



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

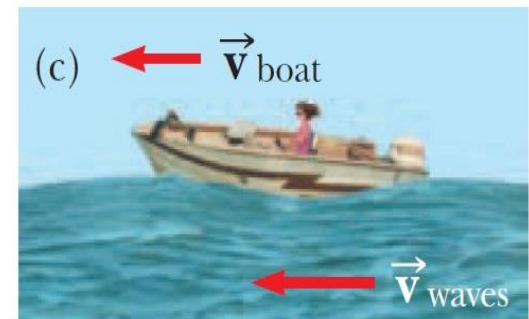
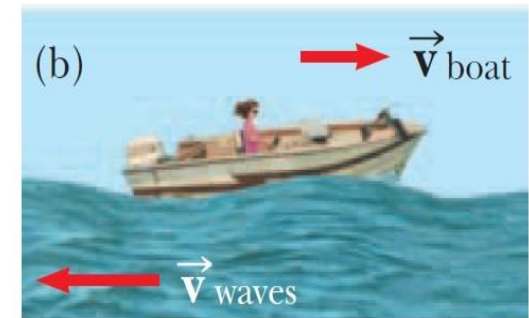
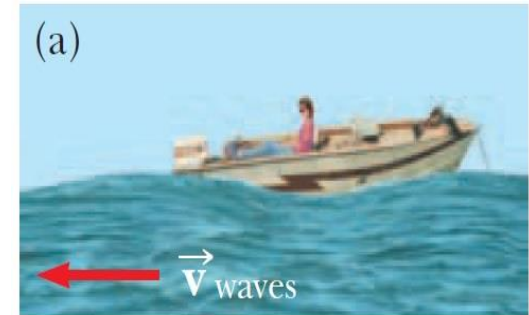
- Άκρως συχνή εμπειρία!
- Ένα όχημα με σειρήνα μας πλησιάζει και απομακρύνεται από μας
 - Το ακούμε με υψηλότερη συχνότητα καθώς έρχεται προς εμάς
 - Το ακούμε με χαμηλότερη συχνότητα καθώς απομακρύνεται



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

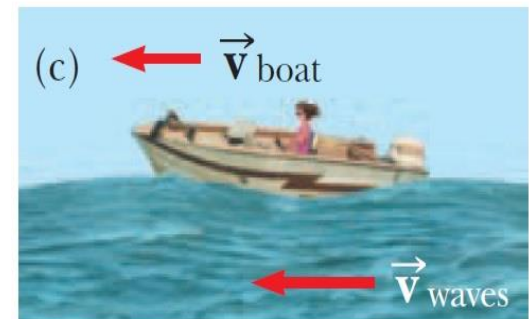
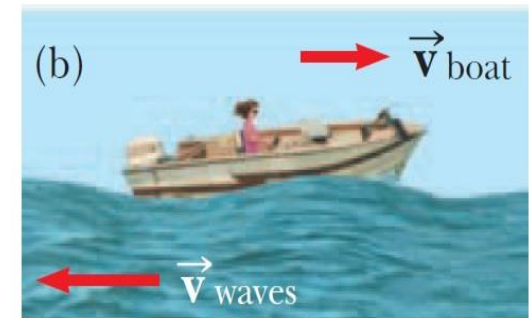
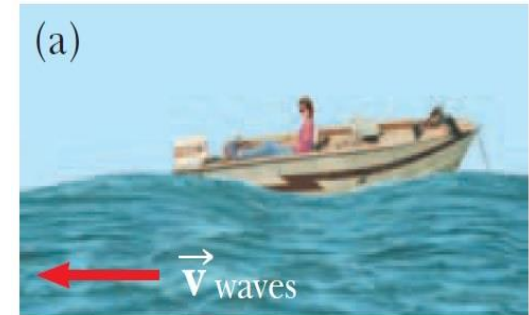
- Διαισθητική κατανόηση
 - Κύματα χτυπούν την ακίνητη βάρκα με περίοδο T
 - Αν προχωρήσει η βάρκα προς την πηγή, κάθε κυματισμός θα φτάνει γρηγορότερα απ' ό,τι πριν
 - Λόγω της κίνησής μας προς την πηγή
- Μετράμε περίοδο $T' < T$
- Τα κύματα φτάνουν «πιο συχνά» στη βάρκα
 - $f' = 1/T' > f = 1/T$



