



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



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

• Το φαινόμενο Doppler

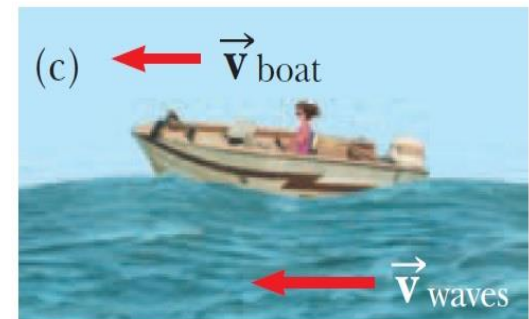
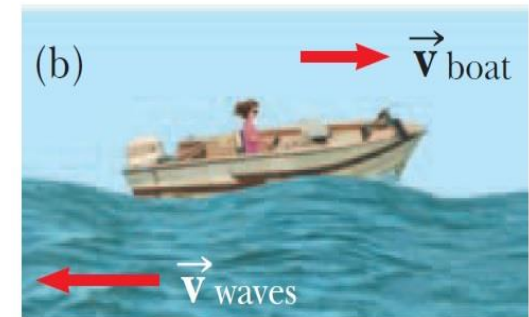
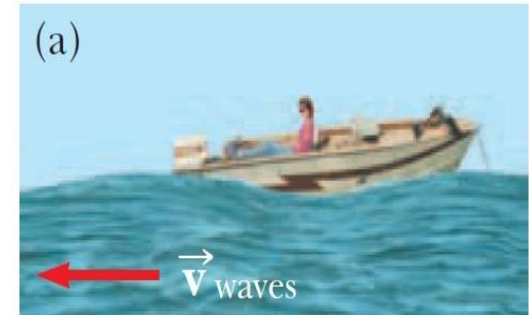
- Άκρως συχνή εμπειρία!
- Ένα όχημα με σειρήνα μας πλησιάζει και απομακρύνεται από μας
 - Το ακούμε με υψηλότερη συχνότητα καθώς έρχεται προς εμάς
 - Το ακούμε με χαμηλότερη συχνότητα καθώς απομακρύνεται



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

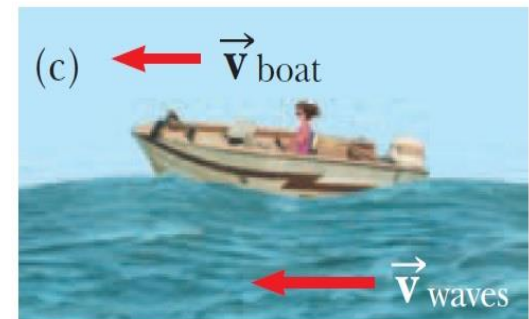
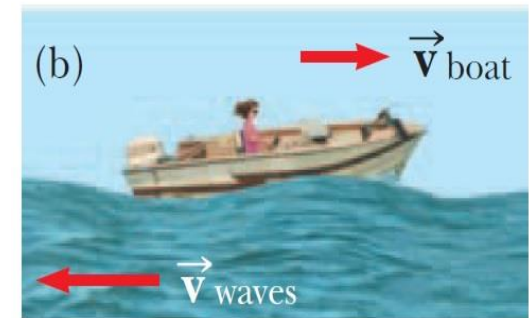
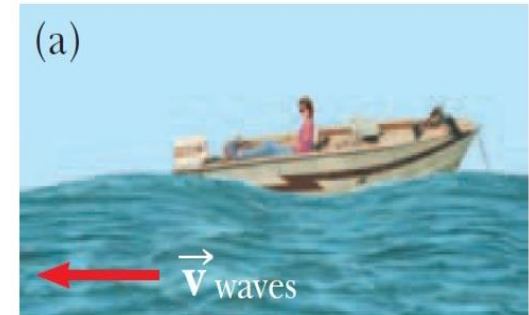
- Διαισθητική κατανόηση
 - Κύματα χτυπούν την ακίνητη βάρκα με περίοδο T
- Αν προχωρήσει η βάρκα προς την πηγή, κάθε κυματισμός θα φτάνει γρηγορότερα απ' ό,τι πριν
 - Λόγω της κίνησής μας προς την πηγή
- Μετράμε περίοδο $T' < T$
- Τα κύματα φτάνουν «πιο συχνά» στη βάρκα
 - $f' = 1/T' > f = 1/T$



