

# Essentials of Ultrasound Physics

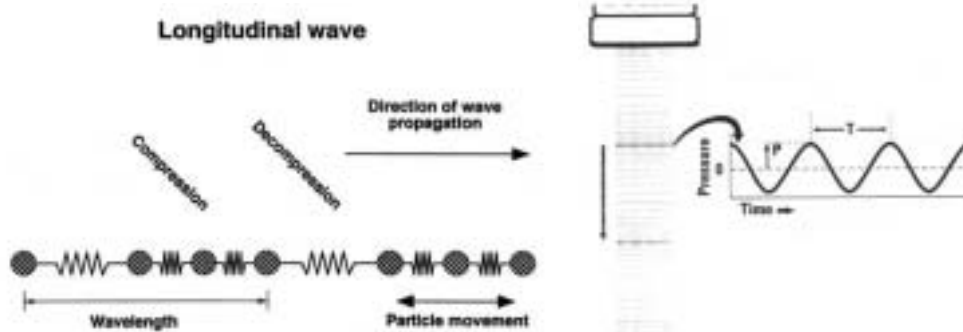
台灣大學 應用力學研究所 邵耀華

## 0. 超音波之臨床用途

- ❖ 人體軟體組織之型態辨識 (長度、厚度)
- ❖ 人體軟體組織之運動模式 (心肌脈動、血管脈動)
- ❖ 血管中，血液之流速(血液循環、阻抗\*)、血管機械性質\*
- ❖ 超音波熱療法

## 1. 超音波基本物理特性

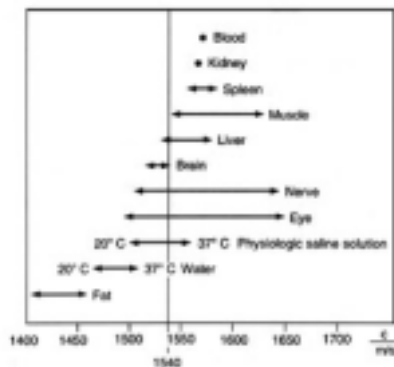
- ❖ 聲音的起源來自物體的振動，而聲波將機械能以壓力波透過介質向下游傳遞。
- ❖ 超音波組織辨識是利用其縱向波特性(波行進方向與震動方向平行)



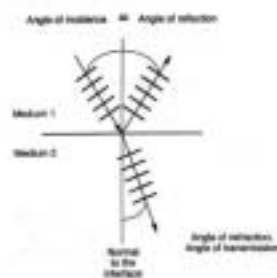
- ❖ 臨床超音波的頻率一般在 2 MHz - 30 MHz 之間，表示每秒震盪數百萬次，但是所使用的振幅很低、能量不大。其頻率遠高於人耳的聽覺範圍(20Hz-20kHz)。
- ❖ 超音波必須依賴介質來傳遞波的能量與動量，若不考慮空氣氣泡或骨頭的影響，在人體軟體組織間傳遞速度大約為  $c = 1540 \text{ m/s}$  ;  $c = \lambda f$  。

各種材質之聲波傳播速度

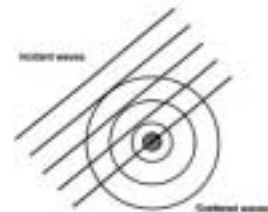
Non-biological Materials	Speed of Sound (m/s)	Biological Materials	Speed of Sound (m/s)
Air	330	Fat	1460
Water	1480	Liver	1555
Lead	2400	Blood	1560
Aluminum	6400	Kidney	1565
		Muscle	1600
		Lens of Eye	1620
		Skull Bone	4080



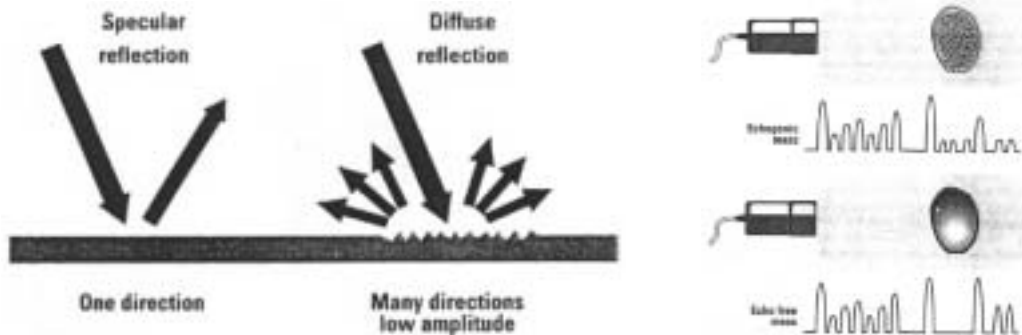
Reflection and refraction



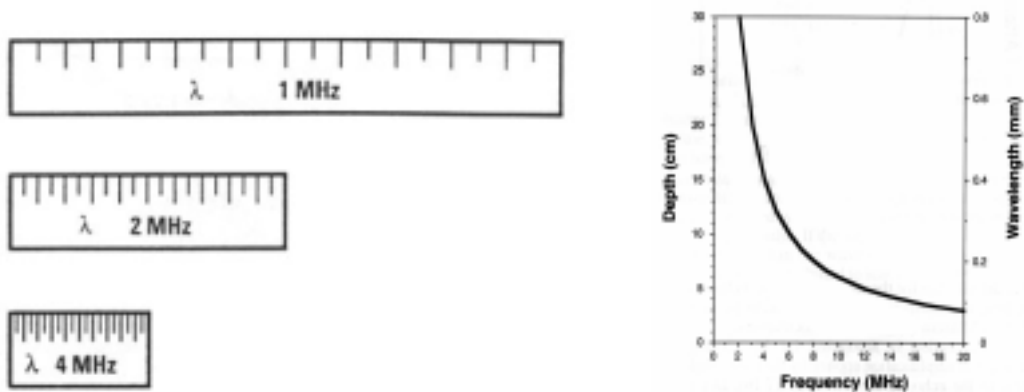
Scattering



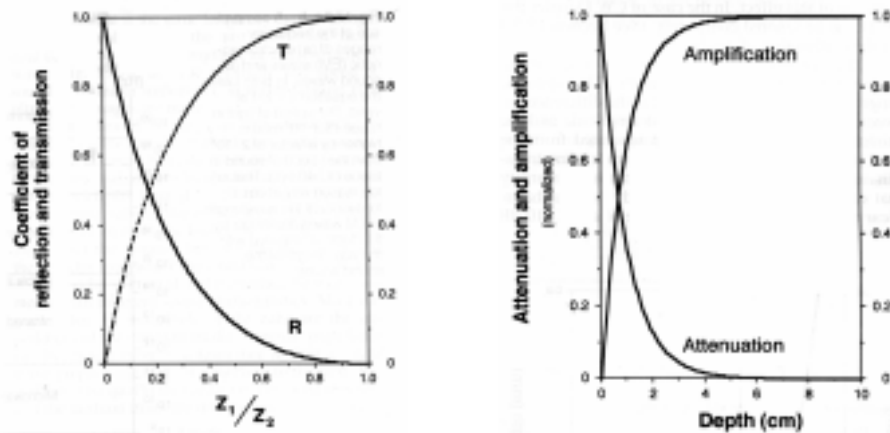
- ❖ 超音波在人體組織間傳遞，若是遇到組織界面，舒密程度改變，會有部份能量反射 (Echo)，反射波的強度與界面組織之聲阻抗差異有關，有時會有折射的現象。當超音波遇到移動之血球，則因血球的尺度(2-10 $\mu\text{m}$ )遠小於超音波的波長(mm)，會產生波的散射的現象(Scattering)。

