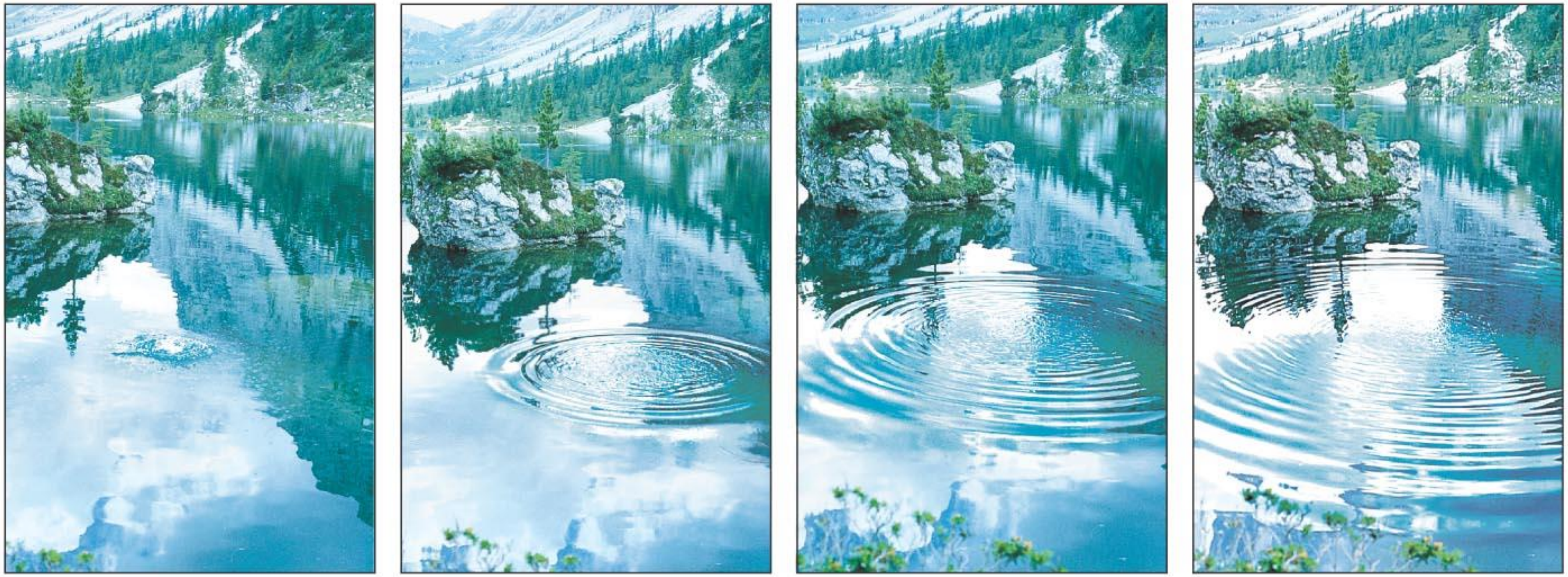
Κεφάλαιο 15

Κίνηση Κυμάτων

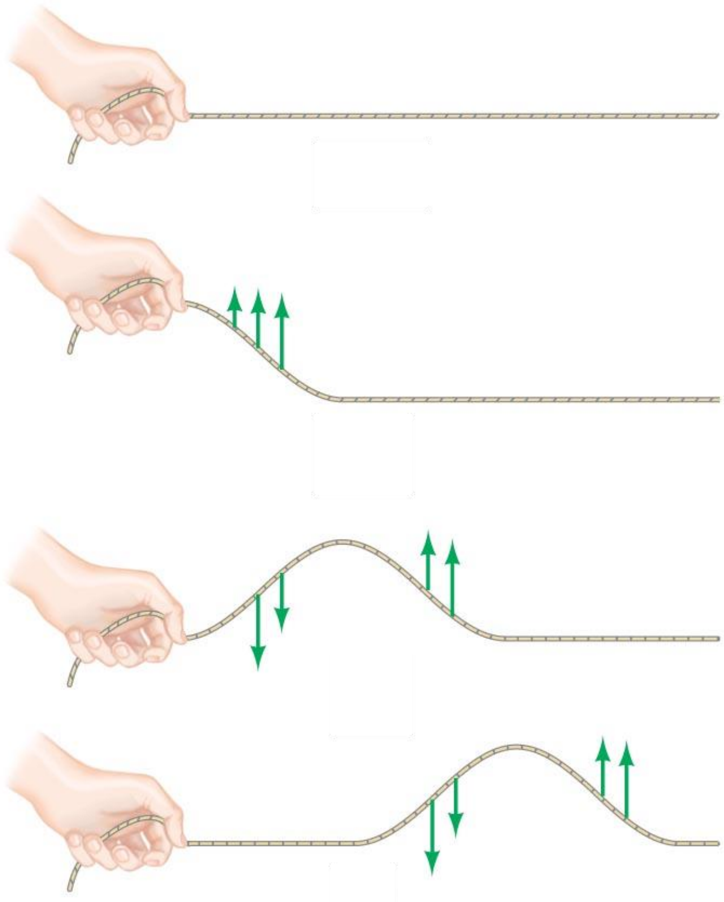


Περιεχόμενα Κεφαλαίου 15

- **Χαρακτηριστικά Κυματικής**
- **Είδη κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια**
- **Μεταφορά ενέργειας με κύματα**
- **Μαθηματική Περιγραφή της Διάδοσης κυμάτων**
- **Η Εξίσωση του Κύματος**
- **Κανόνας Υπέρθεσης**
- **Ανάκλαση και Διάδοση**
- **Συμβολή, Στάσιμα Κύματα και Συντονισμός**
- **Σκέδαση και Διάθλαση**

15-1 Χαρακτηριστικά Διάδοσης Κύματος

Όλα τα κύματα μεταφέρουν ενέργεια.



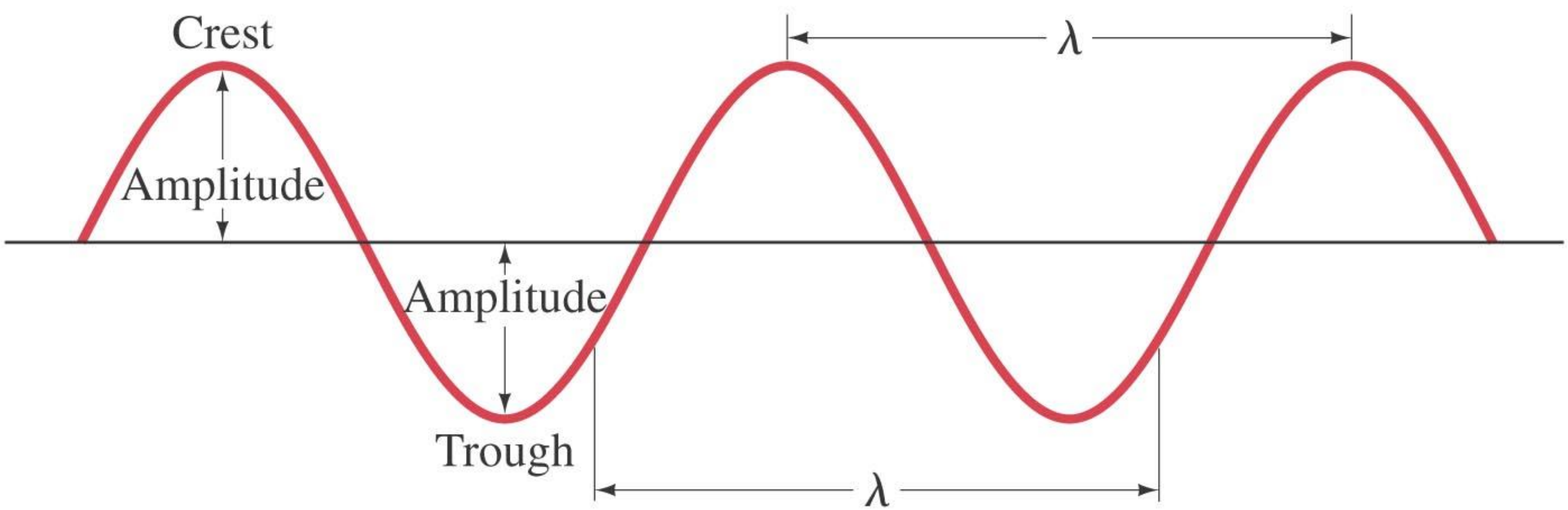
Ένα κύμα ξεκινάει με την ταλάντωση της άκρης μιας χορδής και διαδίδεται εξ αιτίας των δυνάμεων συνοχής του υλικού της χορδής

Συνεχή κύματα (Continuous waves, CW) δημιουργούνται όταν έχουμε συνεχή ταλάντωση της άκρης. Εάν η ταλάντωση είναι αρμονική τότε η μορφή του κύματος είναι ημιτονοειδής

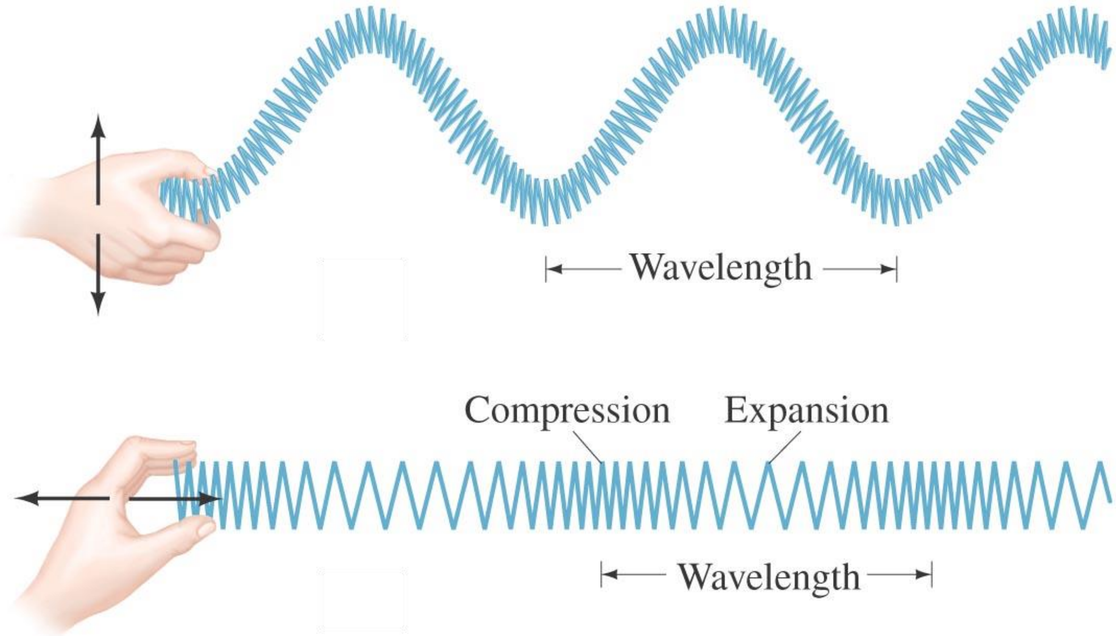
15-1 Χαρακτηριστικά Διάδοσης Κύματος

Χαρακτηριστικά Κυμάτων:

