



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Σχολή Θετικών Επιστημών

Τμήμα Πληροφορικής με εφαρμογές στη Βιοϊατρική

Εισαγωγή στη Φυσική των υπερήχων

Τί είναι οι υπέρηχοι;

- Οι ήχοι είναι διαμήκη ελαστικά κύματα που δημιουργούνται από την περιοδική μεταβολή της πυκνότητας του υλικού μέσου εντός του οποίου διαδίδονται.
- Χαρακτηρίζονται σύμφωνα με τη συχνότητα τους f .
- Υπόηχοι: $f < 20\text{Hz}$
- Ακουστικοί ήχοι: $20\text{Hz} < f < 20000\text{Hz}$
- Υπέρηχοι: $f > 20000\text{Hz}$
 - Διαγνωστικοί υπέρηχοι: 1 – 10MHz
 - Μικροσκοπία υπερήχων: έως 200MHz (εξέταση δομών στα κύτταρα)

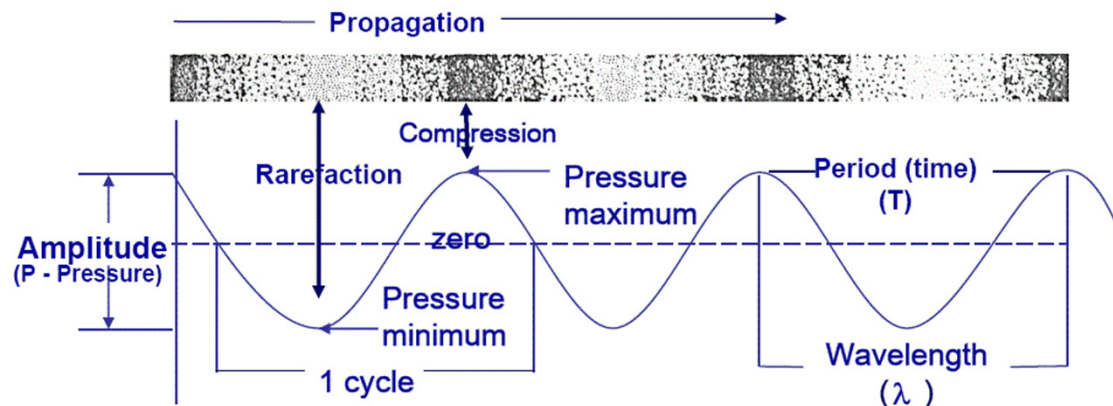


Υπερηχοτομογραφία

- Παράγει εικόνες τμημάτων του ανθρωπίνου σώματος χρησιμοποιώντας τους υπερήχους.
- Ο υπερηχοτομογράφος είναι εφοδιασμένος με έναν πομποδέκτη από τον οποίο δέχεται σήματα, τα επεξεργάζεται και τα μετατρέπει σε εικόνες σε ασπρόμαυρη ή έγχρωμη μορφή.
- Ο πομποδέκτης στέλνει υπερήχους προς το σώμα του εξεταζομένου με κατεύθυνση που καθορίζει ο εξεταστής και ταυτοχρόνως δέχεται τις ανακλάσεις τους και τις μετατρέπει σε εικόνα.
- Κάθε ιστός του σώματος έχει μια ειδική συμπεριφορά στους υπερήχους κι έτσι ανακλά, διαθλά ή απορροφά διαφορετικό ποσό ενέργειας των κυμάτων από αυτά που δέχεται.
- Ο υπολογιστής αφού δέχεται τις ανακλάσεις και γνωρίζοντας την ενέργεια των κυμάτων που στάλθηκαν, αποδίδει ένα χρώμα ή μια απόχρωση του γκρι σε κάθε ιστό και τα εμφανίζει σε μία οθόνη σαν εικόνες.

