

Physics

$w = 2\pi f$

$t = \frac{s}{v}$

$v^2 = u^2 + 2as$

$PE = mgh$

$P = \frac{W}{t}$

$PE = m \times g \times h$

$I = \frac{C}{R}$

$S = vt$

$S = \left(\frac{u+v}{2}\right)t$

$E = mgz$

$s = ut + \frac{1}{2}at^2$

$T = \frac{E}{v+r}$

The image is a hand-drawn collage of physics concepts. At the center is the word "Physics" in large, bold, black letters. Surrounding it are various diagrams and formulas. Top left: A diagram of a rectangular block on a surface with force vectors F_L and F_R , and a coordinate system with x and y axes. Next to it is the formula $w = 2\pi f$ and $t = \frac{s}{v}$. Top center: A diagram of a pendulum with a bob and a string, labeled with P and N . To its right is the formula $v^2 = u^2 + 2as$. Top right: A diagram of a pendulum with a bob and a string, labeled with $PE = mgh$. Middle left: A diagram of a light bulb with arrows pointing outwards, labeled with $PE = m \times g \times h$. Middle right: A diagram of a light bulb with arrows pointing inwards, labeled with $I = \frac{C}{R}$. Bottom left: A diagram of a ring with a positive charge (+) and a negative charge (-), labeled with $E = mgz$. Bottom center: A diagram of a spring with a mass attached, labeled with $s = ut + \frac{1}{2}at^2$. Bottom right: A diagram of a circuit with a battery, a voltmeter (V), and two points A and B, labeled with $T = \frac{E}{v+r}$. Other diagrams include a fan, a ball on a curved path, a ball on a ramp, and a ball on a circular path.

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)**

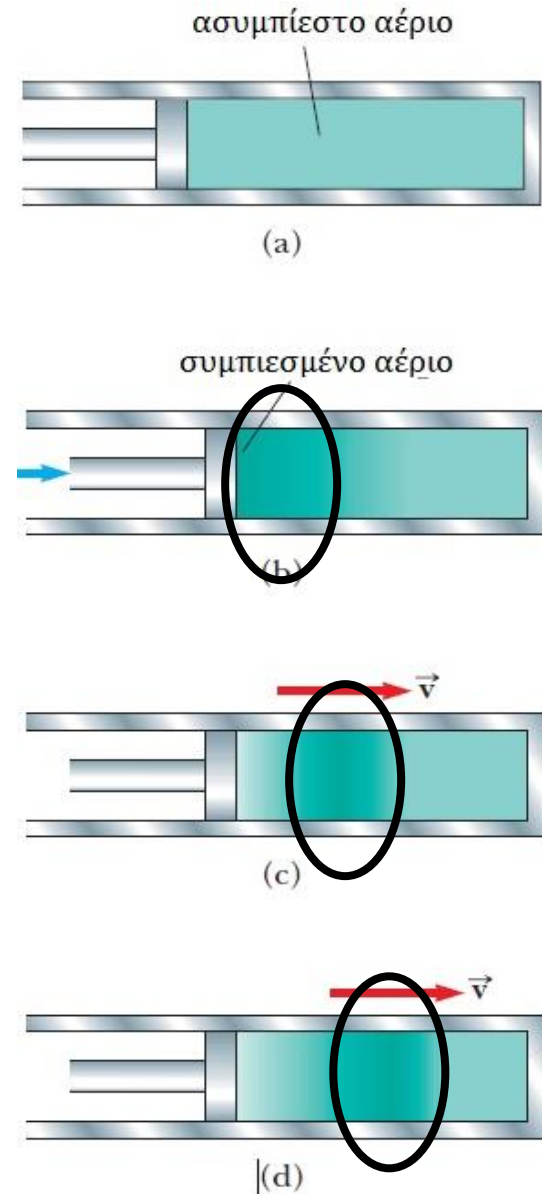
- Ελέφαντες, φάλαινες, και άλλα ζώα επικοινωνούν με υπόηχους
 - Έντονα φυσικά φαινόμενα παράγουν υπόηχους
 - Καταιγίδες, κατολισθήσεις, σεισμοί, ηφαιστειακή δραστηριότητα κ.α.

- **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)



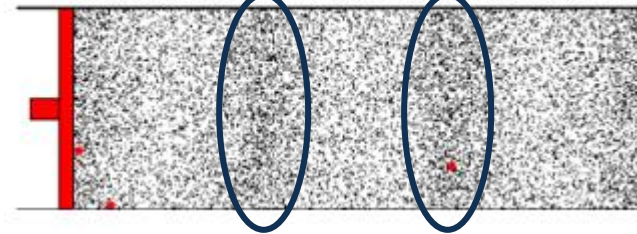
Ηχητικά Κύματα

- ◉ 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

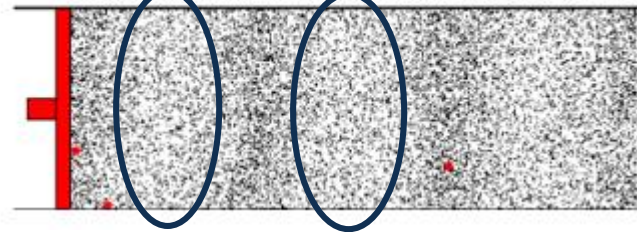
Acoustic Longitudinal Wave



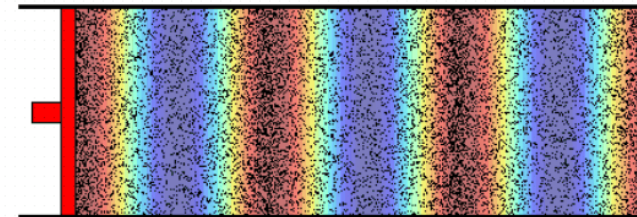
Acoustic Longitudinal Wave



Acoustic Longitudinal Wave



Longitudinal Wave

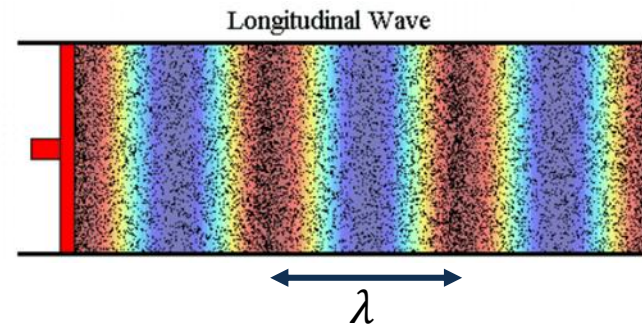
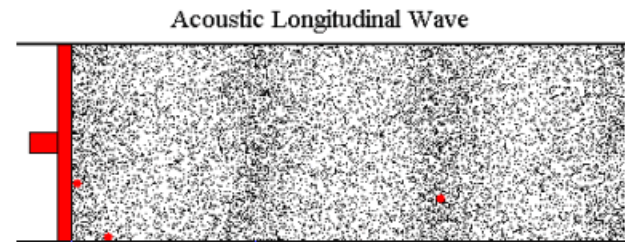