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

- Διαισθητική 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

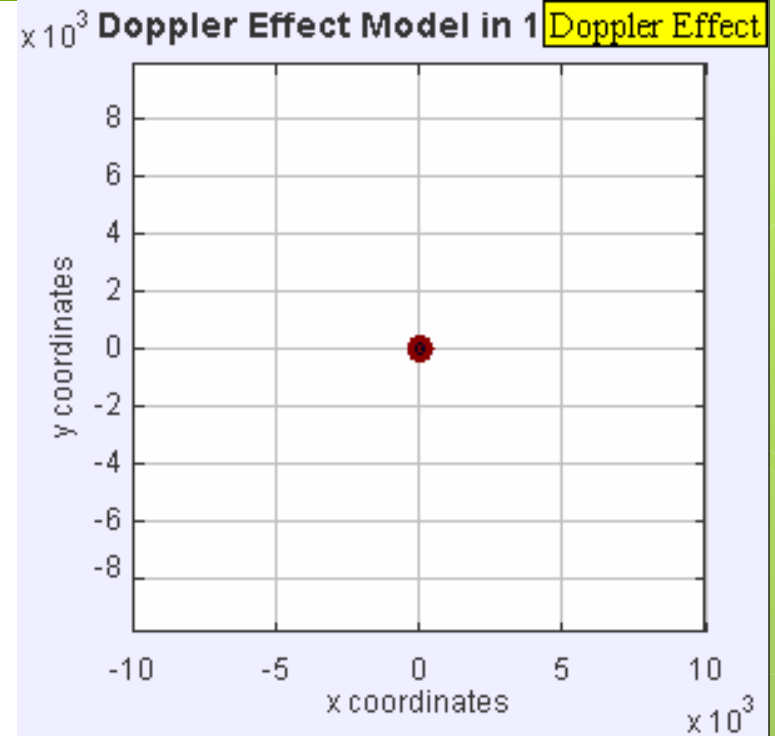
- Στάσιμη πηγή

- Συχνότητα πηγής f

- Περίοδος T

- Μήκος κύματος λ

- Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται τη συχνότητα f της πηγής