- **Πλάτος (amplitude)**, A
- **Μήκος κύματος**, λ
- **Συχνότητα**, f **και Περίοδος**, T
- **Ταχύτητα κύματος**, $v = \lambda f$



15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

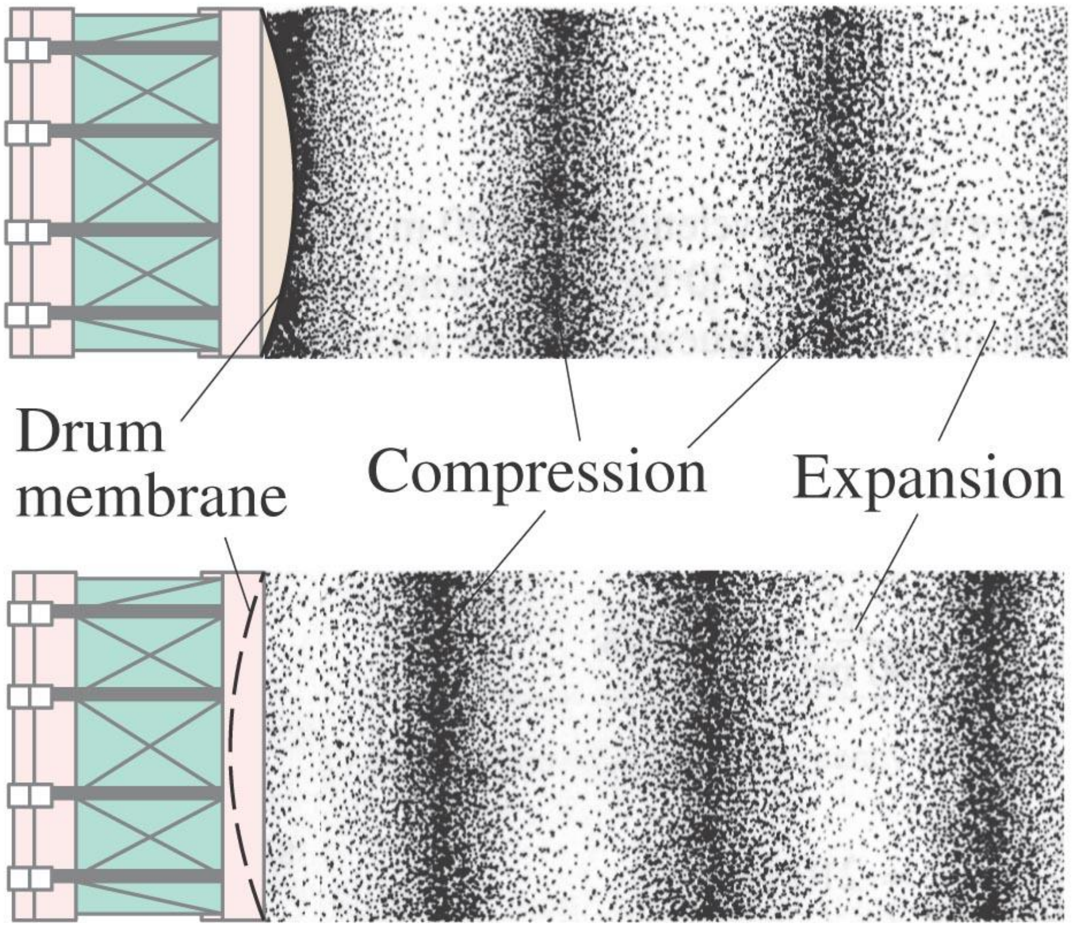


Εγκάρσια: Η κίνηση των σωματιδίων είναι **κάθετη** στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος

Διαμήκη: Η κίνηση των σωματιδίων είναι **κατά-μήκος** της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος.

15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

Τα ηχητικά κύματα είναι διαμήκη:



15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

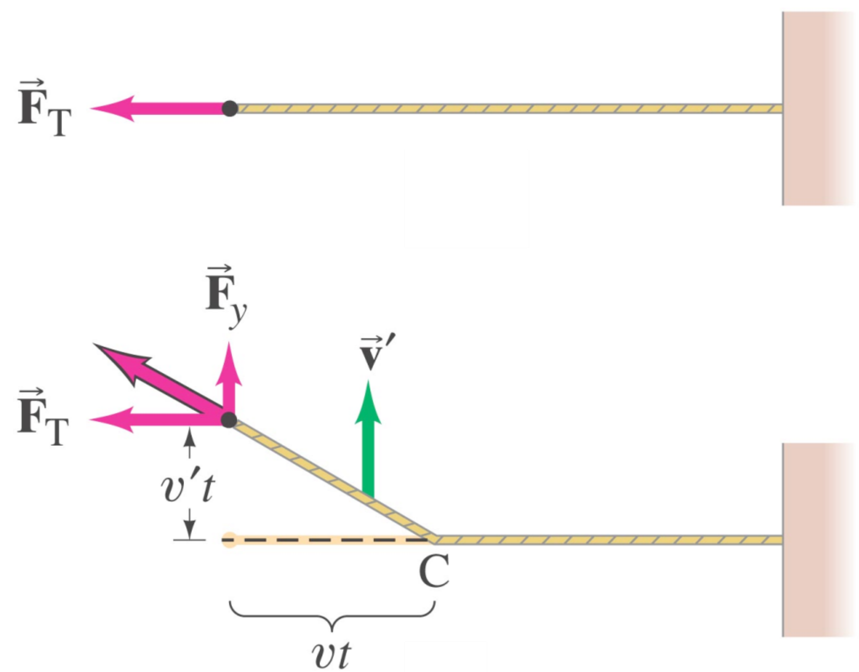
Η ταχύτητα ενός εγκάρσιου κύματος είναι :

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}}.$$

F_T : τάση
μ : μάζα/μήκος

Παρατηρούμε ότι όταν η τάση της χορδής μεγαλώνει η ταχύτητα αυξάνεται.

Όσο μικρότερη είναι μάζα της χορδής τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα.



15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

Ένα καλώδιο χαλκού, μήκους 80.0-m και διαμέτρου, 2.10-mm τεντώνεται μεταξύ δύο πόλων. Ένα πουλί κάθεται στο μέσο του καλωδίου «στέλνοντας» παλμούς κυμάτων προς του δύο πόλους. Οι παλμοί αυτοί ανακλούνται από τους πόλους και φθάνουν ξανά στο πουλί σε 0.750 s. Βρείτε την τάση του καλωδίου.

APPROACH From Eq. 15–2, the tension is given by $F_{\mathrm{T}} = \mu v^2$. The speed v is distance divided by the time. The mass per unit length μ is calculated from the density of copper and the dimensions of the wire.

SOLUTION Each wave pulse travels 40.0 m to the pole and back again (= 80.0 m) in 0.750 s. Thus their speed is $v = (80.0\,\mathrm{m})/(0.750\,\mathrm{s}) = 107\,\mathrm{m/s}$. We take (Table 13–1) the density of copper as $8.90 \times 10^3\,\mathrm{kg/m^3}$. The volume of copper in the wire is the cross-sectional area (πr^2) times the length ℓ, and the mass of the wire is the volume times the density: $m = \rho(\pi r^2)\ell$ for a wire of radius r and length ℓ. Then $\mu = m/\ell$ is

$$\mu = \rho \pi r^2 \ell / \ell = \rho \pi r^2 = (8.90 \times 10^3\,\mathrm{kg/m^3})\pi(1.05 \times 10^{-3}\,\mathrm{m})^2 = 0.0308\,\mathrm{kg/m}.$$

Thus, the tension is $F_{\mathrm{T}} = \mu v^2 = (0.0308\,\mathrm{kg/m})(107\,\mathrm{m/s})^2 = 353\,\mathrm{N}$.

15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

Η ταχύτητα των διαμήκη κυμάτων εξαρτάται από την δύναμη επαναφοράς του υλικού και την πυκνότητά του «ρ».

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

Ε μέτρο Ελαστικότητας

ή

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

Β μέτρο Ελαστικότητας όγκου

15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

Echo-location είναι μια μέθοδο που χρησιμοποιούν ορισμένα ζώα όπως νυχτερίδες φάλαινες και δελφίνια. Τα ζώα αυτά εκπέμπουν ηχητικά κύματα που ανακλούνται από διάφορα αντικείμενα και επιστρέφουν και ανιχνεύονται από τα ζώα ξανά. Εάν η συχνότητες των κυμάτων αυτών είναι 100,000 Hz. (a) Βρείτε τα μήκος κύματος ενός echo-location wave. (b) Εάν ένα αντικείμενο βρίσκεται 100 m από το ζώο, σε πόσο χρόνο μετά την εκπομπή του κύματος ανιχνεύεται η επιστροφή;

APPROACH We first compute the speed of longitudinal (sound) waves in sea water, using Eq. 15–4 and Tables 12–1 and 13–1. The wavelength is $\lambda = v/f$.

SOLUTION (*a*) The speed of longitudinal waves in sea water, which is slightly more dense than pure water, is

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.0 \times 10^9\,\mathrm{N/m^2}}{1.025 \times 10^3\,\mathrm{kg/m^3}}} = 1.4 \times 10^3\,\mathrm{m/s}.$$

Then, using Eq. 15–1, we find

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{(1.4 \times 10^3\,\mathrm{m/s})}{(1.0 \times 10^5\,\mathrm{Hz})} = 14\,\mathrm{mm}.$$

(*b*) The time required for the round-trip between the animal and the object is

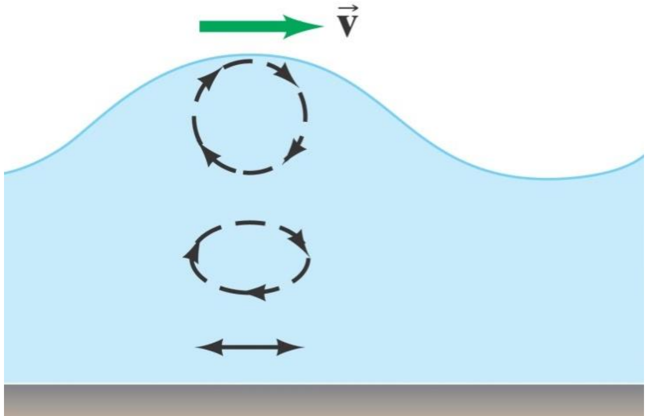
$$t = \frac{\text{distance}}{\text{speed}} = \frac{2(100\,\mathrm{m})}{1.4 \times 10^3\,\mathrm{m/s}} = 0.14\,\mathrm{s}.$$

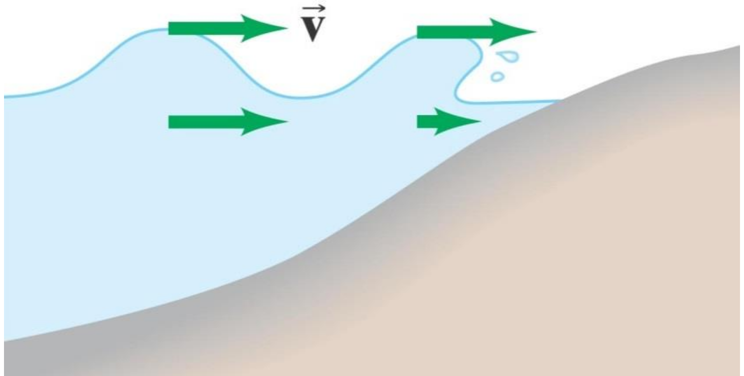
NOTE We shall see later that waves can be used to "resolve" (or detect) objects only if the wavelength is comparable to or smaller than the object. Thus, a dolphin can resolve objects on the order of a centimeter or larger in size.

