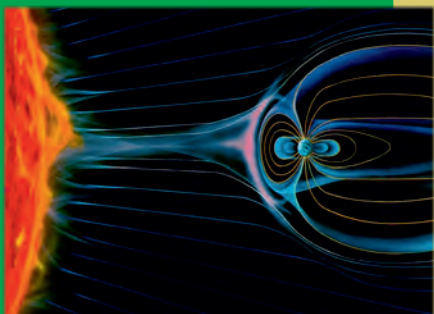


ηλεκτρομαγνητικές  
αλληλεπιδράσεις



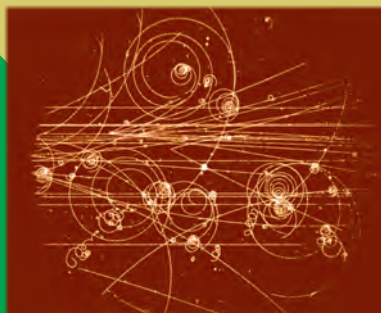
κύματα



οπτική



ακτινοβολίες  
εξ περιβάλλον



# Φυσική

2ος ΚΥΚΛΟΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΝΙΚΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΩΝ









## ΦΥΣΙΚΗ

Με απόφαση της ελληνικής κυβέρνησεως τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου και του Λυκείου τυπώνονται από τον Οργανισμό Εκδόσεως Διδακτικών Βιβλίων και διανέμονται δωρεάν.

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ**  
**ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ**

Κωστόπουλος Δ., Παπαχρήστου Π., Σκούντζος Π., Χαλκιά Κ.

# **ΦΥΣΙΚΗ**

**ΤΕΧΝΙΚΑ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΑ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΗΡΙΑ**

**2ου Κύκλου**

**ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ - ΑΘΗΝΑ**

#### ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ:

- Κωστόπουλος Δημήτριος, Δρ. Φυσικός, Καθηγητής Πανεπιστημίου Αθηνών
- Παπαχρήστου Παναγιώτης, Φυσικός, Καθηγητής Δ/θμιας Εκπαίδευσης
- Σκούντζος Παναγιώτης, Δρ. Φυσικός, Καθηγητής ΤΕΙ Πειραιά
- Χαλκιά Κρυσταλία, Δρ. Φυσικής, Λέκτορας Πανεπιστημίου Αθηνών

#### ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ:

- Κωστόπουλος Δημήτριος, Δρ. Φυσικός, Καθηγητής Πανεπιστημίου Αθηνών

#### ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΡΙΣΗΣ:

- Δρυς Μανώλης, Δρ. Φυσικός, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
- Καρανίκας Γιάννος, Φυσικός, Σχολικός Σύμβουλος
- Χρονόπουλος Χρήστος, Φυσικός, Καθηγητής Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης

#### ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:

- Πολυζώη Μαρία, Φιλόλογος, Καθηγήτρια Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης

#### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΕΙΜΕΝΩΝ - ΓΡΑΦΙΣΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

- Χριστοφόρου Πηνελόπη

#### ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

Επιστημονικός υπεύθυνος του Τομέα Γενικών Μαθημάτων

Αριστείδης Δασκαλάκης, Πάρεδρος του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Φίλοι/ες μαθητές/ιες της πρώτης τάξης του δεύτερου κύκλου των Τ.Ε.Ε., εσείς που κρατάτε αυτό το βιβλίο φυσικής στα χέρια σας και προς στους οποίους αυτό απευθύνεται, δεν θα μπορούσατε να πιστέψετε πόσες φορές σας σκεφτήκαμε κατά τη διάρκεια που γράφαμε αυτό το βιβλίο. Οι επιθυμίες σας, οι φόβοι σας, οι αναζητήσεις σας μας απασχόλησαν τόσες πολλές φορές που σχεδόν μας γίνατε γνώριμοι/ες και οικείοι/ες.

Γνωρίζουμε ότι πολλοί από σας σκοπεύετε να συνεχίσετε τις σπουδές σας στην τριτοβάθμια εκπαίδευση, ενώ άλλοι αποβλέπετε στην άμεση και γρήγορη κατά το δυνατόν επαγγελματική αποκατάσταση. Αισθανθήκαμε ότι όπως συμβαίνει με τους/τις περισσότερους/ες εφοίβους της ηλικίας σας, δεν σας χορηγεί και πολύ η ιδέα να δαπανάτε τις ώρες σας πάνω από ένα βιβλίο (οποιοδήποτε βιβλίο), ούτε ενθουσιάζεστε λύνοντας ασκήσεις φυσικής, ή κάποιου άλλου μαθήματος.

Πιστεύουμε όμως ότι είσαστε ευαίσθητα και προβληματισμένα άτομα που σε κάποιο βαθμό έχετε αγανακτήσει με τις αντιφάσεις της κοινωνίας μας και της εποχής μας, που ζητάτε με ειλικρίνεια και αποφασιστικότητα μια ισορροπία ανάμεσα στην πραγματικότητα και το όνειρο, το επιθυμητό και το εφικτό, την αλήθεια και το ψέμα.

Γράψαμε λοιπόν αυτό το βιβλίο φυσικής με στόχο, αφ' ενός μεν να αποτελέσει, το απαραίτητο υπόβαθρο για την κάλυψη των αναγκών στη φυσική όσων αποφοίτων θα κατευθυνθούν προς τα Τμήματα Τεχνολογικών Εφαρμογών των Τ.Ε.Ι, και αφ' ετέρου, για να δώσει την δυνατότητα στους υπόλοιπους, να γευθούν τους καρπούς της αλληλεπίδρασης με τη φυσική, δηλαδή τη μελέτη των φυσικών φαινομένων και των νόμων που τα διέπουν.

Οι καρποί αυτής της επαφής με τη φυσική είναι:

- α) Η ενίσχυση της ικανότητας για κριτική σκέψη
- β) Η ενίσχυση της εμπιστοσύνης μας στον επαγωγικό τρόπο σκέψης
- γ) Η καλλιέργεια της ικανότητας εκτίμησης του μέτρου των λόγων και των έργων
- δ) Η καλλιέργεια της ικανότητας παρατήρησης και εξαγωγής χρήσιμων συμπερασμάτων
- ε) Η κατανόηση ότι ο άνθρωπος αποτελεί μέρος της φύσης και υπόκειται στους ίδιους νόμους μ' αυτή.

Όλα αυτά, που δεν είναι παρά η κληρονομιά μας από τον ελληνικό τρόπο σκέψης, όπως τον δίδαξαν οι μεγάλοι Έλληνες Φυσικοί-Φιλόσοφοι και που ανεβίωσε με την αναγέννηση στα Πανεπιστήμια της Ευρώπης, αποτε-

λούν τα εφόδια που πρέπει να έχει κάθε υπεύθυνος πολίτης σήμερα. Στην εποχή μας, η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος υπόσχεται εντυπωσιακές βιοιατρικές, κοινωνικές και πολιτισμικές αλλαγές προς το καλύτερο ελπίζουμε, δημιουργεί όμως ταυτόχρονα και πολλούς ορατούς κινδύνους για το μέλλον της ανθρωπότητας, όπως η μόλυνση του περιβάλλοντος, τα όπλα μαζικής καταστροφής (πυρηνικά ή βιολογικά), η ανεξέλεκτη εκμετάλευση της γεννητικής μηχανικής.

Τα εφόδια αυτά, που όπως αναφέραμε πιο πάνω απορρέουν από την επαφή με τη φυσική, είναι ακριβώς αυτά που χρειάζονται οι αυριανοί υπεύθυνοι πολίτες για να στηρίξουν την κριτική τους και την αντίστασή τους στις πιθανές δυσμενείς κοινωνικές ή τεχνολογικές εξελίξεις και όχι ο φανατισμός ή η φοβία.

Πέραν όμως όλων αυτών, για όλους όσους τελειώνοντας τα Τ.Ε.Ε. θα στραφούν στον επαγγελματικό στίβο, η επαφή τους με τη φυσική, και δια μέσου αυτής με τη φύση, δεν πρέπει να κρίνεται κυρίως από την ωφέλεια που τυχόν μπορεί να τους προσφέρει. Την επαφή αυτή πρέπει να την βλέπει κανείς σαν μια απόλαυση, γιατί η φύση μέσω της φυσικής αποκαλύπτει την ομορφιά της. Αν η φύση δεν ήταν όμορφη δεν θα άξιζε να τη γνωρίσει κανείς και αν η φύση δεν άξιζε να την γνωρίσουμε, τέτοια ζωή δεν θ' άξιζε να την ζούμε.

Στην αναζήτηση της βαθύτερης αυτής γνωριμίας με τη φύση, πάνω στο καράβι της φυσικής, θα περάσετε από τη Σκύλα και τη Χάρυβδη του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, θα παραπλεύσετε τις Σειρήνες των γοητευτικών κυμάτων, θα σας θαμπώσουν ίσως τα λαμπυρίσματα των φωτεινών ακτίνων της οπτικής, θα ανακαλύψετε το μυστικό και απόκρυφο κόσμο των ακτινοβολιών και θα γνωριστήτε με το δόκτορα Τζέκιλ και το μίστερ Χάιντ του ενεργειακού μας μέλλοντος.

Όταν πια ολοκληρώσετε το ταξίδι σας, το βέβαιο είναι ότι θα 'χετε γνωρίσει καλύτερα τον εαυτό σας.