Ηχητικά Κύματα

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

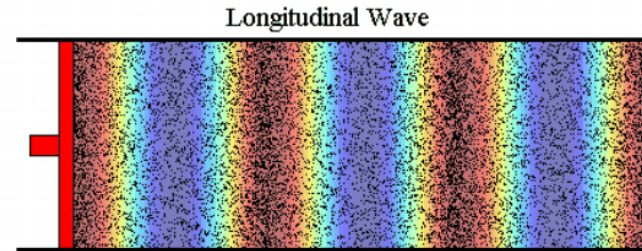
$$s(x, t) = s_{max} \cos(kx - \omega t)$$

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



Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου ΔP



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

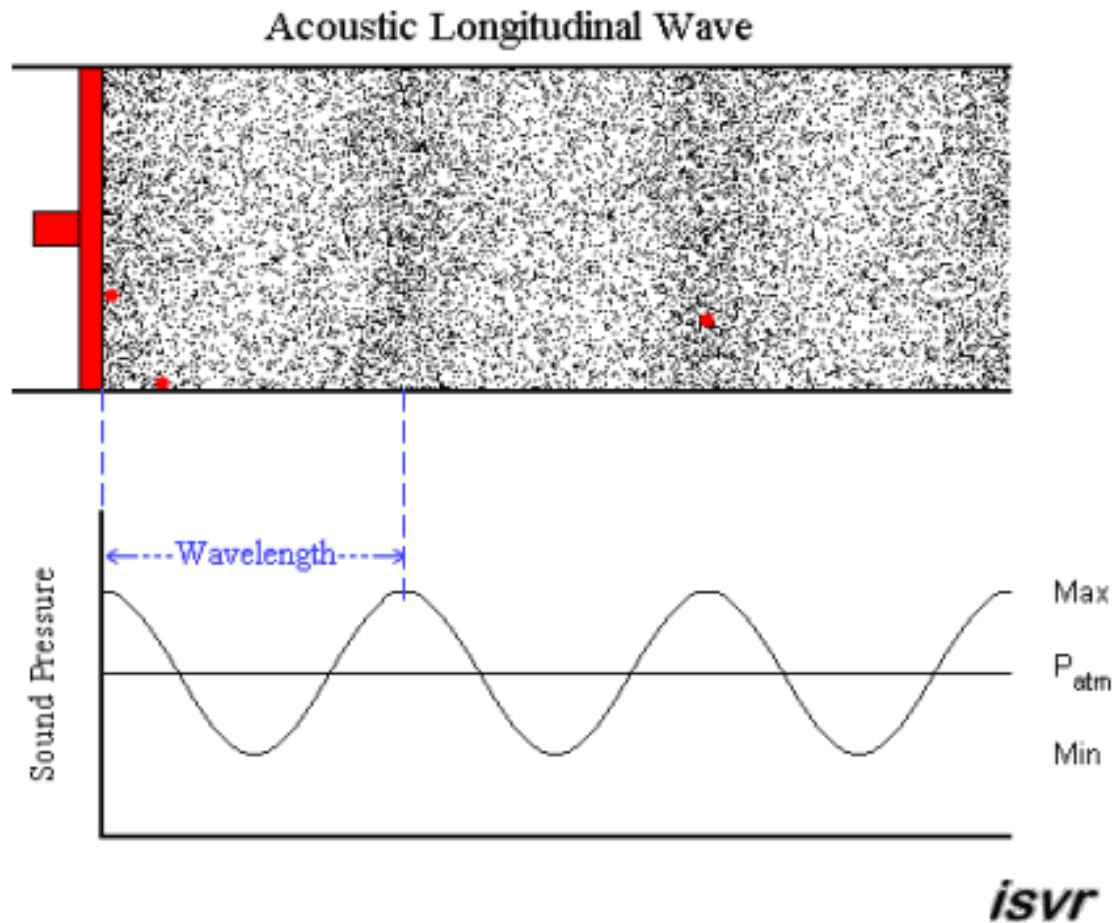
$$\Delta P(x, t) = \Delta P_{max} \sin(kx - \omega t)$$

όπου ΔP_{max} η μέγιστη μεταβολή της πίεσης γύρω από την τιμή ισορροπίας

- Ο όρος ΔP_{max} ονομάζεται **πλάτος πίεσης**

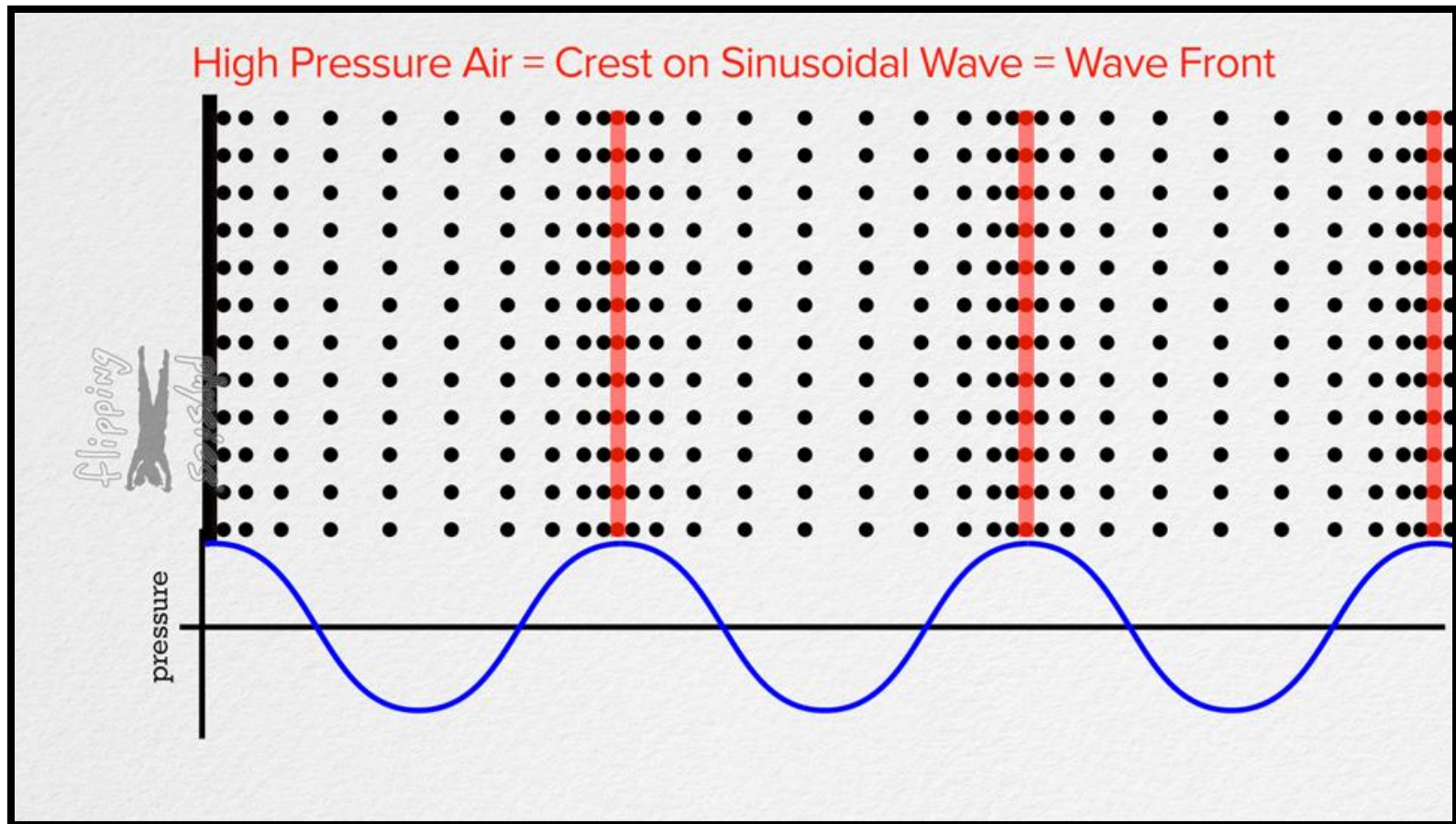
Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου ΔP



