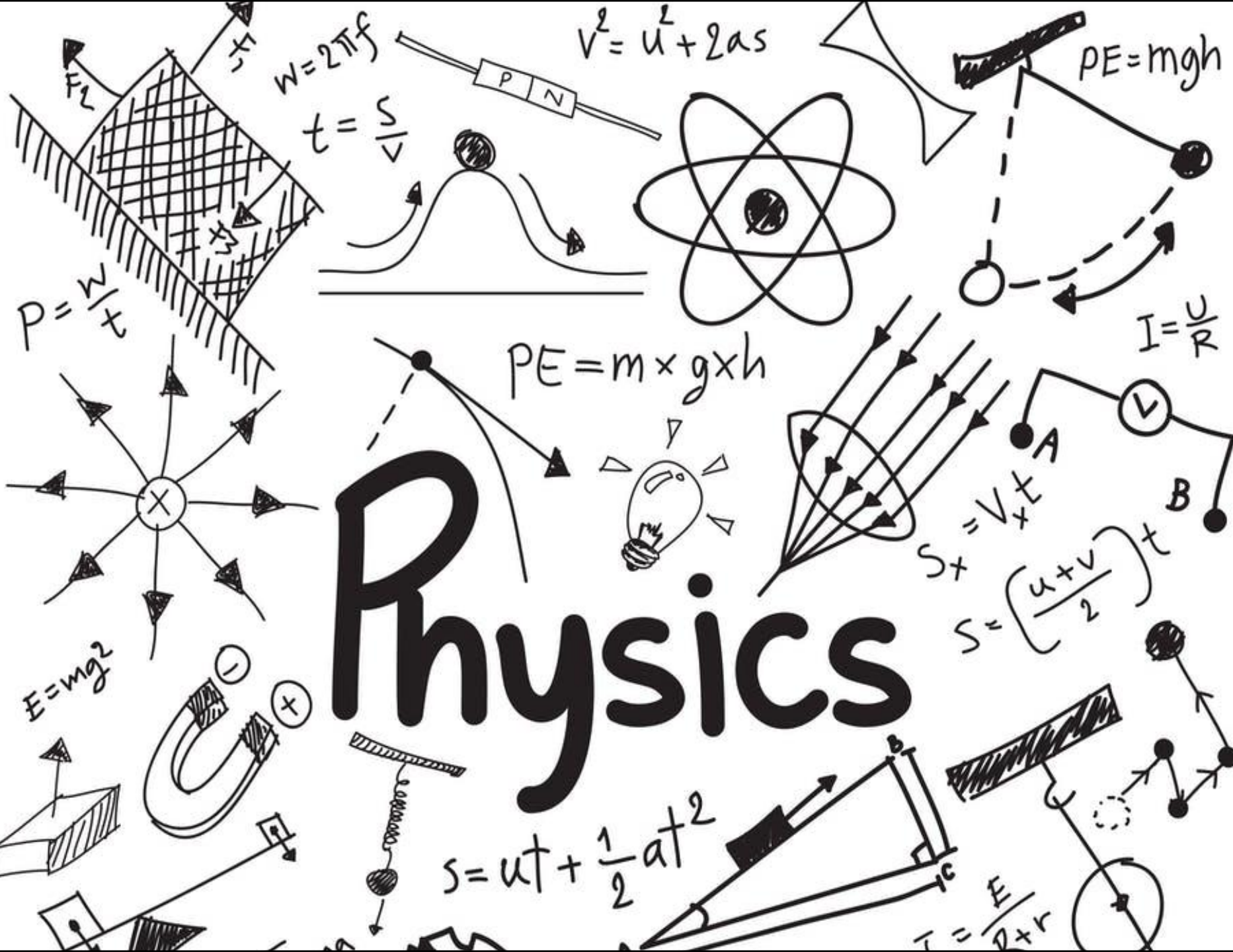


# Physics



# Reminder...

- Διαλέξεις

- Προαιρετική παρουσία!

- Είστε εδώ γιατί **θέλετε** να ακούσετε/συμμετέχετε

- Δεν υπάρχουν απουσίες

- Υπάρχει σεβασμός στους συναδέλφους σας και στην εκπαιδευτική διαδικασία

- Προστατέψτε εσάς και τους συναδέλφους σας: απέχετε από το μάθημα αν δεν είστε/αισθάνεστε καλά



Εικόνα: Τα αυτιά του ανθρώπου έχουν εξελιχθεί να ακούν και να ερμηνεύουν ηχητικά κύματα ως φωνή ή ως ήχους. Κάποια ζώα, όπως το είδος αλεπούς με τα αυτιά νυχτερίδας, έχουν αυτιά που είναι προσαρμοσμένα να ακούν πολύ αδύναμους ήχους.

# Φυσική για Μηχανικούς

## Ηχητικά Κύματα

# Ηχητικά Κύματα

- Τρεις κατηγορίες ηχητικών κυμάτων

- **Ακουστικά κύματα**

- Μουσική, φωνή

- **Κύματα υποήχων (υπόηχοι)**

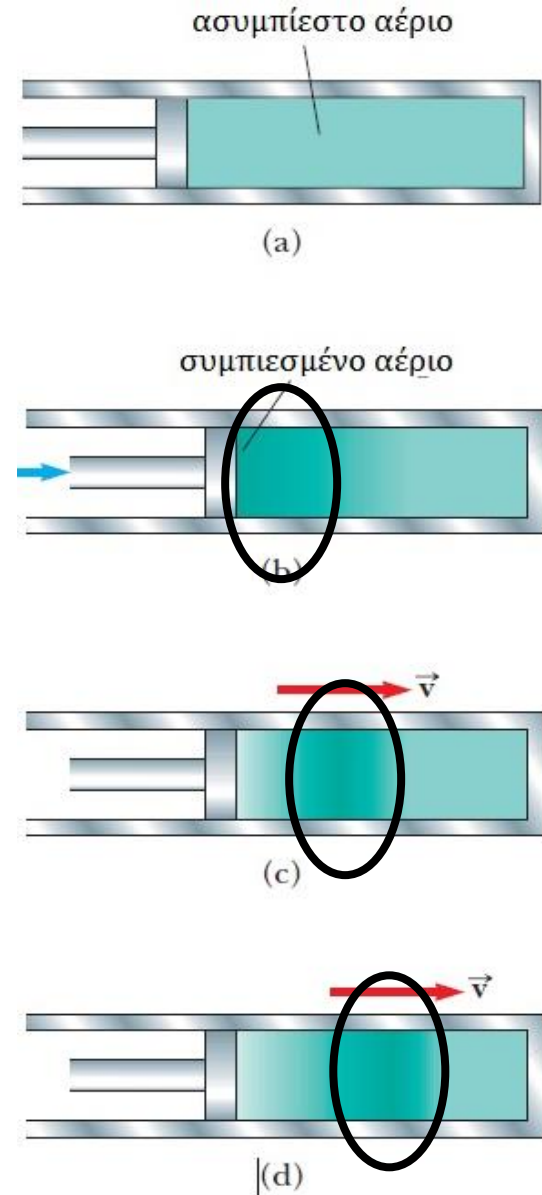
- Ελέφαντες, φάλαινες, και άλλα ζώα επικοινωνούν με υπόηχους
    - Έντονα φυσικά φαινόμενα παράγουν υπόηχους
      - Καταιγίδες, κατολισθήσεις, σεισμοί, ηφαιστειακή δραστηριότητα κ.α.

- **Κύματα υπερήχων (υπέρηχοι)**

- Σφυρίχτρες σκύλων, επικοινωνία νυχτερίδων
    - Ιατρική απεικόνιση

# Ηχητικά Κύματα

- Έμβολο σε ακινησία – (a)
  - Αέριο **ασυμπίεστο** και σε ομοιόμορφη κατανομή
- Έμβολο σε κίνηση προς τα δεξιά – (b)
  - **Πίεση** και **πυκνότητα** αερίου μπροστά στο έμβολο είναι **μεγαλύτερη** απ' ό,τι στο υπόλοιπο μέρος του
- Έμβολο σε ακινησία – (c)
  - **Διάμηκες** κύμα διαδίδεται με ταχύτητα  $\vec{u}$
- Η διάδοση συνεχίζεται – (d)





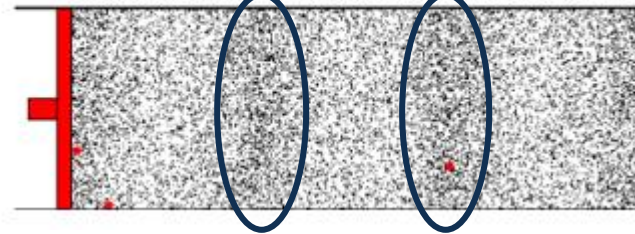
# Ηχητικά Κύματα

- ◉ Έμβολο σε απλή αρμονική ταλάντωση
  - ◉ Πίεση προς τα εμπρός
    - ◉ Περιοχές συμπίεσης (σκούρο)
      - ◉ Πυκνώματα
  - ◉ Τράβηγμα προς τα πίσω
    - ◉ Περιοχές αραιώσης (ανοιχτό)
      - ◉ Αραιώματα
- ◉ Διάδοση με ταχύτητα ήχου στο μέσο