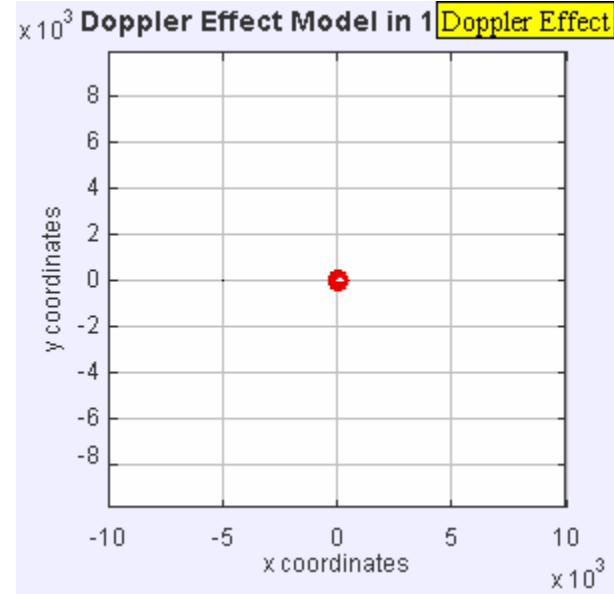
Ηχητικά Κύματα

● 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

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



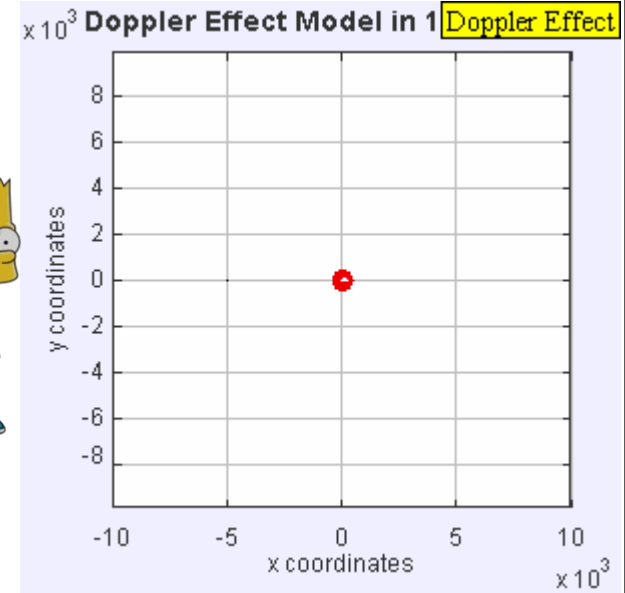
Ηχητικά Κύματα

• 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

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

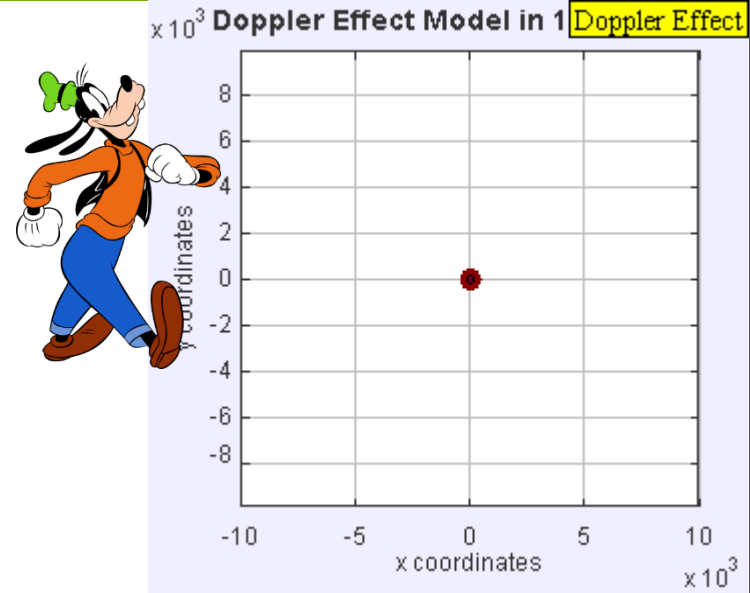


Ηχητικά Κύματα

- 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

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



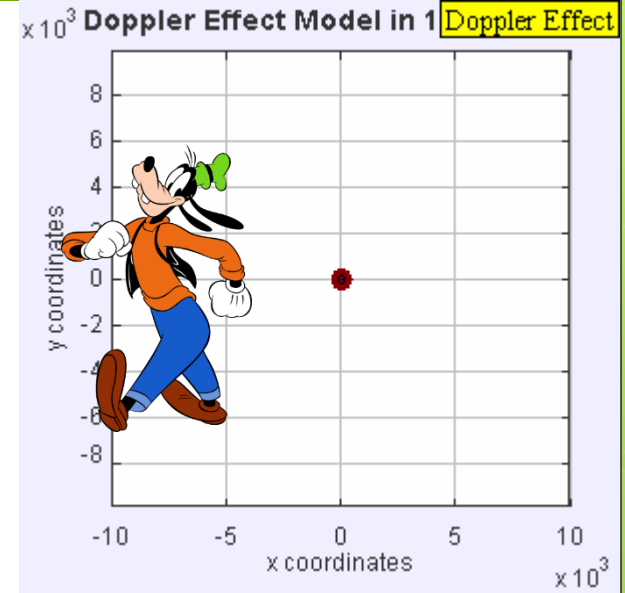
Ηχητικά Κύματα

• 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

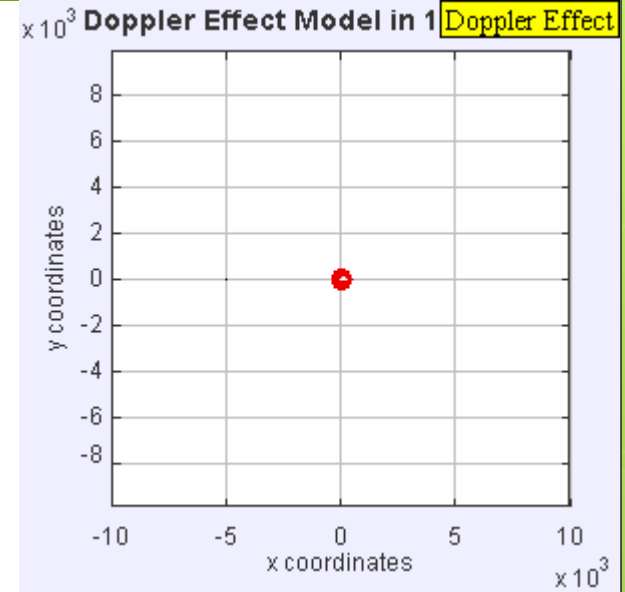
• Το φαινόμενο Doppler

- 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

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

Πώς επιλέγουμε πρόσημα στη σχέση αυτή?

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

$$f' = \frac{u}{u + u_s} f \quad (1) \quad \left. \vphantom{f' = \frac{u}{u + u_s} f} \right\} \begin{array}{l} \text{Από το Γενικό} \\ \text{Τύπο Doppler} \end{array}$$

$\swarrow$ $\nwarrow$
 Ταχ. ήχου Ταχ. πηγής

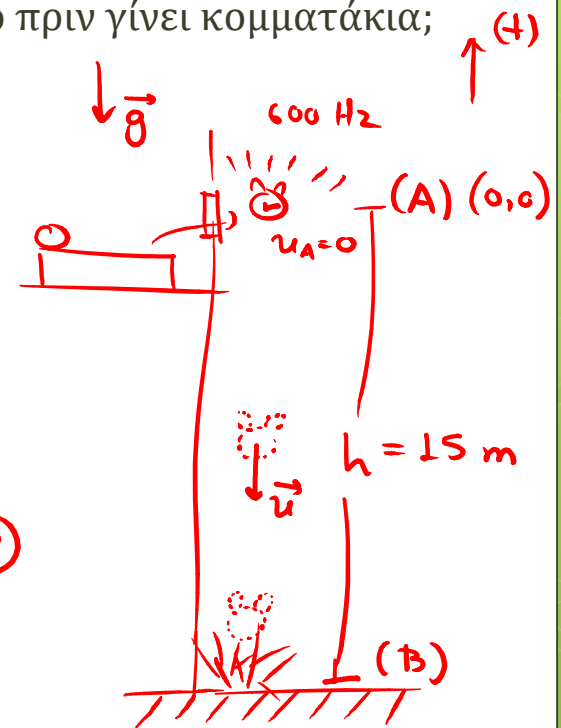
Η ταχύτητα του ρολογιού u_s δίνεται από
 ως σχέση:
$$h = y_i + u_{y_i} \cdot t - \frac{1}{2} g t^2 = -\frac{1}{2} g t^2$$