15-2 Τύποι κυμάτων: Διαμήκη και Εγκάρσια

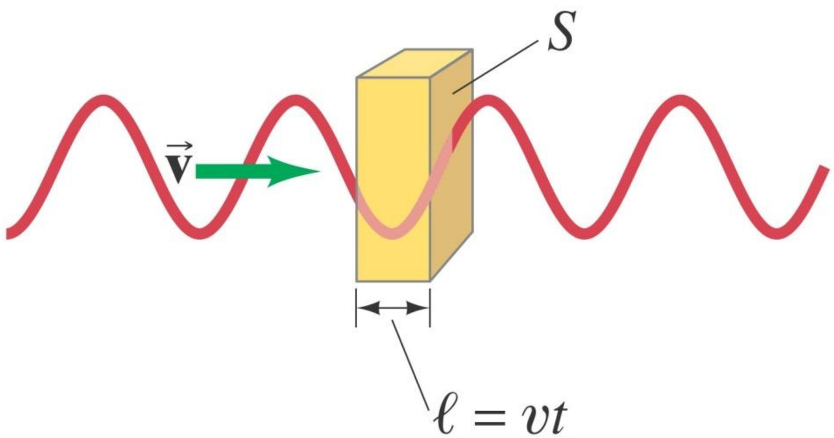
Οι σεισμοί παράγουν εγκάρσια και διαμήκη κύματα. Και τα δύο διαδίδονται μέσα από στερεά υλικά αλλά μόνο ΔΙΑΜΗΚΗ μπορούν να διαδοθούν μέσα από «υγρά», διότι τα υγρά δεν έχουν δυνάμεις επιστροφής κάθετες στην διεύθυνση διάδοσης

Επιφανειακά κύματα είναι κύματα που διαδίδονται κατά μήκος της διαχωριστικής επιφάνειας δύο μέσων (π,χ, αέρα και νερού)





15-3 Μεταφορά Ενέργειας με Κύματα



Η Ενέργεια που μεταφέρεται από ένα κύμα είναι:

$$E = \tfrac{1}{2}kA^2 = 2\pi^2 m f^2 A^2.$$

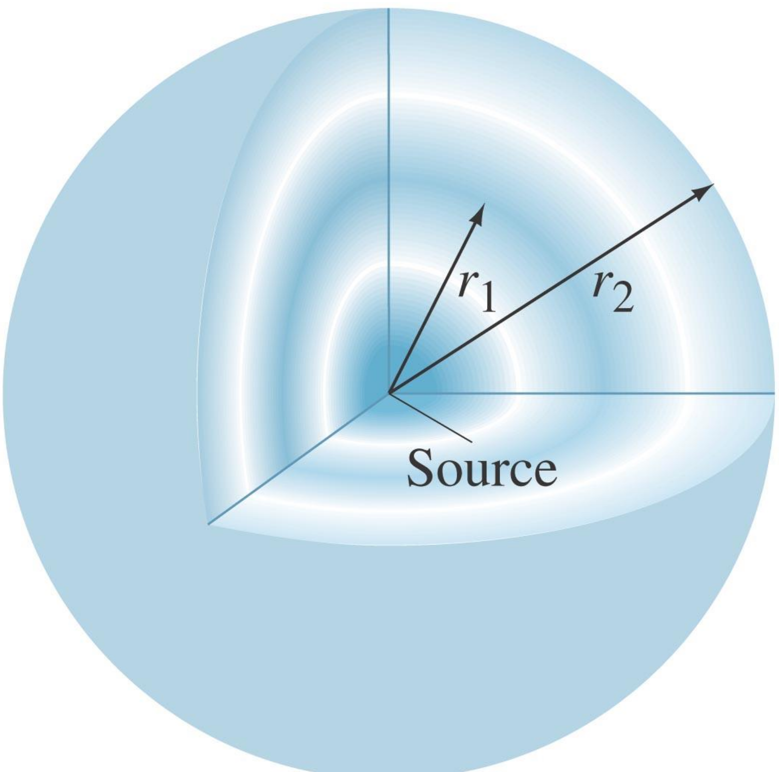
Εάν υποθέσουμε ότι το μέσω είναι ομογενές και πυκνότητα ρ τότε:

$$I = \frac{\overline{P}}{S} = 2\pi^2 v\rho f^2 A^2.$$

Η ***Ένταση*** **(*Ισχύς/επιφάνεια*)** ενός κύματος είναι συνεπώς ανάλογη των τετραγώνων **του πλάτους και της συχνότητας**

15-3 Μεταφορά Ενέργειας με Κύματα

Όταν το κύμα διαδίδεται σε 3-διαστάσεις και όταν το μέσο είναι ομογενές, το κύμα ονομάζεται σφαιρικό.



Για σφαιρικά κύματα για λόγους γεωμετρίας ισχύει:

$$I \propto \frac{1}{r^2}.$$

15-3 Μεταφορά Ενέργειας με Κύματα

Η ένταση ενός σεισμικού κύματος P 100 km από την εστία είναι 1.0 x 10^6 W/m^2. Πόση θα είναι η έντασή του 400 km από την εστία;

APPROACH We assume the wave is spherical, so the intensity decreases as the square of the distance from the source.

SOLUTION At 400 km the distance is 4 times greater than at 100 km, so the intensity will be $\left(\frac{1}{4}\right)^2 = \frac{1}{16}$ of its value at 100 km, or $(1.0 \times 10^6\ \mathrm{W/m^2})/16 = 6.3 \times 10^4\ \mathrm{W/m^2}$.

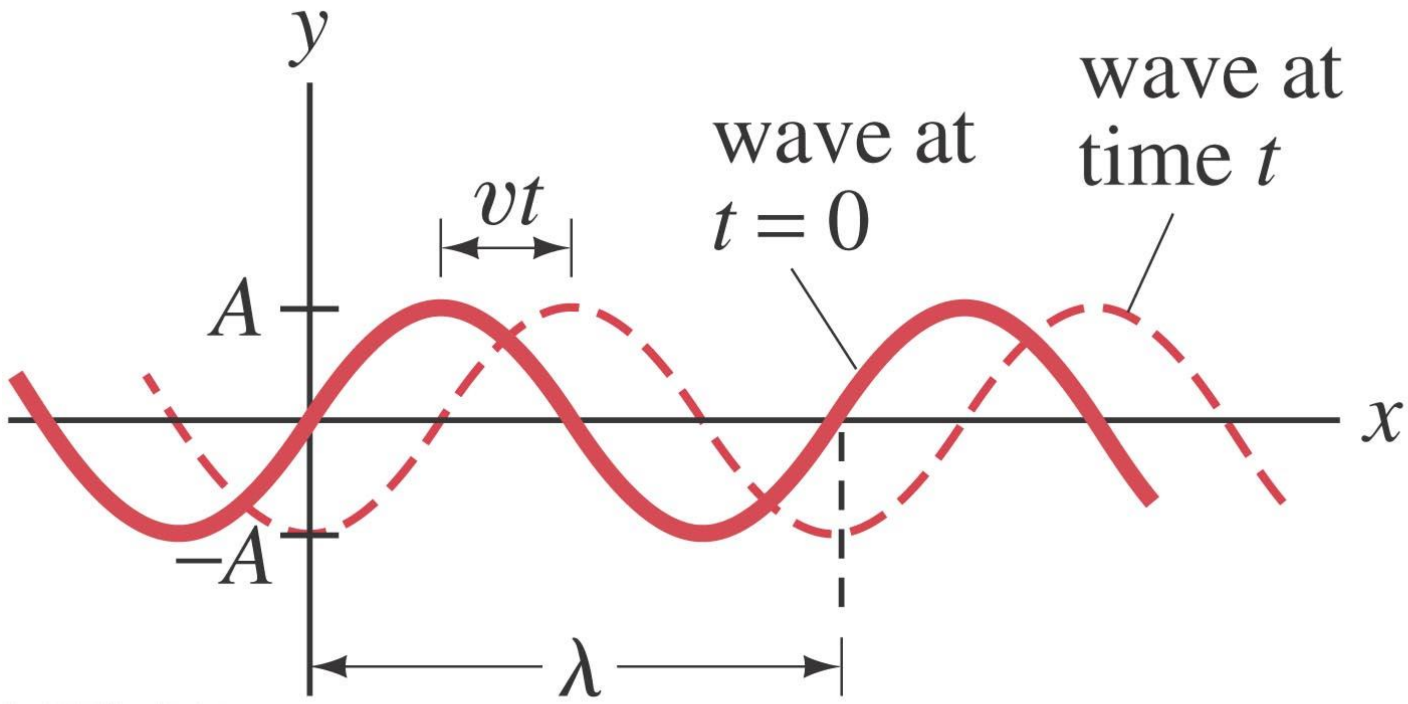
NOTE Using Eq. 15–8b directly gives

$$I_2 = I_1 r_1^2/r_2^2 = (1.0 \times 10^6\ \mathrm{W/m^2})(100\ \mathrm{km})^2/(400\ \mathrm{km})^2 = 6.3 \times 10^4\ \mathrm{W/m^2}.$$

15-4 Μαθηματική Εξίσωση Κυματικής

Εάν ένα κύμα περιγράφεται από την εξίσωση:

$$D(x) = A \sin \frac{2\pi}{\lambda} x.$$



15-4 Μαθηματική Εξίσωση Κυματικής

Μετά από χρόνο *t*, το κύμα έχει διανύσει απόσταση *vt*, και συνεπώς:

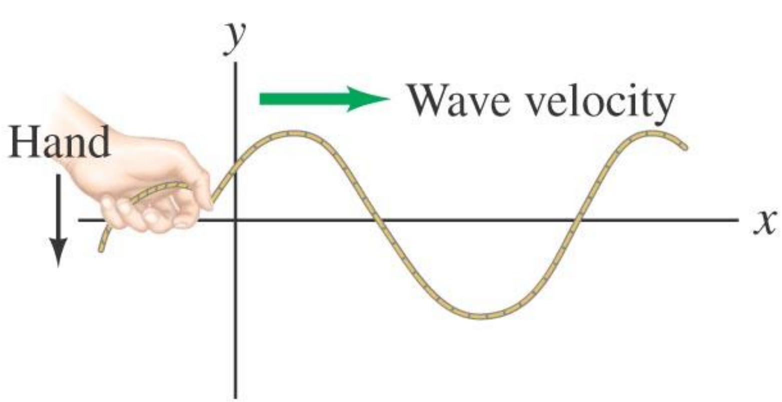
$$D(x,t) = A\sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right].$$

ή: $$D(x,t) = A\sin(kx - \omega t),$$

όπου $\omega = 2\pi f$**,** $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}.$ $\quad v = \lambda f$

15-4 Μαθηματική Εξίσωση Κυματικής

Το αριστερό άκρο μιας χορδής ταλαντεύεται αρμονικά με συχνότητα f = 250 Hz και πλάτος 2.6 cm. Η τάση της χορδής είναι 140 N και έχει γραμμική πυκνότητα μ = 0.12 kg/m. Σε t = 0, το ένα άκρο της χορδής έχει κατακόρυφη μετατόπιση 1.6 cm και πέφτει. Βρείτε (a) το μήκος κύματος που παράγεται και (b) την εξίσωση του κύματος.



