

# Τα κύματα



**Εισαγωγή** • Ήχος και φως • Μεταβίβαση πληροφορίας και ενέργειας • **Μηχανικές ταλαντώσεις** • Στη γλώσσα της ενέργειας • Στη γλώσσα της νευτωνικής δυναμικής • Αρμονική, αμείωτη και ελεύθερη ταλάντωση • Το απλό εκκρεμές • Εξαναγκασμένη ταλάντωση • Συντονισμός • Σύνθεση και ανάλυση ταλαντώσεων • **Ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση** • Εξαναγκασμένη ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση. Συντονισμός • **Η γενίκευση της έννοιας «ταλάντωση»** • **Η έννοια «κύμα»** • Το κύμα και τα μαθηματικά • Εξίσωση κύματος • Γενίκευση • Το στροβοσκόπιο • Έννοιες που περιγράφουν τα κύματα • Κύματα ελαστικότητας και κύματα ηλεκτρομαγνητικά • **Ο ήχος** • Παραγωγή • Διάδοση • Ανίχνευση • Ύψος ενός ήχου • Ακουστότητα ενός ήχου • Χροιά ενός ήχου • Υπόηχοι • Υπέρηχοι • **Ερτζιανά κύματα** • Παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο • Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου • Πομπός και δέκτης ερτζιανών κυμάτων • **Συμβολή των κυμάτων** • Συμβολή κυμάτων από σύμφωνες πηγές • **Η φύση του φωτός (Α')** • Η σωματιδιακή θεωρία • Η κυματική θεωρία • Η σωματιδιακή θεωρία επιβάλλεται • Φαινόμενα συμβολής στο φως • **Περίθλαση** • **Η φύση τού φωτός (Β')** • 19ος αιώνας • Η κυματική θεωρία κυριαρχεί • 20ος αιώνας. Το δίλημμα • **Ταλάντωση στάσιμου κύματος** • **Ανάκλαση** • Οι νόμοι της ανάκλασης του φωτός • Κατοπτρική ανάκλαση και διάχυση • Είδωλα από ανάκλαση του φωτός • Αντικείμενα στο άπειρο • Η αρχή της αντιστρεπτής πορείας • Ανάκλαση των κυμάτων • **Διάθλαση** • Οι νόμοι της διάθλασης του φωτός • Δείκτης διάθλασης • Ολική ανάκλαση • Οπτικές ίνες • Η αρχή Huygens και το φαινόμενο «διάθλαση» • Επίπεδο δίοπτρο • Πλάκα με παράλληλες έδρες • Διάθλαση σε πρίσμα • Το λευκό φως αναλύεται • **Οι φακοί** • Γενικότητες • Συγκλίνοντες φακοί • Αποκλίνοντες φακοί • Μυωπία • **Υπέρυθρες και υπεριώδεις ακτίνες** • **Ακτίνες Χ** • **Ραδιενέργεια** • **Λυμένα παραδείγματα** • **Δραστηριότητες** • Ερωτήσεις • Ασκήσεις • Ντοκουμέντα.

## Ήχος και φως

Η κωδωνοκρουσία του φωτός  
μας υποδέχεται  
στο ξανθό ακροθαλάσσι

Γιάννης Ρίτσος

Αστράφτει και θροντά, λέει ο λαός μας κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας. Χρησιμοποιεί, δηλαδή, δύο διαφορετικά ρήματα για να διαχωρίσει μεταξύ τους τα δύο κυριότερα *σήματα*, το φωτεινό και το ηχητικό, που μεταβιβάζονται από το αστροπελέκι προς τις αισθήσεις μας. Στο στίχο, βέβαια, που παραθέτουμε, ο ποιητής αναγνωρίζει κάποια συγγένεια ανάμεσα στον ήχο και το φως και μιλώντας για κωδωνοκρουσία απιδίδει στο φως μια ακουστικότητα. Ο λαός κατανοεί τον ποιητικό στίχο παρόλο που συνηθίζει να διακρίνει τα δύο διαφορετικά σήματα. Ξέρει πως, όταν πέφτει αστροπελέκι, το ένα από αυτά φτάνει στο μάτι «αστραπιαία» ενώ το άλλο καθυστερεί. Και τα δυο σήματα πηγάζουν από το αστροπελέκι, μεταδίδονται μέσα από τον αέρα, αλλά είναι διαφορετικά. Οι Φυσικοί έχουν υπολογίσει ότι το σήμα που απευθύνεται στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού «ταξιδεύει» με ταχύτητα 300.000 χιλιομέτρων το δευτερόλεπτο ενώ η ταχύτητα του ηχητικού σήματος που ανιχνεύεται από το τύμπανο του αυτιού είναι εκατοντάδες χιλιάδες φορές μικρότερη. 340 περίπου μέτρα το δευτερόλεπτο. Ένας παρατηρητής σε απόσταση τριών χιλιομέτρων από τον κεραυνό αντιλαμβάνεται το φως που εκπέμπεται μέσα σ' ένα εκατοντάκις χιλιοστό του δευτερολέπτου ενώ για τη θροντή πρέπει να περιμένει εννέα περίπου δευτερόλεπτα.

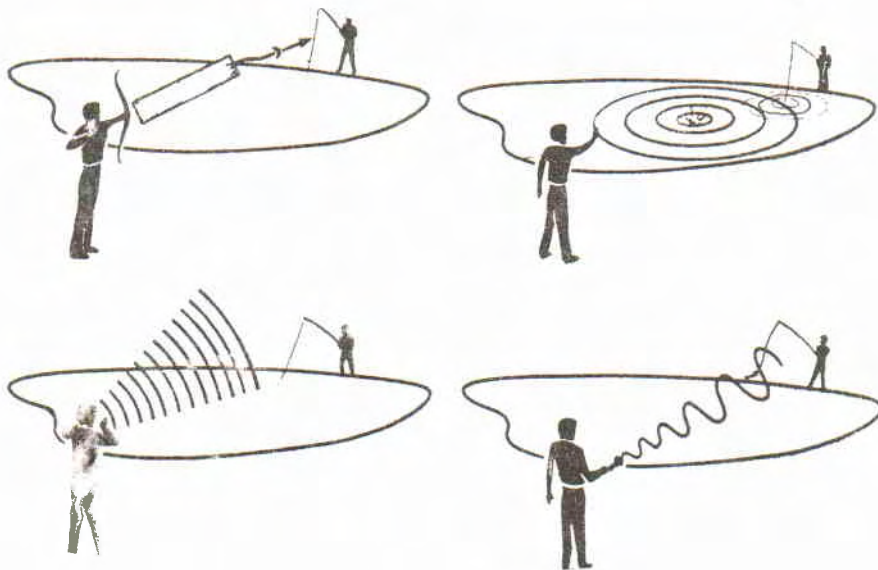
## Μεταβίβαση πληροφορίας και ενέργειας

Και δεν είναι μόνο ο ήχος και το φως. Μια μεγάλη ποικιλία μορφών επικοινωνίας τόσο ανάμεσα σε ανθρώπους όσο και γενικότερα ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε τμήματα του σύμπαντος λειτουργεί μέσα από παρόμοια «σήματα».

Δυο φίλοι βρίσκονται στις απέναντι όχθες μιας μεγάλης λίμνης. Ο ένας από αυτούς ψαρεύει και έχει εντοπίσει την προσοχή του σ' αυτό που κάνει

εκείνη τη στιγμή. Ο άλλος έχει ήδη μαγειρέψει και για τους δυο και προσπαθεί να μεταδώσει στον απέναντι την **πληροφορία** ότι «το φαγητό είναι έτοιμο».

Ένας τρόπος για να το καταφέρει είναι να του φωνάξει δυνατά ή ακόμα καλύτερα να του σφυρίξει όπως κάνουν οι τσοπάνηδες όταν θέλουν να επικοινωνήσουν από μεγάλη απόσταση.



Ένας άλλος τρόπος είναι να εκτοξεύσει προς την απέναντι όχθη ένα βέλος με κατάλληλο σημείωμα που θα φτάσει κοντά στο φίλο του.

Μπορεί ακόμα να πετάξει στο νερό ένα μεγάλο βότσαλο, οπότε η επιφάνεια της λίμνης θα ρυτιδώσει σε ομόκεντρους κύκλους που θα απλώνονται για να φτάσουν και να μεταβιβάσουν μια πληροφορία στον απέναντι φίλο του. Αν έχει προϋπάρξει συμφωνία μεταξύ τους, ο φίλος που ψαρεύει θα αποκωδικοποιήσει την πληροφορία, μεταφράζοντας ότι το φαγητό είναι έτοιμο.

Μπορεί, όμως, να χρησιμοποιήσει και το φως. Αν, λόγου χάριν, διαθέτει ένα φακό, μπορεί, αναβοσβήνοντάς τον, να επικοινωνήσει με τον φίλο του. Βέβαια, στην εποχή μας ένα walky-talky (γουόκι-τόκι) θα μπορούσε να μεταβιβάσει την πληροφορία ακόμα καλύτερα.

Ας συγκρίνουμε τώρα τις πέντε διαφορετικές μορφές μετάδοσης του μηνύματος.

Σε σχέση με όλες τις άλλες η επικοινωνία με το βέλος εμφανίζει ένα στοιχείο που την διαφοροποιεί σημαντικά. Πραγματοποιείται με μετακίνηση —από τον πομπό προς το δέκτη— ενός υλικού σώματος, του βέλους δηλαδή που εκτοξεύτηκε. Σε καμιά από τις άλλες περιπτώσεις δεν έγινε κάτι ανάλογο. Ακόμα και στην περίπτωση της πέτρας που έπεσε στη λίμνη και της

«ρυτίδωσε» την επιφάνεια, **δεν** έλαβε χώρα μετακίνηση νερού προς τον αποδέκτη του μηνύματος. Ένα μικρό ξυλαράκι που θα τύχαινε να επιπλέει σε κάποιο σημείο της επιφάνειας δεν θα παρασυρόταν προς την κατεύθυνση του δέκτη, αλλά απλά θα παλινδρομούσε κατακόρυφα μιμούμενο την κίνηση μιας γειτονικής υγρής ποσότητας. Αυτό, δηλαδή, που μεταφέρθηκε ήταν ένα σήμα για **ενεργοποίηση** των υγρών ποσοτήτων της επιφάνειας σε ταλαντώσεις κατακόρυφες, ένα σήμα που μεταδόθηκε μέχρι την αντίπερα όχθη κι έγινε αντιληπτό από το φίλο που είχε στραμμένη την προσοχή του αλλού.

Αλλά και το ηχητικό σήμα που μεταδόθηκε μέσα από τον αέρα δεν συνοδεύτηκε από μετακίνηση αερίων ποσοτήτων, όπως θα μπορούσε, ίσως, να υποθέσει κάποιος που δεν έχει μελετήσει τα ηχητικά φαινόμενα. Κατά τη μετάδοση του σήματος δημιουργήθηκαν στον αέρα πυκνώματα και αραιώματα, μεταβολές, δηλαδή, στην πίεση και στην πυκνότητά του, οι οποίες «ταξίδεψαν» μέχρι το αυτί του δέκτη. **Μεταφορά ενέργειας** έγινε, η πληροφορία μεταδόθηκε, ο αέρας έπαιξε το ρόλο του διάμεσου, αλλά δεν μετακινήθηκαν αέριες ποσότητες προς την κατεύθυνση του δέκτη, όπως, για παράδειγμα, συμβαίνει όταν φυσάει άνεμος.

Στις δύο άλλες περιπτώσεις τόσο το φωτεινό σήμα όσο και το ηλεκτρομαγνητικό σήμα της συσκευής έφτασε στον προορισμό του με τρομερή ταχύτητα, μεταβιβάζοντας την πληροφορία και οπωσδήποτε μεταφέροντας ενέργεια.

Ένα ακόμα στοιχείο είναι για τις τέσσερις περιπτώσεις κοινό. Η μετάδοση του σήματος συνοδεύτηκε από κάποιες μεταβολές που παρουσιάστηκαν σε ορισμένες ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Το μήνυμα με την πέτρα προκάλεσε μεταβολές στην κινητική κατάσταση του νερού της επιφάνειας. Κατά τη διάδοσή του παρουσίασαν χρονικές μεταβολές οι τιμές των κατακόρυφων ταχυτήτων των υδάτινων ποσοτήτων της επιφάνειας. Το ηχητικό σήμα προκάλεσε χρονικές μεταβολές στις τιμές της πίεσης του αέρα. Το ηλεκτρομαγνητικό σήμα της συσκευής συνοδεύτηκε από τις χρονικές μεταβολές ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ενώ κάτι παρόμοιο συνέβη και με το φωτεινό σήμα, σύμφωνα τουλάχιστον με τη θεωρία του Maxwell.

Να συνοψίσουμε. Τα κοινά στοιχεία κατά τη μετάδοση των τεσσάρων διαφορετικών σημάτων είναι:

1. Καθένα από αυτά τα γεγονότα λαμβάνει χώρα μέσα από μια συγκεκριμένη χρονική αλληλουχία. Προηγείται η εκπομπή, επακολουθεί η μετάδοση και η λήψη.

**εκπομπή  $\Rightarrow$  μετάδοση  $\Rightarrow$  λήψη**

Υπάρχει, δηλαδή, αντίστοιχα ένας πομπός, ένα μέσο διάδοσης και ένας δέκτης ανιχνευτής του σήματος.

2. Και στις τέσσερις περιπτώσεις μεταβιβάζεται από τον πομπό προς το δέκτη κάποια συγκεκριμένη **πληροφορία**.



3. Και στις τέσσερις περιπτώσεις παρατηρείται μεταφορά **ενέργειας** από τον πομπό προς το δέκτη.

4. Δεν παρατηρείται μετακίνηση υλικού σώματος από τον πομπό προς το δέκτη σε καμία περίπτωση από τις τέσσερις..

5. Κατά τη μετάδοση των σημάτων παρατηρούνται αλλοιώσεις των ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης.

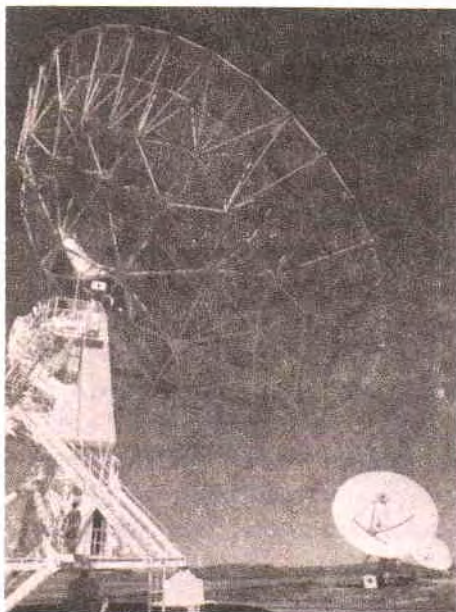
**Κύματα.** Κάθε σήμα, το οποίο κατά τη μετάδοσή του παρουσιάζει τα παραπάνω γνωρίσματα είτε το χαρακτηρίζουμε ως κύμα, είτε λέμε γι' αυτό ότι μεταδίδεται με τη μορφή κύματος.

Το κύμα είναι μία μορφή κίνησης της ύλης κατά την οποία δεν παράτηρείται μετακίνηση ενός υλικού σώματος, όπως συμβαίνει, για παράδειγμα, με τις αιωρήσεις ενός εκκρεμούς ή με τις κινήσεις των ηλεκτρονίων μέσα στον καθοδικό σωλήνα της τηλεόρασης. Το ιδιαίτερο γνώρισμα του κύματος μέσα στην ύλη (φορέα) είναι ότι συντελείται μεταφορά πληροφορίας και ενέργειας προς ορισμένη κατεύθυνση χωρίς τα συστατικά του υλικού «φορέα» να μετακινούνται προς την κατεύθυνση αυτή. Είναι κάτι σαν μια φήμη για αναδιάρθρωση της κυβέρνησης, η οποία ξεκινάει από την Αθήνα και φτάνει πολύ γρήγορα στην Καρδίτσα χωρίς κανένα από τα άτομα που πήραν μέρος στη διάδοσή της να μετακινηθεί από την αρχική θέση του.

Ας δούμε, όμως, και **τι δεν είναι κύμα**. Το νερό που κατεβάζει ένα ποτάμι μεταφέρει πληροφορία και ενέργεια αλλά η μεταφορά αυτή δεν έχει το χαρακτήρα κύματος γιατί σ' αυτήν την περίπτωση συντελείται μετακίνηση υδάτινης μάζας από τις πηγές προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση, κάτι ανάλογο, δηλαδή, με αυτό που συμβαίνει και με την εκτόξευση του βέλους από τη μια όχθη της λίμνης στην απέναντι.

Αντίθετα η ενέργεια και η πληροφορία την οποία μεταβιβάζει στο αυτί του ακροατή το βιολοντσέλο ενός κοντσερτού, η φωνή μιας λαϊκής τραγουδίστριας, το κλάξον ενός γιώτα χι ή η σειρήνα ενός νοσοκομειακού, η ενέργεια και η πληροφορία την οποία η Κασσιόπη μιας ξάστερης νύχτας





μεταβιβάζει στα μάτια μας και οι αόρατοι για το ανθρώπινο μάτι αστέρες στα μεγάλα ραδιοτηλεσκόπια, η ενέργεια και η πληροφορία που μεταβιβάζεται στο μπτεόν αρμέ της πολυκατοικίας μας από το μακρινό επίκεντρο ενός σεισμού που μας αναστάτωσε, η ενέργεια και πληροφορία που μεταβιβάζει στο ραδιοφωνικό δέκτη μας κάποιος πομπός της ΕΡΤ, αποτελούν φαινόμενα κυματικού χαρακτήρα αποτελούν μ' άλλα λόγια **μορφές κίνησης της ύλης που πραγματοποιούνται με μηχανισμό κυματικό.**

Κάθε κύμα ανιχνεύεται με κατάλληλο δέκτη-ανιχνευτή όπως είναι το μικρόφωνο, η φωτογραφική πλάκα, ο σειсмоγράφος και η συσκευή της τηλεόρασης. Δυο τέτοιους πολύτιμους ανιχνευτικούς μηχανισμούς διαθέτουν και οι άνθρωποι. Το μάτι για τα φωτεινά κύματα και το αυτί για τα ηχητικά κύματα —σε συνδυασμό με τους μηχανισμούς μεταβίβασης στον εγκέφαλο— ανιχνεύουν και καταγράφουν τις αντίστοιχες πληροφορίες-μηνύματα που φθάνουν από τον «έξω» κόσμο, στον οποίο κάθε άτομο ζει. Η όραση και η ακοή δεν είναι μόνο μέσα επιβίωσης αλλά και όργανα που συνεισφέρουν στο στοχασμό και κατά

συνέπεια στον εμπλουτισμό του ατόμου που συνεχίζεται ασταμάτητα από την πρώτη μέρα που οι δυο αυτές αισθήσεις αρχίζουν να λειτουργούν.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα κύματα που παράγονται από **παλμικές περιοδικές κινήσεις**. Τέτοιας μορφής είναι τα ηχητικά και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Πηγές αυτών των κυμάτων είναι οι λεγόμενοι ταλαντωτές, παλλόμενα, δηλαδή, συστήματα, η συμπεριφορά των οποίων χαρακτηρίζεται από μία ορισμένη περίοδο και ορισμένη συχνότητα. Αλλά και οι ανιχνευτές αυτών των κυμάτων είναι επίσης συστήματα, τα οποία είναι δυνατόν να υποβληθούν σε παλμική περιοδική κίνηση. Ο ήχος της χορδής μιας κιθάρας παράγεται από κάποια παλμική περιοδική κίνηση (μηχανική ταλάντωση), διαδίδεται αλλοιώνοντας περιοδικά την πίεση και

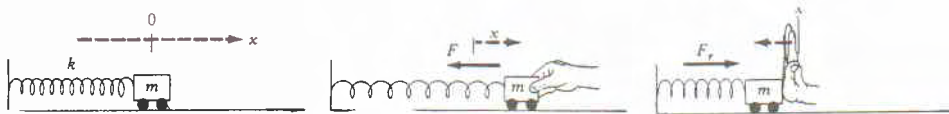
την πυκνότητα του αέρα και ανιχνεύεται, όπως έχουμε πει, από τον κατάλληλο ταλαντωτή (τύμπανο) που διαθέτει το αυτί του ανθρώπου. Το ραδιοφωνικό κύμα εκπέμπεται κατά την ηλεκτρική ταλάντωση ενός παλλόμενου διπόλου, διαδίδεται ως περιοδικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και ανιχνεύεται από την κεραία, τον κατάλληλο δηλαδή ηλεκτρομαγνητικό ταλαντωτή που διαθέτει ο ραδιοφωνικός δέκτης μας.

Στα παρακάτω με τον όρο «κύμα» θα εννοούμε το «περιοδικό κύμα». Για να κατανοήσουμε, όμως, τη συμπεριφορά του θα χρειαστεί προηγουμένως να ασχοληθούμε με τη μελέτη του φαινομένου «ταλάντωση». Θα ασχοληθούμε πρώτα με τη λεγόμενη «μηχανική» ταλάντωση, την παλμική, δηλαδή, κίνηση ενός υλικού σημείου, η οποία μπορεί να μελετηθεί με τους νευτώνικούς νόμους της κίνησης. Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τη λεγόμενη «ηλεκτρική» ταλάντωση, την ειδική, δηλαδή, συμπεριφορά ενός ηλεκτρικού κυκλώματος που διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα. Και στις δύο περιπτώσεις το ζήτημα θα αντιμετωπιστεί και από τη σκοπιά των ενεργειακών διαδικασιών. Θα επιστρατεύσουμε και ένα ορισμένο μοντέλο για κάθε περίπτωση. Στις μηχανικές ταλαντώσεις το μοντέλο θα είναι ένα ελατήριο, στην άκρη του οποίου βρίσκεται προσαρμοσμένο ένα σώμα που μπορεί να εκτελεί παλινδρομική κίνηση χωρίς να συντελείται ενεργειακή υποβάθμιση. Στις ηλεκτρικές ταλαντώσεις το μοντέλο μας θα είναι ένα κύκλωμα με πηνίο, πυκνωτή και αμελητέα ωμική αντίσταση, το οποίο είναι δυνατό να διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα, χωρίς επίσης να συμβαίνει ενεργειακή υποβάθμιση.



## Μηχανικές ταλαντώσεις

Στο μοντέλο που περιγράψαμε το σώμα —μάζας  $m$ — θεωρείται ως υλικό σημείο, το οποίο μπορεί να κινείται ευθύγραμμα και παλινδρομικά πάνω σε οριζόντια επιφάνεια χωρίς τριβές. Το σταθεράς « $k$ » ελατήριο είναι ιδανικό, πράγμα που σημαίνει ότι κατά τις συσπειρώσεις και τις επιμήκυνσεις του δεν παρατηρείται υποβάθμιση της ενέργειας. Στη θέση, στην οποία το



ελατήριο παρουσιάζει το φυσικό μήκος του, το σύστημα ισορροπεί. Είναι **μια ισορροπία ευσταθής κατά την οποία** —όπως είναι γνωστό— **το σύστημα παρουσιάζει την ελάχιστη δυναμική ενέργεια**. Όταν το σύστημα τεθεί σε παλινδρομική κίνηση η θέση αυτή (O) θα λέγεται θέση ισορροπίας. Η εκάστοτε θέση του κινούμενου σώματος ως προς ένα συγκεκριμένο σύστημα αξόνων θα μπορεί να προσδιορίζεται με τη βοήθεια ενός διανύσματος θέσης  $\vec{x}$ , το οποίο το λέμε και «**απομάκρυνση**». Το διάνυσμα θα έχει ως αρχή την αρχή των αξόνων και ως πέρας την εκάστοτε θέση του κινητού. Είναι βολικό να συμφωνήσουμε να θεωρούμε ότι η αρχή των αξόνων συμπίπτει με τη θέση ισορροπίας (O) και ότι ο άξονας  $x$  συμπίπτει με την ευθύγραμμη τροχιά με θετική φορά —όπως φαίνεται και στο σχήμα— προς τα δεξιά.

Ύστερα από αυτήν τη θεώρηση εύκολα γίνεται κατανοητό για την εκάστοτε αλγεβρική τιμή της απομάκρυνσης (σε σχέση με τον άξονα  $x$ ) ότι:

(i) θα είναι θετική όταν το σώμα θα βρίσκεται δεξιά από τη θέση ισορροπίας και αρνητική όταν θα βρίσκεται αριστερά από τη θέση αυτή και ότι

(ii) κατ' απόλυτη τιμή θα συμπίπτει με την επιμήκυνση (ή συσπείρωση) « $\Delta l$ » που θα εμφανίζει το ελατήριο εκείνη τη στιγμή. Θα είναι δηλαδή  $|\Delta l| = |x|$ .

**Στη γλώσσα της ενέργειας.** Μπορούμε να αρχίσουμε τη μελέτη μας περιγράφοντας τη συμπεριφορά του συστήματος στη γλώσσα της ενέργειας. Ενεργοποιούμε το σύστημα και **αφήνουμε** το σώμα να εκτελέσει την οριζόντια παλινδρομική του κίνηση. Δεν παρεμβαίνουμε, δηλαδή, παρά μόνο αρχικά, γεγονός που χαρακτηρίζει την ταλάντωση ως «ελεύθερη».

Εφόσον στο μοντέλο που χρησιμοποιούμε δεχθήκαμε ότι δεν συντελείται ενεργειακή υποβάθμιση, η ποσότητα ενέργειας ( $E$ ) με την οποία το τροφοδοτήσαμε θα διατηρείται σταθερή. Είναι, όπως λέμε στη θερμοδυναμική, ένα **κλειστό σύστημα**. Το άθροισμα μ' άλλα λόγια της κινητικής ενέργειας του σώματος και της ελαστικής δυναμικής ενέργειας του ελατη-



ρίου παραμένει σταθερό και ίσο με την ενέργεια  $E$ . Αν λοιπόν σε κάποια στιγμή η ταχύτητα του σώματος είναι  $\dot{x}$  και η απομάκρυνση του  $\bar{x}$  θα ισχύει

$$\frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E = \text{σταθερό}$$

Η εξίσωση αυτή μας επιτρέπει να βγάλουμε εύκολα ορισμένα συμπεράσματα.

**α.** Καθώς το κινητό απομακρύνεται από τη θέση ισορροπίας αυξάνει η δυναμική του ενέργεια εις βάρος της κινητικής και φυσικά ελαττώνεται το μέτρο της ταχύτητας.

**β.** Το σώμα κινείται ανάμεσα σε δύο ακραίες θέσεις στις οποίες η κινητική ενέργεια μηδενίζεται ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιείται η δυναμική ενέργεια. Στις δύο αυτές θέσεις ( $x_1, x_2$ ) ισχύει:

$$\frac{1}{2}kx_1^2 = \frac{1}{2}kx_2^2 = E \Rightarrow |x_1| = |x_2| = \sqrt{2E/k}$$

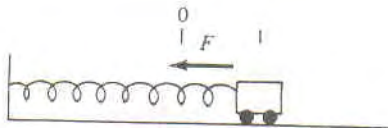
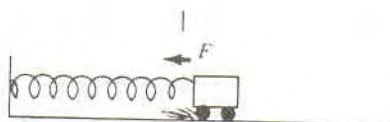
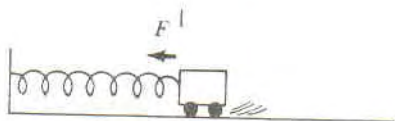
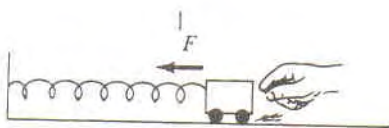
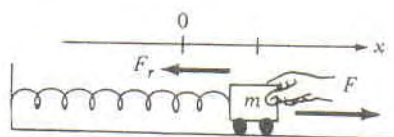
Οι δύο συνεπώς ακραίες θέσεις είναι —ως προς τη θέση ισορροπίας— συμμετρικές. Η θετική ποσότητα  $\sqrt{2E/k}$  που παριστάνει τη μέγιστη απόσταση από τη θέση ισορροπίας λέγεται πλάτος της ταλάντωσης και συμβολίζεται με « $x_0$ ».

Ισχύει  $E = \frac{1}{2}kx_0^2$ , πράγμα που σημαίνει ότι το πλάτος της ταλάντωσης του συγκεκριμένου ταλαντωτή εξαρτάται από την ενέργεια με την οποία τον τροφοδοτήσαμε.

**γ.** Τις στιγμές κατά τις οποίες το σώμα περνάει από τη θέση ισορροπίας η κινητική του ενέργεια γίνεται μέγιστη όπως γίνεται μέγιστη και η απόλυτη τιμή ( $u_0$ ) της ταχύτητας

$$\frac{1}{2}mu_0^2 = E$$

**δ.** Η χρονική εξέλιξη του φαινομένου περιγράφεται με τη λεγόμενη «εξίσωση κίνησης», τη συνάρτηση δηλαδή  $x=x(t)$  η οποία μας δίνει τη θέση του κινητού σε κάθε χρονική στιγμή. Η συνάρτηση αυτή μπορεί να προκύψει από το συνδυασμό της εξίσωσης  $\frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}kx^2 = E$  με





την εξίσωση ορισμού της ταχύτητας. Προκύπτει έτσι η διαφορική εξίσωση

$$\frac{1}{2} m \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} kx^2 = E$$

Η λύση της είναι η συνάρτηση απομάκρυνσης-χρόνου

$$x = x_0 \eta \mu(\sqrt{k/m} \ t) \quad (\text{με } x_0 = \sqrt{2E/k})$$

στην οποία ως αρχή των χρόνων θεωρήθηκε η στιγμή που το κινητό βρισκόταν στη θέση ισορροπίας ( $x=0$ ) κινούμενο προς το θετικό ημιάξονα ( $v>0$ ).

Είναι μια συνάρτηση αρμονική παρόμοια με αυτές που συναντήσαμε κατά τη μελέτη του εναλλασσόμενου ρεύματος. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο η ταλάντωση που μελετάμε χαρακτηρίζεται ως «αρμονική».

Το πρώτο πράγμα που μας «λέει» η αρμονική αυτή συνάρτηση είναι ότι το κινητό ανά ίσα χρονικά διαστήματα « $2\pi\sqrt{m/k}$ » ξαναβρίσκεται στην ίδια θέση. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι κατά τις αντίστοιχες στιγμές το κινητό επανακτά και την ταχύτητά του, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι **η κίνησή του είναι περιοδική**. Καθένα από τα ίσα χρονικά διαστήματα αποτελεί την περίοδο ( $T$ ) της αρμονικής κίνησης. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε  $T = 2\pi\sqrt{m/k}$  και να δώσουμε στη συνάντηση τη μορφή  $x = x_0 \eta \mu 2\pi t / T$  ή την  $x = x_0 \eta \mu \omega t$  ή και την ακόμα συνηθέστερη

$$x = x_0 \eta \mu \omega t$$

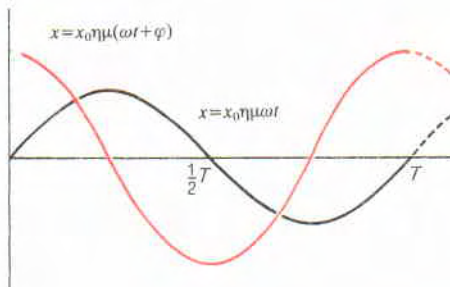
στην οποία το  $\omega$  παριστάνει (όπως και στα εναλλασσόμενα ρεύμα) τη λεγόμενη κυκλική συχνότητα το γινόμενο δηλαδή της συχνότητας ( $\nu$ ) επί τον αριθμό  $2\pi$ . Ισχύει φυσικά  $\omega = \sqrt{k/m}$ . Η ποσότητα —τέλος— « $\omega t$ » αποτελεί τη φάση της απομάκρυνσης.

**Η ταχύτητα.** Η συνάντηση που μας περιγράφει τη χρονική εξέλιξη της ταχύτητας μπορεί να προκύψει ως εξής

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} k x^2 &= \frac{1}{2} k x_0^2 \\ x &= x_0 \eta \mu \omega t \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} v^2 &= \frac{k}{m} x_0^2 \sin^2 \omega t \\ \text{και επειδή } \frac{k}{m} &= \omega^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow v = \omega x_0 \sin \omega t.$$

Εννοείται ότι στη συνάρτηση που προκύπτει, το σύμβολο « $v$ » παριστάνει την αλγεβρική τιμή της ταχύτητας δηλαδή μια ποσότητα θετική ή αρνητική ανάλογα με τη φορά του διανύσματος της ταχύτητας σε σχέση προς τον άξονα.

**Σημείωση.** Αν θελήσουμε να θεωρήσουμε ως αρχή των χρόνων όχι τη στιγμή που αναφέραμε ( $x=0$   $v>0$ ) αλλά κάποια άλλη τυχαία χρονική στιγμή θα πρέπει να δώσουμε στην εξίσωση κίνη-



σης τη μορφή  $x=x_0\eta\mu(\omega t+\varphi)$  στην οποία το « $\varphi$ » παριστάνει την αρχική φάση, την τιμή δηλαδή της φάσης κατά την αρχή των χρόνων. Σ' αυτή την περίπτωση η συνάρτηση ταχύτητας-χρόνου θα έχει τη μορφή  $v=\omega x_0\sigma\upsilon\nu(\omega t+\varphi)$ .

**Στη γλώσσα της νευτωνικής δυναμικής.** Εφαρμόζουμε τώρα τη γνωστή νευτωνική πρακτική στην οποία πρωταγωνιστεί η έννοια της δύναμης.

Σημειώνουμε τις δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα και συνδυάζουμε (α) τους νόμους στους οποίους πειθαρχούν με (β) το δεύτερο νόμο της κίνησης και (γ) τους ορισμούς των μεγεθών ταχύτητα και επιτάχυνση.

Η δύναμη που ασκείται στο σώμα από το —άλλοτε τεντωμένο και άλλοτε συσπειρωμένο— ελατήριο είναι και η συνισταμένη των ασκουμένων δυνάμεων. Αν υποθέσουμε ότι τα  $F, \alpha, v, x$  παριστάνουν αντίστοιχα τις αλγεβρικές τιμές της ασκούμενης αυτής δύναμης, της επιτάχυνσης του σώματος, της ταχύτητας του σώματος και της απομάκρυνσης του, θα ισχύει.

Σύμφωνα με το νόμο της ελαστικότητας (Hooke)  $F=-kx$ .

Σύμφωνα με το δεύτερο νευτωνικό νόμο της κίνησης  $F=ma$ .

Σύμφωνα με τους ορισμούς της ταχύτητας και της επιτάχυνσης  $v=dx/dt$  και  $a=du/dt$ . Προκύπτει η εξίσωση  $m(du/dt)+kx=0$  η οποία, σε συνδυασμό με την εξίσωση ορισμού της ταχύτητας, μας οδηγεί σε μια διαφορική εξίσωση. Η λύση της είναι η αρμονική συνάρτηση απομάκρυνσης-χρόνου  $x=x_0\eta\mu\omega t$  η ίδια δηλαδή συνάρτηση στην οποία είχαμε καταλήξει εφαρμόζοντας την ενεργειακή πρακτική.

**Η ταχύτητα.** Η συνάρτηση που μας δίνει τη χρονική εξέλιξη της ταχύτητας μπορεί να προκύψει από την εξίσωση ορισμού της ταχύτητας μέσα από τη μαθηματική πράξη της παραγώγισης

$$\left. \begin{array}{l} x=x_0\eta\mu\omega t \\ v=\frac{dx}{dt} \end{array} \right\} \Rightarrow v=\omega x_0\sigma\upsilon\nu\omega t$$

**Η επιτάχυνση.** Στη νευτωνική γλώσσα χρησιμοποιείται μια έννοια η οποία κατά την ενεργειακή περιγραφή του φαινομένου δεν χρησιμοποιήθηκε. Είναι η έννοια «επιτάχυνση». Η εξίσωση που μας δίνει τη χρονική της εξέλιξη



μπορεί να προκύψει από το συνδυασμό του δευτέρου νόμου της κίνησης με το νόμο της ελαστικότητας

$$\left. \begin{array}{l} F=ma \\ F=-kx \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} a=-\frac{k}{m}x \\ \frac{k}{m}=\omega^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} a=-\omega^2x \\ x=x_0\eta\mu\omega t \end{array} \right\} \Rightarrow a=-\omega^2x_0\eta\mu\omega t.$$

**Η δύναμη.** Με βάση τα προηγούμενα εύκολα συμπεραίνεται ότι η αλγεβρική τιμή της ασκούμενης στο σώμα (συνισταμένης) δύναμης και η αλγεβρική τιμή της απομάκρυνσης που παρουσιάζει το σώμα εκείνη τη στιγμή σχετίζονται με την εξίσωση

$$F=-m\omega^2x$$

Η εξίσωση εκφράζει ότι η δύναμη  $F$  έχει τιμή ανάλογη προς την απομάκρυνση και φορά αντίθετη από αυτήν.

**Το πλάτος και η περίοδος** αποτελούν τα βασικά στοιχεία ταυτότητας μιας αρμονικής ταλάντωσης. Χρειάζεται, ίσως, συνοψίζοντας να επισημάνουμε ότι στην ελεύθερη αρμονική ταλάντωση την οποία μελετάμε.

α) το πλάτος καθορίζεται από την ποσότητα ενέργειας με την οποία τροφοδοτήσαμε το σύστημα.

β) η περίοδος της κίνησης έχει τιμή ανεξάρτητη από το πλάτος και την ενέργεια. Η τιμή της εξαρτάται μόνο από τη σταθερά του ελατηρίου και τη μάζα του σώματος. Αν δηλαδή τροφοδοτήσουμε με μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας το σύστημα και το αφήσουμε να εκτελέσει ελεύθερη ταλάντωση θα διαπιστωθεί μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης αλλά η περίοδος θα παραμείνει αμετάβλητη και ίση με  $2\pi\sqrt{m/k}$ . Η σταθερή αυτή περίοδος αποτελεί μ' άλλα λόγια ένα χαρακτηριστικό στοιχείο του συγκεκριμένου ταλαντωτή γι' αυτό λέγεται και **ιδιοπερίοδος του ταλαντωτή**. Το ίδιο φυσικά ισχύει και για τη συχνότητα της ελεύθερης ταλάντωσης η οποία λέγεται **ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή**.

## Αρμονικές ταλαντώσεις

Στα προηγούμενα αναφερθήκαμε στο ειδικό μοντέλο ενός σώματος (υλικού σημείου) προσαρμοσμένου σε ιδανικό ελατήριο το οποίο εκτελεί μια ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση πάνω σε οριζόντια επιφάνεια χωρίς τριβές. Ας επιχειρήσουμε να γενικεύσουμε. Τόσο στη φύση όσο και στις ανθρώπινες κατασκευές συχνά συναντάμε συστήματα η συμπεριφορά των οποίων προσεγγίζει το μοντέλο που μελετήσαμε. Σε καθένα από αυτά τα συστήματα διακρίνουμε ένα σώμα για το οποίο υπάρχει κάποια θέση ευσταθούς ισορροπίας και σε περίπτωση που απομακρύνεται από αυτήν επεμβαίνει το περιβάλλον και του ασκεί μια συνισταμένη δύναμη επαναφο-

ράς. Το σώμα εκτελεί έτσι μια ταλάντωση. Αν η δύναμη επαναφοράς ακολουθεί ένα νόμο παρόμοιο με το νόμο της δύναμης του ελατηρίου η ταλάντωση θα είναι αρμονική, πράγμα που σημαίνει ότι η συνάρτηση απομάκρυνσης χρόνου θα είναι ημιτονοειδής.

Μια ευθύγραμμη ταλάντωση υλικού σημείου θα λέγεται λοιπόν αρμονική εφόσον η συνάρτηση απομάκρυνσης χρόνου έχει τη μορφή

$$x = x_0 \mu(\omega t + \varphi)$$

**Οι προϋποθέσεις.** Ας δούμε όμως με κάποια αυστηρότητα τις απαιτούμενες προϋποθέσεις για να πραγματοποιηθεί μια τέτοια κίνηση. Στη γενική περίπτωση.

1. Χρησιμοποιώντας τη γλώσσα της νευτωνικής δυναμικής μπορούμε να πούμε ότι για να πραγματοποιηθεί μια τέτοιου είδους κίνηση **πρέπει και αρκεί η ασκουμένη (συνισταμένη) δύναμη (i) να έχει τιμή ανάλογη προς την απομάκρυνση και (ii) να είναι δύναμη επαναφοράς, να έχει δηλαδή φορά διαρκώς αντίθετη προς τη φορά της απομάκρυνσης.** Η αναγκαία και ικανή αυτή συνθήκη εκφάζεται με την εξίσωση  $F = -Dx$  στην οποία η λεγόμενη **σταθερά επαναφοράς «D»** θα είναι ίση με το γινόμενο  $m\omega^2$  της μάζας δηλαδή του ταλαντωτή επί το τετράγωνο της κυκλικής συχνότητας. Στην ειδική περίπτωση που μελετήσαμε βλέπουμε ότι η σταθερά επαναφοράς συμπίπτει με τη σταθερά του ελατηρίου. Στη γενική περίπτωση η τιμή της εξαρτάται από ορισμένα στοιχεία ταυτότητας του σώματος και του περιβάλλοντος και από το είδος της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Αν λόγου χάριν ο ταλαντωτής είναι το σφαιρίδιο ενός απλού εκκρεμούς η σταθερά επαναφοράς εξαρτάται όπως θα δούμε από το βάρος του σφαιριδίου και το μήκος του εκκρεμούς.
2. Μπορούμε όμως να αντιμετωπίσουμε το ίδιο ζήτημα και **από τη σκοπιά της ενέργειας.**

Στο συγκεκριμένο μοντέλο που μελετήσαμε ως δυναμική ενέργεια του συστήματος θεωρήσαμε την ελαστική δυναμική ενέργεια του ελατηρίου. Ας δούμε τι συμβαίνει στη γενική περίπτωση. Όταν ο ταλαντωτής βρίσκεται στη θέση ισορροπίας ακίνητος, η ισορροπία του είναι, βέβαια, ευσταθής και —όπως κάθε σώμα που βρίσκεται σε τέτοιου είδους ισορροπία —παρουσιάζει την **ελάχιστη τιμή δυναμικής ενέργειας.** Η ιδιαιτερότητα, τώρα, του αρμονικού ταλαντωτή έγκειται στο ότι αν θελήσουμε να παρέμβουμε ώστε να τον μετακινήσουμε από τη θέση ισορροπίας, το υπόλοιπο περιβάλλον θα επιδράσει πάνω του ασκώντας όχι μια οποιαδήποτε δύναμη επαναφοράς, αλλά μια δύναμη επαναφοράς ανάλογη προς την απομάκρυνση.  $F = -Dx$ . Για να πετύχουμε συνεπώς αυτή τη μετακίνηση θα χρειαστεί να ασκούμε δύναμη  $F' = Dx$  να μεταβιβάσουμε δηλαδή ενέργεια ίση με το έργο αυτής της δύναμης. Το έργο αυτό είναι ίσο με  $Dx^2/2$ . Με το που βρίσκεται συνεπώς το σώμα σε μια τυχαία θέση ( $x$ ) θα έχει —ανεξάρτητα από την κίνησή του— ενέργεια



περισσότερη κατά  $Dx^2/2$  από όση είχε στη θέση της ισορροπίας του. Η ενέργεια αυτή δε σχετίζεται με την κίνησή του αλλά με τις αλληλεπιδράσεις του αρμονικού αυτού ταλαντωτή με το περιβάλλον του. Είναι μ' άλλα λόγια **ενέργεια δυναμική**. Κάθε λοιπόν αρμονικός ταλαντωτής εφόσον απέχει κατά  $|x|$  από τη θέση ισορροπίας του, θα έχει δυναμική ενέργεια  $U=Dx^2/2$  σε σχέση εννοείται με τη θέση ισορροπίας του.

Ισχύει όμως και το αντίστροφο. Εφόσον η δυναμική ενέργεια ενός ταλαντωτή είναι ανάλογη προς το τετράγωνο της απομάκρυνσής του, η κίνησή του θα είναι απλή αρμονική ταλάντωση.

Αναγκαία και ικανή συνθήκη απλής αρμονικής ταλάντωσης

Στη γλώσσα της νευτωνική δυναμικής

$$F = -Dx$$

Στη γλώσσα της ενέργειας

$$U = \frac{1}{2}Dx^2$$

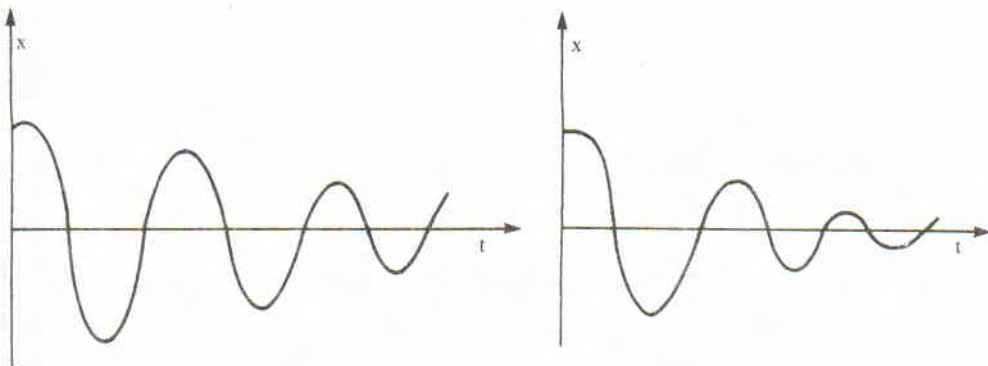


## Αμείωτες και ελεύθερες ταλαντώσεις

Είπαμε ότι μια ταλάντωση θα χαρακτηρίζεται αρμονική εφόσον η χρονική συνάρτηση που προσδιορίζει τη θέση του κινητού είναι ημιτονοειδής. Ο προσδιορισμός **απλή** υποδηλώνει ευθύγραμμη κίνηση υλικού σημείου. Υπάρχουν, δηλαδή, και ταλαντώσεις που είναι αρμονικές αλλά δεν είναι απλές. Η κίνηση την οποία κάνει μια μαγνητική βελόνα καθώς προσανατολίζεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο είναι —για μικρά «γωνιακά πλάτη»— μια αρμονική ταλάντωση, γιατί αποδεικνύεται ότι η χρονική συνάρτηση της γωνιακής απομάκρυνσης είναι ημιτονοειδής. Η κίνηση, όμως, αυτή είναι μια περιστροφική κίνηση ενός σώματος με όχι αμελητέες διαστάσεις και λέγεται στροφική αρμονική ταλάντωση.

Μια ταλάντωση θα χαρακτηρίζεται **αμείωτη** εφόσον η ενέργεια του ταλαντωτή κατά τη διάρκεια της κίνησης διατηρείται αμετάβλητη.

Μια ταλάντωση, τέλος, χαρακτηρίζεται **ελεύθερη** εφόσον το αρχικά ακίνητο σύστημα, τροφοδοτούμενο κατ' αρχήν ενεργειακά, αφήνεται στη



συνέχεια να παλινδρομεί χωρίς άλλη παρέμβαση. Γεγονός είναι ότι ταλαντωτές που να εκτελούν ελεύθερες και αμείωτες ταλαντώσεις δεν υφίστανται. Σε οποιαδήποτε ελεύθερη ταλάντωση η ενέργεια του ταλαντωτή αναπόφευκτα θα υποβαθμίζεται, η μηχανική ενέργεια θα μειώνεται συνεχώς και η ταλάντωση θα λέγεται **φθίνουσα**.

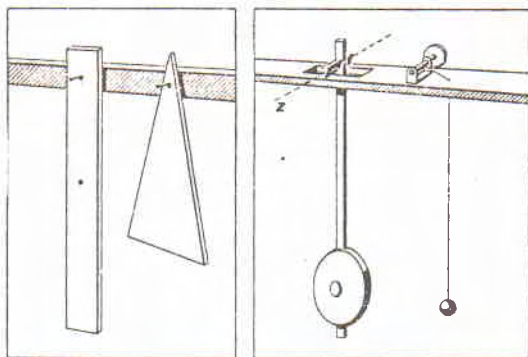
## Ένα ακόμα παράδειγμα αρμονικού ταλαντωτή. Το απλό εκκρεμές.

«Εκκρεμές» είναι μια λέξη της καθαρεύουσας, την οποία συχνά χρησιμοποιούμε στην καθημερινή ζωή. Όταν δεν χρησιμοποιείται μεταφορικά, μας παραπέμπει σε κάποιο σώμα που κρέμεται. Με το ίδιο ακριβώς σημαίνόμενο χρησιμοποιούν αυτόν τον όρο και οι Φυσικοί. Στη δική τους «διάλεκτο» ο όρος αυτός υποδηλώνει ότι όταν το κρεμασμένο σώμα είναι ακίνητο βρίσκεται σε ευσταθή ισορροπία. Στη συνήθη περίπτωση κατά την οποία το σώμα επηρεάζεται μόνο\* από το πεδίο βαρύτητας, ο ίδιος όρος υποδηλώνει και ότι το κρεμασμένο σώμα μπορεί να στρέφεται περί σταθερό οριζόντιο άξονα έχοντας το κέντρο βάρους του χαμηλότερα από αυτόν. Σε περίπτωση, τέλος, που ολοκληρωθεί η μάζα του εκκρεμούς βρίσκεται συγκεντρωμένη στο κέντρο βάρους του, το εκκρεμές λέγεται απλό. Είναι φανερό ότι το απλό εκκρεμές είναι κι αυτό ένα μοντέλο το οποίο μέσα από μια ορισμένη κατασκευή μπορούμε να προσεγγίσουμε. Ένα σφαιρίδιο μικρής\*\* ακτίνας

\* Εννοείται ότι στο σύστημα ασκείται και η δύναμη από το στήριγμα, χωρίς την οποία δε θα μπορούσε το σώμα να κρέμεται. Δεν ασκείται, όμως, δύναμη από κάποιο ηλεκτρικό (ή μαγνητικό) πεδίο, μέσα στο οποίο θα μπορούσε να γίνει η αιώρηση.

\*\* Είναι γνωστό ότι στις Φυσικές Επιστήμες οι διάφοροι ποσοτικοί χαρακτηρισμοί, όπως «μικρός», «μεγάλος», «αμελητέος» και «όχι αμελητέος» έχουν νόημα μόνο σε σχέση με κάποια ποσότητα προς την οποία γίνεται σύγκριση. Στην περίπτωσή μας η ακτίνα του σφαιριδίου θεωρείται μικρή σε σχέση με το μήκος του νήματος, ενώ η μάζα του νήματος θεωρείται αμελητέα συγκρινόμενη προς τη μάζα του σφαιριδίου.

κρεμασμένο από την άκρη ενός νήματος αμελητέας μάζας και μήκους χμετάβλητου αποτελεί μια ικανοποιητική προσέγγιση του απλού εκκρεμούς. Το άλλο άκρο του νήματος διατηρείται ακίνητο. Το όλο σύστημα μπορεί να αιωρείται σε κατακόρυφο επίπεδο.



Διατηρώντας τεντωμένο το νήμα απομακρύνουμε το σφαιρίδιο από τη θέση ισορροπίας, πράγμα που σημαίνει ότι τροφοδοτούμε ενεργειακά το σύστημα. Αφήνουμε το σφαιρίδιο ελεύθερο,

οπότε επακολουθεί η αιώρηση. Η μέγιστη γωνία που σχηματίζει το νήμα με την κατακόρυφο αποτελεί το λεγόμενο πλάτος της αιώρησης.

Στα παρακάτω επιδιώκουμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά του απλού εκκρεμούς για μικρά —μέχρι τρεις μοίρες— πλάτη αιώρησης. Το ζήτημα θα αντιμετωπιστεί και από τις δύο γνωστές μας σκοπιές. Η μία είναι η σκοπιά των πειραματικών διαδικασιών και η άλλη η σκοπιά της θεωρητικής επεξεργασίας του.

**Πειραματική μελέτη.** Εφοδιασμένοι με ένα χρονόμετρο μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι η κίνηση του εκκρεμούς παρουσιάζει περιοδικότητα. Το εκκρεμές εκτελεί σε σταθερό χρόνο μία πλήρη αιώρηση. Ο χρόνος αυτός είναι η περίοδος. Και είναι χαρακτηριστικό ότι παρά την αναπόφευκτη ενεργειακή υποβάθμιση, την οποία «προδίδει» και η αργή ελάττωση του πλάτους αιώρησης, η περίοδος του εκκρεμούς παραμένει σταθερή. Είναι η διαπίστωση την οποία σύμφωνα με την παράδοση έκανε για πρώτη φορά ο Γαλιλαίος παρατηρώντας τις αιωρήσεις ενός πολυέλαιου εκκλησίας και μετρώντας την περίοδό τους με τους σφυγμούς.

Μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στο ερώτημα «Από τι εξαρτάται η περίοδος ενός εκκρεμούς;»

**Περίοδος και μάζα του εκκρεμούς.** Διατηρώντας το ίδιο μήκος νήματος και χρησιμοποιώντας μικρά σφαιρίδια διαφορετικών βαρών διαπιστώνουμε ότι η περίοδος ενός απλού εκκρεμούς είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του.

**Περίοδος και μήκος του εκκρεμούς.** Μετράμε με μετροταινία το μήκος του νήματος (μήκος του εκκρεμούς) και με χρονόμετρο την αντίστοιχη περίοδο. Στη συνέχεια αλλάζουμε το μήκος του εκκρεμούς και επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις καταγράφοντας τα αποτελέσματα σε πίνακα. Εύκολα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση του μήκους συνεπάγεται αύξηση της περιόδου του εκκρεμούς. Η μεταξύ τους, όμως, σχέση δεν είναι σχέση αναλογίας. Σε μια σχετική πειραματική προσπάθεια πήραμε τα αποτελέσματα που περιέχονται στον παρακάτω πίνακα.

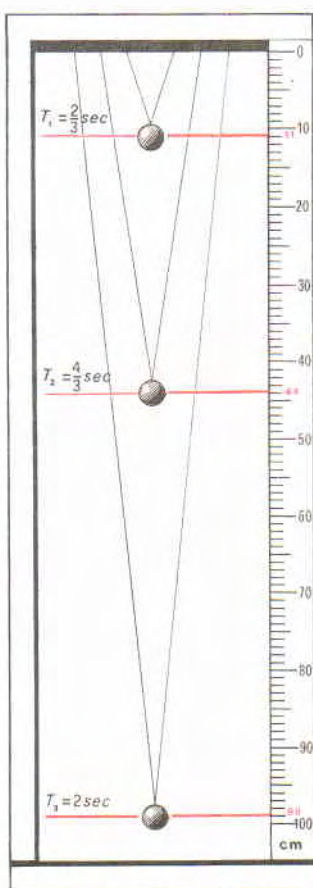
|                                       |      |      |      |      |
|---------------------------------------|------|------|------|------|
| μήκος ( $l$ ) σε cm                   | 70   | 80   | 90   | 100  |
| περίοδος ( $T$ ) σε s                 | 1,41 | 1,79 | 1,91 | 2,00 |
| τετράγωνο περιόδου ( $T^2$ ) σε $s^2$ | 1,99 | 3,20 | 3,65 | 4,00 |

Όταν κάναμε τη γραφική παράσταση  $T=f(l)$  φάνηκε καθαρά ότι τα ποσά δεν είναι ανάλογα. Στη γραφική, όμως, παράσταση  $T^2=f(l)$  το γράφημα ήταν ευθεία γραμμή. Αυτό σήμαινε ότι το τετράγωνο της περιόδου ήταν ανάλογο προς το μήκος του εκκρεμούς ή μ' άλλα λόγια ότι η περίοδος του εκκρεμούς ήταν ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα του μήκους του.

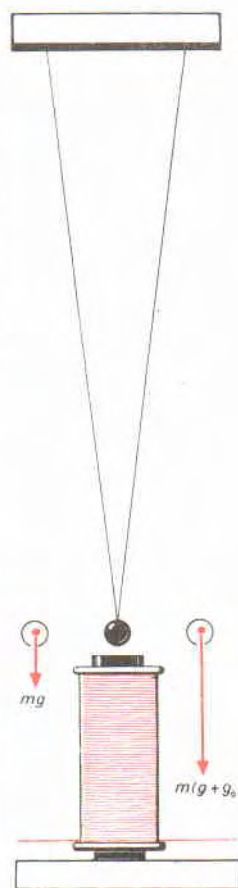
**Περίοδος και Άρτυτική επιτάχυνση.** Σε πειράματα κατά τα οποία



Παρά το διαφορετικό βάρος των σφαιριδίων τα εκκρεμή είναι ισόχρονα.



Τα τετράγωνα των περιόδων είναι ανάλογα προς τα μήκη των νημάτων.



Φαινομενική ενίσχυση του βαρυτικού πεδίου με ηλεκτρομαγνήτη.

δημιουργούνται φαινομενικές ενισχύσεις ή εξασθενίσεις του πεδίου βαρύτητας, διαπιστώνεται ότι η περίοδος του απλού εκκρεμούς είναι αντιστρόφως ανάλογη προς την τετραγωνική ρίζα της βαρυτικής επιτάχυνσης.

**Η θεωρία.** Αν το πλάτος αιωρήσεως είναι μικρότερο από τρεις μοίρες μπορούμε να δεχτούμε ότι το διαγραφόμενο από το υλικό σημείο (σφαιρίδιο) τόξο συμπίπτει με την αντίστοιχη χορδή, η κίνησή τους, συνεπώς, είναι ευθύγραμμη. Μπορούμε, επίσης, να αποδείξουμε ότι η ευθύγραμμη αυτή κίνηση είναι και αρμονική ταλάντωση.

