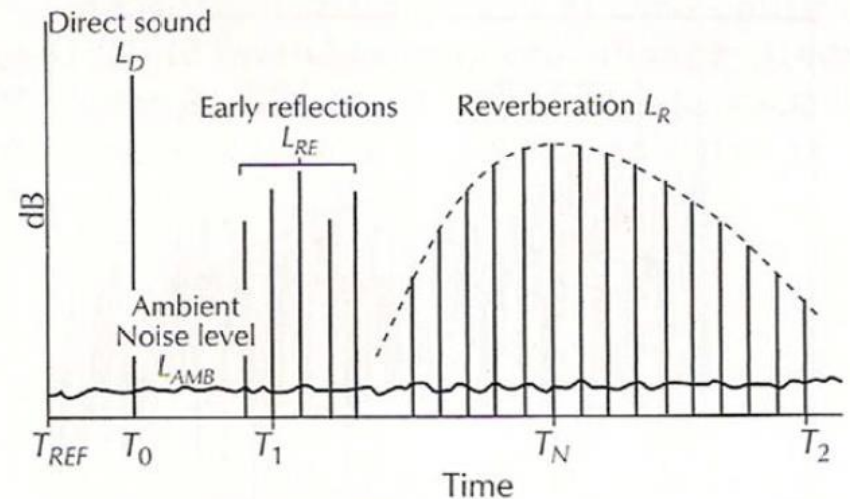


# Συνιστώσες του ήχου σε «μεγάλους» κλειστούς χώρους

- Απευθείας ήχος (direct sound)
- Πρώτες ανακλάσεις (early reflections)  
 $\Delta\tau < 80$  ms
- Αντηχητική συνιστώσα (reverberation)
  - Αντηχητικό πεδίο ή διάχυτο πεδίο
  - Ανακλώμενος ήχος



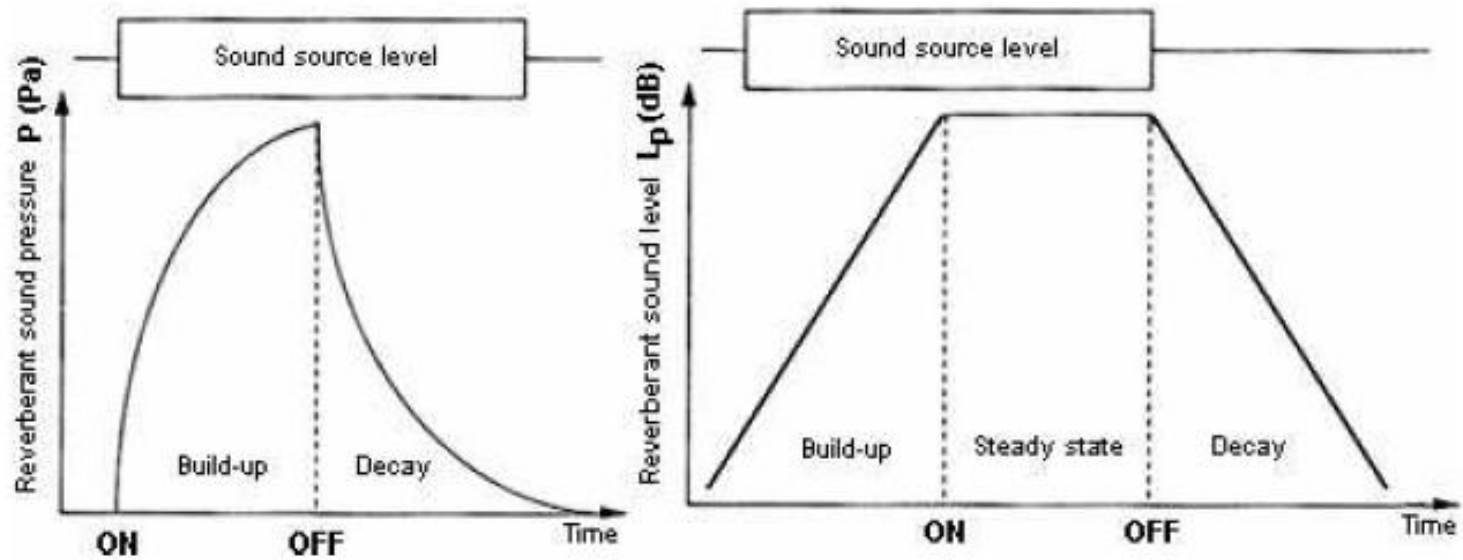
$T_0 - T_{REF} =$  Signal travel time to observer ( $D_0$ )

$T_1 - T_0 =$  Initial Time Delay (ITD) gap

$T_N - T_{REF} =$  Natural room delay

$T_2 - T_1 =$  3-D measurement limits (variable from  $T_{REF}$  to  $T_2$ )

# Αντήχηση



Σχήμα 6. Διαγράμματα  $t-p$ ,  $t-L_p$  για συνεχόμενα εκπεμπόμενο θόρυβο & μηδενισμό πηγής [3]

# Το τέλειο αντηχητικό πεδίο

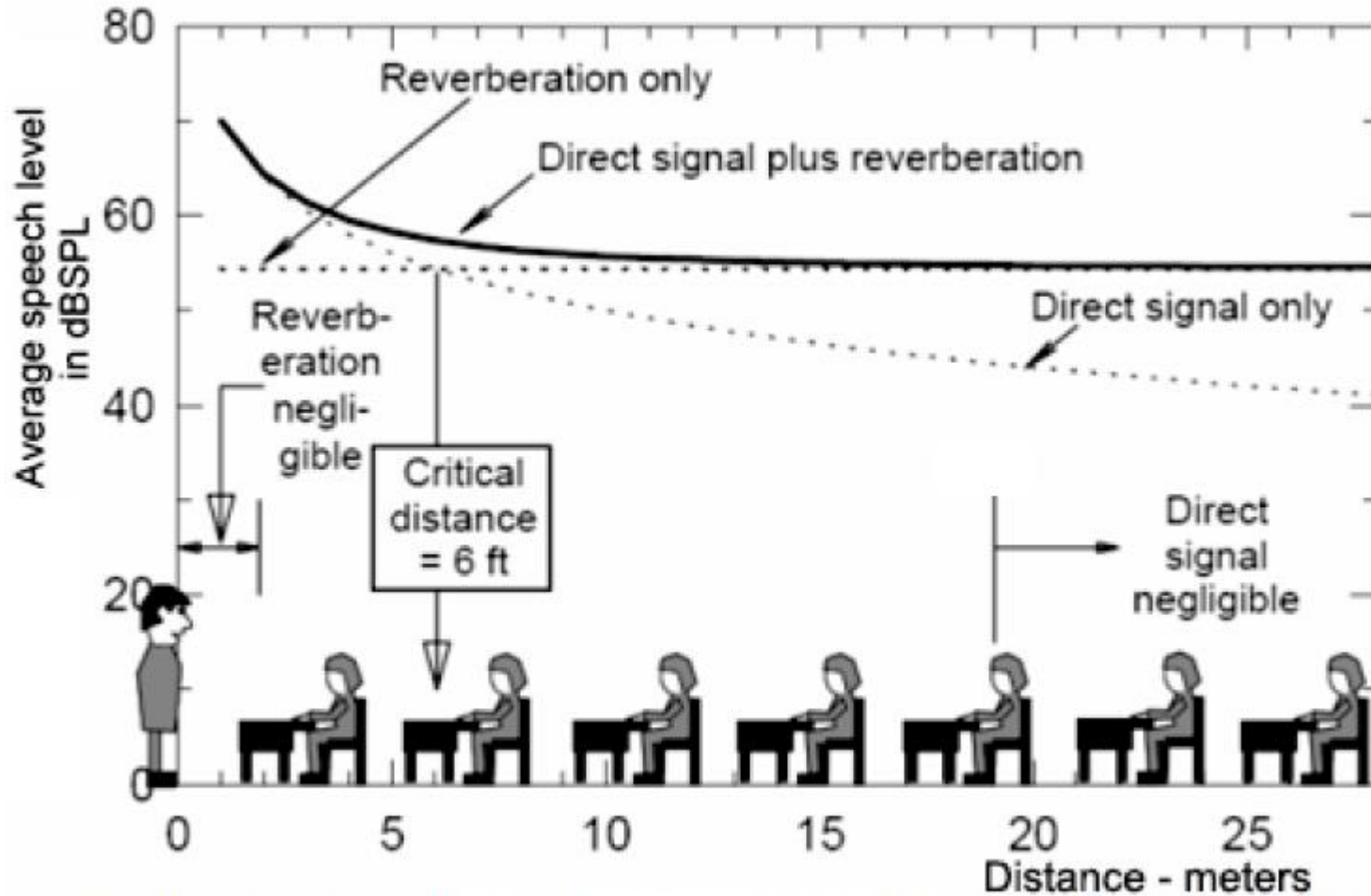
Το πεδίο που δημιουργείται από την υπέρθεση απείρου πλήθους επιπέδων ηχητικών κυμάτων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια πιθανότητα