*Εντολή σου, είπε, αυτός ο κόσμος  
και γραμμένος μες τα σπλάχνα σου είναι  
Διάβασε και προσπάθησε.....  
Οδ. Ελύτης (Γένεση)*

### Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε το Π.Ι. για την συνεχή υποστήριξή του στην προσπάθεια συγγραφής του βιβλίου. Ευχαριστούμε επίσης την Επιτροπή Κρίσης για τις εύστοχες και εποικοδομητικές υποδείξεις που μας έκαναν. Τέλος, ευχαριστούμε τον Ακαδημαϊκό κ. Κ. Αλεξόπουλο και τον Δρ. Δ. Μαρίνο για την πρόθυμη παραχώρηση στοιχείων από το συγγραφικό τους έργο.

**Οι Συγγραφείς**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                     |           |
|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ΜΕΡΟΣ Ι Ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις .....</b>              | <b>1</b>  |
| Εισαγωγή .....                                                      | 3         |
| <b>Κεφάλαιο 1 Μαγνητικά Πεδία .....</b>                             | <b>5</b>  |
| 1.1 Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού .....                       | 7         |
| 1.2 Δύναμη Laplace .....                                            | 8         |
| 1.3 Μαγνητικά πεδία ρευματοφόρων αγωγών ορισμένου<br>σχήματος ..... | 13        |
| 1.4 Φυσικοί μαγνήτες .....                                          | 22        |
| 1.5 Στοιχειώδεις μαγνήτες .....                                     | 24        |
| 1.6 Μαγνητικά υλικά .....                                           | 26        |
| 1.7 Ο ηλεκτρομαγνήτης .....                                         | 29        |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                          | 32        |
| <b>Κεφάλαιο 2 Επαγωγικά Φαινόμενα .....</b>                         | <b>39</b> |
| 2.1 Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής ...                 | 41        |
| 2.2 Νόμος της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής .....                      | 45        |
| 2.3 Αμοιβαία επαγωγή (φαινόμενο) .....                              | 48        |
| 2.4 Αυτεπαγωγή (φαινόμενο) .....                                    | 51        |
| 2.5 Κανόνας του Lenz .....                                          | 54        |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                          | 58        |
| <b>Κεφάλαιο 3 Εναλλασσόμενα ρεύματα .....</b>                       | <b>63</b> |
| 3.1 Το εναλλασσόμενο ρεύμα και οι μαθηματικές<br>σχέσεις του .....  | 65        |
| 3.2 Μετασχηματιστής .....                                           | 70        |
| 3.3 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας .....                             | 73        |
| 3.4 Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις - Ασφάλειες .....                      | 77        |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                          | 84        |



**ΜΕΡΟΣ 2 ΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ..... 89**

|                |    |
|----------------|----|
| Εισαγωγή ..... | 91 |
|----------------|----|

**Κεφάλαιο 4 Μηχανικά Κύματα ..... 93**

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.1 Παραγωγή - Διάδοση Μηχανικών Κυμάτων .....                                                  | 95  |
| 4.2 Εγκάρσια και διαμήκη κύματα .....                                                           | 98  |
| 4.3 Ταχύτητα διάδοσης - Συχνότητα - Περίοδος - Μήκος κύματος - Θεμελιώδης εξίσωση κυμάτων ..... | 103 |
| 4.3.1 Συχνότητα .....                                                                           | 105 |
| 4.3.2 Περίοδος .....                                                                            | 106 |
| 4.3.3 Μήκος κύματος .....                                                                       | 106 |
| 4.3.4 Ταχύτητα διάδοσης .....                                                                   | 107 |
| 4.4 Οι ιδιότητες των κυμάτων .....                                                              | 109 |
| 4.4.1 Ανάκλαση .....                                                                            | 110 |
| 4.4.2 Διάθλαση .....                                                                            | 112 |
| 4.4.3 Συμβολή των κυμάτων .....                                                                 | 115 |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                                                      | 117 |

**Κεφάλαιο 5 Σεισμικά Κύματα ..... 121**

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 5.1 Αιτίες δημιουργίας των σεισμικών κυμάτων .....  | 123 |
| 5.2 Τα είδη των σεισμικών κυμάτων .....             | 123 |
| 5.3 Προσδιορισμός του επίκεντρου ενός σεισμού ..... | 125 |
| 5.4 Η κλίμακα μέτρησης του μεγέθους των σεισμών ... | 127 |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                          | 128 |

**Κεφάλαιο 6 Ηχητικά Κύματα ..... 131**

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| 6.1 Ο ήχος στον αέρα - Πηγές παραγωγής του ήχου .   | 133 |
| 6.2 Διάδοση του ήχου στον αέρα .....                | 133 |
| 6.3 Μέσα διάδοσης του ήχου - Ταχύτητα του ήχου .... | 136 |
| 6.4 Ένταση του ηχητικού κύματος .....               | 139 |
| 6.5 Απλοί και σύνθετοι ήχοι .....                   | 143 |
| 6.6 Υποκειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων .....      | 145 |
| 6.6.1 Το ύψος του ήχου .....                        | 145 |
| 6.6.2 Ακουστότητα .....                             | 146 |
| 6.6.3 Χροιά .....                                   | 149 |
| 6.7 Οι υπέρηχοι και οι εφαρμογές τους .....         | 150 |
| 6.7.1 Σόναρ (ηχοβολιστικές συσκευές) .....          | 151 |
| 6.7.2 Οι υπέρηχοι στην ιατρική .....                | 152 |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                          | 154 |



## **Κεφάλαιο 7 Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα ..... 157**

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1 Παραγωγή και διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων .....                           | 159 |
| 7.2 Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων .....                                           | 162 |
| 7.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα .....                                                       | 163 |
| 7.3.1 Ραδιοκύματα .....                                                                | 166 |
| 7.3.2 Μικροκύματα .....                                                                | 167 |
| 7.3.3 Υπέρυθη ακτινοβολία .....                                                        | 168 |
| 7.3.4 Το ορατό φως .....                                                               | 170 |
| 7.3.5 Η υπεριώδης ακτινοβολία .....                                                    | 171 |
| 7.3.6 Οι ακτίνες Χ .....                                                               | 172 |
| 7.3.7 Οι ακτίνες γάμα .....                                                            | 174 |
| 7.3.8 Βλάβες που δημιουργούνται από την<br>ιοντίζουσα (υπεριώδης, Χ και γ) ακτινοβολία | 174 |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                                             | 175 |

## **ΜΕΡΟΣ 3 ΟΠΤΙΚΗ ..... 179**

|                |     |
|----------------|-----|
| Εισαγωγή ..... | 181 |
|----------------|-----|

## **Κεφάλαιο 8 Φως - Ανάκλαση - Κάτοπτρα ..... 183**

|                                                   |     |
|---------------------------------------------------|-----|
| 8.1 Φύση του φωτός – Θεωρία των κβάντα .....      | 185 |
| 8.2 Ευθύγραμμη διάδοση του φωτός .....            | 188 |
| 8.3 Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός .....           | 192 |
| 8.4 Ανάκλαση του φωτός .....                      | 193 |
| 8.5 Νόμοι ανάκλασης του φωτός – Διάχυση .....     | 196 |
| 8.6 Επίπεδα κάτοπτρα και τα είδωλά τους .....     | 197 |
| 8.7 Τα σφαιρικά κάτοπτρα και τα είδωλά τους ..... | 200 |
| Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                        | 210 |

## **Κεφάλαιο 9 Διάθλαση - Φακοί - Όραση ..... 213**

|                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.1 Διάθλαση του φωτός .....                                                | 215 |
| 9.2 Νόμος της διάθλασης – (Νόμος του Snell) .....                           | 217 |
| 9.3 Ορική γωνία – Ολική ανάκλαση .....                                      | 221 |
| 9.4 Διάδοση του φωτός σε διαφανή πλάκα – Πρίσμα                             | 224 |
| 9.5 Οι φακοί και τα είδωλά τους .....                                       | 228 |
| 9.6 Συγκλίνοντες και αποκλίνοντες λεπτοί φακοί –<br>Διάγραμμα ακτίνων ..... | 230 |
| 9.7 Μεγέθυνση Φακού – Ισχύς Φακού .....                                     | 235 |
| 9.8 Σφάλματα φακών .....                                                    | 237 |

|                                                        |                                                                  |            |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.9                                                    | Όραση – Μηχανισμός όρασης .....                                  | 239        |
| 9.10                                                   | Ανωμαλίες όρασης .....                                           | 242        |
|                                                        | Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                       | 246        |
| <b>Κεφάλαιο 10 Διασκεδασμός - Πόλωση - Laser .....</b> |                                                                  | <b>251</b> |
| 10.1                                                   | Διασκεδασμός του φωτός .....                                     | 253        |
| 10.2                                                   | Ανάλυση του φωτός .....                                          | 253        |
| 10.3                                                   | Ανασύνθεση του λευκού φωτός .....                                | 255        |
| 10.4                                                   | Το ουράνιο τόξο .....                                            | 257        |
| 10.5                                                   | Γραμμικά φάσματα εκπομπής .....                                  | 258        |
| 10.6                                                   | Φασματοσκόπιο – Φάσματα απορρόφησης<br>(Γραμμικά - συνεχή) ..... | 259        |
| 10.7                                                   | Φασματοσκοπική ανάλυση .....                                     | 262        |
| 10.8                                                   | Πόλωση του φωτός .....                                           | 263        |
| 10.9                                                   | Laser .....                                                      | 267        |
|                                                        | Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                       | 269        |
| <b>ΜΕΡΟΣ 4 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....</b>       |                                                                  | <b>273</b> |
|                                                        | Εισαγωγή .....                                                   | 275        |
| <b>Κεφάλαιο 11 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ .....</b>   |                                                                  | <b>277</b> |
| 11.1                                                   | Ραδιενέργεια .....                                               | 279        |
| 11.2                                                   | Ακτινοβολία $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ .....                  | 281        |
| 11.3                                                   | Απαριθμητής Geiger (Γκάιγκερ) .....                              | 283        |
| 11.4                                                   | Κοσμική ακτινοβολία .....                                        | 285        |
| 11.5                                                   | Μεγέθη και μονάδες ραδιοακτινοβόλησης .....                      | 287        |
| 11.6                                                   | Πυρηνική σχάση και σύντηξη .....                                 | 292        |
|                                                        | 11.6.1 Σχάση .....                                               | 292        |
|                                                        | 11.6.2 Σύντηξη .....                                             | 295        |
| 11.7                                                   | Επιπτώσεις της ραδιενέργειας .....                               | 296        |
|                                                        | Ερωτήσεις - Ασκήσεις .....                                       | 301        |
| <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>                              |                                                                  | <b>307</b> |

