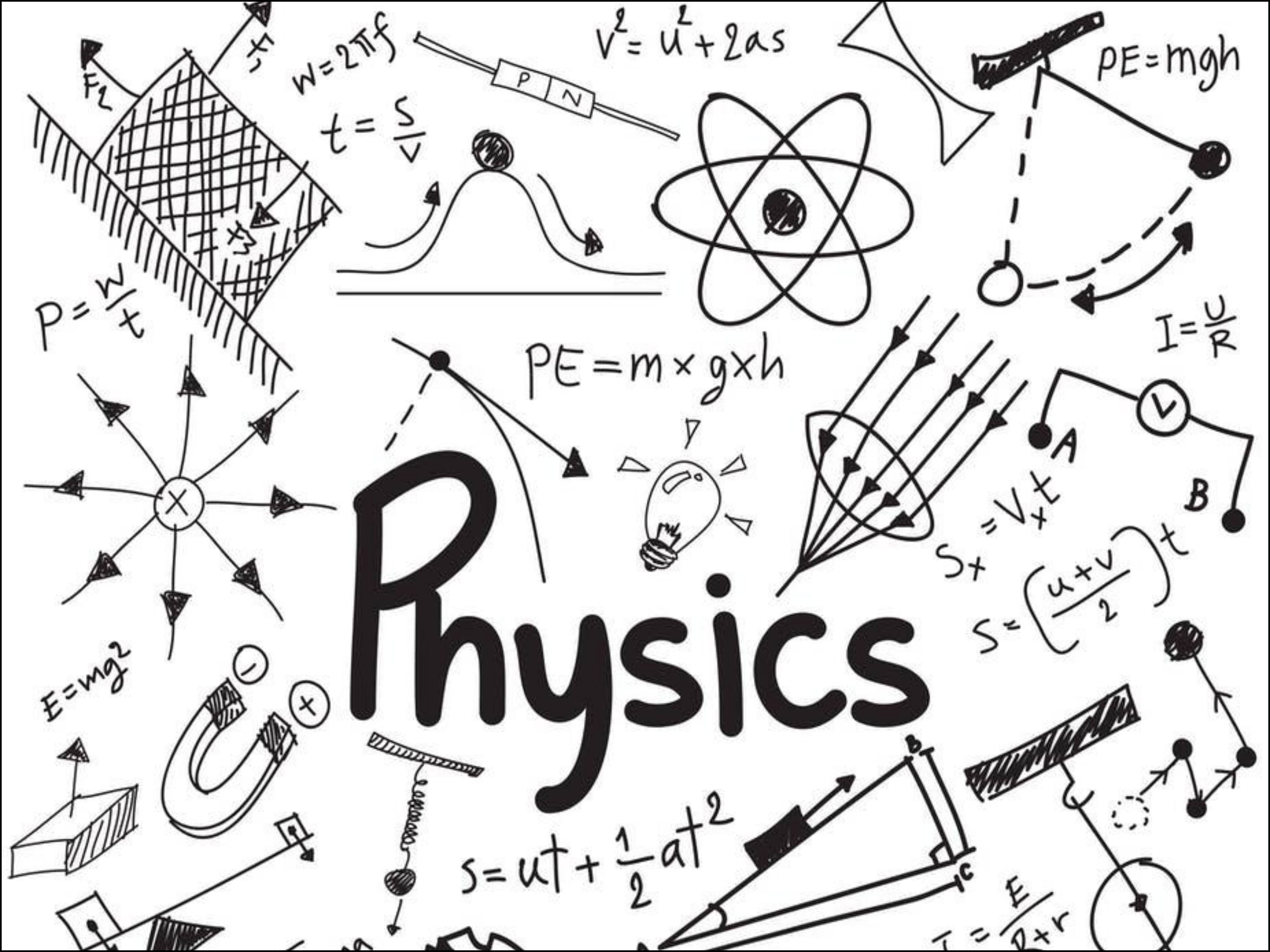


Physics
W=2πf
v²=u²+2as
PE=mgh
t = S/V
P = W/t
PE=m×g×h
I=U/R
A
B
S=ut+1/2at²
E=mg²
P
N

Reminder…

- **Διαλέξεις**
  - **Προαιρετική** παρουσία!
  - Είστε εδώ γιατί **θέλετε** να ακούσετε/συμμετέχετε
  - Δεν υπάρχουν απουσίες
  - Υπάρχει **<u>σεβασμός</u>** στους συναδέλφους σας και στην εκπαιδευτική διαδικασία
  - **Προστατέψτε εσάς και τους συναδέλφους σας**: απέχετε από το μάθημα αν δεν είστε/αισθάνεστε καλά

Φυσική για Μηχανικούς

Υπέρθεση

Εικόνα: Ο Carlos Santana εκμεταλλεύεται τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται από διαφορετικά κύματα που «προστίθενται» 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.

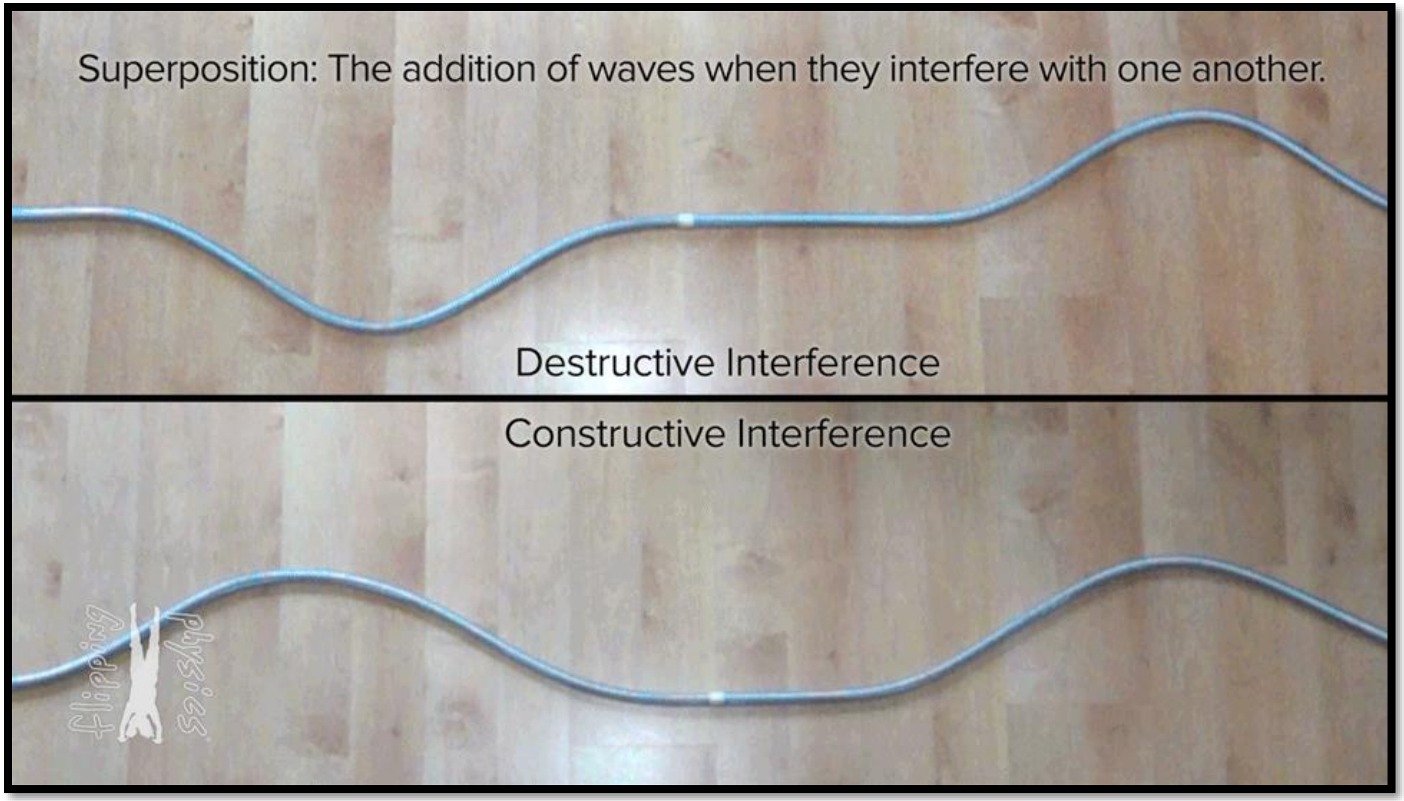
Εικόνα: Ο Carlos Santana εκμεταλλεύεται τα στάσιμα κύματα που δημιουργούνται από διαφορετικά κύματα που «προστίθενται» στις χορδές του. Αλλάζει νότα στην κιθάρα του πιέζοντας τις χορδές σε διαφορετικά σημεία, μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας το μήκος του τμήματος της χορδής που ταλαντώνεται.

Φυσική για Μηχανικούς

Υπέρθεση

Υπέρθεση (review…)

- **Αρχή της υπέρθεσης**



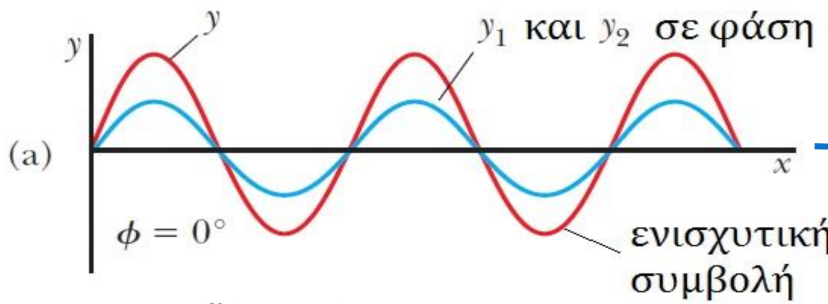
Υπέρθεση (review...)

$$\sin\theta \pm \sin\varphi = 2\sin\left(\frac{\theta\pm\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta\mp\varphi}{2}\right)$$

- **Υπέρθεση ημιτονοειδών κυμάτων**

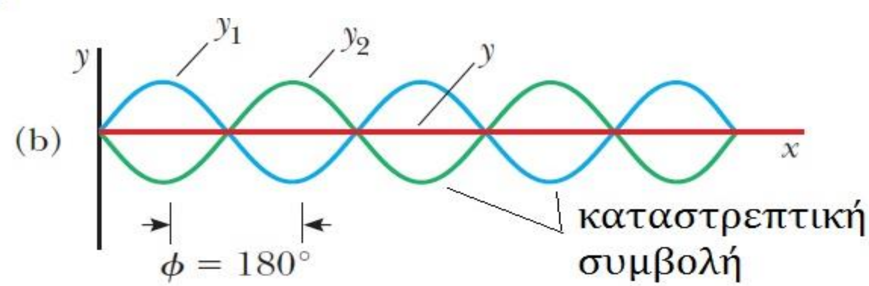
$$y_1(x,t) = A\sin(kx-\omega t)\,, \qquad y_2(x,t) = A\sin(kx-\omega t+\varphi)$$

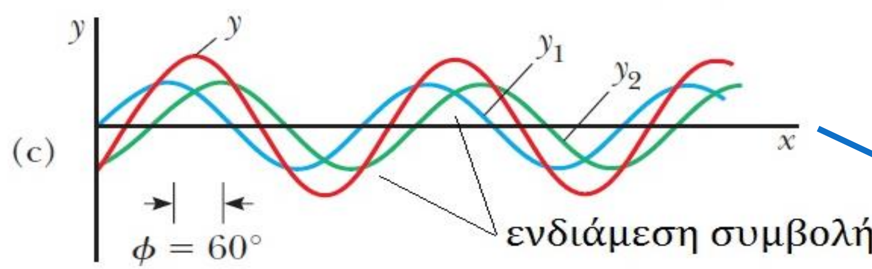
$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = \left[2A\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right]\sin\left(kx-\omega t+\frac{\varphi}{2}\right)$$



$\phi = 2k\pi, k \in Z$

$\phi = (2k+1)\pi, k \in Z$





$\phi \neq k\pi, k \in Z$

Υπέρθεση (review...)

$$\sin\theta \pm \sin\varphi = 2\sin\left(\frac{\theta\pm\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta\mp\varphi}{2}\right)$$