- Σταθερή πυκνότητα ενέργειας
- Οι εξασθενήσεις είναι τέλεια εκθετικές
- Χρόνος αντήχησης παντού το ίδιο
- Χαρακτήρας της εξασθένησης ανεξάρτητος από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου
- Μετρούμενη στάθμη του ανακλώμενου ήχου ανεξάρτητη από τα κατευθυντικά χαρακτηριστικά του μικροφώνου
- Ο απευθείας ήχος ο ανακλώμενος ήχος είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους

# Συνθήκες για να έχουμε αντηχητικό πεδίο

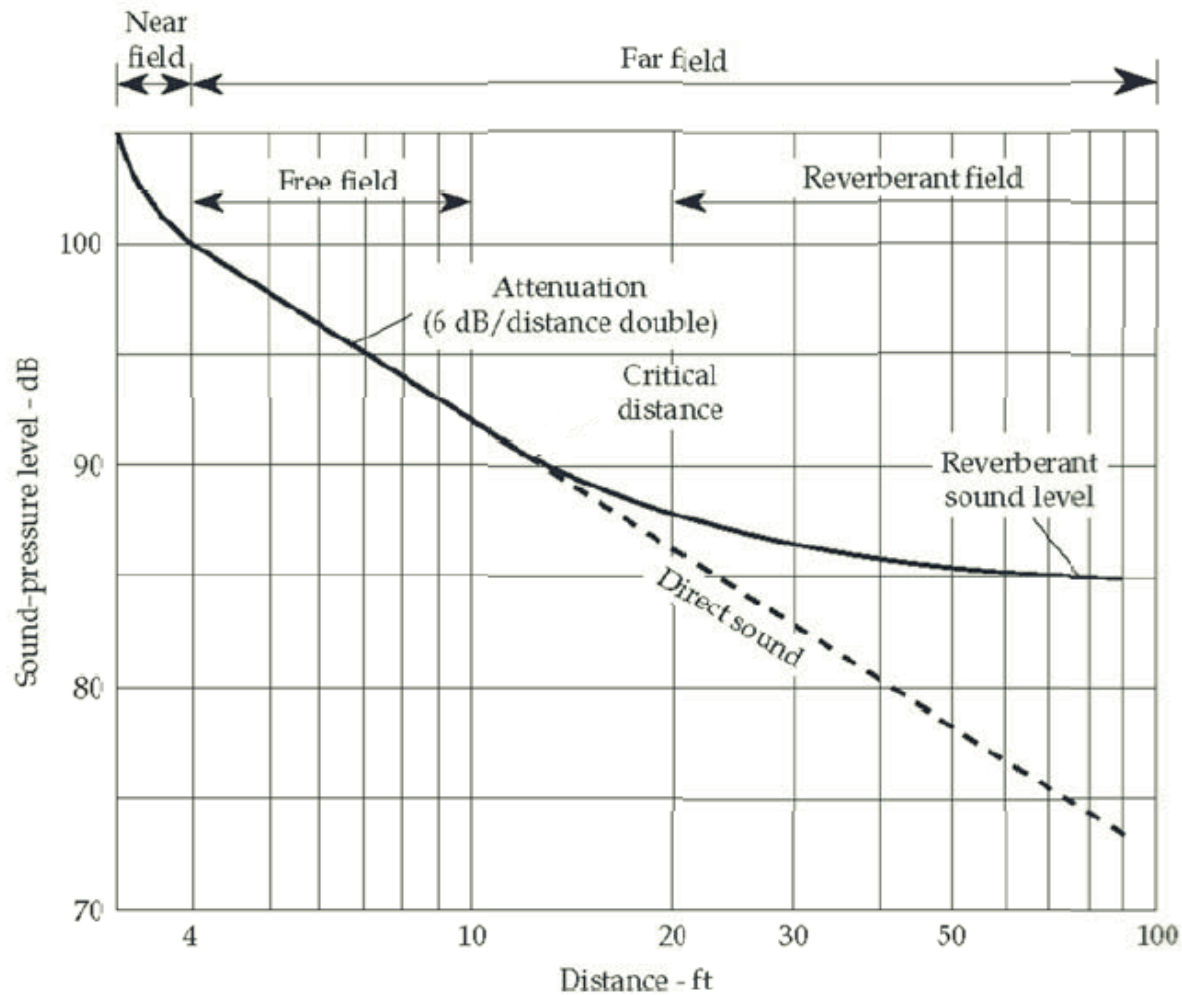
- Ο χώρος έχει ακανόνιστο σχήμα (irregularly shaped)
- Οι διαστάσεις του χώρου είναι σχετικά μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος που μελετάμε
- Δεν έχουμε κάποια διάσταση του χώρου δυσανάλογα μεγάλη σε σχέση με τις άλλες
- Ο συντελεστής απορρόφησης των τοιχωμάτων είναι σχετικά μικρός ( $\alpha < 0.3$ ) και ομοιόμορφα κατανομημένος

# Κρίσιμη απόσταση



Σχήμα 12. Λόγος απευθείας ήχου / αντηχητικού πεδίου σε αίθουσα διδασκαλίας

# Απευθείας + ανακλώμενος ήχος



# Θεωρητικός υπολογισμός του Lap, Lan και του Dc

# Παράγοντας κατευθυντικότητας ( $Q(f)$ )

- Είναι ο λόγος της ακουστικής έντασης πάνω σε ένα συγκεκριμένο άξονα και απόσταση από μια ηχητική πηγή, προς την τιμή της ακουστικής έντασης που θα μετρούσαμε πάνω στον ίδιο άξονα και απόσταση αν η ηχητική πηγή ήταν πανκατευθυντική (και δεν άλλαζε η ισχύ της).
- Δείκτης κατευθυντικότητας (directivity index – DI)

$$DI(f) = 10 \log_{10} Q(f)$$

# Από φυλλάδιο εργαστηρίου

- Ο παράγοντας κατευθυντικότητας,  $Q$ , είναι αδιάστατο μέγεθος, ορίζεται πάντα για ένα σημείο και δίνεται από το λόγο της έντασης σε αυτό το συγκεκριμένο σημείο συγκεκριμένης απόστασης και διεύθυνσης από την πηγή ( $I_d$ ) προς τη μέση τιμή της έντασης από όλες τις διευθύνσεις ( $I_0$ ).

$$Q = \frac{I_d}{I_0} \quad (12)$$

Εξ' ορισμού η μέση τιμή του  $Q$  προς όλες τις διευθύνσεις γύρω από την πηγή είναι ίση με τη μονάδα, 1.