APPROACH We first find the phase velocity of the transverse wave from Eq. 15–2; then $\lambda = v/f$. In (*b*), we need to find the phase ϕ using the initial conditions.

SOLUTION (*a*) The wave velocity is

$$v = \sqrt{\frac{F_T}{\mu}} = \sqrt{\frac{140\ \mathrm{N}}{0.12\ \mathrm{kg/m}}} = 34\ \mathrm{m/s}.$$

Then

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{34\ \mathrm{m/s}}{250\ \mathrm{Hz}} = 0.14\ \mathrm{m} \quad \text{or} \quad 14\ \mathrm{cm}.$$

(*b*) Let $x = 0$ at the left-hand end of the cord. The phase of the wave at $t = 0$ is not zero in general as was assumed in Eqs. 15–9, 10, and 13. The general form for a wave traveling to the right is

$$D(x,t) = A \sin(kx - \omega t + \phi),$$

where ϕ is the phase angle. In our case, the amplitude $A = 2.6\ \mathrm{cm}$; and at $t = 0$, $x = 0$, we are given $D = 1.6\ \mathrm{cm}$. Thus

$$1.6 = 2.6 \sin \phi,$$

so $\phi = \sin^{-1}(1.6/2.6) = 38° = 0.66\ \mathrm{rad}$. We also have $\omega = 2\pi f = 1570\ \mathrm{s}^{-1}$ and $k = 2\pi/\lambda = 2\pi/0.14\ \mathrm{m} = 45\ \mathrm{m}^{-1}$. Hence

$$D = (0.026\ \mathrm{m}) \sin\left[(45\ \mathrm{m}^{-1})x - (1570\ \mathrm{s})t + 0.66\right]$$

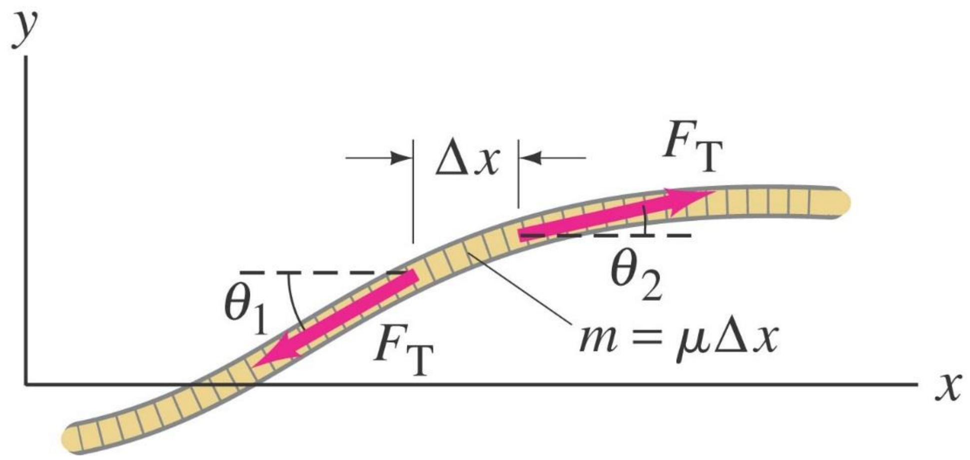
which we can write more simply as

$$D = 0.026 \sin(45x - 1570t + 0.66),$$

and we specify clearly that D and x are in meters and t in seconds.

15-5 Η εξίσωση του Κύματος

Θεωρούμε τμήμα χορδής που βρίσκεται υπό τάση



Από τον 2ο νόμο του Νεύτωνα γράφουμε

$$\Sigma F_y = m a_y$$

$$F_T \sin\theta_2 - F_T \sin\theta_1 = (\mu\,\Delta x)\,\frac{\partial^2 D}{\partial t^2}.$$

15-5 Η εξίσωση του Κύματος

Υποθέτοντας μικρές γωνίες και στο όριο $\Delta x \to 0$, **βρίσκουμε (με κάμποση αριθμητική) ότι:**

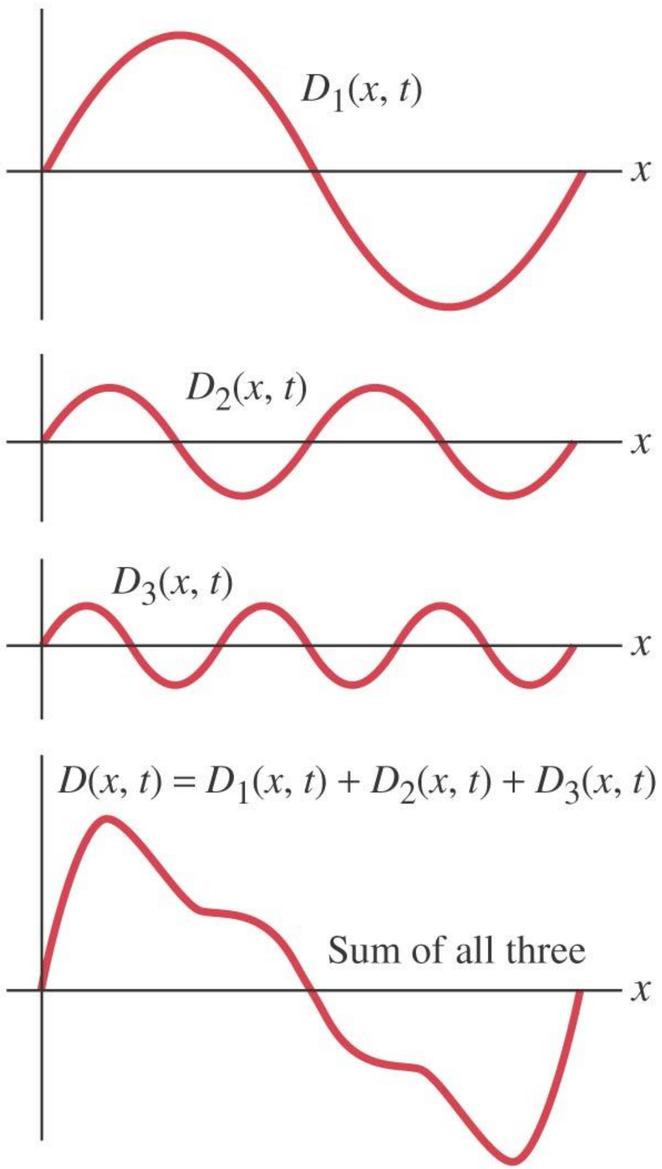
$$\frac{\partial^2 D}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 D}{\partial t^2}.$$

Αυτή είναι και η εξίσωση του μονοδιάστατου κύματος. Είναι μια γραμμική διαφορική εξίσωση δευτέρου βαθμού ως προς τον χρόνο και την μετατόπιση. Οι λύσεις είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις.

15-6 Ο Κανόνας Υπέρθεσης

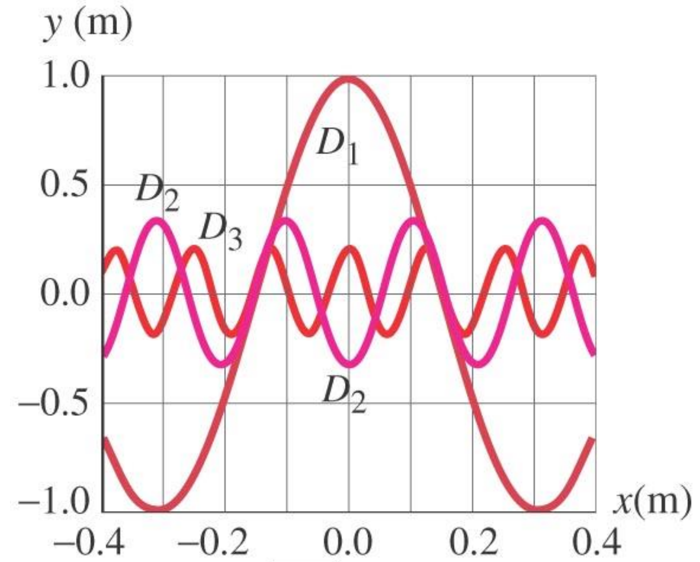
Υπέρθεση: Η μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα όλων των κυμάτων που διέρχονται από το συγκεκριμένο σημείο σε κάθε χρονική στιγμή.

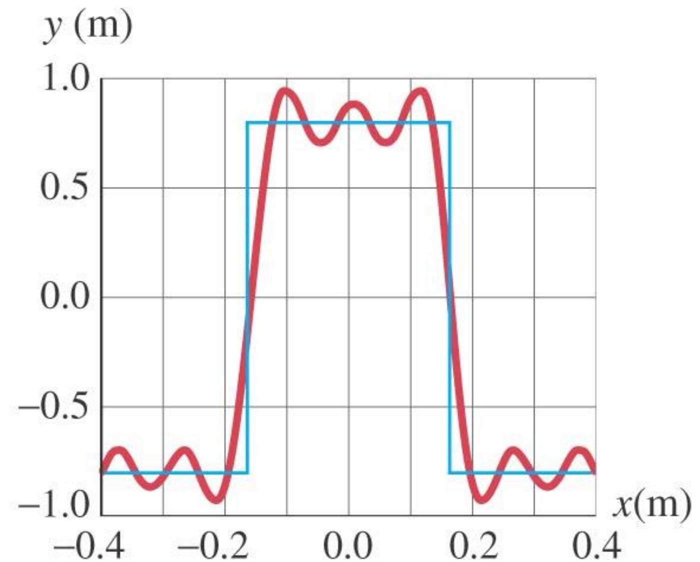
Θεώρημα Fourier: Κάθε σύνθετο περιοδικό κύμα μπορεί να γραφτεί ως το άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων (συναρτήσεων) διαφόρων συχνοτήτων πλατών και φάσεων.