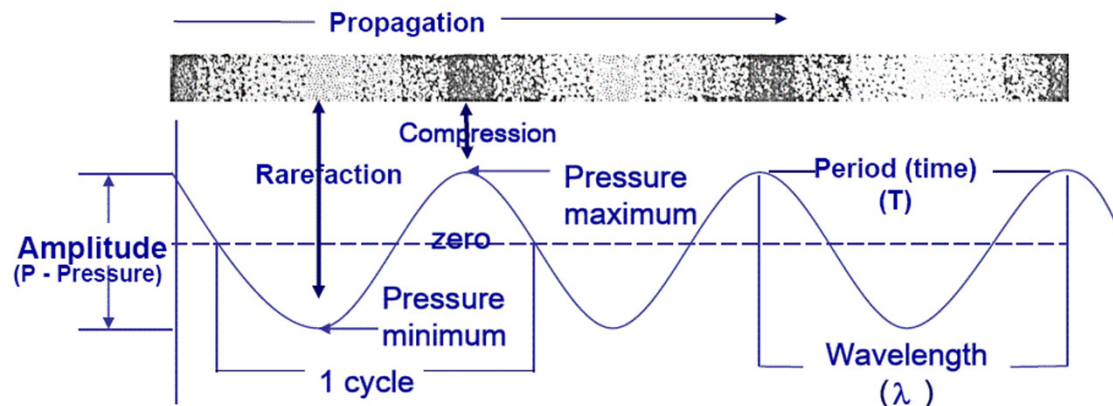
Ηχητικό κύμα

- Για τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη κάποιου υλικού μέσου μεταξύ πομπού και δέκτη.
- Ο ήχος δεν διαδίδεται στο απόλυτο κενό σε αντίθεση με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
- Όταν, εξαιτίας κάποιου ερεθίσματος, δημιουργηθεί μια μορφή διατάραξης στο υλικό μέσο, τότε τα μετατοπισμένα μόρια ύλης ασκούν δυνάμεις στα γειτονικά μόρια, αναγκάζοντάς τα να έλθουν εκτός θέσης ισορροπίας.
- Με αυτό τον τρόπο η διατάραξη ταξιδεύει στο μέσο. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάδοση.



Ηχητικό κύμα (συνέχεια...)

- Ένα ηχητικό κύμα είναι μια σειρά από συμπιέσεις και αραιώσεις. Ο συνδυασμός μιας συμπύεσης και μιας αραιώσης αναπαριστούν έναν κύκλο.
- Η απόσταση ανάμεσα σε δύο γειτονικές κορυφές είναι το μήκος κύματος. Ο χρόνος που απαιτείται για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος ονομάζεται περίοδος T . Η συχνότητα (f) και η περίοδος T είναι αντιστρόφως ανάλογα ($f=1/T$).

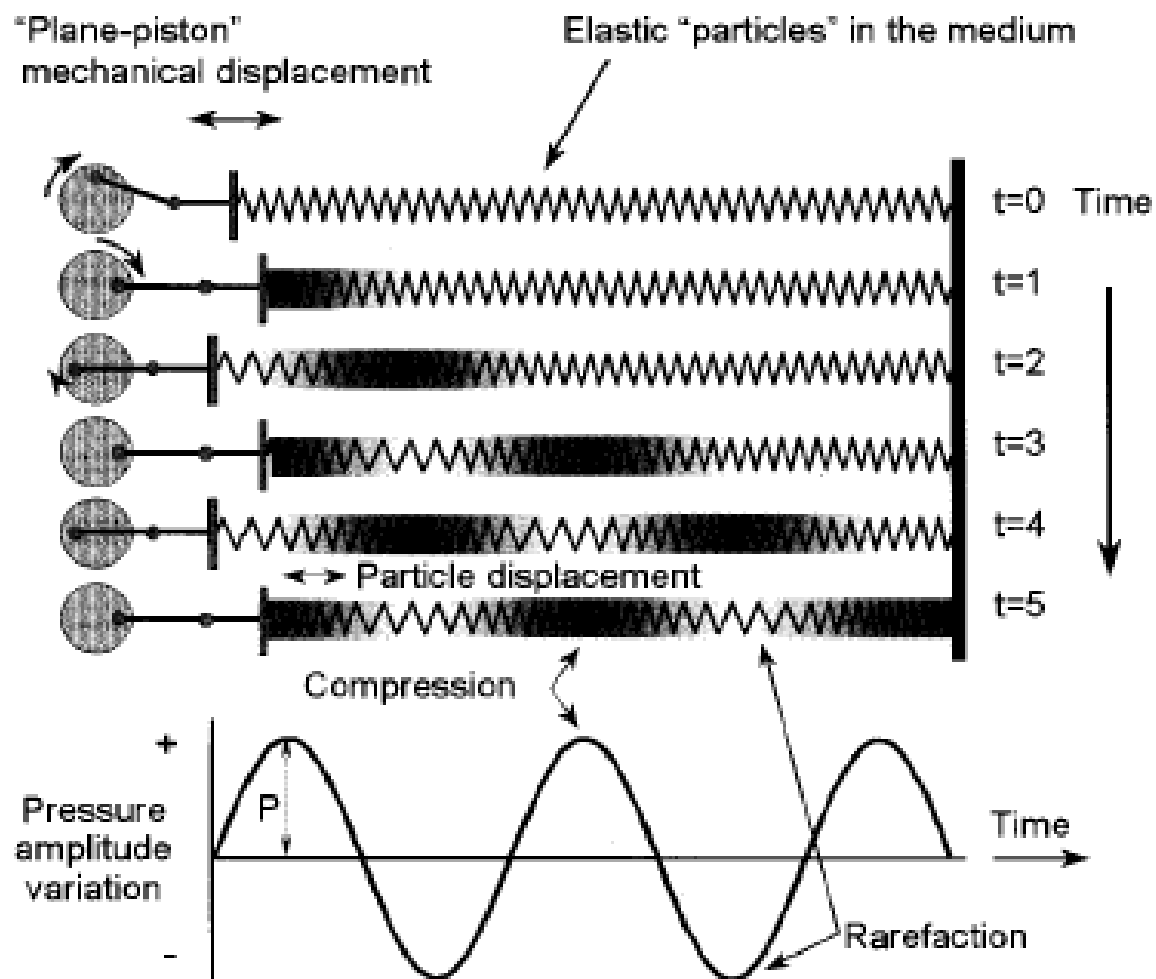


Η εξίσωση του κύματος

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{T} t \right) = A \sin (kx - \omega t)$$

