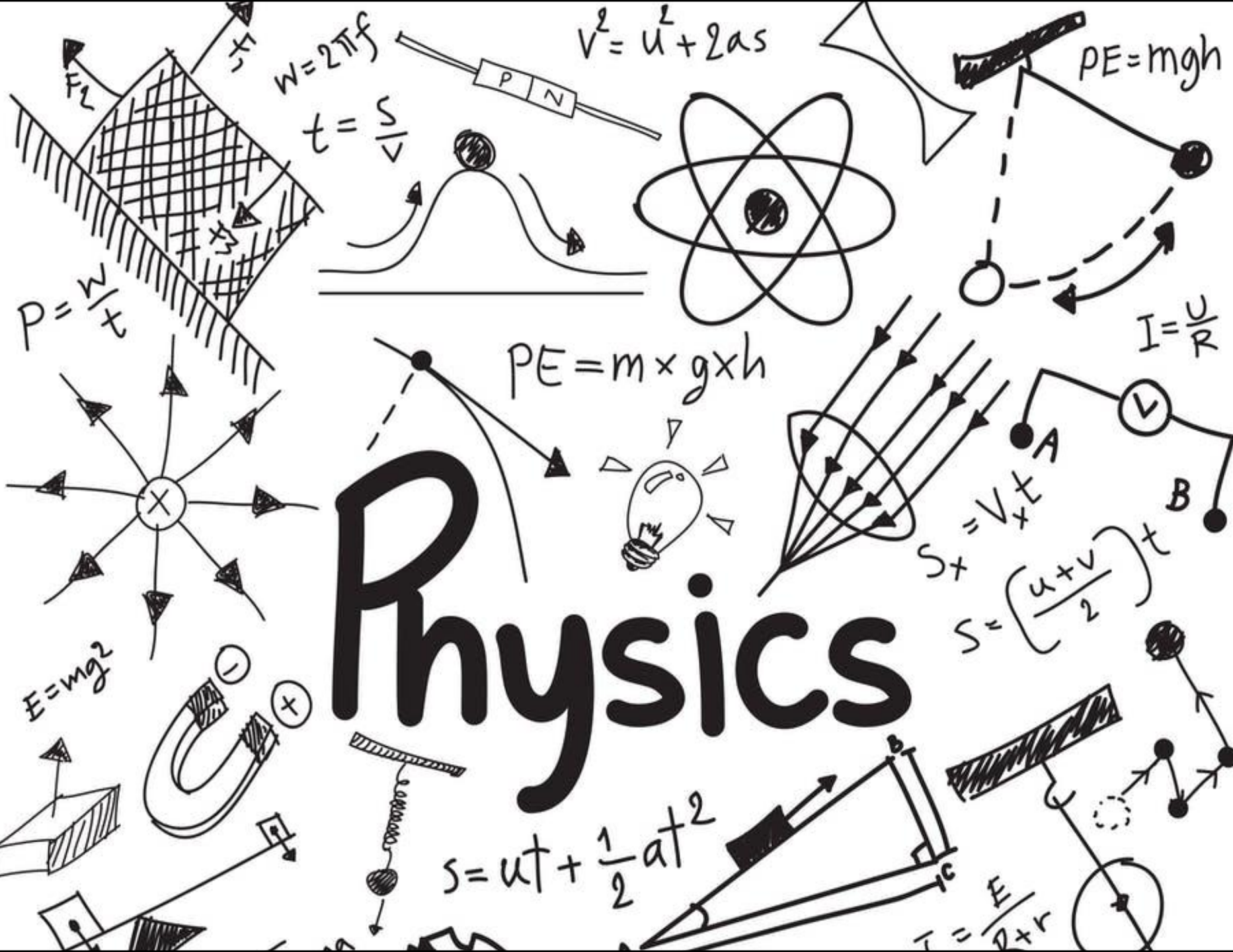


Physics



Reminder...

- Διαλέξεις
 - Προαιρετική παρουσία!
 - Είστε εδώ γιατί **θέλετε** να ακούσετε/συμμετέχετε
 - Δεν υπάρχουν απουσίες
- Υπάρχει σεβασμός στους συναδέλφους σας και στην εκπαιδευτική διαδικασία
- COVID attention: προσέρχεστε με τα απαραίτητα δικαιολογητικά
- 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)**

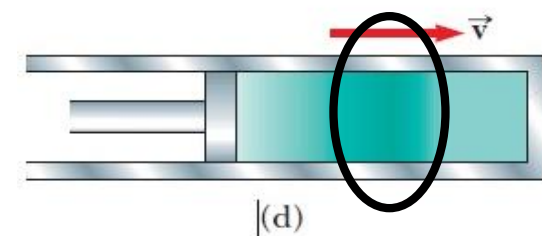
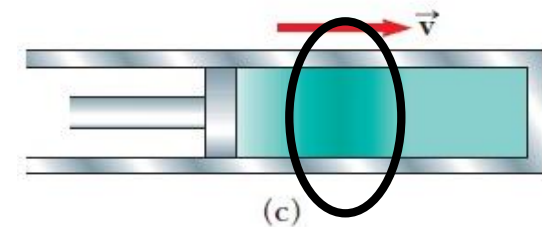
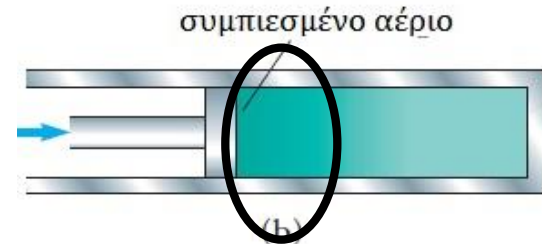
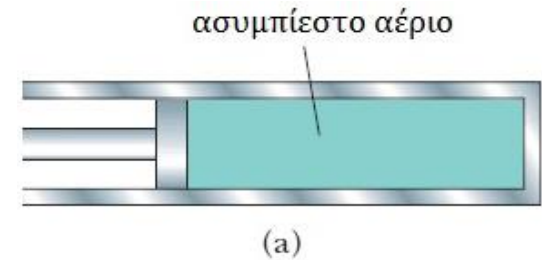
- Ελέφαντες, φάλαινες, και άλλα ζώα επικοινωνούν με υπόηχους
 - Έντονα φυσικά φαινόμενα παράγουν υπόηχους
 - Καταιγίδες, κατολισθήσεις, σεισμοί, ηφαιστειακή δραστηριότητα κ.α.