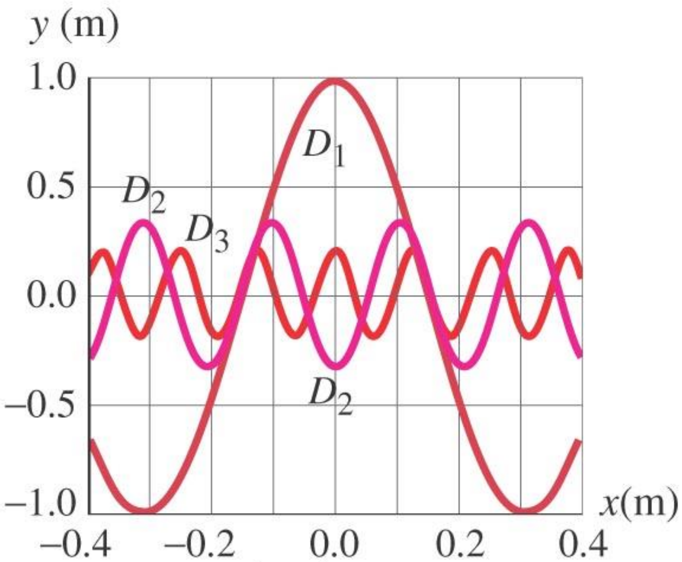


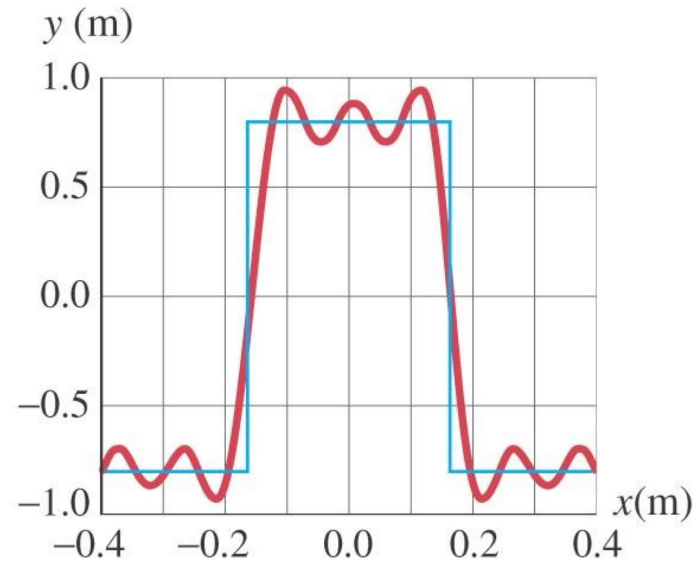
15-6 Ο Κανόνας Υπέρθεσης

Σε $t = 0$, τρία κύματα $D_1 = A \cos kx$, $D_2 = -{}^1/_3 A \cos 3kx$, και $D_3 = {}^1/_5 A \cos 5kx$, όπου $A = 1.0$ m και $k = 10\ \mathrm{m}^{-1}$. Κάντε γραφική παράσταση των τριών κυμάτων από $x = -0.4$ m μέχρι +0.4 m. (Τα τρία αυτά κύματα είναι οι τρεις πρώτοι όροι της ανάπτυξης Fourier για ένα «τετράγωνο κύμα.”)





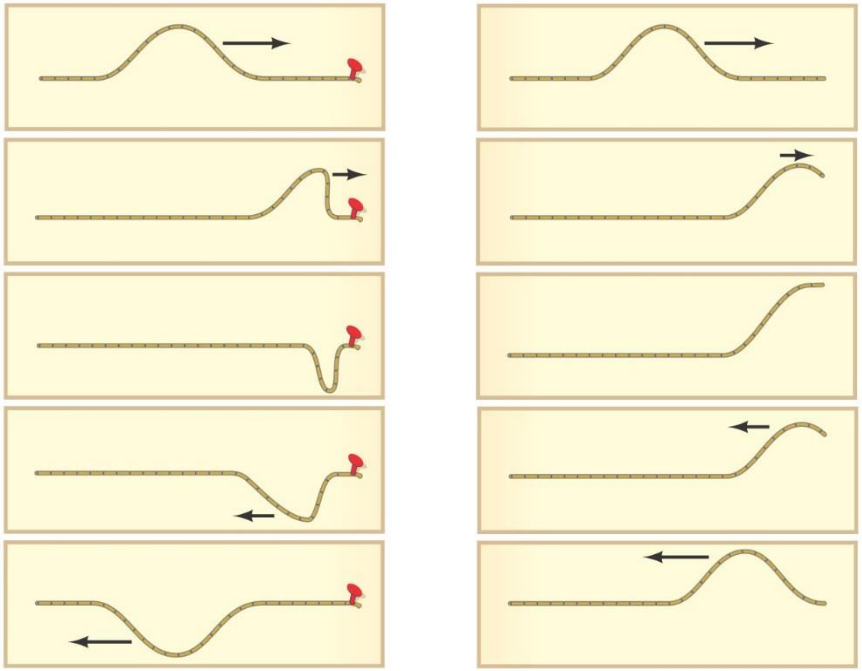




y (m)

RESPONSE The first wave, D_1, has amplitude of 1.0 m and wavelength $\lambda = 2\pi/k = (2\pi/10)$ m $= 0.628$ m. The second wave, D_2, has amplitude of 0.33 m and wavelength $\lambda = 2\pi/3k = (2\pi/30)$ m $= 0.209$ m. The third wave, D_3, has amplitude of 0.20 m and wavelength $\lambda = 2\pi/5k = (2\pi/50)$ m $= 0.126$ m. Each wave is plotted in Fig. 15–17a. The sum of the three waves is shown in Fig. 15–17b. The sum begins to resemble a "square wave," shown in blue in Fig. 15–17b.

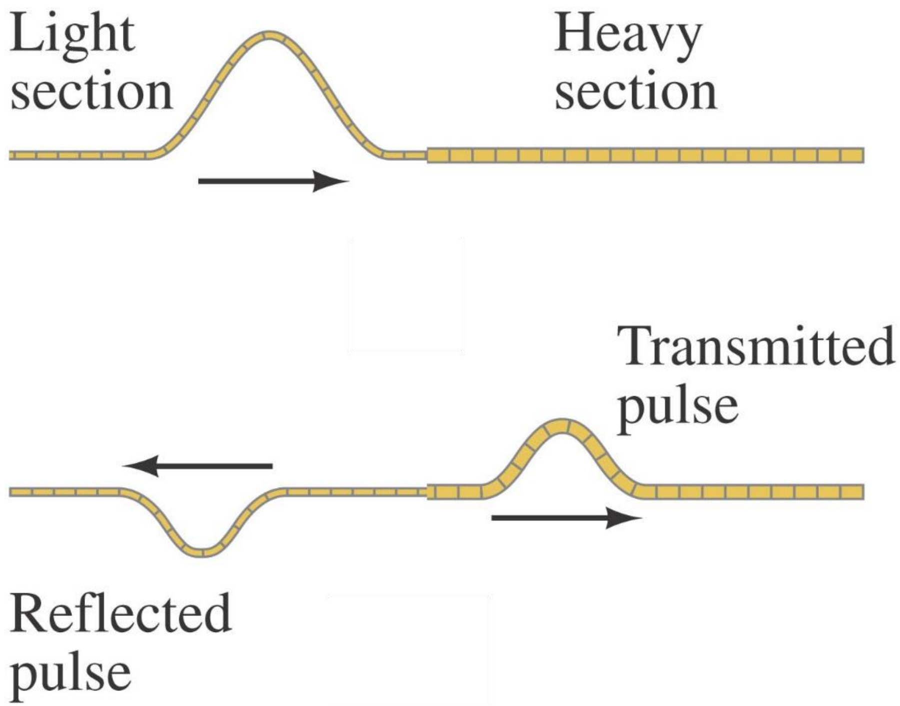
15-7 Ανάκλαση και Διάδοση



Όταν ένα αντικείμενο φτάσει στην άκρη του μέσου (της χορδής), το κύμα ανακλάται και το κύμα επιστρέφει με ίδιο πλάτος (πρόσημο).

Όταν ένα κύμα προσκρούσει σε ένα εμπόδιο, ανακλάται αλλά με αντίστροφο πλάτος (αντίθετο πρόσημο).

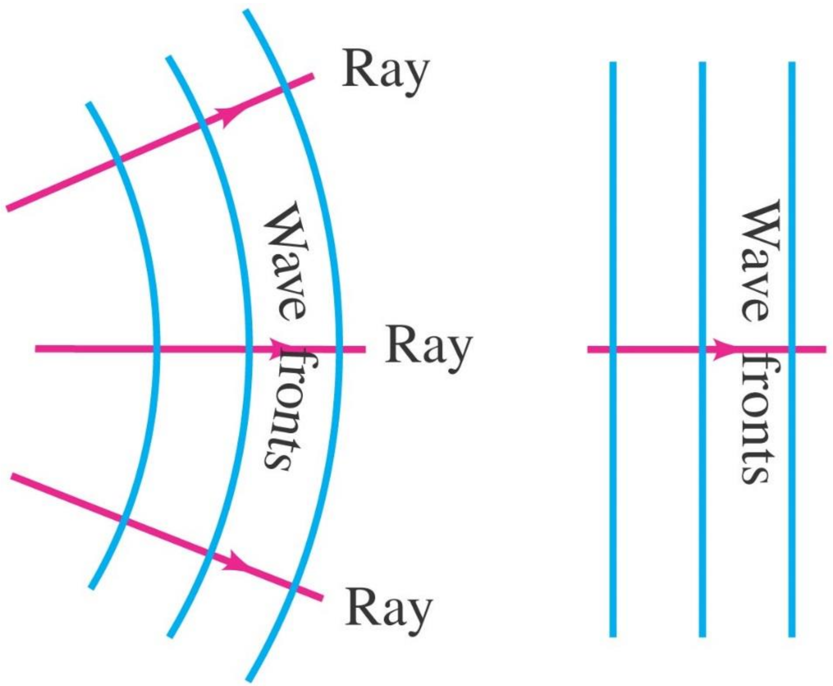
15-7 Ανάκλαση και Διάδοση



Όταν ένα κύμα συναντήσει ένα πυκνότερο μέσο, τότε ένα τμήμα του κύματος διαδίδεται και τμήμα ανακλάται. Εάν η ταχύτητα στο πυκνότερο μέσο είναι μικρότερη, τότε το μήκος κύματος είναι μικρότερο.