- Ο δείκτης κατευθυντικότητας,  $D_I$ , ορίζεται από τον παράγοντα κατευθυντικότητας  $Q$  ως:

$$D_I = 10 \cdot \log Q \quad (13) \Leftrightarrow D_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I_d}{I_0}\right), \text{ σε } dB.$$

Μία ισότροπη πηγή, δηλαδή μια πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις γύρω της, σε ελεύθερο πεδίο (δηλαδή σε χώρο μακριά από ανακλαστικές επιφάνειες) έχει σταθερό παράγοντα κατευθυντικότητας,  $Q = 1$ , παντού.

# Αναλογίες μεταξύ επιθυμητών και ανεπιθύμητων συνιστωσών

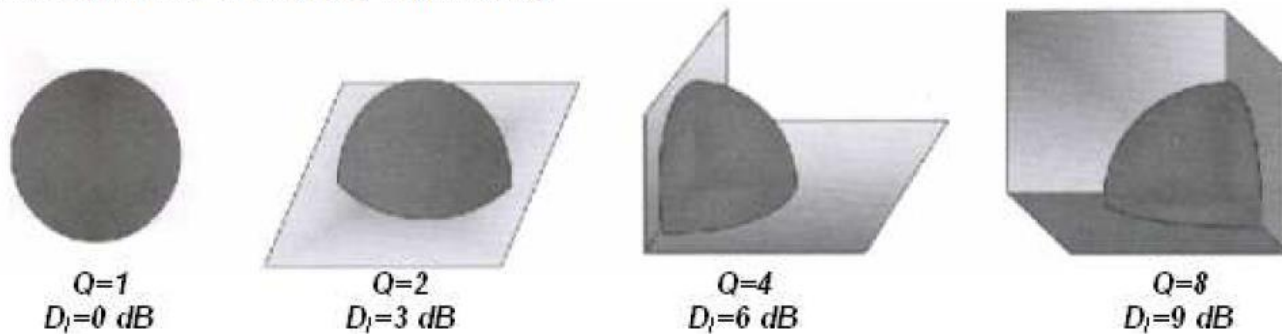
- Direct to Reverberant Ratio (DDR) = λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο
- Signal to Noise Ratio (SNR) = λόγος σήματος προς θόρυβο

Τι μπορώ να κάνω για να αυξήσω το λόγο απευθείας ήχου προς ανακλώμενο σε μία συγκεκριμένη θέση στο χώρο?

Να βάλω περισσότερη ηχο-απορρόφηση στο χώρο	<b>ναι</b>
Να αυξήσω την ισχύ της πηγής	οχι
Να φέρω την πηγή πιο κοντά στη θέση ακρόασης	ναι
Να αυξήσω την κατευθυντικότητα της πηγής	ναι

# Παράγοντας κατευθυντικότητας για διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης ηχείου

Παρακάτω φαίνονται οι διάφορες περιπτώσεις:



Σχήμα 5. Παράγοντας κατευθυντικότητας πηγής,  $Q$ , σύμφωνα με την τοποθέτηση [5]

Θέση πηγής	Παράγοντας κατευθυντικότητας	Δείκτης Κατευθυντικότητας (dB)	
Ελεύθερο πεδίο	1	0	$L = L_p$
Σε επίπεδη επιφάνεια	2	3	$L = L_p + 3 \text{ dB}$
Στη γωνία 2 επιφανειών	4	6	$L = L_p + 6 \text{ dB}$
Στη γωνία 3 επιφανειών	8	9	$L = L_p + 9 \text{ dB}$

Πίνακας 1. Παράγοντας,  $Q$ , & δείκτης,  $D_i$ , κατευθυντικότητας πηγής ανάλογα με τη θέση της [2]

# Απόκριση συχνότητας για διαφορετικούς τρόπους τοποθέτησης ηχείου

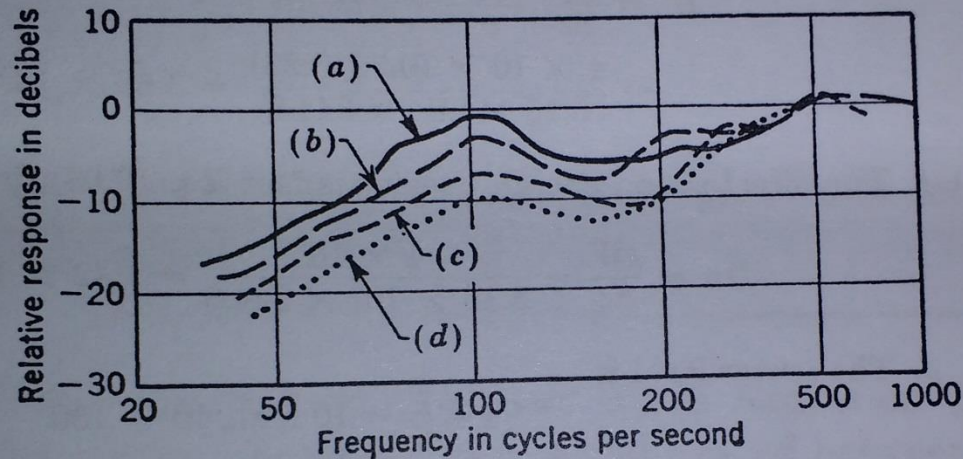
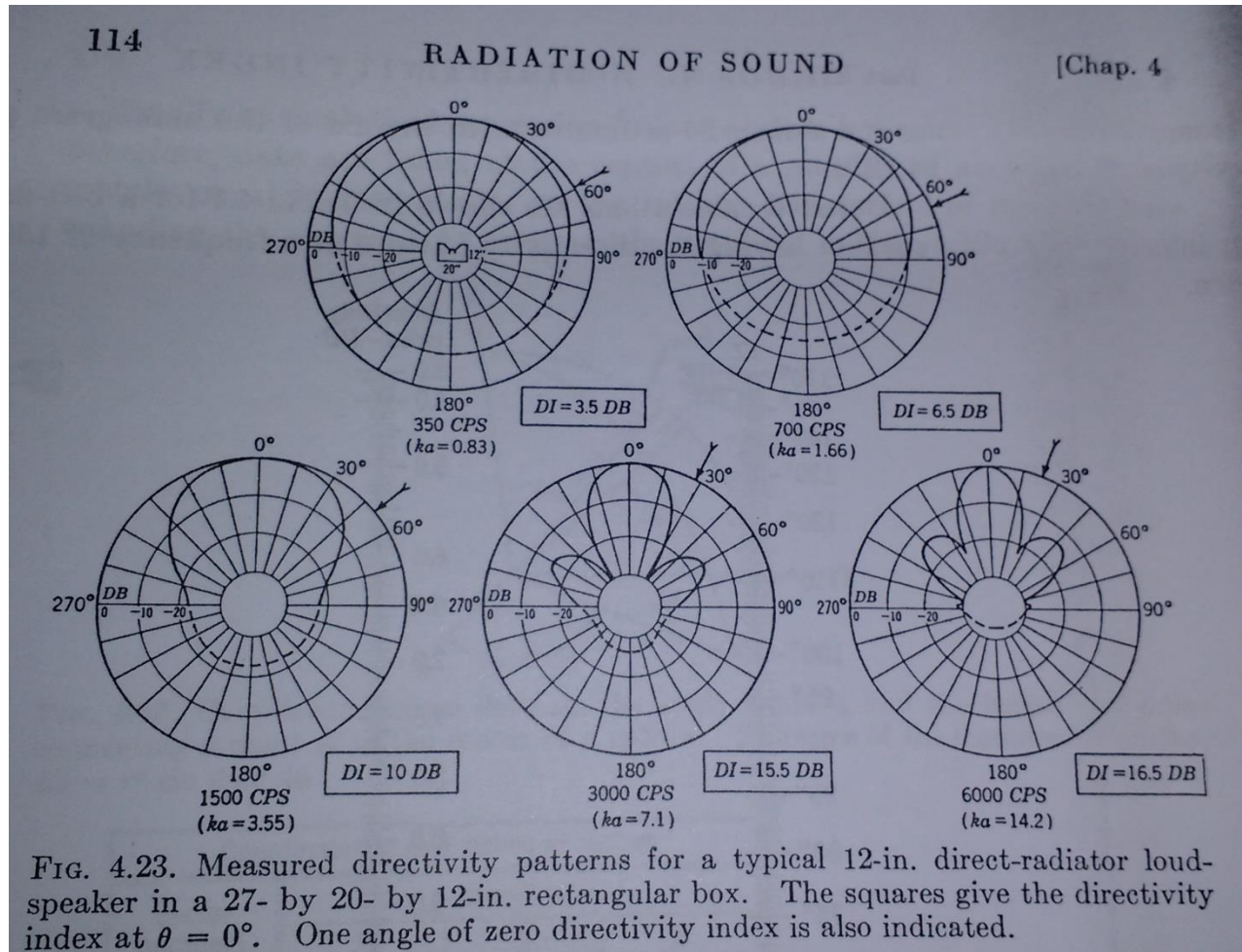