- **Κύματα υπερήχων (υπέρηχοι)**

- Σφυρίχτρες σκύλων, επικοινωνία νυχτερίδων
 - Ιατρική απεικόνιση

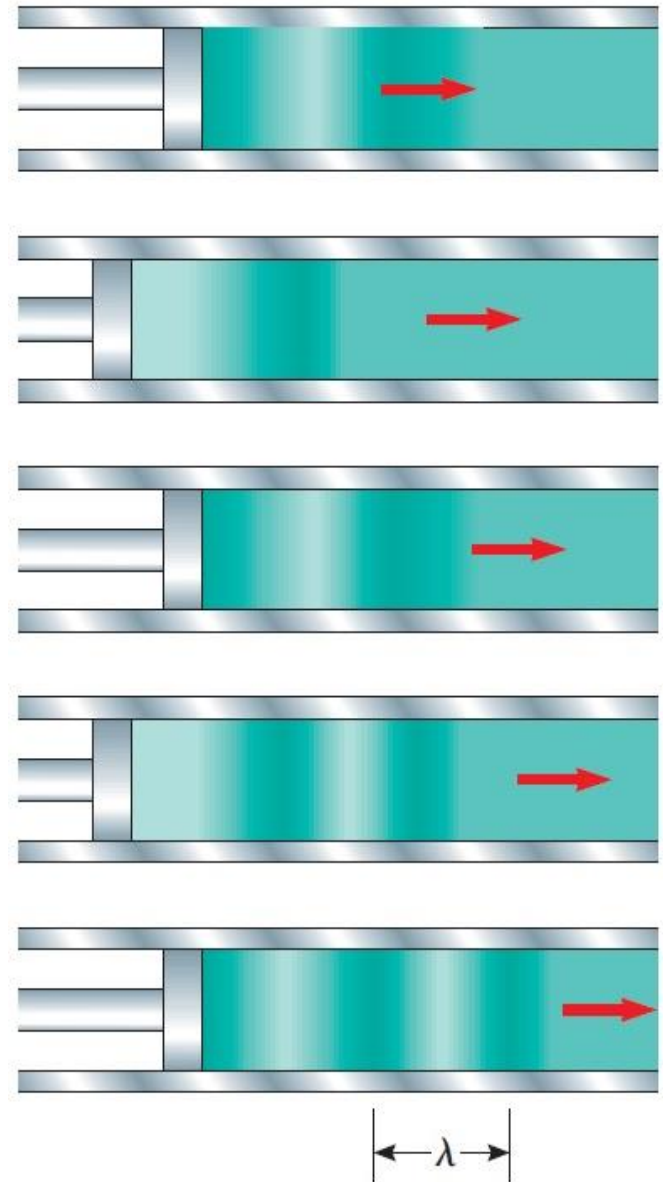
Ηχητικά Κύματα

- 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

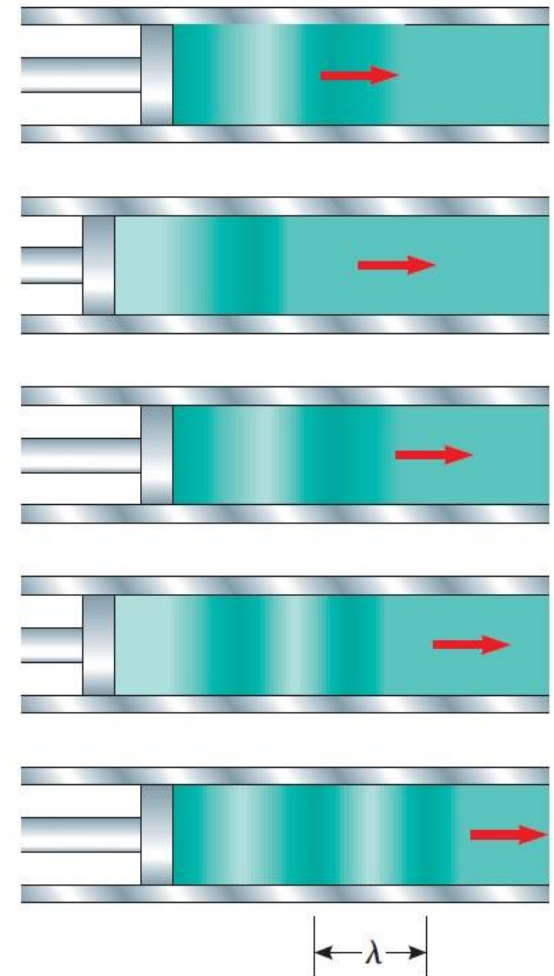


Ηχητικά Κύματα

- ◉ 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



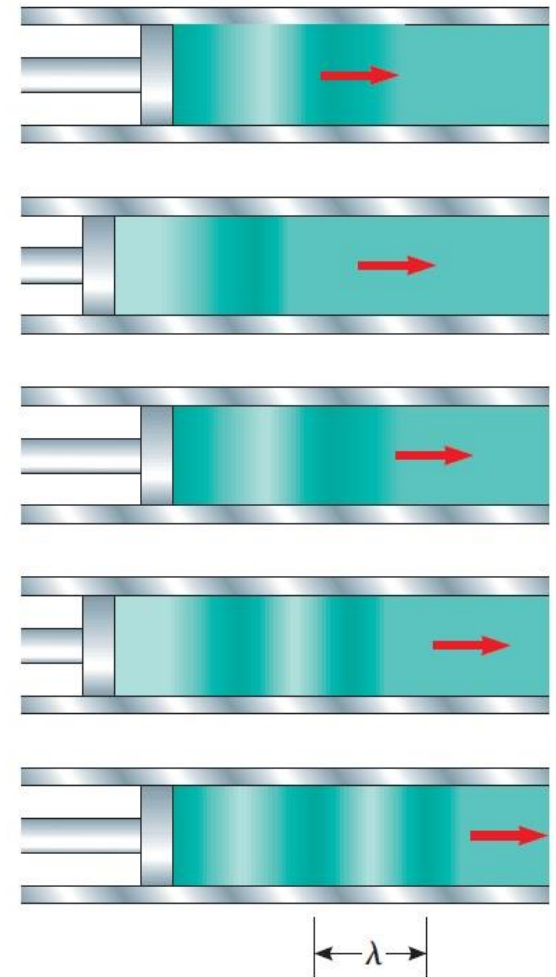
Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου ΔP

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

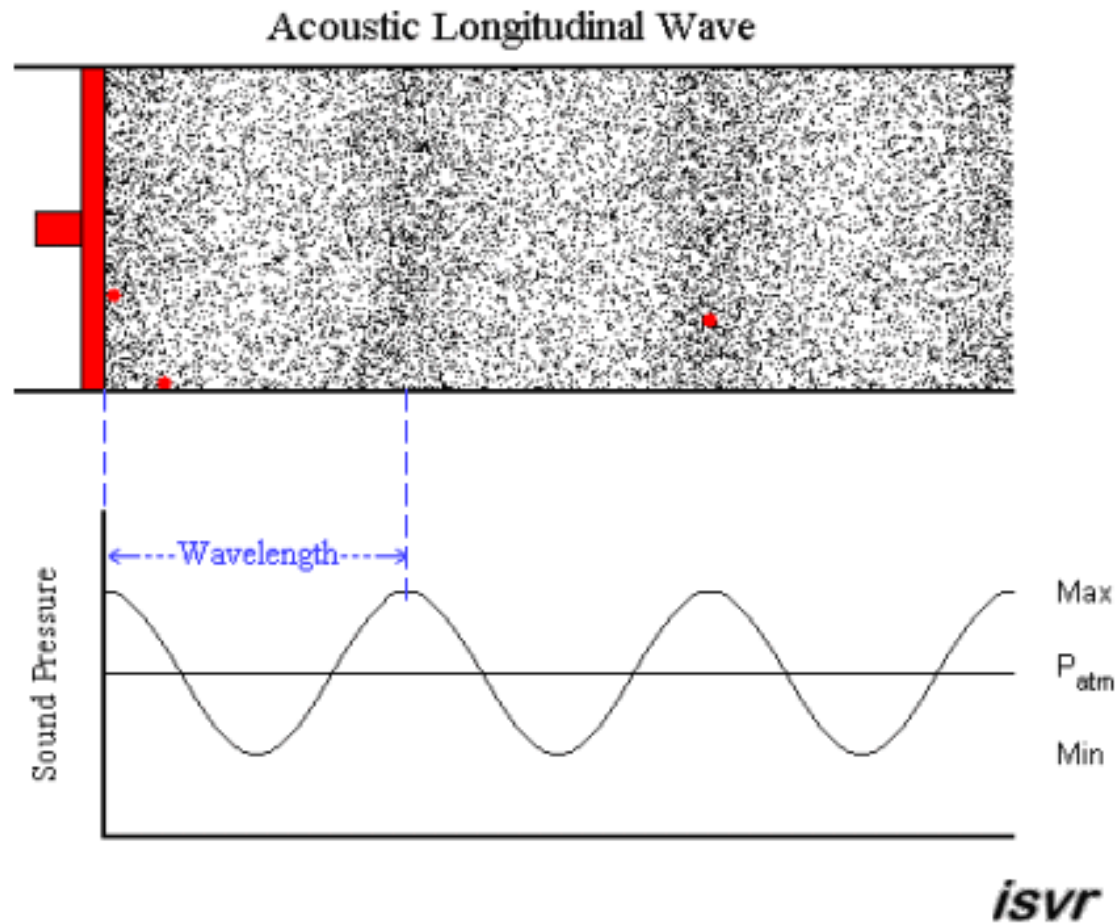
όπου ΔP_{max} η μέγιστη μεταβολή της πίεσης γύρω από την τιμή ισορροπίας

