

ΗΛΕΚΤΡΟΑΚΟΥΣΤΙΚΗ

3. ΑΚΟΥΣΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΚΥΜΑΤΑ, ΠΗΓΕΣ, ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Γιάννης Μουρτζόπουλος

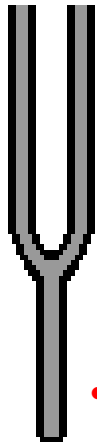


ΟΜΑΔΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΗΧΟΥ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

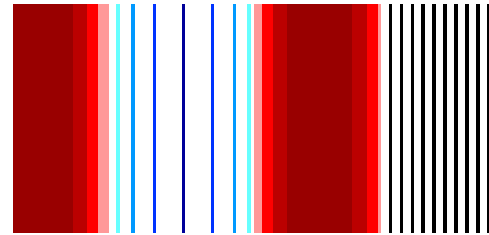
www.wcl.ece.upatras.gr/audiogroup/

η φύση των ακουστικών κυμάτων

ακουστική πηγή



ακουστικό κύμα

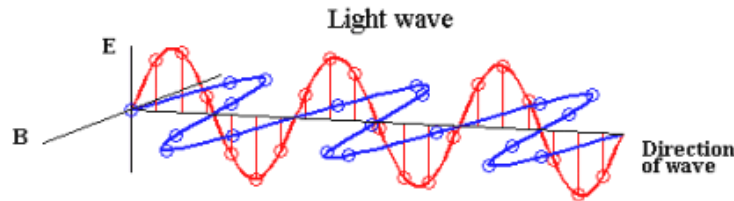
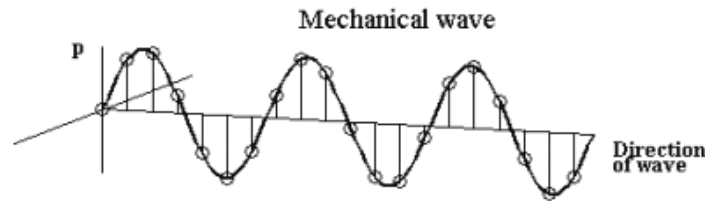


ακροατής



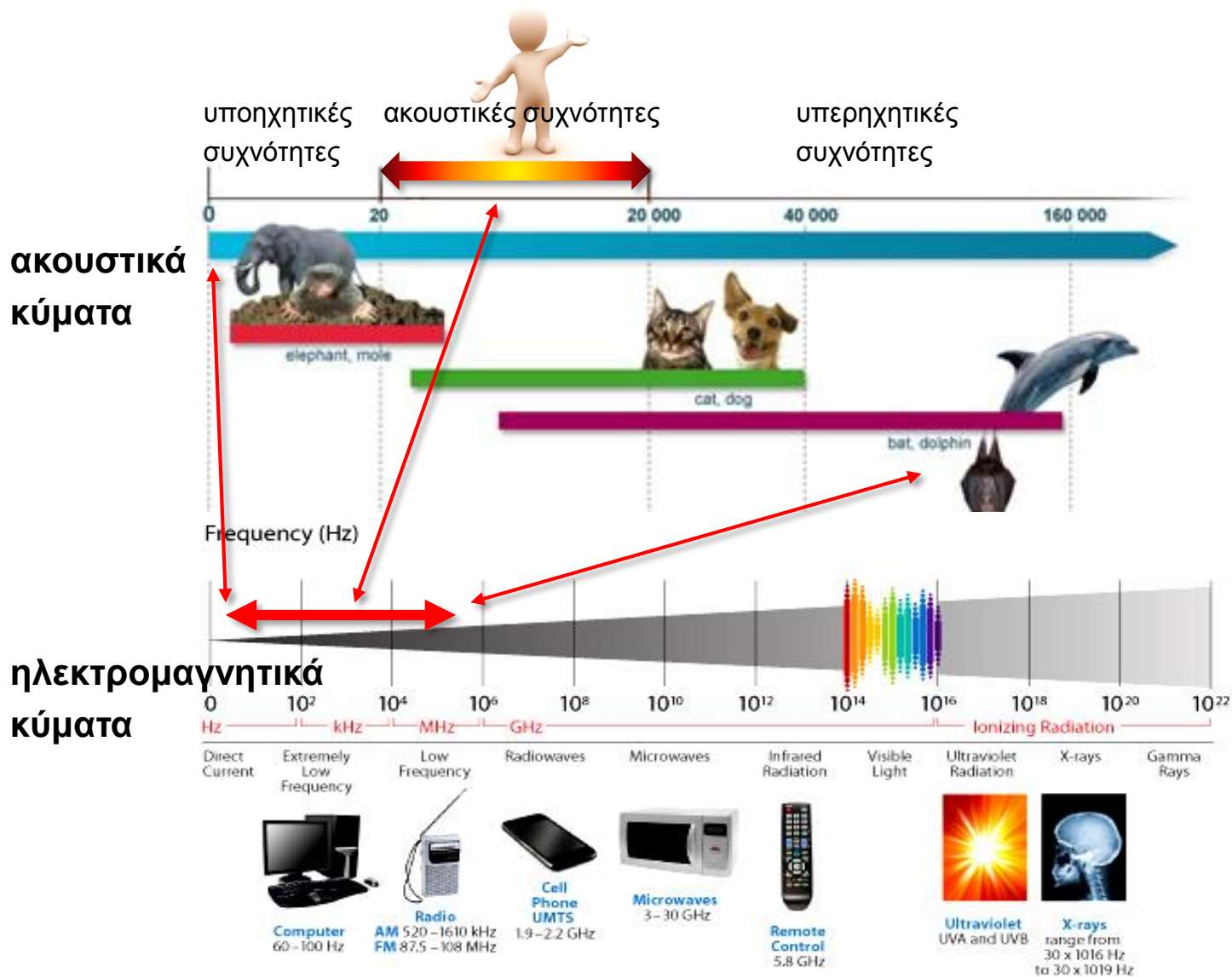
- Είναι ένα **φυσικό** φαινόμενο
- Μία **ταλάντωση** (από την πηγή) **μεταφέρεται** σε ένα μέσο (αέρας)
- Παράγεται **κύμα** που **διαδίδεται** προς τον δέκτη (ακροατή)
- Αναπαράγει ένα **ερέθισμα** (ακοή)

ακουστικά κύματα (φυσική)

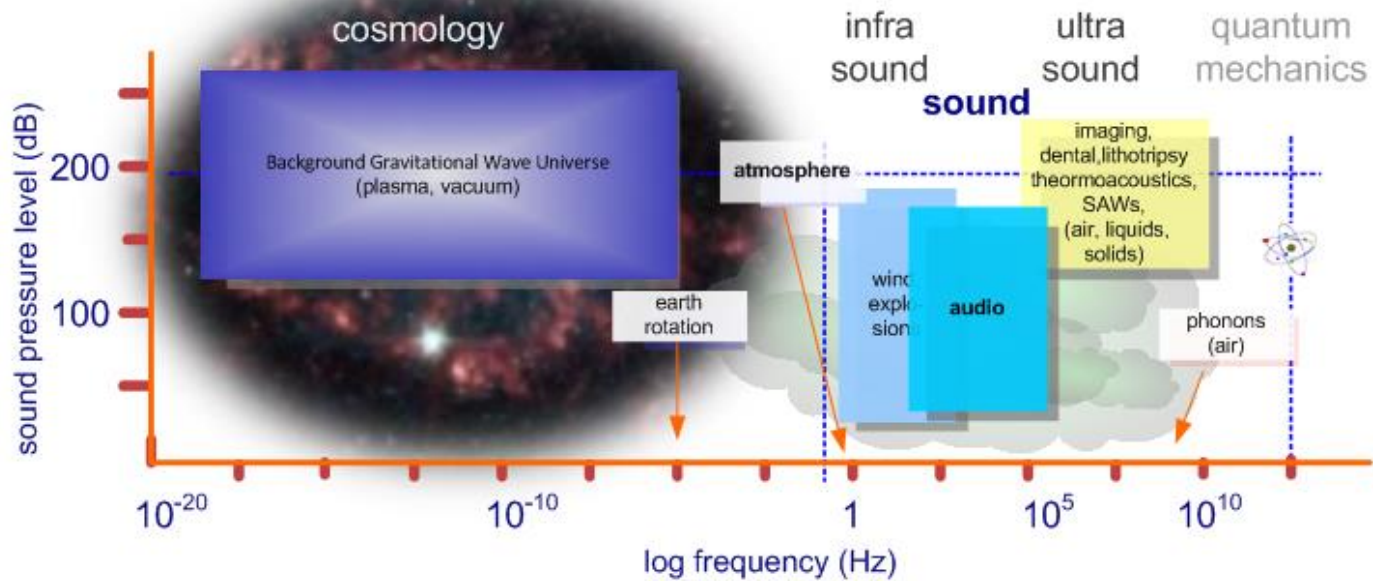


- Τα ακουστικά κύματα παράγονται από **κίνηση σωματιδίων**
- Άρα, παράγονται κυρίως από **μηχανικές ταλαντώσεις**
- Απαιτείται **μάζα** και **δύναμη επαφής** (αέρας,..., ελαστικό μέσο)
- Τα **οπτικά κύματα** δεν παράγονται από κίνηση σωματιδίων
- Είναι **ηλεκτρομαγνητικά κύματα** από σύζευξη μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου
- Μεταδίδονται στο **κενό** (τα ακουστικά, όχι)....

ακουστικά κύματα (φυσική)

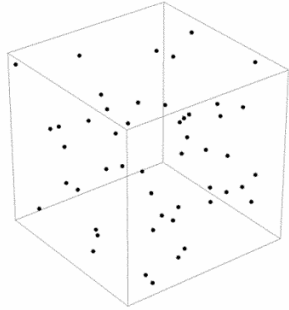


ακουστικά κύματα (φυσική)

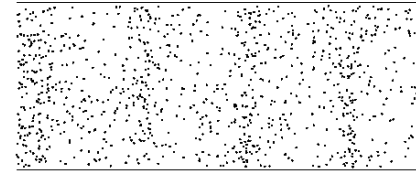


- Τα ακουστικά κύματα εμφανίζονται σε τεράστια περιοχή συχνοτήτων
- Πέρα από την περιοχή ακουστών συχνοτήτων ($\sim 20\text{Hz} - 20\text{KHz}$)
- Εφαρμογές, κυρίως σε υπέρηχους

ακουστικά κύματα (φυσική)



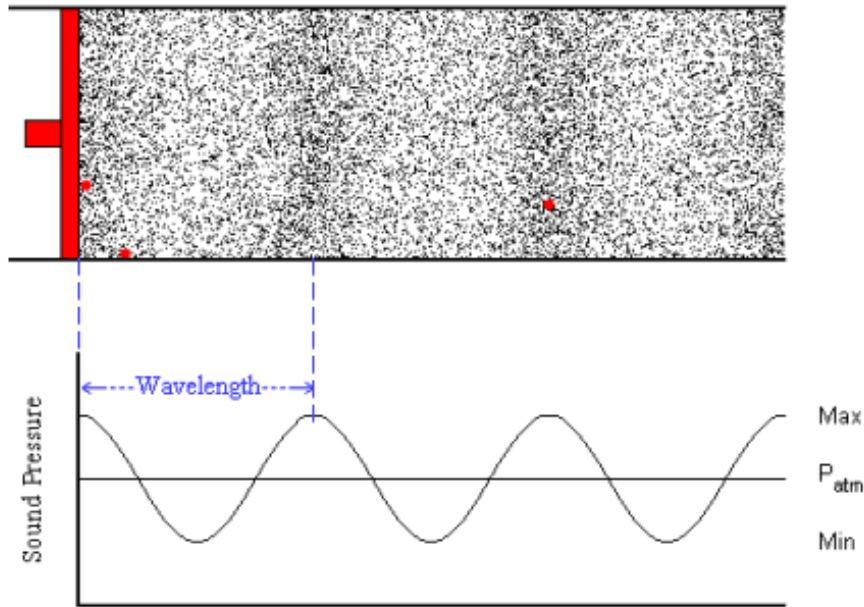
σωματίδια σε κύβο ~ 1/6 τρίχας



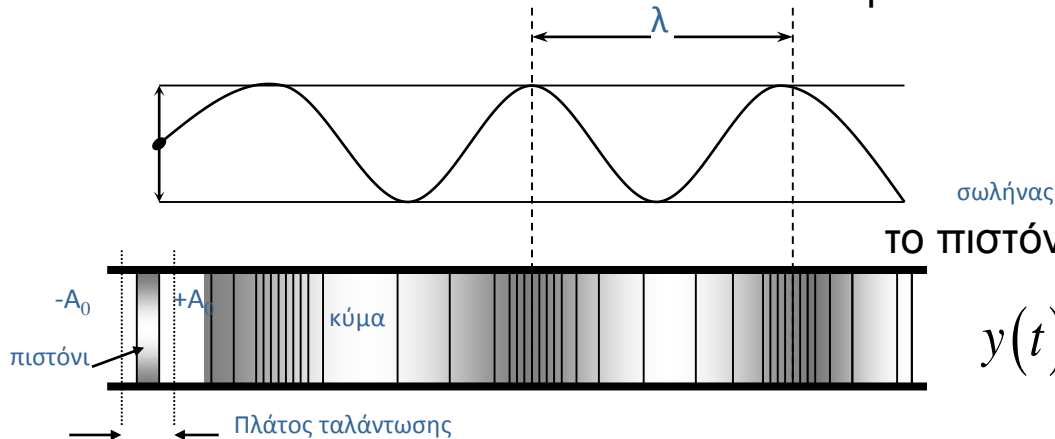
ηχητικό κύμα

- Στην ατμόσφαιρα υπάρχει **τυχαία** κίνηση σωματιδίων σε 3D
- Κάθε μόριο αέρα συγκρούεται ~ 5×10^9 φορές / sec
- Σε δωμάτιο, ~ 2×10^{27} που ζυγίζουν ~ 72 Kg
- Κινητική ενέργεια όση ένα φορτηγό με 1600 Km/h
- Η **ατμόσφαιρα** ζυγίζει ~ 5×10^3 Kg , παράγει DC πίεση **191 dB**
- Το ηχητικό κύμα τρέχει με ταχύτητα 340m/s (~1234 Km/h) ~ 10^6 < από φώς
- Τα σωματίδια του ήχου κινούνται με ~ 0,16 Km/h (**για ~ 117 dB**)
- ~ 140 στα 10^6 μόρια σχηματίζουν το ηχητικό κύμα
- Σε μπαλόκι διαμέτρου ~ 0.4 m, η ταλάντωση θα ήταν ~ 0.2 mm (~ 1/5 τρίχας)
- Δυνατός ήχος έχει ένταση ~ 1 W/m^2 , ελάχιστος ακουστός ~ 10^{-12} W/m^2
(στο αυτί ~ 1 cm^2 η ελάχιστη ισχύς για ήχο ~ 10^{-16} W)

Acoustic Longitudinal Wave



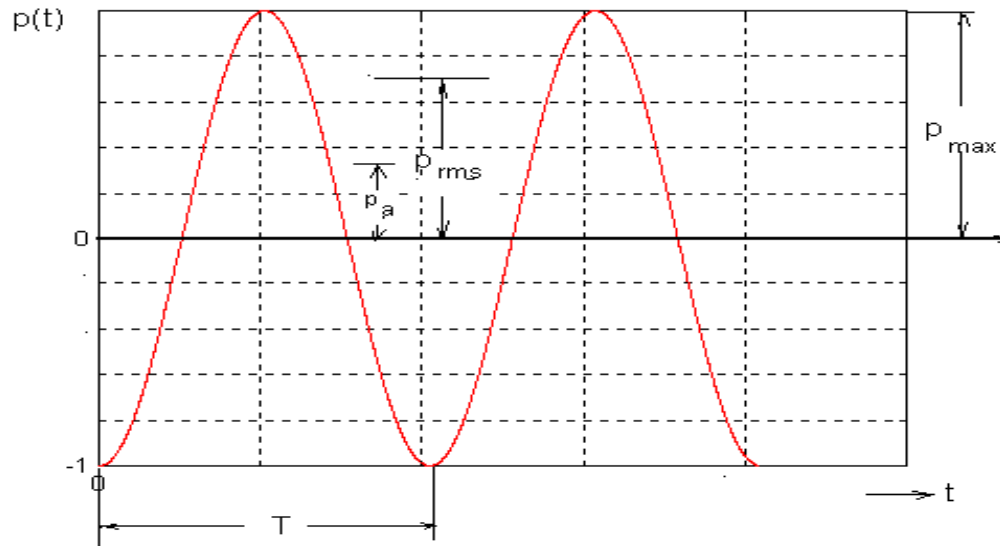
Μονοδιάστατο οδεύων κύμα



το πιστόνι κάνει αρμονική ταλάντωση

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) = A \sin(\omega t)$$

για απλή αρμονική ταλάντωση με συχνότητα f (Hz):

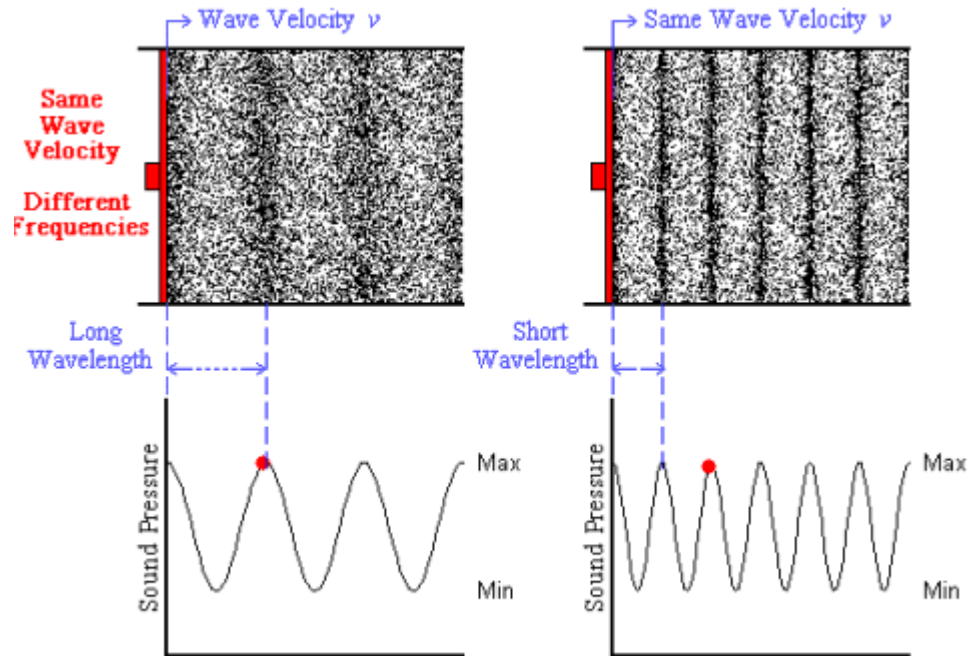


η ακουστική πίεση είναι **μονόμετρο** μέγεθος
μετριέται σε pascal ή N/m^2

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T |p(t)| dt \quad \Rightarrow \quad P_{rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} P_a = \frac{1}{\sqrt{2}} P_{max}$$

ακουστικά κύματα

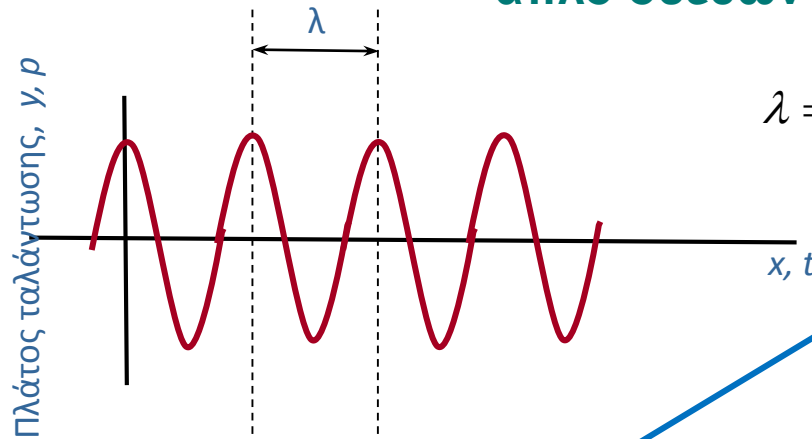


η συχνότητα αρμονικού οδεύοντος κύματος $f = 1/T$

η ταχύτητα του κύματος είναι ανεξάρτητη της συχνότητας

$$c = \lambda / T \text{ και } c/\lambda = 1/T \text{ και επίσης: } \lambda / T = \omega/k = c$$

απλό οδεύων κύμα



$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi}{k} \text{ και } c = \lambda \cdot f$$

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) = A \sin(\omega t)$$

$$p(t) = P \cos(2\pi ft) = P \cos(\omega t)$$

- απλή ημιτονοειδής ταλάντωση με συχνότητα f (Hz) ή ω (rad/s),
- εκφράζει την απομάκρυνση y , ή την πίεση p (90° διαφορά φάσης)
- επαναλαμβάνεται σε διαφορετικά σημεία (x) : 1D οδεύων κύμα
- σε απόσταση x προς τα δεξιά, θα έχουμε μια φασική αλλαγή, φ :

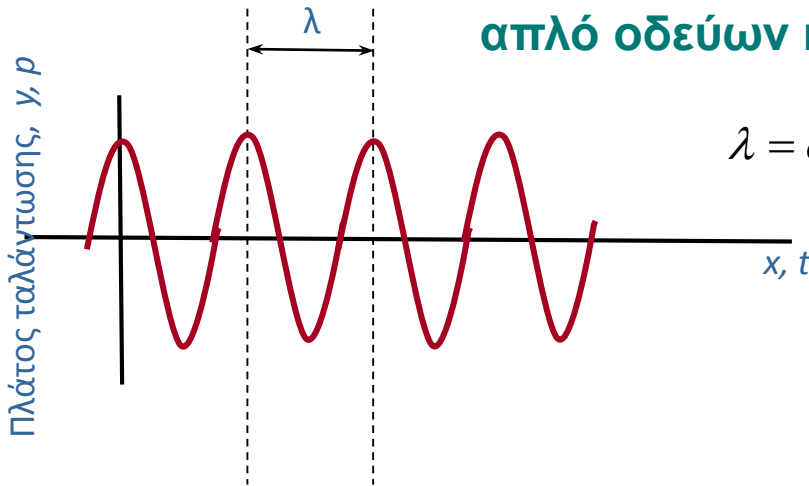
$$p(t, x) = P \cos(\omega t - \varphi)$$

- για απόσταση λ , η διαφορά φάσης θα είναι 2π , άρα:

$$\lambda/x = 2\pi/\varphi \quad \text{και} \quad \varphi = 2\pi x/\lambda$$

- αφού $\omega = 2\pi c/\lambda$:

$$p(t, x) = P \cos\left(\frac{2\pi c}{\lambda} t - \frac{2\pi}{\lambda} x\right) = P \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda} (ct - x)\right] = P \cos[k(ct - x)]$$



$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi}{k} \text{ και } c = \lambda \cdot f$$

- αφού $\cos(a-b) = \cos(b-a)$

$$p(t, x) = P \cos[k(ct - x)] = P \cos(kx - \omega t)$$

- γενικότερα:

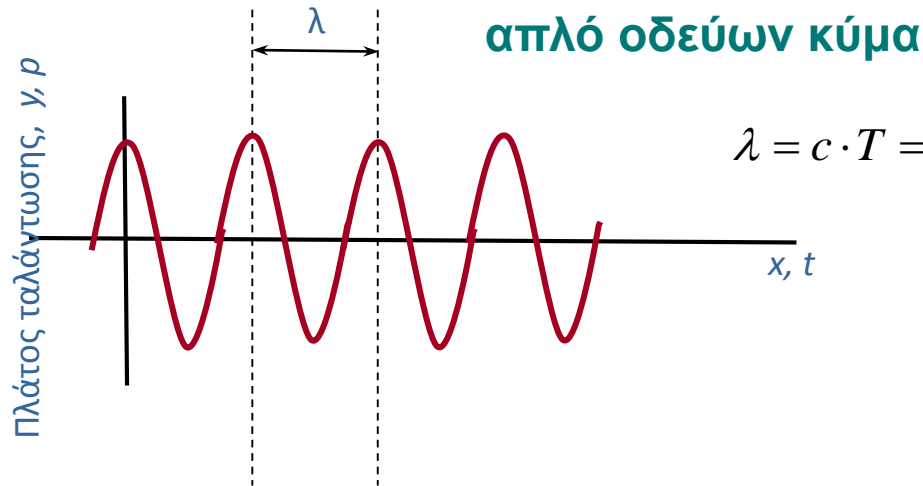
$$p(t, x) = P \cos(kx - \omega t + \varphi)$$