15-7 Ανάκλαση και Διάδοση

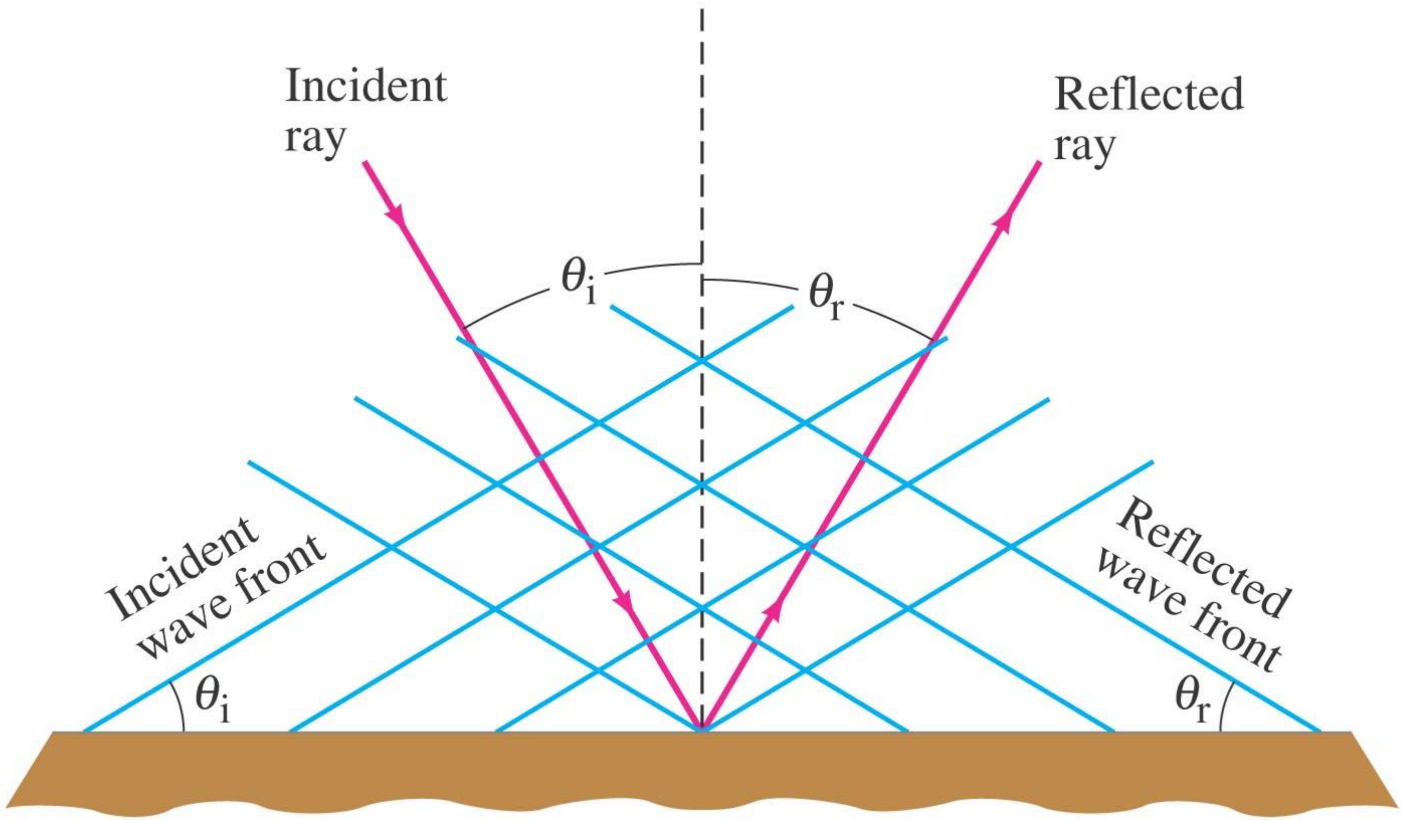
Κύματα πολλαπλών διαστάσεων απεικονίζονται με μέτωπα κύματος, δηλ. επιφάνειες όπου όλα τα κύματα έχουν την ίδια φάση.



Γραμμές κάθετες στα μέτωπα ονομάζονται ακτίνες και δηλώνουν την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

15-7 Ανάκλαση και Διάδοση

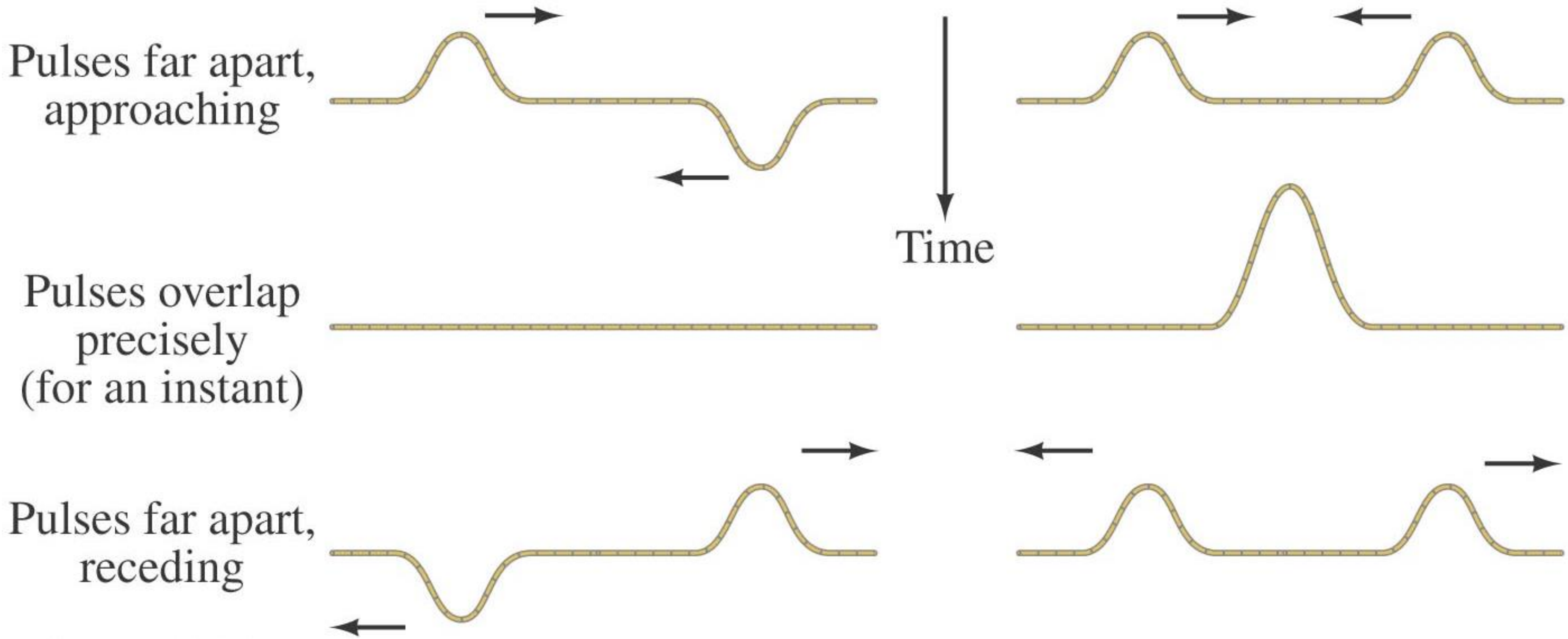
Κανόνας ανάκλασης: Η γωνίας προπτώσεως είναι ίση με την γωνία ανάκλασης



15-8 Συμβολή

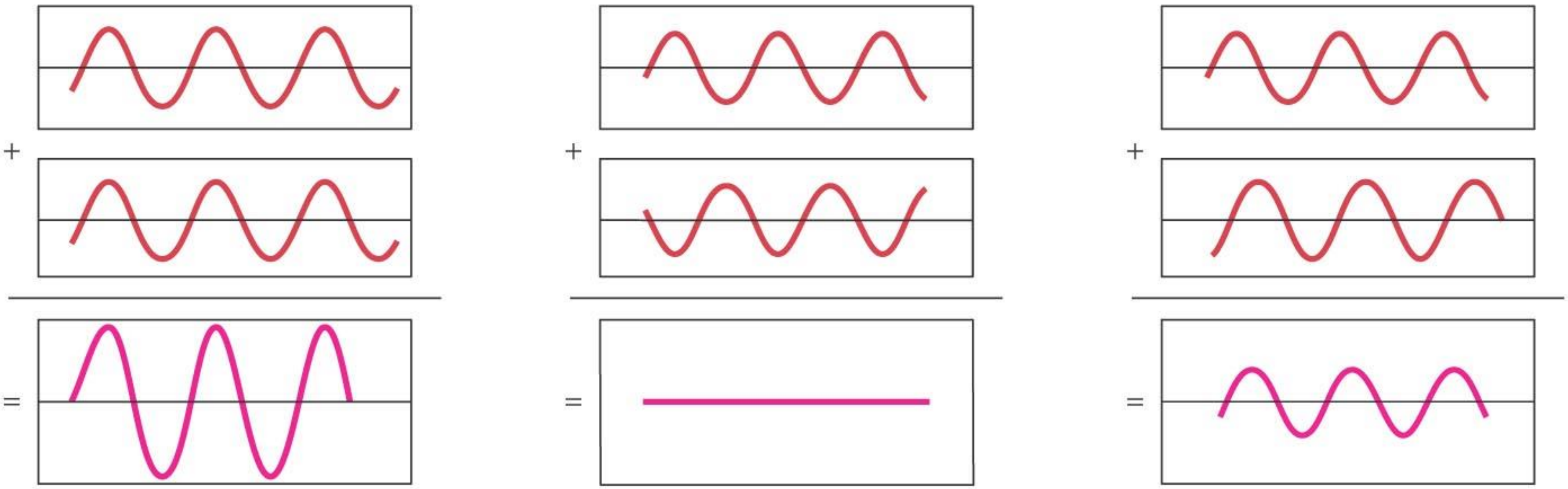
Σύμφωνα με τον κανόνα υπέρθεσης: Η μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα όλων των κυμάτων που διέρχονται από το συγκεκριμένο σημείο σε κάθε χρονική στιγμή.