Ηχητικά Κύματα

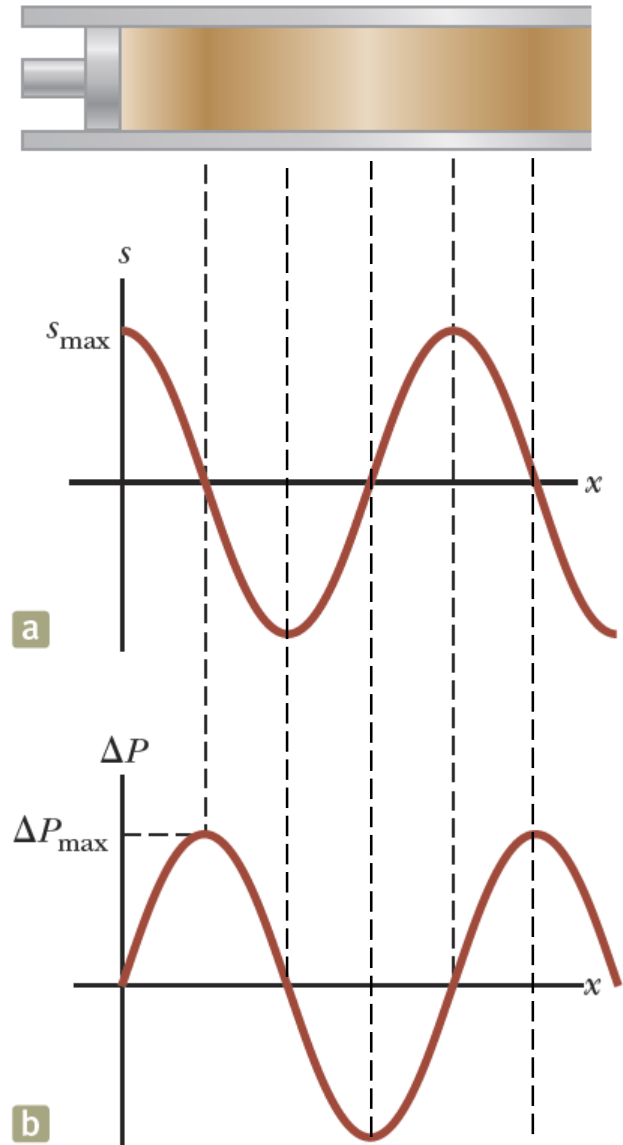
- Μεταβολή πίεσης αερίου ΔP



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)
Gases		Liquids at 25°C		Solids^a	
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 \Rightarrow
αύξηση
κινητικής ενέργειας μορίων

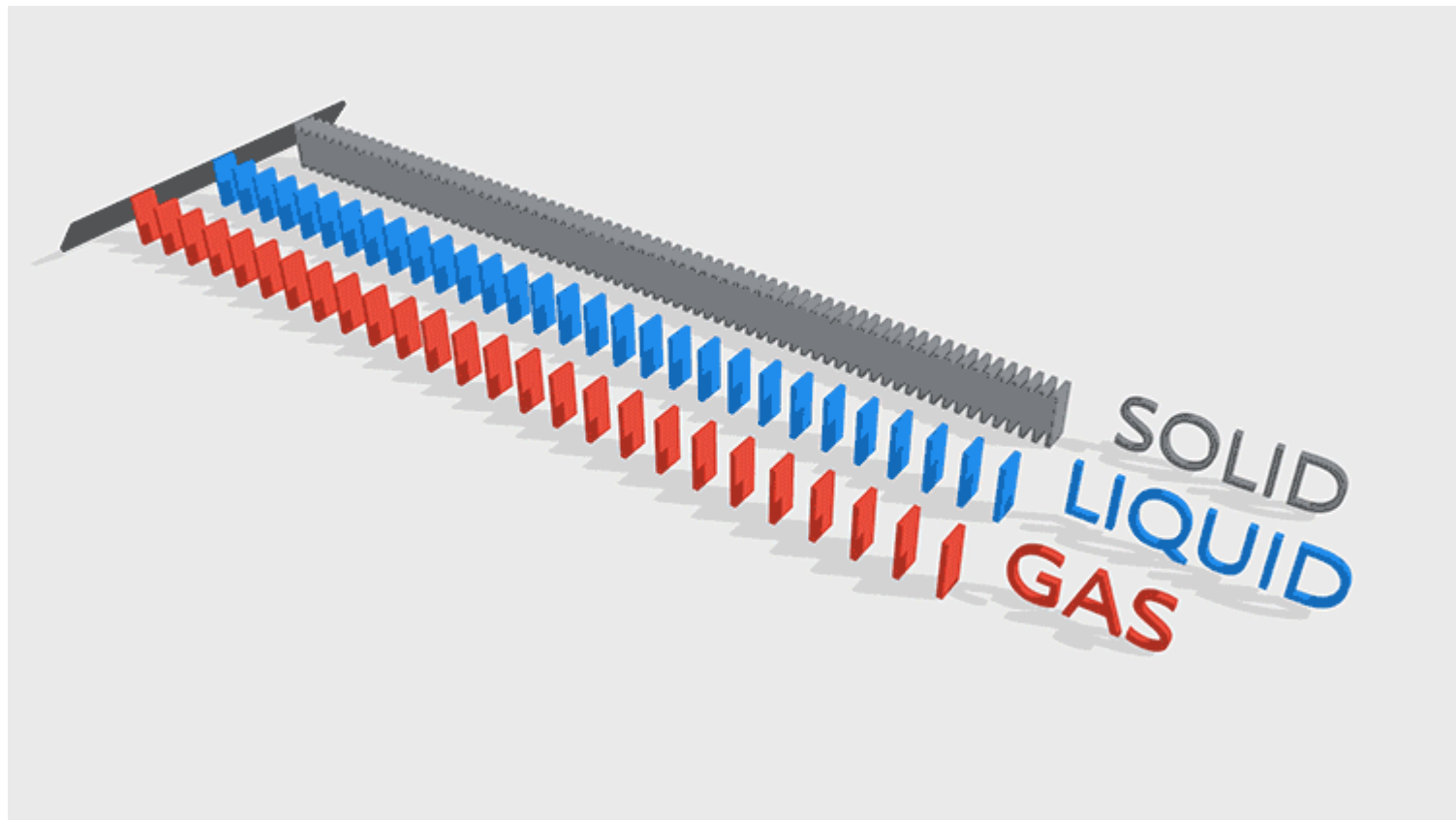
^aValues given are for propagation of longitudinal waves in bulk media. Speeds for longitudinal waves in thin rods are smaller, and speeds of transverse waves in bulk are smaller yet.

