

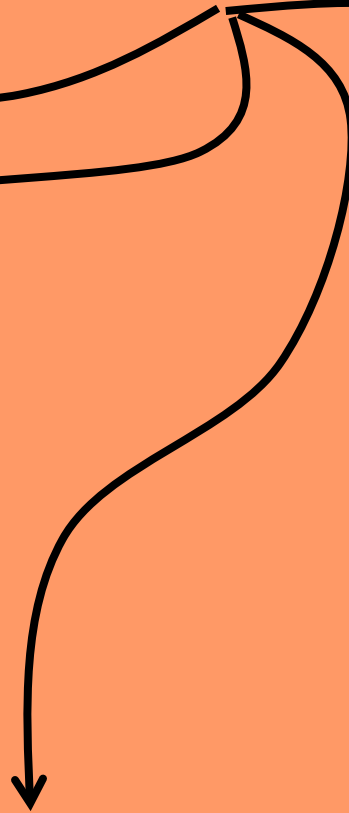
ΗΧΟΣ



ΚΥΜΑ



ΔΙΑΘΛΑΣΗ



ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

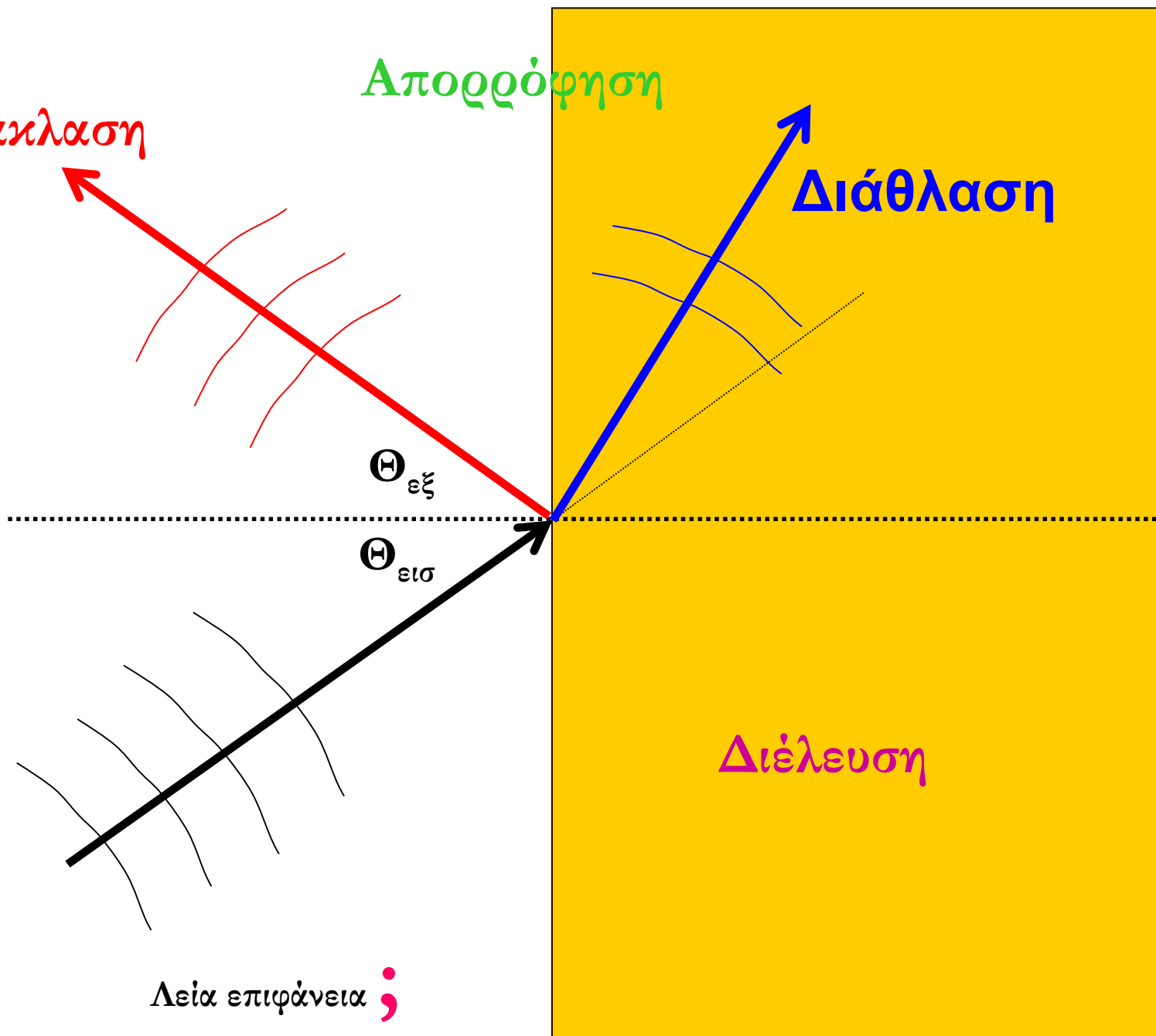
ΑΝΑΚΛΑΣΗ

ΣΥΜΒΟΛΗ

Ανάκλαση

Απορρόφηση

Διάθλαση



Λεία επιφάνεια ;

Ανωμαλίες επιφάνειας  $< \lambda$

Όταν ακούμε μια συναυλία σε ένα ανοιχτό χώρο το ηχητικό πεδίο που δημιουργούν οι ηχητικές πηγές (τα μουσικά όργανα ή τα ηχεία του συστήματος ενίσχυσης ) αποτελείται από τον απευθείας ήχο.

**Τις περισσότερες φορές** η ακρόαση της μουσικής ή οι συνομιλίες γίνονται σε κλειστούς χώρους (γραφείο, σπίτι, θέατρο, αίθουσες μουσικής, κινηματογράφος κλπ) .

Κατά ένα μεγάλο ποσοστό οι χώροι αυτοί είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα. Έχουμε λοιπόν *παράλληλες επιφάνειες που ευνοούν τις ανακλάσεις.*

Άρα σε κλειστή αίθουσα το τελικό ηχητικό κύμα που φτάνει στο αυτί μας αποτελείται από τον **απευθείας ήχο** και τον **ανακλώμενο ήχο**.