(a) Καταστρεπτική συμβολή and (b) Ενισχυτική Συμβολή

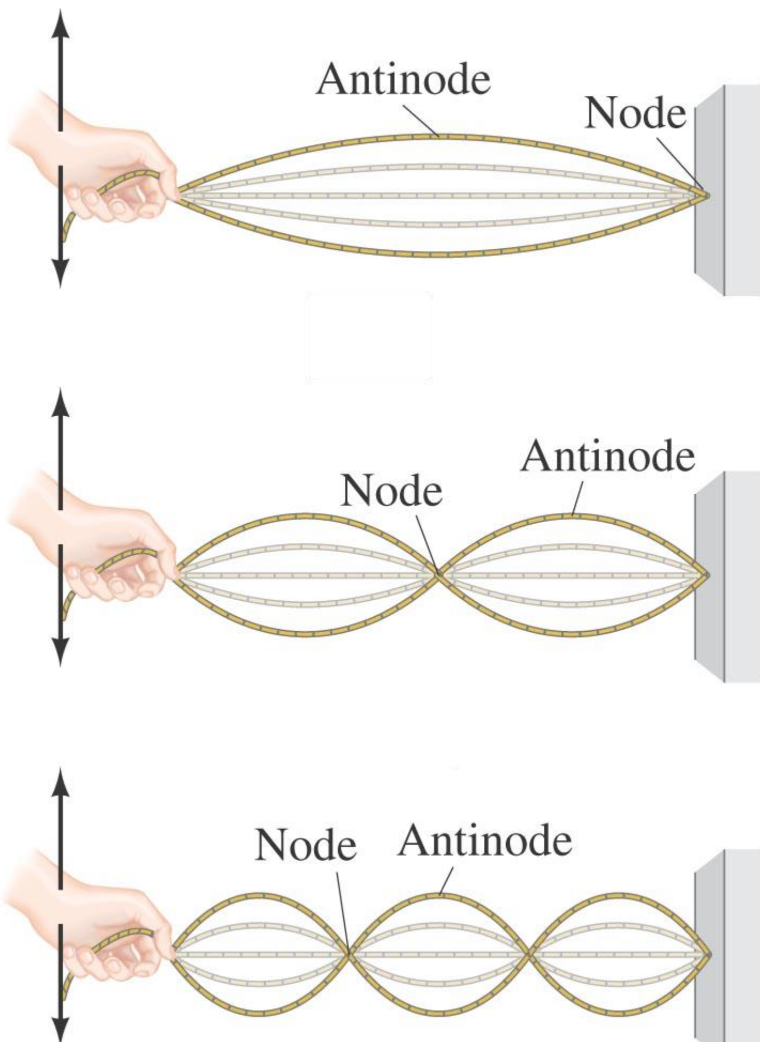


15-8 Συμβολή

Οι γραφικές παραστάσεις δείχνουν αθροίσματα δύο κυμάτων. (a) Ενισχυτικό άθροισμα. (b) Καταστρεπτικό άθροισμα και (c) μερικώς καταστρεπτικό άθροισμα

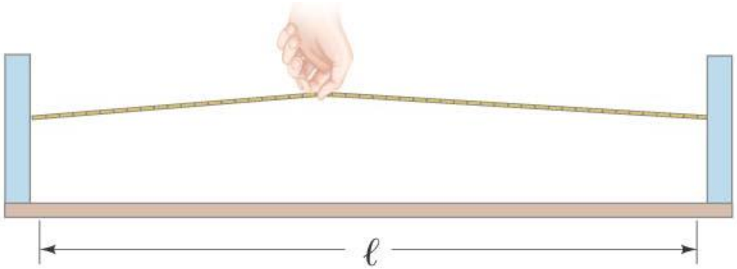


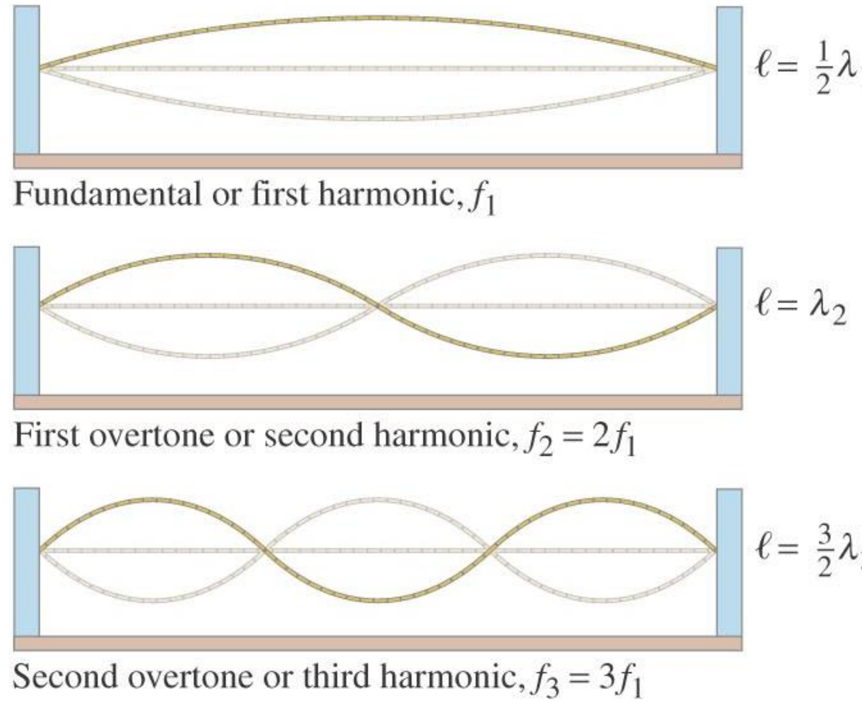
15-9 Στάσιμα Κύματα, Συντονισμός



Στάσιμα Κύματα δημιουργούνται όταν τα άκρα της χορδής είναι σταθερά. Στην περίπτωση αυτή τα μόνα κύματα που επιτρέπονται είναι αυτά που δημιουργούν κόμβους στις άκρες και σε διάφορα σημεία κατά μήκος της χορδής. Στους κόμβους το πλάτος του κύματος είναι ΜΗΔΕΝ.

15-9 Στάσιμα Κύματα, Συντονισμός





Οι συχνότητες των στάσιμων κυμάτων ονομάζονται συχνότητες συντονισμού ή αρμονικές συχνότητες.

Η χαμηλότερη συχνότητα ονομάζεται θεμελιώδης

15-9 Στάσιμα Κύματα, Συντονισμός

Τα μήκη και οι συχνότητες των στάσιμων κυμάτων είναι:

$$\lambda_n = \frac{2\ell}{n}, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots,$$

και

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n\frac{v}{2\ell} = nf_1, \qquad n = 1, 2, 3, \cdots.$$

15-9 Στάσιμα Κύματα, Συντονισμός

Η χορδή ενός πιάνου έχει μήκος 1.10 m και μάζα 9.00 g. (a) Πόση τάση απαιτείται ώστε η χορδή να δονείται με θεμελιώδη συχνότητα 131 Hz; (b) Ποιες είναι οι συχνότητες των πρώτων τεσσάρων αρμονικών;

APPROACH To determine the tension, we need to find the wave speed using Eq. 15–1 $(v = \lambda f)$, and then use Eq. 15–2, solving it for F_T.

SOLUTION (*a*) The wavelength of the fundamental is $\lambda = 2\ell = 2.20\text{ m}$ (Eq. 15–17a with $n = 1$). The speed of the wave on the string is $v = \lambda f = (2.20\text{ m})(131\text{ s}^{-1}) = 288\text{ m/s}$. Then we have (Eq. 15–2)

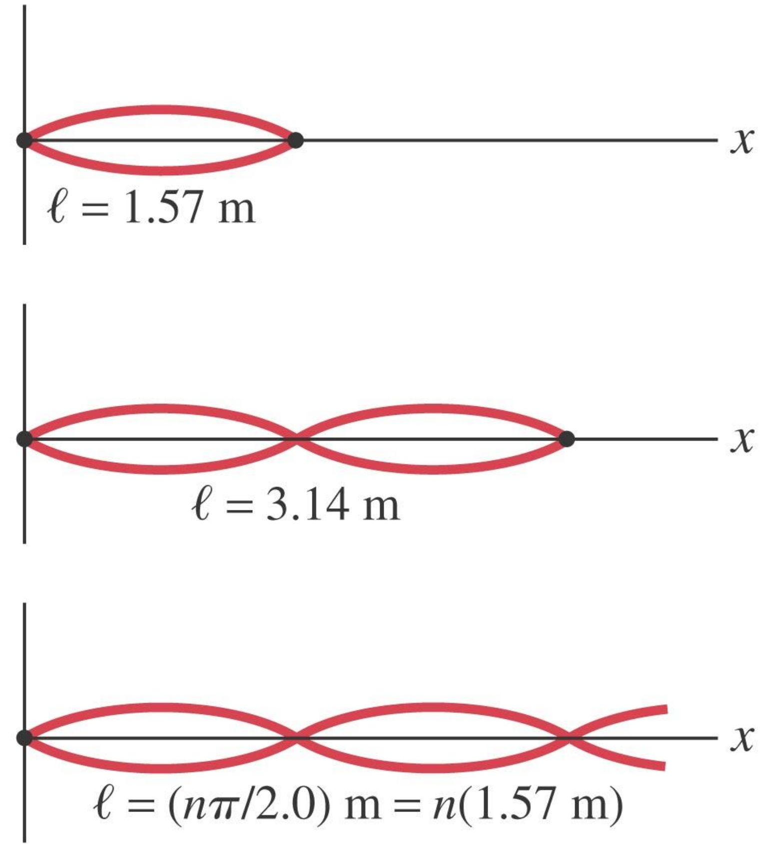
$$F_T = \mu v^2 = \frac{m}{\ell} v^2 = \left(\frac{9.00 \times 10^{-3}\text{ kg}}{1.10\text{ m}}\right)(288\text{ m/s})^2 = 679\text{ N}.$$

(*b*) The frequencies of the second, third, and fourth harmonics are two, three, and four times the fundamental frequency: 262, 393, and 524 Hz, respectively.

NOTE The speed of the wave on the string is *not* the same as the speed of the sound wave that the piano string produces in the air (as we shall see in Chapter 16).

15-9 Στάσιμα Κύματα, Συντονισμός

Δύο κύματα που ταξιδεύουν με αντίθετες φορές μιας χορδής με σταθερό σημείο στο x = 0 περιγράφονται από τις συναρτήσεις D_1 = (0.20 m)sin(2.0x – 4.0t) και D_2 = (0.20m)sin(2.0x + 4.0t)
(όπου x είναι σε m, t σε s), παράγοντας στάσιμα κύματα. Βρείτε (a) την συνάρτηση του στάσιμου κύματος, (b) το μέγιστο πλάτος στο σημείο x = 0.45 m, (c) που βρίσκεται το άλλο σταθερό σημείο της χορδής (x > 0), (d) σε πιο σημείο έχουμε το μέγιστο πλάτος



APPROACH We use the principle of superposition to add the two waves. The given waves have the form we used to obtain Eq. 15–18, which we thus can use.

SOLUTION (*a*) The two waves are of the form $D = A\sin(kx \pm \omega t)$, so

$$k = 2.0\,\mathrm{m}^{-1} \quad \text{and} \quad \omega = 4.0\,\mathrm{s}^{-1}.$$

These combine to form a standing wave of the form of Eq. 15–18:

$$D = 2A\sin kx\cos\omega t = (0.40\,\mathrm{m})\sin(2.0x)\cos(4.0t),$$

where x is in meters and t in seconds.

(*b*) At $x = 0.45\,\mathrm{m}$,

$$D = (0.40\,\mathrm{m})\sin(0.90)\cos(4.0t) = (0.31\,\mathrm{m})\cos(4.0t).$$

The maximum amplitude at this point is $D = 0.31\,\mathrm{m}$ and occurs when $\cos(4.0t) = 1$.