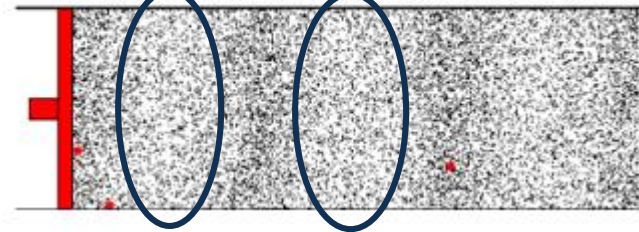
Acoustic Longitudinal Wave



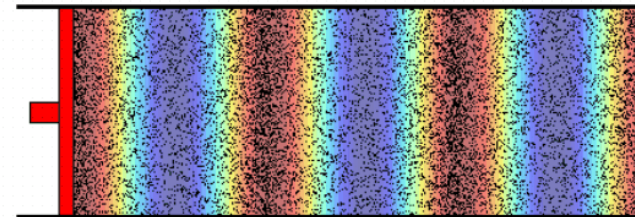
Acoustic Longitudinal Wave



Acoustic Longitudinal Wave



Longitudinal Wave

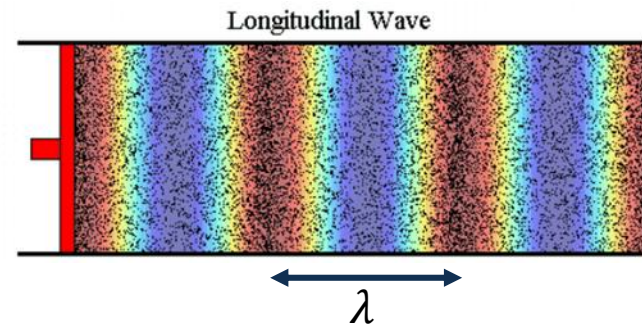
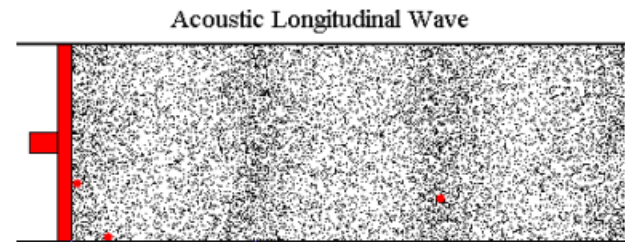


# Ηχητικά Κύματα

- Έμβολο σε απλή αρμονική ταλάντωση
- Απόσταση μεταξύ διαδοχικών πυκνωμάτων ή αραιωμάτων
  - Μήκος κύματος  $\lambda$
- Κάθε μικρός όγκος αερίου εκτελεί απλή αρμονική κίνηση **παράλληλη** προς τη διεύθυνση διάδοσης

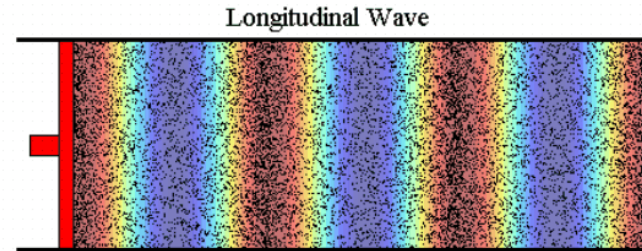
$$s(x, t) = s_{max} \cos(kx - \omega t)$$

- Ο όρος  $s_{max}$  δηλώνει το **πλάτος μετατόπισης**
  - Είναι η μέγιστη μετατόπιση ενός στοιχείου από τη θέση ισορροπίας



# Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου  $\Delta P$



- Η πίεση σε κάθε θέση  $x$  μεταβάλλεται γύρω από μια τιμή ισορροπίας

$$\Delta P(x, t) = \Delta P_{max} \sin(kx - \omega t)$$

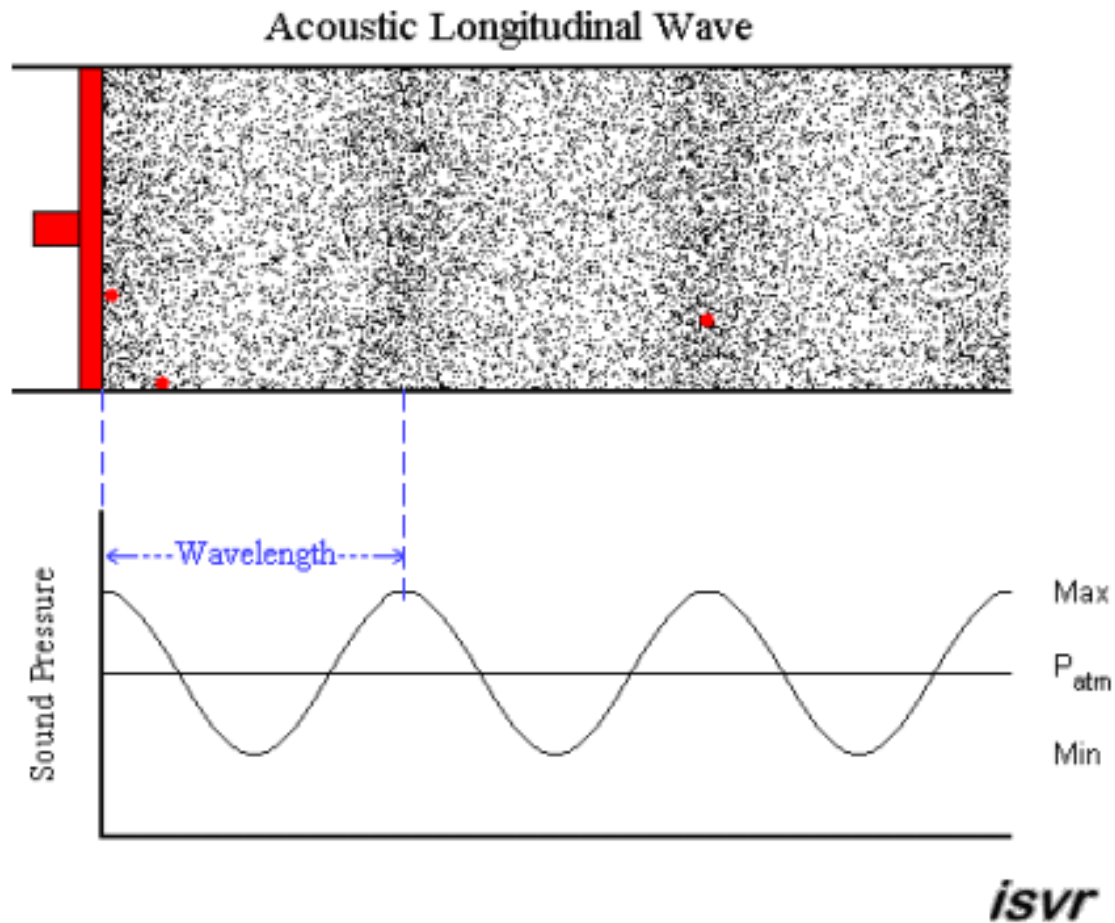
όπου  $\Delta P_{max}$  η μέγιστη μεταβολή της πίεσης γύρω από την τιμή ισορροπίας

- Ο όρος  $\Delta P_{max}$  ονομάζεται **πλάτος πίεσης**



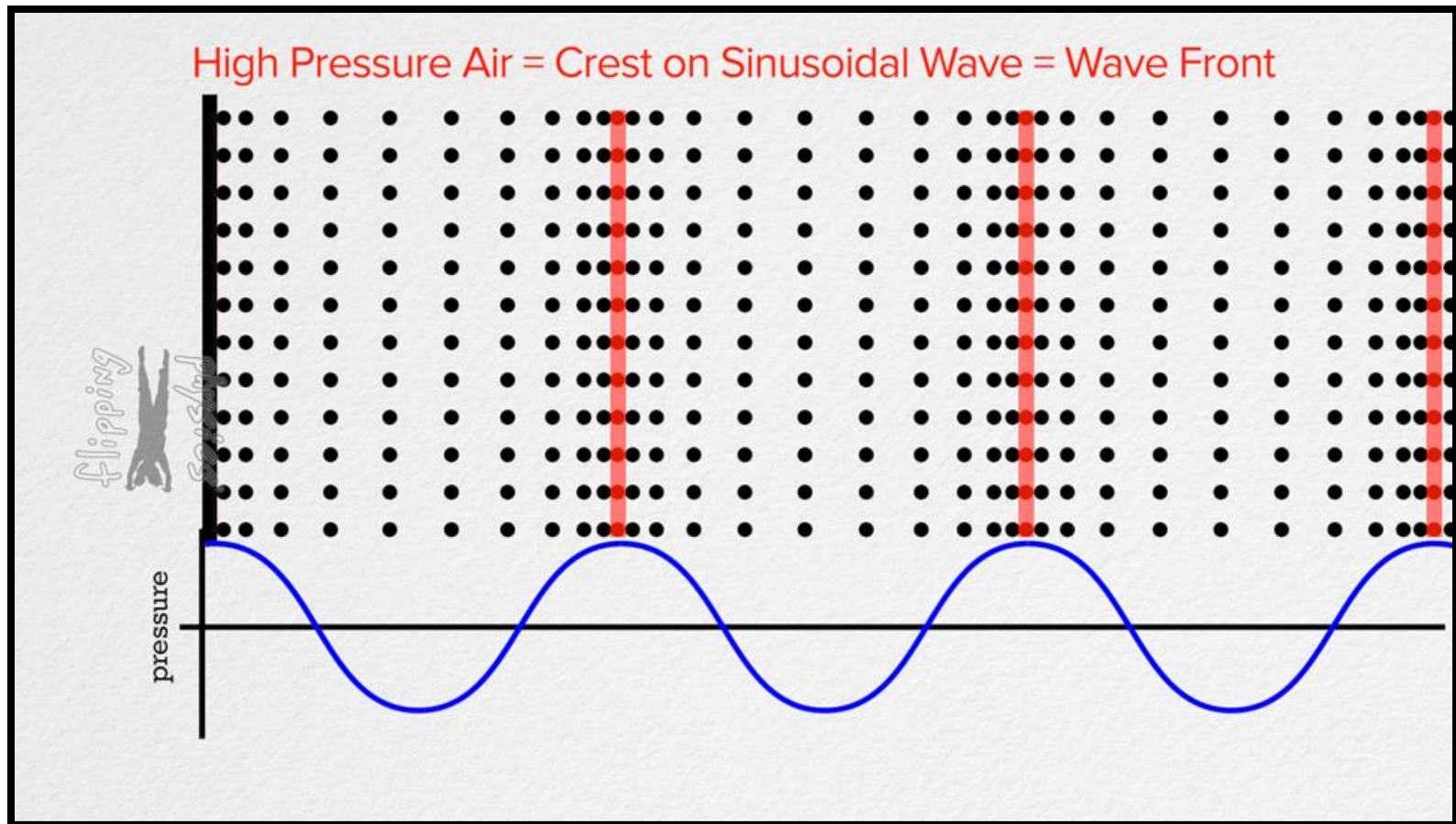
# Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου  $\Delta P$