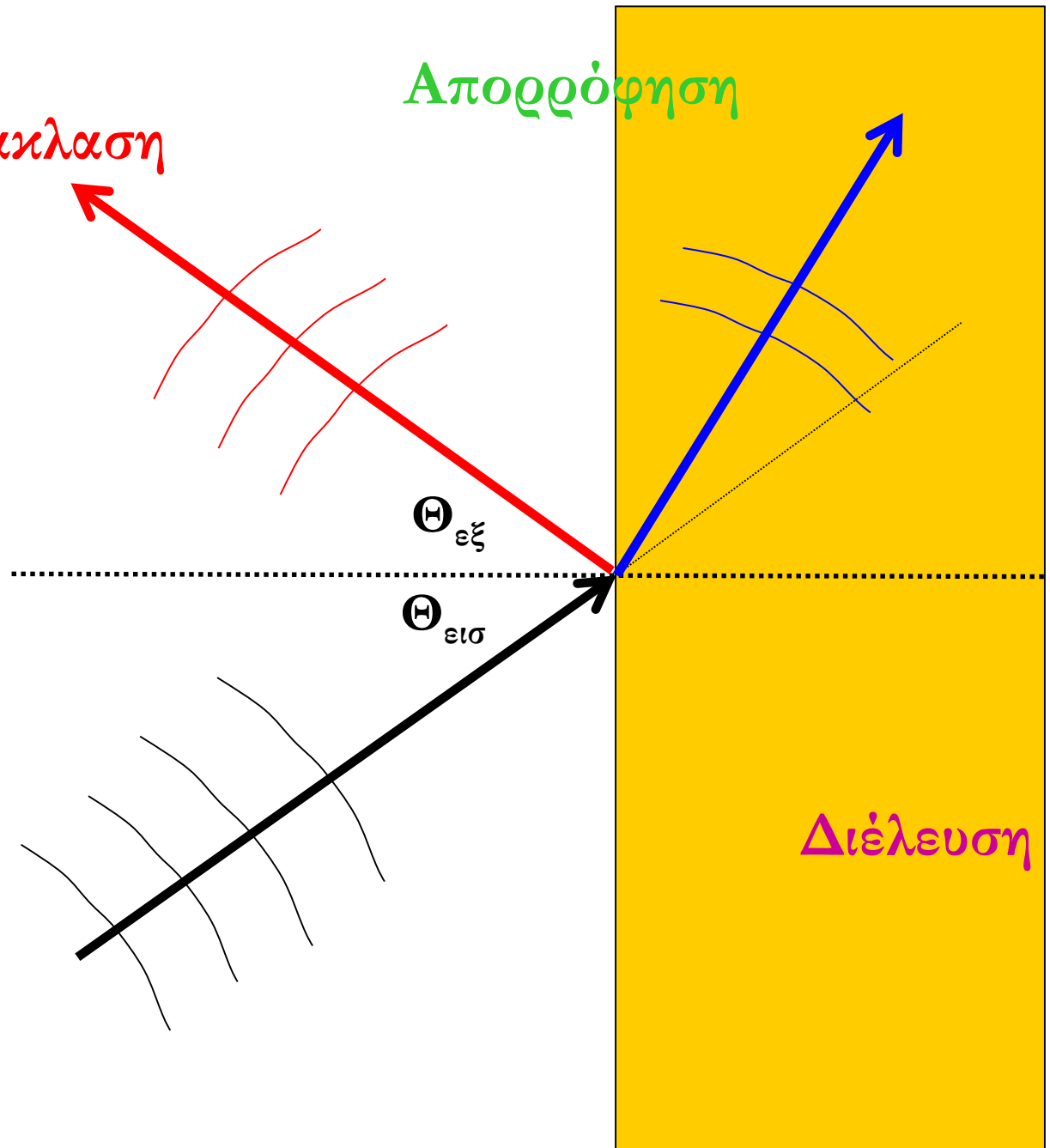
Απορρόφηση

Ανάκλαση

Συντελεστής ανάκλασης

Λόγος της ανακλούμενης  
ενέργειας προς την  
προσπιπτουσα

$$r = \frac{W_{αν}}{W_{πρ}}$$



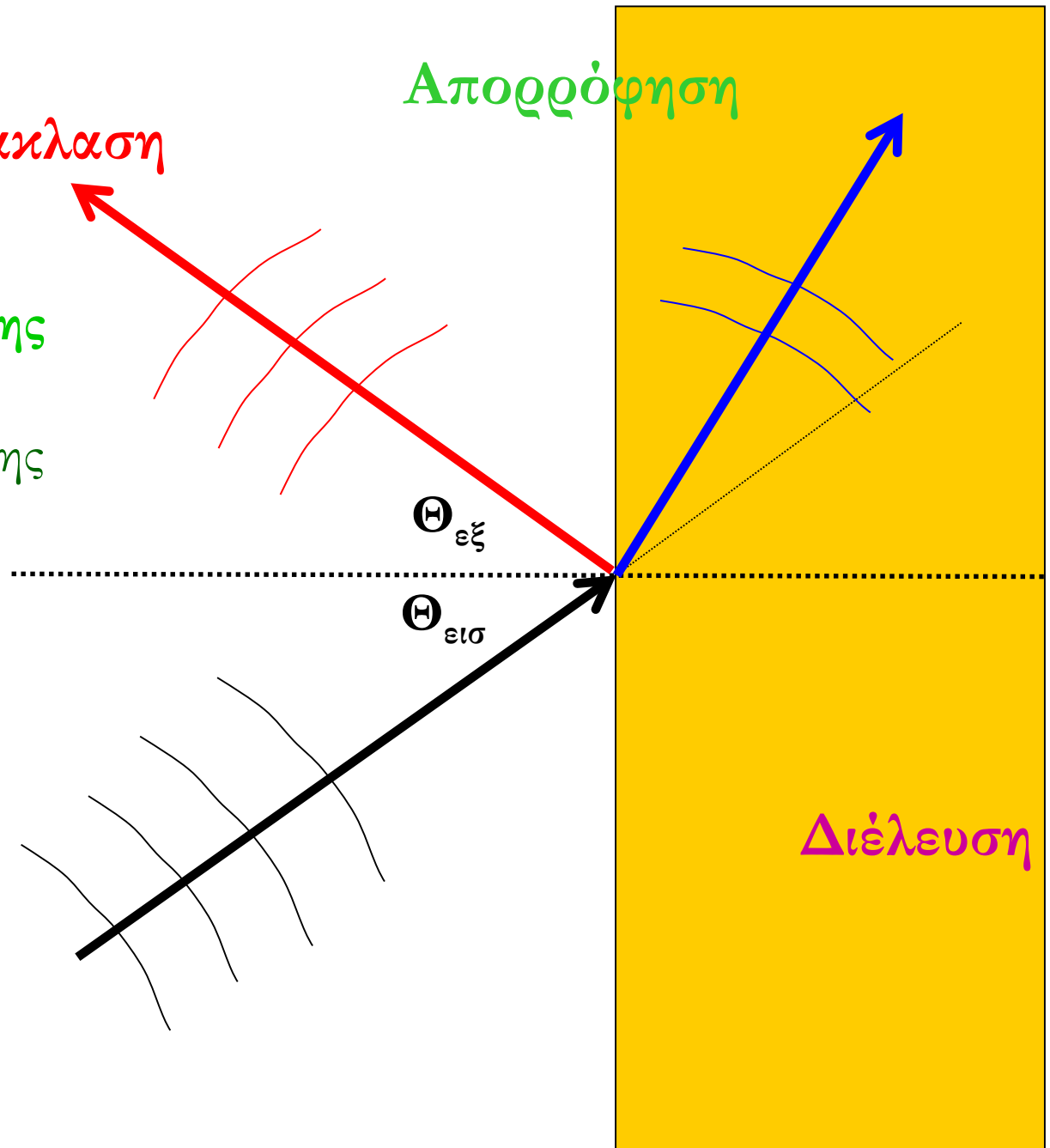
Απορρόφηση

Ανάκλαση

Συντελεστής απορρόφησης

Λόγος της απορροφούμενης  
ενέργειας προς την  
προσπιπτουσα

$$a = \frac{W_{\alpha\pi}}{W_{\pi\rho}}$$



Διέλευση

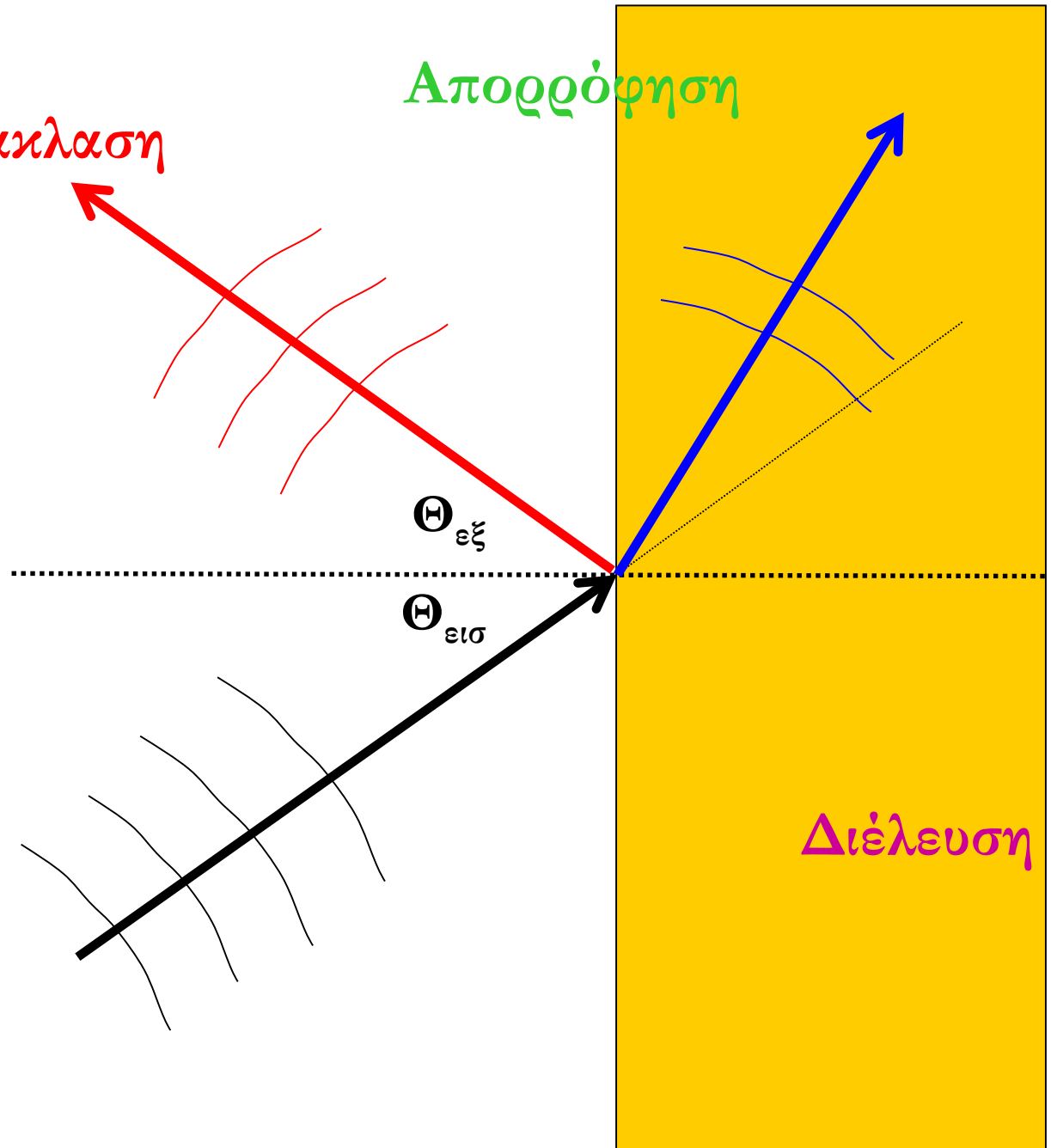
Απορρόφηση

Ανάκλαση

Συντελεστής διέλευσης

Λόγος της διερχόμενης  
ενέργειας προς την  
προσπιπτουσα

$$t = \frac{W_{\delta i}}{W_{\pi\rho}}$$



Διέλευση

$$r + a + t = 1$$

Για τις ανάγκες του μαθήματός μας θα θεωρήσουμε το συντελεστή διέλευσης πολύ μικρό και θα τον αγνοήσουμε οπότε

$$r + a = 1$$

## Τι σημαίνει ότι ο ήχος απορροφάται;

Το ηχητικό κύμα μεταφέρει ενέργεια (τα μόρια του αέρα ταλαντώνονται)