- ή και :

$$y(t, x) = A \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

- συνήθως σε 2 διευθύνσεις:

$$y(t, x) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t)$$



$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi}{k} \text{ και } c = \lambda \cdot f$$

σε κάθε σημείο:

- απομάκρυνση σωματιδίων: $y(t) = A \sin(kx - \omega t)$
- ταχύτητα σωματιδίων: $u(t) = \frac{dy(t)}{dt} = -A\omega \cos(kx - \omega t)$
- πίεση κύματος: $p(t) = -P \cos(kx - \omega t)$
- πίεση και σωματιδιακή ταχύτητα είναι σε φάση
- πίεση και σωματιδιακή απομάκρυνση είναι εκτός φάσης

ταχύτητα του ηχητικού κύματος (c) \neq ταχύτητα σωματιδίων, (u)

ταχύτητα ήχου (ηχητικού κύματος) στον αέρα:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_{atm}}{\rho}}$$

$$P_{atm} \approx 100 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$\rho \approx 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\gamma \approx 1.4$$

$$c \approx 340 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\lambda = c \cdot T = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{2\pi}{k} \quad \text{και} \quad c = \lambda \cdot f$$

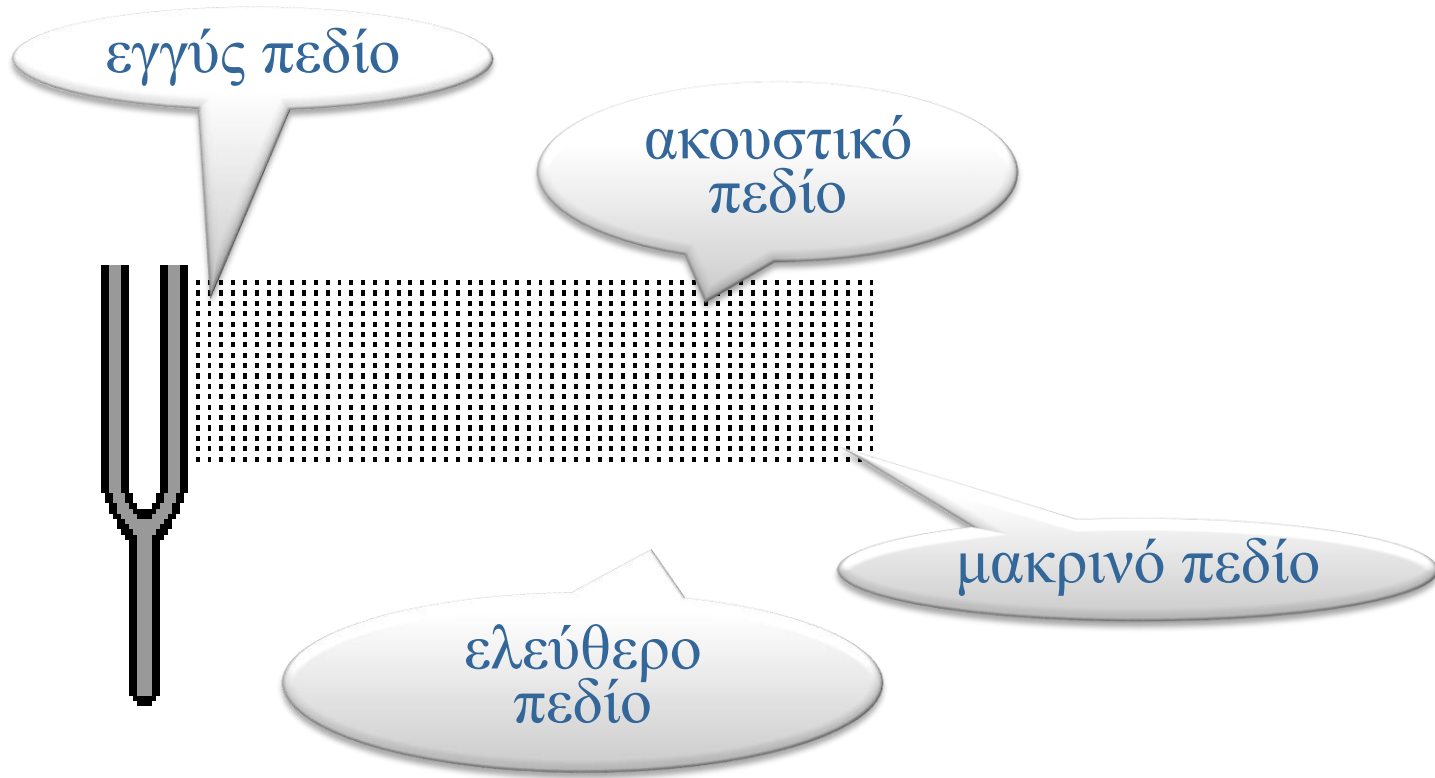
για $f = 16\text{Hz}$, $\lambda = 21,5 \text{ m}$

για $f = 16\text{KHz}$, $\lambda = 21,5\text{mm}$

Στο νερό: $c \approx 1500 \text{ m.s}^{-1}$ Σε μέταλλο: $c \approx 6000 \text{ m.s}^{-1}$

η κυματική εξίσωση

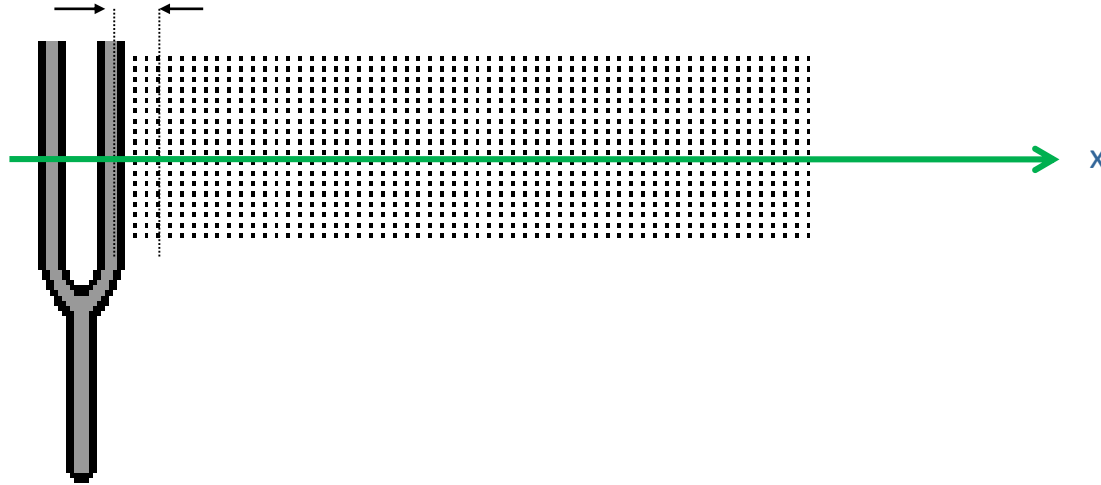
ακουστικό πεδίο και κύματα



- Το ακουστικό πεδίο δημιουργείται από **διαφορά ακουστικής πίεσης**
- Το **εγγύς πεδίο** (near field) ισχύει για $r < \lambda$
- Το **μακρινό πεδίο** (far field) δημιουργείται από το οδεύον κύμα
- Το **ελεύθερο πεδίο** δεν δημιουργεί ανακλάσεις

ακουστικό πεδίο και κύματα

απομάκρυνση $y(t,x)$



σωματιδιακή ταχύτητα

$$\vec{u} = \frac{\partial \vec{y}}{\partial t}$$

π.χ. $u_{rms,max} = 0,25 \text{ m/s}$
 $u_{rms,min} = 5 \times 10^{-8} \text{ m/s}$

σωματιδιακή επιτάχυνση

$$\vec{a} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$$

$$y_{max} = 4 \times 10^{-5} \text{ m}$$

ακουστική πίεση

$$\vec{p} = \vec{u} Z_{Ak}$$

$$y_{min} = 8 \times 10^{-12} \text{ m}$$

(ειδική) ακουστική εμπεδισή Z_{ak} :

$$Z_{ak} = \frac{p(r, t)}{u(r, t)}$$

μετριέται σε Rayl ($\text{Kg/m}^2/\text{sec}^2$)

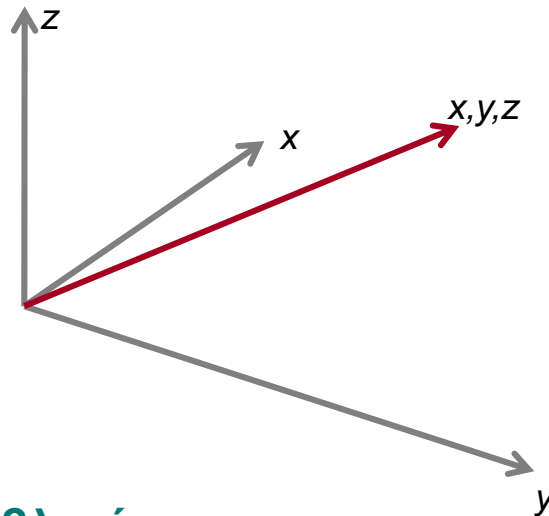
ακουστική εμπεδισή σε επίπεδα κύματα:

$$Z_{ak} = \rho c$$

ακουστική αντίσταση = $1,21 \text{ kg/m}^3 \times 343 \text{ m/sec} = 415 \text{ Rayls}$

η 3-D κυματική εξίσωση διάδοσης του ήχου :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}$$



μεταβλητές
χώρος & χρόνος

γενική επίλυση κυματικής εξίσωσης διάδοσης του ήχου :

$$p(x, t) = f(t - x/c)$$

όποια συνάρτηση

μεταβλητές χώρος & χρόνος

σε 2 διευθύνσεις :

$$p(x, t) = f_1(t - x/c) + f_2(t + x/c)$$

για (πραγματικό μέρος) αρμονικού φάσσορα :

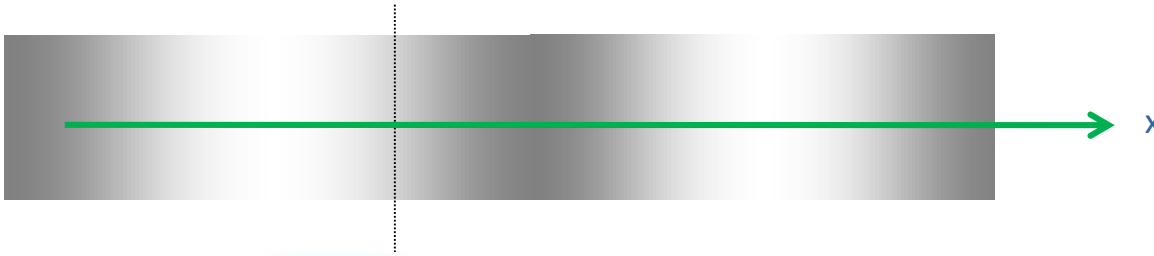
ή

$$p(x, t) = p_{\max} \cos k(x - ct) + p_{\max} \cos k(x + ct)$$

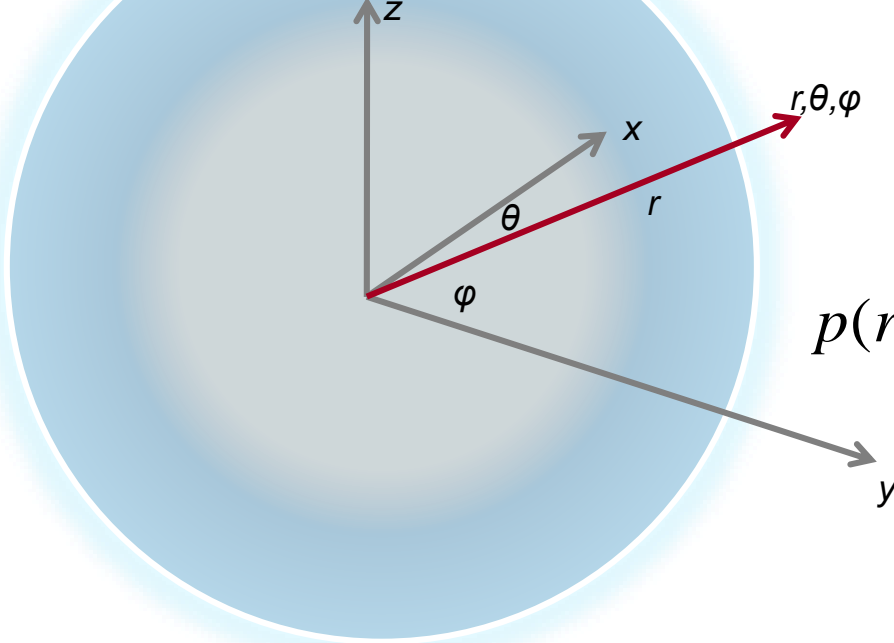
$$p(x, t) = p_{\max} \cos(kx - \omega t) + p_{\max} \cos(kx + \omega t)$$

επίπεδα – σφαιρικά ηχητικά κύματα

επίπεδο κύμα ήχου :



σφαιρικό κύμα ήχου :



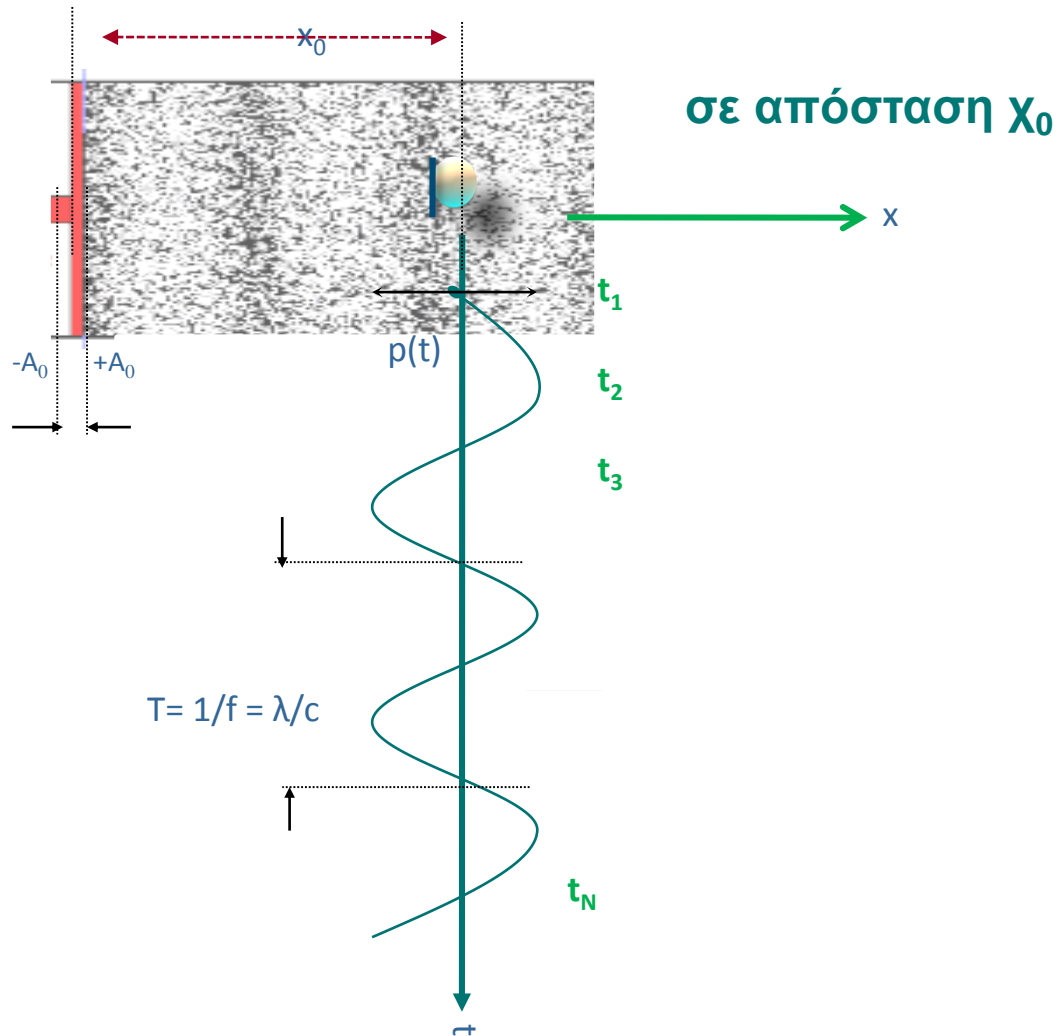
$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2}$$

$$p(r, t) = \frac{P_{\max} \sqrt{2}}{r} \cos k(r - ct)$$

η διάδοση του ακουστικού κύματος

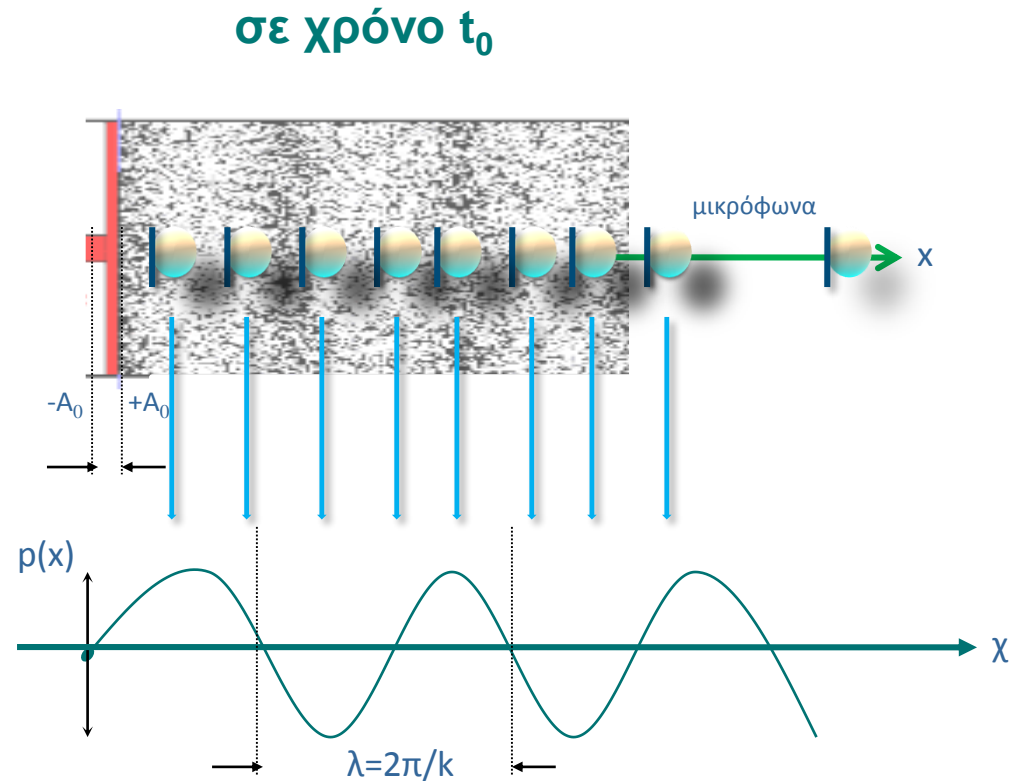
διάδοση ακουστικού κύματος

για σταθερό σημείο στο χώρο, η πίεση μετρείται σε πολλαπλές χρονικές στιγμές:



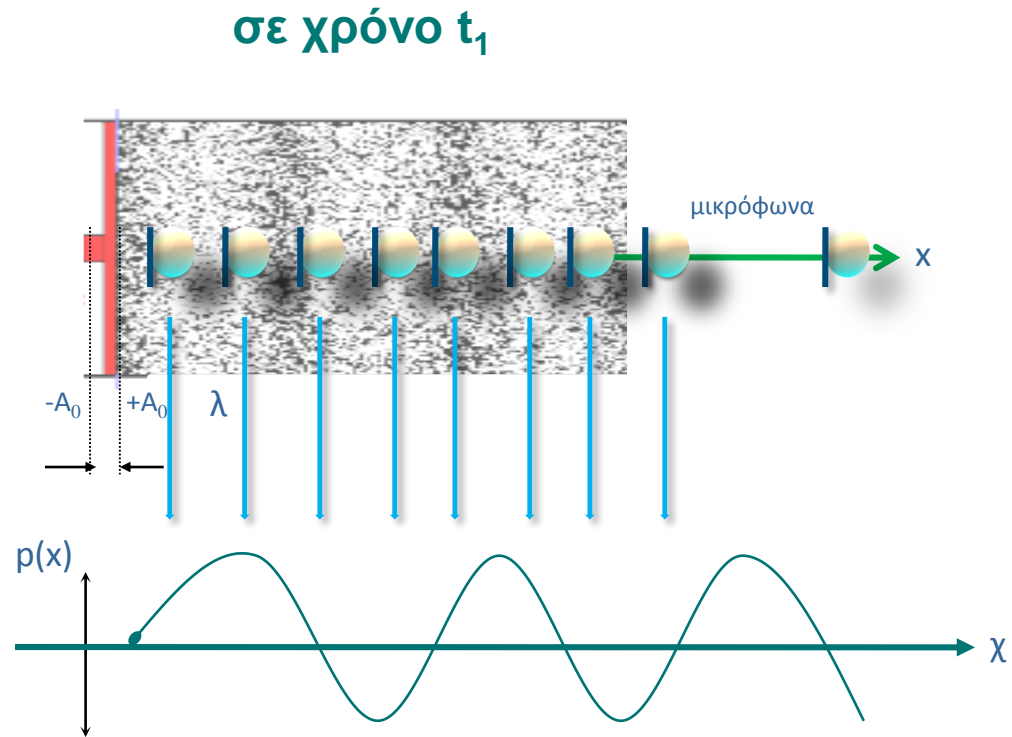
διάδοση ηχητικού κύματος

για σταθερό χρόνο, η πίεση μετριέται σε πολλαπλές χωρικές αποστάσεις:



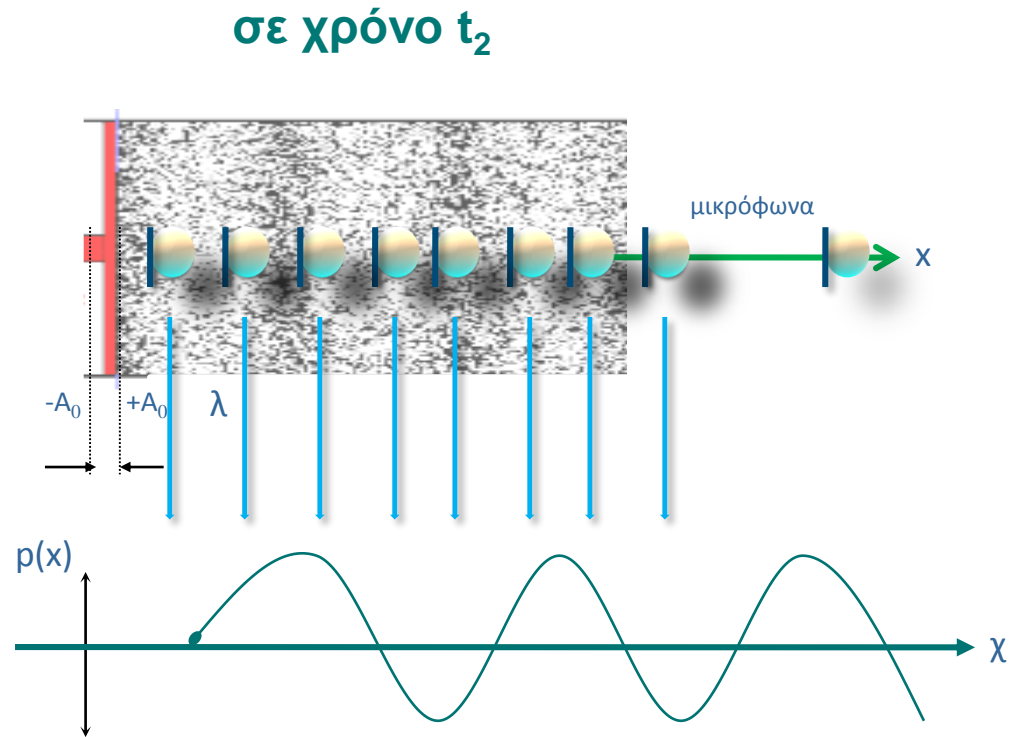
διάδοση ακουστικού κύματος

για σταθερό χρόνο, η πίεση μετριέται σε πολλαπλές χωρικές αποστάσεις:



διάδοση ακουστικού κύματος

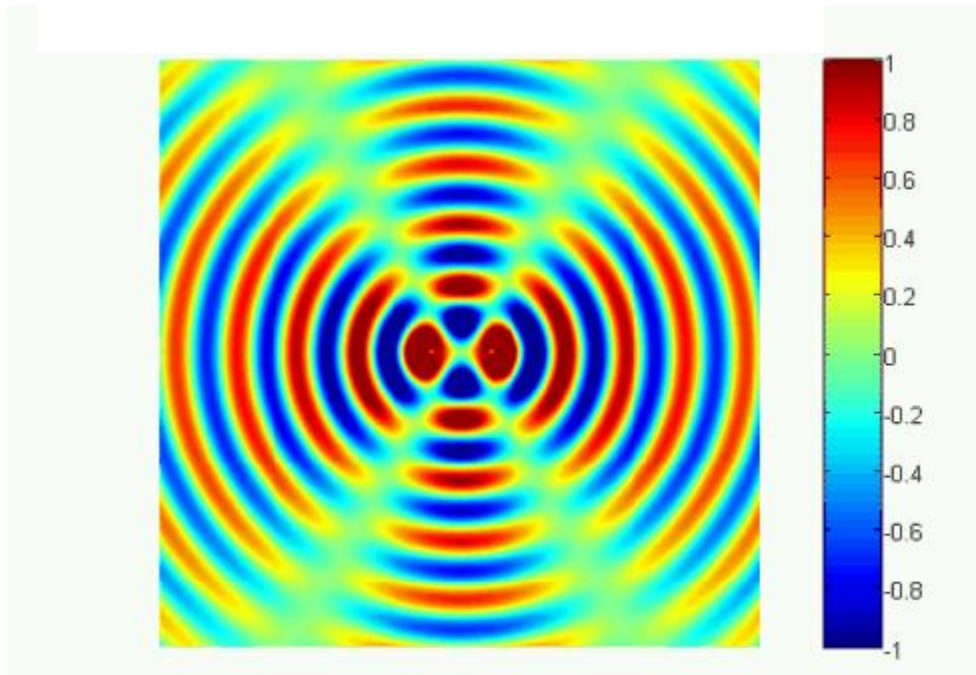
για σταθερό χρόνο, η πίεση μετριέται σε πολλαπλές χωρικές αποστάσεις:



διάδοση ακουστικού κύματος

συνδυασμός κυμάτων – αρχή επαλληλίας

$$p(x,t) = \sum_i p_i(x,t)$$



συνδυασμός 2 σφαιρικών πηγών σε απόσταση λ

στάσιμα κύματα

διάδοση ακουστικού κύματος

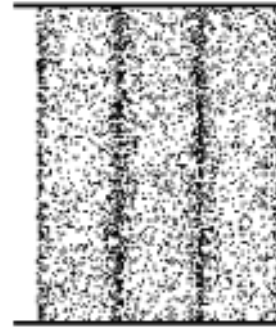
Στάσιμο μονοδιάστατο κύμα από υπέρθεση οδεύοντων κυμάτων



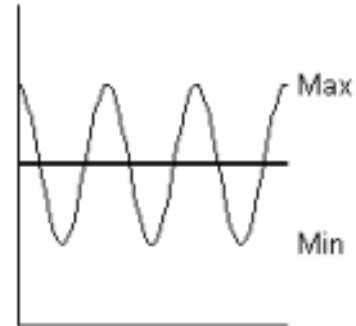
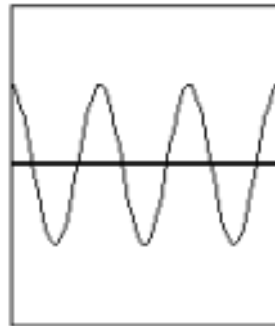
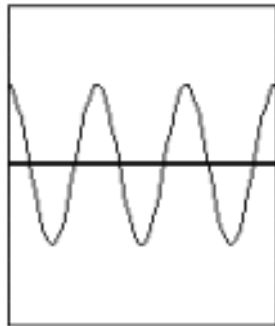
επίπεδο κύμα →



← επίπεδο κύμα



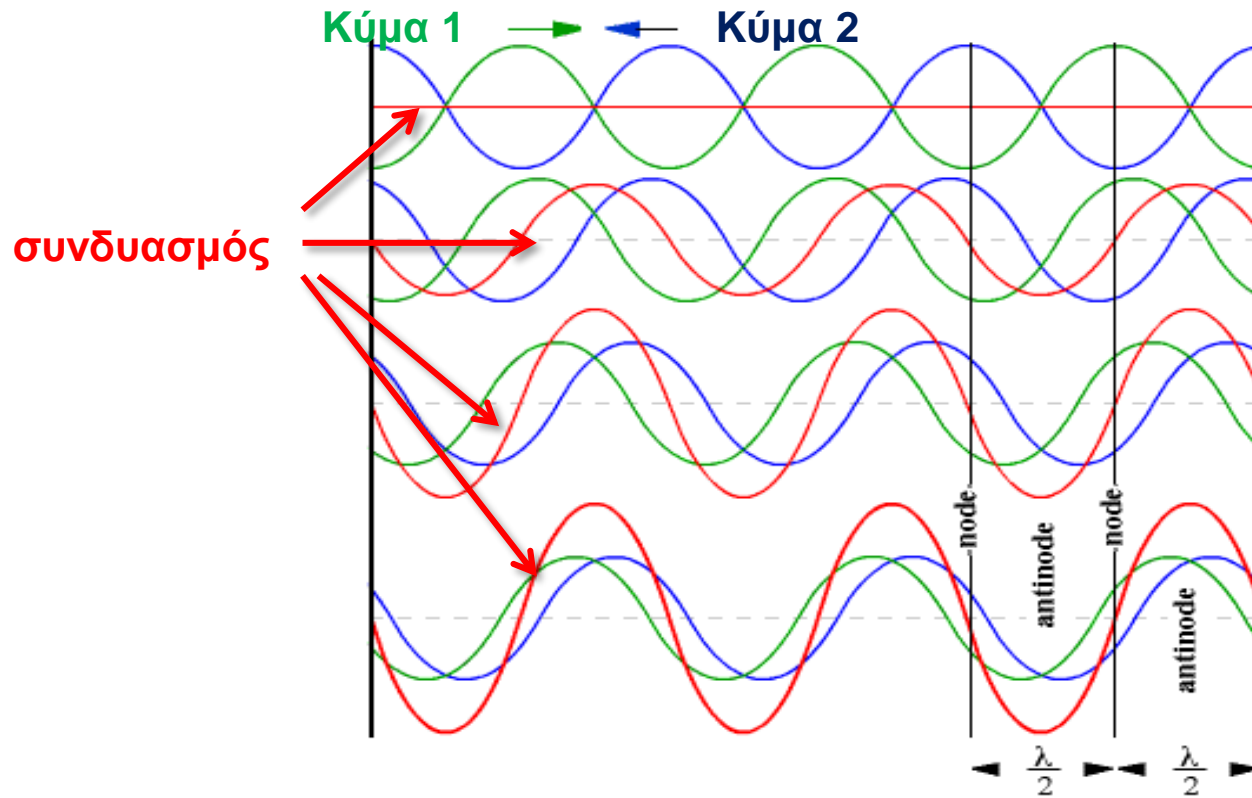
συνδυασμός



διάδοση ακουστικού κύματος

Στάσιμα κύματα

$$p(x,t) = P_{\max} \cos k(x - ct) + P_{\max} \cos k(x + ct) = 2p_{\max} (\cos kx) \cos(2\pi ft)$$



διάδοση ακουστικού κύματος

Στάσιμα κύματα

$$p(x,t) = P_{\max} \cos k(x - ct) + P_{\max} \cos k(x + ct) = 2p_{\max} (\cos kx) \cos(2\pi ft)$$

ή

$$p(x,t) = 2p_{\max} \cos kx \cos(\omega t)$$

αντίστοιχα, για τη σωματιδιακή απομάκρυνση:

$$y(x,t) = 2A_{\max} \sin kx \cos(\omega t)$$

άρα, απλή αρμονική ταλάντωση, όχι οδεύον κύμα

διαμορφωμένο από «χωρικό» αρμονικό όρο:

το πλάτος (της απομάκρυνσης) μεταβάλλεται με τη θέση, x :

ελάχιστο

$$\sin kx = \sin \frac{2\pi x}{\lambda} = 0, x = \pm n \frac{\lambda}{2}$$

μέγιστο

$$\sin kx = \sin \frac{2\pi x}{\lambda} = 1, x = \left(n \pm \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$$

το πλάτος (της πίεσης) μεταβάλλεται με τη θέση, x :

$$\cos kx = \cos \frac{2\pi x}{\lambda} = 0, x = \left(n \pm \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{2}$$

$$\cos kx = \cos \frac{2\pi x}{\lambda} = 1, x = \pm n \frac{\lambda}{2}$$

διάδοση ακουστικού κύματος

Στάσιμα κύματα

τα σημεία για **μέγιστα** (nodes-**δεσμοί**) και **ελάχιστα** (antinodes-**κοιλίες**) απέχουν $\lambda/2$ πίεση και απομάκρυνση είναι εκτός φάσης.

για τη μονοδιάστατη κυματική εξίσωση :

$$\frac{\partial^2 p(x)}{\partial x^2} + k^2 p(x) = 0$$

το στάσιμο κύμα της μορφής :

$$p(x, t) = 2p_{\max}(\cos kx) \cos(2\pi ft)$$

αποτελεί μια λύση της.

Σε 2 παράλληλες επιφάνειες σε απόσταση L (m), για στάσιμο μονοδιάστατο κύμα, θα είναι $f_{\min} = c/2L$, και επίσης συχνότητες $f_n = n c/2L$ ($n=1, 2, \dots$)

η μικρότερη απόσταση L για την δημιουργία στάσιμου κύματος είναι $L = \lambda/2$, άρα: $\kappa = \pi/L$ καθώς και για ακέραια πολλαπλάσια του αρχικού κυματικού αριθμού και της συχνότητας, δηλαδή για τέτοιο στάσιμο:

$$p(x, t) = 2p_{\max} \left(\cos nx \frac{\pi}{\lambda} \right) \cos(2\pi nft)$$

συχνοτική ανάλυση του ακουστικού κύματος



Institut Royal
de
France
Académie des sciences.

FOURIER,
(Joseph.)

Membre de la Légion d'honneur, etc.

Né à Auxerre, le 21 Mars 1768, élu en 1817
à l'Académie, perpétuel pour les sciences mathématiques en 1822.

ανάλυση ακουστικού κύματος

στο διάστημα τιμών $0 < t < T$, και $0 < x < L$, και συχνότητες $f_n = n f_0$

- πίεση αρμονικού κύματος **σε χρονική στιγμή t**,
- σε σημείο x του μονοδιάστατου χώρου (στο διάστημα 0 έως L)
- περιγράφεται σαν σταθμισμένο άθροισμα **αρμονικών** «χωρικών» διακυμάνσεων

$$p(x) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \left(\cos nx \frac{\pi}{L} \right)$$

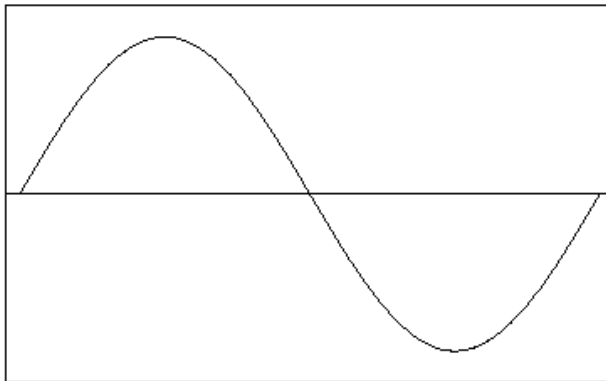
- πίεση αρμονικού **κύματος σε σημείο x** του μονοδιάστατου χώρου
- σε χρόνο t (στο διάστημα 0 έως T)
- περιγράφεται σαν σταθμισμένο άθροισμα **αρμονικών** «χρονικών» διακυμάνσεων

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cos(2\pi n f \frac{t}{T})$$

ανάλυση ακουστικού κύματος

- σε ένα σημείο του χώρου, οποιοδήποτε αρμονικό κύμα (σήμα) σειρά Fourier

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p_n \cos(2\pi n f \frac{t}{T})$$



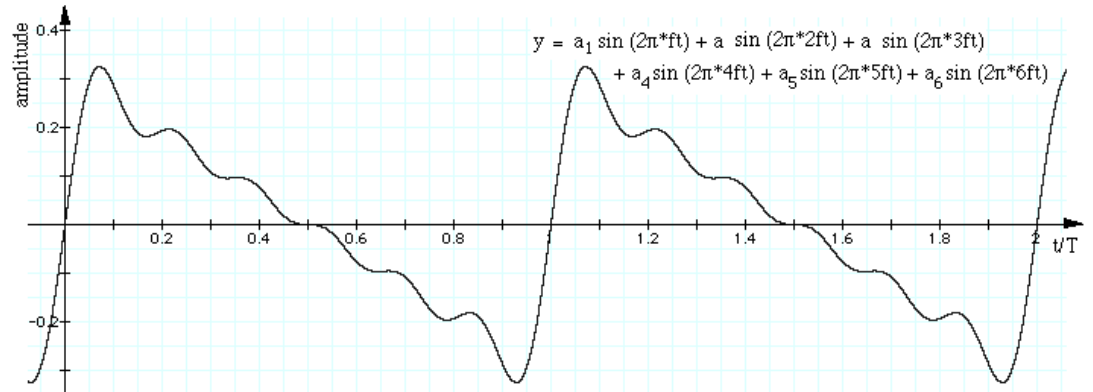
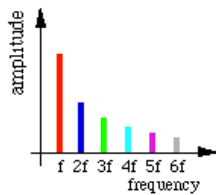
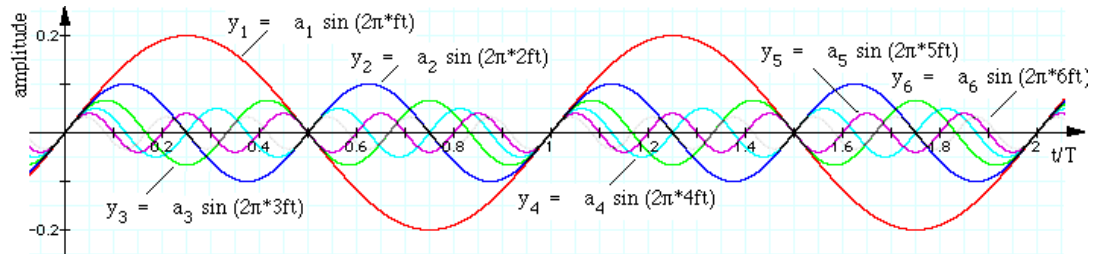
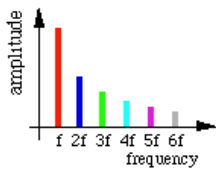
χρόνος



συχνότητα

ανάλυση ακουστικού κύματος

- σε ένα σημείο του χώρου, οποιοδήποτε αρμονικό κύμα (σήμα) σειρά Fourier



συχνότητα



χρόνος

ανάλυση ακουστικού κύματος

για όλους τους κυματικούς αριθμούς χρησιμοποιείται ο **μετασχηματισμός Fourier**

στο διάστημα τιμών $-\infty < t < \infty$, και $-\infty < \omega < \infty$

- σε κάποιο σημείο παρατήρησης, οποιαδήποτε συνάρτηση πίεσης $p(t)$ μπορεί να παραχθεί από την υπέρθεση απείρων μιγαδικών αρμονικών όρων, των οποίων το πλάτος ανά συχνότητα ω , ορίζεται από την μιγαδική συνάρτηση $P(\omega)$, που συνήθως ονομάζεται το «**φάσμα**» της $p(t)$

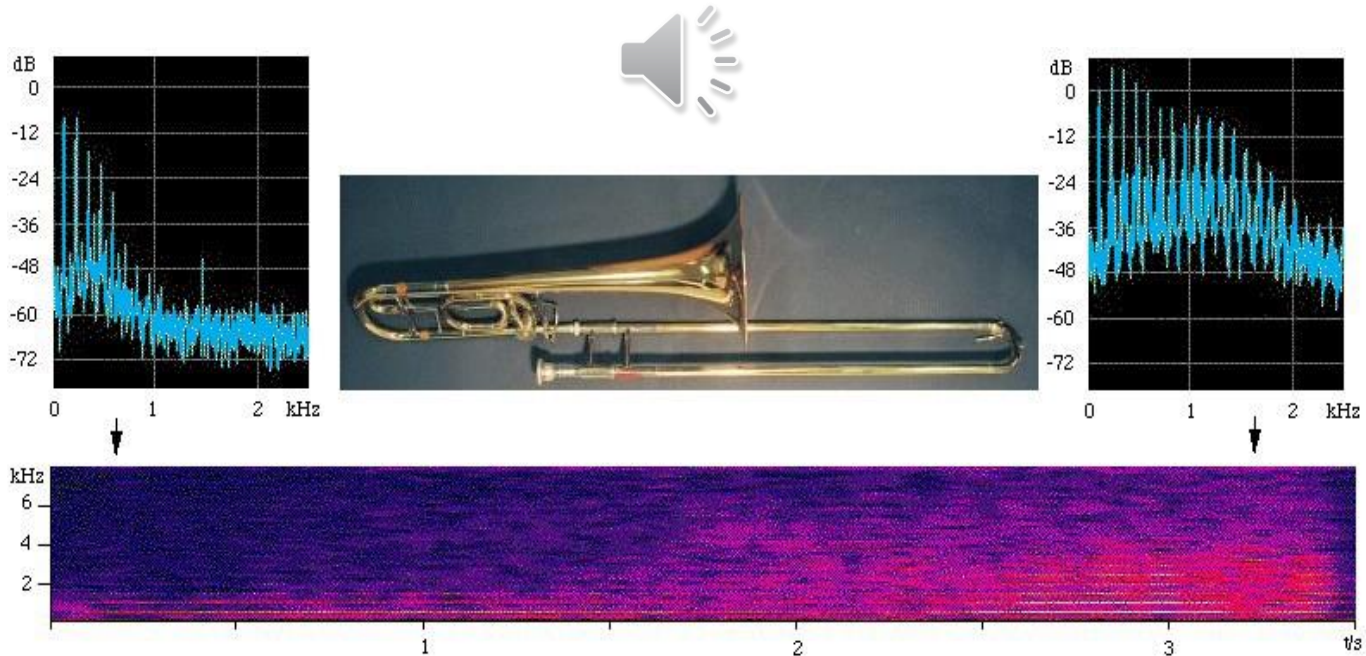
$$p(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

- σε κάποιο σημείο παρατήρησης, το φάσμα της $p(t)$ είναι η μιγαδική συνάρτηση $P(\omega)$

$$P(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t) e^{-j\omega t} dt$$

ανάλυση ακουστικού κύματος

- σε κάποιο σημείο παρατήρησης, το φάσμα της $p(t)$ είναι η μιγαδική συνάρτηση $P(\omega)$
- συνήθως μετράμε το μέτρο του φάσματος. Πρακτικά μέσω FFT
- όταν μεταβάλεται το φάσμα στο χρόνο, κάνουμε ανάλυση σε μικρά χρονικά παράθυρα



ανάλυση ακουστικού κύματος

για όλους τους κυματικούς αριθμούς χρησιμοποιείται ο **μετασχηματισμός Fourier**

στο διάστημα τιμών $-\infty < t < \infty$, και $-\infty < \omega < \infty$

- σε κάποιο σημείο x , η πίεση σχηματίζεται από την υπέρθεση άπειρων όρων με πολλαπλάσια του κυματικού αριθμού της βασικής ταλάντωσης (αριθμός κύκλων ανά μονάδα απόστασης)

$$p(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P(k)e^{jkx} dk$$

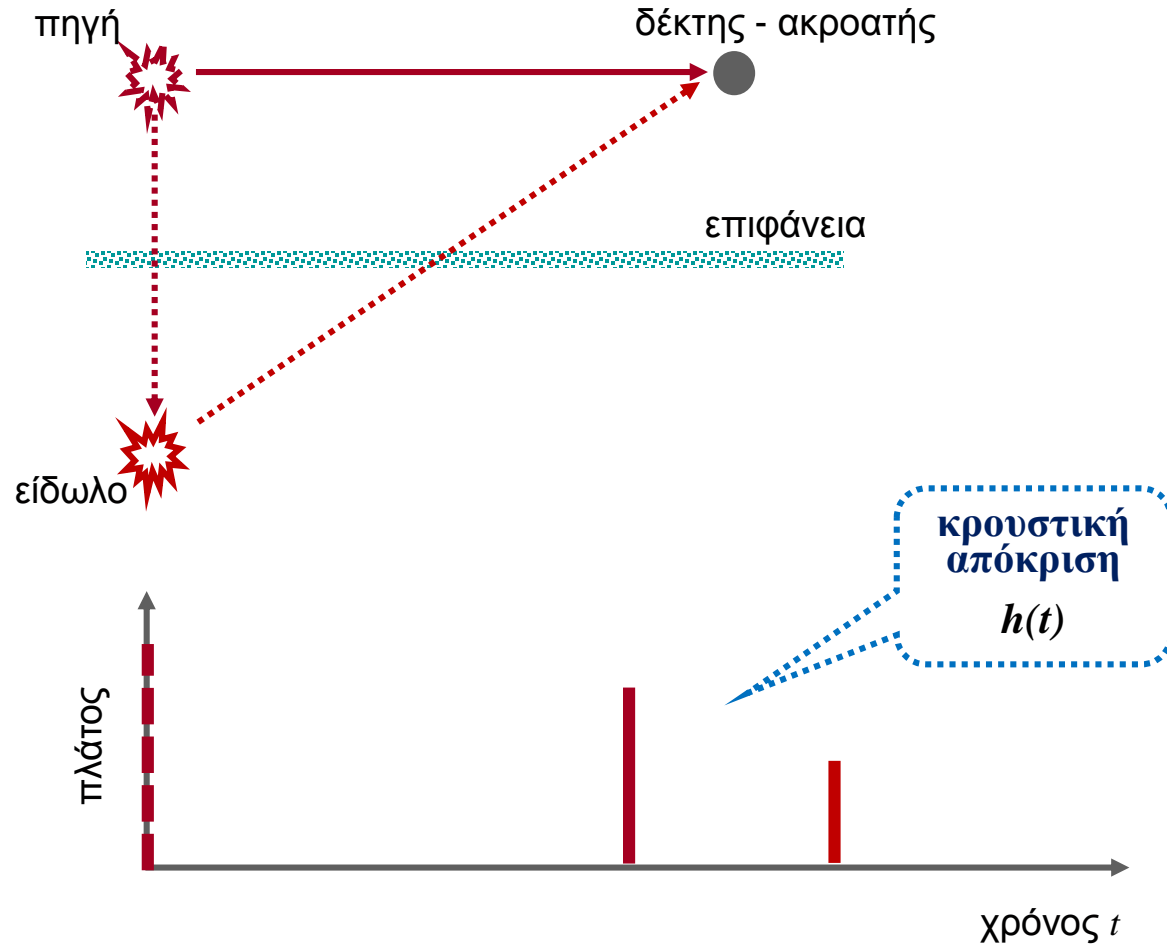
- το φάσμα των κυματικών αριθμών προκύπτει από τον μετασχηματισμό της χωρικής συνάρτησης της πίεσης

$$P(k) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x)e^{-jkx} dx$$

υλοποίηση ακουστικών συστημάτων

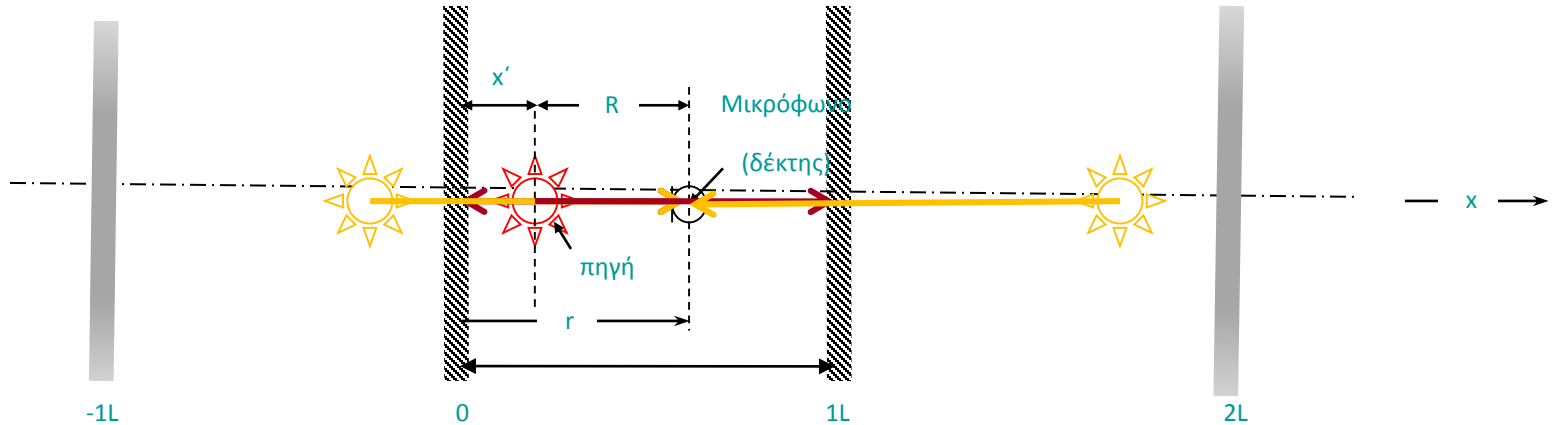
Γεωμετρική ακουστική

- σε σχετικά ψηλές συχνότητες, ο ήχος προσεγγίζεται σαν ακτίνα φωτός
- κάθε επιφάνεια συνεισφέρει μία ανάκλαση