# Ηχητικά Κύματα

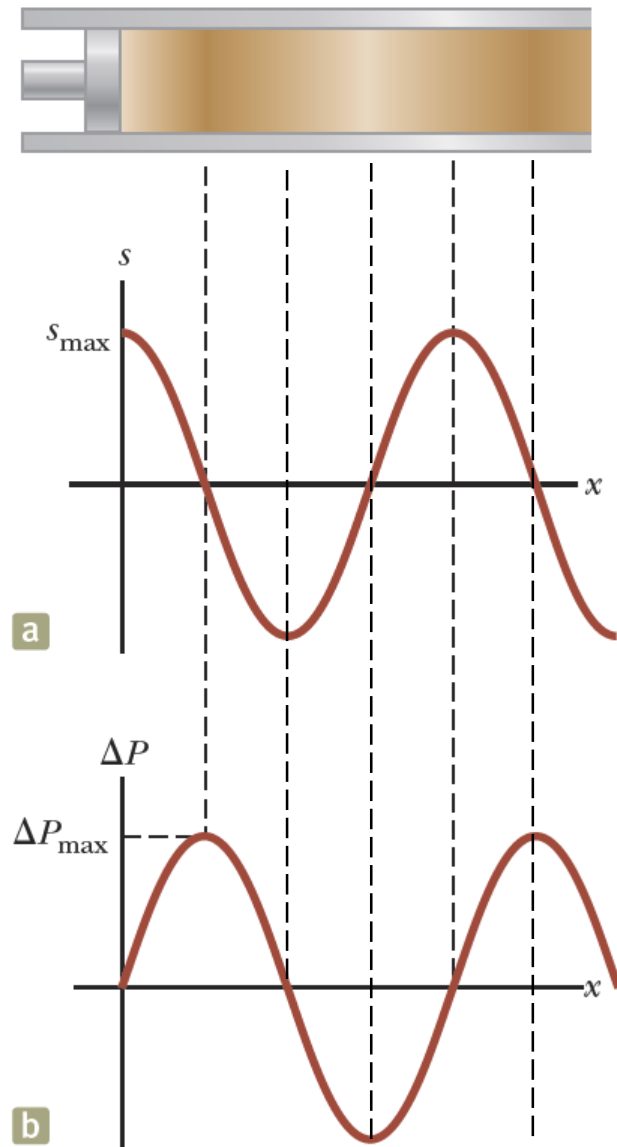
- Μεταβολή πίεσης αερίου  $\Delta P$



# Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου  $\Delta P(x, t)$  και μετατόπισης  $s(x, t)$

- Η μετατόπιση που περιγράψαμε ως συνημιτονοειδής συνάρτηση οδηγεί σε μεταβολή πίεσης ως ημιτονοειδή συνάρτηση
- Διαφορά φάσης  $\pi/2$
- Μεταβολή πίεσης μέγιστη (κατ' απόλυτη τιμή)  $\rightarrow$  μετατόπιση μηδενική!
- Μετατόπιση μέγιστη (κατ' απόλυτη τιμή)  $\rightarrow$  μεταβολή πίεσης μηδενική!



# Ηχητικά Κύματα

- Ταχύτητα διάδοσης ήχου στον αέρα

$$u = 331 \sqrt{1 + \frac{T_c}{273}}$$

όπου  $T_c$  η θερμοκρασία του αέρα (σε βαθμούς C)

- **Παράδειγμα:**
- Πώς θα μετρήσουμε σε πόση απόσταση από μας έπεσε ένας κεραυνός που μόλις είδαμε, αν ακούσουμε τον κρότο του (βροντή) σε  $t$  δευτερόλεπτα?



# Ηχητικά Κύματα

Γιατί συμβαίνει αυτό???

## ○ Ταχύτητα διάδοσης ήχου σε άλλα υλικά

**Table 17.1** Speed of Sound in Various Media

Medium	$v$ (m/s)	Medium	$v$ (m/s)	Medium	$v$ (m/s)
<b>Gases</b>		<b>Liquids at 25°C</b>		<b>Solids<sup>a</sup></b>	
Hydrogen (0°C)	1 286	Glycerol	1 904	Pyrex glass	5 640
Helium (0°C)	972	Seawater	1 533	Iron	5 950
Air (20°C)	343	Water	1 493	Aluminum	6 420
Air (0°C)	331	Mercury	1 450	Brass	4 700
Oxygen (0°C)	317	Kerosene	1 324	Copper	5 010
		Methyl alcohol	1 143	Gold	3 240
		Carbon tetrachloride	926	Lucite	2 680
				Lead	1 960
				Rubber	1 600

Αύξηση θερμοκρασίας ⇒  
αύξηση  
κινητικής ενέργειας μορίων

<sup>a</sup>Values given are for propagation of longitudinal waves in bulk media. Speeds for longitudinal waves in thin rods are smaller, and speeds of transverse waves in bulk are smaller yet.

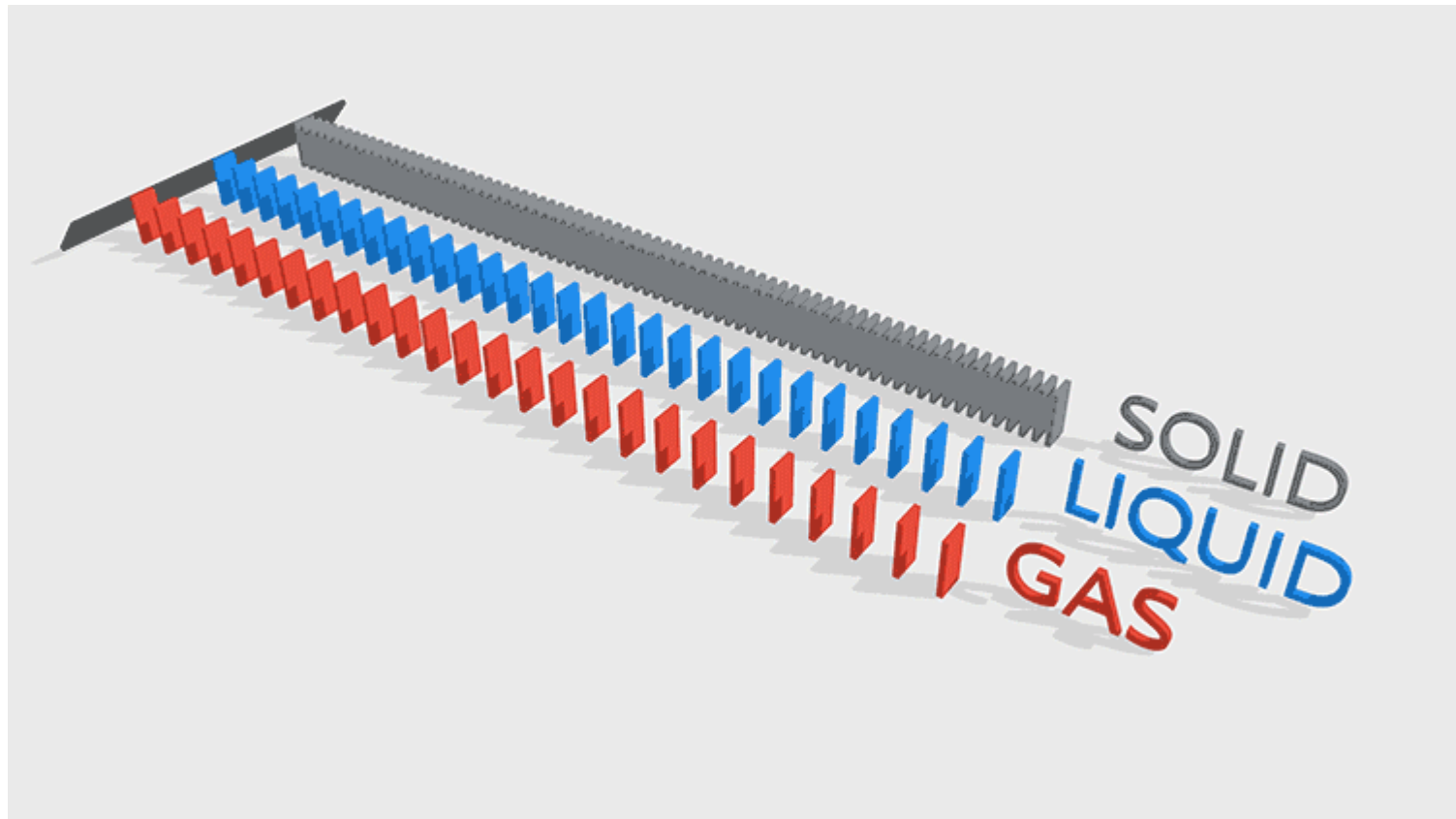
$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

$B$  = μέτρο ελαστικότητας όγκου  
 $\rho$  = πυκνότητα



# Ηχητικά Κύματα

- Ταχύτητα διάδοσης ήχου σε άλλα υλικά
- Ο πίνακας μας δείχνει ότι  $u_{\text{στερεα}} > u_{\text{υγρα}} > u_{\text{αερια}}$  . Γιατί??