μέρος 1

## **ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ**



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κεφάλαιο των Ηλεκτρομαγνητικών Αλληλεπιδράσεων, με τη θεματολογία η οποία έχει προσδιοριστεί από τα αρμόδια όργανα της πολιτείας, αποτελεί τμήμα της μεγάλης ενότητας του Ηλεκτρομαγνητισμού.

Πριν από το περίφημο πείραμα του Oersted και τα αποκαλυπτικά πειράματα του Faraday, ο Ηλεκτρισμός και ο Μαγνητισμός θεωρούνταν δύο ανεξάρτητες επιστημονικές ενότητες. Το πείραμα του Oersted αποκάλυψε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικά πεδία. Τα πειράματα του Faraday αποκάλυψαν ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να παράγουν ηλεκτρικά ρεύματα.

Η σύνθεση του Ηλεκτρισμού και του Μαγνητισμού ανέδειξε εκείνη την επιστημονική ενότητα, την οποία, σήμερα, αποκαλούμε Ηλεκτρομαγνητισμό. Ο Ηλεκτρομαγνητισμός υπήρξε η πρώτη ενοποίηση στη διαρκή προσπάθεια της επιστήμης να ενοποιήσει όλες τις φυσικές δυνάμεις σε μια μοναδική θεωρία. Από τη θεωρία αυτή θα αναδυόταν κάθε φορά, ανάλογα με τις συνθήκες, η καθεμία από τις 4 βασικές δυνάμεις: βαρυτική, ηλεκτρομαγνητική, ασθενής πυρηνική δύναμη και ισχυρή πυρηνική δύναμη. Η σύγχρονη επιστήμη έχει προχωρήσει αρκετά στην πορεία της ενοποίησης. Τα θέματα τα οποία θα αναπτύξουμε σ' αυτό το κεφάλαιο, ξεκινούν από τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων με τη βοήθεια ηλεκτρικών ρευμάτων και καταλήγουν με την παραγωγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Θα εξετάσουμε, επίσης, την αλληλεπίδραση μαγνητικού πεδίου και ρευματοφόρων αγωγών ή μαγνητικού πεδίου και δεσμών από κινούμενα ηλεκτρισμένα σωματίδια, την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια του φαινομένου της επαγωγής. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής, το οποίο αποτελεί την επιστημονική βάση για τη σπουδαία τεχνολογική εφαρμογή των μετασχηματιστών με τη βοήθεια των οποίων μπορούμε να αυξήσουμε (ή και να ελαττώσουμε) το πλάτος μιας εναλλασσόμενης τάσης



**Hans Christian Oersted (1777-1851)**

Δανός καθηγητής και ερευνητής. Σπούδασε στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης και πήρε το διδακτορικό του το 1799. Έγινε καθηγητής στο Πανεπιστήμιο το 1806. Κάποια μέρα του 1820 και ενώ προετοίμαζε ένα πείραμα για τους σπουδαστές του, παρατήρησε ότι η βελόνα κάποιας πυξίδας που την πλησίασε σ' ένα ρευματοφόρο αγωγό "τρίγχε" και στράφηκε προς τον αγωγό. Σε όλες τις επαναλήψεις, η συμπεριφορά της βελόνας ήταν ίδια. Την ημέρα εκείνη μπήκαν τα θεμέλια του ηλεκτρομαγνητισμού.

και με αυτό τον τρόπο να καταστήσουμε οικονομική την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Γενικά, μπορούμε να δώσουμε στο πλάτος του εναλασσόμενου ρεύματος την τιμή που χρειάζεται κάθε φορά για τη λειτουργία των διάφορων συσκευών. Το σενάριο είναι μακρύ και θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι μεταξύ των εφαρμογών σημαντική είναι η δυνατότητα παραγωγής εναλασσόμενου ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια του φαινομένου της επαγωγής. Το εναλασσόμενο ρεύμα σε συνδυασμό με τους μετασχηματιστές χρησιμοποιείται στην παραγωγή, μεταφορά και κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Θα εξετάσουμε ακόμα την αλληλεπίδραση της ύλης με τα μαγνητικά πεδία και τη μαγνήτιση των διάφορων υλικών.

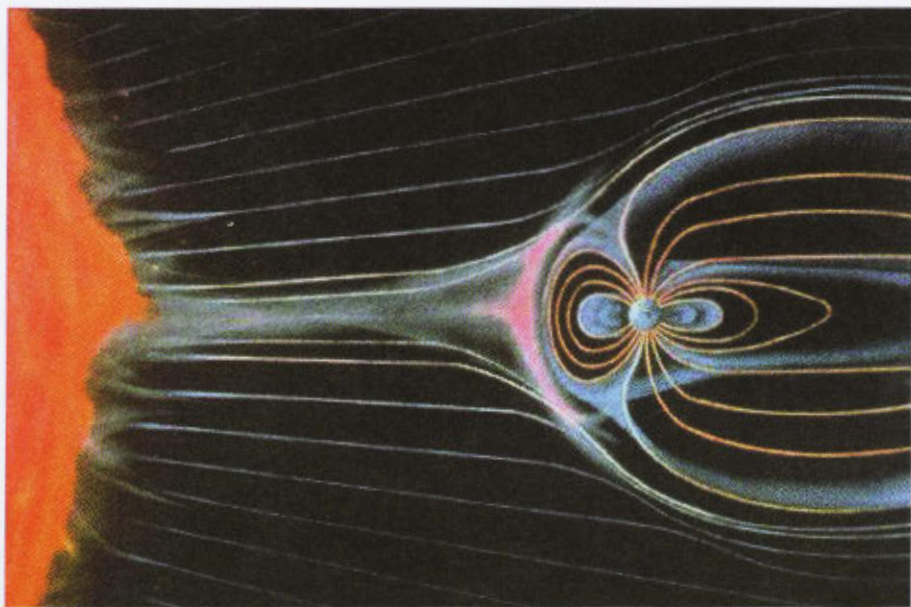
Το τεχνολογικό ενδιαφέρον των βασικών αρχών και νόμων του ηλεκτρομαγνητισμού αποδεικνύεται από τις πολλές εφαρμογές οι οποίες έχουν περάσει σε καθημερινή χρήση. Από τον απλό ηλεκτρομαγνήτη που χρησιμοποιούμε στα ηλεκτρικά κουδούνια μέχρι τους τεράστιους υπεραγωγίσιμους ηλεκτρομαγνήτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται, στα μεγάλα ερευνητικά κέντρα, στους επιταχυντές φορτισμένων σωματιδίων, “δουλεύει” η ίδια αρχή.

Ο απλός κινητήρας, που μπορείτε να κατασκευάσετε σε 10 λεπτά και οι τεράστιοι βιομηχανικοί κινητήρες “δουλεύουν” πάνω στην ίδια αρχή. Αν μπορείτε να αντιστρέψετε νοητικά καταστάσεις, θα αντιληφτείτε πολύ εύκολα ότι ο ηλεκτρικός κινητήρας και η ηλεκτρική γεννήτρια είναι οι δύο όψεις του ίδιου νομίσματος.

Η μαγνητοϋδροδυναμική είναι ο κλάδος ο οποίος ασχολείται με την προώθηση των πλοίων με τη βοήθεια μαγνητικών πεδίων. Η υπεραγωγιμότητα είναι η ιδιότητα ορισμένων υλικών να συντηρούν ηλεκτρικό ρεύμα με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Με τη βοήθεια αυτού του φαινομένου, όχι μόνο κατασκευάζονται πανίσχυροι ηλεκτρομαγνήτες, αλλά δημιουργείται και το φαινόμενο της μαγνητικής ανύψωσης σωμάτων (*mag-lev /magnetic levitation*). Ενδιαφέρουσα τεχνολογική εφαρμογή θα είναι η κατασκευή τρένων και άλλων μεταφορικών μέσων, τα οποία θα κινούνται με τη βοήθεια της μαγνητικής ανύψωσης, πράγμα που σημαίνει ότι δε θα απαιτούνται τροχοί και ότι θα αναπτύσσουν πολύ μεγάλες ταχύτητες, αφού οι τριβές γίνονται πολύ μικρές. Δεν αναφερόμαστε στο μακρινό μέλλον. Τέτοια τρένα κυκλοφορούν ήδη στην Αγγλία και στην Ιαπωνία. Δε θα ήταν υπερβολή να ισχυριστούμε ότι ο 21<sup>ος</sup> αιώνας θα είναι ο αιώνας της μετακίνησης με μαγνητική ανύψωση.