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

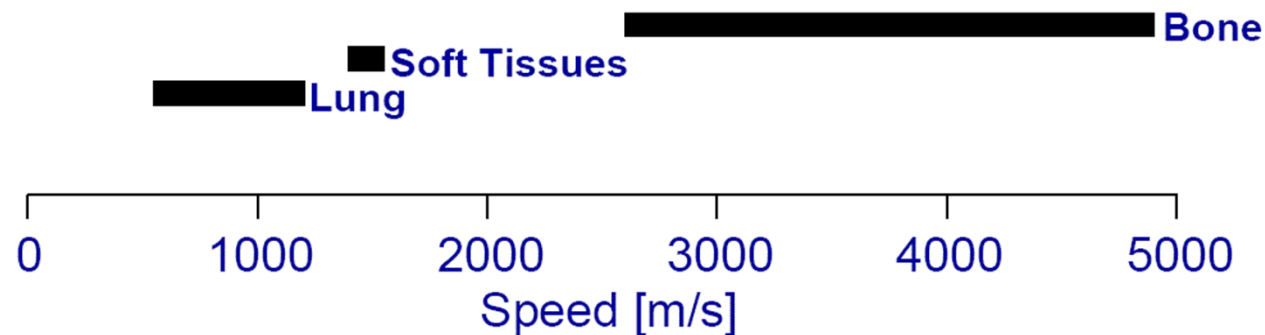
Μηχανικό ισοδύναμο παραγωγής υπερήχων



Διάδοση και ταχύτητα του ήχου

- Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου σε ένα υλικό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού:
 - Ελαστικότητα E : φυσική ιδιότητα του υλικού η οποία χαρακτηρίζει την ικανότητα του υλικού να επιστρέφει στην αρχική του κατάσταση μετά από την εφαρμογή μιας δύναμης
 - Πυκνότητα ρ .

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



- E : Young's modulus = μεταβολή πίεσης / σχετική μεταβολή όγκου =
- $1/\text{compressibility}$ (συμπιεστότητα)

Διάδοση και ταχύτητα του ήχου (συνέχεια...)

Material	Velocity (m/sec)
Air (quoted at 20°C)	330
Fat (quoted at 37°C)	1460
Mercury	1450
Castor Oil	1500
Water (at 50°C)	1540
“HUMAN SOFT TISSUE”	1540
Brain	1541
Liver (quoted at 37°C)	1555
Kidney	1561
Blood	1570
Muscles (quoted at 37°C)	1600
Lens of eye	1620
Skull (quoted at 37°C)	4080
Brass	4490
Aluminum	6400

- Οι συσκευές υπερήχων δέχονται ως μέση ταχύτητα του ήχου στα 1540 m/s.
- Ο ήχος ταξιδεύει γρηγορότερα στα στερεά και πιο αργά στα αέρια.
- Η ταχύτητα του ήχου στο κενό είναι μηδενική.

Ακουστική εμπέδηση Z

- Η διαγνωστική ικανότητα των υπερήχων βασίζεται στα κύματα που ανακλώνται από ανακλαστικές επιφάνειες.
- Αν οι διαφορετικοί ιστοί ήταν ομογενείς τότε δεν θα υπήρχαν ανακλαστικές επιφάνειες και δεν θα δημιουργούνταν ηχώ.
- Το ποσοστό της ανάκλασης καθορίζεται από τη διαφορά στην ακουστική εμπέδηση των ιστών στις δύο πλευρές της ανακλαστικής επιφάνειας.
- Η ακουστική εμπέδηση ή διαπερατότητα Z ενός υλικού μέσου εξαρτάται από τη πυκνότητα του υλικού ρ και από τη ταχύτητα διάδοσης c του κύματος σε αυτό το υλικό:

$$Z = \rho \cdot c$$

- Z σε Rayl (SI units: $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, 1 Rayl = $10^{-5} \text{gr/cm}^2 \cdot \text{sec}$), ρ σε kg/m^3 , c σε m/sec