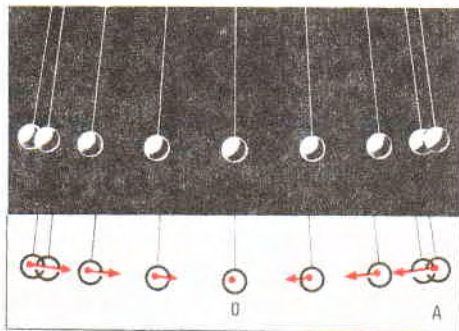
Θεωρούμε τις ασκούμενες στο σφαιρίδιο δυνάμεις σε μια τυχαία στιγμή της κίνησης, κατά την οποία η γωνία νήματος και κατακορύφου είναι  $\varphi$ . Αυτές είναι το βάρος  $m\vec{g}$  και η δύναμη  $\vec{N}$  που ασκεί το τεντωμένο νήμα. Θεωρούμε έναν άξονα « $x$ » κάθετο στο νήμα (ο οποίος είναι σχεδόν οριζόντιος) και τον προσανατολίζουμε με θετικό πρόσημο κατά τη φορά της απομάκρυνσης  $\vec{x}$ . Αναλύουμε το βάρος σε δύο κάθετες συνιστώσες από τις οποίες η μία ( $\vec{F}_x$ ) να έχει τη διεύθυνση του άξονα  $x$ . Θα ισχύει

$$F_x = -mg\eta\varphi.$$

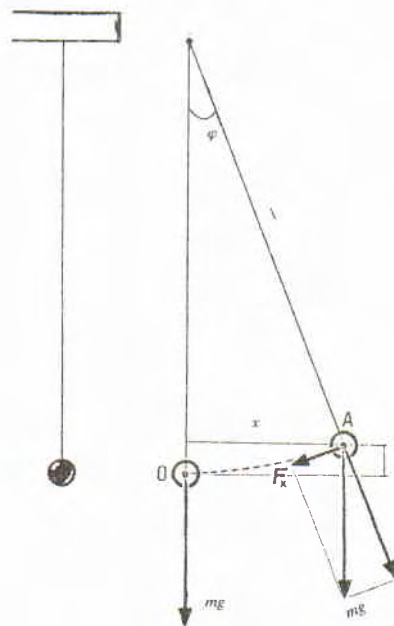
Επειδή η γωνία  $\varphi$  είναι μικρή ισχύει  $\eta\varphi = \varepsilon\varphi = x/l$ . Θα είναι συνεπώς

$$F_x = -(mg/l)x.$$

Το αρνητικό πρόσημο μας επισημαίνει ότι η  $\vec{F}_x$  είναι δύναμη επαναφοράς. Αν προσέξουμε, όμως, και την αναλογία των αλγεβρικών τιμών  $F_x$  και  $x$  θα συμπεράνουμε ότι ικανοποιείται η συνθήκη απλής αρμονικής ταλάντωσης. Εφόσον συμβαίνει αυτό θα ισχύει σύμφωνα με τη θεωρία  $F_x = -m\omega^2 x$ . Η ποσότητα  $mg/l$ , η οποία αποδείχτηκε ότι αποτελεί τη σταθερά επαναφοράς στην περίπτωση του εκκρεμούς θα πρέπει να είναι ίση με την ποσότητα  $m\omega^2$ , η οποία αποτελεί τη σταθερά επαναφοράς κάθε απλής αρμονικής ταλάντωσης.



Καθώς το σφαιρίδιο απομακρύνεται από τη θέση ισορροπίας η ταχύτητά του μειώνεται και αυξάνει η δύναμη επαναφοράς.





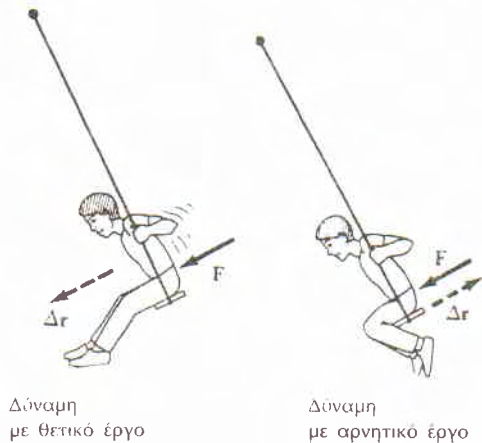
$$\left. \begin{array}{l} \frac{mg}{l} = m\omega^2 \\ \text{και επειδή } \omega = \frac{2\pi}{T} \end{array} \right\} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Η εξίσωση στην οποία καταλήγουμε επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα των πειραματικών προσπαθειών. Η ίδια αυτή εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μας οδηγήσει μέσα από διαδικασίες μετρήσεων σε έναν ικανοποιητικό υπολογισμό της βαρυτικής επιτάχυνσης. Το ίδιο, τέλος, το απλό εκκρεμές μπορεί να αποτελέσει ένα μετρητή χρόνου.

## Εξαναγκασμένη ταλάντωση. Συντονισμός

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για να διατηρείται αμείωτη η ταλάντωση ενός συστήματος είναι να το τροφοδοτούμε περιοδικά με ενέργεια έτσι ώστε να αναπληρώνουμε τις απώλειες.

Όταν ένα παιδί βρίσκεται σε μια κούνια και θέλουμε με ωθήσεις να διατηρούμε σε σταθερό ύψος τις αιωρήσεις, χρειάζεται οι ωθήσεις να γίνονται κατάλληλα. Αν, για παράδειγμα, η δύναμη που ασκούμε δεν έχει τη φορά της μετατόπισης, το αποτέλεσμα θα είναι αρνητικό. Αποδεικνύεται ότι το καλύτερο αποτέλεσμα προκύπτει όταν οι επεμβάσεις μας έχουν μια κατάλληλη περιοδικότητα. Σε περίπτωση, μάλιστα, που οι παρεμβάσεις μας γίνονται με συχνότητα ίση προς την ιδιοσυχνότητα του αιωρούμενου συστήματος, το πλάτος της αιώρησης θα είναι μέγιστο.



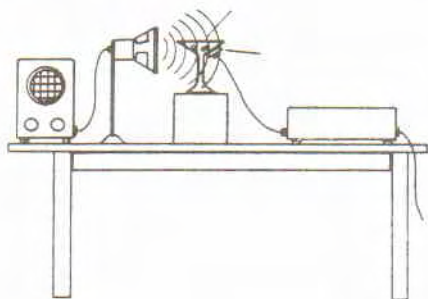
Οι ταλαντώσεις που πραγματοποιούνται με περιοδική επίδραση εξωτερικών δυνάμεων χαρακτηρίζονται εξαναγκασμένες. Το σύστημα που επιδρά περιοδικά προσφέροντας ενέργεια λέγεται διεγέρτης. Σ' αυτού του είδους τις κινήσεις το υποκείμενο σε εξαναγκασμένη ταλάντωση σύστημα (ταλαντωτής) πάλλεται με μια συχνότητα, η οποία (στη γενική περίπτωση) δεν είναι η ιδιοσυχνότητά του, αλλά η συχνότητα του διεγέρτη. Ο διεγέρτης μ' άλλα λόγια, επιβάλλει τη δική του συχνότητα στον ταλαντωτή. Τόσο η πειραματική έρευνα όσο και η θεωρητική μάς δείχνουν ότι το πλάτος της

ταλάντωσης γίνεται μέγιστο εφόσον η συχνότητα του διεγέρτη συμπίπτει\* με την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή.

$$\nu_{\text{εξ}} = \nu_0$$

Σ' αυτήν την περίπτωση λέμε ότι έχουμε φαινόμενο συντονισμού.

Αν και ο διεγέρτης είναι ένα παλλόμενο σύστημα μπορούμε να πούμε ότι η ικανότητα μεταβίβασης ενέργειας από το ένα σύστημα στο άλλο εξαρτάται



(i) από τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στη συχνότητα του διεγέρτη και την ιδιοσυχνότητα του ταλαντωτή και (ii) από το είδος της σύζευξης που υφίσταται ανάμεσα στα δύο συστήματα.

Αν, λόγου χάριν, ο διεγέρτης είναι παλλόμενη αέρια στήλη και ο ταλαντωτής ένα ποτήρι γυάλινο, μπορούμε να εξαναγκάσουμε τα τοιχώματα του ποτηριού σε τόσο μεγάλου πλάτους ταλάντωση ώστε να φθάσουμε σε σημείο να το σπάσουμε. Αυτό πραγματοποιείται εφόσον η συχνότητα της παλλόμενης αέριας στήλης που θα δημιουργήσουμε με ένα μεγάφωνο είναι ίδια ή περίπου ίδια με την ιδιοσυχνότητα του ποτηριού αλλά και εφόσον τα δύο συστήματα βρίσκονται σε κατάλληλη σύζευξη.

## Σύνθεση και ανάλυση των ταλαντώσεων

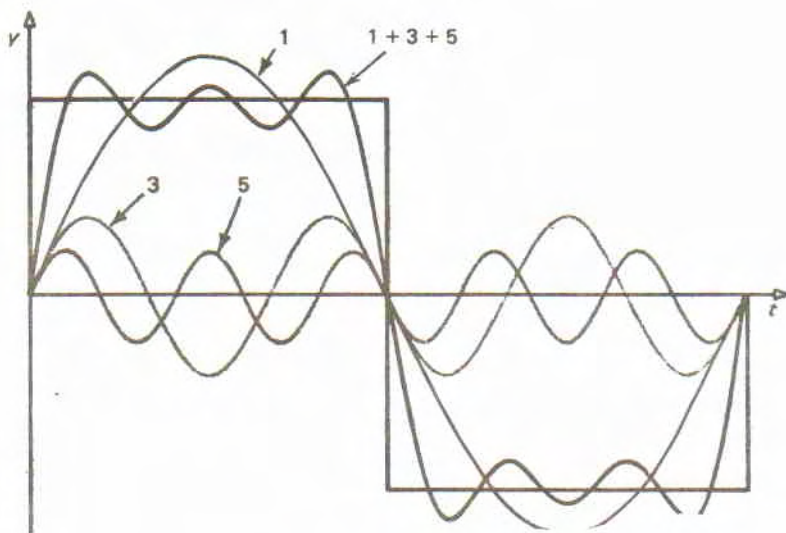
1. Ας θεωρήσουμε ένα υλικό σημείο που εκτελεί ταυτόχρονα δυο (απλές) αρμονικές ταλαντώσεις πάνω στην ίδια ευθεία κίνησης. Με βάση την αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων αποδεικνύεται ότι αν οι συχνότητες των δύο ταλαντώσεων είναι ίσες, η σύνθετη κίνηση του υλικού σημείου θα είναι (απλή) αρμονική ταλάντωση της ίδιας συχνότητας. Αν όμως οι

\* Αυτό δεν είναι ακριβές. Συμβαίνει μόνο εφόσον η κίνηση του συντονιστή δεν παρουσιάζει απόσβεση. Μπορούμε, όμως, για λόγους απλοποίησης του ζητήματος, να θεωρήσουμε ότι ισχύει και γενικά.

συχνότητες των δύο συνιστωσών κινήσεων δεν είναι ίσες η σύνθετη κίνηση δε θα είναι αρμονική ταλάντωση.

Ένα ιδιαίτερο θεωρητικό αλλά και πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζεται στην περίπτωση που η μία συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της άλλης, οπότε προκύπτει περιοδική κίνηση με συχνότητα τη μικρότερη από τις δύο συχνότητες. Αν για παράδειγμα ένα υλικό σημείο συμμετέχει σε δύο αρμονικές ταλαντώσεις συχνοτήτων  $\nu$  και  $2\nu$  η σύνθετη κίνησή του θα είναι περιοδική ταλάντωση συχνότητας  $\nu$ . Αν οι συχνότητες των δύο κινήσεων είναι  $\nu$  και  $5\nu$  η σύνθετη κίνηση θα είναι περιοδική ταλάντωση με συχνότητα  $\nu$ . Κάτι ανάλογο ισχύει και στην περίπτωση που οι κινήσεις είναι περισσότερες από δύο. Κατά τη σύνθεση οσωνδήποτε αρμονικών ταλαντώσεων της ίδιας διεύθυνσης των οποίων οι συχνότητες θα είναι  $\nu$ ,  $2\nu$ ,  $2\nu$ ,  $4\nu$  κ.λπ., η κίνηση που προκύπτει θα είναι επίσης περιοδική ταλάντωση συχνότητας  $\nu$ .

- Κατά την πρώτη δεκαετία του περασμένου αιώνα ο Γάλλος μαθηματικός Jean Batiste Fourier (Ζαν Μπατίστ Φουριέ, 1768-1830) αντιστρέφοντας το



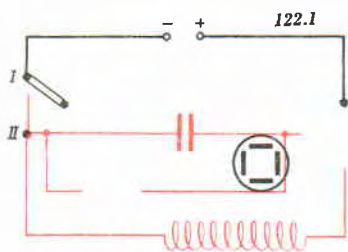
παραπάνω συμπέρασμα απέδειξε μια πρόταση η οποία τοποθετούσε την αρμονική ταλάντωση σε μια «περίοπτη» θέση μέσα στο σύνολο των περιοδικών ταλαντώσεων. Απέδειξε ότι **«κάθε περιοδική ταλάντωση, συχνότητας  $\nu$  μπορεί να αναλυθεί σε σειρά αρμονικών ταλαντώσεων οι συχνότητες των οποίων θα είναι ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητας  $\nu$ ».** (Θεώρημα Fourier).

Σύμφωνα με αυτό το θεώρημα οι αρμονικές ταλαντώσεις αποτελούν τα «δομικά στοιχεία» μιας οποιαδήποτε περιοδικής ταλάντωσης.

Μιας μεγάλης ποικιλίας πρακτικές εφαρμογές βασίζονται στο ίδιο αυτό θεώρημα. Το μουσικό συνθεσάιζερ, για παράδειγμα, κάνει σύνθεση ήχων κατά Fourier.

# Ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις

Το μοντέλο μας εδώ είναι ένα κύκλωμα (Thomson) με πυκνωτή και πηνίο χωρίς ωμική αντίσταση. Είναι, κατά συνέπεια, ένα κύκλωμα στο οποίο δεν



δημιουργείται φαινόμενο Joule και η ενέργεια δεν υποβαθμίζεται. Αξίζει να θυμηθούμε ότι ο φορτισμένος πυκνωτής αποτελεί μία αποθήκη ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου ενώ το ρευματοφόρο πηνίο μία αποθήκη ενέργειας μαγνητικού πεδίου.

Ενεργοποιούμε το σύστημα φορτίζοντας ( $q_0$ ) τον πυκνωτή (C). Τη στιγμή εκείνη το σύστημα έχει ενέργεια  $q_0^2/2C$  αποταμιευμένη στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή. Ο πυκνωτής αρχίζει αμέσως να εκφορτίζεται. Η ενέργειά του ελαττώνεται. Το πηνίο (L) διαρρέεται από ρεύμα (I), πράγμα που σημαίνει ότι δημιουργείται μαγνητικό πεδίο στο οποίο αποθηκεύεται ενέργεια ίση με  $LI^2/2$ . Εφόσον δεχθήκαμε ότι δεν παρατηρείται υποβάθμιση, η ενέργεια του συστήματος διατηρείται σταθερή. Η διατήρηση μπορεί να εκφραστεί με την εξίσωση

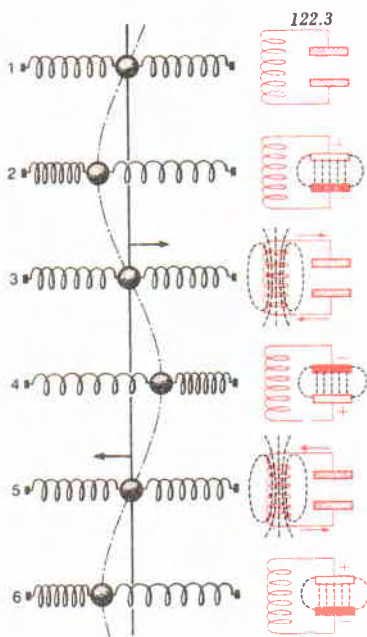
$$E = \frac{1}{2} \frac{q_0^2}{C} = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} LI^2$$

Όταν ο πυκνωτής εκφορτιστεί, όλη η ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου έχει μετατραπεί σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου  $LI_0^2/2$ . Τη στιγμή εκείνη το ρεύμα παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή και ισχύει

$$\frac{1}{2} LI_0^2 = \frac{1}{2} \frac{q_0^2}{C}$$

Εφ' όσον όμως το ρεύμα είναι χρονικά μεταβαλλόμενο, δημιουργείται και φαινόμενο αυτεπαγωγής. Στην επόμενη δηλαδή φάση το πηνίο λειτουργεί ως δίπολο-γεννήτρια και αρχίζει να φορτίζει πάλι τον πυκνωτή. Η αποταμιευμένη στο πηνίο ενέργεια με τη μορφή ενέργειας μαγνητικού πεδίου μετατρέπεται σε ενέργεια ηλεκτρικού πεδίου που αποταμιεύεται στον πυκνωτή. Το ρεύμα φορτίζει τον πυκνωτή με αντίθετη τώρα πολικότητα.

Κατά τη στιγμή ακριβώς που η ενέργεια μαγνητικού πεδίου έχει όλη



εξαντληθεί, στον πυκνωτή έχει αποταμιευτεί το μέγιστο της ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου. Θα επακολουθήσει φυσικά νέα εκφόρτιση του πυκνωτή με αυξανόμενο ρεύμα αντίθετης φοράς από την προηγούμενη που θα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο πηνίο στο οποίο και θα αποθηκεύεται ενέργεια. Το ρεύμα αυτό αποκτά τη μέγιστη τιμή του κατά τη στιγμή που ο πυκνωτής έχει πια εκφορτιστεί. Από τη στιγμή εκείνη το πηνίο θα αρχίσει και πάλι να τροφοδοτεί ενεργειακά τον πυκνωτή και να τον φορτίζει με την αρχική πολικότητα. Η φόρτιση του πυκνωτή ολοκληρώνεται τη στιγμή ακριβώς που το ρεύμα μηδενίζεται και το μαγνητικό πεδίο του πηνίου έχει πάψει να υφίσταται. **Ο κύκλος συμπληρώθηκε και θα επαναληφθεί στην ίδια ακριβώς χρονική διάρκεια με τον προηγούμενο. Το φαινόμενο είναι περιοδικό.** Η ομοιότητά του με τη μηχανική αρμονική ταλάντωση είναι εμφανής. Σε κείνη την περίπτωση είχαμε περιοδική μετατροπή της δυναμικής ενέργειας σε κινητική. Τώρα έχουμε περιοδική πάλι μετατροπή της ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου σε ενέργεια μαγνητικού πεδίου. Το φαινόμενο λέγεται **ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση**.

Σύμφωνα με το δεύτερο κανόνα Kirchhoff το άθροισμα των τάσεων κατά μήκος του κλειστού κυκλώματος (και σε κάθε χρονική στιγμή) θα είναι ίσο προς μηδέν. Αν προσθέσουμε λοιπόν την τάση στους οπλισμούς του πυκνωτή και την αυτεπαγωγική τάση του πηνίου το άθροισμά τους θα είναι ίσο προς μηδέν

$$\frac{q}{C} + L \frac{dI}{dt} = 0$$

Σύμφωνα όμως και με τον ορισμό της έντασης ρεύματος ισχύει

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Ο συνδυασμός των δύο εξισώσεων μας δίνει μια διαφορική εξίσωση η λύση της οποίας είναι η συνάρτηση φορτίου-χρόνου

$$q = q_0 \eta \mu \frac{1}{\sqrt{LC}} t$$

Η ποσότητα  $1/\sqrt{LC}$  αποτελεί την κυκλική συχνότητα ( $\omega$ ) του περιοδικού αυτού φαινομένου, το γινόμενο δηλαδή της συχνότητας επί τον αριθμό  $2\pi$ .

Μπορούμε λοιπόν να γράφουμε και  $q = q_0 \eta \mu \omega t$  αλλά και  $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T = 1/\sqrt{LC} \Rightarrow$

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

Η ποσότητα  $2\pi\sqrt{LC}$  μας δίνει την περίοδο της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης η οποία είναι ταλάντωση ελεύθερη και αμείωτη. Η ίδια λοιπόν ποσότητα



αποτελεί και την ιδιοπερίοδο του κυκλώματος. Η χρονική συνάρτηση του ρεύματος προσδιορίζεται από το συνδυασμό της εξίσωσης  $q=q_0\eta\mu\omega t$  με την εξίσωση που εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2} \frac{q_0^2}{C} &= \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} + \frac{1}{2} LI^2 \\ q &= q_0\eta\mu\omega t \end{aligned} \right\} \Rightarrow I = \omega q_0 \sigma\upsilon\nu\omega t$$

Η ίδια συνάρτηση προκύπτει και από το συνδυασμό της  $q=q_0\eta\mu\omega t$  και της εξίσωσης ορισμού της έντασης ρεύματος μέσα όμως από τη μαθηματική πράξη της παραγωγίσισης

$$\left. \begin{aligned} q &= q_0\eta\mu\omega t \\ I &= \frac{dq}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow I = \omega q_0 \sigma\upsilon\nu\omega t$$

Αξίζει τον κόπο πριν προχωρήσουμε να αντιπαραθέσουμε τα αντίστοιχα μεγέθη και τις αντίστοιχες εξισώσεις που περιγράφουν τη μηχανική και την ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση.

| Μηχανική ταλάντωση |                                         | Ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση |                                         |
|--------------------|-----------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|
| απομάκρυνση        | $x=x_0\eta\mu\omega t$                  | ηλεκτρικό φορτίο           | $q=q_0\eta\mu\omega t$                  |
| ταχύτητα           | $v=\omega x_0\sigma\upsilon\nu\omega t$ | ηλεκτρικό ρεύμα            | $I=\omega q_0\sigma\upsilon\nu\omega t$ |
| μάζα               | $m$                                     | επαγωγικότητα              | $L$                                     |
| σταθερά            |                                         | αντίστροφο                 |                                         |
| επαναφοράς         | $D$                                     | χωρητικότητας              | $1/C$                                   |
| κινητική ενέργεια  | $\frac{1}{2}mv^2$                       | ενέργεια                   |                                         |
|                    |                                         | μαγνητικού πεδίου          | $\frac{1}{2}LI^2$                       |
| δυναμική ενέργεια  | $Dx^2/2$                                | ενέργεια                   |                                         |
|                    |                                         | ηλεκτρικού πεδίου          | $q^2/2C$                                |
| περίοδος           | $T=2\pi\sqrt{m/D}$                      | περίοδος                   | $T=2\pi\sqrt{LC}$                       |

**Παραγωγή αμείωτης ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης.** Όλα αυτά όμως ισχύουν για ένα κύκλωμα-μοντέλο το οποίο δεν μπορεί να υπάρξει στην πραγματικότητα. Κατά τη λειτουργία ενός πραγματικού κυκλώματος η ενεργειακή υποβάθμιση θα συντελεστεί αναπόφευκτα. Το αρχικό «πλάτος» του ρεύματος συνεχώς θα ελαττώνεται. Για να το διατηρήσουμε σταθερό θα πρέπει να συντηρούμε ενεργειακά το κύκλωμα. Θα πρέπει δηλαδή να προσφέρουμε ρυθμικά τόση ακριβώς ενέργεια όση (λόγω φαινομένου Joule) υποβαθμίζεται.

Με μία κατάλληλη ηλεκτρονική διάταξη μπορούμε να το πετύχουμε. Η ηλεκτρομαγνητική αυτή ταλάντωση θα είναι αμείωτη αλλά δε θα είναι βέβαια ελεύθερη.



**Εξαναγκασμένη ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση. Συντονισμός.** Ας υποθέσουμε ότι έχουμε δύο κυκλώματα Thomson ( $L_1, C_1$  και  $L_2, C_2$ ) που βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη. Στο ένα από αυτά συμβαίνει αμείωτη (συντηρούμενη) ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση με περίοδο  $T_1 = 2\pi\sqrt{L_1 C_1}$ . Το κύκλωμα διαρρέεται από εναλασσόμενο ρεύμα συχνότητας  $\nu_1 = 1/2\pi\sqrt{L_1 C_1}$  το οποίο δημιουργεί μαγνητικό πεδίο αρμονικά μεταβαλλόμενο με την ίδια συχνότητα.

Μέσα στο μεταβαλλόμενο αυτό μαγνητικό πεδίο βρίσκεται το πηνίο του δεύτερου κυκλώματος, με αποτέλεσμα να επάγεται σ' αυτό εναλασσόμενη τάση της ίδιας συχνότητας. Κατ' αυτόν τον τρόπο το δεύτερο κύκλωμα διεγείρεται και εκτελεί εξαναγκασμένη ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση η οποία ανιχνεύεται από τη φωτοβολία ενός λαμπτήρα που υπάρχει στο κύκλωμα.

Μπορούμε εδώ να παρατηρήσουμε και κάτι ανάλογο με αυτό που συμβαίνει κατά την εξαναγκασμένη «μηχανική» ταλάντωση. Η φωτοβολία του λαμπτήρα είναι τόσο πιο έντονη όσο μικρότερη είναι η διαφορά της συχνότητας του διεγέρτη από την ιδιοσυχνότητα του συντονιστή. Αν μάλιστα το δεύτερο κύκλωμα διαθέτει μεταβλητό πυκνωτή, είναι δυνατόν μεταβάλλοντας τη χωρητικότητά του, μεταβάλλοντας δηλαδή την ιδιοσυχνότητα του δεύτερου αυτού κυκλώματος, να πετύχουμε συντονισμό. Καθώς η τιμή της ιδιοσυχνότητας προσεγγίζει την τιμή της συχνότητας του διεγέρτη, η φωτοβολία του λαμπτήρα γίνεται όλο και πιο έντονη, γεγονός το οποίο μεταφράζουμε ως αύξηση του πλάτους της ταλάντωσης. Αν οι δύο συχνότητες εξισωθούν ο διεγέρτης εκτελεί ταλάντωση με το μέγιστο πλάτος πράγμα που διαπιστώνεται από τη ένταση της φωτοβολίας του λαμπτήρα-ανιχνευτή. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι μεταξύ των δύο κυκλωμάτων υφίσταται συντονισμός.

Ένα τέτοιο συντονισμό επιδιώκουμε καθώς γυρίζουμε το κατάλληλο κουμπί του ραδιοφωνικού δέκτη μας ψάχνοντας για το σταθμό που θέλουμε. Με την κίνηση που κάνουμε μεταβάλλουμε τη χωρητικότητα κάποιου πυκνωτή, μεταβάλλουμε δηλαδή την ιδιοσυχνότητα ενός συγκεκριμένου κυκλώματος.

## Η γενίκευση της έννοιας «ταλάντωση»

Αναφερθήκαμε σε ταλαντώσεις μηχανικές και σε ταλαντώσεις ηλεκτρομαγνητικές. Αποδεχόμενοι τώρα μια γενίκευση, που έχει επικρατήσει, θα χρησιμοποιούμε τον όρο «ταλάντωση» για κάθε τοπικό φαινόμενο κατά το οποίο οι ιδιότητες του μέσου παρουσιάζουν χρονική περιοδική μεταβολή. Λέγοντας λόγου χάριν η ταλάντωση μιας αέριας στήλης θα εννοούμε την περιοδική μεταβολή της πίεσης της αέριας στήλης. Η περιοδική μεταβολή

που παρουσιάζει η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα ορισμένο σημείο του χώρου θα αποτελεί επίσης μια ταλάντωση.

Τα φαινόμενα με τα οποία θα καταπιαστούμε αμέσως παρακάτω δημιουργούνται από κάποια ταλάντωση και μέσα από κάποια άλλη ταλάντωση ανιχνεύονται. Η διάδοση τέλος της ταλάντωσης από τον πομπό (πηγή) προς τον δέκτη (ανιχνευτή) θα γίνεται με τη μορφή κύματος.

Αν η ταλάντωση γίνεται κάθετα στη διεύθυνση της διάδοσής της, το κύμα χαρακτηρίζεται ως **εγκάρσιο**. Αν πάλι η διεύθυνση διάδοσης συμπίπτει με τη

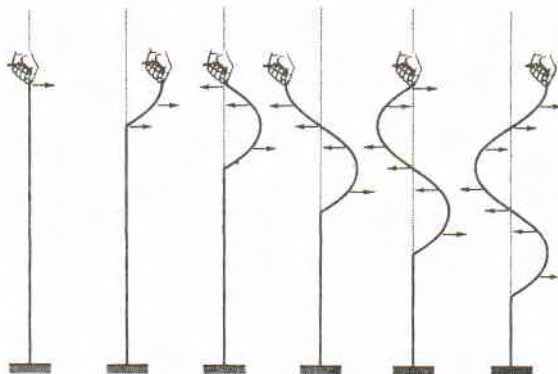


διεύθυνση της ταλάντωσης —όπως συμβαίνει κατά τη διάδοση του ήχου στον αέρα— το κύμα χαρακτηρίζεται ως **διάμηκες**.

## Η έννοια «κύμα»

Θα ξεκινήσουμε και πάλι από ένα μοντέλο. Αυτό θα είναι το **γραμμικό** λεγόμενο κύμα, το κύμα δηλαδή που διαδίδεται κατά μία μόνο διεύθυνση. Το μοντέλο μας προσεγγίζεται με ένα τεντωμένο σκοινί. Ας υποθέσουμε ότι το ένα άκρο του σκοινιού είναι στερεωμένο σταθερά. Κρατώντας το άλλο άκρο με το χέρι μας το αναγκάζουμε να εκτελέσει μια ταλάντωση ορισμένης συχνότητας κάθετα στη διεύθυνση του σκοινιού. Παρατηρούμε ότι η διαταραχή μεταδίδεται κατά μήκος του σκοινιού με ορισμένη ταχύτητα. Το σκοινί αποτελεί το μέσο διάδοσης. Το κύμα είναι εγκάρσιο.

**Το φαινόμενο στο χρόνο. Η ταλάντωση.** Αν συγκεντρώσουμε την προσοχή μας σε



ένα μόνο σημείο του χώρου παρακολουθώντας την «περιπέτειά» του μέσα στον χρόνο, θα διαπιστώσουμε ότι εκτελεί ταλάντωση με συχνότητα ίση προς τη συχνότητα της πηγής. Η συχνότητα αυτή η οποία είναι τελικά κοινή για όλα τα σημεία του μέσου διάδοσης λέγεται και **συχνότητα του κύματος**.

Ένα ακόμα στοιχείο αξίζει να τονιστεί. Η ταλάντωση του τυχαίου σημείου που μελετάμε έχει την ίδια μορφή με την ταλάντωση της πηγής. Αν, για παράδειγμα, καταφέρουμε να εξαναγκάσουμε το άκρο του σκοινιού να εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση, η ταλάντωση του τυχαίου αυτού σημείου—όρα και κάθε σημείον του σκοινιού— θα είναι απλή αρμονική.

**Το φαινόμενο στο χώρο.**  
**Το κύμα.** Η διαταραχή διαδίδεται με μία ορισμένη ταχύτητα η τιμή της οποίας

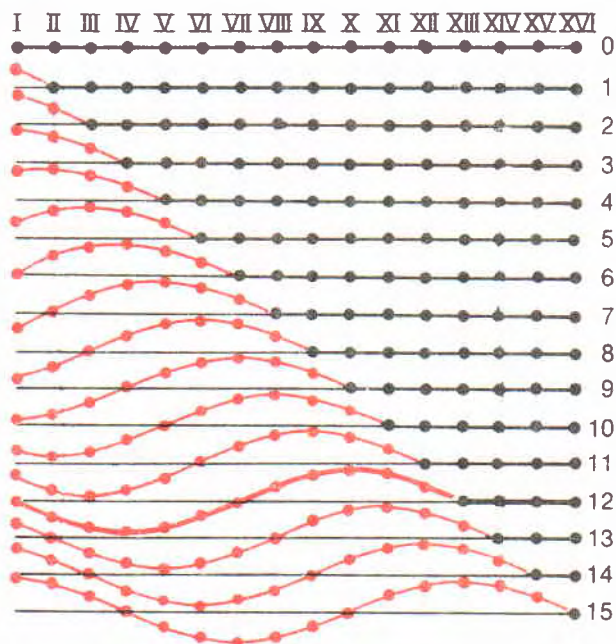
εξαρτάται από τις ιδιότητες του σκοινιού. Το συγκεκριμένο δηλαδή σκοινί «επιβάλλει» στη διαταραχή μια ορισμένη ταχύτητα η τιμή της οποίας δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, για ποράδειγμα, της διαταραχής αλλά από τις ελαστικές και αδρανειακές ιδιότητές του.

Αξίζει εδώ να προσέξουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δεν είναι ταχύτητα ενός υλικού σημείου, η τιμή της όμως προσδιορίζεται με την ίδια ακριβώς λογική. Αν το ελαστικό μέσο παρουσιάζει κατά μια ορισμένη διεύθυνση τις ίδιες ιδιότητες, η ταχύτητα διάδοσης κατά τη διεύθυνση αυτή θα υπολογίζεται από ένα πηλίκο με αριθμητή την απόσταση στην οποία μεταδόθηκε η διαταραχή σε ορισμένη χρονική διάρκεια και παρονομαστή τη χρονική αυτή διάρκεια.

Η απόσταση στην οποία διαδίδεται η διαταραχή σε χρόνο μιας περιόδου αποτελεί το λεγόμενο **μήκος κύματος**.

Το μέγεθος συμβολίζεται διεθνώς με το ελληνικό γράμμα «λ» και αποτελεί ένα στοιχείο ταυτότητας του κάθε κύματος. Η τιμή του εξαρτάται και (i) από τις ιδιότητες του μέσου αλλά και (ii) από τη συχνότητα της κυματικής πηγής.

Αν συνδυάσουμε τον ορισμό του μήκους κύματος με τον ορισμό της ταχύτητας διάδοσης, καταλήγουμε στην εξίσωση  $\lambda = cT$  ή στην ισοδύναμη



$c=\lambda v$  η οποία αποτελεί τη λεγόμενη θεμελιώδη εξίσωση των κυμάτων.

$$c=\lambda v \quad \text{Θεμελιώδης εξίσωση των κυμάτων}$$

## Το κύμα και τα μαθηματικά

Για να περιγράψουμε το κύμα καταφεύγουμε στη γλώσσα των μαθηματικών. Θα επιδιώξουμε να δημιουργήσουμε μια συνάρτηση που να μας περιγράφει την κατάσταση κάθε σημείου του μέσου σε κάθε χρονική στιγμή.

Υποθέτουμε ότι η ταλάντωση της πηγής είναι απλή αρμονική. Κάθε σημείο του μέσου θα εκτελεί, όπως είπαμε, παρόμοια ταλάντωση με την ίδια συχνότητα. Το κύμα σ' αυτή την περίπτωση χαρακτηρίζεται ως αρμονικό. Ας δεχθούμε και μία ακόμα σύμβαση. Θα θεωρούμε ότι το πλάτος της ταλάντωσης θα έχει για όλα τα σημεία την ίδια τιμή. Η κίνηση συνεπώς κάθε σημείου του μέσου θα περιγράφεται από μια συνάρτηση με τύπο  $\xi=\xi_0\eta\mu\omega t$ . Για να έχει όμως κάποιο ενδιαφέρον αυτή η συνάρτηση, θα πρέπει να έχουμε διευκρινίσει ποια είναι η χρονική στιγμή την οποία δεχόμαστε ως αρχή των χρόνων για την κίνηση του κάθε σημείου χωριστά. Είναι φανερό ότι μια τέτοια συνάρτηση με μία μόνο ανεξάρτητη μεταβλητή ( $t$ ) δε μπορεί να ανταποκριθεί στο να περιγράψει αυτό που επιδιώκουμε.

Χρειαζόμαστε μία συνάρτηση στην οποία οι χρονικές στιγμές να αναφέρονται σε μια αρχή χρόνων ενιαία για όλα τα σημεία του μέσου. Για να το καταφέρουμε ακολουθούμε την παρακάτω συλλογιστική.

Θεωρούμε ένα τυχαίο σημείο  $\Sigma$  (του ελαστικού μέσου) το οποίο βρίσκεται σε απόσταση\* « $x$ » από την κυματική πηγή\*\*. Η διαταραχή φθάνει στο σημείο  $\Sigma$  σε χρόνο  $\Delta t=x/c$  μετά την εκκίνηση της πηγής. Αν για παράδειγμα, η κυματική πηγή ( $\Pi$ ) έχει κατά τη χρονική στιγμή  $t=0$  απομάκρυνση  $\xi=0$ , το σημείο  $\Sigma$  θα έχει την ίδια απομάκρυνση μετά από χρόνο  $x/c$ . Κατά τη χρονική στιγμή  $t=T/4$  η πηγή θα βρίσκεται στο άκρο της ταλάντωσης με μηδενική ταχύτητα. Το σημείο  $\Sigma$  θα βρίσκεται στην ίδια κατάσταση μετά από χρονική διάρκεια  $x/c$  τη στιγμή δηλαδή  $t=T/4+x/c$ . Αυτό γενικότερα σημαίνει ότι αν η κυματική πηγή, βρίσκεται κατά τη στιγμή  $t_a$  σε μια ορισμένη κινητική κατάσταση, το σημείο  $\Sigma$  θα βρίσκεται στην ίδια κινητική κατάσταση κατά τη στιγμή  $t_a+x/c$ . Και αντίθετα το τυχαίο (άρα και κάθε) σημείο  $\Sigma$  έχει σε κάθε «τώρα» την απομάκρυνση που είχε η πηγή πριν από χρόνο  $x/c$ . Σε μια λοιπόν τυχαία στιγμή  $t$  αν η πηγή έχει απομάκρυνση (κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης)  $\xi=\xi_0\eta\mu\omega t$ , η απομάκρυνση του τυχαίου σημείου  $\Sigma$  θα είναι  $\xi=\xi_0\eta\mu\omega(t-x/c)$ .

\* Σε πιο αυστηρή διατύπωση το « $x$ » παριστάνει την απόσταση της θέσης ισορροπίας του σημείου αυτού από τη θέση ισορροπίας της πηγής.

\*\* Κάθε σημείο του μέσου μπορεί να θεωρηθεί ως κυματική πηγή.



Αν αντικαταστήσουμε την κυκλική συχνότητα με  $2\pi/T$  και θυμηθούμε ότι  $cT=\lambda$  μπορούμε να δώσουμε στη συνάρτηση τη μορφή

$$\xi = \xi_0 \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

Είναι μια συνάρτηση που αφορά σε κάθε σημείο του μέσου διάδοσης και σε κάθε χρονική στιγμή. Έχει επικρατήσει να ονομάζεται **εξίσωση αρμονικού κύματος**. Σ' αυτήν είναι

$\xi$  η απομάκρυνση που παρουσιάζει ένα οποιοδήποτε σημείο του μέσου διάδοσης από τη θέση ισορροπίας του

$x$  η απόσταση του σημείου αυτού από την πηγή

$t$  η χρονική «απόσταση» της στιγμής στην οποία αναφερόμαστε από κάποια καθορισμένη αρχή χρόνων

$T$  η κοινή περίοδος ταλάντωσης όλων των σημείων, και

$\lambda$  το μήκος κύματος.

Η λεγόμενη λοιπόν εξίσωση αρμονικού κύματος είναι μία συνάρτηση ( $\xi$ ) με δυο μεταβλητές  $\xi = \xi(t, x)$ . Αξίζει να την ερευνήσουμε.

**α.** Αν θέλουμε η συνάρτηση να αναφέρεται **σε ένα και μόνο συγκεκριμένο σημείο του μέσου διάδοσης** θα χρειαστεί να δώσουμε στο « $x$ » μια σταθερή τιμή —ας υποθέσουμε  $d$ — που θα είναι η απόσταση, του σημείου αυτού από την πηγή του κύματος. Θα προκύψει έτσι η συνάρτηση

$$\xi = \xi_0 \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d}{\lambda} \right)$$

που μας πληροφορεί **για τις θέσεις που αποκτά** το συγκεκριμένο αυτό κινητό-σημείο **στο κύλημα του χρόνου**.

**β.** Δίνοντας όμως στο χρόνο  $t$  μια σταθερή τιμή ( $t = t_a$ ) και θεωρώντας έτσι μόνο το  $x$  ως μεταβλητή της συνάρτησης θα προκύψει

$$\xi = \xi_0 \eta \mu 2\pi \left( \frac{t_a}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

μια συνάρτηση δηλαδή  $\xi = \xi(x)$  η οποία αναφέρεται **στο σύνολο των σημείων του μέσου** και μας πληροφορεί για τη θέση καθενός από αυτά σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

**Φάση και διαφορά φάσης.** Η ποσότητα  $\varphi = 2\pi(t/T - x/\lambda)$  λέγεται φάση. Κάθε σημείο του μέσου σε κάθε χρονική στιγμή χαρακτηρίζεται από μια «φάση», η οποία μας πληροφορεί για την κινητική του κατάσταση.

Ας θεωρήσουμε δύο σημεία στην ίδια διεύθυνση διάδοσης τα οποία βρίσκονται σε αποστάσεις  $x_1$  και  $x_2$  αντίστοιχα από την πηγή. Σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή οι φάσεις τους θα είναι

$$2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_1}{\lambda} \right) \text{ και } 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x_2}{\lambda} \right)$$

Θα έχουν διαφορά  $\Delta\varphi = 2\pi \frac{x_2 - x_1}{\lambda}$ . Η απόσταση  $x_2 - x_1$  μας δίνει την απόσταση ( $d$ ) των δύο αυτών σημείων.

Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να προχωρήσουμε σε ορισμένα πορίσματα:

α. Δύο σημεία του ελαστικού μέσου που βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση διάδοσης και η απόστασή τους είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος έχουν διαφορά φάσης ακέραιο πολλαπλάσιο του « $2\pi$ ».

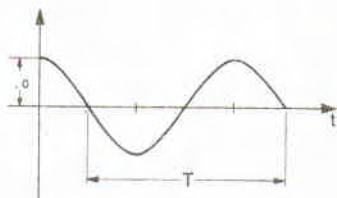
$$\left. \begin{array}{l} \Delta\varphi = 2\pi \frac{d}{\lambda} \\ d = k \cdot \lambda \end{array} \right\} \Rightarrow \Delta\varphi = 2k\pi \quad \left. \begin{array}{l} \xi_1 = \xi_0 \eta \mu \varphi_1 \\ \xi_2 = \xi_0 \eta \mu (\varphi_1 + 2k\pi) \end{array} \right\} \Rightarrow \xi_1 = \xi_2$$

Αυτό σημαίνει ότι τα δύο αυτά σημεία έχουν διαρκώς την ίδια απομάκρυνση και γενικότερα την ίδια κινητική κατάσταση. Συνηθίζεται να λέμε ότι τα δύο αυτά σημεία βρίσκονται στην ίδια φάση. Η μικρότερη απόσταση δύο τέτοιων σημείων είναι μήκος κύματος. Μπορούμε λοιπόν να δώσουμε ένα ακόμη ορισμό για το μήκος κύματος:

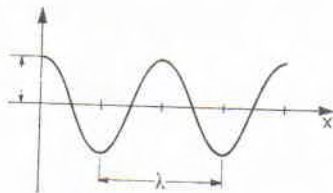
Μήκος κύματος λέγεται η απόσταση δύο πλησιέστερων σημείων που βρίσκονται στην ίδια φάση.

Εννοείται ότι αναφερόμαστε σε σημεία που βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση διάδοσης.

**Περίοδος και μήκος κύματος.** Η περίοδος ενός κύματος εκφράζει τη «χρονική περιοδικότητα» της συμπεριφοράς ενός σημείου του μέσου. Αποτελεί την ελάχιστη χρονική απόσταση ανάμεσα σε δύο παρόμοια γεγονότα που θα συμβούν στο ίδιο σημείο (περιοχή). Από την άλλη μεριά το μήκος κύματος εκφράζει ένα είδος «χωρικής περιοδικότητας» του συνόλου των σημείων σε μια ορισμένη χρονική στιγμή. Αποτελεί την ελάχιστη «χωρική απόσταση» ανάμεσα σε δύο ίδια γεγονότα που συμβαίνουν την ίδια χρονική στιγμή.



Η χρονική συνάρτηση  $\xi = f(t)$  περιγράφει την «ιστορία» ενός συγκεκριμένου σημείου του μέσου στο οποίο διαδίδεται ένα αρμονικό κύμα. Η περίοδος παριστάνεται ως η ελάχιστη χρονική απόσταση ανάμεσα σε δύο στιγμές κατά τις οποίες το σημείο παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά.



Η χωρική συνάρτηση  $\xi = f(x)$  ενός αρμονικού κύματος, αποδίδει ένα «στιγμιότυπο» του κύματος. Μας δίνει μια εικόνα για τις θέσεις των διαφόρων σημείων σε μια ορισμένη χρονική στιγμή. Είναι η εικόνα που θα πέραμε αν μπορούσαμε να «φωτογραφίσουμε» την κυματική διαταραχή ή, μ' άλλα λόγια, ν' ακινητοποιήσουμε το χρόνο. Το μήκος κύματος παριστάνεται ως η ελάχιστη χωρική απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία τα οποία τη στιγμή εκείνη —αλλά και κάθε στιγμή— έχουν την ίδια συμπεριφορά.

Όλα τα προηγούμενα αναφέρονται σε αρμονικό κύμα ελαστικότητας το οποίο διαδίδεται κατά τη μία μόνο διεύθυνση. Αρκετά όμως από αυτά αφορούν και σε ένα οποιοδήποτε κύμα γενικότερα. Στη γενική αυτή περίπτωση θα υπάρχει μια ταλαντούμενη «ποσότητα» που μπορεί —όπως είπαμε— να είναι η πίεση του αέρα στα ηχητικά κύματα όπως και η ένταση του ηλεκτρικού (ή και μαγνητικού) πεδίου τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Η τιμή  $f(x,t)$  της ταλαντούμενης αυτής ποσότητας θα είναι (i) συνάρτησης θέσης και (ii) συνάρτηση χρόνου. Για δυο επίσης σημεία που βρίσκονται στην ίδια διεύθυνση διάδοσης σε θέσεις δηλαδή  $x_1, x_2$  που απέχουν κατά « $x_2 - x_1$ », θα ισχύει γενικά

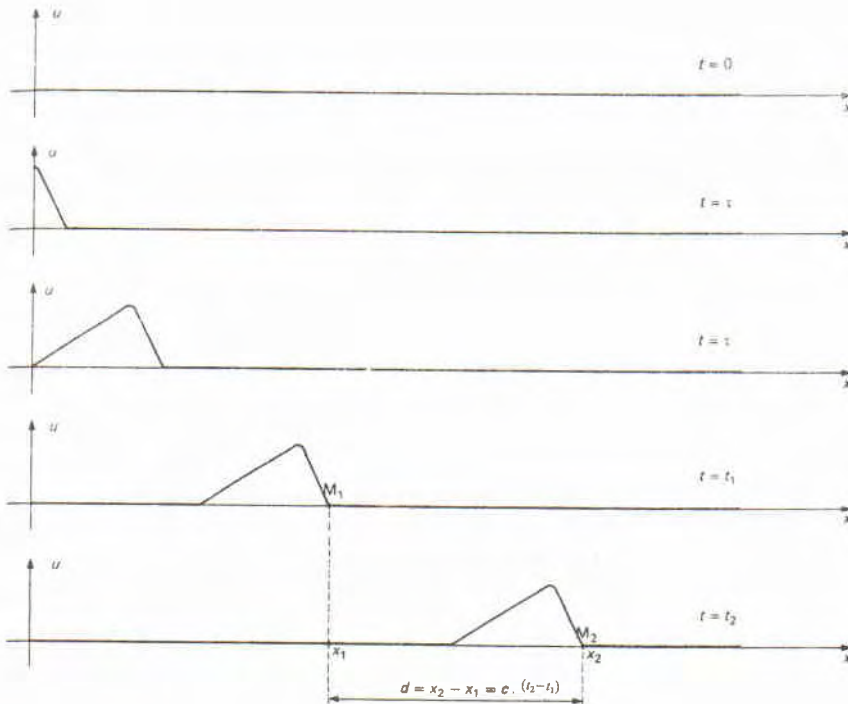
$$f(x_2, t) = f\left(x_1, t - \frac{x_2 - x_1}{c}\right)$$

Η τελευταία αυτή σχέση μας «λεει» ότι η τιμή την οποία έχει η ταλαντούμενη ποσότητα  $f(x,t)$  ενός σημείου ( $x_0$ ) σε μια ορισμένη χρονική στιγμή ( $t$ ) συμπίπτει με την τιμή που είχε η ταλαντούμενη ποσότητα ενός άλλου σημείου ( $x_1$ ) πριν από χρόνο  $(x_2 - x_1)/c$ .



## Εξίσωση κύματος: Γενίκευση

Στα σχήματα που παραθέτουμε παριστάνεται η διάδοση μιας κυματικής διαταραχής, μέσα από ένα σχοινί. Για να επιτύχουμε μία γενίκευση ας υποθέσουμε ότι η κίνηση κάθε σημείου δεν παρουσιάζει περιοδικότητα. Καθένα από τα σχήματα



παριστάνει ένα στιγμιότυπο της διάδοσης και αναφέρεται σε μία χρονική στιγμή.

Υποθέτουμε ότι μια συνάρτηση  $f(x,t)$  μας περιγράφει τη διάδοση της διαταραχής. Ας εντοπίσουμε την προσοχή μας σε δύο διαφορετικά στιγμιότυπα το τέταρτο και το πέμπτο. Κατά τη χρονική στιγμή  $t_2$  η διαταραχή βρίσκεται στη θέση  $x_2$ , οπότε η τιμή της συνάρτησης θα είναι  $f(x_2, t_2)$ . Ένα όμως παρόμοιο γεγονός —μια παρόμοια διαταραχή του σκοινιού— είχε συμβεί σε μια άλλη περιοχή ( $x_1$ ) του σκοινιού πριν από  $t_2 - t_1$  και οι τιμές που προσδιορίζουν τις δύο θέσεις ( $x_1, x_2$ ) και τις αντίστοιχες στιγμές ( $t_1, t_2$ ) συνδέονται με την εξίσωση  $x_2 - x_1 = c(t_2 - t_1)$  στην οποία η « $c$ » παριστάνει την ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής. Μπορούμε λοιπόν να ισχυριστούμε ότι αν  $x_2 - x_1 = c(t_2 - t_1)$  θα είναι και  $f(x_2, t_2) = f(x_1, t_1)$  ή

$$f(x_2, t_2) = f\left(x_1, t - \frac{x_2 - x_1}{c}\right) \text{ ή και γενικώτερα.}$$

$$f(x, t) = f\left(x_1, t - \frac{x - x_1}{c}\right) = f\left(x_2, t - \frac{x - x_2}{c}\right) = \dots = f\left(x_\mu, t - \frac{x - x_\mu}{c}\right).$$

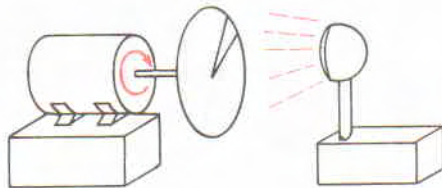
Η συνάρτηση  $f(x,t)$  μας περιγράφει κάποιο γεγονός. Οι παραπάνω σχέσεις μας λένε ότι το γεγονός αυτό με το κύλημα του χρόνου «**αναπαράγεται**» σε **διάφορες περιοχές του χώρου** που βρίσκονται στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Σ' αυτό ακριβώς το σημείο βρίσκεται και η διαφορά του κυματικού φαινομένου από το φαινόμενο της ταλάντωσης στο οποίο ένα συγκεκριμένο γεγονός, με το κύλημα του χρόνου, «**αναπαράγεται**» στην **ίδια περιοχή του χώρου**. Οι παραπάνω σχέσεις μας λένε επίσης ότι το γεγονός «ταξιδεύει» προς ορισμένη κατεύθυνση με ταχύτητα διάδοσης ίση προς « $c$ ».

## Το στροβοσκόπιο

Το στροβοσκόπιο μας επιτρέπει να παρατηρούμε τα γεγονότα με ρυθμούς διαφορετικούς από αυτούς με τους οποίους εξελίσσονται. Μας επιτρέπει για παράδειγμα να παρατηρούμε τη διάδοση ενός κύματος την οποία δεν θα προλαβαίναμε με το μάτι να παρακολουθήσουμε.

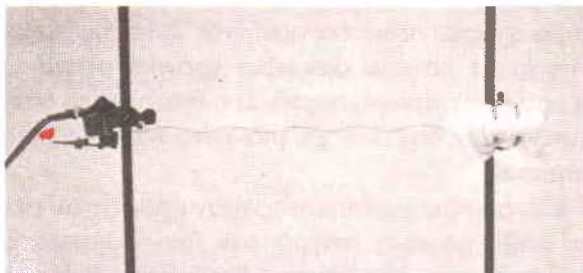
Η μέθοδος προκαλεί πιο αργή παρουσίαση του γεγονότος κάτι σαν το αργό γύρισμα μιας κινηματογραφικής ταινίας.

Ας φανταστούμε ένα λευκό δίσκο που στρέφεται με συχνότητα  $\nu_{\text{περ}} = 20 \text{ Hz}$  άρα και περίοδο  $T_{\text{περ}} = 1/20 \text{ s}$  και σ' ένα σημείο του έχει μια μικρή μαύρη κηλίδα. Λόγω του οπτικού μεταισθήματος το ανθρώπινο μάτι αντιλαμβάνεται την τροχιά της κηλίδας σαν έναν πλήρη κύκλο. Ας δούμε τι θα συμβεί αν μέσα σ' ένα σκοτεινό δωμάτιο επιχειρήσουμε να φωτίζουμε το δίσκο με περιοδικές αναλαμπές συχνότητας  $\nu_\alpha = 19,9 \text{ Hz}$  και περιόδου  $T_\alpha = 1/19,9 \text{ s}$ . Θεωρούμε ως αρχή των χρόνων μια στιγμή κατά την οποία δημιουργείται μία —θεωρούμενη ως «πρώτη»— αναλαμπή. Ο δίσκος φωτίζεται και αντιλαμβανόμαστε την κηλίδα σε μια ορισμένη θέση. Στη χρονική διάρκεια  $T_\alpha$  που επακολουθεί μέχρι την επόμενη αναλαμπή η κηλίδα θα έχει στραφεί κατά γωνία



$$\varphi = \omega_{\text{περ}} T_\alpha = 2\pi \frac{T_\alpha}{T_{\text{περ}}} = 2\pi \frac{200}{199} = 2\pi + \frac{2\pi}{199}.$$

Θα έχει δηλαδή διαγράψει μια πλήρη περιστροφή και θα έχει ακόμη μετατοπιστεί κατά  $2\pi/199$  ακτίνια, περίπου δηλαδή 1,8 μοίρες. Αυτό σημαίνει ότι κάθε φορά που θα φωτίζεται, κάθε φορά δηλαδή που θα φαίνεται, θα μετατοπίζεται γωνιακά κατά  $2\pi/199$  ακτίνια κατά τη φορά της πραγματικής περιστροφής. Θα μας φαίνεται μ' άλλα λόγια ότι περιστρέφεται πολύ αργά απ' ό,τι στην πραγματικότητα. Η φαινομενική γωνιακή ταχύτητα θα είναι  $\omega_{\varphi}=2\pi/199$ Τα και η αντίστοιχη συχνότητα  $\nu_{\varphi}=\omega_{\varphi}/2\pi=0,1$  Hz ίση συνεπώς με τη διαφορά των συχνοτήτων  $\nu_{\text{περ}}-\nu_{\alpha}$ . Είναι επίσης χαρακτηριστικό ότι αν η συχνότητα των αναλαμπών συμπίπτει με τη συχνότητα της περιστροφής, η κηλίδα φαίνεται ακίνητη αν η συχνότητα των αναλαμπών είναι ακέραιο υποπολλαπλάσιο της συχνότητας περιστροφής γιατί τότε  $T_{\alpha}=k \cdot T_{\text{περ}}$ .



Κατά ανάλογο τρόπο μπορούμε να παρακολουθήσουμε την αιώρηση ενός εκρεμούς, τη γρήγορη κίνηση ενός ταλαντωτή, την εξέλιξη ενός κύματος αλλά και να υπολογίζουμε τις πραγματικές συχνότητες.

## Έννοιες που περιγράφουν τα κύματα

Το κύμα που μελετήσαμε το χαρακτηρίσαμε ως γραμμικό επειδή η διάδοσή του γινόταν κατά μια μόνο διεύθυνση. Ένα κύμα είναι θέβαιο δυνατόν να διαδίδεται και σε μια ορισμένη επιφάνεια, όπως είναι το κύμα που δημιουργείται στην επιφάνεια του νερού, οπότε χαρακτηρίζεται ως **επιφανειακό**. Αν τέλος η διάδοσή του γίνεται κατά τις τρεις χωρικές διαστάσεις, το κύμα χαρακτηρίζεται ως **κύμα χώρου**. Τα ηχητικά κύματα



«Η λίμνη του κύκνου». Η κίνηση του κύκνου δημιουργεί διαταραχή που διαδίδεται σε κύματα πάνω στην επιφάνεια του νερού.



που διαδίδονται στον αέρα αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κύματος χώρου.

Για να περιγράψουμε τη διάδοση των κυμάτων επιστρατεύουμε και ορισμένες ακόμη γεωμετρικές έννοιες. Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ένα κύμα χώρου που εκπορεύεται από τις ταλαντώσεις μιας συγκεκριμένης πηγής. Σε κάποια ορισμένη χρονική στιγμή, το σύνολο των σημείων του μέσου στα οποία έχει φτάσει η διαταραχή, διαχωρίζεται από το σύνολο των υπόλοιπων σημείων με μια επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή λέγεται **μέτωπο κύματος**.

Σ' ένα κύμα χώρου υπάρχουν σημεία του μέσου διάδοσης τα οποία έχουν σε κάθε χρονική στιγμή την ίδια συμπεριφορά. Είναι σημεία τα οποία (σύμφωνα με όσα είπαμε) βρίσκονται διαρκώς σε συμφωνία φάσης. Κάθε επιφάνεια τα σημεία της οποίας βρίσκονται σε συμφωνία φάσης χαρακτηρίζεται **ισοφασική**. Μια ευθεία κάθετη σ' ένα σημείο ισοφασικής επιφάνειας αποτελεί τη λεγόμενη **κυματική ακτίνα** η οποία στην περίπτωση του ήχου θα χαρακτηρίζεται ηχητική ενώ στην περίπτωση του φωτός θα χαρακτηρίζεται φωτεινή.

Αν η πηγή του κύματος είναι σημειακή και το μέσο διάδοσης κυματικά ομογενές οι ισοφασικές επιφάνειες θα είναι σφαιρικές επιφάνειες με κέντρο το σημείο-πηγή. Η απόσταση δύο διαδοχικών ισοφασικών επιφανειών μετρουμένη κατά τη διεύθυνση της κυματικής ακτίνας είναι ίση με το μήκος κύματος. Η «εξωτερική» ισοφασική επιφάνεια αποτελεί το **μέτωπο** κύματος.



Ο παλμογράφος καταγράφει ότι στις δύο περιοχές που βρίσκονται τα μικρόφωνα υπάρχει αντίθεση φάσης.