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

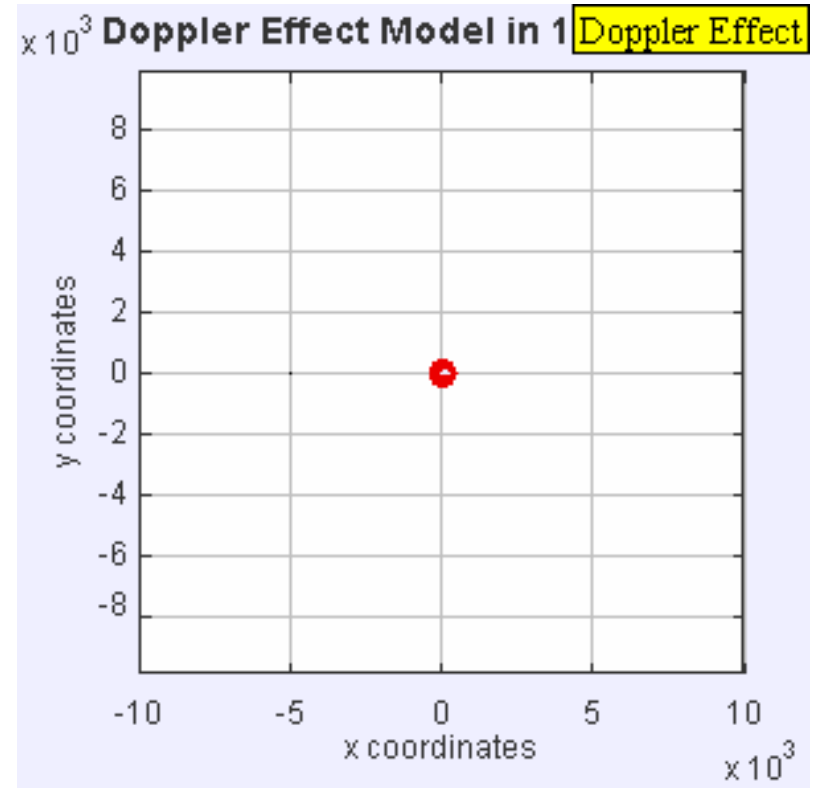
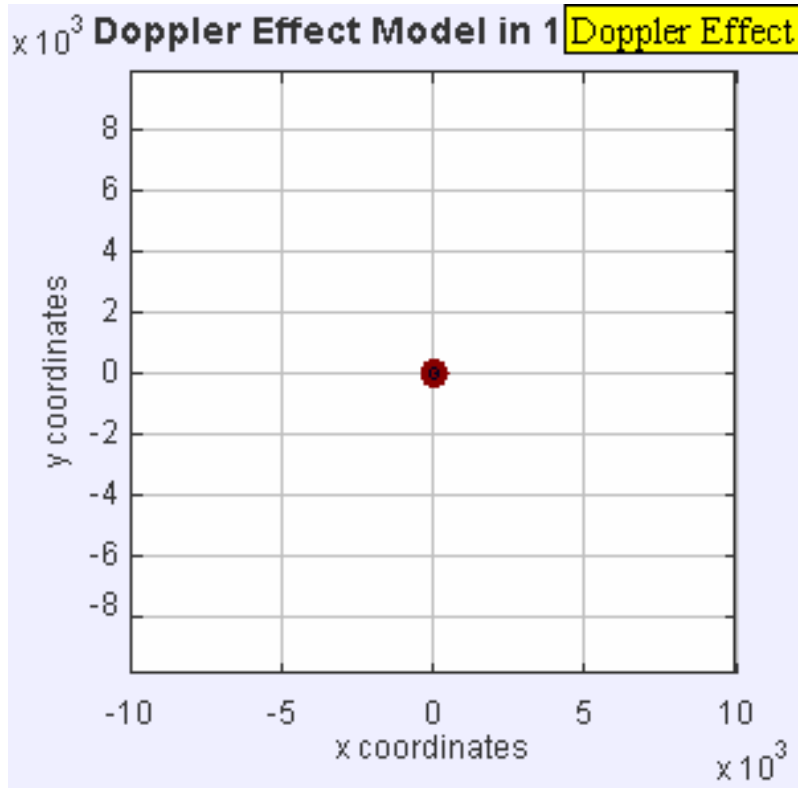
- Διαισθητική κατανόηση
 - Κύματα χτυπούν την ακίνητη βάρκα με περίοδο T
 - Αν προχωρήσει η βάρκα μακριά από την πηγή, κάθε κυματισμός θα φτάνει αργότερα απ' ό,τι πριν
 - Λόγω της κίνησής μας μακριά από την πηγή
 - Μετράμε περίοδο $T' > T$
 - Τα κύματα φτάνουν «πιο αραιά» στη βάρκα
 - $f' = 1/T' < f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



Ηχητικά Κύματα

- Το φαινόμενο Doppler

- Ευθέως ανάλογα για μια ηχητική πηγή



Ηχητικά Κύματα

- Το φαινόμενο Doppler

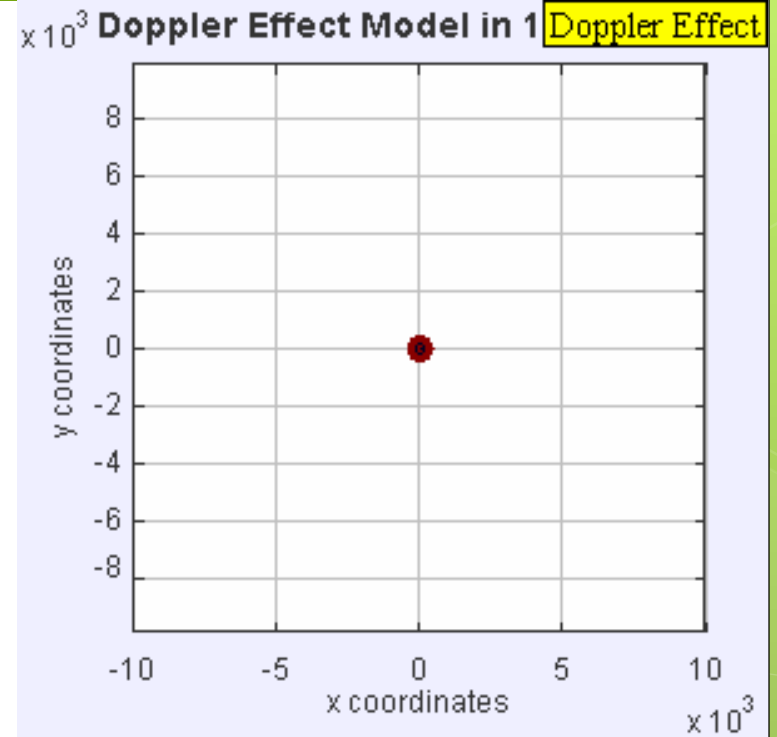
- Στάσιμη πηγή

- Συχνότητα πηγής f

- Περίοδος T

- Μήκος κύματος λ

- Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται τη συχνότητα f της πηγής