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

B = μέτρο ελαστικότητας όγκου
 ρ = 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_{avg} η μέση ισχύς του κύματος και A το εμβαδό της επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης

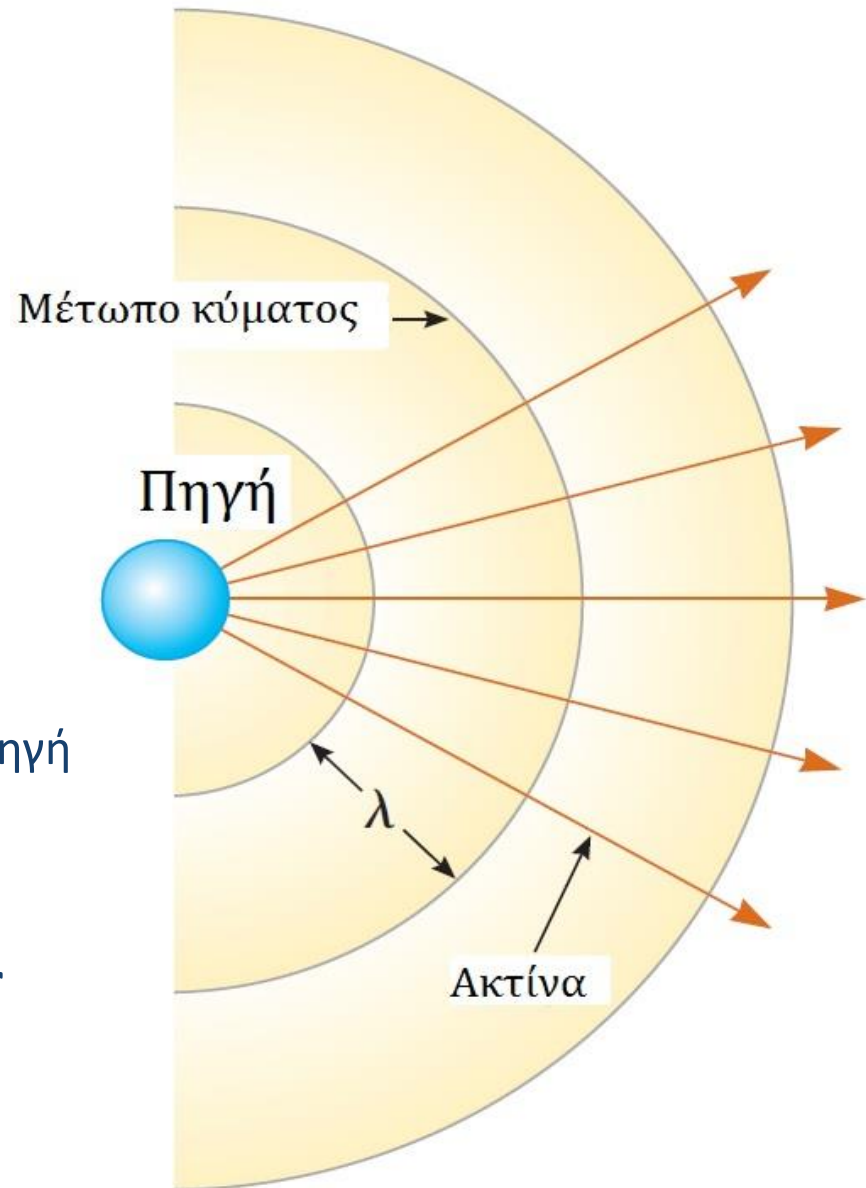
- Τα κύματα που είδαμε ως τώρα μοντελοποιούνταν ως διαμήκη κύματα
 - Διαδίδονταν σε ευθεία γραμμή
- Στην πράξη, τα ηχητικά κύματα διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις
 - Σφαιρικά κύματα
 - Ισοτροπική διάδοση → ίδια ένταση προς κάθε κατεύθυνση

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

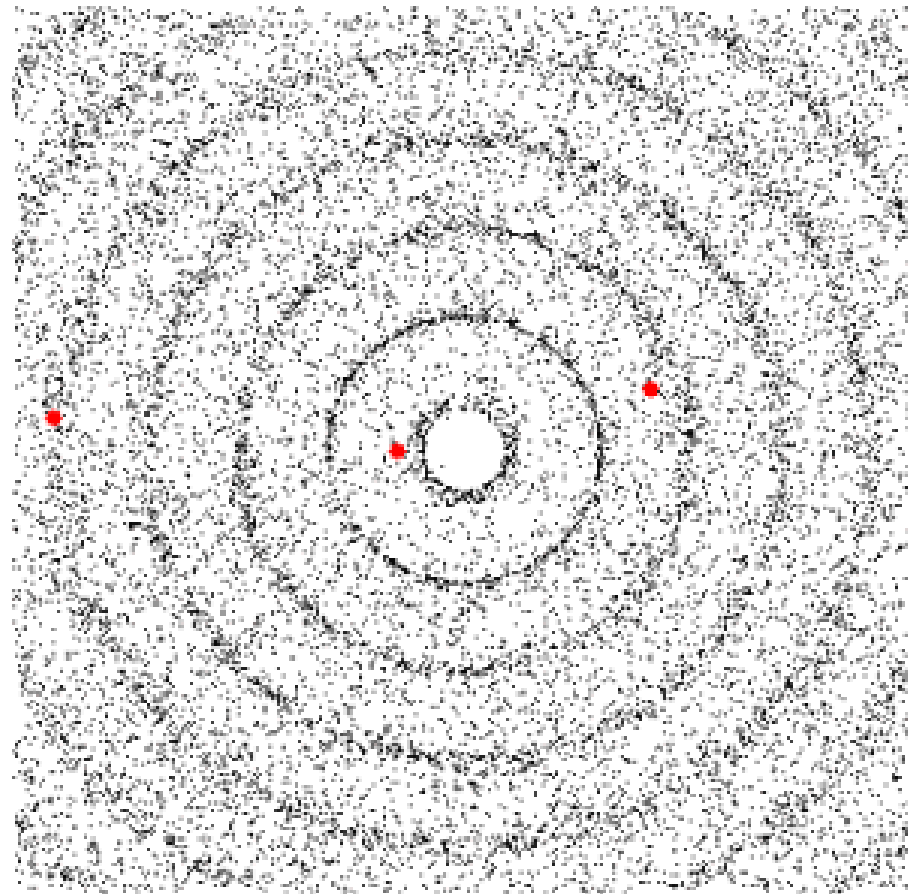
$$I = \frac{P}{A} = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Εμβαδό μετώπου