# Ηχητικά Κύματα

- Ένταση περιοδικών ηχητικών κυμάτων

$$I = \frac{\text{Μέση Ισχύς}}{A} = \frac{P_{\text{avg}}}{A}$$

όπου  $P_{\text{avg}}$  η μέση ισχύς του κύματος και  $A$  το εμβαδό της επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης

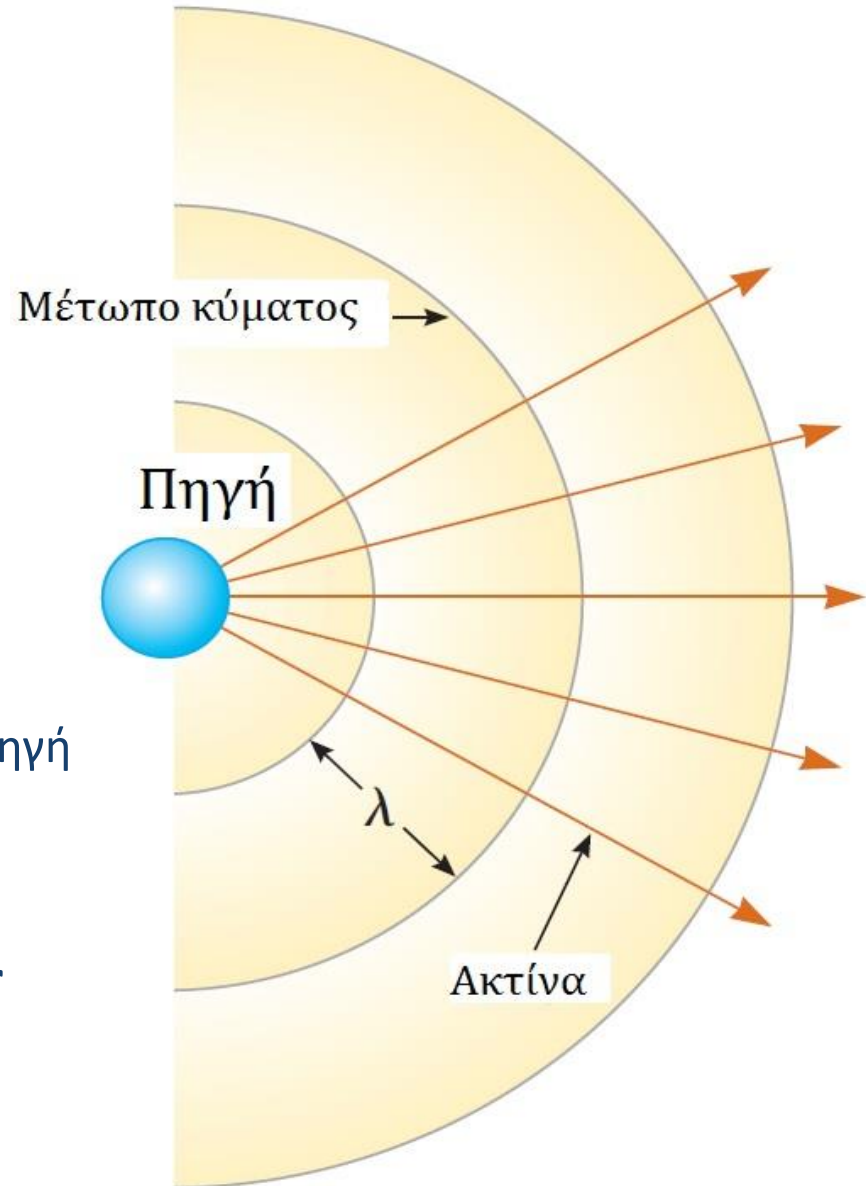
- Τα κύματα που είδαμε ως τώρα μοντελοποιούνταν ως διαμήκη κύματα
  - Διαδίδονταν σε ευθεία γραμμή
- Στην πράξη, τα ηχητικά κύματα διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις
  - Σφαιρικά κύματα
  - Ισοτροπική διάδοση → ίδια ένταση προς κάθε κατεύθυνση

# Ηχητικά Κύματα

- Σφαιρικό κύμα
  - Ομόκεντρα κυκλικά τόξα
- Μέτωπο κύματος
  - Επιφάνεια όπου η φάση  $(kr - \omega t + \varphi)$  του κύματος έχει ίδια τιμή
- Ακτίνες
  - Ευθείες που ξεκινούν απ'την πηγή
  - Δείχνουν την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος
- Ένταση κύματος σε απόσταση  $r$