- **Υπέρθεση ημιτονοειδών κυμάτων**

$$y_1(r,t) = \boxed{A\sin(kr_1 - \omega t + \phi_1)} \qquad A\sin(\Phi_1)$$

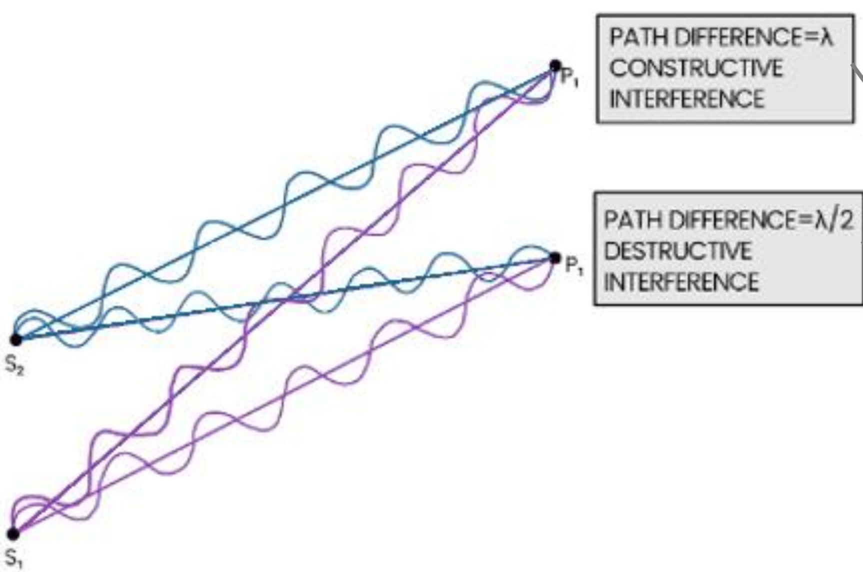
$$y_2(r,t) = \boxed{A\sin(kr_2 - \omega t + \phi_2)} \qquad A\sin(\Phi_2)$$

$$y(r,t) = y_1(r,t) + y_2(r,t) = \left[2A\cos\left(\frac{\Delta\Phi}{2}\right)\right]\sin\left(\frac{\Phi_1+\Phi_2}{2}\right)$$

$$\Delta\Phi = 2\pi\frac{\Delta r}{\lambda} + \Delta\varphi$$

0

«σε φάση»

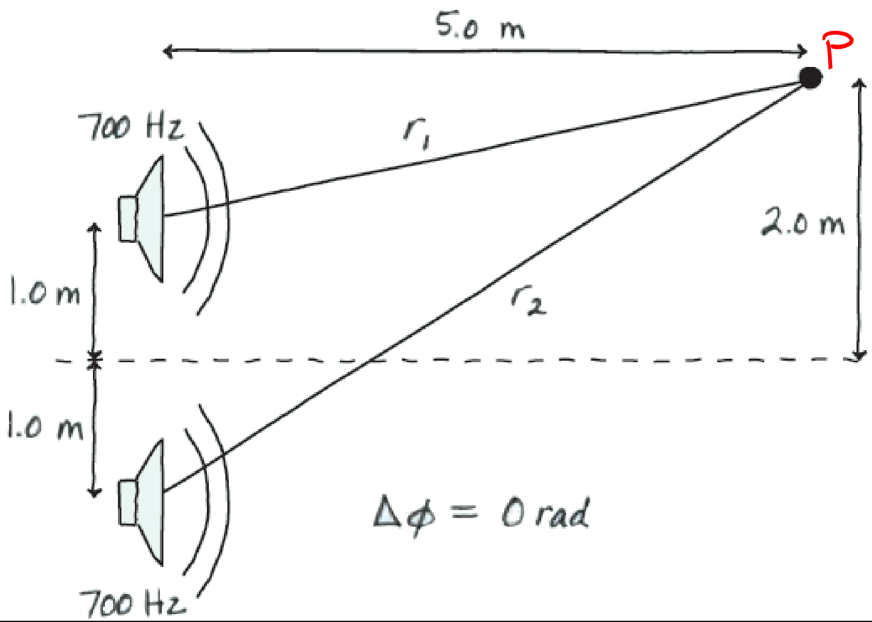


$$\Delta r = m\lambda, m = 0,1,2,3, \dots$$

$$\Delta r = \frac{(2m+1)\lambda}{2}, m = 0,1,2,3, \dots$$

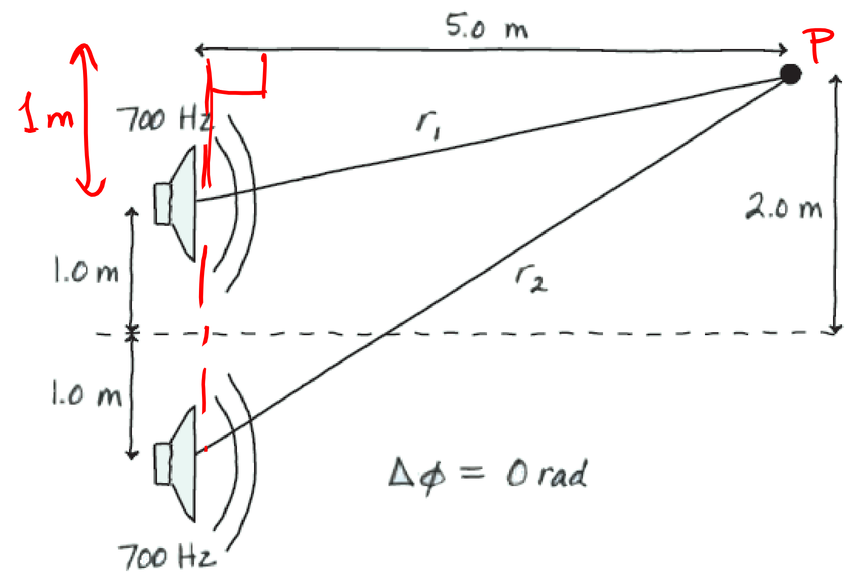
Υπέρθεση

- **Παράδειγμα:**
  - Δυο ηχεία βρίσκονται σε απόσταση 2.0 μέτρων και σε φάση. Εκπέμπουν συχνότητα 700 Hz σε ένα δωμάτιο που ο ήχος διαδίδεται με ταχύτητα 341 m/s. Ένας ακροατής στέκεται στο σημείο του σχήματος. Τι είδους συμβολή υπάρχει στο σημείο? Πώς αλλάζει η απάντησή σας αν τα ηχεία βρίσκονται εκτός φάσης?



Υπέρθεση

- **Παράδειγμα – Λύση:**



Τα δυο ηχεία βρίσκονται σε φάση, άρα $\Delta\varphi = 0$. Οπότε

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r + 0 = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r.$$

$$\Delta r_P = |r_2 - r_1|$$

$$r_2 = \sqrt{3^2 + 5^2} = \sqrt{9+25} = \sqrt{34} \simeq 5.83 \text{ m}$$

$$r_1 = \sqrt{5^2 + 1^2} = \sqrt{26} \simeq 5.10 \text{ m}$$

$$\rightarrow \Delta r_P = 0.73 \text{ m}$$

Είναι $u = \lambda f \Rightarrow \lambda = \frac{u}{f} = \frac{341}{700} \simeq 0.487$ m

Άρα

$\Delta r_P = m\lambda \longrightarrow$ ενισχ.

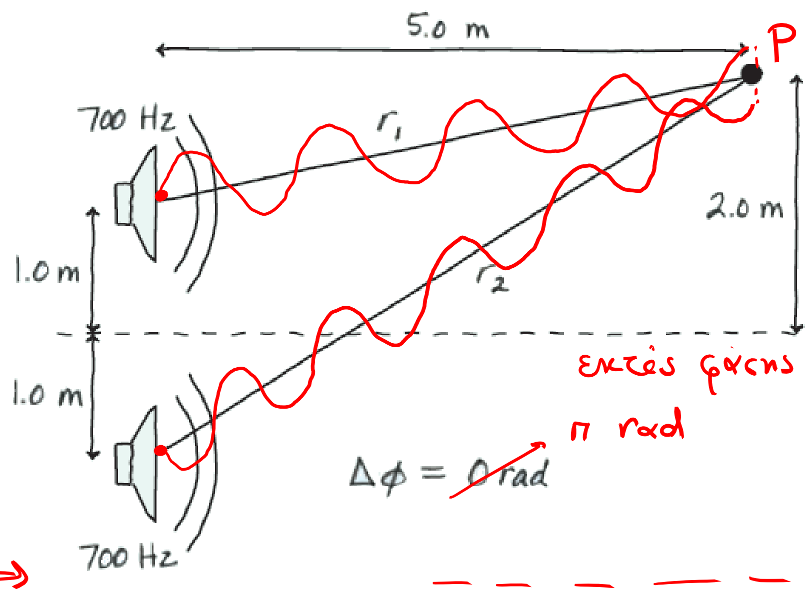
$\Delta r_P = (2m+1)\lambda/2 \longrightarrow$ καταστρ.

$\frac{\Delta r_P}{\lambda} = 1.5 = \frac{3}{2} \Rightarrow \Delta r_P = \frac{3}{2}\lambda$

άρα καταστρεπτική συμβ.

Υπέρθεση

- **Παράδειγμα – Λύση:**



Αν τα ηχεία ήταν εκτός φάσης,

τότε $\Delta\varphi = \pi$, κι άρα

$$\Delta\phi_P = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_P + \pi$$

Όμοια με πριν, $\frac{\Delta r_P}{\lambda} = 1.5$ $\Rightarrow$

$$\Rightarrow \Delta\phi_P = 2\pi \cdot 1.5 + \pi = 3\pi + \pi = 4\pi$$

Άρα $\left| 2A\cos\left(\frac{\Delta\phi_P}{2}\right) \right| = \left| 2A\cos(2\pi) \right| = 2A$,

Ενισχυτική συμβολή στο ίδιο σημείο!

Πλάτος συνολικού κύματος στο σημείο P

Προσέξτε ότι δε χρησιμοποιήσαμε τις σχέσεις $\Delta r = m\lambda$, $\Delta r = \frac{(2m+1)\lambda}{2}$ γιατί αυτές ισχύουν για συμφασικές πηγές, δηλ. για $\Delta\varphi = 0$!

$$\Delta r = m\lambda, m = 0,1,2,3,\ldots$$
$$\Delta r = (2m+1)\frac{\lambda}{2}, m = 0,1,2,3,\ldots$$

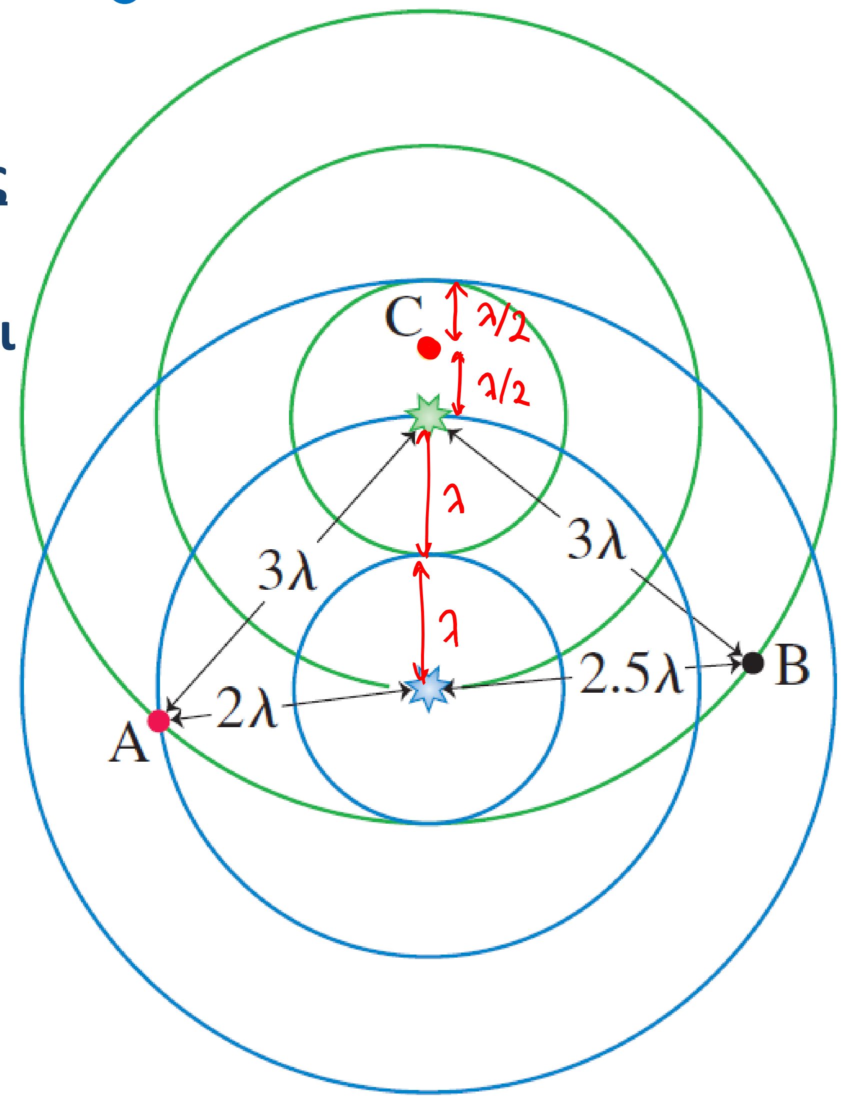
Υπέρθεση

- **Quiz:**
  - **Θεωρήστε δυο πηγές <u>ίδιες και σε φάση μεταξύ τους</u>**
  - **Στα σημεία A, B, C υπάρχει καταστρεπτική ή ενισχυ-τική συμβολή?**