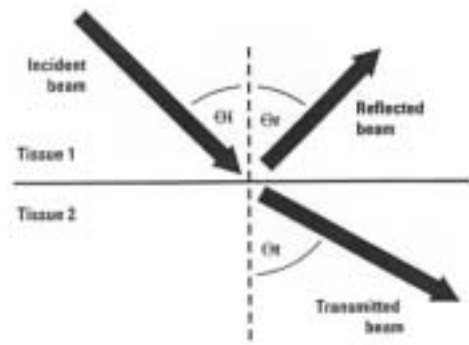
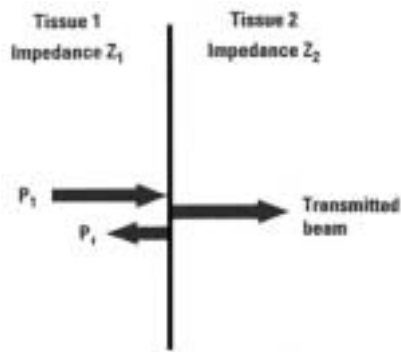


- ❖ 超音波的聲壓強度(Intensity)與聲壓大小(P)的平方成正比，與材質的密度( $\rho$ )及聲速(c)成反比。  $I=P^2/2\rho c$ 。
- ❖ 超音波掃描之空間解析度：由於超音波的波長如同量測尺的刻度，愈是高頻的超音波其刻度愈精密，空間解析度愈高。



- ❖ 超音波之穿透能力：當超音波穿透人體組織時，部份的能量被組織吸收，部份的能量穿透組織。 穿透與反射的強度與界面間聲阻抗比值( $Z_1/Z_2$ ) 有關。 所以超音波強度會隨著深度衰減，衰減的程度與超音波之頻率高低也有關，頻率愈高雖然空間解析度高但是穿透力則較差。 一般而言、超音波來回綜合衰減(attenuation)約為 0.5-1.0 dB/MHz cm，所以回聲訊號需用深度補償(DGC)作動態修正。





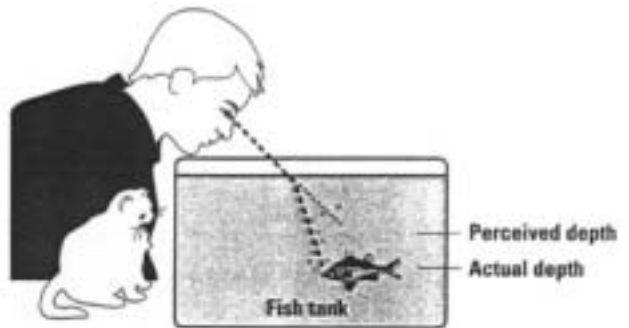
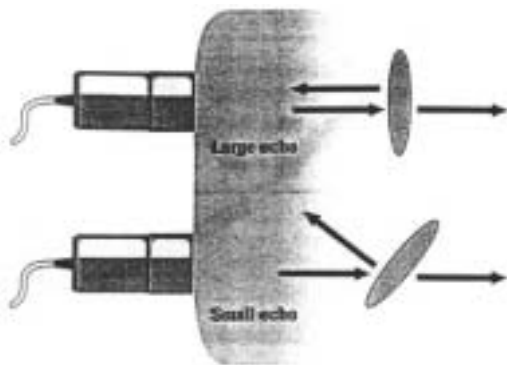
### Acoustic Impedance of Soft Tissues

Tissue	Impedance (rayls)
Air	$0.0004 \times 10^6$
Fat	$1.3400 \times 10^6$
Water	$1.4800 \times 10^6$
Liver	$1.6500 \times 10^6$
Blood	$1.6500 \times 10^6$
Kidney	$1.6300 \times 10^6$
Muscle	$1.7100 \times 10^6$
Skull Bone	$7.8000 \times 10^6$

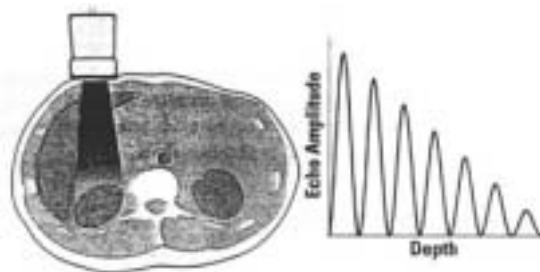
### Reflected Amplitude ratio of interface

Interface	$P_r/P_i$	$I_r/I_i$
Kidney-Liver	0.006	0.00004
Liver-Muscle	0.018	0.0003
Fat-Liver	0.10	0.01
Muscle-Bone	0.64	0.41
Muscle-Air	0.99	0.98

### Effects of Non-perpendicular sound beam incidence



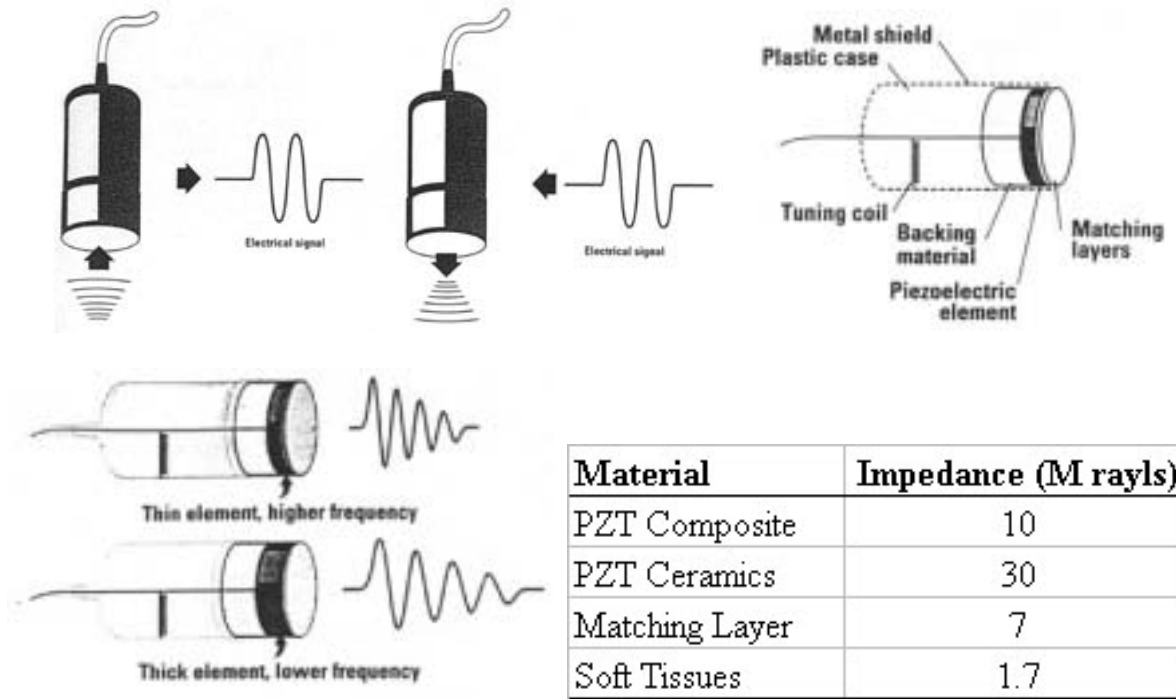
### Attenuation of Ultrasound Beams in Tissue