ανάλυση ακουστικού κύματος

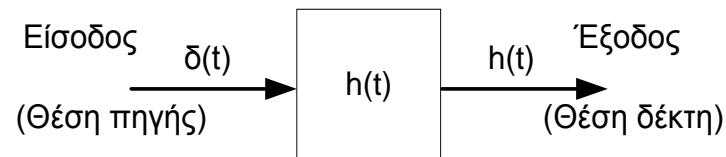
δημιουργία ηχητικών ειδώλων από παράλληλες ανακλαστικές επιφάνειες



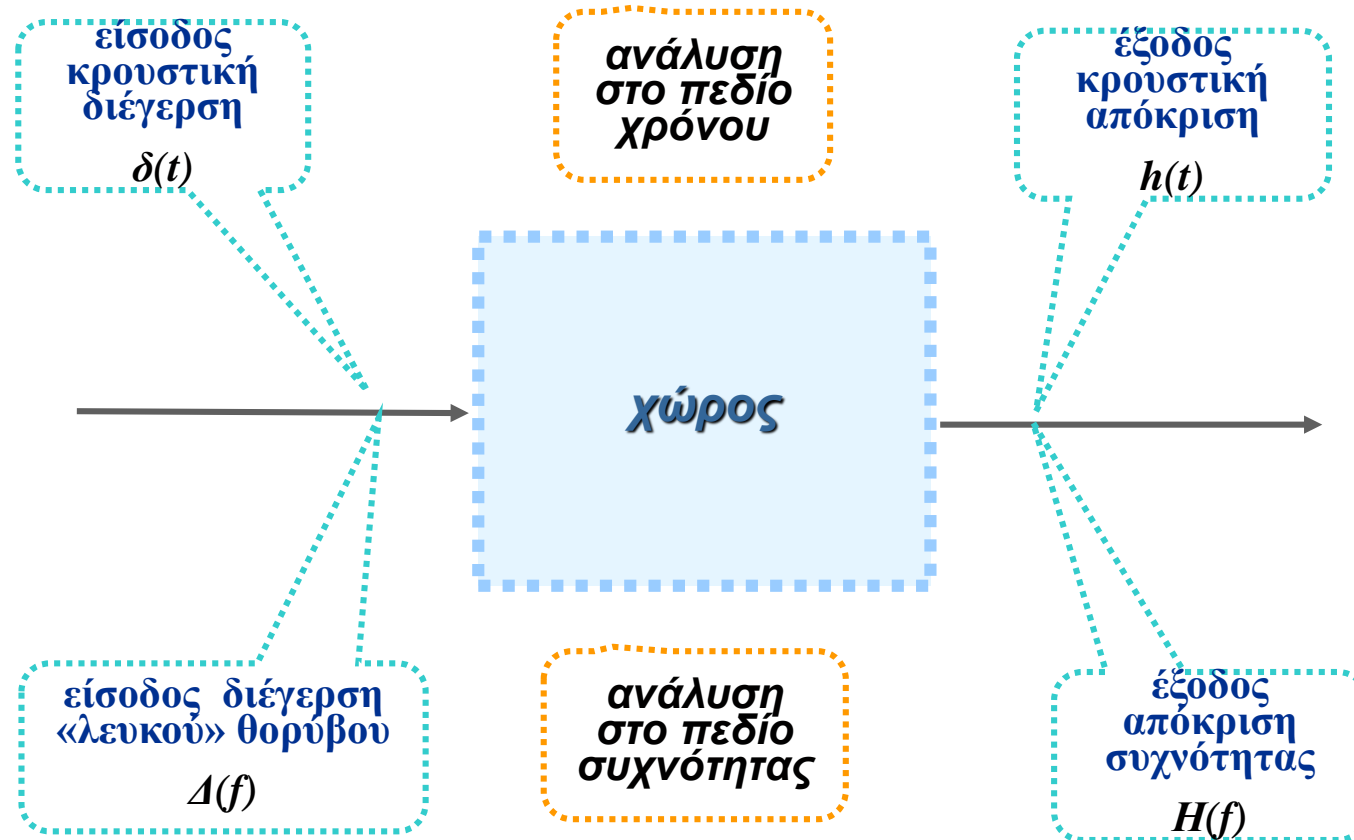
$$t_1 = \frac{2nL \pm x' + r}{c},$$

$$t_2 = \frac{2nL \pm x' - r}{c}$$

ΣΥΣΤΗΜΑ



βασικές έννοιες (ακουστική χώρων σαν σύστημα)



ανάλυση ακουστικού κύματος

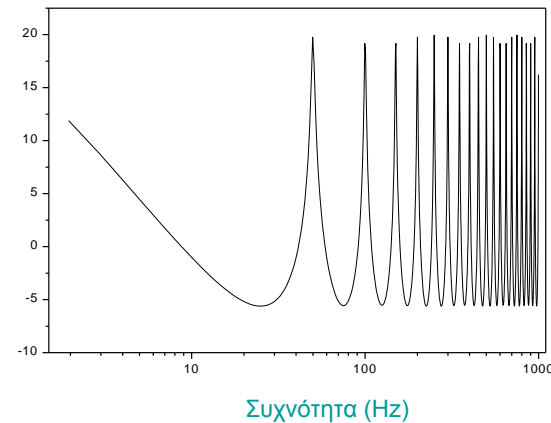
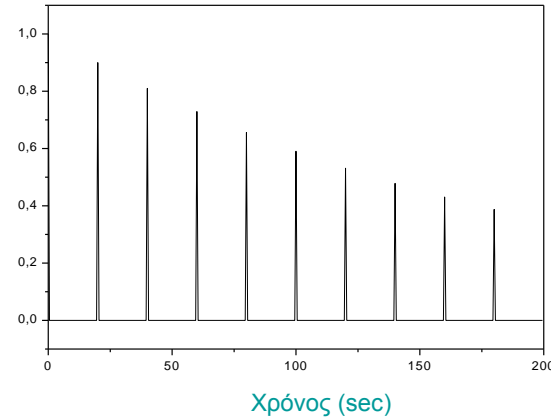
$$h(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{P}{R_n} \delta(t - t_n)$$

$$\frac{P}{R_n} = g^n \quad t_n = \frac{R_n}{c} = nt_0,$$

$$H(\omega) = F \{ h(t) \} = F \left\{ \sum_{n=0}^{\infty} g^n \delta(t - nt_0) \right\}$$

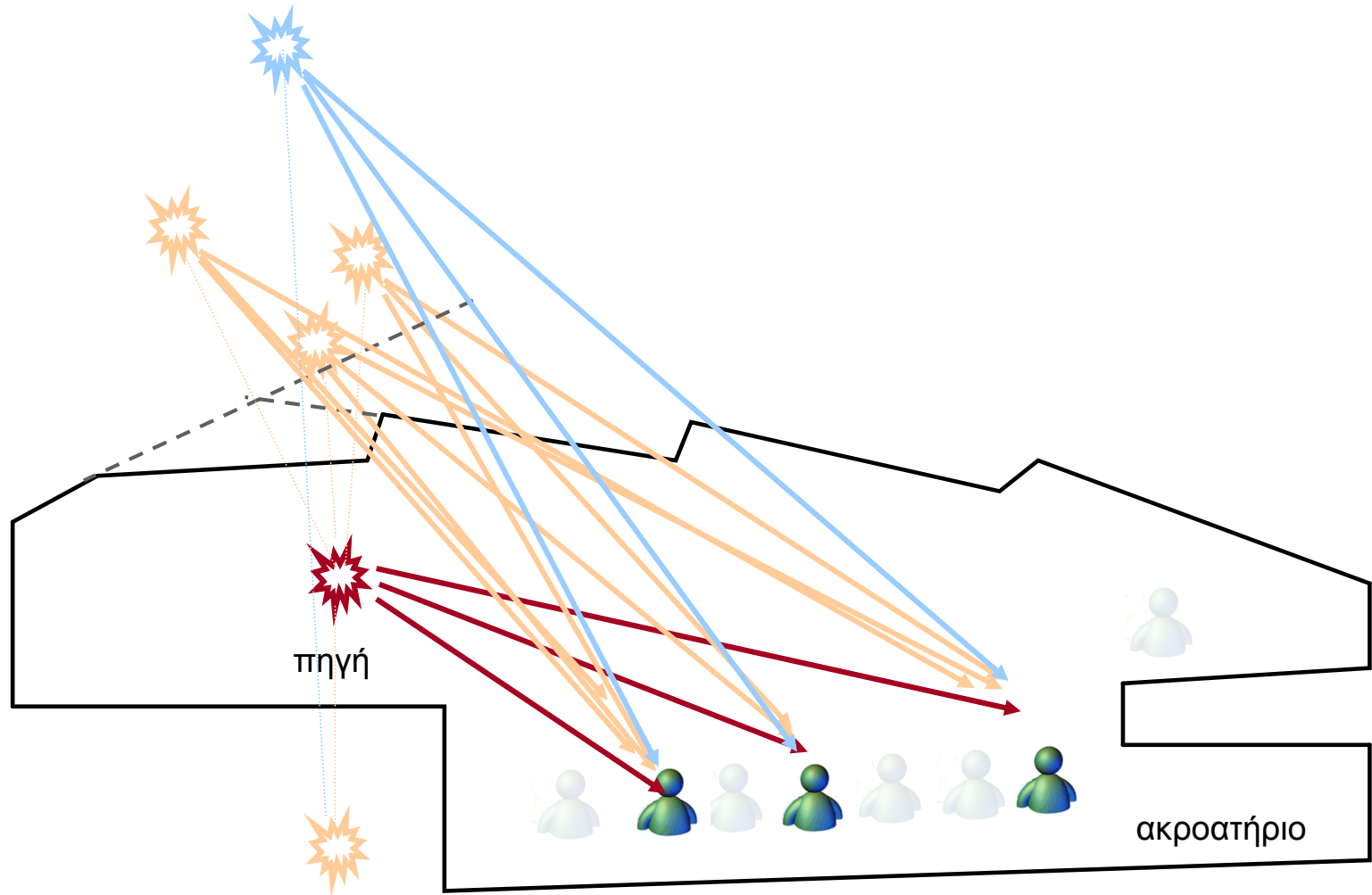
$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} g^n \delta(t - nt_0) e^{-j\omega t} dt = \frac{1 - g^n e^{-j\omega n t_0}}{1 - g e^{-j\omega t_0}} \quad \text{ή}$$

$$H(\omega) = \frac{A}{1 + g^2 - 2g \cos \omega t} + \frac{B}{1 + g^2 - 2g \cos \omega t_0}$$



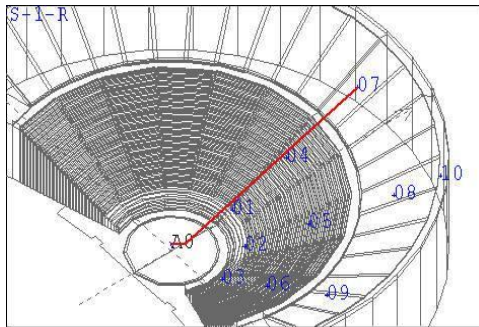
Π
Λ
Α
Τ
Ο
Σ

εξομοίωση για σύνθετους κλειστούς χώρους

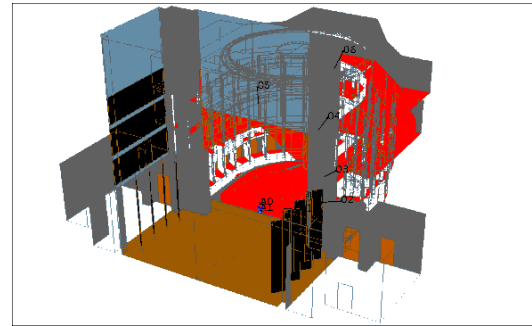


εξομοίωση για σύνθετους κλειστούς χώρους

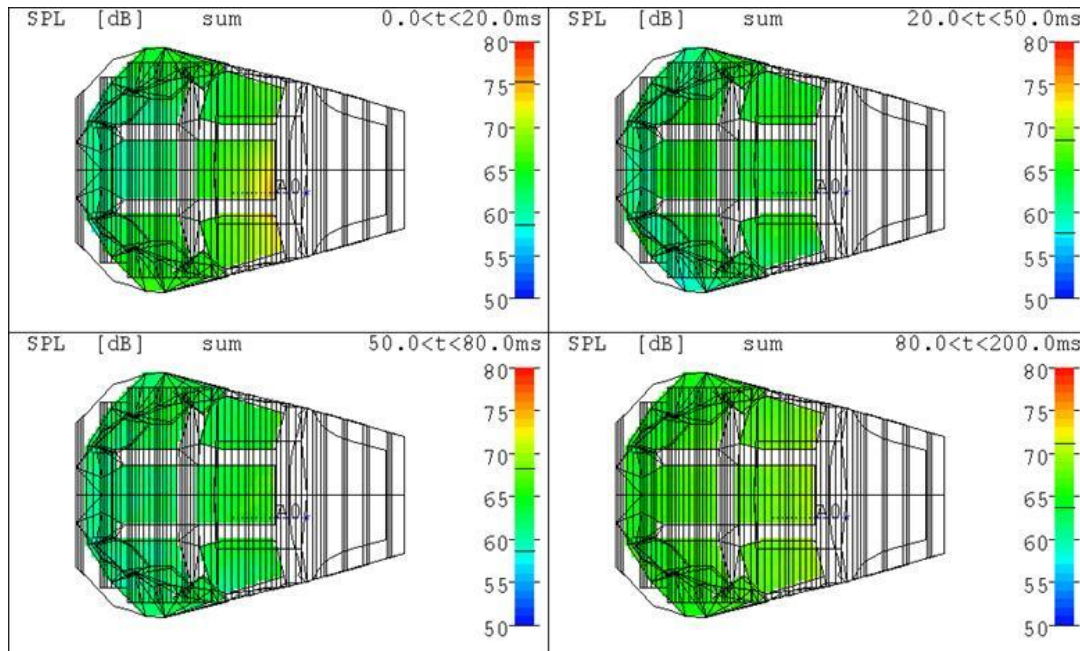
αρχαίο θέατρο Επιδαύρου



θέατρο Απόλλων



Συνεδριακό & Πολιτιστικό Κέντρο ΠΠ



ακουστικές πηγές

ακουστική πίεση, ένταση

(ειδική) ακουστική εμπεδισή Z_{ak} : $Z_{ak} = \frac{p}{u}$
μετρίεται σε Rayl ($\text{Kg/m}^2/\text{sec}^2$)

ακουστική εμπεδισή σε επίπεδα κύματα: $Z_{ak} = \rho c$

ακουστική αντίσταση στον αέρα = $1,21 \text{ kg/m}^3 \times 343 \text{ m/sec} = 415 \text{ Rayls}$

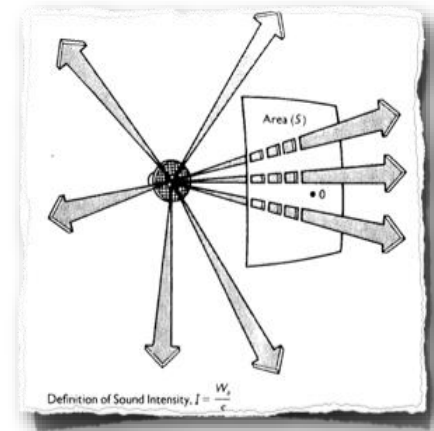
- πίεση p και σωματιδιακή ταχύτητα u είναι σε φάση
- πίεση = δύναμη / επιφάνεια: $p = F / A$
- στιγμιαία (peak) ισχύς W που παράγεται από τη δύναμη: $W = Fu = pAu$
- στιγμιαία ένταση I (W/m^2) = στιγμ. ισχύ / επιφάνεια:

$$I = W / A = \frac{pAu}{A} = p \frac{p}{z} = \frac{p^2}{\rho c}$$

για αρμονική πίεση $p(t) = p_m \sin(\omega t)$: $I = \frac{p^2}{\rho c} = \frac{p_m^2 \sin^2(\omega t)}{\rho c}$

- συνήθως μετράμε μέσες ή rms τιμές πίεσης

- Η ηχητική ένταση είναι μέγεθος **διανυσματικό**
 - απαιτείται η γνώση διεύθυνσης, φοράς και μέτρου
 - δυσκολία στη μέτρησή της

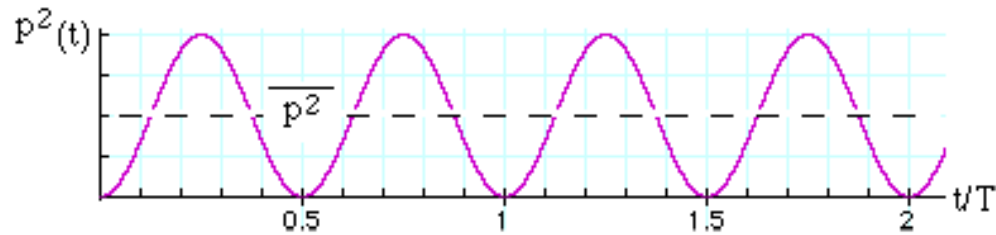


- Εκφράζει τη ροή της ηχητικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας
 - Μονάδα μέτρησης W/m^2
- Σύμφωνα με τον ΕΛΟΤ (κανονισμός 556.1)
 - «Ηχητική ένταση σε ένα σημείο του ηχητικού πεδίου και προς μια καθορισμένη διεύθυνση είναι το πηλίκο της μέσης ηχητικής ισχύος που διαπερνά κάθετα μια στοιχειώδη επιφάνεια διά του εμβαδού της επιφανείας»

ακουστική πίεση, ένταση

για αρμονικά σήματα η μέση τιμή πλάτους
(σε άρτιες περιόδους) είναι $\frac{1}{2}$ της μέγιστης και:

$$I_{mean} = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c}$$

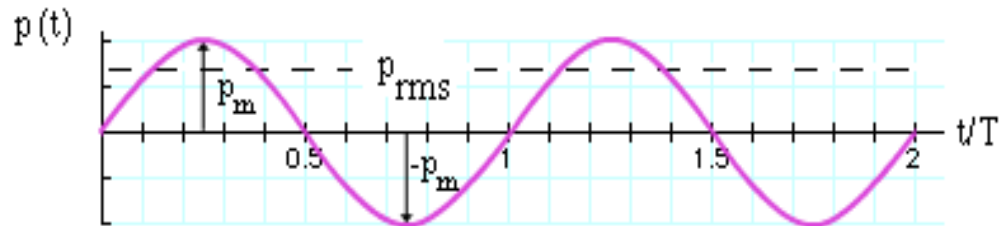


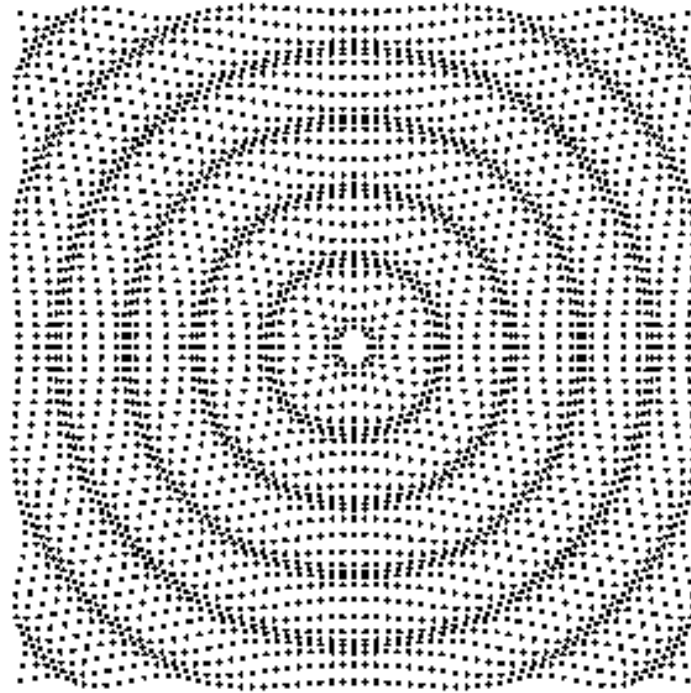
συνήθως χρησιμοποιούμε την rms τιμή, που για αρμονικά σήματα είναι:

$$p_{rms} = \frac{p_m}{\sqrt{2}}$$

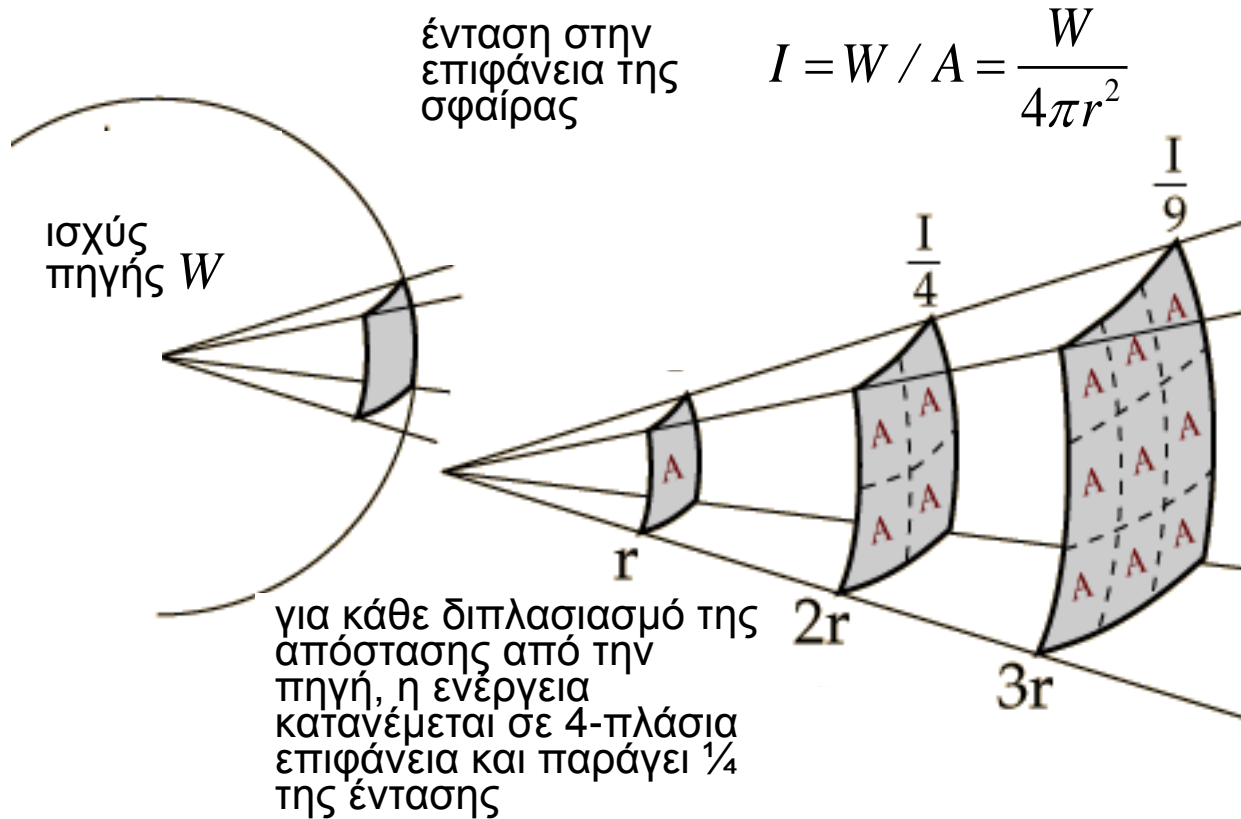
και:

$$I_{rms} = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$





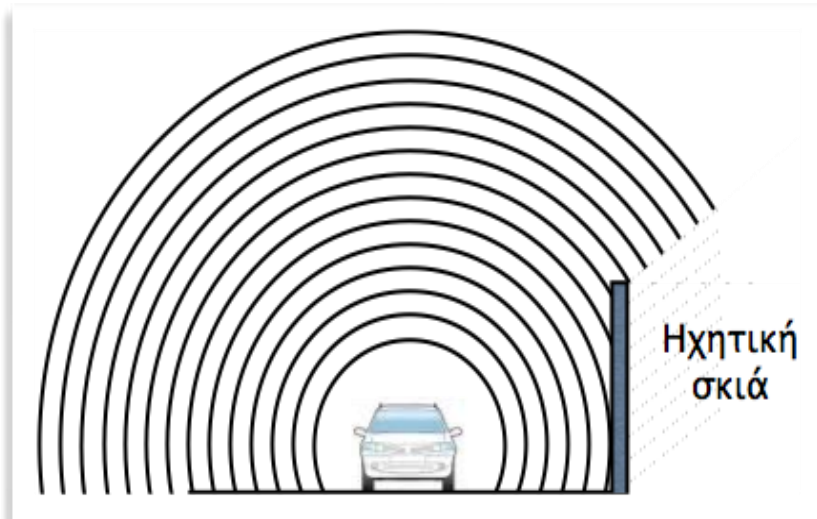
- Ομοιογενής (ισότροπη) εκπομπή προς όλες τις διευθύνσεις