A : ενισχυτική , $\Delta r = \lambda$

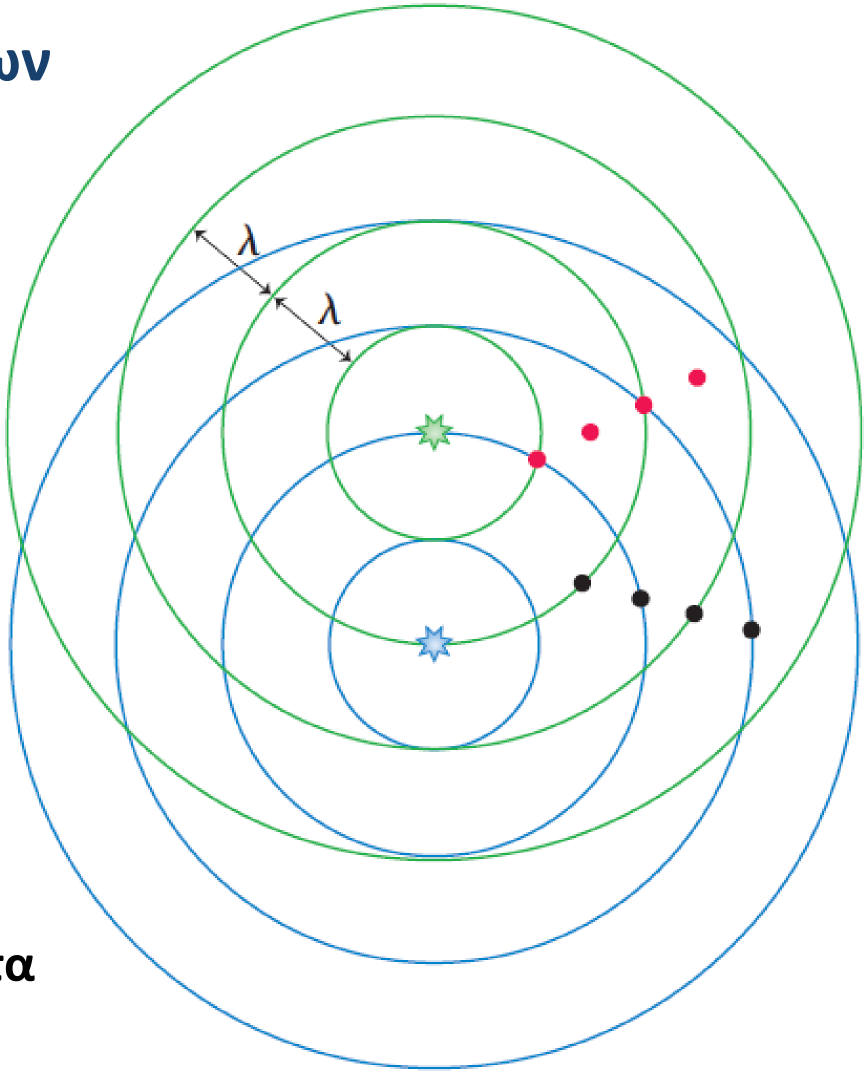
B : καταστρεπτική, $\Delta r = \frac{\lambda}{2}$

C : ενισχυτική , $\Delta r = 2\lambda$



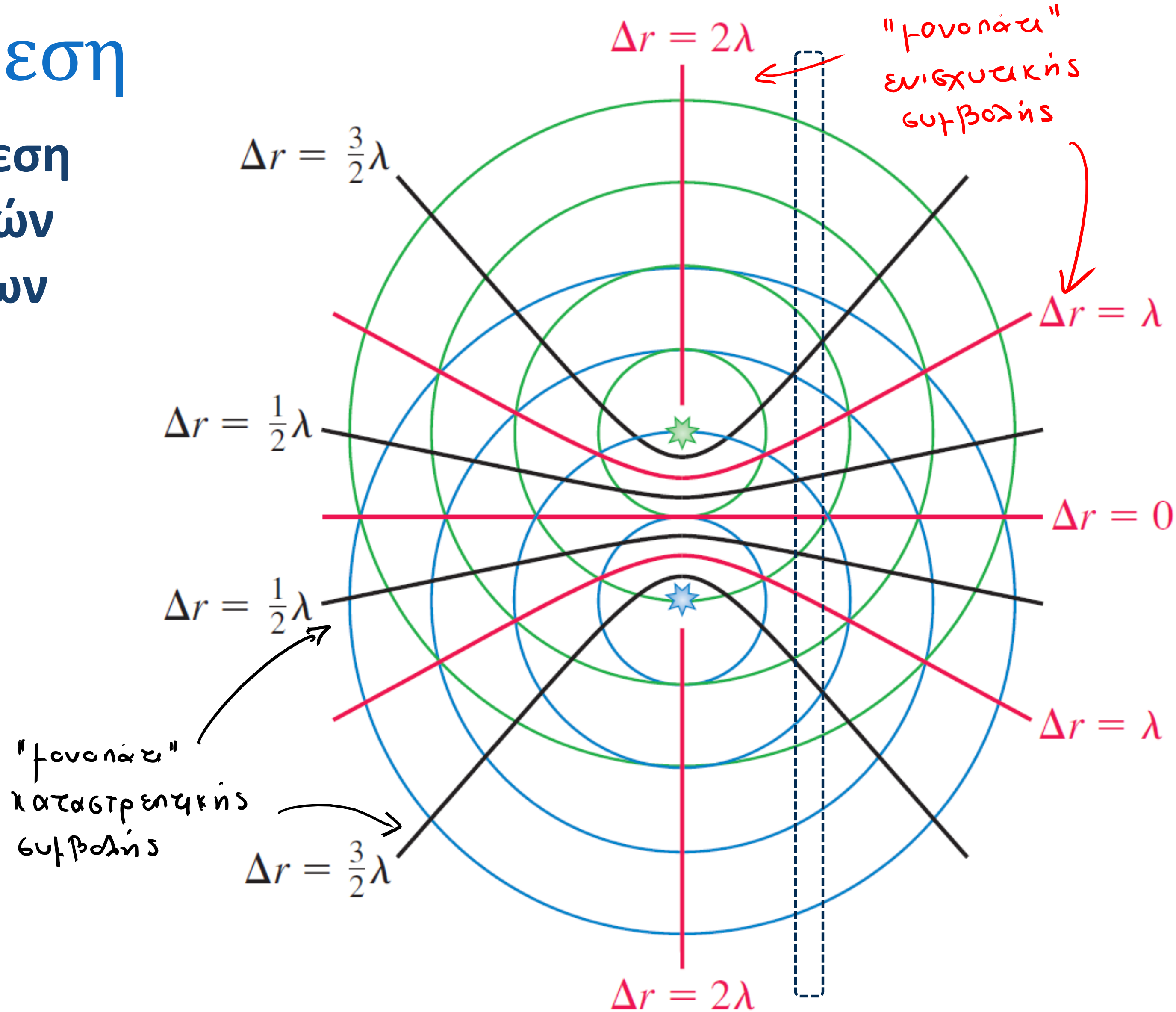
Υπέρθεση

- **Συμβολή ηχητικών κυμάτων**
  - Κοινές πηγές
    - Ίδιο k, ίδιο f, ίδιο A, $\Delta\phi = 0$
  - **Ενισχυτική συμβολή**
  - **Τα πυκνώματα του ενός κύματος συμπίπτουν με αυτά του άλλου – το ίδιο και τα αραιώματα**
  - **Καταστρεπτική συμβολή**
  - **Τα πυκνώματα του ενός συμπίπτουν με τα αραιώματα του άλλου**



Υπέρθεση

- **Υπέρθεση ηχητικών κυμάτων**

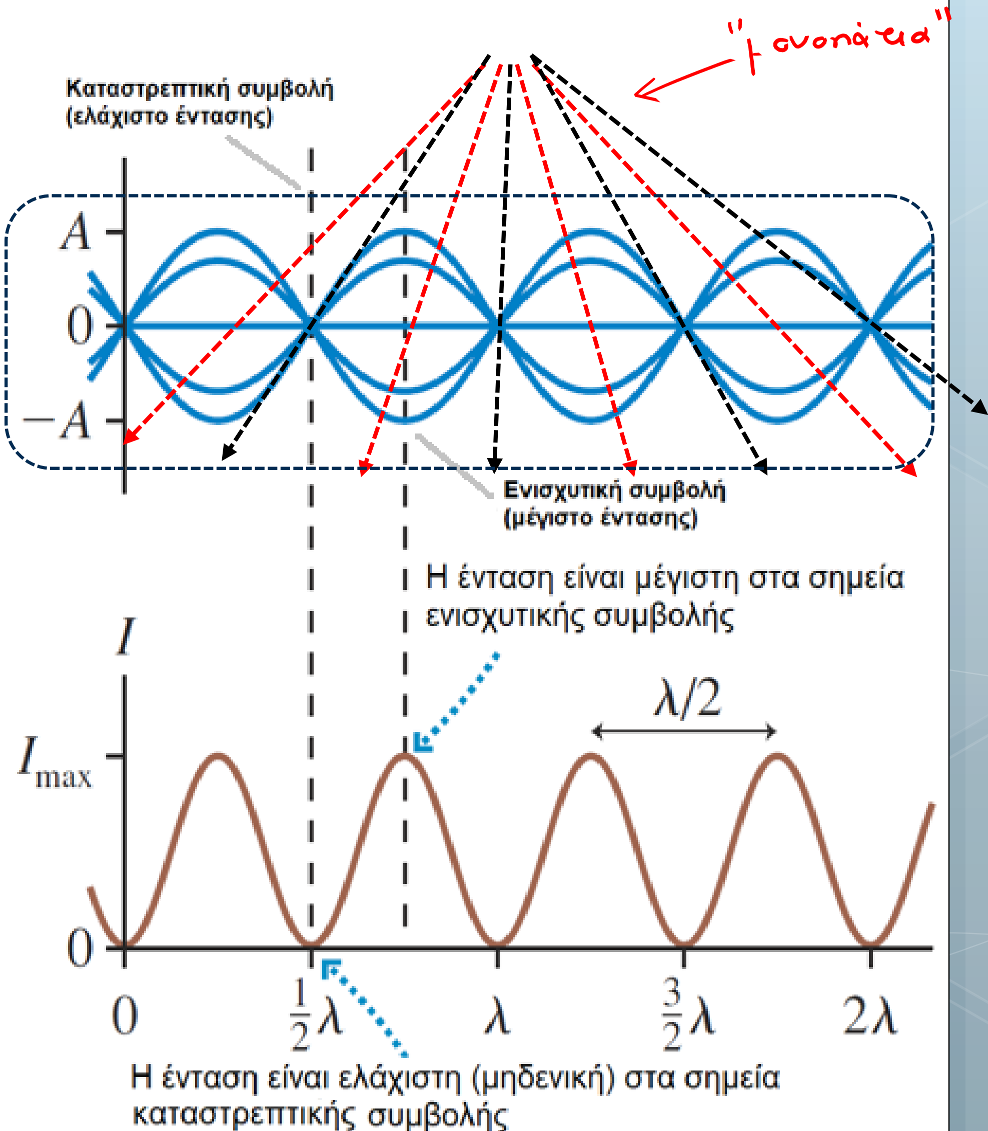


Υπέρθεση

- **Ένταση ηχητικών κυμάτων**
  - Μπορεί κανείς να δείξει ότι η ένταση I ενός ηχητικού κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του **συνολικού** κύματος A

$$I = cA^2$$

  - Η ένταση I του ήχου είναι **μέγιστη** στα σημεία **ενισχυτικής** συμβολής και **μηδενική** (ελάχιστη) στα σημεία **καταστρεπτικής** συμβολής