Άρα $t^2 = -\frac{2h}{g} \Rightarrow t = \sqrt{-\frac{2h}{g}}$. Επίσης,

$$u_B = u_A - g t \Rightarrow u_B = 0 - g t = -g \sqrt{-\frac{2h}{g}} \quad (2)$$

Η (1) λόγω (2) δίνει
$$f' = \frac{u}{u + g \sqrt{-\frac{2h}{g}}} f =$$

$$= 571 \text{ Hz.}$$

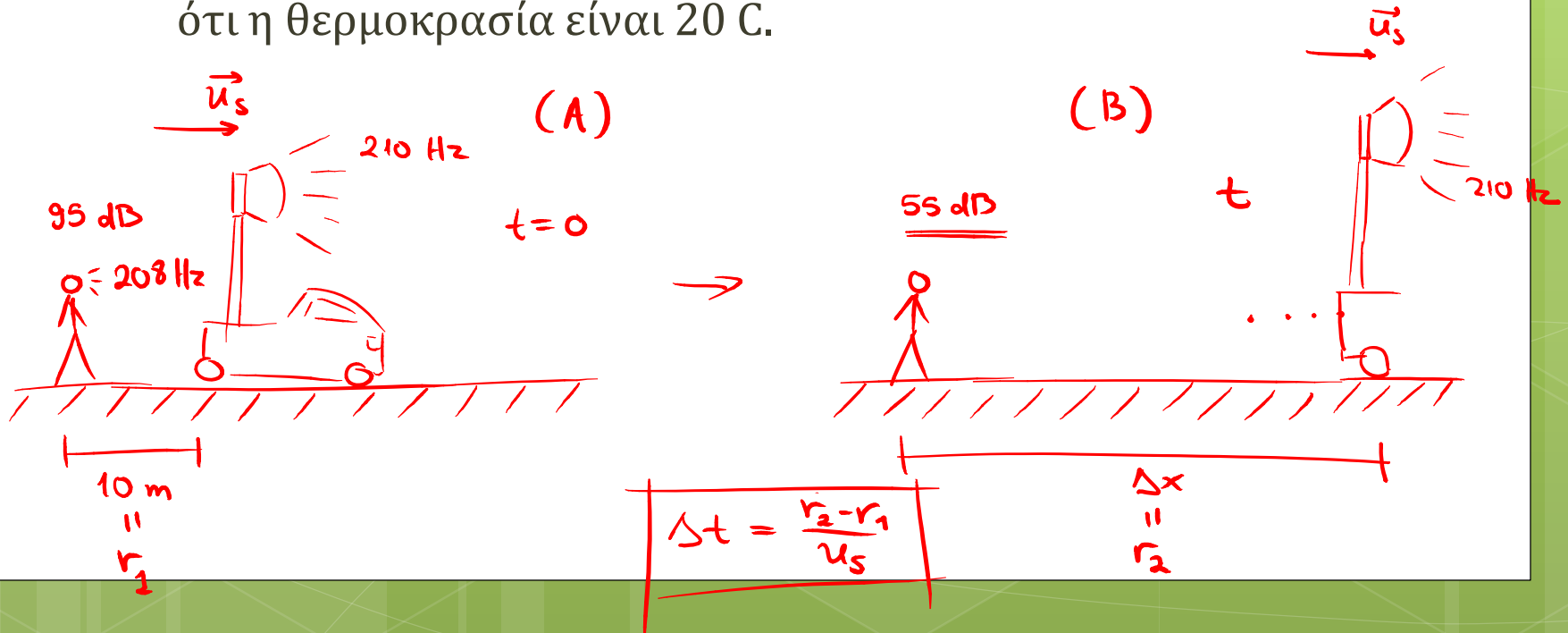


Ηχητικά Κύματα

● Παράδειγμα:

- Από το ηχείο ενός πλανόδιου πωλητή που κινείται με σταθερή ταχύτητα εκπέμπεται ένα ημίτονο στα 210 Hz. Όταν βρίσκεστε στα 10 m από το ηχείο, μετράτε την ηχοστάθμη του ήχου και τη βρίσκετε στα 95 dB στα 208 Hz. Πόσο χρόνο θα πάρει μέχρι η ηχοστάθμη να πέσει στα ανεκτά επίπεδα των 55 dB? Υποθέστε ότι η θερμοκρασία είναι 20 C.