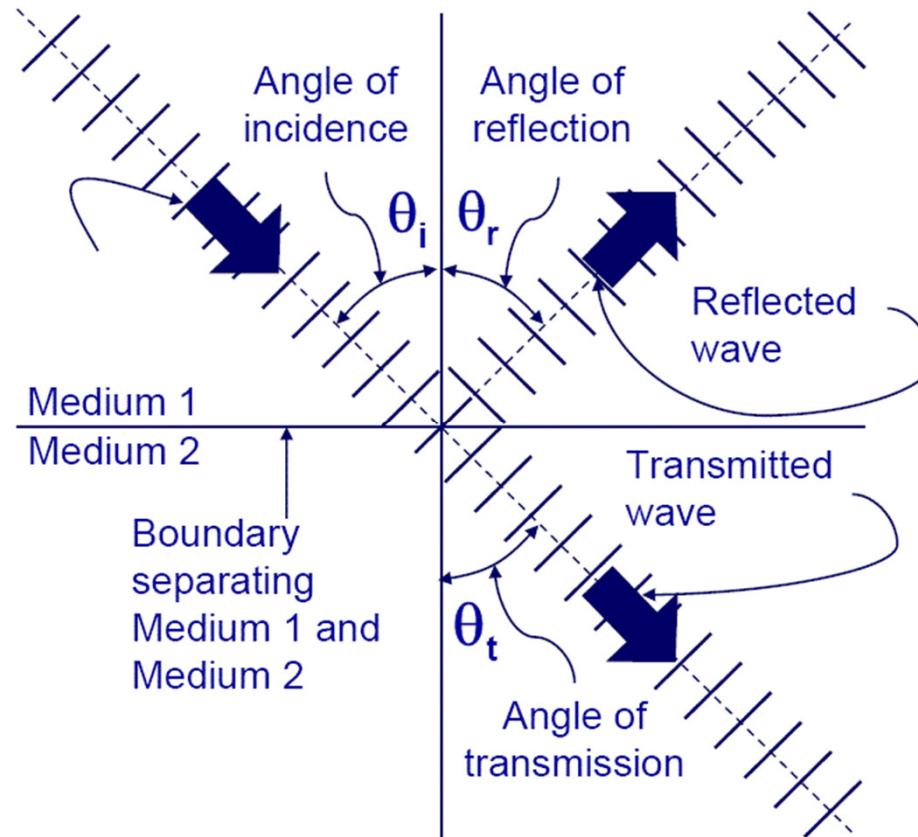
<i>Material</i>	α (dB/cm)	<i>Material</i>	α (dB/cm)
Blood	0.18	Lung	40
Fat	0.6	Liver	0.9
Muscle (across fibers)	3.3	Brain	0.85
Muscle (along fibers)	1.2	Kidney	1.0
Aqueous and vitreous humor of eye	0.1	Spinal cord	1.0
Lens of eye	2.0	Water	0.0022
Skull bone	20	Caster oil	0.95
		Lucite	2.0

(Πίνακας 19-4 από Medical Imaging Physics, Wiley, 4th Edition)

Χαρακτηριστικά του κύματος

- Ταχύτητα κύματος ($c=(E/\rho)^{1/2}$) και ταχύτητα σωματιδίου (v).
 - Δυο τελείως διαφορετικές ταχύτητες.
 - v αφορά τη μετακίνηση κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος.
 - Το κύμα ταξιδεύει σχετικά γρήγορα ενώ τα σωματίδια ταλαντώνονται γύρω από την αρχική τους θέση με σχετικά μικρή ταχύτητα σωματιδίου
- Πίεση P : η τιμή του κυμαίνεται καθώς το κύμα διαδίδεται
 - $P = Z \cdot v$
- Πυκνότητα Ενέργειας: $E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ (Joules/m³)
- Ακουστική ένταση: $I = c \cdot E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot Z \cdot v^2 = P^2/2Z$ (W/m²)
- Ομοιότητα με τον νόμο του Ohm, όπου
 - $P=V$
 - $v=I$
 - $Z=R$

Αλληλεπιδράσεις με τους ιστούς



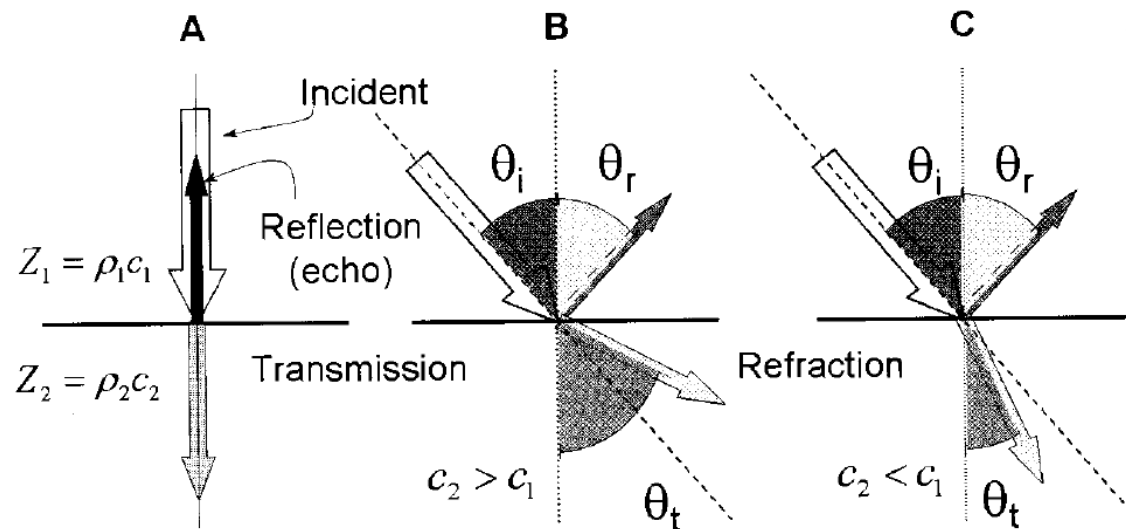
Συμπεριφορά ενός κύματος που προσπίπτει σε μία επιφάνεια που διαχωρίζει 2 υλικά με διαφορετική ακουστική εμπέδηση.