## Κύματα ελαστικότητας και ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία σημάτων που μεταφέρονται με μορφή κύματος. Ανάμεσά τους μπορούμε να διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν κύματα, όπως τα ηχητικά, η διάδοση των οποίων σχετίζεται με τις ελαστικές ιδιότητες της ύλης. Τα χαρακτηρίζουμε ως κύματα ελαστικότητας. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι ότι δεν διαδίδονται στο κενό. Στη δεύτερη ανήκουν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στα οποία ήδη αναφερθήκαμε. Το φως, οι υπέρυθρες ακτίνες, οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες Röntgen (Ραίντγκεν), τα ραδιοφωνικά κύματα αποτελούν ορισμένες μορφές τέτοιων σημάτων. Η διάδοσή τους γίνεται με κύματα ηλεκτρομαγνητικά τα οποία διαδίδονται ακόμα και στο κενό.

## Ο ήχος

μονάχα λίγες στέρνες, άδειες κι αυτές,  
που ηχούν και που τις προσκυνάμε.  
Ήχος στεκάμενος κούφιος, ίδιος με τη μοναξιά μας.  
Γιώργος Σεφέρης

Οι ήχοι παράγονται τόσο στο μεγάλο εργαστήριο παλμικών κινήσεων της φύσης όσο και στα ποικίλα ηχογόνα σώματα που έχει δημιουργήσει η ανθρώπινη τεχνική. Έχουν όμως όλοι τους μια κοινή προέλευση την οποία μπορούν να αναγνωρίζουν οι φυσικοί. Ο παφλασμός του κύματος, το κελάρυσμα του νερού, η βοή του καταρράκτη το θρόισμα των φύλλων, η μεγάλη ποικιλία φωνών των ζώων, τα οποία βελάζουν, νιαουρίζουν, γαβγίζουν, βρυχώνται, κοάζουν, χλιμιντρίζουν, γρυλίζουν, κελαηδούν, αλλά και οι φωνές των ανθρώπων που ψιθυρίζουν, συνομιλούν, τραγουδούν, ψάλλουν, γελάνε, νανουρίζουν τα παιδιά τους, ζητωκραυγάζουν ή φωνασκούν, παράγονται στο «εργαστήρι» της φύσης με τους τρόπους που παράγονται και οι τεχνητοί ήχοι από τη λειτουργία των μηχανών, τα σφυρίγματα των τραίνων ή τις εξατμίσεις των αυτοκινήτων όπως και οι μουσικοί ήχοι που προέρχονται από το διαπασών, την κιθάρα, το εκκλησιαστικό όργανο, το όμποε, το μπουζούκι το σαντουρι ή τα ντραμς.

Εύκολα μπορούμε να αναγνωρίσουμε τον «κοινό παρανομαστή» όλων των περιπτώσεων και να υποστηρίξουμε ότι ο ήχος παράγεται από τις μηχανικές ταλαντώσεις —είτε περιοδικές είτε μη περιοδικές— ενός συγκεκριμένου σώματος.

Στη γενίκευση της έννοιας *ταλάντωση* έχουμε ήδη αναφερθεί. Το ηχογόνο λοιπόν σώμα μπορεί να είναι ένα στερεό σώμα ορισμένης ελαστικότητας, το οποίο εκτελεί μια συγκεκριμένη παλμική κίνηση, όπως συμβαίνει με τις



φωνητικές χορδές των ανθρώπων ή με τις μεμβράνες των ηλεκτρομαγνητικών μεγαφώνων. Μπορεί όμως να είναι μια αέρια στήλη στην οποία έχει δημιουργηθεί ταλάντωση στάσιμου κύματος\* και παρουσιάζει περιοδικές μεταβολές της πίεσης. Κάτι ανάλογο συμβαίνει με τους ήχους που παράγει ένα κλαρίνο ή ένα σαξόφωνο.

**Διάδοση.** Οι οποιασδήποτε φύσης αυτές μεταβολές μεταφέρονται στον περιβάλλοντα αέρα με τη μορφή διαμήκων κυμάτων, τα οποία συνίστανται στη διάδοση περιοδικών\* μεταβολών της πίεσης και της πυκνότητάς του.

Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα είναι ανεξάρτητη από την πίεση του αέρα, εξαρτάται όμως από τη θερμοκρασία του. Η εξίσωση  $c=c_0\sqrt{1+\alpha\theta}$  περιγράφει αυτή ακριβώς την εξάρτηση. Το « $c_0$ » παριστάνει την ταχύτητα του ήχου σε αέρα θερμοκρασίας  $0^\circ\text{C}$ , η οποία είναι περίπου ίση με  $331\text{ m/s}$ . Το « $\alpha$ » παριστάνει το συντελεστή  $1/273\text{ grad}^{-1}$  τον οποίο συναντάμε και στις σχετικές εξισώσεις διαστολής των ιδανικών αερίων.

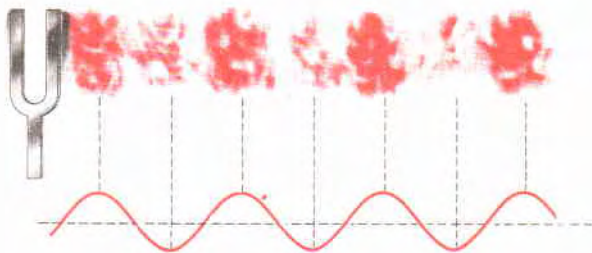
Στα υγρά ο ήχος διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα. Σε νερό λόγω χάριν  $0^\circ\text{C}$  η ταχύτητα του ήχου φθάνει τα  $1440\text{ m/s}$ . Στα στερεά σώματα η ταχύτητα του ήχου είναι ακόμα μεγαλύτερη. Στο χαλκό είναι περίπου  $3500\text{ m/s}$ , ενώ στο σίδηρο πάνω από  $5000\text{ m/s}$ .

Κατά τον 17ο αιώνα, όταν οι άνθρωποι κατάφεραν να δημιουργήσουν **κενό**, διαπίστωσαν, ότι, ενώ το φως διαδίδεται στο κενό, ο ήχος δεν διαδίδεται στο κενό. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες του αιώνα μας, που οι άνθρωποι πέτυχαν να απομακρυνθούν από τη γήινη ατμόσφαιρα, βεβαιώθηκαν για κάτι το οποίο είχαν ήδη υποψιαστεί. Ότι ο διαστημικός χώρος είναι ένας κόσμος απόλυτης σιωπής.

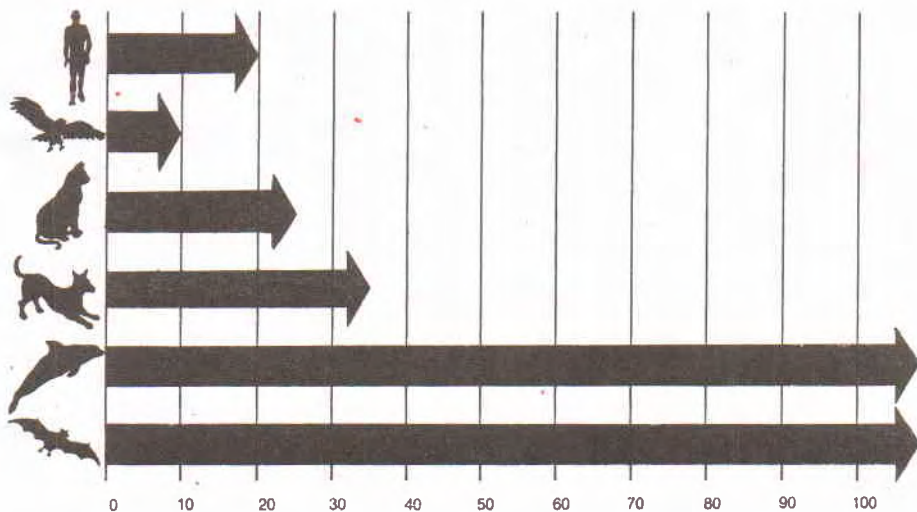
\* Στην έννοια αυτή θα αναφερθούμε σε επόμενη ενότητα.

**Ανίχνευση.** Η ανίχνευση των ηχητικών αυτών κυμάτων γίνεται με σώματα-δέκτες τα οποία συνήθως υποβάλλονται σε εξαναγκασμένη ταλάντωση. Τέτοιοι δέκτες είναι λόγω χάριν τα τύμπανα των ανθρώπινων αυτιών και οι μεμβράνες, τις οποίες διαθέτουν τα διάφορα μικρόφωνα. Συνδέοντας κατάλληλα το μικρόφωνο με παλμογράφο μπορούμε να έχουμε και μια εικόνα-στιγμιότυπο του ηχητικού κύματος που ανιχνεύουμε.

Αν η ταλάντωση του ηχογόνου σώματος είναι αρμονική, το ηχητικό κύμα θα είναι ένα αρμονικό κύμα και ο ήχος θα χαρακτηρίζεται **απλός**. Μια ικανοποιητική προσέγγιση απλού ήχου παράγεται με το διαπασών. Αν η ταλάντωση της πηγής δεν είναι αρμονική αλλά παρουσιάζει περιοδικότητα, έχει δηλαδή μια ορισμένη συχνότητα, ο ήχος λέγεται **σύνθετος**.



**Ύψος ενός ήχου.** Η συχνότητα ενός ήχου συνδέεται με το υποκειμενικό γνώρισμα του ύψους, το γνώρισμα δηλαδή βάσει του οποίου διακρίνουμε έναν οξύτερο (ψηλότερο) ήχο από ένα βαρύτερο (χαμηλότερο). Το υποκειμενικό, μ' άλλα λόγια, στοιχείο, σύμφωνα με το οποίο ισχυριζόμαστε, ότι ο «άλφα» ήχος είναι πιο οξύς από τον «βήτα», αντιστοιχεί σε ένα αντικειμενικό στοιχείο, σύμφωνα με το οποίο η ηχητική πηγή του «άλφα» εμφανίζει μεγαλύτερο αριθμό παλμών ανά δευτερόλεπτο σε σχέση με την ηχητική πηγή, που δημιουργεί τον ήχο «βήτα», παρουσιάζει δηλαδή μεγαλύτερη



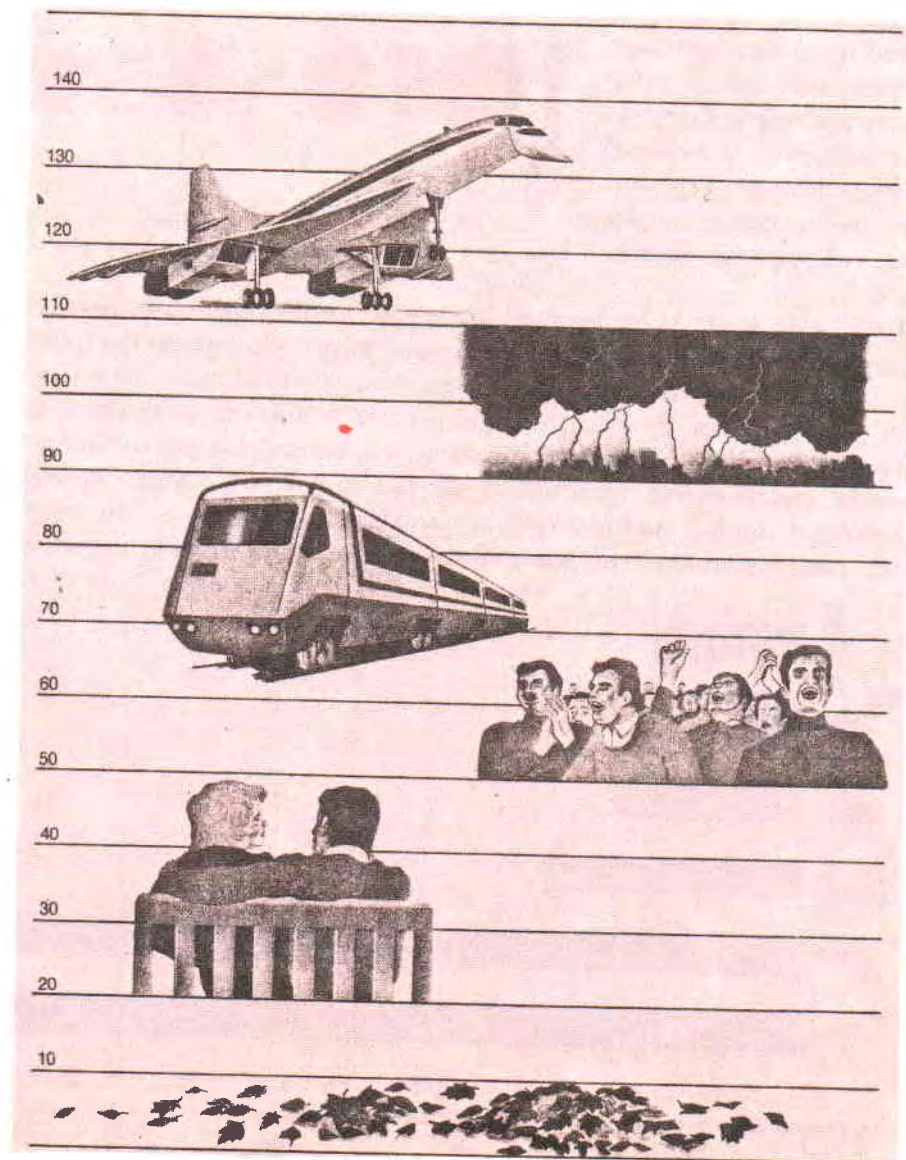
Στο σχήμα παριστάνονται οι περιοχές ακουστών συχνοτήτων ορισμένων ζώων. Οι τιμές συχνότητας είναι σε kHz.



## 390 Τα κύματα

συχνότητα. Το ανθρώπινο αυτί μπορεί και αντιλαμβάνεται ήχους συχνότητας μεγαλύτερης των 20 Hz και μικρότερης των 20.000 Hz. Τα κύματα με συχνότητα μικρότερη των 20 Hz αντιστοιχούν στους λεγόμενους υπόηχους, ενώ τα κύματα με συχνότητα μεγαλύτερη των 20.000 Hz, στους λεγόμενους υπέρηχους.

**Ακουστότητα ενός ήχου.** Ένα ακόμα υποκειμενικό γνώρισμα κάθε ήχου είναι η ακουστότητα, το γνώρισμα δηλαδή που μας επιτρέπει να κατατάσσουμε τους ήχους σε ισχυρούς, λιγότερο ισχυρούς, ακόμα λιγότερο

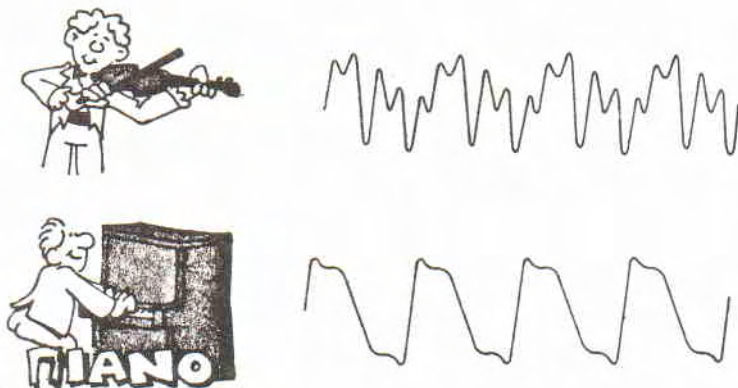




δυνατούς κ.λ.π. Το αντικειμενικό αντίστοιχο της ακουστότητας σχετίζεται και με τη συχνότητα, αλλά και με την ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας ενέργεια που μεταφέρεται από τα ηχητικά κύματα. Το δεύτερο αυτό αντικειμενικό μέγεθος λέγεται ένταση του ηχητικού κύματος μετριέται φυσικά σε  $\text{W/m}^2$  ή  $\text{W/cm}^2$  και οπωσδήποτε σχετίζεται με το πλάτος ταλάντωσης της ηχητικής πηγής. Για δοσμένη συχνότητα η αντικειμενική αύξηση της έντασης προκαλεί αύξηση της ακουστότητας. Για τη μέτρηση της ακουστότητας χρησιμοποιείται η κλίμακα των decibel (ντεσιμπέλ).

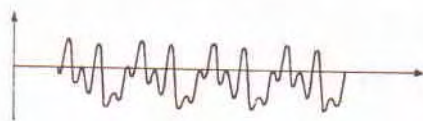
**Η χροιά.** Στους σύνθετους ήχους αποδίδουμε κι ένα ακόμα υποκειμενικό γνώρισμα, «ποιοτικού» χαρακτήρα, το οποίο λέγεται χροιά. Ο άνθρωπος έχει τη δυνατότητα να διακρίνει μεταξύ τους δύο ήχους παρ' όλο που έχουν το ίδιο ύψος και την ίδια ακουστότητα. Δύο εξίσου ισχυροί και εξίσου οξείς ήχοι, προερχόμενοι όμως ο ένας από πιάνο κι ο άλλος από βιολί, έχουν διαφορετική χροιά.

Για να κατανοήσουμε το «αντικειμενικό» αντίστοιχο του υποκειμενικού



αυτού γνωρίσματος απαιτείται να επικαλεστούμε την ανάλυση Fourier (Φουριέ). Σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει σχετικά, μπορούμε τώρα να υποστηρίξουμε, ότι κάθε σύνθετος ήχος συχνότητας  $\nu$  είναι δυνατόν να θεωρηθεί, ότι προέρχεται από επαλληλία απλών ήχων με συχνότητες  $\nu$ ,  $2\nu$ ,  $3\nu$ ,  $4\nu$ ... $k\nu$ , ακέραια δηλαδή πολλαπλάσια της συχνότητας  $\nu$ . Από αυτούς ο απλός ήχος με τη μικρότερη συχνότητα λέγεται θεμελιώδης ή πρώτος αρμονικός, ο απλός ήχος με τη διπλάσια συχνότητα ( $2\nu$ ) λέγεται δεύτερος αρμονικός, ο απλός ήχος με την τριπλάσια συχνότητα τρίτος αρμονικός κ.ο.κ. Κάθε αρμονικός χαρακτηρίζεται (α) από τη συχνότητά του, αλλά και (β) από το πλάτος του.

Ο Helmholtz (Χέλμχολτς) ήταν ο πρώτος που πέτυχε —κατά τα μέσα του περασμένου αιώνα— να αποδείξει, ότι το υποκειμενικό γνώρισμα «χροιά» σχετίζεται με την παρουσία των ανωτέρας τάξης αρμονικών (δεύτερο, τρίτο, τέταρτο...), οι οποίοι συμπαράγονται με το θεμελιώδη. Όταν δύο ηχογόνα παράγουν δύο εξίσου δυνατούς και ισούψείς αλλά «διαφορετι-



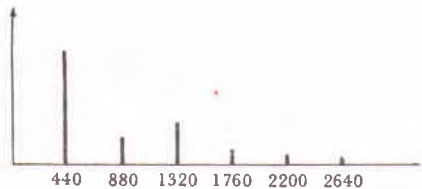
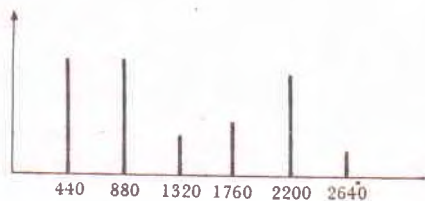
(α)

ήχος από πιάνο



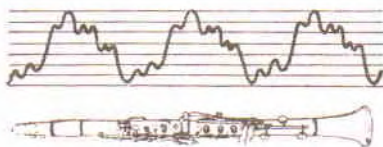
(β)

ήχος από βιολί

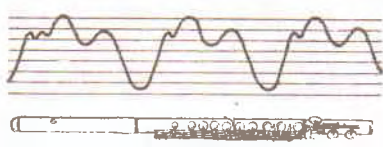


Ανάλυση δύο ήχων του ίδιου ύψους και της ίδιας ακουστότητας. Ο ένας προέρχεται από βιολί και ο άλλος από πιάνο. Στα σχήματα της δεύτερης σειράς παριστάνονται οι συχνότητες (440 Hz, 2·440 Hz, 3·440 Hz, ...) και τα πλάτη των αρμονικών.

κούς» ήχους, αυτό σημαίνει ότι (με εξαίρεση το θεμελιώδη) οι αρμονικοί που παράγονται είναι δυνατόν να διαφέρουν (i) κατά το πλήθος (ii) κατά την τάξη και (iii) κατά το πλάτος (ένταση).



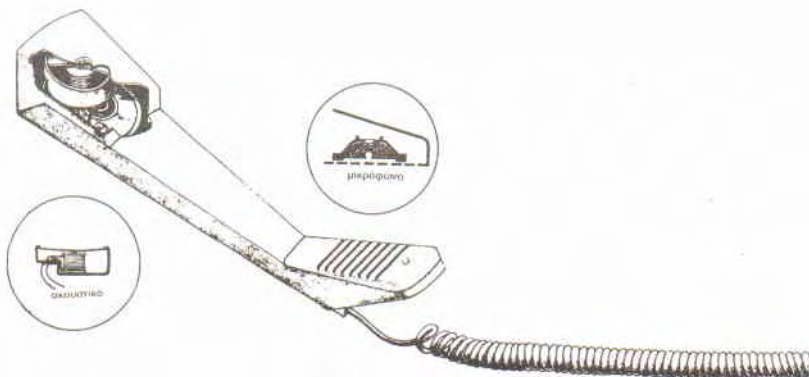
κλαρινέτο



φλάουτο

Αντιστρέφοντας το ζήτημα μπορούμε να πούμε ότι δύο εξ ίσου δυνατοί ισοϋψείς ήχοι, εκτός από το ότι εμπεριέχουν παρόμοιους θεμελιώδεις, διαθέτουν —και οι δύο— δεύτερο αρμονικό της ίδιας έντασης, τρίτο αρμονικό της ίδιας έντασης και αυτό ισχύει για όλους τους αρμονικούς.

**Ήχος και ηλεκτρικό ρεύμα.** Ο ήχος «μετατρέπεται» σε ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο μοιάζει μ' αυτόν. Αυτό συμβαίνει στο μικρόφωνο ενός τηλεφώνου για



παράδειγμα. Αποτελείται από δύο μονωμένες πλάκες άνθρακα, μεταξύ των οποίων υπάρχουν κόκκοι επίσης από άνθρακα. Το ηλεκτρικό «μικροφωνικό» ρεύμα περνάει από τη μία πλάκα στην άλλη μέσω των αγώγιμων κόκκων άνθρακα. Καθώς μιλάμε μπροστά στη μια πλάκα, αυτή πάλλεται και οι κόκκοι μετακινούνται, οπότε μεταβάλλεται η ηλεκτρική αντίσταση του κυκλώματος, με συνέπεια να δημιουργούνται διακυμάνσεις της έντασης του μικροφωνικού ρεύματος. Η μορφή των ρευματικών αυτών διακυμάνσεων αντιστοιχεί στη μορφή των ήχων που φθάνουν στην πρώτη πλάκα άνθρακα.

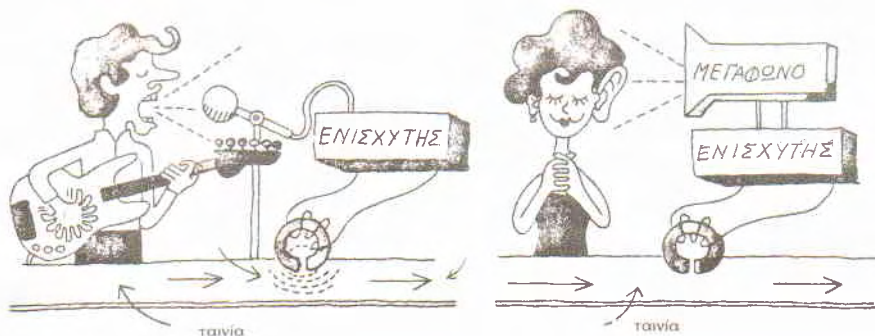
**Ο ήχος γίνεται εικόνα.** Συνδυάζοντας (α) τη δυνατότητα του μικροφώνου να δημιουργεί ρευματικές άρα και τασικές διακυμάνσεις, που έχουν τη μορφή της ηχητικής κύμανσης, με (β) τη δυνατότητα του παλμογράφου να απεικονίζει τις τασικές διακυμάνσεις στην οθόνη του, καταφέρνουμε να έχουμε μια εικόνα του ηχητικού κύματος.

Μπορούμε για παράδειγμα συνδέοντας το μικρόφωνο με τον παλμογράφο να αναγνωρίσουμε την εικόνα της αρμονικής καμπύλης που αντιστοιχεί στον ήχο ενός διαπασών.

**Το ηλεκτρικό ρεύμα μετατρέπεται σε ήχο ο οποίος μοιάζει με αυτό.** Τέτοιου είδους μετατροπές πραγματοποιούνται στα ακουστικά των τηλεφώνων και στα ηλεκτρομαγνητικά μεγάφωνα. Το μεγάφωνο αποτελείται από ένα ισχυρό ηλεκτρομαγνήτη και από ένα ευκίνητο έλασμα μαλακού σιδήρου το οποίο βρίσκεται μεταξύ των πόλων του. Γύρω από τη βάση του ελάσματος υπάρχει πηνίο το οποίο τροφοδοτείται με μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο πιθανόν να έχει δημιουργηθεί από ένα μικρόφωνο. Οι διακυμάνσεις του ηλεκτρικού ρεύματος αναγκάζουν το έλασμα να πάλλεται και μαζί του να πάλλεται μία μεμβράνη η οποία λόγω του μεγέθους της παράγει ήχο μεγάλης έντασης.

**Ο ήχος καταγράφεται και αναπαράγεται.** Με το **μαγνητόφωνο** μπορούμε να καταγράψουμε τον ήχο σε μαγνητική ταινία και ύστερα να τον αναπαράγουμε.

Ο ήχος μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα με το μικρόφωνο. Το ρεύμα ενισχύεται και κυκλοφορεί σε ένα πηνίο με δακτυλιοειδή σιδερένιο πυρήνα ο



οποίος έχει μία λεπτή εγκοπή. Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο περιορίζεται μέσα στο μέταλλο εκτός από την περιοχή της εγκοπής όπου οι δυναμικές γραμμές του εξαπλώνονται στον άμεσα γειτονικό χώρο στον οποίο βρίσκεται και η μαγνητική ταινία. Η ταινία είναι από πλαστικό καλυμμένο με λεπτή επίστρωση σιδηρομαγνητικού υλικού συνήθως οξειδίου σιδήρου ή χρωμίου. Καθώς κινείται, μαγνητίζεται καταγράφοντας τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που αντιστοιχούν στο σήμα.

Κατά την αντίστροφη λειτουργία της αναπαραγωγής η ταινία κινείται εφαπτόμενη σε ένα άλλο πηνίο όμοιο με το πρώτο. Λόγω της κίνησης της



ταινίας, οι μεταβολές του μαγνητικού πεδίου επάγουν ηλεκτρικές τάσεις και ρεύματα στις σπείρες του πηνίου, τα οποία ενισχύονται και μετατρέπονται πάλι σε ήχο από το μεγάφωνο.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η πραγματοποίηση του κύκλου «ήχος-ρεύμα-μαγνητικό πεδίο-ρεύμα-ήχος» αποτελεί μια ακόμα εφαρμογή των δύο βασικών ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων, των μαγνητικών δηλαδή αποτελεσμάτων του ρεύματος και τους φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής.

## Υπόηχοι

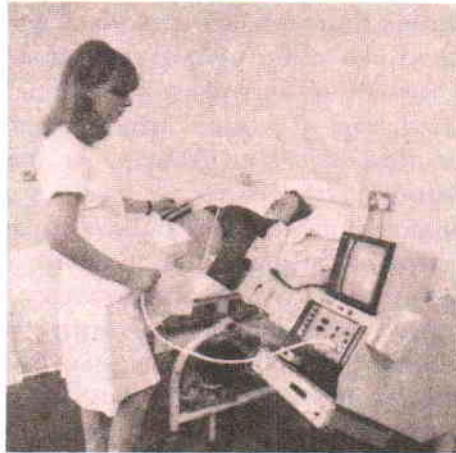
Φυσικές πηγές υποήχων είναι ορισμένα μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως οι κυκλώνες και οι σεισμοί. Τεχνητές πηγές είναι οι δονήσεις των διαφόρων μηχανών. Οι υπόηχοι δεν διεγείρουν την αίσθηση της ανθρώπινης ακοής, γίνονται όμως αντιληπτοί από τα νεύρα του δέρματος προκαλώντας συνήθως ένα αόριστο αίσθημα ανησυχίας και ελαφρής ναυτίας. Η μακρόχρονη όμως έκθεση σε υπόηχους μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην υγεία καθώς και ζημιές σε κτίρια ή σε μηχανικές κατασκευές. Δυστυχώς η τέτοιου είδους ακουστική μόλυνση αποτελεί ακόμα ένα άλυτο πρόβλημα, γιατί οι υπόηχοι δεν εξασθενίζουν περνώντας μέσα από τα συνήθη ηχομονωτικά υλικά.

## Υπέρηχοι

Οι υπέρηχοι παράγονται κι αυτοί τόσο στα «εργαστήρια» της φύσης όσο και στα εργαστήρια που έχουν δημιουργήσει οι άνθρωποι. Ορισμένα θαλάσσια θηλαστικά —όπως το δελφίνι— είναι προικισμένα με προηγμένα «φωνητικά» συστήματα που τους επιτρέπουν να εκπέμπουν υπέρηχους. Τους χρησιμοποιούν και για να προσανατολίζονται αλλά και για να εντοπίζουν τη θήρα τους. Παρόμοια κύματα έχουν τη δυνατότητα να εκπέμπουν και οι νυχτερίδες, αλλά και ορισμένα έντομα. Στο ανθρώπινο τεχνητό εργαστήριο η παραγωγή υπερήχων βασίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτροσυστολής.

Το κυριότερο χαρακτηριστικό αυτών των κυμάτων είναι ότι διαδίδονται με τρόπο που θυμίζει τις λεπτές φωτεινές δέσμες και μπορούν να εστιάζονται με τη βοήθεια ακουστικών κατόπτρων και φακών. Κατ' αυτό τον τρόπο η συγκεντρωμένη ενέργεια μιας υπερηχητικής δέσμης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καθαρισμό επιφανειών αποστείρωση υγρών και επιτάχυνση χημικών αντιδράσεων. Μια άλλη ιδιότητα που χαρακτηρίζει τους υπέρηχους είναι το ότι διαδίδονται ευκολότερα στο νερό παρά στον αέρα. Η ιδιότητα αυτή οδήγησε στην ανακάλυψη του sonar (σόναρ) της συσκευής που μας επέτρεψε να ανιχνεύσουμε και να χαρτογραφήσουμε τους θαλάσσιους βυθούς. Από την εποχή των αρχαίων Φοινίκων οι ψαράδες δημιουργούσαν έντονους ήχους και ύστερα περίμεναν να ακούσουν την ηχώ τους για να εκτιμήσουν αποστάσεις από βυθισμένα στην ομίχλη ακρωτήρια. Στην ίδια ακριβώς λογική βασίστηκε και η ανακάλυψη της συσκευής sonar στα 1917 με τη διαφορά ότι η συσκευή αυτή χρησιμοποιούσε υπέρηχους. Το sonar εκπέμπει υπερηχητική δέσμη η οποία ανακλώμενη στο βυθό (ή σε κάποιο αντικείμενο που θέλουμε να ανιχνεύσουμε) επιστρέφει μετά από χρόνο τον οποίο μπορούμε με ακρίβεια να μετρήσουμε. Συνδυάζοντας το χρόνο αυτό με τη γνωστή ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στο νερό υπολογίζουμε τη ζητούμενη απόσταση.

Σημαντικές εφαρμογές έχουμε και σε πολλούς τομείς της ιατρικής. Εστιασμένες ακτίνες υπερηχητικών κυμάτων που διεισδύουν στο σώμα και ανακλώνται από ορισμένα εσωτερικά όργανα δημιουργώντας τελικά ζωντανές ηλεκτρονικές εικόνες των οργάνων αυτών. Κατά τα τελευταία χρόνια έχει





επικρατήσει η διαγνωστική χρήση υπερήχων και σε εγκυμονούσες γυναίκες προκειμένου να γίνεται αναγνώριση της πορείας της κύησης, αλλά και υπερηχογράφηση του εμβρύου.

## Ερτζιανά κύματα

### Παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο

Χρειάζεται να επιστρέψουμε στο κύκλωμα Thomson. Είδαμε ότι οι ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις ενός τέτοιου κυκλώματος μπορούν να προκαλέσουν εξαναγκασμένες ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις σ' ένα ανάλογο γειτονικό κύκλωμα. Σύμφωνα όμως με όσα είδαμε η διέγερση του δεύτερου κυκλώματος οφείλεται μόνο στην επίδραση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από το πρώτο κύκλωμα και αυτό γιατί το ηλεκτρικό πεδίο μένει εντοπισμένο μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή.

Είναι όμως δυνατό να πετύχουμε τη διέγερση του δεύτερου κυκλώματος και με το ηλεκτρικό πεδίο του πρώτου, αρκεί τα δύο κυκλώματα να διαμορφωθούν κατάλληλα. Ας δούμε τι ακριβώς εννοούμε «κατάλληλη διαμόρφωση». Αξίζει να πούμε προκαταβολικά ότι η επέμβαση μας θα δημιουργήσει και μια σημαντική αύξηση της ιδιοσυχνότητας.

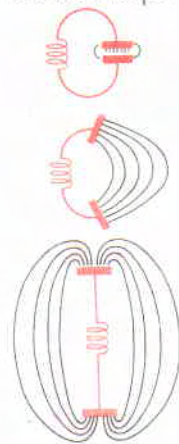
**Πρώτη επέμβαση:** Αντικαθιστούμε το πηνίο του κυκλώματος μ' ένα ευθύγραμμο αγωγό. Οι συνέπειες της αντικατάστασης είναι:

- i) να διατηρηθούν οι ιδιότητες του κυκλώματος.
- ii) να ελαττωθεί η επαγωγικότητα άρα και η ιδιοπερίοδος του κυκλώματος. Ας μην ξεχνάμε ότι  $T=2\pi\sqrt{LC}$ .

**Δεύτερη επέμβαση:** Απομακρύνουμε σιγά-σιγά τον ένα οπλισμό του πυκνωτή από τον άλλο ώστε οι δύο οπλισμοί να βρεθούν στις δύο άκρες ενός ευθύγραμμου αγωγού. Οι συνέπειες της απομάκρυνσης είναι:

- i) να διατηρηθούν οι ιδιότητες του κυκλώματος.
- ii) να ελαττωθεί ακόμα περισσότερο η ιδιοπερίοδος λόγω της ελάττωσης της χωρητικότητας και
- iii) το ηλεκτρικό πεδίο να «απλώνεται» πια στο χώρο και να μην περιορίζεται μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή.

Έχουμε δημιουργήσει ένα ανοιχτό κύκλωμα Thomson που αποτελείται από ένα μόνο ευθύγραμμο αγωγό. Σε σύγκριση με το «αρχικό» μας κύκλωμα το νέο κύκλωμα παρουσιάζει



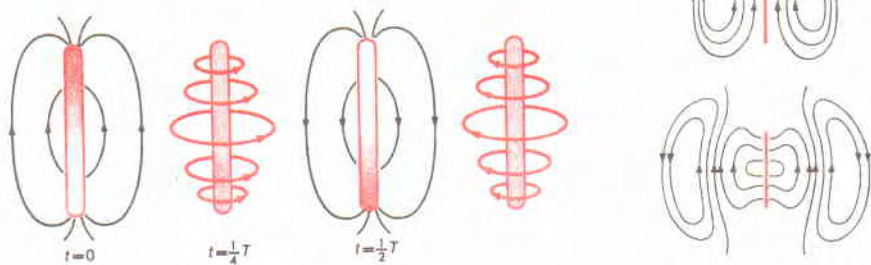
αναμφίβολα μικρότερη ιδιοπερίοδο μεγαλύτερη δηλαδή ιδιοσυχνότητα, αλλά εκτός του μαγνητικού πεδίου του εκτείνεται στο χώρο και το ηλεκτρικό πεδίο. Αν στο ανοικτό αυτό κύκλωμα δημιουργηθεί αμείωτη ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση, στα δύο άκρα του και σε κάθε στιγμή θα βρίσκονται αντίθετα ηλεκτρικά φορτία  $(+q, -q)$  οι τιμές των οποίων θα μεταβάλλονται με τη συχνότητα της ταλάντωσης. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο το κύκλωμα στη μορφή του αυτή λέγεται και **παλλόμενο ηλεκτρικό δίπολο**.

Ο ευθύγραμμος αγωγός μπορεί στις δύο άκρες του να καταλήγει ελεύθερα ή να έχει μικρές πλάκες ή σφαίρες. Στο μέσο του μπορεί να έχει ένα σπινθηριστή.

## Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου

Καθώς λειτουργεί η αμείωτη ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση, τα αντίθετα ηλεκτρικά φορτία  $+q, -q$  που βρίσκονται στα άκρα του διπόλου δημιουργούν μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Ο αγωγός διαρρεόμενος από εναλλασσόμενο ρεύμα δημιουργεί γύρω του μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Τόσο το ένα όσο και το άλλο πεδίο μεταβάλλονται περιοδικά με τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης. Καθώς εξασθενίζει το ηλεκτρικό πεδίο ενισχύεται το μαγνητικό και αντίστροφα.

Τα δύο αυτά αλληλένδετα πεδία αποτελούν —όπως έχουμε πει— το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.

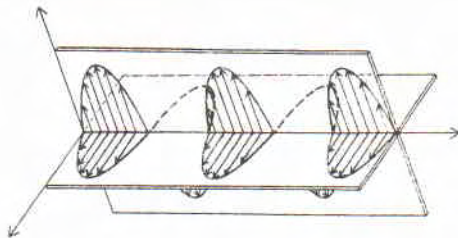


## Πομπός και δέκτης ερτζιανών κυμάτων

Τόσο το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο διαδίδονται στο χώρο με ταχύτητα ίση προς την ταχύτητα του φωτός. Οι δυναμικές γραμμές συνεχώς απλώνονται. Σε σημεία που βρίσκονται σε απόσταση μεγάλη από

το παλλόμενο δίπολο η ένταση  $\vec{E}$  του ηλεκτρικού πεδίου και η ένταση  $\vec{B}$  του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους αλλά και κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης.

Η μεταβολή των τιμών τους σ' ένα σημείο του χώρου θα δίνεται από εξισώσεις της μορφής  $E = E_0 \eta \mu \omega \cdot t$  και  $B = B_0 \eta \mu \omega t$ . Σύμφωνα με τη γενίκευση που έχουμε δεχθεί, μπορούμε να πούμε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (όπως και η ένταση του μαγνητικού πεδίου) εκτελεί ταλάντωση η οποία διαδίδεται στο χώρο μεταφέροντας πληροφορία και ενέργεια. Πρόκειται μ' άλλα λόγια για **κύμα** το οποίο χαρακτηρίζουμε ως ηλεκτρομαγνητικό.



Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται από κυκλώματα λέγονται **ερτζιανά\***. Η σύγχρονη ραδιοτηλεπικοινωνία χρησιμοποιεί αυτά τα κύματα για να μεταβιβάζει σε μεγάλες αποστάσεις πληροφορία και ενέργεια.

**Ο πομπός ερτζιανών κυμάτων** αποτελείται από ένα κύκλωμα ταλαντώσεων, στο οποίο παράγονται αμείωτες ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις πολύ μεγάλης συχνότητας της τάξεως δηλαδή των MHz (μεγαχέρτς). Πρόκειται για τη λεγόμενη φέρουσα συχνότητα.

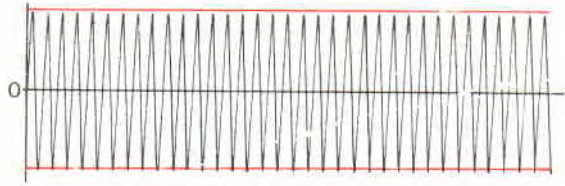
Το κύκλωμα συνδέεται με την **κεραία** με ένα παλλόμενο —δηλαδή— δίπολο στο οποίο παράγονται ηλεκτρομαγνητικές ταλαντώσεις της ίδιας συχνότητας. Το κύμα που εκπέμπει η κεραία έχει την ίδια μεγάλη και σταθερή συχνότητα και λέγεται φέρον κύμα.

Τι γίνεται όμως προκειμένου να μεταφερθεί μέσω του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ένας ήχος, όπως συμβαίνει με τα τραγούδια που ακούμε ανοίγοντας ένα ραδιόφωνο;

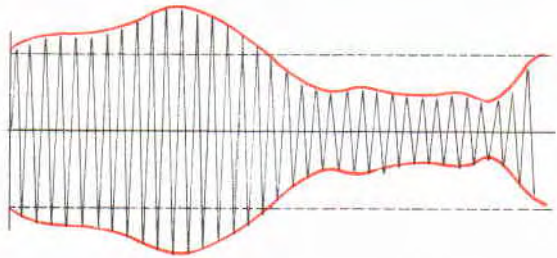
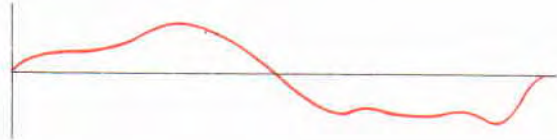
Οι ήχοι της μουσικής και της ομιλίας έχουν συχνότητες μερικών kHz (κιλοχέρτς), συχνότητες δηλαδή πολύ «χαμηλές» σε σχέση με τις φέρουσες συχνότητες. Ένας τέτοιος ήχος όταν φθάνει στο μικρόφωνο προκαλεί όπως ξέρουμε μεταβολές του μικροφωνικού ρεύματος με τη συχνότητα που χαρακτηρίζει τον ήχο αυτό. Για τη ραδιοφωνική μετάδοση των ήχων το κύκλωμα του μικροφώνου συνδέεται με κύκλωμα Thomson και οι μεταβολές του μικροφωνικού ρεύματος **προκαλούν αντίστοιχες μεταβολές στο πλάτος του φέροντος κύματος με το ρυθμό της ηχητικής συχνότητας**. Τώρα η κεραία εκπέμπει ένα **διαμορφωμένο** κύμα το οποίο μεταφέρει τις χαρακτηριστικές μεταβολές που προκάλεσε ο ήχος του μικροφώνου.

\* Η λέξη προέρχεται από το όνομα του Hertz.

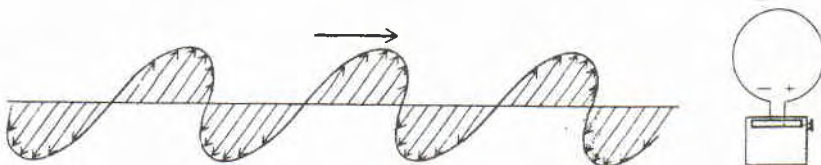
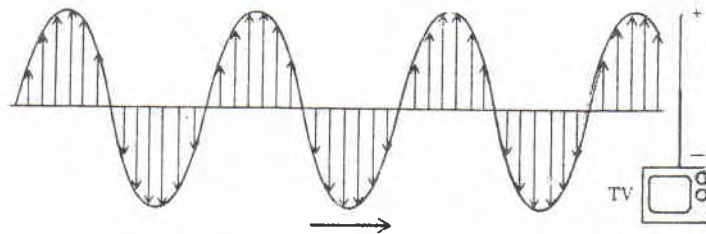
Έτσι ο **δέκτης** καταφέρνει να διαχωρίσει από το φέρον κύμα την ταλάντωση η οποία το διαμόρφωσε και να την μετατρέψει σε ηλεκτρικό ρεύμα της ίδιας μορφής. Το ρεύμα αυτό αφού ενισχυθεί διαβιβάζεται στο μεγάφωνο, όπου και αναπαράγεται ο ήχος που είχε διεγείρει το μικρόφωνο του πομπού. Ο δέκτης αποτελείται και αυτός από κεραία και κύκλωμα Thomson. Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα φθάνει σ' αυτόν διεγείρει την κεραία η οποία με τη σειρά της διεγείρει το κύκλωμα Thomson. Κατ' αυτό τον τρόπο στα άκρα του πυκνωτή αναπτύσσεται τάση της ίδιας μορφής με το διαμορφωμένο κύμα που είχε εκπέμψει ο πομπός. Η τάση αυτή στη συνέχεια παίρνει τη μορφή του μικροϋφωνικού ρεύματος του πομπού.



Φέρον κύμα



Διαμορφωμένο κύμα



Οι ευθύγραμμες κεραίες ανιχνεύουν το «ηλεκτρικό τμήμα» του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ενώ οι κυκλικές κεραίες ανιχνεύουν το «μαγνητικό τμήμα» του.

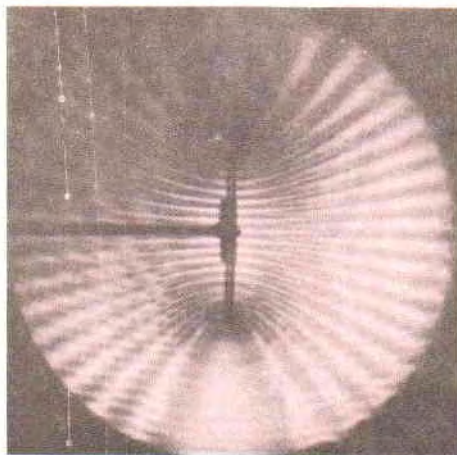
## Συμβολή των κυμάτων

Όταν στο ίδιο μέσο συμβαίνει να διαδίδονται ταυτόχρονα δύο ή περισσότερα κύματα το φαινόμενο που προκύπτει από τη συνάντησή τους λέγεται **συμβολή**. Η θεωρητική μελέτη του φαινομένου βασίζεται στη λεγόμενη **αρχή της επαλληλίας**, σύμφωνα με την οποία «καθένα από τα κύματα διαδίδεται σαν να μην υπήρχαν τα άλλα κύματα». Η ολική διαταραχή κάθε σημείου του μέσου προσδιορίζεται σε κάθε χρονική στιγμή από τη «σύνθεση» των διαταραχών που οφείλονται σε κάθε κύμα ξεχωριστά. Στα παρακάτω θα μελετήσουμε δύο ενδιαφέρουσες περιπτώσεις του φαινομένου συμβολής. Αρχικά θα μελετήσουμε τη συμβολή δύο κυμάτων που εκπορεύονται από σύμφωνες πηγές. Στη συνέχεια θα καταπιαστούμε με ένα ακόμα αποτέλεσμα της συμβολής, τις λεγόμενες **ταλαντώσεις στάσιμου κύματος**.

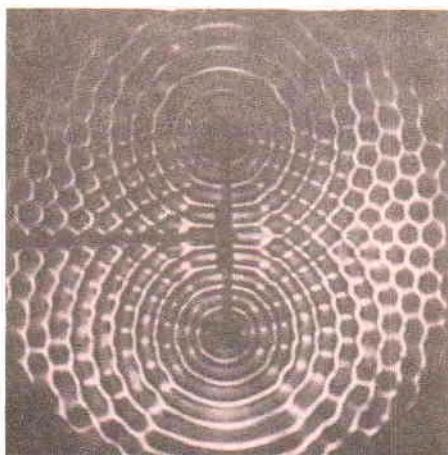
### Συμβολή κυμάτων που προέρχονται από σύμφωνες πηγές

Δύο πηγές κυμάτων λέγονται σύμφωνες εφ' όσον πάλλονται με την ίδια συχνότητα και το ίδιο πλάτος και βρίσκονται συνεχώς σε συμφωνία φάσεως.

**Το πείραμα.** Με ένα κατάλληλο στέλεχος προσαρμοσμένο σε αρμονικό ταλαντωτή δημιουργούμε μια διάταξη, τα δύο άκρα της οποίας εκτελούν κατακόρυφες αρμονικές ταλαντώσεις. Τα δύο αυτά άκρα ( $S_1$  και  $S_2$ )



Φωτογραφία που πάρθηκε με συνεχή φωτισμό της επιφάνειας.



Φωτογραφία της ίδιας επιφάνειας. Η λήψη έγινε με στροβοσκοπικό φωτισμό.



συναντούν την αρχικά ακίνητη επιφάνεια νερού και προκαλούν τη διάδοση αρμονικών επιφανειακών κυμάτων πάνω της. Παρατηρούμε το αποτέλεσμα της συνάντησης των δύο κυμάτων. Διαπιστώνουμε ότι σε ορισμένα σημεία του ελαστικού μέσου διάδοσης (σημεία ενίσχυσης) η κύμανση είναι έντονη, ενώ σε άλλα σημεία (σημεία απόσβεσης) δεν υφίσταται κύμανση. Είναι χαρακτηριστικό ότι όλα τα σημεία στα οποία διαπιστώνεται ενίσχυση ανήκουν σε συγκεκριμένες καμπύλες που έχουν τη μορφή ισοσκελούς υπερβολής. Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και με τα σημεία απόσβεσης. Ανήκουν και αυτά σε καμπύλες οι οποίες φυσικά δεν τέμνουν τις προηγούμενες, αλλά έχουν κι αυτές τη μορφή των ισοσκελών υπερβολών.

**Η θεωρία.** Οι αρμονικές ταλαντώσεις των δύο πηγών χαρακτηρίζονται από ίσα πλάτη και ίσες συχνότητες και βρίσκονται σε συμφωνία φάσεως. Αυτό σημαίνει ότι αν η μία περιγράφεται με την εξίσωση  $\xi = a \sin \omega t$ , με την ίδια εξίσωση μπορούμε να περιγράψουμε και την άλλη ταλάντωση.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα τυχαίο σημείο (M) του ελαστικού μέσου το οποίο υποθέτουμε ότι απέχει από τις πηγές ( $S_1, S_2$ ) των δύο κυμάτων αποστάσεις  $d_1$  και  $d_2$  αντίστοιχα. Η απομάκρυνση που θα παρουσίαζε το σημείο αυτό, αν υπήρχε μόνο η κύμανση της  $S_1$ , θα ήταν

$$\xi_1 = a \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda} \right)$$

Αν πάλι υπήρχε μόνο η κύμανση της  $S_2$ , η απομάκρυνση του M θα ήταν

$$\xi_2 = a \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda} \right)$$

Αν βασιστούμε στην αρχή της επαλληλίας και υποθέσουμε ότι οι δύο ταλαντώσεις έχουν την ίδια διεύθυνση, θα πρέπει να δεχθούμε ότι για την απομάκρυνση του M θα ισχύει

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 \quad \text{οπότε} \quad \xi = a \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_1}{\lambda} \right) + a \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_2}{\lambda} \right).$$

Μετά τις πράξεις προκύπτει ότι

$$\xi = A \sin 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{d_1 + d_2}{\lambda} \right) \quad \text{με} \quad A = 2a \sin \frac{\pi}{\lambda} (d_1 - d_2)$$

Οι σχέσεις στις οποίες καταλήγουμε, υποδηλώνουν ότι

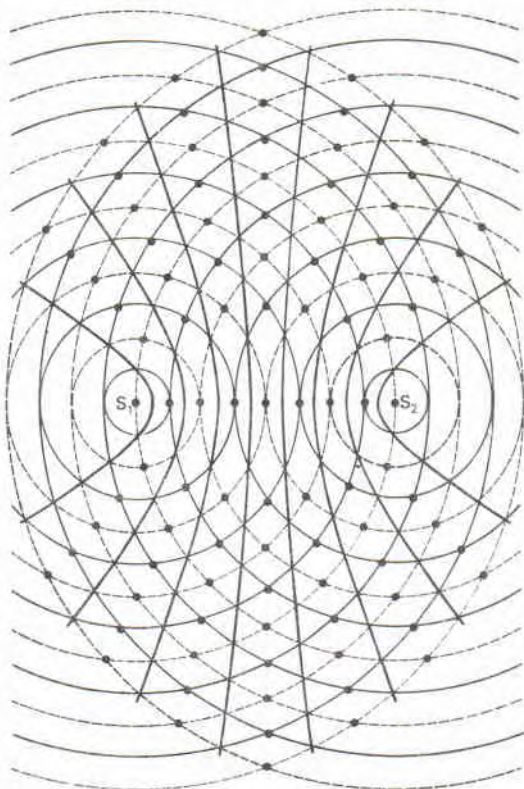
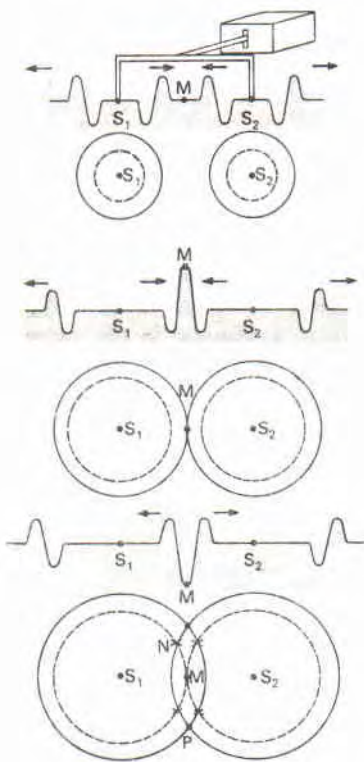
- (i) Το τυχαίο σημείο M εκτελεί αρμονική ταλάντωση
- (ii) Η συχνότητα της ταλάντωσής του συμπίπτει με την κοινή συχνότητα ταλάντωσης των δύο πηγών
- (iii) Το πλάτος της ταλάντωσής του εξαρτάται από τη διαφορά των αποστάσεων του ( $d_1 - d_2$ ) από τις δύο κυματικές πηγές.

Το ζήτημα του πλάτους παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αξίζει να το ερευνήσουμε διεξοδικότερα.

**Κρόσσοι ενίσχυσης.** Από την εξίσωση που μας δίνει την τιμή του πλάτους

## 402 Τα κύματα

συμπεραίνεται ότι αν  $d_1 - d_2 = k\lambda$ , θα είναι και  $A = 2a$ . Τα σημεία δηλαδή των οποίων οι διαφορές των αποστάσεων από τις δύο πηγές είναι ακέραια πολλαπλάσια του μήκους κύματος, θα είναι σημεία ταλαντούμενα με



πλάτος διπλάσιο από το πλάτος κάθε πηγής. Είναι σημεία στα οποία τα δύο κύματα αλληλοενισχύονται.

Ας δούμε όμως και ποιο είναι το σύνολο των σημείων αυτών πάνω στην επιφάνεια. Θα χρειαστούμε τη συνδρομή της Γεωμετρίας. Αν στην εξίσωση  $d_1 - d_2 = k\lambda$  θεωρήσουμε  $k=0$ , θα προκύψει  $d_1 = d_2$ . Το σύνολο (γεωμετρικός τόπος) των σημείων αυτών είναι η μεσοκάθετος στο ευθύγραμμο τμήμα  $S_1S_2$ . Για  $k=1$  είναι  $d_1 - d_2 = \lambda$ . Το σύνολο των σημείων αυτών αποτελεί μια ισοσκελή υπερβολή, οι δύο εστίες της οποίας είναι τα σημεία  $S_1$  και  $S_2$ . Για  $k=2, 3, 4, \dots$  η εξίσωση που προκύπτει εκάστοτε αντιστοιχεί σε σημεία ισοσκελών υπερβολών. Το σύνολο όλων αυτών των σημείων αποτελεί τους λεγόμενους κροσσούς ενίσχυσης.

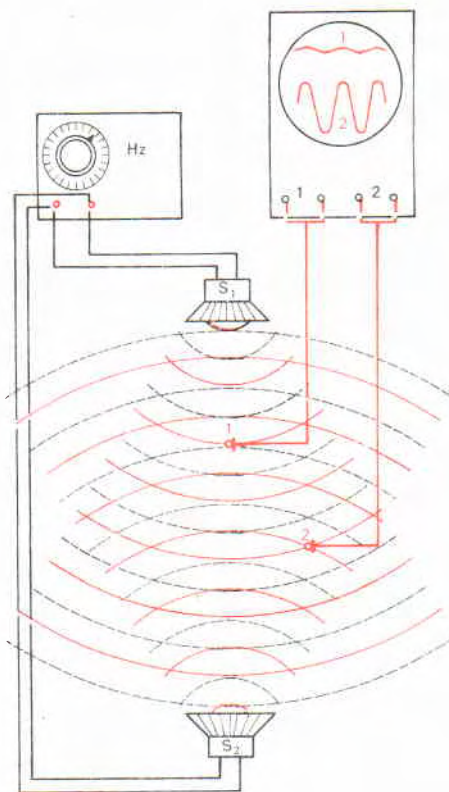
**Κροσσοί απόσβεσης. Διαταραχή + Διαταραχή = ακινησία.** Αν τώρα  $d_1 - d_2 = (2k+1)\lambda/2$ , θα είναι  $A=0$ , κάθε σημείο δηλαδή, του οποίου η διαφορά αποστάσεων από τις δύο πηγές είναι περιττό πολλαπλάσιο του  $\lambda/2$  θα είναι διαρκώς ακίνητο. Για  $k=0,1,2,3,\dots$  προκύπτουν οι εξισώσεις  $d_1 - d_2 = \lambda/2,$

$d_1 - d_2 = 3\lambda/2$ ,  $d_1 - d_2 = 5\lambda/2$ ,  $d_1 - d_2 = 7\lambda/2$ , κ.λ.π. καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε υπερβολή με εστίες τα σημεία  $S_1$  και  $S_2$ . Το σύνολο αυτών των σημείων αποτελεί τους λεγόμενους κροσσούς απόσβεσης.

Η συμβολή είναι ένα φαινόμενο που εκδηλώνεται σε όλα τα είδη κυμάτων. Ισχύει όμως και το αντίστροφο. Αν δηλαδή σε μια «μορφή ύλης» εκδηλωθούν φαινόμενα συμβολής, μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι η «μορφή ύλης» παρουσιάζει χαρακτήρα κύματος. Κατά την περιγραφή της συμβολής στα διάφορα είδη κυμάτων, αντί για την έννοια «απομάκρυνση» η οποία μας εξυπηρέτησε στα ελαστικά επιφανειακά κύματα, θα χρησιμοποιούμε το κατάλληλο ανάλογο μέγεθος. Αν τα κύματα είναι ηλεκτρομαγνητικά, το αντίστοιχο της απομάκρυνσης είναι η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου. Αν τα κύματα είναι ηχητικά και διαδίδονται σε αέριο, το κατάλληλο μέγεθος είναι οι εκάστοτε μεταβολές της πίεσης.