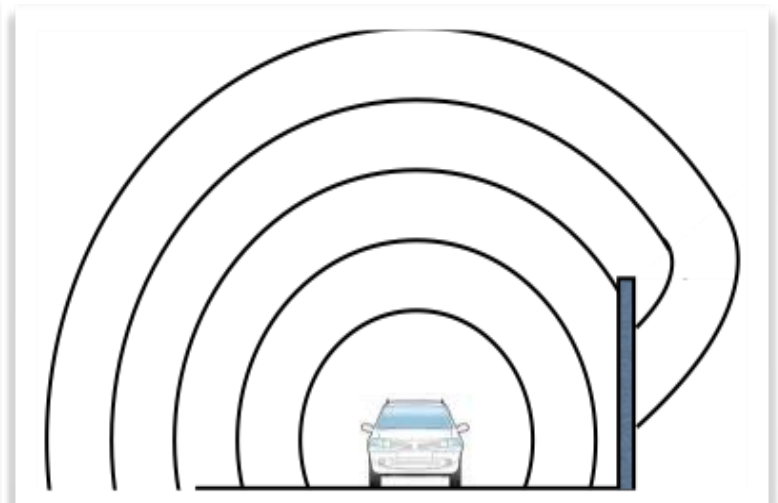
$$I = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p^2}{\rho c}$$

κυματικά φαινόμενα διάδοσης

περίθλαση (diffraction)

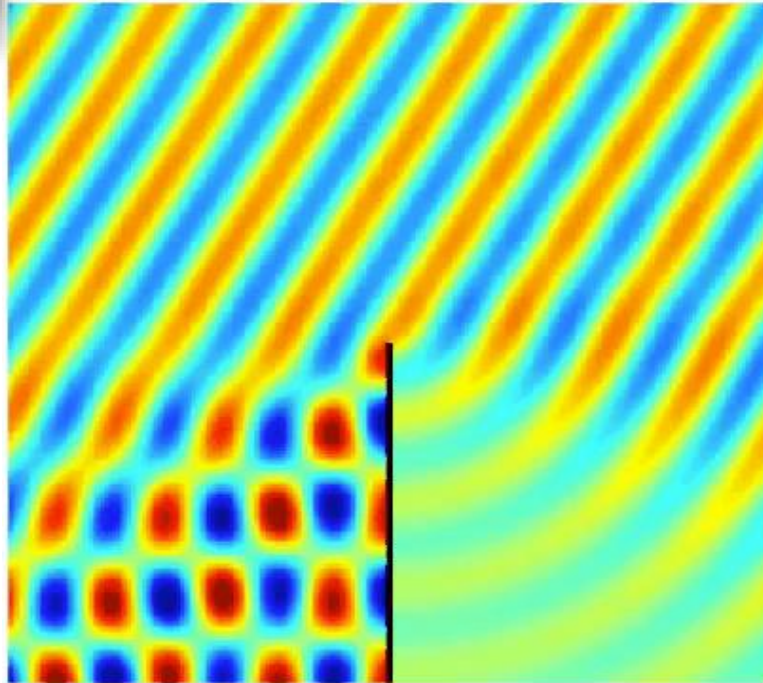


Μικρό μήκος κύματος



Μεγάλο μήκος κύματος

περίθλαση (diffraction)



πηγή: ISVR,
Southampton
University

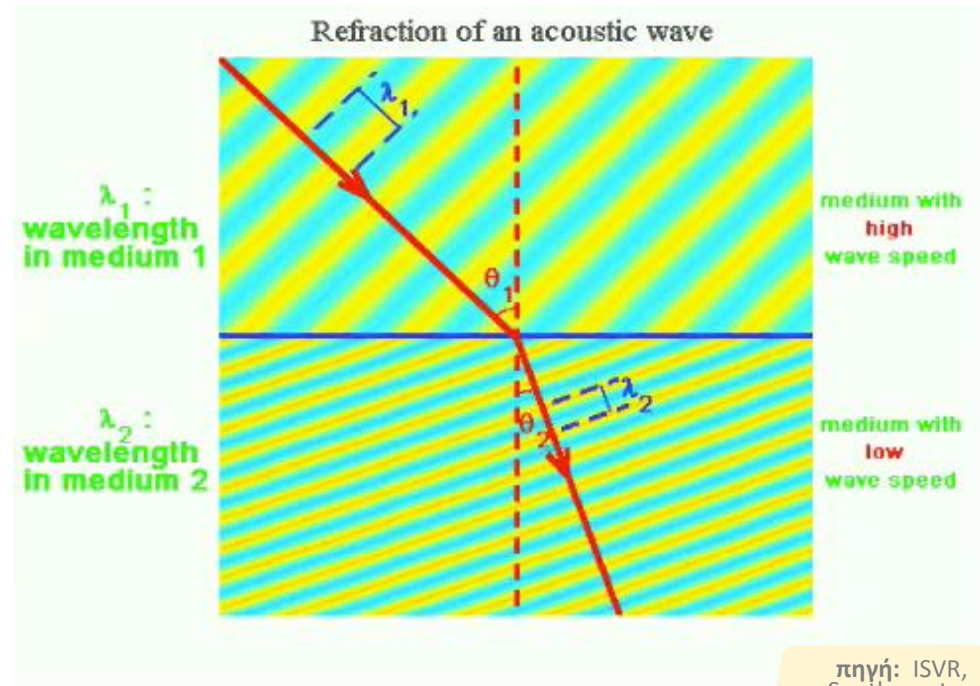
διάθλαση (refraction)

- Κατά την μετάβαση μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης το ηχητικό κύμα αλλάζει διεύθυνση
- Υπολογισμός της νέας πορείας βάσει του νόμου του Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{c_1} = \frac{\sin \theta_2}{c_2}$$

c_1 , c_2 οι ταχύτητες διάδοσης στα δύο υλικά

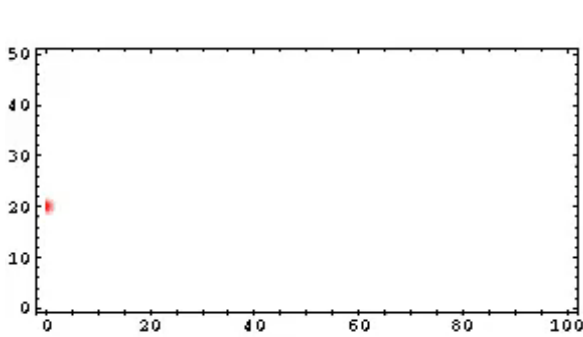
Διάθλαση: αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του ηχητικού κύματος, όταν αυτό περνά από ένα υλικό σε ένα άλλο



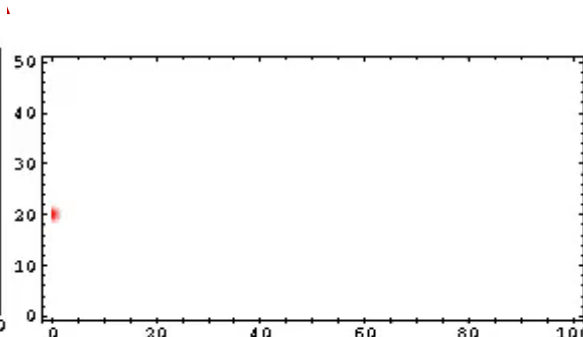
πηγή: ISVR,
Southampton
University

Διάδοση παλμικού σφαιρικού κύματος

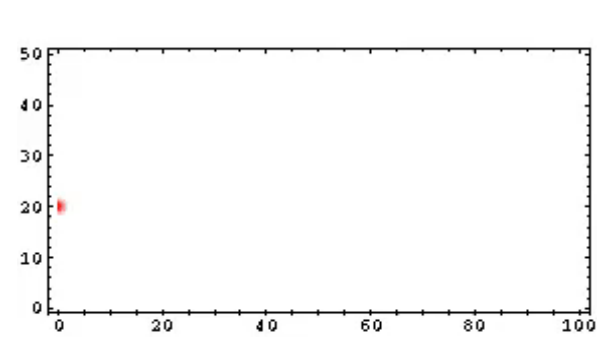
$$c=343\text{m/sec}$$



$$c=(1-0.05*\gamma)*343\text{m/sec}$$



$$c=(1+0.05*\gamma)*343\text{m/sec}$$



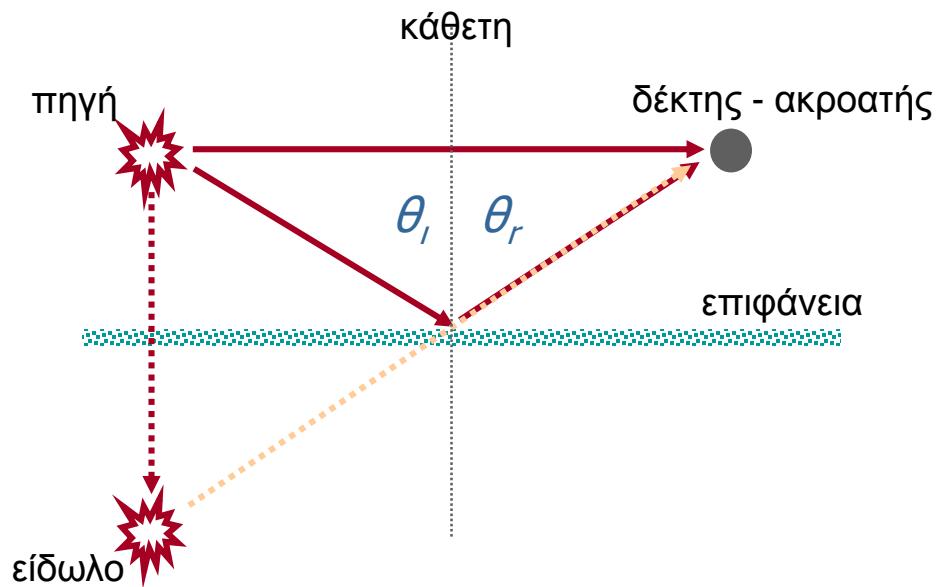
↑
 γ

Κατά τη διάρκεια της ημέρας,
θερμοκρασία μειώνεται με το
ύψος

Κατά τη διάρκεια της νύχτας,
θερμοκρασία αυξάνει με το
ύψος

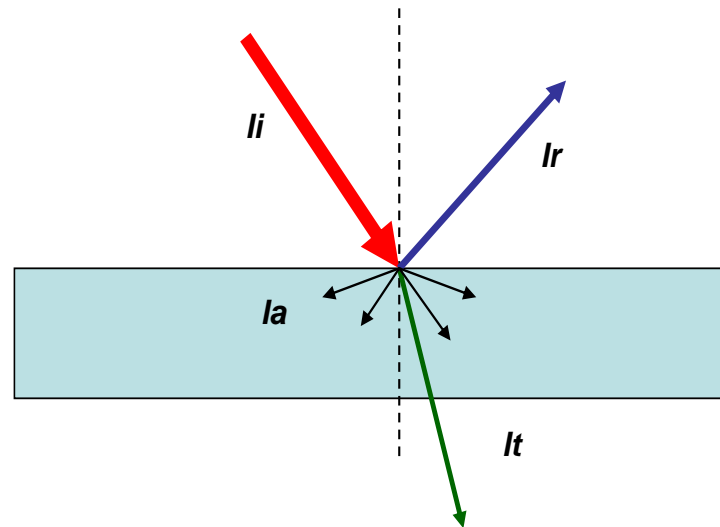
ανάκλαση (reflection)

- σε σχετικά ψηλές συχνότητες, ο ήχος προσεγγίζεται σαν ακτίνα φωτός
- θεωρούμε ιδανική ανάκλαση (χωρίς απώλεια ενέργειας)
- νόμος ανάκλασης: γωνία $\theta_i = \theta_r$



ανάκλαση (reflection)

- στην πράξη, υπάρχει απώλεια ισχύος και έντασης ανακλώμενου ήχου, που δίνεται από το συντελεστή απορροφησης
- νόμος ανάκλασης: γωνία $\theta_i = \theta_r$



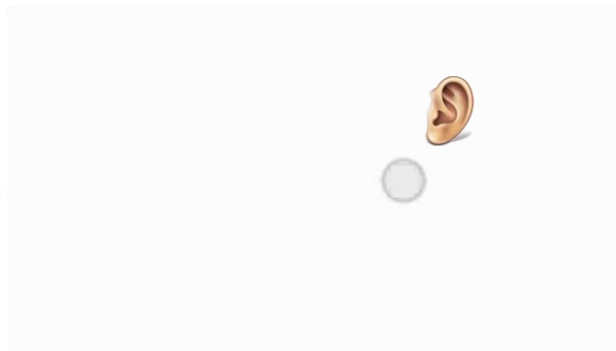
$$a_r = \frac{w_r}{w_i} = \frac{I_r}{I_i}$$

φαινόμενο Doppler

- Όσο πηγή/δέκτης πλησιάζουν, η διαδοχή πυκνωμάτων και αραιωμάτων του μέσου γίνεται πιο γρήγορη και το μήκος κύματος μικραίνει
- Το αντίθετο συμβαίνει όταν η απόσταση μεγαλώνει
- Σχέση μεταξύ πραγματικής (f_0) και παρατηρούμενης (f) συχνότητας

$$f = \left(\frac{c \pm u_r}{c \pm u_s} \right) f_0$$

- u_r η ταχύτητα του δέκτη (πρόσημο «-» εάν ο παρατηρητής απομακρύνεται από την πηγή)
- u_s η ταχύτητα της πηγής (πρόσημο «-» εάν η πηγή κινείται προς τον παρατηρητή)



Αύξηση απόστασης



Μείωση απόστασης

- Μονάδα μέτρησης ταχύτητας αεροσκαφών
 - 1 Mach
- Όταν η ταχύτητα υπερβεί την ταχύτητα του ήχου παράγεται υψηλός κρουστικός θόρυβος
 - Sonic boom
 - Περίπου 130dB
 - Διάρκεια θορύβου περίπου 300ms



<1Mach

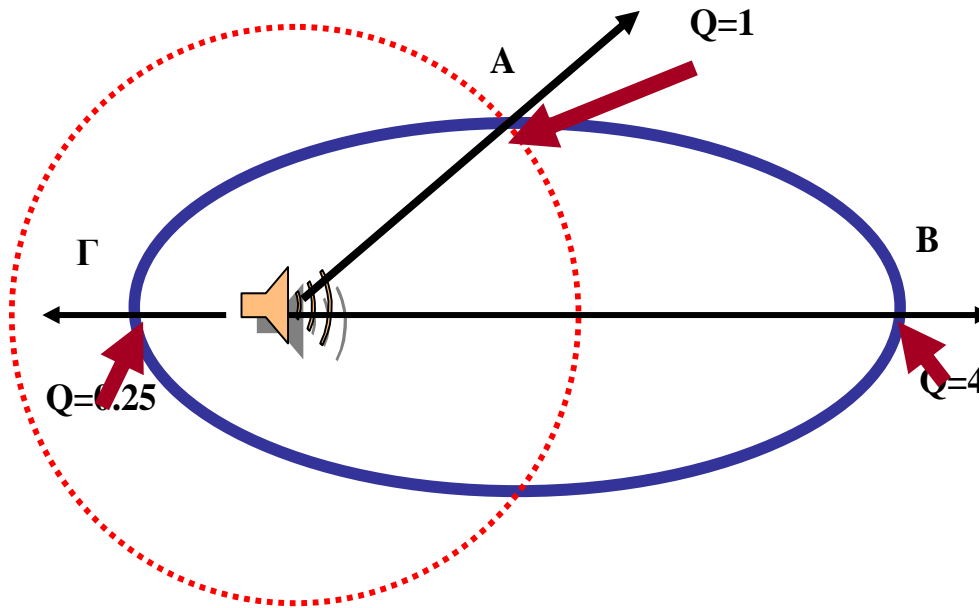
>1Mach

κατευθυντικότητα πηγών

κατευθυντική ακουστική εκπομπή

Παράγοντας κατευθυντικότητας Q

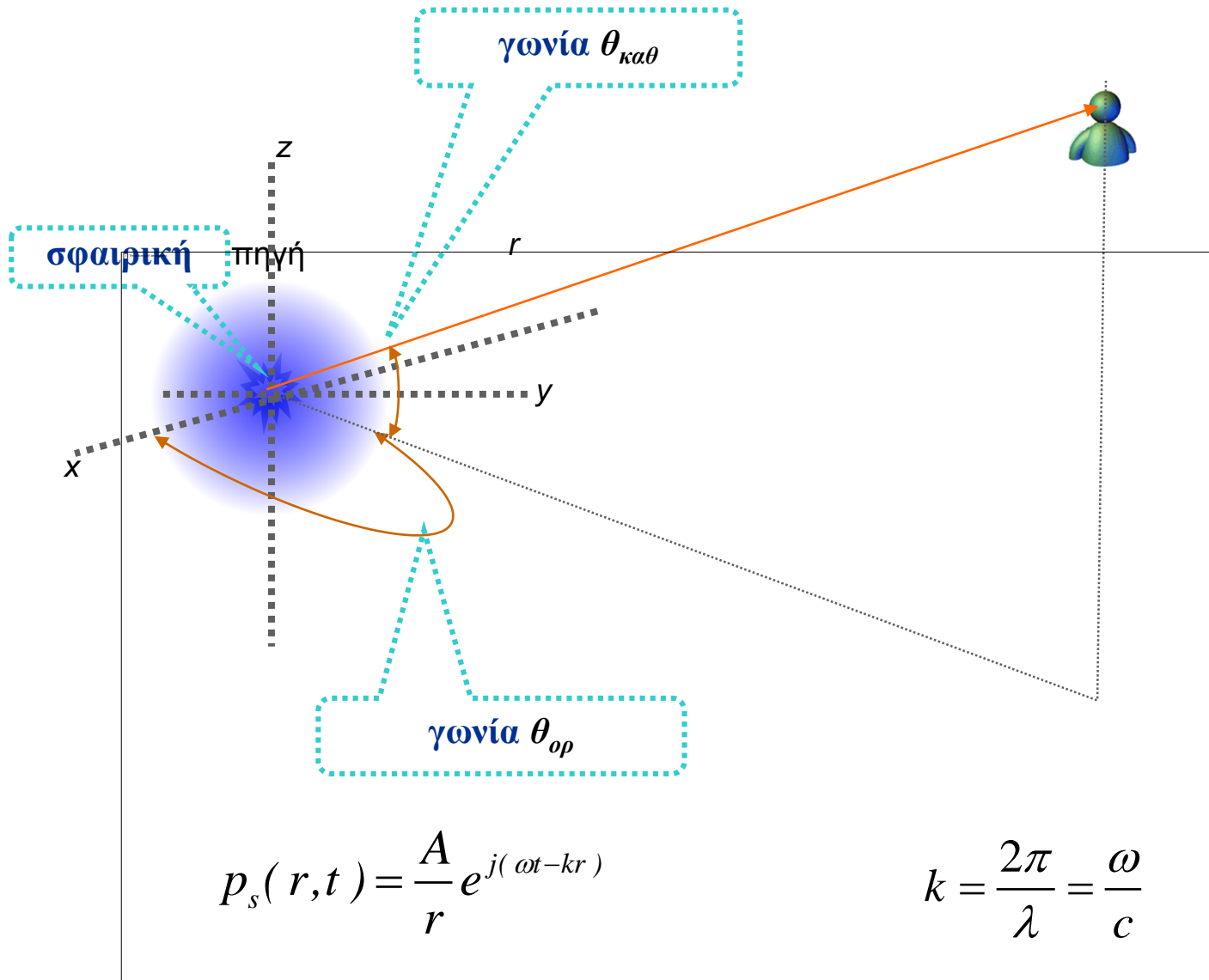
$$Q_{\theta,\varphi} = \frac{I_{\theta,\varphi}}{I_0}$$



Δείκτης κατευθυντικότητας DI

$$DI = 10 \log Q \text{ (dB)}$$

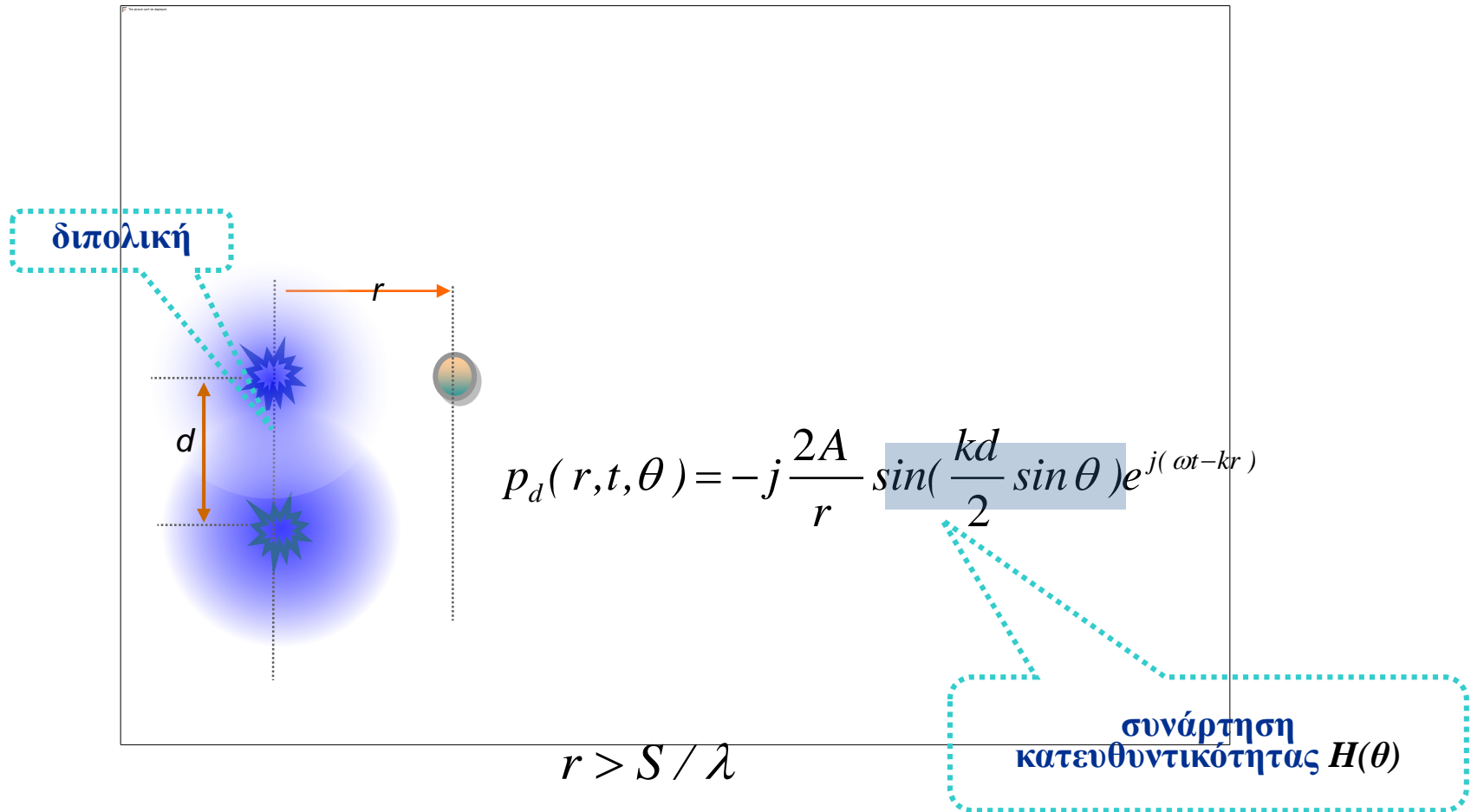
κατευθυντικότητα πηγών (σφαιρική πηγή)

