



2-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η έννοια «κύμα», από τις πιο βασικές έννοιες της φυσικής, χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή φαινομένων που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα.

Στην ενότητα αυτή θα περιγράψουμε το μηχανισμό παραγωγής τόσο των μηχανικών όσο και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων καθώς και μια σειρά φαινομένων που είναι κοινά σε όλα τα κύματα –την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη συμβολή.

2-2 ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

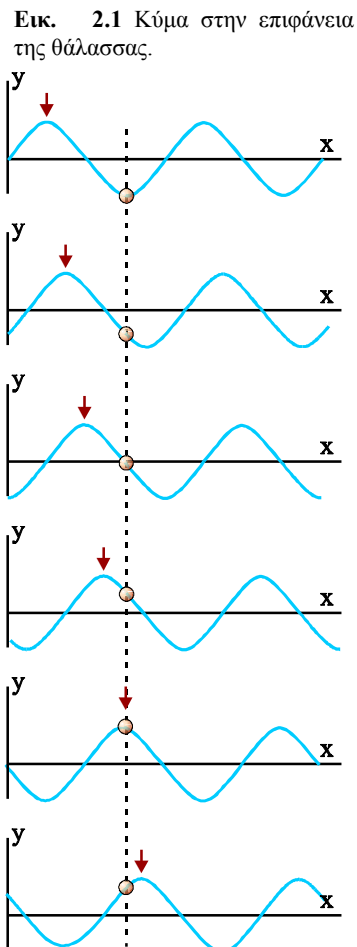
Αν προκληθεί μια διαταραχή σε ένα υλικό που ηρεμεί (ισορροπεί), τα μόριά του, στην περιοχή όπου προκλήθηκε η διαταραχή, μετατοπίζονται από τις θέσεις ισορροπίας τους. Επειδή όμως τα μόρια αυτά αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους δέχονται δυνάμεις που τείνουν να τα επαναφέρουν στις αρχικές τους θέσεις ενώ στα διπλανά τους ασκούνται δυνάμεις που τείνουν να τα εκτρέψουν από τη θέση ισορροπίας. Έτσι, η διαταραχή διαδίδεται από τη μια περιοχή του υλικού στην άλλη και όλα τα σημεία του υλικού εκτελούν διαδοχικά την ίδια κίνηση. Η διάδοση αυτής της διαταραχής στο χώρο ονομάζεται **κύμα**.

Για τη δημιουργία ενός κύματος χρειάζονται η **πηγή της διαταραχής** ή **πηγή του κύματος**, δηλαδή η αιτία που θα προκαλέσει τη διαταραχή και ένα υλικό (**μέσο**) στο οποίο κάθε μόριο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά του (ελαστικό μέσο).

Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα ελαστικό μέσο ονομάζονται **μηχανικά κύματα**. Ο κυματισμός στην επιφάνεια της θάλασσας, η διάδοση των δονήσεων κατά μήκος ενός στερεού και ο ήχος είναι μερικά παραδείγματα μηχανικών κυμάτων.

Κατά τη διάδοση ενός κύματος δεν έχουμε μεταφορά ύλης από μια περιοχή του ελαστικού μέσου σε άλλη. Τα μόρια του ελαστικού μέσου κινούνται γύρω από τη θέση ισορροπίας τους.

Για να προκαλέσουμε την κυματική διαταραχή πρέπει να δώσουμε ενέργεια σε κάποια περιοχή του μέσου. Η ενέργεια αυτή μεταφέρεται με το κύμα σε άλλες περιοχές του μέσου. **Κατά τη διάδοση ενός κύματος μεταφέρεται ενέργεια και ορμή από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο, όχι όμως και ύλη.**



Σχ. 2.1 Κατά τη διάδοση ενός κύματος σε ένα ελαστικό μέσο τα σημεία του μέσου κινούνται γύρω από μια θέση ισορροπίας. Κατά τη διάδοση του κύματος δε μεταφέρεται ύλη.



Εικ. 2.2 Τα κύματα στη θάλασσα μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας και συχνά προκαλούν καταστροφές στις ακτές.

Αν σε χρόνο t μια διαταραχή διαδίδεται σε απόσταση x από την πηγή παραγωγής της, το πηλίκιο

$$v = \frac{x}{t} \quad (2.1)$$

είναι η **ταχύτητα διάδοσης του κύματος**.

Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται ένα κύμα σε ένα μέσον εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του μέσου που διαταράσσεται και όχι από το πόσο ισχυρή είναι η διαταραχή. Λόγου χάρι ο ήχος διαδίδεται στον αέρα με ταχύτητα 344 m/s, ανεξάρτητα από το αν είναι ισχυρός ή ασθενής. Στα στερεά ο ήχος διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα.

Στο σημείο αυτό να επισημάνουμε τη διάκριση ανάμεσα στην ταχύτητα του κύματος, που είναι σταθερή, και την ταχύτητα με την οποία κινούνται τα σημεία του μέσου γύρω από τη θέση ισορροπίας τους, που δεν είναι σταθερή.

Με κριτήριο τη διεύθυνση στην οποία κινούνται τα σημεία του ελαστικού μέσου, τα κύματα διακρίνονται σε **εγκάρσια** και σε **διαμήκη**.

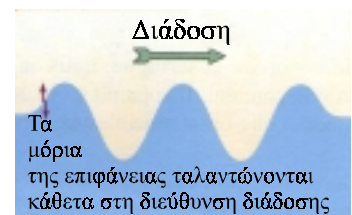
Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται στα στερεά. Τα διαμήκη διαδίδονται τόσο στα στερεά όσο και στα υγρά και τα αέρια.

Εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα στα οποία όλα τα σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τέτοια κύματα διαδίδονται κατά μήκος μιας χορδής. Τα κύματα που διαδίδονται στην επιφάνεια των υγρών μπορούν να θεωρηθούν κατά προσέγγιση εγκάρσια.

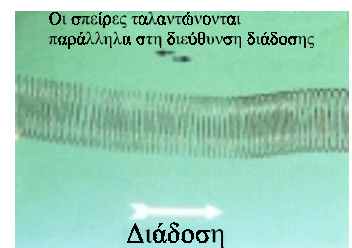
Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα στα οποία τα σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται παράλληλα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Τέτοιο είναι το κύμα που διαδίδεται κατά μήκος του ελατηρίου στο σχήμα 2.3.

Αν η πηγή εκτελεί περιοδική κίνηση τα σωματίδια του μέσου κινούνται επίσης περιοδικά. Το κύμα που προκύπτει τότε είναι ένα **περιοδικό κύμα**. Ειδικότερα, αν η κίνηση της πηγής είναι απλή αρμονική ταλάντωση όλα τα σωματίδια του μέσου εκτελούν επίσης απλή αρμονική ταλάντωση και το κύμα ονομάζεται **ημιτονοειδές ή αρμονικό**. Τα αρμονικά κύματα έχουν απλή μαθηματική περιγραφή και παίζουν έναν ιδιαίτερα σπουδαίο ρόλο. Οποιαδήποτε κυματική διαταραχή, όσο περίπλοκη και να είναι, μπορεί να θεωρηθεί ότι προέρχεται από το άθροισμα ενός αριθμού αρμονικών κυμάτων.

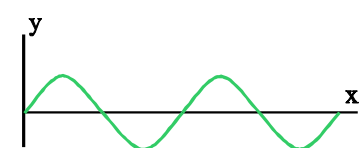
Η **περίοδος (T) του κύματος** είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο ένα σωματίδιο του μέσου ολοκληρώνει την κίνησή του (αρμονική ταλάντωση). Εάν φωτογραφίζαμε το μέσο στο οποίο διαδίδεται ένα αρμονικό κύμα δυο χρονικές στιγμές που διαφέρουν κατά μια περίοδο θα βλέπαμε ότι όλα τα σωματίδια του μέσου, έχοντας εκτελέσει μια πλήρη ταλάντωση, βρίσκονται πάλι στις αρχικές τους θέσεις. Έτσι, παρόλο που το κύμα θα έχει προχωρήσει, η κυματική εικόνα που θα πάρουμε θα είναι ίδια. Επομένως **περίοδος του κύματος είναι επίσης το χρονικό διάστημα στο οποίο η κυματική εικόνα επαναλαμβάνεται**.



Σχ. 2.2 Τα κύματα στην επιφάνεια του νερού είναι κατά προσέγγιση εγκάρσια

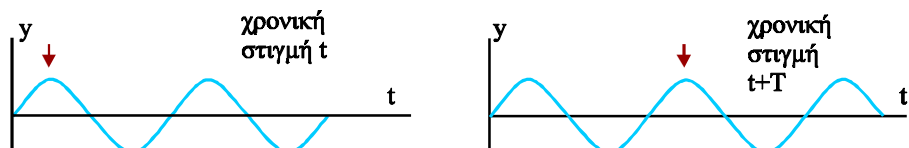


Σχ. 2.3 Διάμηκες κύμα



Σχ. 2.4 Στιγμιότυπο εγκάρσιου αρμονικού κύματος.

Σχ. 2.5 Μετά από χρόνο μιας περιόδου η κυματική εικόνα επαναλαμβάνεται

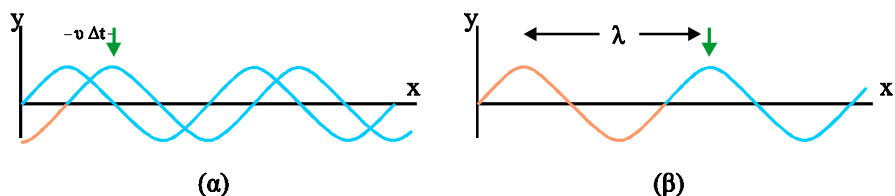


Η συχνότητα (f) με την οποία ταλαντώνονται τα σημεία του μέσου ονομάζεται και συχνότητα του κύματος. Η συχνότητα του κύματος δείχνει τον αριθμό των κορυφών (αν πρόκειται για εγκάρσιο κύμα) ή των πυκνωμάτων (αν πρόκειται για διάμηκες) που φτάνουν σε κάποιο σημείο του μέσου στη μονάδα του χρόνου κατά τη διάδοση του κύματος.

Η απόσταση στην οποία διαδίδεται το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου ονομάζεται μήκος κύματος και συμβολίζεται με λ .

Στο σχήμα 2.6α βλέπουμε δύο στιγμιότυπα ενός εγκάρσιου αρμονικού κύματος σε χρονικές στιγμές που διαφέρουν κατά Δt . Σ' αυτό το χρονικό διάστημα μια κορυφή του κύματος μετακινήθηκε κατά $v \Delta t$. Σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου μια κορυφή (έστω αυτή με το βελάκι) θα έχει μετακινηθεί κατά ένα μήκος κύματος (σχ. 2.6β). Επομένως η απόσταση δύο διαδοχικών κορυφών είναι ίση με λ .

Σχ. 2.6 (α) Σε χρόνο Δt μια κορυφή του κύματος μετακινείται κατά $v \Delta t$. (β) Σε μια περίοδο μετακινείται κατά λ .



Θα μπορούσαμε, να ορίσουμε το **μήκος κύματος** ως την **απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων του μέσου που απέχουν το ίδιο από τη θέση ισορροπίας τους και κινούνται κατά την ίδια φορά**.

Αν στη σχέση (2.1) αντικαταστήσουμε το t με την περίοδο του κύματος η απόσταση x στην οποία διαδίδεται το κύμα είναι λ και η σχέση παίρνει τη μορφή

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (2.2)$$

Επειδή $T = \frac{1}{f}$ η σχέση, τελικά, γίνεται

$$v = \lambda f \quad (2.3)$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται **θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής**.

Η μαθηματική περιγραφή του αρμονικού κύματος

Ας υποθέσουμε ότι η πηγή αρμονικής διαταραχής O αρχίζει να ταλαντώνεται τη χρονική στιγμή $t_0 = 0$ και ότι η ταλάντωσή της περιγράφεται από τη σχέση $y = A\eta\mu\omega t$. Ένα σημείο M του ελαστικού μέσου θα αρχίσει να ταλαντώνεται τη χρονική στιγμή $t_1 = \frac{x}{v}$. Επομένως τη χρονική στιγμή t ,

το σημείο M θα ταλαντώνεται επί χρόνο $t - t_1 = t - \frac{x}{v}$ και, με την προϋπό-

θεση ότι το πλάτος της ταλάντωσης του M είναι ίσο με το πλάτος ταλάντωσης του O ,¹ η εξίσωση της κίνησής του θα είναι

$$y = A\eta\mu\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) \quad \text{ή} \quad y = A\eta\mu\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

$$\text{ή} \quad y = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{vT}\right)$$

ή, επειδή $vT = \lambda$,

$$y = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad (2.4)$$

Αν το κύμα διαδίδεται κατά την αντίθετη φορά τότε

$$y = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)$$

Η (2.4) αποτελεί την **εξίσωση του κύματος** και δίνει κάθε στιγμή την απομάκρυνση που έχουν τα σημεία του ελαστικού μέσου από τη θέση ισορροπίας τους.

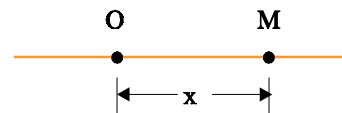
Το A ονομάζεται **πλάτος του κύματος** και είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει η απομάκρυνση ενός σημείου του μέσου κατά την αρμονική ταλάντωση που εκτελεί.

Η γωνία $2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$ ονομάζεται **φάση** και μετριέται σε ακτίνια. Ε-

πειδή η φάση εξαρτάται από την απόσταση x από την πηγή προκύπτει ότι τα σημεία του ελαστικού μέσου την ίδια χρονική στιγμή έχουν διαφορετικές φάσεις.

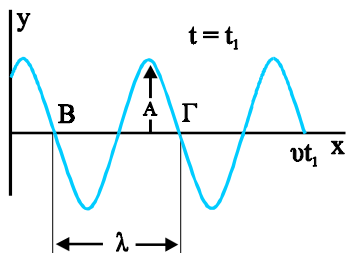
Γραφική παράσταση του κύματος

Από τη σχέση (2.4) φαίνεται ότι η απομάκρυνση y κάποιου σημείου του μέσου είναι συνάρτηση δύο μεταβλητών, του χρόνου t και της απόστασης x του σημείου από την πηγή. Για το λόγο αυτό δεν είναι δυνατό η σχέση (2.4) να παρασταθεί γραφικά σε επίπεδο σχήμα. Αν όμως η μια από τις δύο μεταβλητές θεωρηθεί σταθερή, η απομάκρυνση είναι συνάρτηση μόνο της άλλης μεταβλητής και είναι δυνατή η γραφική της παράσταση.

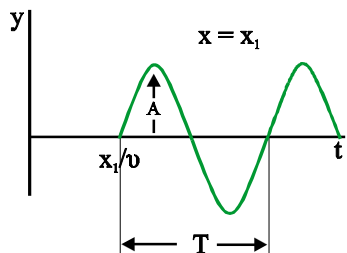


Σχ. 2.7 Το σημείο M απέχει απόσταση x από την πηγή O του κύματος.

¹ Η προϋπόθεση αυτή εκπληρώνεται στην περίπτωση κυμάτων που διαδίδονται σε γραμμικά ελαστικά μέσα (π.χ. χορδές) χωρίς απώλειες ενέργειας.



Σχ. 2.8 Ένα στιγμιότυπο του κύματος. Τα σημεία B και Γ που έχουν διαφορά φάσης 2π , απέχουν ένα μήκος κύματος,



Σχ. 2.9 Γραφική παράσταση της κίνησης ενός σημείου του ελαστικού μέσου σε συνάρτηση με το χρόνο.

A) Στιγμιότυπο του κύματος.

Για δεδομένη χρονική στιγμή ($t = t_1$) η σχέση (2.4) παίρνει τη μορφή

$$y = A \eta \mu 2\pi \left(\sigma \tau \alpha \theta - \frac{x}{\lambda} \right)$$

και δίνει την απομάκρυνση κάθε σημείου του μέσου συναρτήσει της απόστασής του από την πηγή. Το διάγραμμα αυτής της συνάρτησης (σχ. 2.8), δίνει τη θέση των διαφόρων σημείων του μέσου μια ορισμένη χρονική στιγμή και ονομάζεται **στιγμιότυπο του κύματος**.

B) Ταλάντωση ενός σημείου του μέσου.

Για ορισμένη απόσταση από την πηγή ($x = x_1$), η σχέση (2.4) παίρνει τη μορφή

$$y = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \sigma \tau \alpha \theta \right)$$

και δίνει την απομάκρυνση ενός συγκεκριμένου σημείου του μέσου συναρτήσει του χρόνου.

Η γραφική παράσταση της σχέσης αυτής (σχ. 2.9) είναι η γνωστή μας γραφική παράσταση της απλής αρμονικής ταλάντωσης.

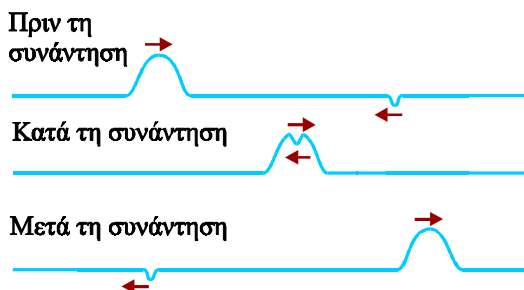
2-3 ΕΠΑΛΛΗΛΙΑ Ή ΥΠΕΡΘΕΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τι συμβαίνει όταν στο ίδιο ελαστικό μέσο **συμβάλλουν**, δηλαδή διαδίδονται ταυτόχρονα δύο ή περισσότερα κύματα; Ποια είναι τότε η κίνηση των μορίων του μέσου;

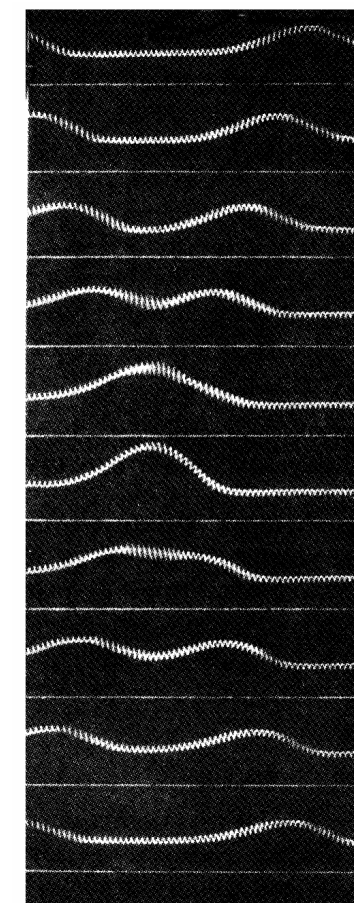
Έχει διαπιστωθεί ότι τα κύματα ακολουθούν την αρχή επαλληλίας ή υπέρθεσης, σύμφωνα με την οποία

όταν σε ένα μέσο διαδίδονται δύο ή περισσότερα κύματα η απομάκρυνση ενός σημείου του ελαστικού μέσου είναι ίση με τη συνισταμένη των απομακρύνσεων που οφείλονται στα επί μέρους κύματα.

Στο σχήμα 2.10 φαίνεται το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης διάδοσης δύο παλμών κατά μήκος ενός σχοινιού, στο ίδιο επίπεδο, με αντίθετες κατευθύνσεις. Όταν οι δυο παλμοί συναντώνται, τα μόρια του σχοινιού έχουν απομάκρυνση ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των απομακρύνσεων που θα είχαν αν οι δυο παλμοί διαδίδονταν ξεχωριστά.



Σχ. 2.10



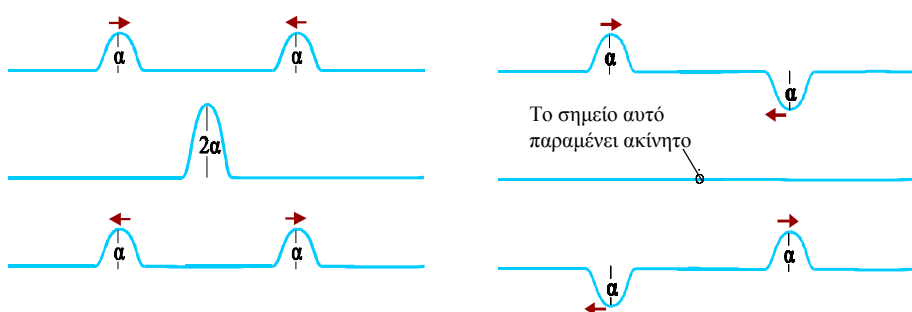
Εικ. 2.3 Φωτογραφίες από δύο κυματικούς παλμούς που διαδίδονται κατά μήκος ενός ελατηρίου.

Στην εικόνα 2.3 φαίνονται δύο κύματα τα οποία διαδίδονται κατά μήκος ενός ελατηρίου. Όπως φαίνεται, τα κύματα διέρχονται το ένα μέσα από το άλλο χωρίς να μεταβληθούν καθόλου. Τα κύματα που διαδίδονται στο ίδιο μέσο, δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Κάθε κύμα διαδίδεται σαν να μην υπήρχε το άλλο. Η συνεισφορά κάθε κύματος στην απομάκρυνση ενός σημείου του μέσου είναι ανεξάρτητη από την ύπαρξη του άλλου κύματος.