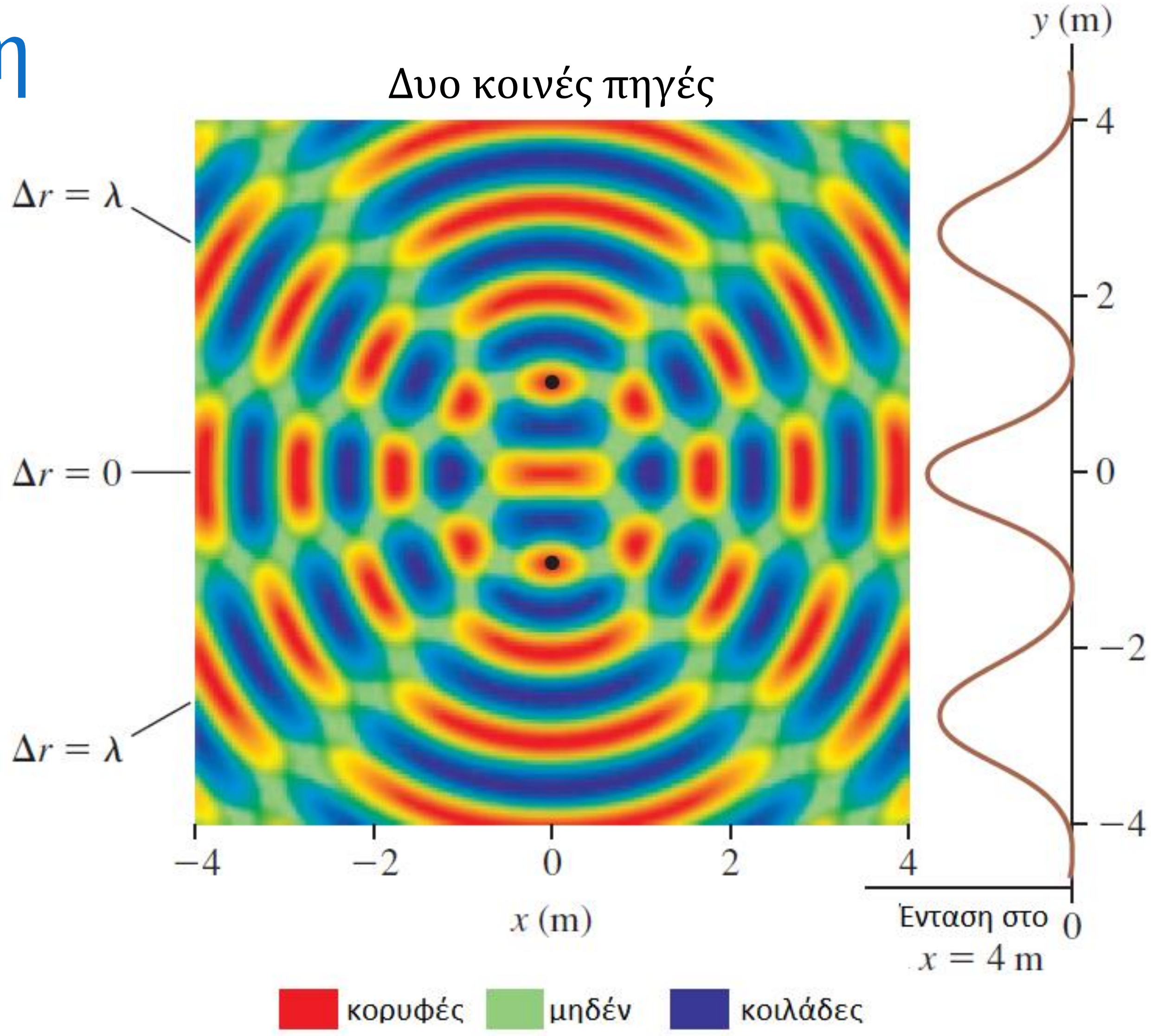


https://www.youtube.com/watch?v=b87QZtYKmqo

Υπέρθεση

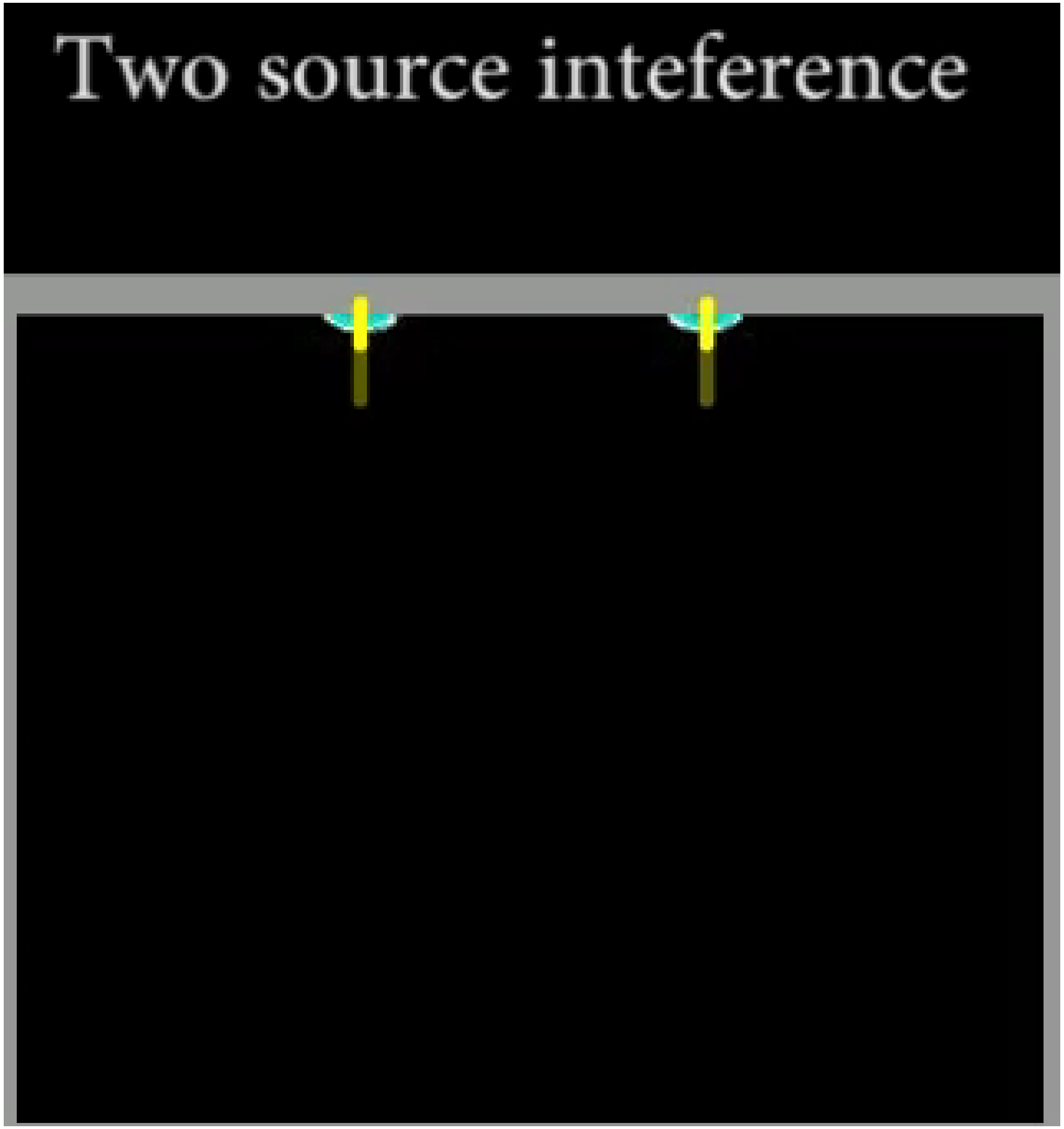
Υπέρθεση

- **Ένταση ηχητικών κυμάτων**



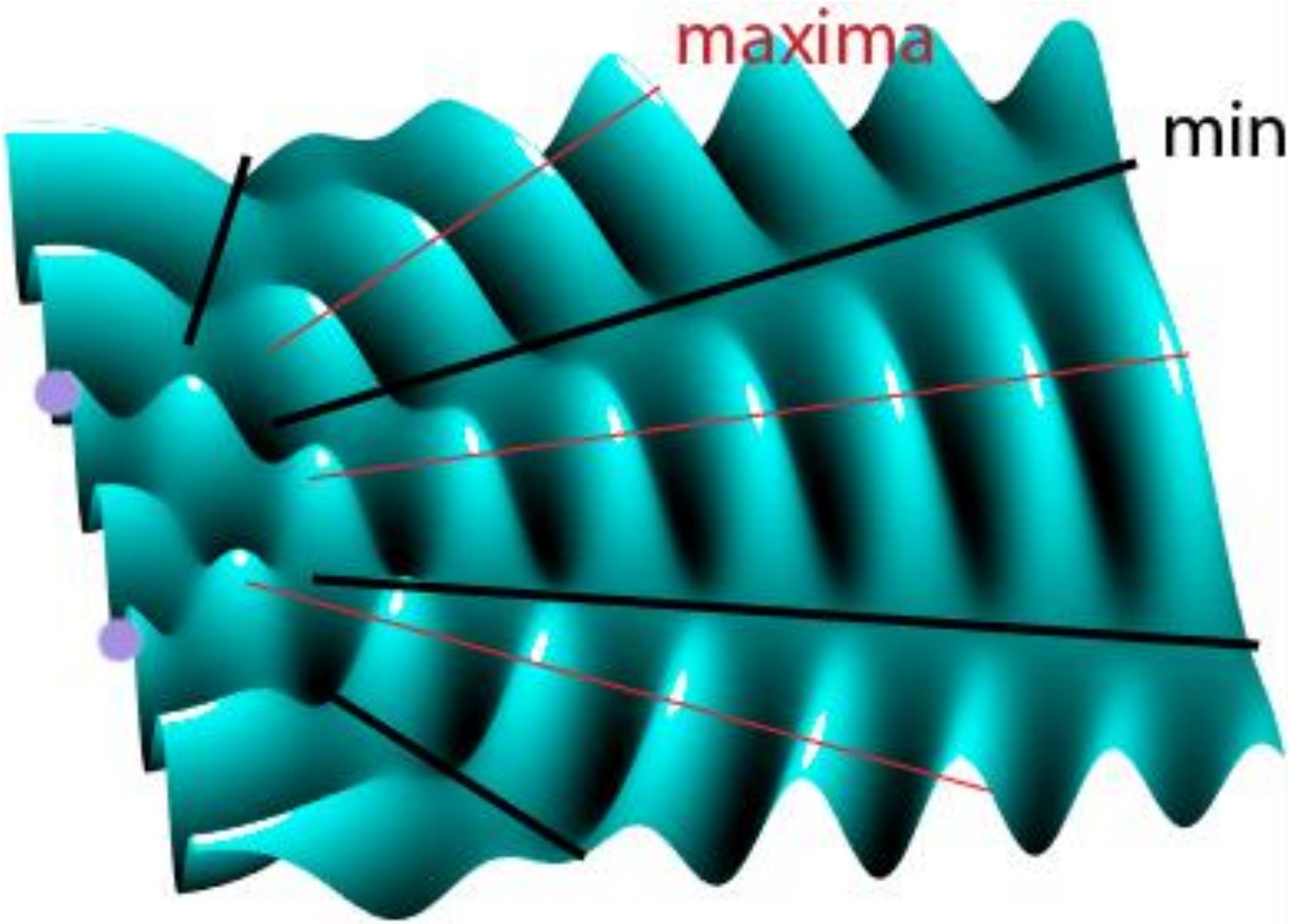
Υπέρθεση

- **Συμβολή ηχητικών Κυμάτων**



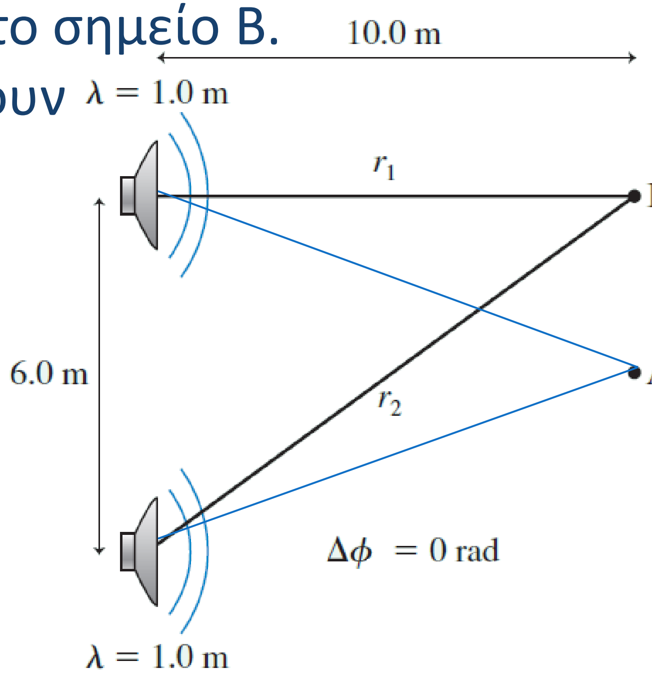
Υπέρθεση

- **Συμβολή ηχητικών κυμάτων: μέγιστα/ελάχιστα έντασης**



Υπέρθεση

- **Παράδειγμα:**
  - Δυο ηχεία βρίσκονται σε απόσταση 6.0 μέτρων και σε φάση. Εκπέμπουν μήκος κύματος $\lambda = 1.0$ m. Κάθε ηχείο δημιουργεί ήχο με ένταση I_0. Ένας ακροατής στέκεται στο σημείο Α του σχήματος (στη μεσοκάθετο της απόστασης των ηχείων). Ένας δεύτερος ακροατής στέκεται στο σημείο Β. Ποιες είναι οι εντάσεις που λαμβάνουν σε όρους I_0?



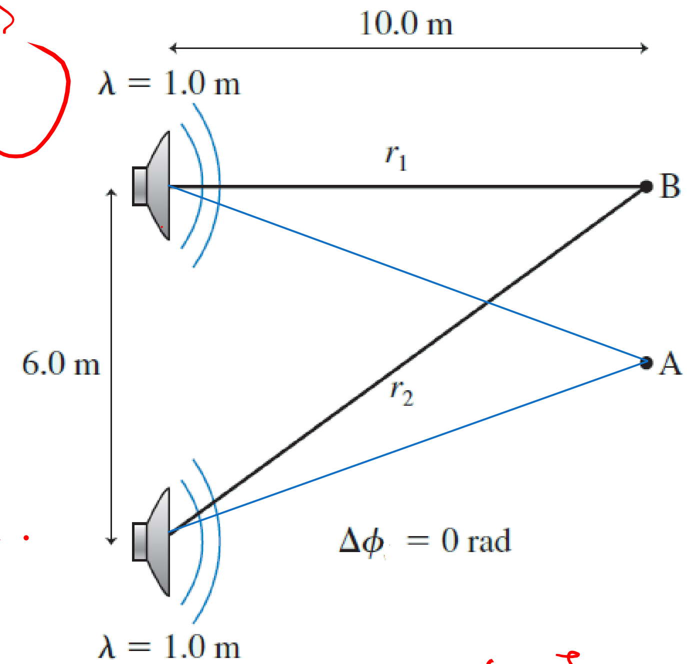
Κάθε ηχείο ξεχωριστά εκπέμπει κύματα έντασης $I_0 = cA^2$

$$\left|2A\cos\left(\frac{\Delta\phi_i}{2}\right)\right| = A_i$$

Υπέρθεση

$$I_0 = cA^2$$

- **Παράδειγμα – Λύση:**



Το σημείο Α ανήκει στη μεσοκάθετο της απόστασης των ηχείων, άρα $\Delta r_A = 0$, οπότε έχουμε ενισχυτική συμβολή. Το πλάτος της θα είναι 2A.