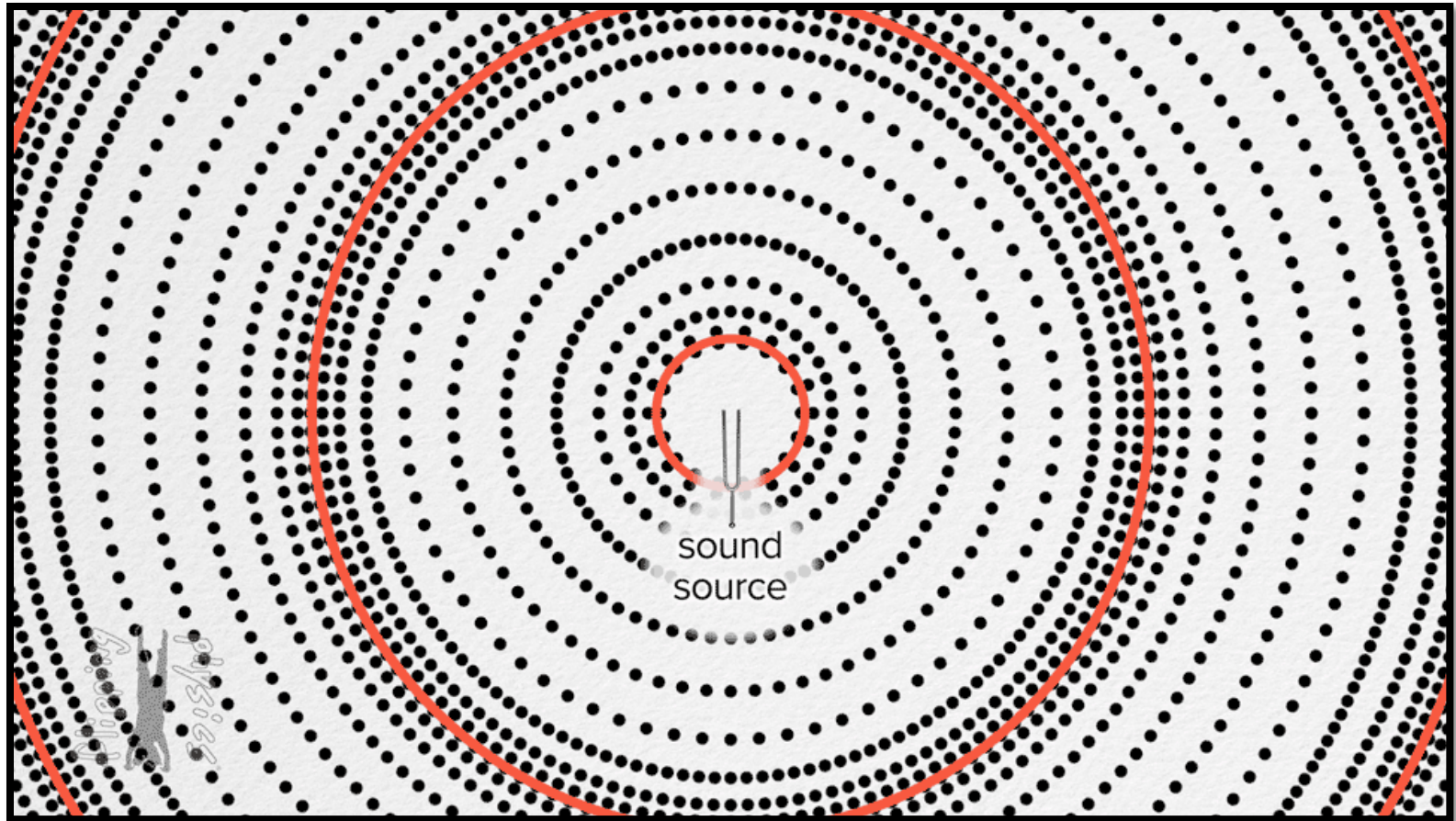


Ηχητικά Κύματα

Acoustic Monopole



Ηχητικά Κύματα



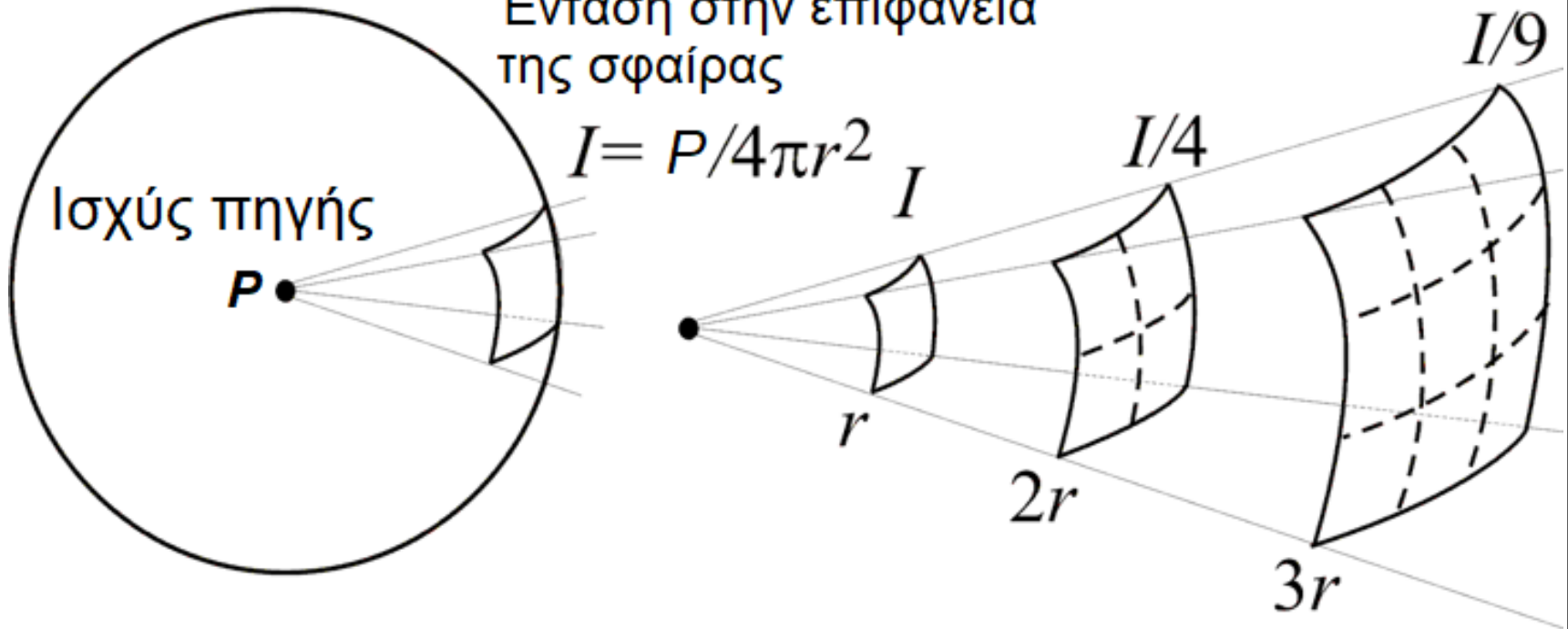
Ηχητικά Κύματα

Εμβαδό σφαίρας

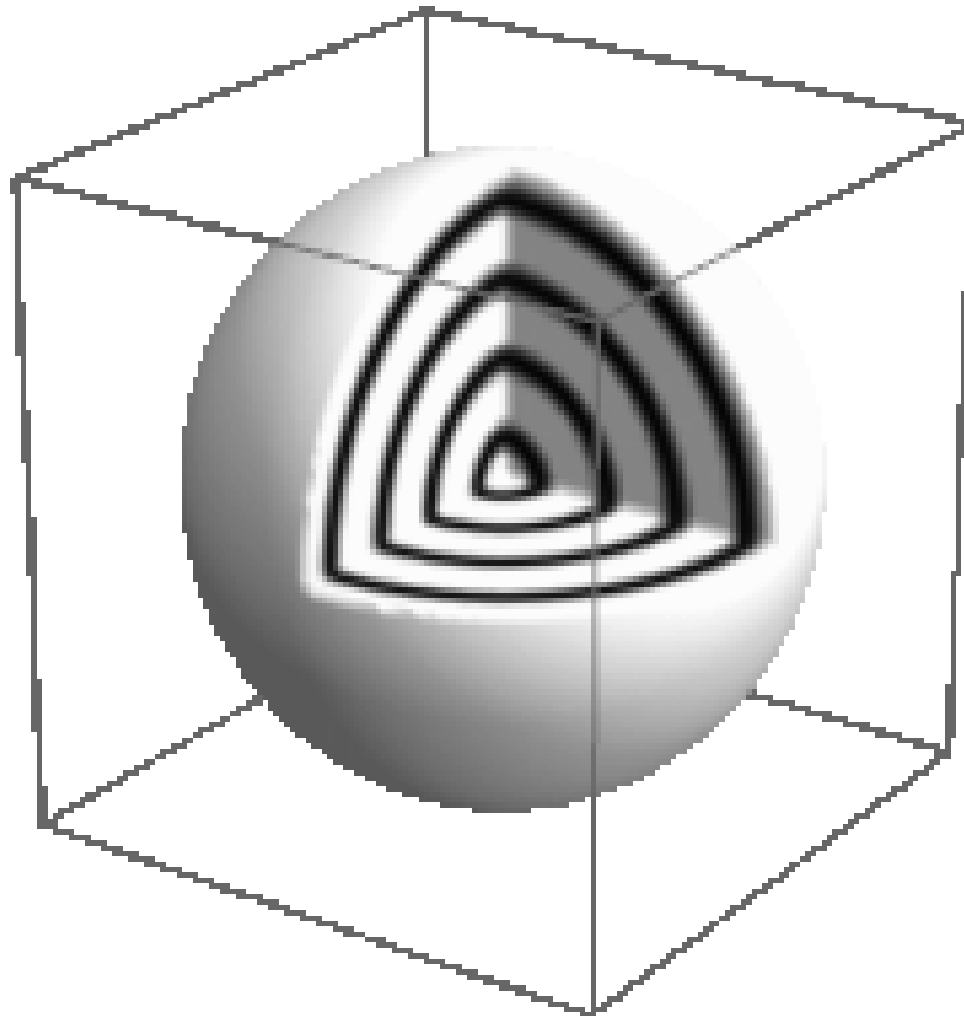
$$A = 4\pi r^2$$

Ένταση στην επιφάνεια
της σφαίρας

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



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
- β : μετριέται σε Decibel (dB)
 - Προς τιμήν του A. G. Bell
- Κατώφλι ακοής: 0 dB
- Όριο πόνου: 120-130 dB

Source of Sound	β (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.

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

$$= 10 \cdot \log_{10} 2 + 10 \log_{10} 10^5 = 10 \cdot \log_{10} 2 + 50 \log_{10} 10$$

$$= 10 \log_{10} 2 + 50 \cdot 1 = 50 + \underbrace{10 \log_{10} 2}_{\approx 3} \approx 53 \text{ dB}$$

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

Ηχητικά Κύματα

• Παράδειγμα – Λύση:

- 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.