Η αρχή της επαλληλίας παραβιάζεται μόνο όταν τα κύματα είναι τόσο ισχυρά ώστε να μεταβάλλουν τις ιδιότητες του μέσου στο οποίο διαδίδονται (όταν οι δυνάμεις που ασκούνται στα σωματίδια του μέσου δεν είναι ανάλογες της απομάκρυνσης). Τέτοιες περιπτώσεις όπου δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας, έχουμε στα κύματα που δημιουργούνται από μια έκρηξη.

Τα κυματικά φαινόμενα που απαντούν στη φύση είναι συνήθως αρκετά σύνθετα. Όπως την κίνηση ενός βλήματος την αναλύουμε σε συνιστώσες, οριζόντια και κατακόρυφη, ένα σύνθετο κύμα μπορούμε να το θεωρήσουμε ως αποτέλεσμα της επαλληλίας ενός αριθμού αρμονικών κυμάτων, με επιλεγμένα πλάτη και μήκη κύματος.

Η ταυτόχρονη διάδοση δύο ή περισσότερων κυμάτων στην ίδια περιοχή ενός ελαστικού μέσου ονομάζεται συμβολή.

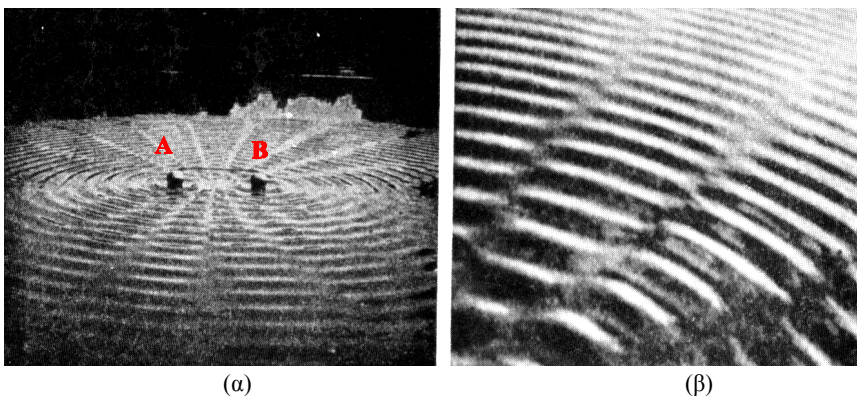


Σχ. 2.11 Το αποτέλεσμα της συμβολής δύο όμοιων κυματικών παλμών και της συμβολής δύο όμοιων αλλά αντίθετων παλμών

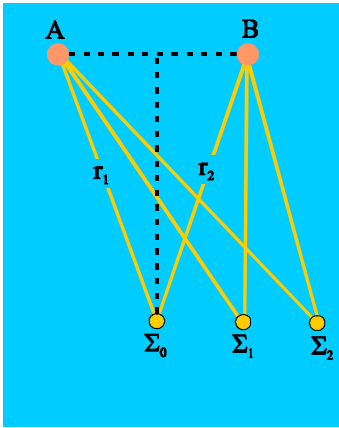
Στη συνέχεια θα μελετήσουμε μερικές ειδικές περιπτώσεις συμβολής κυμάτων.

2-4 ΣΥΜΒΟΛΗ ΔΥΟ ΚΥΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΥΓΡΟΥ

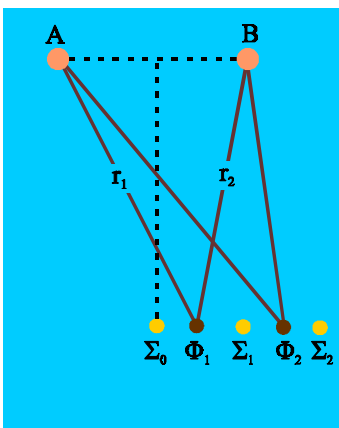
Οι εικόνες 2.4α και 2.4β δείχνουν το αποτέλεσμα της συμβολής δύο όμοιων κυμάτων στην επιφάνεια νερού. Τα κύματα προκαλούνται στην επιφάνεια νερού από τις πηγές Α και Β.



(α) (β)
Εικ. 2.4 Η συμβολή δύο κυμάτων στην επιφάνεια νερού



Σχ. 2.12 Στα σημεία $\Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_2, \dots$ για τα οποία οι αποστάσεις τους από τις δύο πηγές διαφέρουν ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος έχουμε ενίσχυση.



Σχ. 2.13 Στα σημεία $\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2, \dots$ για τα οποία οι αποστάσεις τους από τις δύο πηγές διαφέρουν περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος έχουμε απόσβεση.

Βλέπουμε ότι υπάρχουν σημεία (τα οποία μάλιστα σχηματίζουν γραμμές) που παραμένουν ακίνητα, ενώ άλλα ταλαντώνονται πολύ έντονα.

Στο σχήμα 2.12 το σημείο Σ_0 είναι ένα σημείο στην επιφάνεια του νερού που απέχει εξίσου από τα σημεία A και B, ($r_1 = r_2$).

Επειδή τα δύο κύματα ξεκινούν ταυτόχρονα από τις πηγές και η απόσταση που διανύουν μέχρι να φτάσουν στο Σ_0 είναι ίδια, όταν στο Σ_0 φτάνει "όρος" από τη μια πηγή, θα φτάνει "όρος" και από την άλλη, σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, στο Σ_0 θα δημιουργηθεί "όρος" με διπλάσιο ύψος. Μετά από χρόνο $T/2$ στο σημείο Σ_0 θα φτάσουν ταυτόχρονα δύο "κοιλιάδες", έτσι η κοιλιά που θα δημιουργηθεί στο Σ_0 θα έχει διπλάσιο βάθος. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι τα δύο κύματα συμβάλλουν ενισχυτικά.

Ενισχυτική συμβολή έχουμε και σε άλλα σημεία. Για παράδειγμα και στο σημείο Σ_1 , στο οποίο $r_1 - r_2 = \lambda$. Όταν στο σημείο Σ_1 φτάνει "όρος" που προέρχεται από την πηγή B, ταυτόχρονα φτάνει "όρος" που προέρχεται από την πηγή A και δημιουργήθηκε μια περίοδο νωρίτερα. Το ίδιο συμβαίνει σε όλα εκείνα τα σημεία στα οποία η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση ενός σημείου Φ_1 (σχ. 2.13), στο οποίο οι αποστάσεις r_1 και r_2 από τις πηγές A και B, διαφέρουν κατά $\lambda/2$. Όπως είπαμε τα "όρη" ξεκινούν ταυτόχρονα από τις δύο πηγές. Όταν στο σημείο Φ_1 φτάνει όρος προερχόμενο από την πηγή B, από την πηγή A θα φτάνει κοιλιά, με αποτέλεσμα τα δύο κύματα να αλληλοαναιρούνται. Μετά από χρόνο $T/2$, στο σημείο Φ_1 , θα φτάσει "κοιλιά" από το B και "όρος" από το A. Το άθροισμά τους θα είναι πάλι μηδέν. Το σημείο Φ_1 παραμένει διαρκώς ακίνητο. Το ίδιο συμβαίνει με όλα εκείνα τα σημεία, στην επιφάνεια του νερού, στα οποία η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές είναι ίση με περιττό πολλαπλάσιο του $\lambda/2$. Επομένως

Τα σημεία των οποίων οι αποστάσεις r_1 και r_2 , από τις δύο πηγές, διαφέρουν κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ

(δηλαδή $r_1 - r_2 = N\lambda$ όπου $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

ταλαντώνονται με μέγιστο πλάτος. Τότε έχουμε ενίσχυση.

Τα σημεία των οποίων οι αποστάσεις r_1 και r_2 , από τις δύο πηγές, διαφέρουν κατά περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$)

(δηλαδή $r_1 - r_2 = (2N + 1)\lambda/2$ όπου $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

μένουν διαρκώς ακίνητα. Τότε έχουμε απόσβεση.

Όλα τα υπόλοιπα σημεία κάνουν ταλάντωση με ενδιάμεσο πλάτος.

Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να γίνουν πιο πειστικά αν μελετήσουμε μαθηματικά το φαινόμενο. Έστω ότι ένα τυχαίο σημείο του μέσου στο οποίο διαδίδονται ταυτόχρονα κύματα που προέρχονται από τις πηγές A και B, απέχει από αυτές r_1 και r_2 αντίστοιχα. Μια τυχαία χρονική στιγμή t το σημείο αυτό έχει απομάκρυνση,

$$y_1 = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) \text{ εξαιτίας του πρώτου κύματος και} \quad (2.5)$$

$$y_2 = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right) \text{ εξαιτίας του δεύτερου} \quad (2.6)$$

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η απομάκρυνση του σημείου αυτού από τη θέση ισορροπίας του τη χρονική στιγμή t θα είναι

$$y = y_1 + y_2$$

η οποία βάσει των (2.5) και (2.6) γίνεται

$$y = A \left[\eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) + \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right) \right] \quad (2.7)$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας

$$\eta\mu\alpha + \eta\mu\beta = 2\sigma\upsilon\nu\left(\frac{\alpha - \beta}{2}\right)\eta\mu\left(\frac{\alpha + \beta}{2}\right) \text{ η σχέση (2.7) γίνεται}$$

$$y = 2A \sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \eta\mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right)$$

Επομένως το αποτέλεσμα της συμβολής είναι ταλάντωση που έχει πλάτος

$$A' = 2A \sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \quad (2.8)$$

και φάση $2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right)$

Σύμφωνα με τη (2.8), το πλάτος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο ($A' = 2A$) ό-

ταν $\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} = \pm 1$

ή όταν $2\pi \frac{|r_1 - r_2|}{2\lambda} = N\pi$,

δηλαδή στα σημεία για τα οποία

$$|r_1 - r_2| = N\lambda \quad \text{όπου } N = 0, 1, 2, \dots$$

Όταν $\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} = 0$

δηλαδή $2\pi \frac{|r_1 - r_2|}{2\lambda} = (2N + 1)\frac{\pi}{2}$

ή $|r_1 - r_2| = (2N + 1)\frac{\lambda}{2} \quad \text{με } N = 0, 1, 2, \dots$

η (2.8) δίνει ότι $A' = 0$. Δηλαδή τα σημεία αυτά παραμένουν διαρκώς ακίνητα.

Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων για τα οποία ισχύει $r_1 - r_2 = \sigma\tau\alpha\theta$. είναι υπερβολή. Επομένως τα σημεία στα οποία έχουμε ενισχυτική συμβολή και τα σημεία στα οποία έχουμε απόσβεση, βρίσκονται πάνω σε υπερβολές.

Σημείωση: Η μελέτη του φαινομένου της συμβολής, όπως έγινε, αφορούσε στη συμβολή δύο κυμάτων των οποίων οι πηγές βρίσκονται **σε φάση** (δηλαδή δημιουργούν ταυτόχρονα μέγιστα και ελάχιστα). Συμβολή, όμως, έχουμε κάθε φορά που δύο κύματα διαδίδονται στο ίδιο μέσο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.1

Δύο σημειακές πηγές ήχου Α και Β εκπέμπουν αρμονικό ήχο ίδιας συχνότητας και βρίσκονται σε φάση. Στο μέσο Μ της απόστασής τους, ο ήχος ακούγεται έντονος. Στο σημείο Γ, που βρίσκεται πάνω στην ευθεία ΑΒ, σε απόσταση $x=4\text{ cm}$ από το σημείο Μ, ο ήχος μηδενίζεται για πρώτη φορά. Να βρεθεί η συχνότητα του ήχου που εκπέμπεται από τις δύο πηγές. Η ταχύτητα του ήχου στον αέρα είναι $v=340\text{ m/s}$.

Απάντηση :

Απόσβεση έχουμε στα σημεία, της ευθείας ΑΒ, στα οποία ισχύει

$$r_1 - r_2 = (2N + 1) \lambda / 2 \quad \text{όπου} \quad N = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

Στο σημείο Γ όπου για πρώτη φορά παρατηρείται απόσβεση $N=0$ Επομένως

$$r_1 - r_2 = \lambda / 2$$

Αν το σημείο Γ βρίσκεται πλησιέστερα στο Β τότε

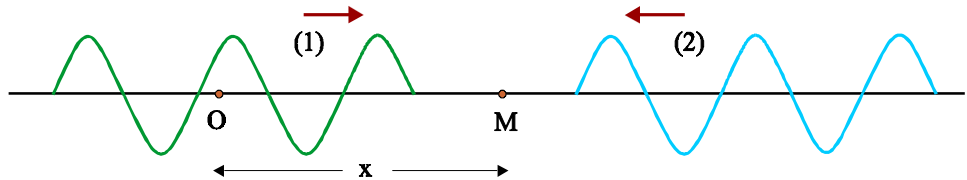
$$AM + x - (BM - x) = \lambda / 2 \quad \text{ή} \quad 2x = \lambda / 2 \quad \text{άρα} \quad \lambda = 4x = 16\text{ cm}$$

και
$$f = \frac{v}{\lambda} = 2125\text{ Hz}$$

2-5 ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ

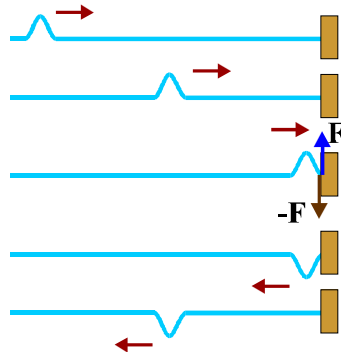
Δύο κύματα ίδιου πλάτους και ίδιας συχνότητας διαδίδονται με αντίθετη φορά μέσα στο ίδιο ελαστικό μέσο (σχ. 2.14)

Σχ. 2.14 Τα δύο κύματα διαδίδονται στο ίδιο ελαστικό μέσο με αντίθετη φορά.



Τα δύο κύματα συμβάλλουν. Η κίνηση του μέσου ονομάζεται στάσιμο κύμα.

Στάσιμο κύμα ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων της ίδιας συχνότητας και του ίδιου πλάτους που διαδίδονται στο ίδιο μέσο με αντίθετες κατευθύνσεις.



Σχ. 2.15 Ο κυματικός παλμός ανακλάται στο σταθερό εμπόδιο και διαδίδεται αντίθετα.

Κρατάμε την ελεύθερη άκρη ενός τεντωμένου σχοινιού, που η άλλη του άκρη είναι στερεωμένη σε ακλόνητο σημείο και της δίνουμε μια ώθηση. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένας κυματικός παλμός ο οποίος διαδίδεται κατά μήκος του σχοινιού. Όταν η κυματική διαταραχή φτάσει στην άκρη του σχοινιού το σχοινί ασκεί μια δύναμη στο σημείο στήριξης. Η αντίδραση σε αυτή τη δύναμη δημιουργεί έναν ανακλώμενο παλμό που κινείται στην αντίθετη κατεύθυνση (σχ. 2.15).

Εάν εξαναγκάσουμε το ελεύθερο άκρο του σχοινιού να κάνει αρμονική ταλάντωση (σχήμα 2.16) το αρμονικό κύμα που δημιουργείται και το όμοιο του που προκύπτει από την ανάκλαση συμβάλλουν δημιουργώντας στάσιμο κύμα. Αν φωτογραφίσουμε το σχοινί σε διάφορες χρονικές στιγμές, θα

παρατηρήσουμε ότι υπάρχουν σημεία στο σχοινί - οι **δεσμοί** - που παραμένουν διαρκώς ακίνητα ενώ όλα τα άλλα εκτελούν ταλάντωση με την ίδια συχνότητα. Το πλάτος της ταλάντωσης δεν είναι ίδιο για όλα τα σημεία που ταλαντώνονται. Μέγιστο πλάτος έχουν τα σημεία που βρίσκονται στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών -οι **κοιλίες**.

Η ονομασία (στάσιμο = ακίνητο) οφείλεται στο γεγονός ότι εδώ δεν έχουμε να κάνουμε με ένα κύμα, δηλαδή με μια παραμόρφωση που διαδίδεται. Στο κύμα όλα τα σημεία εκτελούν διαδοχικά την ίδια κίνηση ενώ στο στάσιμο δε συμβαίνει το ίδιο.

Η εξίσωση του στάσιμου κύματος

Έστω το αρμονικό κύμα με εξίσωση

$$y_1 = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2.9)$$

που διαδίδεται κατά τη θετική φορά του άξονα x (στο σχήμα 2.14 το κύμα 1).

Ένα δεύτερο κύμα με ίδιο πλάτος και ίδια συχνότητα, που διαδίδεται κατά την αντίθετη κατεύθυνση (στο σχήμα 2.14 το κύμα 2), θα περιγράφεται από την εξίσωση

$$y_2 = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \quad (2.10)$$

Σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας, η απομάκρυνση ενός σημείου Μ του μέσου τη χρονική στιγμή t, θα είναι

$$y = y_1 + y_2$$

η οποία γίνεται από τις (2.9) και (2.10)

$$y = A \left[\eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \right] \quad (2.11)$$

Κάνοντας χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας

$$\eta \mu \alpha + \eta \mu \beta = 2 \sigma \upsilon \nu \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \eta \mu \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \quad \text{η σχέση (2.11) γίνεται}$$

$$y = 2A \sigma \upsilon \nu 2\pi \frac{x}{\lambda} \eta \mu \frac{2\pi}{T} t \quad (2.12)$$

$$\text{Παρατηρούμε ότι ο όρος} \quad A' = 2A \sigma \upsilon \nu 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (2.13)$$

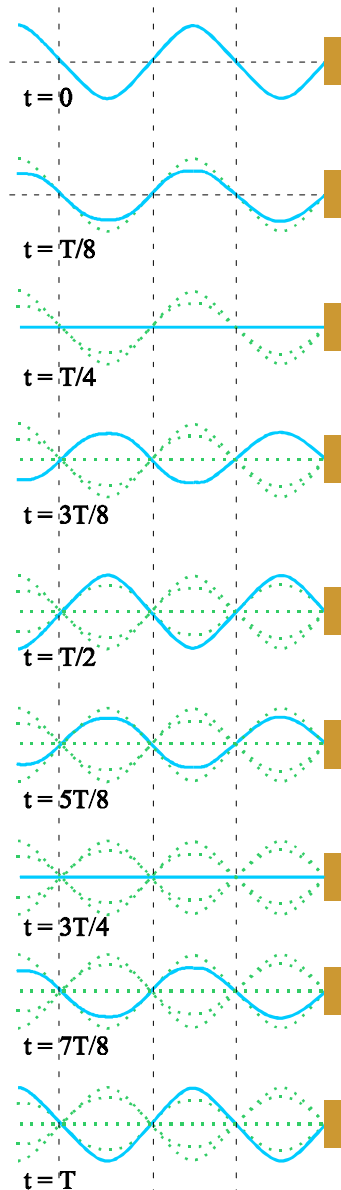
εξαρτάται μόνο από τη θέση x του σημείου και παραμένει σταθερός με το χρόνο.

Η σχέση (2.12) παίρνει τη μορφή

$$y = A' \eta \mu \frac{2\pi}{T} t \quad \text{ή} \quad y = A' \eta \mu \omega t$$

που είναι η εξίσωση της απλής αρμονικής ταλάντωσης. Επομένως

κάθε σημείο του μέσου εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση. Το πλάτος της ταλάντωσης δεν είναι ίδιο για όλα τα σημεία αλλά εξαρτάται από τη θέση του [σχέση (2.13)].



Σχ. 2.16 Στιγμιότυπα στάσιμου κύματος σε χορδή.



Εικ. 2.5 Στις χορδές της κιθάρας σχηματίζονται στάσιμα κύματα. Τα άκρα κάθε χορδής είναι υποχρεωτικά δεσμοί.

Τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε θέση x τέτοια ώστε

$$A' = 2A \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} = 0$$

δηλαδή

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \dots (2K+1)\frac{\pi}{2}$$

ή

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \dots (2K+1)\frac{\lambda}{4} \quad (2.14)$$

έχουν μηδενικό πλάτος ταλάντωσης, δηλαδή παραμένουν συνεχώς ακίνητα. Είναι **οι δεσμοί του στάσιμου κύματος**.

Τα σημεία τα οποία βρίσκονται σε θέση τέτοια ώστε

$$A' = 2A \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm 2A$$

δηλαδή

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = 0, \pi, \dots, K\pi$$

ή

$$x = 0, \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \dots \frac{K\lambda}{2}. \quad (2.15)$$

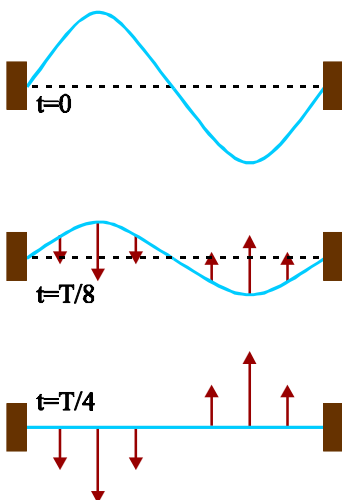
έχουν μέγιστο πλάτος ταλάντωσης, ίσο με $2A$. Αποτελούν τις **κοιλίες του στάσιμου κύματος**.

Από τις (2.14) και (2.15) προκύπτει ότι

η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών, ή κοιλιών είναι ίση με το μισό του μήκους κύματος λ των κυμάτων από τη συμβολή των οποίων προήλθε το στάσιμο κύμα.