Στο σημείο Β:

$$\left.\begin{aligned} r_1 &= 10\ m \\ r_2 &= \sqrt{10^2+6^2} = \sqrt{136} \simeq 11.662\ m \end{aligned}\right\} \Longrightarrow \Delta r_B = 1.662\ m$$

(δεν ξέρουμε τι συμβολή είναι)

Είναι
$$\left.\begin{aligned} A_A &= 2A \\ I_A &= c(A_A)^2 \end{aligned}\right\} \Longrightarrow I_A = c(2A)^2 = c4A^2 = 4cA^2 = 4I_0$$

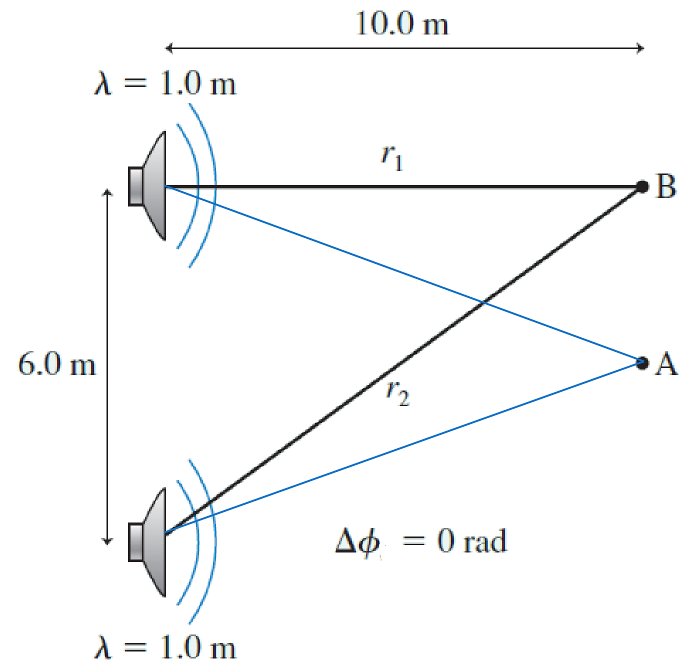
Επίσης, $\Delta\phi_B = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta r_B = 2\pi\Delta r_B \simeq 10.44$ rad

Υπέρθεση

- **Παράδειγμα – Λύση:**

Αφού $A_B = \left| 2A\cos\left(\frac{\Delta\phi_B}{2}\right) \right|$, $\Delta\phi_B = 10.44$ rad $\Rightarrow$

$\Rightarrow A_B \cong 0.972A$



Είναι

$$I_B = cA_B^2 = c(0.972A)^2 = c\,0.95A^2 = 0.95cA^2$$
$$= 0.95 I_0$$

Παρατηρήστε ότι η ένταση του ήχου στο σημείο B είναι 5% μικρότερη από την ένταση που θα ακούγαμε αν είχαμε μόνο <u>ένα</u> από τα δυο ηχεία στο χώρο!

Φυσική για Μηχανικούς

Στάσιμα Κύματα

Εικόνα: O 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

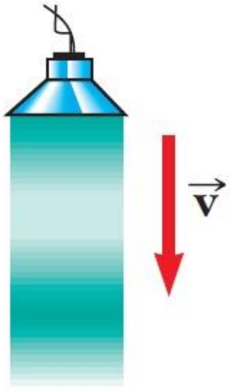
Στάσιμα Κύματα

Εικόνα: O 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.

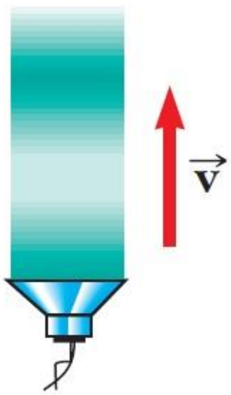
Στάσιμα Κύματα

$$\sin\theta \pm \sin\varphi = 2\sin\left(\frac{\theta \pm \varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\theta \mp \varphi}{2}\right)$$

- **Στάσιμα κύματα**
  - Ως τώρα βλέπαμε ηχητικά κύματα που συνέβαλαν σε κάποιο σημείο μπροστά τους



  - Τι θα γίνει αν τα βάλουμε **αντικρυστά**;
    - **Ίδια** συχνότητα, μήκος κύματος, πλάτος, αρχ. φάση
    - **Αντίθετη** ταχύτητα

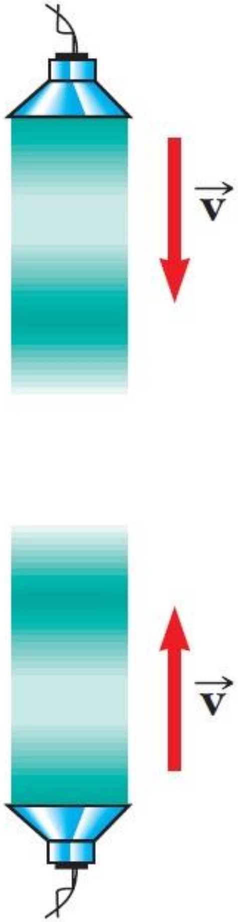


  - $y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$
    $= A\sin(kx - \omega t) + A\sin(kx + \omega t)$
    $= (2A\sin(kx))\cos(\omega t)$
  - Η παραπάνω σχέση ορίζει ένα ***στάσιμο κύμα***

Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**

$$y(x,t) = (2A\sin(kx))\cos(\omega t)$$



- Παρατηρήστε ότι **δεν** εξαρτάται από την έκφραση $kx \pm \omega t$

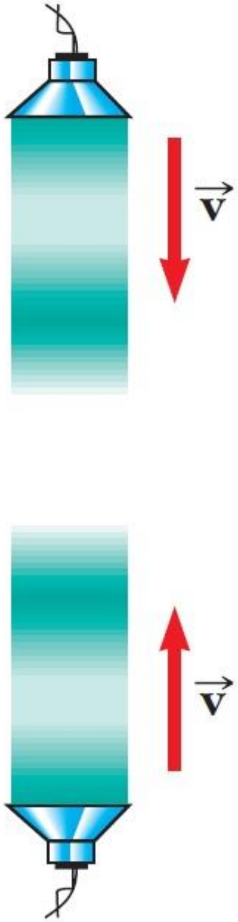
- Άρα **δεν** είναι οδεύον (κινούμενο) κύμα

- Δεν υπάρχει η έννοια της διάδοσης της κίνησης σε ένα **στάσιμο** κύμα

Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**

$$y(x,t) = (2A\sin(kx))\cos(\omega t)$$



- Λέγεται **στάσιμο** (δηλαδή σταθερό σε μια θέση) επειδή όλα τα στοιχεία του μέσου εκτελούν μεν απλή αρμονική ταλάντωση, ΑΛΛΑ:
  - με **διαφορετικό πλάτος** το **καθένα**!

- Δηλ. αντίθετα με ότι συμβαίνει σε ένα οδεύον κύμα, όπου τα στοιχεία του μέσου εκτελούν το ένα μετά το άλλο την **ίδια ακριβώς κίνηση**…
  - … εξασφαλίζοντας έτσι τη διάδοση της διαταραχής (του κύματος)

Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**
- Ας συγκρίνουμε:

$$y(t) = A\cos(\omega t)$$

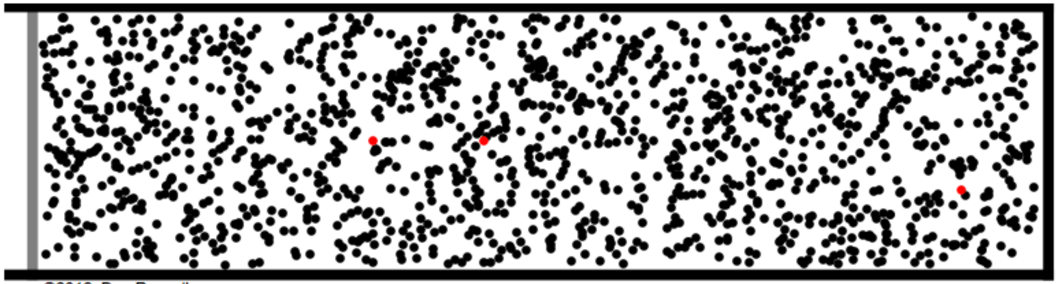
και

$$y(x,t) = (2A\sin(kx))\cos(\omega t)$$

- Τι παρατηρείτε;
  - Η δεύτερη περιγράφει μια ειδική μορφή της πρώτης
    - Κάθε στοιχείο που βρίσκεται στη **θέση** x εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση
    - Το **πλάτος** της απλής αρμονικής κίνησης, $2A\sin(kx)$, ενός στοιχείου εξαρτάται από τη **θέση** του στοιχείου, x, στο μέσο

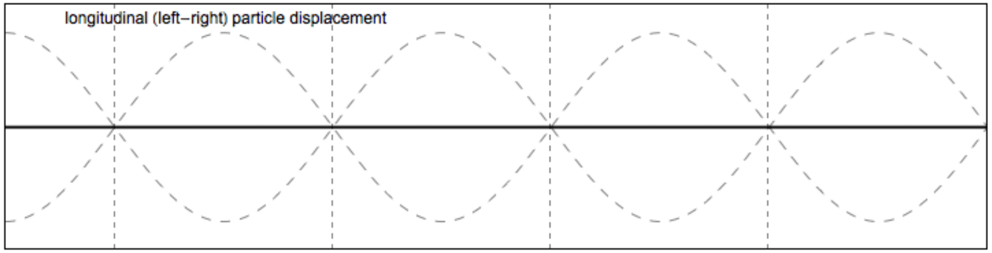
Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**