$$\beta = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$



Ηχητικά Κύματα

$$u_{\text{sound}} = 331 \sqrt{1 + \frac{T_c}{273}} = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

• Παράδειγμα – Λύση:

$$\beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

- Από το ηχείο ενός πλανόδιου πωλητή που κινείται εκπέμπεται ένα ημίτονο στα 210 Hz. Όταν βρίσκεστε στα 10 m από το ηχείο, μετράτε την ηχοστάθμη του ήχου και τη βρίσκετε στα 95 dB στα 208 Hz. Πόσο χρόνο θα πάρει μέχρι η ηχοστάθμη να πέσει στα ανεκτά επίπεδα των 55 dB? Υποθέστε ότι η θερμοκρασία είναι 20 °C

Από τη σχέση του Doppler έχουμε: $f' = \frac{u}{u + u_s} f \Rightarrow$

$$\underset{208}{f'} = \frac{\overset{343}{u}}{u + u_s} \underset{210}{f}$$

$$\Rightarrow u_s = \left(\frac{f}{f'} - 1 \right) u = \left(\frac{210}{208} - 1 \right) \cdot 343 = 3.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \text{ Τα ηχητικά}$$

κύματα διαδίδονται σε σφαιρικά κυματικά μέτωπα: $I = \frac{P_{\text{avg}}}{4\pi r^2} \quad (2)$

$$\text{Από (1)} \Rightarrow \beta = 10 \log_{10} \frac{I}{I_0} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = 10^{\frac{\beta}{10}} \Rightarrow \boxed{I = I_0 \cdot 10^{\frac{\beta}{10}}}$$

$$\text{Άρα σε απόσταση } r_1 = 10 \text{ m, } I_1 = I_0 \cdot 10^{\frac{95}{10}} = I_0 \cdot 10^{9.5} \quad (3)$$

$$r_2 = ? \text{ m, } I_2 = I_0 \cdot 10^{\frac{55}{10}} = I_0 \cdot 10^{5.5} \quad (4)$$

Ηχητικά Κύματα

◉ Παράδειγμα – Λύση:

- ◉ Από το ηχείο ενός πλανόδιου πωλητή που κινείται εκπέμπεται ένα ημίτονο στα 210 Hz. Όταν βρίσκεστε στα 10 m από το ηχείο, μετράτε την ηχοστάθμη του ήχου και τη βρίσκετε στα 95 dB στα 208 Hz. Πόσο χρόνο θα πάρει μέχρι η ηχοστάθμη να πέσει στα ανεκτά επίπεδα των 55 dB? Υποθέστε ότι η θερμοκρασία είναι 20 C.

$$\text{Η } \textcircled{2}, \textcircled{3} \text{ αθω } \textcircled{4} : \frac{I_1}{I_2} = \frac{\cancel{I_0} \cdot 10^{9.5}}{\cancel{I_0} \cdot 10^{5.5}} = 10^4 = \frac{\cancel{\frac{P_{\text{avg}}}{4\pi r_1^2}}}{\cancel{\frac{P_{\text{avg}}}{4\pi r_2^2}}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}} = 10^4 \Rightarrow r_2^2 = r_1^2 \cdot 10^4 = 10^2 \cdot 10^4 = 10^6 \Rightarrow r_2 = 10^3 \text{ m}$$

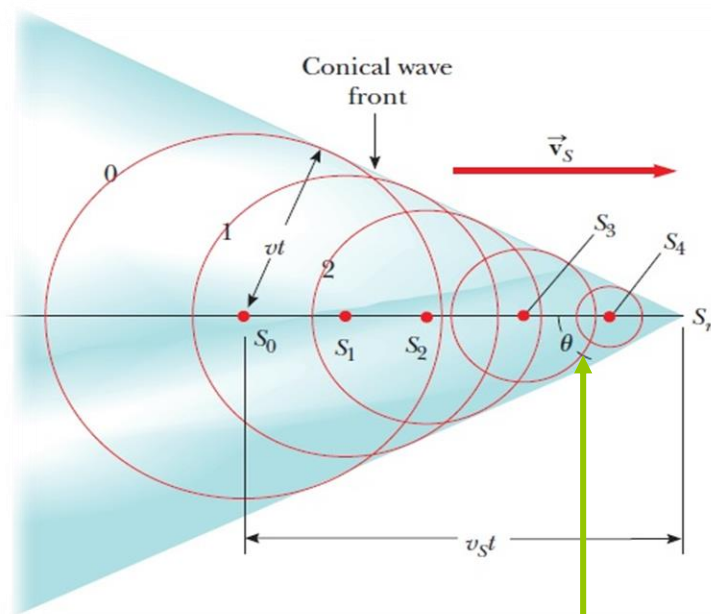
Άρα σε $r_2 = 10^3 \text{ m}$ θα ακούγεται το ημίτονο στα 55 dB.

$$\text{Τέλος, } \Delta t = \frac{\Delta x}{v_s} = \frac{10^3 - 10}{3.3} = \frac{990}{3.3} = 300 \text{ sec} = 5 \text{ minutes}$$