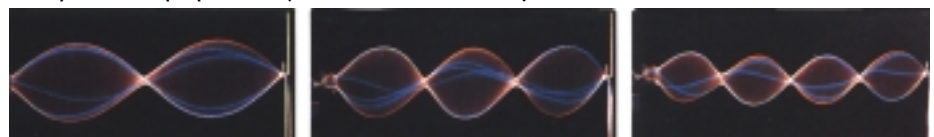
Στην παραπάνω μαθηματική μελέτη, η αρχή μέτρησης των αποστάσεων είναι κοιλία (για $x=0$, έχουμε κοιλία).

Στάσιμα κύματα μπορούν να δημιουργηθούν και σε ένα μέσο του οποίου τα δύο άκρα είναι ακίνητα, όπως σε μια χορδή ενός μουσικού οργάνου (εικ. 2.5). Στην περίπτωση αυτή, αν θέλουμε ως αρχή μέτρησης των αποστάσεων να πάρουμε το ένα άκρο (όπου υπάρχει δεσμός), η σχέση (2.12) χρειάζεται τροποποίηση ώστε, για $x=0$ να δίνει δεσμό.



Σχ. 2.17 Στιγμιότυπα στάσιμου κύματος σε χορδή. Τη στιγμή μηδέν η χορδή είναι ακίνητη, οπότε $K=0$, όλη η ενέργεια είναι δυναμική, U , λόγω της παραμόρφωσης της χορδής. Τη στιγμή $t=T/8$, η χορδή κινείται. Έχει και κινητική και δυναμική ενέργεια. Τη στιγμή $t=T/4$, η χορδή δεν είναι παραμορφωμένη ($U=0$), συνεπώς όλη η ενέργεια έχει μετατραπεί σε κινητική.

Τα βέλη δείχνουν τις ταχύτητες των διαφόρων σημείων της χορδής.



Εικ. 2.6 Στάσιμα κύματα σε χορδές.

Ενεργειακή προσέγγιση

Εφόσον στο στάσιμο κύμα υπάρχουν σημεία που παραμένουν πάντα ακίνητα, δε μεταφέρεται ενέργεια από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο (αυτός επίσης είναι ένας βασικός λόγος που διαφοροποιεί την κατάσταση του στάσιμου κύματος από αυτό που ορίσαμε ως κύμα).

Η ενέργεια που είχαν τα αρχικά κύματα, η συμβολή των οποίων έδωσε το στάσιμο κύμα, εγκλωβίζεται ανάμεσα στους δεσμούς. Σε μια χορδή, στην οποία έχει δημιουργηθεί στάσιμο κύμα, η ενέργεια μετατρέπεται συνεχώς από ελαστική δυναμική ενέργεια, όταν η χορδή είναι στιγμιαία ακίνητη, σε κινητική όταν η χορδή διέρχεται από τη θέση ισορροπίας. Στις ενδιάμεσες θέ-

σεις τα μόρια της χορδής, έχουν και κινητική και δυναμική ενέργεια.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.2

Τα κύματα $y_1 = 8 \text{ ημ}2\pi\left(\frac{t}{0,3} - 5x\right)$ και $y_2 = 8 \text{ ημ}2\pi\left(\frac{t}{0,3} + 5x\right)$ διαδίδονται στο ίδιο ελαστικό μέσο σε αντίθετες κατευθύνσεις. Τα x και y είναι σε cm και το t σε s.

α) Ποια είναι η εξίσωση του στάσιμου κύματος που δημιουργείται;

β) Ποιο είναι το πλάτος της ταλάντωσης ενός σημείου που βρίσκεται στη θέση $x = 3,025 \text{ cm}$;

Απάντηση :

Η εξίσωση ενός αρμονικού κύματος είναι $y = A \text{ ημ}2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$

Συγκρίνοντας τη σχέση αυτή με τις εξισώσεις των κυμάτων που συμβάλλουν για να δημιουργήσουν το στάσιμο κύμα έχουμε ότι $A = 8 \text{ cm}$, $T = 0,3 \text{ s}$ και $\lambda = 0,2 \text{ cm}$

Η εξίσωση του στάσιμου κύματος είναι $y = 2A \text{ συν}2\pi \frac{x}{\lambda} \text{ ημ} \frac{2\pi}{T} t$

Επομένως $y = 16 \text{ συν}10\pi x \text{ ημ} \frac{2\pi}{0,3} t$

Το πλάτος της ταλάντωσης του σημείου που βρίσκεται στη θέση $x = 3,025 \text{ cm}$ είναι

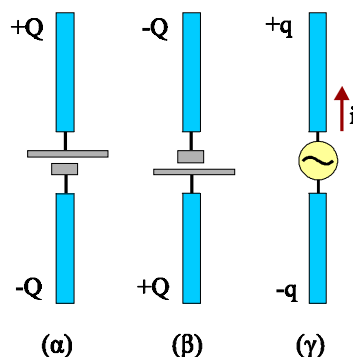
$$A' = 2A \text{ συν}2\pi \frac{x}{\lambda} = 16 \text{ συν}10\pi x = 16 \text{ συν}30,25\pi = 16 \text{ συν}\left(30\pi + \frac{\pi}{4}\right) = 16 \frac{\sqrt{2}}{2} = 8\sqrt{2} \text{ cm}$$

2-6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με την παραγωγή και τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα κύματα που γνωρίσαμε (μηχανικά) αφορούσαν στη διάδοση μιας υλικής διαταραχής. Με τρόπο ανάλογο, όπως θα δούμε, διαδίδεται και μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή.

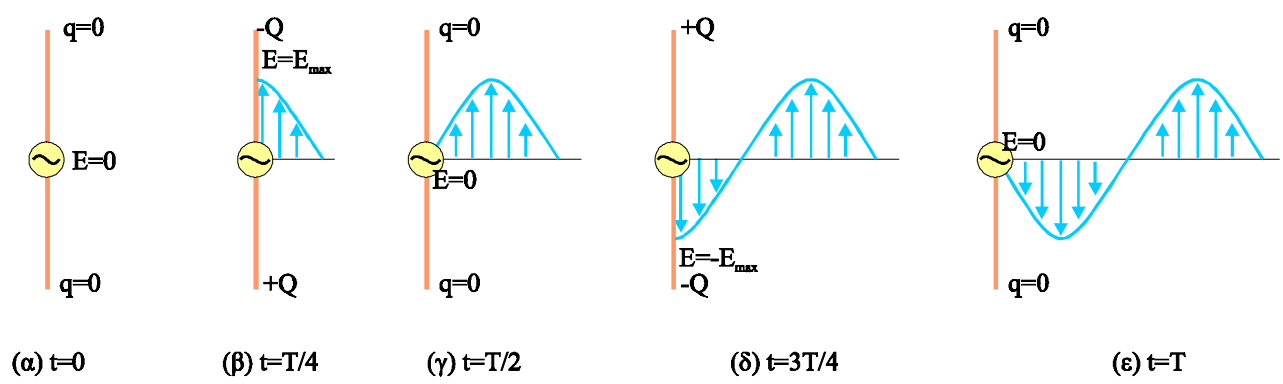
Γνωρίζουμε ότι ένα σύστημα δύο φορτίων $+Q$ και $-Q$ δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο και ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Αν δύο μεταλλικές ράβδοι συνδεθούν με πηγή συνεχούς τάσης, φορτίζονται με ετερόσημα φορτία $+Q$ και $-Q$ (σχ. 2.18α,β). Αν συνδεθούν με γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης, όπως στο σχήμα 2.18γ, φορτίζονται εναλλάξ με θετικά και αρνητικά φορτία. Στις άκρες τους εμφανίζεται ζεύγος ηλεκτρικών φορτίων που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Η κίνηση αυτή των φορτίων αποτελεί εναλλασσόμενο ρεύμα.

Ένα τέτοιο σύστημα ονομάζεται **ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο**.



Σχ. 2.18 (α), (β). Μεταλλικές ράβδοι συνδέονται με πηγή συνεχούς τάσης. Οι ράβδοι φορτίζονται με φορτία $\pm Q$. (γ) Οι ράβδοι συνδέονται με γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης. Στις άκρες τους εμφανίζεται φορτίο $\pm q$ που μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο. Η διάταξη διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα.

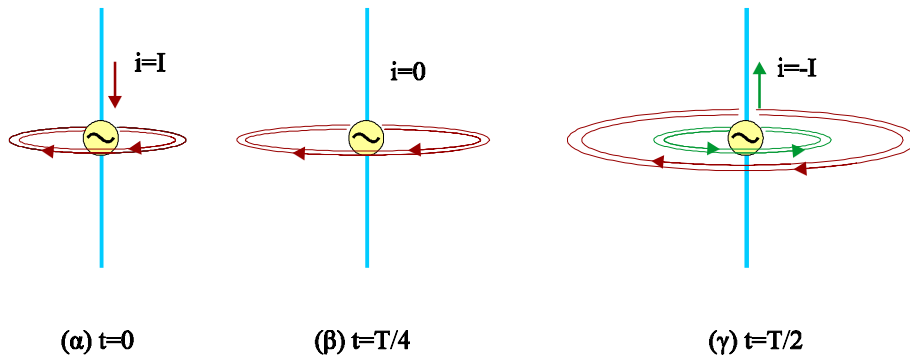
Στο σχήμα 2.19 απεικονίζεται σχηματικά η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρομαγνητικού κύματος από ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο. Τη χρονική στιγμή μηδέν τα φορτία στις άκρες των αγωγών είναι μηδέν (σχ.2.19α). Καθώς η τάση στις άκρες των αγωγών μεταβάλλεται εμφανίζονται ετερόσημα φορτία και δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο γύρω από αυτούς. Τη χρονική στιγμή $t=T/4$ τα φορτία στις άκρες των αγωγών έχουν πάρει τη μέγιστη τιμή, ενώ το ηλεκτρικό πεδίο που είχε δημιουργηθεί, από τη στιγμή μηδέν μέχρι τη στιγμή $T/4$, έχει απομακρυνθεί από τις ράβδους (σχ. 2.19β). Στη συνέχεια τα φορτία στα άκρα των ράβδων μειώνονται, επομένως μειώνεται και η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούν. Ένα τέταρτο της περιόδου αργότερα τα φορτία στα άκρα των ράβδων έχουν μηδενισθεί. Εν τω μεταξύ το ηλεκτρικό πεδίο που είχε δημιουργηθεί μέχρι τότε απομακρύνεται από τους αγωγούς, με ταχύτητα c (σχ. 2.19γ). Στη συνέχεια εμφανίζεται αρνητικό φορτίο κάτω και θετικό πάνω. Τα φορτία παίρνουν τη μέγιστη τιμή τους τη στιγμή $3T/4$, και μηδενίζονται τη στιγμή T . Το φαινόμενο επαναλαμβάνεται συνεχώς.



Σχ. 2.19 Ο κύκλος λειτουργίας ταλαντούμενου ηλεκτρικού δίπολου. Στο σχήμα απεικονίζεται μόνο το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται. Το σχέδιο δεν ανταποκρίνεται στις πραγματικές διαστάσεις.

Στο ίδιο χρονικό διάστημα δημιουργείται και μαγνητικό πεδίο διότι οι αγωγοί διαρρέονται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Τη στιγμή μηδέν οι αγωγοί διαρρέονται από ρεύμα (σχ. 2.20) με αποτέλεσμα γύρω τους να έχει δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο. Το ρεύμα αυτό μειώνεται και μηδενίζεται τη στιγμή $T/4$. Στο μεταξύ το μαγνητικό πεδίο που είχε δημιουργηθεί απλώνεται στο χώρο. Τη στιγμή $T/2$ οι αγωγοί διαρρέονται πάλι από ρεύμα, μέγιστης έντασης. Γύρω τους έχει δημιουργηθεί εκ νέου μαγνητικό πεδίο κ.ο.κ. Αυτό που έχει σημασία είναι ότι καθώς τα ηλεκτρικά φορτία ταλαντώνονται το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που συνεχώς δημιουργούν απομακρύνεται από το δίπολο (διαδίδεται) με την ταχύτητα c του φωτός.

Μια διαταραχή που διαδίδεται ονομάστηκε κύμα. Η κατάλληλη ονομασία για αυτού του είδους τις διαταραχές (ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων) που διαδίδονται είναι “**ηλεκτρομαγνητικό κύμα**”.



Σχ. 2.20 Το ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και δημιουργεί γύρω του μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Σε όλα τα υλικά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα.

Από τη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων διαπιστώθηκε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο. Τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Κάθε στιγμή το λόγος των μέτρων των εντάσεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι ίσος με την ταχύτητα διάδοσής τους $\left(c = \frac{E}{B} \right)$.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα - όπως και τα μηχανικά - υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δημιουργούνται από μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο ή ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο δεν παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Αυτό σημαίνει ότι ούτε τα ακίνητα φορτία ούτε τα φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα (σταθερά ρεύματα) μπορούν να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Όταν όμως έχουμε ηλεκτρικά φορτία που επιταχύνονται τα μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία που δημιουργούν έχουν ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

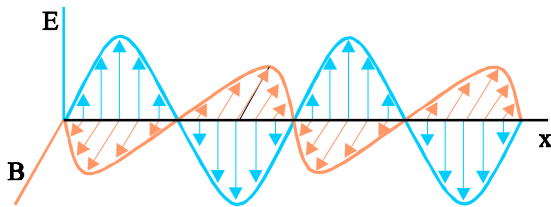
Η αιτία δημιουργίας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η επιταχυνόμενη κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων.

Τα ταλαντούμενα ηλεκτρικά δίπολα αποτελούν κοινή μέθοδο παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στους ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς σταθμούς. Κατά την ταλάντωση του ηλεκτρικού φορτίου στην κεραία, όταν τα φορτία στα άκρα της έχουν μέγιστη τιμή, το ρεύμα σ' αυτή είναι μηδέν και όταν τα φορτία στα άκρα μηδενιστούν η κεραία διαρρέεται από ρεύμα μέγιστης έντασης. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κοντά στην κεραία έχουν διαφορά φάσης 90° (όταν το ένα είναι μέγιστο το άλλο είναι μηδέν). Σε μεγάλες όμως αποστάσεις τα δύο πεδία είναι σε φάση.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο, ενός αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση x , είναι

$$\begin{aligned} E &= E_{\max} \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \\ B &= B_{\max} \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \end{aligned}$$

και το στιγμιότυπο ενός τέτοιου κύματος φαίνεται στο σχήμα (2.21)



Σχ. 2.21 Στιγμιότυπο αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος, διαδιδόμενου κατά τη διεύθυνση x .

2-7 Η ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΚΑΙ ΛΗΨΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Η εποχή μας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί «εποχή της πληροφορίας». Ασύλληπτα μεγάλος αριθμός πληροφοριών μεταφέρονται από τον **πομπό** στο **δέκτη** της πληροφορίας, μέσα από καλώδια χαλκού ή από οπτικές ίνες (ενσύρματη τηλεπικοινωνία) ή μέσω των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ασύρματη τηλεπικοινωνία).

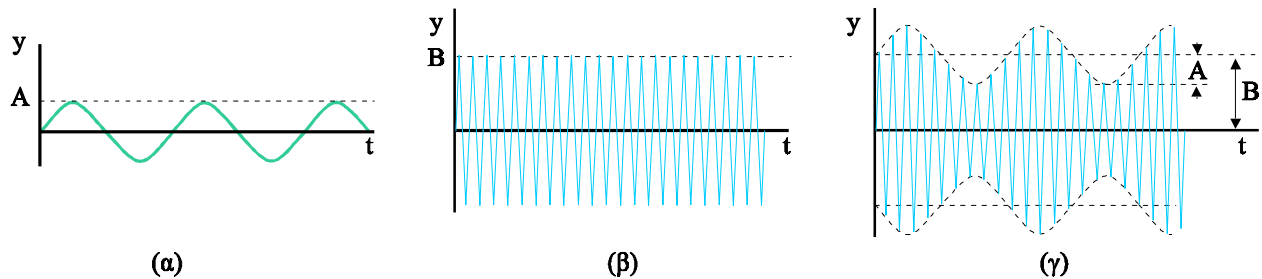
Σε κάθε μορφή τηλεπικοινωνίας, η προς μετάδοση πληροφορία-ήχος ή εικόνα- μετατρέπεται με το κατάλληλο μέσο- μικρόφωνο ή βιντεοκάμερα- σε ένα ηλεκτρικό σήμα.

Η εκπομπή

Ένας ήχος μπορεί να μετατραπεί με ένα μικρόφωνο σε ηλεκτρικό σήμα. Έτσι ο ήχος του διαπασών μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα της μορφής του σχήματος 2.22α.

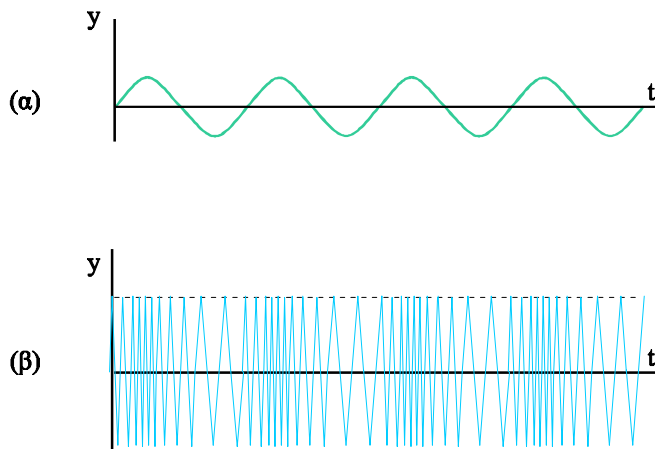
Για να μεταδώσουμε την πληροφορία, το ηλεκτρικό σήμα που παίρνουμε από το μικρόφωνο διαβιβάζεται στην κεραία του πομπού, αφού προηγουμένα το διαμορφώσουμε. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα προστίθεται σε ένα αρμονικό υψίσυχο κύμα, που παράγεται στον πομπό και έχει ορισμένη συχνότητα (φέρουσα συχνότητα)¹ (σχ. 2.22β). Έτσι το κύμα που εκπέμπεται από την κεραία έχει τη μορφή του σχήματος 2.22γ. Η διαμόρφωση αυτή ονομάζεται **διαμόρφωση κατά πλάτος** ή **ΑΜ** (από τις λέξεις amplitude modulation).

¹ Η διαμόρφωση του σήματος επιβάλλεται για δύο λόγους: α) Το μήκος μιας κεραίας πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το μήκος του ηλεκτρομαγνητικού κύματος που εκπέμπει. Για να εκπέμφθει κατ' ευθείαν το ηλεκτρικό σήμα που παίρνουμε από ένα ήχο απαιτείται κεραία μήκους πολλών χιλιομέτρων. β) Κάθε πομπός πρέπει να έχει κάποια ταυτότητα ώστε κατά τη λήψη να είναι δυνατή η αναγνώριση και η επιλογή του.



Σχ. 2.22 (α) Μικροφωνικό ρεύμα (β) φέρον κύμα (γ) διαμορφωμένο κύμα.

Το σήμα μπορεί να διαμορφωθεί και στη συχνότητά του. Η διαμόρφωση αυτή λέγεται **διαμόρφωση κατά συχνότητα** ή **FM** (frequency modulation) (σχ.2.23).



Σχ. 2.23 (α) το μικροφωνικό ρεύμα (β) διαμόρφωση του φέροντος κύματος κατά συχνότητα.

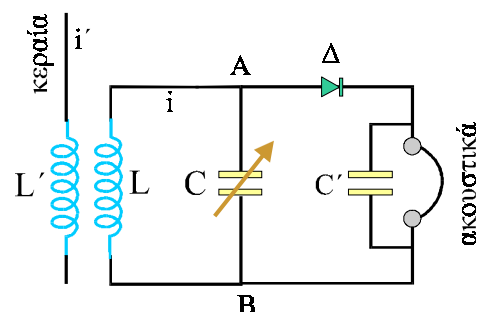
Στη διαμόρφωση κατά συχνότητα στο φέρον κύμα δημιουργούνται πυκνώματα και αραιώματα. Όσο πιο ισχυρό είναι το ηχητικό σήμα τόσο πιο έντονα είναι τα πυκνώματα και αραιώματα που δημιουργούνται στο φέρον κύμα. Το πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι ότι το διαμορφωμένο κύμα δεν επηρεάζεται σημαντικά από παράσιτα. Τα παράσιτα, κατά τη συμβολή τους με το διαμορφωμένο κύμα, επηρεάζουν κυρίως τα πλάτη και λιγότερο τις συχνότητες.

Το διαμορφωμένο κύμα διεγείρει την κεραία. Τα φορτία της ταλαντώνονται και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα αντίστοιχης μορφής.

Η λήψη

Η λήψη ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το δέκτη, γίνεται με ένα αγωγό (κεραία) ο οποίος βρίσκεται σε επαγωγική σύζευξη με ένα κύκλωμα LC (σχ. 2.24). Ο δέκτης αφού συντονιστεί με κάποιο πομπό διαχωρίζει το φέρον κύμα από την ταλάντωση που το διαμόρφωσε και το μετατρέπει σε ρεύμα όμοιας μορφής (φώραση). Το ρεύμα αυτό αφού ενισχυθεί οδηγείται στο μεγάφωνο το οποίο αναπαράγει τον αρχικό ήχο.