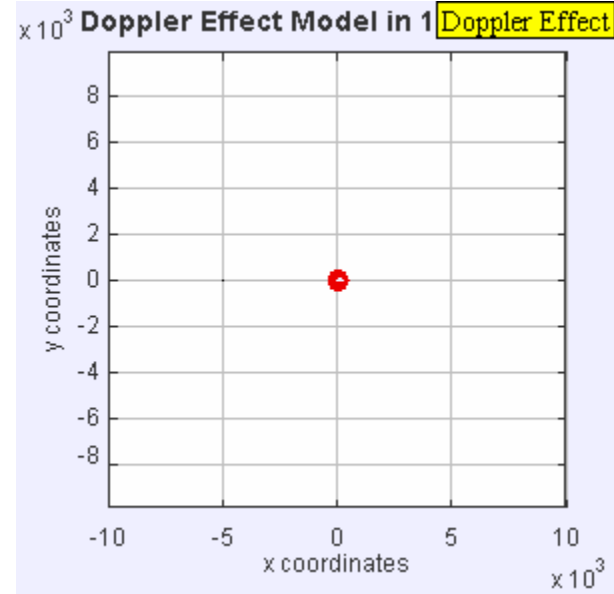
Ηχητικά Κύματα

● Το φαινόμενο Doppler

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

- Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται συχνότητα

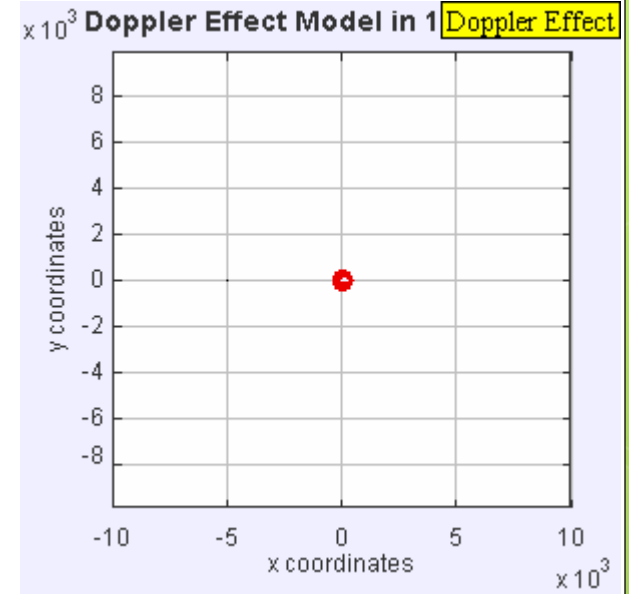
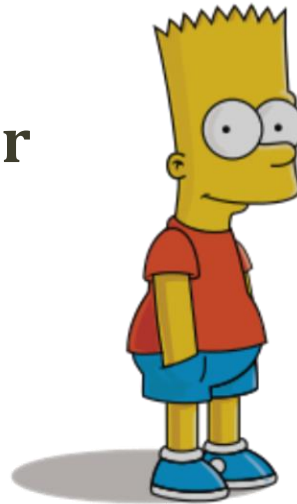
$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \left(\frac{v}{v - v_s} \right) f = \left(\frac{1}{1 - v_s/v} \right) f$$



Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

- Κινούμενη πηγή
 - Μακριά από τον παρατηρητή
- Συχνότητα πηγής f
- Περίοδος T
- Μήκος κύματος λ
- Ταχύτητα πηγής v_s



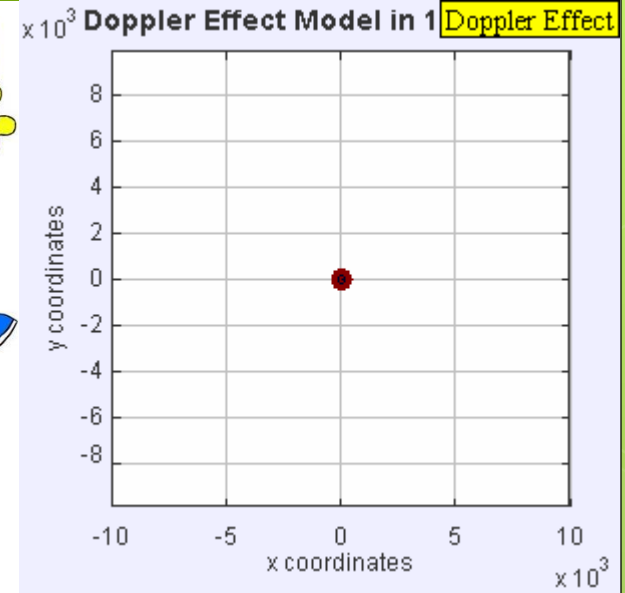
- Ένας ακίνητος παρατηρητής αντιλαμβάνεται συχνότητα