$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Εμβαδό μετώπου



# Ηχητικά Κύματα

Εμβαδό σφαίρας

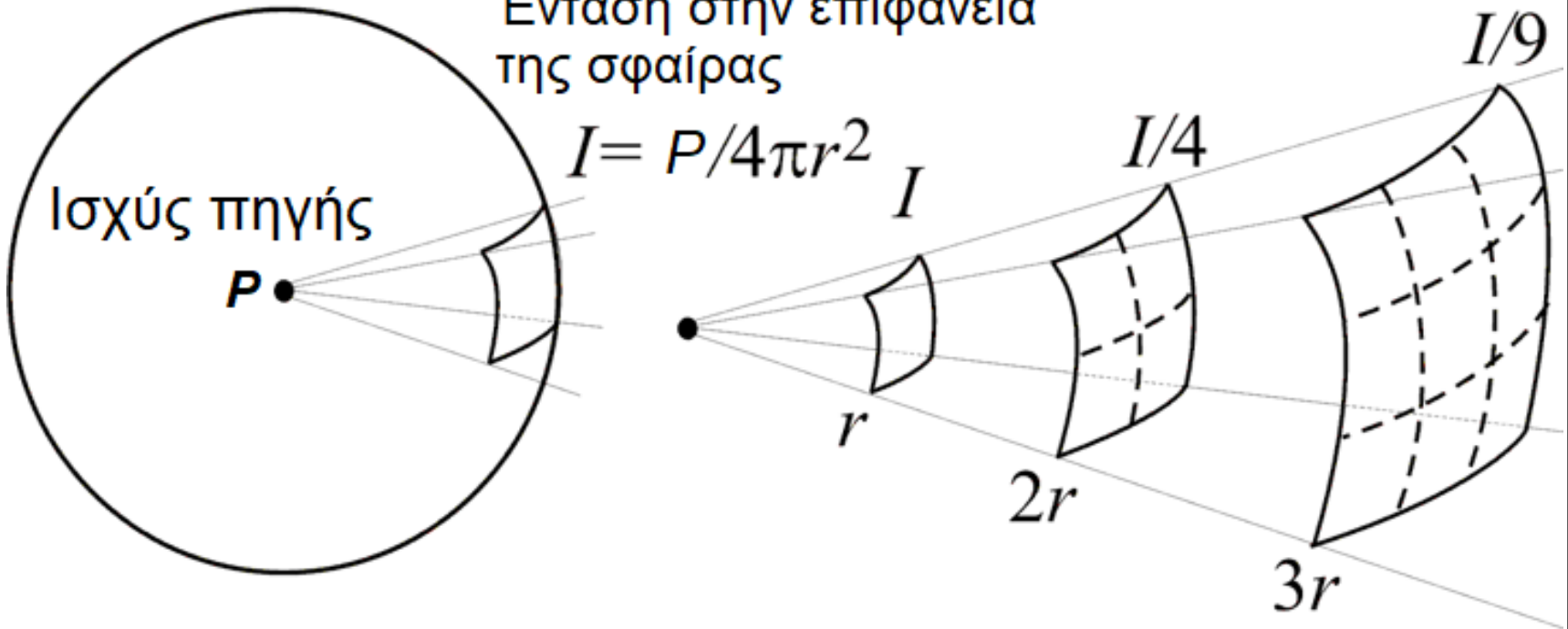
$$A = 4\pi r^2$$

Ένταση στην επιφάνεια  
της σφαίρας

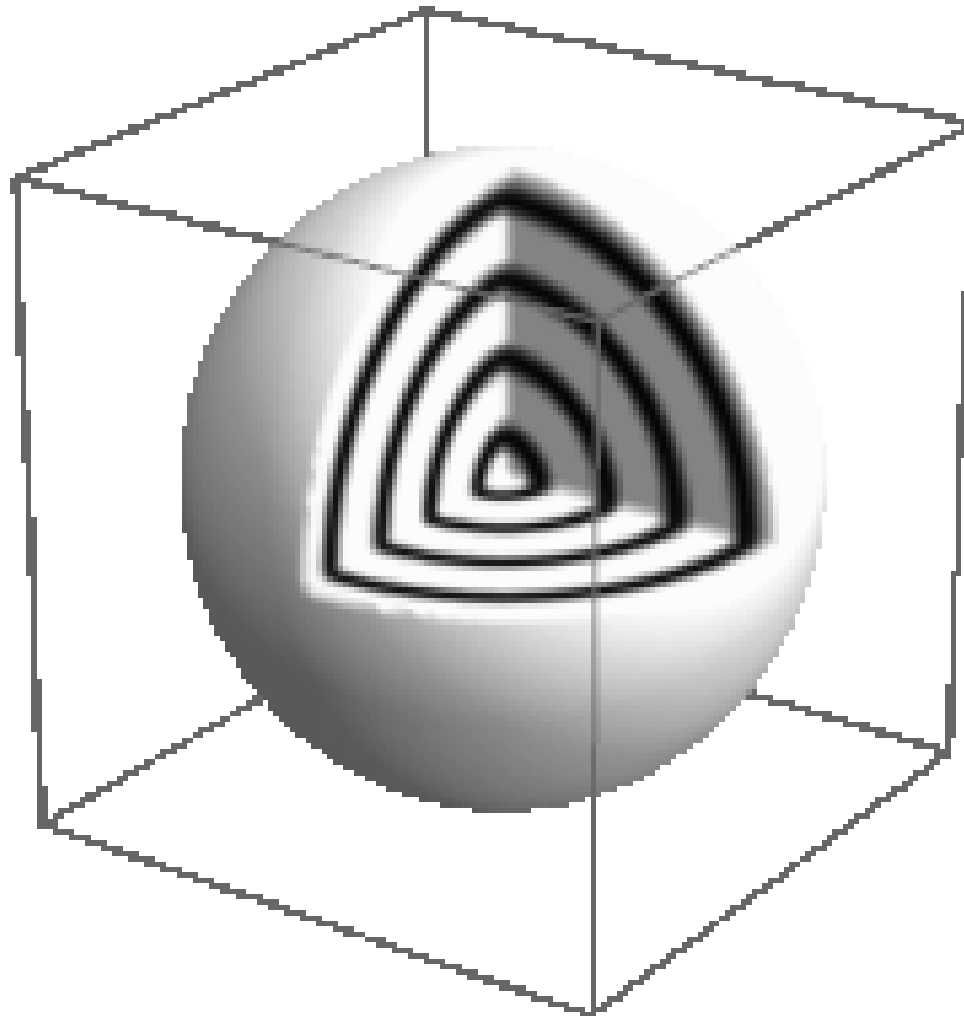
$$I = P / 4\pi r^2$$

Ισχύς πηγής

$P$



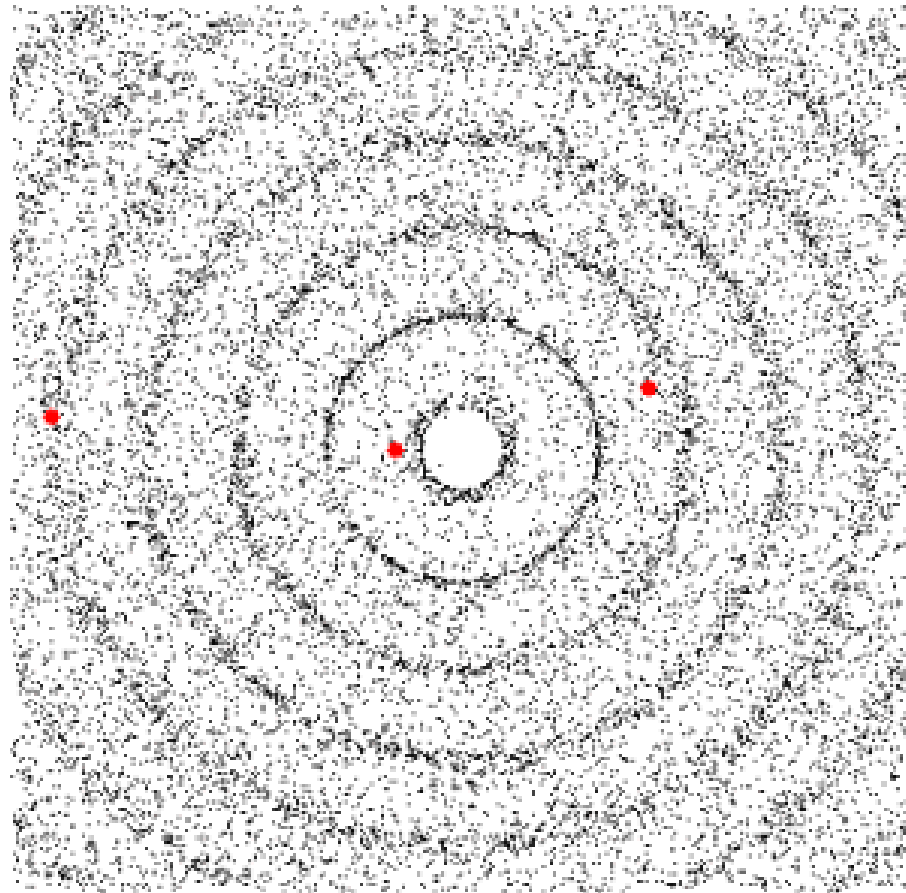
# Ηχητικά Κύματα



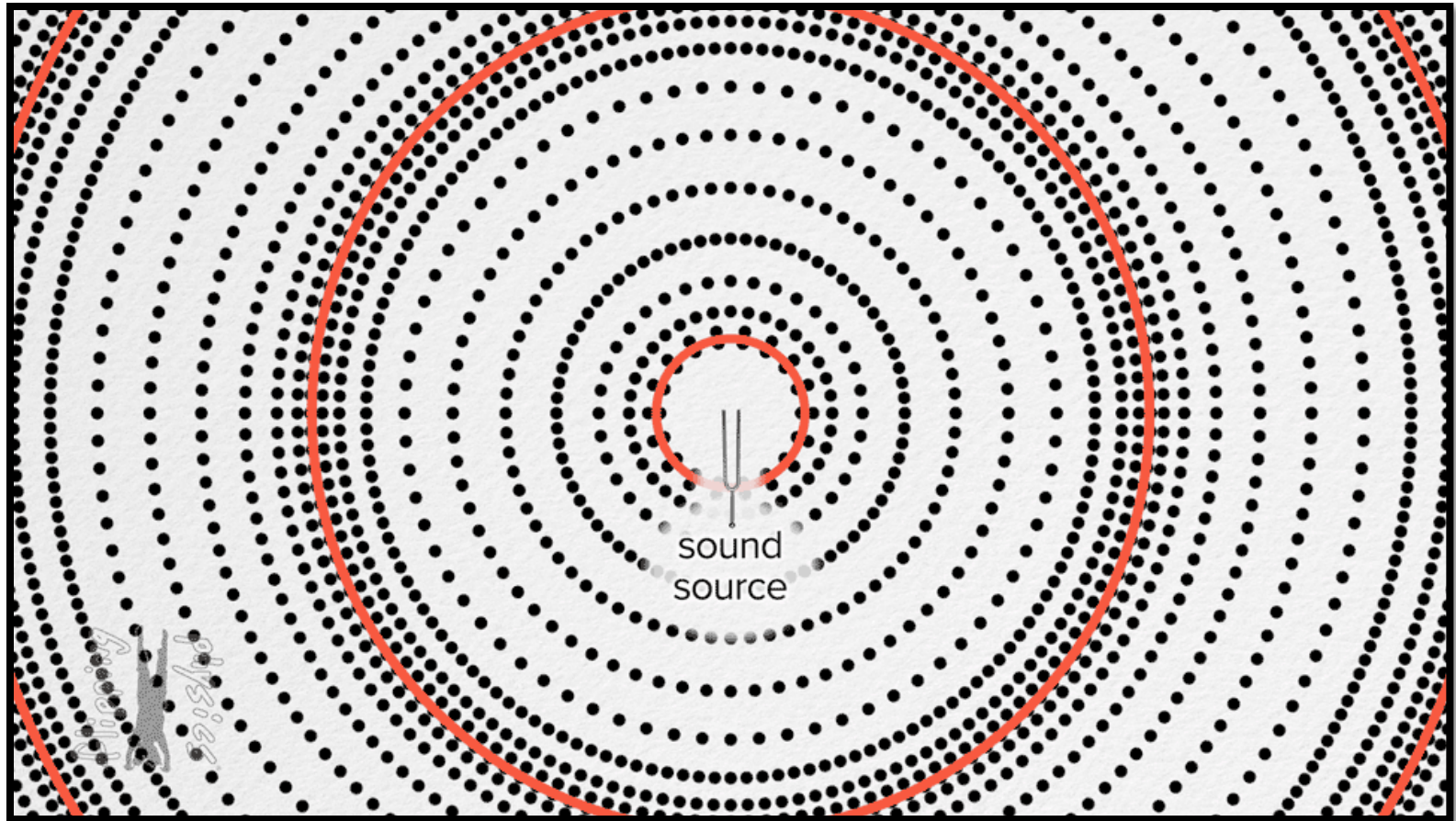


# Ηχητικά Κύματα

## Acoustic Monopole



# Ηχητικά Κύματα



# Ηχητικά Κύματα

- Οι ασθενέστεροι ήχοι που μπορεί να αντιληφθεί το ανθρώπινο αυτί στη συχνότητα των 1000 Hz έχουν ένταση περίπου  $10^{-12} \frac{W}{m^2}$
- Αυτό είναι το λεγόμενο **κατώφλι ακοής (στα 1000 Hz)**.
- Οι δυνατότεροι ήχοι που μπορούμε να ακούσουμε (χωρίς πόνο) είναι έντασης  $1 \frac{W}{m^2}$
- Λόγος μέγιστης προς ελάχιστη ένταση:  $10^{12}$  !!!