- Ο όρος ΔP_{max} ονομάζεται πλάτος πίεσης



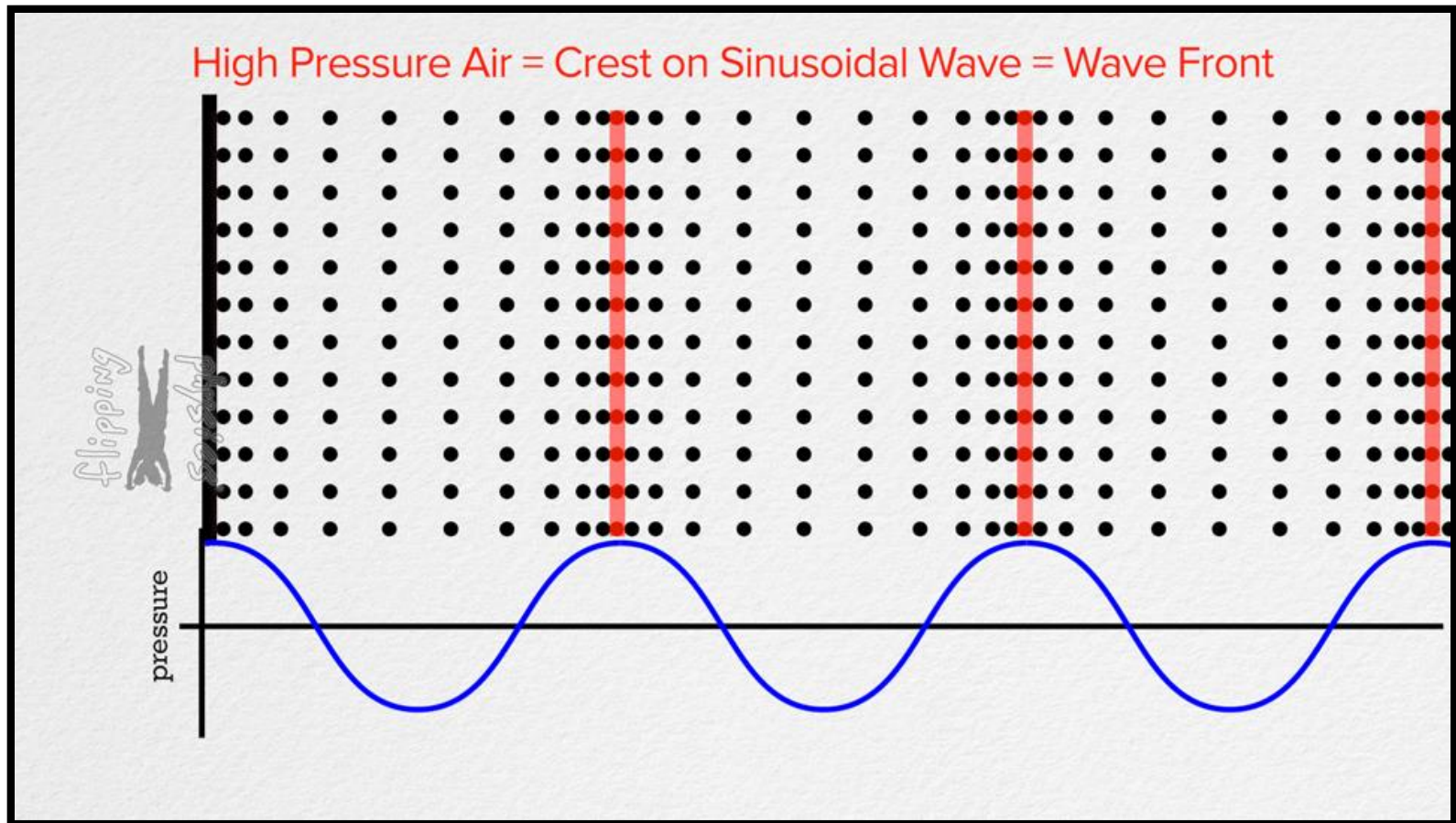
Ηχητικά Κύματα

- Μεταβολή πίεσης αερίου ΔP



Ηχητικά Κύματα

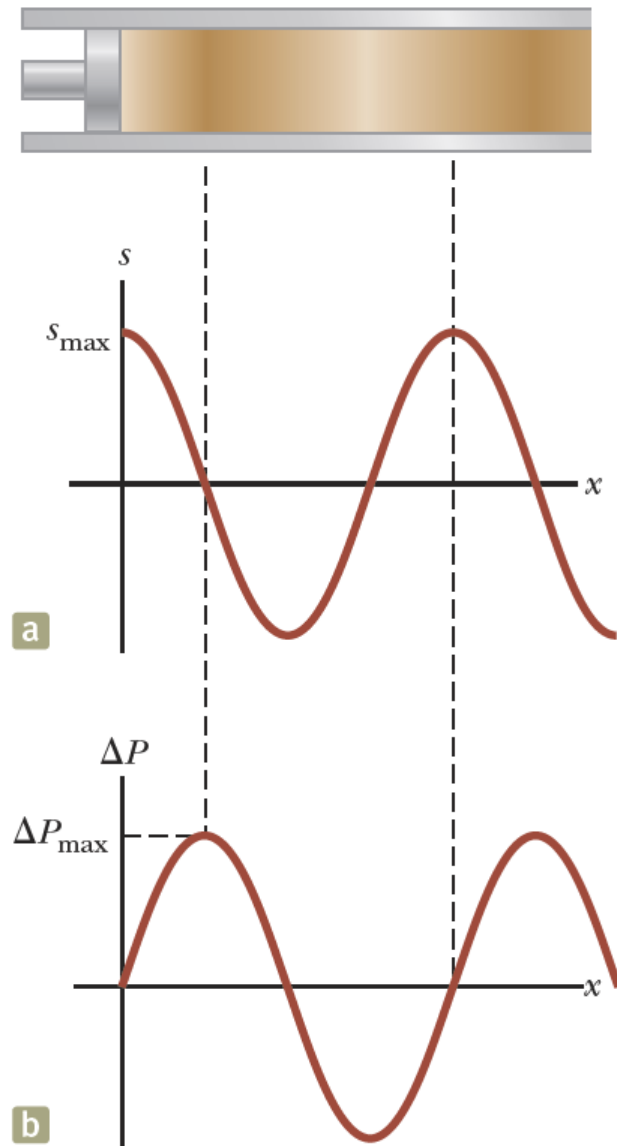
- Μεταβολή πίεσης αερίου ΔP



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 σε t δευτ/πτα?



Ηχητικά Κύματα

Αύξηση θερμοκρασίας $\Rightarrow$ αύξηση κινητικής ενέργειας μορίων

• 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

^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

- ◉ Ένταση περιοδικών ηχητικών κυμάτων

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

όπου A το εμβαδό της επιφάνειας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης

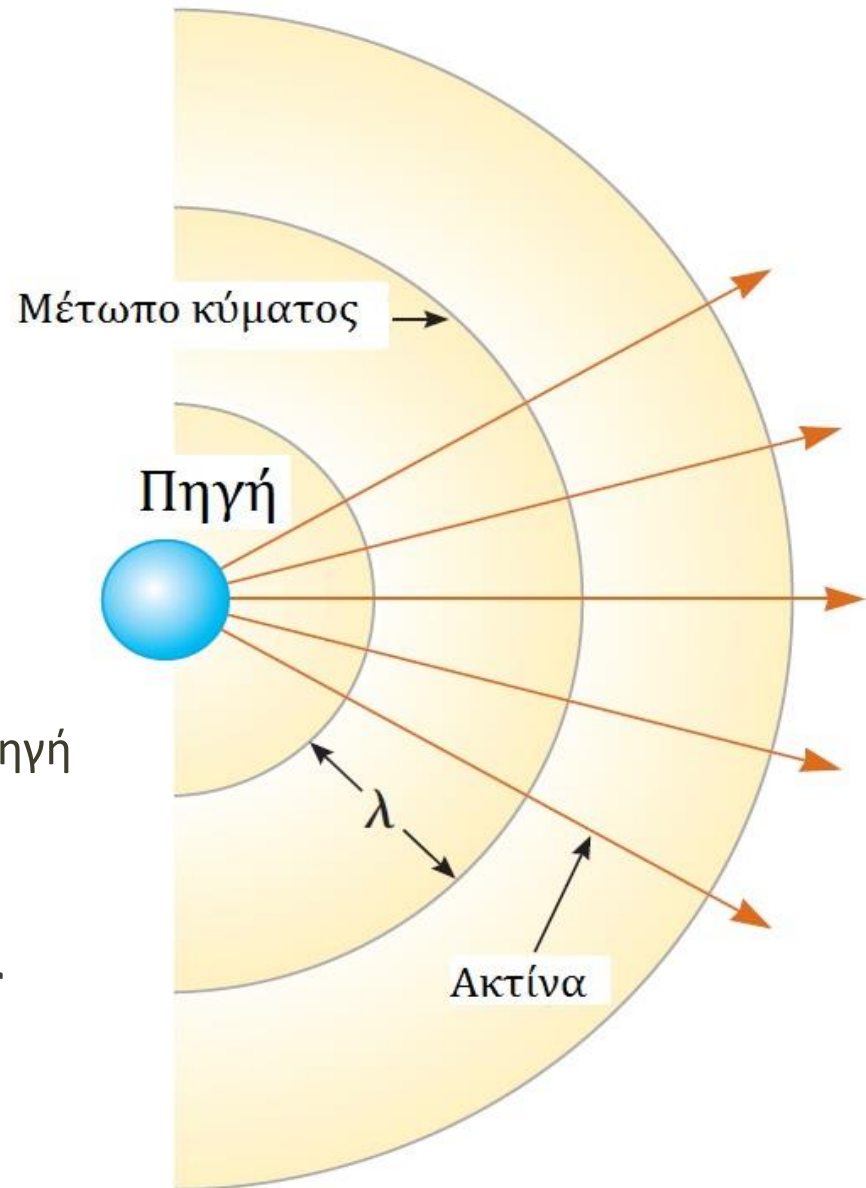
- ◉ Τα κύματα που είδαμε ως τώρα μοντελοποιούνταν ως διαμήκη κύματα
 - ◉ Διαδίδονταν σε ευθεία γραμμή
- ◉ Στην πράξη, τα ηχητικά κύματα διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις
 - ◉ Σφαιρικά κύματα

Ηχητικά Κύματα

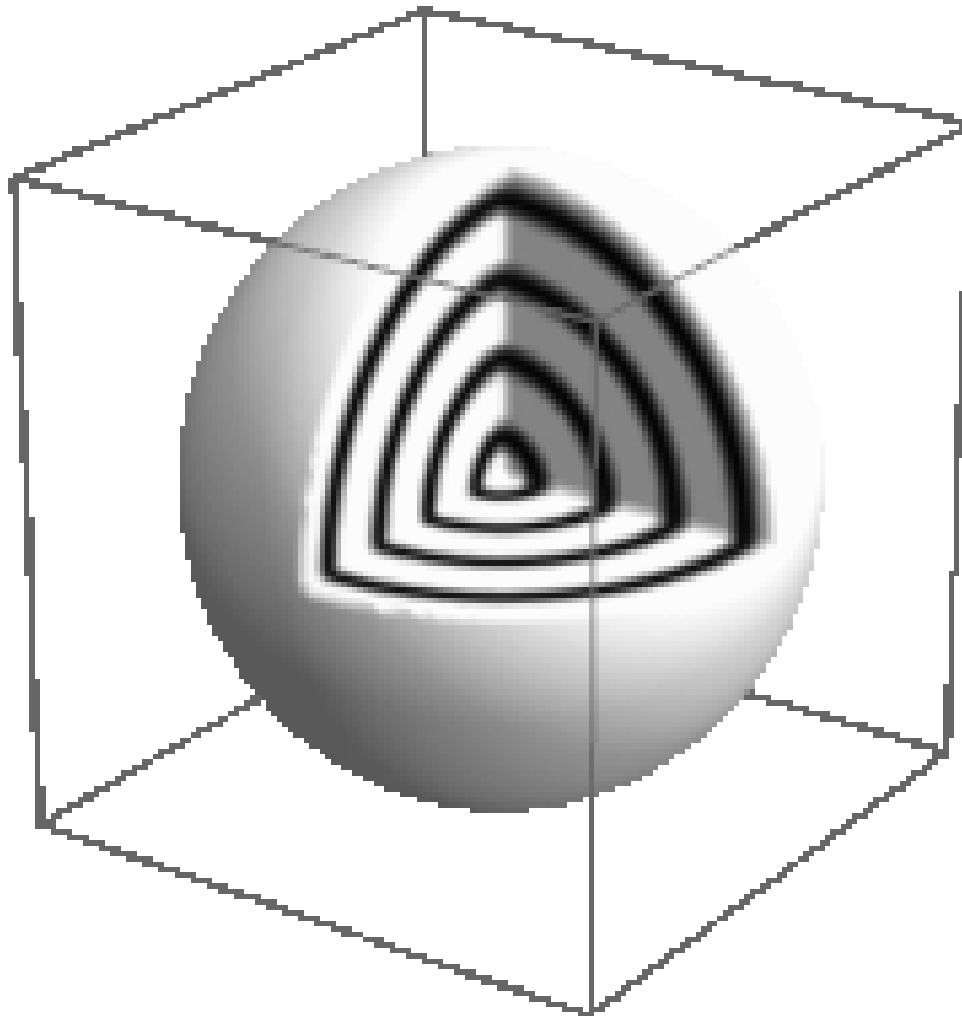
- Σφαιρικό κύμα
 - Ομόκεντρα κυκλικά τόξα
- Μέτωπο κύματος
 - Επιφάνεια όπου η φάση $(kx - \omega t + \varphi)$ του κύματος έχει ίδια τιμή
- Ακτίνες
 - Ευθείες που ξεκινούν απ' την πηγή
 - Δείχνουν την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος
- Ένταση κύματος σε απόσταση r