**Φαινόμενα συμβολής στον ήχο.**

**Ήχος + ήχος = σιωπή.** Συνδέουμε δύο όμοια μεγάφωνα με την ίδια ηχητική πηγή χαμηλής συχνότητας. Τοποθετούμε το ένα μεγάφωνο απέναντι στο άλλο και ανιχνεύουμε το αποτέλεσμα της συμβολής με μικρόφωνα συνδεδεμένα προς παλμογράφο. Σε ορισμένες περιοχές οι ήχοι αλληλοεπισχύνονται ενώ σε άλλες περιοχές το αποτέλεσμα της συμβολής είναι η απόσβεση, οι δύο δηλαδή παρόμοιοι ήχοι συναντιώνται και αλληλοκαταργούνται. Ο ήχος συναντά τον ήχο και δημιουργείται σιωπή.



## Η φύση του φωτός (Α)

Μέχρι και τον πέμπτο αιώνα πριν από το Χριστό οι άνθρωποι διατηρούσαν πάνω στο ουσιαστικό ζήτημα της μέρας και της νύχτας μια αντίληψη που θα μπορούσε σήμερα να τη χαρακτηρίσουμε «πονητική». Πίστευαν ότι το φως ήταν ένας λαμπερός

ατμός και το σκοτάδι ένας μαύρος ατμός που υψωνόταν τα βράδια από την επιφάνεια της Γης. Το φως και το σκοτάδι αποτελούσαν δύο «οντότητες» μεταξύ τους ανεξάρτητες. Υπάρχουν αρκετές αναφορές μέσα σε αρχαία κείμενα από τις οποίες πιστοποιείται το εντυπωσιακό —σε σχέση με τις σημερινές μας απόψεις— αυτό γεγονός. Σε ένα από τα σημαντικά άλματα που πραγματοποίησε η ανθρώπινη σκέψη κατά τους αιώνες που ακολούθησαν, η παλιά αντίληψη ανατράπηκε. Συμφωνα με τη νέα αντίληψη, την οποία δεχόμαστε μέχρι και σήμερα, *το σκοτάδι δεν έχει υλική υπόσταση, το σκοτάδι δεν είναι παρά η απουσία φωτός. Εκείνο που έχει υλική υπόσταση είναι το φως.*

**Η σωματιδιακή θεωρία.** Πάνω στη νέα αντίληψη βασίστηκε και η έρευνα των ποικίλων «φωτεινών» φαινομένων. Τα πρώτα φαινόμενα που ερευνήθηκαν ήταν τα σχετικά με την **ευθύγραμμη διάδοση**, την **ανάκλαση** και τη **διάθλαση**, μέσα από τα οποία δημιουργήθηκε και η ιδέα μιας φωτεινής ακτίνας ευθύγραμμης. Η ιδέα αυτή συνέβαλε με τη σειρά της στη διαμόρφωση της πρώτης θεωρίας για τη φύση του φωτός, σύμφωνα με την οποία οι ευθύγραμμες ακτίνες αντιστοιχούσαν σε τροχιές **πολύ μικρών αόρατων σωματιδίων**. Μια θεωρία ουσιαστικά ισοδύναμη με αυτή βρίσκουμε στο βιβλίο του Λουκρητίου «De rerum natura» (Για τη φύση των πραγμάτων) τον πρώτο αιώνα πριν από το Χριστό.

Το επόμενο ορόσημο στην εξέλιξη των ιδεών για το φως εμφανίζεται το δέκατο έβδομο αιώνα μετά Χριστόν. Σ' ολόκληρη σχεδόν την καριέρα του ο Νεύτωνας ενδιαφέρθηκε σοβαρά για τα προβλήματα του φωτός. Στο κλασικό βιβλίο του «Οπτική» που κυκλοφόρησε τελικά στα 1703 παρουσίασε μια από τις πρώτες συστηματικές μελέτες για το φως. Στο μεταξύ —προτού δηλαδή να προβεί στη δημοσίευση— είχε παραδεχθεί ότι **το φως είναι ένα ρεύμα αόρατων σωματιδίων που εκτοξεύονται από το φωτεινό σώμα.**

**Η ευθύγραμμη διάδοση του φωτός.** Ένα διαφανές μέσον χαρακτηρίζεται ως «οπτικώς ισότροπο» όταν, μέσα σ' αυτό, το φως διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα. Σε ένα τέτοιου είδους μέσον δεχόμαστε ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα. Ένα από τα φαινόμενα που ενθαρρύνουν αυτή την παραδοχή είναι και η **δημιουργία σκιάς**. Πάνω σ' αυτό το φαινόμενο βασίζεται και το γνωστό «θέατρο σκιών» το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο ενδιαφέροντα στοιχεία της πολιτιστικής μας παράδοσης.



Μπορούμε δηλαδή να πούμε ότι υποστήριζε την παλιά θεωρία της σωματιδιακής υπόστασης.

Τίποτα περισσότερο δε χρειάζεται για να χρησιμοποιήσει κανείς τις ακτίνες φωτός σε εφαρμογές εύκολης ανάκλασης και εύκολης διάδοσης από το να είναι μικρά σωματίδια που με τις ελκτικές τους δυνάμεις ή με κάποιες άλλες δυνάμεις προκαλούν δονήσεις πάνω σε ό,τι επενεργούν.

Νεύτωνας, Οπτική, Αίτημα 29.

**Η κυματική θεωρία.** Την ίδια περίπου εποχή ο Άγγλος Hooke (Χουκ) και ο Ολλανδός Huygens (Χόιχενς) είχαν συγκλίνει σε μια υπόθεση εντελώς διαφορετική, σύμφωνα με την οποία το φως μοιάζει με τον ήχο και πρέπει να το δεχόμαστε σαν **ένα κύμα** που διαδίδεται σε ένα μέσο. Ειδικά μάλιστα ο Huygens στο βιβλίο του «Πραγματεία για το φως», που κυκλοφόρησε το 1690, διατύπωσε μια σχετικά ολοκληρωμένη θεωρία με την οποία ήταν δυνατόν να ερμηνευτούν τα γνωστά τότε φωτεινά φαινόμενα. Για την ερμηνεία των φαινομένων αυτών, ο Huygens πρότεινε μια καινούρια **αρχή** για τη διάδοση όχι μόνο του φωτός αλλά και όλων γενικά των κυμάτων. Με βάση την αρχή του Huygens και μέσα από γεωμετρικούς συλλογισμούς έγινε δυνατόν να δοθεί μια ερμηνεία στους πειραματικούς νόμους τόσο της ανάκλασης όσο και της διάθλασης του φωτός.

**Αρχή Huygens.** Κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή δευτερογενούς κυματίδιου το οποίο διαδίδεται με την ταχύτητα του κύματος.

Τα δευτερογενή αυτά κυματίδια συμβάλλουν και αναιρούνται αμοιβαία σε όλα τα σημεία του μέσου εκτός από τα σημεία που καθορίζει η κοινή εφαπτόμενη επιφάνεια στα μέτωπα των κυματιδίων αυτών. Η επιφάνεια αυτή αποτελεί και το «επόμενο» μέτωπο κύματος. Όταν λοιπόν μας είναι σε κάποια στιγμή ( $t$ ) γνωστό το μέτωπο κύματος μπορούμε να προβλέψουμε το μέτωπο σε μια επόμενη στιγμή ( $t+\Delta t$ ).

Η κυματική θεωρία είχε όμως και την «αχίλλεια πτέρνα» της. Η διάδοση των κυμάτων προϋπόθετε οπωσδήποτε κάποιο μέσο (φορέα) διάδοσης. Ποιο είναι άραγε το μέσο στο οποίο διαδίδονται τα φωτεινά κύματα στο μεγάλο ταξίδι τους από τον Ήλιο μέχρι εμάς; Οι επιστήμονες του δέκατου έβδομου αιώνα έλυσαν —ή μάλλον νόμισαν ότι έλυσαν— το πρόβλημα παραδεχόμενοι την ύπαρξη μιας ουσίας που κάλυπτε όλο το σύμπαν και η οποία θα μπορούσε να αποτελεί το μέσο (φορέα) διάδοσης των κυμάτων φωτός. Στην «ουσία» αυτή δόθηκε το όνομα **αιθέρας**, μια λέξη που είχε κάποτε χρησιμοποιήσει ο Αριστοτέλης ονοματοδοτώντας το συστατικό υλικό των ουρανών και των ουρανίων σωμάτων. Αλλά ο «φωτοφόρος» αιθέρας έπρεπε να διαθέτει και ορισμένες ιδιότητες. Η μεγάλη ταχύτητα του φωτός απαιτούσε ένα μέσον τρομακτικά μεγάλης ελαστικότητας και τρομακτικά μικρής πυκνότητας. Και η ουσία αυτή θα έπρεπε να επιτρέπει στα ουράνια σώματα να κινούνται χωρίς τριβές. Και ενώ η ιδέα της παρουσίας του αιθέρα ήταν οπωσδήποτε ενοχλητική, για τους φυσικούς όμως του 17ου αιώνα, η ιδέα της ύπαρξης κυμάτων χωρίς υλικό φορέα διάδοσης ήταν ακόμα πιο ενοχλητική. Ο αιθέρας πήρε τη θέση του στην κλασική φυσική παρόλο που η κυματική θεωρία για ένα περίπου αιώνα παραμερίστηκε από τη σωματιδιακή θεωρία.

**Η σωματιδιακή θεωρία επιβάλλεται.** Ο Νεύτωνας χωρίς να είναι κατηγορηματικός



ποτέ δεν παραδέχτηκε την κυματική φύση του φωτός. Γεγονός είναι, βέβαια, ότι τόσο η σωματιδιακή όσο και η κυματική θεωρία μπορούσαν να ερμηνεύσουν τα γνωστά την εποχή εκείνη φαινόμενα. Παρόλη όμως τη φαινομενική ισοδυναμία που παρουσίαζαν τα επιχειρήματα των δύο πλευρών, η σωματιδιακή θεωρία του φωτός πριμοδοτημένη με το κύρος του Νεύτωνα κυριάρχησε στην Ευρωπαϊκή σκέψη σ' όλη τη διάρκεια του αιώνα που ακολούθησε. Για μια ακόμη φορά η δύναμη της αυθεντίας κυριολεκτικά καθοδήγησε τις περισσότερες από τις πειραματικές προσπάθειες και τις θεωρητικές συνθέσεις προς ορισμένη κατεύθυνση. Η εξέλιξη αυτή αποτέλεσε ένα είδος κανόνα που συνοδευόταν βέβαια και από αρκετές εξαιρέσεις. Ο Euler (Ώιλερ) για παράδειγμα υπερασπίστηκε με σθένος την κυματική θεωρία αλλά με κανένα από τα επιχειρήματά του δεν κατάφερε να κλονίσει την εδραιωμένη πεποίθηση για τη σωματιδιακή υπόσταση του φωτός. Η κυματική θεωρία φαινόταν ότι θα ήταν για πάντα ανίσχυρη να αντιπαρατεθεί στο «Νευτώνικό αναντίρρητο». Στα Ευρωπαϊκά πανεπιστήμια οι φοιτητές διδάσκονταν ότι η «αλήθεια» για το φως ήταν αυτό που είχε υποστηρίξει ο Νεύτωνας.

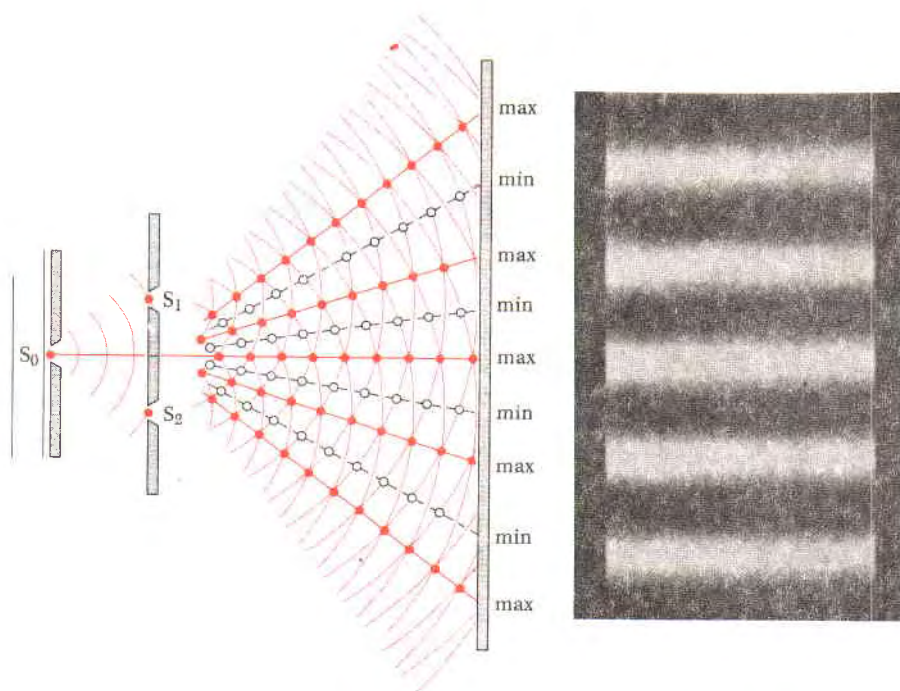
## Φαινόμενα συμβολής του φωτός

**Η σωματιδιακή θεωρία κλονίζεται.** Υπήρχε όμως ένα ακραιφνώς κυματικό φαινόμενο το οποίο δεν είχε ποτέ παρατηρηθεί στο φως. Ήταν το φαινόμενο της συμβολής. Αν μπορούσε κανείς «ανακρίνοντας» την ύλη να της αποσπάσει την ομολογία ότι το φως παρουσιάζει φαινόμενα συμβολής, θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα σημαντικό ρήγμα στην εδραιωμένη πεποίθηση της εποχής. Η ιδέα αυτή έφερε στο προσκήνιο τον Άγγλο Thomas Young (Τόμας Γιανγκ). Ο Young ξεκίνησε από την πεποίθηση ότι το φως ήταν κύμανση και θα έπρεπε να εμφανίζει φαινόμενα συμβολής. Σύμφωνα με την κυματική θεωρία αν δύο κύματα προερχόμενα από σύμφωνες πηγές και διαδιδόμενα στο ίδιο μέσο συναντηθούν μπορεί να συμβάλλουν με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν περιοχές έντονου φωτισμού αλλά και περιοχές απουσίας φωτός, δηλαδή σκότους. Όπως δηλαδή συμβαίνει με τα επιφανειακά κύματα στα οποία μπορούμε και παρατηρούμε και το αποτέλεσμα που λέγεται «διαταραχή + διαταραχή = ακινησία», όπως συμβαίνει με τα ηχητικά κύματα κατά τη συμβολή των οποίων διαπιστώνεται και το αποτέλεσμα «ήχος + ήχος = σιωπή», κάτι ανάλογο θα μπορούσε να συμβαίνει και με το φως. Θα μπορούσε δηλαδή να διαπιστωθεί ότι σε ορισμένες περιοχές κατά τη συμβολή θα έχουμε **«φως + φως = σκοτάδι»**. Αν αυτό συνέβαινε θα ενίσχυε την άποψη για τον κυματικό χαρακτήρα του φωτός.

Το πρόβλημα βέβαια ήταν ότι η ύπαρξη δύο μονοχρωματικών φωτεινών πηγών που να είναι σύμφωνες ήταν κάτι ανέφικτο. Η σκέψη του Young ήταν ότι η συγκεκριμένη «αζεπέραστη» δυσκολία θα μπορούσε να ξεπεραστεί αν αξιοποιούσε ένα άλλο κυματικό φαινόμενο, την περίθλαση.

Χρησιμοποιώντας ένα διάφραγμα με δύο πολύ μικρές παράλληλες σχισμές και έχοντας τοποθετήσει μια οθόνη παράλληλα προς το διάφραγμα σε απόσταση μεγάλη σε σχέση με την απόσταση των σχισμών **κατάφερε, τελικά, φωτίζοντας το διάφραγμα να δει να σχηματίζονται στην οθόνη φωτεινές και σκοτεινές περιοχές** που η μία διαδέχονταν την άλλη. Ήταν το αντίστοιχο των κροσσών ενίσχυσης και των

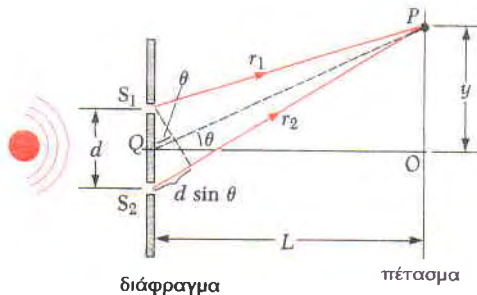
κροσσών απόσβεσης. Το φως αφού πρώτα υφίστατο περίθλαση στις δύο σχισμές δημιουργούσε δύο κύματα με ίσες συχνότητες και χωρίς φασική διαφορά. Τα δύο κύματα συνέβαλλαν και δημιουργούσαν τις φωτεινές και σκοτεινές ταινίες (είδωλα των σχισμών) το αποτέλεσμα δηλαδή της συμβολής στην περιοχή της οθόνης. Ήταν η πρώτη πειραματική ένδειξη που θα κλόνιζε το κύρος της σωματιδιακής θεωρίας και θα ενθάρρυνε την άλλη άποψη.



Παράλληλα οι μετρήσεις που πήρε του επέτρεψαν να υπολογίσει για πρώτη φορά το μήκος κύματος των διαφόρων ακτινοβολιών. Οι τιμές που βρήκε ήταν  $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  για την ερυθρά ακτινοβολία και  $0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$  για την ιώδη.

**Υπολογισμός του μήκους κύματος.** Στο σχήμα παρουσιάζεται μια τομή από επίπεδο κάθετο τόσο στο πέτασμα όσο και στο διάφραγμα. Η κάθετος στο επίπεδο του διαφράγματος στο μέσον  $O$  της  $S_1S_2$  (σχήμα) τέμνει το πέτασμα στο σημείο  $O$  στο οποίο θα βρίσκεται και ο «κεντρικός» φωτεινός κροσσός. Αν είναι  $y$  η απόσταση του υπ' αριθμόν « $k$ » φωτεινού κροσσού από τον κεντρικό και  $r_1, r_2$  οι αντίστοιχες αποστάσεις του από τις δύο σχισμές ( $S_1, S_2$ ), θα ισχύει  $r_2 - r_1 = k\lambda$ .

Πάνω στην  $PS_2$  θεωρούμε ένα ευθύ-



γραμμο τμήμα  $PS_1$  ίσο με  $PS_1$ . Το τμήμα  $S_2S_1$  θα είναι ίσο με  $k\lambda$ . Η απόσταση  $L$  ανάμεσα στο διάφραγμα και το πέτασμα είναι τόσο μεγάλη σε σχέση με την απόσταση  $d=S_1S_2$  των δύο σχισμών, ώστε να μας επιτρέπεται να θεωρήσουμε ότι τα τρίγωνα  $S_1S_1'P$  και  $S_1S_1'S_2$  είναι ορθογώνια. Ισχύει  $S_2S_1S_1'=PQO=\theta$ . Στο τρίγωνο  $PQO$  ισχύει  $\varepsilon\varphi\theta=y/L$  ενώ στο τρίγωνο  $S_1S_1'S_2$   $\eta\mu\theta=k\lambda/d$ . Επειδή οι γωνίες είναι πολύ μικρές μπορούμε να δεχθούμε ότι  $\varepsilon\varphi\theta=\eta\mu\theta$ , οπότε

$$\frac{y}{L} = \frac{k\lambda}{d} \Rightarrow y = k \frac{\lambda L}{d}$$

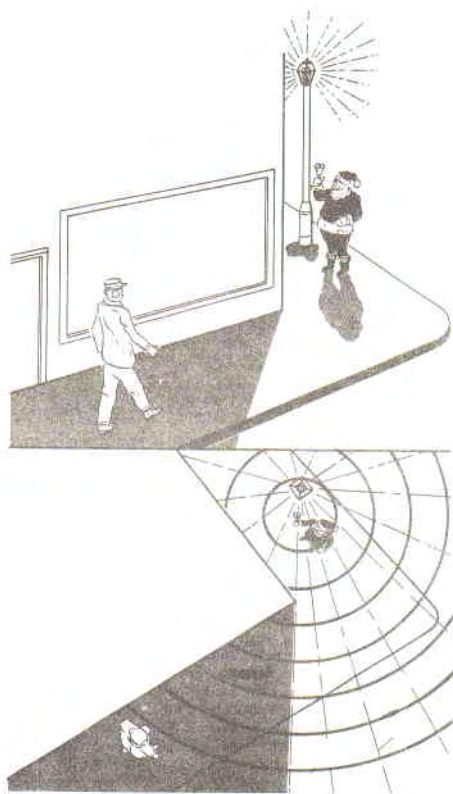
Η τελευταία εξίσωση για  $k=0,1,2,3,\dots$  μας δίνει τις θέσεις των φωτεινών κρόσσων. Η ίδια πάλι εξίσωση μας οδηγεί στον υπολογισμό του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας την οποία χρησιμοποιήσαμε.

## Περίθλαση

Καθώς βρισκόμαστε μέσα σε δωμάτιο με ανοιχτή πόρτα είναι δυνατόν να ακούμε τη φωνή ενός φίλου που βρίσκεται έξω από το δωμάτιο και μιλάει χωρίς να τον βλέπουμε. Είναι κάτι σαν ο ήχος να «στρίβει» τη γωνία. Αν βέβαια ο φίλος θελήσει να μεταβιβάσει ένα απ' ευθείας φωτεινό μήνυμα στα μάτια μας (με ένα φακό για παράδειγμα) ξέρουμε προκαταβολικά ότι αυτό θα είναι μια ενέργεια μάταιη. Το φως δε φαίνεται να «στρίβει» τη γωνία.

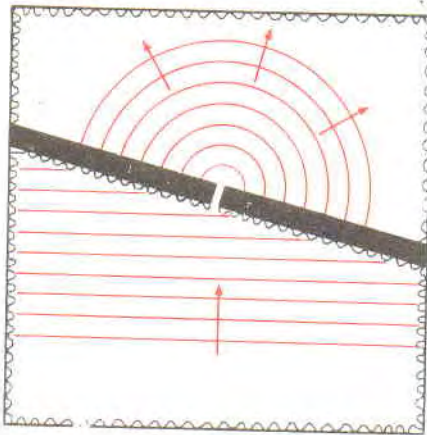
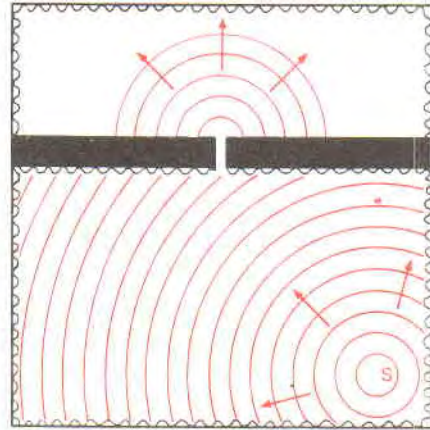
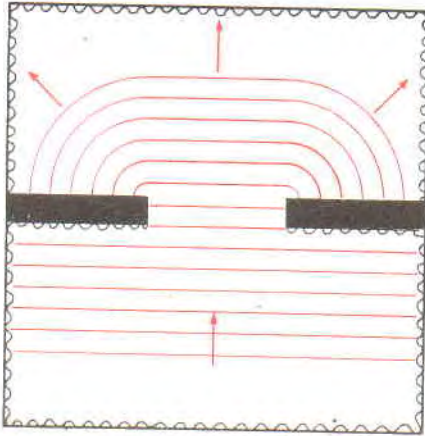
Οι φυσικοί λένε ότι σε ένα ανοίγμα με τις διαστάσεις μιας πόρτας οι ηχητικές ακτίνες στρίβουν, τα ηχητικά κύματα παραβιάζουν την αρχή της ευθύγραμμης διάδοσης και υφίστανται τη λεγόμενη **περίθλαση**. Αυτό συμβαίνει επειδή οι διαστάσεις του ανοίγματος είναι μικρότερες από το μήκος κύματος του ήχου. Κάτι ανάλογο θα μπορούσε να συμβεί και με το φως όχι όμως σε ανοίγματα τόσο μεγάλων διαστάσεων. Η περίθλασή του απαιτεί μια πάρα πολύ μικρή σχισμή.

Η περίθλαση είναι ένα γενικό κυματικό φαινόμενο το οποίο δημιουργείται εφ' όσον στη διάδοση του κύματος παρεμβάλλεται ένα εμπόδιο που έχει κάποια σχισμή (άνοιγμα). Όταν το πλάτος του ανοίγματος είναι μικρότερο από το μήκος κύματος παρουσιάζεται απόκλιση από την



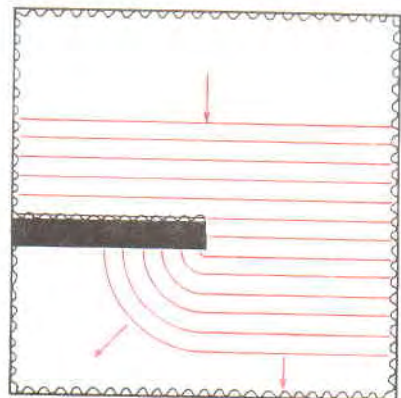
Ο πεζός δε βλέπει το φως της λάμπας, ούτε τον «Άγιο Βασίλη», ακούει, όμως το κουδούνι του. Τα ηχητικά κύματα παραβιάζοντας το ευθύγραμμο της διάδοσης, παρακάμπτουν το εμπόδιο.

ευθύγραμμη διάδοση η οποία λέγεται περίθλαση. Σύμφωνα με την αρχή Huygens η μικρή σχισμή γίνεται πηγή δευτερογενών κυμάτων τα οποία είναι σφαιρικά γιατί έχουν κοινό κέντρο εκπομπής, μιας και το άνοιγμα είναι τόσο μικρό που μας



επιτρέπεται να το θεωρήσουμε σημείο. Πίσω συνεπώς από το εμπόδιο θα διαδίδονται σφαιρικά κύματα με κέντρο το άνοιγμα, κύματα δηλαδή με κυματικές ακτίνες προς κάθε κατεύθυνση. Η όλη εικόνα ισοδυναμεί με παραβίαση της αρχής της ευθύγραμμης διάδοσης. Περίθλαση παρατηρείται και σε περίπτωση που το κύμα συναντά ένα εμπόδιο με διαστάσεις μικρότερες από το μήκος κύματος. Στις παρυφές του εμποδίου η διεύθυνση διάδοσης, άρα και η μορφή του κύματος, υφίστανται τροποποίηση.

**Περίθλαση του φωτός.** Το φαινόμενο παρα-





τηρείται και σε φως, που περιπίπτει πάνω σε ανοίγματα ή αδιαφανή αντικείμενα που οι διαστάσεις τους να έχουν μέγεθος της τάξης του μήκους κύματος του φωτός. Το λευκό ηλιακό φως κατά την περίθλασή του υφίσταται και ανάλυση στις ακτινοβολίες οι οποίες «συμμετέχουν» —όπως πιστεύουμε— σ' αυτό. Η ανάλυση οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε ακτινοβολία έχει ένα «δικό της» μήκος κύματος με αποτέλεσμα να υφίσταται μία περίθλαση διαφορετική σε σχέση με τις υπόλοιπες.

Η περίθλαση του φωτός είχε για πρώτη φορά παρατηρηθεί από τον Ιταλό Grimaldi (Γκριμάλντι) το έτος 1665, μερικά δηλαδή χρόνια προτού να διαμορφωθούν οι δύο αντιμαχόμενες θεωρίες για το φως. Το φαινόμενο ήταν γνωστό τόσο στο Νεύτωνα όσο και στο Huygens. Αλλά ο Νεύτωνας δεν «διέκρινε» μέσα από αυτό το φαινόμενο μια κυματική θεωρία για το φως. Από την άλλη πλευρά ο Huygens παρόλο που επινόησε την πολύ έξυπνη κατασκευή (Αρχή Huygens) για τη διάδοση των κυμάτων και ενώ —σήμερα αναγνωρίζουμε ότι— θα μπορούσε εφαρμόζοντάς την να ερμηνεύσει το μυστηριώδες τότε φαινόμενο της περίθλασης ο ίδιος αδιαφόρησε και ουσιαστικά δεν ασχολήθηκε με το φαινόμενο αυτό.

## Η φύση του φωτός (B)

19ος αιώνας.

### Η κυματική θεωρία κυριαρχεί

Ο Young είχε πείσει τον εαυτό του ότι το φως έχει χαρακτήρα κυματικό. Αυτό δε σημαίνει ότι κατάφερε να πείσει και το επιστημονικό κατεστημένο της εποχής. Η δημοσίευση της εργασίας του, ενώ έγινε με απλό και πειστικό τρόπο, προκάλεσε όχι μόνο αποδοκιμασίες αλλά και πάρα πέρα αντιδράσεις σε επίπεδο εμπαιγμού. Ήταν το αναπόφευκτο τίμημα της προσωπικής του σύγκρουσης με τη Νευτωνική αυθεντία. Μέσα σε εκατό χρόνια η Νευτωνική επανάσταση είχε προλάβει να γίνει καθεστώς.

Στα χρόνια που ακολούθησαν η προσπάθεια για τη στήριξη της κυματικής θεωρίας ενισχύθηκε με τη συμμετοχή του Augustin Fresnel (Αυγουστίνου Φρενέλ 1788-1827) ενός Γάλλου επιστήμονα με αξιόλογη μαθηματική κατάρτιση ο οποίος συνεργάστηκε με τον Young παρόλο που οι διαφορετικές πατρίδες τους συνέβαινε να βρίσκονται σε εμπόλεμη κατάσταση. Με το ονομαστό του πείραμα το οποίο παρουσίασε μερικά χρόνια αργότερα (1821) απέδειξε κι αυτός ότι το φως παρουσιάζει φαινόμενα συμβολής. Σαν φωτεινές πηγές χρησιμοποίησε τα δύο έδωλα μιας μονοχρωματικής πηγής πάνω σε δύο καθρέφτες που σχημάτιζαν γωνία περίπου 180 μοιρών. Τα δύο αυτά είδωλα μπορούσαν να θεωρηθούν σαν δύο σύμφωνες πηγές κατάλληλες να δώσουν πάνω σε μια οθόνη κροσσούς συμβολής. Σε αντίθεση με ό,τι είχε συμβεί 20 χρόνια νωρίτερα με τον Thomas Young, η επίδειξη του νέου πειράματος έπεισε τους περισσότερους επιστήμονες για την κυματική φύση του φωτός. Σ' αυτό



έπαιξε σημαντικό ρόλο και ο σεβασμός που ενέπνεαν οι μαθηματικές γνώσεις του Fresnel.

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε επίσης η συμβολή του Fresnel και στη θεωρητική ερμηνεία της περίθλασης. Ενάμιση περίπου αιώνα μετά τον Huygens θα «διακρίνει» μέσα στο φαινόμενο της περίθλασης αυτό που δεν μπόρεσε να διακρίνει ο Huygens, ένα ισχυρό δηλαδή επιχείρημα για την κυματική φύση του φωτός. Ο ίδιος πάλι θα χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά την αρχή Huygens για να ερμηνεύσει θεωρητικά την περίθλαση. Σήμερα η αρχή αυτή αναφέρεται και ως «αρχή Huygens-Fresnel».

Μπορούμε να πούμε ότι κατά την πρώτη εικοσιπενταετία του 19ου αιώνα η άποψη για την κυματική φύση του φωτός δέχθηκε μια ώθηση αποφασιστική. Το γεγονός είναι σημαντικό με την έννοια ότι ήταν η πρώτη φορά που μια Νευτωνική άποψη δεχόταν ένα τόσο ισχυρό κλονισμό με τελικό αποτέλεσμα την ολοκληρωτική της ανατροπή. Η καινούρια θεωρία αναπτύχθηκε χωρίς τη σφραγίδα μιας αυθεντίας.

Την ίδια περίπου εποχή η ανακάλυψη και η μελέτη του φαινομένου της **πόλωσης του φωτός** ενίσχυσε ακόμα περισσότερο την κυματική θεωρία και έδειξε ότι το φως έχει χαρακτήρα **εγκάρσιου κύματος**. Τέσσερις περίπου δεκαετίες αργότερα ο Maxwell ισχυρίστηκε ότι **το φως διαδίδεται με κύματα της ίδιας μορφής με τα ηλεκτρομαγνητικά**.

## 20ος αιώνας. Το δίλημμα

Από την αυγή του εικοστού αιώνα η άποψη για τη σωματιδιακή φύση του φωτός έκανε και πάλι την εμφάνισή της με ένα όμως πρόσωπο εντελώς διαφορετικό.

**Η εκπομπή της ακτινοβολίας και το quantum ενέργειας.** Το Δεκέμβριο του έτους 1900 ένας μεγάλος Γερμανός φυσικός της εποχής, ο Max Planck (Μαχ Πλανκ 1858-1947) έκανε —κατά τη διάρκεια ενός συνεδρίου— μια σημαντική ανακοίνωση με την οποία άνοιγε ένα καινούριο κεφάλαιο της ιστορίας της φυσικής. Ο Planck ανακοίνωσε ότι σύμφωνα με τους δικούς του υπολογισμούς τα «παράδοξα»\* που παρουσίαζε —κατά την εποχή εκείνη— η εκπομπή ακτινοβολίας, θα μπορούσαν να ερμηνευτούν, αρκεί κανείς να παραδεχόταν ότι **η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται (και απορροφάται) μόνο κατά τρόπο ασυνεχή**. Θα μπορούσαμε να «μεταφράσουμε» τον ισχυρισμό του λέγοντας ότι η εκπομπή ακτινοβολίας γίνεται με τρόπο που θυμίζει σταγόνες που βγαίνουν από ένα σταγονόμετρο. Η περιγραφή όμως της ασυνέχειας έγινε από τον Planck στη γλώσσα της ενέργειας. Εκπομπή ακτινοβολίας πραγματοποιείται μόνο εφ' όσον συμπληρωθεί ένα ορισμένο ενεργειακό ποσό το οποίο —χρησιμοποιώντας μια λατινική λέξη— ονόμασε quantum ενέργειας. Απλοποιώντας την ονομασία του θα το λέμε κβάντο ενέργειας. Όλα τα εκπεμπόμενα κβάντα μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας είναι ίσα και αδιαίρετα. Η ενέργεια (E) καθενός από αυτά εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της ακτινοβολίας

\* Κατά τα τέλη του περασμένου αιώνα αρκετοί φυσικοί επιδιώκοντας να χρησιμοποιήσουν τη στατιστική μέθοδο της θερμοδυναμικής στη μελέτη της εκπομπής ακτινοβολίας είχαν οδηγηθεί σε συμπεράσματα ομολογουμένως παράδοξα.

και υπολογίζεται μάλιστα από το γινόμενο της συχνότητας ( $\nu$ ) επί μια σταθερά ( $h$ ) ίση προς  $6,55 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , η οποία αργότερα ονομάστηκε **σταθερά του Planck**. Η εξίσωση  $E=h\nu$  εκφράζει αυτόν ακριβώς τον υπολογισμό.

$$E=h\nu$$

Για να κατανοήσουμε την τάξη μεγέθους της ενέργειας ενός κβάντου αρκεί να σκεφθούμε ότι η ενέργεια ενός κβάντου πράσινου φωτός είναι ίση με την ενέργεια που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο επιταχυνόμενο μεταξύ δύο σημείων με διαφορά δυναμικού τριών περίπου βόλτ.

**Η διάδοση της ακτινοβολίας και το φωτόνιο.** Πέντε χρόνια αργότερα (1905) ο Albert Einstein επιδιώκοντας να δώσει μια ερμηνεία στο ανεξήγητο μέχρι τότε **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** πρότεινε μια παραπέρα προέκταση της αρχικής υπόθεσης του Planck. Υποστήριξε ότι η κβαντική θεώρηση δεν ίσχυε μόνο κατά την εκπομπή του φωτός (ακτινοβολίας) αλλά και κατά τη διάδοσή του. Για τον Einstein κατά τη διάδοση του φωτός όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικού κύματος η ακτινοβολός ενέργεια δεν θα έπρεπε να κατανέμεται με ομοιόμορφο τρόπο στα μέτωπα κύματος, όπως δεχόταν η κλασική θεωρία, αλλά θα έπρεπε να είναι εντοπισμένη σε συγκεκριμένα «πακέτα» ενέργειας. Η εικόνα βέβαια που μας προτείνει δεν σχετίζεται με τις καθημερινές εμπειρίες μας. Είναι σα να δεχόμαστε ότι καθώς ένα θαλάσσιο κύμα «σκάει» πάνω σε μια ακτή, ολόκληρη η ενέργεια που μεταφέρει απορροφάται από ένα μόνο βότσαλο. Σύμφωνα με το καινούριο μοντέλο η ενεργειακή μιας φωτεινής ακτίνας συντίθεται από μικρές διακεκριμένες ποσότητες (κόκκους) κάθε μία από τις οποίες είναι ίση με την ενέργεια ενός κβάντου. Το κβάντο φωτεινής ενέργειας ονομάστηκε **φωτόνιο** και η άποψη ότι η (ηλεκτρομαγνητική) ακτινοβολός ενέργεια είναι (όπως και το ηλεκτρικό φορτίο) **κβαντισμένη** άρχισε να επικρατεί.

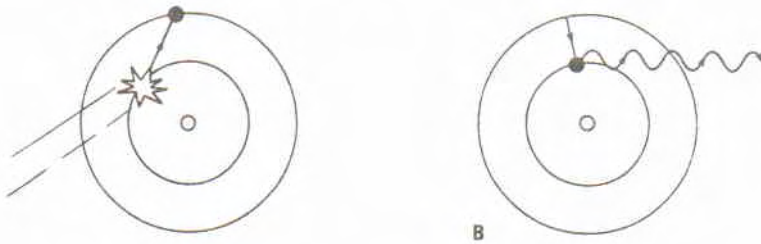
Με τη θεωρία των φωτονίων δόθηκε μια ικανοποιητική εξήγηση στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Το φωτόνιο άρχισε να θεωρείται ως μικρότατο σωματίδιο το οποίο διαφέρει από όλα τα υπόλοιπα κατά το ότι η μάζα ηρεμίας του είναι μηδέν. Το μικρότατο αυτό σωματίδιο μπορεί να έχει ελάχιστη σχέση με τα σωματίδια φωτός που είχε φανταστεί ο Νεύτωνας, είναι όμως σωματίδιο.

**Το ξεπέραςμα ενός διλήμματος.** Το καινοφανές στοιχείο της νέας θεωρίας είναι ότι δεν αρνείται την κυματική φύση του φωτός, δεν αγνοεί μ' άλλα λόγια ότι το φως διαδίδεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ας μη ξεχνάμε ότι για τον υπολογισμό της ενέργειας ( $E=h\nu$ ) κάθε φωτονίου παίρνει υπόψη της τη συχνότητα του αντίστοιχου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Για πρώτη φορά το δίλημμα «σωματίδιο ή κύμα» φαίνεται να ξεπερνιέται. Η άποψη που επικρατεί μέχρι και σήμερα αποδίδει σε κάθε ακτινοβολία, μια διττή υπόσταση. Η ακτινοβολία αποτελεί μια υλική οντότη-



τα η οποία σε ορισμένα φαινόμενα εκδηλώνει κβαντικό χαρακτήρα ενώ σε άλλα εκδηλώνει κυματικότητα. Όταν η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με την ύλη όπως συμβαίνει στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο για να περιγράψουμε τη συμπεριφορά της επικαλούμαστε την κβαντική (φωτονιακή) της υπόσταση. Σε φαινόμενα πάλι όπως η συμβολή και η πόλωση ερμηνεύουμε τη συμπεριφορά της ακτινοβολίας επικαλούμενοι την κυματική της υπόσταση. Η φωτονιακή (ασυνεχής) μορφή όσο και η κυματοειδής (συνεχής) μορφή δεν αποτελούν παρά πλευρές της πραγματικότητας η οποία μέσα από το φίλτρο των ανθρώπινων αισθητηρίων και της γλώσσας μας γίνεται το αλλοιωμένο Γνωστό.

**Το φως και η δομή του ατόμου.** Κατά τα χρόνια που ακολούθησαν η έρευνα πάνω στο συσσωρευμένο πειραματικό υλικό ώθησε τη θεωρία για την εκπομπή του φωτός

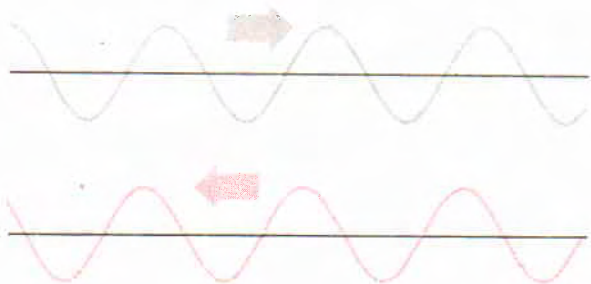


να «συναντηθεί» με τη θεωρία για τη δομή του ατόμου. Ένα από τα πρώτα αποτελέσματα της «συνάντησης» ήταν και η παρακάτω θεώρηση: Στη συνήθη κατάσταση κάθε ηλεκτρόνιο του ατόμου βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη τροχιά. Αν κάποια εξωτερική αιτία του μεταβιβάσει μια ποσότητα ενέργειας, το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει την τροχιά του και μεταφέρεται σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας. Το φαινόμενο λέγεται διέγερση. Η παρουσία όμως του ηλεκτρονίου στη νέα τροχιά διαρκεί ελάχιστο χρόνο. Στη συνέχεια επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση αποβάλλοντας την πρόσθετη ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου.

## Ταλάντωση στάσιμου κύματος

Θα ασχοληθούμε τώρα με μια ειδική περίπτωση συμβολής. Δύο αρμονικά κύματα του ίδιου πλάτους και της ίδιας συχνότητας διαδίδονται κατά μήκος του ίδιου άξονα  $x'x$ . Ζητούμε να προβλέψουμε θεωρητικά το αποτέλεσμα της συμβολής των δύο αυτών κυμάτων.

Ας θεωρήσουμε ότι τα δύο κύματα είναι εγκάρσια και ότι οι ταλαντώσεις γίνονται στο ίδιο επίπεδο. Θεωρούμε επίσης ως αρχή των αξόνων ένα σημείο  $O$  για το οποίο υποθέτουμε



ότι η ταλάντωση που εκτελεί λόγω του προς τα δεξιά (σχήμα) διαδιδόμενου κύματος περιγράφεται με την εξίσωση  $x = x_0 \eta \mu \omega t$  και λόγω του προς τα αριστερά διαδιδόμενου κύματος περιγράφεται με την εξίσωση  $x' = x_0 \eta \mu \omega t$ . Αυτό σημαίνει ότι το σημείο Ο εκτελεί την ταλάντωση  $\xi = 2x_0 \eta \mu \omega t$  με πλάτος δηλαδή διπλάσιο από το « $x_0$ ». Θεωρούμε τώρα ένα τυχαίο σημείο Μ που βρίσκεται πάνω στο θετικό ημιάξονα δεξιά δηλαδή από το Ο (σχήμα) σε απόσταση  $+x$  από αυτό. Λόγω του προς τα δεξιά διαδιδόμενου κύματος η κίνηση του Μ θα περιγράφεται από την εξίσωση  $x_M = x_0 \eta \mu \omega (t - x/c)$ . Η εξίσωση εκφράζει το γεγονός ότι σε κάθε χρονική στιγμή το σημείο Μ **έχει** την απομάκρυνση που **είχε** το σημείο Ο πριν από χρόνο  $x/c$ . Ας δούμε και πως επηρεάζεται η κίνηση του Μ λόγω του προς τα αριστερά διαδιδόμενου κύματος. Το κύμα αυτό δημιουργεί στο Ο την κίνηση  $x' = x_0 \eta \mu \omega t$ . Λόγω αυτού του κύματος το σημείο Ο θα πρέπει σε κάθε στιγμή να έχει την απομάκρυνση την οποία είχε το Μ πριν από χρόνο  $x/c$ . Αυτό σημαίνει ότι αν η εξίσωση κίνησης του Ο είναι η  $x' = x_0 \eta \mu \omega t$ , η εξίσωση κίνησης του Μ θα πρέπει να είναι η  $x'_M = x_0 \eta \mu \omega (t + x/c)$ . Το σημείο Μ συμμετέχει όμως και στις δύο κινήσεις με συνέπεια η εξίσωση της κίνησης του να είναι

$$\xi = x_M + x'_M \quad \text{ή} \quad \xi = x_0 \eta \mu \omega (t - \frac{x}{c}) + x_0 \eta \mu \omega (t + \frac{x}{c})$$

Αν κάνουμε τις πράξεις θα προκύψει

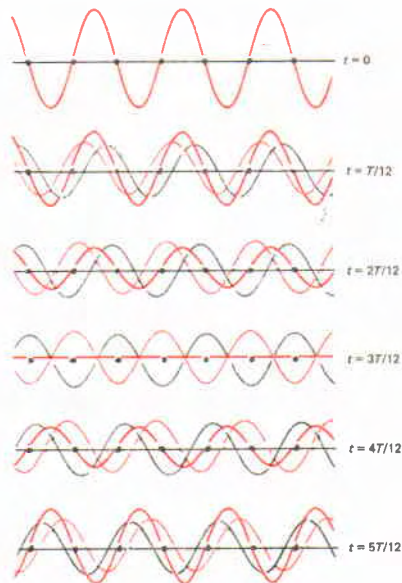
$$\xi = 2a \sin(\frac{\omega x}{c}) \eta \mu \omega t \quad \text{ή}$$

$$\xi = A \eta \mu \omega t \quad \text{με} \quad A = 2a \sin(\frac{\omega x}{c})$$

Η εξίσωση αυτή μας αποκαλύπτει ότι όλα τα σημεία του μέσου εκτελούν αρμονικές ταλαντώσεις με πλάτη τα οποία εξαρτώνται από τη θέση τους.

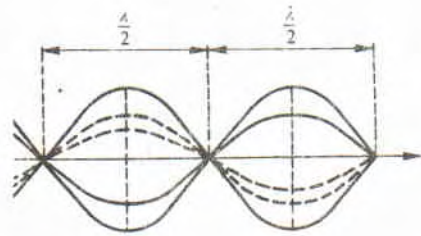
Πρόκειται για μια ιδιαίτερη κατάσταση ταλαντώσεων των υλικών σημείων του μέσου κατά την οποία **δεν μεταβιβάζεται ενέργεια** δεν υπάρχει δηλαδή το βασικό γνώρισμα ενός κύματος. Η κατάσταση αυτή λέγεται «**ταλάντωση στάσιμου κύματος**» ή απλά «**στάσιμο κύμα**».

Ανάμεσα στα σημεία του ελαστικού μέσου διακρίνουμε σημεία τα οποία διατηρούνται συνεχώς ακίνητα και λέγονται **δεσμοί**. Διακρίνουμε επίσης τις λεγόμενες **κοιλίες**, χαρακτηριστικά δηλαδή σημεία τα οποία ταλαντεύονται με το μεγαλύτερο πλάτος (2α) από όλα τα υπόλοιπα.



Η εξίσωση  $A=2\alpha\sin(\omega x/c)$  επιβεβαιώνει την ύπαρξη δεσμών και κοιλιών και μας επιτρέπει να αποδείξουμε ότι

α) η απόσταση δύο διαδοχικών δεσμών —όπως και η απόσταση δύο διαδοχικών κοιλιών— είναι σταθερή και ίση με το μισό ( $\lambda/2$ ) του μήκους καθενός από τα δύο συμβάλλοντα κύματα.

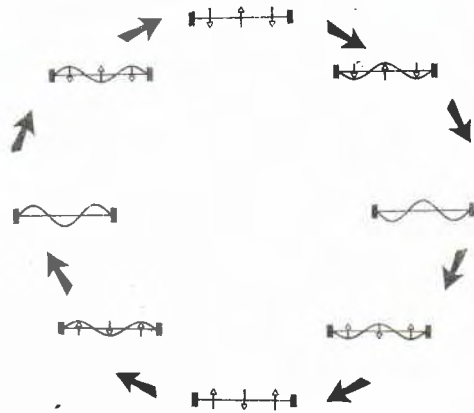


β) η απόσταση κάθε δεσμού από την επόμενη κοιλία είναι σταθερή και ίση με  $\lambda/4$ .

Η εξίσωση  $\xi=2\alpha\sin(\omega x/c)\eta\mu\omega t$  μας επιτρέπει να αποδείξουμε ότι (i) τα μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών σημεία βρίσκονται διαρκώς σε συμφωνία φάσης, ενώ (ii) τα συμμετρικά ως προς ένα δεσμό σημεία βρίσκονται διαρκώς σε αντίθεση φάσης.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν για κύματα εγκάρσια. Μια ανάλογη κατάσταση ισχύει και για διαμήκη κύματα.

Στην πράξη μια τέτοιου είδους συμβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την κάθετη πρόσπτωση ενός κύματος σε «εμπόδιο» και τη συνακόλουθη ανάκλασή του. Καθώς το προς το εμπόδιο διαδιδόμενο κύμα συμβάλλει με το ανακλώμενο, δημιουργείται ταλάντωση στάσιμου κύματος.



Όλα τα παραπάνω ισχύουν για κύματα εγκάρσια. Ένα ανάλογο φαινόμενο συμβαίνει και με διαμήκη κύματα.

Σε πάρα πολλές περιπτώσεις η παραγωγή μουσικών ήχων οφείλεται σε ταλαντώσεις στάσιμου κύματος. Τόσο στην περίπτωση ενός βιολιστή σολίστα σε μουσικό κοντσέρτο όσο και στην περίπτωση ενός βιολιτζή που παίζει σε πανηγύρι ναξιώτικο, η ταλάντωση στάσιμου κύματος είναι η μοναδική πηγή του παραγόμενου ηχητικού κύματος.



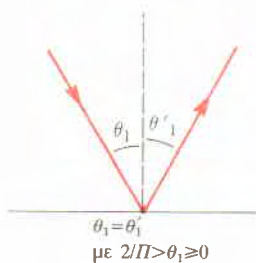
# Ανάκλαση

Εκτός από ορισμένες αυτοδύναμες πηγές —ανάμεσα στις οποίες ο ήλιος, η φλόγα, η πυγολαμπίδα και το πυρακτωμένο νήμα του ηλεκτρικού λαμπτήρα αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα —**τα περισσότερα αντικείμενα τα βλέπουμε επειδή αντανακλούν το φως που πέφτει πάνω τους**. Κάθε φορά που το φως πέφτει πάνω σε μια επιφάνεια κατά ένα ποσοστό αντανακλάται οπωσδήποτε.

Η ανάκλαση του φωτός πάνω σε ειδικές «κατοπτρικές» επιφάνειες έχει σα συνέπεια να δημιουργούνται είδωλα σαν αυτά που βλέπουμε μέσα από τους καθρέφτες. Ο Νάρκισσος της ελληνικής μυθολογίας ερωτεύτηκε με πάθος το ίδιο του το είδωλο που έβλεπε να καθρεφτίζεται στο ακίνητο νερό.

## Οι νόμοι της ανάκλασης

Τρεις περίπου αιώνες πριν από το Χριστό ο Ευκλείδης παρουσίασε μια περιγραφή της ανάκλασης σε «γλώσσα γεωμετρική». Σε δύο από τα έργα του —στα *Οπτικά* και στα *Κατοπτρικά*— παρουσιάζεται το μοντέλο της φωτεινής ακτίνας το οποίο ακόμα και σήμερα αποτελεί βασικό εργαλείο της Γεωμετρικής Οπτικής της επιστήμης δηλαδή που χρησιμοποιεί τη Γεωμετρία για να περιγράψει τη συμπεριφορά του φωτός. Στα *Κατοπτρικά* εμφανίζεται και ένας «νόμος» για την ανάκλαση του φωτός. Για να επαληθεύσουμε το νόμο αυτό πειραματικά, χρειαζόμαστε μια λεπτή φωτεινή δέσμη η οποία θα αποτελέσει την επιδιωκόμενη προσέγγιση στο μοντέλο της «ακτίνας φωτός». Χρησιμοποιούμε επίσης την επιφάνεια ενός καθρέφτη και τις έννοιες **γωνία πρόσπτωσης** και **γωνία ανάκλασης**. Η πρώτη από αυτές είναι η γωνία που σχηματίζει η προσπίπτουσα λεπτή δέσμη (ακτίνα) με την



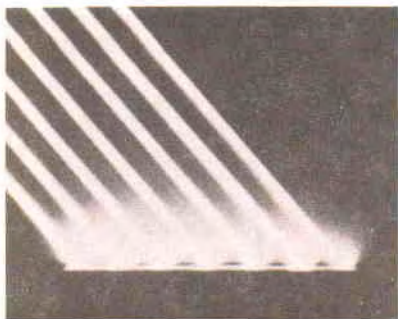
Αν  $\theta_i = 0$  αν δηλαδή το φως προσπίπτει κάθετα στην ανακλαστική επιφάνεια, θα είναι και  $\theta_r = 0$ . Το φως θα ανακλαστεί υφιστάμενο αντιστροφή της φοράς του.

κάθετο στην ανακλώσα κατοπτρική επιφάνεια. Η γωνία που θα δημιουργείται από την ανακλώμενη ακτίνα και την ίδια κάθετο είναι η γωνία ανάκλασης. Το πείραμα επιβεβαιώνει αυτό που ισχυρίζεται και ο Ευκλείδης στα *Κατοπτρικά*. **Η γωνία πρόσπτωσης είναι πάντοτε ίση με τη γωνία ανάκλασης.**

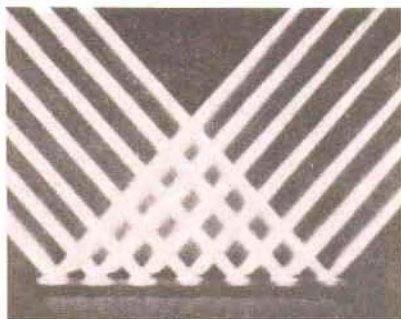
Από το ίδιο όμως πείραμα απορρέει και ένα συμπέρασμα το οποίο πολλούς αιώνες αργότερα επισημαίνει στη *Διοπτρική* του (*Dioptrique*, 1637) και ο Καρτέσιος. **Η ανακλώμενη ακτίνα βρίσκεται πάντοτε στο επίπεδο πρόσπτωσης** στο επίπεδο δηλαδή που ορίζεται από την προσπίπτουσα ακτίνα και την κάθετο στην κατοπτρική επιφάνεια.

## Κατοπτρική ανάκλαση και διάχυση

Η ανάκλαση όμως στους καθρέφτες είναι μια ειδική περίπτωση ανάκλασης την οποία μπορούμε να χαρακτηρίσουμε **κατοπτρική**. Μια αποκλειστικά τέτοιου είδους ανάκλαση συμβαίνει εφ' όσον η ανακλαστική επιφάνεια



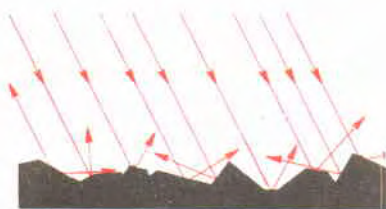
Διάχυση



Κατοπτρική ανάκλαση

Η συμπεριφορά μιας παράλληλης φωτεινής δέσμης μας βοηθάει να κατανοήσουμε τη διαφορά ανάμεσα σε διάχυση και κατοπτρική ανάκλαση.

είναι απολύτως λεία και στιλπνή. Όλες όμως οι επιφάνειες έχουν κάποιες ανωμαλίες και οι προσπίπτουσες ακτίνες ανακλώνται πάνω στις ανωμαλίες αυτές. Κάθε φωτεινή ακτίνα υπακούει στους νόμους της ανάκλασης, αλλά η ανακλώμενη φωτεινή δέσμη εμφανίζεται να **διαχέεται** προς όλες τις κατευθύνσεις με συνέπεια να φθάνουν φωτεινές ακτίνες στα μάτια μας ανεξάρτητα από το με ποια γωνία κοιτάζουμε την επιφάνεια. Η γενική αυτή περίπτωση ανάκλασης του φωτός αποτελεί **το φαινόμενο της διάχυσης** χάρη στο οποίο μπορούμε και **βλέπουμε τα ετερόφωτα σώματα**. Ακόμα και στην πιο λεία επιφάνεια ένα ποσοστό φωτός θα ανακλαστεί διάχυτα. Μπορούμε όμως να έχουμε μία ικανοποιητικά κατοπτρική ανάκλαση εφ' όσον οι ανωμαλίες της επιφάνειας έχουν μέγεθος της τάξης του μήκους κύματος του χρησιμοποιούμενου φωτός.



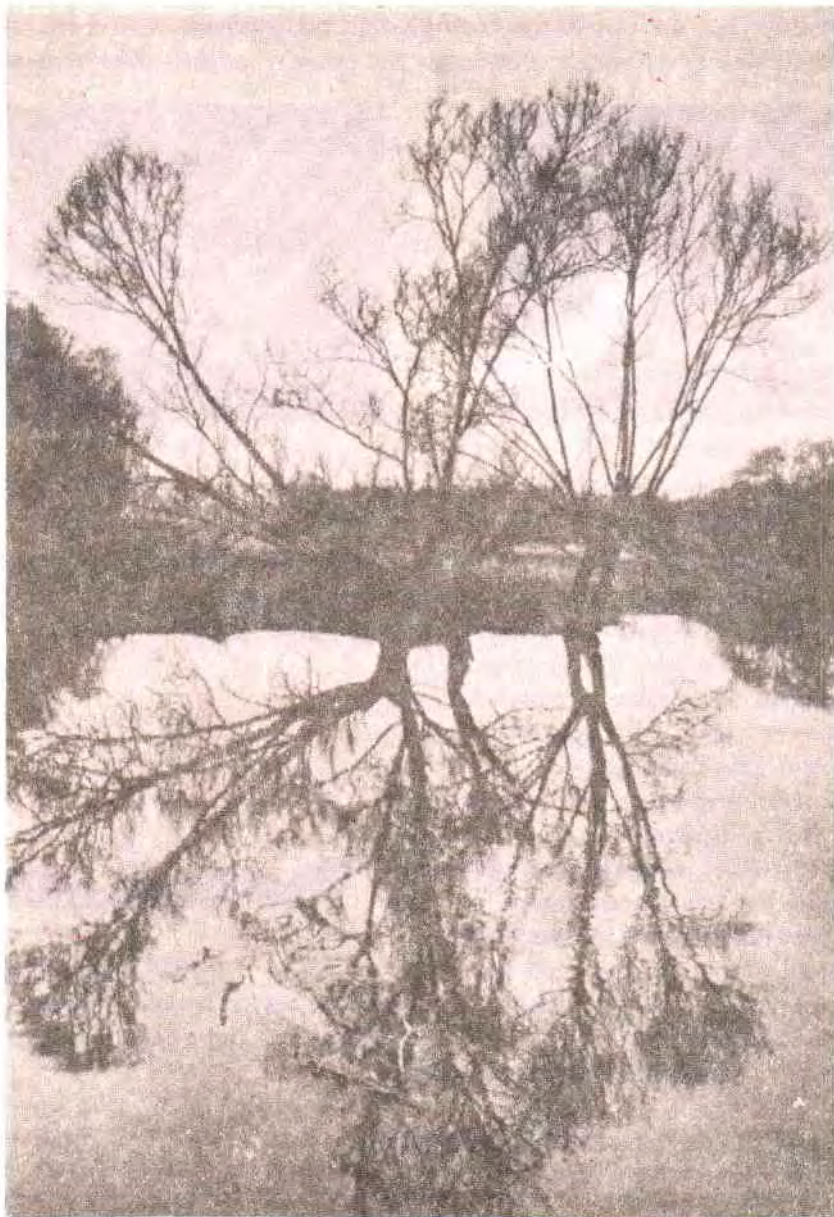
## Είδωλα από ανάκλαση

Κατά τις κατοπτρικές ανακλάσεις σχηματίζονται, όπως είπαμε, και τα λεγόμενα είδωλα από ανάκλαση. Στα πλαίσια της παράδοσης που δημιουργήθηκε από το έργο του Ευκλείδη, μπορούμε να περιγράψουμε το φαινόμενο σε γλώσσα γεωμετρική.