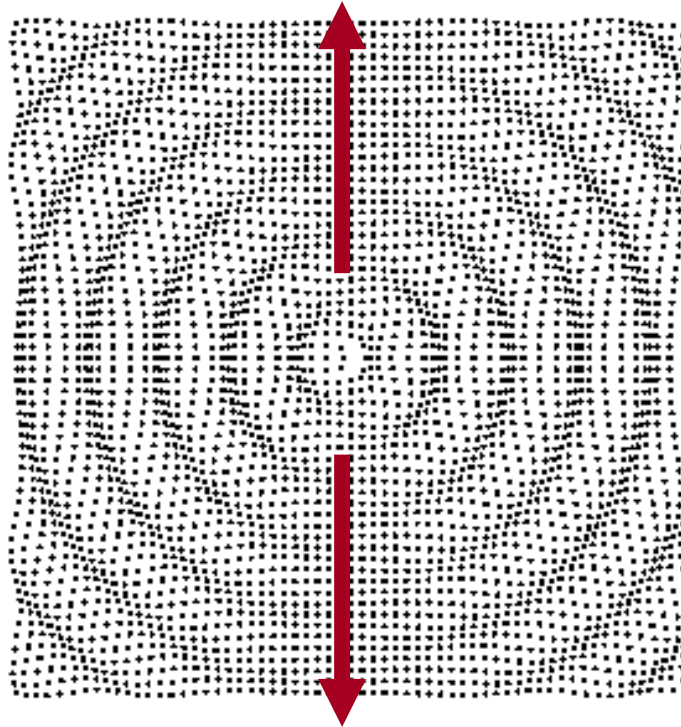


$$p_s(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}$$

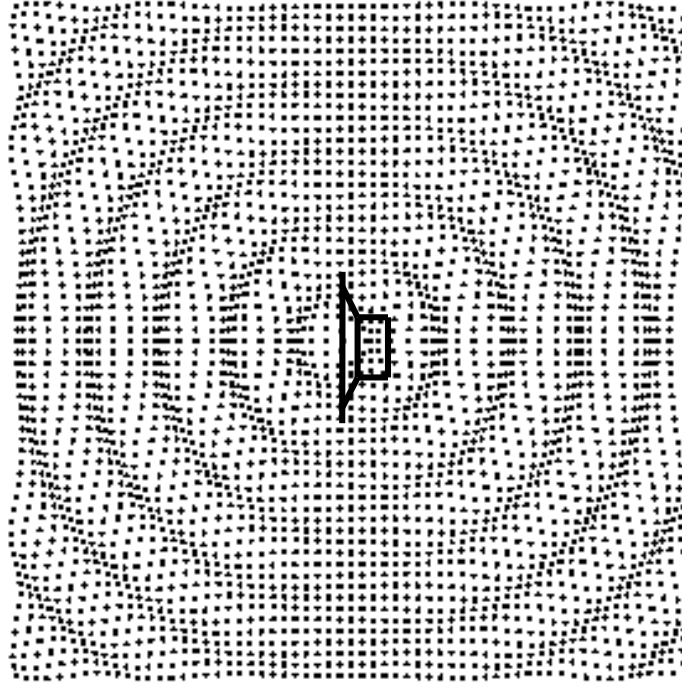
$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

κατευθυντικότητα πηγών (ακουστικό δίπολο)



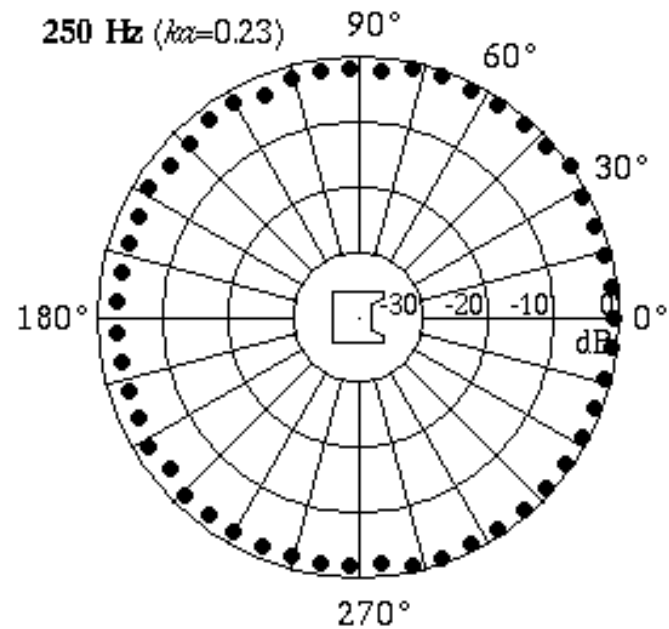
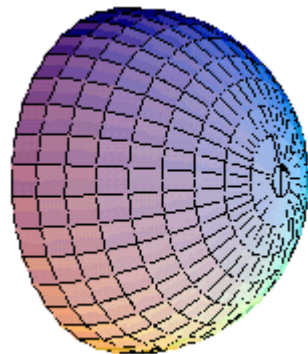
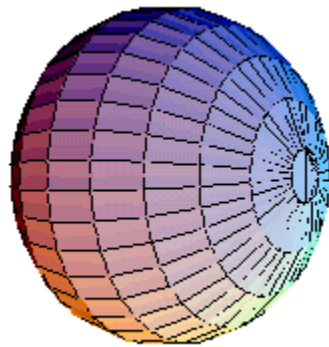


- Σε 2 διευθύνσεις δεν παράγεται εκπομπή

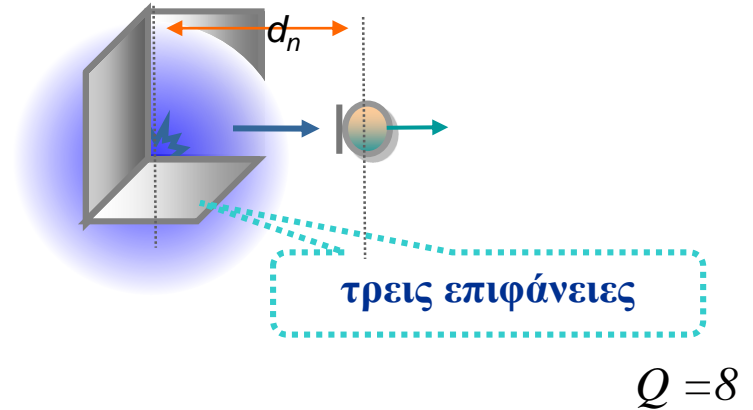
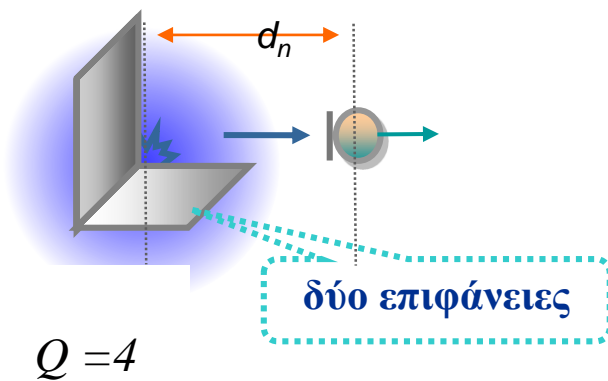
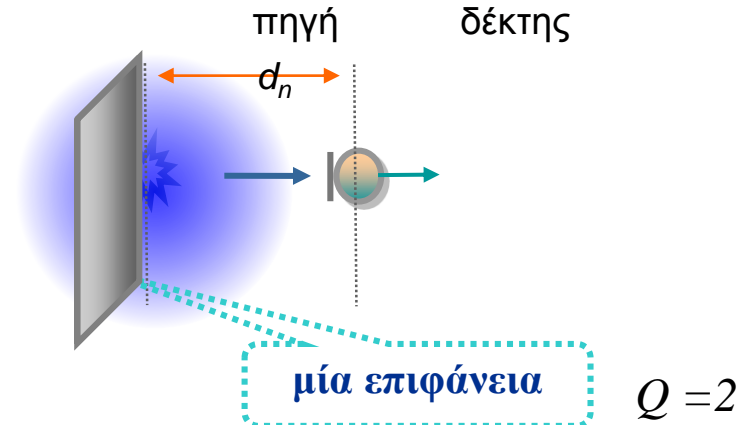
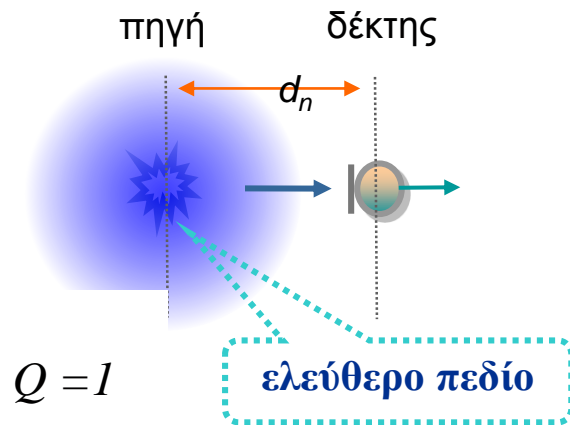


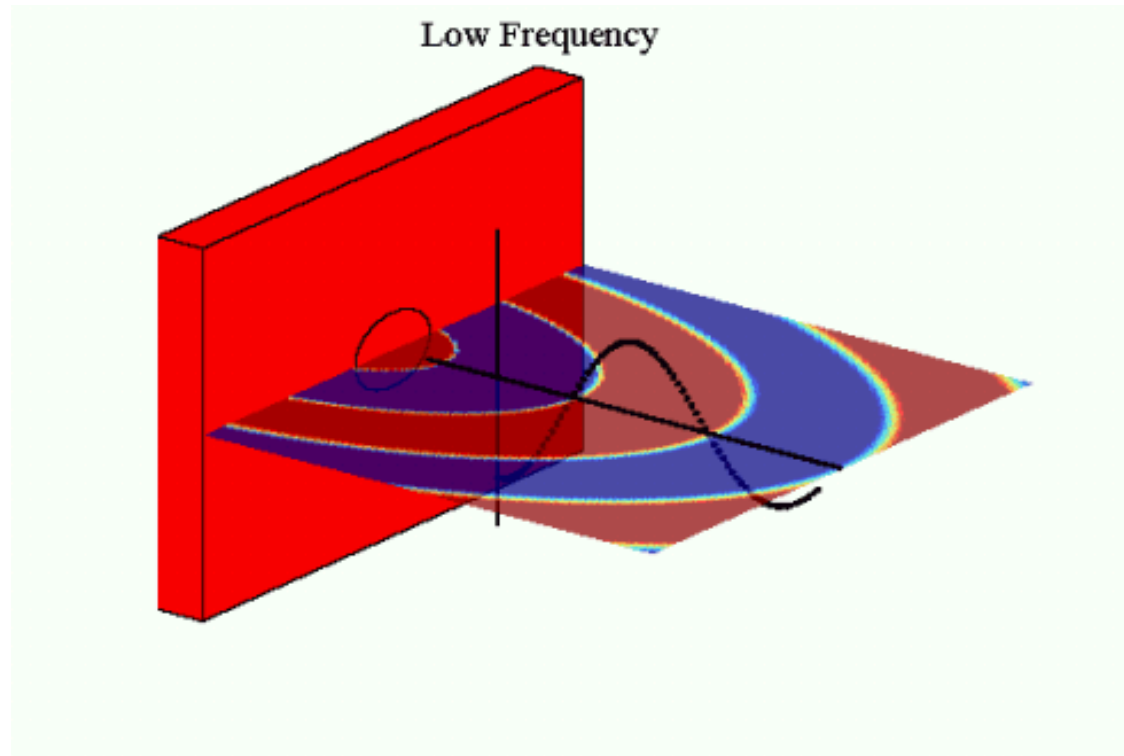
- Ένα μεγάφωνο (χωρίς κουτί – ηχείο) λειτουργεί σα δίπολο

$$\tilde{p}(r, \theta, t) = \underbrace{j\rho c \frac{Qk}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)}}_{\text{baffled simple source}} \underbrace{\left[\frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right]}_{\text{directivity}}$$

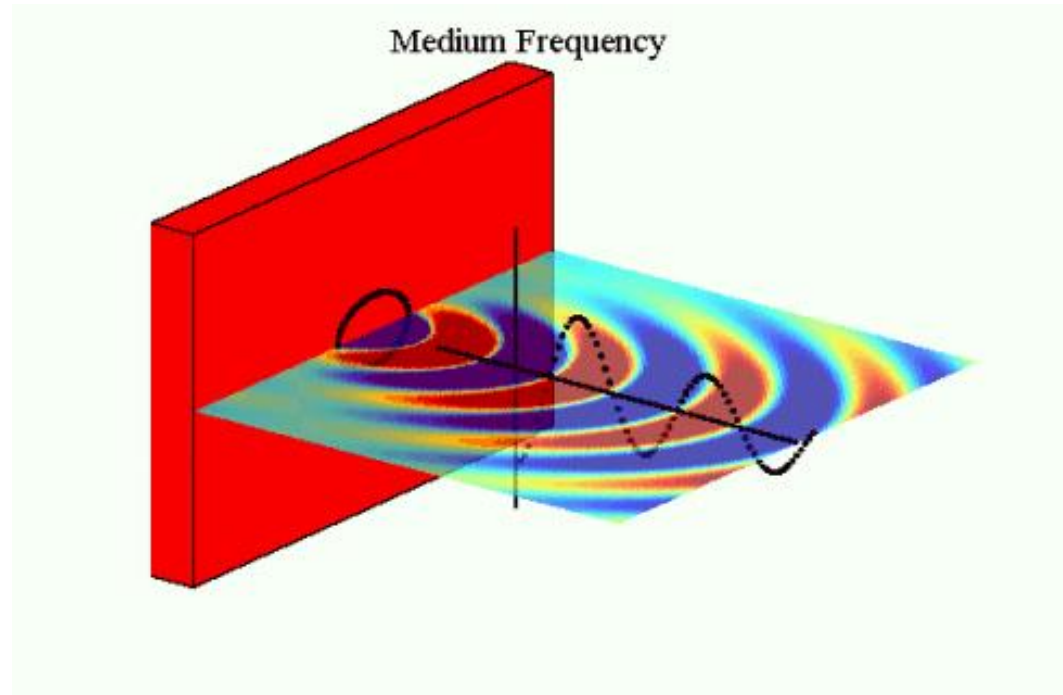


κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών

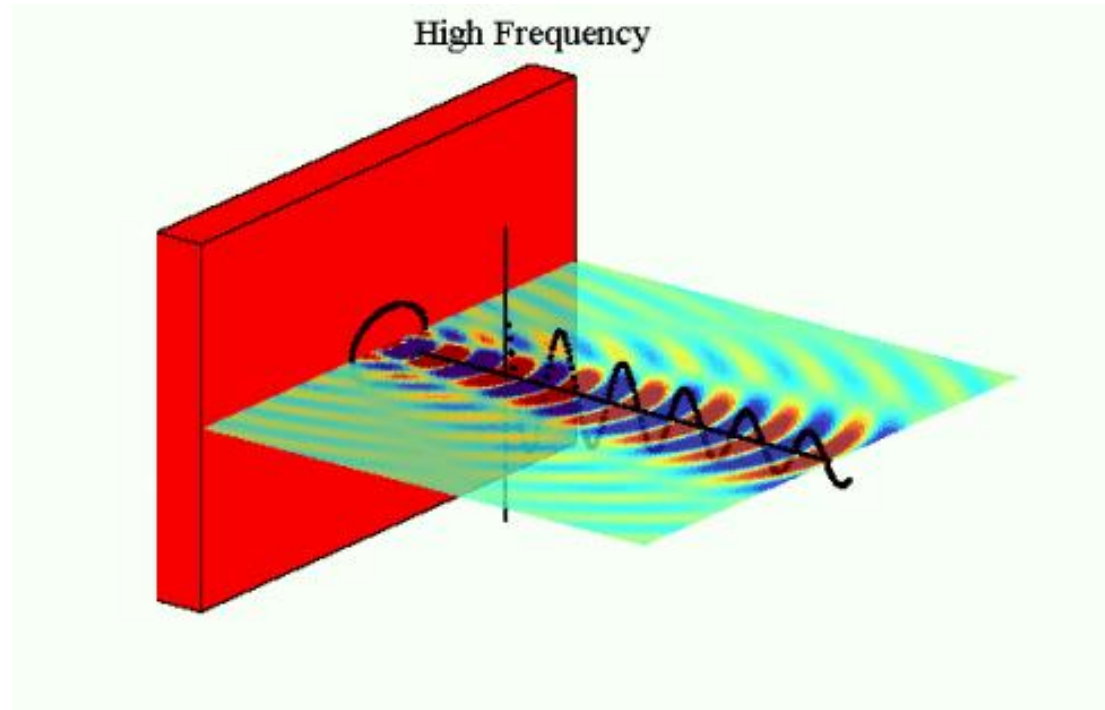




- Οι χαμηλές συχνότητες διαδίδονται προς όλες τις διευθύνσεις

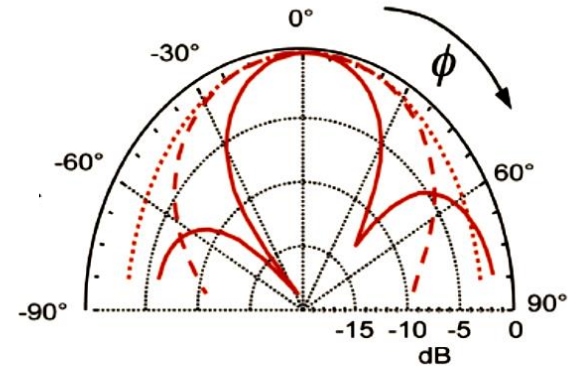
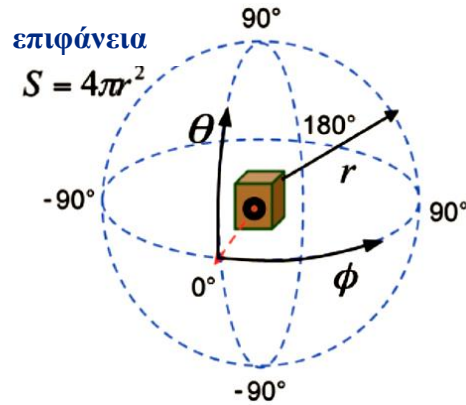


- Οι μεσαίες συχνότητες διαδίδονται σε ένα κώνο



- Οι ψηλές συχνότητες διαδίδονται σε μία πολύ στενή δέσμη

κατευθυντικότητα πηγών (ηχείων)



πολικό διάγραμμα
 $b(\theta, \phi) = 20 \log H(\theta, \phi) \text{ dB}$

πίεση στο μακρινό πεδίο

$$p(r, \theta, \phi)$$

πίεση στον άξονα

$$p_{ax}(r) = p(r, \theta = 0, \phi = 0)$$

στάθμη πίεσης στον άξονα

$$Lp_{ax}(r) = 20 \log \left(\frac{p_{ax}(r)}{P_o} \right) \text{ dB}$$

$$P_o = 20 \text{ } \mu\text{Pa}$$

Λόγος Κατευθυντικότητας

$$H(\theta, \phi) = \frac{p(r, \theta, \phi)}{p_{ax}(r)}$$

Κατευθυντικότητα

$$Q = \frac{p_{ax}^2(r)}{p_s^2(r)} = \frac{S}{\int_s H(\theta, \phi)^2 dS}$$

ή D

Δείκτης Κατευθυντικότητας
(Directivity Index)

$$DI = 10 \log (Q) \text{ dB}$$

$$DI \approx Lp_{ax}(r = 0.4m) - L_{\Pi}$$

εκπομπή σε ημισφαίριο (με μπάφλα)

ακουστική ισχύς

$$\begin{aligned} \Pi &= \frac{1}{\rho_0 c^2_s} \int p(r, \theta, \phi)^2 dS \\ &= \frac{p_{ax}^2(r)}{\rho_0 c} \int_s H(\theta, \phi)^2 dS \end{aligned}$$

μέση τιμή πίεσης

$$p_s(r) = \sqrt{\frac{\Pi \rho_0 c}{S}}$$

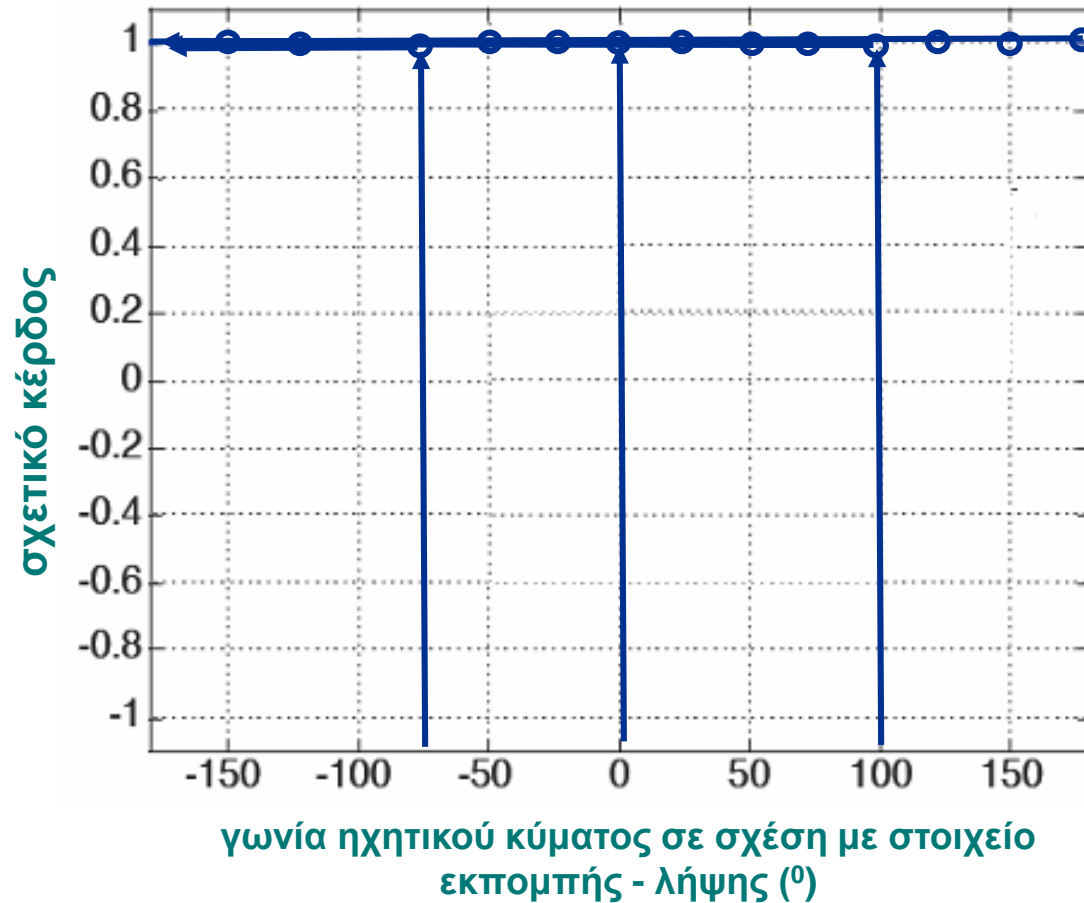
στάθμη ακουστικής ισχύος

$$L_{\Pi} = 10 \log_{10} \left(\frac{\Pi}{P_o} \right) \text{ dB}$$

$$P_o = 10^{-12} \text{ W}$$

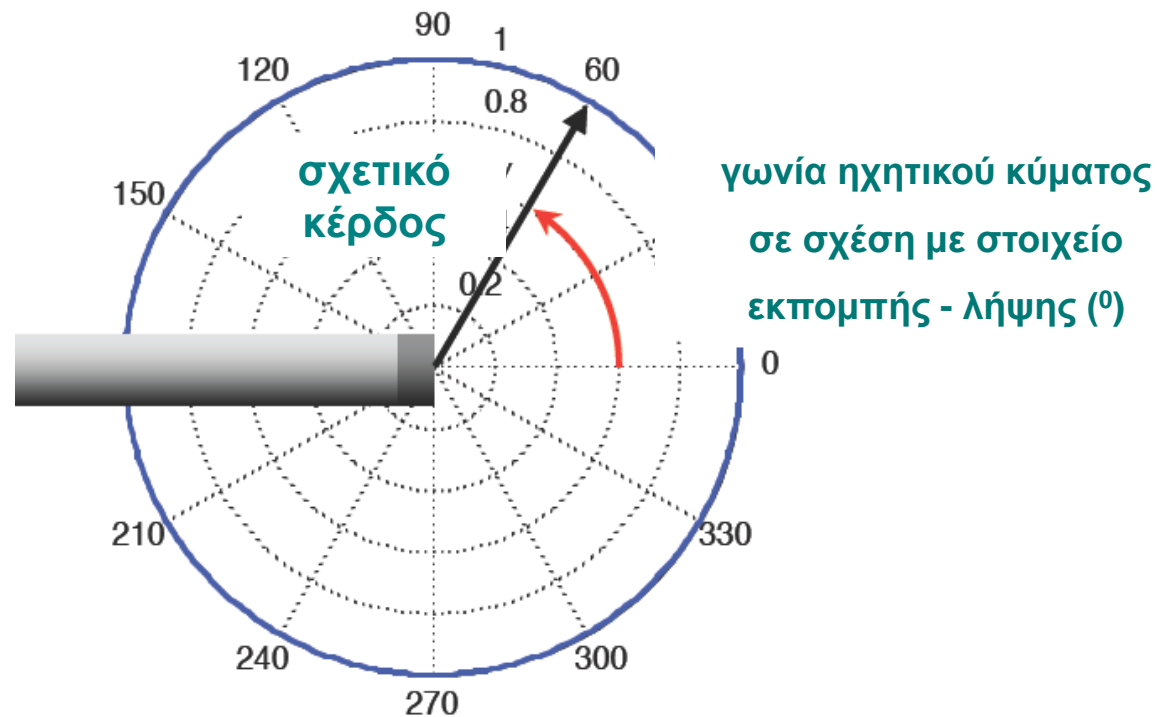
κατευθυντικότητα πηγών - δεκτών

- Μονοπολική ηχητική πηγή - παντοκατευθυντικός δέκτης
Καρτεσιανές συντεταγμένες
ευαισθησία, κατευθυντικότητα, απόκριση