Όταν προσπίπτει σε επιφάνεια (τοίχο) προκαλεί ταλάντωση των μορίων της επιφάνειας

Μέρος της ενέργειας των μορίων του τοίχου μετατρέπεται σε θερμότητα

Ποιο χαρακτηριστικό του κύματος (για απλό ήχο) μεταβάλλεται όταν έχουμε απορρόφηση;                      συχνότητα;                      ταχύτητα;                      πλάτος;

## Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται:

- 1) Από τη συχνότητα του ήχου
- 2) Από το υλικό της επιφάνειας
- 3) Από τη φύση της επιφάνειας
- 4) Από τη γωνία πρόσπτωσης





Συντελεστής απορρόφησης;

$$\alpha=1$$

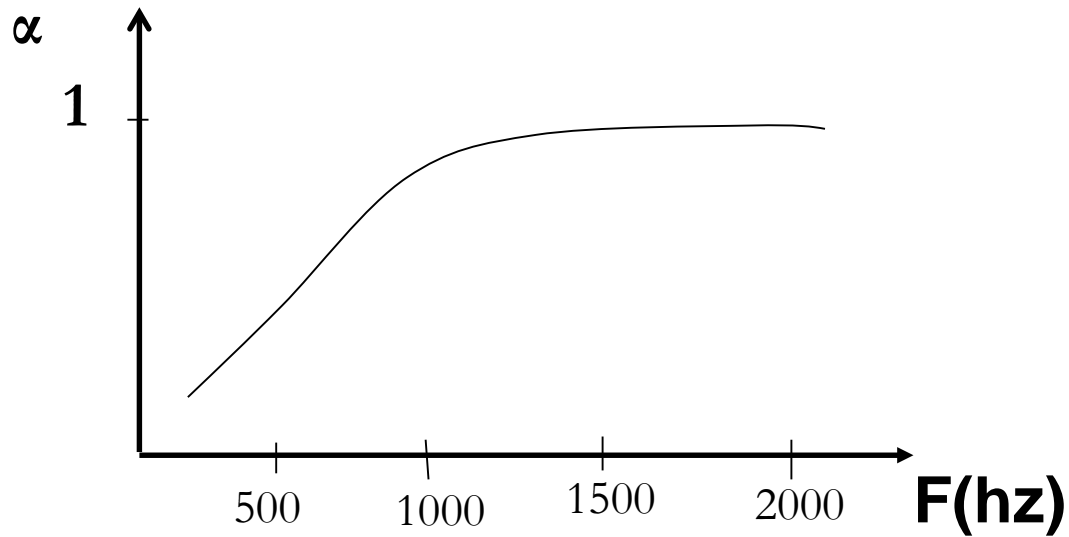
Τα ηχοαπορροφητικά υλικά χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο του ήχου σε ένα χώρο και όχι για τον έλεγχο της μετάδοσης του ήχου ανάμεσα σε δύο χώρους

Το ποσό ηχοαπορρόφησης σ' ένα χώρο ενδιαφέρει άμεσα αρχιτέκτονες και πολιτικούς μηχανικούς για:

- 1) Να ελαττώσουν τη στάθμες θορύβου
- 2) Να εξαλείψουν την ηχώ
- 3) Να ελέγξουν την μετήχηση

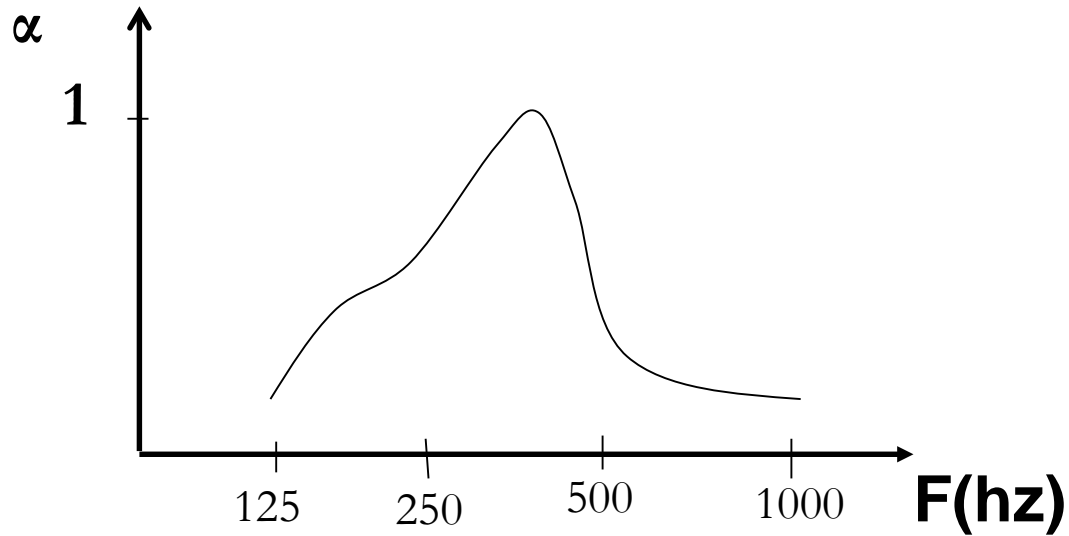
# Ηχοαπορροφητικά υλικά

## Πορώδη υλικά



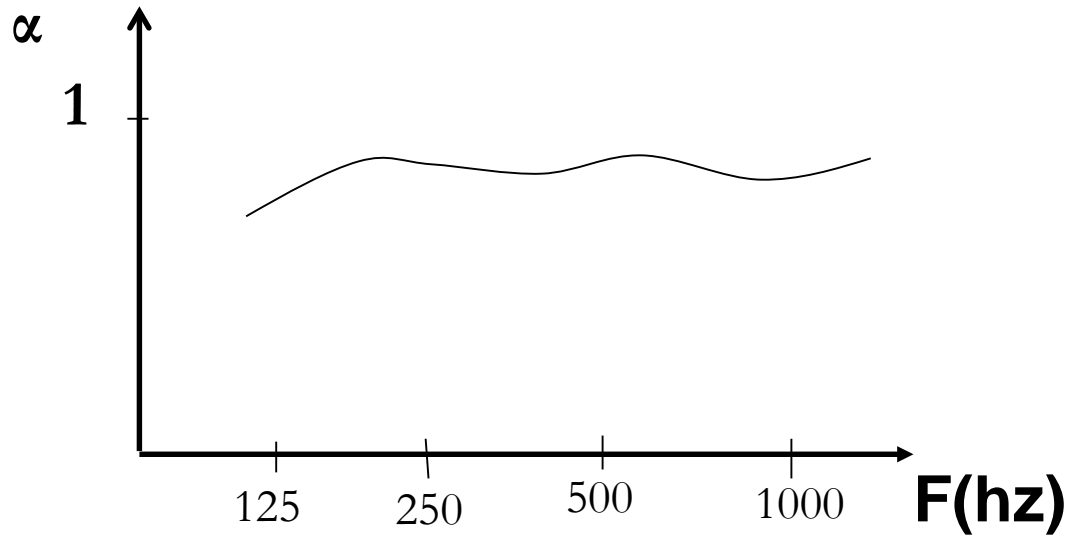
Ινώδη υλικά όπως χαλιά, υφάσματα, ρουχισμός, πάνελ από υαλοβάμβακα κλπ.