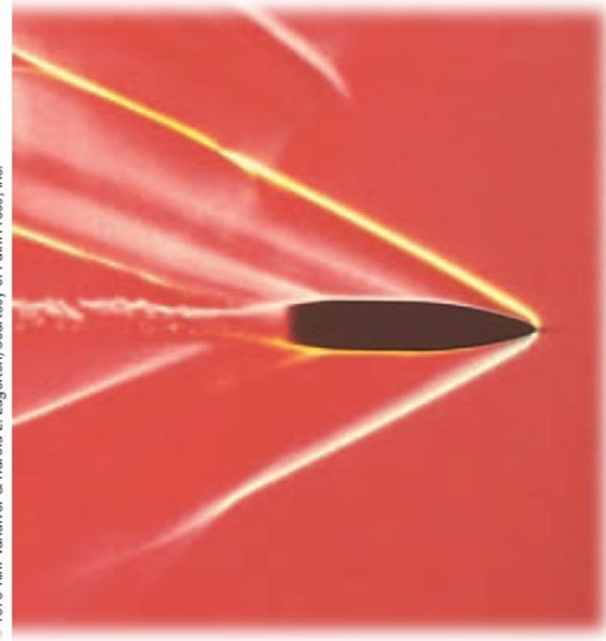
Άρα σε χρόνο $\Delta t = 300 \text{ sec}$ θα έχουμε την ηχοστάθμη στα 55 dB.
Αυτό ισοδυναμεί σε απόσταση 1000 m από τον παρατηρητή.

Ηχητικά Κύματα

- ◉ Κρουστικά κύματα
 - ◉ Πηγές με ταχύτητα $v_s > v_{wave}$



© 1973 Kim Vandiver & Harold E. Edgerton/Courtesy of Palm Press, Inc.



- ◉ Αριθμός Mach:

$$\frac{1}{\sin \theta} = \frac{v_s}{v_{wave}}$$

Ηχητικά Κύματα

- Κρουστικά κύματα
 - Πηγές με ταχύτητα $v_s > v_{wave}$



Ηχητικά Κύματα

- Ψηφιακή Ηχογράφηση

- Πρώτη αναλογική ηχογράφηση (Edison, 19^{ος} αιώνας)

- Φωνογράφος

- Αποθηκεύει τον ήχο ως διακυμάνσεις του βάθους αυλακώσεων, δημιουργώντας «κορυφές» και «κοιλίες» επάνω σε έναν κύλινδρο, μέσω μιας βελόνας που συνδεόταν σε έναν φωναγωγό που λάμβανε τα μηχανικά κύματα



- Κατά την αναπαραγωγή, η βελόνα «ακολουθεί» το μονοπάτι των αυλακώσεων, και συνδεδεμένη με το διάφραγμα και τον φωναγωγό, παράγει τον ήχο

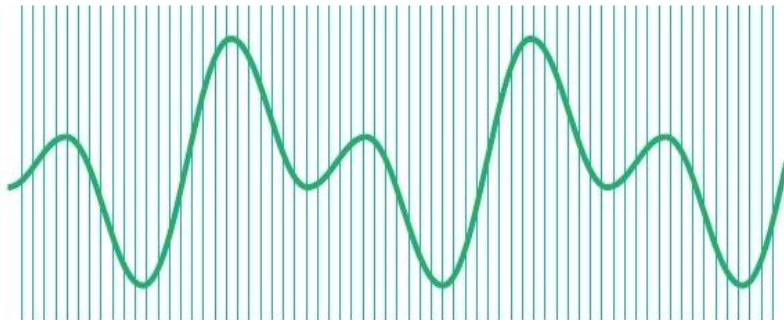
Ηχητικά Κύματα

- Ψηφιακή Ηχογράφηση

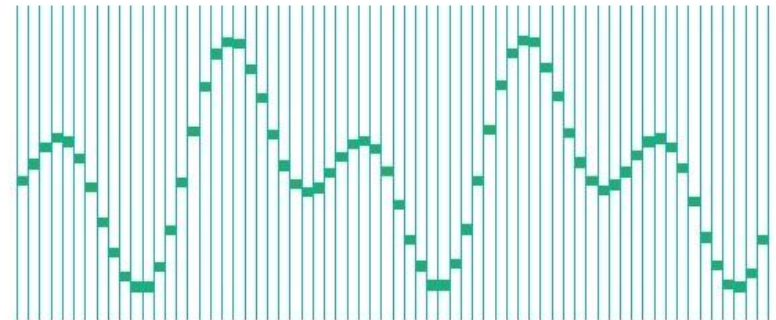
- Ακολουθία bits (1 και 0)

- Βήμα 1^ο: Δειγματοληψία

- Παίρνουμε δείγματα από τον ήχο ανά τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. 44100 δείγματα σε 1 sec, με σταθερή απόσταση μεταξύ τους)