κατευθυντικότητα πηγών - δεκτών

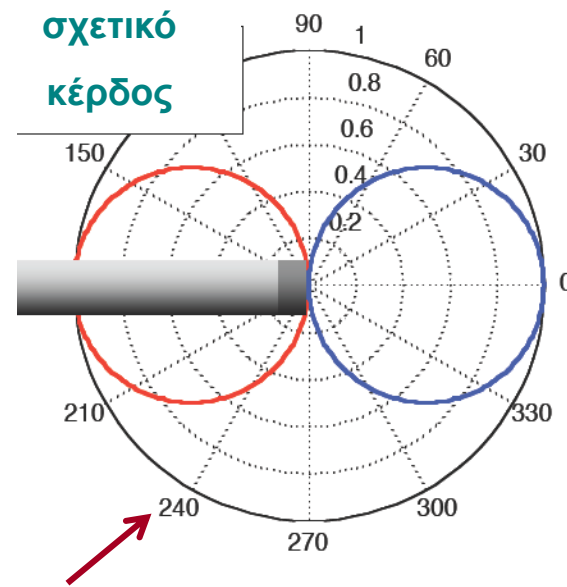
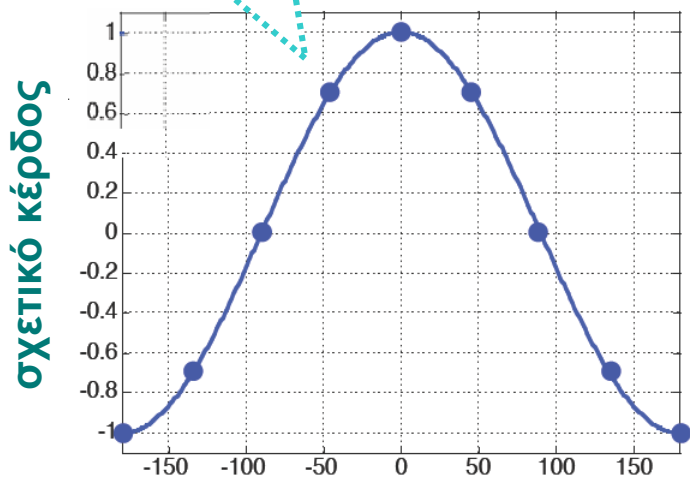
- Μονοπολική ηχητική πηγή - παντοκατευθυντικός δέκτης
Πολικές συντεταγμένες
ευαισθησία, κατευθυντικότητα, απόκριση



κατευθυντικότητα πηγών - δεκτών

- Διπολική ηχητική πηγή - δέκτης
ευαισθησία, κατευθυντικότητα, απόκριση

$$S \text{ ή } Q = \cos(\text{γωνίας})$$



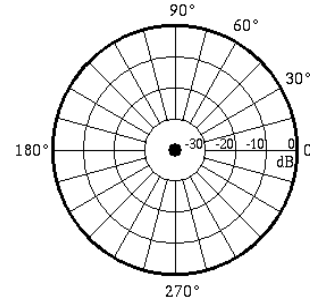
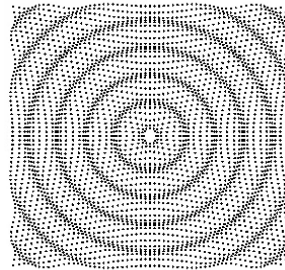
$$Q_{\theta,\phi} = \frac{I_{\theta,\phi}}{I_0}$$

γωνία ηχητικού κύματος
σε σχέση με στοιχείο
εκπομπής - λήψης (°)

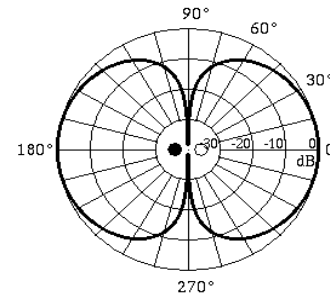
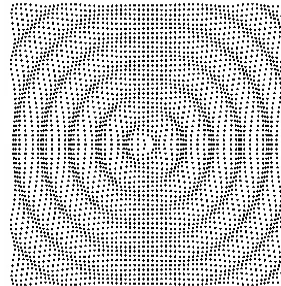
$$DI = 10 \log Q$$

κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών

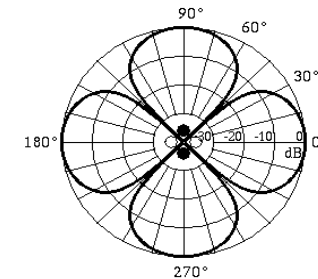
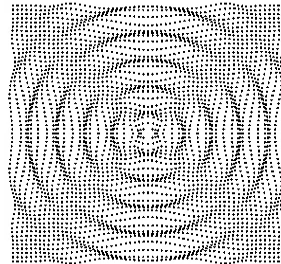
- Μονοπολική ηχητική πηγή



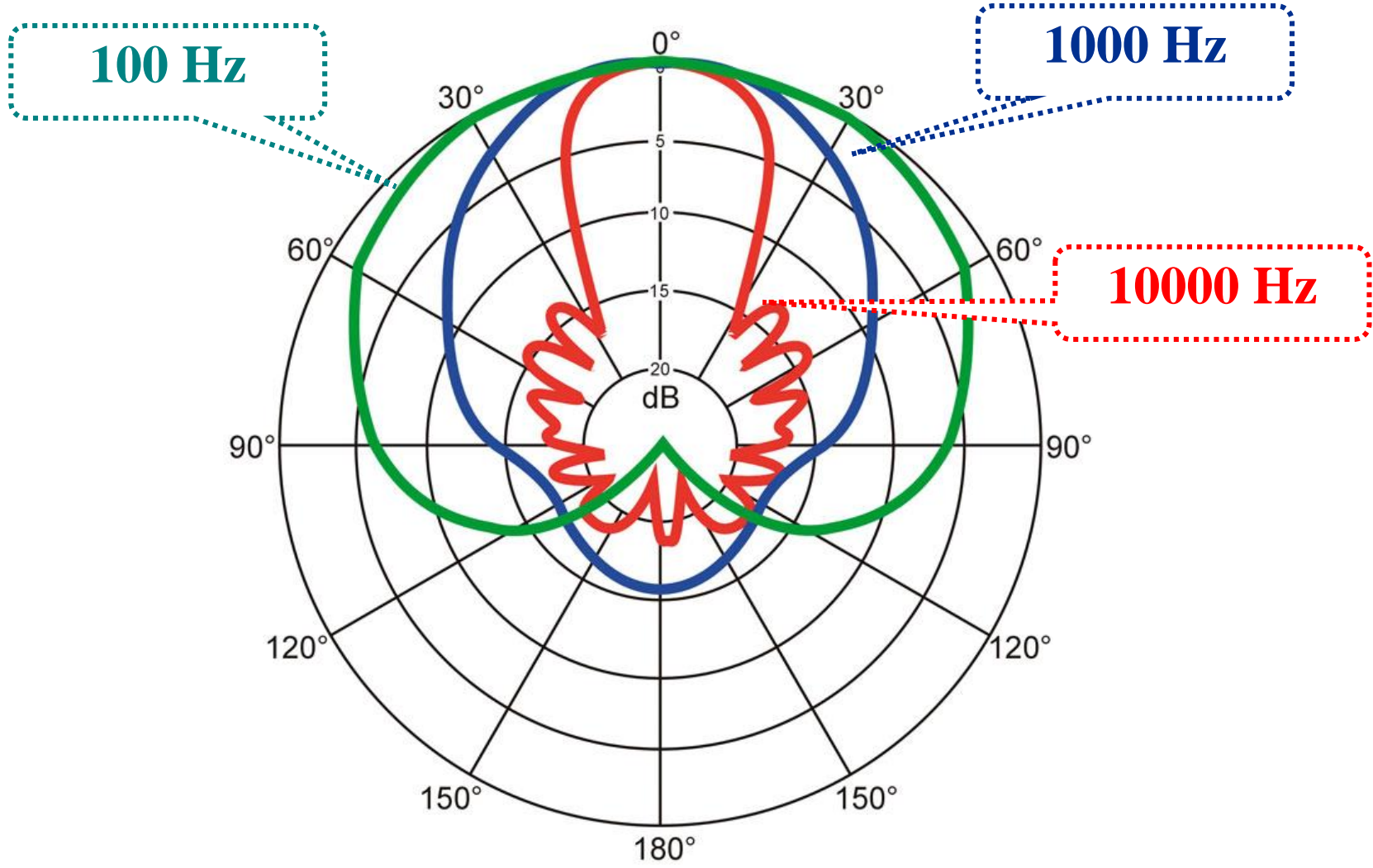
- Διπολική ηχητική πηγή



- Τετραπολική ηχητική πηγή

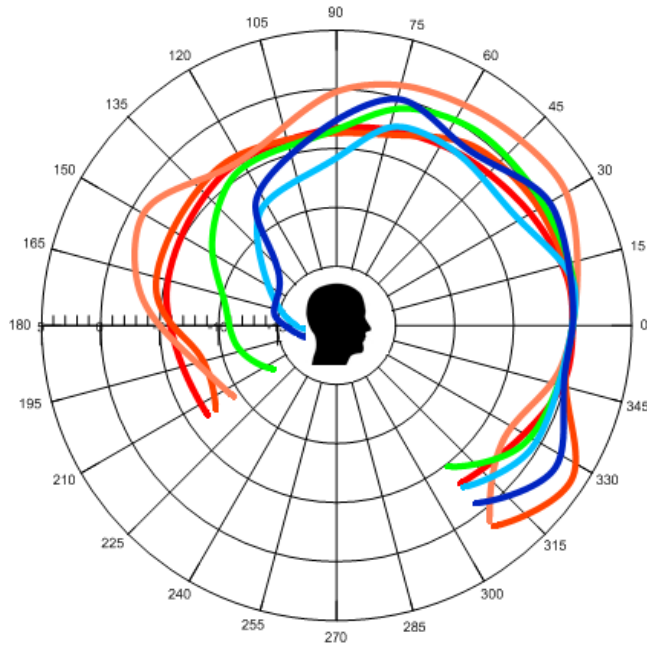


κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών

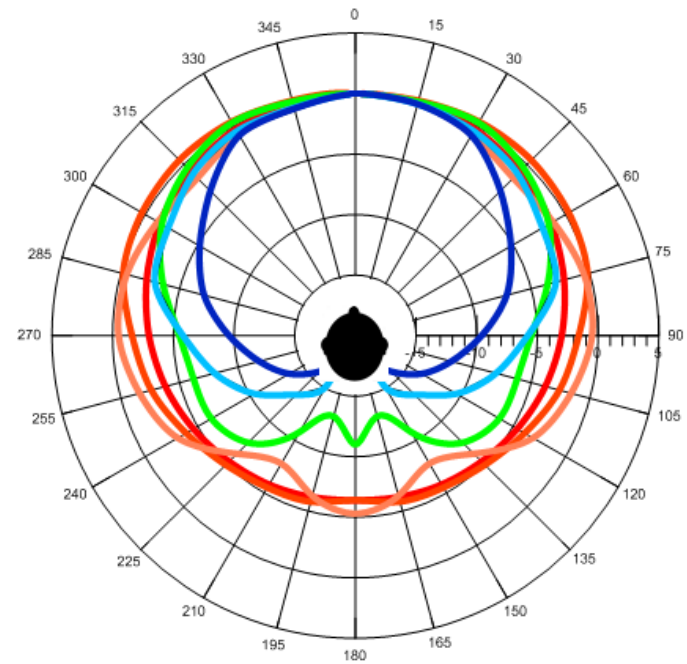


κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών

κατευθυντικότητα,
κάθετο επίπεδο



κατευθυντικότητα,
οριζόντιο επίπεδο

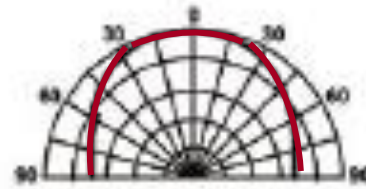


κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών

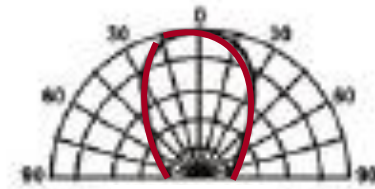
πολικά διαγράμματα



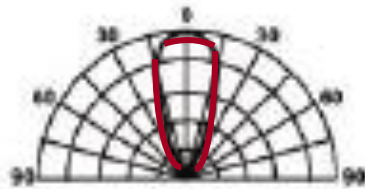
500



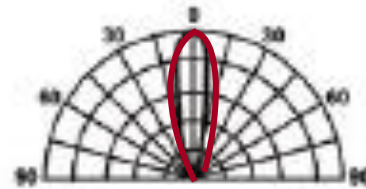
1000



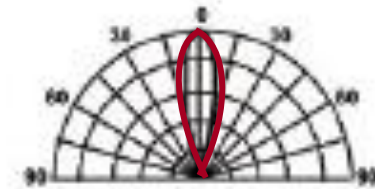
2000



4000



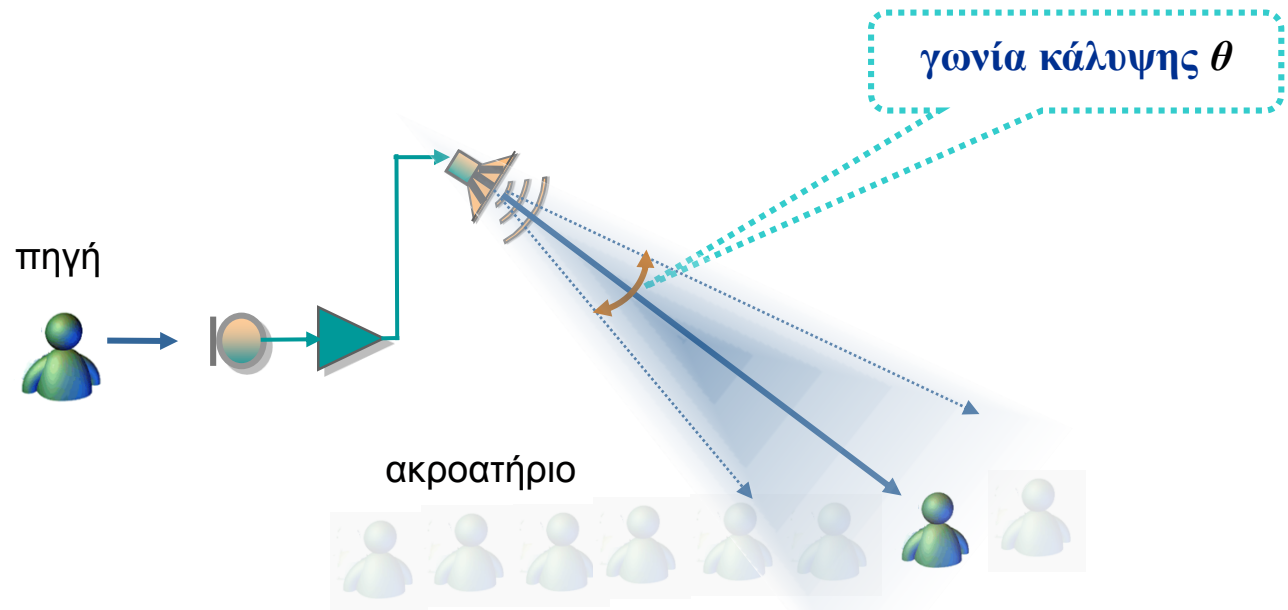
8000



16000

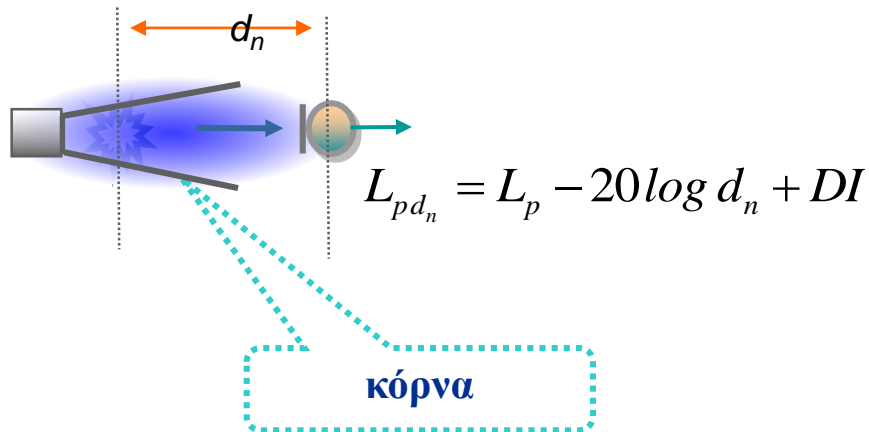
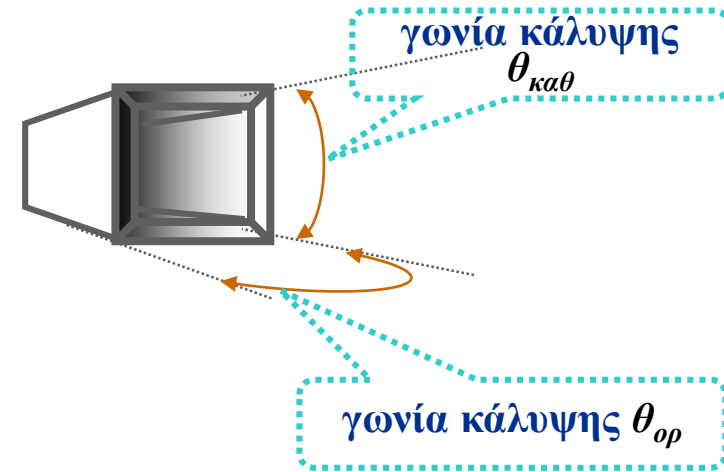
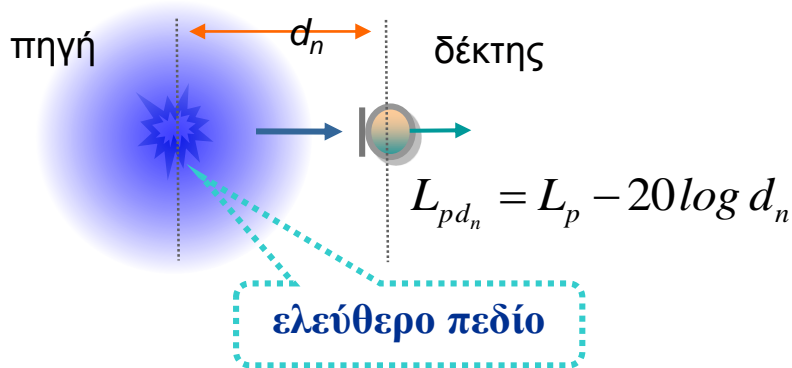
συχνότητα (Hz)

κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών



κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών

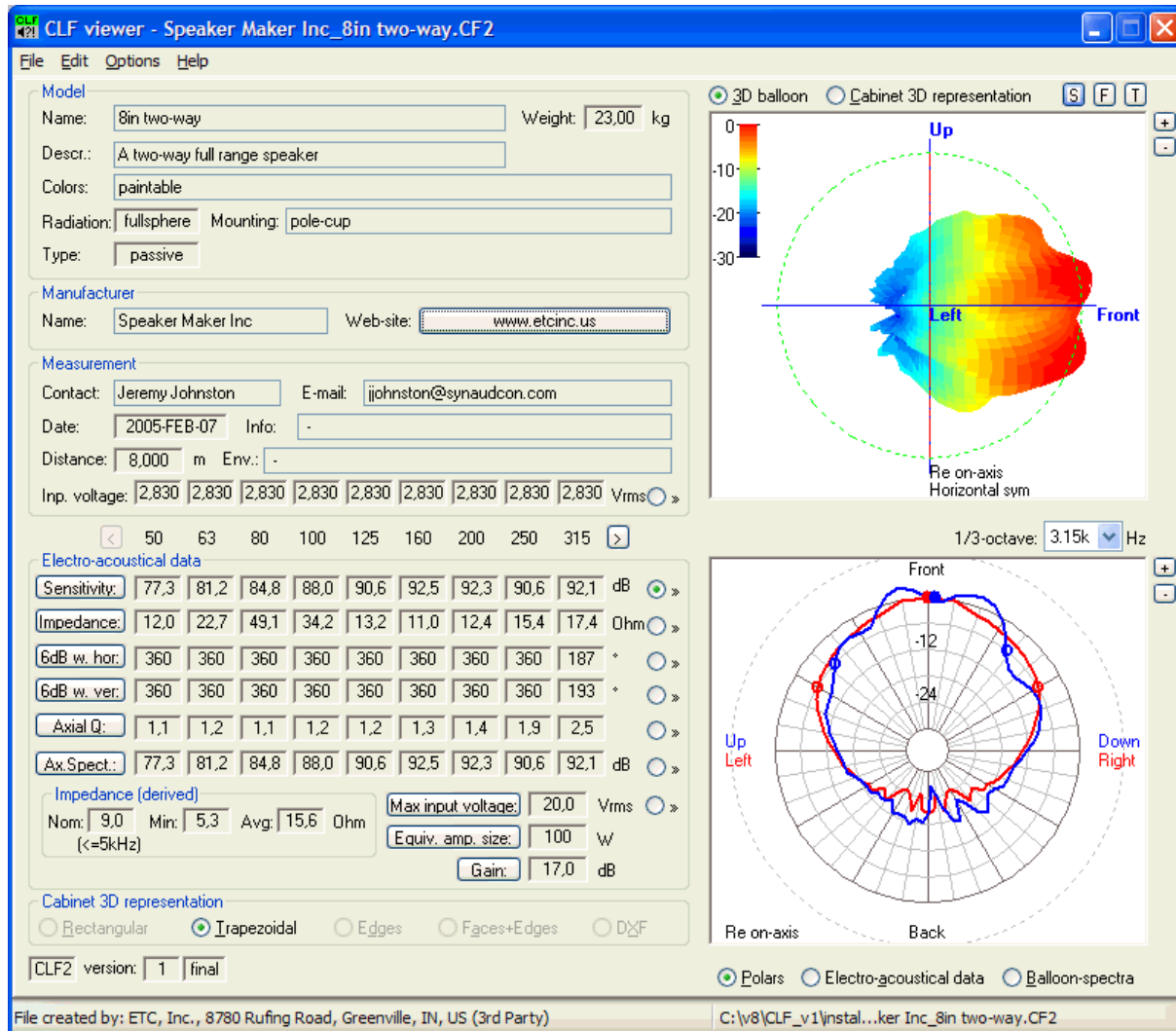
ελέγχοντας την κατευθυντικότητα - κόρνες



$$Q = \frac{180^\circ}{\arcsin\left(\sin\frac{\theta_{ορ}}{2} \sin\frac{\theta_{καθ}}{2}\right)}$$

$$DI = 10 \log Q$$

κατευθυντικότητα ηχείων - πηγών



κατευθυντικότητα ηχείων – συστοιχίες πηγών

σφαιρική πηγή

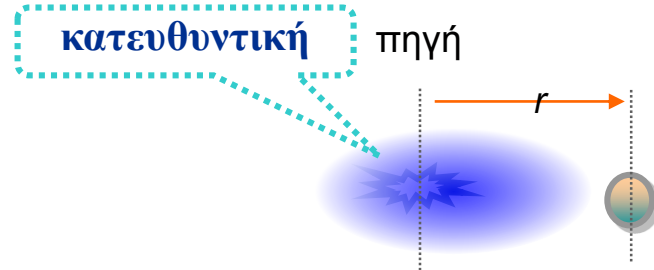
$$p_s(r, t) = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$$