FIG. 10.24. Frequency response of a loudspeaker for four locations (a) at corner of a rectangular room; (b) at center of one wall at floor level; (c) at center of one wall halfway between floor and ceiling; and (d) suspended at exact center of room. The curves are smoothed versions of the original data.

# Κατευθυντικότητα ηχείου



# DI με τη συχνότητα

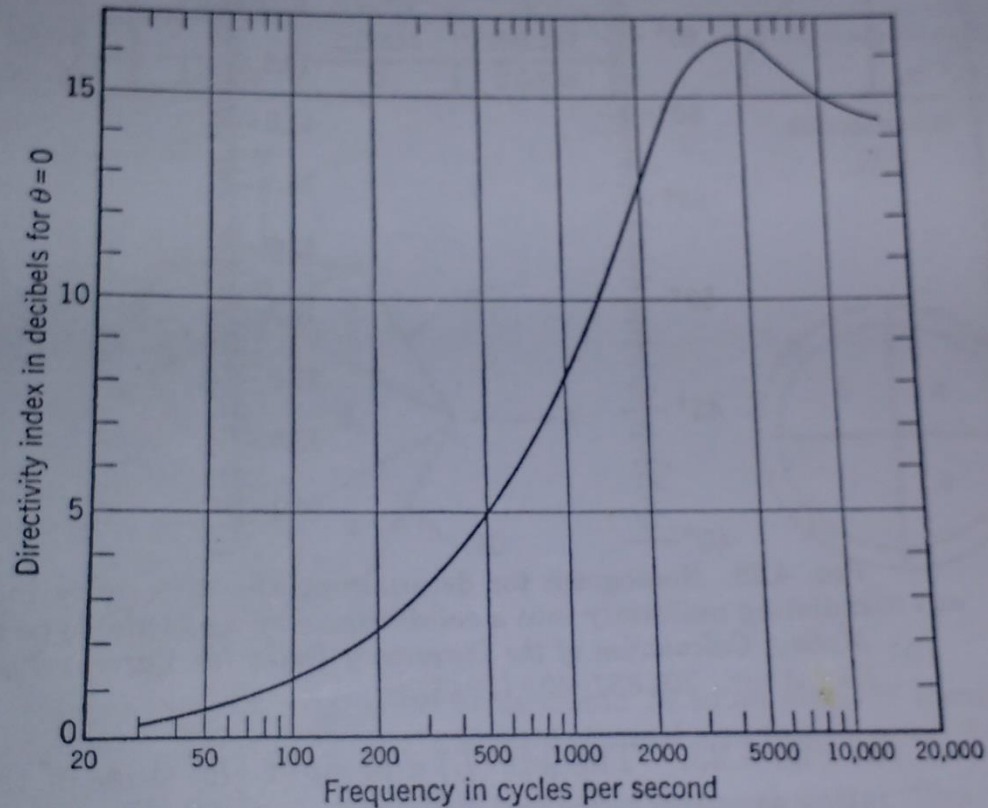
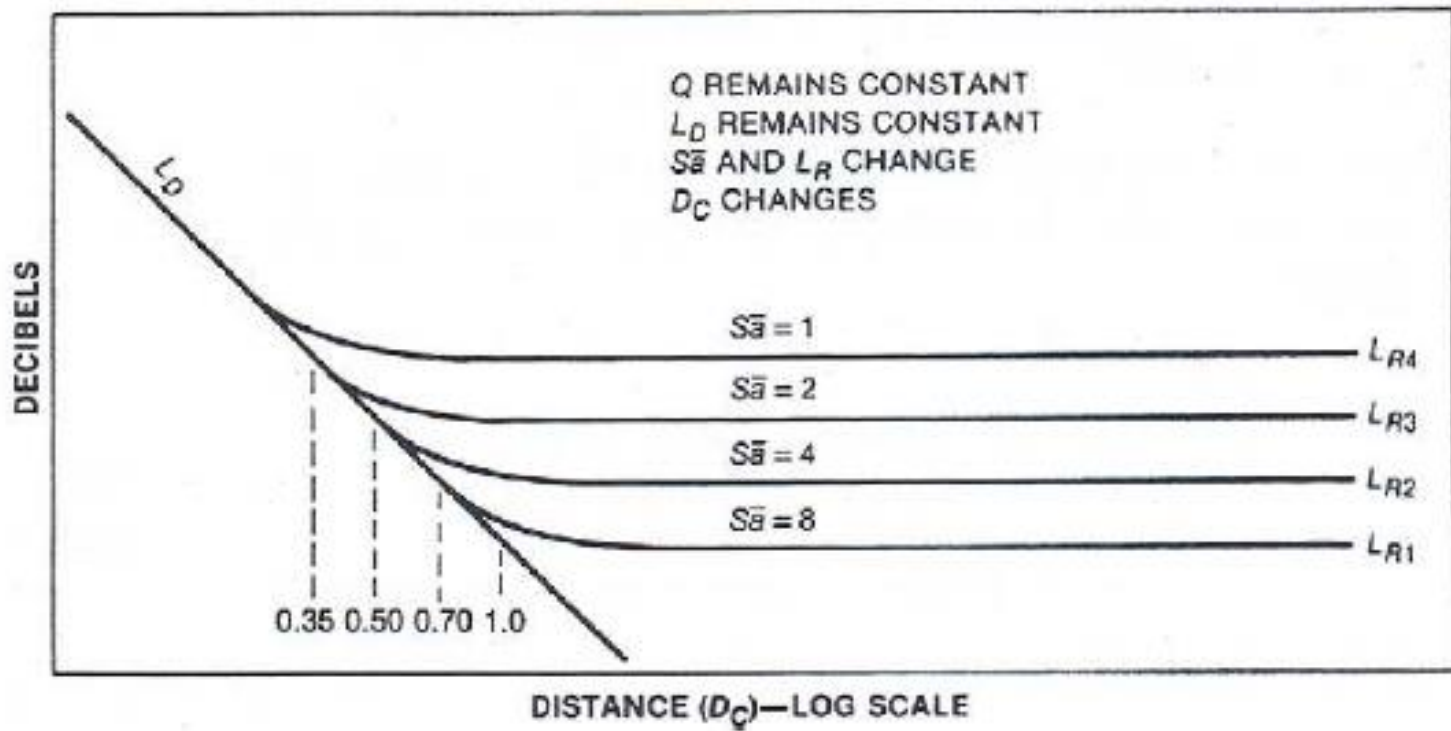