Για να κατανοήσουμε όμως καλύτερα το όλο ζήτημα χρειάζεται εκτός από

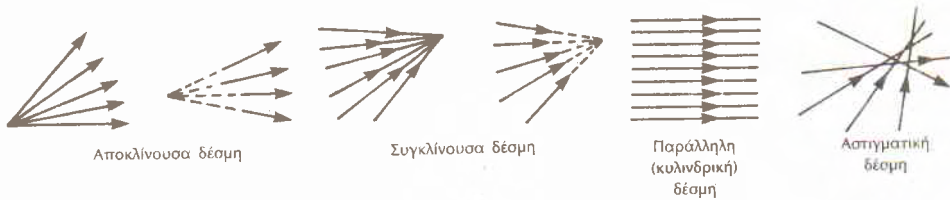
## 418 Τα κόμματα

την έννοια της φωτεινής ακτίνας να αποσαφηνίσουμε και την έννοια της φωτεινής δέσμης.



**Φωτεινές δέσμες.** Μια φωτεινή δέσμη είναι ένα σύνολο φωτεινών ακτίνων. Εφ' όσον οι ακτίνες ή οι γεωμετρικές προεκτάσεις τους τέμνονται **όλες** σε ένα σημείο, η δέσμη χαρακτηρίζεται στιγματική και το σημείο στίγμα (εστία) της

δέσμης. Μια στιγματική δέσμη θα είναι **αποκλίνουσα** εφ' όσον οι ακτίνες προέρχονται από το στίγμα (εστία) της δέσμης ή **συγκλίνουσα** εφ' όσον οι



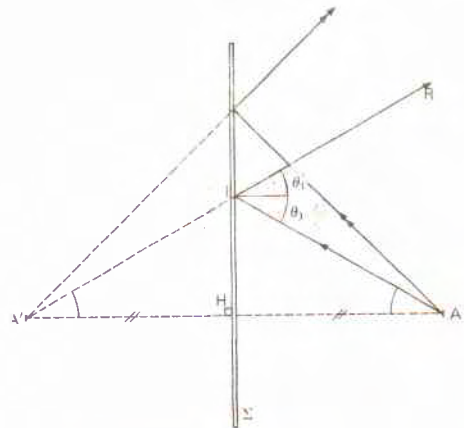
ακτίνες κατεθύνονται προς την εστία της. Όταν στο ανθρώπινο μάτι προσπέσει δέσμη αποκλίνουσα, ο παρατηρητής εκλαμβάνει ως φωτεινό σημείο την εστία της. Η συγκλίνουσα δέσμη γίνεται αντιληπτή από τον άνθρωπο με τη βοήθεια ενός πέτασματος (οθόνης) τοποθετημένου στην εστία της. Το φως «εστιάζει» πάνω στο πέτασμα και διαχέεται, οπότε στον παρατηρητή δημιουργείται η αντίληψη φωτεινού στίγματος πάνω στο πέτασμα.

Μια ειδική περίπτωση στιγματικής δέσμης η οποία δεν καταχωρείται ούτε στις συγκλίνουσες ούτε στις αποκλίνουσες είναι η κυλινδρική (παράλληλη) δέσμη φωτός της οποίας η εστία θεωρείται στο άπειρο.

Οι φωτεινές τέλος δέσμες που δεν είναι στιγματικές χαρακτηρίζονται ως αστιγματικές.

**Επίπεδη κατοπτρική επιφάνεια.** Ας φανταστούμε ένα φωτεινό σημείο Α μπροστά σε καθρέφτη (κάτοπτρο) επίπεδο καθώς και έναν παρατηρητή. Το φωτεινό σημείο Α αποτελεί εστία αποκλίνουσας δέσμης. Κάθε ακτίνα της δέσμης που προσπίπτει στην επιφάνεια ανακλάται συμπεριφερόμενη με υπακοή προς τους νόμους της ανάκλασης. Θεωρούμε (σχήμα) μια από τις ανακλώμενες αυτές ακτίνες. Φέρομε και την κάθετο Αx προς το επίπεδο της ανακλαστικής επιφάνειας. Αν συνδυάσουμε τους γνωστούς νόμους της ανάκλασης με σχετικά θεωρήματα της Ευκλείδειας Γεωμετρίας μπορούμε να αποδείξουμε ότι η γεωμετρική προέκταση της ανακλώμενης ακτίνας (R) τέμνει την κάθετο Αx στο σημείο Α' που είναι συμμετρικό του Α ως προς το επίπεδο της κατοπτρική επιφάνειας. Στο επίπεδο πρόσπτωσης (σχήμα) στο οποίο ανήκει και η ανακλώμενη ακτίνα R, ισχύει

α) Σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης  $\theta_1 = \theta_2$





β) Λόγω της παραλληλίας της  $AA'$  με την κάθετο στο σημείο (I) πρόσπτωσης  $\theta_1 = IAA$  και  $\theta'_1 = IA'A$ .

Από τα παραπάνω συνάγεται ότι  $IAA' = IA'A$ . Το τρίγωνο  $IAA'$  είναι λοιπόν ισοσκελές άρα το ύψος  $IH$  θα είναι και διάμεσος. Κατά συνέπεια τα  $A$  και  $A'$  είναι ως προς την επίπεδη επιφάνεια συμμετρικά.

Όλα αυτά αφορούν στην τυχαία ανακλώμενη ακτίνα άρα και σε κάθε ακτίνα ανακλώμενη. Το λογικό συμπέρασμα είναι ότι όλες οι ανακλώμενες ακτίνες θα συνιστούν δέσμη αποκλίνουσα με εστία ( $A'$ ) η οποία (i) δημιουργείται από τις προεκτάσεις τους και (ii) είναι συμμετρική ως προς το φωτεινό σημείο  $A$ . Η δέσμη αυτή θα δημιουργεί στον παρατηρητή την αντίληψη ενός ειδώλου που βρίσκεται «πίσω» από τον καθρέφτη και λέγεται **φανταστικό είδωλο** του φωτεινού σημείου  $A$  το οποίο στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί ένα **πραγματικό αντικείμενο**.



Εφ' όσον το αντικείμενο έχει διαστάσεις, δεν είναι δηλαδή σημειακό, το φανταστικό είδωλο κάθε σημείου θα βρίσκεται σε θέση συμμετρική ως προς το σημείο από το οποίο προέρχεται το φως.

Το μήνυμα που μεταφέρει το ανακλώμενο φως στο μάτι του παρατηρητή είναι ότι είδωλο είναι «κατοπτρικά συμμετρικό» ως προς το αντικείμενο. Όταν βρεθούμε μπροστά σε επίπεδο καθρέφτη το είδωλό μας μοιάζει βέβαια με αυτό που είμαστε. Αν όμως θελήσουμε να σηκώσουμε το αριστερό μας χέρι, το είδωλό μας «θα σηκώσει» το δεξί χέρι του.

**Σφαιρική κατοπτρική επιφάνεια.** Αν η κατοπτρική επιφάνεια είναι σφαιρική\* το φανταστικό είδωλο θα είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από το αντικείμενο, ανάλογα με το αν η ανάκλαση του φωτός γίνεται σε επιφάνεια κυρτή ή κοίλη.

Στα κυρτά σφαιρικά κάτοπτρα το είδωλο ενός φωτεινού αντικειμένου σχηματίζεται πάντα φανταστικό αλλά μικρότερο σε μέγεθος από το αντικείμενο.

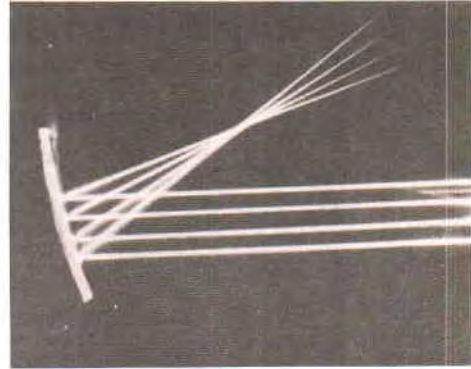
Στα κοίλα σφαιρικά κάτοπτρα το φανταστικό είδωλο, το οποίο θα μπορούσαμε να δούμε μέσα σ' αυτά, σχηματίζεται μόνο εφ' όσον το αντικείμενο είναι κοντά στην κατοπτρική επιφάνεια, σε απόσταση δηλαδή μικρότερη από το μισό της ακτίνας καμπυλότητας της σφαιρικής επιφάνειας. Το είδωλο που θα σχηματίζεται σ' αυτή την περίπτωση είναι

\* Ισχύουν για σφαιρικά κάτοπτρα μικρού ανοίγματος, μεγάλης δηλαδή ακτίνας καμπυλότητας σε σχέση με το μέγεθός τους.



μεγαλύτερο από το αντικείμενο. Στην αντίθετη περίπτωση δεν σχηματίζεται είδωλο πίσω από τον καθρέφτη, δεν δημιουργούνται δηλαδή ανακλώμενες ακτίνες αποκλίνουσας δέσμης οι προεκτάσεις των οποίων να αντιστοιχούν σε είδωλο φανταστικό. Το είδωλο σχηματίζεται μπροστά από τον καθρέφτη στην περιοχή δηλαδή όπου υπάρχει φως. Σχηματίζεται από συγκλίνουσες δέσμες και μπορούμε να το «ανιχνεύσουμε» αν στη θέση ακριβώς που σχηματίζεται φροντίσουμε ναβάλουμε ένα κατάλληλο πέτασμα. Αυτό το είδος ειδώλου λέγεται **πραγματικό**.

**Αντικείμενο στο άπειρο.** Με την πειραματική έρευνα διαπιστώνεται και με τη βοήθεια της Ευκλείδειας Γεωμετρίας αποδεικνύεται ότι αν σε καθένα από τα τρία είδη κατόπτρων που αναφέραμε προσπέσει παράλληλη (κυλινδρική) δέσμη φωτός θα συμβούν τα εξής.



Ανάκλαση σε κοίλο κάτοπτρο μικρού ανοίγματος.

α) Σε επίπεδο κάτοπτρο.  
Η ανακλώμενη δέσμη θα παραμείνει παράλληλη.

β) Σε κυρτό κάτοπτρο.  
Η ανακλώμενη δέσμη θα είναι αποκλίνουσα. Το φως θα φαίνεται ότι προέρχεται από ένα σημείο πίσω από τον καθρέφτη.

γ) Σε κοίλο κάτοπτρο.  
Θα προκύψει δέσμη συγκλίνουσα. Μπορούμε κατ' αυτό τον τρόπο να εστιάσουμε και το ηλιακό φως. Η εστίαση επιτυγχάνεται και με κοίλα παραβολικά κάτοπτρα.

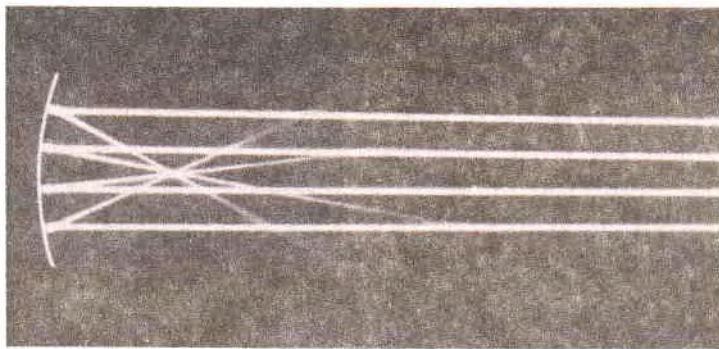
Η ιδιότητα των κοίλων κατόπτρων να εστιάζουν το ηλιακό φως ήταν γνωστή από την αρχαιότητα. Η παράδοση αναφέρει ότι κατά τη διάρκεια μιας πολιορκίας των Συρακουσών ο Αρχιμήδης χρησιμοποιώντας κοίλους καθρέφτες προκάλεσε στα εχθρικά ρωμαϊκά σκάφη πυρκαγιές.

Γκραβούρα του 1572.

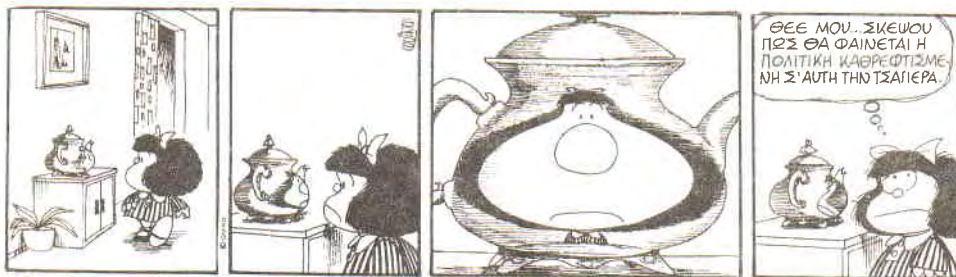


## Η αρχή της αντιστρεπτής πορείας του φωτός

Το σημείο στο οποίο εστιάζει η προσπίπτουσα σε κοίλο κάτοπτρο κυλινδρική δέσμη αποτελεί μία εστία του κατόπτρου. Αν στο σημείο αυτό τοποθετήσουμε μια σημειακή φωτεινή πηγή η αποκλίνουσα δέσμη που θα εκπορεύεται από αυτήν θα μετατραπεί (μετά την ανάκλασή της) σε δέσμη κυλινδρική. Με παραβολικά κάτοπτρα και με εντελώς ανάλογο τρόπο



δημιουργούνται οι κυλινδρικές φωτεινές δέσμες στους προβολείς (μακρινά φώτα) των αυτοκινήτων και των μοτοσικλετών. Κατά τη διάδοση του φωτός δεχόμαστε —γενικώτερα— ότι ισχύει η λεγόμενη αρχή της αντιστρεπτής πορείας, σύμφωνα με την οποία *το γεωμετρικό σχήμα της πορείας μιας φωτεινής ακτίνας δε μεταβάλλεται αν αντιστραφεί η φορά της διάδοσης*.

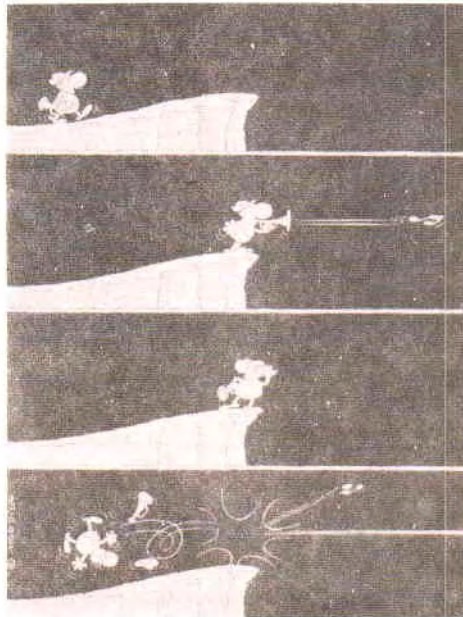


## Ανάκλαση των κυμάτων

Η ανάκλαση είναι ένα γενικό φαινόμενο που εμφανίζεται σε κάθε είδος κύματος. Τόσο τα κύματα ελαστικότητας όσο και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όταν βρεθούν μπροστά σε κάποιο εμπόδιο αναλώνται. Η έννοια της

κυματικής ακτίνας μας εξυπηρετεί στο να διατυπώσουμε «νόμους ανάκλασης» αντιστοιχούς με τους νόμους της ανάκλασης του φωτός οι οποίοι ερμηνεύονται με βάση την αρχή του Huygens.

Η **ηχώ** είναι φαινόμενο που συμβαίνει σε ειδικές περιπτώσεις ανάκλασης ηχητικών κυμάτων και σχετίζεται με τη φυσιολογία της ανθρώπινης ακοής. Αν ένας άνθρωπος βρεθεί σε ανοιχτή περιοχή —όπως είναι για παράδειγμα μια λαγκαδιά— και φωνάξει δυνατά, είναι δυνατόν να αντιληφθεί την επανάληψη της φωνής του με την προϋπόθεση ότι υπάρχει εμπόδιο σε απόσταση τουλάχιστον 17 μέτρων από αυτόν. Το γεγονός οφείλεται σε ανάκλαση των ηχητικών κυμάτων πάνω στο εμπόδιο και ερμηνεύεται αν πάρουμε υπ' όψη μας (i) ότι ο άνθρωπος διατηρεί την εντύπωση ενός μονοσύλλαβου ήχου (ηχητικό μεταίσθημα) επί χρόνο  $t_{\mu}=1/10$  του δευτερολέπτου, (ii) ότι η ταχύτητα του ήχου στον αέρα ( $c_{\text{nx}}$ ) είναι περίπου 340 m/s και (iii) ότι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να φθάσει ο ήχος στο εμπόδιο να προσπέσει κάθετα σ' αυτό να ανακλαστεί και να επιστρέψει είναι ίσο με  $2x/c_{\text{nx}}$  όπου  $x$  η απόσταση του εμπόδιου από τον ακροατή. Αν λοιπόν  $2x/c_{\text{nx}} > t_{\mu}$  ή  $x > c_{\text{nx}} t_{\mu}/2$ , αν δηλαδή  $x > 17\text{m}$ , ο άνθρωπος θα αντιληφθεί τον από ανάκλαση ήχο αφού θα έχει ήδη παύσει να υφίσταται η ακουστική εντύπωση της αρχικής εκφώνησης.



Ραδιοφωνικά κύματα με μήκος κύματος μεγαλύτερο από ένα όριο ανακλώνται στην ιονόσφαιρα και επιστρέφουν στην επιφάνεια της Γης. Επιτυγχάνεται κατ' αυτό τον τρόπο να φθάνουν σε μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική εξασθένηση.

Τα ραδιοτηλεσκόπια είναι τεράστιοι παραβολικοί «καθρέφτες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων» οι οποίοι έχουν μια κεραία-δέκτη στην εστία τους. Αξίζει εδώ να τονίσουμε ότι οι ορατές ακτινοβολίες στις οποίες βασίζεται η οπτική έρευνα του ουρανού συνιστούν ένα πολύ μικρό φάσμα ακτινοβολιών. Αντίθετα τα κοσμικά ραδιοκύματα που ανιχνεύονται από τα ραδιοτηλεσκόπια, προέρχονται από άορατους ραδιοαστέρες διαφόρων σημείων του Γαλαξία και μας μεταφέρουν μια μεγάλη ποικιλία μηνυμάτων γι' αυτούς.





Κοίλοι ηχητικοί ανακλαστήρες, δημιουργήματα της φύσης.

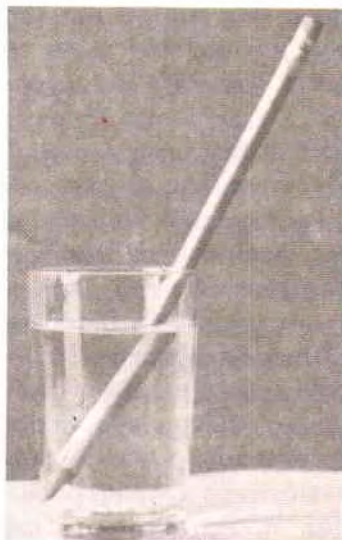


Κοίλοι ηχητικοί ανακλαστήρες δημιουργημένοι από τον άνθρωπο.

## Διάθλαση

Διάθλαση υφίστανται όλων των μορφών τα κύματα. Το φαινόμενο θα πρέπει όμως να παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στο φως. Είναι πολύ πιθανό ο μακρινός μας πρόγονος να παρατήρησε κάποτε ότι ένα κατακόρυφο ραβδί που βρίσκεται κατά ένα μέρος στο νερό και κατά το υπόλοιπο έξω από αυτό φαίνεται σα να έχει σπάσει. Σήμερα ισχυριζόμαστε ότι το φαινομενικό αυτό σπάσιμο οφείλεται στη διάθλαση του φωτός.

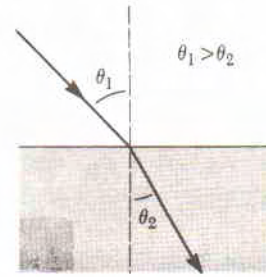
Το μοντέλο της φωτεινής ακτίνας αποδείχτηκε ιδιαίτερα αποτελεσματικό στο να περιγράψει αυτό το φαινόμενο. Στην πράξη το μοντέλο προσεγγίζεται από μια λεπτή φωτεινή δέσμη. Υποθέτουμε ότι μια ακτίνα μονοχρωματικού\* φωτός προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφανών μέσων (στην επιφάνεια ενός **διόπτρου**, όπως συνηθίζεται να λέγεται). Κατά το πέρασμά της από το πρώτο στο δεύτερο μέσο η διεύθυνση της ακτίνας μεταβάλλεται\*\*.



\* Παρακάτω θα κατανοήσουμε για ποιο λόγο η ακτίνα πρέπει να είναι μονοχρωματική.

\*\* Αυτό δεν συμβαίνει αν η πρόσπτωση γίνει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια.

Το φαινόμενο περιγράφεται ποσοτικά με τη βοήθεια των δύο γωνιών που σχηματίζει η φωτεινή ακτίνα με την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης, της γωνίας πρόσπτωσης ( $\theta_1$ ) και της γωνίας διάθλασης ( $\theta_2$ ).



## Οι νόμοι της διάθλασης

Το δεύτερο αιώνα μετά Χριστόν ο Αλεξανδρινός Πτολεμαίος δημοσίευσε πίνακες γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης του φωτός στο αέρα, το νερό και το γυαλί. Μελετώντας σήμερα τα δεδομένα του Πτολεμαίου βγάζουμε το συμπέρασμα, ότι τουλάχιστον για μικρές γωνίες ο λόγος της γωνίας πρόσπτωσης προς τη γωνία διάθλασης φαίνεται να είναι σταθερός. Όμως για γωνίες μεγαλύτερες των 20 μοιρών ο κανόνας δεν ισχύει. Ο Πτολεμαίος έβγαλε λανθασμένα το συμπέρασμα ότι ο κανόνας ισχύει για όλες τις γωνίες και αποτελεί ένα νόμο της διάθλασης. Το έτος 1000 περίπου μετά Χριστόν ο Άραβας ερευνητής Alhazen (Αλχάζεν) ερευνώντας το φαινόμενο της διάθλασης υποστήριξε ότι η προσπίπτουσα ακτίνα η κάθετος και η διαθλώμενη ακτίνα βρίσκονται πάντοτε στο ίδιο επίπεδο. Η πρόταση αυτή αποτελεί τον πρώτο νόμο της διάθλασης. Ο νόμος όμως που θα συσχετίζε τις γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης είχε ξεφύγει και από αυτόν. Πολλούς αιώνες αργότερα μια εργασία του Kepler πάνω στο ίδιο ζήτημα υπήρξε ανεπιτυχής.

Ο νόμος ανακαλύφθηκε τελικά από τον Ολλανδό Snell (Σνελ 1591-1626). Στα 1621 ισχυρίστηκε ότι σε κάθε διάθλαση αυτό που διατηρείται σταθερό δεν είναι —όπως είχε υποστηρίξει ο Πτολεμαίος— ο λόγος των γωνιών, αλλά **ο λόγος των ημιτόνων των δύο γωνιών**. Ο νόμος Snell\* αποτέλεσε ένα από τα πιο σημαντικά ερευνητικά συμπεράσματα της εποχής εκείνης κατά την οποία η επιστήμη έχει αρχίσει να συνειδητοποιεί τις δυνατότητες που της παρέχει η μαθηματική γλώσσα στη διατύπωση των συμπερασμάτων της. Μετρήσεις που γίνονται με σύγχρονα όργανα επιβεβαιώνουν ότι ο λόγος των ημιτόνων είναι πράγματι σταθερός, ανεξάρτητος δηλαδή από την τιμή της γωνίας πρόσπτωσης. Κατά την εποχή βέβαια του Snell καμία εξήγηση δεν μπορεί να δοθεί σ' αυτό το γεγονός. Πέρασαν αρκετές δεκαετίες μέχρι να εμφανιστεί μια ικανοποιητική θεωρία που να προσφέρεται για την ερμηνεία του.

Αυτό έγινε στα 1690. Στο βιβλίο του «Πραγματεία για το φως» που κυκλοφόρησε εκείνη τη χρονιά ο επίσης Ολλανδός Huygens (Χόιχενς) διατύπωσε όπως είπαμε μια κυματική θεωρία για το φως και πρότεινε τη γνωστή «αρχή» για τη διάδοση όλων των κυμάτων. Με βάση την αρχή Huygens και μέσα από γεωμετρικούς συλλογισμούς φθάνουμε στο συμπέρασμα ότι ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών είναι ίσος με το λόγο των ταχυτήτων διάδοσης του φωτός στα δύο διαφανή μέσα, ανεξάρτητος συνεπώς από τη γωνία πρόσπτωσης.

\* Ο Snell δεν δημοσίευσε ποτέ τα συμπεράσματά του. Ο νόμος δημοσιεύτηκε μερικά χρόνια αργότερα από τον Καρτέσιο.



Η διατύπωση του νόμου της διάθλασης έδωσε την πρώτη θεωρητική κάλυψη στους κατασκευαστές οπτικών οργάνων οι οποίοι μέχρι τότε εργάζονταν μόνο εμπειρικά. Ο αντίκτυπος στις προσπάθειες για την κατανόηση των φακών και στις έρευνες για την τελειοποίησή τους υπήρξε σημαντικός.

Τόσο ο Huygens όσο και ο Snell ήταν Ολλανδοί. Και δεν είναι συμπτωματικό ότι ο επίσης Ολλανδός Leeuwenhoek (Λέβενχουκ), βασιζόμενος στο μεγεθυντικό φακό που χρησιμοποιούσαν οι υφαντουργοί για να εξετάζουν την ποιότητα των υφασμάτων,

κατασκεύασε το πρώτο επιστημονικό μικροσκόπιο με το οποίο ανακάλυψε έναν καινούριο κόσμο, τον κόσμο των μικροβίων μέσα σε μία σταγόνα νερό.

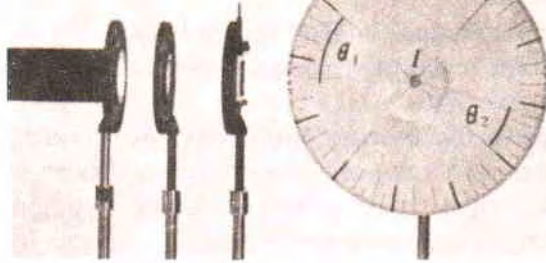
Ένας ακόμα Ολλανδός ο Lippershey (Λίππερσι) έφτιαξε το 1608 το πρώτο τηλεσκόπιο. Ένα παρόμοιο τηλεσκόπιο χρησιμοποίησε το 1609 ο Γαλιλαίος για να ερευνήσει το ουράνιο στερέωμα και να διακρίνει για πρώτη φορά τις ηλιακές κηλίδες τις φάσεις της Αφροδίτης και τους τέσσερις δορυφόρους του Δία. Η επιστήμη είχε πια δρομολογηθεί σε δρόμους καινοφανείς. Από δω και πέρα ήταν σε θέση να προεκτείνει την ανθρώπινη όραση στα βασίλεια του απείρως μεγάλου και του απείρως μικρού, εξερευνώντας τόσο τον αόρατο, με γυμνό μάτι, κόσμο των ζωντανών οργανισμών όσο και τον επίσης αόρατο κόσμο των ουρανών.



Η Ολλανδική Δημοκρατία του 17ου αιώνα ήταν μια από τις βασικές «πρωταγωνίστριες» της εποχής των θαλάσσιων εξερευνήσεων. Εκτός όμως από μεγάλη ναυτική δύναμη τα πλοία της οποίας ταξίδευαν στα πέρατα του κόσμου, η Ολλανδία εκείνης της εποχής ήταν και η χώρα που ασπιάστηκε περισσότερο ίσως από κάθε άλλη τον Ευρωπαϊκό διαφωτισμό. Η Ολλανδία —θαλάσσια δύναμη και η «άλλη» Ολλανδία το καλλιτεχνικό και πνευματικό κέντρο της εποχής αποτελούσαν έννοιες αλληλένδετες. Η βελτίωση των πλοίων απαιτούσε τεχνολογικές προόδους και η βελτίωση της τεχνολογίας είχε ανάγκη από ελεύθερη διακίνηση ιδεών. Έτσι η επαναστατική Ολλανδική δημοκρατία του 17ου αιώνα έγινε η πρώτη χώρα σε εκδόσεις και πωλήσεις βιβλίων επιτρέποντας και τις μεταφράσεις και εκδόσεις βιβλίων απαγορευμένων σε άλλες χώρες. Η διεύρυνση του γεωγραφικού ορίζοντα σημαίνει και διεύρυνση του πνευματικού. Σ' έναν αιώνα που όλος ο κόσμος είχε για κυβερνήτες αυτοκράτορες και βασιλείς η Ολλανδία κυβερνιόταν από το λαό της. Η διάχυτη ελευθερία της σκέψης και η ενθάρρυνση της πνευματικής προσπάθειας καλλιέργησαν μια νοοτροπία εμπιστοσύνης στον άνθρωπο και στο έργο του. Στην Ιταλία ο Γαλιλαίος και ο Bruno (Μπρούνο) τιμωρήθηκαν σκληρά γιατί τόλμησαν να σκεφθούν. Στην Ολλανδία ο Huygens τιμήθηκε και δοξάστηκε.

Δίκαια θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι το φως συμβολίζει αυτή την εποχή. Στην ίδια τη λέξη «διαφωτισμός» το φως εκφράζει την ελευθερία της σκέψης. Το φως είναι παρόν στη ζωγραφική ιδιαίτερα στους εξασίσιους πίνακες του Rembrandt (Ρέμπραντ) και του Vermeer (Βερμέρ), στο έργο του Snell για τη διάθλαση, στην ανακάλυψη του μικροσκόπιου και του τηλεσκοπίου και στο έργο του Huygens του θεμελιωτή της κυματικής θεωρίας.

Με μετρήσεις που πάρθηκαν σε εργαστήριο διαπιστώθηκε ότι προκειμένου για μικρές γωνίες —ο Πτολεμαίος δεν είχε άδικο. Είχε όμως άδικο για γωνίες πρόσπτωσης μεγαλύτερες των  $20^\circ$ , ενώ και σε αυτές τις περιπτώσεις η συμπεριφορά του διαθλώμενου φωτός υπακούει στο νόμο του Snell. Οι μετρήσεις αναφέρονται σε μονοχρωματικό φως που περνάει από τον αέρα σε πλεξιγκλάς.



|                                   |       |      |       |      |       |       |      |      |       |      |      |
|-----------------------------------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|
| $\theta_1$ (σε μοίρες)            | 3     | 6    | 9     | 15   | 20    | 30    | 40   | 50   | 60    | 70   | 80   |
| $\theta_2$ (σε μοίρες)            | 2     | 4    | 6     | 10   | 13,25 | 19,75 | 25,5 | 31   | 32,25 | 39   | 41,5 |
| $\theta_1/\theta_2$               | 1,50  | 1,50 | 1,50  | 1,50 | 1,51  | 1,52  | 1,57 | 1,61 | 1,70  | 1,79 | 1,93 |
| $\eta\mu\theta_1/\eta\mu\theta_2$ | 1,485 | 1,50 | 1,485 | 1,49 | 1,49  | 1,48  | 1,49 | 1,49 | 1,50  | 1,49 | 1,49 |

## Δείκτης διάθλασης

Συνοψίζουμε. Ας υποθέσουμε ότι μονοχρωματικό φως διαδίδεται από ένα διαφανές μέσο  $M_1$  προς ένα άλλο διαφανές μέσο  $M_2$ . Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο της διάθλασης:

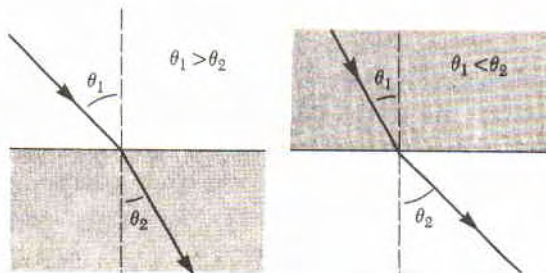
**Ο λόγος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης και διάθλασης είναι σταθερός, ανεξάρτητος δηλαδή από τη γωνία πρόσπτωσης.**

Ο σταθερός αυτός λόγος ονομάζεται σχετικός δείκτης διάθλασης του μέσου  $M_2$  ως προς το μέσο  $M_1$  και είναι ίσος με το λόγο  $c_1/c_2$  των ταχυτήτων του φωτός στα δύο διαφανή μέσα. Ισχύει δηλαδή

$$\frac{\eta\mu\theta_1}{\eta\mu\theta_2} = n_{2,1} = \frac{c_1}{c_2}$$

Είναι φανερό ότι ο καθαρός αυτός αριθμός ο οποίος μας «δείχνει» τι θα συμβεί κατά τη συγκεκριμένη διάθλαση αναφέρεται σε δύο διαφανή μέσα θεωρούμενα κατά ορισμένη διάταξη.

Είναι επίσης εύκολο να συμπεράνουμε ότι αν  $c_1 > c_2 \Rightarrow \theta_1 > \theta_2$ , αν δηλαδή το φως διαδίδεται από μέσο μεγαλύτερης ταχύτητας (οπτικά αραιότερο) σε μέσο μικρότερης ταχύτητας, η γωνία διάθλασης θα είναι μικρότερη από τη γωνία



πρόσπτωσης. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι η διαθλώμενη ακτίνα πλησιάζει την κάθετο. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή  $c_2 > c_1$  οπότε θα είναι και  $\theta_2 > \theta_1$ , λέμε ότι η διαθλώμενη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετο.

Οι ίδιοι νόμοι, οι ίδιοι ορισμοί και τα ίδια λογικά συμπεράσματα ισχύουν για όλα τα κύματα τόσο δηλαδή τα ηλεκτρομαγνητικά όσο και τα κύματα ελαστικότητας.

**Απόλυτος δείκτης διάθλασης.** Ας προσέξουμε όμως και κάτι που δεν ισχύει για τα κύματα ελαστικότητας. Αν το μέσον από το οποίο «προέρχεται» το φως είναι το κενό, ο λόγος των ημιτόνων ονομάζεται (απόλυτος) δείκτης διάθλασης του διαφανούς μέσου (υλικού). Θα είναι

$$\frac{\eta\mu\theta_1}{\eta\mu\theta_2} = n = \frac{c_0}{c}$$

όπου  $c_0$  και  $c$  οι ταχύτητα του φωτός στο κενό και στο συγκεκριμένο διαφανές υλικό αντίστοιχα. Η τιμή του απόλυτου δείκτη διάθλασης είναι πάντοτε μεγαλύτερη από τη μονάδα.

Αν είναι τώρα  $n_1, n_2$  οι απόλυτοι δείκτες διάθλασης δύο διαφανών μέσων και  $n_{2,1}$  ο σχετικός δείκτης διάθλασης τού μέσου «2» ως προς το μέσο «1» εύκολα αποδεικνύεται ότι  $n_{2,1} = n_2/n_1$  οπότε και ο νόμος Snell διατυπώνεται με την εξίσωση.

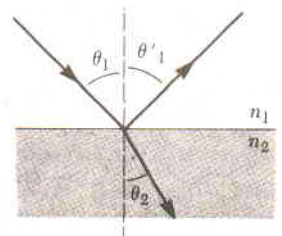
$$\frac{\eta\mu\theta_1}{\eta\mu\theta_2} = n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ή} \quad n_1\eta\mu\theta_1 = n_2\eta\mu\theta_2.$$

**Η μεταβολή στο μήκος κύματος.** Αξίζει τέλος να παρατηρήσουμε ότι κατά τη διάθλαση ενός κύματος η συχνότητά του διατηρείται σταθερή ενώ το μήκος κύματος μεταβάλλεται.

Αν πάρουμε υπ' όψη και τη θεμελιώδη εξίσωση των κυμάτων, βγάζουμε το συμπέρασμα ότι ο λόγος των ταχυτήτων ( $c_1, c_2$ ) που παρουσιάζει ένα κύμα πριν και μετά τη διάθλαση είναι ίσος με το λόγο των αντιστοίχων μηκών κύματος. Είναι  $c_2/c_1 = \lambda_2/\lambda_1$ .

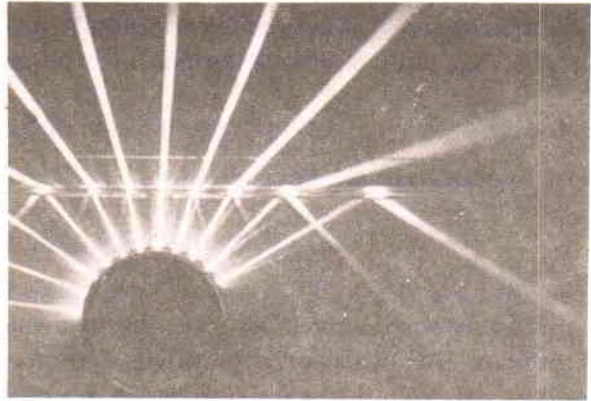
## Ολική ανάκλαση

**α. Διάδοση από το αραιότερο στο πυκνότερο.** Δε θα πρέπει να μας διαφεύγει ότι κατά την πρόσπτωση μιας φωτεινής δέσμης σε επιφάνεια που διαχωρίζει το αρχικό διαφανές μέσον από ένα άλλο οπτικά πυκνότερο, εκτός από διάθλαση συμβαίνει και ανάκλαση. Στη γενική περίπτωση μπορούμε να πούμε ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία ενέργεια κατανέμεται ανάμεσα στις δύο προκύπτουσες δέσμες, την ανακλώμενη και τη διαθλώμενη.

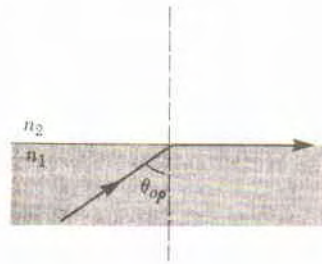
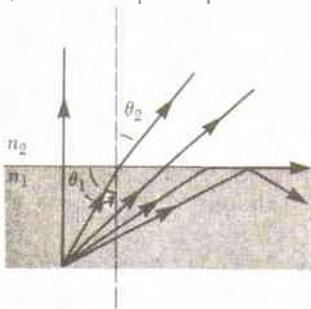


Η κατανομή εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης. Όταν, για παράδειγμα, το φως διαδίδεται από τον αέρα σε γυαλί, για γωνίες πρόσπτωσης μέχρι 50 μοιρών ανακλάται λιγότερο από 10% της φωτεινής ενέργειας. Για γωνίες όμως πρόσπτωσης γύρω στις 80 μοίρες το ποσοστό της ανακλώμενης ενέργειας είναι ίσο με το ποσοστό της διαθλώμενης. Για γωνίες ακόμα μεγαλύτερες το ποσοστό της ανακλώμενης ενέργειας υπερέχει σημαντικά. Είναι όμως γεγονός ότι ένα ορισμένο κλάσμα από τη φωτεινή ενέργεια της προσπίπτουσας δέσμης θα διαθλαστεί οπωσδήποτε.

**Διάθλαση από πυκνότερο σε αραιότερο.** Όταν όμως η διάθλαση γίνεται από πυκνότερο προς αραιότερο τα πράγματα είναι διαφορετικά. Το πείραμα δείχνει ότι αν η πρόσπτωση του φωτός γίνεται με γωνία μεγαλύτερη από μια ορισμένη «**ορική γωνία**» δεν συντελείται διάθλαση και παρατηρείται ένα φαινόμενο που λέγεται **ολική ανάκλαση**.



Υποθέτουμε ότι μια φωτεινή πηγή βρίσκεται μέσα στο νερό και παρατηρούμε ορισμένες φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στην επιφάνεια του διόπτρου «νερό-αέρας». Είναι γεγονός ότι σε κάθε περίπτωση που συμβαίνει διάθλαση η γωνία διάθλασης ( $\theta_2$ ) είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης ( $\theta_1$ ). Η διαθλώμενη ακτίνα «απομακρύνεται» από την κάθετο, ενώ το φαινόμενο πειθαρχεί υποχρεωτικά στο νόμο Snell. Ισχύει



$n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2$ . Αν λοιπόν αυξάνουμε προοδευτικά τη γωνία πρόσπτωσης, θα φθάσει κάποια στιγμή κατά την οποία η γωνία διάθλασης θα γίνει ίση με μία ορθή. Στην περίπτωση αυτή η γωνία πρόσπτωσης θα έχει μια τιμή  $\theta_{op}$  για την οποία θα ισχύει.

$$n_1 \eta \mu \theta_{op} = n_2 \eta \mu \frac{\pi}{2} \Rightarrow \eta \mu \theta_{op} = \frac{n_2}{n_1}$$



Η γωνία αυτή ( $\theta_{op}$ ) εφ' όσον αντιστοιχεί στη μέγιστη γωνία διάθλασης ( $\theta_2 = \pi/2$ ) θα αποτελεί και τη μέγιστη γωνία πρόσπτωσης για την οποία συμβαίνει διάθλαση του φωτός. Λέγεται ορική γωνία του διόπτρου. Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι (i) για γωνία πρόσπτωσης μικρότερη από την ορική, η φωτεινή ενέργεια κατανέμεται ανάμεσα στην ανακλώμενη και τη διαθλώμενη δέσμη, ενώ αν (ii) η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την ορική δεν είναι δυνατόν να συμβεί διάθλαση. Γιατί η διάθλαση δεν είναι απλά ένα φαινόμενο κατά το οποίο αλλάζει η διεύθυνση διάδοσης ενός κύματος, είναι ένα φαινόμενο το οποίο πειθαρχεί οπωσδήποτε και σε συγκεκριμένους νόμους. Αν λοιπόν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την ορική δεν είναι δυνατόν να συντελεστεί διάθλαση γιατί σε αντίθετη περίπτωση το φαινόμενο θα παραβίαζε το νόμο Snell. Και ο νόμος είναι σαφής. Σε κάθε διάθλαση επιβάλλεται να ισχύει

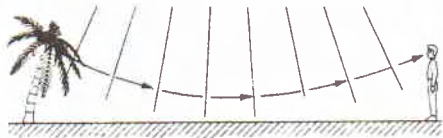
$$n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2 \Rightarrow \eta \mu \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \eta \mu \theta_1$$

και εφόσον  $\eta \mu \theta_2 \leq 1$  θα είναι και

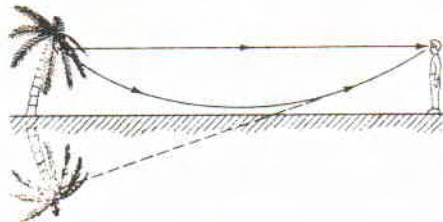
$$\frac{n_1}{n_2} \eta \mu \theta_1 \leq 1 \quad \text{ή} \quad \eta \mu \theta_1 \leq \frac{n_2}{n_1}$$

που σημαίνει ότι  $(\eta \mu \theta_1)_{\max} = n_2/n_1$ . Υπάρχει λοιπόν ένα μέγιστο στις τιμές των γωνιών πρόσπτωσης (ορική γωνία) το οποίο αν ξεπεραστεί δεν θα γίνει διάθλαση. Αν μια φωτεινή ακτίνα προσπέσει με γωνία μεγαλύτερη της ορικής δεν θα υπάρχουν «μονοπάτια» για να περάσει το φως στο άλλο μέσον το οπτικά αραιότερο. Θα έχουμε φαινόμενο ολικής ανάκλασης. Όπως φαίνεται και από την εξίσωση  $\eta \mu \theta_{op} = n_2/n_1$  η τιμή της ορικής γωνίας εξαρτάται από το ζευγάρι των δύο διαφανών μέσων.

Όλα τα παραπάνω ισχύουν τόσο για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα όσο και για τα κύματα ελαστικότητας.



Στα θερμότερα αέρια στρώματα το φως έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε σύγκριση με τα ψυχρότερα. Κατά τις ζεστές μέρες συμβαίνει συχνά τα αέρια στρώματα που βρίσκονται στο έδαφος να έχουν θερμοκρασία μεγαλύτερη από τα υπερκείμενα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις το φως που εκπέμπεται από μια πηγή και φθάνει στον παρατηρητή του δημιουργεί την εντύπωση ειδώλου από ανάκλαση (Αντικατοπτρισμός).



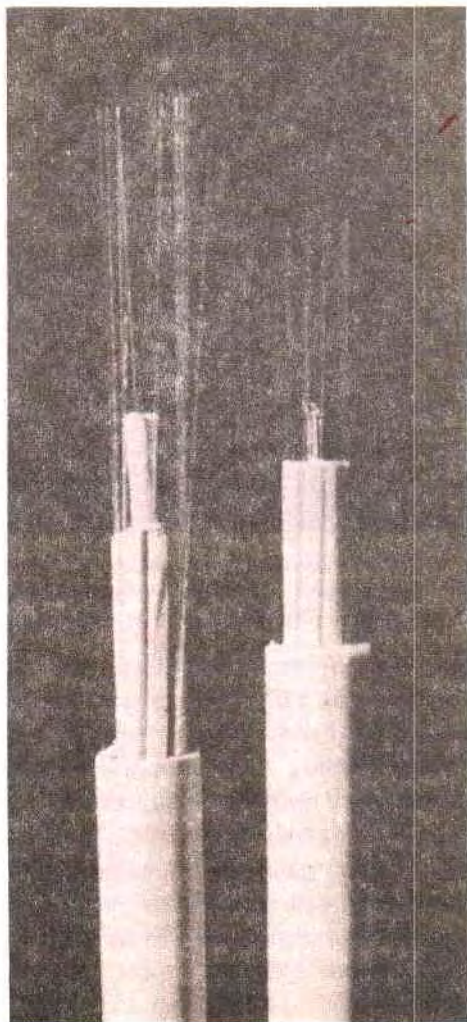


## Ολική ανάκλαση του φωτός και τηλεπικοινωνίες

Στην εποχή μας το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης του φωτός αξιοποιείται σε εφαρμογές υψηλής οπτικής τεχνολογίας μέσα από τις οποίες φαίνονται να διανοίγονται εντελώς καινούριες προοπτικές στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Το όλο ζήτημα σχετίζεται με τη δυνατότητα που έχουμε σήμερα να κατασκευάζουμε **οπτικές ίνες** γυάλινους δηλαδή κυλίνδρους τόσο λεπτούς που να είναι όσο ένα σύρμα εύκαμπτοι. Το φως διοχετεύεται στο ένα άκρο τους και υφιστάμενο πολλαπλές ολικές ανακλάσεις εξέρχεται από το άλλο άκρο. Οι ίνες λειτουργούν σα σωλήνες που μπορούν να κατευθύνουν το νερό και να το διοχετεύουν εκεί που θέλουμε. Οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται σε μια σύγχρονη τεχνική τρισδιάστατης φωτογραφίας η οποία λέγεται **ολογραφία**. Χρησιμοποιούνται επίσης στην Ιατρική. Περνώντας για παράδειγμα έναν τέτοιο διαφανή κύλινδρο μέσα από τον οισοφάγο ενός ασθενή μπορούμε να εξετάσουμε το στομάχι του για έλκος ή και για κάποια άλλη πάθηση.

Εκεί όμως που το μέλλον για τις οπτικές ίνες προμηνύεται εξαιρετικά ελπιδοφόρο είναι —όπως είπαμε— ο τομέας των τηλεπικοινωνιών και η τηλεφωνία ιδιαίτερα. Τα πράγματα εκεί δείχνουν ότι το φως θα μπορέσει να αντικαταστήσει το ηλεκτρικό ρεύμα αποτελώντας τον μελλοντικό φορέα μεταβίβασης πληροφοριών με πολλά μάλιστα πλεονεκτήματα.

Όπως και στη ραδιοφωνία έτσι και στην τηλεφωνία είναι αναγκαία η δια-



μόρφωση του ηλεκτρικού φέροντος σήματος από το ηλεκτρικό ρεύμα που αντιστοιχεί στο κύμα της ανθρώπινης φωνής. Σε ένα συμβατικό τηλεφωνικό σύστημα το φέρον κύμα δεν είναι, όπως συμβαίνει στη ραδιοφωνία, ημιτονοειδές (αρμονικό). Αποτελείται από μια σειρά ρευματικών παλμών μεγάλης και εδώ συχνότητας, μικρής διάρκειας και σταθερού πλάτους. Οι παλμοί αυτοί αφού υποστούν διαμόρφωση, μεταφέρονται με το ηλεκτρικό κύκλωμα του καλωδίου και στη συνέχεια αποδιαμορφώνονται και μετατρέπονται πάλι σε ηχητικά κύματα στο ακουστικό.



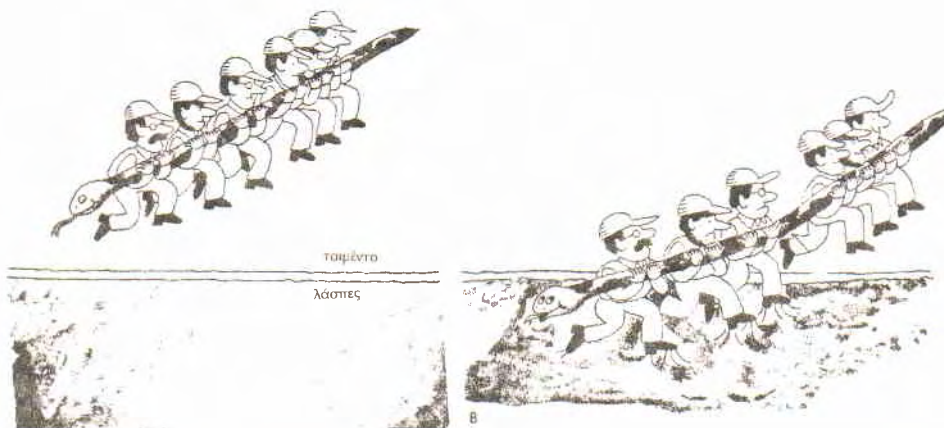
Το «οπτικό» (αριστερά) και το συμβατικό καλώδιο της φωτογραφίας μπορούν να μεταφέρουν τον ίδιο αριθμό (10.000) τηλεφωνικών συνδιαλέξεων.

Σε ένα τηλεφωνικό σύστημα οπτικών ινών τα ηχητικά κύματα «μετατρέπονται» κι εδώ σε αντίστοιχους ηλεκτρικούς παλμούς οι οποίοι όμως χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση ενός Laser (Λείζερ). Το παραγόμενο φως αποτελείται από αντίστοιχους παλμούς που μεταφέρονται από τις οπτικές ίνες για να μετατραπούν και πάλι με τη βοήθεια φωτοδιόδων σε ηλεκτρικούς παλμούς. Ένα από τα ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα που παρουσιάζονται είναι η διαφάνεια του μέσου. Όλοι ξέρουμε ότι ένα λεπτό τζάμι είναι πιο διαφανές από ένα παχύ. Η σύγχρονη όμως τεχνολογία είναι σε θέση να δημιουργεί διαφανή υλικά τέτοια που αν με αυτά κατασκευάζαμε τζάμι πάχους ενός χιλιομέτρου θα ήταν εξίσου διαφανές με ένα τζάμι σαν αυτά που έχουμε στα παράθυρα. Τα διαφανή αυτά υλικά χρησιμοποιούνται για την

κατασκευή των οπτικών ινών. Έτσι η πραγματοποίηση τηλεφωνικού δικτύου με καλώδια μήκους δεκάδων χιλιομέτρων είναι τώρα εφικτή.

Τα πλεονεκτήματα που θα προκύψουν είναι ποικίλα. Η ποσότητα πληροφορίας που μπορεί να μεταφέρει ένα κύκλωμα εξαρτάται από τις ηλεκτρικές ιδιότητές του, από τη «χωρητικότητα» του όπως έχει επικρατήσει να λέγεται. Οι οπτικές ίνες έχουν συγκριτικά μεγαλύτερη χωρητικότητα. Μια δέσμη χάλκινων καλωδίων διαμέτρου 7,5 cm μπορεί να αντικατασταθεί από ένα «φωτοσωλήνα» διαμέτρου 0,6 cm. Η οικονομία σε βάρος είναι ακόμα πιο σημαντική. Κι ακόμα ένα τηλεφωνικό δίκτυο βασισμένο στη νέα αυτή τεχνολογία θα συνέτεινε σημαντικά στην αποσυμφόρωση του υπεδάφους των πόλεων. Στο συμβατικό δίκτυο οι ενεργειακές απώλειες που





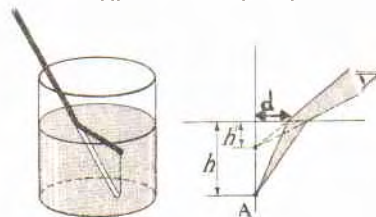
Ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας στο κενό. Στον πίνακα παρατίθενται οι τιμές του δείκτη διάθλασης ορισμένων υλικών για μήκη κύματος στο κενό  $\lambda_0 = 589 \cdot 10^{-9} \text{m}$

|                    |           |                  |          |
|--------------------|-----------|------------------|----------|
| Διαμάντι           | 2,419     | Νερό             | 1,333    |
| Φθοριούχο ασβέστιο | 1,434     | Βενζίνη          | 1,501    |
| Πάγος              | 1,309*    | Αιθυλική αλκοόλη | 1,361    |
| Γυαλί              | 1,52-1,66 | Αέρας            | 1,000293 |
| Γλυκερίνη          | 1,473     | CO <sub>2</sub>  | 1,00045  |

## Διάθλαση σε επίπεδες επιφάνειες

**Διάθλαση σε επίπεδο δίοπτρο.** Παρατηρούμε ένα μολύβι βυθισμένο στο νερό. Μας φαίνεται σπασμένο κι αυτό οφείλεται στη διάθλαση του φωτός.

Είναι, φυσικά, μέρα και το διάχυτο φως κάνει όλα τα αντικείμενα να αποτελούν πηγές φωτός. Κάθε σημείο του μολυβιού αποτελεί μια σημειακή φωτεινή πηγή, από την οποία εκπέμπεται απολίνουσα δέσμη φωτός. Κάθε ακτίνα της δέσμης υπακούει στους δύο νόμους της διάθλασης. Διαθλάται διατηρούμενη στο επίπεδο προσπίτωσης ενώ ταυτόχρονα απομακρύνεται από την κάθετο. Έτσι η δέσμη που φθάνει στο μάτι μας φαίνεται να προέρχεται από ένα σημείο Α' που δεν είναι το σημείο Α αλλά βρίσκεται ψηλότερα από αυτό. Το Α' αποτελεί ένα φανταστικό είδωλο από διάθλαση. Αυτό ισχύει για όλα τα σημεία του

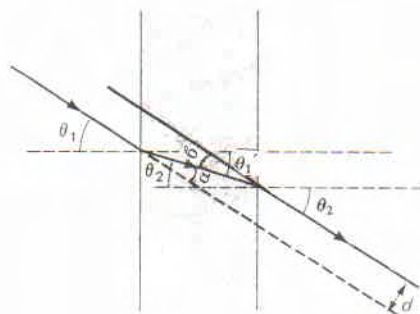




μολυβιού που βρίσκονται μέσα στο νερό. Καθένα από αυτά μας φαίνεται ότι βρίσκεται ψηλότερα από τη θέση στην οποία πράγματι βρίσκεται. Το μολύβι φαίνεται σπασμένο. Ισχύει  $n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2$ . Στα δύο ορθογώνια τρίγωνα που σχηματίζονται ισχύει  $d = h \epsilon \varphi \theta_1$  και  $d = h' \epsilon \varphi \theta_2$ . Αν αναφερόμαστε σε κατακόρυφη παρατήρηση οι γωνίες  $\theta_1$  και  $\theta_2$  θα είναι αρκετά μικρές ώστε να ισχύει  $\eta \mu \theta_1 = \epsilon \varphi \theta_1$  και  $\eta \mu \theta_2 = \epsilon \varphi \theta_2$ . Θα είναι λοιπόν  $h'/h = n_2/n_1$ , όπου  $n_1, n_2$  οι δείκτες διάθλασης του νερού και του αέρα, αντίστοιχα. Η εξίσωση ισχύει για κάθε δίοπτο αρκεί οι γωνίες πρόσπτωσης να είναι μικρές.

**Διάθλαση σε πλάκα με παράλληλες έδρες. (Σύστημα δύο παραλλήλων επιπέδων διόπτρων).** Αν μια φωτεινή μονοχρωματική ακτίνα προσπέσει πλάγια σε πλάκα με παράλληλες έδρες τόσο η θεωρία όσο και το πείραμα μας δείχνουν ότι μετά τις δύο διαθλάσεις παραμένει παράλληλη προς την αρχική της διεύθυνση, έχοντας βέβαια υποστεί μια παράλληλη μετατόπιση.