Σε κάθε σημείο του χώρου στον οποίο διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται με το χρόνο. Αν τοποθετήσουμε έναν ευθύγραμμο αγωγό μέσα σε ένα τέτοιο μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (με τη διεύθυνση του παράλληλη στην

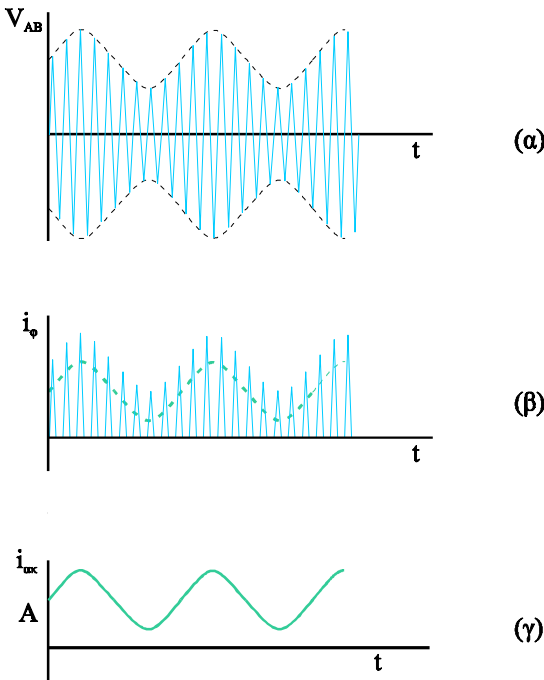


Σχ. 2.24 Απλός ραδιοφωνικός δέκτης.

ένταση του πεδίου), τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού εξαναγκάζονται σε ταλάντωση.

Κάθε στιγμή, στην κεραία του δέκτη φτάνουν πολλά ηλεκτρομαγνητικά κύματα, διαφόρων συχνοτήτων. Έτσι, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της κεραίας εξαναγκάζονται σε μια περίπλοκη ταλάντωση. Η κίνηση αυτή του φορτίου στην κεραία, προκαλεί, λόγω επαγωγής, εξαναγκασμένη ηλεκτρική ταλάντωση στο κύκλωμα LC. Το πλάτος της ηλεκτρικής ταλάντωσης στο κύκλωμα LC είναι πολύ μικρό, εκτός εάν το κύκλωμα συντονιστεί με κάποια από τις συχνότητες με τις οποίες ταλαντώνονται τα ηλεκτρόνια στην κεραία. Ο πυκνωτής C στο κύκλωμα είναι μεταβλητός. Έτσι, μπορούμε να συντονίσουμε το δέκτη με ορισμένο ραδιοφωνικό σταθμό, αποκλείοντας όλους τους άλλους. Τότε στα άκρα του A και B εμφανίζεται εναλλασσόμενη τάση.

Σχ. 2.25 (α) Η τάση στα άκρα του πυκνωτή, στο κύκλωμα LC του δέκτη (β) το ρεύμα μετά τη φώραση (γ) το ρεύμα που διαρρέει τα ακουστικά.



Αν τα σημεία A και B συνδεθούν απ’ ευθείας με ακουστικά δε θα παραχθεί ήχος γιατί η αδράνεια των ακουστικών δεν επιτρέπει ταλάντωση τόσο μεγάλης συχνότητας. Για να λειτουργήσουν τα ακουστικά πρέπει από το διαμορφωμένο κύμα (σχ. 2.25α) να απομονώσουμε το κύμα που αντιστοιχεί στο ηχητικό σήμα. Η φώραση επιτυγχάνεται αν, μεταξύ του κυκλώματος LC και των ακουστικών παρεμβάλουμε μία ανορθωτική διάταξη π.χ. δίοδο (Δ). Η δίοδος επιτρέπει να περνάει ρεύμα μόνο κατά τη μία φορά. Έτσι το ρεύμα που οδηγείται στα ακουστικά είναι ημιανορθωμένο (σχ. 2.25β). Το ημιανορθωμένο αυτό ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της επαλληλίας, ενός ρεύματος χαμηλής συχνότητας (η πράσινη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 2.25β) και ενός άλλου υψηλής συχνότητας. Το πηνίο που υπάρχει στα ακουστικά, εξαιτίας του φαινομένου της αυτεπαγωγής, κόβει το ρεύμα υψηλής

συχνότητας¹. Επομένως από τα ακουστικά περνάει μόνο το ρεύμα χαμηλής συχνότητας (σχ. 2.25γ), που έχει τη μορφή του μικροφωνικού ρεύματος. Το ρεύμα αυτό αναπαράγει στα ακουστικά τον αρχικό ήχο.

Στο δέκτη του σχήματος 2.24 τα ακουστικά λειτουργούν με την ενέργεια που παρέχει το κύμα που φτάνει στην κεραία. Στην πράξη όμως οι δέκτες χρησιμοποιούν διατάξεις οι οποίες ενισχύουν το σήμα που φτάνει στα μεγάφωνα.

2-8 ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν παράγονται μόνο από ταλαντούμενα ηλεκτρικά δίπολα. Σήμερα γνωρίζουμε ότι συνδέονται με ένα πλήθος φυσικών φαινομένων όπως είναι η αποδιέγερση των ατόμων, οι πυρηνικές διασπάσεις κ.α. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα ευρύτατο φάσμα μηκών κύματος και συχνοτήτων. Η έκταση του φάσματος αυτού παρουσιάζεται στο σχήμα 2.26, στο οποίο σημειώνονται προσεγγιστικά οι περιοχές μήκους κύματος και συχνότητας των διαφόρων τμημάτων του. Παρά τις τεράστιες διαφορές στις εφαρμογές και στην παραγωγή τους, όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν τα γενικά χαρακτηριστικά που περιγράψαμε στην παράγραφο 2-6.

Εφόσον όλα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα c , η συχνότητα τους και το μήκος κύματος συνδέονται με τη σχέση

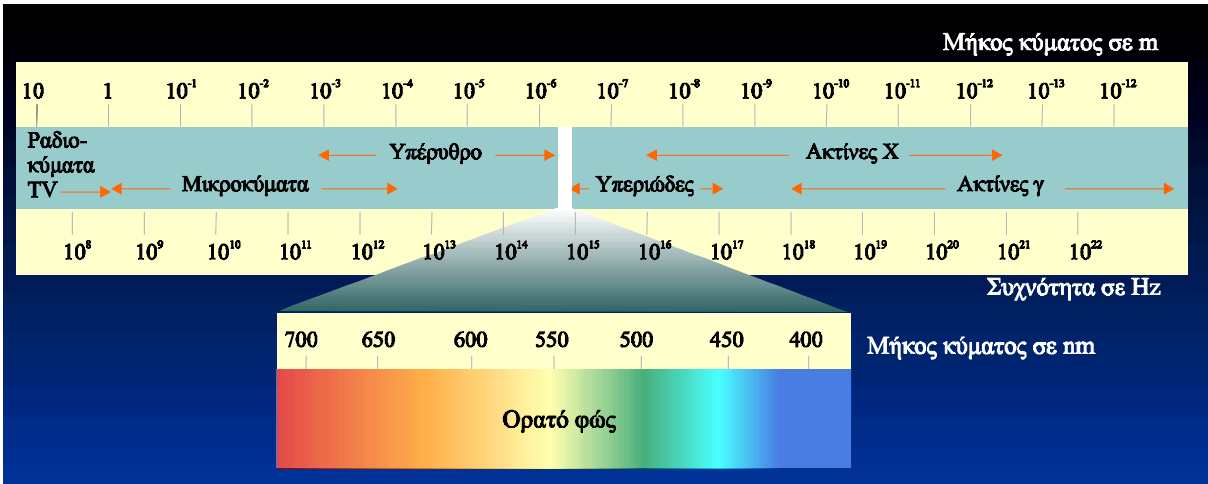
$$c = \lambda f$$

Θα κάνουμε μια σύντομη περιγραφή των διαφόρων περιοχών του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά σειρά ελαττούμενου μήκους κύματος. Πρέπει όμως να έχουμε υπόψη μας ότι δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός του κάθε τμήματος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τα υπόλοιπα.

Ραδιοκύματα. Είναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος από 10^5m έως μερικά εκατοστά. Δημιουργούνται από ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως τα κυκλώματα LC, και χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία και την τηλεόραση.

Μικροκύματα. Το μήκος κύματός τους εκτείνεται από 30cm έως 1mm περίπου. Παράγονται από ηλεκτρονικά κυκλώματα. Οι φούρνοι μικροκυμάτων με τους οποίους μαγειρεύουμε ή ζεσταίνουμε γρήγορα το φαγητό λειτουργούν με κύματα αυτής της περιοχής. Μικροκύματα χρησιμοποιούν και τα ραντάρ.

¹ Το πηνίο αντιδρά σε κάθε μεταβολή του ρεύματος. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη που επάγεται στο πηνίο, όταν μεταβάλλεται η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει είναι ανάλογη του ρυθμού με τον οποίο μεταβάλλεται το ρεύμα. Όταν το ρεύμα μεταβάλλεται πολύ γρήγορα, όπως στην περίπτωση που περιγράψαμε, το πηνίο πρακτικά μηδενίζει το ρεύμα αυτό.



Σχ. 2.26 Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στη λεπτομέρεια φαίνεται η περιοχή του ορατού φωτός.

Υπέρυθρα κύματα. Καλύπτουν την περιοχή από 1mm έως 7×10^{-7} m περίπου. Τα κύματα αυτά εκπέμπονται από τα θερμά σώματα και απορροφώνται εύκολα από τα περισσότερα υλικά. Η υπέρυθρη ακτινοβολία που απορροφάται από ένα σώμα αυξάνει το πλάτος της ταλάντωσης των σωματιδίων από τα οποία αποτελείται, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του.

Το ορατό φως. Είναι το μέρος εκείνο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανιχνεύει ο ανθρώπινος οφθαλμός. Το μήκος κύματος του ορατού φωτός κυμαίνεται από 400 nm έως 700 nm (δηλαδή από 400×10^{-9} m έως 700×10^{-9} m). Το ορατό φως παράγεται από την ανακατανομή των ηλεκτρονίων στα άτομα και στα μόρια. Κάθε υποπεριοχή του ορατού φάσματος προκαλεί στον άνθρωπο την αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος. Προσεγγιστικά τα μήκη κύματος των διαφόρων χρωμάτων του ορατού φάσματος είναι :

700 έως 630 nm	Ερυθρό
630 έως 590 nm	Πορτοκαλί
590 έως 560 nm	Κίτρινο
560 έως 480 nm	Πράσινο
480 έως 440 nm	Κυανό
440 έως 400 nm	Ιώδες

Μια ακτινοβολία που περιέχει μήκη κύματος σε μια πολύ στενή περιοχή χαρακτηρίζεται **μονοχρωματική**. Για παράδειγμα, μια ακτινοβολία από 490 έως 491 nm είναι μια πράσινη μονοχρωματική ακτινοβολία. Τέτοια ακτινοβολία μπορούμε να πάρουμε με τη χρήση ειδικών πηγών ή φίλτρων. Όταν χρησιμοποιούμε την έκφραση «μονοχρωματικό φως με μήκος κύματος 580 nm» στην πραγματικότητα εννοούμε φως σε μια στενή περιοχή μηκών κύματος γύρω στα 580 nm. Το απόλυτα μονοχρωματικό φως, δηλαδή το φως που αποτελείται μόνο από ένα μήκος κύματος, αποτελεί μια εξιδανίκευση. Τα λείζερ παράγουν φως που πλησιάζει πολύ στο απόλυτα μονοχρωματικό.

Υπεριώδης ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή καλύπτει τα μήκη κύματος από $3,8 \times 10^{-7}$ m έως 6×10^{-8} m περίπου. Ο Ήλιος είναι ισχυρή πηγή υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι υπεριώδεις ακτίνες είναι υπεύθυνες για το "μαύρισμα" όταν κάνουμε ηλιοθεραπεία, το καλοκαίρι. Μεγάλες δόσεις υπεριώδους ακτινοβολίας βλάπτουν τον ανθρώπινο οργανισμό. Το μεγαλύτερο

μέρος της υπεριώδους ακτινοβολίας, που φτάνει στη Γη από τον Ήλιο απορροφάται από τα άτομα και τα μόρια της ανώτερης ατμόσφαιρας (στρατόσφαιρα).

Το όζον της στρατόσφαιρας, απορροφά κατά κύριο λόγο την επικίνδυνη υπεριώδη ακτινοβολία. Σήμερα ανησυχούμε για την πιθανή καταστροφή αυτής της προστατευτικής ασπίδας ενάντια στις υπεριώδεις ακτίνες του Ήλιου. Το όζον της στρατόσφαιρας μειώνεται εξαιτίας εκτεταμένης χρήσης των χλωροφθορανθράκων, ενώσεων που χρησιμοποιούνται στα ψυγεία, τα κλιματιστικά τους ψεκαστήρες και αλλού.

Οι ακτίνες X (ή ακτίνες Röntgen) είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκη κύματος από 10^{-8} m έως 10^{-13} m περίπου. Η πιο κοινή αιτία παραγωγής ακτίνων X είναι η επιβράδυνση ηλεκτρονίων που προσκρούουν με μεγάλη ταχύτητα σε ένα μεταλλικό στόχο. Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται στην ιατρική, κυρίως για διαγνωστικούς σκοπούς (ακτινογραφίες), και στη μελέτη των διαφόρων κρυσταλλικών δομών. Οι ακτίνες X μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στους ζωντανούς οργανισμούς και γι' αυτό πρέπει να αποφεύγουμε την έκθεσή μας σ' αυτές χωρίς σοβαρό λόγο.

Οι ακτίνες γ. Είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ορισμένους ραδιενεργούς πυρήνες καθώς και σε αντιδράσεις πυρήνων και στοιχειωδών σωματιδίων ή ακόμα και κατά τη διάσπαση στοιχειωδών σωματιδίων. Τα μήκη κύματός τους αρχίζουν από 10^{-10} m και φτάνουν ως τα 10^{-14} m. Είναι πολύ διεισδυτικές και βλάπτουν τους οργανισμούς που τις απορροφούν.

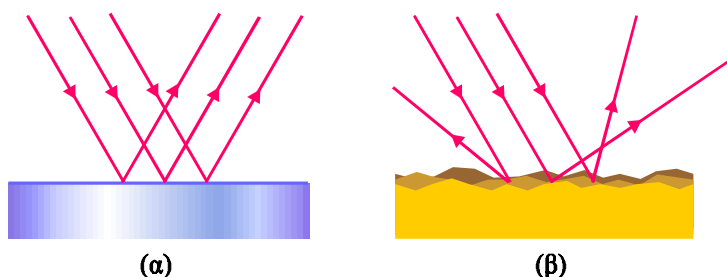
2-9 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

A. Ανάκλαση του φωτός

Όταν το φως που διαδίδεται σε ένα μέσο συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στο αρχικό μέσο διάδοσης και σε ένα άλλο, ένα μέρος του επιστρέφει στο αρχικό μέσο.

Στο σχήμα 2.27α βλέπουμε πώς ανακλώνται οι ακτίνες μιας φωτεινής παράλληλης δέσμης που προσπίπτει πάνω σε λεία και στιλπνή επιφάνεια, (κάτοπτρο). Οι ανακλώμενες ακτίνες εξακολουθούν να είναι παράλληλες μεταξύ τους και η ανάκλαση αυτή ονομάζεται **κατοπτρική ανάκλαση**.

Εάν η επιφάνεια πάνω στην οποία προσπίπτει η δέσμη έχει ανωμαλίες, οι ακτίνες που την αποτελούν ανακλώνται σε διάφορες διευθύνσεις (σχ. 2.27β) και σκορπίζονται στο γύρω χώρο. Η ανάκλαση αυτή, στην οποία οι ανακλώμενες ακτίνες δεν είναι πια παράλληλες, ονομάζεται **διάχυση**.



Σχ. 2.27 (α) Κατοπτρική ανάκλαση (β) διάχυση



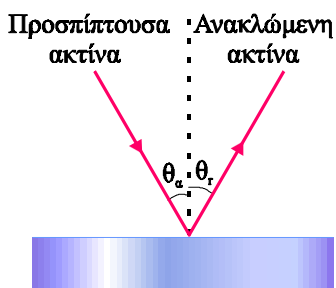
Εικ. 2.7 Διάταξη για την πειραματική μελέτη της ανάκλασης του φωτός.

Τη νύχτα, αν ο δρόμος είναι στεγνός, το φως από τους προβολείς του αυτοκινήτου διαχέεται και έτσι ο δρόμος φαίνεται καλά. Εάν όμως έχει βρέξει, το νερό γεμίζει τις λακκούβες και το φως των προβολέων ανακλάται κατοπτρικά πάνω στην επιφάνεια του νερού με αποτέλεσμα να μη φωτίζονται όλα τα σημεία του δρόμου, ο οποίος, στην περίπτωση αυτή δε διακρίνεται καλά.

Στη συνέχεια, όταν χρησιμοποιούμε τον όρο ανάκλαση θα εννοούμε κατοπτρική ανάκλαση.



Εικ.2.8 Το είδωλο που βλέπουμε στην επιφάνεια της λίμνης προέρχεται από ακτίνες που φτάνουν σε μας αφού ανακλαστούν στην επιφάνειά της.



Σχ. 2.28 Ανάκλαση φωτεινής ακτίνας. θ_a είναι η γωνία πρόσπτωσης και θ_r η γωνία ανάκλασης. Ισχύει $\theta_a = \theta_r$.

Έστω ότι μια φωτεινή ακτίνα προσπίπτει υπό γωνία πάνω σε μια λεία επιφάνεια και ανακλάται (σχ. 2.28). Τη γωνία ανάμεσα στην αρχική διεύθυνση της ακτίνας και στην κάθετη στην επιφάνεια την ονομάζουμε **γωνία πρόσπτωσης (θ_a)**, και τη γωνία ανάμεσα στην κάθετη στην επιφάνεια και στη διεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας, **γωνία ανάκλασης (θ_r)**, Πειραματικά προκύπτει ότι :

1. Η **προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη και η κάθετη στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.**
2. Η **γωνία ανάκλασης θ_r , είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης θ_a .**

$$\theta_r = \theta_a$$

B. Διάθλαση του φωτός

Όταν το φως συναντήσει την επιφάνεια που διαχωρίζει το μέσον στο οποίο διαδίδεται από ένα άλλο διαφανές μέσο, στο οποίο διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα, ένα μέρος του ανακλάται και το υπόλοιπο μέρος του διαθλάται, δηλαδή περνάει στο δεύτερο μέσο, αλλάζοντας πορεία.

Η γωνία που σχηματίζει η διαθλώμενη ακτίνα με την κάθετη στην επιφάνεια λέγεται γωνία διάθλασης (σχ. 2.29).

Γνωρίζουμε ότι το φως διαδίδεται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα στο κενό

Ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό (c), προς την ταχύτητά του (v) στο υλικό

$$n = \frac{c}{v}$$

ονομάζεται δείκτης διάθλασης (n) του οπτικού υλικού.

Ο δείκτης διάθλασης είναι καθαρός αριθμός και για οποιοδήποτε υλικό είναι μεγαλύτερος της μονάδας.

Πειραματικά προκύπτει ότι

1. Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων, στο σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.
2. Όταν το φως είναι μονοχρωματικό, ο λόγος του ημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης (θ_a) προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης (θ_b) είναι ίσος με τον αντίστροφο λόγο των δεικτών διάθλασης των δύο μέσων.

$$\frac{\eta\mu\theta_a}{\eta\mu\theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad \text{ή} \quad n_a \eta\mu\theta_a = n_b \eta\mu\theta_b \quad (2.16)$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται και **νόμος του Snell** (Σνέλ).

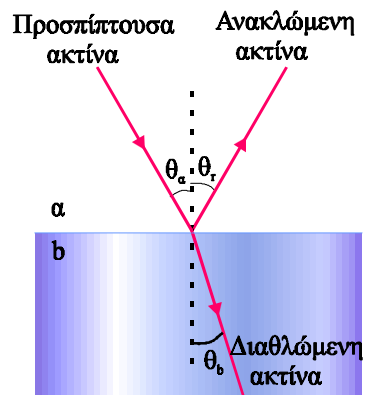
Η σχέση (2.16) δείχνει ότι όταν μια ακτίνα διέρχεται από ένα υλικό a σε ένα υλικό b στο οποίο η ταχύτητα του φωτός είναι μικρότερη ($n_b > n_a$), τότε η γωνία διάθλασης είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή η διαθλώμενη ακτίνα πλησιάζει στην κάθετη, στο σημείο πρόσπτωσης. Αντίθετα αν η ταχύτητα του φωτός στο δεύτερο υλικό (b) είναι μεγαλύτερη της ταχύτητάς του στο πρώτο ($n_b < n_a$), η διαθλώμενη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετη.