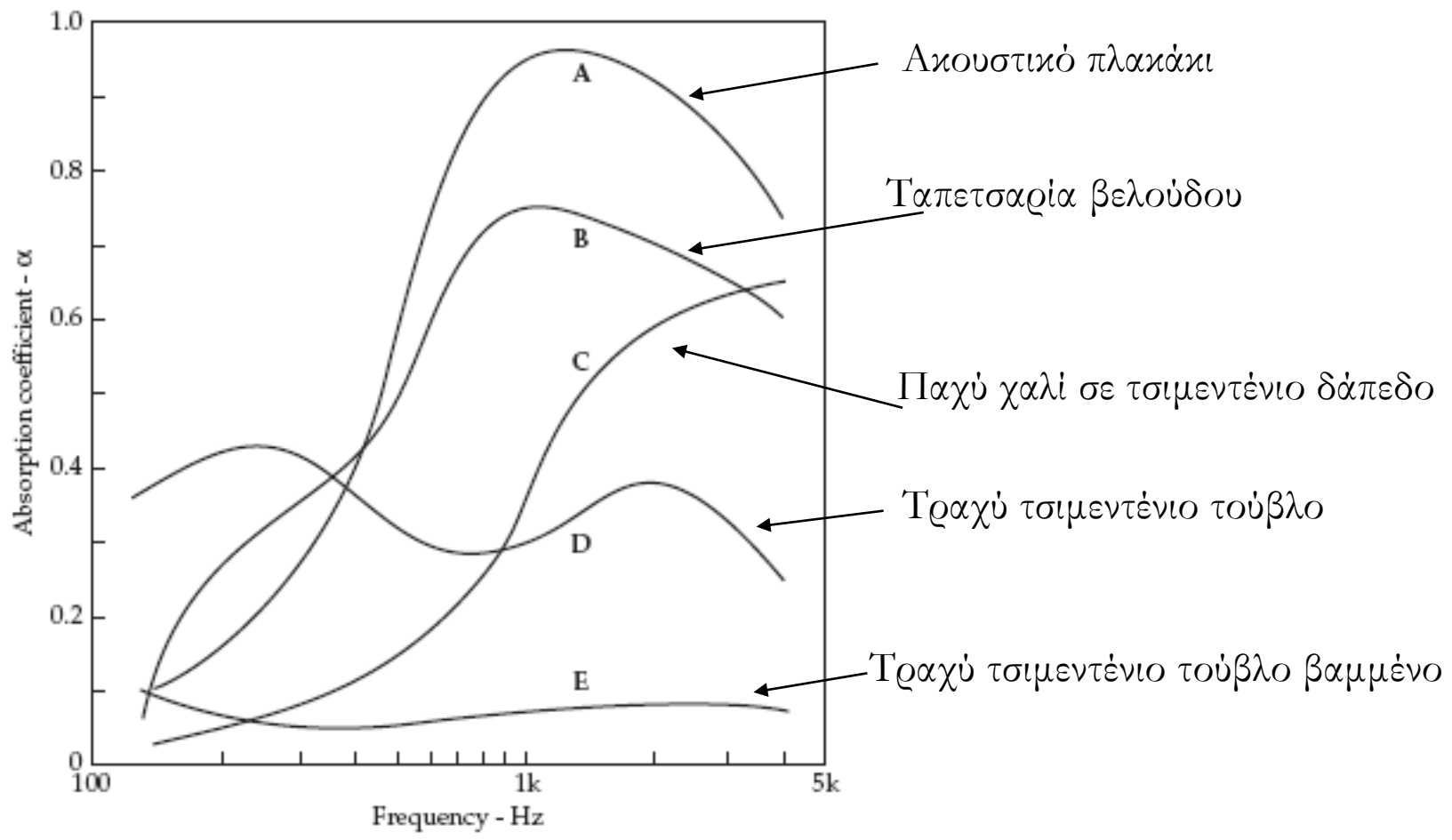
## Παλλόμενα υλικά



Υλικά με πολλά φύλλα σχετικά ελαστικά (κόντρα πλακέ).  
Πολλές φορές ένα φύλλο συμπαγούς υλικού με ένα στρώμα  
αέρα μεταξύ αυτού και του τοιχώματος μιας αίθουσας.

# Σύνθετα υλικά





<b>Υλικό</b>	<b>Μέσος συντελεστής απορρόφησης</b>
ανοιχτό παράθυρο	1
χοντρή τσόχα	0,6
κουρτίνες	0,4-0,7
ακουστικά πλακάκια	0,2-0,3
χαλιά	0,2
άνθρωπος	0,1-0,2
σοβάς	0,03
βαμμένο ξύλο	0,03
μάρμαρο	0,01

«ανηχωϊκές αίθουσες»  
Αίθουσες με πολύ  
απορροφητικά τοιχώματα  
Χρησιμοποιούνται για  
μετρήσεις ήχου





# Ηχητική απορροφητικότητα μιας επιφάνειας

Αν μια επιφάνεια έχει εμβαδόν  $S$  και συντελεστή απορρόφησης  $\alpha$ , η ηχητική απορροφητικότητα της επιφάνειας αυτής είναι:

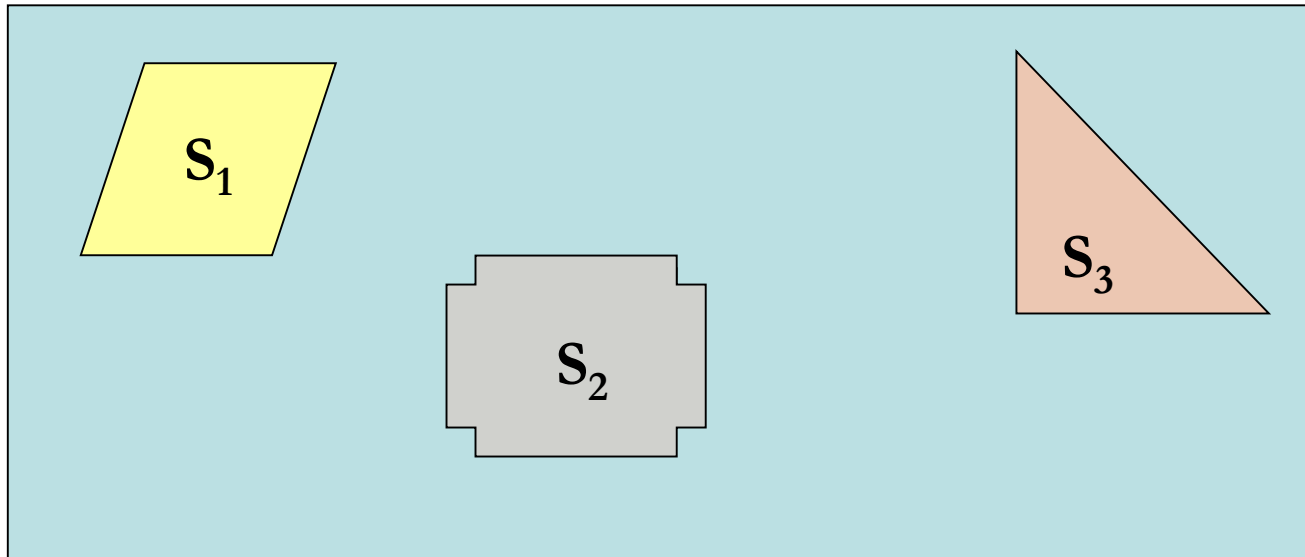
$$A = \alpha S$$

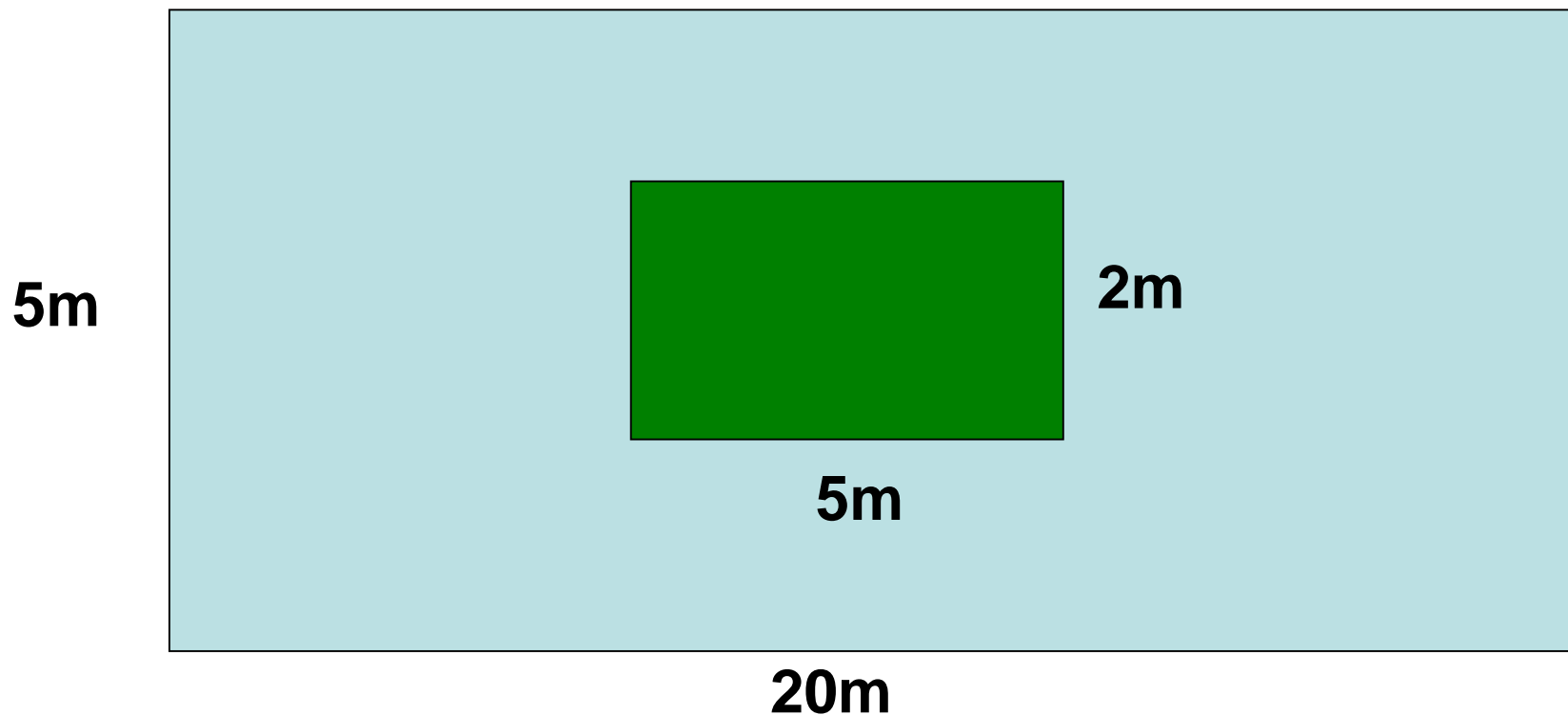


# Ηχητική απορροφητικότητα μιας επιφάνειας

Αν μια επιφάνεια είναι σύνθετη και αποτελείται από πολλά υλικά η ηχητική απορροφητικότητα της επιφάνειας αυτής είναι:

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + \dots$$





$$\alpha_{\text{τοιχου}} = 0,02$$

$$E_{\text{τοιχου}} = 100\text{m}^2$$

$$\alpha_{\text{κουρτ}} = 0,4$$

$$E_{\text{κουρτ}} = 10\text{m}^2$$

$$A = (100 - 10) \cdot 0,02 + 10 \cdot 0,4 = 5,8\text{m}^2$$

# ΗΧΩ

Το αυτί για να μπορέσει να διακρίνει το ανακλώμενο κύμα ως ξεχωριστό από τον αρχικό ήχο πρέπει η καθυστέρηση στη λήψη του ανακλώμενου κύματος από το αυτί να είναι μεγαλύτερη από **0,1sec**

Άρα η ανακλαστική επιφάνεια πρέπει να είναι σε απόσταση μεγαλύτερη από:

$$s = v_{\eta\chi} \cdot t = 343 \frac{m}{sec} \cdot 0,05 sec = 17,2m$$

Η ηχώ έχει μεγαλύτερη μικρότερη ή ίση ένταση με τον αρχικό ήχο και γιατί;

Αν μετά τον αρχικό ήχο λόγω πολλαπλών ανακλάσεων φτάσει στο αυτί μεγάλος αριθμός ηχητικών κυμάτων με χρόνο άφιξης μεταξύ τους μικρότερο από **0,01sec** τότε ακούγεται παρατεταμένος ήχος

## ΑΝΤΗΧΗΣΗ ή ΜΕΤΗΧΗΣΗ

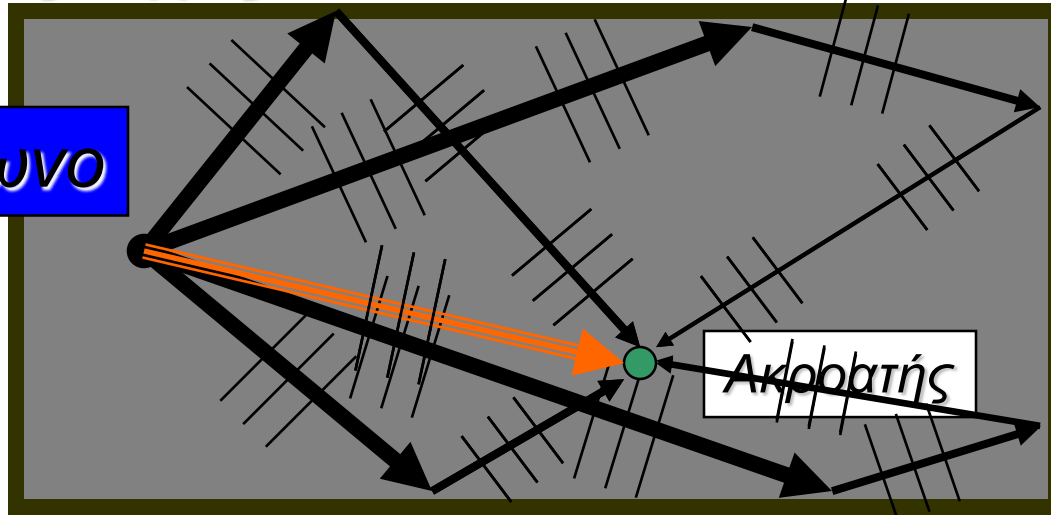
Τελικό αποτέλεσμα

Παρατεταμένη διάρκεια ήχου μετά το σταμάτημα της αρχικής πηγής

## Μετήχηση (Reverberation)

Ευθύς Ήχος ⇒

Μεγάφωνο



Ακροατής

Ήχος Μετήχησης

ακουστότητα

εναντίον

ευκρίνειας

Συντελεστής ευκρίνειας ενός χώρου ορίζουμε το ποσοστό των μονοσύλλαβων λέξεων που γίνονται αντιληπτές.

Για να είναι αποδεικτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 80%.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά από πλευράς ακουστικής μιας αίθουσας είναι πόσο γρήγορα σβήνει ένας ήχος.

# Wallace Sabine

(Καθηγητής Harvard 1868-1919)

Έθεσε το ερώτημα: “πόσος χρόνος χρειάζεται για να μειωθεί η ένταση του ήχου στο 1 εκατομμυριοστό (-60 dB) της αρχικής του τιμής;”



**Wallace  
Sabine**

Ο **χρόνος μετήχησης**  $\tau_R$ , είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να μειωθεί η ένταση του ήχου κατά ένα παράγοντα  $10^{-6}$  (- 60dB) της αρχικής τιμής του.

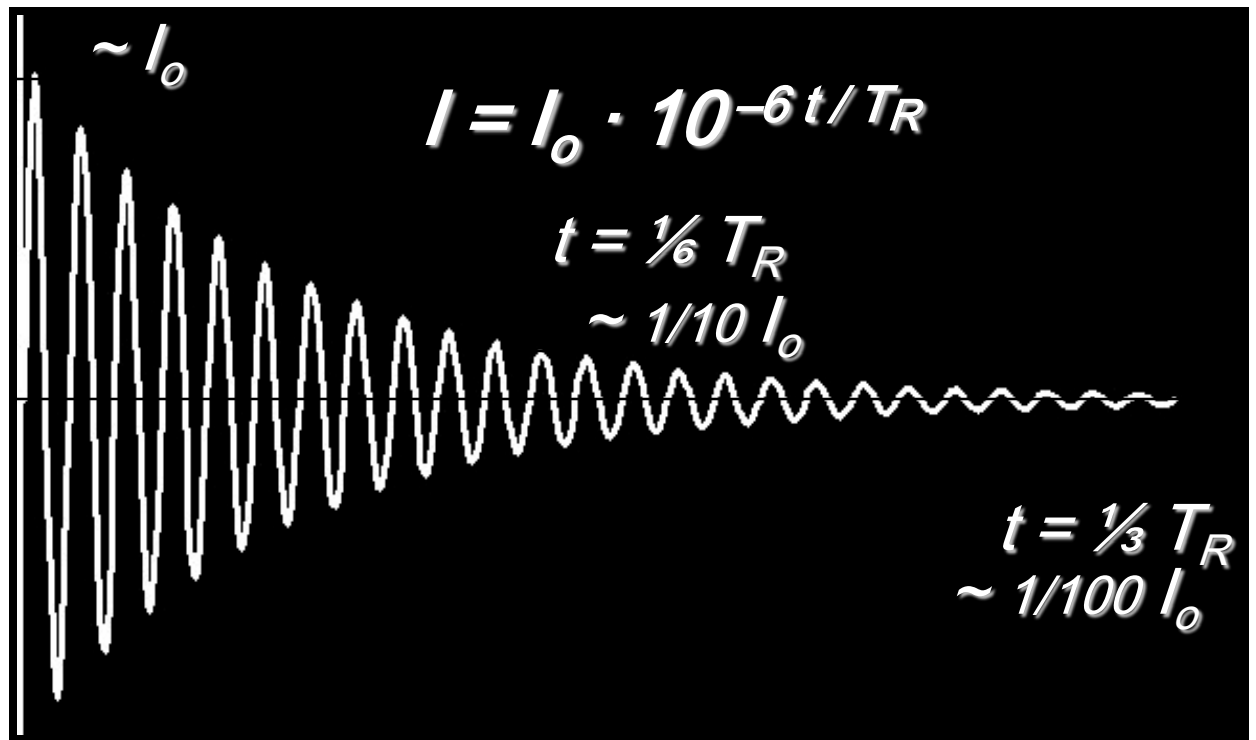


**Boston Symphony Hall**



# Ένταση ήχου σε δωμάτιο:

Πλάτος  
πίεσης



Χρόνος  $t(ms)$

$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

σε m<sup>3</sup>

σε m<sup>2</sup>

- $V$  είναι ο όγκος του δωματίου.
- $A$  είναι η συνολική απορροφητικότητα του χώρου δηλαδή