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

Εμβαδό μετώπου



Ηχητικά Κύματα



Ηχητικά Κύματα

Εμβαδό σφαίρας

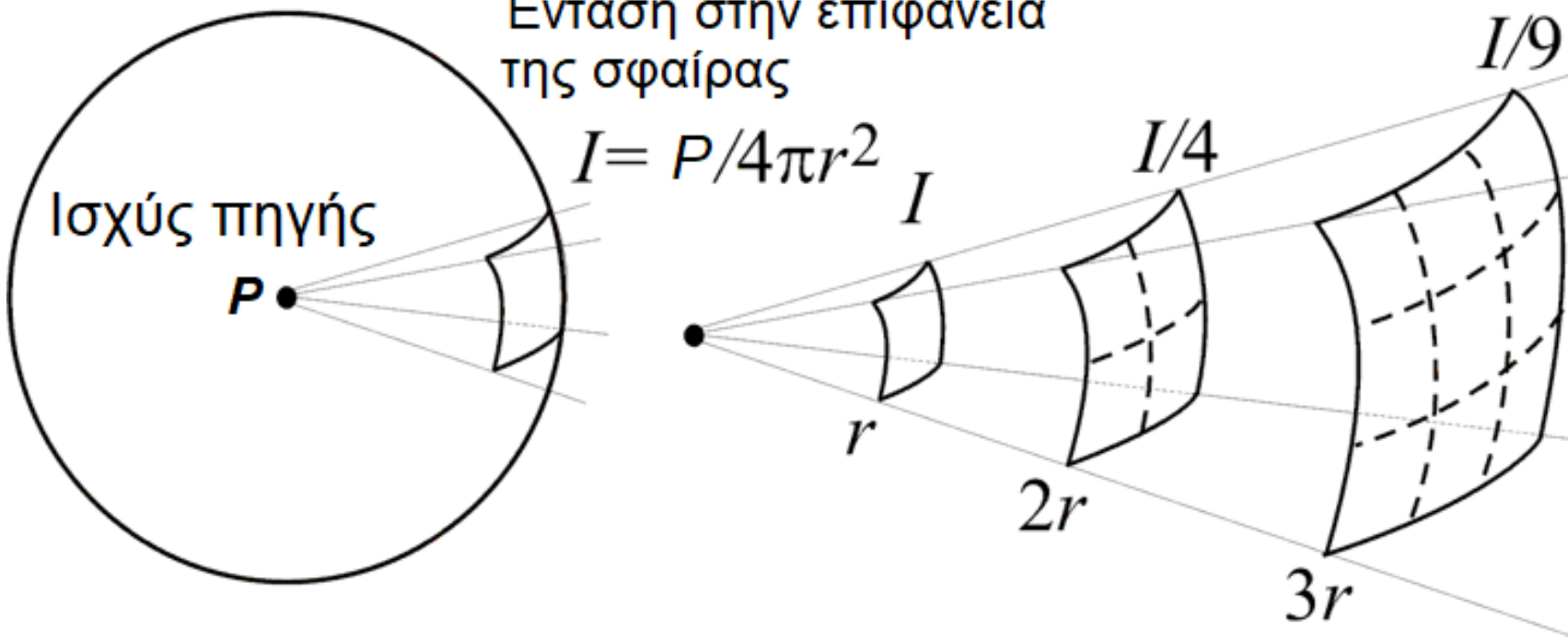
$$A = 4\pi r^2$$

Ένταση στην επιφάνεια
της σφαίρας

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

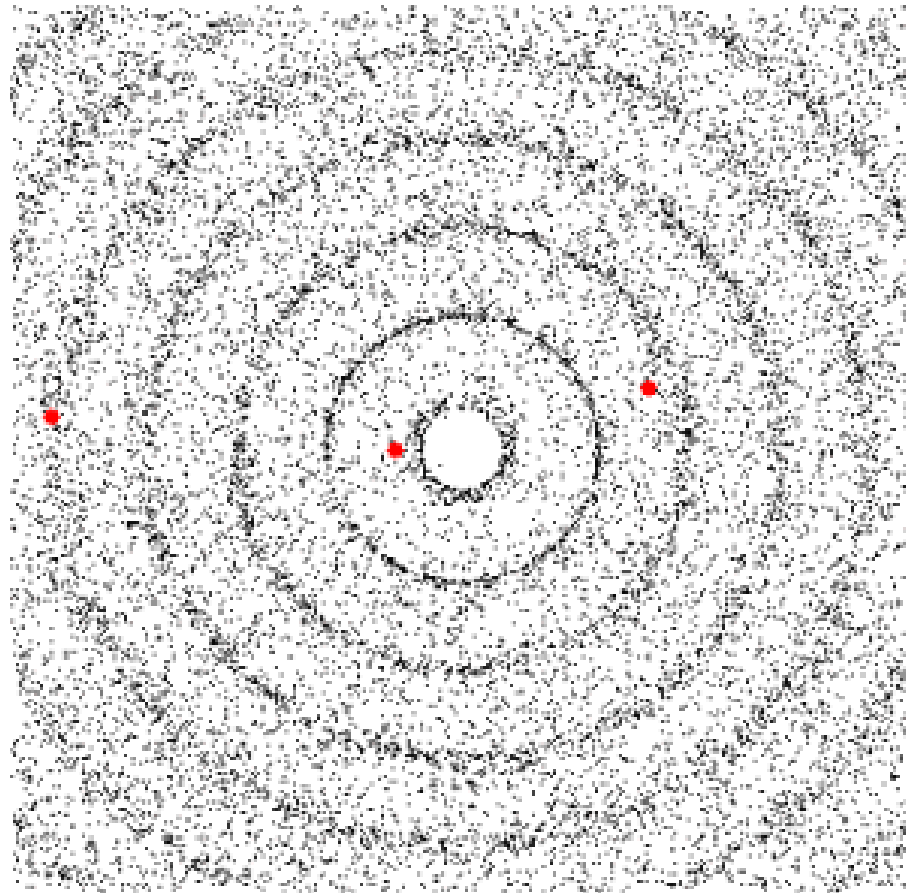
Ισχύς πηγής

P



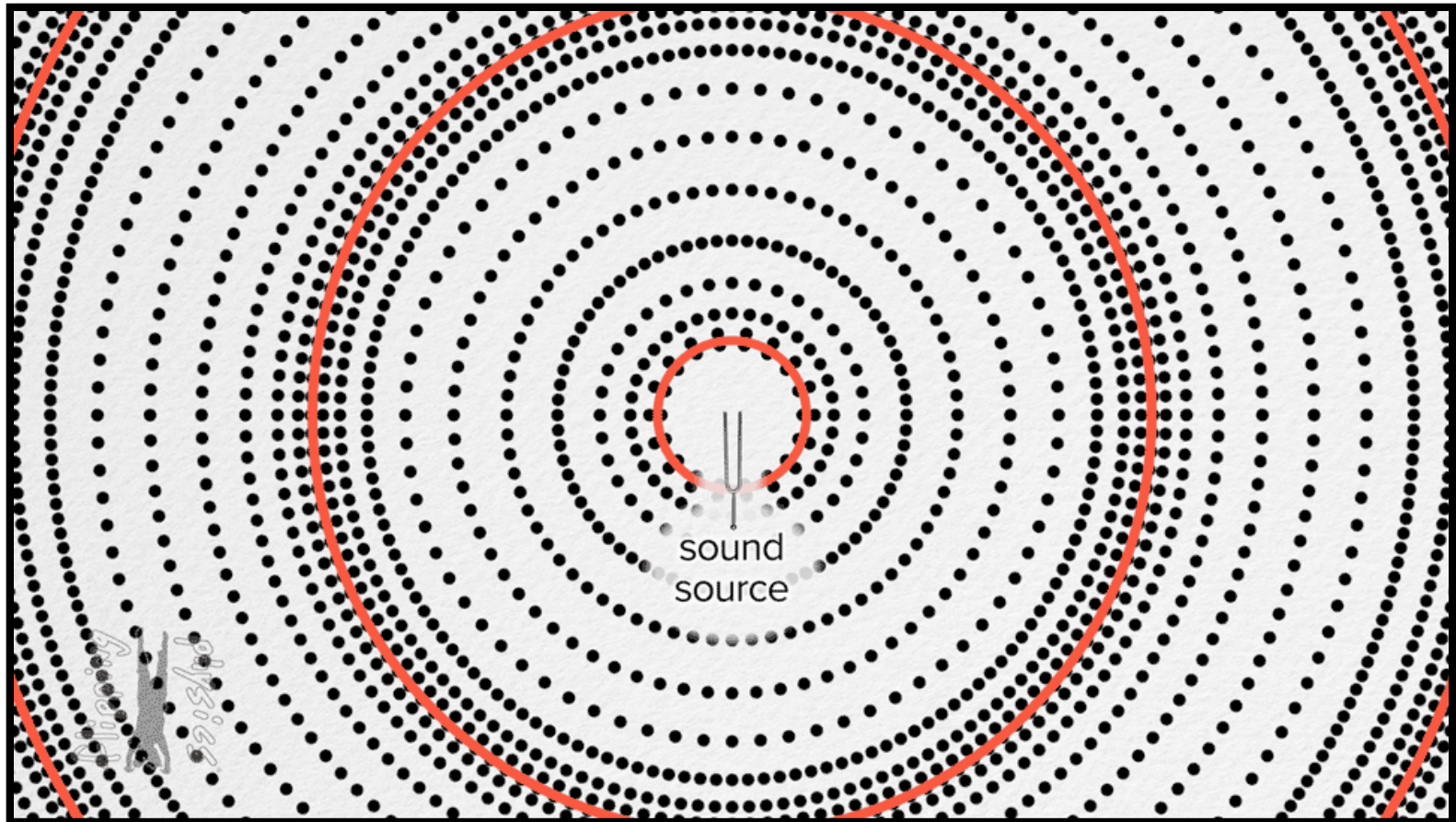
Ηχητικά Κύματα

Acoustic Monopole



isvr

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 $1 \frac{W}{m^2}$

Ηχητικά Κύματα

More interesting dB range :)

◉ Ηχοστάθμη

- ◉ Μεγάλο εύρος εντάσεων αντιληπτό απ' το αυτί μας
- ◉ Μια λογαριθμική κλίμακα είναι βολικότερη
- ◉ **Ηχοστάθμη**

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

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

Sound Levels	
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 και 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.