Tissue	Attenuation at 1MHz (dB/cm)
Water	0.0002
Blood	0.18
Liver	0.5
Muscle	1.2

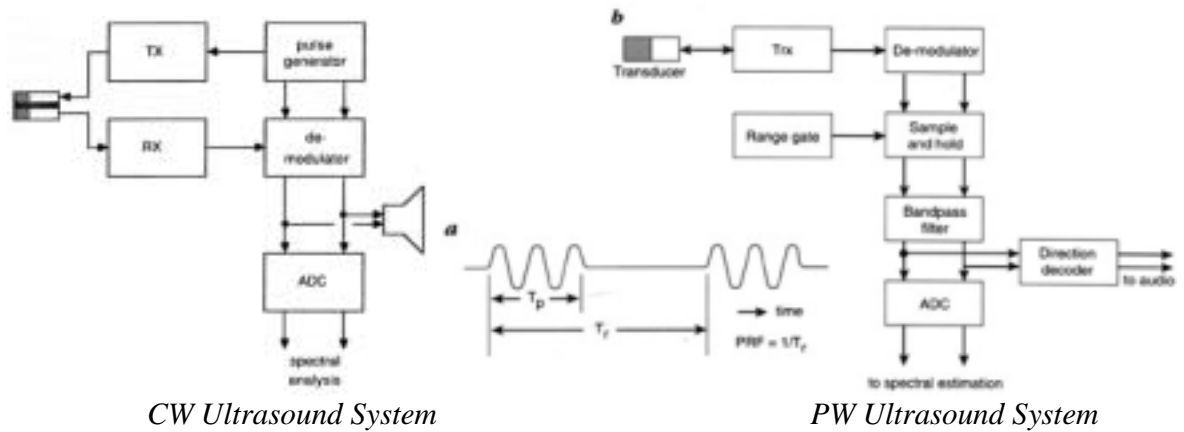
## 2 超音波聲源系統基本架構

### ❖ 超音波探頭 (Piezoelectric Ceramics)

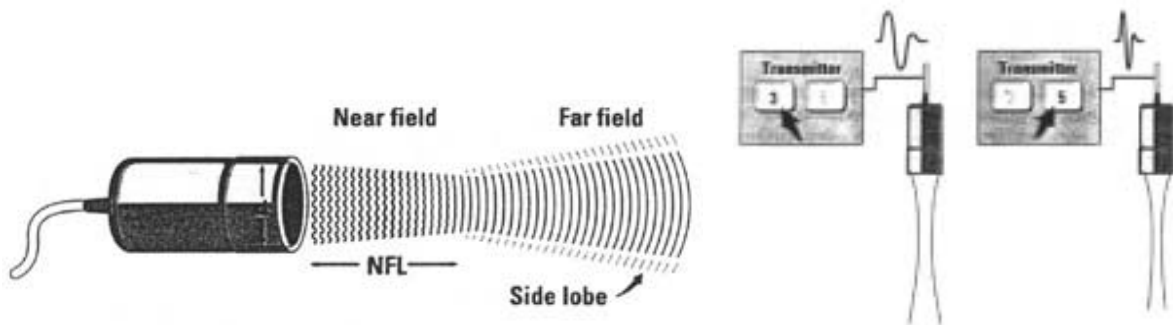


### ❖ 連續波 (Continuous Wave) 超音波系統

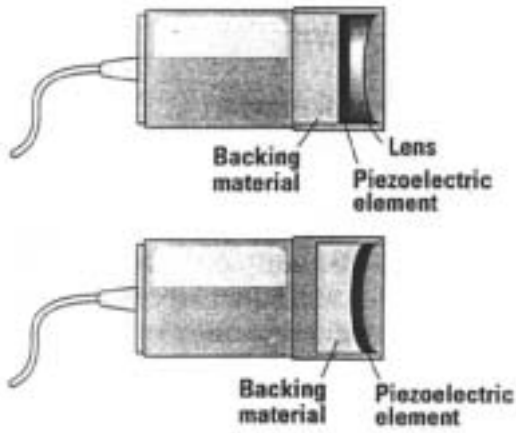
### ❖ 脈衝波 (Pulse Wave) 超音波系統 (具有深度的資訊)



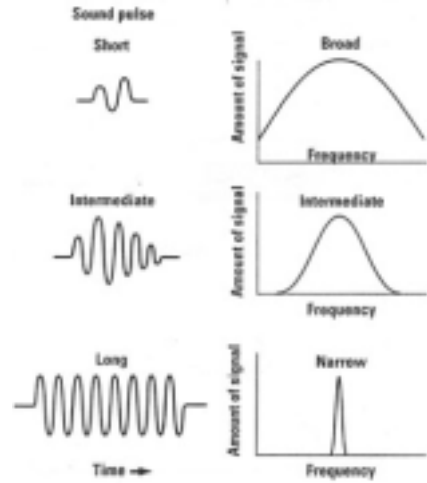
### ❖ 超音波掃描聚焦特性



### Focused Transducers



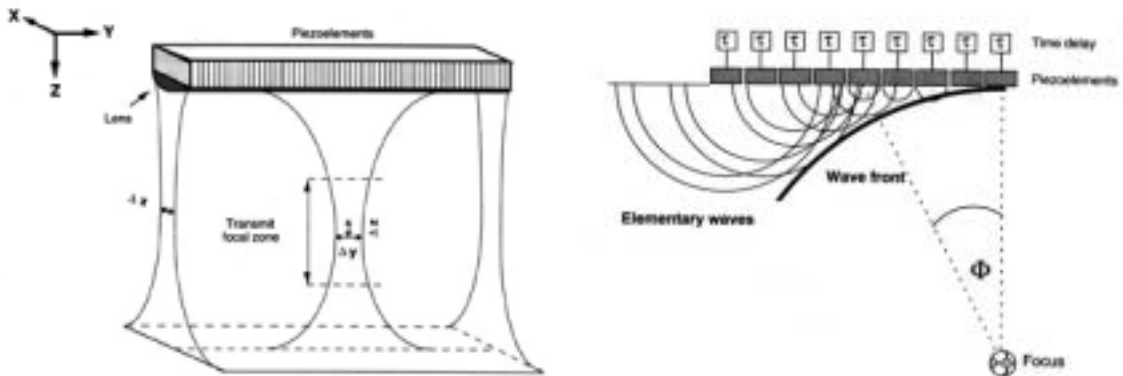
### Effect of Pulse Duration (PD) on frequency bandwidth