# κεφάλαιο 1



*Ηλιακός άνεμος*

## ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

- Μαγνητικό πεδίο ρευματοφόρου αγωγού
- Δύναμη Laplace
- Μαγνητικά πεδία ρευματοφόρων αγωγών ορισμένου σχήματος
- Φυσικοί μαγνήτες
- Στοιχειώδεις μαγνήτες
- Μαγνητικά υλικά
- Ο ηλεκτρομαγνήτης





## 1.1 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΡΕΥΜΑΤΟΦΟΡΟΥ ΑΓΩΓΟΥ

*Η μαγνητική βελόνα κινδυνεύει. Όπου και να γυρίσει θαμπώνεται  
από το φλογόβολο πρόσωπο της εγκάρδιας ανατολής.*

*Οδ. Ελύτης (Η συναυλία των Γυάκινθων)*

Έχετε παρατηρήσει ότι, όταν ξεσπούν κεραυνοί στη διάρκεια μιας καταιγίδας, οι εικόνες της τηλεόρασης παρουσιάζουν παραμόρφωση και ότι η φωτοβολία των λαμπτήρων φωτισμού ελαττώνεται; Έχετε παρατηρήσει, ακόμα ότι, όταν περνάτε με το αυτοκίνητό σας κάτω ή κοντά από πυλώνες υψηλής τάσης της ΔΕΗ, στο ραδιόφωνό σας, το οποίο μέχρι εκείνη τη στιγμή έπαιζε κανονικά, εμφανίζονται “παράσιτα”; Έχετε δει φωτογραφίες, όπως αυτή της εικόνας (1.1), στην οποία το βόρειο σέλας φαίνεται να κατεβαίνει από τον ουρανό σαν μια τεράστια πολύχρωμη κουρτίνα σε περιοχές του αρκτικού κύκλου; Οι δύο πρώτες διαταραχές σχετίζονται με το ότι τα ρεύματα των κεραυνών δημιουργούν μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία, τα οποία προκαλούν τις παρατηρούμενες διαταραχές.



**Εικόνα 1.1** Το Βόρειο Σέλας

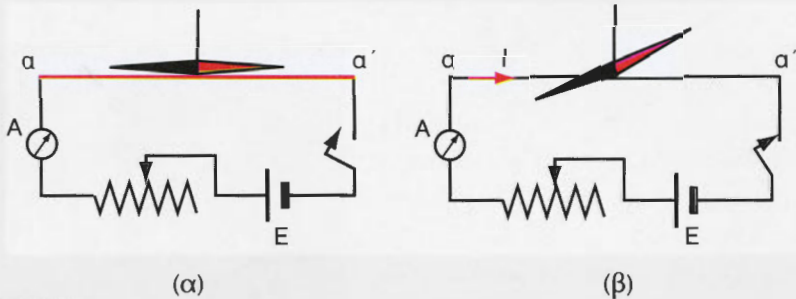
Το τρίτο φαινόμενο οφείλεται στο ίδιο το μαγνητικό πεδίο της Γής, το οποίο “παγιδεύει” και επιταχύνει φορτισμένα σωματίδια που προέρχονται από το διάστημα. (Οι κρούσεις των σωματιδίων με τα μόρια των αερίων της ατμόσφαιρας αναγκάζουν τα μόρια σε διεγέρσεις και αποδιεγέρσεις. Στις αποδιεγέρσεις των μορίων οφείλονται τα χρώματα τα οποία εμφανίζονται στο βόρειο σέλας).

Ο πρώτος ο οποίος απέδειξε πειραματικά ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να δημιουργηθούν από ηλεκτρικά ρεύματα ήταν ο H.C. Oersted. Το πείραμά του ήταν απλό και μπορούμε να το επαναλάβουμε.

### Πείραμα

Ο μεταλλικός αγωγός α’ έχει τεντωθεί, ώστε να έχει, αρχικά, τη διεύθυνση μαγνητικής βελόνας σε ελεύθερη εξάρτηση, δηλαδή τη διεύθυνση μαγνητικού βορρά-μαγνητικού νότου. Τα άκρα του αγωγού έχουν συνδεθεί με τους πόλους πηγής. Στο κύκλωμα έχει τοποθετηθεί σε σειρά αντιστάτης με ρυθμιζόμενη αντίσταση και διακόπτης, ο οποίος αρχικά είναι ανοι-

χτός. Όταν κλείσουμε το διακόπτη, θα παρατηρήσουμε ότι η μαγνητική βελόνα θα κάνει ένα απότομο “τίναγμα” και μετά από λίγες αιωρήσεις θα ισορροπήσει σε μία θέση η οποία θα σχηματίζει κάποια γωνία με την αρχική θέση της, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.2



**Εικόνα 1.2**

Το μαγνητικό πεδίο του ρεύματος επιδρά στη μαγνητική βελόνα (β) και την εκτρέπει από τη θέση ισορροπίας της (α).

## Ερμηνεία

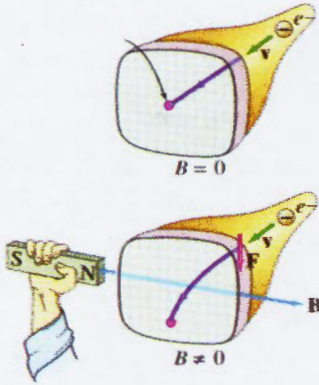
Η ερμηνεία της “συμπεριφοράς” της βελόνας πρέπει να αναζητηθεί στη δίοδο του ρεύματος μέσα από τον αγωγό αα, αφού η δίοδος ρεύματος είναι η μόνη μεταβολή που παρατηρήθηκε με το κλείσιμο του διακόπτη. Γνωρίζουμε εξάλλου ότι η μαγνητική βελόνα επηρεάζεται από τα μαγνητικά πεδία. Το συμπέρασμα είναι άμεσο: **το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί μαγνητικό πεδίο.**

Το φαινόμενο είναι γενικό. Κάθε ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί στο χώρο μαγνητικό πεδίο. Στην περίπτωση κατά την οποία ο αγωγός έχει κάποιο απλό γεωμετρικό σχήμα (π.χ. ευθύγραμμος αγωγός, κυκλικός αγωγός), είναι δυνατόν και ο μαθηματικός υπολογισμός ποσοτικών στοιχείων για το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου στα διάφορα σημεία του χώρου. Το μαγνητικό πεδίο περιγράφεται από ένα διανυσματικό μέγεθος, το οποίο ονομάζεται **πεδίο  $\vec{B}$**  και συμβολίζεται με  $\vec{B}$ . Εάν η τιμή του πεδίου  $\vec{B}$  είναι ίδια σε κάθε σημείο του μαγνητικού πεδίου, τότε το μαγνητικό πεδίο ονομάζεται **ομογενές**.

## 1.2 ΔΥΝΑΜΗ LAPLACE

Αν το εργαστήριό σας διαθέτει παλμογράφο, μπορείτε να κάνετε το εξής πείραμα. (εικ. 1.3). Ρυθμίστε τον παλμογράφο, ώστε η δέσμη ηλεκτρονίων να εστιάζεται στο κέντρο της οθόνης του. Αυτό θα το διαπιστώσετε από το φωτεινό ίχνος που δημιουργεί η δέσμη στο κέντρο της οθόνης. Πλησιάστε έ-

να ραβδόμορφο μαγνήτη σε διάφορες θέσεις κοντά στη οθόνη και παρατηρήστε τον τρόπο με τον οποίο μετατοπίζεται το φωτεινό ίχνος πάνω στην οθόνη.



**Εικόνα 1.3**

Τα ηλεκτρόνια της δέσμης που δημιουργεί ο παλμογράφος δέχονται μαγνητικές δυνάμεις και αποκλίνουν από την ευθύγραμμη πορεία τους. Τα ηλεκτρόνια παράγονται από θερμαινόμενο μεταλλικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και στη συνέχεια επιταχύνονται με τη βοήθεια ηλεκτρικού πεδίου.

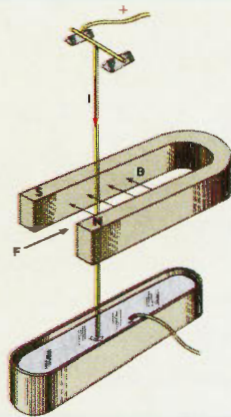
Τι αποδεικνύει αυτή η συμπεριφορά της δέσμης ηλεκτρονίων; Το μήνυμα είναι φανερό:

Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις σε κινούμενα φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρικούς φορείς).

## Πείραμα

Στην εικόνα (1.4) φαίνεται μια απλή διάταξη με την οποία μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις σε ρευματοφόρους αγωγούς.