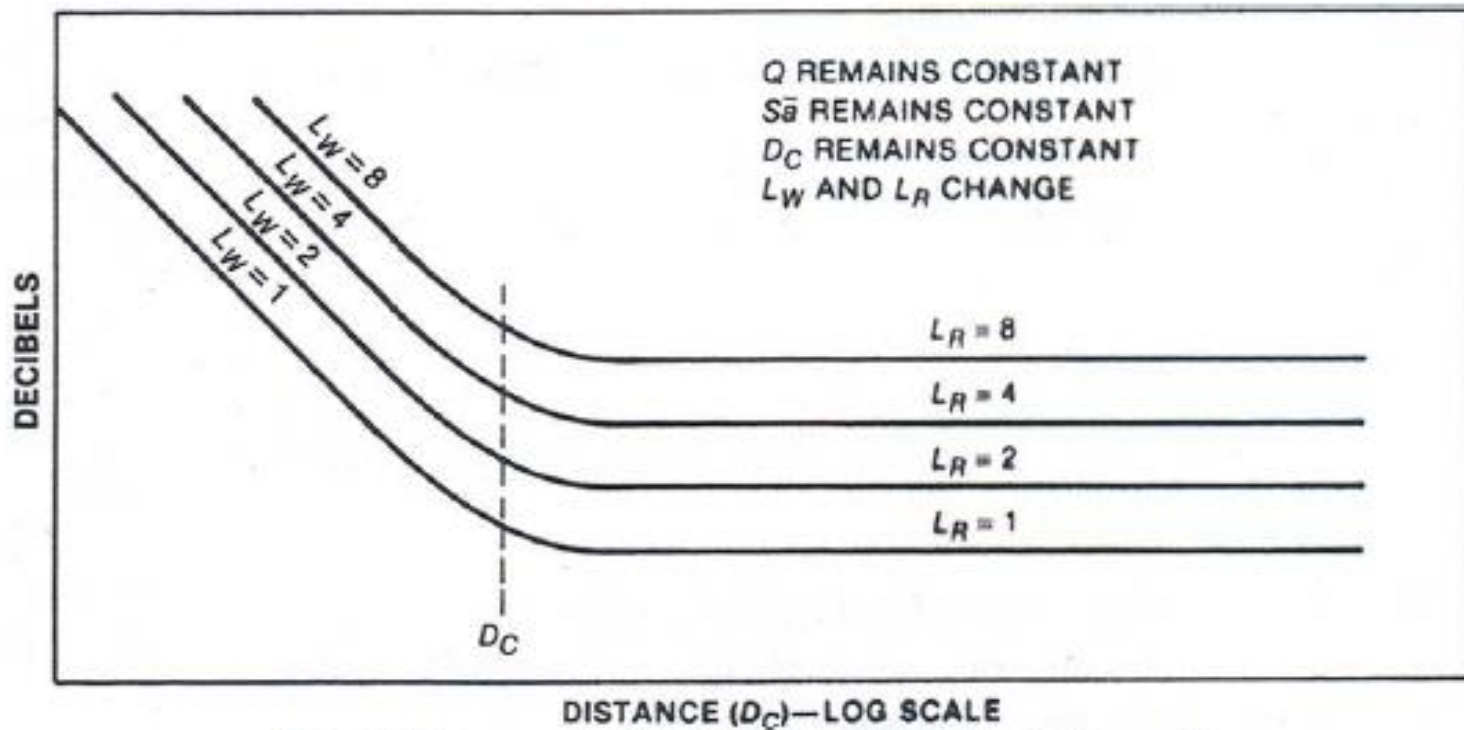
FIG. 4.24. Directivity indexes for  $0^\circ$  axes of the directivity patterns of Fig. 4.23 computed as though the source were symmetrical about the  $0^\circ$  axis. The data apply to a typical 12-in. direct-radiator loudspeaker mounted in a 27- by 20- by 12-in. rectangular box.

# Μεταβολή της συνολικής απορρόφησης



Σχήμα 10. Μεταβολή κρίσιμης απόστασης  $D_C$  για διαφορετικά  $R$  ( $S \cdot \bar{a}$ ) [1]

# Μεταβολή της ισχύος



Σχήμα 11. Αύξηση της ηχητικής στάθμης που εκπέμπει η πηγή. ( $L_W$ )<sub>πηγής</sub> [1]

# Άσκηση 1:

- Δωμάτιο με διαστάσεις 5 x 10 x 3.5 m περιλαμβάνει ιστροπική ηχητική πηγή ισχύος 10  $\mu\text{W}$  στην συχνότητα των 1000 Hz, τοποθετημένη στο κέντρο της ακμής του τοίχου των 5 m. Αν οι συντελεστές απορρόφησης για τη συχνότητα των 1000 Hz είναι  $\alpha_{\text{πατώματος}}=0.1$ ,  $\alpha_{\text{τοιχων}}=0,02$  και  $\alpha_{\text{οροφής}}=0,26$
- 1) Να βρεθεί η στάθμη του ανακλώμενου ήχου, 2) του απευθείας ήχου και 3) η συνολική ηχητική στάθμη στο κέντρο του δωματίου, δηλαδή στο σημείο (2.5, 5, 1.75).

## Άσκηση 2:

Για μια πηγή που έχει υπολογιστεί ότι πετυχαίνει  $D_c=4$  m μέσα σε ένα κλειστό χώρο, πόσο θα γίνει το  $D_c$  αν

0) το ηχείο αντικατασταθεί με άλλο ηχείο που έχει τετραπλάσιο συντελεστή κατευθυντικότητας  $Q$

1) ο κλειστός χώρος χτιστεί με τα ίδια υλικά αλλά με κλίμακα 2:1 ?

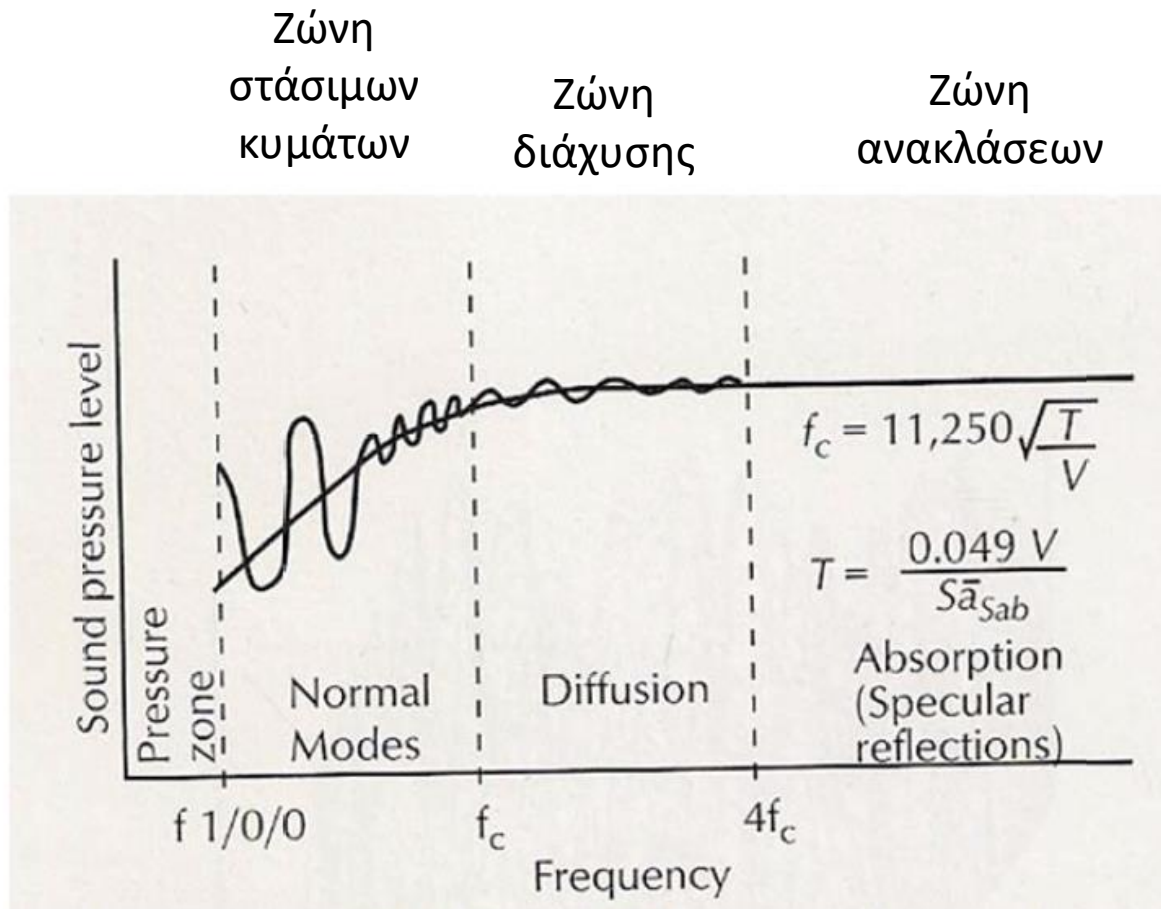
2) ο ίδιος χώρος χτιστεί με το διπλάσιο μέσο συντελεστή απορρόφησης?