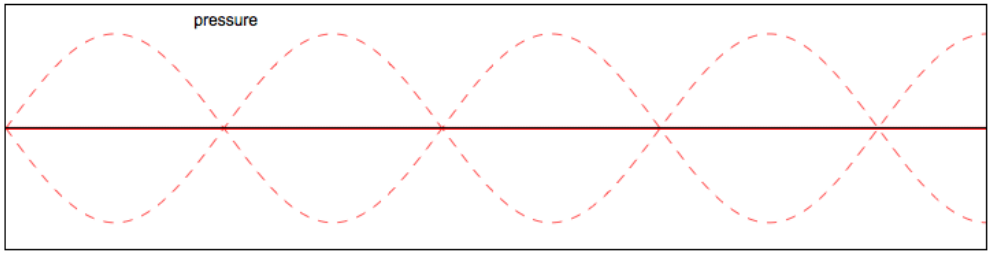


©2012, Dan Russell

Μετατόπιση

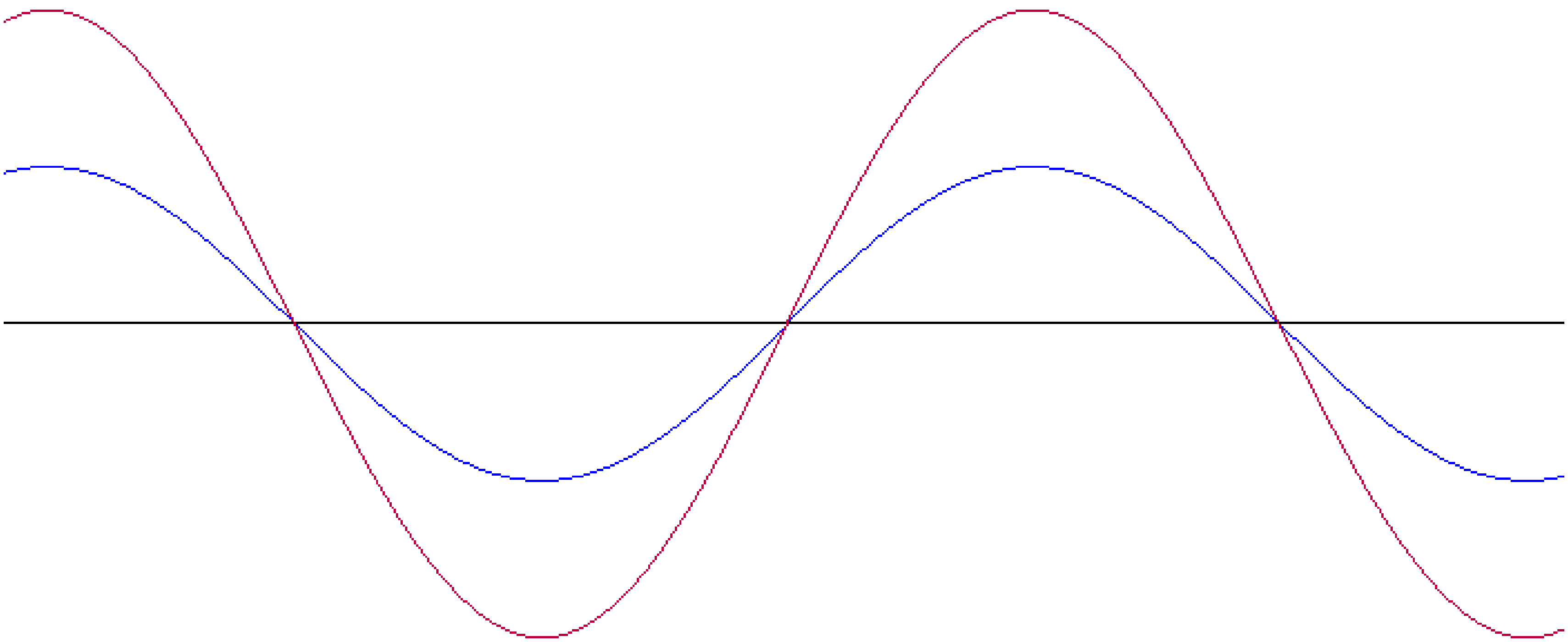


Πίεση



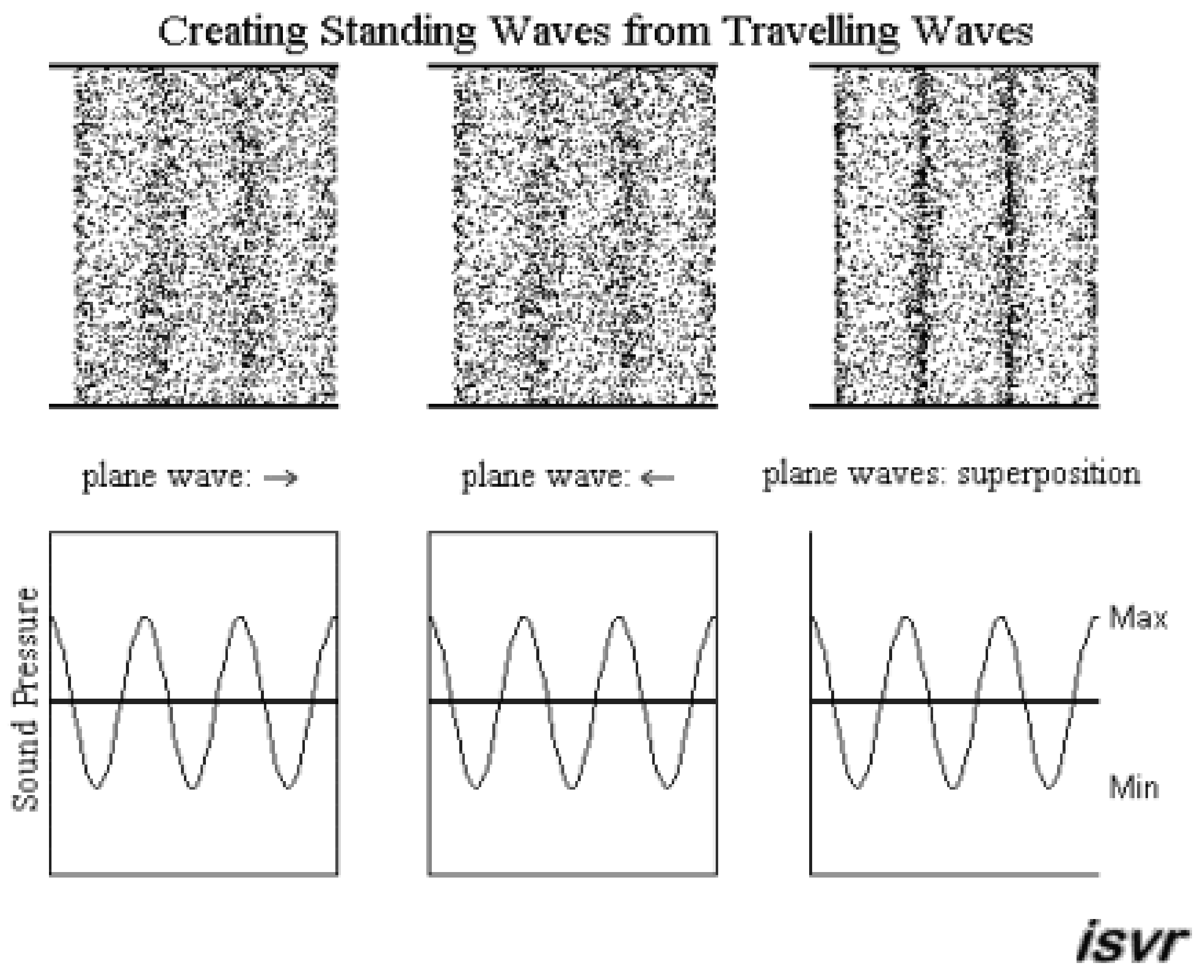
Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**



Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**



Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**

$$y(x,t) = (2A\sin(kx))\cos(\omega t)$$

- Υπάρχουν στοιχεία του μέσου που ΔΕΝ ταλαντώνονται? (δηλ. σε ποιο x μηδενίζεται το πλάτος;)

$$2A\sin(kx) = 0$$

$$\sin(kx) = \sin(n\pi)$$

$$kx = n\pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}x = n\pi$$

$$x = \frac{n\lambda}{2}, \qquad n = 0,1,2,3,\ldots$$

- Τα σημεία αυτά λέγονται **δεσμοί (nodes)**

Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**

$$y(x,t) = (2A\sin(kx))\cos(\omega t)$$

- Υπάρχον στοιχεία του μέσου που ταλαντώνονται με το μέγιστο δυνατό πλάτος? (δηλ. σε ποιο x μεγιστοποιείται το πλάτος;)

$$2A\sin(kx) = \pm 2A$$

$$\sin(kx) = \sin\left(n\pi + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$kx = n\pi + \frac{\pi}{2}$$

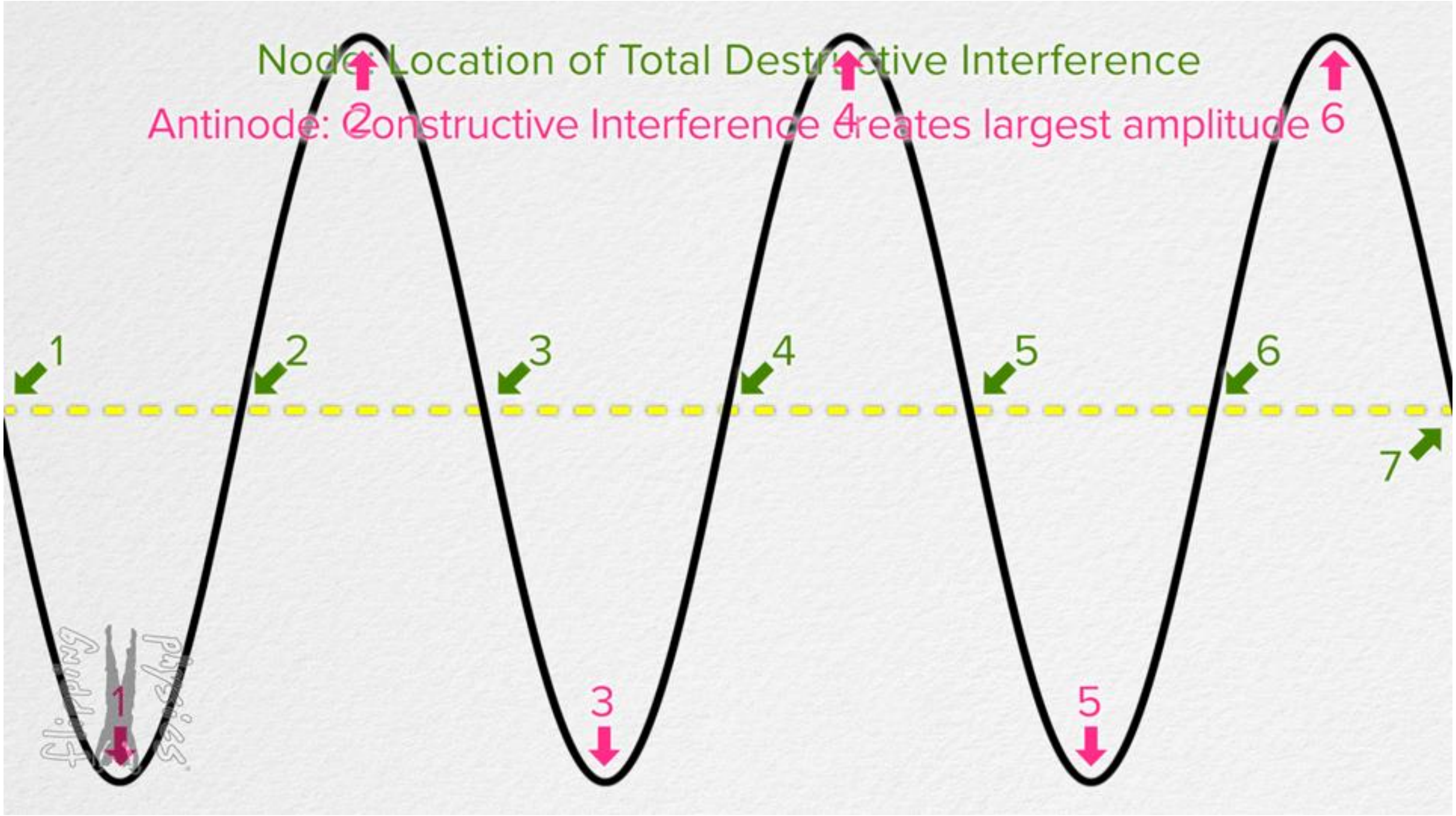
$$\frac{2\pi}{\lambda}x = n\pi + \frac{\pi}{2}$$

$$x = \frac{(2n+1)\lambda}{4}, n = 0,1,2,3,\ldots$$

- Τα σημεία αυτά λέγονται **κοιλίες (ή αντιδεσμοί) (antinodes)**

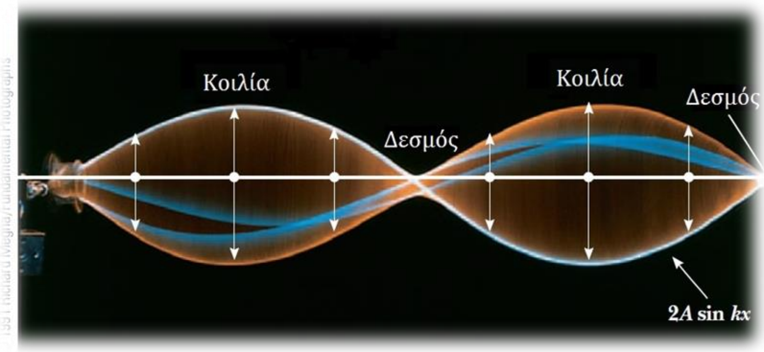
Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**



Στάσιμα Κύματα

- **Στάσιμα κύματα**



- Άρα εύκολα συμπεραίνει κανείς από τα προηγούμενα:

- Απόσταση μεταξύ **δυο διαδοχικών κοιλιών** = $\frac{\lambda}{2}$
- Απόσταση μεταξύ **δυο διαδοχικών δεσμών** = $\frac{\lambda}{2}$
- Απόσταση μεταξύ **δεσμού και επόμενης κοιλίας** = $\frac{\lambda}{4}$

Στάσιμα Κύματα

- **Παράδειγμα:**
  - Δυο κύματα τα οποία διαδίδονται προς αντίθετες κατευθύνσεις, δημιουργούν ένα στάσιμο κύμα. Οι επιμέρους κυματοσυναρτήσεις είναι

$$y_1(x,t) = 4\sin(3x - 2t)$$
$$y_2(x,t) = 4\sin(3x + 2t)$$

  με x, y να μετρούνται σε εκατοστά και ο χρόνος σε δευτερόλεπτα.
    - Α) Βρείτε το πλάτος της απλής αρμονικής κίνησης για το στοιχείο του μέσου που βρίσκεται στη θέση $x = 2.3$ εκατοστά.
    - Β) Βρείτε τις θέσεις των δεσμών και των κοιλιών αν το ένα άκρο της χορδής βρίσκεται στο σημείο $x = 0$.

Στάσιμα Κύματα

- **Παράδειγμα – Λύση:**
- Οι επιμέρους κυματοσυναρτήσεις είναι

$$y_1 = 4\sin(3x - 2t)$$
$$y_2 = 4\sin(3x + 2t)$$

  - Α) Βρείτε το πλάτος της απλής αρμονικής κίνησης για το στοιχείο του μέσου που βρίσκεται στη θέση $x = 2.3$ εκατοστά.

Το στάσιμο κύμα δίνεται από τη σχέση

$$y(x,t) = 8\sin(3x)\cos(\omega t)$$
$$= A(x)\cos(\omega t)$$

με $A(x)$ το πλάτος του κύματος

Για $x = 2.3$ cm, $A(2.3) = 8 \cdot \sin(6.9) \simeq 4.6$ cm. Άρα το στοιχείο στη θέση $x = 2.3$ cm εκτελεί Α.Α.Τ με πλάτος $A(2.3) = 4.6$ cm.

Στάσιμα Κύματα

- **Παράδειγμα – Λύση:**
- Οι επιμέρους κυματοσυναρτήσεις είναι

$$y_1 = 4\sin(3x - 2t)$$
$$y_2 = 4\sin(3x + 2t)$$

  - Β) Βρείτε τις θέσεις των δεσμών και των κοιλιών αν το ένα άκρο της χορδής βρίσκεται στο σημείο $x = 0$.