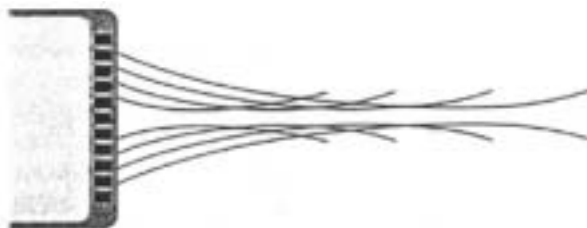
### Array Transducers



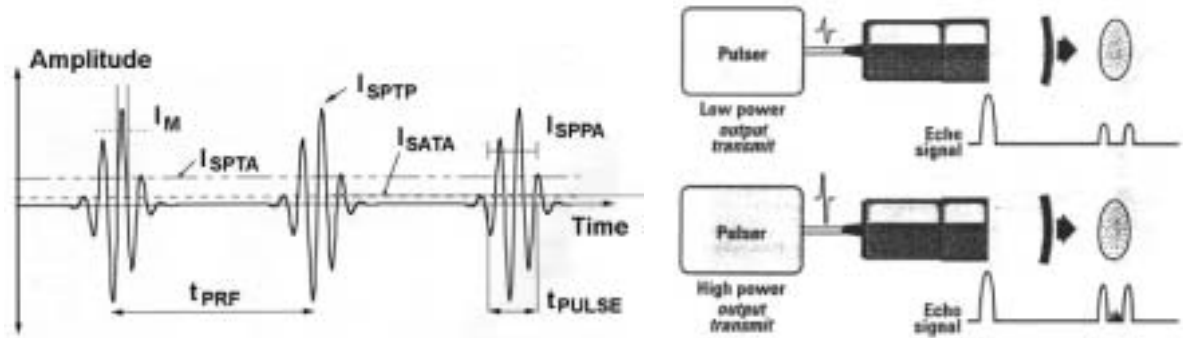
### Electronic Beam Steering and Focussing



### Dynamic Aperture

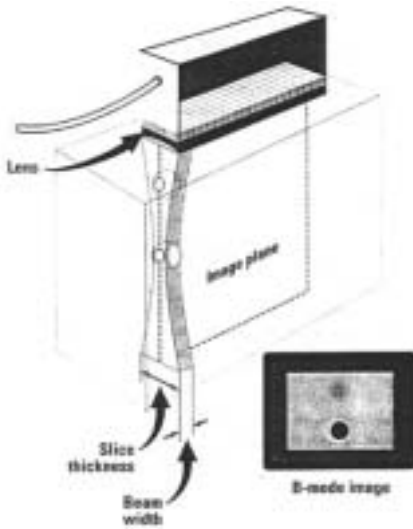


### 3. Pulse-Echo超音波系統設備

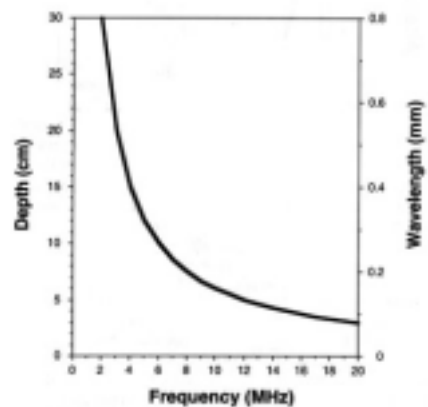
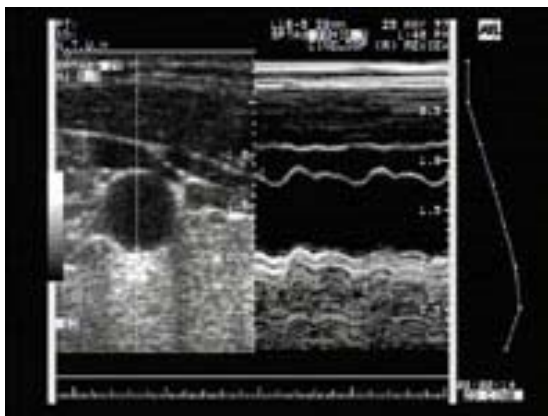


#### 超音波掃描顯示方式：灰階影像 - 掃描區內組織構造 (Morphology)

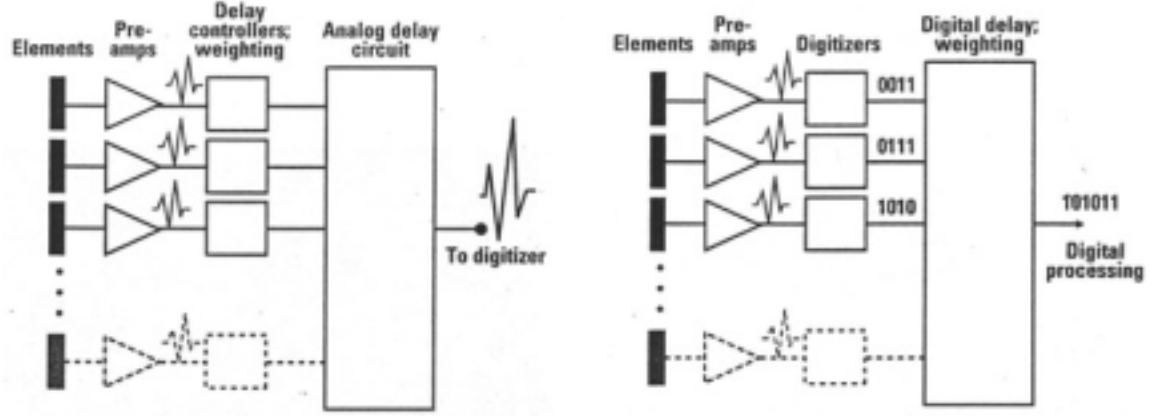
- ❖ A 模式顯示反射波的振幅大小；在聲速固定的假設下、反射點位置可以由回聲訊號延遲時間來代表。軸向的空間解析度與超音波的脈衝長度(PD)與脈波形狀有關。
- ❖ B 模式是以多條 A 模式掃描排列而得。反射波振幅大小以灰階影像亮度表示。由於已知掃描線間隔，可以顯示二維組織幾何影像。灰階對比可以表示組織界面的聲阻抗差異。沿著超音波掃描線，空間的解析度與超音波探頭髮射之頻率有關，最大量測深度取決於各脈衝波的時間間隔(Pulse Repetition Frequency)。
- ❖ M 模式是連續使用同一條掃描線，觀察回聲(掃描線)隨著時間變化的關係。