$$A = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \alpha_4 S_4 + \dots$$

Όπου  $\alpha$  ο συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας και  $S$  το εμβαδόν της επιφάνειας

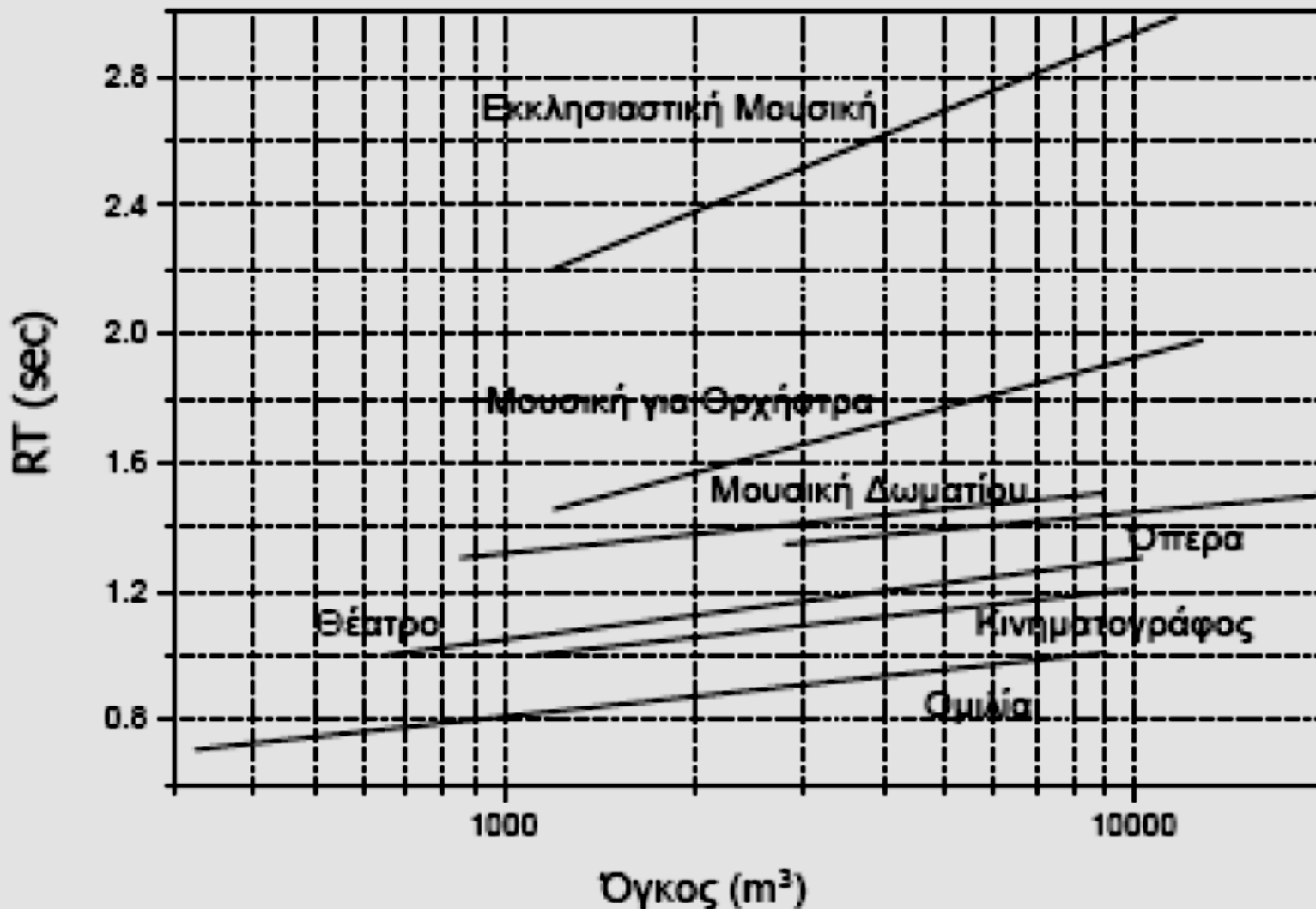
Μία από τις σημαντικότερες (ακουστικά) ιδιότητες μιας αίθουσας είναι ο χρόνος μετήχησης

Ισχύει για αίθουσες με διαστάσεις μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος του ήχου

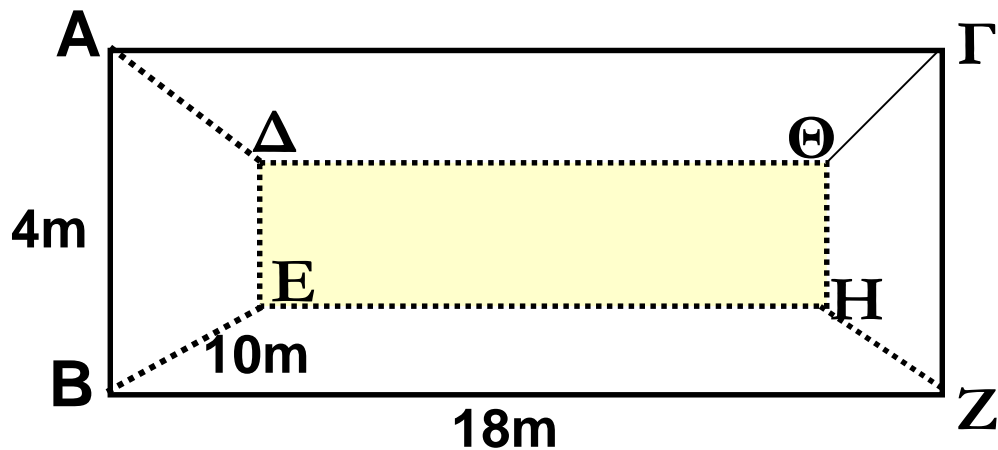
Εξαρτάται:

- 1) Από τις διαστάσεις της αίθουσας
- 2) Από τον τρόπο και το πόσο απορροφούν οι διάφορες επιφάνειες

# Ποιες οι αποδεκτές τιμές του χρόνου μετήχησης;



Ορθογώνια αίθουσα έχει διαστάσεις 10 x 18 x 4 m. Οι τοίχοι είναι καλυμμένοι με τσιμέντο που έχει συντελεστή απορρόφησης  $\alpha_1=0,04$ . Να υπολογιστεί ο χρόνος μετήχησης.



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + a_4 S_4 + \dots$$

Τοίχος ABDE:  $\alpha_{T1} = (10 \times 4) 0,04 = 1,6 \text{ m}^2$

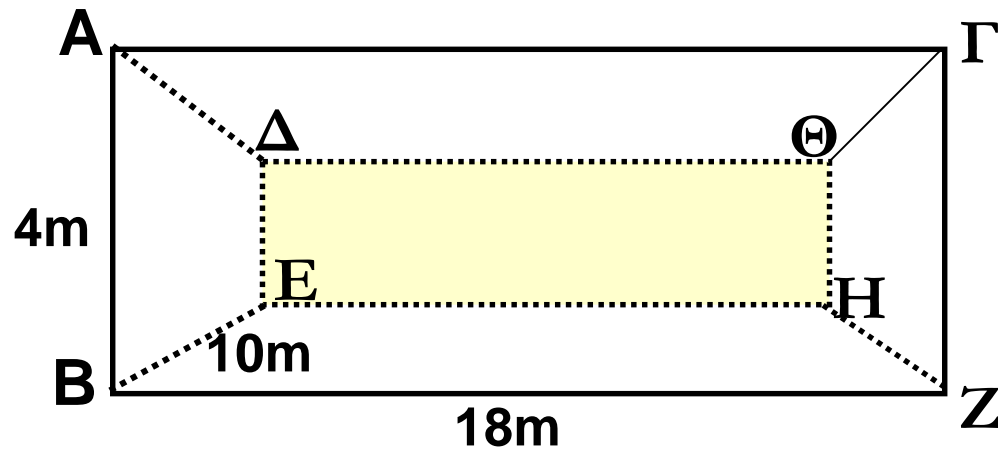
Τοίχος HFGZ:  $\alpha_{T2} = (10 \times 4) 0,04 = 1,6 \text{ m}^2$