(υποθέτουμε ότι ο μέσος συντελεστής απορρόφησης είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερος του 0.1)

# Άσκηση 3:

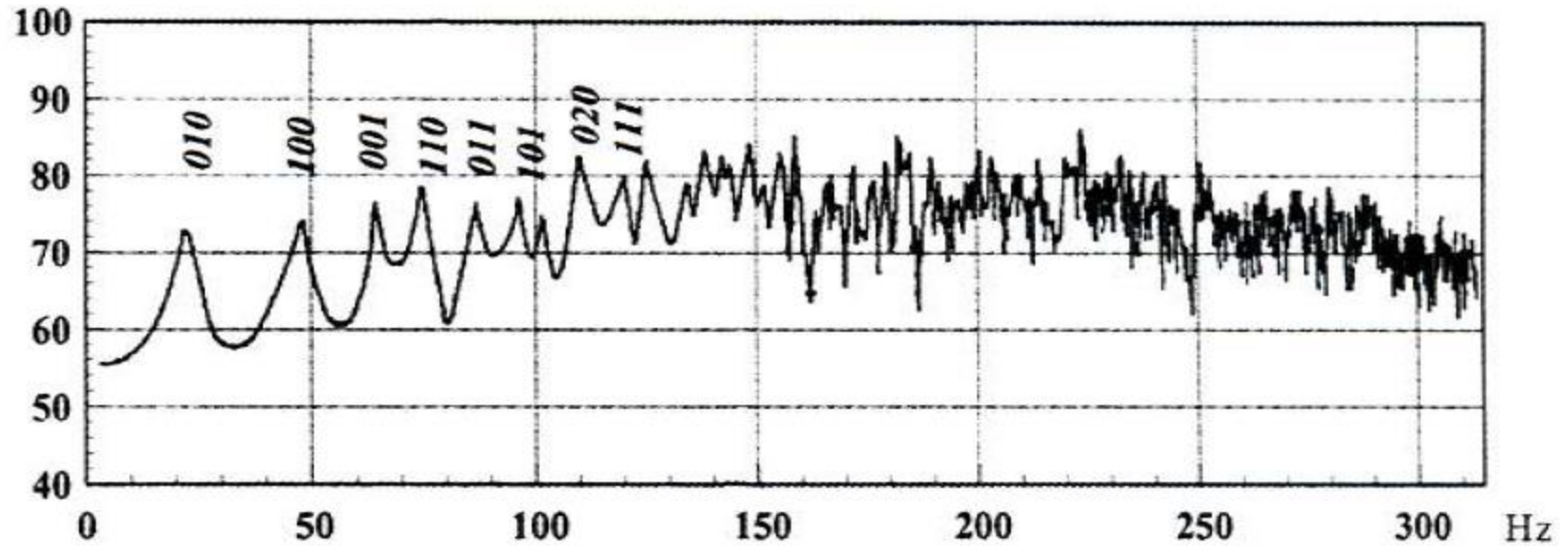
- Σε ένα χώρο όπου επικρατούν συνθήκες διάχυτου ηχητικού πεδίου, μετρήσαμε την κρίσιμη απόσταση για μία ηχητική πηγή και τη βρήκαμε ίση με  $D_{c,1}=4$  m. Τι θα συμβεί στην κρίσιμη απόσταση μετρούμενη από το συγκεκριμένο ηχείο αν στον ίδιο χώρο λειτουργήσουνε άλλα 3 πανομοιότυπα ηχεία? Θα μειωθεί, θα αυξηθεί, ή θα παραμείνει σταθερή? Αν μεταβληθεί, πόσο εκτιμάτε ότι θα είναι η καινούρια κρίσιμη απόσταση? Θεωρείστε ότι τα ηχεία συνδέονται σε κοινή ηλεκτρική πηγή και τοποθετούνται μακριά το ένα από το άλλο έτσι ώστε η λειτουργία του ενός να μην επηρεάζει τον απευθείας ήχο του άλλου.

# Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newman



Σχήμα 6.4 Διάγραμμα Bolt-Beranek-Newmann – Ελεγκτής σταθερής κατάστασης της ακουστικής απόκρισης δωματίου

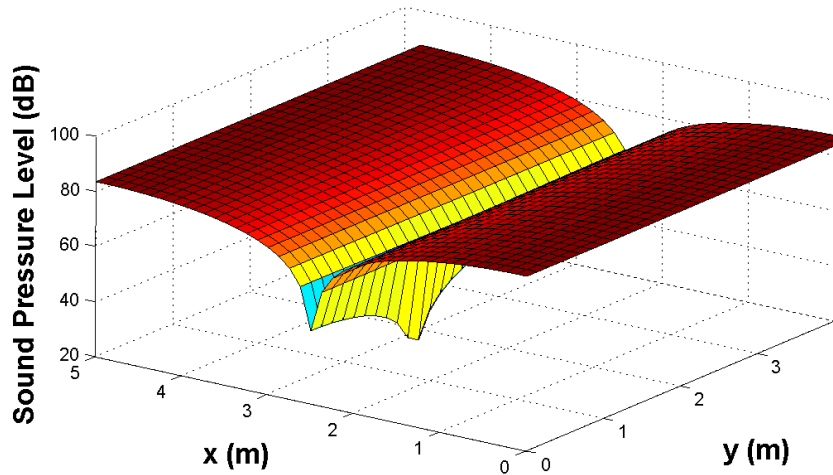
# Απόκριση Συχνότητας



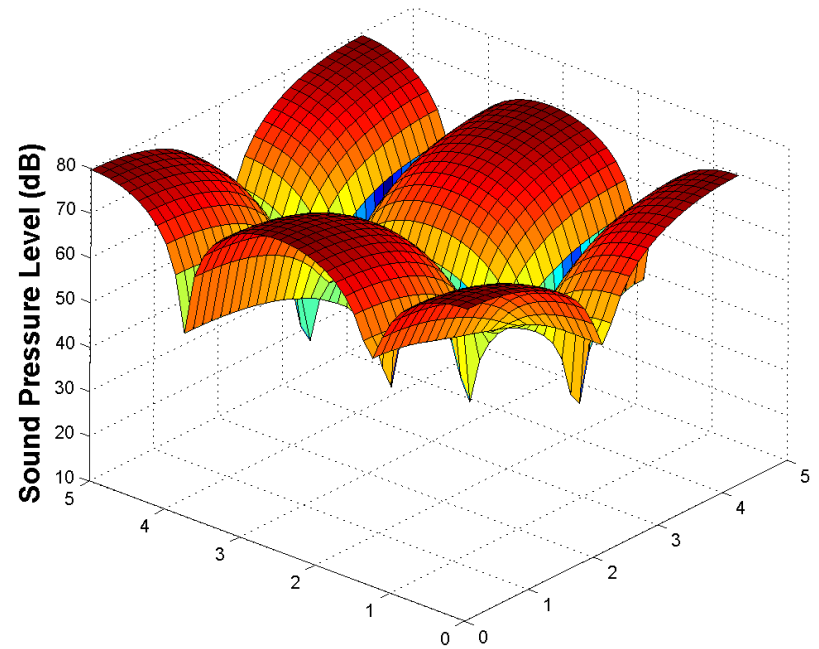
Σχήμα 14 Συμπεριφορά κλειστού χώρου σε υψηλές και χαμηλές συχνότητες [8]