$$\begin{aligned} \text{Έναι } \beta &= 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \\ I_0 &= 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \\ I &= 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \beta &= 10 \log_{10} \frac{2 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}} = \\ &= 10 \log_{10} (2 \cdot 10^5) \\ &= 10 \log_{10} 2 + 10 \log_{10} 10^5 \\ &= 10 \log_{10} 2 + 50 \cdot \log_{10} 10 \\ &= 50 + 10 \log_{10} 2 \approx 53 \text{ dB} \end{aligned}$$

$\log_{10} 2 \approx 0.3$

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

$$\log(ab) = \log(a) + \log(b)$$

$$\log(a^b) = b \log(a)$$

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.

$$\begin{aligned} \text{Δίνονται} \quad \beta &= 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \\ I &= 4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \\ I_0 &= 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \begin{aligned} \beta &= 10 \log_{10} \frac{4 \cdot 10^{-7}}{10^{-12}} \\ &= 10 \log_{10} (4 \cdot 10^5) \\ &= 10 \log_{10} 4 + 10 \log_{10} 10^5 \\ &= 10 \log_{10} 4 + 50 \log_{10} 10 \\ &= 50 + 10 \cdot \underbrace{\log_{10} 4}_{\approx 6} \approx 56 \text{ dB} \end{aligned}$$

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

Ηχητικά Κύματα

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

Παράδειγμα – Λύση:

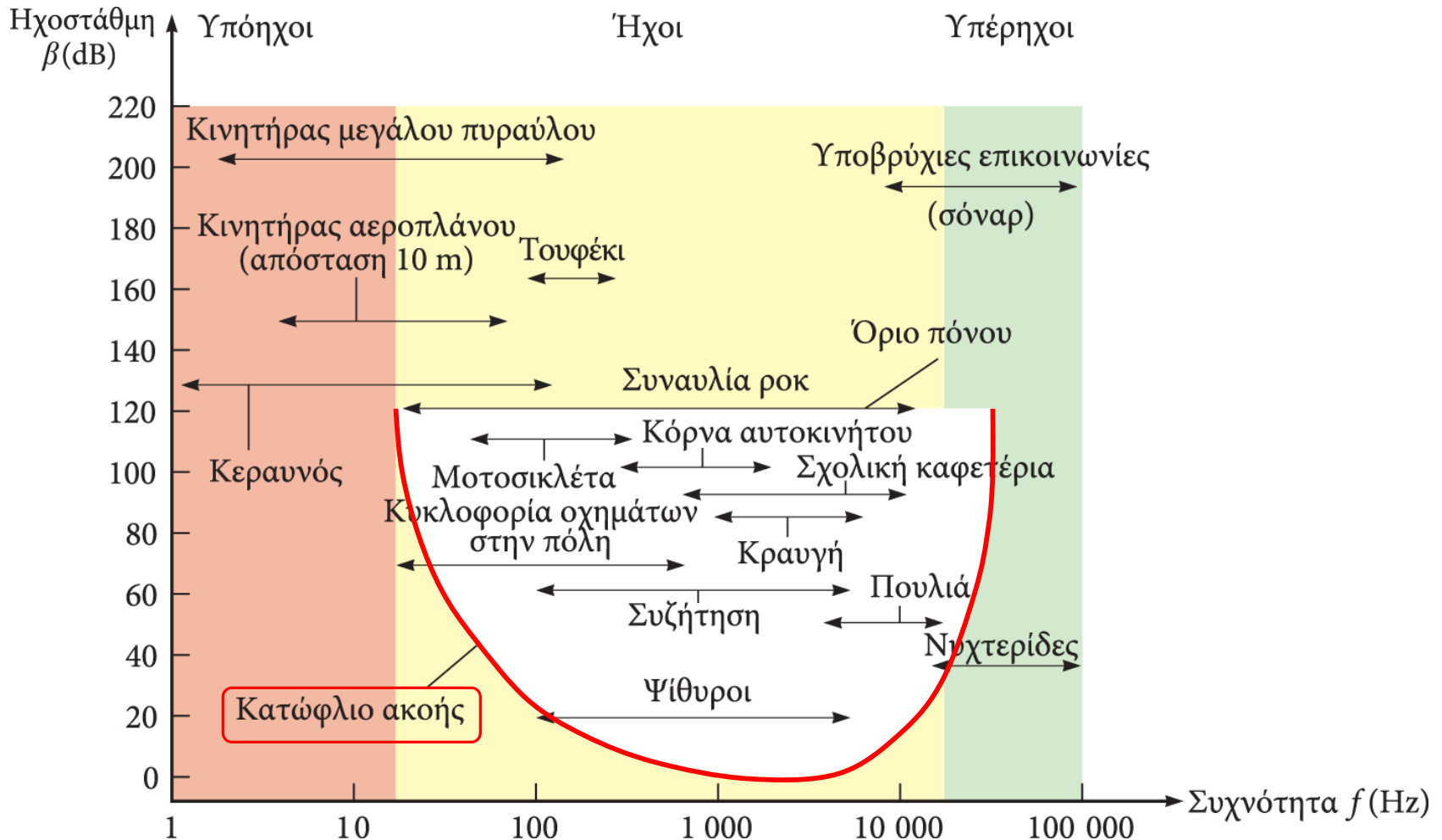
- Γ) Αν ο εργάτης δε λαμβάνει την ίδια ένταση ήχου από κάθε μηχανή και γνωρίζει ότι αυτές βρίσκονται σε απόσταση $r_1 = 10 \text{ m}$ και $r_2 = 20 \text{ m}$ αντίστοιχα, τότε ποιος είναι ο λόγος των εντάσεών τους?

$$\begin{aligned} \text{Θα είναι } I_1 &= \frac{P_{avg}}{4\pi r_1^2} \\ I_2 &= \frac{P_{avg}}{4\pi r_2^2} \\ r_1 &= 10 \text{ m} \\ r_2 &= 20 \text{ m} \end{aligned} \quad \Rightarrow \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{1}{4\pi r_1^2}}{\frac{1}{4\pi r_2^2}} = \frac{\frac{1}{r_1^2}}{\frac{1}{r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{20^2}{10^2} = \frac{400}{100} = 4$$

$$\text{Αρα } \frac{I_1}{I_2} = 4.$$

Ηχητικά Κύματα

Ακουστότητα και Συχνότητα – Ψυχοακουστική



Ηχητικά Κύματα

- ◉ Παράδειγμα εφαρμογής:

- ◉ Συμπίεση 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)

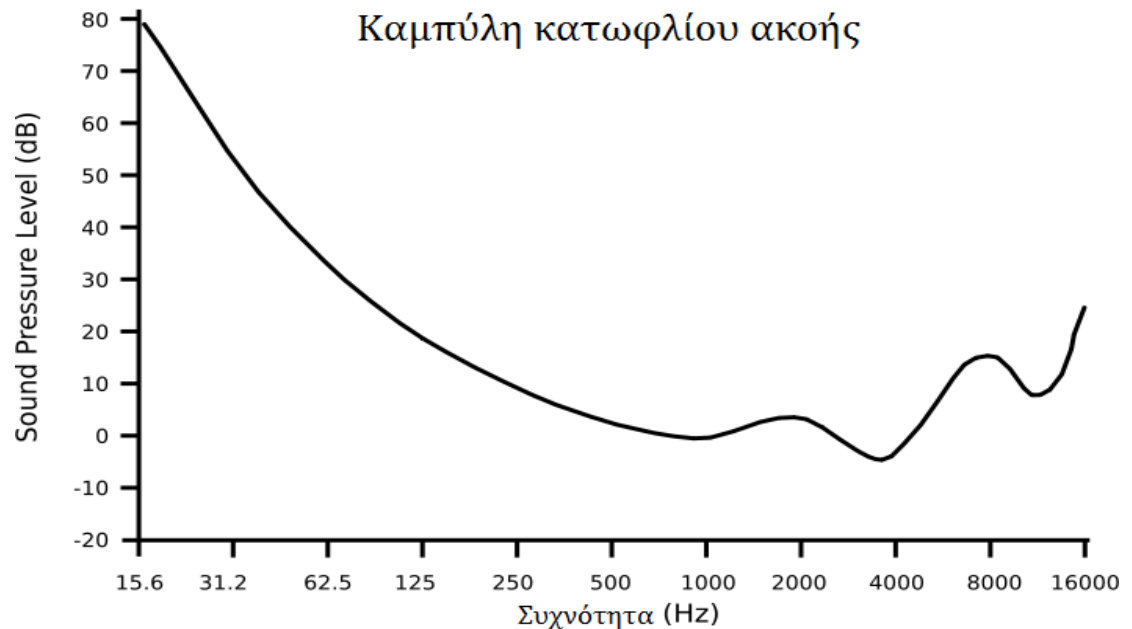
- ◉ Γ. Κάποιοι ήχοι επικαλύπτουν άλλους γειτονικούς

- ◉ Το φαινόμενο του masking (masking effect)

Ηχητικά Κύματα

- Παράδειγμα εφαρμογής:

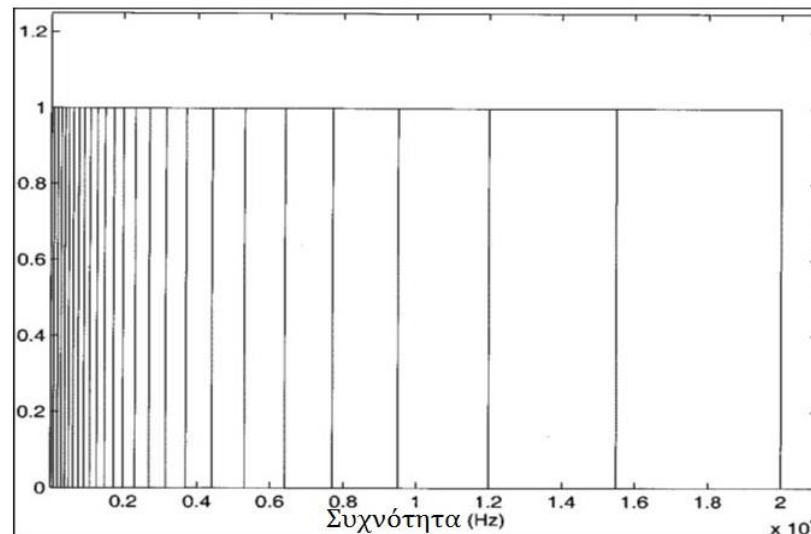
- Συμπίεση ήχου (MP3 standard)
- Α. Εξάλειψη ήχων που δεν ακούγονται ($<$ κατώφλι ακοής)
 - Μπορούμε να τους αφαιρέσουμε
 - Ό,τι βρίσκεται κάτω από το κατώφλι, δε χρειάζεται να αποθηκευτεί