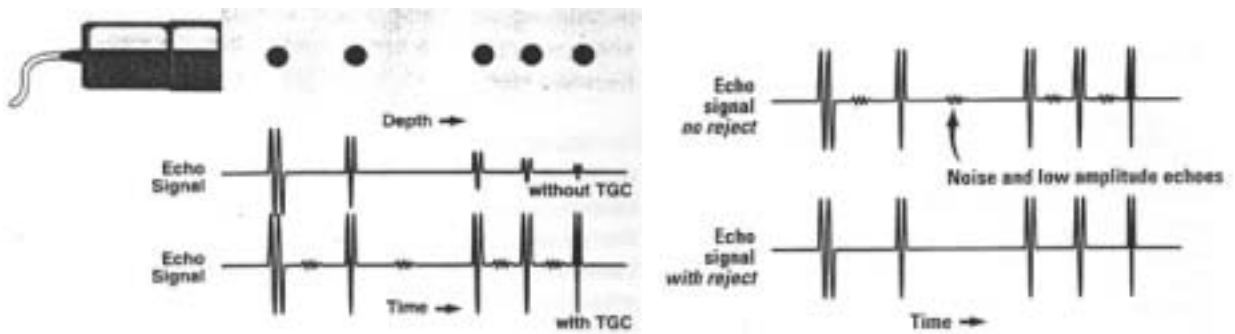
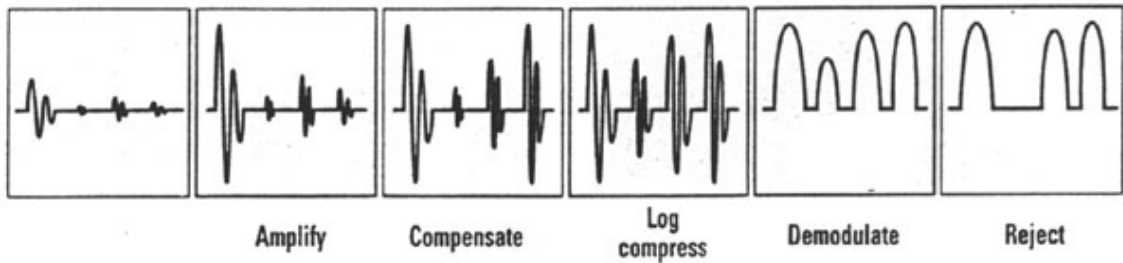
B-mode image of a liver and gall bladder.



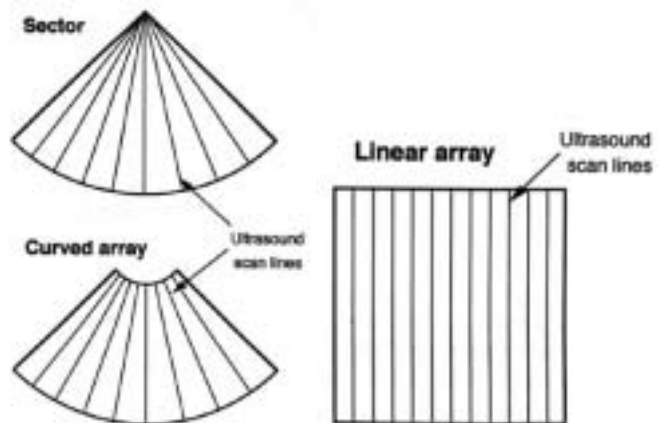
### Ultrasound Beam Former (Analog vs. Digital Beam Forming)