Ο δείκτης διάθλασης του κενού είναι εξ ορισμού ίσος με τη μονάδα, επομένως όταν μια ακτίνα διέρχεται από το κενό σε ένα υλικό, πλησιάζει πάντα την κάθετη.

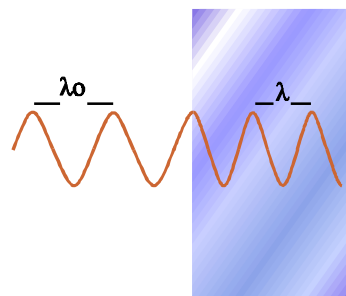
Όταν μια ακτίνα προσπίπτει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια, $\theta_a=0$, $\eta\mu\theta_a=0$ και από (2.16) προκύπτει ότι και $\theta_b=0$. Δηλαδή η ακτίνα δεν αλλάζει κατεύθυνση.

Από τους νόμους της διάθλασης προκύπτει ότι η πορεία που ακολουθεί μια ακτίνα είναι ίδια είτε αυτή μεταβαίνει από το υλικό a στο b είτε αντίστροφα.

Όταν το μονοχρωματικό φως διέρχεται από ένα υλικό σε κάποιο άλλο, η συχνότητά του (f), δεν αλλάζει, διότι ο αριθμός των μεγίστων που φτάνουν στη διαχωριστική επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των μεγίστων που στον ίδιο χρόνο την εγκαταλείπουν. Αφού η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το φως είναι διαφορετική στα δυο μέσα και η συχνότητα της ακτινοβολίας μένει σταθερή, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας πρέπει να είναι διαφορετικό στα δυο μέσα. ($c = \lambda f$).



Σχ. 2.29 Ανάκλαση και διάθλαση φωτεινής μονοχρωματικής δέσμης κατά τη μετάβαση από ένα διαφανές μέσο σε άλλο.



Σχ. 2.30 Μονοχρωματική ακτινοβολία περνάει από τον αέρα σε ένα διαφανές μέσο. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας μειώνεται.

Εάν το ένα μέσο είναι το κενό ή – στην πράξη - ο αέρας τότε

$$c = \lambda_o f$$

όπου λ_o το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο κενό.

Σε κάθε υλικό ισχύει

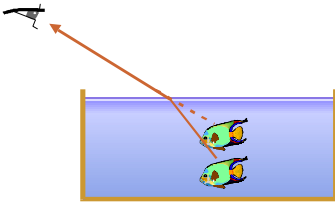
$$v = \lambda f$$

Διαιρώντας τις δύο σχέσεις προκύπτει

$$\frac{c}{v} = \frac{\lambda_o}{\lambda} \quad \text{ή} \quad n = \frac{\lambda_o}{\lambda}$$

$$\text{οπότε} \quad \lambda = \frac{\lambda_o}{n}$$

επομένως **το μήκος κύματος μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας που μεταβαίνει από το κενό ή τον αέρα σε κάποιο άλλο μέσο μειώνεται.**

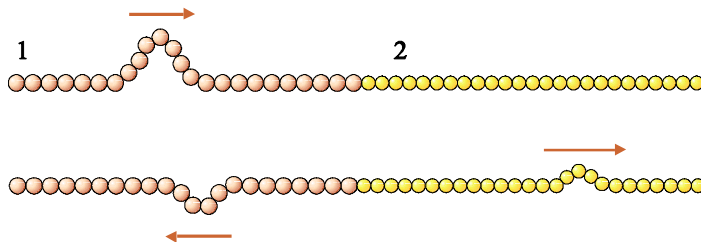


Σχ. 2.31 Εξαιτίας της διάθλασης ένα αντικείμενο μέσα στο νερό φαίνεται να βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια από όσο είναι πραγματικά.

Στο φαινόμενο της διάθλασης οφείλονται πολλές οφθαλμαπάτες, όπως το φαινομενικό σπάσιμο μιας ράβδου που ένα τμήμα της είναι βυθισμένο στο νερό. Μια άλλη οφθαλμαπάτη φαίνεται στο σχήμα 2.31. Το μάτι αντιλαμβάνεται το φως σαν να διαδίδεται ευθύγραμμα. Έτσι βλέπει το ψάρι στην προέκταση της ακτίνας (εστιγμένη γραμμή), πιο κοντά στην επιφάνεια από ότι είναι πραγματικά.

Μελετήσαμε τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης για το φως κι αυτό γιατί ο ρόλος των φαινομένων στον κλάδο της φυσικής που μελετά το φως και ονομάζεται **οπτική** είναι σημαντικός, αλλά και γιατί, με το φως τα φαινόμενα είναι εύκολα παρατηρήσιμα. Ωστόσο πρέπει να επισημάνουμε ότι τα φαινόμενα αυτά δεν περιορίζονται μόνο στα φωτεινά κύματα αλλά είναι κοινά σε όλα τα είδη κυμάτων, ηλεκτρομαγνητικά και μηχανικά.

Σχ. 2.32 Όταν ο κυματικός παλμός που διαδίδεται στο μέσο 1 συναντήσει το μέσο 2 εν μέρει ανακλάται και εν μέρει συνεχίζει στο μέσο 2, με άλλη ταχύτητα.



Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα ραδιοκύματα ανακλώνται σε μεταλλικές επιφάνειες. Θα έχετε παρατηρήσει τις κεραίες εκπομπής με μεταλλικό "κάτοπτρο" ή τις κεραίες δορυφορικής λήψης που επίσης φέρουν κάτοπτρο. Οι μεταλλικές επιφάνειες παίζουν για τα ραδιοκύματα το ρόλο που παίζουν οι καθρέφτες για το φως. Σε πολλές κεραίες εκπομπής, υπάρχει μια παραβολική μεταλλική επιφάνεια (κάτοπτρο). Χωρίς το κάτοπτρο, το κύμα που παράγεται από το ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο θα διασκορπιζόταν σε όλο το χώρο γύρω του. Με το κάτοπτρο, μετά την ανάκλασή του το κύμα διαδίδεται προς μια μόνο κατεύθυνση. Το κύμα αυτό είναι ικανό να φτάσει πολύ μακριά χωρίς σημαντική εξασθένηση. Στις κεραίες λήψης, το κάτοπτρο ανακλά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που πέφτουν πάνω του και τα εστιάζει στην κεραία, με αποτέλεσμα το σήμα στην κεραία να είναι πιο ισχυρό.



Εικ. 2.9 Παραβολικές κεραίες ραδιοτηλεσκόπιου.

Στον πίνακα που ακολουθεί αναφέρονται οι δείκτες διάθλασης ορισμένων υλικών, για το κίτρινο φως με μήκος κύματος $\lambda_0 = 589\text{ nm}$.

Υλικό	Δείκτης Διάθλασης	Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Στερεά		Υγρά	
Πάγος	1,309	Νερό	1,333
Πυριτική στεφανύαλος	1,52	Αιθυλική αλκοόλη	1,361
Μολυβδύαλος (κρύσταλλο)	1,66	Βενζόλιο	1,501
Φθορίτης	1,434	Αέρια	
Χλωριούχο νάτριο	1,544	Αέρας	1,000293
Αδάμας	2,419	Διοξείδιο του άνθρακα	1,00045

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.3

Ακτίνα φωτός μήκους κύματος $\lambda_0 = 590 \times 10^{-9}\text{ m}$ μεταβαίνει από τον αέρα σε γυαλί, που έχει δείκτη διάθλασης 1,52. Η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας είναι $\theta_a = 30^\circ$. Να υπολογίσετε:

- α) τη συχνότητα της ακτινοβολίας στον αέρα και στο γυαλί.
- β) την ταχύτητα διάδοσης στο γυαλί.
- γ) Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο γυαλί.
- δ) τη γωνία διάθλασης της ακτίνας.

Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι $c = 3 \times 10^8\text{ m/s}$.

Απάντηση :

- α) Όταν το φως διαδίδεται στον αέρα η ταχύτητά του είναι σχεδόν όση και η ταχύτητά του στο κενό δηλαδή c . Από τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε

$$c = \lambda_o f \quad \text{ή} \quad f = \frac{c}{\lambda_o} = 5 \times 10^{14}\text{ Hz}$$

Η συχνότητα μιας ακτινοβολίας δεν αλλάζει όταν το φως μεταβαίνει από το ένα μέσο στο άλλο. Επομένως, και στο γυαλί η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι $f = 5 \times 10^{14}\text{ Hz}$.

β) Ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού είναι

$$n = \frac{c}{v} \quad \text{επομένως} \quad v = \frac{c}{n} = 1,973 \times 10^8 \text{ m/s}$$

γ) Για να βρούμε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο γυαλί χρησιμοποιούμε πάλι τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής για τη διάδοσή της στο γυαλί.

$$v = \lambda f \quad \text{οπότε} \quad \lambda = \frac{v}{f} = 395 \times 10^{-9} \text{ m}$$

δ) Σύμφωνα με το νόμο του Snell

$$n_a \eta \mu \theta_a = n_b \eta \mu \theta_b$$

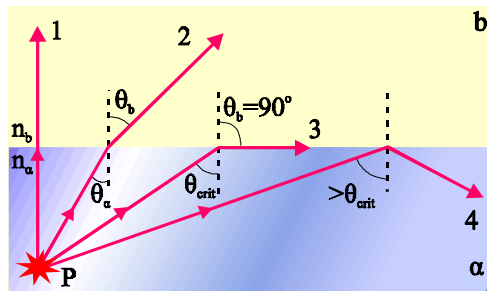
Το αρχικό μέσο (α) είναι ο αέρας με δείκτη διάθλασης $n_a = 1$, ενώ μέσο b είναι το γυαλί με δείκτη διάθλασης $n_b = n$. Επομένως

$$\eta \mu \theta_a = n \eta \mu \theta_b \quad \text{άρα} \quad \eta \mu \theta_b = \frac{\eta \mu 30^\circ}{n} = 0,329, \quad \theta_b = 19,2^\circ$$

2-10 ΟΛΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ

Το σχήμα 2.33 δείχνει μερικές ακτίνες μονοχρωματικού φωτός που εκπέμπονται από μια σημειακή πηγή P, μέσα σε ένα υλικό α με δείκτη διάθλασης n_a . Οι ακτίνες προσπίπτουν στην επιφάνεια που χωρίζει το υλικό α από ένα δεύτερο διαφανές υλικό b που έχει δείκτη διάθλασης n_b .

Σχ. 2.33 Φωτεινές ακτίνες που εκπέμπονται από τη σημειακή πηγή P, προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφανών μέσων. Αν $n_a > n_b$ κάποιες ακτίνες υφίστανται ολική ανάκλαση



Έστω ότι $n_a > n_b$. Από το νόμο του Snell, για τη γωνία διάθλασης μιας τέτοιας ακτίνας έχουμε

$$\eta \mu \theta_b = \frac{n_a}{n_b} \eta \mu \theta_a \quad (2.17)$$

Επειδή ο λόγος n_a/n_b είναι μεγαλύτερος της μονάδας, το $\eta \mu \theta_b$ είναι μεγαλύτερο του $\eta \mu \theta_a$, επομένως $\theta_b > \theta_a$. Άρα υπάρχει μια τιμή της θ_a – μικρότερη από τις 90° – για την οποία ο νόμος του Snell δίνει $\eta \mu \theta_b = 1$ επομένως $\theta_b = 90^\circ$. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση της ακτίνας 3 του σχήματος 2.33. Η γωνία θ_a για την οποία η διαθλώμενη ακτίνα κινείται παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων ονομάζεται **κρίσιμη γωνία (ή οριακή γωνία)** και συμβολίζεται με θ_{crit} . Όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνει μεγαλύτερη από τη θ_{crit} , η ακτίνα ανακλάται ολικά από τη διαχωριστική επιφάνεια.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ολική εσωτερική ανάκλαση**. Μια τέτοια περίπτωση παριστάνεται με την ακτίνα 4 στο σχήμα 2.33. Η ακτίνα 4 ανακλάται από τη διαχωριστική επιφάνεια σαν να έπεσε πάνω σε ένα τέλειο κάτοπτρο. Η ακτίνα αυτή, όπως και όλες οι ακτίνες που υφίστανται ολική ανάκλαση, ακολουθούν το νόμο της ανάκλασης δηλαδή, η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης.

Μπορούμε να βρούμε την κρίσιμη γωνία θ_{crit} χρησιμοποιώντας το νόμο του Snell. Αν στη σχέση (2.17) θέσουμε $\theta_b=90^\circ$ προκύπτει

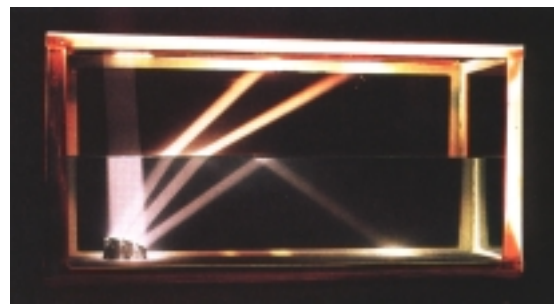
$$n_a \sin \theta_{crit} = n_b \quad (2.18)$$

Η σχέση (2.18) ισχύει μόνο όταν $n_a > n_b$, διαφορετικά θα έδινε $n_a \sin \theta_{crit} > 1$, που είναι αδύνατο.

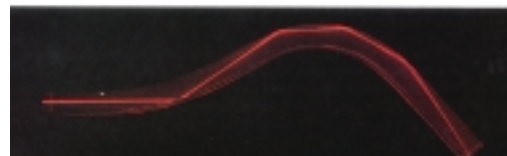
Επομένως,

το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης συμβαίνει μόνο όταν το φως μεταβαίνει από μέσο (α) σε μέσο (β) για τα οποία ισχύει $n_a > n_b$. Για να έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση πρέπει η γωνία πρόσπτωσης να είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης γωνίας.

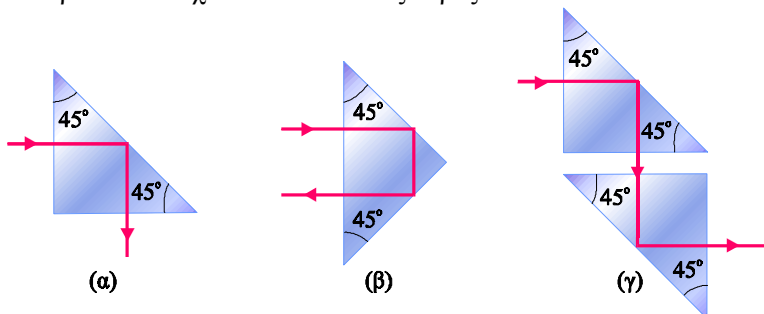
Για το φως που κατευθύνεται από το γυαλί στον αέρα, η κρίσιμη γωνία είναι $41,1^\circ$. Η κρίσιμη γωνία είναι γενικά μικρή, όταν ένα μέσο έχει μεγάλο δείκτη διάθλασης και το άλλο είναι ο αέρας. Στο διαμάντι η κρίσιμη γωνία είναι 24° . Η μικρή κρίσιμη γωνία είναι ο λόγος που ένα κατεργασμένο διαμάντι (με πολλές έδρες) λαμποκοπά στο φως. Το μεγαλύτερο μέρος του φωτός που εισέρχεται στο διαμάντι, υφίσταται ολική ανάκλαση στις διάφορες έδρες του. Για να εξέλθει πρέπει να προσπέσει σχεδόν κάθετα στις έδρες του.



Εικ. 2.10 Στη διάταξη φαίνεται τόσο η διάθλαση όσο και η ολική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια νερού – αέρα.



Εικ. 2.11 Η μετάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις οπτικές ίνες στηρίζεται στο φαινόμενο της ολικής ανάκλασης.



Σχ. 2.34 Πρίσματα ολικής ανάκλασης το (γ) δείχνει πώς λειτουργεί το περισκόπιο.

Εάν χρησιμοποιήσουμε το κατάλληλο πρίσμα, μπορούμε με το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης να μεταβάλουμε την κατεύθυνση μιας ακτίνας φωτός. Στο σχήμα 2.34 παρατηρούμε τέτοιες περιπτώσεις. Στο σχήμα 2.34α η φωτεινή ακτίνα με ολική εσωτερική ανάκλαση εκτρέπεται κατά 90° ενώ στο σχήμα 2.34β εκτρέπεται κατά 180° (αντιστρέφεται η πορεία της). Τα περισκόπια στα υποβρύχια χρησιμοποιούν συνδυασμό δύο πρισμάτων της περίπτωσης (α) (σχ.2.34γ) ώστε οι άνθρωποι στο εσωτερικό τους να μπορούν να βλέπουν τι γίνεται πάνω από την επιφάνεια του νερού.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2.4

Υπολογίστε την κρίσιμη (οριακή) γωνία στη διαχωριστική επιφάνεια νερού-αέρα. Ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι 1,33.

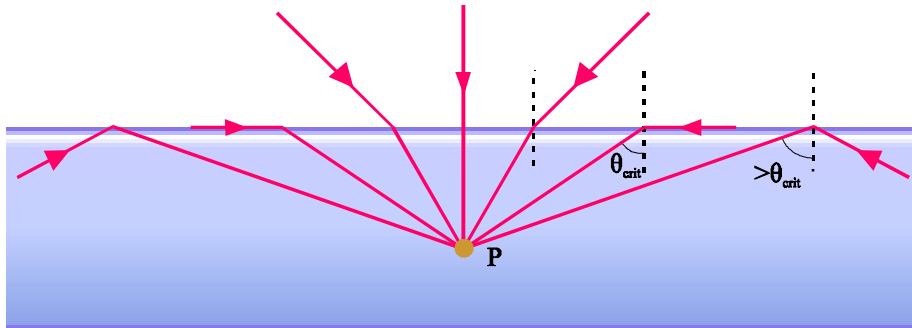
Απάντηση :

Η κρίσιμη γωνία δίνεται από τη σχέση $n_a \sin \theta_{crit} = n_b$

Μέσο α είναι το νερό με $n_a = 1.33$ και μέσο b, ο αέρας με $n_b = 1$.

Αντικαθιστώντας παίρνουμε ότι $\sin \theta_{crit} = 0,75$ επομένως $\theta_{crit} = 49^\circ$.

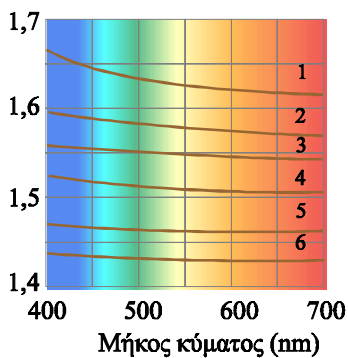
Όταν ένας δύτες βρίσκεται μέσα στο νερό και κοιτάζει προς τα πάνω, μπορεί να δει έξω από το νερό, μόνο όταν κοιτάζει με γωνία μικρότερη της κρίσιμης. Όταν κοιτάζει με γωνία μεγαλύτερη της κρίσιμης, οι φωτεινές ακτίνες που φτάνουν στα μάτια του προέρχονται από ολική ανάκλαση του φωτός στη διαχωριστική επιφάνεια νερού αέρα και αυτό που βλέπει είναι ο βυθός (σχ. 2.35).



Σχ. 2.35 Ο δύτες που βρίσκεται στο σημείο P, δέχεται φωτεινές ακτίνες από τον αέρα αλλά και ακτίνες που προέρχονται από ολική ανάκλαση στην επιφάνεια του νερού. Έτσι, κοιτάζοντας στην επιφάνεια βλέπει τι συμβαίνει στο βυθό.

2-11 ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΜΟΣ - ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Δείκτης διάθλασης



Σχ. 2.36 Μεταβολή του δείκτη διάθλασης ορισμένων υλικών σε συνάρτηση με το μήκος κύματος. Τα υλικά είναι: (1) πυριτική μολυβδύαλος (κρύσταλλο) (2) βορική μολυβδύαλος (κρύσταλλο) (3) χαλαζίας (4) πυριτική στεφανύαλος (5) τηγμένος χαλαζίας (6) φθορίτης.

Στο κενό η ταχύτητα του φωτός είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος. Μέσα στην ύλη, όμως, η ταχύτητα διάδοσης του φωτός εξαρτάται από το μήκος κύματος.

Αυτό σημαίνει ότι και ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού, δεν είναι ίδιος για όλες τις ακτινοβολίες αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο υλικό.

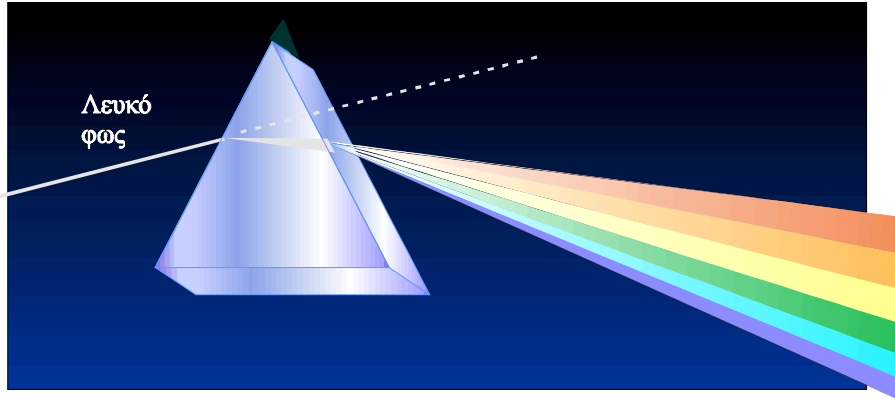
Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας ονομάζεται διασκεδασμός.