Ηχητικά Κύματα

- Παράδειγμα εφαρμογής:

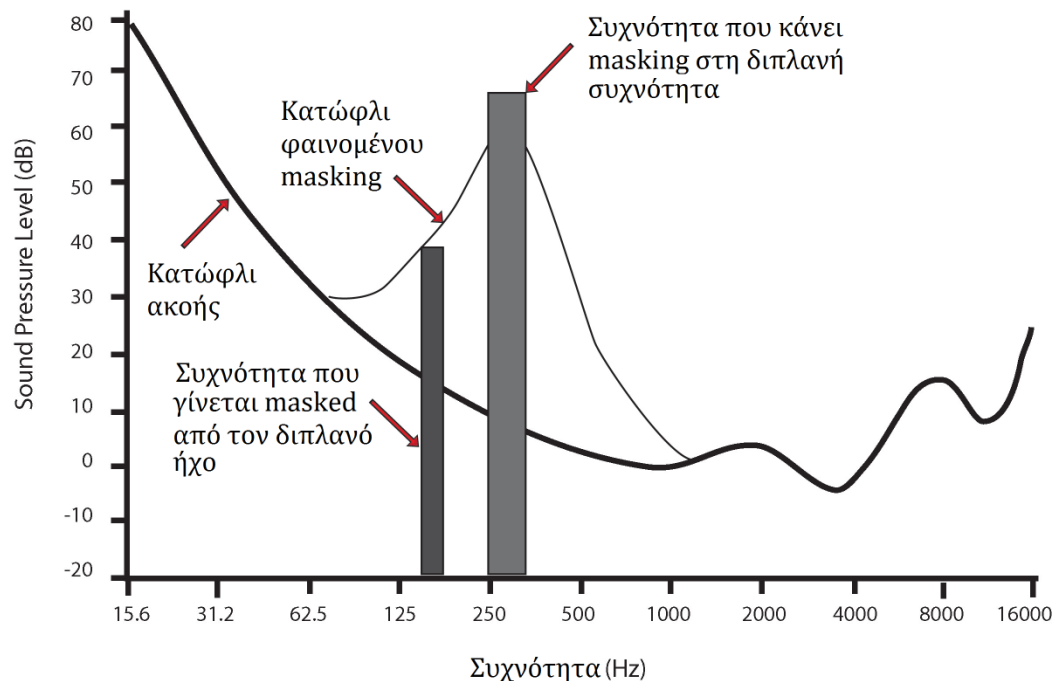
- Συμπίεση ήχου (MP3 standard)
- Β. Κάποιοι ήχοι είναι πιο «ευαίσθητοι» από άλλους
 - Χρήση κρίσιμων ευρών ζώνης (critical bands)
 - Διαφορετική «βαρύτητα» σε κάθε ζώνη
 - Διαφορετική «ευαισθησία» του αυτιού σε κάθε ζώνη



Ηχητικά Κύματα

ο Παράδειγμα εφαρμογής:

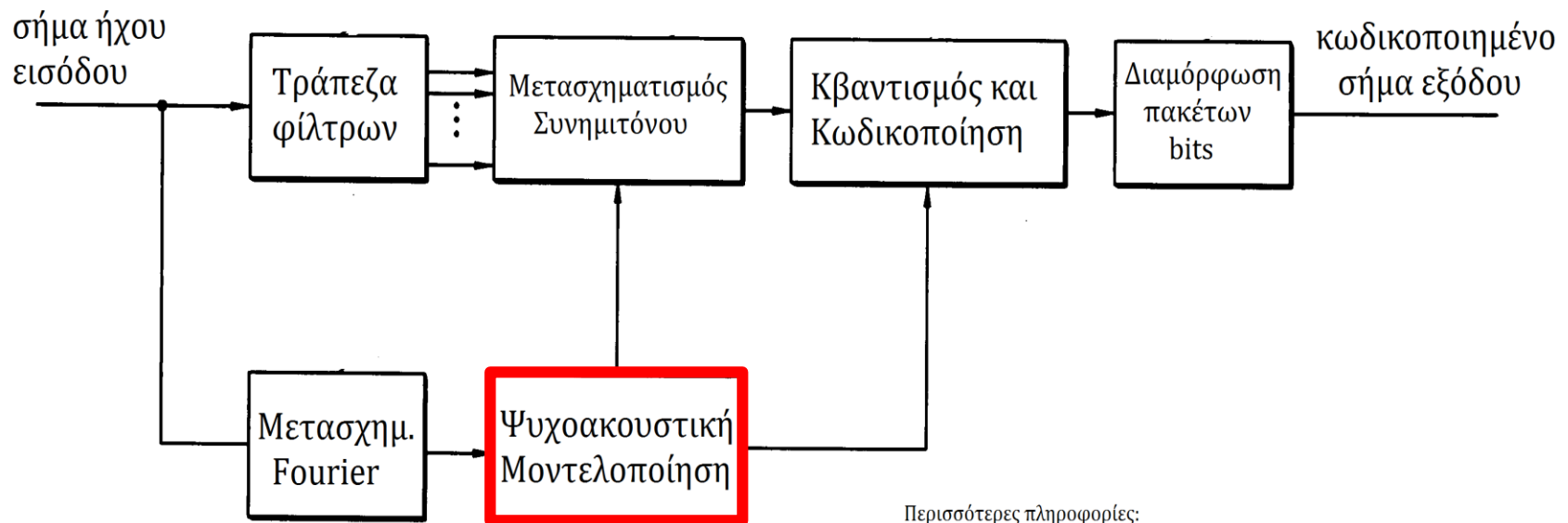
- ο Συμπίεση ήχου (MP3 standard)
- ο Γ. Masking effect
 - ο Ένας πιο δυνατός ήχος μπορεί να επικαλύψει ένα γειτονικό του
 - ο Η πληροφορία του γειτονικού ήχου δε χρειάζεται να αποθηκευτεί



Ηχητικά Κύματα

- Παράδειγμα εφαρμογής:

- Συμπίεση ήχου (MP3 standard)
- Απλοποιημένο διάγραμμα

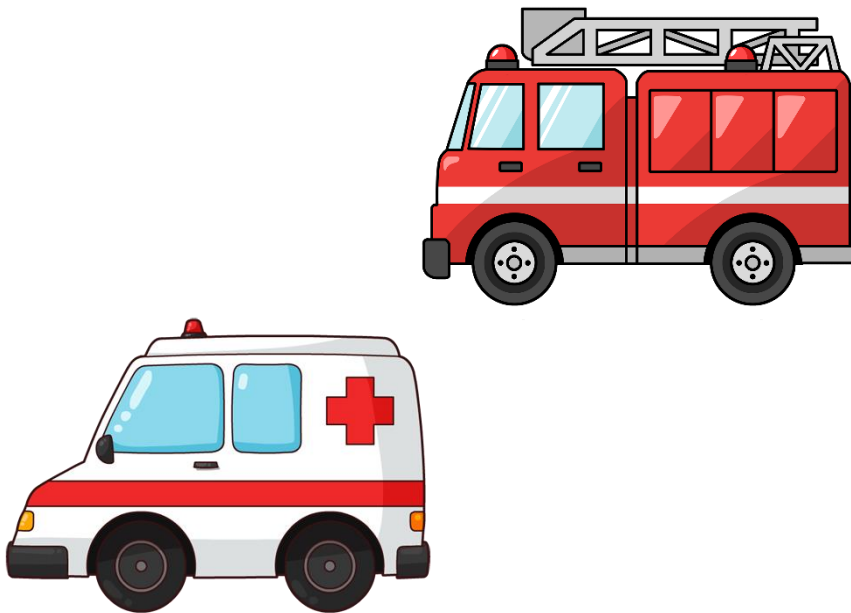


Περισσότερες πληροφορίες:
<http://www.cns.nyu.edu/~msl/courses/2223/Readings/IEEEXplore-1.pdf>

Ηχητικά Κύματα

◉ Το φαινόμενο Doppler

- ◉ Άκρως συχνή εμπειρία!
- ◉ Ένα όχημα με σειρήνα μας πλησιάζει και απομακρύνεται από μας
 - ◉ Το ακούμε με υψηλότερη συχνότητα καθώς έρχεται προς εμάς
 - ◉ Το ακούμε με χαμηλότερη συχνότητα καθώς απομακρύνεται



Doppler effect

Στάσιμη πηγή ήχου



Πηγή ήχου που πλησιάζει



Παρατηρητής

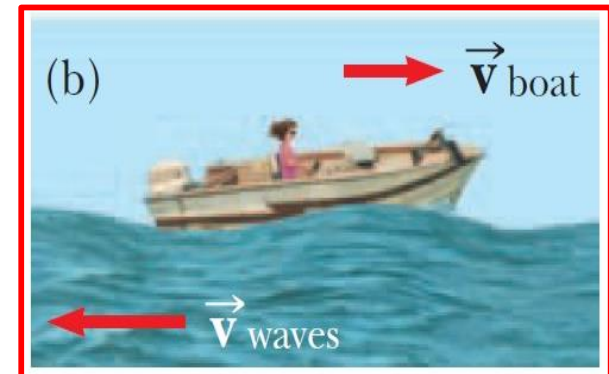
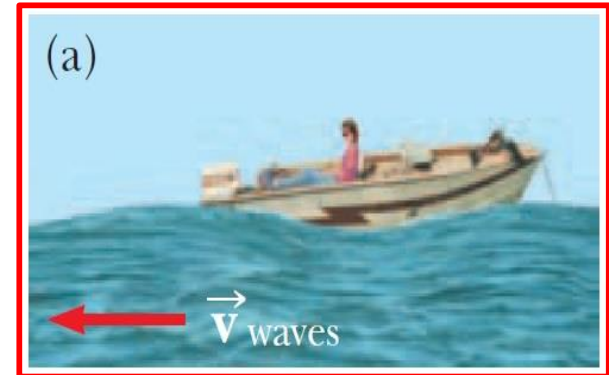
Πηγή ήχου που απομακρύνεται