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

Ηχητικά Κύματα

○ Το φαινόμενο Doppler

- Κινούμενος παρατηρητής
 - Πλησιάζει την πηγή
- Συχνότητα πηγής f
- Περίοδος T
- Μήκος κύματος λ
- Ταχύτητα παρατηρητή v_o
- Ένας κινούμενος παρατηρητής που πλησιάζει την πηγή αντιλαμβάνεται συχνότητα

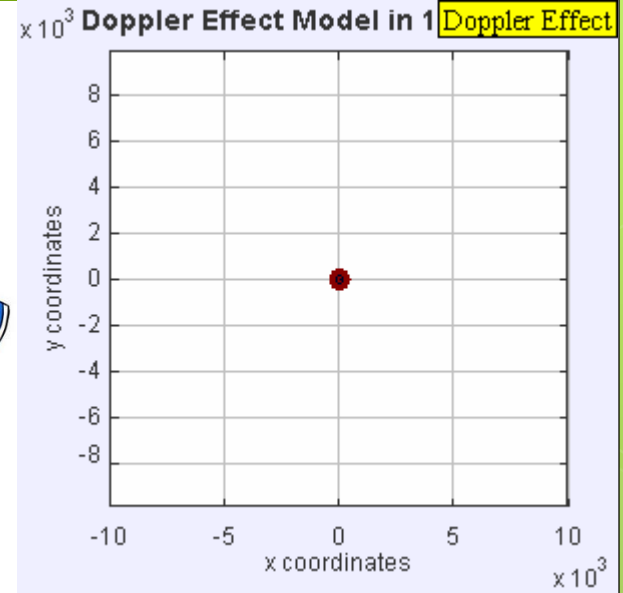


$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \left(\frac{v+v_o}{v} \right) f = \left(1 + \frac{v_o}{v} \right) f$$

Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

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



- Ένας κινούμενος παρατηρητής που απομακρύνεται από την πηγή αντιλαμβάνεται συχνότητα

$$f' = \frac{v'}{\lambda} = \left(\frac{v - v_o}{v} \right) f = \left(1 - \frac{v_o}{v} \right) f$$

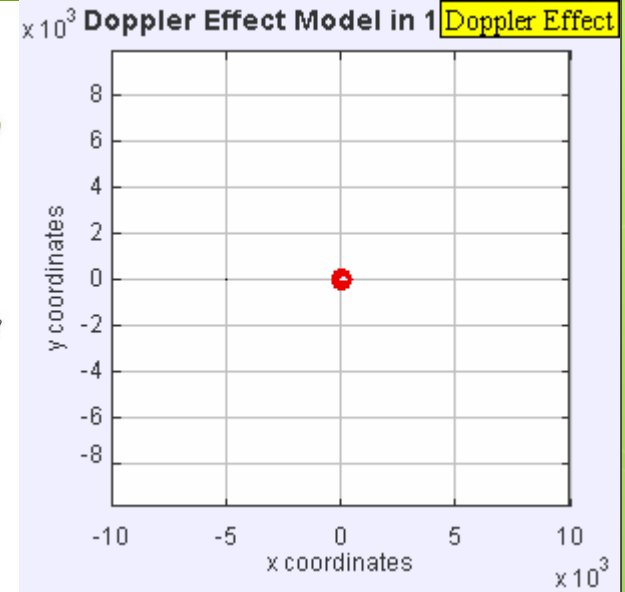
Ηχητικά Κύματα

• Το φαινόμενο Doppler

- Κίνηση και των δυο
- Συχνότητα πηγής f
- Περίοδος T
- Μήκος κύματος λ
- Ταχύτητα παρατηρητή v_o
- Ταχύτητα πηγής v_s

- Ένας κινούμενος παρατηρητής αντιλαμβάνεται συχνότητα μιας κινούμενης πηγής

$$f' = \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) f$$



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

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 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. Ένα πρωί, «κολλάει» και δεν μπορείτε να το κλείσετε. Στην απελπισία σας, το πετάτε 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;

Η ταχύτητα του ρολοιού είναι $u_s = g \cdot t$ ^{αγνωστο}

Γνωρίζουμε ότι:

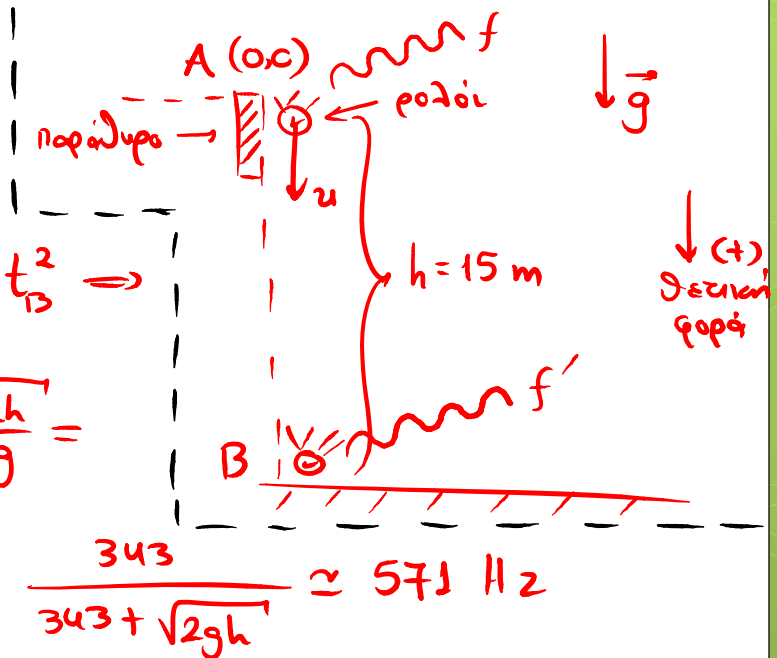
$$y_B = y_A + u_{iy} \cdot t + \frac{1}{2} g t_B^2 \Leftrightarrow h = \frac{1}{2} g t_B^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow t_B^2 = \frac{2h}{g} \Rightarrow t_B = \sqrt{\frac{2h}{g}} \text{ . Άρα } u_s = g \sqrt{\frac{2h}{g}} =$$