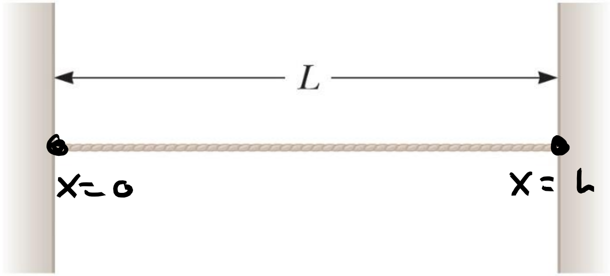
Ξέραμε ότι

$$\left.\begin{aligned} x_a &= \frac{2n+1}{4}\lambda, \; n \in \mathbb{N} \\ x_\delta &= \frac{n}{2}\lambda, \; n \in \mathbb{N} \\ k &= \frac{2\pi}{\lambda} = 3\ cm \Rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{3}\ cm \end{aligned}\right\} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \quad x_a = \frac{2n+1}{6}\pi, \; n \in \mathbb{N}$$

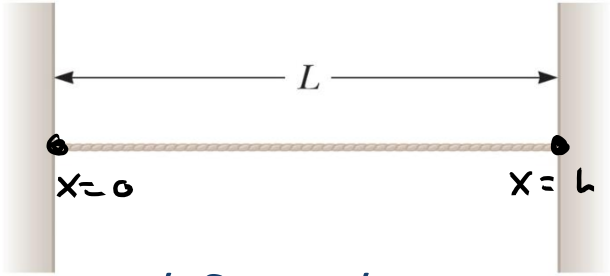
$$x_\delta = \frac{n}{2}\frac{2\pi}{3} = \frac{\pi n}{3}, \; n \in \mathbb{N}$$

Στάσιμα Κύματα



- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Θεωρήστε το νήμα της εικόνας
    - Χορδή κιθάρας, πιάνου
  - *<u>Οριακή συνθήκη</u>*: το νήμα έχει υποχρεωτικά δεσμούς στα άκρα!
  - Αν διεγείρουμε το νήμα στο μέσο του, δυο ημιτονοειδή κύματα θα ταξιδέψουν προς αντίθετες κατευθύνσεις
  - Όταν φτάσουν στα άκρα του νήματος, θα ανακλαστούν με ίδιο πλάτος και συχνότητα, και θα συμβάλλουν μεταξύ τους
    - Κι αυτό συνεχίζεται για τα επόμενα ανακλώμενα και συμβαλλόμενα κύματα
  - Αυτές είναι οι συνθήκες για δημιουργία ενός στάσιμου κύματος!

Στάσιμα Κύματα



- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - *<u>Οριακή συνθήκη</u>*: το νήμα έχει υποχρεωτικά δεσμούς στα άκρα!
    - Άρα το μήκος κύματος των κυμάτων που δημιουργούν στάσιμο κύμα πάνω στο νήμα είναι προκαθορισμένο
    - $2A \sin kL = 0 \Rightarrow kL = \frac{2\pi}{\lambda} L = n\pi \Rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n}, \quad n = 1,2,3,4, \ldots$
    - Προκαθορισμένη είναι και η συχνότητα του κύματος, αφού
$$u = \lambda f \Rightarrow f_n = \frac{u}{\lambda_n}$$
  - Η οριακή συνθήκη προκαλεί ένα συγκεκριμένο αριθμό διακριτών στάσιμων κυμάτων στο νήμα, που λέγονται **κανονικοί τρόποι** ή **ιδιομορφές (modes)**
    - Καθεμιά έχει τη δική της συχνότητα, η οποία υπολογίζεται εύκολα όπως παραπάνω

Στάσιμα Κύματα

- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Κανονικός τρόπος (mode) $\boldsymbol{n}$
  - Περιγράφεται ως η ταλάντωση που έχει οριακές συνθήκες στα άκρα της (δεσμοί) και κάθε δεσμός απέχει ¼ του μήκους κύματος από τον επόμενο/προηγούμενο αντιδεσμό
  - Μήκη κύματος

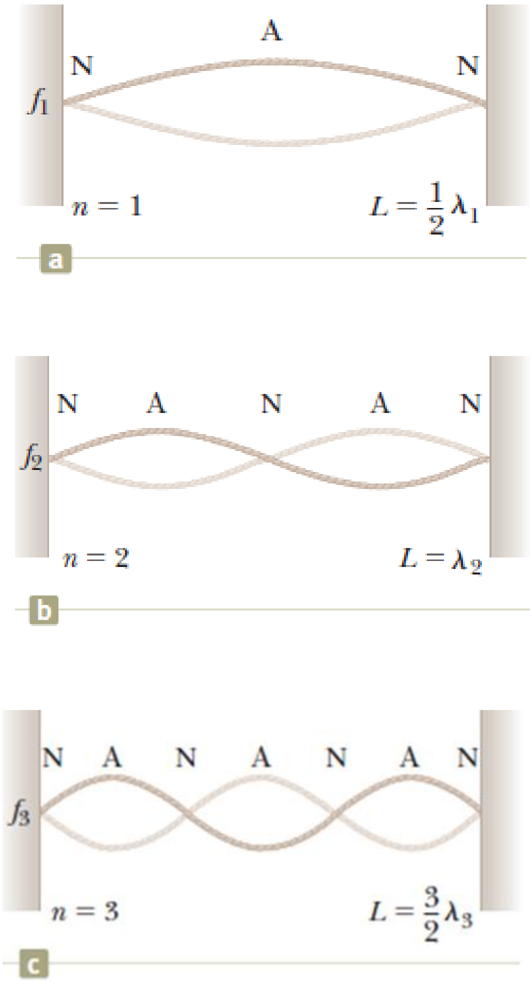
$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, n \in \mathbb{N}^+$$

  - Φυσικές συχνότητες

$$f_n = \frac{u}{\lambda_n} = n\frac{u}{2L} = nf_1, n \in \mathbb{N}^+$$

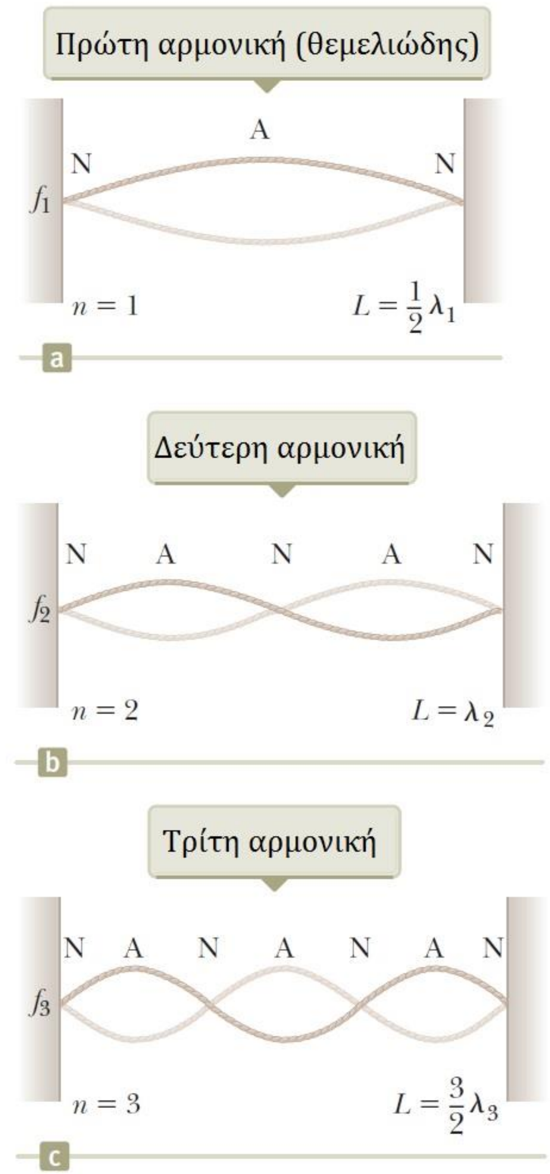
  - Για νήμα τάσης T και γραμμικής πυκνότητας μ,

$$f_n = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}, n \in \mathbb{N}^+$$



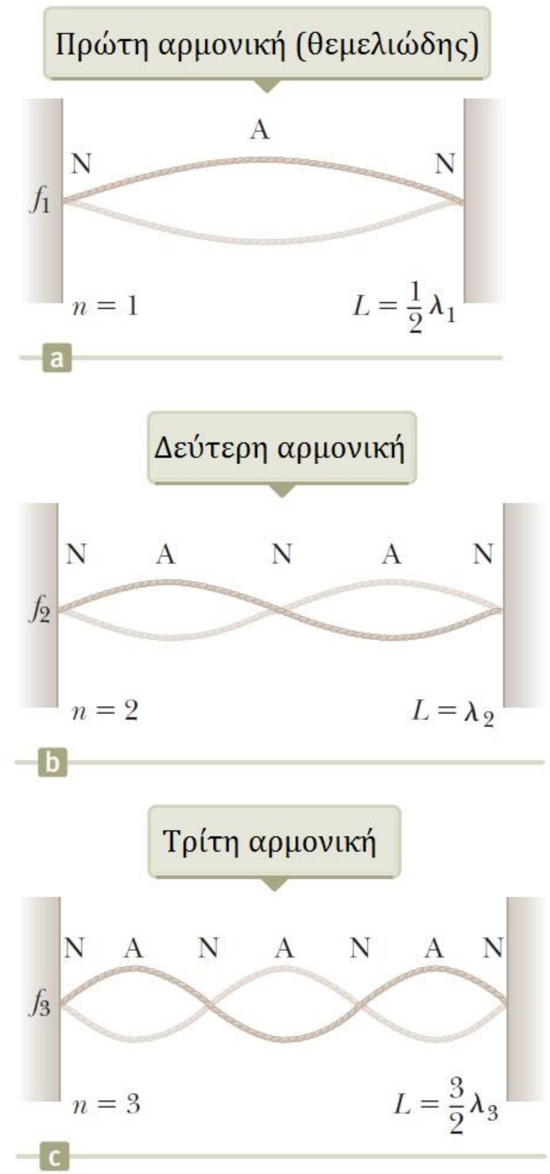
Στάσιμα Κύματα

- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Κανονικές μορφές (modes) n
  - Για $n = 1$, η συχνότητα αυτή λέγεται ***θεμελιώδης συχνότητα***
    - Οι υπόλοιπες είναι ακέραιες πολλα-πλάσιες αυτής: $f_n = nf_1$
  - Συχνότητες κανονικών τρόπων που παρουσιάζουν αυτήν την ακέραια πολλαπλάσια σχέση δημιουργούν ταλαντώσεις που λέγονται ***αρμονικές***

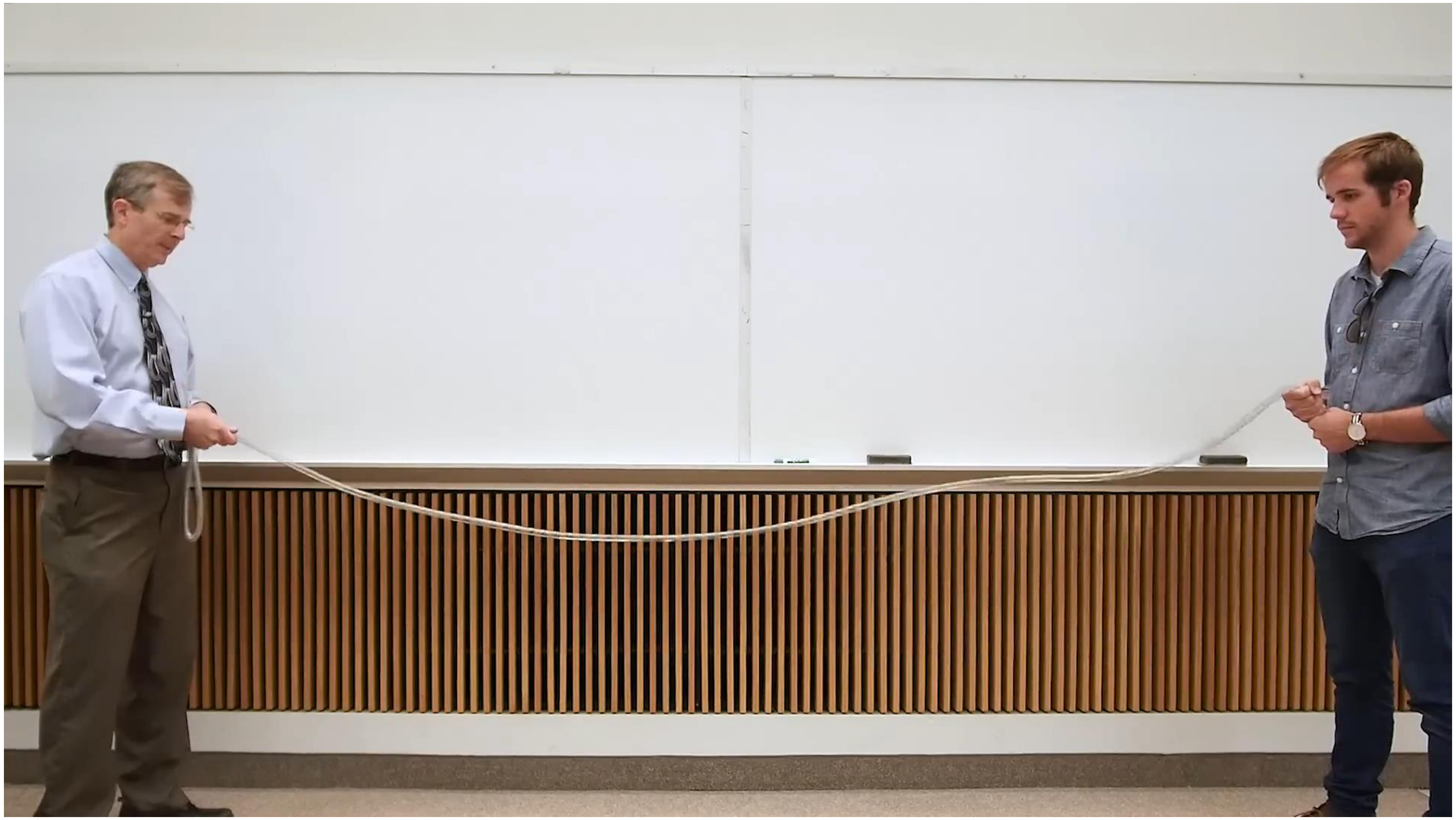


Στάσιμα Κύματα

- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Για να παρουσιαστεί μια μόνο αρμονική, πρέπει να διεγείρουμε το νήμα ώστε να πάρει το σχήμα της επιθυμητής αρμονικής
    - Αφού το διεγείρουμε, το νήμα θα ταλαντωθεί στην αντίστοιχη συχνότητα
    - Δύσκολο να επιτευχθεί για τις περισσότερες αρμονικές
  - Αν διεγείρουμε το νήμα με τυχαίο τρόπο, μόνο κύματα που ικανοποιούν τις οριακές συνθήκες θα «επιζήσουν» στο νήμα
    - Αυτά είναι οι αρμονικές ☺