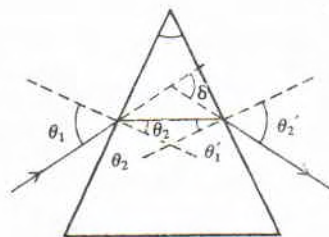
Για την πρώτη διάθλαση (σχήμα) ισχύει  $n_1 \eta \mu \theta_1 = n_2 \eta \mu \theta_2$  ενώ για τη δεύτερη διάθλαση  $n_2 \eta \mu \theta'_1 = n_1 \eta \mu \theta'_2$ . Η Γεωμετρία διδάσκει ότι  $\theta_2 = \theta'_1$ . Θα είναι συνεπώς και  $\theta_1 = \theta'_2$  οπότε και  $\theta_1 - \theta_2 = \theta'_2 - \theta'_1$  ή  $\alpha = \beta$ . Η τελευταία ισότητα αποδεικνύει την παραλληλία της αρχικά προσπίπτουσας δέσμης με την τελικά εξερχόμενη.



Στη φωτογραφία που παραθέτουμε εκτός από τις δύο διαθλάσεις παρατηρούμε και δύο ανακλάσεις του φωτός.

**Διάθλαση σε πρίσμα. (Σύστημα δύο τεμνομένων επιπέδων διόπτρων).** Σε αντίθεση με αυτό που συμβαίνει στην πλάκα με παράλληλες έδρες, κατά τη δίοδο μιας φωτεινής ακτίνας από πρίσμα λαμβάνει χώρα «εκτροπή». Στην οπτική με τον όρο «πρίσμα» εννοούμε ένα διαφανές σώμα που έχει σχήμα ορθού τριγωνικού πρίσματος. Αυτό που συνήθως σχεδιάζουμε παριστάνει μια εγκάρσια τομή του πρίσματος που έχει σχήμα ισοσκελούς τριγώνου.

Οι διαθλάσεις μιας λεπτής μονοχρωματικής δέσμης γίνονται σε δύο επίπεδα διόπτρα τα οποία τέμνονται κατά μια διέδρη γωνία τη λεγόμενη **διαθλαστική γωνία** του (οπτικού) πρίσματος. Η διαθλαστική γωνία και ο δείκτης διάθλασης του υλικού αποτελούν τα στοιχεία ταυτότητας ενός πρίσματος.



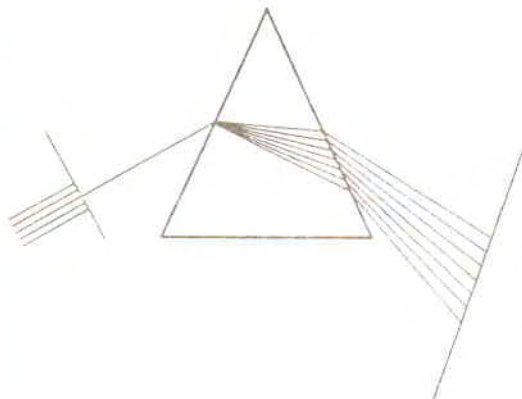
Ως **εκτροπή** μιας λεπτής μονοχρωματικής δέσμης θεωρούμε τη γωνία που σχηματίζεται από την αρχικά προσπίπτουσα δέσμη (ακτίνα) και την τελικά εξερχόμενη. Η τιμή της εξαρτάται α) από τη γωνία πρόσπτωσης και β) από το πρίσμα από



τη διαθλαστική δηλαδή γωνία του και το δείκτη διάθλασης. Αυτό δείχνουν τα σχετικά πειράματα. Στα ίδια όμως συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε συνδυάζοντας τους νόμους της διάθλασης με ορισμένα γεωμετρικά θεωρήματα. Οι εξισώσεις που προκύπτουν είναι:

$$\eta\mu\theta_1 = \eta\mu\theta_2 \quad \eta\mu\theta'_1 = \eta\mu\theta'_2 \quad A = \theta_2 + \theta'_1 \quad \varepsilon = \theta_1 + \theta'_2 - A$$

Όλα αυτά θα ισχύουν αν η δέσμη είναι μονοχρωματική. Αν όμως χρησιμοποιήσουμε δέσμη λευκού φωτός και έχουμε φροντίσει να τοποθετήσουμε μια οθόνη λευκού χρώματος από την άλλη πλευρά του πρίσματος, θα παρατηρήσουμε το φαινόμενο το οποίο έκανε μεγάλη εντύπωση στο Νεύτωνα και τον οδήγησε να διατυπώσει μια σημαντική **θεωρία για τα χρώματα**. Πάνω στην οθόνη θα παρατηρήσουμε το **φάσμα** του λευκού



φωτός μια έγχρωμη δηλαδή ταινία στην οποία θα εκτίθενται το ένα από το άλλο τα επτά χρώματα της ίριδος, το κόκκινο, το πορτοκαλί, το κίτρινο, το πράσινο, το γαλάζιο, το βαθύ γαλάζιο και το μενεξεδί το λεγόμενο και ιώδες.

Η θεωρία του Νεύτωνα την οποία δεχόμαστε και σήμερα υποστηρίζει ότι το λευκό φως αποτελείται από διάφορες ακτινοβολίες. Κάθε μια από αυτές χαρακτηρίζεται από ορισμένη συχνότητα ( $\nu$ ) και ορισμένο μήκος κύματος στο κενό. Το μήκος κύματος της ερυθράς (κόκκινης) ακτινοβολίας είναι το μεγαλύτερο. Είναι ίσο με  $76 \cdot 10^{-9} \text{ m}$  περίπου. Όλες οι άλλες ακτινοβολίες που «συμμετέχουν» το λευκό φως έχουν μήκη κύματος τα οποία ελαττώνονται σύμφωνα με τη σειρά που εμφανίζονται στο φάσμα του λευκού φωτός. Η ιώδης ακτινοβολία έχει το μικρότερο μήκος κύματος ( $36 \cdot 10^{-9} \text{ m}$ )· άρα και τη μεγαλύτερη συχνότητα.

## Το λευκό φως αναλύεται

Η δημιουργία του φάσματος οφείλεται στην **ανάλυση** που υφίσταται το λευκό φως. Κατά τη διάθλασή του στην πρώτη επιφάνεια του πρίσματος το λευκό φως αναλύεται σε μονοχρωματικές ακτινοβολίες. Το φαινόμενο ερμηνεύεται βάσει των παρακάτω προτάσεων.

1. Στο κενό —και κατά προσέγγιση και στον αέρα— όλες οι ακτινοβολίες έχουν την ίδια ταχύτητα διάδοσης  $c_0 = 300.0000 \text{ km/s}$ .

2. Σε ένα ορισμένο διαφανές μέσον —όχι στο κενό— οι ακτινοβολίες διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες.

3. Ο δείκτης διάθλασης ενός διαφανούς μέσου ορίζεται ως  $n = \eta_{\mu\theta_1} / \eta_{\mu\theta_2}$ .

4. Ο δείκτης διάθλασης ενός διαφανούς μέσου είναι ίσος με το λόγο της ταχύτητας διάδοσης της ακτινοβολίας στο κενό ( $c_0$ ) προς την ταχύτητα διάδοσης της ίδιας ακτινοβολίας στο διαφανές μέσο  $n = c_0 / c$ .

Αν συγκεράσουμε αυτές τις προτάσεις καταλήγουμε στα συμπεράσματα ότι: (α) ο δείκτης διάθλασης του συγκεκριμένου διαφανούς μέσου εξαρτάται και από το είδος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σ' αυτό και ότι (β) η τιμή της γωνίας διάθλασης ( $\theta_2$ ) για μια τυχαία ακτινοβολία θα δίνεται από την εξίσωση  $\eta_{\mu\theta_2} = c \eta_{\mu\theta_1} / c_0$ .

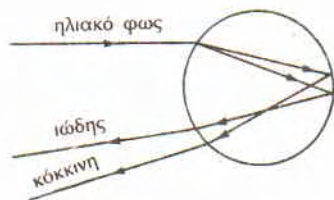
Καθεμιά, λοιπόν, ακτινοβολία θα παρουσιάσει την «προσωπική» της διάθλαση. Η ιώδης ακτινοβολία που χαρακτηρίζεται από τη μικρότερη συγκριτικά ταχύτητα στο συγκεκριμένο διάφανο μέσο θα παρουσιάσει και τη μικρότερη γωνία διάθλασης.



Η ανάλυση του φωτός συμβαίνει σε κάθε διάθλαση φωτεινής δέσμης που δεν είναι μονοχρωματική. Μπορούμε να την παρατηρήσουμε σε πλακίδια με παράλληλες έδρες, σε φακούς όπως και σε σταγονίδια βροχής. Με το πρίσμα, όμως, η μελέτη του φαινομένου γίνεται πιο αποτελεσματικά. Ακόμα καλύτερο είναι αντί να αφήσουμε το αναλυμένο φως να προσπέσει απ' ευθείας στο πέτασμα να παρεμβάλουμε ένα σύστημα συγκεντρωτικών (συγκλινόντων) φακών και να κάνουμε μέσα από αυτό την παρατήρηση.

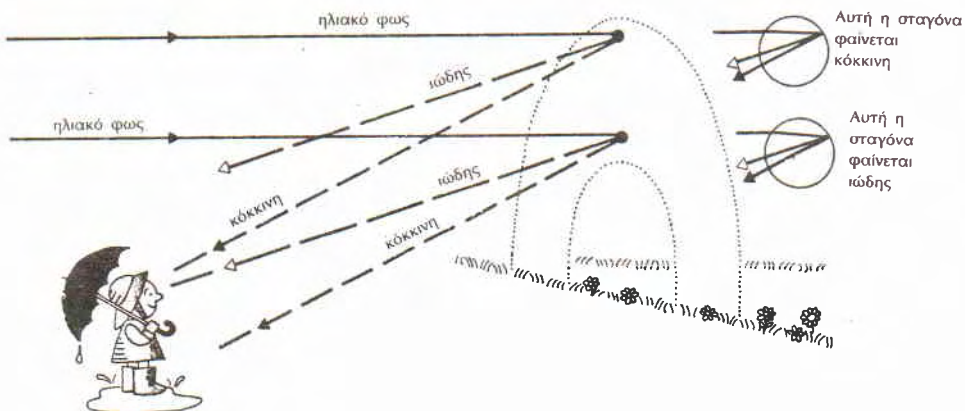
**Ουράνιο τόξο.** Το φαινόμενο «ουράνιο τόξο» οφείλεται στην ανάλυση που υφίσταται το ηλιακό φως όταν προσπίπτει σε σταγόνες της βροχής. Για να το δει κανείς χρειάζεται να βρίσκεται ανάμεσα στον ήλιο και στην περιοχή όπου πέφτει βροχή. Για να κατανοήσουμε τη δημιουργία του ας υποθέσουμε ότι μια ακτίνα ηλιακού

φωτός προσπίπτει στην εξωτερική επιφάνεια μιας σταγόνας νερού και διαθλώμενη αναλύεται. Στο σχήμα παριστάνεται η πορεία των δύο ακτίνων που αντιστοιχούν στα άκρα του φάσματος δηλαδή της κόκκινης και της ιώδους. Κατά την πρόσπτωση



του αναλυμένου φωτός στην εσωτερική επιφάνεια της σταγόνας ένα μεγάλο μέρος υφίσταται ανάκλαση και η έξοδος (δηλαδή η διάθλαση του αναλυμένου φωτός) συντελείται κατά την επόμενη πρόσπτωση στην εσωτερική επιφάνεια. Από κει και πέρα αν ο παρατηρητής βρίσκεται σε θέση τέτοια ώστε να φθάνει σ' αυτόν η «κόκκινη ακτίνα» θα αντιλαμβάνεται ότι η συγκεκριμένη σταγόνα έχει

χρώμα κόκκινο. Με ανάλογο τρόπο θα αντιλαμβάνεται ότι κάθε σταγόνα βροχής έχει ένα από τα χρώματα του ηλιακού φάσματος.



Στο εξωτερικό τμήμα του ουράνιου τόξου ο παρατηρητής με την ομπρέλλα βλέπει το κόκκινο φως να έρχεται από σημεία ψηλότερα από ότι τα άλλα χρώματα. Αντίθετα στο εσωτερικό τμήμα του ουράνιου τόξου φαίνεται να είναι ψηλότερα η περιοχή του μενεξεδένιου χρώματος.

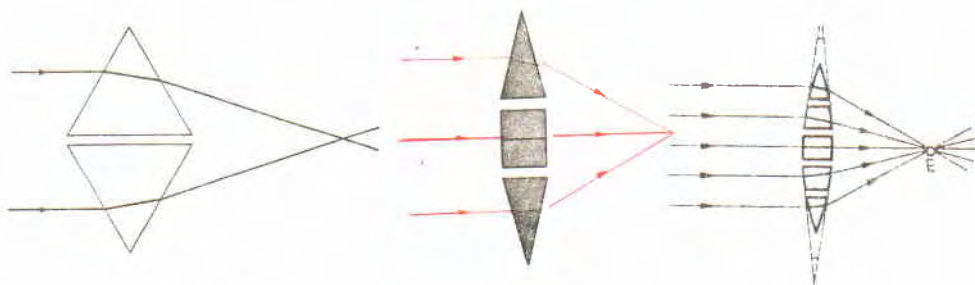
# Οι φακοί

Σήμερα θεωρείται βέβαιο ότι οι Κινέζοι είχαν ανακαλύψει τους φακούς δύο περίπου χιλιάδες χρόνια πριν από το Χριστό. Υπάρχουν επίσης αξιόλογες μαρτυρίες για το γεγονός ότι οι φακοί χρησιμοποιήθηκαν κατά το μεσαίωνα για τη διόρθωση της όρασης. Μόνο όμως η βελτίωσή τους, την οποία κατάφεραν οι Ολλανδοί κατασκευαστές του 17ου αιώνα, τους μετέτρεψε στο εκπληκτικό εκείνο εργαλείο με το οποίο ο άνθρωπος «είδε» πράγματα τα οποία δεν είχε μπορέσει ούτε να φανταστεί.

Να υποθέσουμε ότι παίρνουμε δυο όμοια διαφανή πρίσματα και τα ακουμπάμε κατά τις βάσεις τους σε τρόπο ώστε οι διαθλαστικές γωνίες τους να βρίσκονται απέναντι. Να φανταστούμε επίσης ότι δύο λεπτές φωτεινές δέσμες (ακτίνες) παράλληλες προς τις κοινές έδρες επαφής —όπως στο σχήμα— προσπίπτουν στο σύστημα που δημιουργήσαμε. Είναι γεγονός ότι οι δύο ακτίνες θα **συγκλίνουν** σε ένα σημείο. Αν προχωρήσουμε την ιδέα παραπέρα χρησιμοποιώντας περισσότερα πρίσματα τοποθετημένα κατάλληλα κι αν —ακόμα καλύτερα— λειάνουμε τις γωνίες που θα προκύ-



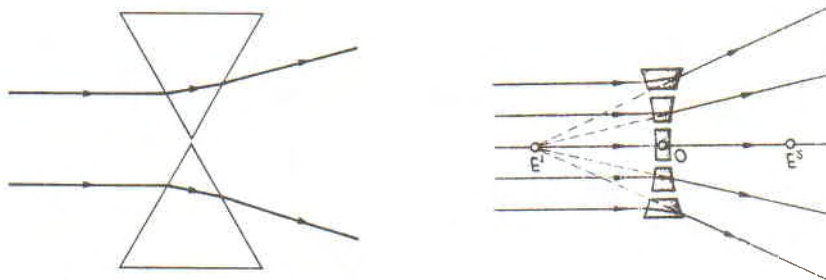
Καρδινάλιος Ugone. Πορτραίτο του 1352.



ψουν, θα φθάσουμε τελικά στην ιδέα του **συγκλίνοντος** ή **συγκεντρωτικού** φακού. Το όνομα του το οφείλει στο γεγονός ότι κάθε παράλληλη (κυλινδρική) δέσμη φωτός που προσπίπτει πάνω του συγκλίνει σε ένα σημείο της «άλλης» πλευράς. Θα έχουμε έτσι ένα φακό σαν αυτόν που αποτελεί τη βάση του ανθρώπινου οφθαλμού, ένα φακό σαν αυτούς που υπάρχουν στα μικροσκόπια, στα τηλεσκόπια και στις φωτογραφικές μηχανές, αλλά και σαν αυτούς με τους οποίους μπορούμε να ανάψουμε φωτιά σ' ένα χαρτί εστιάζοντας το ηλιακό φως πάνω του.



Αν πάλι αντιστρέψουμε την αρχική ιδέα και βάλουμε τα πρίσματα ανάποδα (όπως στο σχήμα) θα διαπιστώσουμε ότι οι δύο λεπτές δέσμες (ακτίνες) θα **αποκλίνουν**. Η επέκταση της ιδέας οδηγεί σε φακούς παρόμοι-



ους με αυτούς που βρίσκονται στα μυωπικά γυαλιά, που φοράει μόνιμα ένας από τους συγγραφείς αυτού του βιβλίου. Είναι οι **αποκλίνοντες** (ή **αποκεντρωτικοί**) **φακοί** που πρωτοεμφανίστηκαν στην Ευρώπη κατά το Μεσαίωνα αλλά η ευρεία χρησιμοποίησή τους για τη διόρθωση της μυωπίας έγινε μερικούς αιώνες αργότερα, αφού στο μεταξύ ο Snell και ο Καρτέσιος είχαν ήδη διατυπώσει τους νόμους της διάθλασης. Μια παράλληλη φωτεινή δέσμη που προσπίπτει σε ένα τέτοιου είδους φακό μετά από τις δύο διαθλάσεις μετατρέπεται σε αποκλίνουσα. Σ' αυτό ακριβώς το γεγονός οφείλεται και η ονομασία τους.

Σε γλώσσα μεγαλύτερης αυστηρότητας ο φακός είναι ένα σύστημα δύο διόπτρων από τα οποία το ένα είναι οπωσδήποτε σφαιρικό. Στα παρακάτω θα δεχθούμε ορισμένες συμβάσεις για λόγους απλούστευσης. Δεχόμαστε λοιπόν ότι.

1. Μέσα στο διαφανές υλικό του φακού το φως παρουσιάζει μικρότερη ταχύτητα σε σχέση με αυτή που παρουσιάζει στο περιβάλλον του. Στη γενική περίπτωση ο φακός μας θα είναι από γυαλί και θα βρίσκεται στον αέρα, γεγονός που εξασφαλίζει την παραδοχή που κάναμε.

2. Το φως που προσπίπτει είναι μονοχρωματικό.

3. Ο φακός είναι λεπτός, το πάχος του δηλαδή σε σχέση με το μέγεθος (μήκος) του είναι ασήμαντο.

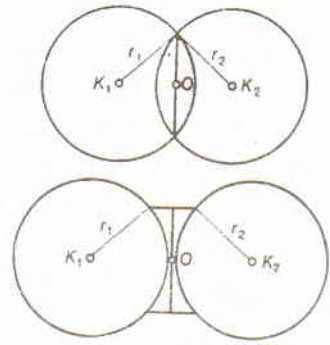
**Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των λεπτών φακών.** Στη γενική επίσης περίπτωση\* κάθε μια από τις διαθλαστικές επιφάνειες του φακού αποτελεί τμήμα της επιφάνειας μιας σφαίρας. Έχουμε λοιπόν δύο υποθετικές σφαίρες (σχήμα) η διάκεντρος\*\* των οποίων ( $K_1K_2$ ) αποτελεί τον λεγόμενο **κύριο άξονα** του φακού. Το «σημείο» στο οποίο ο κύριος άξονας τέμνει το φακό λέγεται οπτικό κέντρο του φακού.

\* «Ειδικές περιπτώσεις είναι εκείνες κατά τις οποίες η μία από τις διαθλαστικές επιφάνειες είναι επίπεδη. Αυτό συμβαίνει στους επιπεδοκυλινδρικούς και τους επιπεδοκυρτούς φακούς.

\*\* Στις παραπάνω «ειδικές» περιπτώσεις ο κύριος άξονας ορίζεται ως η κάθετος από το κέντρο της σφαίρας στο επίπεδο.

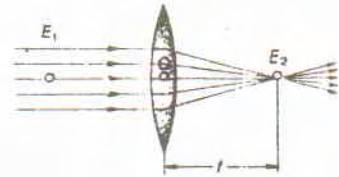


Αποδεικνύεται ότι οι φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στο φακό κατευθυνόμενες προς το οπτικό κέντρο του, υφίστανται μια παράλληλη μετατόπιση τόσο μικρή ώστε να μας επιτρέπεται να θεωρούμε ότι η εξερχόμενη ακτίνα αποτελεί προέκταση της προσπίπτουσας. Κάθε ευθεία γραμμή που περνάει από το οπτικό κέντρο λέγεται άξονας του φακού. Ένας φακός έχει συνεπώς άπειρους άξονες. Μια ιδιαίτερη θέση ανάμεσά τους κατέχει ο κύριος άξονας στον οποίο αναφερθήκαμε.



## Συγκλίνοντες φακοί

Οι συγκλίνοντες φακοί **αναγνωρίζονται** από το γεγονός ότι είναι παχύτεροι στο μέσον\* και λεπτότεροι στα άκρα. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί ο αμφίκυβλος φακός, ο οποίος εμφανίζεται και στο διπλανό σχήμα. Το **κριτήριο** όμως για να δεχθούμε ότι έχουμε συγκλίνοντα φακό είναι αυτό που ήδη αναφέραμε. Μετατρέπει κάθε κυλινδρική (παράλληλη) δέσμη που προσπίπτει πάνω του σε δέσμη συγκλίνουσα η οποία εστιάζει σε συγκεκριμένο σημείο (**εστία**) της άλλης πλευράς. Αν η δέσμη είναι και παράλληλη προς τον κύριο άξονα το σημείο στο οποίο εστιάζει αποτελεί τη μια από τις δύο κύριες εστίες του φακού. Κάθε (λεπτός) φακός διαθέτει δύο τέτοια σημεία που βρίσκονται πάνω στον κύριο άξονα και ισαπέχουν από το οπτικό κέντρο του.



Το γεγονός μπορούμε να το διαπιστώσουμε πειραματικά. Στο ίδιο βέβαια συμπέρασμα καταλήγει και η θεωρητική έρευνα που βασίζεται στη μελέτη των δύο διαδοχικών διαθλάσεων, παίρνοντας εννοείται υπ' όψη της ότι ο φακός είναι λεπτός.

Η απόσταση κάθε κύριας εστίας από το φακό αποτελεί το βασικό στοιχείο της ταυτότητάς του. Είναι η λεγόμενη **εστιακή απόσταση** που συμβολίζεται διεθνώς με το γράμμα  $f$ . Η τιμή της αποτελεί κριτήριο για το «πόσο ισχυρός» είναι ο φακός που διαθέτουμε. Όσο μικρότερη εστιακή απόσταση έχει ένας φακός τόσο ισχυρότερος μπορεί να θεωρηθεί. Συχνά, αντί για την εστιακή απόσταση χρησιμοποιείται το αντίστροφό της, το οποίο λέγεται **ισχύς** ( $P$ ). Η μονάδα μετρήσεως της ισχύος είναι το  $\text{m}^{-1}$  ή λεγόμενη διοπτρία (1 dpt). Η τιμή της εστιακής απόστασης —όπως φυσικά και της ισχύος— εξαρτάται α)

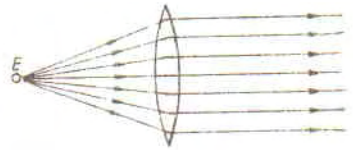
\* Με την προϋπόθεση όμως ότι βρίσκονται σε διαφανές περιβάλλον με μικρότερο δείκτη διάθλασης. Σε αντίθετη περίπτωση οι παχύτεροι στο μέσον φακοί είναι αποκλίνοντες.

από το σχετικό δείκτη διάθλασης ( $n$ ) που παρουσιάζει το υλικό σε μια ορισμένη ακτινοβολία και  $\theta$ ) από τις τιμές των δύο ακτίνων καμπυλότητας  $R_1$  και  $R_2$ . Η εξίσωση

$$P = \frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{τύπος των κατασκευαστών})$$

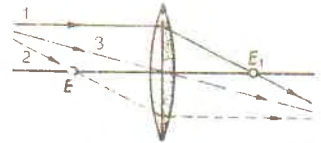
αναφέρεται σ' αυτή ακριβώς την εξάρτηση και αφορά όχι μόνο στους συγκλίνοντες φακούς αλλά και στους απολίνοντες. Οι τιμές  $R_1, R_2$  των ακτίνων καμπυλότητας θεωρούνται θετικές εφόσον είναι κυρτές οι αντίστοιχες διαθλαστικές επιφάνειες και αρνητικές εφόσον οι επιφάνειες αυτές είναι κοίλες. Αν η μια διαθλαστική επιφάνεια είναι επίπεδη ο όρος  $1/R$  που αναφέρεται σ' αυτήν θα είναι ίσος προς μηδέν.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι αν στη θέση της κύριας εστίας βρεθεί ένα φωτεινό σημείο, η αποκλίνουσα δέσμη που θα εκπορεύεται από αυτό θα μετατραπεί —μετά την έξοδό της από το συγκλίνοντα φακό σε δέσμη κυλινδρική παράλληλη προς τον κύριο άξονα.



**Είδωλα από διάθλαση.** Ας «εστιάσουμε» τώρα σε δύο συγκεκριμένες παρατηρήσεις στις οποίες ήδη αναφερθήκαμε:

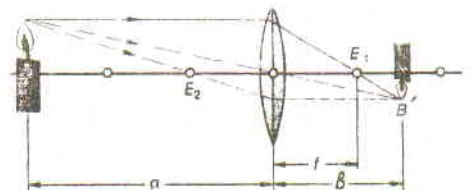
i) Κάθε φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει στο φακό παράλληλα προς τον κύριο άξονα, μετά την έξοδό της απ' αυτόν θα περάσει από την κύρια εστία της άλλης πλευράς.



ii) Κάθε φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει στο φακό κατευθυνόμενη προς το οπτικό κέντρο του εξέρχεται από αυτόν χωρίς ουσιαστικά να υποστεί αλλαγή στην κατεύθυνσή της.

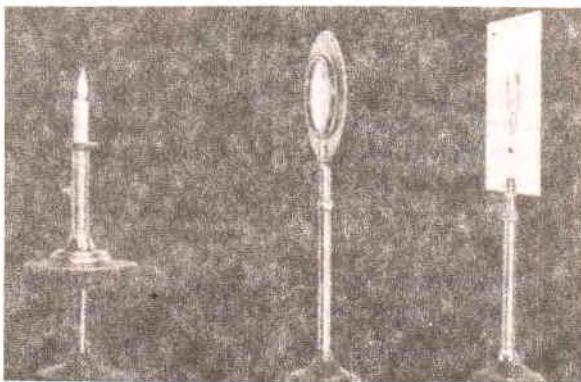
Ο συνδυασμός των δύο αυτών παρατηρήσεων θα μας βοηθήσει να προβλέψουμε το είδος και τη θέση του ειδώλου που δημιουργείται από ένα φωτεινό αντικείμενο ύστερα από διάθλαση. Για να απλοποιήσουμε τα πράγματα ας θεωρήσουμε ένα γραμμικό αντικείμενο κάθετο στον κύριο άξονα σε απόσταση ( $\alpha$ ) από το φακό μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση.

Η τεχνική του προσδιορισμού του ειδώλου βασίζεται στο να εντοπίσουμε γραφικά το είδωλο της κορυφής (B) του αντικειμένου AB. Όπως και κάθε φωτεινό σημείο το B αποτελεί το στίγμα μιας αποκλίνουσας δέσμης που προσπίπτει στο φακό. Από τις φωτεινές ακτίνες της δέσμης είναι βο-



λικό να επιλέξουμε δύο ακτίνες την πορεία των οποίων μπορούμε εύκολα να προβλέψουμε. Η μία είναι ακτίνα παράλληλη προς τον κύριο άξονα η οποία μετά την «περιπέτειά» της με το φακό θα κατευθυνθεί όπως είπαμε προς την κύρια εστία της άλλης πλευράς. Η άλλη ακτίνα είναι αυτή που κατευθύνεται προς το οπτικό κέντρο του φακού. Αυτή θα περάσει προς την άλλη πλευρά χωρίς να μεταβληθεί η πορεία της. Οι δύο ακτίνες θα συναντηθούν στο σημείο Β'.

Εφόσον ο φακός είναι λεπτός, οι προσπτώσεις γίνονται με μικρές γωνίες και το φως είναι μονοχρωματικό, αποδεικνύεται ότι κάθε ακτίνα που εκπορεύεται από το φωτεινό σημείο Β μετά την έξοδό της από το φακό θα κατευθύνεται στο σημείο Β'. Μ' άλλα λόγια στο σημείο Β' θα συγκλίνει η φωτεινή δέσμη που εκπορεύθηκε από το σημείο Β. Το Β' αποτελεί ένα **πραγματικό είδωλο** του σημείου Β και μπορεί να γίνει αντιληπτό με τη βοήθεια μιας οθόνης που θα τοποθετήσουμε στη θέση αυτή.

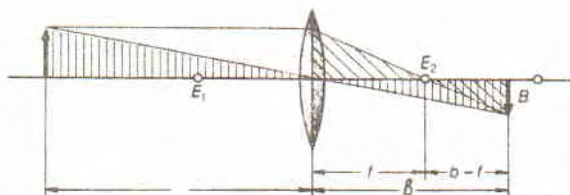


Θεωρούμε τη γεωμετρική προβολή του Β' στον κύριο άξονα. Προκύπτει έτσι το σημείο Α' το οποίο αποδεικνύεται ότι αποτελεί είδωλο του φωτεινού σημείου Α. Ολόκληρο τέλος το ευθύγραμμο τμήμα Α'Β' αντιστοιχεί στο γραμμικό είδωλο του αντικειμένου ΑΒ. Αξίζει εδώ να επισημάνουμε ότι το πραγματικό αυτό είδωλο είναι πάντοτε αντεστραμμένο.

Η θέση του καθορίζεται (i) από τη θέση του αντικειμένου και (ii) από την εστιακή απόσταση του φακού. Αν είναι α και β οι αντίστοιχες αποστάσεις αντικειμένου και ειδώλου από το φακό, αποδεικνύεται τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά ότι ισχύει

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

Το μέγεθος τέλος του γραμμικού ειδώλου (Α'Β') συνδέεται με το μέγεθος του γραμμικού αντικειμένου (ΑΒ) με την εξίσωση



$$\frac{(A'B')}{(AB)} = \frac{\beta}{\alpha}$$

η οποία αποδεικνύεται βάσει της ομοιότητας των ορθογώνιων τριγώνων  $AOB$  και  $A'O'B'$ , που δημιουργούνται στα σχετικά σχήματα. Ο λόγος  $\mu = (A'B')/(AB)$  ονομάζεται γραμμική μεγέθυνση.

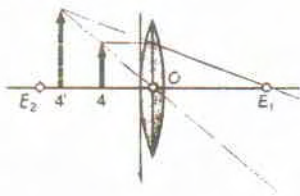
**Πραγματικό είδωλο συγκεντρωτικού φακού**

Από την εξίσωση  $\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$  αποδεικνύεται ότι:

- i) αν  $2f > \alpha > f$   $\left\{ \begin{array}{l} \beta > 2f \\ \mu > 1 \end{array} \right.$
- ii) αν  $\alpha = 2f$   $\left\{ \begin{array}{l} \beta = 2f \\ \mu = 1 \end{array} \right.$
- iii) αν  $\alpha < f$   $\left\{ \begin{array}{l} f < \beta < 2f \\ \mu < 1 \end{array} \right.$

Αν το αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση πολύ μεγάλη σε σχέση με την εστιακή συνθίζεται να λέγεται ότι «βρίσκεται στο άπειρο» και η αντίστοιχη δέσμη να θεωρείται κυλινδρική. Στη σχετική εξίσωση βάζουμε  $1/\alpha = 0$  και προκύπτει  $\beta = f$ . Το είδωλο σχηματίζεται σε επίπεδο κάθετο στον κύριο άξονα.

**Φανταστικό είδωλο.** Με ανάλογους συλλογισμούς μπορούμε να προσδιορίσουμε το είδωλο ενός αντικειμένου που βρίσκεται κοντά στο φακό, σε απόσταση δηλαδή μικρότερη από την εστιακή. Σ' αυτή την περίπτωση, η



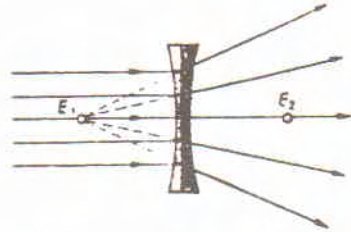
αποκλίνουσα δέσμη που εκπορεύεται από το σημειακό αντικείμενο  $B$ , μετά την έξοδό της από το φακό παραμένει αποκλίνουσα δέσμη εκπορευόμενη όμως από ένα άλλο σημείο  $B'$ . Η δέσμη αυτή δημιουργεί στο μάτι ενός παρατηρητή την εντύπωση ειδώλου το οποίο βρίσκεται στην ίδια μεριά (σε σχέση με το φακό) στην οποία βρίσκεται και το αντικείμενο. Το σημείο  $B'$  αποτελεί ένα φανταστικό είδωλο από διάθλαση. Το συνολικό είδωλο  $A'B'$  είναι φανταστικό ορθό και μεγαλύτερο από το αντικείμενο. Στην εξίσωση που συνδέει τις αποστάσεις αντικειμένου και ειδώλου με την εστιακή απόσταση του φακού η τιμή του « $\beta$ » θα είναι αρνητική.

Έναν εξαιρετικό συγκλίνοντα φακό διαθέτει και το ανθρώπινο μάτι. Η εστιακή απόσταση του φακού μπορεί και μεταβάλλεται με αλλαγές οι οποίες προκαλούνται από λείους μύες στις δύο ακτίνες καμπυλότητας. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται στο άπειρο —δηλαδή πολύ μακριά σε σχέση με την εστιακή απόσταση— η σχετική φωτεινή δέσμη συγκλίνει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Από κει μέσω του οπτικού νεύρου μεταβιβάζεται στον εγκέφαλο το μήνυμα για την οπτική εντύπωση. Όταν το αντικείμενο

πλησιάζει προς ένα φυσιολογικό μάτι, ο φακός κυρτώνεται και η εστιακή του απόσταση μικραίνει ώστε το (αντεστραμμένο) πραγματικό είδωλο να δημιουργείται ακριβώς επάνω στον αμφιβληστροειδή. Πρόκειται για τον λεγόμενο **μηχανισμό προσαρμογής του ματιού**.

## Αποκλίνοντες φακοί

Μια κυλινδρική δέσμη που προσπίπτει σε αποκλίνοντα φακό παράλληλα προς τον κύριο άξονα, μετά τις δύο διαθλάσεις μετατρέπεται σε αποκλίνουσα δέσμη φωτός. Το στίγμα της βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα, στη θέση της λεγόμενης **κύριας** εστίας. Το σημείο όμως αυτό βρίσκεται στην πλευρά της προσπίπτουσας δέσμης και όχι —όπως συμβαίνει στους συγκλίνοντες φακούς— στην πλευρά της εξερχόμενης. Η απόστασή του, από το λεπτό αποκλίνοντα φακό θεωρούμενη με αρνητικό πρόσημο λέγεται κι εδώ εστιακή απόσταση. Όπως και στους συγκλίνοντες φακούς οι κύριες εστίες είναι δύο και —ως προς το φακό— συμμετρικές.

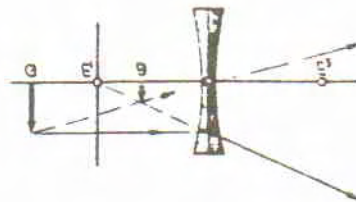


**Φανταστικά είδωλα.** Οι αποκλίνοντες φακοί δημιουργούν μόνο φανταστικά είδωλα φωτεινών αντικειμένων. Κάθε φανταστικό είδωλο που δημιουργείται από ένα τέτοιο φακό (i) είναι μικρότερο από το αντικείμενό του και (ii) βρίσκεται πιο κοντά στο φακό από όσο το αντικείμενο αυτό.

Ο γραφικός προσδιορισμός του ειδώλου ενός γραμμικού αντικειμένου κάθετος στον κύριο άξονα βασίζεται σε μια τεχνική ανάλογη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στους συγκλίνοντες φακούς. Το είδωλο όμως εδώ θα είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το αντικείμενο, ορθό και θα βρίσκεται πάντοτε μεταξύ της κύριας εστίας και του φακού. Στην εξίσωση

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

οι τιμές των  $\beta$  και  $f$  θα είναι πάντοτε αρνητικές.

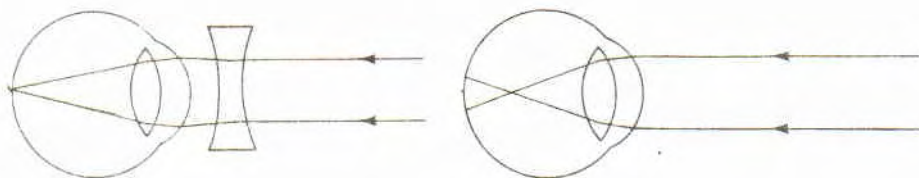


## Μυωπία

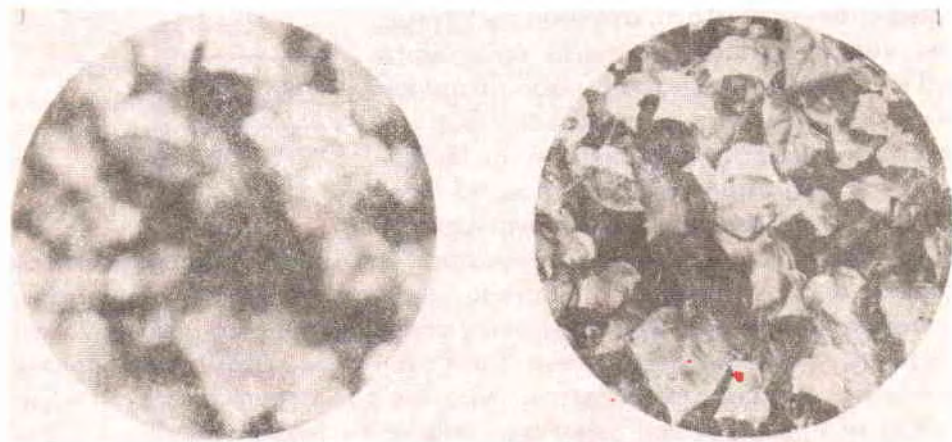
Όταν μια κυλινδρική φωτεινή δέσμη (φως δηλαδή που προέρχεται από αντικείμενο στο άπειρο) προσπίπτει στο φακό ενός μυωπικού ματιού δεν εστιάζει στον αμφιβληστροειδή αλλά πριν από αυτόν. Βάζοντας μπροστά



στο μυωπικό μάτι έναν αποκλίνοντα φακό κατάλληλης ισχύος (ο οποίος θα μπορούσε να είναι και φακός επαφής) η κυλινδρική δέσμη μετά τη διάθλασή



της στο φακό αυτό μετατρέπεται σε αποκλίνουσα δέσμη με στίγμα την εστία (E) του αποκλίνοντος φακού. Το σημείο E αποτελεί για το φακό του ματιού



...Χωρίς γυαλιά

...Με γυαλιά

ένα πραγματικό αντικείμενο το είδωλο του οποίου σχηματίζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή.

## Υπέρυθρες και υπεριώδεις ακτίνες

**Υπέρυθρες ακτίνες.** Το έτος 1800 ο Άγγλος αστρονόμος William Herschel (Γουίλλιαμ Χέρσελ) πραγματοποίησε ένα απλό αλλά πολύ ενδιαφέρον πείραμα. Ρίχνοντας σε ένα ειδικό πρίσμα μια δέσμη λευκού φωτός και μετακινώντας στην περιοχή του φάσματος ένα θερμόμετρο επιχειρούσε να ερευνήσει σε ποιο βαθμό το φως των διαφόρων περιοχών του φάσματος επιδρούσε πάνω στο θερμόμετρο. Η πειραματική αυτή δραστηριότητα τον οδήγησε σε μια ενδιαφέρουσα διαπίστωση. Διαπίστωσε ότι η θερμοκρασιακή αύξηση γινόταν μεγαλύτερη όταν απομακρυνόταν από το ερυθρό άκρο του ορατού φάσματος, τοποθετώντας το θερμόμετρο σε περιοχές όπου το ανθρώπινο μάτι δεν αντιλαμβάνεται τίποτα. Επρόκειτο για **μια αόρατη ακτινοβολία με έντονα θερμικά αποτελέσματα**. Αρκετές δεκαετίες αργότερα

διαπιστώθηκε ότι η «θερμική» αυτή ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα μικρότερη από τη συχνότητα της ερυθρής ακτινοβολίας. Στο γεγονός αυτό αποδίδεται και η ονομασία υπέρυθρη ακτινοβολία (ή υπέρυθρες ακτίνες) η οποία επεκράτησε.

Οι υπέρυθρες ακτίνες παρουσιάζουν τη σημαντική ιδιότητα να εκπέμπονται από όλα τα σώματα. Μέχρι τη θερμοκρασία των 500°C περίπου η ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα είναι εντελώς αόρατη (υπέρυθρη). Στις αμέσως ψηλότερες θερμοκρασίες ένα μέρος από την εκπεμπόμενη ακτινοβολία αρχίζει να είναι ορατό και οπωσδήποτε κόκκινο. Αν πυρώσουμε μια οποιαδήποτε καρφίτσα μπορούμε εύκολα να το διαπιστώσουμε. Σήμερα ξέρουμε ότι ένα ποσοστό 60% περίπου από την ακτινοβολία που μας στέλνει ο ήλιος είναι ακτίνες υπέρυθρες. Το συνηθισμένο γυαλί απορροφά τις υπέρυθρες και η ιδιότητα αυτή αξιοποιείται στα θερμοκήπια. Οι ορατές ακτινοβολίες του ηλιακού φωτός περνούν μέσα από το διαφανές (γι' αυτές) περίβλημα του θερμοκηπίου και θερμαίνουν το εσωτερικό του. Τα διάφορα σώματα που βρίσκονται μέσα στο θερμοκήπιο ακτινοβολούν στο υπέρυθρο με αποτέλεσμα η ακτινοβολία τους να «παγιδεύεται» διότι το περίβλημα είναι (για τις υπέρυθρες ακτίνες) αδιαφανές.

Οι υπέρυθρες ακτίνες ανιχνεύονται με κατάλληλα ευαισθητοποιημένες φωτογραφικές πλάκες. Ένα διαστημικό όχημα μπορεί μέσα σε αιγώλυτο σκοτάδι να παίρνει φωτογραφίες της γήινης ατμόσφαιρας χρησιμοποιώντας την υπέρυθρη ακτινοβολία της.

**Υπεριώδεις ακτίνες.** Την ίδια περίπου εποχή που ο Heischell ανακάλυπτε τις «θερμικές» ακτίνες, ένας Γερμανός φυσικός επιχειρούσε να εξερευνήσει την πέρα από το ιώδες άκρο του φάσματος περιοχή. Το 1801 ο Ritter (Ρίτερ) εξέταζε τη χημική δράση του φωτός πάνω σε χλωριούχο άργυρο. Το φως διασπά το χλωριούχο άργυρο και το φαινόμενο αυτό αποτελεί τη βάση της φωτογράφισης. Η διαπίστωση που έκανε ο Ritter πειραματιζόμενος πάνω σ' αυτό το αντικείμενο ήταν ότι οι αόρατες ακτινοβολίες που αντιστοιχούσαν στην πέρα από το ιώδες περιοχή παρουσίαζαν **εντονότερη χημική δράση από το «ορατό» φως**. Σήμερα ξέρουμε ότι και η «χημική» αυτή ακτινοβολία είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα της ιώδους γι' αυτό και λέγεται υπεριώδης ακτινοβολία (υπεριώδεις ακτίνες).

Εκτός από την έντονη χημική δράση τους οι υπεριώδεις ακτίνες προκαλούν και φθορισμό εφόσον βέβαια προσπέσουν σε ειδικά σώματα. Κύρια πηγή υπεριωδών ακτίνων είναι ο ήλιος ενώ τα κατώτερα κυρίως στρώματα της ατμόσφαιρας απορροφούν τις ακτίνες αυτές έντονα. Το κοινό γυαλί απορροφά τις υπεριώδεις γι' αυτό και η έρευνά τους προϋποθέτει πρίσματα και φακούς από υλικό διαφανές στις ακτίνες αυτές. Ένα τέτοιο κατάλληλο υλικό είναι ο χαλαζίας.

## Ακτίνες Röntgen

Το Νοέμβριο του έτους 1895 ο Γερμανός φυσικός Wilhelm Conrad Röntgen (Βίλελμ Κόνραντ Ραϊντγκεν, 1845-1923) μελετούσε τη συμπεριφορά των καθοδικών ακτίνων στο εργαστήριο. Ένα απόγευμα κατά τη διάρκεια ενός πειράματος έχοντας σκεπάσει τον «καθοδικό» σωλήνα με ένα κομμάτι μαύρο χαρτί διαπίστωσε ότι ένα ευαίσθητο διάφραγμα (που είχε τοποθετήσει κοντά στο σωλήνα για να ανιχνεύει ακτινοβολίες) παρουσίαζε μια πρασινωπή λάμψη πράγμα ακατανόητο γιατί ο σωλήνας ήταν σκεπασμένος με το διαφανές μαύρο χαρτί. Όταν διέκοψε τη λειτουργία του σωλήνα η λάμψη εξαφανίστηκε. Το εκπληκτικό για την εποχή εκείνη γεγονός ήταν ότι το αδιαφανές χαρτί που εμπόδιζε τη δίοδο όλων των γνωστών —τότε— ακτινοβολιών δεν ήταν σε θέση να εμποδίσει τη δίοδο των άγνωστων ακτίνων που φαίνονταν να εκπέμπονται από το σωλήνα. Η ακτινοβολία αυτή προερχόταν από το μέταλλο της ανόδου πάνω στο οποίο προσέκρουαν τα σωματίδια (ηλεκτρόνια) των καθοδικών ακτίνων.

**Ιδιότητες.** Ερευνώντας παραπέρα τη συμπεριφορά της ο Röntgen διαπίστωσε ότι μπορούσε να διαπεράσει και άλλες ουσίες —εκτός από το χαρτί— όπως το ξύλο, το γυαλί και το καουτσούκ, ορισμένα μέταλλα αλλά και τους ανθρώπινους ιστούς. Διαπίστωσε ακόμα ότι οι μυστηριώδεις αυτές ακτίνες —τις οποίες ονόμασε «ακτίνες Χ»— επιδρούσαν στη φωτογραφική πλάκα και ότι η διεισδυτικότητά τους διέφερε από υλικό σε υλικό. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι οι **ακτίνες Χ** ή ακτίνες Röntgen (Ραϊντγκεν) όπως επικράτησε να λέγονται απορροφώνται περισσότερο από τα χημικά στοιχεία μεγάλου ατομικού αριθμού παρά από τα ελαφρότερα. Έτσι γρήγορα η καινούρια ακτινοβολία χρησιμοποιήθηκε για τη φωτογράφιση των οστών (ακτινογραφία) δοσμένου ότι αυτά περιέχουν φωσφόρο και ασβέστιο ενώ τα σαρκώδη μέρη του σώματος συνίστανται από ελαφρότερα στοιχεία όπως είναι το υδρογόνο, το οξυγόνο, το άζωτο και ο άνθρακας. Η παραπέρα πειραματική έρευνα έδειξε ότι οι αόρατες ακτίνες Röntgen (α) προκαλούν εκπομπή φωτός (φθορισμό) όταν προσπίπτουν σε ορισμένες χημικές ουσίες ενώ (β) όταν προσπίπτουν σε αέρια δημιουργούν ιόντα προκαλούν δηλαδή ιονισμό των αερίων. Οι ιδιότητες αυτές όπως και η χημική τους δράση πάνω σε φωτογραφική πλάκα χρησιμοποιούνται για την ανίχνευσή τους. Αργότερα ανακαλύφθηκε ότι προκαλούν και βιολογικά αποτελέσματα.

**Η φύση των ακτίνων.** Το ζήτημα της φύσης των ακτίνων Χ παρέμεινε για ένα διάστημα «ανοικτό». Ήταν άραγε δέσμη φορτισμένων σωματιδίων όπως οι καθοδικές ακτίνες ή αποτελούσαν μια καινούρια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όπως το φως και οι γνωστές τότε αόρατες υπέρυθρες (και υπεριώδεις) ακτίνες που είχαν συχνότητα μικρότερη (και αντίστοιχα μεγαλύτερη) από το φως; Ένα καίριο κριτήριο ήταν η συμπεριφορά τους μέσα σε ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο. Αποδείχθηκε ότι η δέσμη ακτίνων Röntgen

δεν εκτρέπεται ούτε από ηλεκτρικό ούτε από μαγνητικό πεδίο (όπως συμβαίνει με τις καθοδικές ακτίνες) πράγμα που απέκλεισε την πρώτη τουλάχιστον εκδοχή. Η ακτίνες X δεν ήταν δέσμη φορτισμένων σωματιδίων. Κατά τα χρόνια που ακολούθησαν έγινε αποδεκτό ότι οι ακτίνες X συνιστούν μια ακόμα **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** με συχνότητα μεγαλύτερη από τη συχνότητα των υπεριωδών ακτίνων και φυσικά και του ορατού φωτός. Η διάδοσή τους γίνεται λοιπόν με τη μορφή εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Κάτω από ειδικές συνθήκες είναι δυνατόν να ανακλαστούν, να διαθλαστούν ή και να παρουσιάσουν φαινόμενα περίθλασης και συμβολής.

Δεκαεφτά χρόνια μετά την ανακάλυψή τους ο Max von Laue (Μαξ φον Λάουε) ξεκινώντας από την ιδέα της περίθλασης έκανε τη σκέψη ότι οι ακτίνες αυτές θα μπορούσαν να εξυπηρετήσουν την έρευνα της διάταξης των ατόμων στο εσωτερικό των στερεών. Φαινομενικά η ιδέα ήταν μάλλον τολμή. Δοσμένου ότι το μήκος κύματος αυτών των ακτίνων έπρεπε να είναι υπερβολικά μικρό, η περίθλασή τους απαιτούσε σχισμές ή εμπόδια πολύ μικρών διαστάσεων. Εφόσον λοιπόν τα άτομα (μόρια ή ιόντα) τα οποία συγκροτούσαν τα κρυσταλλικά πλέγματα βρίσκονταν σε αποστάσεις της τάξης μεγέθους αυτού του μήκους κύματος και σε ορισμένη όπως πιστευόταν διάταξη, οι ακτίνες X θα μπορούσαν προσπίπτοντας σε κρυστάλλους των στερεών σωμάτων να περιθλώνται και να δίνουν μηνύματα ικανά να περιγράφουν την «αρχιτεκτονική» των κρυστάλλων αυτών. Τα επόμενα χρόνια η μέθοδος εξελίχθηκε με τη συνεργασία του W. H. Bragg (πατέρα) και τον W. L. Bragg (γιου) οι οποίοι μάλιστα μοιράστηκαν το βραβείο Nobel (Νόμπελ) του έτους 1915. Η τεχνική τους αποδείχθηκε πολυτιμότεο «εργαλείο» στην έρευνα της δομής του αόρατου μικρόκοσμου τόσο για τους κρυστάλλους των στερεών υλικών, όσο και —αργότερα— για τα γενετικά μόρια του ανθρώπινου σώματος.

Μετά τη νέα ανακάλυψη το γνωστό μέχρι τότε φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών εμπλουτίστηκε. Οι υπέρυθρες ακτίνες το φως, οι υπεριώδεις ακτίνες και οι ακτίνες Röntgen αποτελούσαν τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που είχαν την ίδια φύση, διαδίδονταν ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο κενό με την ίδια ταχύτητα των 300.000 χιλιομέτρων ανά δευτερόλεπτο και διέφεραν στις τιμές του μήκους κύματος και της συχνότητας.

**Παραγωγή.** Σήμερα οι ακτίνες Röntgen δημιουργούνται με σωλήνες υψηλού κενού στα ηλεκτρόδια των οποίων εφαρμόζεται υψηλή τάση την οποία παίρνουμε από μετασχηματιστή. Στο εσωτερικό αυτών των σωλήνων δημιουργείται δέσμη καθοδικών ακτίνων, δέσμη δηλαδή από ηλεκτρόνια, τα οποία επιταχυνόμενα στο χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων αποκτούν μεγάλες ταχύτητες και στη συνέχεια η πρόσπτωσή τους στο μέταλλο της ανόδου (αντικαθόδου) συνοδεύεται από εκπομπή ακτίνων Röntgen.

**Έκθεση.** Ο όρος «έκθεση» αναφερόμενος σε μια οποιαδήποτε ακτινοβολία



(Röntgen, ραδιενεργό, κοσμική κ.λπ.) υποδηλώνει το ποσό της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα υλικό. Μετρείται με τον αριθμό ή το φορτίο των ιόντων που δημιουργείται καθώς η ακτινοβολία περνά μέσα από ξηρό αέρα ορισμένης ποσότητας. Η μονάδα 1 röntgen (1R) αντιστοιχεί σε έκθεση κατά την οποία παράγονται ιόντα συνολικού φοτίου  $2,58 \cdot 10^{-4} \text{C}$  σε 1 kg ξηρού αέρα.

## Ραδιενέργεια

Λίγους μήνες αργότερα (1896), ακολουθώντας τα ίχνη του Röntgen, ο Γάλλος φυσικός Henry Becquerel (Ανρί Μπεκερέλ 1852-1908) οδηγήθηκε σε μια ανακάλυψη ακόμα πιο εντυπωσιακή. Ανακάλυψε ότι οι κρύσταλλοι ενός ορισμένου άλατος του ουρανίου εξέπεμπαν αυθόρμητα μία αόρατη ακτινοβολία η οποία μπορούσε να προσβάλλει τη φωτογραφική πλάκα, να προκαλεί δηλαδή μια δράση «χημική».

Το εντυπωσιακό όμως σ' αυτή την περίπτωση βρισκόταν στο γεγονός ότι η εκπομπή της ακτινοβολίας έδειχνε να είναι αδιάκοπη και να συμβαίνει ανεξάρτητα από το αν η ουσία φωτιζόταν ή δε φωτιζόταν.

Αμέσως μετά την ανακάλυψη του Becquerel, ένα ζεύγος χημικών, ο Γάλλος Pierre



Η Μαρία Κιουρί.

Curié (Πιερ Κιουρί 1859-1906) και η Πολωνέζα σύζυγός του Μαρία (1867-1934), μια από τις πρώτες γυναίκες που εμφανίστηκαν στην ιστορία των επιστημών, ανέλαβαν να ερευνήσουν βαθύτερα το μυστήριο της αυθόρμητης εκπομπής. Ερευνώντας τις ιδιότητες ενός ορυκτού του ουρανίου που λέγεται πισσουρανίτης ανακάλυψαν ότι εκτός από ουράνιο περιείχε τουλάχιστον μια ακόμα ουσία που εξέπεμπε τέτοιου είδους ακτινοβολία και μάλιστα εντονότερα από το ουράνιο. Ύστερα από δύο περίπου χρόνια εντατικής έρευνας κατάφεραν να εντοπίσουν όχι ένα αλλά δύο άγνωστα την εποχή εκείνη στοιχεία που εξέπεμπαν ακτινοβολία παρόμοια με αυτή που είχε ανακαλύψει ο Becquerel. Το ένα από τα καινούρια στοιχεία με ατομικό

αριθμό 88 το ονόμασαν Ράδιο (Ra). Το άλλο με ατομικό αριθμό 84 ονομάστηκε Πολώνιο (Po) για να τιμηθεί η πατρίδα της Marie. Στο καινούριο φαινόμενο δόθηκε το όνομα *ραδιενέργεια*.

Ποια ήταν όμως η πηγή της μυστηριώδους αυτής ραδιενέργειας; Κατά τα χρόνια που ακολούθησαν —κατά τις αρχές δηλαδή του αιώνα μας— τα συμπεράσματα της πειραματικής έρευνας εμπλουτισμένα με τις καινοφανείς αντιλήψεις για τη δομή της ύλης οδήγησαν τους ερευνητές στο να υποστηρίξουν αυτό το οποίο δεχόμαστε



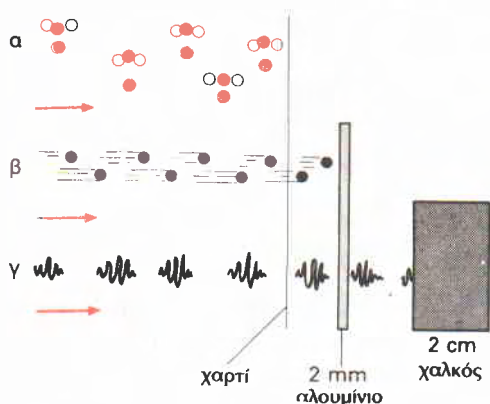
ακόμα και σήμερα. Η ραδιενέργεια πηγάζει από τους πυρήνες των ατόμων της ύλης κι αυτό είναι κάτι που δε φαινόταν να συμβαίνει για καμία άλλη από τις γνωστές ακτινοβολίες εκείνης τουλάχιστον της εποχής. Το φως για παράδειγμα όπως και οι υπέρυθρες, αλλά και οι υπεριώδεις ακτίνες προέρχονται από διεγέρσεις ηλεκτρονίων ενώ και με τις ακτίνες Χ συμβαίνει κάτι ανάλογο.

**Η φύση της ραδιενέργειας.** Από τις πρώτες κιόλας παρατηρήσεις του Becquerel διαπιστώθηκε ότι οι αόρατες αυτές ακτίνες υφίσταντο εκτροπή από μαγνητικό πεδίο παρόμοια με την εκτροπή που προκαλείται σε δέσμη κινουμένων φορτισμένων σωματιδίων. Η φορά της εκτροπής πρόδιδε την ύπαρξη αρνητικού φορτίου. Οι πρώτες αυτές παρατηρήσεις ήταν ατελείς και δεν αποκάλυπταν την παρουσία άλλης μορφής ακτίνων η οποία αποκαλύφθηκε λίγο αργότερα. Σύντομα διαπιστώθηκε ότι —όπως και οι ακτίνες Χ— η ραδιενεργός ακτινοβολία ιονίζει τα αέρια. Η ιδιότητα αυτή επέτρεπε στους ερευνητές —εκτός από την ανίχνευση της αόρατης ακτινοβολίας— να παίρνουν και ποσοτικές μετρήσεις ευκολώτερα, εννοείται, από τη φωτογραφική μέθοδο.