$$= \sqrt{2hg} = u_s^{(B)} \text{ . Οπότε } f' = \frac{u}{u + u_s^{(B)}} f = \frac{343}{343 + \sqrt{2gh}} \approx 571 \text{ Hz}$$

$$\text{Άρα } f' \approx 571 \text{ Hz.}$$

$$f' = \frac{u \pm u_o \leftarrow \text{Παρατηρητής}}{u \mp u_s \leftarrow \text{πηγή}} f$$



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.

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.

Είναι $f' = \frac{u}{u + u_s} f$

$$u_s = 331 \sqrt{1 + \frac{T_c}{273}} \Big|_{T_c=20} = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

Όπως γνωρίζουμε ότι $I = \frac{P_{\text{μέση}}}{A} = \frac{P_{\text{μέση}}}{4\pi r^2}$

$$\begin{aligned} \text{Αν } I_1 &= \frac{P_{\text{μέση}}}{4\pi r_1^2} \\ I_2 &= \frac{P_{\text{μέση}}}{4\pi r_2^2} \end{aligned} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow \boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}} \quad (2)$$

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

$$f' = \frac{u}{u + u_s} f \rightarrow \beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

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.

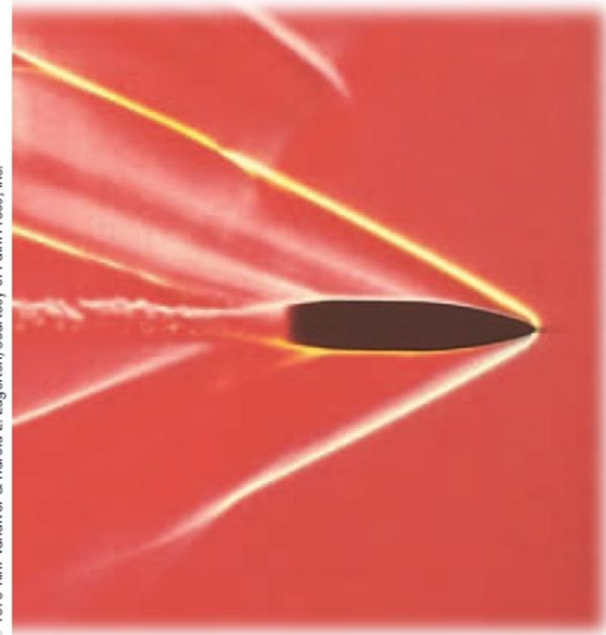
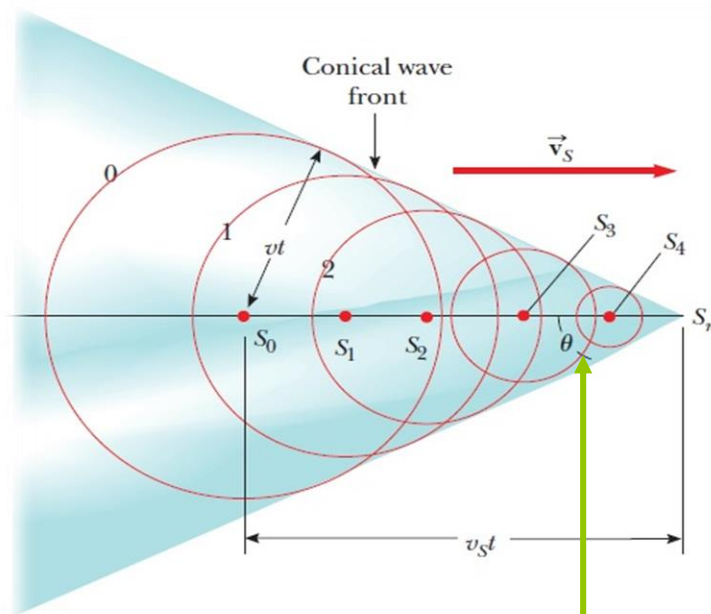
$$\begin{aligned} \text{Είναι } \left. \begin{aligned} I_1 &= I_0 \cdot 10^{\frac{\beta_1}{10}} \\ \beta_1 &= 95 \text{ dB} \end{aligned} \right\} &\Rightarrow I_1 = I_0 \cdot 10^{9.5} \\ \left. \begin{aligned} I_2 &= I_0 \cdot 10^{\frac{\beta_2}{10}} \\ \beta_2 &= 55 \text{ dB} \end{aligned} \right\} &\Rightarrow I_2 = I_0 \cdot 10^{5.5} \end{aligned} \quad \left\{ \begin{aligned} \textcircled{2} \quad \frac{I_0 \cdot 10^{9.5}}{I_0 \cdot 10^{5.5}} &= \frac{r_2^2}{10^2} \Rightarrow \end{aligned} \right.$$

$$\Rightarrow \frac{10^{9.5}}{10^{5.5}} = \frac{r_2^2}{100} \Rightarrow 10^{9.5-5.5} = \frac{r_2^2}{100} \Rightarrow r_2^2 = 100 \cdot 10^4 = 10^6 \Rightarrow r_2 = 1000 \text{ m}$$

$$\text{Βρίσκουμε ότι } u_s = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \text{ σταθερή. Άρα } u = \frac{\Delta r}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta r}{u} = \frac{1000}{330} = 300 \text{ s}$$