(a)

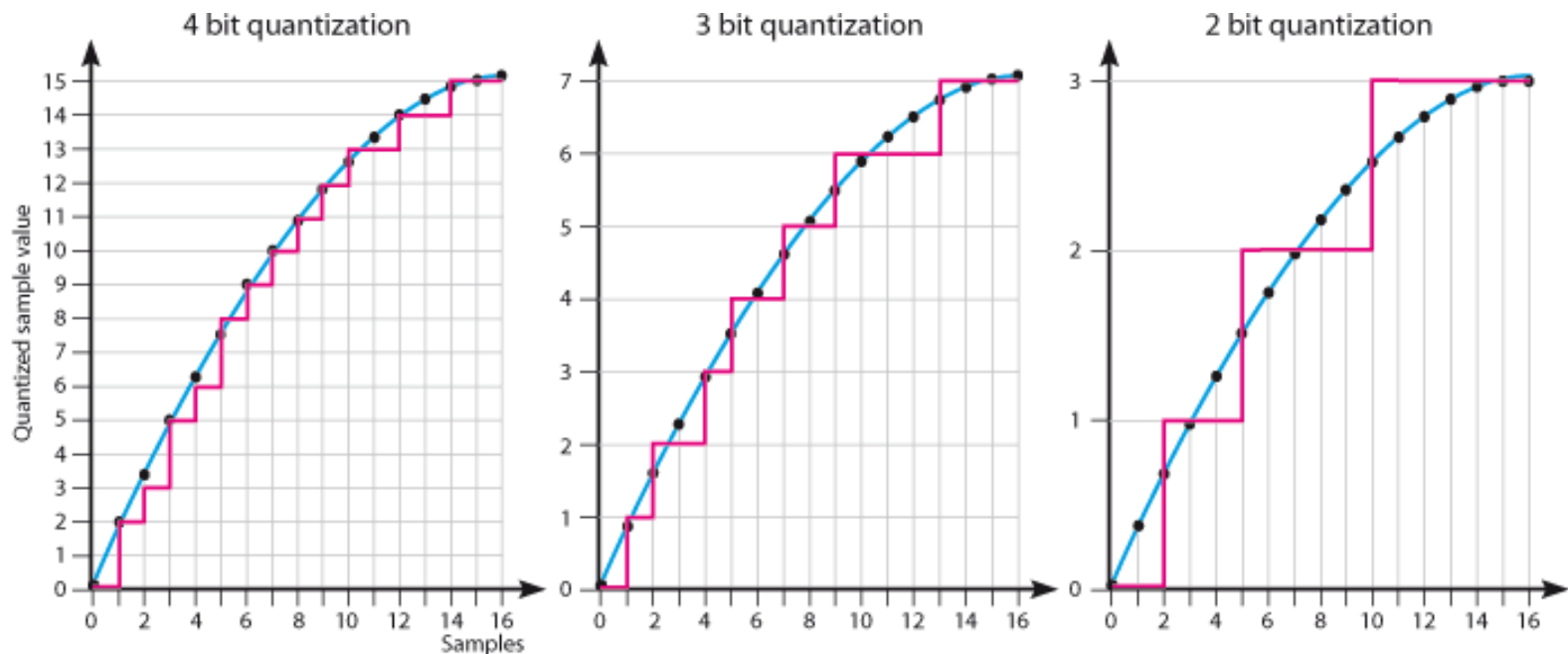


(b)

Ηχητικά Κύματα

● Ψηφιακή Ηχογράφηση

- Ακολουθία bits (1 και 0)
- Βήμα 2^ο: Κβαντισμός – Μετατροπή σε ψηφιακό σήμα
 - «Στρογγυλεύουμε» τις τιμές πλάτους των δειγμάτων
 - Μετατρέπουμε τις τιμές στο δυαδικό σύστημα