Ο κατακόρυφος αγωγός διαρρέεται από ρεύμα το οποίο εξασφαλίζει ηλεκτρική πηγή συνδεδεμένη στα άκρα του. Στο κύκλωμα παρεμβάλλεται διακόπτης ο οποίος αρχικά είναι ανοιχτός. Το κάτω άκρο του αγωγού ακουμπάει ελαφρά στην επιφάνεια αλατόνευρου που περιέχεται στη λεκάνη. Τμήμα του αγωγού έχει τοποθετηθεί στο εσωτερικό πεταλοειδούς μαγνήτη, ο οποίος δημιουργεί οριζόντιο μαγνητικό πεδίο. Το αλατόνευρο χρησιμοποιείται, α-



**Εικόνα 1.4**

Το μαγνητικό πεδίο ασκεί δύναμη στον ρευματοφόρο αγωγό



φενός για να εξασφαλίζεται η ηλεκτρική επαφή και η κυκλοφορία ρεύματος, αφετέρου, για να επιτρέπει στον κατακόρυφο αγωγό να κινείται. Κλείνουμε το διακόπτη και παρατηρούμε ότι ο αγωγός κινείται κατά την κατεύθυνση του βέλους. Ανοίγουμε το διακόπτη και παρατηρούμε ότι ο αγωγός επανέρχεται στην προηγούμενη θέση του. Είναι φανερό ότι ο ρευματοφόρος αγωγός, ο οποίος βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, δέχεται δύναμη. Η δύναμη αυτή ονομάζεται δύναμη Laplace. Μπορούμε να εξετάσουμε ποιοτικά την επίδραση διάφορων παραγόντων στη δύναμη που δέχεται ο ρευματοφόρος αγωγός. Μπορούμε, π.χ, να μεταβάλλουμε το ρεύμα και συγχρόνως να παρατηρούμε την εκτροπή του αγωγού από την κατακόρυφη θέση του. Μπορούμε, επίσης, να χρησιμοποιούμε μαγνήτες που δημιουργούν ασθενέστερα ή ισχυρότερα πεδία ή μπορούμε να αλλάζουμε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Μπορούμε, τέλος, να χρησιμοποιήσουμε μαγνητικά πεδία τα οποία να εκτείνονται περισσότερο στο χώρο και να εξετάσουμε την επίδραση του μήκους του αγωγού το οποίο βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο στην εκτροπή του σύρματος και, κατά συνέπεια, στο μέτρο της δύναμης που δέχεται.

Η λεπτομερής πειραματική έρευνα έδειξε ότι το μέτρο της δύναμης Laplace εξαρτάται από:

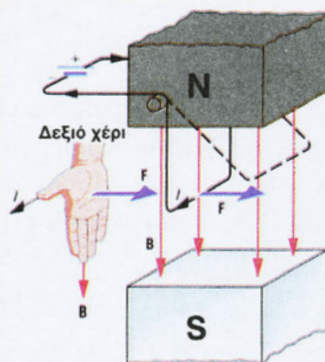
- το μέτρο  $B$  του μαγνητικού πεδίου.
- το ρεύμα  $I$  το οποίο διαρρέει τον αγωγό.
- το μήκος  $\ell$  του αγωγού το οποίο βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.
- το ημίτονο της γωνίας  $\varphi$  (ημφ) την οποία σχηματίζει η κατεύθυνση του αγωγού με την κατεύθυνση του  $\vec{B}$ .

Ως κατεύθυνση του αγωγού θεωρούμε την κατεύθυνση του ρεύματος (συμβατικής φοράς) που τον διαρρέει. Η γωνία  $\varphi$  είναι αυτή για την οποία ισχύει  $0 < \varphi < 180^\circ$ .

Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο προς όλους τους παραπάνω παράγοντες. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε:

$$F_L = BI\ell \eta \mu \varphi \quad (1)$$

Η κατεύθυνση της δύναμης Laplace



**Εικόνα 1.4α**

Τα δάχτυλα κατευθύνονται προς το  $\vec{B}$ . Ο αντίχειρας κατευθύνεται προς την κατεύθυνση του ρεύματος στον αγωγό. Η κατεύθυνση της κάθετης στην παλάμη είναι η κατεύθυνση της  $\vec{F}_L$ .

προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού, όπως φαίνεται στην εικόνα (1.4α).

Τεντώνουμε την παλάμη του δεξιού χεριού μας, έτσι ώστε τα τέσσερα δάχτυλα να δείχνουν προς την κατεύθυνση του πεδίου  $\vec{B}$  και ο αντίχειρας προς την κατεύθυνση του ρεύματος  $I$ . Η κατεύθυνση προς την οποία στρέφεται η παλάμη αποτελεί την κατεύθυνση της δύναμης.

Ο κανόνας χρησιμοποιεί τη συμβατική φορά του ρεύματος. Εάν πρόκειται για ρεύμα που οφείλεται σε δέσμη ηλεκτρονίων, η φορά του ρεύματος είναι αντίθετη προς την ταχύτητά τους. Ας μελετήσουμε λίγο ακόμα τη σχέση (1):

1. Εάν  $\varphi=0^\circ$  ή  $\varphi=180^\circ$ , επειδή  $\eta\mu 0^\circ=\eta\mu 180^\circ=0$ , προκύπτει ότι  $F_L=0$ . Τούτο σημαίνει ότι, εάν το ρεύμα  $I$  έχει την ίδια κατεύθυνση με το πεδίο ή κατεύθυνση αντίθετη από αυτό, το μέτρο της δύναμης Laplace είναι μηδέν.
2. Εάν  $\varphi=90^\circ$  ή  $\varphi=270^\circ$ , επειδή  $\eta\mu 90^\circ=1$  και  $\eta\mu 270^\circ=-1$ , το μέτρο της δύναμης Laplace μεγιστοποιείται με τιμή :

$$F_L = BI\ell \quad (2)$$

Αυτό σημαίνει ότι με δεδομένα τα  $B$ ,  $I$  και  $\ell$  το μέτρο της δύναμης Laplace γίνεται μέγιστο, όταν ο αγωγός είναι κάθετος στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Η σχέση (2) μας επιτρέπει να δώσουμε έναν αυστηρό ορισμό του διανύσματος  $\vec{B}$ , σε σημείο  $A$  μαγνητικού πεδίου.

### Ορισμός του πεδίου $\vec{B}$

- Τοποθετούμε μικρό, ευθύγραμμο, ρευματοφόρο αγωγό στο σημείο  $A$  και με διαδοχικές προσπάθειες προσδιορίζουμε τη διεύθυνση που πρέπει να έχει, ώστε να μην δέχεται δύναμη Laplace από το μαγνητικό πεδίο. Αυτή η διεύθυνση αποτελεί τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου στο σημείο  $A$  (θυμηθείτε την παρατήρηση 1).
- Τοποθετούμε τον αγωγό σε θέση κάθετη προς τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου (την οποία μόλις προσδιορίσαμε) και παρατηρούμε την κατεύθυνση προς την οποία εκτρέπεται. Η κατεύθυνση εκτροπής αποτελεί και την κατεύθυνση της δύναμης Laplace. Γνωρίζοντας την κατεύθυνση του ρεύματος και την κατεύθυνση της δύναμης Laplace, προσδιορίζουμε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου με τη βοήθεια του κανόνα του δεξιού χεριού.
- Το μέτρο  $B$  του μαγνητικού πεδίου θα προσδιοριστεί με τη βοήθεια του τύπου (2), αν τον λύσουμε ως προς  $B$  :  $B = \frac{F_L}{I\ell}$  (3), όπου  $F_L$  είναι το μέτρο της δύναμης Laplace, όταν ο αγωγός είναι τοποθετημένος κάθετα στη δι-

εύθυνση του μαγνητικού πεδίου,  $I$  το ρεύμα που τον διαρρέει και  $\ell$  το μήκος του.

Από τη σχέση (3) προκύπτει ότι η μονάδα του πεδίου στο σύστημα SI είναι:  $1\text{T}/\text{A}\cdot\text{m}$ . Η μονάδα αυτή ονομάζεται 1 tesla (1 T). Έτσι,  $1\text{T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}}$

### Ορισμός του 1 tesla (1 T)

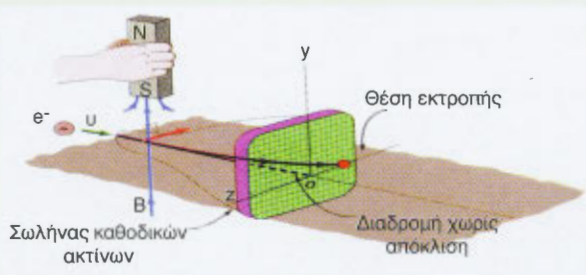
Το 1 T είναι το μέτρο του μαγνητικού πεδίου το οποίο ασκεί δύναμη 1 N σε ευθύγραμμο αγωγό μήκους 1m, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα 1A και είναι κάθετος στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

#### 1. ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Ρευματοφόρος αγωγός τοποθετείται σε κάποια περιοχή και διαπιστώνουμε ότι δεν ασκείται πάνω του δύναμη. Εξαιτίας της διαπίστωσης αυτής, μπορούμε να είμαστε σίγουροι ότι στην περιοχή δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο; Εάν όχι, τι πρέπει να κάνουμε για να βεβαιωθούμε; Να αιτιολογήσετε την άποψή σας

#### 2. ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Στην απέναντι εικόνα φαίνεται μια δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία υφίσταται απόκλιση από την ευθύγραμμη πορεία της, διότι στην περιοχή δρα μαγνητικό πεδίο. Να προσ-



διορίσετε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου.

Τι θα συμβεί στην κατεύθυνση απόκλισης της δέσμης, αν αναστρέψουμε τη φορά του μαγνητικού πεδίου;

Τι πρέπει να κάνουμε, ώστε η δέσμη ηλεκτρονίων να μην παρουσιάζει απόκλιση, παρά την ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου;

Αναφερόμαστε στην περίπτωση που φαίνεται στην εικόνα. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιήσουμε ένα, επιπλέον, ηλεκτροστατικό πεδίο, έτσι ώστε η δέσμη να μην παρουσιάζει απόκλιση, παρά την ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου;

Να αιτιολογήσετε όλες τις απαντήσεις σας. Να αγνοήσετε το μαγνητικό πεδίο της γης.