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

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

$$I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$I = 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

} \Rightarrow

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{4 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}}$$

$$= 10 \log_{10} (4 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{12})$$

$$= 10 \log_{10} (4 \cdot 10^5)$$

$$= 10 \cdot \log_{10} 4 + 10 \log_{10} 10^5 = \cancel{10 \log_{10} 4} + 50 \approx 56 \text{ dB}$$

≈ 6

Ηχητικά Κύματα

● Παράδειγμα – Λύση:

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

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

Θα είναι $I_1 = \frac{P}{4\pi r_1^2}$

$$I_2 = \frac{P}{4\pi r_2^2}$$

$$r_1 = 10 \text{ m}$$

$$r_2 = 20 \text{ m}$$

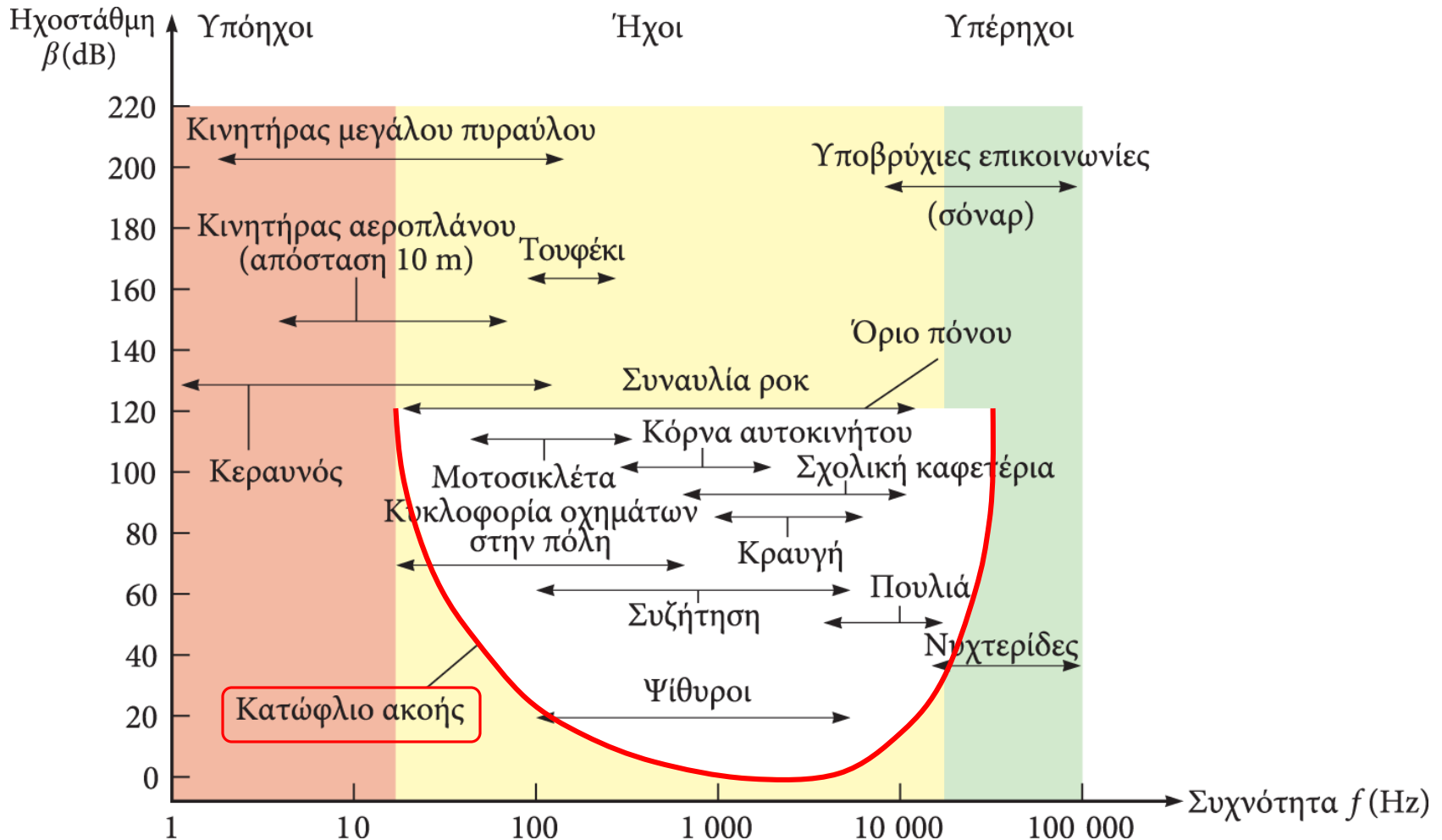
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2}$$