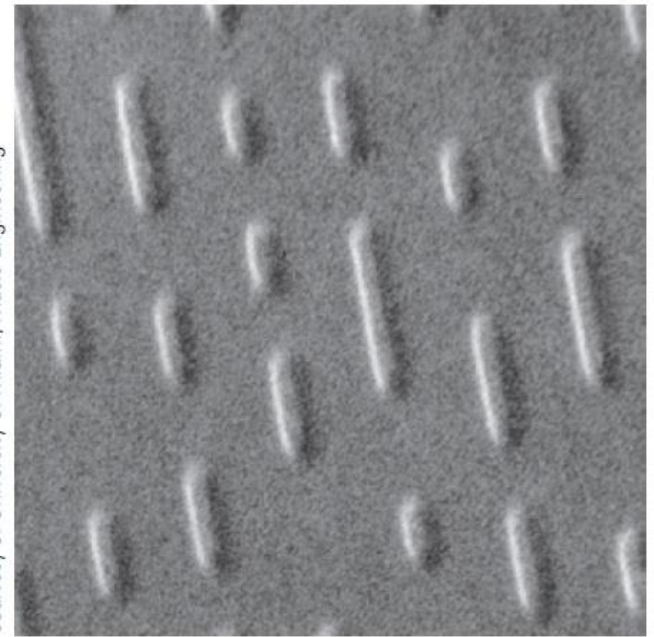


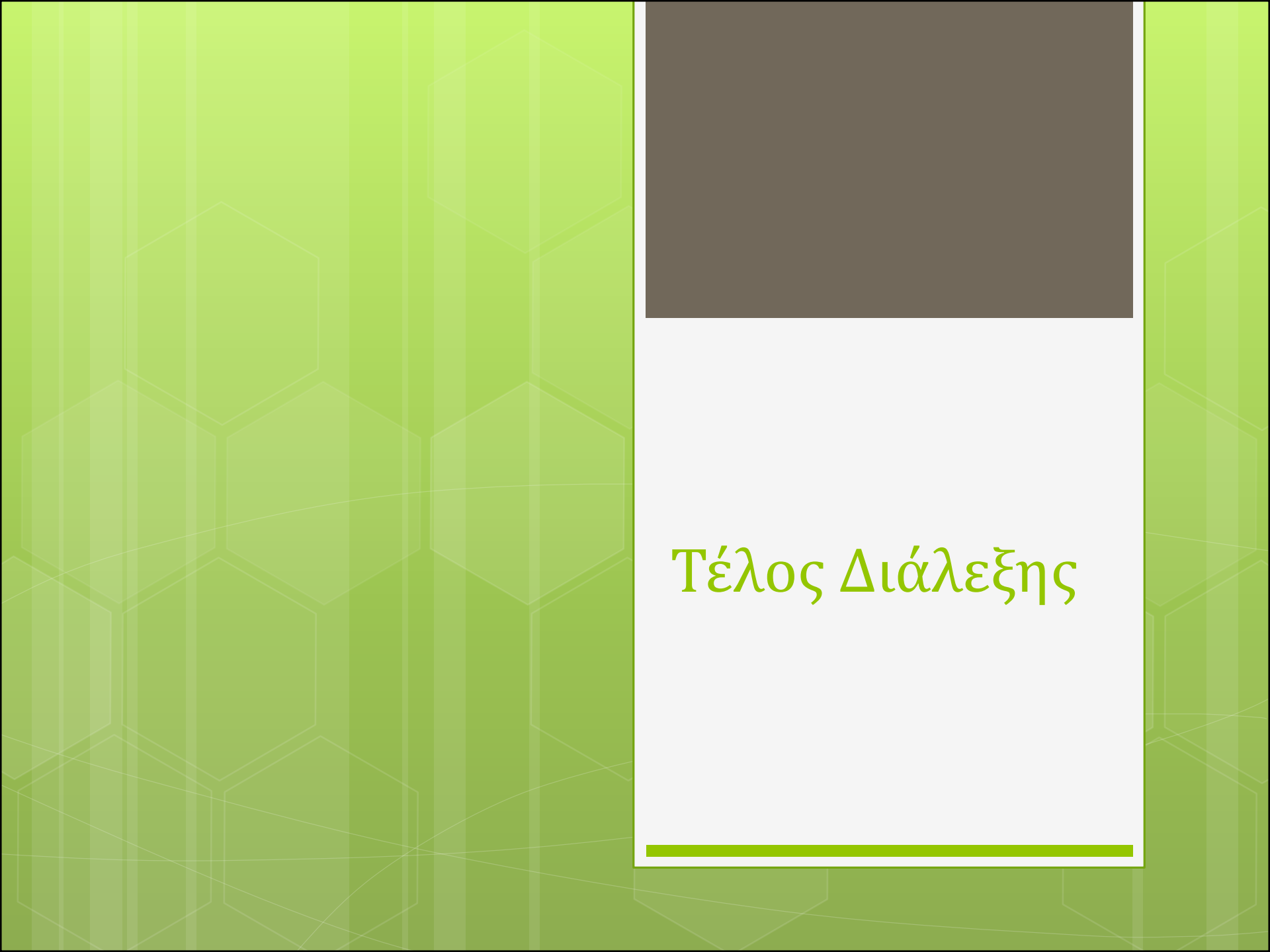
Ηχητικά Κύματα

◉ Ψηφιακή Ηχογράφηση

- ◉ Επιφάνεια ψηφιακού δίσκου (compact disc)
- ◉ Οι «κορυφές» και οι «κοιλίες» ανιχνεύονται από ένα σύστημα laser
 - ◉ Αναπαριστούν 1 και 0
- ◉ Οι δυαδικοί αριθμοί μετατρέπονται ξανά σε τάσεις (voltage)
 - ◉ Ουσιαστικά σε διακριτές τιμές
- ◉ Το αρχικό ηχητικό σήμα ανασυντίθεται

Courtesy of University of Miami, Music Engineering





Τέλος Διάλεξης