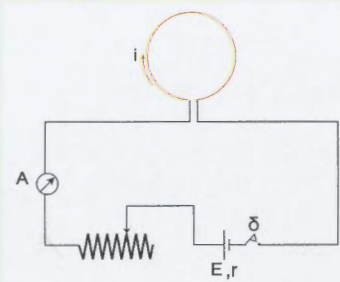
## 1.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΑΓΩΓΩΝ

### Α. Κυκλικός αγωγός

Είπαμε στην παράγραφο (1.1) ότι κάθε ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Εδώ, θα εξετάσουμε την περίπτωση του κυκλικού αγωγού. Ας δοκιμάσουμε το εξής απλό ποιοτικό πείραμα:

### Πείραμα

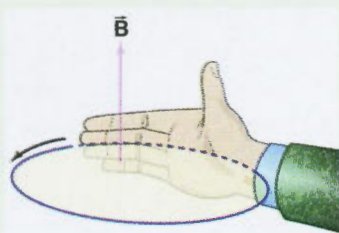
Στην εικόνα (1.5α) φαίνεται ένας κυκλικός αγωγός ο οποίος τροφοδοτείται με ρεύμα από ηλεκτρική πηγή. Στο κύκλωμα έχουμε παρεμβάλλει ρυθμιστική αντίσταση, αμπερόμετρο και διακόπτη. Ο κυκλικός αγωγός έχει τοποθετηθεί σε κατακόρυφο επίπεδο. Σε οριζόντιο επίπεδο έχουμε τοποθετήσει ένα ελαφρύ χαρτόνι. Έχουμε φροντίσει, ώστε ο αγωγός σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία του να περνάει από δύο μικρές τρύπες που έχουμε σχηματίσει στο χαρτόνι. Το αποτέλεσμα αυτής της κατασκευής είναι να έχουμε το μισό αγωγό πάνω από το χαρτόνι και τον άλλο μισό από κάτω. Πάνω στο χαρτόνι σκορπίζουμε ρινίσματα σιδήρου (σκόνη σιδήρου), ώστε να καλυφθεί με ομοιόμορφο τρόπο όλη η έκταση του χαρτονιού. Κλείνουμε το διακόπτη και χτυπάμε ελαφρά με το μολύβι μας το χαρτόνι. Θα παρατηρήσουμε ότι τα ρινίσματα σιδήρου ομαδοποιούνται και τοποθετούνται πάνω σε καμπύλες οι οποίες παρουσιάζουν μια κανονικότητα. Οι καμπύλες αυτές είναι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Σε κάθε σημείο τους το τοπικό διάνυσμα του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  είναι εφαπτόμενο. Αξίζει να παρατηρήσετε ότι οι δυναμικές γραμμές είναι κλειστές, δηλαδή δεν μπορούμε πάνω σ' αυτές να προσδιορίσουμε αρχή ή τέλος. Οι σκούρες καμπύλες γραμμές της εικόνας (1.5β) είναι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Το σύνολο των δυναμικών γραμμών ενός μαγνητικού πεδίου ονομάζεται **μαγνητικό φάσμα**. Στην εικόνα (1.5β) βλέπετε τμήμα του μαγνητικού φάσματος του πεδίου το οποίο δημιουργεί κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός. Τα ρινίσματα σιδήρου, τα οποία σκορπίσαμε πάνω στο οριζόντιο χαρτόνι, τοποθετούνται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών. Αυτή η ομαδοποίηση σκιαγραφεί το σχήμα των καμπύλων δυναμικών γραμμών.

**Εικόνα 1.5α**

Η διάταξη της εικόνας απεικονίζει την πειραματική διαδικασία με την οποία μελετάμε το μαγνητικό πεδίο κυκλικού αγωγού. Μεταβάλλοντας το ρεύμα  $I$ , μπορούμε να μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο και, κατά συνέπεια, τη μορφή του μαγνητικού φάσματος.

**Εικόνα 1.5β**

Το μαγνητικό πεδίο κυκλικού αγωγού, όπως οπτικοποιείται με τη βοήθεια του μαγνητικού φάσματος

**Εικόνα 1.6**

Για τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης του  $\vec{B}$  στο κέντρο κυκλικού ρευματοφόρου αγωγού, καμπυλώνουμε τα δάχτυλα του δεξιού χεριού, ώστε να δείχνουν κατά την φορά του ρεύματος  $I$ . Η κατεύθυνση του αντίχειρά μας δείχνει την κατεύθυνση του διανύσματος  $\vec{B}$

Είναι δυνατόν να προσδιορίσουμε πειραματικά το πεδίο  $\vec{B}$  σε κάθε σημείο. Μόνο στο κέντρο του κυκλικού αγωγού μπορούμε να το υπολογίσουμε με απλά μαθηματικά. Οι υπολογισμοί οδηγούν στα επόμενα συμπεράσματα για το διάνυσμα  $\vec{B}$  στο κέντρο του αγωγού.

- Το πεδίο  $\vec{B}$  είναι κάθετο στο επίπεδο του κυκλικού αγωγού.
- Η κατεύθυνσή του είναι η κατεύθυνση του αντίχειρα, όταν κάμπουμε τα δάχτυλα του δεξιού χεριού προς τη φορά του ρεύματος που διαρρέει κυκλικό αγωγό (για ρεύμα συμβατικής φοράς).
- Το μέτρο του διανύσματος δίνεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi I}{R} \quad (4)$$



όπου :

$I$  το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό

$R$  η ακτίνα του αγωγού

Η σταθερά  $\frac{\mu_0}{4\pi}$  συμβολίζεται με  $k_m$ . Για το κενό η τιμή της είναι

$$k_m = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}. \text{ Προφανώς, } \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

### ❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Ας θεωρήσουμε το άτομο του υδρογόνου, για το οποίο γνωρίζουμε ότι διαθέτει ένα ηλεκτρόνιο, το οποίο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα. Γνωρίζετε, ήδη, ότι το ηλεκτρόνιο είναι ηλεκτρικός φορέας με φορτίο  $q_e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$ . Το περιφερόμενο ηλεκτρόνιο δημιουργεί ρεύμα με ένταση  $I = q_e / T$ , όπου  $T$  η περίοδος περιστροφής του. Τούτο σημαίνει ότι δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Το μέτρο της έντασης στο κέντρο της τροχιάς του θα είναι

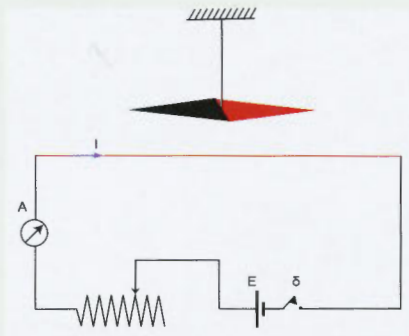


$$B = k_m \frac{2\pi q_e}{RT}$$

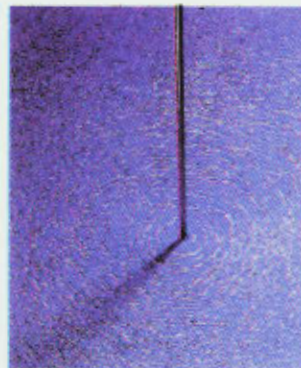
Αντιλαμβάνεστε ότι, για ένα άτομο το οποίο διαθέτει πολλά ηλεκτρόνια, θα δημιουργείται ένα σύνθετο μαγνητικό πεδίο του οποίου το μέτρο και η κατεύθυνση θα εξαρτώνται και από τις κατευθύνσεις των μαγνητικών πεδίων τα οποία παράγουν τα ηλεκτρόνιά του, καθώς περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα. Θα επανέλθουμε στο σημείο αυτό, όταν θα εξετάσουμε τα μαγνητικά πεδία που παράγουν οι μόνιμοι μαγνήτες.

### ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Κάθε κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί πεδίο  $\vec{B}$ , του οποίου το μέτρο δίνει η σχέση (4). Ποιο νομίζετε ότι θα είναι το μέτρο του πεδίου  $\vec{B}$ , το οποίο δημιουργείται στο κέντρο ημικυκλικού ρευματοφόρου αγωγού;

**Β. Ευθύγραμμος αγωγός**( με “άπειρο” μήκος)<sup>1</sup>**Πείραμα****Εικόνα 1.7**

Η πειραματική διάταξη για τη μελέτη του μαγνητικού πεδίου ευθύγραμμου αγωγού με “άπειρο” μήκος. Με τη ρυθμιστική αντίσταση μπορούμε να μεταβάλλουμε το ρεύμα  $I$ .

**Εικόνα 1.7α**

Το μαγνητικό πεδίο ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού με πολύ μεγάλο μήκος, όπως οπτικοποιείται με τη βοήθεια του μαγνητικού φάσματος.