Στο σχήμα 2.36 βλέπουμε την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης έξι διαφορετικών υλικών, από το μήκος του κύματος. Η τιμή του συνήθως μειώνεται, όταν αυξάνεται το μήκος κύματος. Ο δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος για το ιώδες φως και μικρότερος για το ερυθρό.

Έστω ότι μια μονοχρωματική ακτίνα φωτός, προσπίπτει πάνω σ' ένα πρίσμα, όπως στο σχήμα 2.37. Η ακτίνα διαθλάται κατά την είσοδό της στο πρίσμα, αλλά και κατά την έξοδό της με αποτέλεσμα να εκτρέπεται από την αρχική της διεύθυνση κατά μια γωνία δ , που ονομάζεται **γωνία εκτροπής**.

Ας δούμε τώρα τι θα συμβεί όταν μια δέσμη λευκού φωτός πέσει πάνω σε ένα πρίσμα. Το λευκό φως προέρχεται από την ανάμιξη όλων των χρωμάτων που αποτελούν το ορατό φως. Επομένως αποτελείται από πολλά μήκη κύματος. Τα διάφορα χρώματα από τα οποία αποτελείται το λευκό φως έχουν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Η εκτροπή που προκαλεί το πρίσμα αυξάνεται όταν αυξάνεται ο δείκτης διάθλασης. Ο δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος στα μικρότερα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο ιώδες χρώμα. Έτσι το ιώδες υφίσταται τη μέγιστη εκτροπή, το ερυθρό την ελάχιστη. Η γωνία εκτροπής για τα άλλα χρώματα κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές που αντιστοιχούν στο ερυθρό και το ιώδες.

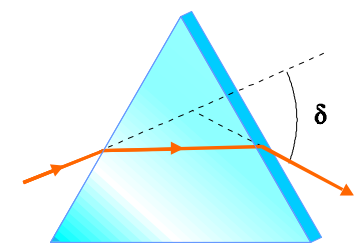
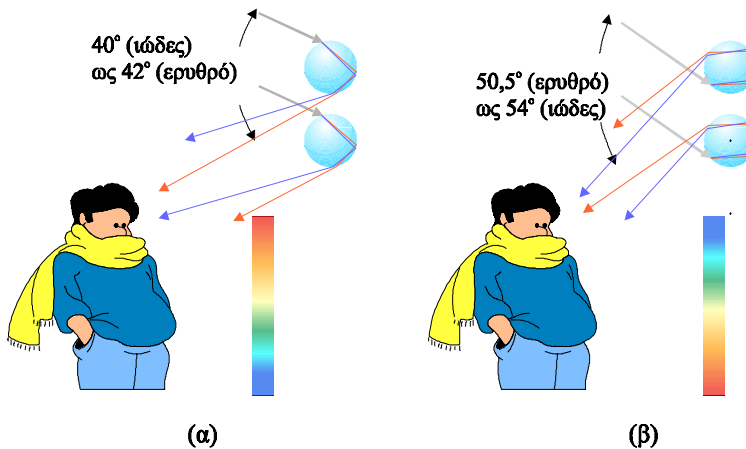
Όταν το φως αναδυθεί από το πρίσμα, δεν αποτελεί πια μια παράλληλη δέσμη (επειδή η εκτροπή των χρωμάτων που το συνθέτουν είναι διαφορετική), αλλά διασκορπίζεται σε μια δέσμη σχήματος βεντάλιας (σχ.2.39) στην οποία το λευκό φως έχει αναλυθεί σε μια συνεχή ταινία από διάφορα χρώματα, που αποτελούν **το φάσμα του λευκού φωτός**.



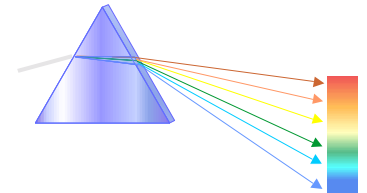
Σχ. 2.39

Ο Newton, μελετώντας το φαινόμενο της ανάλυσης του λευκού φωτός από ένα πρίσμα, διατύπωσε για πρώτη φορά την άποψη ότι το λευκό φως αποτελεί τη σύνθεση πολλών χρωμάτων, των χρωμάτων στα οποία αναλύεται με το πρίσμα. Τα χρώματα αυτά ο Newton τα ονόμασε «απλά» γιατί δεν αναλύονται με το πρίσμα.

Το ουράνιο τόξο, το οποίο δημιουργείται μετά από βροχή αν η θέση του Ήλιου είναι κατάλληλη, οφείλεται σε συνδυασμό των φαινομένων του διασκεδασμού και της ολικής εσωτερικής ανάκλασης.



Σχ. 2.37 Μια ακτίνα μονοχρωματικού φωτός εκτρέπεται από την αρχική πορεία της όταν περνάει από ένα πρίσμα



Σχ. 2.38 Η ανάλυση που υφίσταται το λευκό φως, όταν περνά από ένα πρίσμα, κάνει ορατά τα διάφορα χρώματα από τα οποία αποτελείται.

Σχ. 2.40 (α) Οι σταγόνες του νερού αναλύουν το λευκό φως στο φάσμα του. Ο παρατηρητής βλέπει ταυτόχρονα ένα αριθμό σταγόνων. Τις σταγόνες που βρίσκονται ψηλότερα στο πεδίο της όρασής του τις βλέπει κόκκινες γιατί από τα χρώματα στα οποία αναλύουν το φως μόνο το κόκκινο πέφτει στα μάτια του. Τις σταγόνες που βρίσκονται χαμηλότερα τις βλέπει ιώδεις για τον ίδιο λόγο. Τις ενδιάμεσες σταγόνες τις βλέπει να παίρνουν ανάλογα με τη θέση τους διαδοχικά όλα τα χρώματα του φάσματος ξεκινώντας από το κόκκινο και καταλήγοντας στο ιώδες. (β) Σχηματισμός ανεστραμμένου ουράνιου τόξου.

Στο σχήμα 2.40α παριστάνεται ο τρόπος σχηματισμού του. Το φως που έρχεται πίσω από τον παρατηρητή πέφτει πάνω στα σταγονίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, διαθλάται μέσα σ’ αυτά και, στη συνέχεια, αφού υποστεί ολική εσωτερική ανάκλαση στην οπίσθια πλευρά τους, βγαίνει διαθλώμενο από τη σταγόνα και φτάνει στον παρατηρητή. Ο διασκεδασμός έχει ως αποτέλεσμα την ανάλυση του λευκού φωτός στο φάσμα του. Μερικές φορές φαίνεται και ένα δεύτερο ουράνιο τόξο, λίγο μεγαλύτερο, με ανεστραμμένη τη σειρά των χρωμάτων (σχήμα 2.40β). Το τόξο αυτό προέρχεται από δύο εσωτερικές ανακλάσεις στο εσωτερικό των σταγονιδίων.



Εικ. 2.12 Στην εικόνα φαίνεται αμυδρά πάνω από το ουράνιο τόξο και μια ανεστραμμένη εικόνα του.

ΣΥΝΟΨΗ

Κύμα ονομάζεται μια διαταραχή που διαδίδεται. Κατά τη διάδοση του κύματος μεταφέρεται ενέργεια και ορμή από ένα σημείο του χώρου σε κάποιο άλλο όχι όμως και ύλη.

Η **θεμελιώδης κυματική εξίσωση** είναι $v = \lambda f$

Η εξίσωση ενός αρμονικού κύματος είναι

$$y = A \eta \mu 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

Σύμφωνα με την **αρχή της επαλληλίας**, εάν δύο ή περισσότερα κύματα διαδίδονται σε ένα μέσο η απομάκρυνση ενός σημείου του μέσου από τη θέση ισορροπίας του είναι ίση με τη συνισταμένη των απομακρύνσεων που οφείλονται στα επιμέρους κύματα.

Το αποτέλεσμα της ταυτόχρονης διάδοσης δύο ή περισσότερων κυμάτων στο ίδιο μέσο ονομάζεται **συμβολή των κυμάτων**.

Η συμβολή δύο κυμάτων ίδιου πλάτους που προέρχονται από σύμφωνες πηγές και διαδίδονται σε διαφορετικές διευθύνσεις, έχει ως αποτέλεσμα τα σημεία για τα οποία η διαφορά των αποστάσεών τους από τις δύο πηγές είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ , να ταλαντώνονται έντονα.

Τα σημεία για τα οποία η διαφορά των αποστάσεων από τις δύο πηγές είναι περιττό πολλαπλάσιο του μισού μήκους κύματος ($\lambda/2$) μένουν διαρκώς ακίνητα.

Όλα τα υπόλοιπα σημεία του μέσου κάνουν ταλάντωση με ενδιάμεσο πλάτος.

Στάσιμο κύμα ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων ίδιου πλάτους και ίδιας συχνότητας που διαδίδονται στο ίδιο μέσο σε αντίθετες κατευθύνσεις.

Στο στάσιμο κύμα ορισμένα σημεία είναι μόνιμα ακίνητα (**δεσμοί**), ενώ άλλα κάνουν ταλάντωση με μέγιστο πλάτος (**κοιλίες**). Όλα τα άλλα σημεία του μέσου κάνουν ταλάντωση με πλάτος που εξαρτάται από τη θέση τους. Η απόσταση δύο διαδοχικών δεσμών ή κοιλιών είναι $\lambda/2$.

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός c .

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο, τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ισχύει $\frac{E}{B} = c$, όπου E και B τα μέτρα της έντασης του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά όπως και τα μηχανικά κύματα υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από την επιτάχυνση ηλεκτρικών φορτίων.

Οι διάφορες περιοχές του **φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας** είναι : Τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, οι υπέρυθρες ακτίνες, το ορατό φως, οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γ.

Κατά την ανάκλαση :

Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη και η κάθετη στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Η γωνία ανάκλασης θ_r είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης θ_a

Δείκτης διάθλασης n , ενός διαφανούς υλικού ονομάζεται ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό (c) , προς την ταχύτητά του v στο υλικό.

$$n = \frac{c}{v}$$

Κατά τη διάθλαση

Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων, στο σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Όταν το φως είναι **μονοχρωματικό**, ο λόγος του ημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης (θ_a) προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης (θ_b) είναι ίσος με τον αντίστροφο λόγο των δεικτών διάθλασης των δύο μέσων.

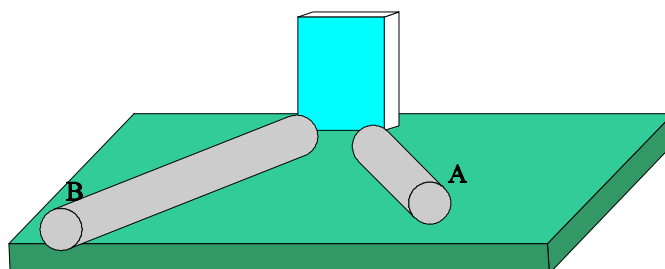
Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο σε άλλο με μικρότερο δείκτη διάθλασης και η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη έχουμε **ολική εσωτερική ανάκλαση**.

Διασκεδασμός ονομάζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Όταν λευκό φως προσπίπτει σ' ένα πρίσμα, λόγω διασκεδασμού, αναλύεται στο φάσμα του.

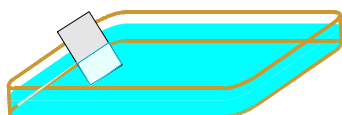
1. Ανάκλαση του ήχου.

Όλα τα κύματα ανακλώνται αν προσπέσουν σε εμπόδιο. Μπορείτε να διαπιστώσετε την ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων και να επιβεβαιώσετε ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης. Θα χρειασθείτε ένα ρολόι (πηγή ήχου) δύο σωλήνες κατασκευασμένους από χαρτόνι και ένα βιβλίο (ανακλαστική επιφάνεια). Τοποθετήστε τους σωλήνες και το βιβλίο πάνω στο τραπέζι όπως στο σχήμα 2.41. Μπροστά στο άκρο του ενός σωλήνα (Α) τοποθετήστε το ρολόι και στο άκρο του άλλου σωλήνα (Β) βάλτε το αφτί σας. Οι δύο άλλες άκρες των σωλήνων πρέπει να απέχουν λίγα εκατοστά από το βιβλίο (ανακλαστική επιφάνεια). Μεταβάλλοντας τις γωνίες που σχηματίζουν οι σωλήνες με την ανακλαστική επιφάνεια, θα διαπιστώσετε ότι ο ήχος ακούγεται δυνατά και καθαρά όταν οι δύο σωλήνες σχηματίζουν ίσες γωνίες με την κάθετη στην ανακλαστική επιφάνεια.



Σχ. 2.41

2. Ένα ουράνιο τόξο στο ταβάνι



Σχ. 2.42

Μέσα σε μία λεκάνη που περιέχει λίγο νερό τοποθετήστε σε πλάγια θέση ένα καθρεφτάκι του οποίου ένα μέρος να είναι βυθισμένο μέσα στο νερό. Τοποθετήστε τη λεκάνη έτσι ώστε το φως του ήλιου να πέφτει πάνω στον καθρέφτη. Δίνοντας την κατάλληλη κλίση στον καθρέφτη θα δείτε στο ταβάνι το φάσμα του ηλιακού φωτός. Εξηγήστε το φαινόμενο.

3. Φωτεινός πίδακας



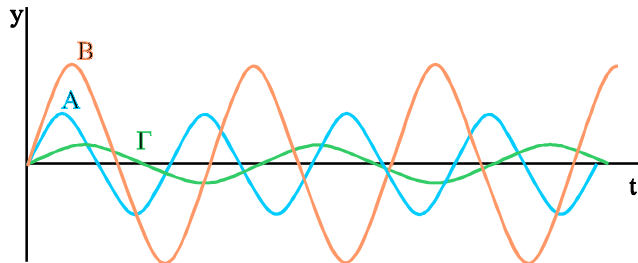
Σχ. 2.43

Θα χρειαστείτε ένα ισχυρό φακό που μπορεί να εστιάζει το φως του και ένα διαφανές πλαστικό ποτήρι με μια τρύπα διαμέτρου 3 mm περίπου, στο πλευρικό του τοίχωμα, κοντά στη βάση του.

Γεμίστε το ποτήρι με νερό και φωτίστε το όπως φαίνεται στο σχήμα. Αν το δωμάτιο είναι σκοτεινό, θα παρατηρήσετε ότι το φως δείχνει να παγιδεύεται μέσα στον πίδακα του νερού, μέχρι ένα σημείο. Εξηγήστε το φαινόμενο.

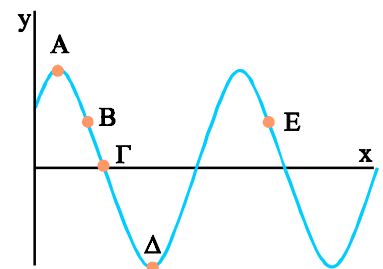
Μηχανικά κύματα

- 2.1 Η ταχύτητα ενός ηχητικού κύματος εξαρτάται
 α) από τη συχνότητα του ήχου.
 β) από την ένταση του ήχου.
 γ) από το υλικό στο οποίο διαδίδεται το κύμα.
 δ) από το μήκος κύματος.
 Επιλέξτε τη σωστή πρόταση.
- 2.2 Τρεις πηγές Α, Β και Γ δημιουργούν ηχητικά κύματα στον αέρα. Το σχήμα 2.44 παριστάνει γραφικά την ταλάντωση των τριών πηγών σε συνάρτηση με το χρόνο.



Σχ. 2.44

- α) Ποιο κύμα έχει μεγαλύτερο πλάτος;
 β) Ποιο κύμα έχει μεγαλύτερο μήκος;
- 2.3 Το σχήμα 2.45 παριστάνει το στιγμιότυπο ενός αρμονικού κύματος
- 1) Ποιο από τα σημεία Α, Β, Γ έχει αυτή τη στιγμή
 - α) μεγαλύτερη ταχύτητα κατά την ταλάντωση του;
 - β) μεγαλύτερη επιτάχυνση;
 - 2) Επιλέξτε από τα Α, Β, Γ, Δ και Ε δύο σημεία
 - α) που οι φάσεις τους διαφέρουν κατά π .
 - β) που οι φάσεις τους διαφέρουν κατά 2π .
 - γ) που απέχουν απόσταση λ .
- 2.4 Κατά μήκος των χορδών 1 και 2 (που είναι κατασκευασμένες από το ίδιο υλικό, έχουν το ίδιο πάχος και τις έχουμε τεντώσει με την ίδια δύναμη), διαδίδονται δύο εγκάρσια αρμονικά κύματα. Το κύμα στη χορδή 1 έχει διπλάσια συχνότητα και το μισό πλάτος από το κύμα στη χορδή 2. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές;
- α) Η ταχύτητα διάδοσης των δύο κυμάτων στις δύο χορδές είναι ίδια.
 - β) Το μήκος κύματος στη χορδή 2 είναι διπλάσιο από το μήκος κύματος στη χορδή 1.
 - γ) Η μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης είναι μεγαλύτερη στα σωματίδια της χορδής 1.
 - δ) Η μέγιστη επιτάχυνση ταλάντωσης είναι μεγαλύτερη στα σωματίδια της χορδής 1.
- 2.5 Οι εξισώσεις που ακολουθούν περιγράφουν τρία εγκάρσια αρμονικά



Σχ. 2.45

κύματα που διαδίδονται σε διαφορετικά μέσα.

(α) $y = 10^{-2} \eta\mu 2\pi(2t-4x)$

(β) $y = 5 \times 10^{-3} \eta\mu 2\pi(4t-2x)$

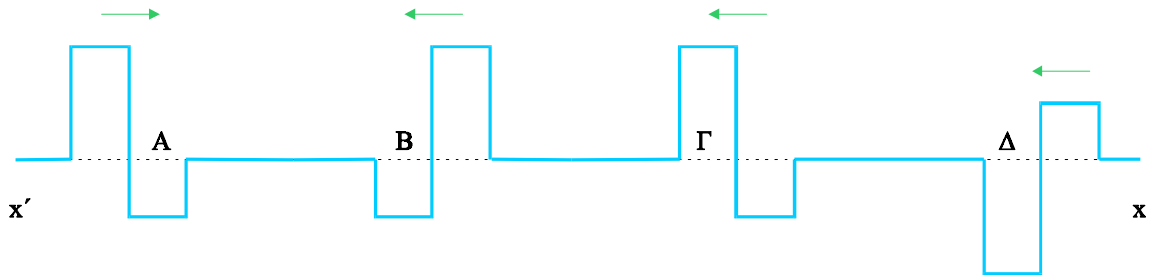
(γ) $y = 2 \times 10^{-2} \eta\mu 2\pi(2t-3x)$

Τα μεγέθη είναι μετρημένα στο SI.

1. Ποιο κύμα διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα;
2. Σε ποια περίπτωση τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται με μεγαλύτερη μέγιστη ταχύτητα;

Συμβολή – στάσιμα κύματα

- 2.6 Στο σχήμα 2.46 φαίνονται οι κυματικοί παλμοί Α, Β, Γ και Δ που διαδίδονται στο ίδιο υλικό κατά τη διεύθυνση $x'x$.



Σχ. 2.46

Με ποιον από τους παλμούς Β, Γ και Δ πρέπει να συναντηθεί ο παλμός Α ώστε να δώσει 1) απόσβεση 2) ένα τετραγωνικό παλμό που το ύψος του είναι ίδιο με το πλάτος του;

- 2.7 Ποιες πηγές ονομάζονται σύμφωνες;

- 2.8 Συμπληρώστε τα κενά:

Στάσιμο κύμα ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων με ίδιο πλάτος και ίδια συχνότητα που διαδίδονται στο ελαστικό μέσο σε κατευθύνσεις. Το στάσιμο κύμα δεν είναι κύμα αλλά μια ιδιόμορφη ταλάντωση του μέσου. Κατά τη δημιουργία ενός στάσιμου κύματος σε ένα υλικό υπάρχουν σημεία που και ονομάζονται δεσμοί και σημεία που ταλαντώνονται με και ονομάζονται Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών είναι

- 2.9 Οι εξισώσεις

(α) $y = 5 \sigma\upsilon\nu 4x \eta\mu 10t$

(β) $y = 2 \sigma\upsilon\nu 2x \eta\mu 20t$

(γ) $y = \sigma\upsilon\nu 8x \eta\mu 5t$

περιγράφουν στάσιμα κύματα που δημιουργούνται στο ίδιο υλικό. Τα x και y είναι μετρημένα σε cm και το t σε s.