# Τρόποι ταλάντωσης σε ορθογώνιο δωμάτιο

(1,0,0)



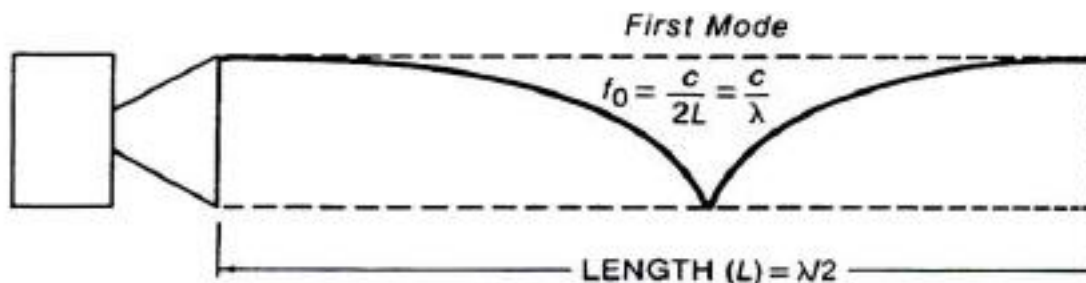
(2,1,0)



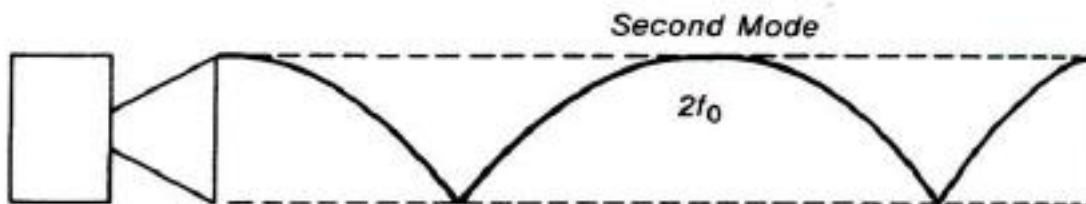
# Στάσιμα κύματα σε σωλήνα

<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/StandingWaves/StandingWaves.html>

<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/phase-p-u/phase-p-u.html>



$$p(x) = A \cos \frac{\pi x}{L}$$



$$p(x) = A \cos \frac{2\pi x}{L}$$

Third Mode =  $3f_0$ , Fourth Mode =  $4f_0$ , etc.

Σχήμα 2. Σχηματισμός στάσιμων κυμάτων σε σωλήνα [1]

Γενικός τύπος για τη  
n-ιοστή ιδιομορφή :

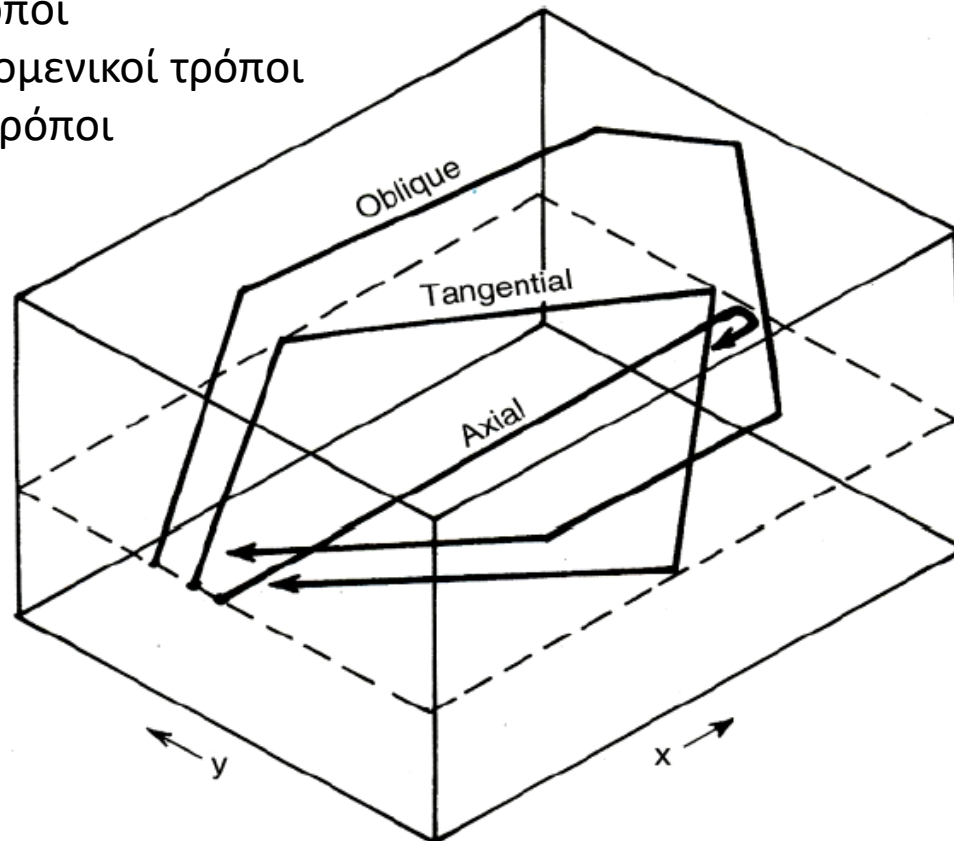
$$\Psi_n(x) = \cos \frac{n\pi x}{L}$$

# Κλειστές διαδρομές

Axial modes= αξονικοί τρόποι

Tangential modes= εφαπτομενικοί τρόποι

Oblique modes= πλάγιοι τρόποι



Σχήμα 3. Όλοι οι τρόποι δόνησης στον τρισδιάστατο χώρο [3]

# Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων για ορθογώνιο δωμάτιο

Ιδιοσυχνότητες ορθογωνίου δωματίου:

$L_x$ : μήκος (m)

$L_y$ : πλάτος (m)

$L_z$ : ύψος (m)

$$f = (n_x, n_y, n_z) = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2}$$

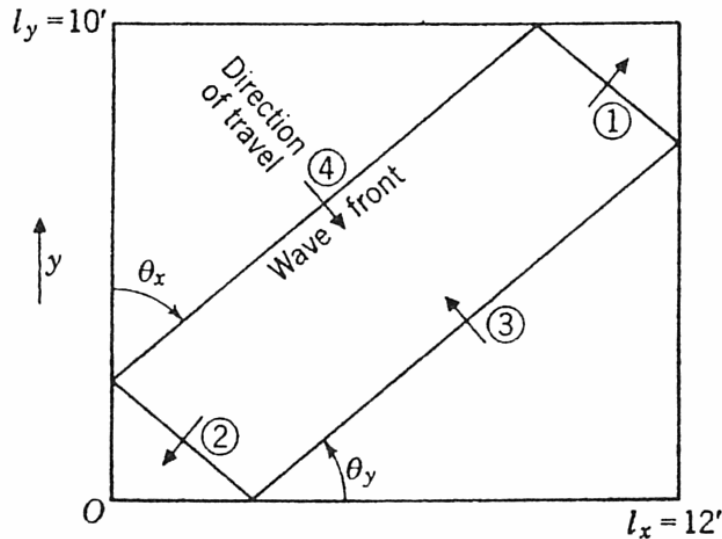
Συγκεκριμένα:

- Οι εφαιπτομενικοί τρόποι δόνησης έχουν το 1/2 της ενέργειας των αξονικών, άρα 3 dB χαμηλότερη στάθμη και
- Οι πλάγιοι τρόποι δόνησης έχουν το 1/4 της ενέργειας των αξονικών, άρα 6 dB χαμηλότερη στάθμη.