Παίρνουμε ένα λευκό χαρτόνι με διαστάσεις 20cm x 30cm, αρκετά παχύ, ώστε να μην κάμπτεται λόγω του βάρους του. Στερεώνουμε το χαρτόνι σε οριζόντια θέση και από το κέντρο του περνάμε έναν ευθύγραμμο μεταλλικό αγωγό, τον οποίον τοποθετούμε σε κατακόρυφη θέση. Τα άκρα του αγωγού τα συνδέουμε με ηλεκτρική πηγή, αφού παρεμβάλουμε αντιστάτη με μεταβλητή αντίσταση, αμπερόμετρο και ανοιχτό διακόπτη (εικόνα 1.7). Πάνω στο χαρτόνι σκορπίζουμε μικρά ρινίσματα σιδήρου, φροντίζοντας να καλύψουμε όλη την έκταση του χαρτονιού με τρόπο ώστε η πυκνότητα των ρινισμάτων να είναι σε κάθε περιοχή του χαρτονιού περίπου ίδια. Κλείνουμε το διακόπτη και με ένα μολύβι χτυπάμε το χαρτόνι ελαφρά στα άκρα του, ώστε τα ρινίσματα να αναδιαταχθούν. Θα παρατηρήσουμε ότι αυτά θα τοποθετηθούν σε περιφέρειες, των οποίων το κέντρο βρίσκεται στο σημείο όπου ο αγωγός τέμνει το χαρτόνι (εικόνα 1.7α).

**Για να επιτύχει το πείραμα χρειάζεται ρεύμα τουλάχιστον 10Α. Αυτό σημαίνει ότι για την εκτέλεση του πειράματος είναι απαραίτητη η παρουσία του καθηγητή σας και η λήψη μέτρων ασφαλούς εκτέλεσης.**

<sup>1</sup> Στην πραγματικότητα πρέπει το μήκος του αγωγού να είναι πολύ μεγαλύτερο από την απόσταση του αγωγού από τα σημεία στα οποία υπολογίζουμε το μαγνητικό πεδίο.

## Ερμηνεία

Με το κλείσιμο του διακόπτη, από το κύκλωμα περνάει ρεύμα, πράγμα που διαπιστώνεται από την απόκλιση της βελόνας του αμπερομέτρου. Το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο, το οποίο αναγκάζει τα ρινίσματα σιδήρου να τοποθετηθούν με έναν ορισμένο τρόπο. Οι ομαδοποιήσεις που σχηματίζονται προσδιορίζουν εποπτικά τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Τα ρινίσματα σιδήρου μαγνητίζονται και δρουν ως μικρές μαγνητικές βελόνες, οι οποίες τοποθετούνται κατά μήκος των δυναμικών γραμμών του μαγνητικού πεδίου. Το συμπέρασμα, μέχρι εδώ είναι ότι:

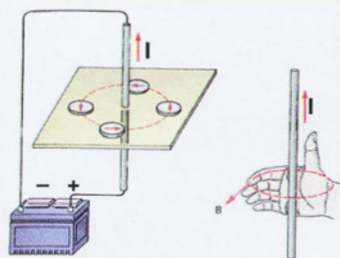
Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργεί ευθύγραμμος αγωγός διαρρεόμενος από ρεύμα είναι περιφέρειες κύκλων των οποίων τα επίπεδα είναι κάθετα στον αγωγό και των οποίων τα κέντρα βρίσκονται πάνω στον αγωγό.

Εάν συνεχίσουμε το πείραμα μπορούμε να προσδιορίσουμε τους παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν το μέτρο του μαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργεί ο ευθύγραμμος αγωγός σε σημείο Α. Έτσι, μεταβάλλοντας το ρεύμα  $I$  και την απόσταση  $R$  του σημείου Α από τον αγωγό, θα διαπιστώσουμε τα εξής:

- Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου σε σημείο Α είναι ανάλογο του ηλεκτρικού ρεύματος  $I$ .
- Το μέτρο του μαγνητικού πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση του σημείου Α από τον αγωγό.

Η κατεύθυνση του διανύσματος  $\vec{B}$  προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (εικ. 1.8). Περιβάλλουμε τον αγωγό με το δεξί χέρι έτσι, ώστε ο αντίχειρας να δείχνει κατά τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος. Η φορά των καμπυλομένων δακτύλων προσδιορίζει τη φορά των δυναμικών γραμμών και, κατά συνέπεια, την κατεύθυνση του διανύσματος  $\vec{B}$ .

Στην εικόνα (1.7α) φαίνεται τμήμα του μαγνητικού φάσματος του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ένας μακρύς ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός. Οι περι-



**Εικόνα 1.8**

Προσδιορισμός της κατεύθυνσης του πεδίου του ευθύγραμμου ρευματοφόρου αγωγού με πολύ μεγάλο μήκος.

φέρειες τις οποίες διακρίνετε σχηματίζονται από τα μικρά ρινίσματα σιδήρου που σκορπίσαμε στο χαρτόνι. Αν πάνω στο χαρτόνι τοποθετούσαμε μικροσκοπικές μαγνητικές βελόνες, αυτές θα τοποθετούνταν με τέτοιο τρόπο, ώστε ο άξονάς τους να εφάπτεται στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. (εικ. 1.8)

Συνοψίζοντας:

Το πεδίο σε απόσταση  $R$  από ευθύγραμμο αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα  $I$ :

- Έχει μέτρο που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi I}{R} \quad (5)$$

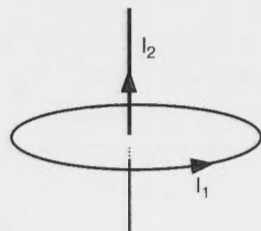
- Βρίσκεται σε επίπεδο κάθετο στον αγωγό.
- Έχει κατεύθυνση που προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού.

### ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Σας δίνουν ένα ευλύγιστο μονωμένο σύρμα. Κάμπτουμε το σύρμα στη μέση ώστε να σχηματιστούν δύο ευθύγραμμα τμήματα, τα οποία να έχουν το ίδιο μήκος, να είναι παράλληλα και να εφάπτονται. Αν στο σύρμα διαβιβάσουμε ρεύμα παρατηρούμε ότι στην περιοχή δεν ανιχνεύεται μαγνητικό πεδίο. Πως το εξηγείτε; Μπορούμε να πλέξουμε τα δύο κομμάτια του σύρματος το ένα γύρω από το άλλο; Αν το διπλωμένο σύρμα το διπλώνουμε άλλη μια φορά, τι θα συνέβαινε;

### ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ ΑΚΟΜΑ

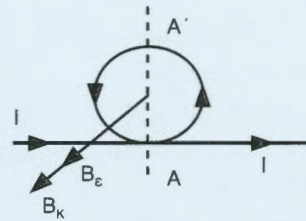
Στο απέναντι σχήμα φαίνεται ένας κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός, ο οποίος βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο. Από το κέντρο του διέρχεται ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός με πολύ μεγάλο μήκος. Να εξετάσετε εάν ο κάθε αγωγός ασκεί δύναμη στον άλλο. Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.





### ❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

Ευθύγραμμος, ηλεκτρικά μονωμένος αγωγός με πολύ μεγάλο μήκος κάμπτεται, ώστε σε ένα τμήμα του να σχηματιστεί κύκλος και, τελικά, να πάρει τη μορφή, η οποία φαίνεται στο απέναντι σχήμα. Ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα  $I$  και η ακτίνα του κύκλου είναι  $R$ . Να υπολογίσετε το πεδίο στο κέντρο του κυκλικού αγωγού.



### Λύση

Στο κέντρο του κυκλικού αγωγού, τα μέτρα των πεδίων που οφείλονται στον ευθύγραμμο και στον κυκλικό αγωγό είναι, αντιστοίχως

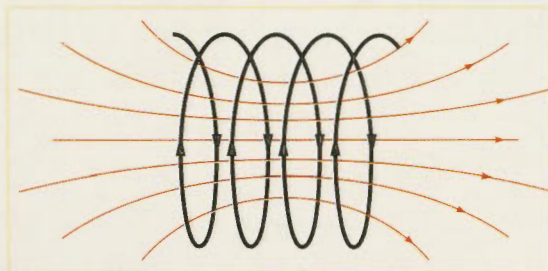
$$B_{\text{ευθ}} = k_m \frac{2I}{R} \quad B_{\text{κυκλ}} = k_m \frac{2\pi I}{R}$$

Τα αντίστοιχα διανύσματα είναι ομόρροπα και, κατά συνέπεια, το μέτρο του ολικού μαγνητικού πεδίου θα είναι:

$$B_{\text{ολ}} = B_{\text{ευθ}} + B_{\text{κυκλ}} = k_m \frac{2I}{R} + k_m \frac{2\pi I}{R} = \frac{2k_m I}{R} (1 + \pi)$$

### (IV) ΤΟ ΠΗΝΙΟ

Είναι ένα σύνολο μικρού αριθμού κυκλικών (συνήθως) αγωγών της ίδιας ακτίνας  $R$  σε στενή περιέλιξη. Εάν η διάμετρος κάθε κυκλικής σπείρας είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος του πηνίου, μπορούμε να υπολογίζουμε το μαγνητικό πεδίο



στο κέντρο του, αφού είναι το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών

πεδίων των κυκλικών αγωγών. Έτσι:

$$B = k_m \frac{2\pi I}{R} N$$

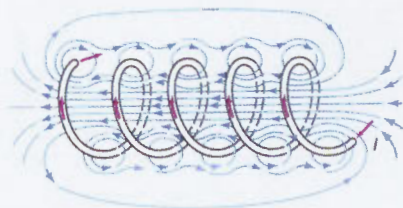
όπου  $N$  ο αριθμός των περιελίξεων. Εάν οι σπείρες βρίσκονται όλες στο ίδιο επίπεδο, έχουμε το επίπεδο κυκλικό πηνίο. Στην περίπτωση αυτή ως ακτίνα του πηνίου λαμβάνουμε τη μέση ακτίνα, η οποία είναι η μέση τιμή της εσωτερικής και της εξωτερικής ακτίνας του.

$$\bar{R} = \frac{R_{\text{εσωτ}} + R_{\text{εξωτ}}}{2} \quad \text{και} \quad B = k_m \frac{2\pi I}{\bar{R}} N$$

### Γ. Το σωληνοειδές

Είπαμε ότι κάθε αγωγός ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο. Μελετήσαμε τα μαγνητικά πεδία του κυκλικού αγωγού και του αγωγού με “άπειρο μήκος”. Είδαμε ακόμα και το μαγνητικό πεδίο του πηνίου. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις τα μαγνητικά πεδία είναι μη ομογενή. Το ερώτημα είναι αν μπορούμε να έχουμε μια “κατασκευή” η οποία, όταν διαρρέεται από ρεύμα, να δημιουργεί ομογενές μαγνητικό πεδίο. Η απάντηση είναι καταφατική και πραγματοποιείται στο **σωληνοειδές**.