- 1) Σε ποιο από τα τρία, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών είναι μεγαλύτερη;
- 2) Σε ποια περίπτωση τα σωματίδια του μέσου αποκτούν μεγαλύτερη ταχύτητα κατά την ταλάντωσή τους;

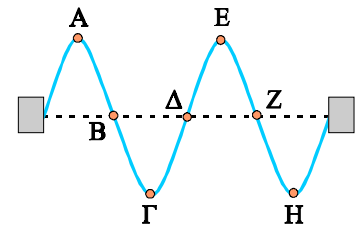
- 2.10 Δύο σύμφωνες σημειακές πηγές 1 και 2 δημιουργούν στο ίδιο υλικό εγκάρσια κύματα με μήκος κύματος $\lambda=3\text{cm}$. Τα σημεία Α, Β και Γ απέχουν από

τις δύο πηγές: Το Α, $d_1=18\text{cm}$ και $d_2=16\text{cm}$. Το Β, $r_1=19,5\text{cm}$ και $r_2=16,2\text{cm}$ και το Γ $l_1=20\text{cm}$ και $l_2=15,5\text{cm}$. Με το δείκτη 1 συμβολίζονται οι αποστάσεις τους από την πηγή 1 και με το δείκτη 2 οι αποστάσεις από την πηγή 2.

- α) Εκτελεί κάποιο από τα σημεία ταλάντωση με μέγιστο πλάτος;
- β) Παραμένει κάποιο από αυτά διαρκώς ακίνητο;

2.11 Το σχήμα 2.47 παριστάνει ένα στιγμιότυπο ενός στάσιμου κύματος που έχει δημιουργηθεί σε μια χορδή.

- α) Ποια σημεία στο σχήμα αντιστοιχούν σε δεσμούς και ποια σε κοιλές;
- β) Πόσο διαφέρουν οι φάσεις των σημείων Α και Γ;
- γ) Πόσο διαφέρουν οι φάσεις των σημείων Α και Ε;
- δ) Αν το μήκος κύματος των κυμάτων από τα οποία δημιουργήθηκε το στάσιμο είναι λ ποια η οριζόντια απόσταση των σημείων Α και Β;



Σχ. 2.47

2.12 Σε ένα στάσιμο κύμα, τα σημεία που βρίσκονται μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών έχουν

- α) την ίδια φάση.
- β) φάσεις που διαφέρουν κατά $\pi/2$.
- γ) φάσεις που διαφέρουν κατά π .
- δ) φάσεις που διαφέρουν κατά 2π .

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

2.13 Το φως κάνει να φτάσει από τον Ήλιο στη Γη περίπου 8,5 min. Πόσο περίπου απέχει η Γη από τον Ήλιο; ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

2.14 Πόσες φορές το δευτερόλεπτο θα μπορούσε να κάνει το γύρο της Γης ένα σώμα αν είχε ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός;

($R_Γ=6400 \text{ km}$ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

2.15 Εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας έχουμε όταν

- α) ένα σώμα είναι φορτισμένο.
- β) ένας πυκνωτής είναι φορτισμένος.
- γ) φορτία κινούνται με σταθερή ταχύτητα όπως συμβαίνει στους αγωγούς που διαρρέονται από σταθερό ρεύμα.
- δ) φορτία επιταχύνονται ή επιβραδύνονται, όπως συμβαίνει στους αγωγούς που διαρρέονται από μεταβαλλόμενα ρεύματα.

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

2.16 Η συχνότητα ενός αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται στο κενό είναι $6 \times 10^6 \text{ Hz}$. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι α) $5 \times 10^6 \text{ m}$, β) $2 \times 10^2 \text{ m}$, γ) $5 \times 10 \text{ m}$, ή δ) $2 \times 10^9 \text{ cm}$;

($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

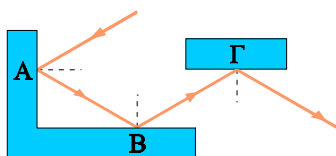
- 2.17 Χωρίς να συμβουλευτείτε τον πίνακα με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, αντιστοιχίστε τους διαφόρους τύπους των κυμάτων που βρίσκονται στην αριστερή στήλη με συχνότητες που βρίσκονται στη δεξιά.

Ραδιοκύματα	10^{13} Hz
Μικροκύματα	10^{17} Hz
Ακτίνες X	10^8 Hz
Υπέρυθρο	10^{10} Hz
Υπεριώδες	10^{15} Hz
Ακτίνες γ	10^{19} Hz

- 2.18 Ποιος τύπος ηλεκτρομαγνητικού κύματος έχει μήκος κύματος συγκρίσιμο με
- το μέγεθος ενός αυτοκινήτου;
 - με τη διάμετρο μιας μπάλας;
 - με τη διάμετρο του ατόμου;
 - με τη διάμετρο του πυρήνα;
- (Συμβουλευτείτε τον πίνακα με το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).
- 2.19 Η ταχύτητα με την οποία διαδίδονται τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι
- μεγαλύτερη στο κενό.
 - μεγαλύτερη όταν διαδίδονται στην ύλη.
 - παντού ίδια.
- Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.
- 2.20 Ποια από τις εξισώσεις που ακολουθούν δεν μπορεί να περιγράψει το ηλεκτρικό πεδίο ενός αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος που διαδίδεται στο κενό;
- $E = 100 \text{ ημ}2\pi(6 \times 10^{10}t - 2 \times 10^2x)$
 - $E = 50 \text{ ημ}2\pi(12 \times 10^{12}t - 4 \times 10^4x)$
 - $E = 100 \text{ ημ}2\pi(9 \times 10^{13}t - 3 \times 10^6x)$
- Όλα τα μεγέθη εκφράζονται στο SI. ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

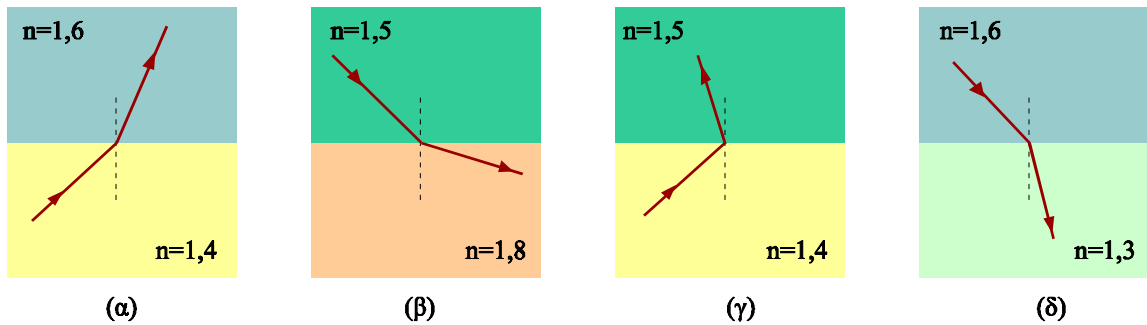
Ανάκλαση – διάθλαση

- 2.21 Είναι δυνατό μια φωτεινή ακτίνα να μη διαδίδεται ευθύγραμμα; Αναφέρατε τέτοιες περιπτώσεις.



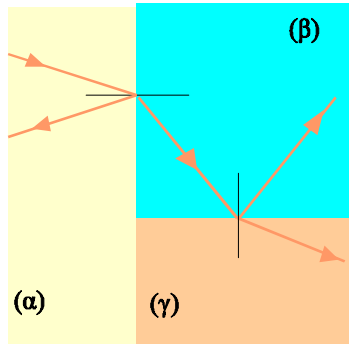
Σχ. 2.48

- 2.22 Στο σχήμα 2.48 φαίνονται οι διαδοχικές ανακλάσεις που υφίσταται μια φωτεινή ακτίνα στις επιφάνειες A, B και Γ. Αν η γωνία πρόσπτωσης στο σημείο A είναι 30° πόσες μοίρες είναι οι γωνίες ανάκλασης στις επιφάνειες B και Γ;
- 2.23 Σε ποιο από τα επόμενα σχήματα έχει σχεδιαστεί σωστά η διαθλώμενη ακτίνα;



Σχ. 2.49

- 2.24 Μονοχρωματικό φως μεταβαίνει από τον αέρα στο γυαλί. Ποιο από τα μεγέθη μήκος κύματος, συχνότητα και ταχύτητα διάδοσης αυξάνεται, ποιο μειώνεται και ποιο παραμένει σταθερό;
- 2.25 Στο σχήμα 2.50 φαίνεται η πορεία μιας ακτίνας μονοχρωματικού φωτός η οποία διέρχεται από τρία διαφανή υλικά. Σε ποιο υλικό το φως διαδίδεται με μικρότερη ταχύτητα;
- 2.26 Δέσμη λευκού φωτός εκτρέπεται από ένα πρίσμα. Ποιο χρώμα εκτρέπεται περισσότερο, το κόκκινο ή το μπλε;
- 2.27 Στο σχήμα φαίνονται τρεις διαφανείς οριζόντιες πλάκες πολύ μεγάλων διαστάσεων. Οι πλάκες είναι τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη και το σύστημα περιβάλλεται από αέρα. Ακτίνες φωτός εισέρχονται πλάγια στις πλάκες όπως στο σχήμα. Σε ποια από τις πλάκες είναι δυνατό το φως, μετά από διαδοχικές ολικές ανακλάσεις, να βγει από τη δεξιά πλευρά;

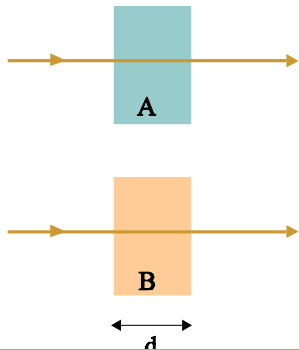


Σχ. 2.50



Σχ. 2.51

- 2.28 Στο σχήμα 2.52 φαίνονται δύο ακτίνες μονοχρωματικού φωτός, οι οποίες στο κενό έχουν το ίδιο μήκος κύματος. Οι ακτίνες στην πορεία τους συναντούν και διέρχονται από δύο λεπτές μεμβράνες A και B, του ίδιου πάχους d και διαφορετικού δείκτη διάθλασης. Το πάχος d αντιστοιχεί σε 3×10^4 μήκη κύματος της ακτινοβολίας στο υλικό A ή σε $2,2 \times 10^4$ μήκη κύματος της ακτινοβολίας στο υλικό B.
- α) Ποιο υλικό έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης;
- β) Σε ποιο υλικό, το φως θέλει μεγαλύτερο χρόνο για να καλύψει την απόσταση d ;



Σχ. 2.52

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Μηχανικά κύματα

- 2.29 Ένα αρμονικό κύμα διαδίδεται κατά μήκος μιας χορδής. Ο χρόνος που χρειάζεται ένα σημείο της χορδής για να μετατοπιστεί από τη θέση μέγιστης απομάκρυνσης στη θέση ισορροπίας είναι 0,15 s. Ποια είναι η συχνότητα του κύματος; Αν το μήκος κύματος είναι $\lambda=1,2$ m ποια είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος;
[Απ: 10/6 Hz , 2 m/s]
- 2.30 Η εξίσωση ενός γραμμικού αρμονικού κύματος είναι $y = 3 \times 10^{-2} \eta\mu(1320t - 4x)$ (SI). Να υπολογίσετε:
α) το μήκος κύματος (λ).
β) την ταχύτητα του κύματος v .
γ) τη μέγιστη ταχύτητα ταλάντωσης των σημείων του ελαστικού μέσου.
δ) την απόσταση μεταξύ δύο σημείων του ελαστικού μέσου τα οποία παρουσιάζουν διαφορά φάσης 120° .
[Απ : 1,57 m, 330 m/s, 39,6 m/s, 0,523 m]
- 2.31 Η πηγή Ο αρχίζει τη χρονική στιγμή μηδέν να εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση πλάτους $A=10$ cm και συχνότητας $f=0,25$ Hz. Το κύμα που δημιουργεί διαδίδεται κατά μήκος γραμμικού ομογενούς ελαστικού μέσου με ταχύτητα $v=3$ m/s. Να υπολογίσετε:
α) μετά από πόσο χρόνο θα αρχίσει να κινείται κάποιο σημείο Β του μέσου, που απέχει $x = 60$ m από το σημείο Ο.
β) την απομάκρυνση του σημείου Β, από τη θέση ισορροπίας του, τη στιγμή $t = 21,5$ s.
[Απ : 20 s, $5\sqrt{2}$ cm]

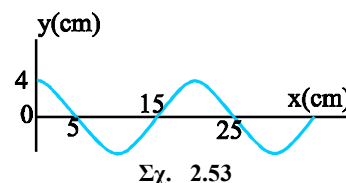
Στάσιμο κύμα

- 2.32 Ένα στάσιμο κύμα δίνεται από την εξίσωση:
 $y = 0,5 \sin \frac{\pi x}{3} \eta\mu 40\pi t$ όπου τα x και y είναι σε cm και το t σε s.
α) Να γράψετε τις εξισώσεις των δύο κυμάτων που συμβάλλουν για να δημιουργήσουν το στάσιμο κύμα.
β) Πόσο απέχουν δύο διαδοχικοί δεσμοί;
γ) Τι ταχύτητα έχει τη χρονική στιγμή $t = 9/8$ s ένα σημείο του μέσου το οποίο απέχει 1cm από τη θέση $x = 0$;
δ) Με τι ταχύτητα διαδίδονται τα κύματα;
[Απ: $y_1 = 0,25 \eta\mu 2\pi \left(20t - \frac{x}{6} \right)$, $y_2 = 0,25 \eta\mu 2\pi \left(20t + \frac{x}{6} \right)$, 3cm, -31,4 cm/s, 1,2 m/s]

- 2.33 Στο σχήμα απεικονίζεται το στιγμιότυπο ενός στάσιμου κύματος, τη στιγμή κατά την οποία όλα τα σημεία του ελαστικού μέσου βρίσκονται στις θέσεις της μέγιστης απομάκρυνσής τους. Τα κύματα που συμβάλλουν για να δώσουν το στάσιμο κύμα έχουν περίοδο $T = 2 \text{ s}$.

- α) Να σχεδιάσετε τα στιγμιότυπα του κύματος μετά από $0,5 \text{ s}$ και μετά από 1 s .
 β) Να υπολογίσετε το πλάτος της ταλάντωσης ενός σημείου που βρίσκεται στη θέση $x = 12,5 \text{ cm}$.

[Απ: $2\sqrt{2} \text{ cm}$]



- 2.34 Διαπασών συχνότητας 340 Hz ηχεί μπροστά σε λείο κατακόρυφο τοίχο. Ανάμεσα στο διαπασών και στον τοίχο, στην ευθεία που είναι κάθετη στον τοίχο, μετακινείται ευαίσθητος δέκτης. Παρατηρούμε ότι σε δύο διαδοχικές θέσεις του δέκτη, που απέχουν μεταξύ τους $0,5 \text{ m}$, η ένδειξή του μηδενίζεται.

- α) Ποια είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου;
 β) Αντικαθιστούμε το διαπασών με άλλο άγνωστης συχνότητας. Διαπιστώνουμε δύο μέγιστα έντασης σε θέσεις που απέχουν μεταξύ τους $0,2 \text{ m}$. Ποια είναι η συχνότητα του δεύτερου διαπασών;

[Απ: 340 m/s , 850 Hz]

- 2.35 Δύο κύματα διαδίδονται ταυτόχρονα κατά μήκος του ίδιου σχοινιού. Οι εξισώσεις των κυμάτων είναι:

$$y_1 = 5 \text{ ημ} \pi(5t - x) \quad \text{και} \quad y_2 = 5 \text{ ημ} \pi(5t + x) \quad \text{όπου}$$

τα y και x είναι μετρημένα σε cm και το t σε sec .

- α) Υπολογίστε την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων.
 β) Βρείτε τη θέση τριών σημείων του σχοινιού τα οποία παραμένουν ακίνητα και τριών σημείων των οποίων το πλάτος της ταλάντωσης είναι μέγιστο.
 γ) Ποιο είναι το μέγιστο πλάτος της ταλάντωσης;

[Απ: α) 5 cm/s γ) 10 cm]

- 2.36 Δύο κύματα ίδιου πλάτους, συχνότητας 60 Hz , διαδίδονται αντίθετα σε χορδή της οποίας τα άκρα είναι στερεωμένα σε ακλόνητα σημεία. Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων είναι 120 m/s . Το στάσιμο κύμα που δημιουργείται στη χορδή έχει τρεις δεσμούς. Βρείτε το μήκος της χορδής.

[Απ: 2 m]

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

- 2.37 Ένας ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει στα 100 MHz .

- α) Ποιο είναι το μήκος του κύματος που εκπέμπει ο σταθμός;
 β) Η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος σε κάποια θέση είναι $E_{\text{max}} = 12 \times 10^{-3} \text{ V/m}$. Ποια είναι η μέγιστη τιμή του μαγνητικού πεδίου του κύματος σε εκείνη τη θέση;
 γ) Αν για τη λήψη αυτού του ηλεκτρομαγνητικού κύματος χρησιμοποιείται δέκτης με κύκλωμα LC, στο οποίο το πηνίο έχει

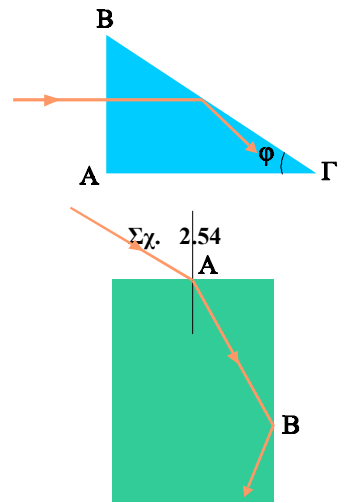
συντελεστή αυτεπαγωγής $L=5 \text{ mH}$, για ποια τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή συντονίζεται ο δέκτης;
 $(c = 3 \times 10^8 \text{ m/s})$. Θεωρήστε $\pi^2 \approx 10$.
 [Απ : $3 \text{ m}, 4 \times 10^{-11} \text{ T}, 5 \times 10^{-16} \text{ F}$]

Ανάκλαση – Διάθλαση

- 2.38 Μονοχρωματική ακτινοβολία μεταβαίνει από τον αέρα σε γυαλί. Αν ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού είναι $n=1,5$ να βρεθεί η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται η ακτινοβολία στο γυαλί. $(c = 3 \times 10^8 \text{ m/s})$
 [Απ : $2 \times 10^8 \text{ m/s}$]
- 2.39 Στον πυθμένα δοχείου που περιέχει νερό τοποθετούμε μια γυάλινη πλάκα. Δέσμη παράλληλων ακτίνων μονοχρωματικού φωτός προσπίπτει από το νερό στη γυάλινη πλάκα με γωνία 30° . Βρείτε τις διευθύνσεις των ανακλώμενων και διαθλώμενων ακτίνων. Δίνονται οι δείκτες διάθλασης του νερού και του γυαλιού $n_1=1,33$ και $n_2=1,52$ αντίστοιχα.
 [Απ : $\theta_r = 30^\circ$, $\eta \mu \theta_b = 0,4375$]
- 2.40 Μέσα σε υγρό με άγνωστο δείκτη διάθλασης βυθίζουμε μια γυάλινη πλάκα. Μια λεπτή μονοχρωματική δέσμη πέφτει στην πλάκα με γωνία θ_a . Μεταβάλλοντας τη γωνία πρόσπτωσης παρατηρούμε ότι όταν είναι μεγαλύτερη των 60° η δέσμη παθαίνει ολική ανάκλαση στη γυάλινη πλάκα. Αν ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού είναι $n_b=1,5$, να βρεθεί ο δείκτης διάθλασης του υγρού.
 [Απ : $\sqrt{3}$]
- 2.41 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας $f = 5,1 \times 10^{14} \text{ Hz}$ έχει – στο νερό– μήκος κύματος $\lambda=4,4 \times 10^{-7} \text{ m}$. Να βρείτε το δείκτη διάθλασης του νερού. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
 [Απ : $1,33$]
- 2.42 Το μήκος κύματος μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας στον αέρα είναι 650 nm .
 α) Ποια είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας;
 β) Ποιο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας όταν διέρχεται από γυαλί που έχει δείκτη διάθλασης $1,4$;
 γ) Ποια είναι η ταχύτητα της ακτινοβολίας στο γυαλί;
 Δίνεται $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
 [Απ: α) $4,6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ β) 464 nm γ) $2,14 \times 10^8 \text{ m/s}$]
- 2.43 Το κίτρινο φως που δίνει η λάμπα νατρίου διαδίδεται σε κάποιο υγρό με ταχύτητα $1,92 \times 10^8 \text{ m/s}$. Ποιος είναι ο δείκτης διάθλασης του υγρού αυτού για το κίτρινο φως; Δίνεται $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
 [Απ: $n=1,56$]

- 2.44 Μονοχρωματική δέσμη πέφτει κάθετα στην επιφάνεια πρίσματος με δείκτη διάθλασης $n=1,4$ όπως στο σχήμα 2.54. Υπολογίστε τη μεγαλύτερη τιμή της γωνίας φ για την οποία, η δέσμη υφίσταται ολική ανάκλαση στην επιφάνεια ΒΓ του πρίσματος.

[Απ: $\sin\varphi_{\max} = 0,714$ ($\varphi_{\max} \approx 45^\circ$)]



- 2.45 Μονοχρωματική δέσμη προσπίπτει στο σημείο Α μιας γυάλινης πλάκας με γωνία 60° (σχ. 2.55). Ποιος πρέπει να είναι ο ελάχιστος δείκτης διάθλασης του γυαλιού ώστε η δέσμη να υποστεί ολική ανάκλαση στο σημείο Β; (Η γυάλινη πλάκα βρίσκεται στον αέρα).