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

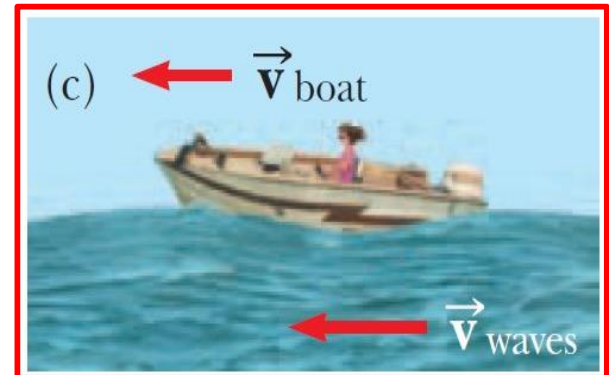
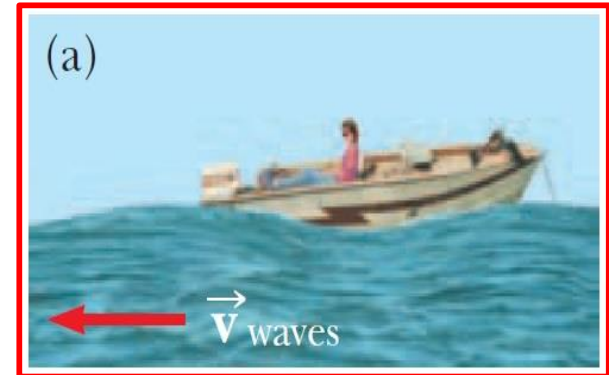
- Διαισθητική κατανόηση
 - Κύματα χτυπούν την ακίνητη βάρκα με περίοδο T
 - Αν προχωρήσει η βάρκα προς την πηγή, κάθε κυματισμός θα φτάνει γρηγορότερα απ' ό,τι πριν
 - Λόγω της κίνησής μας προς την πηγή
 - Μετράμε περίοδο $T' < T$
- Τα κύματα φτάνουν «πιο συχνά» στη βάρκα
 - $f' = 1/T' > f = 1/T$



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

- Διασθητική κατανόηση
 - Κύματα χτυπούν την ακίνητη βάρκα με περίοδο T
 - Αν προχωρήσει η βάρκα μακριά από την πηγή, κάθε κυματισμός θα φτάνει αργότερα απ' ό,τι πριν
 - Λόγω της κίνησής μας μακριά από την πηγή
 - Μετράμε περίοδο $T' > T$
- Τα κύματα φτάνουν «πιο αραιά» στη βάρκα
 - $f' = 1/T' < f = 1/T$



Ηχητικά Κύματα

- Το φαινόμενο Doppler

- Ευθέως ανάλογα για μια ηχητική πηγή



Ηχητικά Κύματα

- Το φαινόμενο Doppler

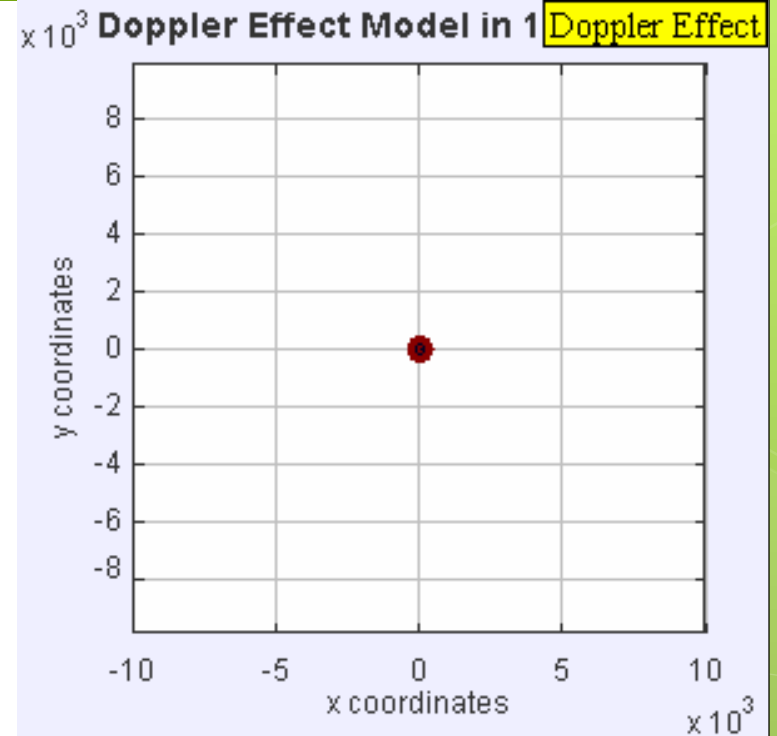
- Στάσιμη πηγή

- Συχνότητα πηγής f

- Περίοδος T

- Μήκος κύματος λ

- Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται τη συχνότητα f της πηγής



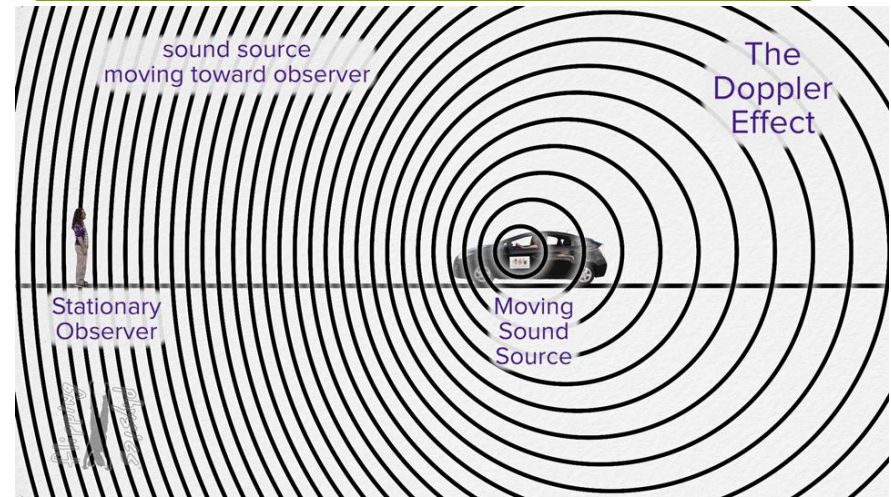
Ηχητικά Κύματα

● Το φαινόμενο Doppler

- Κινούμενη πηγή
 - Προς τον παρατηρητή
- Συχνότητα πηγής f
- Περίοδος T
- Μήκος κύματος λ
- Ταχύτητα πηγής u_s

- Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται συχνότητα

$$f' = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{\lambda - \frac{u_s}{f}} = \frac{u}{\left(\frac{u}{f}\right) - \left(\frac{u_s}{f}\right)} = \left(\frac{u}{u - u_s}\right) f = \left(\frac{1}{1 - u_s/u}\right) f$$



Ηχητικά Κύματα

○ Το φαινόμενο Doppler

○ Κινούμενη πηγή

○ Μακριά από τον παρατηρητή

○ Συχνότητα πηγής f

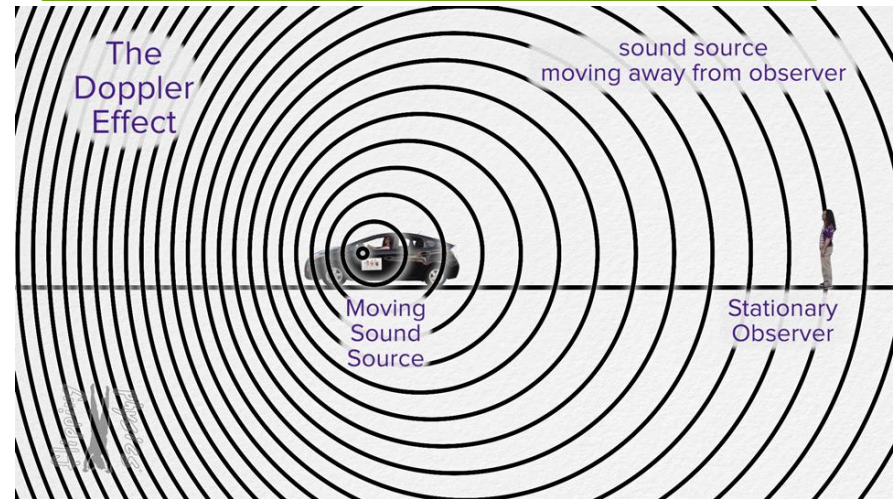
○ Περίοδος T

○ Μήκος κύματος λ

○ Ταχύτητα πηγής u_s

○ Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται συχνότητα

$$f' = \frac{u}{\lambda'} = \frac{u}{\lambda + \frac{u_s}{f}} = \frac{u}{\left(\frac{u}{f}\right) + \left(\frac{u_s}{f}\right)} = \left(\frac{u}{u + u_s}\right) f = \left(\frac{1}{1 + u_s/u}\right) f$$