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

● 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

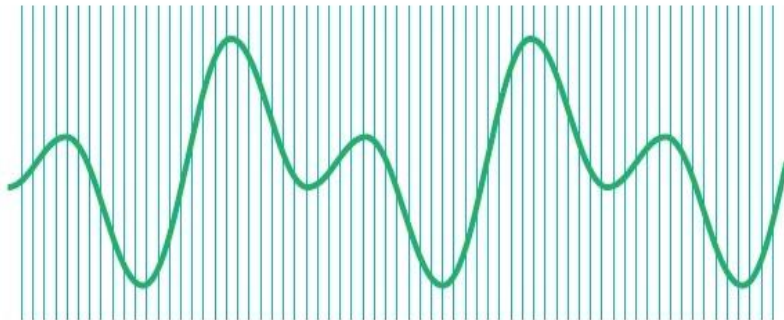
Ηχητικά Κύματα

- Ψηφιακή Ηχογράφηση

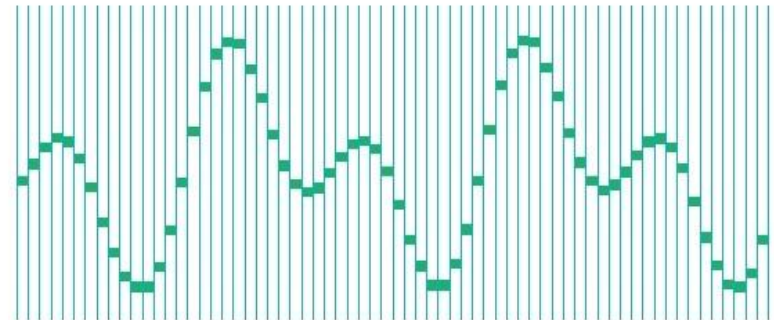
- Ακολουθία bits (1 και 0)

- 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)

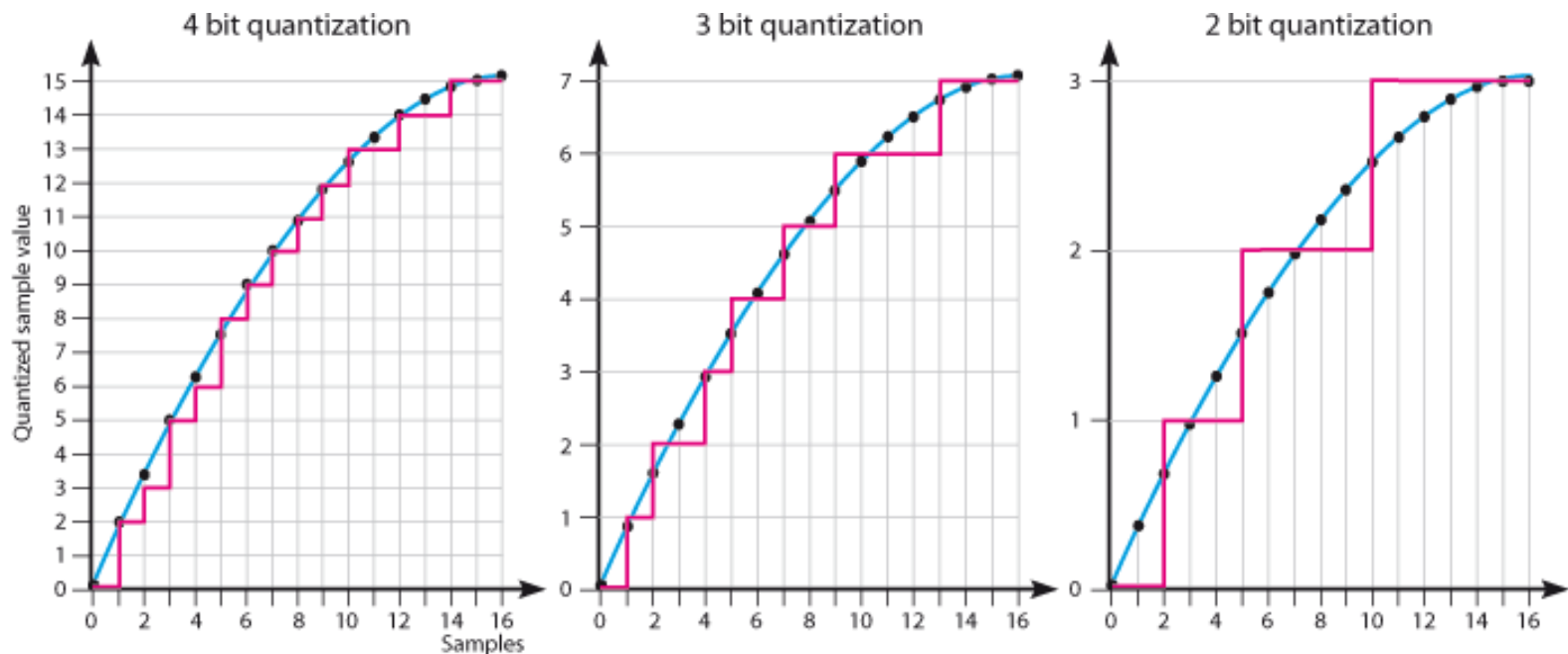


(b)