[Απ: 1,32]

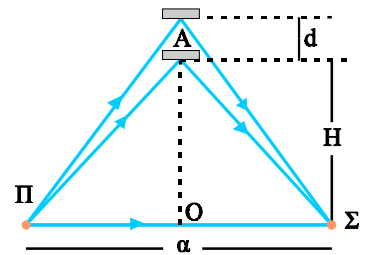
Σχ. 2.55

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

- 2.46 Δύο σύμφωνες πηγές Π_1 και Π_2 δημιουργούν στην επιφάνεια ενός υγρού κύματα, με πλάτος $A=3 \text{ mm}$ και περίοδο $T=0,4 \text{ s}$. Ένα μικρό κομμάτι φελλού βρίσκεται σε κάποιο σημείο της επιφάνειας, σε αποστάσεις $x_1=6 \text{ m}$ και $x_2=5,5 \text{ m}$ από τις πηγές. Η ταχύτητα των κυμάτων είναι $v=5 \text{ m/s}$. Τι κίνηση κάνει ο φελλός;

[Απ : απλή αρμονική ταλάντωση, με πλάτος $A'=3\sqrt{2} \text{ mm}$ και περίοδο $0,4 \text{ s}$]

- 2.47 Σε κάποιο σημείο στην επιφάνεια ενός υγρού δημιουργούμε κύματα με την πηγή Π. Στο σημείο Σ της επιφάνειας, σε απόσταση a από την πηγή, τα κύματα μπορούν να φτάσουν ή απευθείας (ακολουθώντας τη διαδρομή ΠΣ) ή αφού ανακλαστούν στον ανακλαστήρα Α που βρίσκεται στην επιφάνεια του υγρού και πάνω στη μεσοκάθετο του τμήματος ΠΣ. Αν μετακινήσουμε τον ανακλαστήρα παρατηρούμε ότι όταν απέχει απόσταση H από το Ο, το σημείο Σ παραμένει συνέχεια ακίνητο, ενώ, για πρώτη φορά, κάνει ταλάντωση με μέγιστο πλάτος, όταν ο ανακλαστήρας μετακινείται κατά d . Να βρείτε το μήκος του κύματος.

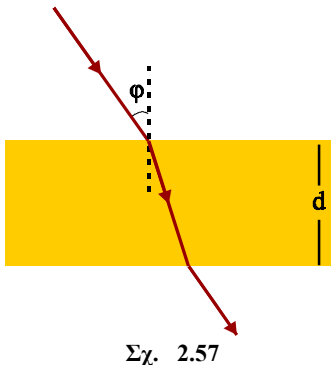


Σχ. 2.56

[Απ : $2\sqrt{4(H+d)^2 + a^2} - 2\sqrt{4H^2 + a^2}$]

- 2.48 Μια σημειακή φωτεινή πηγή βρίσκεται σε βάθος h , μέσα σε υγρό με δείκτη διάθλασης n . Να υπολογίσετε την ακτίνα του φωτεινού δίσκου που βλέπει στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού ένας παρατηρητής που βρίσκεται έξω από το υγρό.

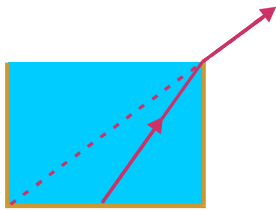
[Απ : $\frac{h}{\sqrt{n^2 - 1}}$]



Σχ. 2.57

- 2.49 Μια ακτίνα μονοχρωματικού φωτός πέφτει πάνω σε γυάλινη πλάκα πάχους d . Η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας είναι φ και ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού n .
- α) Δείξτε ότι η ακτίνα που εξέρχεται από το γυαλί είναι παράλληλη στην αρχική.
- β) Υπολογίστε την παράλληλη μετατόπιση που υφίσταται η ακτίνα από το γυαλί.

[Απ: $l = d\eta\mu\varphi\left(1 - \frac{\sigma\upsilon\nu\varphi}{\sqrt{n^2 - \eta\mu^2\varphi}}\right)$]



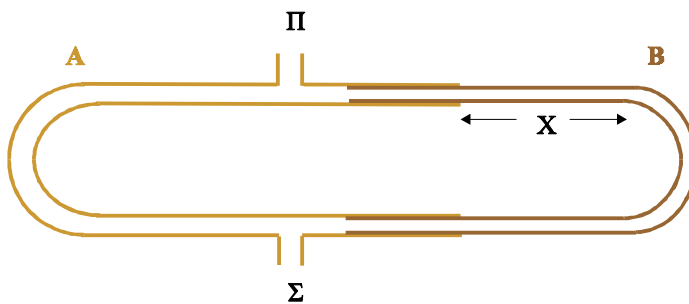
Σχ. 2.58

- 2.50 Κυλινδρικό δοχείο έχει διάμετρο βάσης 9 cm και άγνωστο ύψος. Ένας παρατηρητής βρίσκεται σε τέτοια θέση, ώστε μόλις να βλέπει την απέναντι εσωτερική άκρη του πυθμένα, όταν το δοχείο είναι κενό. Αν το δοχείο είναι γεμάτο με νερό ο παρατηρητής, χωρίς να αλλάξει θέση βλέπει το κέντρο του πυθμένα. Να υπολογίσετε το ύψος του δοχείου. Δίνεται ότι ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι $n=1,33$.

[Απ : 5,28 cm]

- 2.51 Το σχήμα 2.59 παριστάνει μία διάταξη που αποτελείται από δύο σωλήνες A και B. Ο σωλήνας B μπορεί να μετακινείται και με τον τρόπο αυτό να μεταβάλλεται το μήκος x . Ηχητική πηγή Π δημιουργεί ήχο συχνότητας 1,25 kHz στο ένα ανοιχτό άκρο του σωλήνα. Στο άλλο ανοιχτό άκρο (Σ) φτάνουν ταυτόχρονα δύο ηχητικά κύματα. Τα κύματα δημιουργούνται από την πηγή και διαδίδονται μέσω του αέρα στους σωλήνες A και B. Μετακινώντας το σωλήνα B (μεταβάλλεται τότε η απόσταση x) η ένταση του ήχου στο σημείο Σ αυξομειώνεται. Αν για $x_0=0,408\text{m}$ η ένταση του ήχου στο σημείο Σ είναι μηδέν, ποια είναι η επόμενη τιμή της απόστασης x ($x > 0,408\text{m}$) για την οποία ξαναμηδενίζεται η ένταση; Δίνεται η ταχύτητα του ήχου $v=340\text{ m/s}$.

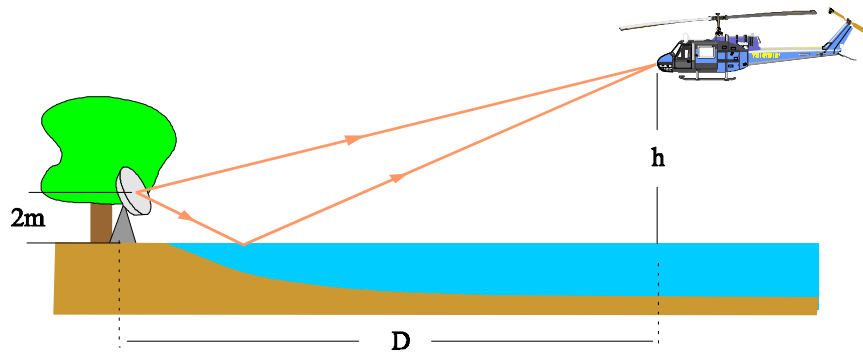
[Απ: 0,544 m]



Σχ. 2.59

- 2.52 Ένας πομπός ραντάρ (R) βρίσκεται σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια ήρεμης λίμνης. Ο πομπός εκπέμπει παλμούς μικροκυμάτων συχνότητας f προς ένα ελικόπτερο που μένει ακίνητο στον αέρα, σε ύψος $h=50\text{ m}$ πάνω από την επιφάνεια της λίμνης και σε οριζόντια απόσταση $D=2\text{ km}$ από τον πομπό του ραντάρ. Το ύψος h είναι το μι-

κρότερο ύψος γι' αυτή την οριζόντια απόσταση για το οποίο το ραντάρ δεν καταγράφει σήμα ανακλώμενο από το ελικόπτερο. Ποια είναι η συχνότητα του κύματος που εκπέμπει το ραντάρ;
 Υποθέστε ότι η επιφάνεια της λίμνης συμπεριφέρεται σαν τέλειος οριζόντιος ανακλαστήρας. Η ταχύτητα των μικροκυμάτων στον αέρα είναι $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$.
 [Απ: $1,5 \times 10^9 \text{ Hz}$]



Σχ. 2.60



ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΡΑΔΙΟΚΥΜΑΤΩΝ

Ο Hertz, πρώτος, το 1887, στηριζόμενος στις προβλέψεις της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell, επέτυχε την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Στα χρόνια που ακολούθησαν έγινε μεγάλη προσπάθεια για τη μετάδοση μηνυμάτων μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Το 1900 ο Ρορον στη Ρωσία και ο Marconi κατάφεραν να μεταδώσουν μηνύματα σε απόσταση μερικών δεκάδων χιλιομέτρων.

Σήμερα είμαστε εξοικειωμένοι με τις διάφορες μορφές επικοινωνίας που στηρίζονται στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, από το ραδιόφωνο και την τηλεόραση μέχρι τα ασύρματα τηλέφωνα και τις συνδέσεις μεταξύ υπολογιστών. Η ανάπτυξη των επικοινωνιών δημιούργησε τον κίνδυνο να γίνονται διαφορετικές εκπομπές στην ίδια συχνότητα, γι' αυτό, ύστερα από διεθνείς συμφωνίες, καθορίστηκαν οι ζώνες των επικοινωνιών, δηλαδή περιοχές συχνοτήτων που διατίθενται για το ραδιόφωνο, την τηλεόραση, τις επικοινωνίες των πλοίων, των αεροπλάνων κ.λ.π.

Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή αυτών των περιοχών θα πρέπει να μιλήσουμε για δυο παράγοντες που επηρεάζουν τις επικοινωνίες. Πρόκειται για το έδαφος και την ιονόσφαιρα. Τα κύματα που διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια της Γης απορροφώνται από αυτή. Η απορρόφηση είναι μεγαλύτερη για τα μικρότερα μήκη κύματος. Η ιονόσφαιρα είναι στρώμα της ατμόσφαιρας που βρίσκεται σε ύψος από 60 km έως 350 km και παρουσιάζει σημαντική αγωγιμότητα. Η αγωγιμότητα της ιονόσφαιρας οφείλεται στο μεγάλο αριθμό ιόντων και ηλεκτρονίων που περιέχει. Η δημιουργία αυτού του στρώματος οφείλεται στο βομβαρδισμό που υφίσταται η Γη από διάφορες ακτινοβολίες που προέρχονται κυρίως από τον Ήλιο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ξεκινούν από τη Γη και φτάνουν στην ιονόσφαιρα, όταν έχουν μήκος κύματος μεγαλύτερο από ένα όριο, ανακλώνται και επιστρέφουν στη Γη. Έτσι μέσω της ανάκλασης τα κύματα αυτά φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις.

Μακρά κύματα : Έχουν μήκος κύματος από 1000 m έως 2000 m. Τα κύματα αυτά ταξιδεύουν πάνω από το έδαφος και μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις πάνω στη Γη χωρίς σημαντική εξασθένιση. Απορροφώνται όμως πιο εύκολα από τη θάλασσα και έτσι δε μπορούν να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις πάνω από αυτή.

Μεσαία κύματα : Έχουν μήκος κύματος από 100 m έως 1000 m. Παρουσιάζουν μεγαλύτερη απορρόφηση από την επιφάνεια της Γης αλλά ανακλώνται πάνω στην ιονόσφαιρα και φτάνουν σε μεγάλες αποστάσεις.

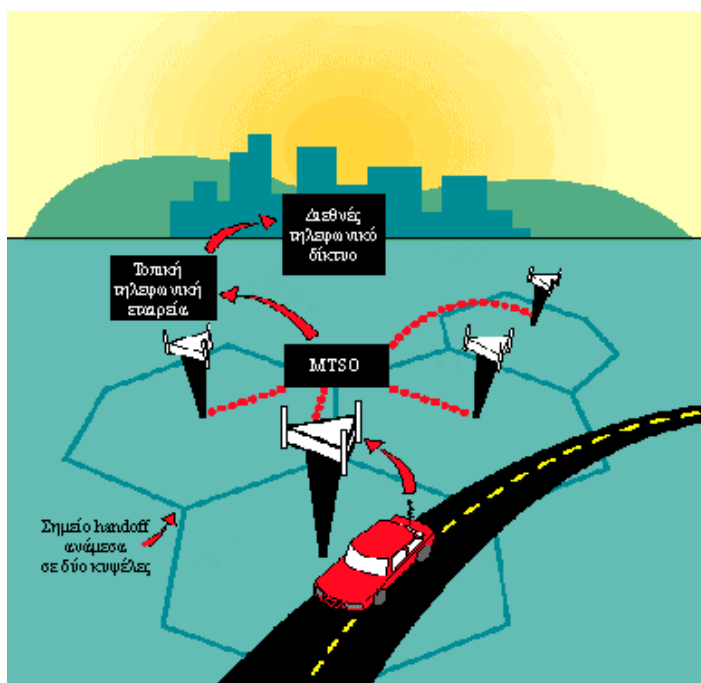
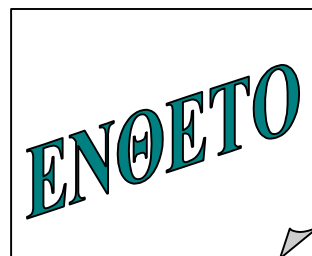
Βραχέα χαρακτηρίζονται τα μήκη κύματος από 10 m έως 100 m. Διαπερνούν εύκολα τα χαμηλότερα στρώματα της ιονόσφαιρας αλλά ανακλώνται από τα υψηλότερα, που βρίσκονται σε ύψος πάνω από 180 km. Με διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ ιονοσφαιρας και της επιφάνειας της Γης μπορούν να φτάσουν σε μεγάλες αποστάσεις, να κάνουν ακόμα και το γύρο της Γης χωρίς να εμποδίζονται από την καμπυλότητά της. Πολλοί από τους ραδιοσταθμούς που "πιάνουμε" στα βραχέα εμφανίζουν αστάθεια κατά τη λήψη τους. Αυτό οφείλεται στην αστάθεια που παρουσιάζει η ιονόσφαιρα. Οι διάφορες περιοχές της ιονόσφαιρας μετακινούνται, με το χρόνο, αλλάζουν σύσταση, έκταση και μορφή, ανάλογα με τη θέση του Ήλιου, με φαινόμενα που συμβαίνουν στην επιφάνεια του Ήλιου, με τις εποχές του χρόνου κ.α.

Περιοχές VHF και UHF. Τα VHF αντιστοιχούν σε μήκη κύματος από 1 m έως 10 m (συχνότητες 20 MHz έως 300 MHz) και τα UHF από 10 cm έως 1 m (συχνότητες από 300 MHz έως 30000 MHz). Τα κύματα αυτά διαπερνούν την ιονόσφαιρα και απορροφώνται πολύ γρήγορα από το έδαφος. Γι' αυτό, στην τηλεόραση όπου χρησιμοποιούνται αυτές οι συχνότητες, πρέπει οι κεραίες των σπιτιών μας να έχουν οπτική επαφή με την κεραία του σταθμού εκπομπής ή του αναμεταδότη που συνήθως βρίσκεται σε ένα κοντινό βουνό.

Μικροκύματα: Αντιστοιχούν σε μήκη κύματος από 0,1 mm έως 1 cm. Τα μικροκύματα διαπερνούν την ιονόσφαιρα και προσφέρονται για επικοινωνίες μέσω δορυφόρων.

ΚΥΨΕΛΩΤΗ (ΚΙΝΗΤΗ) ΤΗΛΕΦΩΝΙΑ

Το κυψελωτό σύστημα λέγεται έτσι επειδή χωρίζει την περιοχή κάλυψης σε σχεδόν εξαγωνικά κομμάτια. Το κάθε κομμάτι έχει στο κέντρο του έναν σταθμό βάσης (κεραία). Γειτονικές κυψέλες χρησιμοποιούν διαφορετικές συχνότητες, ενώ μη γειτονικές μπορούν να χρησιμοποιούν τις ίδιες, εξασφαλίζοντας μεγάλη χωρητικότητα με ένα περιορισμένο εύρος συχνοτήτων (bandwidth). Κάθε σταθμός ελέγχου εκπέμπει την ταυτότητα του σε μία κοινή συχνότητα ελέγχου έτσι ώστε το σύστημα να ξέρει σε ποια κυψέλη βρίσκεται. Καθώς ο κινητός σταθμός κινείται μέσα στο σύστημα, επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία κάθε φορά που εντοπίζει ότι βρίσκεται σε διαφορετική κυψέλη.



Σχ. 2.61

Όταν ο συνδρομητής δέχεται ένα τηλεφώνημα, το κέντρο στέλνει μέ-

σω της κοινής συχνότητας εντολή στον ανάλογο κινητό σταθμό (τηλέφωνο) να χτυπήσει, αφού ξέρει σε ποια κυψέλη βρίσκεται. Το κέντρο δίνει στο σταθμό ένα συγκεκριμένο κανάλι στο οποίο γίνεται η επικοινωνία.

Παρόμοια, όταν ο συνδρομητής θέλει να κάνει μία κλήση, στέλνει μία εντολή στο κέντρο μέσω της κοινής συχνότητας. Το κέντρο απαντάει με ένα κανάλι στο οποίο γίνεται η επικοινωνία.

Κατά τη διάρκεια ενός τηλεφωνήματος, καθώς το τηλέφωνο του συνδρομητή (κινητός σταθμός) κινείται μέσα στο σύστημα, το κέντρο ελέγχει συνεχώς την ισχύ του σήματος που λαμβάνει. Γειτονικοί σταθμοί βάσης μπορεί επίσης να λαμβάνουν το ίδιο σήμα καθώς ο κινητός σταθμός κινείται προς αυτούς. Όταν το σήμα εξασθενήσει αρκετά στον αρχικό σταθμό βάσης και λαμβάνεται πιο δυνατά σε έναν άλλο, το κέντρο δίνει εντολή στον κινητό σταθμό να αλλάξει κανάλι, σε ένα κανάλι που ανήκει στο νέο σταθμό βάσης. Αυτή η διαδικασία λέγεται hand-off. Όταν αλλάζει το κανάλι, ο συνδρομητής αντιλαμβάνεται μόνο μία μικρή διακοπή στη μετάδοση. Έτσι ο συνδρομητής μπορεί να συνεχίσει μια συνομιλία, ακόμη κι αν μετακινηθεί σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα πρώτα κυψελωτά συστήματα ήταν αναλογικά, δηλαδή η μετάδοση του ήχου είναι αναλογική. Τέτοια συστήματα είναι το AMPS [Advanced Mobile Phone System, (Προηγμένο Σύστημα Κινητών Τηλεφώνων)] που χρησιμοποιήθηκε κυρίως στη Βόρεια Αμερική στα 800MHz, το NMT 450 και 900 (Nordic Mobile Telephone στα 450 και 900MHz) στις σκανδιναβικές χώρες και TACS [Total Access Communication System, (Σύστημα Επικοινωνίας Πλήρους Πρόσβασης)] που χρησιμοποιήθηκε σε μερικές ευρωπαϊκές και ασιατικές χώρες και είναι σχεδόν ίδιο με το AMPS.

Το πρώτο εμπορικό σύστημα AMPS λειτούργησε στο Chicago, το 1983. Αρχικά χρησιμοποιούσε 666 κανάλια πλάτους 30kHz, αλλά μετά επεκτάθηκε στα 832. Ο ήχος διαμορφώνεται με διαμόρφωση FM.

Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως ψηφιακά συστήματα όπως το GSM [(Global System for Mobile communications, (Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητές Επικοινωνίες)], το IS-136 (Industry Standard 136) και το IS-95 (Industry Standard 95). Το GSM είναι το πιο δημοφιλές που χρησιμοποιείται στην Ελλάδα. Υπάρχει σε εκδόσεις στα 900, 1800 και 1900MHz. Στην Ελλάδα λειτουργεί στα 900 και 1800 MHz. Χρησιμοποιεί κανάλια πλάτους 100 kHz. Το κάθε κανάλι εξυπηρετεί περισσότερους από έναν συνδρομητές. Αυτό γίνεται μέσω της χρήσης TDMA [Time Division Multiple Access, (Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Χρόνου)], που μοιράζει το κανάλι σε 8 χρονικές σχισμές. Κάθε συνδρομητής παίρνει μία από τις σχισμές και εκπέμπει μόνο κατά τη διάρκεια της, ενώ μένει σιωπηρός κατά τη διάρκεια των άλλων 7. Έτσι 8 συνδρομητές χρησιμοποιούν το κανάλι συγχρόνως, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη χωρητικότητα. Λόγω της ψηφιακής μετάδοσης η ποιότητα του ήχου είναι καλύτερη και εξασφαλίζει το απόρρητο των συνδιαλέξεων. Επίσης γίνονται δυνατές διάφορες προηγμένες υπηρεσίες, όπως η μετάδοση δεδομένων και η αποστολή συντόμων γραπτών μηνυμάτων.