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

$$\text{Άρα } \frac{I_1}{I_2} = 4.$$

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^{ης} ηχογράφησης είναι συχνοτικά/ακουστικά το ίδιο με της 2^{ης};
- Ακούστε τους τώρα **απομονωμένους** από τους υπόλοιπους



Ηχητικά Κύματα

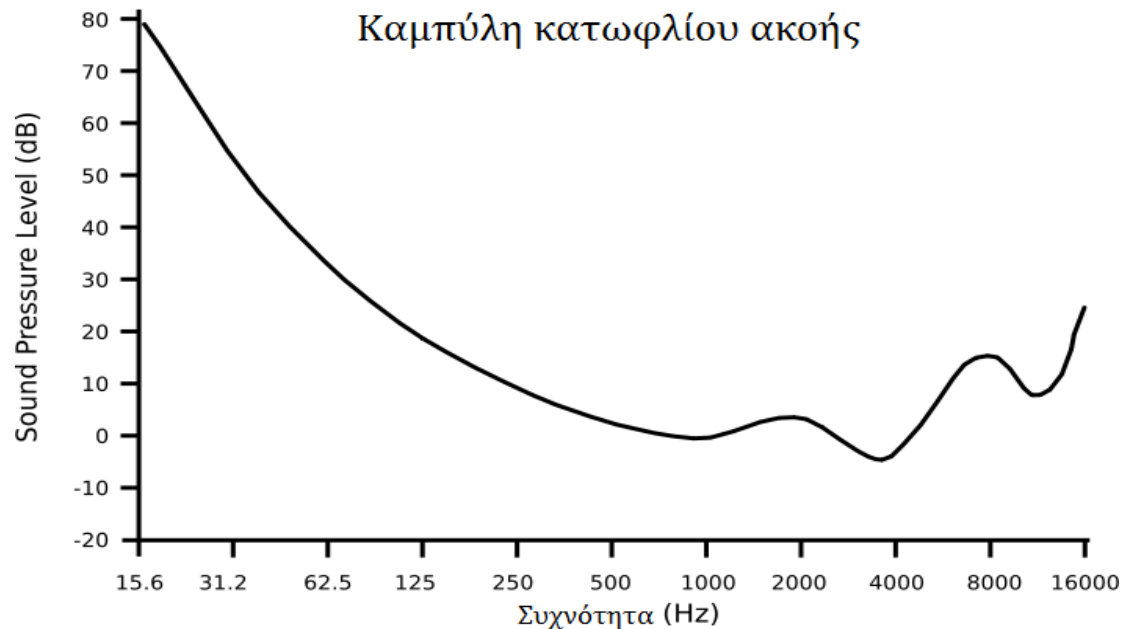
◉ Παράδειγμα εφαρμογής:

- ◉ 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?

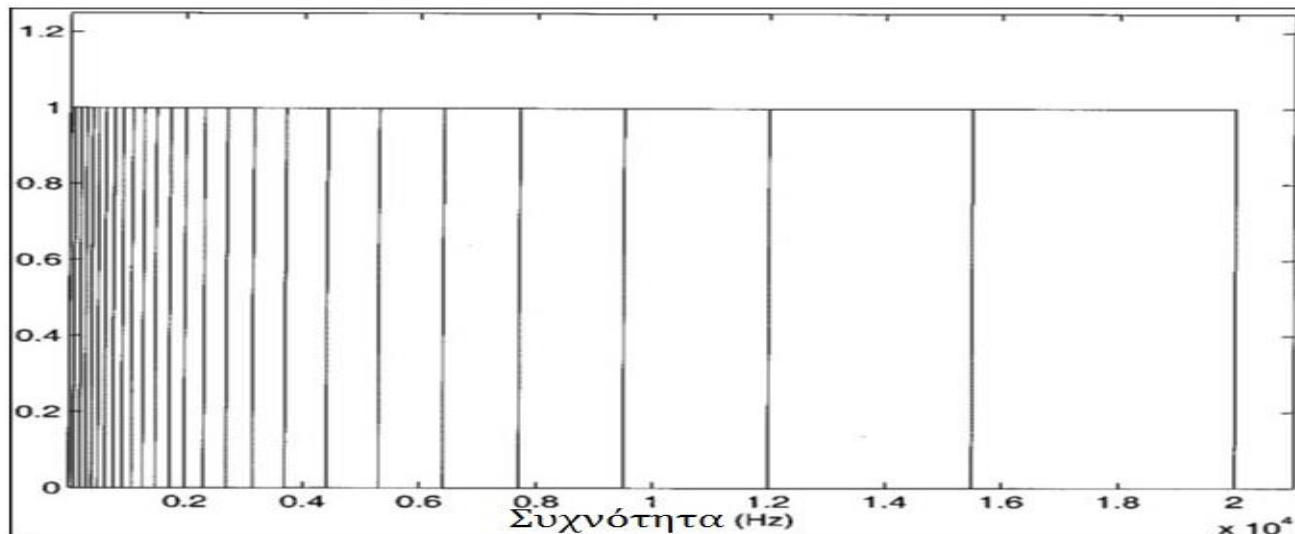


- Κάθε γραμμή είναι ένας τόνος στην ίδια συχνότητα αλλά σε διαφορετική ηχοστάθμη (**πάνω** από το κατώφλι ακοής (αριστερή στήλη), **κάτω** από το κατώφλι ακοής (δεξιά στήλη))

Ηχητικά Κύματα

◉ Παράδειγμα εφαρμογής:

- ◉ Συμπύεση 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

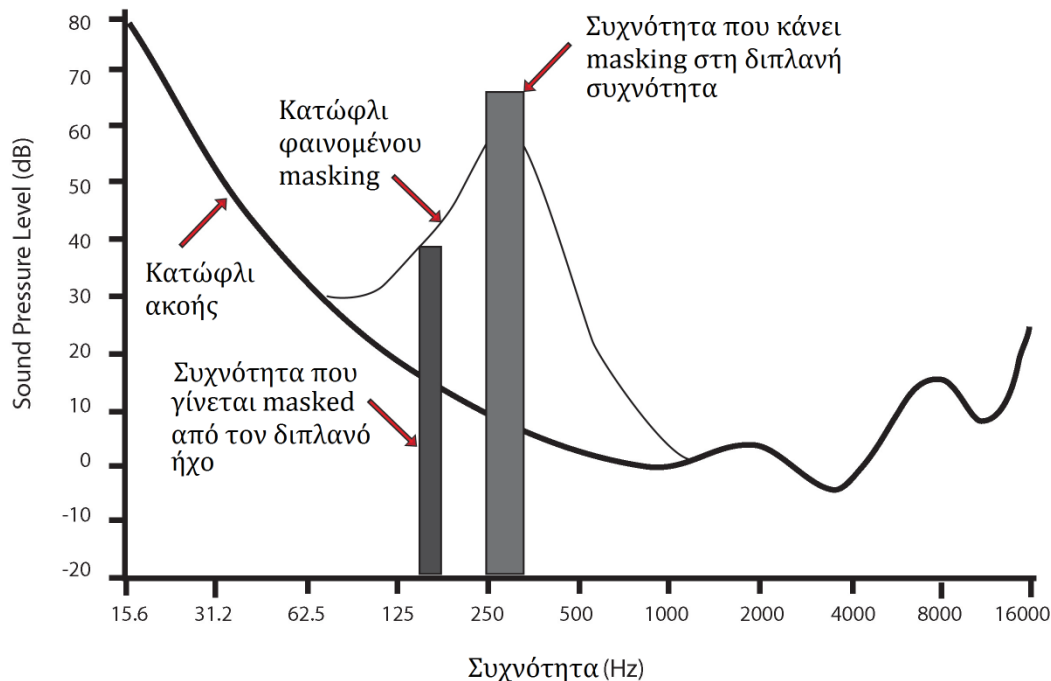


- Διακρίνετε με την ίδια **ευκολία** τη διαφορά των 50 Hz στο πρώτο ζεύγος και τη διαφορά των 200 Hz στο δεύτερο ζεύγος?

Ηχητικά Κύματα

◉ Παράδειγμα εφαρμογής:

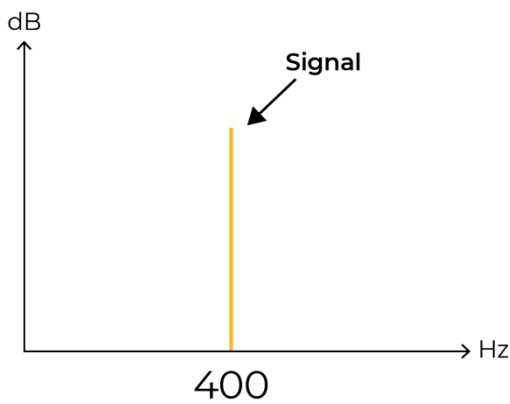
- ◉ Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
- ◉ Γ. Masking effect (σε χρόνο και συχνότητα)
 - ◉ Ένας πιο δυνατός ήχος μπορεί να επικαλύψει ένα γειτονικό του
 - ◉ Η πληροφορία του γειτονικού ήχου δε χρειάζεται να αποθηκευτεί



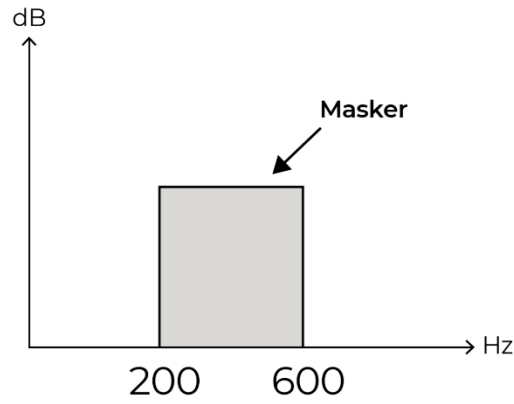
Ηχητικά Κύματα

○ Παράδειγμα εφαρμογής:

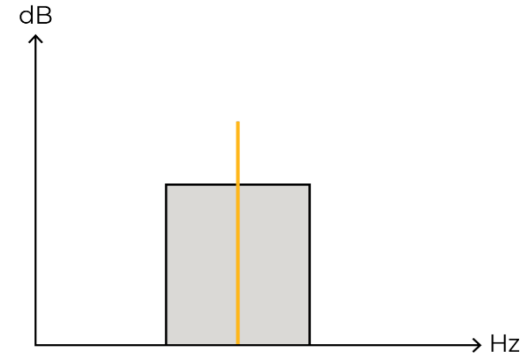
- Συμπύεση ήχου (MP3 standard)
- Γ. Masking effect (σε χρόνο και **συχνότητα**)



Pure 400Hz tone



200-600Hz pink noise



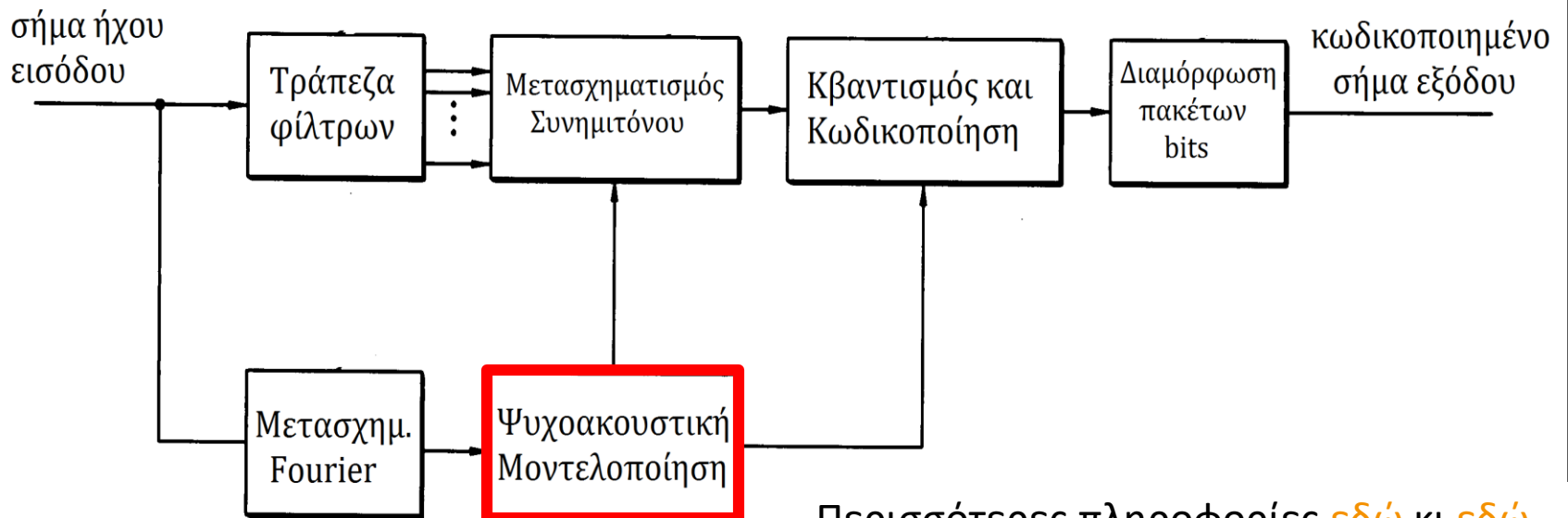
Tone + noise



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

Ηχητικά Κύματα

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



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



Τέλος Διάλεξης