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

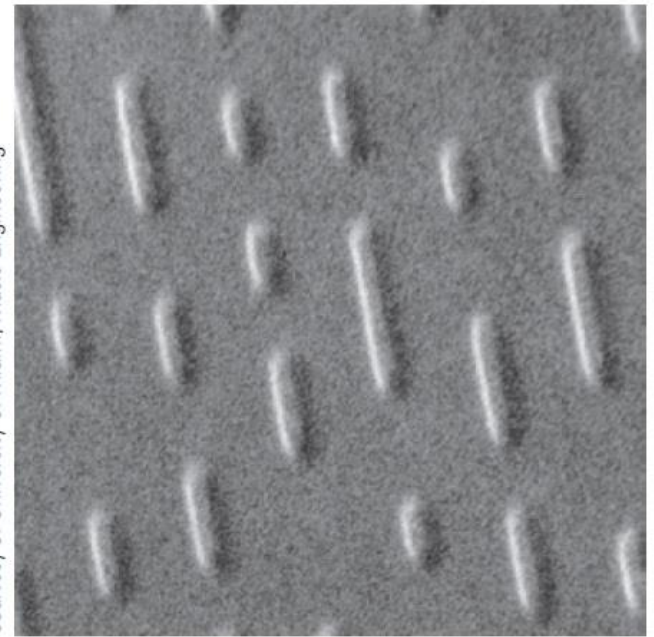


Ηχητικά Κύματα

◉ Ψηφιακή Ηχογράφηση

- ◉ Επιφάνεια ψηφιακού δίσκου (compact disk)
- ◉ 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





Εικόνα: Ο Carlos Santana εκμεταλλεύεται τα στάσιμα κύματα στις χορδές του. Αλλάζει νότα στην κιθάρα του πιέζοντας τις χορδές σε διαφορετικά σημεία, μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας το μήκος του τμήματος της χορδής που ταλαντώνεται.

Φυσική για Μηχανικούς

Υπέρθεση

Στάσιμα Κύματα



Εικόνα: Ο Carlos Santana εκμεταλλεύεται τα στάσιμα κύματα στις χορδές του. Αλλάζει νότα στην κιθάρα του πιέζοντας τις χορδές σε διαφορετικά σημεία, μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας το μήκος του τμήματος της χορδής που ταλαντώνεται.

Φυσική για Μηχανικούς

Υπέρθεση

Στάσιμα Κύματα

Υπέρθεση

- Μελέτη κυματικής
- Κύματα διαφορετικά από σωματίδια
 - Συνδυασμός σωματιδίων δίνει ένα σώμα
 - Για να συμβεί πρέπει τα σωματίδια να βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία
 - Συνδυασμός κυμάτων δίνει ένα κύμα
 - Για να συμβεί πρέπει τα κύματα να βρίσκονται στο ίδιο σημείο!
- Σημαντικό: τα κύματα μπορούν να συνδυαστούν, να συνυπάρξουν, να συμβάλλουν στην ίδια θέση του χώρου!
 - Για να αναλύσουμε τέτοιες συμπεριφορές, απαιτείται η **αρχή της υπέρθεσης**

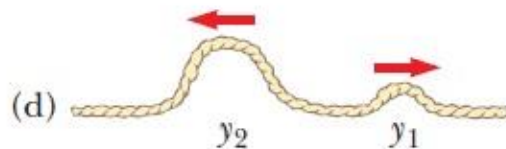
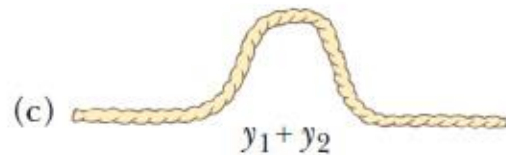
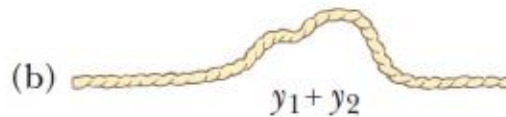
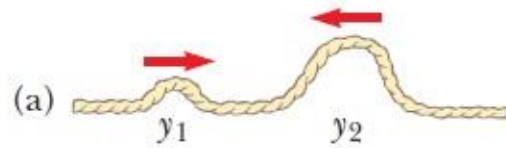
Υπέρθεση