(*c*) These waves make a standing wave pattern, so both ends of the string must be nodes. Nodes occur every half wavelength, which for our string is

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2}\frac{2\pi}{k} = \frac{\pi}{2.0}\,\mathrm{m} = 1.57\,\mathrm{m}.$$

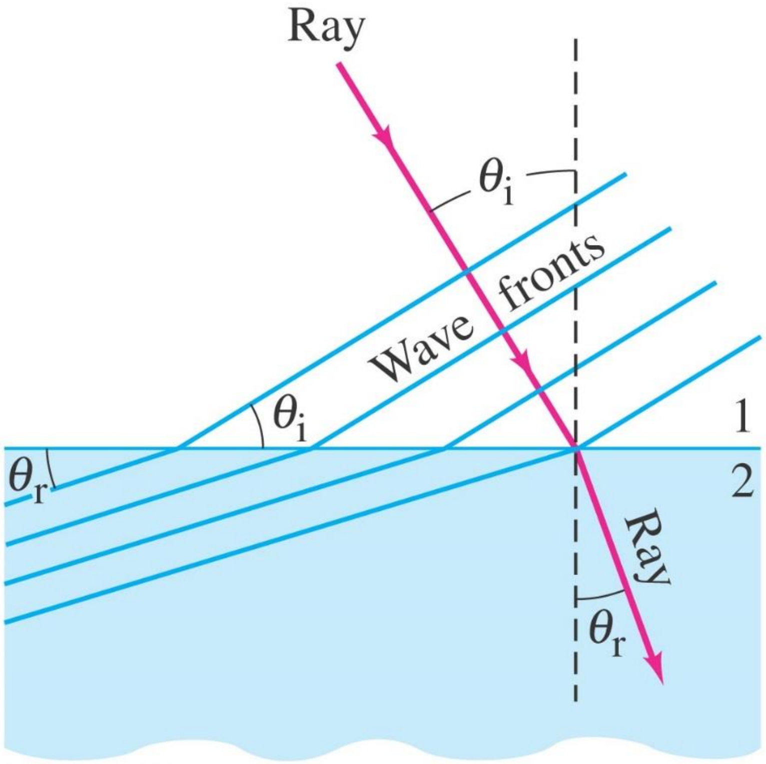
If the string includes only one loop, its length is $\ell = 1.57\,\mathrm{m}$. But without more information, it could be twice as long, $\ell = 3.14\,\mathrm{m}$, or any integral number times 1.57 m, and still provide a standing wave pattern, Fig. 15–27.

(*d*) The nodes occur at $x = 0, x = 1.57\,\mathrm{m}$, and, if the string is longer than $\ell = 1.57\,\mathrm{m}$, at $x = 3.14\,\mathrm{m}$, $4.71\,\mathrm{m}$, and so on. The maximum amplitude (antinode) is 0.40 m [from part (*b*) above] and occurs midway between the nodes. For $\ell = 1.57\,\mathrm{m}$, there is only one antinode, at $x = 0.79\,\mathrm{m}$.

15-10 Διάθλαση

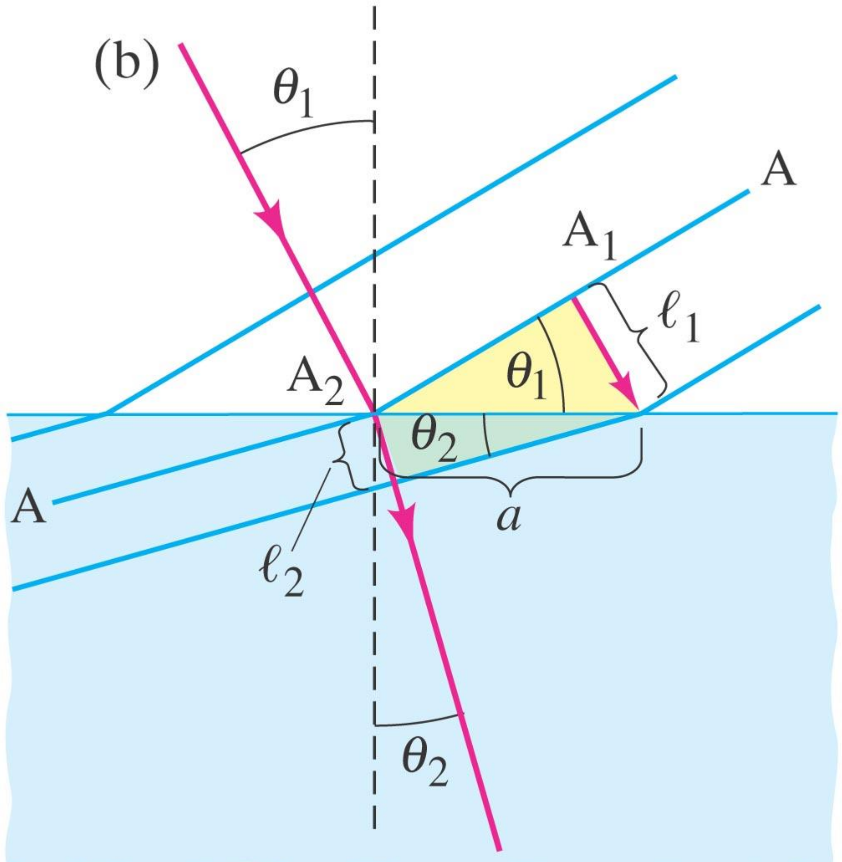
Όταν ένα κύμα συναντήσει μια διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων με διαφορετική πυκνότητα, τότε η κατεύθυνση διάδοσης του κύματος αλλάζει σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{v_2}{v_1}.$$



15-10 Διάθλαση

Η κόκκινη γραμμή δείχνει την μεταβολή όταν περνάμε από μέσω με χαμηλή ταχύτητα σε μέσω με μεγαλύτερη ταχύτητα. Η τροχιά είναι αντιστρεπτή όταν ακολουθούμε την αντίστροφη πορεία.



15-10 Διάθλαση

Ένα σεισμικό κύμα P περνάει από γεωλογικό πέτρωμα με ταχύτητα 6.5 km/s σε πέτρωμα με ταχύτητα 8.0 km/s. Εάν η γωνία πρόσπτωσης στη διαχωριστική επιφάνεια είναι 30°, πόση είναι η γωνία διάθλασης;

APPROACH We apply the law of refraction, Eq. 15–19, $\sin\theta_2/\sin\theta_1 = v_2/v_1$.

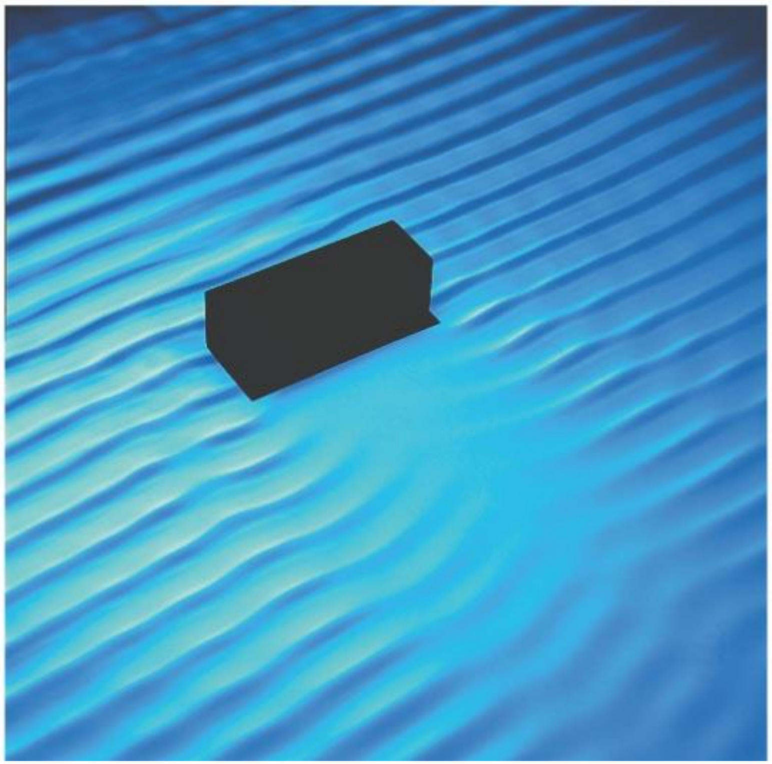
SOLUTION Since $\sin 30° = 0.50$, Eq. 15–19 yields

$$\sin\theta_2 = \frac{(8.0\,\mathrm{m/s})}{(6.5\,\mathrm{m/s})}(0.50) = 0.62.$$

So $\theta_2 = \sin^{-1}(0.62) = 38°$.

NOTE Be careful with angles of incidence and refraction. As we discussed in Section 15–7 (Fig. 15–21), these angles are between the wave front and the boundary line, or—equivalently—between the ray (direction of wave motion) and the line perpendicular to the boundary. Inspect Fig. 15–30b carefully.

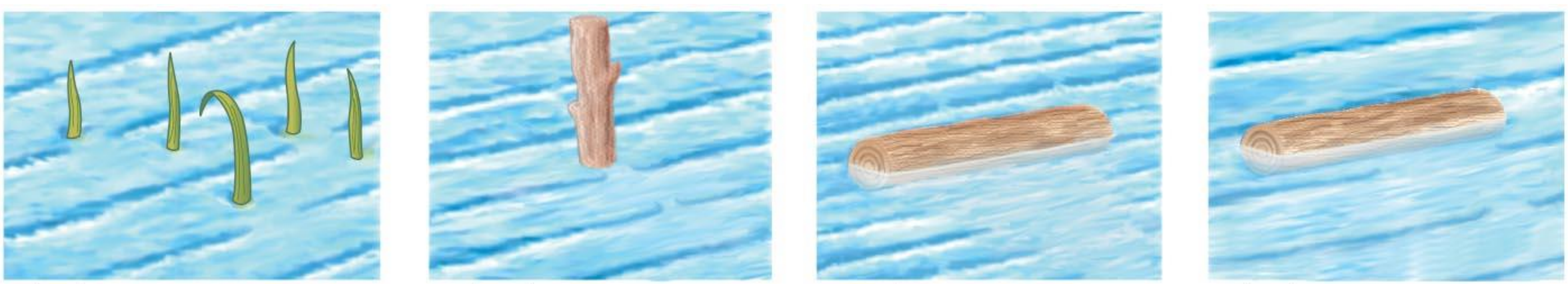
15-11 Περίθλαση



Όταν ένα κύμα συναντήσει ένα αντικείμενο στην τροχιά του, το κύμα το «προσπερνάει» αφήνοντας μια «σκιά» πίσω από το αντικείμενο.

15-11 Περίθλαση

Ο βαθμός περίθλασης εξαρτάται από το μέγεθος του εμποδίου (αντικειμένου) σε σχέση με το μήκος κύματος. Εάν τα αντικείμενο είναι ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΟΤΕΡΟ από το μήκος κύματος το κύμα ΔΕΝ ΕΠΙΡΕΑΖΕΤΑΙ (a). Όσο περισσότερο πλησιάζουν οι διαστάσεις του αντικειμένου στο μήκος κύματος τόσο περισσότερη περίθλαση έχουμε, δηλ. παρατηρούμε «διείσδυση» του κύματος πίσω από το αντικείμενο (περιοχή «σκιάς»)



Water waves passing blades of grass | Stick in water | Short-wavelength waves passing log | Long-wavelength waves passing log