x \Rightarrow p = 6$$

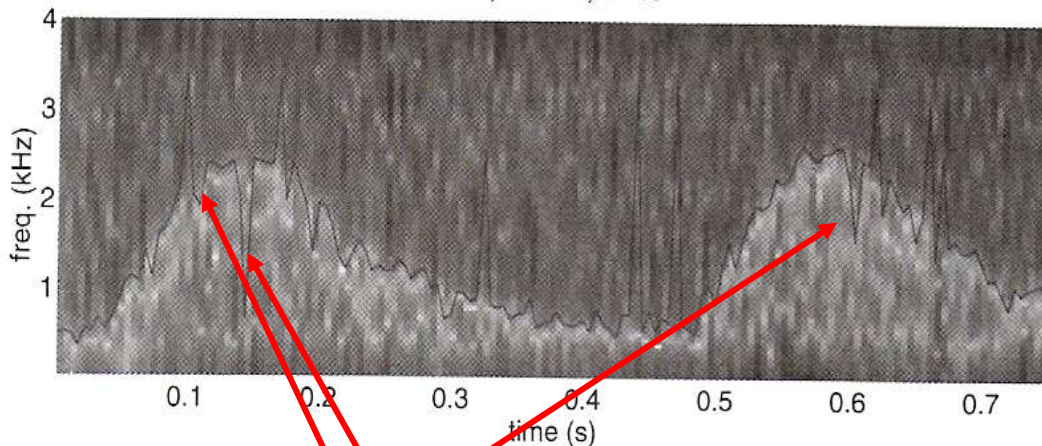
$$+ \Rightarrow p = 4$$

FREQUENZA MASSIMA

AR+SVD, lw=40



AR, ord=12, lw=40



Valori spuri dovuti all'ordine non ottimo

Confronto fra AR PSD con ordine variabile (in alto) e ordine fisso $p=12$ (in basso).

Frame di 40 punti = 5ms.

La scelta dell'ordine variabile riduce i “picchi spuri” nella PSD dovuti all'ordine fisso, non adeguato su tutto il segnale.

Pertanto, la stima della frequenza massima è migliorata.