Διάθλαση

- Όταν ο ήχος περνάει από 2 γειτονικούς ιστούς με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης, μπορεί να αλλάξει η διεύθυνση διάδοσης.
- Αυτό ονομάζεται διάθλαση και καθορίζεται από το νόμο του Snell:

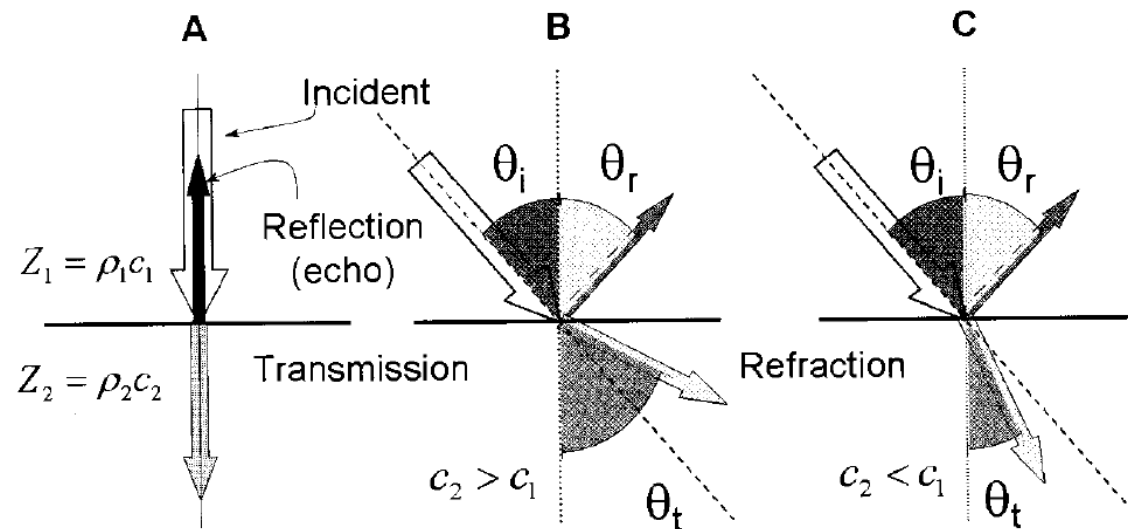
$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{c_2}{c_1}$$

- Η διάθλαση είναι μία από τις βασικές αιτίες της μη-συνταύτισης στην τελική εικόνα.



Διάθλαση (συνέχεια...)

- Οι υπερηχογράφοι υποθέτουν ότι η ηχώ επιστρέφει από μια ευθεία γραμμή.
- Αν το κύμα έχει υποστεί διάθλαση, η ηχώ στην τελική εικόνα μπορεί να προέρχεται από διαφορετική τοποθεσία από αυτή που πραγματικά εμφανίζεται.
- Αυτό μπορεί να αποφευχθεί αν φέρουμε τη γωνία σάρωσης όσο πιο κάθετα γίνεται στην επιφάνεια που θέλουμε να απεικονιστεί.



Ανάκλαση, διάδοση και διάθλαση

- Οι γωνίες πρόσπτωσης θ_i , ανάκλασης θ_r και διάθλασης θ_t συνδέονται:

$$\theta_i = \theta_r$$

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \frac{c_1}{c_2} = n_{21}$$

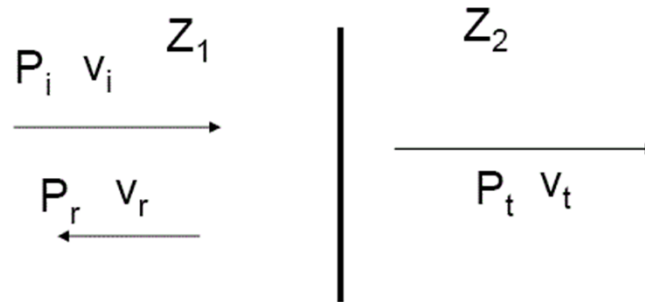
n_{21} είναι ο σχετικός δείκτης διάθλασης του μέσου 2 ως προς το μέσο 1.