### Signal Demodulation (Pre-amplification, Filtering, and Time-Gain Compensation)

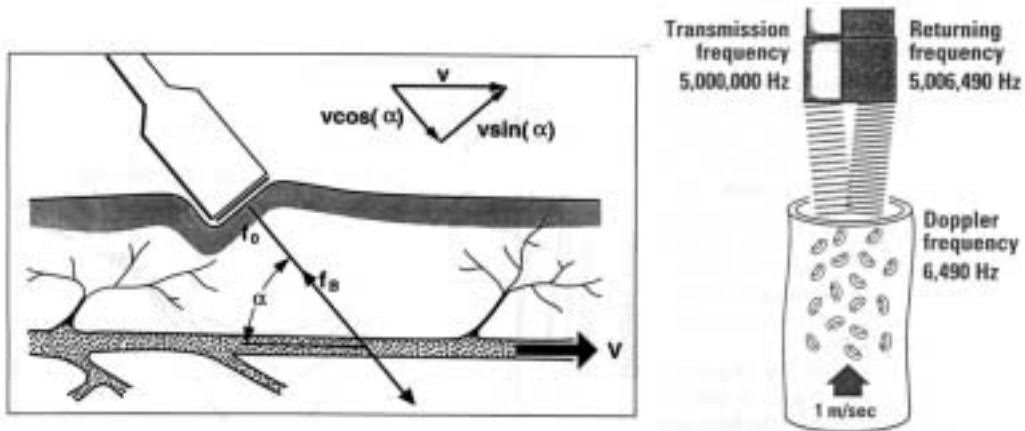


### 超音波影像扫描(Sector, Curvilinear Array, Linear Array)

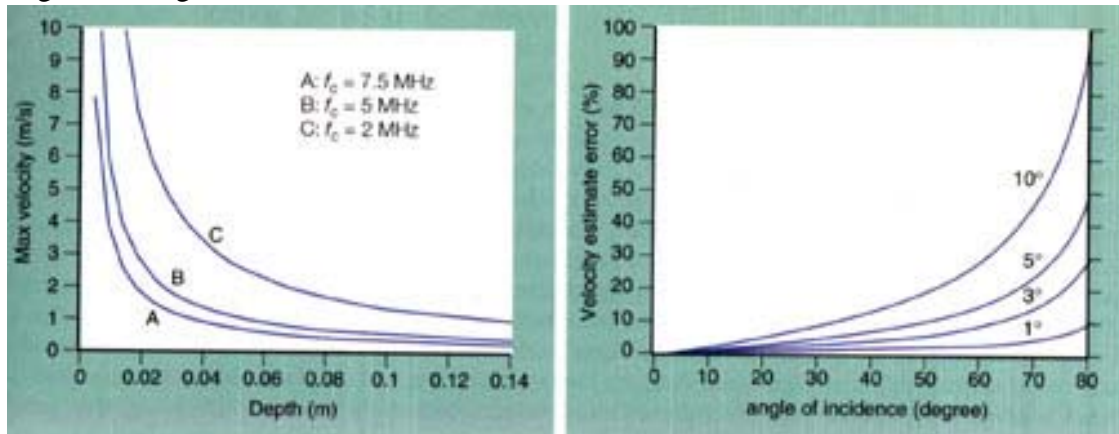


#### 4. 超音波都卜勒

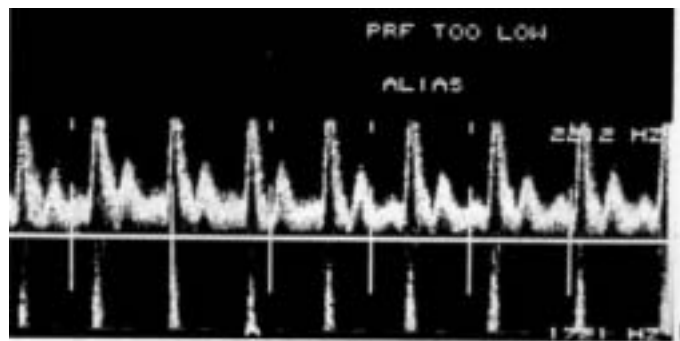
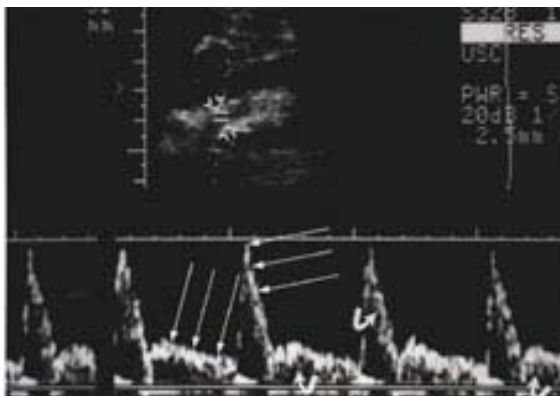
- ❖ 超音波都卜勒將回音都卜勒訊號 (Pulse-Echo cycles) 做頻譜處理，脈波間隔時間 ( $T_{PRF}$ ) 與深度有關，必須大於超音波往返的時間。



- ❖ 超音波都卜勒掃描角度夾角要小於70度，以免流速誤差過高。此時需要利用Steering Angle 及 Angle Correction 來取得正確的流速資訊。

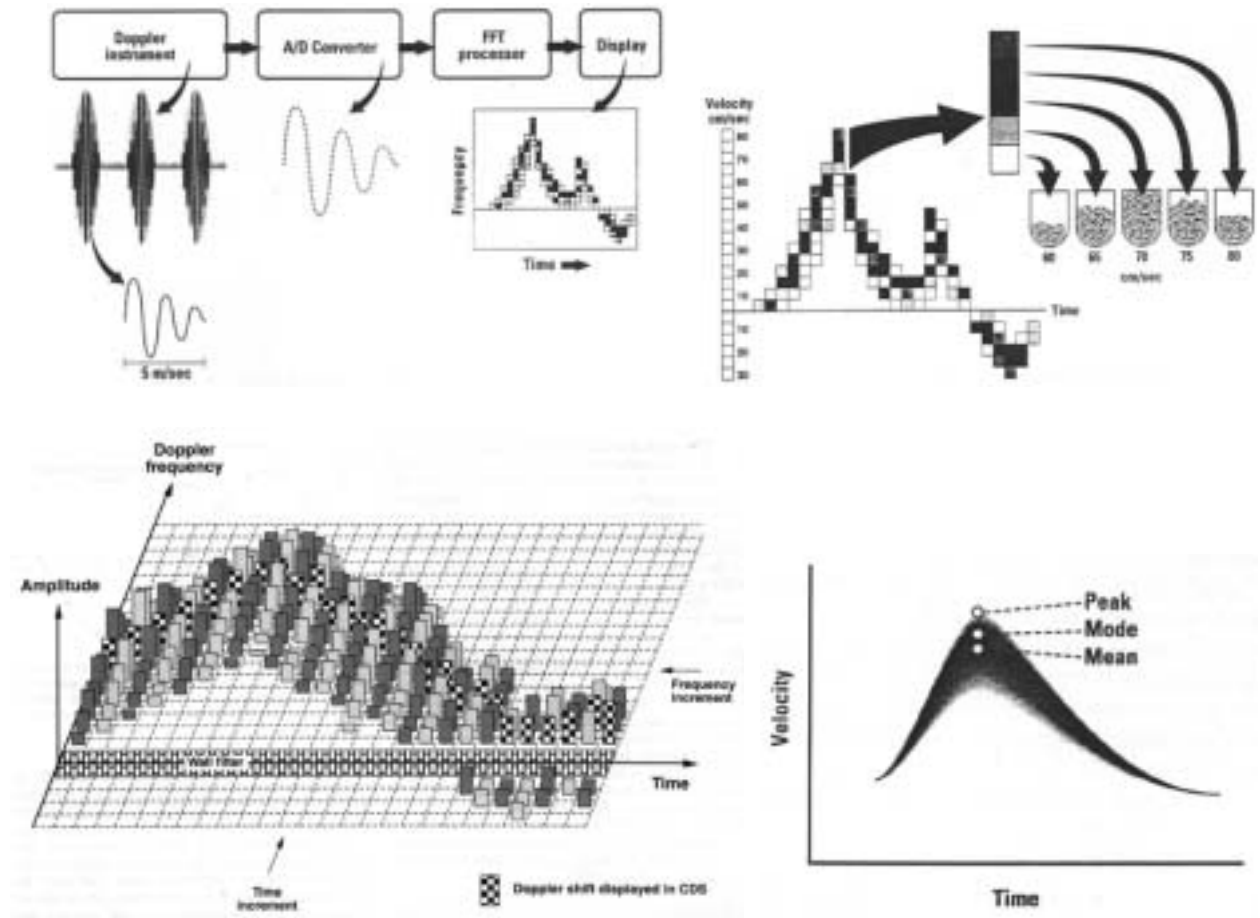


- ❖ 都卜勒軸向最小的解析度(Doppler Gate)與超音波的脈衝長度與脈波形狀有關，可偵測到的最大(流速) 頻移  $f_d < 0.5 f_{PRF}$  例如：觀測血管深度在15 cm時， $f_{PRF}$  約為5.13kHz，因此當頻移(速度)大於 2.6kHz 時，就會有些訊號超過部份會被切掉，而頻率高於  $f_{PRF}/2$  之能量會被疊加到負頻的部份而造成訊號失真 (aliasing)。