Τρόποι δόνησης	Πλήθος ανακλάσεων	Ενέργεια	Στάθμη
Αξονικοί	2 επιφάνειες	1	0
Εφαιπτομενικοί	4 επιφάνειες	1/2	- 3 dB
Πλάγιοι	6 επιφάνειες	1/4	- 6 dB

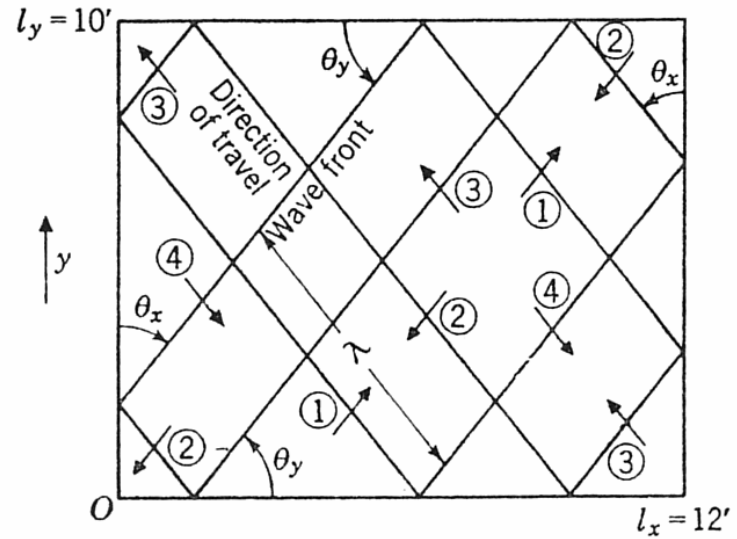
Αυτό δεν ισχύει πάντως σε όλες τις περιπτώσεις, αφού στην περίπτωση ανώμαλης κατανομής των απορροφητικών υλικών στις διάφορες επιφάνειες ανάλογα με τα απορροφητικά υλικά του κάθε τοίχου μπορεί να τύχει ένας εφαιπτομενικός τρόπος ταλάντωσης να είναι πιο έντονος από έναν αξονικό.

# Κλειστές διαδρομές επαπτομενικών τρόπων ταλάντωσης



(a)

$$n_x=1, n_y=1, n_z=0$$



(b)

$$n_x=3, n_y=2, n_z=0$$

# Άσκηση 2

- Σε ένα ορθογώνιο δωμάτιο με διαστάσεις  $4 \times 5 \times 2.8$  m παρατηρούμε έντονο συντονισμό στα 103 Hz, τον οποίο θέλουμε να τον αποδυναμώσουμε. Έχουμε στη διάθεσή μας μικρή ποσότητα απορροφητικού panel. Προτείνεται τρόπο τοποθέτησης του panel (σε ποιους τοίχους πρέπει να μπει) ώστε να έχουμε το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Δίνεται  $c=243$  m/s.

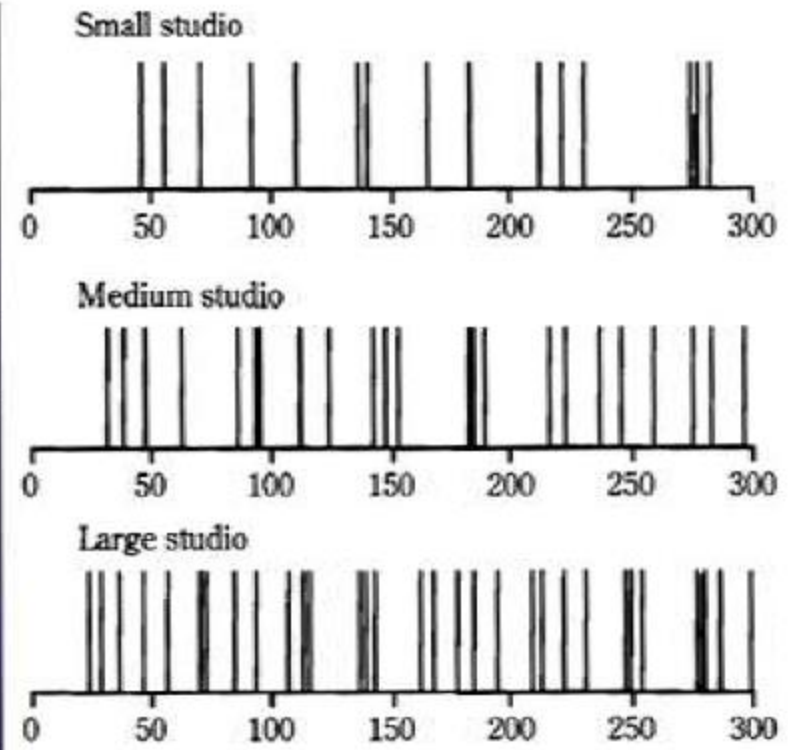
# Υπολογισμός ιδιοσυχνοτήτων

Studio dimensions.

	Ratio	Small studio	Medium studio	Large studio
Height	1.00	8.00 ft	12.00 ft	16.00 ft
Width	1.28	10.24 ft	15.36 ft	20.48 ft
Length	1.54	12.32 ft	18.48 ft	24.64 ft
Volume		1,000 cu ft	3,400 cu ft	8,000 cu ft

Studio resonances in Hz.

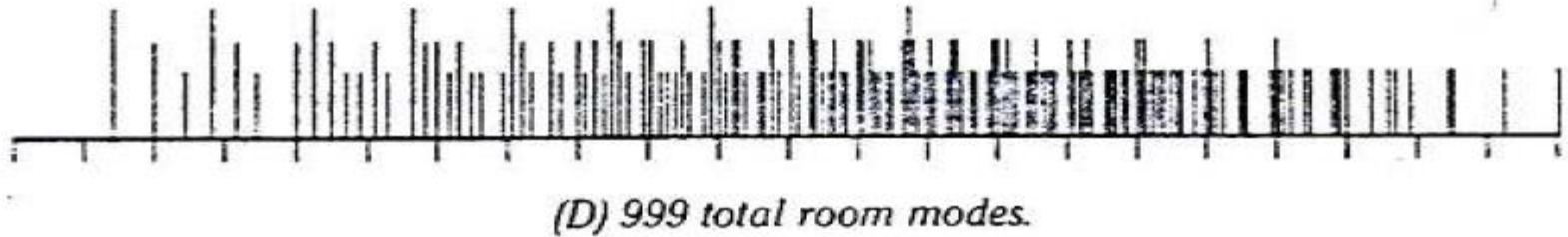
	Small studio	Medium studio	Large studio
Number of axial modes below 300 Hz	18	26	33
Lowest axial mode	45.9	30.6	22.9
Average mode spacing	14.1	10.4	8.4
Frequency corresp to room diagonal,	31.6	21.0	15.8
Assumed reverb, time of studio, second	0.3	0.5	0.7
Mode bandwidth ( $2.2/RT60$ )	7.3	4.4	3.1



Σχήμα 18 Συντονισμοί για χώρους διαφορετικού όγκου, αλλά ίσων αναλογιών [12]

# Κατανομή ιδιοσυχνοτήτων

Κυβικό δωμάτιο



Δωμάτιο με βέλτιστες αναλογίες



# Προτεινόμενες αναλογίες διαστάσεων

		Height	Width	Length
Sepmeyer	A	1.00	1.14	1.39
	B	1.00	1.28	1.54
	C	1.00	1.60	2.33
Louden	D	1.00	1.40	1.90
	E	1.00	1.30	1.90
	F	1.00	1.50	2.50
Volkmann	G	1.00	1.50	2.50
Boner	H	1.00	$\sqrt[3]{2} = 1.26$	$\sqrt[3]{4} = 1.59$

Πίνακας 2. Διάφορες προτάσεις για βέλτιστες αναλογίες ενός χώρου [2], [4], [10]

# Άσκηση 1

- Προτείνεται εναλλακτικές διαστάσεις ορθογώνιου δωματίου σε κτίριο με ύψος ορόφου 2.8 m κάνοντας χρήση των αναλογιών του Serpeyer.