Συντελεστής ανάκλασης ενέργειας R_A (ή διάδοσης R_T): το ποσοστό της ενέργειας της προσπίπτουσας δέσμης που ανακλάται (ή διαδίδεται)

$$R_A = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2, R_T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$

- Προφανώς $R_A + R_T = 1$

Ανάκλαση, διάδοση και διάθλαση (συνέχεια...)



Συνοριακές συνθήκες:

$$P_i + P_r = P_t$$

$$v_i - v_r = v_t \Leftrightarrow \frac{P_i}{Z_1} - \frac{P_r}{Z_1} = \frac{P_t}{Z_2}$$

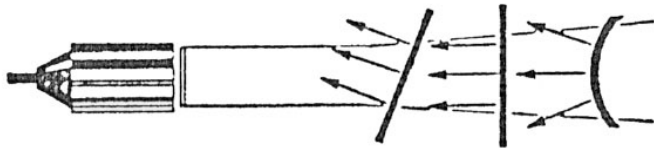
Λύσεις:

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{2 Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad \frac{P_r}{P_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

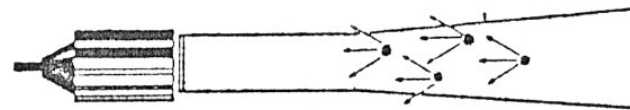
Ανάκλαση

- **Κατοπτρική:** αν το μήκος κύματος των υπερήχων είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις διαστάσεις των ανακλαστικών επιφανειών, ο υπέρηχος αντανακλάται όπως ο καθρέφτης το φως.
Αυτές οι επιφάνειες ονομάζονται κατοπτρικοί ανακλαστήρες και τέτοια παραδείγματα στο σώμα μας βρίσκονται στο διάφραγμα και στην ουροδόχο κύστη. Οι ανακλάσεις αυτές είναι εξαρτώμενες από τη γωνία πρόσπτωσης.
- **Σκέδαση:** Αν οι διαστάσεις των ανακλαστικών επιφανειών και των ανωμαλιών, είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος των υπερήχων, τότε παρατηρείται σκέδαση της δέσμης υπερήχων.
Η ηχώ από αυτή την επιφάνεια σκεδάζεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