διπολική

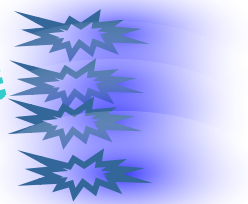
$$p_d(r, t, \theta) = -j \frac{2A}{r} \sin\left(\frac{kd}{2} \sin \theta\right) e^{j(\omega t - kr)} \quad r > S / \lambda$$

συνάρτηση κατευθυντικότητας $H(\theta)$

κατευθυντικότητα ηχείων – συστοιχίες πηγών



πολλές
κατευθυντικές
πηγές



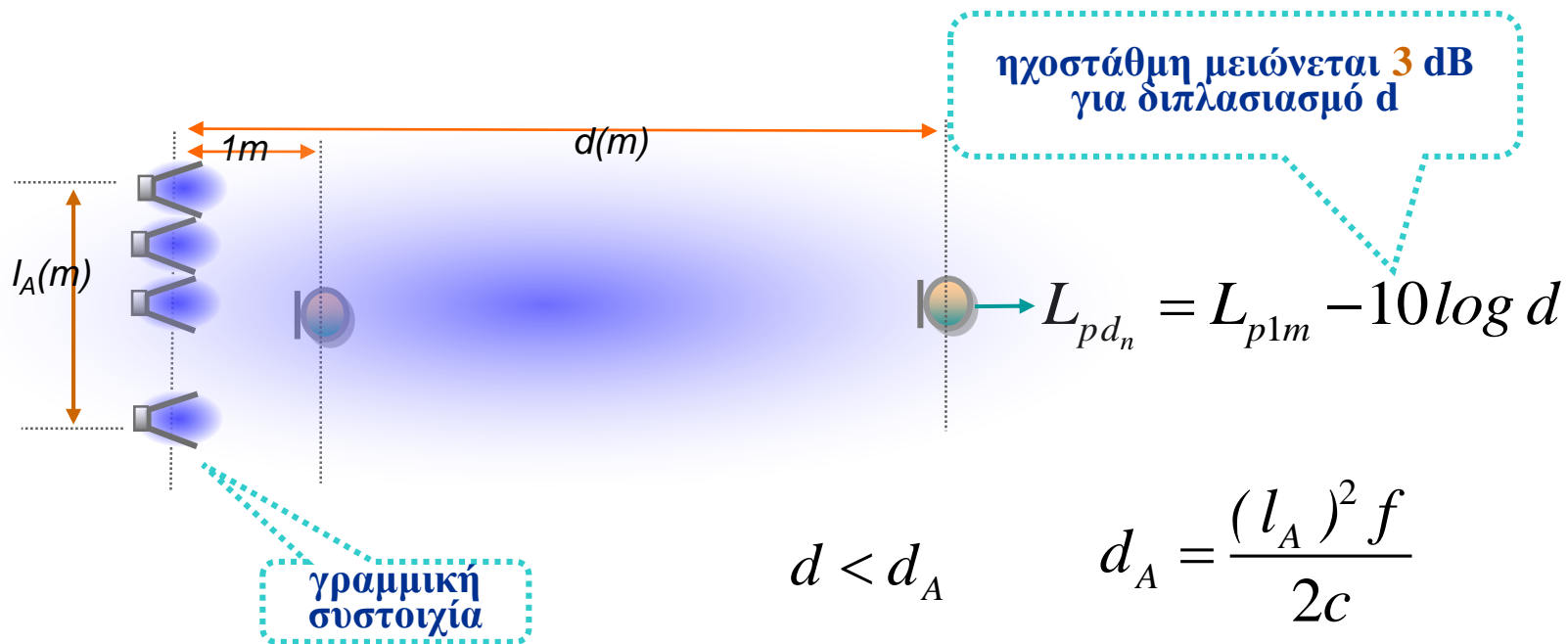
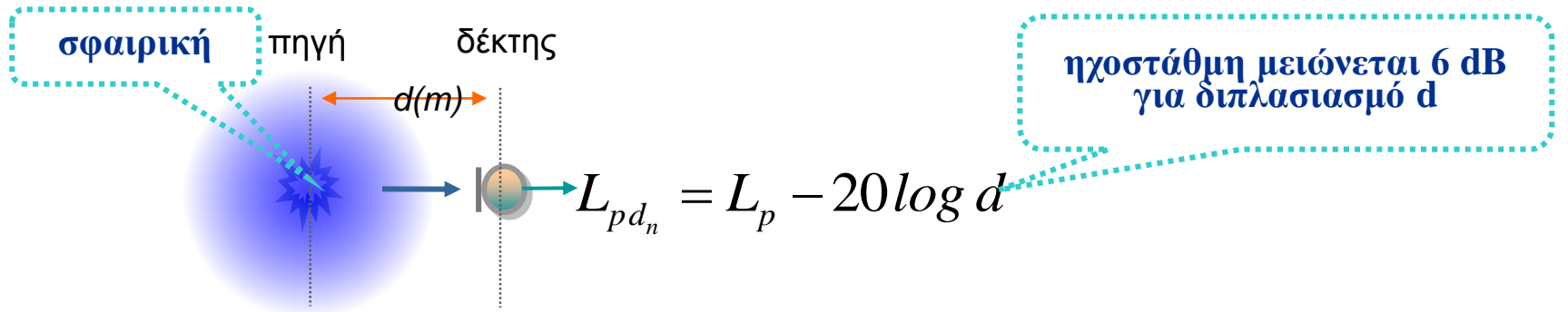
συνάρτηση
κατευθυντικότητας $H(\theta)$

$$p(r, t, \theta) = H(\theta) \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)}$$

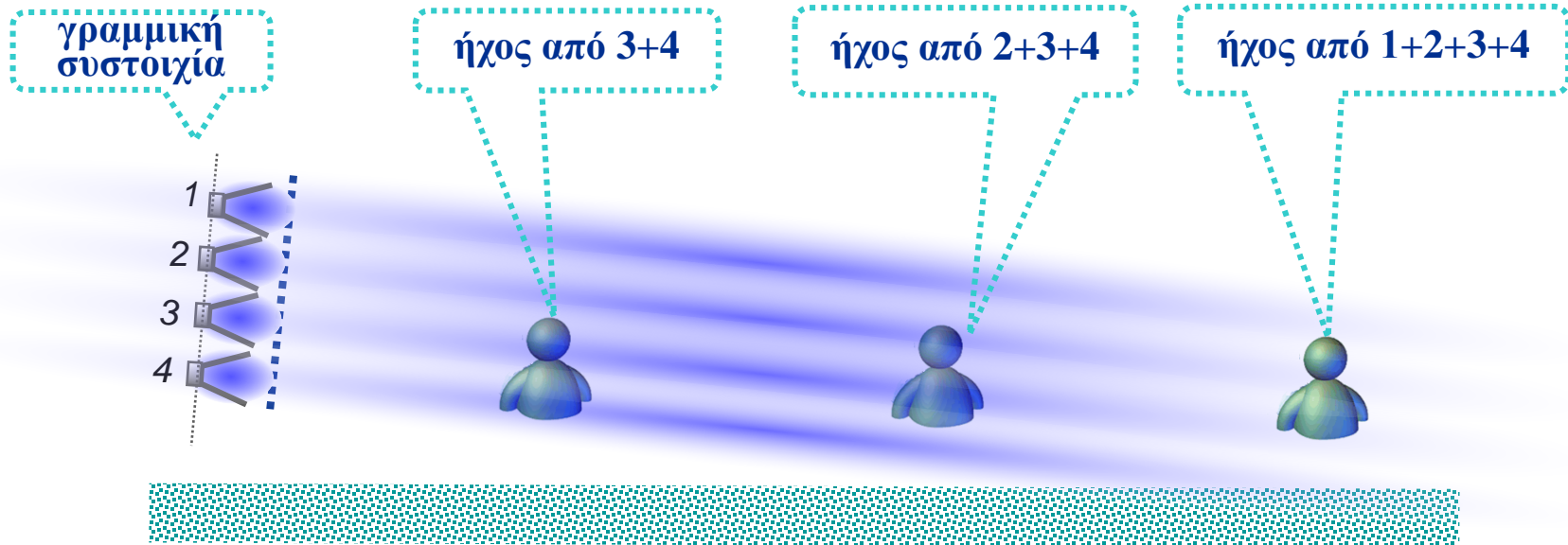
$$p(r, t, \theta) = \sum_{k=1}^N H_k(\theta) \frac{A}{r_k} e^{j(\omega t - kr_k)}$$

συστοιχία

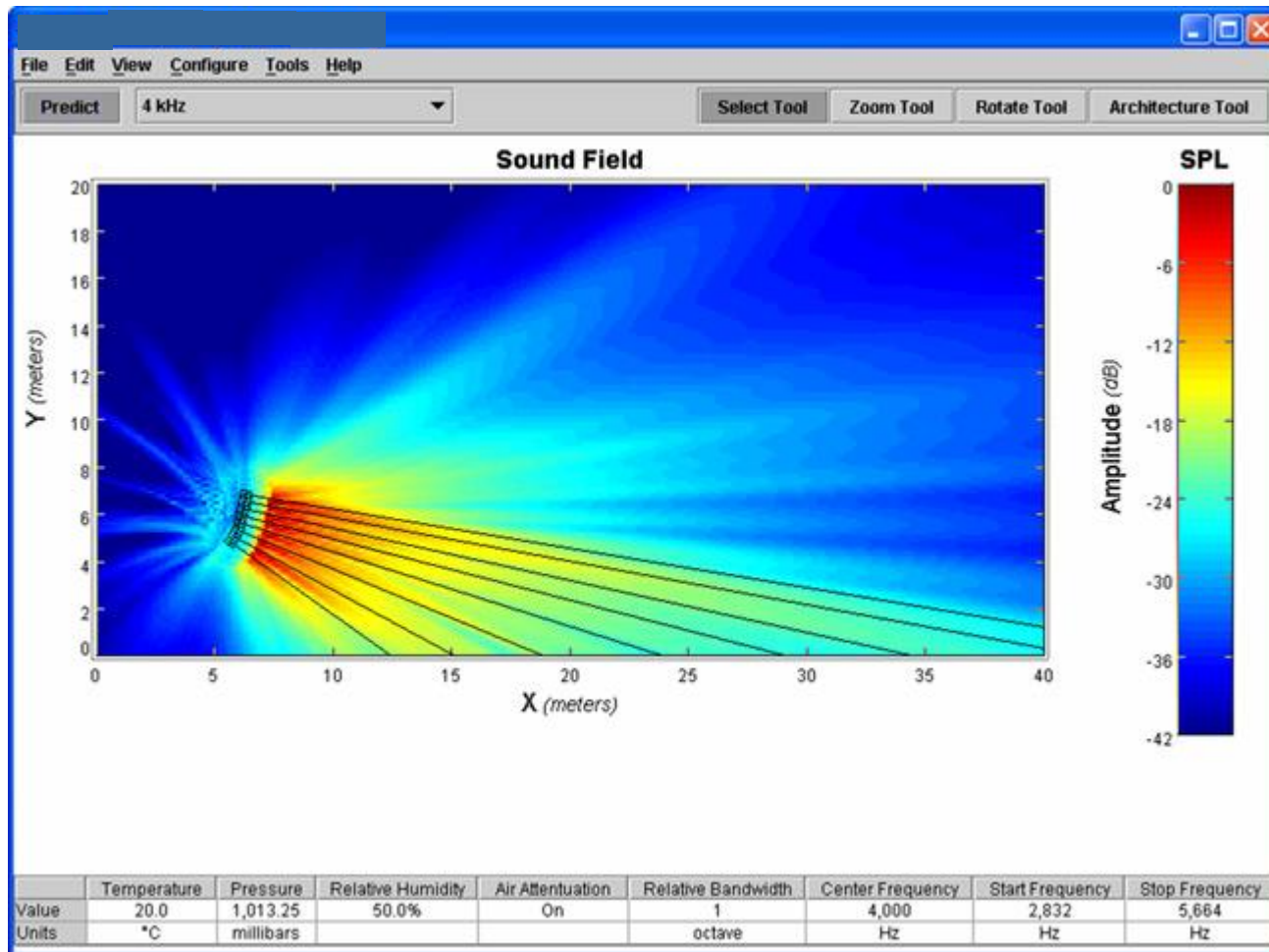
κατευθυντικότητα ηχείων - συστοιχίες



κατευθυντικότητα ηχείων - συστοιχίες

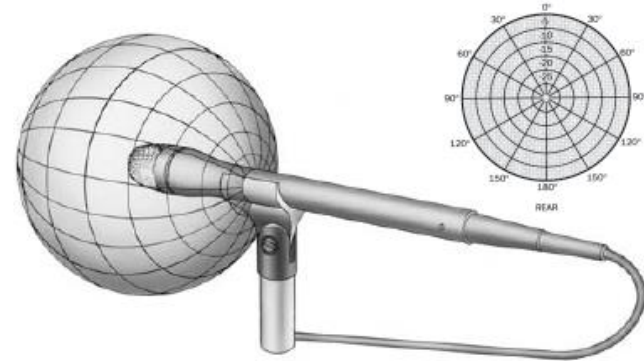


κατευθυντικότητα ηχείων - συστοιχίες

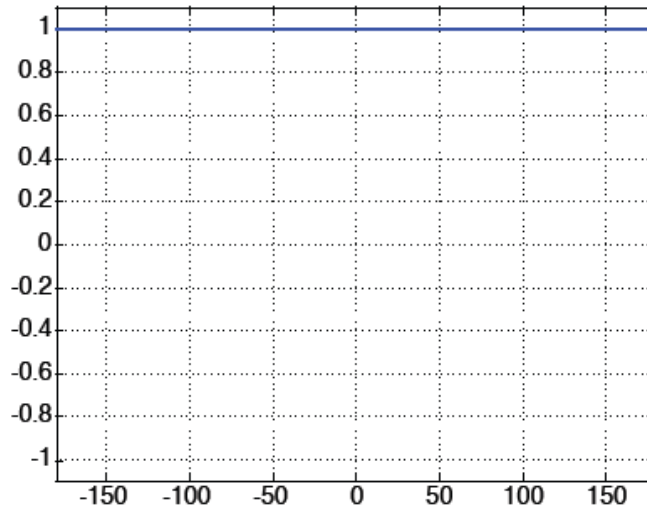


κατευθυντικότητα μικροφώνων

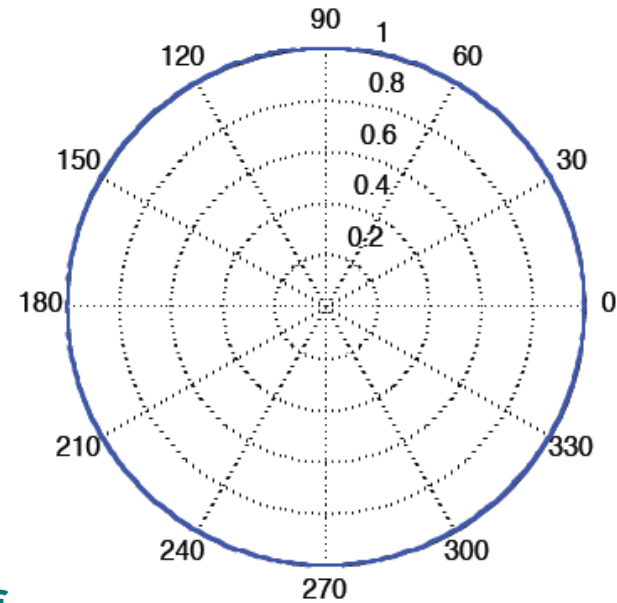
παντοκατευθυντικό
μικρόφωνο
(omnidirectional)



σχετικό ηλεκτρικό κέρδος
μικροφώνου

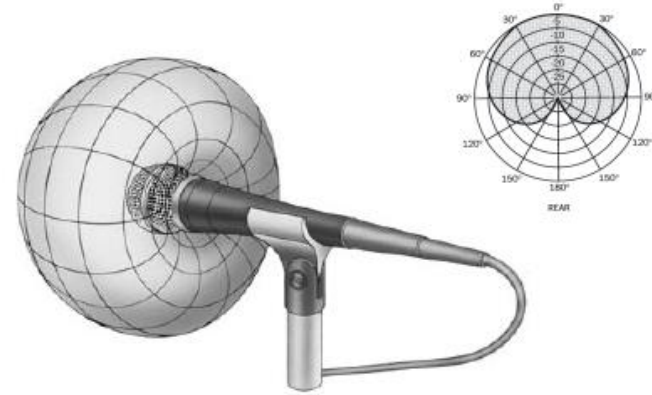


γωνία ηχητικού κύματος σε σχέση με
μικρόφωνο ($^{\circ}$)

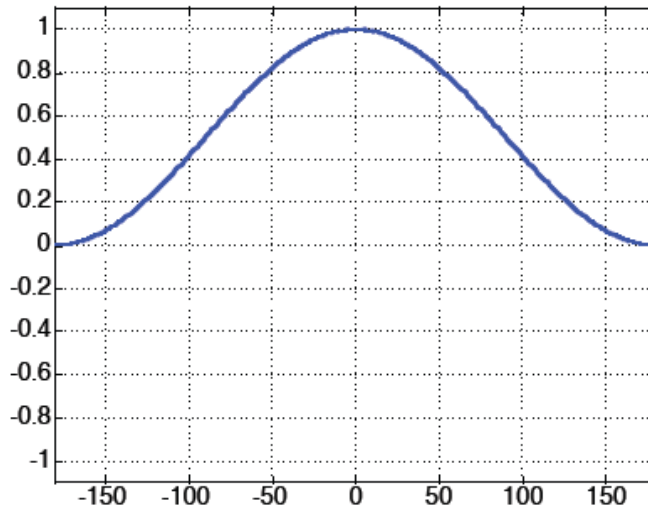


κατευθυντικότητα μικροφώνων

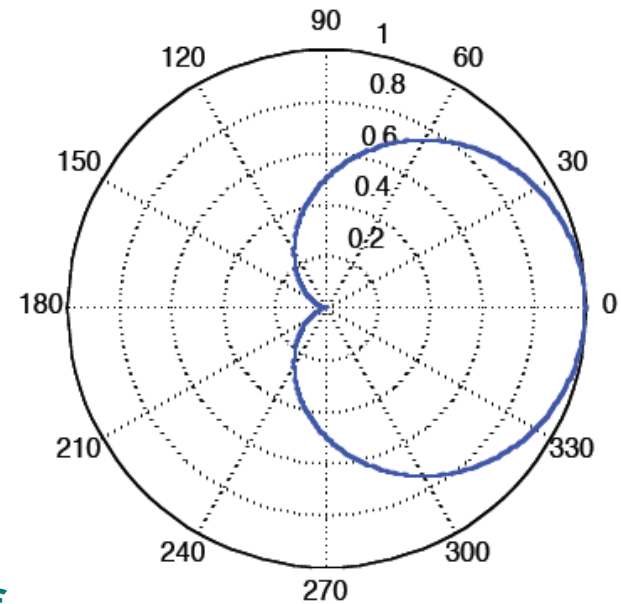
καρδιοειδές
μικρόφωνο
(cardioid)



σχετικό ηλεκτρικό κέρδος
μικροφώνου

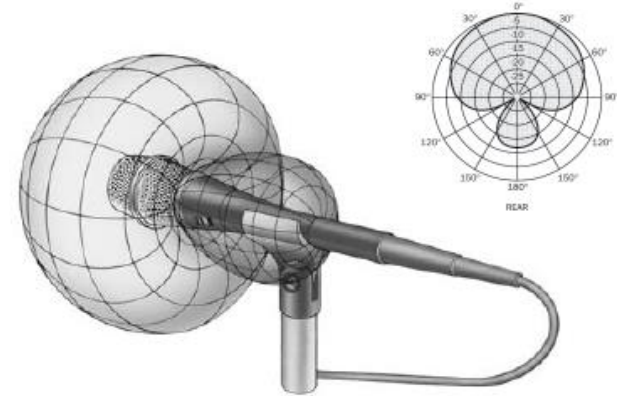


γωνία ηχητικού κύματος σε σχέση με
μικρόφωνο (°)

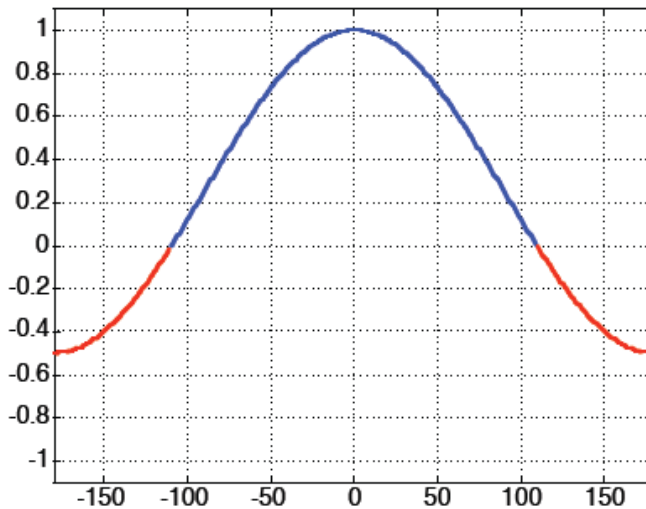


κατευθυντικότητα μικροφώνων

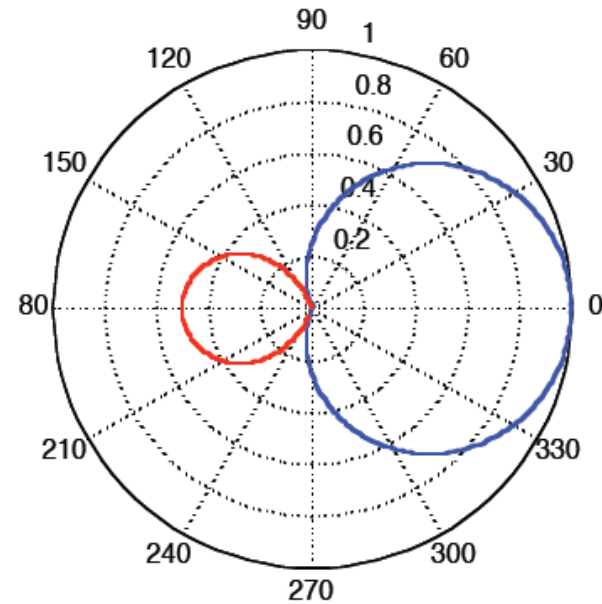
υπερκαρδιοειδές
μικρόφωνο
(hypercardioid)



σχετικό ηλεκτρικό κέρδος
μικροφώνου



γωνία ηχητικού κύματος σε σχέση με
μικρόφωνο (°)





ομάδα τεχνολογίας ήχου & ακουστικής

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

<http://www.wcl.ece.upatras.gr/AudioGroup/>