Ο Ernest Rutherford (Έρνεστ Ράδερφορντ 1871-1937) ένας από τους πιο αξιόλογους πειραματιστές της εποχής αξιοποιώντας την ιδιότητα του ιονισμού απέδειξε ότι οι ακτίνες της ραδιενέργειας ήταν δύο διαφορετικών ειδών. Τις ονόμασε μάλιστα α (άλφα) και β (βήτα) χρησιμοποιώντας τα δύο πρώτα γράμματα από το ελληνικό αλφάβητο. Ενώ οι πρώτες (οι άλφα) απορροφώνται από μερικά εκατοστόμετρα αέρα οι δεύτερες (οι βήτα) μπορούν να διαπερνούν μια πλάκα αλουμινίου πάχους ενός χιλιοστού.

Οι «βήτα» ήταν οι ακτίνες που είχε ανιχνεύσει ο Becquerel. Κινούμενα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Εκτός από αυτές ο Rutherford απέδειξε ότι στη ραδιενεργό ακτινοβολία περιέχεται ένα ακόμα συστατικό το οποίο προκαλούσε ισχυρό ιονισμό αλλά δεν μπορούσε να διαπεράσει λεπτότατα φύλλα από αλουμίνιο. Ήταν οι λεγόμενες ακτίνες «άλφα», οι οποίες υφίσταντο και αυτές εκτροπή από μαγνητικό πεδίο αλλά σε αντίθετη —σε σχέση προς τις βήτα— κατεύθυνση. Το γεγονός φανέρωνε ότι ήταν και αυτές φορτισμένα σωματίδια, αλλά με ηλεκτρικό φορτίο θετικό. Από τις παραπέρα μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι τα σωματίδια βήτα διαπερνούν στρώματα υλικών εκατό —κατά μέσον όρο— φορές παχύτερα από τα λεπτά στρώματα που ανακόπτουν τα σωματίδια «άλφα». Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξε και η ερευνητική δραστηριότητα του ζεύγους Curie. Η ραδιενεργός ακτινοβολία φαινόταν λοιπόν να έχει δύο συνιστώσες. Η άποψη όμως αυτή ανατράπηκε. Λίγα χρόνια αργότερα ο Γάλλος φυσικός Villard (Βιλλάρ) απέδειξε ότι και μετά την απορρόφηση των σωματιδίων α και β οι φωτογραφικές πλάκες φαίνονταν να επηρεάζονται από κάποια αόρατη ακτινοβολία που παρουσιαζόταν έτσι ιδιαίτερα διεισδυτική. Επρόκειτο για τις λεγόμενες ακτίνες γ (γάμα) οι οποίες εμφάνιζαν μια ουσιαστική διαφορά από τα σωματίδια α και β, δοσμένου ότι παρά τις προσπάθειες

των ερευνητών κανεός είδους εκτροπή —από οσοδήποτε ισχυρό μαγνητικό ή ηλεκτρικό πεδίο— φαινόταν να συμβαίνει στις ακτίνες αυτές.



Λίγο αργότερα αποδείχθηκε ότι τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια «βήτα» είναι **ηλεκτρόνια** μεγάλων ταχυτήτων τα οποία εκπέμπονται από τους πυρήνες της ύλης και χαρακτηρίζονται από μεγάλη ποικιλία τιμών ενέργειας.

Ερευνώντας επίσης την εκτροπή των σωματιδίων «άλφα» από μαγνητικό πεδίο ο Rutherford απέδειξε ότι το πηλίκο ( $q/m$ ) του φορτίου κάθε σωματιδίου προς τη μάζα του αντιστοιχούσε σε σωματίδιο παρόμοιο με **πυρήνα**

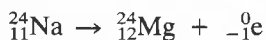
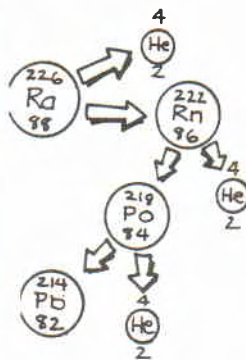
**του ατόμου του ηλίου (He).** Σε ένα κρίσιμο πείραμα που έγινε στα 1906 αποδείχτηκε ότι παγιδεύοντας τις ακτίνες «άλφα» είναι δυνατόν να προκύψει αέριο το οποίο διαπιστώνεται ότι είναι ήλιο.

Το σωματίδιο α συμβολίζεται όπως και ο πυρήνας ηλίου με  ${}^4_2\text{He}$ . Ο αριθμός «2» (ατομικός αριθμός) μας δίνει το πλήθος των στοιχειωδών φορτίων (e) του σωματιδίου και —στην περίπτωση αυτή— και το πλήθος των πρωτονίων. Ο άλλος αριθμός ο «4» (μαζικός αριθμός) υποδηλώνει το συνολικό πλήθος των στοιχειωδών σωματιδίων από τα οποία αποτελείται το εν λόγω σωματίδιο. Ο πυρήνας ηλίου περιέχει δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια, τέσσερα συνεισφέροντας στο σύνολο στοιχειώδη σωματίδια (νουκλεόνια). Κατά ανάλογο τρόπο το σύμβολο  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$  μας παραπέμπει σε πυρήνα ραδίου-226. Πρόκειται για πυρήνα με 88 πρωτόνια, με ηλεκτρικό φορτίο +88e και με 138 νετρόνια, σύνολο δηλαδή νουκλεονίων 226. Το σύμβολο  ${}^{238}_{92}\text{U}$  υποδηλώνει πυρήνα ουρανίου-238 με 92 πρωτόνια ηλεκτρικό φορτίο +92 και 146 νετρόνια.

Όσο για τις ακτίνες γ οι εργασίες κυρίως του Rutherford έπεισαν ότι το δεισδυτικό αυτό τμήμα της ραδιενέργειας είναι **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** όπως οι υπέρυθρες, το φως, οι υπεριώδεις και οι ακτίνες Χ με συχνότητα όμως μεγαλύτερη από τη συχνότητα των ακτίνων Χ. Εξυπακούεται βέβαια ότι η ανακάλυψη των ακτίνων γ διεύρυνε το γνωστό μας φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών.

Κατά τις δεκαετίες που ακολούθησαν αποδείχθηκε ότι η εκπομπή ραδιενέργειας σχετίζεται με το ζήτημα της πυρηνικής δομής. Αναγνωρίστηκε ότι οι πυρήνες των διαφόρων στοιχείων (ισοτόπων) δεν έχουν την ίδια «σταθερότητα». Καθώς ο πυρήνας ενός ατόμου τείνει να μεταπέσει σε κατάσταση μεγαλύτερης σταθερότητας εκπέμπει ραδιενέργεια.

Ραδιενεργά στοιχεία δεν είναι μόνο το ουράνιο, το πολώνιο και το ράδιο. Όλα σχεδόν τα στοιχεία που έχουν ατομικό αριθμό μεγαλύτερο από 82 (πυρήνες δηλαδή με πάνω από 82 πρωτόνια) εκδηλώνουν αυθόρμητη ραδιενεργό εκπομπή σωματιδίων α και οι πυρήνες τους μετατρέπονται σε διαφορετικούς σταθερότερους πυρήνες με μικρότερο ατομικό και μαζικό αριθμό. Ο πυρήνας του ραδίου για παράδειγμα με την εκπομπή ενός σωματιδίου α μετατρέπεται σε πυρήνα ραδονίου με ατομικό αριθμό μικρότερο κατά δύο μονάδες και μαζικό αριθμό μικρότερο κατά τέσσερις μονάδες. Πρόκειται για κυριολεκτική μεταστοιχείωση. Ορισμένα από τα υπόλοιπα στοιχεία όπως το κάλιο (K) και το ρουβίδιο (Rb) εκδηλώνουν επίσης αυθόρμητη (φυσική) ραδιενέργεια β η οποία προκαλεί μεταστοιχείωση. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η μεταστοιχείωση του νατρίου σε μαγνήσιο. Δεδομένου ότι το σωματίδιο β συμβολίζεται όπως και το ηλεκτρόνιο με  ${}_{-1}^0e$  μπορούμε να γράψουμε



**Τεχνητή Ραδιενέργεια.** Εκτός όμως από αυτά, το έτος 1934 διαπιστώθηκε ότι μπορούμε να δημιουργούμε ραδιενεργά στοιχεία (ισότοπα) με τρόπους τεχνητούς. Αν για παράδειγμα βομβαρδίσουμε ένα φύλλο αλουμινίου ( ${}_{13}^{24}\text{Al}$ ) με σωματίδια α θα προκύψει το ισότοπο φωσφόρος-30 ( ${}_{15}^{30}\text{P}$ ) το οποίο είναι ραδιενεργό. Πρόκειται για τη λεγόμενη τεχνητή ραδιενέργεια.

Είναι μάλιστα χαρακτηριστικό ότι καθένα από τα σωματίδια που εκπέμπει ο ραδιενεργός φωσφόρος-30 έχει μάζα ίση με τη μάζα ενός ηλεκτρονίου και ηλεκτρικό φορτίο e αλλά θετικό. Το σωματίδιο αυτό λέγεται **ποζιτρόνιο** (+β ή  ${}_{+1}^0e$ ) και ανακαλύφθηκε από τον Anderson στην κοσμική ακτινοβολία το έτος 1932, δυο δηλαδή χρόνια πριν από την ανακάλυψη της τεχνητής ραδιενέργειας.

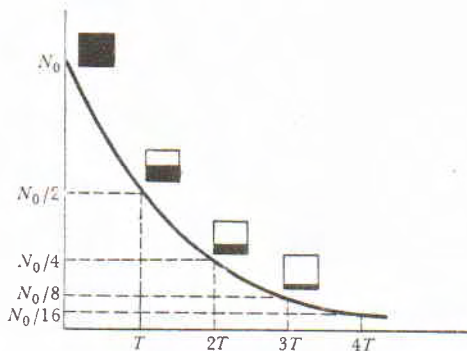
Μπορούμε να γράψουμε  ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{14}^{30}\text{Si} + {}_{+1}^0e$ .

Αξίζει τέλος να τονίσουμε ότι σε καθένα από τα φαινόμενα που περιγράψαμε παρατηρείται α) διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου β) διατήρηση του αριθμού των νουκλεονίων γ) διατήρηση της ενέργειας και δ) διατήρηση της ορμής.

**Χρόνος υποδιπλασιασμού.** Ο ρυθμός εκπομπής της ραδιενέργειας μετρείται σε μονάδες Becquerel (Μπεκερέλ). Το ένα Becquerel αντιστοιχεί σε μια διάσπαση ανά δευτερόλεπτο. Συμβολίζεται με 1 Bq. Η ποσοτική έρευνα του φαινομένου μας δείχνει ότι ο ρυθμός εκπομπής ραδιενέργειας ενός συγκεκριμένου παρασκευάσματος παρουσιάζει αδιάκοπη μείωση.

Ας υποθέσουμε ότι σε κάποια χρονική στιγμή —την οποία θεωρούμε ως

αρχή των χρόνων— διαθέτουμε ομοειδείς ραδιενεργούς πυρήνες πλήθους  $N_0$ . Διαπιστώνεται ότι σε ορισμένη χρονική διάρκεια  $T$  η οποία εξαρτάται μόνο από το είδος των πυρήνων που διαθέτουμε, ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων θα έχει γίνει  $N_0/2$ , μισό δηλαδή του αρχικού αριθμού  $N_0$ .



Κατά τη χρονική διάρκεια  $T$  που θα ακολουθήσει, ο αριθμός των αδιάσπαστων πυρήνων θα γίνει  $N_0/4$  μισό δηλαδή του  $N_0/2$ . Αυτό θα συνεχίζεται ασταμάτητα, ενώ η χρονική διάρκεια  $T$  θα παραμένει ανεξάρτητη από τις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας, από τη χημική σύσταση της ουσίας στην οποία βρίσκεται το ραδιενεργό παρασκεύασμα αλλά και από την παρουσία ηλεκτρικών ή μαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητη σε τελευταία ανάλυση

από οτιδήποτε. Η σταθερή αυτή χρονική διάρκεια η οποία για κάθε πυρήνα έχει μια χαρακτηριστική τιμή, λέγεται **χρόνος υποδιπλασιασμού**. Το ιώδιο-131 ( $^{131}_{53}\text{I}$ ) για παράδειγμα έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 8 μέρες. Αυτό

|                        |                                  |
|------------------------|----------------------------------|
| $^{87}_{37}\text{Rb}$  | $4.88 \times 10^{10} \text{ yr}$ |
| $^{238}_{92}\text{U}$  | $4.5 \times 10^9 \text{ yr}$     |
| $^{40}_{19}\text{K}$   | $1.28 \times 10^9 \text{ yr}$    |
| $^{239}_{94}\text{Pu}$ | $2.44 \times 10^4 \text{ yr}$    |
| $^{14}_6\text{C}$      | 5730 yr                          |
| $^{226}_{88}\text{Ra}$ | 1602 yr                          |
| $^{137}_{55}\text{Cs}$ | 30.0 yr                          |
| $^{90}_{38}\text{Sr}$  | 28.1 yr                          |
| $^3_1\text{H}$         | 12.4 yr                          |
| $^{60}_{27}\text{Co}$  | 5.26 yr                          |
| $^{131}_{53}\text{I}$  | 8.05 day                         |
| $^{11}_6\text{C}$      | 21 min                           |

σημαίνει ότι αν σε κάποια στιγμή διαθέτουμε ένα ραδιενεργό παρασκεύασμα με  $N_0$  πυρήνες ιωδίου-131, μέσα σε οκτώ μέρες θα γίνουν  $N_0/2$  διασπάσεις, κατά τις επόμενες οκτώ μέρες θα γίνουν  $N_0/4$  διασπάσεις ενώ κατά τις οκτώ μέρες που θα ακολουθήσουν θα συμβούν  $N_0/8$  διασπάσεις στο ίδιο παρασκεύασμα. Οι χρόνοι υποδιπλασιασμού των διάφορων σοτόπων πυρήνων ποικίλλουν. Για το ουράνιο-238 είναι 4,5 δισεκατομμύρια χρόνια, για το ράδιο-226 είναι 1602 χρόνια, ενώ για το πολώνιο-212 είναι μόλις  $3 \cdot 10^{-7}$  δευτερόλεπτα.

**Βιολογικά αποτελέσματα.** Μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1920 οι άνθρωποι αγνοούσαν το θανάσιμο γι' αυτούς κίνδυνο που κρύβει η ραδιενέργεια. Γύρω στα 1925 έγιναν για πρώτη φορά γνωστές οι θανατηφόρες ιδιότητες των ακτίνων  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ . Η ραδιενεργός ακτινοβολία που απορροφά ένας οργανισμός είναι δυνατόν να καταστρέψει τους ιστούς και τα οστά και να προκαλέσει τρομερές γενετικές ανωμαλίες καταστρέφοντας τα κύτταρα αναπαραγωγής. Εξυπακούεται ότι τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τη δόση και το ρυθμό απορρόφησης της ραδιενέργειας.

**Δόση και ισοδύναμη δόση.** Η έννοια δόση δεν αναφέρεται μόνο στη ραδιενέργεια. Όταν μια οποιαδήποτε ακτινοβολία (ραδιενεργός, κοσμική, Röntgen, πρωτονίων, νετρονίων κ.λπ.), διαπερνά την ύλη τής μεταβιβάζει

μια ποσότητα από την ενέργεια που μεταφέρει. Η ανά μονάδα μάζας απορροφούμενη ενέργεια λέγεται δόση. Ως μονάδα δόσης χρησιμοποιείται το 1 rad. Η λέξη προέρχεται από το *radiation absorbed dose* που σημαίνει δόση απορροφημένης ακτινοβολίας. 1 rad είναι  $10^{-2}$  J/Kg.

Τα βιολογικά όμως αποτελέσματα της απορρόφησης ακτινοβολιών σχετίζονται και με τη φύση της απορροφώμενης ακτινοβολίας. Μια δόση, λόγου χάριν, ορισμένων rad ακτίνων γ δεν προκαλεί τον ίδιο ιονισμό με μια δόση ίσων rad που προέρχεται από πρωτόνια. Το γεγονός αυτό είχε ως συνέπεια την εισαγωγή και αποδοχή ενός συντελεστή (σ), εξαρτώμενου από τη φύση της προσβάλλουσας ακτινοβολίας. Το γινόμενο του συντελεστή αυτού επί τη δόση μας δίνει τη λεγόμενη *ισοδύναμη* (ή *ενεργό*) δόση με μονάδα μετρήσεως το *rem* (*roentgen equivalent man*),

$$\sigma \times \text{Δόση (σε rad)} = \text{Ισοδύναμη δόση (σε rem)}$$

| τύπος<br>ακτινοβολίας | συντελεστής<br>(σ) |
|-----------------------|--------------------|
| ακτίνες Χ             | 1                  |
| ακτίνες γ             | 1                  |
| ηλεκτρόνια            | 1-1,7              |
| αργά νετρόνια         | 4-5                |
| πρωτόνια              | 10                 |
| σωματίδια α           | 10                 |
| βαρεία ιόντα          | 20                 |

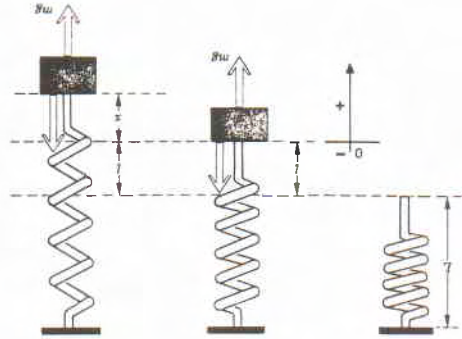
Ο **απαριθμητής Geiger (Γκάιγκερ)** ο οποίος εφευρέθηκε το 1928 εξακολουθεί να αποτελεί την πιο διαδεδομένη διάταξη για ανίχνευση και καταμέτρηση ακτινοβολιών. Συνίσταται από ένα κλειστό μεταλλικό ή γυάλινο κύλινδρο και ένα λεπτό μονωμένο σύρμα που βρίσκεται στη θέση του άξονα του κυλίνδρου και συνδέεται με το θετικό πόλο πηγής σταθερής τάσης. Ο άλλος πόλος της πηγής συνδέεται με τη Γη και με τον μεταλλικό κύλινδρο ή με ένα αγωγίμο τοίχωμα που βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα αν είναι γυάλινος. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει αέριο υπό χαμηλή πίεση. Η λειτουργία του βασίζεται στον ιονισμό που προκαλούν οι ακτινοβολίες στο αέριο. Λόγω της σχετικά μεγάλης διαφοράς δυναμικού μόλις εισέλθει στο εσωτερικό του σωλήνα ένα ιονίζον σωματίδιο προκαλείται ηλεκτρική εκκένωση με συνέπεια τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αντίσταση αρκετών ΜΩ που συνδέεται σε σειρά με τον απαριθμητή. Η εκκένωση που δημιουργείται δεν μπορεί να συντηρηθεί και ο απαριθμητής επανέρχεται στην προηγούμενη κατάσταση έτοιμος να *απαριθμήσει* το επόμενο σωματίδιο που θα εισβάλει σ' αυτόν.



## Λυμένα παραδείγματα

1. Στο άκρο ενός κατακόρυφου ελατηρίου σταθεράς  $k=20 \text{ N/m}$  είναι κρεμασμένο ένα σώμα μάζας  $m=100 \text{ g}$  το οποίο εκτελεί κατακόρυφη αμείωτη και ελεύθερη ταλάντωση. Όπως φαίνεται και στη σχηματική παράσταση, κάθε φορά που το σώμα βρίσκεται στην ανώτερη θέση του το ελατήριο έχει το φυσικό μήκος του. Θα αποδείξουμε ότι η ταλάντωση είναι αρμονική θα υπολογίσουμε την περίοδο και το πλάτος της και στη συνέχεια θα αναζητήσουμε τις θέσεις εκείνες στις οποίες η δυναμική ενέργεια είναι μεγαλύτερη από την κινητική.

Θεωρούμε ότι  $g=10 \text{ m/s}^2$ .



α. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο σώμα κατά τη διάρκεια της κίνησης είναι (i) η σταθερή δύναμη «βάρος»  $B=mg$  και (ii) η μεταβαλλόμενη δύναμη ( $F_{ελ}$ ) την οποία ασκεί το ελατήριο. Σύμφωνα με το νόμο του Hooke η τιμή αυτή της δύναμης είναι ανάλογη προς τη μεταβολή μήκους που παρουσιάζει το ελατήριο (σε σχέση προς το φυσικό του μήκος) σε κάθε στιγμή.

Κάθε φορά που το σώμα περνάει από τη θέση ευσταθούς ισορροπίας οι δύο αυτές δυνάμεις ισορροπούν. Υποθέτουμε ότι σ' αυτή τη θέση η μήκυνση του ελατηρίου είναι ίση με  $l$ .

$$\left. \begin{array}{l} \text{Θα ισχύει } \Sigma F=0 \Rightarrow B-F_{ελ}=0 \\ \text{Σύμφωνα με το νόμο Hooke } F_{ελ}=kl \end{array} \right\} \Rightarrow B=kl=0$$

Θεωρούμε τώρα το σώμα σε μία **τυχαία** στιγμή της κίνησής του (σχήμα) κατά την οποία η απομάκρυνσή του θα είναι  $\tilde{x}$ . Στη θέση αυτή η δύναμη του ελατηρίου θα έχει μέτρο  $F_{ελ}=k(l+\tilde{x})$ .

Εντοπίζουμε την προσοχή μας στη συνισταμένη των δύο ασκουμένων δυνάμεων. Για να αποδείξουμε ότι η κίνηση είναι (απλή) αρμονική ταλάντωση θα χρειαστεί να δείξουμε ότι για τη συνισταμένη ισχύουν δύο πράγματα: (i) ότι έχει φορά αντίθετη από τη φορά της απομάκρυνσης και (ii) ότι έχει τιμή ανάλογη προς τιμή της απομάκρυνσης.

Μπορούμε όμως να «προσβάλλουμε» και τους δύο αυτούς στόχους μαζί αρκεί να χρησιμοποιήσουμε την έννοια της αλγεβρικής τιμής των αντίστοιχων διανυσμάτων. Βέβαια η έννοια της αλγεβρικής τιμής έχει ανάγκη από άξονα. Θεωρούμε λοιπόν έναν άξονα θετικά προσανατολισμένο κατά τη φορά της απομάκρυνσης. Δεχόμαστε επίσης ότι τα σύμβολα « $F$ » και « $x$ » παριστάνουν τις αλγεβρικές τιμές της συνισταμένης των δυνάμεων και της απομάκρυνσης αντίστοιχα. Θα ισχύει  $F=B-k(l+\tilde{x}) \Rightarrow F=B-kl-\tilde{k}x$ . Επειδή όμως  $B-kl=0$  η σχέση γίνεται  $F=-\tilde{k}x$ .

Διαπιστώνουμε ότι με τη σχέση  $F=-\tilde{k}x$  επιτεύχθηκαν και οι δύο στόχοι μας. Η κίνηση είναι αρμονική ταλάντωση και η σταθερά επαναφοράς ( $D$ ) συμπίπτει και σ' αυτή την περίπτωση με τη σταθερά του ελατηρίου. Η σύμπτωση μας οδηγεί και στον υπολογισμό της περιόδου.

$$\left. \begin{array}{l} k=D \\ D=m\omega^2 \\ \omega=2\pi/T \end{array} \right\} \Rightarrow T=2\pi\sqrt{m/k}. \quad T=0,63 \text{ s.}$$

β. Κάθε φορά που το σώμα βρίσκεται στην ανώτερη θέση του το ελατήριο αποκτά (σύμφωνα με τα δεδομένα) το φυσικό μήκος του. Από αυτό συμπεραίνεται ότι το πλάτος ( $x_0$ ) της ταλάντωσης θα είναι ίσο με την επιμήκυνση ( $l$ ) που έχει το ελατήριο στη θέση ισορροπίας. Θα είναι λοιπόν

$$\left. \begin{array}{l} x_0 = l \\ B - k l = 0 \\ B = mg \end{array} \right\} \Rightarrow x_0 = \frac{mg}{k} \quad x_0 = 10 \text{ cm.}$$

γ. Η δυναμική ενέργεια ( $U$ ) του αρμονικού ταλαντωτή, η επιπλέον δηλαδή δυναμική ενέργεια που έχει σε σχέση με τη θέση ευσταθούς ισορροπίας (όπου θεωρούμε  $U=0$ ) είναι ίση με  $Dx^2/2$ . Εφόσον  $D=k$  θα είναι  $U=kx^2/2$ . Ζητάμε τις θέσεις στις οποίες η δυναμική ενέργεια θα είναι μεγαλύτερη από την κινητική ( $K$ ). Η ολική ενέργεια είναι  $kx_0^2/2$  ίση δηλαδή με τη μέγιστη δυναμική ενέργεια. Ισχύει

$$\left. \begin{array}{l} K = \frac{1}{2} kx_0^2 - \frac{1}{2} kx^2 \\ U = \frac{1}{2} kx^2 \\ U > K \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{2} kx^2 > \frac{1}{2} kx_0^2 - \frac{1}{2} kx^2 \Rightarrow 2x^2 > x_0^2 \Rightarrow |x| > \frac{x_0}{\sqrt{2}}$$

**2. Η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα σε αντικείμενο και πραγματικό είδωλο ενός συγκλίνοντος φακού.** Υποθέτουμε ότι ένα γραμμικό φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται μπροστά σε λεπτό συγκλίνοντα φακό κάθετα στον κύριο άξονά του. Εφόσον η απόστασή του ( $\alpha$ ) από το φακό είναι μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση, το είδωλο είναι πραγματικό και μπορούμε να το ανιχνεύσουμε με τη βοήθεια ενός πετάσματος. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται στη μία εστία του φακού το είδωλο δημιουργείται στο άπειρο. Η απόσταση ( $d$ ) αντικειμένου-ειδώλου είναι σ' αυτή την περίπτωση άπειρη. Απομακρύνοντας συνεχώς το αντικείμενο από τον ακίνητο φακό διαπιστώνουμε ότι η απόσταση  $d$  ελαττώνεται, η τιμή της φθάνει σε ένα ελάχιστο και στη συνέχεια αυξάνει στο άπειρο. Μπορούμε να υπολογίσουμε το ελάχιστον της απόστασης αντικειμένου-ειδώλου.

Ας είναι  $\theta$  η απόσταση του πραγματικού ειδώλου από το φακό

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ισχύει } d = \alpha + \theta \\ \text{και } \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\theta} = \frac{1}{f} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{d - \alpha} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{d}{\alpha(d - \alpha)} = \frac{1}{f} \Rightarrow \alpha^2 - d\alpha + df = 0.$$

Για να έχει πραγματικές ρίζες η δευτεροβάθμια (ως προς  $\alpha$ ) εξίσωση στην οποία καταλήξαμε θα πρέπει η διακρίνουσά της να είναι μεγαλύτερη από το μηδέν.

$$d^2 - 4df \geq 0 \Rightarrow d \geq 4f.$$

Η απόσταση αντικειμένου-ειδώλου είναι λοιπόν οπωσδήποτε μεγαλύτερη ή ίση από το τετραπλάσιο της εστιακής απόστασης. Η ελάχιστη απόσταση θα είναι συνεπώς ίση με  $4f$ . Σ' αυτή την περίπτωση η προηγούμενη δευτεροβάθμια εξίσωση έχει διπλή ρίζα  $\alpha = 2f$ . Στη θέση δηλαδή της ελάχιστης απόστασης ο φακός βρίσκεται στο μέσον αυτής της απόστασης ( $\alpha = \theta = 2f$ ) και το είδωλο έχει τις ίδιες διαστάσεις με το αντικείμενο.

# Δραστηριότητες • Ερωτήσεις • Ασκήσεις

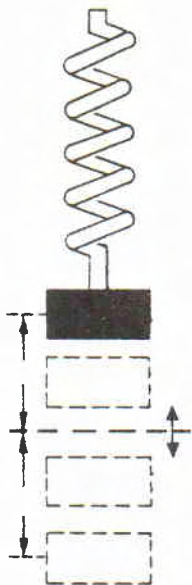
Να θεωρηθούν γνωστά: Η ταχύτητα του φωτός στο κενό  $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , ο δείκτης διάθλασης του αέρα  $n = 1$ , η βαρυτική επιτάχυνση  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . Οι φακοί θεωρούνται λεπτοί. Το φως —εφόσον δεν αναφέρεται κάτι διαφορετικό— θα θεωρείται μονοχρωματικό.

## Δραστηριότητες



**5.1. Στο εργαστήριο.** Από το άκρο ενός κατακόρυφου ελατηρίου κρεμάμε ένα σώμα το οποίο έχουμε προηγουμένως

ζυγίσει. Στη συνέχεια το εκτρέπουμε από τη θέση ισορροπίας και μετράμε την περίοδο ( $T$ ) της κατακόρυφης ταλάντωσής του. Κάνουμε μια ακόμη μέτρηση για διαφορετικό πλάτος ταλάντωσης. Επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις για σώματα διαφορετικών μαζών και κάνουμε τη γραφική παράσταση  $T^2 = f(m)$  από την οποία υπολογίζουμε τη σταθερά του ελατηρίου.



**5.2. Στο εργαστήριο.** Μετράμε την περίοδο ( $T$ ) ενός απλού εκκρεμούς. Επαναλαμβάνουμε τις μετρήσεις μεταβάλλοντας το μήκος ( $l$ ) του εκκρεμούς, κάνουμε τη γραφική παράσταση  $T^2 = f(l)$  από την οποία υπολογίζουμε την τιμή ( $g$ ) της βαρυτικής επιτάχυνσης.

**5.3. Χρησιμοποιώντας το «κιβώτιο κυμά-**

των» του σχολικού εργαστηρίου προσπαθήστε να δημιουργήσετε το φαινόμενο συμβολής των κυμάτων.

**5.4. Κατά τη διάθλαση σε ειδικό γυαλί μετρήθηκαν οι παρακάτω τιμές των γωνιών πρόσπτωσης ( $\theta_1$ ) και των γωνιών διάθλασης ( $\theta_2$ )**

$\theta_1$  (σε μοίρες)  $3^\circ \ 6^\circ \ 9^\circ \ 15^\circ \ 20^\circ \ 30^\circ \ 40^\circ \ 60^\circ \ 80^\circ$

$\theta_2$  (σε μοίρες)  $2^\circ \ 4^\circ \ 6^\circ \ 10^\circ \ 13^\circ \ 19^\circ \ 25^\circ \ 36^\circ \ 41^\circ$

Κάνετε σε χαρτί μιλλιμετρέ τις γραφικές παραστάσεις (i)  $\theta_2 = f(\theta_1)$  και (ii)  $\eta \mu \theta_2 = f(\eta \mu \theta_1)$ . Διατυπώστε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγετε.

**5.5. Χρησιμοποιώντας ένα λεπτό συγκλίνοντα φακό πήραμε τις παρακάτω μετρήσεις για τις αποστάσεις αντικειμένου ( $\alpha$ ) και πραγματικού ειδώλου ( $\beta$ ) από το φακό.**

$\alpha$  (σε cm) 80 60 40 30 25

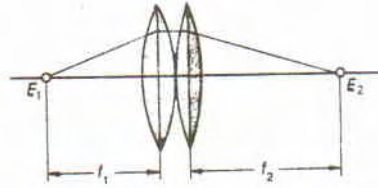
$\beta$  (σε cm) 27 30,5 39,5 60,2 99,5

Κάνετε τη γραφική παράσταση  $1/\beta = f(1/\alpha)$  και βάσει αυτής υπολογίστε την εστιακή απόσταση του φακού.

**5.6. Διαθέτουμε ένα συγκλίνοντα φακό ισχύος  $4 \text{ m}^{-1}$  και ένα γραμμικό αντικείμε-**

νο κάθετο στον κύριο άξονα το οποίο για διάφορες θέσεις-αποστάσεις ( $\alpha$ ) από το φακό μας δίνει πραγματικό είδωλο κάθετο στον κύριο άξονα. Χρησιμοποιώντας μιλιμετρέ χαρτί κάνετε τη γραφική παράσταση  $\mu=f(\alpha)$  όπου « $\alpha$ » η εκάστοτε απόσταση του αντικειμένου από το φακό και « $\mu$ » η αντίστοιχη γραμμική μεγέθυνση.

**5.7. Στο εργαστήριο.** Βρείτε ένα τρόπο ώστε να αποδείξετε πειραματικά ότι η



ισχύς ενός συστήματος συγκλινόντων φακών σε επαφή είναι ίση με το άθροισμα των ισχύων των δύο φακών.

## Ερωτήσεις



**5.8.** Ένας τροβαδούρος παίζει ένα κορμάτι στην κιθάρα του και ο «αντίπαλος» τού απαντάει με πυροβολισμούς. Ποια από τα ανταλλασσόμενα μηνύματα μεταβιβάζονται με τη μορφή κύματος και ποια μεταβιβάζονται με άλλη μορφή;

**5.9.** Ποια είναι τα βασικά γνωρίσματα ενός κύματος;

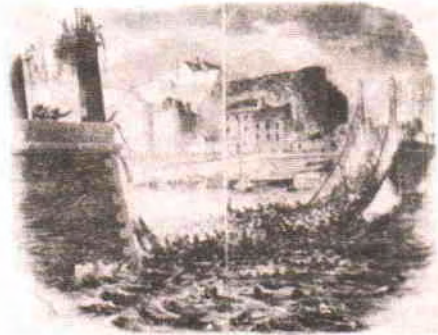
**5.10.** Η μέτρηση της μάζας ενός σώματος βασίζεται συνήθως στη βαρύτητα. Πως θα μπορούσαμε να μετρήσουμε τη μάζα ενός σώματος αν υποθέσουμε ότι βρίσκμαστε εκτός πεδίου βαρύτητας, διαθέτοντας ένα ελατήριο γνωστής σταθεράς και ένα χρονόμετρο;

**5.11.** Τι εννοούμε λέγοντας ότι «ένας αρμονικός ταλαντωτής έχει δυναμική ενέργεια»;

**5.12.** Τι θα συμβεί στην περίοδο ενός εκκρεμούς αν το μεταφέρουμε από τη Νορβηγία στην Κένυα;

**5.13.** Το έτος 1850 η γέφυρα του ποτα-

μού Maine (Μαϊν) κατέρρευσε καθώς ένας λόχος στρατιωτών διατηρώντας



στρατιωτικό βηματισμό περνούσε από πάνω της. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί συνέβη αυτό το γεγονός;

**5.14.** Περιγράψτε την αμείωτη ηλεκτρομαγνητική ταλάντωση ενός κυκλώματος Thomson, στη γλώσσα της ενέργειας.

**5.15.** Πώς εννοούμε τη γενίκευση στον όρο «ταλάντωση»;

**5.16.** Όλα τα κύματα έχουν μήκος κύματος;

**5.17.** Ποια είναι η προϋπόθεση ώστε ένα κύμα χώρου να είναι σφαιρικό;

**5.18.** Εντοπίστε τις σημαντικότερες κατά τη γνώμη σας διαφορές ανάμεσα σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα και σε κύματα ελαστικότητας.

**5.19.** Ποια είναι τα «αντικειμενικά στοιχεία» τα οποία δημιουργούν το γνώρισμα της χροιάς;

**5.20. Η ιδέα που έχουμε για τη φωνή μας.** Όποιος ακούει τη φωνή του από μαγνητόφωνο την αντιλαμβάνεται πιο λεπτή από ότι νόμιζε. Γιατί άραγε συμβαίνει αυτό; (Απ. Το μεγαλύτερο μέρος του ήχου που ακούμε καθώς μιλάμε —και κυρίως οι χαμηλές συχνότητες— προέρχεται από το πέρασμα του ήχου μέσα από τα οστά του κρανίου μας. Το μαγνητόφωνο καταγράφει τη φωνή μας απαλλαγμένη από τις χαμηλές συχνότητες).

**5.21.** Περιγράψτε πως μεταβιβάζεται ο ήχος σε μια ραδιοφωνική εκπομπή.

**5.22.** Κατά το 18ο αιώνα η σωματιδιακή θεωρία για το φως επεκράτησε εις βάρος της κυματικής. Ποιος ήταν ο σημαντικότερος κατά τη γνώμη σας λόγος γι' αυτή την επικράτηση;

**5.23. Η ντουντούκα και η περίθλαση.** Ο ήχος της φωνής μας «βγαίνοντας από το στόμα» διαχέεται ομοιόμορφα προς κάθε κατεύθυνση. Όταν χρησιμοποιούμε ντουντούκα ο ήχος ακούγεται ισχυρότερος προς την κατεύθυνση που είναι στραμμένο το χωνί. Γιατί άραγε;

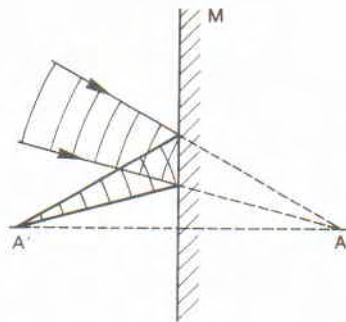
**5.24. Η νευτωνική αυθεντία υπό αμφισβήτηση.** Κατά το 19ο αιώνα η σωματιδιακή (νευτωνική) θεωρία για το φως κλονίστηκε και τελικά παραμερίστηκε

από την κυματική θεωρία. Γιατί συνέβη αυτό;

**5.25.** Πως μπορεί να μετρηθεί το μήκος κύματος μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας;

**5.26.** Κατά τι διαφέρει η κατοπτρική ανάκλαση από τη διάχυση;

**5.27.** Πάνω σε επίπεδο καθρέφτη προσπίπτει συγκλίνουσα φωτεινή δέσμη προερχόμενη από κάποιο φακό. Η εστία της η οποία βρίσκεται «πίσω» από τον καθρέφτη αποτελεί ένα «φανταστικό αντικείμενο». Αποδείξτε ότι η δέσμη μετά την ανάκλαση θα είναι και πάλι συγκλί-



νουσα. Μπορούμε να ισχυριστούμε ότι σχηματίστηκε ένα πραγματικό είδωλο. Αποδείξτε ότι το είδωλο αυτό είναι συμμετρικό ως προς το αντικείμενο. Πώς μπορούμε να ανιχνεύσουμε το πραγματικό αυτό είδωλο πειραματικά;

**5.28.** Σε ποια από τα συμπεράσματά του για τη διάθλαση είχε δίκιο ο Πτολεμαίος και σε ποια είχε άδικο;

**5.29. Ήταν όλοι Ολλανδοί.** Ο Snell, ο Huygens, ο Lippershey (Λίπερσι) ο κατασκευαστής του πρώτου τηλεσκοπίου, ο εφευρέτης του μικροσκοπίου Leeuwenhoek (Λέβενχουκ) ήταν όλοι Ολλανδοί. Πιστεύετε ότι πρόκειται για σύμπτωση; Δικαιολογήστε την απάντησή.



**5.30.** Το μήκος κύματος μεταβάλλεται κατά τη διάθλαση; Τι συμβαίνει με τη συχνότητα;

**5.31.** Πώς ορίζεται και από τι εξαρτάται ο απόλυτος δείκτης διάθλασης;

**5.32.** Πως μπορούμε ξεκινώντας από την αρχή Huygens να οδηγηθούμε στο δεύτερο νόμο της διάθλασης;

**5.33.** Μια ηχητική ακτίνα προερχόμενη από τον αέρα προσπίπτει στην επιφάνεια του νερού. Η διαθλώμενη ακτίνα θα «πλησιάσει» προς την κάθετο ή θα απομακρυνθεί από αυτήν;

**5.34.** Μια πισίνα μας φαίνεται πιο βαθιά όταν είναι άδεια, παρά όταν είναι γεμάτη με νερό. Γιατί;

**5.35.** Είναι δυνατόν ένας λεπτός αμφίκοι-

λος φακός να λειτουργεί ως συγκεντρωτικός φακός;

**5.36.** Γιατί χρειαζόμαστε μάσκα για να βλέπουμε κάτω από τη θάλασσα; Δώστε μια απάντηση στο ερώτημα παίρνοντας υπ' όψη ότι: (α) Το γεγονός ότι βλέπουμε καθαρά σημαίνει πως σχηματίζεται σαφές είδωλο πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. (β) Το είδωλο αυτό προέρχεται από διάθλαση του φωτός στο φακό του ματιού μας. (γ) Ένα μεγάλο μέρος αυτής της διάθλασης συντελείται στην επιφάνεια του ματιού μας. (δ) Ο δείκτης διάθλασης των υλικών του ματιού είναι περίπου ίσος με αυτόν του νερού.

**5.37.** Διαθέτουμε μια σημειακή φωτεινή πηγή, ένα επίπεδο, ένα κοίλο, κι ένα κυρτό κάτοπτρο. Διαθέτουμε επίσης ένα συγκλίνοντα και έναν αποκλίνοντα φακό. Προτείνετε δύο τρόπους με τους οποίους μπορούμε να δημιουργήσουμε μια κυλινδρική δέσμη φωτός.

## Ασκήσεις

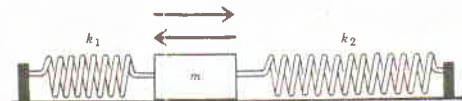


**5.38.** Ένα υλικό σημείο κινείται σε περιφέρεια κύκλου με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Αποδείξτε ότι η προβολή του σε μια οποιαδήποτε διάμετρο του κύκλου εκτελεί (απλή) αρμονική ταλάντωση με κυκλική συχνότητα ίση —κατά μέτρο— με τη γωνιακή ταχύτητα της κυκλικής κίνησης.

**5.39.** Η συχνότητα της αρμονικής ταλάντωσης ενός σώματος είναι 2 Hz και το πλάτος 4 cm. Υπολογίστε το μέτρο της ταχύτητας του σώματος κατά τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες η απομά-

κρυνση είναι (i)  $x_1 = +2$  cm (ii)  $x_2 = -3$  cm.

**5.40.** Ένα σώμα μάζας 100 g βρίσκεται πάνω σε οριζόντια επιφάνεια και συνδέεται —όπως φαίνεται και στη σχηματική παράσταση— με δύο ελατήρια. Υπολογί-



στε την περίοδο της ταλάντωσης την οποία (εφ' όσον φυσικά ενεργοποιηθεί) θα εκτελέσει πάνω στην οριζόντια επιφάνεια χωρίς τριβές. Θεωρήστε πως

όταν το σώμα βρίσκεται στη θέση ισορροπίας τα δύο ελατήρια έχουν το φυσικό τους μήκος. Δίνονται οι σταθερές των δύο ελατηρίων  $k_1=16\text{N/m}$  και  $k_2=8\text{N/m}$ .

**5.41.** Στο ελεύθερο άκρο ενός κατακόρυφα στερεωμένου ελατηρίου κρεμάμε ένα σώμα μικρών διαστάσεων η μάζα του οποίου είναι 500 g. Διαπιστώνουμε ότι κατά την ισορροπία του συστήματος το ελατήριο έχει επιμηκυνθεί κατά 2 cm. Ξεκρεμάμε αυτό το σώμα και κρεμάμε στη θέση του ένα άλλο σώμα μάζας 800 g το οποίο ενεργοποιούμε κατά τρόπο ώστε να εκτελέσει κατακόρυφη αμείωτη αρμονική ταλάντωση πλάτους 1 cm. Υπολογίστε τη μέγιστη ταχύτητα και τη μέγιστη επιτάχυνση του σώματος κατά τη διάρκεια της ταλάντωσης. Υπολογίστε επίσης τη δυναμική ενέργεια του ταλαντωτή κατά τη στιγμή που απέχει 0,5 cm από τη θέση ισορροπίας του.

**5.42.** Ένα βάθρο εκτελεί κατακόρυφη αρμονική ταλάντωση πλάτους 5 cm έχοντας πάνω του ένα μικρό αντικείμενο Σ. Παρατηρούμε ότι αν αυξήσουμε τη συχνότητα της ταλάντωσης διατηρώντας το πλάτος σταθερό, για μια ορισμένη τιμή συχνότητας το αντικείμενο αποχωρίζεται από το βάθρο. Υπολογίστε την τιμή αυτής της συχνότητας.

**5.43.** Κατά τη διάρκεια μιας αμείωτης ηλεκτρομαγνητικής ταλάντωσης συχνότητας 5 kHz η ολική ενέργεια του κυκλώματος Thomson είναι  $10^{-5}\text{J}$ . Το πηνίο του κυκλώματος έχει επαγωγικότητα 1 mH. Υπολογίστε (i) το πλάτος της έντασης του εναλλασσόμενου ρεύματος (ii) την ένταση του ρεύματος τη στιγμή κατά την οποία η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου του πυκνωτή είναι  $6\cdot 10^{-6}\text{J}$  και (iii) τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Θεωρήστε  $\pi^2=10$ .

**5.44.** Η εξίσωση ενός αρμονικού κύματος

είναι  $\xi=0,1\eta\mu\pi(2t-0,01x)$  στο Διεθνές Σύστημα (S.I.). Ζητούνται το πλάτος της ταλάντωσης κάθε σημείου του μέσου, η ταχύτητα διάδοσης του κύματος και το μήκος κύματος.

**5.45.** Η ταλάντωση ενός υλικού σημείου Α ελαστικού μέσου περιγράφεται με την εξίσωση  $\xi=0,03\eta\mu 5\pi t$  (S.I.). Υποθέτουμε ότι οι παλμική αυτή κίνηση μεταδίδεται στο ελαστικό μέσο με ταχύτητα 5 m/s. Υπολογίστε την απομάκρυνση που έχει κατά τη χρονική στιγμή  $t=0,3\text{s}$  ένα υλικό σημείο Μ που απέχει από το Α 50 cm.

**5.46.** Η ταχύτητα διάδοσης ενός κύματος είναι 360 m/s και η συχνότητά του 500Hz. Η φάση ενός σημείου Σ του μέσου σε κάποια χρονική στιγμή « $t_0$ » είναι « $\pi/8$ ». α) Πόσο απέχει το σημείο Σ από το γειτονικότερο σημείο Σ' (της ίδιας κυματικής ακτίνας) το οποίο κατά τη στιγμή « $t_0$ » παρουσιάζει φάση « $\pi/6$ ». (β) Ποιες θα είναι οι τιμές των φάσεων των Σ και Σ' κατά τη στιγμή « $t_0+\Delta t$ » όπου  $\Delta t=10^{-3}\text{s}$ .

**5.47.** Ένα μεγαφώνιο το οποίο μπορούμε να παρομοιάσουμε με σημειακή πηγή S τροφοδοτείται από γεννήτρια χαμηλών συχνοτήτων. Η συχνότητα των ηλεκτρομαγνητικών ταλαντώσεων στην είσοδο του μεγαφώνου είναι ελεγχόμενη. Τα παραγόμενα ηχητικά κύματα μπορούν να θεωρηθούν σφαιρικά. Η ταχύτητα της διάδοσής τους είναι 340 m/s. (α) Σε ένα σημείο Μ που απέχει 2 cm από την πηγή S τοποθετούμε ένα μικρόφωνο το οποίο επίσης θεωρούμε σημειακό. Για ποιες τιμές της συχνότητας οι ταλαντώσεις του μεγαφώνου και του μικροφώνου βρίσκονται σε συμφωνία φάσης; (β) Σταθεροποιούμε τη συχνότητα σε 510 Hz. Προσδιορίστε τις θέσεις των σημείων που πάλλονται σε συμφωνία φάσης με το Μ. Περιοριστείτε στο τμήμα SM (γ) Μεταβάλλουμε τη συχνότητα σε 550 Hz. Ποιες είναι οι γειτονικές θέσεις (στο τμή-

μα SM) στις οποίες πρέπει να μεταφέρουμε το μικρόφωνο για να ανιχνεύσουμε ηχητική ταλάντωση σε συμφωνία φάσης με την πηγή;

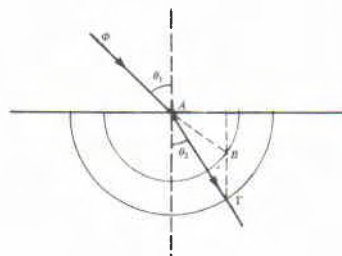
**5.48.** Σε δύο σημεία A και B μιας ήρεμης επιφάνειας νερού δημιουργούνται δύο αρμονικές ταλαντώσεις της ίδιας συχνότητας (5 Hz) και του ίδιου πλάτους 0,5 cm. Σε ένα σημείο M της επιφάνειας του νερού τοποθετείται ένα μικρό κομμάτι φελλού. Το σημείο M απέχει από τα A και B αποστάσεις  $r_1=28\text{cm}$  και  $r_2=44\text{cm}$ , αντίστοιχα. Η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων επιφανειακών κυμάτων είναι 0,4 m/s. Θεωρούμε ως αρχή των χρόνων μια χρονική στιγμή κατά την οποία τα ταλαντευόμενα σημεία A και B βρίσκονται στη θέση ισορροπίας κινούμενα προς τον θετικό ημιάξονα. Ζητείται η εξίσωση που παρέχει τις απομακρύνσεις του M συναρτήσει του χρόνου.

**5.49.** Υποθέστε ότι διαθέτουμε μια διάταξη δημιουργίας κροσσών συμβολής παρόμοια με αυτή που χρησιμοποίησε ο Young και ότι χρησιμοποιούμε μονοχρωματικό φως άγνωστου μήκους κύματος. Οι δύο σχισμές απέχουν 2 mm και το διάφραγμα απέχει από το πέτασμα 140 cm. Διαπιστώνουμε ότι ο δέκατος στη σειρά φωτεινός κροσσός απέχει από τον κεντρικό φωτεινό κροσσό 3,8 mm. Πώς μπορούμε να υπολογίσουμε το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιήσαμε;

**5.50. Βυθομέτρηση με υπερήχους.** Για να υπολογίσουμε το βάθος ενός θαλάσσιου βυθού εκπέμπουμε μια δέσμη υπερήχων 100.000 Hz η οποία ανακλώμενη στο βυθό επιστρέφει μετά από χρόνο 1,4s από τη στιγμή της εκπομπής. Αν θεωρηθεί γνωστό ότι όλα τα «ηχητικά» κύματα διαδίδονται στο νερό με ταχύτητα 1.440 m/s υπολογίστε (α) το μήκος κύματος

των υπερήχων και (β) το βάθος του βυθού.

**5.51. Μια γεωμετρική «κατασκευή».** Υποθέτουμε ότι ο δείκτης διάθλασης ενός διαφανούς υλικού (ως προς τον αέρα) είναι «n». Θεωρούμε μια επίπεδη επιφάνεια του διαφανούς αυτού σώματος σε σημείο A της οποίας προσπίπτει φωτεινή μονοχρωματική ακτίνα ΦΑ προερχόμενη από τον αέρα. Με κέντρο το σημείο



A και τυχαία ακτίνα R γράφουμε στο επίπεδο πρόσπτωσης και προς το μέρος του διαφανούς σώματος ημιπερίφερεια. Με το ίδιο κέντρο και προς το ίδιο μέρος γράφουμε μια ακόμα ημιπερίφερεια ακτίνας  $(AE)=n(AD)$ ,  $R'=nR$ . Η προέκταση της ΦΑ συναντά την πρώτη ημιπερίφερεια στο σημείο B. Από το B φέρομε ευθεία κάθετο στην επίπεδη διαθλαστική επιφάνεια. Η προέκταση αυτής της καθέτου τέμνει τη δεύτερη ημιπερίφερεια στο σημείο Γ. Να αποδείξετε ότι η ευθεία ΑΓ έχει τη διεύθυνση της διαθλώμενης ακτίνας.

**5.52.** Το μήκος κύματος μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας στο κενό είναι  $58,9 \cdot 10^{-6}\text{ cm}$ . Ποια είναι η συχνότητά της; Πόσο θα είναι το μήκος κύματος στο νερό του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι 1,33;

**5.53. Η «περιπέτεια» μιας φωτεινής ακτίνας.** Στο μέσον της πάνω επιφάνειας ενός γυάλινου κύβου προσπίπτει μια φωτεινή ακτίνα μονοχρωματικού φωτός

υπό γωνία  $45^\circ$  σε τρόπο ώστε το επίπεδο πρόσπτωσης να είναι παράλληλο προς μία πλευρική έδρα του κύβου. Υπολογίστε την εκτροπή της ακτίνας μετά την τελική της έξοδο από τον κύβο. Ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού να θεωρηθεί ίσος με  $\sqrt{2}$ . Δίνεται επίσης ότι  $\varepsilon_{\text{φ}26^\circ 35'} = 0,5$ .

**5.54. Η βελόνα που «χάθηκε».** Φανταστείτε ότι μέσα σε ένα δοχείο με αδιαφανή τοιχώματα βρίσκεται ένα διαφανές υγρό. Στην επιφάνειά του επιπλέει ένας αδιαφανής επίπεδος κυκλικός δίσκος από φελλό. Η ακτίνα του κυκλικού αυτού δίσκου είναι 10 cm. Στο κέντρο του (Ο) και κάθετα προς το επίπεδό του είναι μπηγμένη μια βελόνα η οποία βρίσκεται κατακόρυφη βυθισμένη μέσα στο υγρό. Διαπιστώνεται ότι το άκρο (Μ) της βελόνας παύει να φαίνεται δια μέσου της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού, όταν το μήκος ΟΜ γίνει μικρότερο από 7,5 cm. Από τα στοιχεία αυτά να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του υγρού.

**5.55.** Ένα πρίσμα έχει διαθλαστική γωνία  $30^\circ$ . Υπολογίστε την εκτροπή μιας μονοχρωματικής φωτεινής ακτίνας η οποία προσπίπτει κάθετα στη μία έδρα του. Δίνεται ότι ο δείκτης διάθλασης του διαφανούς υλικού του πρίσματος για τη συγκεκριμένη ακτινοβολία είναι ίσος με  $\sqrt{2}$ .

**5.56.** Η διαθλαστική γωνία ενός πρίσματος είναι  $60^\circ$ . Να υπολογίσετε τη μικρότερη δυνατή γωνία πρόσπτωσης μιας μονοχρωματικής φωτεινής ακτίνας ώστε στη δεύτερη έδρα του πρίσματος η ακτίνα αυτή να εξέλθει από το πρίσμα, να μην υποστεί δηλαδή ολική ανάκλαση. Ο δείκτης διάθλασης του διαφανούς υλικού του πρίσματος για τη συγκεκριμένη ακτινοβολία είναι ίσος με  $\sqrt{2}$ .

**5.57.** Πάνω στην επιφάνεια πυριτυάλου

προσπίπτει μια ακτίνα λευκού φωτός υπό γωνία  $60^\circ$ . Να υπολογίσετε τη γωνία που σχηματίζουν η ερυθρά και η ιώδης ακτίνα μετά τη διάθλαση. Η ταχύτητα διάδοσης της ερυθράς ακτινοβολίας στην πυριτυάλο είναι  $1,849 \cdot 10^8$  m/s, ενώ η ταχύτητα διάδοσης της ιώδους ακτινοβολίας στο ίδιο υλικό είναι  $1,804 \cdot 10^8$  m/s.

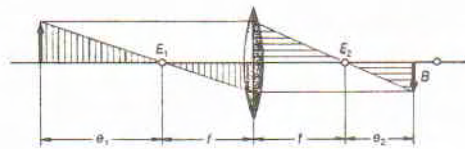
**5.58.** Θέλουμε να κατασκευάσουμε έναν αμφίκυρτο συμμετρικό φακό εστιακής απόστασης 6 cm. Το γυαλί που χρησιμοποιούμε έχει δείκτη διάθλασης 1,5. Ποιες θα πρέπει να είναι οι ίσες μεταξύ τους τιμές των δύο ακτίνων καμπυλότητας;

**5.59.** Η μία από τις επιφάνειες ενός φακού είναι κυρτή με ακτίνα καμπυλότητας 20 cm, ενώ η άλλη επιφάνεια είναι κοίλη με ακτίνα καμπυλότητας 30 cm. Υπολογίστε την εστιακή απόσταση του φακού (α) όταν βρίσκεται στον αέρα και (β) όταν βρίσκεται στο νερό. Το υλικό του φακού παρουσιάζει δείκτη διάθλασης  $n=3/2$ . Ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι  $n'=4/3$ .

**5.60.** Κατά την εποχή του Νεύτωνα η μελέτη των φακών έχει προχωρήσει αρκετά. Ο λεγόμενος «τύπος του Νεύτωνα»

$$e_1 e_2 = f^2$$

συνδέει τις αποστάσεις  $e_1$  και  $e_2$  αντικειμένου και ειδώλου από τις αντίστοιχες



δύο εστίες του φακού, με την εστιακή απόσταση ( $f$ ) του φακού αυτού. Να αποδείξετε ότι ο τύπος του Νεύτωνα είναι ισοδύναμος με τον τύπο

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

στον οποίο τα  $\alpha$  και  $\beta$  παριστάνουν τις αποστάσεις αντικειμένου και ειδώλου από το φακό.

**5.61.** Ένα κατακόρυφο γραμμικό αντικείμενο απέχει 5 cm από ένα κατακόρυφο πέτασμα. Προσδιορίστε τη θέση στην οποία πρέπει να τοποθετήσουμε ένα συγκλίνοντα φακό ώστε πάνω στο πέτασμα να προβληθεί το από διάθλαση είδωλο του αντικειμένου και να είναι οκταπλάσιο από αυτό. Υπολογίστε επίσης την εστιακή απόσταση του φακού που θα χρησιμοποιήσουμε.

**5.62.** Ένα γραμμικό φωτεινό αντικείμενο ύψους 2 cm απομακρύνεται από ένα συγκλίνοντα φακό παραμένοντας κάθετο στον κύριο άξονά του. Υπολογίστε το είδος, τη θέση και το μέγεθος του ειδώλου που σχηματίζεται αν η απόσταση του αντικειμένου από το φακό είναι 4 cm, 6 cm, 10 cm και 12 cm. Η εστιακή απόσταση του φακού είναι 5 cm. Κάνετε τους αντίστοιχους υπολογισμούς αν ο φακός είναι αποκλίνων με ίση κατ' απόλυτο τιμή εστιακή απόσταση.

**5.63.** Μια σημειακή φωτεινή πηγή απέχει 50 cm από ένα πέτασμα. Ανάμεσά τους βρίσκεται ένας συγκεντρωτικός φακός ο κύριος άξονας του οποίου είναι κάθετος στο πέτασμα. Παρατηρούμε ότι για δύο θέσεις του φακού οι οποίες απέχουν μεταξύ τους 20 cm παίρνουμε ευκρινές είδωλο πάνω στο πέτασμα. Πόση είναι η ισχύς του φακού;

**5.64. Φωτογραφίζοντας μια λεύκα.** Φωτογραφίσαμε μια λεύκα με φωτογραφική μηχανή ο φακός της οποίας είχε εστιακή απόσταση 20 cm. Πάνω στη

φωτογραφική πλάκα το δέντρο είχε ύψος 15 cm. Υπολογίστε το ύψος της λεύκας αν είναι γνωστό ότι η φωτογραφική πλάκα βρισκόταν 0,25 cm πίσω από την κύρια εστία του φακού.