- Αρχή της υπέρθεσης

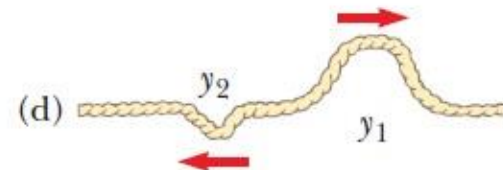
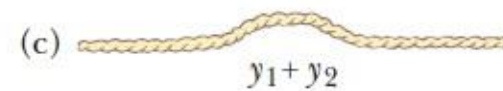
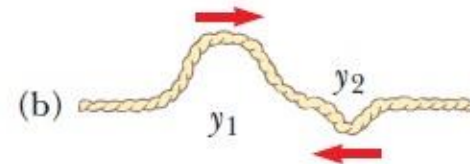
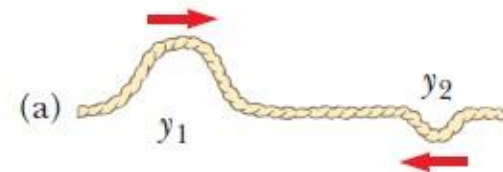
- *Αν σε κάποιο μέσο διαδίδονται δυο ή περισσότερα κύματα, η συνισταμένη τιμή της κυματοσυνάρτησης σε οποιοδήποτε σημείο είναι το αλγεβρικό άθροισμα των τιμών των κυματοσυναρτήσεων των επιμέρους κυμάτων*
- Τέτοια κύματα λέγονται **γραμμικά**
- Ο συνδυασμός δυο διαφορετικών κυμάτων στην ίδια περιοχή του χώρου λέγεται **συμβολή**

Υπέρθεση

○ Αρχή της υπέρθεσης



Ενισχυτική Συμβολή



Καταστρεπτική Συμβολή

Υπέρθεση

- Υπέρθεση ημιτονοειδών κυμάτων

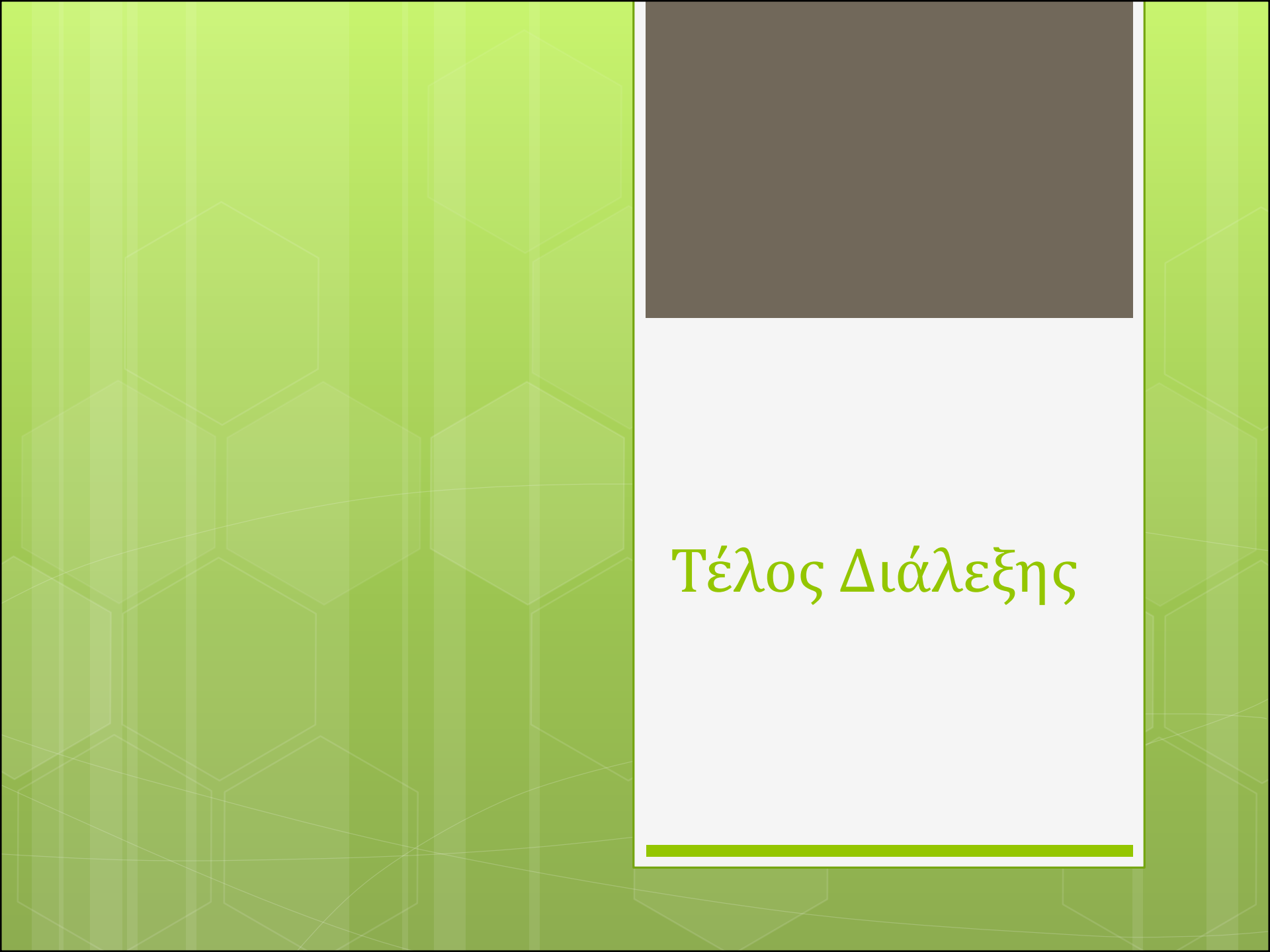
- Δυο ημιτονοειδή κύματα που διαδίδονται προς τα δεξιά
 - Ίδια συχνότητα, μήκος, και πλάτος
 - Διαφορετική φάση

$$y_1 = A \sin(kx - \omega t), \quad y_2 = A \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

- $y = y_1 + y_2$

$$= A[\sin(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t + \varphi)]$$

$$= 2A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \sin\left(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2}\right)$$



Τέλος Διάλεξης