# Ηχητικά Κύματα

[Click here for a more interesting dB range 😊](#)

## ○ Ηχοστάθμη

- Μεγάλο εύρος εντάσεων αντιληπτό απ' το αυτί μας
- Μια λογαριθμική κλίμακα είναι βολικότερη
- **Ηχοστάθμη (sound level)**

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0}$$

- $I_0$  : **ένταση αναφοράς** (κατώφλι ακοής)
- $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ 
  - Για συχνότητες 1000 Hz
  - Στην πραγματικότητα, είναι μεταβλητή
- $\beta$  : μετριέται σε Decibel (dB)
  - Προς τιμήν του A. G. Bell
- Κατώφλι ακοής: 0 dB
- Όριο πόνου: 120-130 dB

Sound Levels	
Source of Sound	$\beta$ (dB)
Nearby jet airplane	150
Jackhammer; machine gun	130
Siren; rock concert	120
Subway; power lawn mower	100
Busy traffic	80
Vacuum cleaner	70
Normal conversation	60
Mosquito buzzing	40
Whisper	30
Rustling leaves	10
Threshold of hearing	0

# Ηχητικά Κύματα

## ○ Παράδειγμα:

- Δυο ίδιες μηχανές βρίσκονται στην ίδια απόσταση από έναν εργάτη. Η ένταση του ήχου που λαμβάνει ο εργάτης κατά τη λειτουργία κάθε μηχανής είναι ίση με  $2 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ .
  - A) Βρείτε την ηχοστάθμη που ακούει ο εργάτης όταν λειτουργεί η μια μηχανή.
  - B) Βρείτε την ηχοστάθμη που ακούει ο εργάτης όταν λειτουργούν και οι δυο μηχανές.
  - Γ) Αν ο εργάτης δε λαμβάνει την ίδια ένταση ήχου από κάθε μηχανή αλλά γνωρίζει ότι αυτές βρίσκονται σε απόσταση  $r_1 = 10 \text{ m}$  και  $r_2 = 20 \text{ m}$  αντίστοιχα, τότε ποιός είναι ο λόγος των εντάσεών τους?



# Ηχητικά Κύματα

## ● Παράδειγμα – Λύση:

- Δυο ίδιες μηχανές βρίσκονται στην ίδια απόσταση από έναν εργάτη. Η ένταση του ήχου κατά τη λειτουργία κάθε μηχανής είναι ίση με  $2 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ .

A) Βρείτε την ηχοστάθμη που ακούει ο εργάτης όταν λειτουργεί η μια μηχανή.

$$\begin{aligned} \text{Είναι } \beta &= 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \\ I_0 &= 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \\ I &= 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} \beta &= 10 \log_{10} \frac{2 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}} = \\ &= 10 \log_{10} (2 \cdot 10^{-7+12}) \\ &= 10 \log_{10} (2 \cdot 10^5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\stackrel{\textcircled{1}}{=} 10 \log_{10} 2 + 10 \log_{10} 10^5 \stackrel{\textcircled{2}}{=} 10 \log_{10} 2 + 5 \cdot 10 \log_{10} 10 = \\ &= 50 + \underbrace{10 \log_{10} 2}_{\approx 3} \approx 50 + 3 = 53 \text{ dB} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \beta &= 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \\ \log(ab) &= \log(a) + \log(b) \quad \textcircled{1} \\ \log(a^b) &= b \log(a) \quad \textcircled{2} \end{aligned}$$

# Ηχητικά Κύματα

## • Παράδειγμα – Λύση:

- Δυο ίδιες μηχανές βρίσκονται στην ίδια απόσταση από έναν εργάτη. Η ένταση του ήχου κατά τη λειτουργία κάθε μηχανής είναι ίση με  $2 \cdot 10^{-7} \text{ W/m}^2$ .
- Β) Βρείτε την ηχοστάθμη που ακούει ο εργάτης όταν λειτουργούν και οι δυο μηχανές.

$$\begin{aligned} \text{Τώρα, } I &= I_1 + I_2 = 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \text{ άρα } \beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} = \\ &= 10 \log_{10} (4 \cdot 10^5) = 10 \log_{10} 4 + 10 \log_{10} 10^5 = \\ &= \underbrace{10 \log_{10} 4}_{\approx 6} + 5 \cdot \overbrace{10 \log_{10} 10}^1 \approx 50 + 6 = 56 \text{ dB} \end{aligned}$$

Διπλασιασμός της έντασης, αυξήθηκε η ηχοστάθμη κατά  $- \text{φότος} - 3 \text{ dB}$ .

$$\begin{aligned} \beta &= 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \\ \log(ab) &= \log(a) + \log(b) \\ \log(a^b) &= b \log(a) \end{aligned}$$

# Ηχητικά Κύματα

## ● Παράδειγμα – Λύση:

- Γ) Αν ο εργάτης δε λαμβάνει την ίδια ένταση ήχου από κάθε μηχανή αλλά γνωρίζει ότι αυτές βρίσκονται σε απόσταση  $r_1 = 10$  m και  $r_2 = 20$  m αντίστοιχα, τότε ποιος είναι ο λόγος των εντάσεών τους?

$$I = \frac{P_{avg}}{4\pi r^2}$$

Ίδιες μηχανές, ίδια η μέση ισχύς τους, έστω  $P_{μηχ}$ .

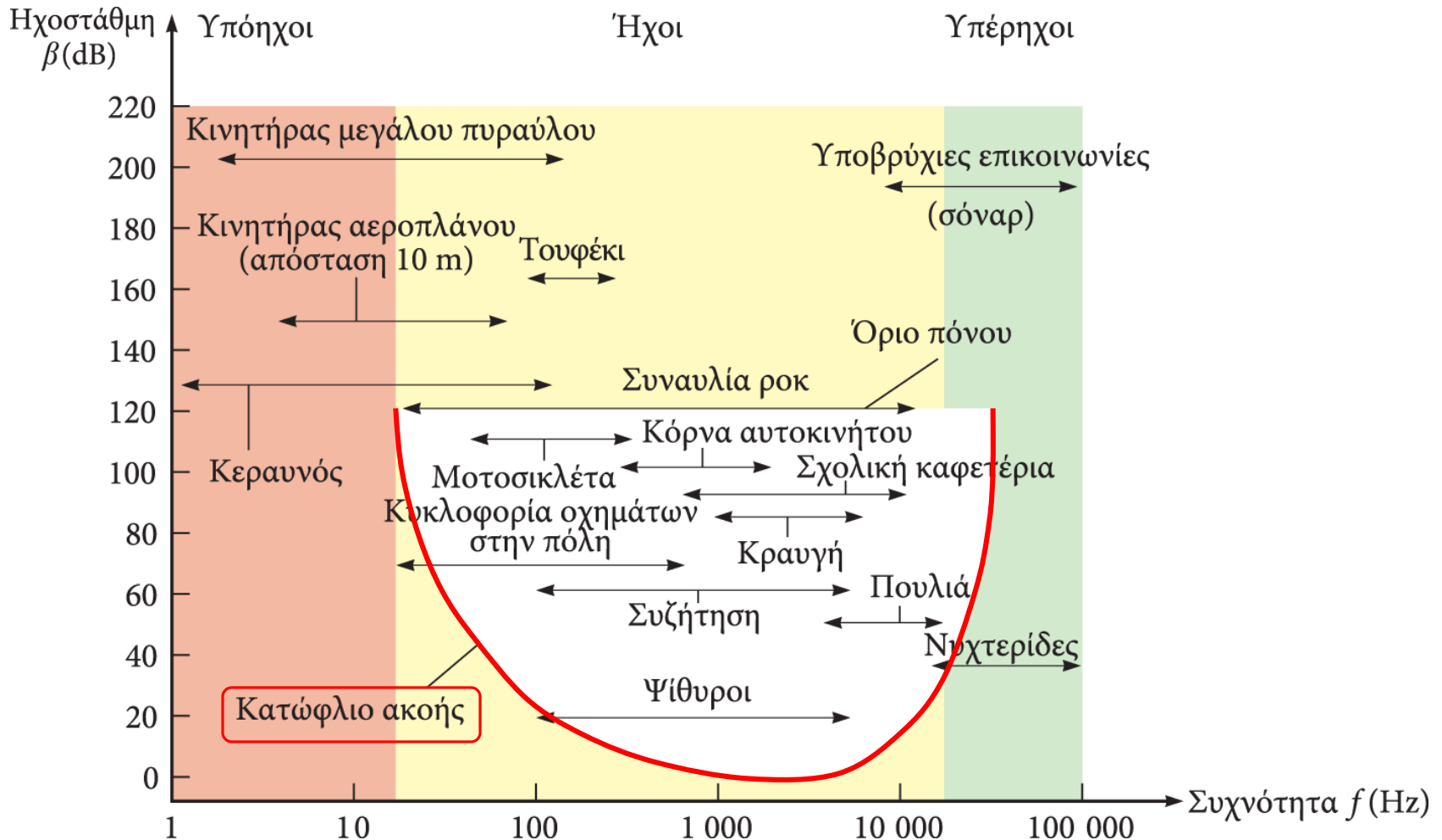
$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{P_{μηχ}}{4\pi r_1^2} \\ I_2 &= \frac{P_{μηχ}}{4\pi r_2^2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{P_{μηχ}}{4\pi r_1^2}}{\frac{P_{μηχ}}{4\pi r_2^2}} = \frac{\frac{1}{r_1^2}}{\frac{1}{r_2^2}} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2$$

$$\text{Για } r_1 = 10 \text{ m, } r_2 = 20 \text{ m, } \frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{20}{10}\right)^2 = 4.$$