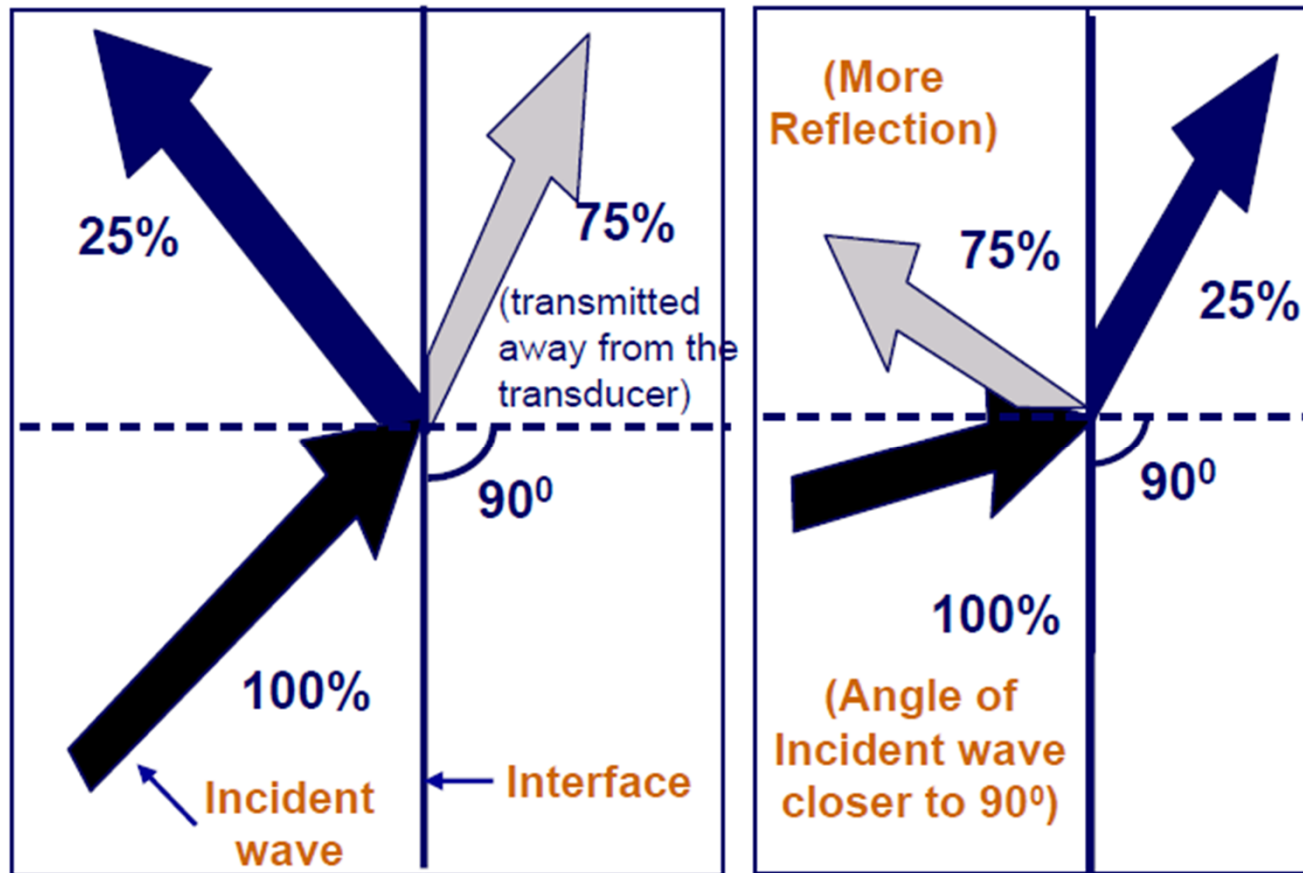
Κατοπτρικοί ανακλαστήρες



Σκέδαση



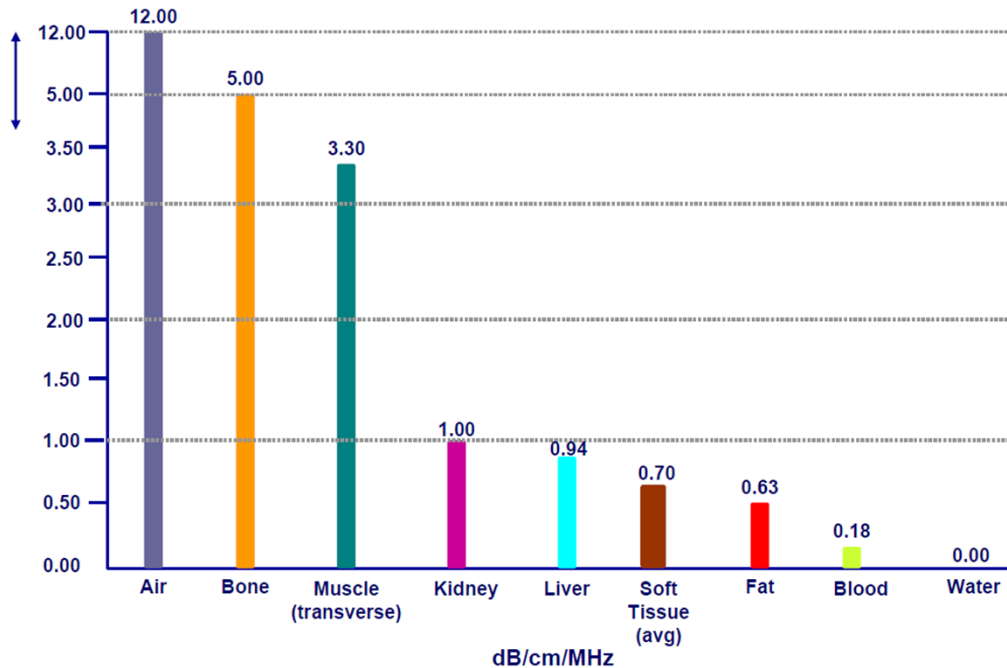
Ανάκλαση και διάδοση



Εξασθένηση

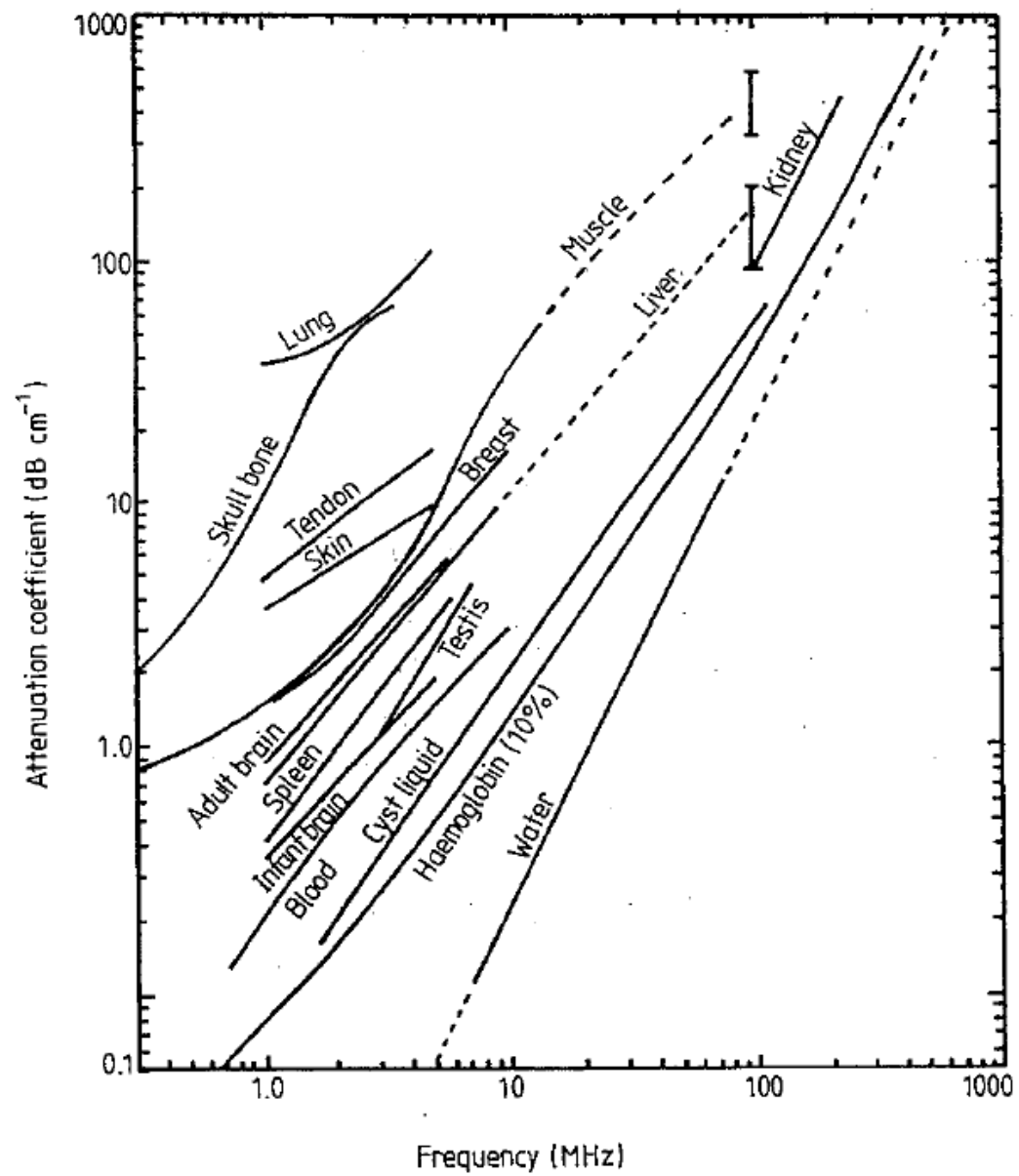
- Μείωση της ακουστικής ενέργειας καθώς μετακινείται το κύμα μέσα από το υλικό και εναποθέτει κάποιο μέρος της ενέργειας του ως θερμότητα.
- Η εξασθένηση αυτής της ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς επηρεάζει την βάθος διείσδυσης στους ιστούς.
- Επηρεάζει τις επιλογές που κάνουμε στη λειτουργία του υπερηχογράφου ώστε να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.
- Μέρος της ενέργειας μεταφέρεται ως θερμότητα στους ιστούς και κάποια χάνεται εξαιτίας της ανάκλασης και της σκέδασης.
- Επομένως η εξασθένηση είναι το συνδυαστικό αποτέλεσμα της απορρόφησης, σκέδασης και ανάκλασης.
- Εξαρτάται από τη συχνότητα του ακουστικού κύματος καθώς και από τη φύση του υλικού που διαπερνάει:
 - Οι υψηλές συχνότητες εξασθενούν πιο γρήγορα

Συντελεστής εξασθένησης



Tissue	Attenuation at 1MHz	Exponent m
Water	0.02 dB/cm	2
Blood	0.2 dB/cm	1