**5.65.** Μια κυλινδρική δέσμη ερυθρού φωτός προσπίπτει σε συγκλίνοντα φακό παράλληλη προς τον κύριο άξονα και εστιάζει σε απόσταση 30 cm από αυτόν. Τι θα είχε συμβεί αν ήταν δέσμη ιώδους ακτινοβολίας; Δίνονται οι δείκτες διάθλασης του υλικού του φακού για την ερυθρά και την ιώδη ακτινοβολία  $n_e=1,60$  και  $n_i=1,68$  αντίστοιχα.

**5.66.** Μια κυλινδρική δέσμη μονοχρωματικού φωτός προσπίπτει σε αποκλίνοντα φακό ( $f_1=-5$  cm) παράλληλα προς τον κύριο άξονα. Πίσω από τον αποκλίνοντα φακό βρίσκεται συγκλίνων φακός με εστιακή απόσταση  $f_2=15$  cm. Οι κύριοι άξονες των δύο φακών συμπίπτουν. Η δέσμη, μετά τις διαθλάσεις στους δύο φακούς εξερχόμενη από τον συγκλίνοντα είναι και πάλι κυλινδρική και παράλληλη προς τον κοινό κύριο άξονα. Ζητείται η απόσταση των δύο φακών.

**5.67.** Οι δύο συγκλίνοντες φακοί (αντικειμενικός και προσοφθάλμιος) ενός αστρονομικού τηλεσκοπίου έχουν εστιακές αποστάσεις 12 cm και 2 cm αντίστοιχα και κοινό κύριο άξονα. Η απόστασή τους ρυθμίζεται έτσι ώστε μια κυλινδρική φωτεινή δέσμη που πέφτει στον πρώτο (αντικειμενικό φακό) παράλληλη προς τον κοινό κύριο άξονα να εξέλθει από τον δεύτερο (προσοφθάλμιος) φακό διατηρούμενη επίσης παράλληλη προς τον κοινό κύριο άξονα. Πόσο απέχουν οι δύο φακοί;



## Ντοκουμέντο 1

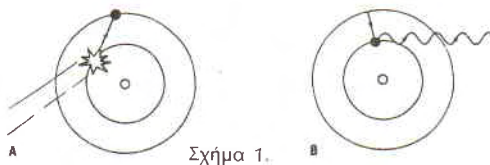
**Απόσπασμα από το βιβλίο «Φυσική για ανθρώπους που νομίζουν ότι δεν τους αρέσει η φυσική»**

### Λείζερ

Ας υποθέσουμε ότι επισκέπτες από άλλους πλανήτες προσπαθούσαν να κατανοήσουν το δικό μας πολιτισμό αναλύοντας κινηματογραφικά έργα, τηλεοπτικά προγράμματα και διαφημίσεις. Είναι πολύ πιθανό ότι από τις διαφημίσεις θα κατέληγαν στο συμπέρασμα ότι τα κυριότερα προβλήματα που μας απασχολούν είναι τα βρόμικα ρούχα, η δυσσομία από τον ιδρώτα και τα ακατάστατα μαλλιά. Από πολλά έργα πάλι θα συμπεραίναν ότι στόχος της ανθρωπότητας είναι η ανακάλυψη του τελικού όπλου καταστροφής. Η επιστημονική φαντασία έχει αρκετές φορές καταφέρει να είναι ακριβής στην πρόβλεψη του μέλλοντος και σε πολλά έργα επιστημονικής φαντασίας, το τελικό αυτό όπλο είναι μια ακτίνα θανάτου που εξαερώνει και εξαφανίζει τους «κακούς». Ευτυχώς δεν έχουμε ακόμα τέτοιο όπλο. Το πλησιέστερο πράγμα που έχουμε εφεύρει ως τώρα είναι το laser (λείζερ), μια ενδιαφέρουσα επινόηση με ειρηνικές κυρίως χρήσεις, τουλάχιστον μέχρι σήμερα\*.

**Η ανάπτυξη του λείζερ.** Οι θεωρητικές βάσεις για την ανάπτυξη του λείζερ μπήκαν με την εργασία των A. L. Schalow και C. H. Townes το 1958, ενώ ο πρώτος λείζερ κατασκευάστηκε από τον T. H. Maiman και λειτούργησε το 1960. Η είδηση έκανε πάταγο και με όλες τις υποσχέσεις που μπορεί να παρουσιάζει μια τέτοια ανακάλυψη, το νέο μεταφέρθηκε στα πέρατα του κόσμου από τα μέσα μαζικής επικοινωνίας. Πολλές από τις προσδοκίες δεν πραγματοποιήθηκαν —δεν έχουμε ακόμα ακτίνες θανάτου— αλλά λειτουργούν σήμερα εκατοντάδες χιλιάδες λείζερ σε πρακτικές εφαρμογές και οι εξελίξεις συνεχίζονται. Η λέξη LASER προέρχεται από το Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, που σημαίνει «Ενίσχυση φωτός από σύμφωνη εκπομπή ακτινοβολίας». Θα αρχίσουμε από το τέλος, από τη σύμφωνη δηλαδή εκπομπή ακτινοβολίας.

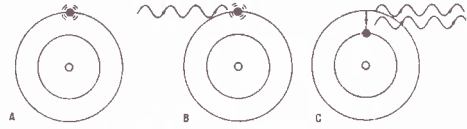
**Σύμφωνη εκπομπή ακτινοβολίας.** Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί ένα άτομο να εκπέμψει φωτεινή ενέργεια είναι ο εξής: Μια πηγή ενέργειας μπορεί να μεταφέρει ένα ηλεκτρόνιο από τη θεμελιώδη τροχιά του σε μια ανώτερη (σχήμα 1). Στη συνέχεια το ηλεκτρόνιο επανέρχεται μόνο του στην αρχική του κατάσταση, αποβάλλοντας την πρόσθετη ενέργεια με τη μορφή ενός φωτονίου. Ο χρόνος που παραμένει το ηλεκτρόνιο στην κατάσταση διέγερσης είναι εξαιρετικά βραχύς (περίπου  $10^{-8}$ s), σε



Σχήμα 1.

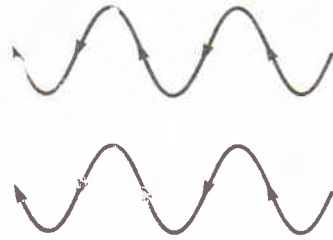
\* Το ντοκουμέντο προέρχεται από βιβλίο που κυκλοφόρησε το 1974.

ορισμένες όμως περιπτώσεις, το ηλεκτρόνιο «κολλάει», δυσκολεύεται δηλαδή να επανέλθει στη θεμελιώδη τροχιά του παραμένοντας στην ανώτερη για χρόνους που φθάνουν τα  $10^{-3}$ s ή και τα  $10^{-2}$ s. Βέβαια ένα εκατοστό του δευτερολέπτου μπορεί να μας φαίνεται μηδαμινό, αλλά είναι ένα εκατομμύριο φορές περισσότερο από το χρονικό διάστημα που παραμένει συνήθως το ηλεκτρόνιο στην κατάσταση διεγερσης.



Σχήμα 2.

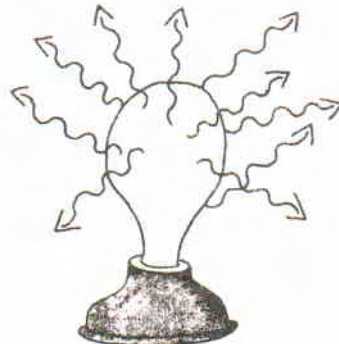
Υπάρχουν πολλοί τρόποι με τους οποίους ένα «κολλημένο» ηλεκτρόνιο μπορεί να απελευθερωθεί και να ξαναγυρίσει στην αρχική του κατάσταση, αλλά ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό σε ένα λέιζερ είναι μια διαδικασία, γνωστή με το όνομα «σύμφωνη εκπομπή ακτινοβολίας». Ας εξετάσουμε το άτομο του σχήματος 2Α. Το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε κατάσταση διεγερσης και δυσκολεύεται να ξαναγυρίσει στην κατώτερη τροχιά. Αν μπορούσε θα το έκανε απελευθερώνοντας ταυτόχρονα ένα φωτόνιο ερυθρού φωτός. Στο σχήμα 2Β βλέπουμε ένα άλλο φωτόνιο που τυχαίνει να έχει το ίδιο μήκος κύματος με το «ερυθρό» φωτόνιο που θα απελευθερωνόταν από το ηλεκτρόνιό μας κατά την επάνοδό του στην κατώτερη τροχιά. Το δεύτερο λοιπόν φωτόνιο παίζει ένα ρόλο «καλού Σαμαρείτη». Συγκρούεται με το ηλεκτρόνιο, το απελευθερώνει και το ηλεκτρόνιο ξαναγυρίζει στην κατώτερη τροχιά του εκπέμποντας συγχρόνως και το φωτόνιο του ερυθρού φωτός. Τα δύο φωτόνια ταξιδεύουν τώρα μαζί. Ο όρος «ταξιδεύουν μαζί» δεν είναι τυχαίος. Τα δύο φωτόνια εκτός από την ίδια συχνότητα έχουν και την ίδια φάση. Έτσι η σύμφωνη εκπομπή έχει δύο σημαντικά αποτελέσματα. Τα δύο φωτόνια (i) κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση και (ii) βρίσκονται σε συμφωνία φάσης.



Σχήμα 3. Δύο φωτόνια σε συμφωνία φάσης.

Αν τώρα τα δύο αυτά φωτόνια συναντήσουν ένα άλλο «κολλημένο» ηλεκτρόνιο που χρειάζεται βοήθεια το προκαλούν ώστε κι αυτό με τη σειρά του να εκπέμψει ένα ακόμα φωτόνιο και να έχουμε έτσι τρία φωτόνια με το ίδιο μήκος κύματος και σε συμφωνία φάσης. Αυτό επαναλαμβάνεται και καταλήγουμε σε φαινόμενο χιονοστιβάδας που είναι ουσιώδες για τη λειτουργία του λέιζερ.

**Το κοινό φως. Φωτόνια που δεν συμβαδίζουν.** Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη διαφορά της ακτινοβολίας λέιζερ από το συνηθισμένο φως ας δούμε πώς εκπέμπεται το συνηθισμένο φως. Όταν κλείσουμε το κύκλωμα, το ηλεκτρικό ρεύμα διεγείρει τα άτομα του νήματος μιας κοινής λάμπας ή του αερίου ενός λαμπτήρα φθορισμού. Η διεγερση αυτή γίνεται κατά τυχαίο τρόπο. Διεγείρεται ένα άτομο, ύστερα ένα άλλο, ύστερα ένα άλλο, δεν υπάρχει δηλαδή καμιά ιδιαίτερη σειρά. Εξίσου τυχαία τα ηλεκτρόνια επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση εκπέμποντας ακτινοβολία ενέργεια, με τη μορφή φωτονίων.



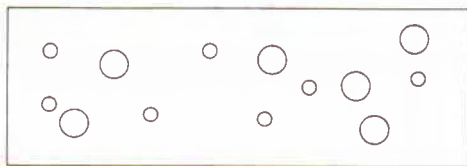
Σχήμα 4. Φωτόνια που δεν συμβαδίζουν.

Στο σχήμα 4 βλέπουμε ότι τα φωτόνια εκπέμπονται όχι μόνο προς κάθε κατεύθυνση αλλά και χωρίς να έχουν καμιά σχέση μεταξύ τους. Είναι φωτόνια που «δεν συμβαδίζουν». Και δεν είναι μόνο αυτό. Μία συνήθης φωτεινή πηγή σαν αυτές που αναφέραμε εκπέμπει φωτόνια με διάφορα μήκη κύματος ανάλογα προς τις τροχιές στις οποίες διεγέρθηκαν τα αντίστοιχα ηλεκτρόνια. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα ανακάτωμα από φωτόνια διαφόρων μηκών κύματος, καθένα από τα οποία πάει «όπου θέλει». Ανακατωσούρα. Αλλά έτσι είναι η φύση ή μάλλον έτσι είναι το φως.

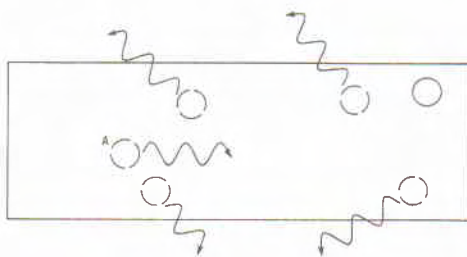
**Λέιζερ από ρουμπίνι.** Για την κατασκευή του πρώτου λέιζερ χρησιμοποιήθηκε ένα υλικό που συνήθως συναντάμε σε κοσμηματοπωλεία. Το ρουμπίνι. Το ρουμπίνι που χρησιμοποιείται στους λέιζερ είναι ίδιο με αυτό των κοσμημάτων αλλά έχει σχήμα ράβδου με μήκος λίγων εκατοστών και διάμετρο μισού περίπου εκατοστού. Τα δύο άκρα του είναι γυαλισμένα και έχουν επίστρωση από άργυρο. Το ένα άκρο είναι πλήρως επαργυρωμένο για να αντανakλά το φως ενώ το άλλο έχει μόνο μια λεπτή επίστρωση, έτσι ώστε να επιτρέπει σε ένα μέρος του φωτός να περνά και το υπόλοιπο να ανακλάται. Γύρω από τη ράβδο τοποθετείται ένας λαμπτήρας ελικοειδής. Όταν ανάβει, εκπέμπει μια βραχύχρονη αλλά έντονη λάμψη που θυμίζει το φλας της φωτογραφικής μηχανής. Το φως της λάμψης διαπερνά το ρουμπίνι και ένα μέρος του απορροφάται από άτομα μετατοπίζοντας



Σχήμα 5.



Σχήμα 6. Οι μεγάλοι κύκλοι παριστάνουν διεγερμένα άτομα. Οι μικροί παριστάνουν άτομα που δεν έχουν διεγερθεί.

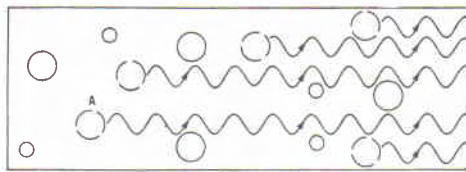


Σχήμα 7. Οι «σπαρμένοι» κύκλοι παριστάνουν άτομα που εκπέμπουν φωτόνια.

ηλεκτρόνια από τις θεμελιώδεις τροχιές σε άλλες τροχιές μεγαλύτερης ενέργειας. Τα άτομα παραμένουν σ' αυτή την κατάσταση για ένα εκατοστό περίπου του δευτερολέπτου. Στη συνέχεια ορισμένα από αυτά επανέρχονται στις αρχικές τους τροχιές εκπέμποντας φωτόνια τα οποία, για την περίπτωση του λέιζερ από ρουμπίνι, είναι φωτόνια ερυθρού φωτός. Πολλά από αυτά βγαίνουν από την κυλινδρική επιφάνεια χωρίς να επιδρούν στη λειτουργία του λέιζερ. Είναι όμως μερικά τα οποία κινούνται κατά μήκος της ράβδου φθάνοντας σε ένα από τα άκρα της, όπως στην περίπτωση του ατόμου Α που παριστάνεται στο σχήμα 7. Το φωτόνιο αυτό σύντομα συναντά ένα άλλο άτομο σε κατάσταση διέγερσης και προκαλεί την εκπομπή ενός άλλου φωτονίου. Το δεύτερο όμως αυτό φωτόνιο κινείται στο ίδιο μήκος κύματος με το πρώτο, όπως δύο στρατιώτες σε πορεία με τον ίδιο βηματισμό. Στο δρόμο τους συναντούν κι άλλα άτομα και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται. Προκύπτουν έτσι όλο και περισσότερα φωτόνια, η ένταση του φωτός αυξάνει, το φως ενισχύεται.

Τα φωτόνια-στρατιώτες φθάνουν κάποτε στο καλά επαργυρωμένο άκρο της ράβδου και υφίστανται ανάκλαση. Καθώς κινούνται προς το απέναντι άκρο

συναντούν και άλλα άτομα σε διέγερση. Δημιουργούνται έτσι ακόμα περισσότερα φωτόνια και η ένταση της δέσμης μεγαλώνει συνεχώς. Αξίζει εδώ να παρατηρήσουμε ότι αυτό θα ήταν αδύνατο να συμβεί αν τα ηλεκτρόνια δεν είχαν την τάση να «κολλάνε» στις ανώτερες τροχιές και να παραμένουν σ' αυτές για συγκριτικά μεγάλα χρονικά διαστήματα. Το αρχικό φωτόνιο-στρατιώτης έγινε λοιπόν ζεύγος, ύστερα διμοιρία, λόχος, ταξιαρχία. Στο τέλος έχουμε αμέτρητες στρατιές με στρατιώτες περισσότερους από όσους υπήρξαν σε όλη την ιστορία της ανθρωπότητας και όλοι να παρελαύνουν με τον ίδιο βηματισμό και προς την ίδια κατεύθυνση, ένα γεγονός που θα μπορούσε να συγκινήσει ακόμα και τον πιο αυστηρό στρατηγό.



Σχήμα 8. Ολοένα και περισσότερα άτομα εκπέμπουν φωτόνια σε συμφωνία φάσης.

Όταν η στρατιά των φωτονίων φθάσει στο απέναντι άκρο, ορισμένα το διαπερνούν και άλλα αντανakλώνται για να συνεχίσουν την πάνω-κάτω πορεία τους «απελευθερώνοντας» όλο και περισσότερα φωτόνια, ενώ από το μερικώς επαργυρωμένο άκρο ξεφεύγουν όλο και περισσότερα. Αυτά αποτελούν τη φωτεινή δέσμη του λέιζερ.

Αυτό βέβαια κάποτε σταματάει. Όταν περάσει ο χρόνος που τα ηλεκτρόνια παραμένουν σε κατάσταση διέγερσης, η δέσμη σβήνει. Το φαινόμενο μπορεί βέβαια με μια καινούρια λάμψη του ελικοειδούς λαμπτήρα να επαναληφθεί. Το φως δηλαδή του λέιζερ δεν είναι μια συνεχής δέσμη αλλά μια σειρά παλμών.

Ο λέιζερ υπακούει βέβαια στην αρχή διατήρησης της ενέργειας. Η ενέργεια της δέσμης δεν υπερβαίνει αυτή με την οποία τροφοδοτούμε το λαμπτήρα-φλας. Επί πλέον πολλά φωτόνια «διαφεύγουν» από την κυλινδρική επιφάνεια της ράβδου και δε συνεισφέρουν στη δέσμη. Έτσι ο λέιζερ μας δίνει φωτεινή ενέργεια λιγότερη από αυτή που του δίνουμε. Αυτό που κάνει τον λέιζερ μοναδικό είναι ότι το φως του είναι ενός και μόνο μήκους κύματος και διαδίδεται σε μια και μόνο κατεύθυνση δημιουργώντας έτσι συγκέντρωση σημαντικού ποσού ενέργειας σε μια δέσμη πολύ λεπτή.

## Ντοκουμέντο 2

### Οι σεισμοί

Οι σεισμοί οφείλονται σε φαινόμενα που συντελούνται στο εσωτερικό της Γης, για τη δομή του οποίου γνωρίζουμε σήμερα αρκετά πράγματα. Η κύρια πηγή αυτών των γνώσεων είναι η μελέτη των σεισμικών κυμάτων, η οποία με την πάροδο του χρόνου, μάς παρέχει μια ολοένα λεπτομερέστερη «ακτινογραφία» του εσωτερικού

του πλανήτη μας. Ο φλοιός, ο εξωτερικός μανδύας, η μεταβατική ζώνη, ο εσωτερικός μανδύας και ο πυρήνας (εξωτερικός και εσωτερικός) αποτελούν τα βασικά στρώματα του εσωτερικού της Γης, στρώματα τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους κατά τη σύσταση και κατά τη φυσική κατάσταση. Ειδικά ο μανδύας αποτελεί την πηγή των ωστικών δυνάμεων που κινούν αργά τις ηπείρους πάνω στη γήινη επιφάνεια. Το εξωτερικό στρώμα του εξωτερικού μανδύα λέγεται λιθόσφαιρα. Αποτελείται από δώδεκα γήινες μάζες, που κινούνται η μία σχετικά προς την άλλη. Τα περισσότερα γεωλογικά φαινόμενα, όπως είναι τα ηφαίστεια, η ορογένεση, η δημιουργία ωκεάνειων ρηγμάτων και οι σεισμοί δημιουργούνται στην περιοχή αυτών των μαζών. Είναι φυσικό η κίνηση των μαζών σ' αυτές τις περιοχές να συναντά κάποια αντίσταση. Όταν, για παράδειγμα, η αφρικανική μάζα πιέζει από το νότο την ευρασιατική, σε κάποια από τα σημεία επαφής οι ελαστικές δυνάμεις αυξάνονται μέχρι να ξεπεράσουν την αντίσταση των πετρωμάτων της λιθόσφαιρας τα οποία τότε θραύονται, κυρίως κοντά σε υπάρχοντα ρήγματα, και προκαλούν σεισμούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι μεταξύ δύο στρωμάτων που κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο δημιουργούνται κενά διαστάσεων από ένα μέτρο μέχρι ένα χιλιόμετρο.

Το σημείο που αρχίζει ο σεισμός λέγεται εστία ή υπόκεντρο. Από κει εκπορεύονται οι σεισμικές δονήσεις —συχνοτήτων που ποικίλλουν από 0,01 Hz μέχρι μερικά Hz— και διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση. Η νοητή κατακόρυφος που περνάει από την εστία του σεισμού συναντά τη γήινη επιφάνεια σε ένα σημείο που λέγεται επίκεντρο του σεισμού.

Για την παρακολούθηση των σεισμών και την έρευνα των σεισμικών κυμάτων χρησιμοποιούμε τους σειсмоγράφους. Στην πιο απλή του μορφή ο σειсмоγράφος αποτελείται από ένα ευαίσθητο εκκρεμές, το οποίο αρχίζει να αιωρείται κατά την άφιξη του σεισμικού κύματος. Οι σεισμοί —όπως και οι υπόγειες πυρηνικές εκρήξεις— δημιουργούν τρία είδη κυμάτων. Για κάθε είδος από αυτά υπάρχει και το αντίστοιχο διεθνές σύμβολο. Το «p» από το λατινικό *prima*, το «s» από το επίσης λατινικό *secundae* και το «L» που αντιστοιχεί στα λεγόμενα κύματα Love. Τα κύματα p και s διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης, ενώ τα L τα οποία και «φθάνουν» τελευταία διαδίδονται στη γήινη επιφάνεια. Τα p είναι διαμήκη κύματα και διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τα s, τα οποία είναι κύματα εγκάρσια. Η ταχύτητα των p και των s εξαρτάται από την πυκνότητα και την ελαστικότητα του μέσου διάδοσης και συνήθως είναι ανάλογη προς το βάθος.

Η διαδρομή που ακολουθεί ένα σεισμικό κύμα δεν είναι ευθεία αλλά καμπύλη με κοιλότητα προς την επιφάνεια της Γης. Τα κύματα που φθάνουν στο σειсмоγράφο χωρίς καμιά ανάκλαση στη γήινη επιφάνεια συμβολίζονται με p ή με s. Αν έχει συμβεί μια ανάκλαση στην επιφάνεια χρησιμοποιείται το σύμβολο pp ή το αντίστοιχο ss. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται άλλα γράμματα ή και αριθμοί που υποδηλώνουν την περιοχή από την οποία πέρασε το κύμα. Έτσι ένα κύμα p το οποίο πέρασε από τον πυρήνα συμβολίζεται με pkr. Η απόσταση της εστίας από το σταθμό υπολογίζεται από τη διαφορά των χρόνων άφιξης των κυμάτων p, s και L. Το 1935 ο Richter (Ρίχτερ) εισήγαγε την ιδέα του τοπικού μεγέθους ( $M_L$ ) ενός σεισμού, το οποίο αντιστοιχεί στην ενέργεια που απελευθερώνεται. Το μέγεθος μπορεί να μετρηθεί με ένα ειδικό τύπο σειсмоγράφου (Wood-Anderson) και η τιμή του δίνεται από τον τύπο

$$M_L = \log_{10} A - \log_{10} A_0$$



στον οποίο  $A$  είναι το μέγιστο πλάτος που καταγράφει το όργανο. Στον όρο  $\log_{10} A_0$  περιλαμβάνεται η απόσταση εστίας σταθμού και η απόσβεση των σεισμικών κυμάτων από τα πετρώματα.

Για το συσχετισμό του μεγέθους ενός σεισμού με την ενέργεια που απελευθερώνεται, χρησιμοποιείται και η εξίσωση Gutenberg-Richter

$$\log_{10} E = 11,8 + 1,5 M_L$$

στην οποία η ενέργεια ( $E$ ) μετριέται σε  $10^{-7} \text{J}$  (erg, έργια). Ένας σεισμός 6 Ρίχτερ ( $M_L=6$ ) παρόλο που είναι σεισμός μέτριας έντασης απελευθερώνει ενέργεια περίπου  $10^{14} \text{J}$ .

Το πιο ενδιαφέρον πρόβλημα της σύγχρονης σεισμολογίας είναι η πρόβλεψη των σεισμών. Σε χώρες —όπως η Ελλάδα— οι οποίες αντιμετωπίζουν σοβαρότατα προβλήματα εξ αιτίας των σεισμών εξετάζονται διάφορες μέθοδοι για τη λύση του προβλήματος της πρόβλεψης. Ελπίζεται ότι κατά τα επόμενα χρόνια θα υπάρξουν αποτελέσματα ικανοποιητικά.

# Βιβλιογραφία

## α. Εγχειρίδια διδασκαλίας

1. Amaldi E. και άλλοι, LA FISICA PER I LICEI SCIENTIFICI εκδ. Zanichelli, Bologna 1984.
2. Andersen I. και Norbøll K. FYSIK (for 7 Klasse) Εκδ. P. Haase, Κοπεγχάγη 1976.
3. Andrew W. και άλλοι INTRODUCTION AUX SCIENCES PHYSIQUES (σε γαλλική μετάφραση J. Deshênes). Εκδ. Études Vivants, Montreal, 1979.
4. Arfken G. και άλλοι UNIVERSITY PHYSICS εκδ. Academic Press, Orlando Florida USA 1984.
5. Atkins K. PHYSICS εκδ. John Wiley and Sons USA 1966.
6. Blatt F. PRINCIPLES OF PHYSICS Εκδ. Allyn and Bacon Inc. USA 1983.
7. Bottaro P. και άλλοι PHYSIQUE α) Classe de seconde β) Première S et E γ) Terminales S et E Εκδ. A. Colin Paris 1983.
8. Bramand P. και άλλοι PHYSIQUE α) Seconde εκδ. 1981 β) Première εκδ. 1982 γ) Terminales C et E εκδ. 1983. Εκδ. Hachette, Paris.
9. Bueche F. UNDERSTANDING THE WORD OF PHYSICS Εκδ. Mc Graw-Hill N. York, 1981.
10. Caianiello E και άλλοι FISICA, (2ος τόμος) Εκδ. A. Garçanti, Milano 1976.
11. Calvani P. και Maraviglia B. INTRODUZIONE ALLA FISICA (2ος τόμος) Εκδ. Laterza, Roma-Bari 1982.
12. Collection A. Cros FONDEMENTS DE LA PHYSIQUE α) Seconde 1981 β) Première D, 1979 γ) Terminales CE, 1980, Εκδ. Belin, Paris.
13. Collection Hébert PHYSIQUE α) Seconde, 1982 β) Première S/E, 1982 γ) Terminale D, 1983. Εκδ. Technique et Voulgavisation, Paris.
14. Collection «Libres Parcours» SCIENES PHYSIQUES 5<sup>ο</sup> και 4<sup>ο</sup> εκδ. Hachette, Paris 1979
15. Déglise A και άλλοι PHYSIQUE α) Seconde, 1982 β) Première S/E, 1982 γ) Terminale CE, 1983. Εκδ. Hatier, Paris.
16. De Marco Abele FISICA (ad uso dei Licei Scientifici). Εκδ. Poseidonia, Bologna 1973.
17. Errico L. και Vespi A. FISICA OGGI (2ος τόμος) Εκδ. Loescher, Torino 1972.
18. Fortuzzi Maria Giovanna NOZIONI DI FISICA Εκδ. Zanichelli, Bologna, 1984.
19. Freeman I. PHYSICS (Principles and insights). Εκδ. McGraw-Hill N. York 1968.
20. Fuller J. και Coates B. LIGHT ON PHYSICS Εκδ. Cambridge U.P. 1982.
21. Grimsehl FYSIK I και II. Εκδ. Ernst Klett Verlag, Stuttgart 1974.
22. Halliday D. και Resnick R. PHYSICS Εκδ. John Wiley and Sons, N. York 1966.
23. Holton G. και άλλοι HARVARD PROJECT PHYSICS COURSE (HPP). α) Στην Ιταλική έκδοση Unità 4. La luce et l'elettromagnetismo (1982). β) Στην Καναδέζικη γαλλόφωνη έκδοση Tome 4 La lumière et l' electromagnetisme (1980).
24. Hewitt P. CONCEPTUAL PHYSICS Εκδ. Little, Brown and Company USA 1985.
25. Jardin Jim HIGHER PHYSICS Εκδ. Heinemann Educational Books, London 1983.
26. Jardin Jim PHYSICS IS FUN Book four Εκδ. Heinemann Educational Books London 1971.
27. Kane J. και Sternheim M. PHYSICS Εκδ. John Wiley and Sons N. York 1983.
28. MacLachlan J. και άλλα MATIÈRE ET ÉNERGIE (σε γαλλική μετάφραση της P. Marcotte) Εκδ. Clarke, Irwin and Co. 1981, Canada.
29. Riban D. INTRODUCTION TO PHYSICAL SCIENCE McGraw-Hill, New York 1982.
30. Saison A. και άλλοι PHYSIQUE α) Seconde β) Première SE γ) Terminales CE. Εκδ. F. Nathan, Paris 1981.
31. Serway R. και Faughn J. COLLEGE PHYSICS. Εκδ. Saunders College Publishing USA 1985.
32. Tedone G. και Dominici P. LA FISICA IERI E OGGI (τόμος 1) Εκδ. Cremonese, Firenze 1969.
33. Van Heuvelen A. PHYSICS. Εκδ. Little, Brown and Company Boston, Toronto 1982.
34. Yavorsky B. και Pinsky A. FUNDAMENTAL OF PHYSICS (σε αγγλική μετάφραση από τα ρώσικα του N. Weinstein). Εκδ. Mir Μόσχα 1975.

35. Αλεξόπουλος Κ.-Μαρίνος Δ. ΦΥΣΙΚΗ, Τόμος Πρώτος, Αθήνα 1980.
36. Αλεξόπουλος Κ.-Μαρίνος Δ. ΦΥΣΙΚΗ, Τόμος Δεύτερος, Αθήνα 1976.

## 6. Ιστορία των Επιστημών και Επιστημολογία

37. Asimov Isaac LIGHT, MAGNETISM AND ELECTRICITY. Εκδ. A. Mentor Book, USA 1966.
38. Bach McMaster John, BENJAMIN FRANKLIN. Εκδ. Chelsea House, New York 1980.
39. Bernál John, Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΣΤΗΝ ΙΣΤΟΡΙΑ, Τόμος Β, σε ελληνική μετάφραση του Ε. Μπιτσάκη. Εκδ. Ι. Ζαχαρόπουλος, Αθήνα 1983.
40. Dampier William A HISTORY OF SCIENCE, Cambridge U.P., London 1979.
41. Daumas Maurice, HISTOIRE DE LA SCIENCE. Εκδ. Gallimard, Paris 1957.
42. Einstein A.-Infeld L. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΙΔΕΩΝ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ (Μετάφρ. Ε. Μπιτσάκη) εκδ. Δωδώνη, Αθήνα 1978.
43. Farrington Benjamin Η ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΣΤΗΝ ΑΡΧΑΙΑ ΕΛΛΑΔΑ σε ελληνική μετάφραση του Ν. Ραΐση. Εκδ. Κάλβος, Αθήνα 1969.
44. Holton Gerald INTRODUCTION TO CONCEPTS AND THEORIES IN PHYSICAL SCIENCE (Δεύτερη έκδοση με τη συμμετοχή και του S. Brush). Εκδ. Princeton U.P. New Jersey 1985.
45. Maitte Bernard, LA LUMIERE, Editions du Seuil, Paris 1981.
46. Segrè Emilio FROM FALLING BODIES TO RADIO WAVES. Εκδ. W..H. Freeman and Company, New York 1984.
47. Taton René (sous la direction) LA SCIENCE MODERNE DE 1450 A 1800. Εκδ. Presse Universitaires de France, Paris 1969.
48. Toraldo di Francia G. L'INDAGINE DEL MONDO FISICO. Εκδ. G. Einaudi, Torino 1976.
49. Ziman John THE FORCE OF KNOWLEDGE (THE SCIENTIFIC DIMENSION OF SOCIETY). Εκδ. Cambridge U.P. Cambridge 1982.

## γ. Διάφορα

50. Asimov Isaak GUIDE TO SCIENCE (Τόμος Ι). Εκδ. Penguin Books 1982.
51. Boutaric A. MATIÈRE, ÉLECTRICITÉ, ÉNERGIE. Εκδ. P.U.F., Paris 1948.
52. Capéran L. και άλλοι PHYSIQUE (Cours et exercices résolus). Εκδ. Les cahiers du BAC, Paris 1982.
53. Epstein Lewis, THINKING PHYSICS IS GEDANKEN PHYSICS. Εκδ. Insight Press San Francisco 1983.
54. Faughn J. και Kuhn K. PHYSICS FOR PEOPLE WHO THINK THEY DON'T LIKE PHYSICS. Εκδ. Saunders Company, Philadelphia 1976.
55. Feynman R. και άλλοι THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS. Εκδ. Addison Wesley P.C., California 1971.
56. Κιτάιγκοροντσκι Α., LA PHYSIQUE A LA PORTÉE DE TOUS Livre 3, Les électons. Σε γαλλική μετάφραση από τα ρωσικά. Εκδ. Mir, Μόσχα 1982.
57. Koestler Arthur, Η ΠΡΑΞΗ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ (Σε ελληνική μετάφραση Ιωάννας Χατζηνικολή). Εκδ. Χατζηνικολή, Αθήνα 1976.
58. Λαντάου Λ. και Κιτάιγκοροντσκι Α., PHYSICS FOR EVERYONE (Τόμος 1). Σε αγγλική μετάφραση από τα ρώσικα. Εκδ. Mir, Μόσχα 1978.
59. March Robert, PHYSICS FOR POETS. Εκδ. McGraw-Hill USA 1978.
60. Nicolson Marjorie, SCIENCE AND IMAGINATION. Εκδ. Archon Books, USA 1976.
61. Rousseau Pierre, LA LUMIÈRE. Εκδ. PUF, Paris 1977.
62. Spears Jacqueline και Zollman Dean, THE FASCINATION OF PHYSICS. Εκδ. Benjamin/Cummings P.C. USA 1985.
63. Walker Jearl, THE FLYING CIRCUS OF PHYSICS. Εκδ. John Wiley and Sons, USA 1977 (και

στην ελληνική μετάφραση Α. Μάμαλη-Γ. Τρουφάκου με τίτλο «Το πανηγύρι της Φυσικής»).

64. Βελεστινλής Ρήγας, Φυσικής απάνθισμα, Βιέννη 1790.
65. Δάρβαρις Δημήτριος, Επιτομή Φυσικής, Βιέννη 1812.

#### δ. Εγκυκλοπαιδικά

66. Basic Science. Εκδ. Marshall Cavendish Books 1984.
67. The encyclopedia of Science. Εκδ. Optimum books 1982.
68. Il mondo della Scienza.
69. Les techniques de Communication. Εκδ. Larousse 1984.
70. Επιστημονική βιβλιοθήκη Life. α. Φως και όραση. β. Ήχος και ακοή. γ. Ύλη. Εκδ. «Λύκειος Απόλλων-Χρυσός τύπος».

#### ε. Περιοδικά

71. Physics Teachers.
72. La Recherche.
73. Scientific American.
74. Φυσικός Κόσμος.

#### στ. Άρθρα

75. Γαθρόγλου Κ.-Γκουνταρούλης Γ., «Μεθολογικά προβλήματα εξέλιξης της θεωρίας της υπεραγωγιμότητας». Από το ένθετο «απόψεις» του περιοδικού Φυσικός κόσμος τεύχος 90.
76. Κασέτας Αντρέας, «Ο δρόμος για τον ηλεκτρομαγνητισμό», Φυσικός κόσμος, τεύχος 73.
77. Κασέτας Αντρέας, «Ηλεκτρομαγνητική επαγωγή», Φυσικός κόσμος, τεύχος 86.

Ο στίχος του Νίκου Καββαδία στη σελίδα 28 είναι από το ποίημα KURO SIWO.

Ο στίχος του Διονύση Σαββόπουλου στη σελίδα 119 είναι από το «Ρεμπέτικο» της συλλογής «Δέκα χρόνια κομμάτια».

Οι στίχοι του Γιάννη Ρίτσου με τους οποίους αρχίζει το πέμπτο κεφάλαιο είναι από την «Εαρινή Συμφωνία».

Οι στίχοι του Γιώργου Σεφέρη στην αρχή της ενότητας «Ήχος» είναι από το ποίημα «Ο τόπος μας είναι κλειστός», της συλλογής «Μυθιστόρημα».

Η γελοιογραφία της σελίδας 169 είναι του Αργεντινού σκιτσογράφου Quino παρμένη από τη συλλογή «Ο κόσμος ανάποδα». Εκδόσεις Βαβέλ.

Τα σκίτσα της Μαφάλντα είναι και αυτά του Quino παρμένα από την ελληνική έκδοση της Μαφάλντα στις Εκδόσεις Βαβέλ.

Το σκίτσο της σελίδας 118 καθώς και το σκίτσο στην ανάκλαση των κυμάτων είναι του επίσης Αργεντινού σκιτσογράφου Mordillo.

Τα υπόλοιπα σκίτσα προέρχονται από πηγές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία με αριθμούς 20, 25, 52, 54.

Η φωτογραφία με τους λαϊκούς τραγουδιστές που υπάρχει στην ενότητα «Ήχος» είναι παρμένη από το βιβλίο του Κώστα Χατζηδουλή «Βασίλης Τσιτσάνης», εκδόσεις Νεφέλη. Στο μέσον της φωτογραφίας καθιστός διακρίνεται ο Βασίλης Τσιτσάνης και δίπλα του η Μαρίκα Νίνου (1950).

Ορισμένες από τις φωτογραφίες, τα σχήματα και τις γκραβούρες προέρχονται από πηγές που αναφέρονται στη βιβλιογραφία με αριθμούς 2, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 23, 25, 27, 28, 31, 33, 46, 54, 56, 59, 71, 72, 74.

Κατά τη συγγραφή των τριών πρώτων κεφαλαίων του βιβλίου μας βοήθησε πάρα πολύ η παιδαγωγός Μαρία Σ. Συμεωνίδου. Αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε τόσο αυτήν όσο και τον συνάδελφο Αλέξανδρο Ι. Ζαγοραίο ο οποίος μας βοήθησε κατά τη συγγραφή του τέταρτου και του πέμπτου κεφαλαίου.

Η μετάφραση του αποσπάσματος από το βιβλίο «*Διαλέξεις του R. Feynman πάνω στη Φυσική*» έγινε από το Σταμάτη Μουρίκη.

Η μετάφραση του αποσπάσματος από το «*Φυσική για ποιητές*» (Ντοκουμέντο 2, στο τέταρτο κεφάλαιο) έγινε από τον Αλέξανδρο Ζαγοραίο. Ο ίδιος σε συνεργασία με τον Αντρέα Κασέτα έκανε και τις μεταφράσεις του κειμένου για τις ακτίνες Λέιζερ (από την αγγλική) καθώς και του κειμένου για τους Σεισμούς (από την ιταλική γλώσσα) από το εγχειρίδιο με αριθμό βιβλιογραφίας «1».

Την ευθύνη για την τελική διαμόρφωση της γλώσσας όλων των κειμένων του βιβλίου φέρει ο Αντρέας Κασέτας. Ο ίδιος φέρει εξ ολοκλήρου και την ευθύνη για τη συγγραφή του κεφαλαίου «Κύματα».



# Ευρετήριο

## A

αγωγιμότητα ηλεκτρική 18  
— μέγεθος 149  
αγωγοί ηλεκτρικοί 19  
— σε ηλεκτρική ισορροπία 74  
— σε ηλεκτρική ισορροπία απομονωμένοι 77  
αιθέρας 405  
ακουστότητα ενός ήχου 390  
ακτίνες α 451  
ακτίνες β 451  
ακτίνες γ 451  
ακτίνες X ή ακτίνες Röntgen 448  
ακτίνες φωτός 404  
ακτινοβολία ηλεκτρομαγνητική 335, 447, 451, 452  
αλγεβρικές τιμές 360  
αλληλεπίδραση ηλεκτροστατική 27  
— μαγνητικών 33  
— μαγνητών με κινούμενα ηλεκτρικά φορτία 37  
— ρευματοφόρων αγωγών 251  
— ρευμάτων και μαγνητών 122  
— φορτισμένων αγωγών 91  
Alhazen (Αλχάζεν) 425  
Ampère (Αμπέρ) 124, 251, 254  
— μονάδα 133, 253  
— νόμος 47  
Ampère-Maxwell (Αμπέρ-Μάξγουελ) νόμος 332, 334  
αμπερόμετρο 134, 135  
ανάκλαση ηχητικών κυμάτων 423  
— ραδιοφωνικών κυμάτων 423  
ανάκλαση φωτός 416  
— κατοπτρική 417  
ανάκλασης νόμοι 416  
ανάλυση του φωτός 436  
αντικατοπτρισμός 436  
αντιηλεκτρεγερτική δύναμη 184  
αντίσταση ηλεκτρική 149, 321  
— εσωτερική, πηγής 176  
— ρυθμιστική 159  
αντιστάτες (αντιστάσεις) 152, 153, 162, 163, 185, 317  
ανίχνευση ηλεκτρικού φορτίου 21  
— ηλεκτρομαγνητικού κύματος 364  
— κύματος 358  
— μαγνητικού πεδίου 62  
αποδέκτης 145, 146, 183, 185  
αρχή αντιστρεπτής πορείας φωτός 422  
— επαλληλίας κυμάτων 410  
— Huygens (Χόιγενς) 432  
Αρχιμήδης 421  
ασφάλεια 168  
αυτεπαγωγή 297, 298, 374

## B

Weiss (Βάις) θεωρία 256  
Watt (Βατ) 148  
Βελεστινλής Ρήγας 114, 115, 11  
Weber (Βέμπερ), μονάδα 65  
Volt (Βολτ), μονάδα, 58, 14  
Volta (Βόλτα) 58, 122, 27  
βολτόμετρο 140  
βραχυκύκλωμα 175  
βραχυκυκλώσεως ρεύμα 175

## Γ

Γαλιλαίος 426  
γαλθανόμετρο 277  
γείωση 80  
γεννήτρια (πηγή) ηλεκτρική 145, 146, 173-177  
Young (Γιανγκ) πείραμα 406  
Geiger (Γκίγκερ) απαριθμητής 455  
— ανάκλασης 416  
— διάθλασης 425  
— πρόσπτωσης 416, 425

## Δ

Δάρβαρις Δημήτριος 116, 117  
δείκτης διάθλασης 427, 428  
— απόλυτος 428  
— σχετικός 427  
δέκτης ερτζιανών κυμάτων 399  
δεσμοί στάσιμου κύματος 414  
διάθλαση φωτός 424  
διάθλασης νόμοι 425, 427  
διαθλαστική γωνία πρίσματος 435  
διαπερατότητα μαγνητική 244, 245  
διατήρηση ενέργειας 179, 180, 290, 297, 361  
— ηλεκτρικού φορτίου 72, 135, 142  
διαφορά δυναμικού (τάση)  
— μεταξύ δύο σημείων πεδίου 57-59  
— μεταξύ δύο σημείων κυκλώματος 137-142, 178  
διαφορά φάσης 381  
διάχυση του φωτός 417  
διέγερση ηλεκτρονίου 413, 466  
διηλεκτρική αντοχή 97  
διηλεκτρική σταθερά 96, 98  
δινορεύματα 307, 306  
δίπολο  
— ηλεκτρικό σε ηλεκτρικό πεδίο 47, 48, 63, 97  
— ως στοιχείο ηλεκτρικού κυκλώματος 144, 301  
— ενεργητικό 145, 146, 307, 308  
— παθητικό 145, 146, 149

## Ε

— μαγνητικό 346, 347  
Δόση 455  
— ισοδύναμη 455  
δυναμική γραμμή 49  
— ηλεκτρικού πεδίου 51  
— μαγνητικού πεδίου 63  
δυναμικό 56  
— ηλεκτρικού πεδίου 59  
είδωλο από ανάκλαση 417  
— φανταστικό 420  
είδωλο από διάθλαση 442  
— πραγματικό 443  
— φανταστικό 444, 445  
ειδική αντίσταση 154  
έκθεση ακτινοβολίας 449  
εκκρεμές 367  
εκπομπή ερτζιανών κυμάτων 398  
— ήχου 387  
— φωτός 413  
εκτροπή 435  
εκφόρτιση πυκνωτή 92, 187  
ενέργεια ηλεκτρική 146, 161, 292, 309, 323  
— ηλεκτρικού πεδίου 94, 303, 374, 376  
— θερμική 145  
— μαγνητικού πεδίου 302, 303, 374, 376  
— μηχανική 146, 292, 308  
— χημική 145  
ενεργός ένταση 315  
ενεργός τάση 316  
ένταση ηλεκτρικού πεδίου (ή ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$ ) 44  
ένταση ηλεκτρικού ρεύματος (ή ηλεκτρικό ρεύμα) 132-135  
ένταση μαγνητικού πεδίου (ή μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  ή μαγνητική επαγωγή) 62, 216, 217  
Edison Thomas (Έντισον Τόμας) 167, 325  
Edison φαινόμενο 73  
επαγωγή ηλεκτροστατική 81  
επαγωγή ηλεκτρομαγνητική 279  
επαγωγικότητα (ή συντελεστής αυτεπαγωγής) πηνίου 300  
— σωληνοειδούς 300  
επιτάχυνση 363  
έργο 147, 281  
Oersted (Ερστεντ) πείραμα 123, 237, 271, 272, 275  
εστία φακού 441  
εστιακή απόσταση φακού 442

## Z

ζεύγος δυνάμεων 48, 228  
Siemens (Ζήμενς) μονάδα 149

## H

ηλεκτρεγερτική δύναμη 174, 177, 178  
— επαγωγική 282-286  
— αυτεπαγωγική 298-301  
ηλεκτρική θωράκιση 83  
ηλεκτρικό (ή ηλεκτροστατικό) πεδίο 43  
— ομογενές 47  
— τοπογραφία 48-51  
ηλεκτρικό πεδίο χρονικά μεταβαλλόμενο 329  
ηλεκτρίση 13, 15  
ηλεκτρικό φορτίο 16, 70  
— θετικό 17, 70  
— αρνητικό 17, 70  
ηλεκτρισμός 12  
ηλεκτρομαγνήτης 245  
ηλεκτρομαγνητισμός 8, 9, 10  
ηλεκτρόνια ελεύθερα 73, 226, 293  
ηλεκτρόνιο 68, 69  
ηλεκτροσκοπίο 21, 80, 81  
ηλεκτροστατική μηχανή 24  
ημιαγωγοί 19  
ήχος 354, 387  
ηχώ 443

## Θ

θερμική κίνηση 256  
θερμικός συντελεστής αντίστασης 156  
θερμοδυναμική 162  
θεωρίες για τη φύση του φωτός  
— σωματιδιακή 404  
— κυματική 405

## I

ιονισμός 219  
ιόντα αρνητικά 72  
— θετικά 71  
ισότοπα 218  
ισοφασική επιφάνεια 386  
ισχύς ηλεκτρική 148, 161, 302

## K

καθοδικές ακτίνες 67  
κάτοπτρο επίπεδο 443  
— κοίλο 420  
— σφαιρικό 420  
— κυρτό 420  
— παραβολικό 421  
κβαντισμένο 66, 412

κινητήρας (μοτέρ) ηλεκτρικός 146, 147, 166, 183, 331-333  
Curie (Κιουρί) θερμοκρασία 245, 246  
Curie Marie (Κιουρί Μαρία) 450  
Curie Pierre (Κιουρί Πιερ) 450  
Kirchhoff (Κίρχοφ) 136  
— κανόνας πρώτος 136  
— κανόνας δεύτερος 142, 180, 186, 305, 375  
κοιλίες στάσιμου κύματος 414  
Coulomb (Κουλόμπ) νόμος 26, 27  
— μονάδα φορτίου 28, 351  
— πεδίο 45  
κροσσοί συμβολής 401, 406  
— ενίσχυσης 401, 406  
— απόσβεσης 402, 407  
κυκλική συχνότητα ταλάντωσης 362  
— εναλλασσόμενης τάσης 313  
— εναλλασσόμενου ρεύματος 313  
κυκλοφορία ηλεκτρική 296  
— μαγνητική 248, 245  
κύκλωμα ηλεκτρικό 142, 143  
κύμα γενικά 357, 358  
— φέρον 398  
— διαμορφωμένο 378  
κύματα γραμμικά 378  
— επιφανειακά 385  
— ελαστικότητας 387  
— ερτζιανά 396  
— ηλεκτρομαγνητικά 387, 335  
— σεισμικά 470, 471  
— χώρου 385  
— εγκάρσια 378  
— διαμήκη 378  
κύματος μήκος 379, 382  
— συχνότητα 379  
— ταχύτητα διάδοσης 379  
— εξίσωση 383  
— μέτωπο 386

## Λ

λαμπτήρας πυρακτώσεως 166, 167  
Laue (Λάουε) 449  
Laplace (Λαπλάς) δύναμη 126, 211, 223-226, 287  
Leeuwenhoek (Λέβενχουκ) 426  
Laser (Λέιζερ) 466  
— από ρουμίνι 468  
Layden (Λέιντεν) πόλη της Ολλανδίας 87, 157  
— φιάλη 87  
Lenz (Λεντς) κανόνας 285-288  
Lippershey (Λίπερσει) 426  
Lorentz (Λόρεντς) 211  
— μαγνητική δύναμη 211-215, 226, 293

## M

μαγνητική απόκλιση 257  
μαγνητική βελόνα 33

μαγνητική έγκλιση 258  
μαγνητικό πεδίο μαγνήτη (μαγνητοστατικό) 61, 62, 63, 64  
— Γης 257-259  
— ομογενές 64, 223  
— ρευματοφόρου αγωγού 236, 237  
— ευθύρ. ρευμ. αγωγού 238-240  
— σωληνοειδούς 243, 244  
μαγνητικό πεδίο χρονικά μεταβαλλόμενο 328, 257  
μαγνητικός μεσημβρινός 257  
μαγνητισμός 28, 29, 30  
μαγνήτιση με επαφή 36  
— με επαγωγή 37, 251, 245  
μαγνητόμετρο 235, 237  
μαγνητόφωνο 393  
Maxwell (Μάξγουελ) 56, 65, 125, 248, 251, 327-329, 351  
— σύνθεση 327  
— εξισώσεις 335, 336  
μεγάφωνο 393  
μέση ισχύς 317  
μετασχηματιστής 321, 322, 323  
— ιδανικός 324, 325  
— πραγματικός 226  
μεταφορά ενέργειας 275  
— ηλεκτρ. ενέργειας 321  
μήκος κύματος του φωτός 407  
μικροσκοπίο 426  
μικρόφωνο 389, 392  
Millikan (Μίλλικαν) πείραμα 68  
μονωτές γενικά 19  
— σε ηλεκτρ. πεδίο 84  
Becquerel Henry (Μπεκερέλ Ανρύ) 450  
Becquerel (Μπεκερέλ, Bq)  
— μονάδα ραδιενέργειας 453  
Biot και Savart (Μπιο και Σαθάρ)  
— νόμος 125, 250  
Bohr (Μπορ) μοντέλο 71  
Bragg (Μπραγκ) 449  
μωυπία 445

## N

νετρόνιο 70  
— Newton (Νεύτωνας) 25, 404, 405, 406  
νευτωνική δυναμική 17

## O

ολογραφία 431  
— «Οπτική» του Νεύτωνα 404  
— οπτικές ίνες 431  
ορική γωνία 429  
ουράνιο τόξο 437

## Π

παγκόσμιας έλξης νόμος 24  
παλμογράφος 139, 140

πεδίο γενικά 39  
 — ορισμός 41  
 — ύπαρξη 41  
 — ανιχνευση 41  
 — περιγραφή 42  
 — ηλεκτρομαγνητικό 333  
 — μαγνητικό: δες «μαγνητικό πεδίο»  
 — ηλεκτρικό: δες «ηλεκτρικό πεδίο»  
 περίθλαση 408, 449  
 — φωτός 409  
 περίοδος εναλλασσόμενου ρεύματος 361  
 — ταλάντωση 362, 375  
 — εκκρεμούς 368  
 πηνίο 241, 374  
 — στο ηλεκτρικό κύκλωμα 301, 304, 305, 306, 314  
 ποζιτρόνιο 453  
 πόλο μαγνητικοί 34  
 — πομπός ερτζιανών κυμάτων 398  
 ποτενσιόμετρο 159  
 πρωτόνιο 70  
 πτώση τάσεως 152  
 πυκνωτής 86, 87, 88, 89, 90  
 — σε ηλεκτρικό κύκλωμα συνεχούς ρεύματος 185, 186, 187  
 σε κύκλωμα Thomson 374, 375  
 πυξίδα 30

## P

Rutherford E. (Ράδερφορντ Ε.) 451, 452  
 Ραδιενέργεια 450  
 Ραδιενέργεια τεχνητή 453  
 ραδιοηλεκσκόπιο 413  
 Röntgen W. C. (Ραϊντγκεν Β. Κ.) 448  
 Röntgen (Ραϊντγκεν) ακτίνες 448  
 röntgen (ραϊντγκεν), μονάδα έκθεσης 450  
 rad (ραντ), μονάδα δόσης 455  
 rem (ρεμ) 455  
 ρεύμα ηλεκτρικό  
 — μετατόπισης 332  
 — συνεχές 132, 318-319  
 — εναλλασσόμενο 309, 318, 321  
 Richter (Ρίχτερ) 470  
 ροή ηλεκτρική 53  
 — μαγνητική 65, 283, 288, 289, 311  
 ροοστάτης 159  
 ροπή μαγνητική 229, 230, 247, 254, 255  
 — ζεύγους δυνάμεων 228

## Σ

σεισμογράφος 470  
 σεισμοί 469  
 Schelling (Σέλλινγκ) 270

σιδηρομαγνητικά υλικά 244, 256  
 Snell (Σνελ) νόμος 425  
 σταθερά χρόνου χωρητική 187  
 — επαγωγική 306  
 στάσιμο κύμα 415  
 στροβοσκόπιο 384  
 συμβολή κυμάτων 400  
 — φωτός 406  
 σύνδεση πυκνωτών 188, 189,  
 — γεννητριών 181, 182, 183  
 — αντιστάτων 170, 171, 172, 173  
 συντελεστής αυτεπαγωγής, θλέπε επαγωγικότητα  
 — απόδοσης 326  
 συντονισμός 371, 377  
 συχνότητα ρεύματος εναλλασσόμενου 213  
 — τάσης εναλλασσόμενης 213  
 — ταλάντωσης 362  
 — κύματος 379  
 σωληνοειδές 242

## T

ταλάντωση μηχανική 360  
 — αρμονική 365  
 — αμείωτη 366  
 — φθίνουσα 367  
 — ελεύθερη 366  
 — εξαναγκασμένη 371, 377  
 — γενίκευση της έννοιας 377  
 ταλαντώσεων σύνθεση 372  
 τάση αρμονικά εναλλασσόμενη 312, 313  
 — επαγωγική 293  
 τάση ηλεκτρική δες «διαφορά δυναμικού»  
 ταχύτητα υλικού σημείου 362  
 — διάδοσης ήχου 388  
 — ρευματική ηλεκτρονίων 131, 136  
 Tesla (Τέσλα) μονάδα 64, 217  
 Gilbert (Τζίλμπερτ) 30  
 Joule (Τζουλ) νόμος 163  
 — φαινόμενο 165, 166  
 τηλεσκόπιο 426  
 Thomson (Τόμσον) κύκλωμα 359, 374, 396  
 Thomson J. J. (Τόμσον) 68

## Υ

υπεραγωγιμότητα 157  
 υπέρηχοι 395  
 υπεριώδεις ακτίνες 447  
 υπέρυθρες ακτίνες 446  
 υποβάθμιση ενέργειας 162  
 υπόηχοι 394  
 ύψος του ήχου 389

## Φ

φακοί 439  
 — συγκλίνοντες 439, 441  
 — αποκλίνοντες 445  
 Farad (Φαράντ) μονάδα 78  
 Faraday (Φαραντέι) 38, 49, 276-278, 348, 351  
 — νόμος 284, 285, 293, 328  
 φάση εναλλασσόμενης τάσης 313  
 — εναλλασσόμενου ρεύματος 313  
 — απομάκρυνσης 362  
 — στα κύματα 381  
 φάσμα λευκού φωτός 436  
 φασματογράφος μάζας 219, 220, 221  
 φορά ηλεκτρικού ρεύματος 128, 129  
 φόρτιση πυκνωτή 92, 186, 187  
 Foucault (Φουκώ) ρεύματα δες «δινορεύματα»  
 Fourier (Φουριέ) 155  
 — ανάλυση 373  
 Franklin (Φρανκλίνος) 25, 269, 270  
 Fresnel (Φρενέλ) 410  
 φυσική φιλοσοφία 270, 271  
 φως 354, 403  
 φωτόνιο 412, 413, 466

## X

χαρακτηριστική καμπύλη διπόλου 144, 150, 151, 173, 174, 179, 184  
 Helmholtz (Χέλμχολτς) 212, 290, 148  
 Huygens (Χόιχενς) 405, 433  
 χοροιά ήχου 391  
 χρόνος υποδιπλασιασμού 454  
 Hall (Χωλλ) φαινόμενο 233-235  
 χωρητικότητα αγωγού 77  
 — πυκνωτή 90, 95

## Ω

Ω (Ωμ) μονάδα 455  
 — Ohm (Ωμ) 155  
 — Ohm, νόμος του 152-157