Άρα η ένταση ήχου της πρώτης μηχανής είναι 4 φορές μεγαλύτερη από της 2ης.

# Ηχητικά Κύματα

## Ακουστότητα και Συχνότητα – Ψυχοακουστική



# Ηχητικά Κύματα

## ○ Ψυχοακουστική:

- Η επιστήμη που μελετά πως αντιλαμβάνονται οι άνθρωποι τον ήχο
- Δεν ακούμε όλοι με τον ίδιο τρόπο! 😊
- Παίζει μεγάλο ρόλο το τι **νομίζουμε** ότι ακούμε
  
- Δυο συνιστώσες:
  - Φυσιολογία του ήχου (πως το σώμα μας λαμβάνει τον ήχο)
  - Ψυχολογία του ήχου (πως ερμηνεύει ο εγκέφαλός μας τον ήχο)
  
- Ακούμε μόνο ένα μικρό τμήμα του ακουστικού φάσματος
- Από 20 Hz ως περίπου 20000 Hz



# Ηχητικά Κύματα

## ○ Ψυχοακουστική:

- Παράγοντες που επηρεάζουν την αντίληψη του ήχου
  - Ηλικία
  - Σχήμα και μέγεθος αυτιού
  - Οστική πυκνότητα
  - Σωματικό βάρος
- Φυσιολογικοί παράγοντες επηρεάζουν το «τι» μπορούμε να ακούσουμε...
- ...αλλά ο εγκέφαλός μας αποφασίζει «πως» το ακούμε! 😊
  - Π.χ. «πτώση ενός ποτηριού σε ένα μπαρ» vs «πτώση ενός ποτηριού τη νύχτα στο σπίτι μας» → **context (πλαίσιο)**

# Ηχητικά Κύματα

- Ψυχοακουστική: **context (πλαίσιο)**
- Ακούστε μια-μια τις παρακάτω δυο ακολουθίες ήχων
- Επικεντρωθείτε στους **δυο τελευταίους** τόνους (θα τους αναγνωρίσετε από μια παύση που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών τόνων και των δυο τελευταίων) καθεμιάς



- Πιστεύετε ότι το ζεύγος των τελευταίων τόνων της 1<sup>ης</sup> ηχογράφησης είναι συχνοτικά/ακουστικά το ίδιο με της 2<sup>ης</sup>;
- Ακούστε τους τώρα **απομονωμένους** από τους υπόλοιπους



# Ηχητικά Κύματα

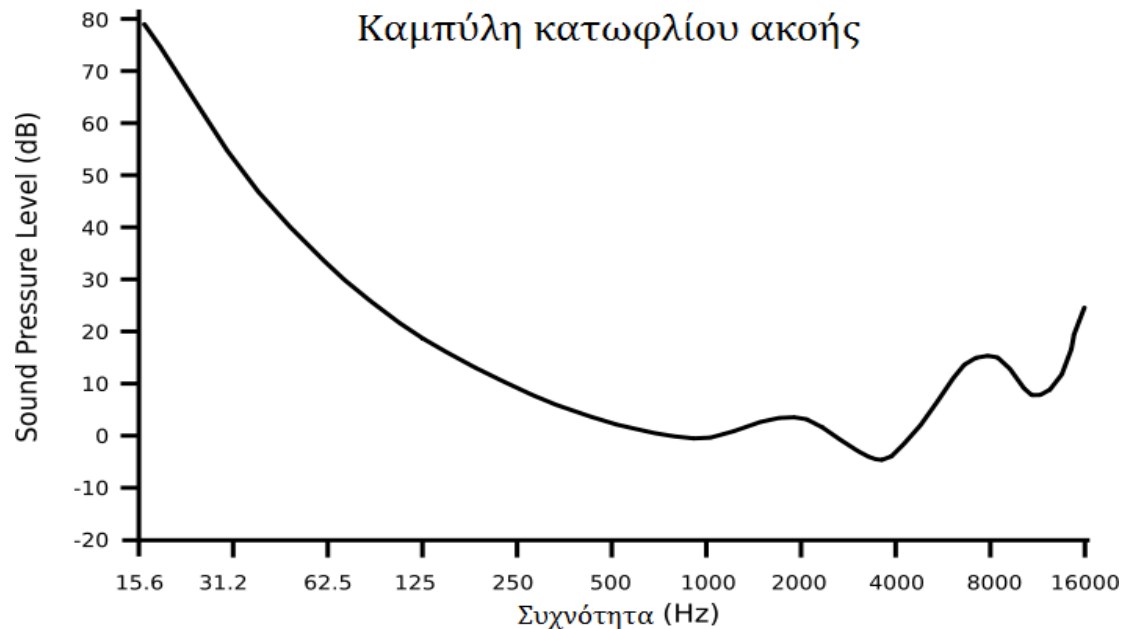
## ◉ Παράδειγμα εφαρμογής:

- ◉ Συμπύεση ήχου (MPEG3 standard – MP3)
- ◉ Τρεις σημαντικοί παράγοντες
  - ◉ Α. Εξάλειψη ήχων που δεν ακούγονται (< κατώφλι ακοής)
    - ◉ Μπορούμε να τους αφαιρέσουμε (μην αποθηκεύσουμε)
  - ◉ Β. Κάποιοι ήχοι είναι πιο «ευαίσθητοι» από άλλους
    - ◉ Χρήση κρίσιμων ευρών ζώνης (critical bands)
  - ◉ Γ. Κάποιοι ήχοι επικαλύπτουν άλλους γειτονικούς
    - ◉ Το φαινόμενο του masking (masking effect)

# Ηχητικά Κύματα

## ◉ Παράδειγμα εφαρμογής:

- ◉ Συμπίεση ήχου (MP3 standard)
- ◉ Α. Εξάλειψη ήχων που δεν ακούγονται (< κατώφλι ακοής)
  - ◉ Μπορούμε να τους αφαιρέσουμε
  - ◉ Ό,τι βρίσκεται κάτω από το κατώφλι, δε χρειάζεται να αποθηκευτεί



# Ηχητικά Κύματα

Ρυθμίστε μέτρια προς χαμηλά την ένταση των ηχείων σας!

- Παράδειγμα εφαρμογής:

- Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
- Α. Εξάλειψη ήχων που δεν ακούγονται (< κατώφλι ακοής)
- Μπορείτε να ακούσετε τους ήχους αριστερά?
- Αυτούς δεξιά?

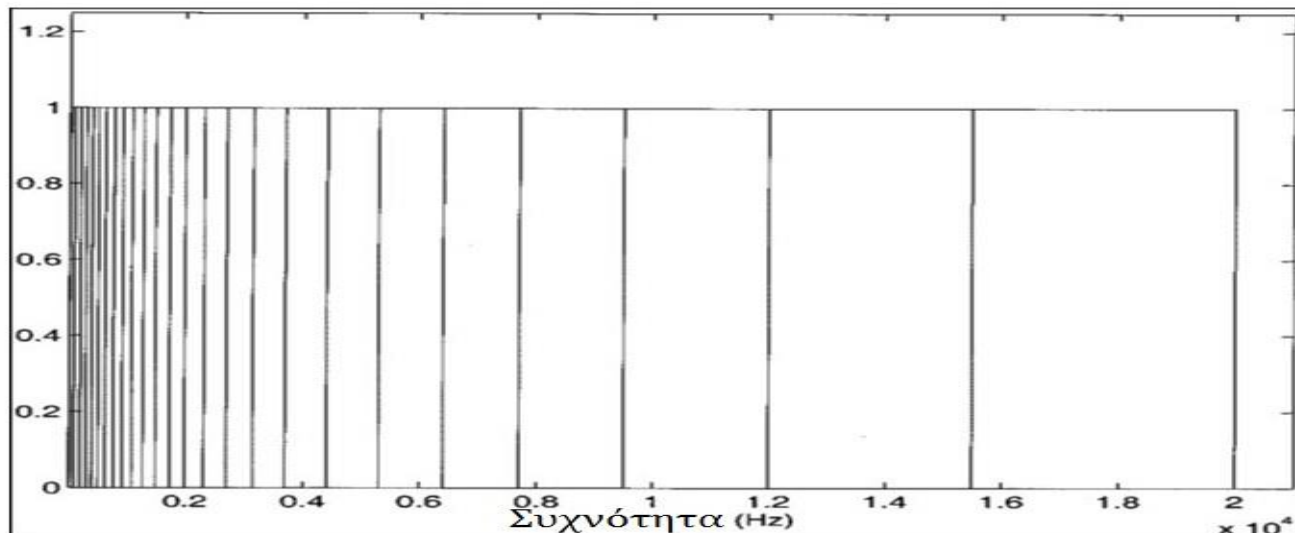


- Κάθε γραμμή είναι ένας τόνος στην ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετική ηχοστάθμη (**πάνω** από το κατώφλι ακοής (αριστερή στήλη), **κάτω** από το κατώφλι ακοής (δεξιά στήλη))