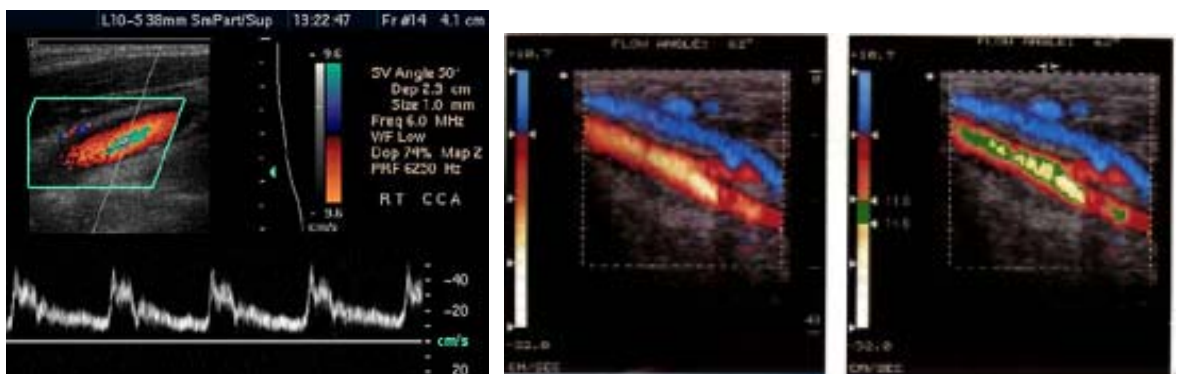




#### 4. 超音波都卜勒頻譜探究 (Exploring Doppler Ultrasound Spectrum)



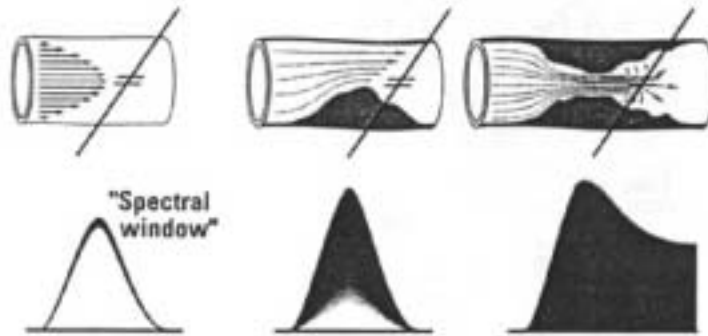
- ❖ 彩色超音波都卜勒影像(Color Doppler Image)顯示的速度分為Mean averaged velocity 及Intensity-weighted average velocity 兩種。



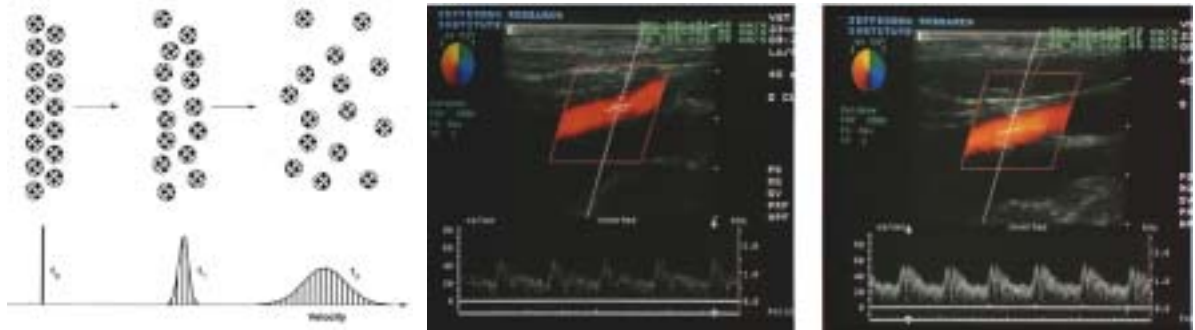
- ❖ 由於流速在同一取樣中未必為單一值，在每一個間隔時間，能量最大的都卜勒頻移被轉換成為流速之數值。
- ❖ 一般以紅色表示速度向探頭而來，藍色代表血流遠離探頭。 亮度代表流速數值的高低。 而流速分佈差異(Variation)可用綠色成分混和。

❖ **Spectral Broadening** (caused by transducer, flow turbulence or Doppler gate)

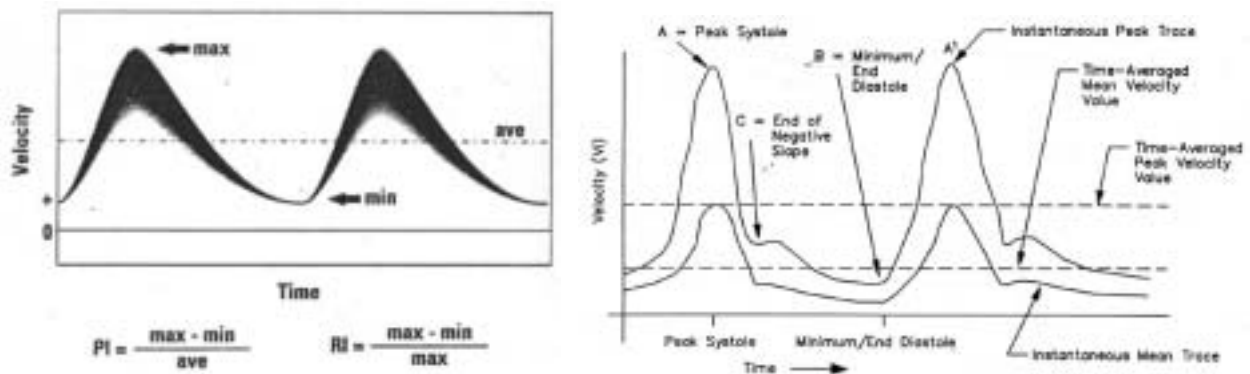
Effect of Flow turbulence on the velocity spectrum



Effect of Doppler gate on the velocity spectrum



❖ 由超音波都卜勒頻譜(Doppler Spectrum)圖形引申之血流特徵參數

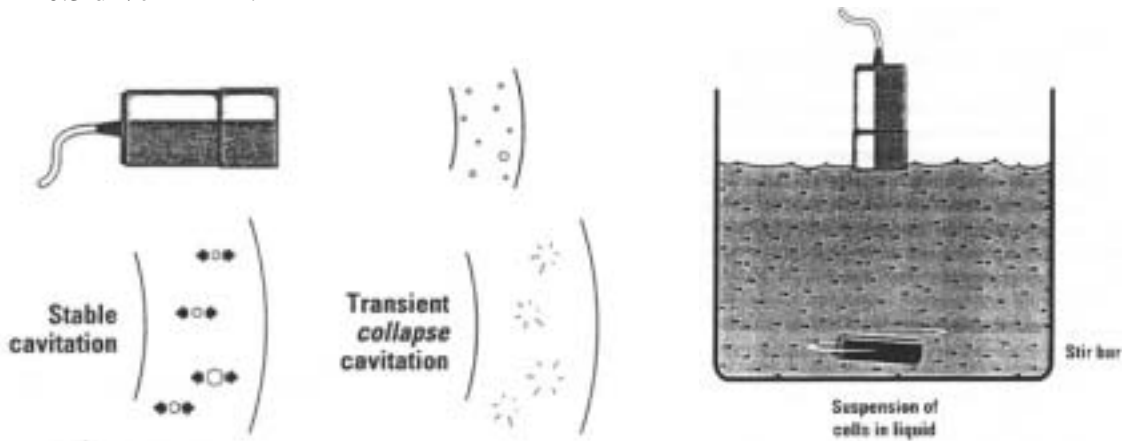


Power Doppler imaging (PDI) 反應影像位置之 Doppler signal 之強度，可以反應移動中之散射因子(Scatters: RBCs)數目，而不管移動的速度大小。因此掃描角度、深度對 PDI 影像之影響較小。也沒有影像因頻率響應不足的失真問題。一般而言，Power Doppler 敏感度比 Color Doppler 高，可用來探測較低流速的血液滲流，但是由於其滲流的強度受到 Color Gain 設定的影響，也受到流場紊流(Turbulence)特性的干擾，過高的 CPA Level 常常會使影像色階飽和，所以想要利用 PDI 做定量的血流分析需要很小心。