Τοίχος EDFH:  $\alpha_{T3} = (18 \times 4) 0,04 = 2,88 \text{ m}^2$

Τοίχος ABZG:  $\alpha_{T4} = (18 \times 4) 0,04 = 2,88 \text{ m}^2$

Οροφή ADFG:  $\alpha_{T5} = (10 \times 18) 0,04 = 7,2 \text{ m}^2$

Πάτωμα BEHZ:  $\alpha_{T6} = (10 \times 18) 0,04 = 7,2 \text{ m}^2$



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

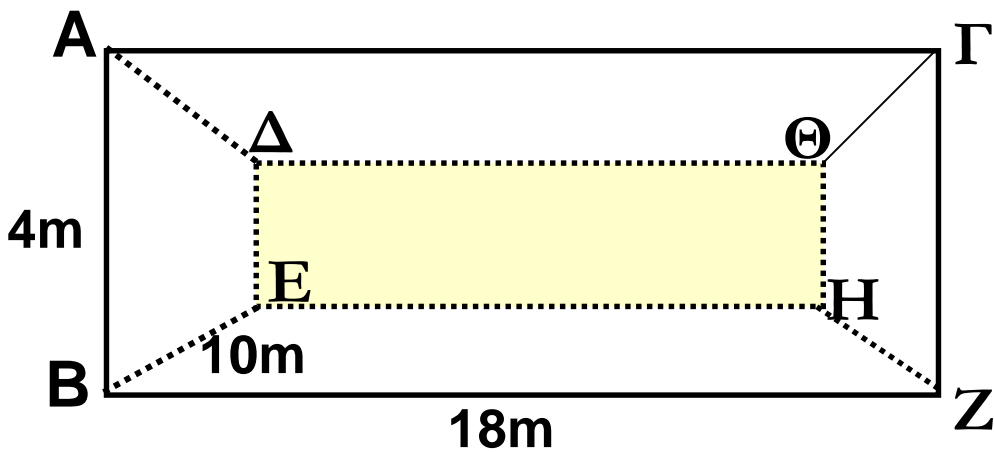
Άρα  $A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} = 23,36 \text{ m}^2$

$$V = 10 \times 18 \times 4 = 720 \text{ m}^3$$

Και ο χρόνος μετήχησης είναι:

$$\tau_R = 0,161 \frac{720}{23,36} = 4,96 \text{ sec}$$

Για αίθουσα διαλέξεων ο χρόνος αυτός δεν είναι αποδεκτός.



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

Τοίχος ΑΒΔΕ:  $\alpha_{T1} = (10 \times 4) 0,04 = 1,6 \text{ m}^2$

Τοίχος ΗΘΓΖ:  $\alpha_{T2} = (10 \times 4) 0,04 = 1,6 \text{ m}^2$

Τοίχος ΕΔΘΗ:  $\alpha_{T3} = (18 \times 4) 0,04 = 2,88 \text{ m}^2$

Τοίχος ΑΒΖΓ:  $\alpha_{T4} = (18 \times 4) 0,04 = 2,88 \text{ m}^2$

Οροφή ΑΔΘΓ:  $\alpha_{T5} = (10 \times 18) 0,04 = 7,2 \text{ m}^2$

Πάτωμα ΒΕΗΖ:  $\alpha_{T6} = (10 \times 18) 0,04 = 7,2 \text{ m}^2$

Αν διαθέτω πλάκες απορρόφησης ήχου με συντελεστή απορρόφησης κατά **900%** μεγαλύτερο από αυτόν των τοίχων και στρώσω το ταβάνι με αυτές βελτιώνω σημαντικά την ακουστική της αίθουσάς μου;

→  $\alpha_{T5} = (10 \times 18) 0,4 = 72 \text{ m}^2$

Άρα  $A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} = 88,16 \text{ m}^2$

Και ο χρόνος μετήχησης είναι:  $\tau_R = 0,161 \frac{720}{88,16} = 1,31 \text{ sec}$

Πολύ καλύτερα τα πράγματα



Ορθογώνια αίθουσα έχει διαστάσεις 15 x 20 x 5 m. Οι τοίχοι είναι καλυμμένοι με σοβά που έχει συντελεστή απορρόφησης  $\alpha_1=0,05$ . Η αίθουσα προορίζεται διαλέξεις και είναι χωρητικότητας 100 ατόμων. Για την ακουστική μελέτη της αίθουσας απαιτούμε να λειτουργεί ικανοποιητικά (συντελεστής μετήχησης 0,9 και όταν είναι μισογεμάτη δηλαδή αν έχει μέσα 50 άτομα.

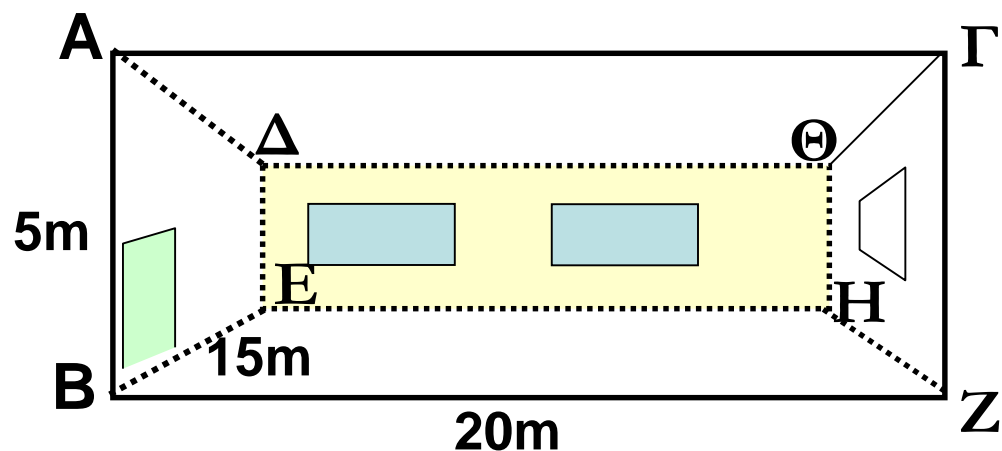
Θεωρείστε απορρόφηση  $0,4\text{m}^2/\text{άτομο}$ .

Στον τοίχο ΑΒΕΔ υπάρχει πόρτα 1 x 2 με συντελεστή απορρόφησης 0,08

Στον τοίχο ΕΔΘΗ υπάρχουν 2 παράθυρα  $2\text{m}^2$  το καθένα που είναι ανοιχτά.

Στον τοίχο ΗΘΓΖ υπάρχει παράθυρο  $2\text{m}^2$  με  $\alpha=0,01$

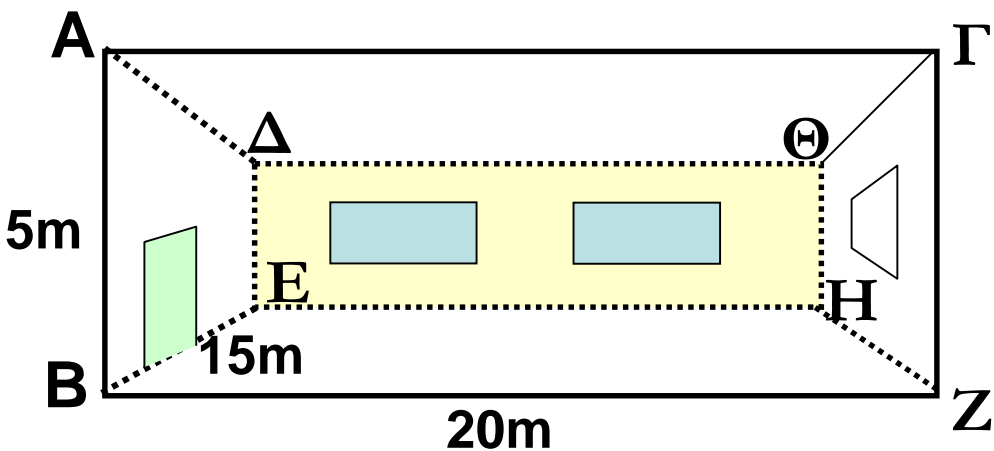
Στον τοίχο ΑΒΖΓ υπάρχει κουρτίνα  $20\text{m}^2$  με  $\alpha=0,2$





α) Πόσος είναι ο χρόνος μετήχησης της αίθουσας;