# Ηχητικά Κύματα

## ○ Παράδειγμα εφαρμογής:

- Συμπίεση ήχου (MP3 standard)
- Β. Κάποιοι ήχοι είναι πιο «ευαίσθητοι» από άλλους
  - Χρήση κρίσιμων ευρών ζώνης (critical bands)
  - Διαφορετική «βαρύτητα» σε κάθε ζώνη
  - Διαφορετική «ευαισθησία» του αυτιού σε κάθε ζώνη



# Ηχητικά Κύματα

Ρυθμίστε μέτρια προς χαμηλά την ένταση των ηχείων σας!

- Παράδειγμα εφαρμογής:

- Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
- Β. Κάποιοι ήχοι είναι πιο «ευαίσθητοι» από άλλους

500 Hz



550 Hz



6300 Hz



6500 Hz



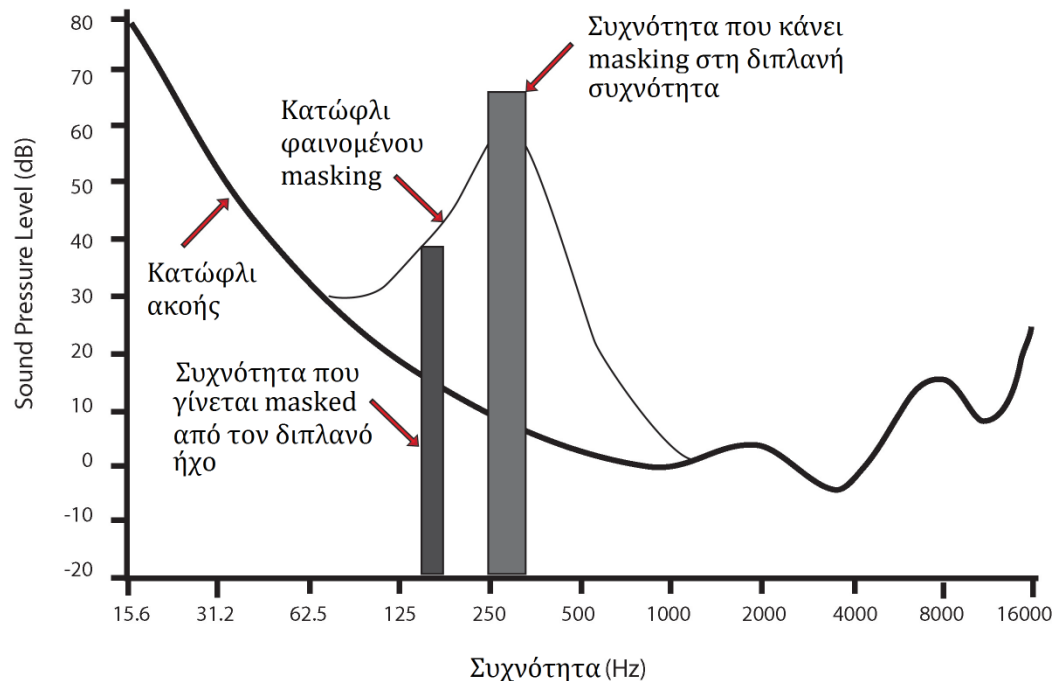
- Διακρίνετε με την ίδια **ευκολία** τη διαφορά των 50 Hz στο πρώτο ζεύγος και τη διαφορά των 200 Hz στο δεύτερο ζεύγος?



# Ηχητικά Κύματα

## ○ Παράδειγμα εφαρμογής:

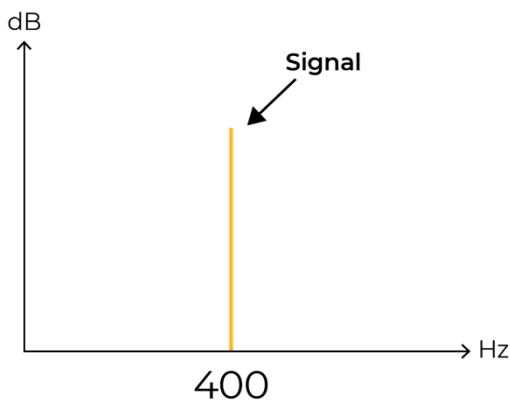
- Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
- Γ. Masking effect (σε χρόνο και συχνότητα)
  - Ένας πιο δυνατός ήχος μπορεί να επικαλύψει ένα γειτονικό του
  - Η πληροφορία του γειτονικού ήχου δε χρειάζεται να αποθηκευτεί



# Ηχητικά Κύματα

## ○ Παράδειγμα εφαρμογής:

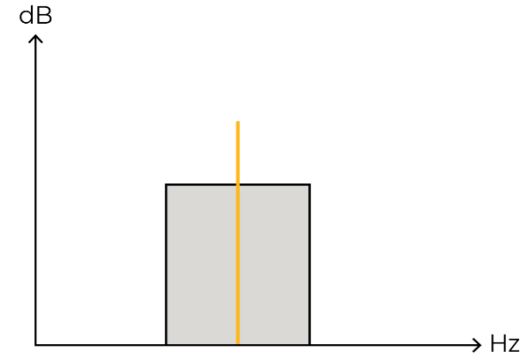
- Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
- Γ. Masking effect (σε χρόνο και **συχνότητα**)



Pure 400Hz tone



200-600Hz pink noise



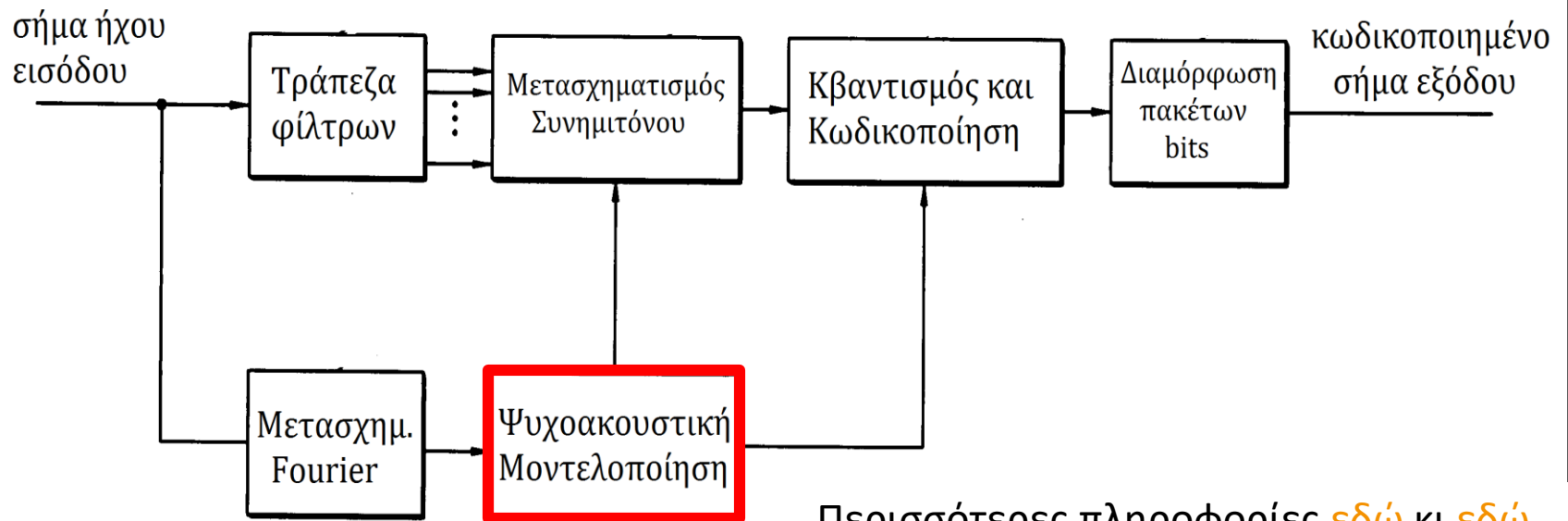
Tone + noise



- Ακούστε τα παραπάνω από αριστερά → δεξιά. Μπορείτε να ακούσετε τον τόνο των 400 Hz στην 3<sup>η</sup> περίπτωση?

# Ηχητικά Κύματα

- Παράδειγμα εφαρμογής:
  - Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
  - Απλοποιημένο διάγραμμα



Περισσότερες πληροφορίες [εδώ](#) κι [εδώ](#)  
(ΔΕΝ είναι «εύπεπτα» κείμενα).



Τέλος Διάλεξης