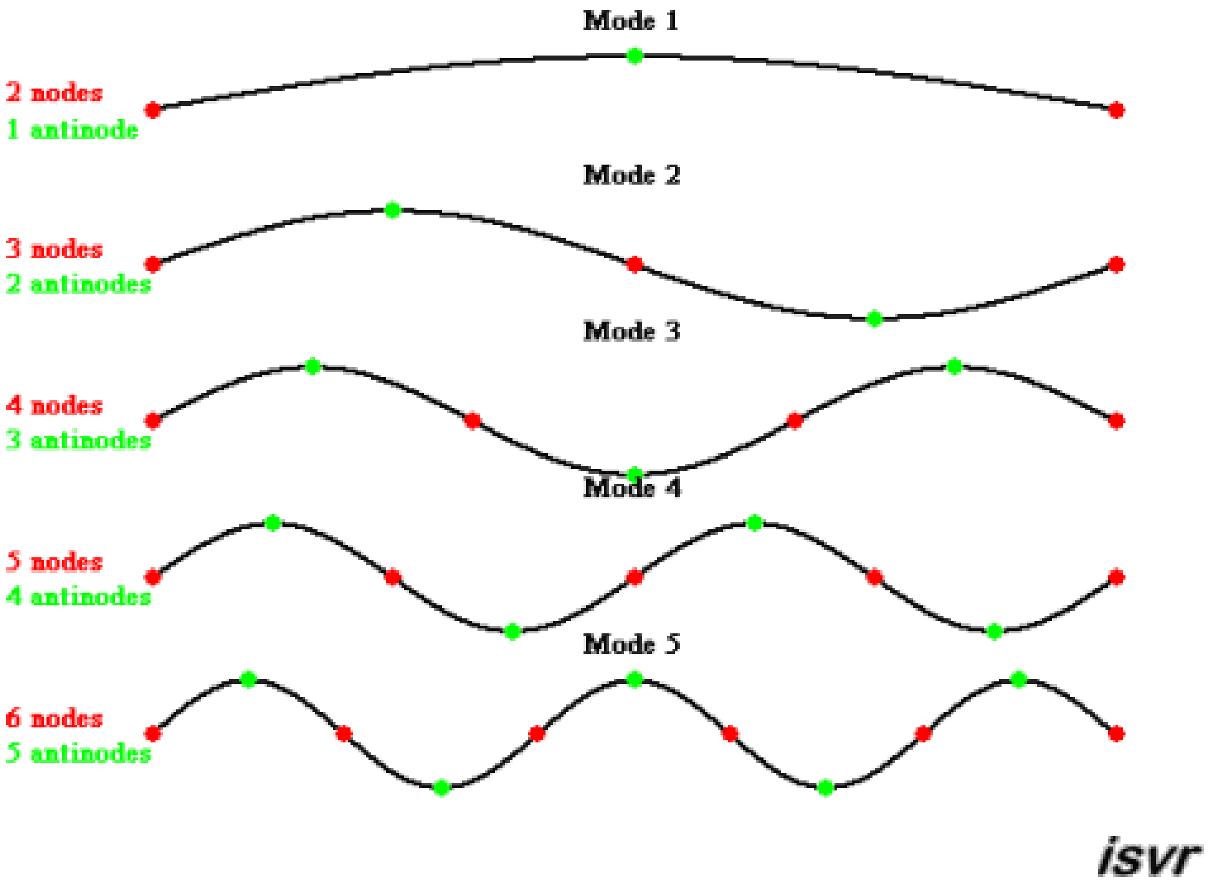


Στάσιμα Κύματα



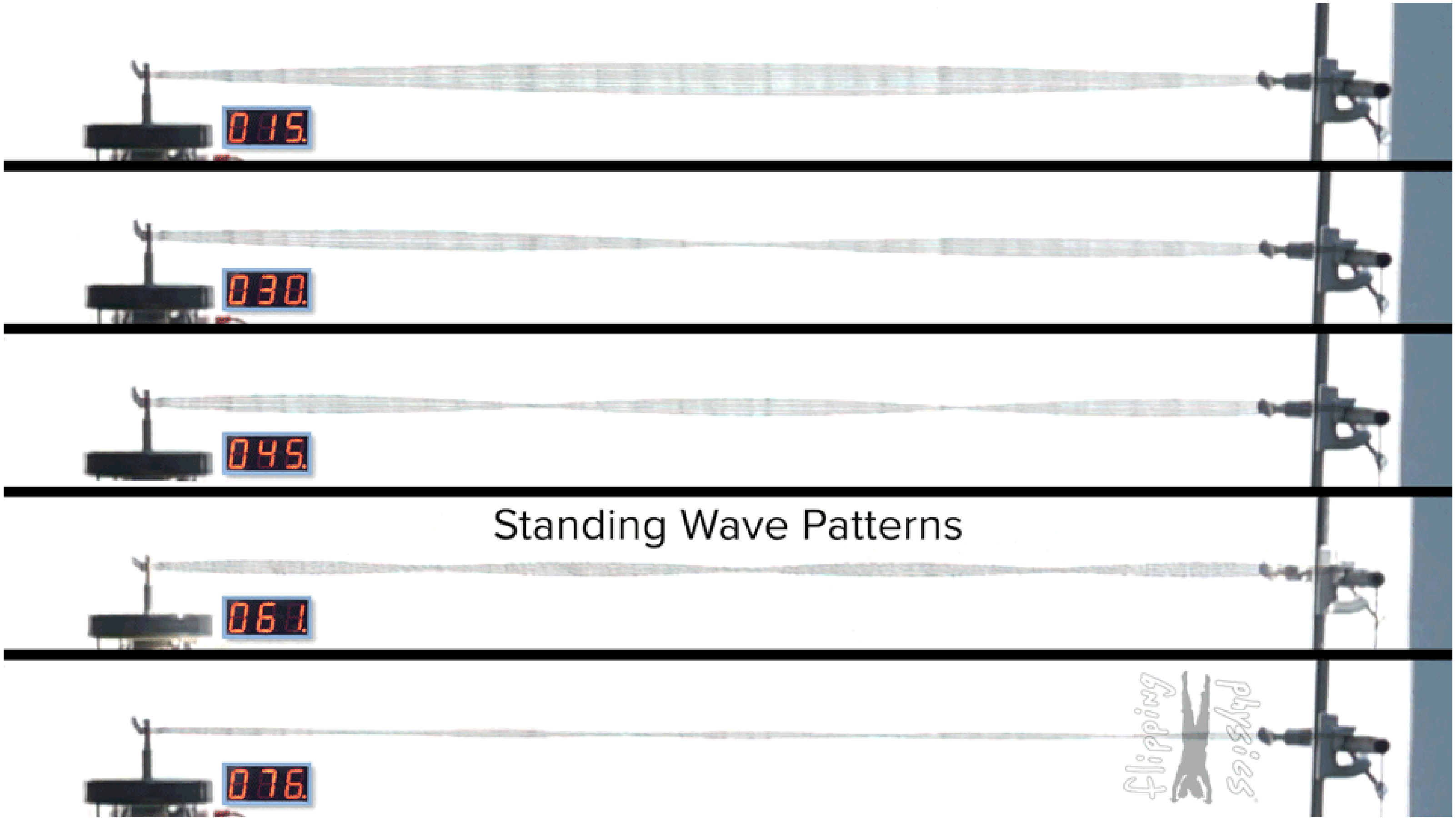
Στάσιμα Κύματα

- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Κανονικές μορφές (modes) n



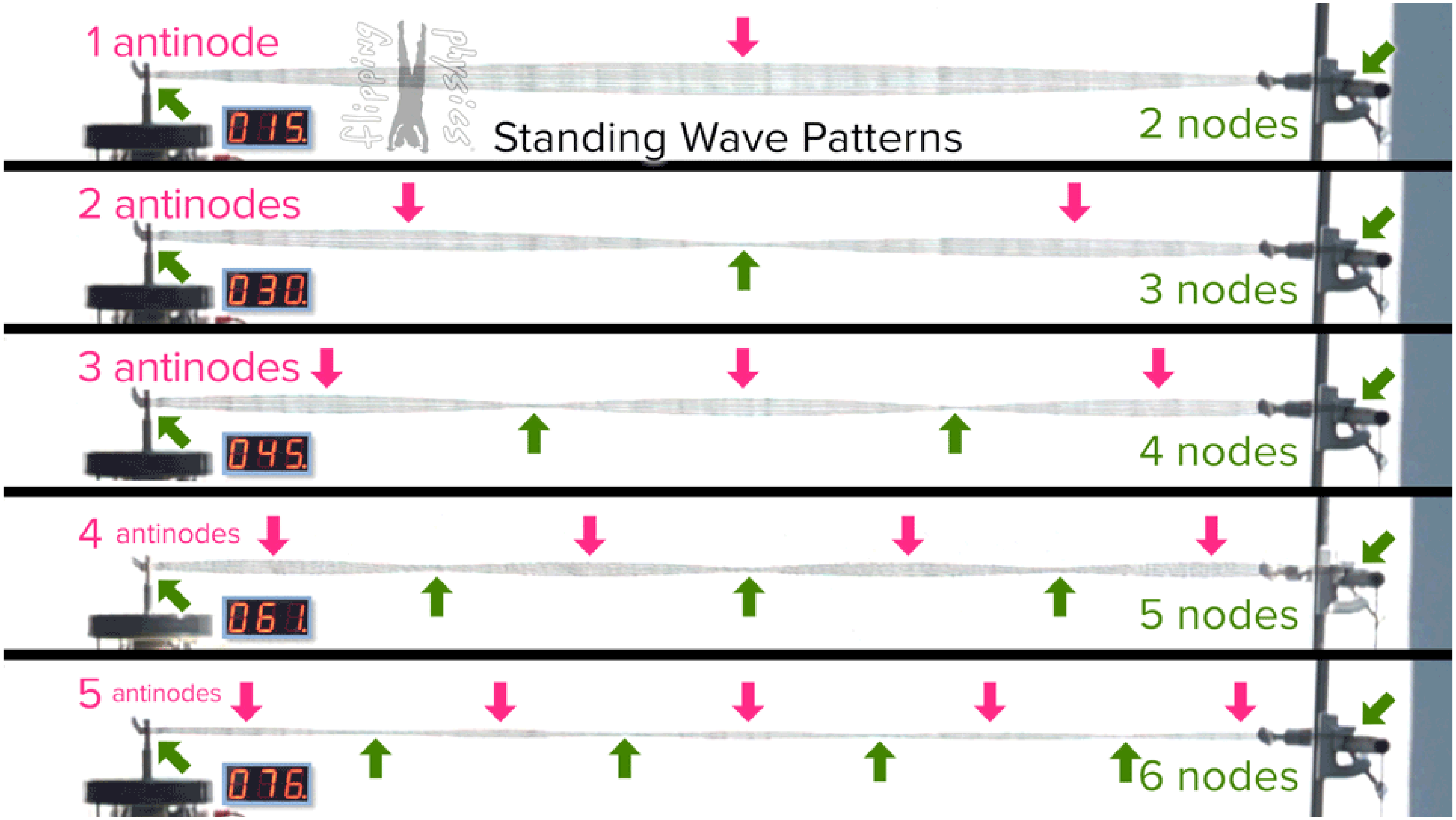
Στάσιμα Κύματα

- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Κανονικές μορφές (modes) n



Στάσιμα Κύματα

- **Κύματα υπό Οριακές Συνθήκες**
  - Κανονικές μορφές (modes) n



Τέλος Διάλεξης