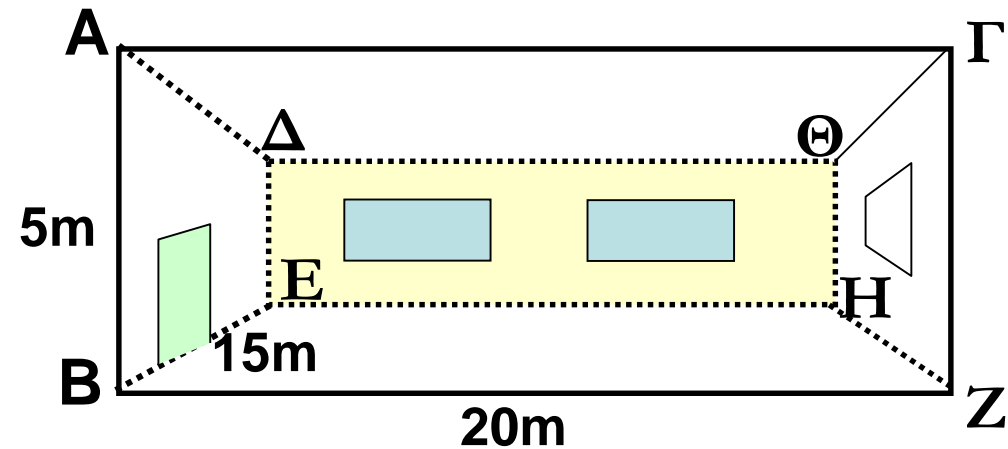
β) Αν θέλουμε ο χρόνος μετήχησης της αίθουσας να είναι **0,9** ποιος πρέπει να είναι ο συντελεστής απορρόφησης υλικού με το οποίο πρέπει να επιστρώσουμε την οροφή;



## Τύπος Sabine

$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

$$A = a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3 + a_4 S_4 + \dots$$



Τοίχος ABΔΕ:  $\alpha_{\tau_1} = 2 \times 0,08 + [(15 \times 5) - 2] 0,05 = 3,81 \text{m}^2$

Τοίχος ΗΘΓΖ:  $\alpha_{\tau_2} = 2 \times 0,01 + [(15 \times 5) - 2] 0,05 = 3,67 \text{m}^2$

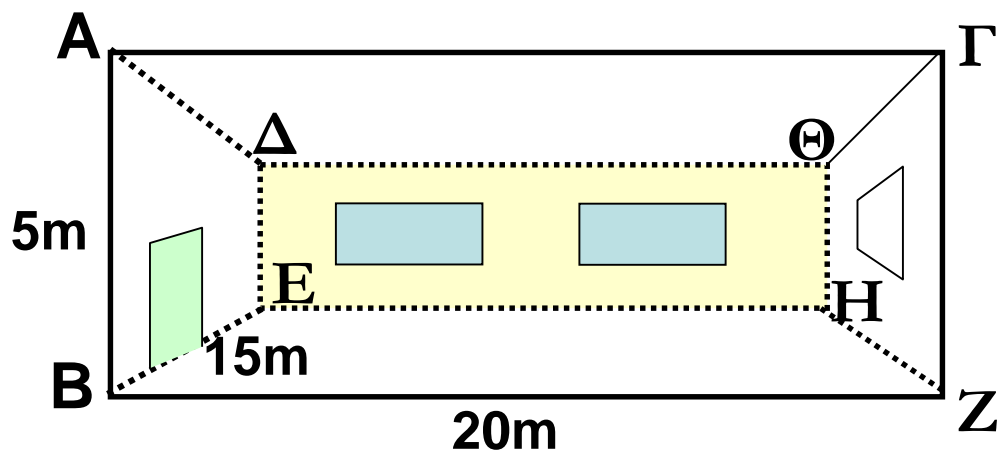
Τοίχος ΕΔΘΗ:  $\alpha_{\tau_3} = 4 \times 1 + [(20 \times 5) - 4] 0,05 = 8,8 \text{m}^2$

Τοίχος ΑΒΖΓ:  $\alpha_{\tau_4} = 20 \times 0,2 + [(20 \times 5) - 20] 0,05 = 8 \text{m}^2$

Οροφή ΑΔΘΓ:  $\alpha_{\tau_5} = (20 \times 15) 0,05 = 15 \text{m}^2$

Πάτωμα ΒΕΗΖ:  $\alpha_{\tau_6} = (20 \times 15) 0,05 = 15 \text{m}^2$

Αιροατήριο:  $\alpha_{\tau_7} = 50 \times 0,4 = 20 \text{m}^2$



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

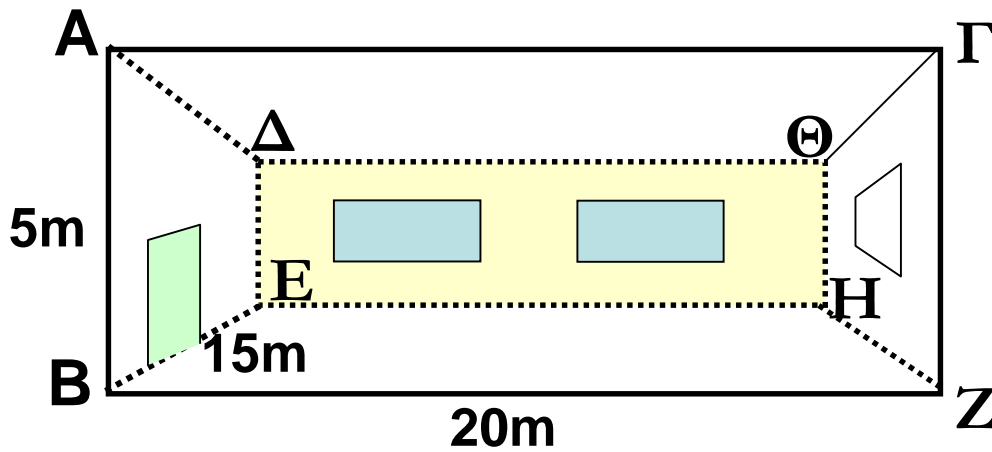
Άρα  $A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} + \alpha_{T7} = 74,28 \text{ m}^2$

$$V = 20 \times 15 \times 5 = 1500 \text{ m}^3$$

Και ο χρόνος μετήχησης είναι:

$$\tau_R = 0,161 \frac{1500}{74,28} = 3,25 \text{ sec}$$

Για αίθουσα διαλέξεων ο χρόνος αυτός είναι απαράδεκτος.



$$\tau_R = 0,161 \frac{V}{A} \text{ sec}$$

$$A = \alpha_{T1} + \alpha_{T2} + \alpha_{T3} + \alpha_{T4} + \alpha_{T5} + \alpha_{T6} + \alpha_{T7} = 74,28 \text{ m}^2$$

$$59,28 \text{ m}^2$$

$$V = 20 \times 15 \times 5 = 1500 \text{ m}^3$$

$$\text{Οροφή } A\Delta\Theta\Gamma: \alpha_{T5} = (20 \times 15) a = 300a$$

Και ο χρόνος μετήχησης είναι:

$$\tau_R = 0,161 \frac{1500}{59,28 + 300a} \Rightarrow$$

↓  
**0,9**

$$\dots \dots \dots \Rightarrow a = 0,7$$

Άσκηση: Μια αίθουσα έχει όγκο  $2625\text{m}^3$  και χρόνο μετήχησης  $8,1\text{sec}$  για ήχο συχνότητας  $1\text{KHz}$ . Όταν η αίθουσα είναι πλήρης ο χρόνος μετήχησης γίνεται  $3,6\text{sec}$ . Αν η απορρόφηση ανά σπουδαστή είναι  $0,5\text{m}^2$  **πόσοι σπουδαστές βρίσκονται στην αίθουσα;**

$$\tau = 0,161 \frac{V}{A} \text{sec}$$

Ξέρω  $V=2625\text{m}^3$   
 $\tau_1=8,1\text{sec}$   
 $\tau_2=3,6\text{sec}$   
 $A_{\sigma\pi\tau}=0,5\text{m}^2$

$$\tau_1 = 0,161 \frac{V}{A_1} \Leftrightarrow A_1 = 0,161 \frac{2625}{8,1} \Leftrightarrow A_1 = 52,2\text{m}^2$$

$$A_2 = 0,161 \frac{2625}{3,6} \Leftrightarrow A_2 = 117,4\text{m}^2$$

Ποιος προκάλεσε τη διαφορά στην απορροφητικότητα της αίθουσας;

**Οι σπουδαστές**

Πόσο άλλαξε η απορροφητικότητα της αίθουσας;

$$A_2 - A_1 = 117,4 - 52,2 = 65,2 m^2$$

απορροφητικότητα ανά σπουδαστή;  $0,5 m^2$

$$\frac{\delta A}{0,5} = \frac{65,2}{0,5} = 130 \text{ σπουδαστές}$$

**ΤΕΛΟΣ**