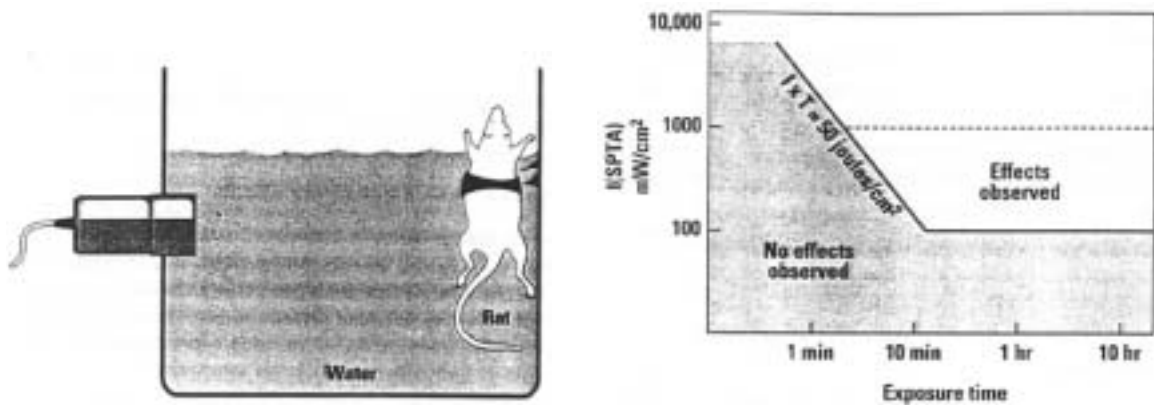
**5. Bioeffects and Safety of Ultrasound (Acoustic Pressure, Power and Intensity)**

Operating Mode	Pr (MPa)	I_SPTA (mW/cm <sup>2</sup> )	I_SPPA (W/cm <sup>2</sup> )	Power (mW)
B-scan	1.7	18.7	174	18.0
M-Mode	1.7	73	174	3.9
Pulse Doppler	2.5	1140	288	30.7
Color Doppler	2.6	234	325	80.5

- ❖ Thermal Index (TI): ratio of the acoustic power produced by the transducer to the power required to raise the temperature in tissue 1 degree C.
- ❖ Mechanical Index (MI): ratio of the acoustic pressure produced by the transducer to the acoustic pressure for cavitation threshold. Attenuation of the medium was assumed to be 0.3 dB/cm-MHz.



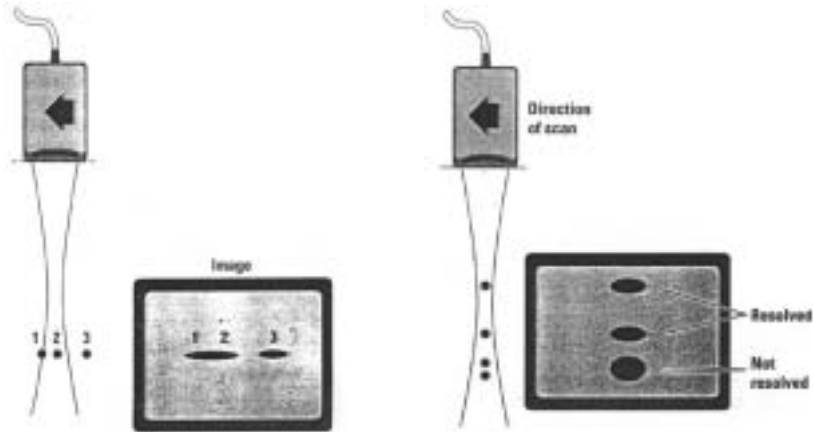
**Safety of Exposure that are higher than the diagnostic level**



Exposure Time	Highest TI without an effect
1 min	6
10 mins	4.3
100 mins	2.7

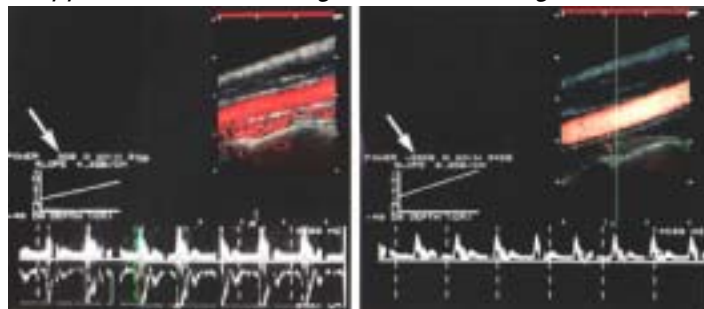
## 6. 常見之超音波影像誤差、失真或假像 (Image Artifacts)

- ❖ 由於超音波假設波速為一定值  $C=1540\text{m/s}$  而與實際介質之波速不同，所以實際形體位置與影像有些許差異。
- ❖ 當超音波遇到介質強烈之折射，會在特定位置產生折射的幻影，偏折角度與界面聲阻抗差異有關。

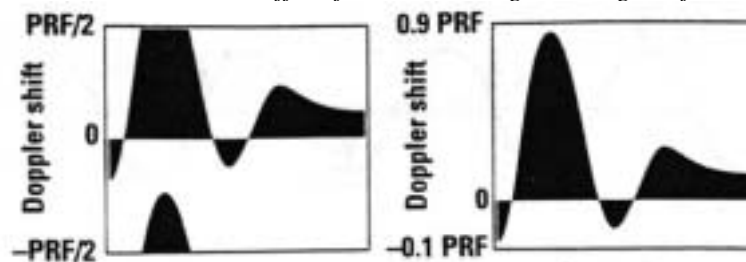


- ❖ 當超音波遇到金屬或玻璃的物體會有在後面出現彗星尾巴般的影像
- ❖ 超音波都卜勒由於Pulse Repetition Frequency 太低會造成Aliasing 失真；Doppler Gain 太高會造成 Mirror般的假像。超音波都卜勒頻譜失真(Aliasing)解決方法: 增加 Pulse Repetition Frequency (PRF) 或Baseline Frequency Shift

*Doppler Gain Too High      Reducing Gain*



*Baseline offset for eliminating aliasing artifact*



## 7. 結語

超音波在臨床上的應用隨著硬體與分析軟體的發展，能以非侵入式的方法提供人體組織多樣化的動態資訊。超音波操作簡便安全，應用廣泛，而且相對地價位較低，很有發展的潛力。如果對使用中每一種超音波機型的原理、性能及適用範圍有較深入的了解，超音波將會成為協助各位診斷的重要儀器。