Ηχητικά Κύματα

○ Το φαινόμενο Doppler

○ Κινούμενος παρατηρητής

○ Πλησιάζει την πηγή

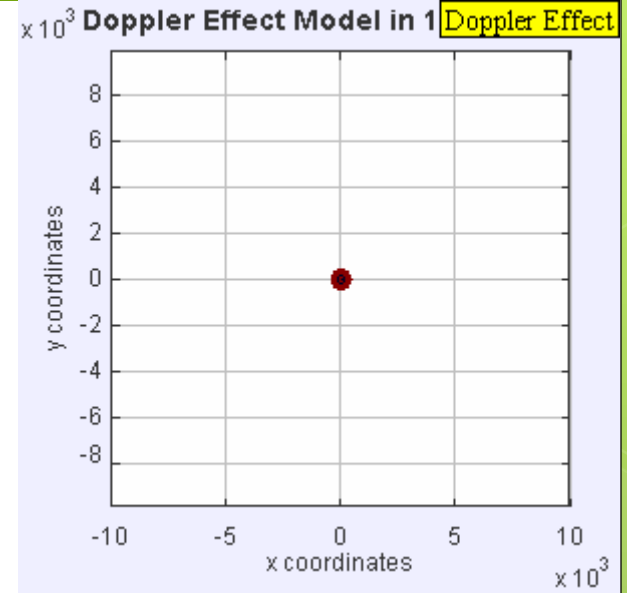
○ Συχνότητα πηγής f

○ Περίοδος T

○ Μήκος κύματος λ

○ Ταχύτητα παρατηρητή u_o

○ Ένας κινούμενος παρατηρητής που πλησιάζει την πηγή αντιλαμβάνεται συχνότητα

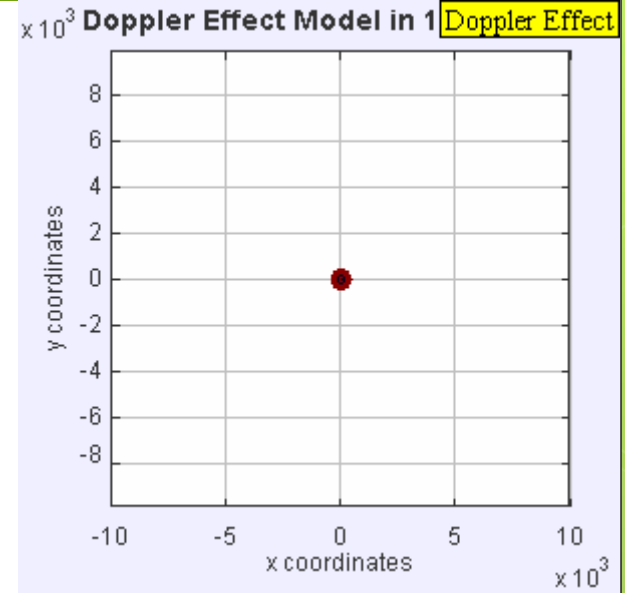


$$f' = \frac{u'}{\lambda} = \left(\frac{u + u_o}{u} \right) f = \left(1 + \frac{u_o}{u} \right) f$$

Ηχητικά Κύματα

○ Το φαινόμενο Doppler

- Κινούμενος παρατηρητής
 - Απομακρύνεται από την πηγή
- Συχνότητα πηγής f
- Περίοδος T
- Μήκος κύματος λ
- Ταχύτητα παρατηρητή u_o



- Ένας κινούμενος παρατηρητής που απομακρύνεται από την πηγή αντιλαμβάνεται συχνότητα

$$f' = \frac{u'}{\lambda} = \left(\frac{u - u_o}{u} \right) f = \left(1 - \frac{u_o}{u} \right) f$$

Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

- Κίνηση και των δυο

- Συχνότητα πηγής f

- Περίοδος T

- Μήκος κύματος λ

- Ταχύτητα παρατηρητή u_o

- Ταχύτητα πηγής u_s

- Ένας **κινούμενος** παρατηρητής αντιλαμβάνεται συχνότητα μιας **κινούμενης** πηγής

Συχνότητα αντίληψης παρατηρητή $f' = \left(\frac{u \pm u_o}{u \pm u_s} \right) f$ Συχνότητα εκπομπής πηγής

Ταχύτητα παρατηρητή (blue)

Ταχύτητα ήχου (red)

Ταχύτητα πηγής (purple)

Πώς επιλέγουμε πρόσημα στη σχέση αυτή?

1. Πηγή και παρατηρητής **κινούνται ο ένας προς τον άλλο**: πρόσημα που αυξάνουν το f'

2. Πηγή και παρατηρητής **απομακρύνονται ο ένας από τον άλλο**: πρόσημα που μειώνουν το f'

3. Οι ταχύτητες εννοούνται πάντα κατά **μέτρο**!

Ηχητικά Κύματα

● Παράδειγμα:

- Το ξυπνητήρι σας παράγει έναν ήχο συχνότητας 600 Hz. Ένα πρωί, «κολλάει» και δεν μπορείτε να το κλείσετε. Στην απελπισία σας, το πετάτε («αφήνετε») από το παράθυρο. Αν υποθέσετε ότι η ταχύτητα του ήχου είναι 343 m/s, και ότι βρίσκεστε στον 4^ο όροφο (15 m από το έδαφος), τι συχνότητα θα ακούσετε λίγο πριν γίνει κομματάκια;



Ηχητικά Κύματα

● Παράδειγμα – Λύση:

- Το ξυπνητήρι σας παράγει έναν ήχο συχνότητας 600 Hz. Στην απελπισία σας, το πετάτε (αφήνετε) από το παράθυρο. Αν η ταχύτητα του ήχου είναι 343 m/s, και βρίσκεστε 15 m από το έδαφος, τι συχνότητα θα ακούσετε λίγο πριν γίνει κομματάκια;

Η συχνότητα που θα ακούσατε είναι μικρότερη γιατί έχετε πηγή ήχου αποβαρυνόμενη από τον αέρα. Χρειαζόμαστε την ταχύτητα του ξυπνητηριού να εφαρμόσουμε τον τύπο του Doppler. Είτω κίνηση ελεύθερα επιταχυνόμενη από το $A \rightarrow B$.

$$u_B^2 = u_A^2 - 2g \Delta y \Leftrightarrow u_B^2 = u_A^2 - 2g(y_B - y_A) \Leftrightarrow$$
$$\Leftrightarrow u_B^2 = 0 - 2g(0 - h) = 2gh \Rightarrow u_B = -\sqrt{2gh}$$

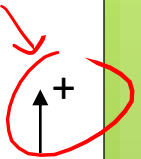
άρα $|u_B| = \sqrt{2gh} \cong 17.14 \frac{m}{s}$. Άρα f ε Doppler

θα έχουμε

$$f' = \frac{343}{343 + 17.14} \cong 571 \text{ Hz}$$

$$f' = \left(\frac{u \pm u_o}{u \pm u_s} \right) f$$

θετική φορά

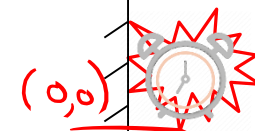


(A)



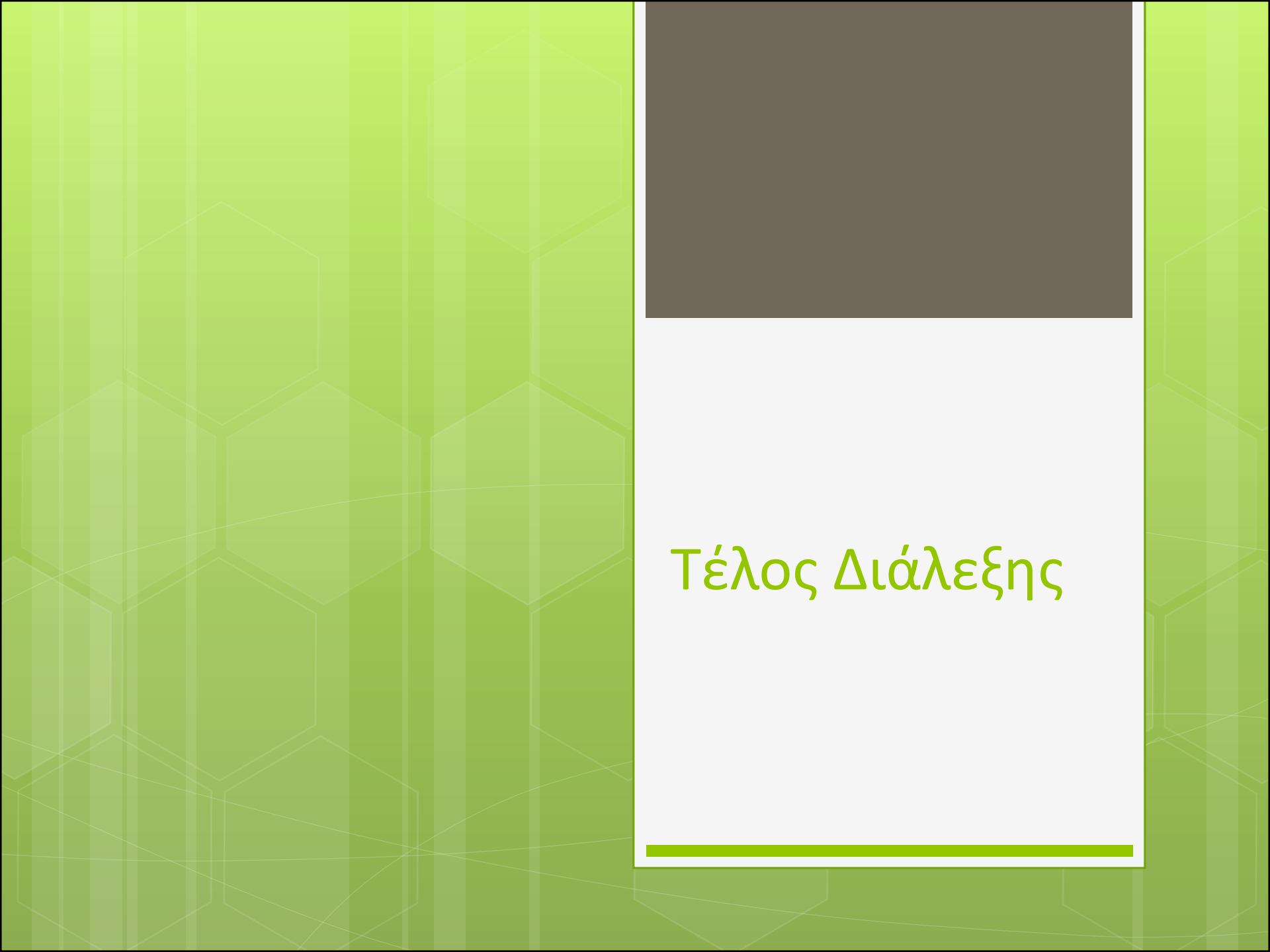
$$u_A = 0$$
$$f_A = 600 \text{ Hz}$$

$$h = 15 \text{ m}$$



$$u_B = ?$$
$$f_B = ?$$

(B)



Τέλος Διάλεξης