Liver	1dB/cm	1.2
Muscle	1.6 dB/cm	
Skull Bone	8dB/cm	2.1
Lung	30dB/cm	0.2-1.2

- α σε μονάδες (dB/cm/MHz) → εξαρτάται από τη συχνότητα
- μ σε μονάδες (dB/cm) -> $\mu = \alpha \cdot f^m$
 - Για τους περισσότερους ιστούς $m \approx 1$
 - Για μικρούς σκεδαστές $m \approx 4$



Πώς παράγεται η εικόνα;

- Τα υπερηχογραφήματα παρουσιάζουν τις διαφορές στην ακουστική εμπέδηση (Z) των ιστών. Αυτές προκαλούνται από τις μεταβολές στην πυκνότητα και στην συμπίεστικότητα των ιστών πχ κόκκαλο, συκώτι.
- Στην πιο απλή μορφή, ένα κύμα υπερήχου παράγεται από έναν μετατροπέα (transducer) και διαδίδεται σε ευθεία γραμμή μέσα στο σώμα.
- Καθώς διαδίδεται, παράγεται ηχώ από τα αντικείμενα που βρίσκονται στην πορεία του.
- Η επιστρεφόμενη ηχώ λαμβάνεται από τον μετατροπέα.
- Η εικόνα παρουσιάζει το πλάτος του λαμβανόμενου κύματος ως φωτεινότητα ενώ μεταφράζει τον χρόνο άφιξης ως απόσταση κατά μήκος της διαδρομής του κύματος (line of sight).
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για πολλαπλές διαδρομές ώστε να παραχθεί μια δισδιάστατη εικόνα.