Για να κατασκευάσουμε ένα σωληνοειδές, χρησιμοποιούμε ένα μονωμένο χάλκινο σύρμα, με το οποίο δημιουργούμε περιελίξεις της ίδιας ακτίνας, οι οποίες έχουν τον ίδιο άξονα. Ένα συνηθισμένο σωληνοειδές φαίνεται στην εικόνα (1.9). Να παρατηρήσετε (εικ. 1.10) ότι οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του σωληνοειδούς και, ιδιαίτερα, σε μια με-



Εικόνα 1.9

Ένα συνηθισμένο σωληνοειδές



Εικόνα 1.10

Το μαγνητικό φάσμα ενός σωληνοειδούς

γάλη περιοχή γύρω από το κέντρο του είναι παράλληλες, πράγμα που σημαίνει ότι το μαγνητικό πεδίο είναι ομογενές. Στην πραγματικότητα φροντίζουμε να έχουμε “στενή περιέλιξη”, δηλαδή οι μονωμένες σπείρες να εφά-



πτονται μεταξύ τους. Αυτό κάνει το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό ομογενές. Στην ιδανική (και απραγματοποίητη) περίπτωση που το σωληνοειδές έχει “άπειρο” μήκος, το μαγνητικό πεδίο περιορίζεται στο εσωτερικό του και είναι απόλυτα ομογενές. Για τα σωληνοειδή στα οποία το μήκος τους είναι μεγαλύτερο του πενταπλάσιου της διαμέτρου τους μπορούμε να υποθέτουμε ότι το πεδίο στο εσωτερικό τους είναι ομογενές, με εξαίρεση μία μικρή περιοχή γύρω από τα άκρα του.

Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα σωληνοειδές μήκους  $\ell$  που έχει  $N$  σπείρες και το οποίο διαρρέεται από ρεύμα  $I$ .

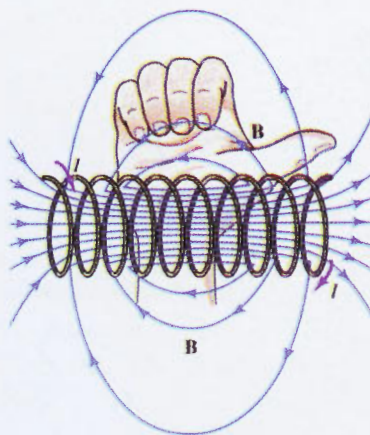
Εάν το μήκος του σωληνοειδούς είναι μεγαλύτερο από το πενταπλάσιο της διαμέτρου των σπειρών, το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι, με πολύ καλή προσέγγιση, ομογενές και το μέτρο του διανύσματος  $\vec{B}$  δίνεται από τη σχέση:

$$B = \mu_0 I \frac{N}{\ell} \quad (9)$$

Το πηλίκο  $\frac{N}{\ell}$  ονομάζεται **ανηγμένος αριθμός σπειρών  $N^*$**  και εκφράζει

τον αριθμό των σπειρών ανά μονάδα μήκους του σωληνοειδούς.

Η κατεύθυνση του  $\vec{B}$  προσδιορίζεται με τον κανόνα του δεξιού χεριού (εικόνα 11): διατηρούμε καμπυλωμένα τα τέσσερα δάχτυλα του δεξιού χεριού και τεντωμένο τον αντίχειρα. Κατευθύνουμε τα δάχτυλα κατά τη φορά του ρεύματος στις σπείρες. Η κατεύθυνση προς την οποία δείχνει ο αντίχειρας είναι η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ .



**Εικόνα 1.11**

Ο κανόνας του δεξιού χεριού για την εύρεση της κατεύθυνσης του  $\vec{B}$

### ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Σωληνοειδές με πυκνή περιέλιξη έχει μήκος  $\ell$  και  $N$  σπείρες. Άλλο σωληνοειδές με την ίδια πυκνή περιέλιξη έχει μήκος  $\ell/2$  και η διάμετρός του είναι ίση με τη διάμετρο του πρώτου. Τα δύο σωληνοειδή είναι κατασκευασμένα από το ίδιο σύρμα. Να συγκρίνετε τα μέτρα των πεδίων στο εσωτερικό τους, όταν διαρρέονται από ίδια ρεύματα.

## 1.4 ΦΥΣΙΚΟΙ ΜΑΓΝΗΤΕΣ

Όλοι σας γνωρίζετε ότι οι μαγνήτες έχουν την ιδιότητα να έλκουν μικρά σιδερένια αντικείμενα. Πολλοί από σας γνωρίζετε για τις μαγνητικές κλειδαριές, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε πόρτες ασφαλείας, ή έχετε χρησιμοποιήσει μικρούς μαγνήτες, για να στερεώσετε σημειώσεις στην πόρτα του ψυγείου σας. Κάποιοι από σας έχετε χρησιμοποιήσει πυξίδα για να προσανατολιστείτε, όταν βρίσκεστε σε δάσος.

Από πού προέρχονται, όμως, αυτές οι δυνάμεις; Για αιώνες η ιδιότητα των μαγνητών να έλκουν άλλα μεταλλικά αντικείμενα ή να έλκονται και να απωθούνται μεταξύ τους αποδιδόταν σε υπερφυσικές δυνάμεις. Σήμερα, γνωρίζουμε ότι ο μαγνητισμός συνδέεται στενά με τον ηλεκτρισμό και είναι οι δύο όψεις μιας θεμελιακής δύναμης, η οποία ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητική**. Αξιοποιούμε τον ηλεκτρομαγνητισμό για την κατασκευή πολλών συσκευών καθημερινής χρήσης.

Μολονότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός αποτελούν τις δύο όψεις του φαινομένου το οποίο ονομάζεται ηλεκτρομαγνητισμός, είναι χρήσιμο και εποικοδομητικό να εξετάσουμε τις ιδιότητες των μαγνητών και τον τρόπο με τον οποίο μαγνητίζονται τα διάφορα σώματα.

Στη φύση υπάρχουν σε ελεύθερη κατάσταση στερεά ορυκτά, κυρίως ορυκτά οξειδίων του σιδήρου, τα οποία παρουσιάζουν μαγνητικές ιδιότητες, έχουν, δηλαδή, την ικανότητα να έλκουν μικρά σιδερένια αντικείμενα (εικόνα 1.12α). Αν τα υλικά αυτά υποστούν κατάλληλη επεξεργασία, μπορεί να κατασκευαστούν τεχνητοί φυσικοί μαγνήτες με διάφορα σχήματα, όπως π.χ. ραβδόμορφοι ή πεταλοειδείς μαγνήτες (εικόνες β,γ)



**Εικόνα 1.12**  
Φυσικός  
μαγνήτης



Ραβδόμορ-  
φος μαγνή-  
της

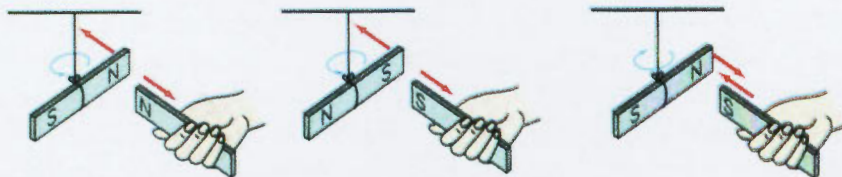


Πεταλοει-  
δής μαγνή-  
της

Στην εικόνα (1.12γ) παρατηρείτε ότι οι ελκτικές ιδιότητες του μαγνήτη εκδηλώνονται, κυρίως, σε δύο περιοχές, οι οποίες βρίσκονται στα άκρα του μαγνήτη. Τις περιοχές αυτές τις ονομάζουμε **μαγνητικούς πόλους**. Ο ένας πόλος ονομάζεται (συμβατικά) **βόρειος μαγνητικός πόλος (N)** και ο άλλος **νότιος μαγνητικός πόλος (S)**. Η πειραματική έρευνα έχει δείξει ότι οι όμοιοι μαγνητικοί πόλοι απωθούνται και οι ετερόνυμοι έλκονται (εικόνα 1.13).

Όταν σε κάποιο σημείο του χώρου τοποθετήσουμε ένα φυσικό ή έναν τεχνητό μαγνήτη, κάθε άλλος μαγνήτης που φέρεται στο χώρο αυτό δέχεται δύναμη. Λέμε τότε ότι στο χώρο υπάρχει **μαγνητικό πεδίο**. Τούτο σημαί-

νει ότι ο χώρος απέκτησε την ιδιότητα να ασκεί δυνάμεις σε άλλους μαγνή-  
 τες που φέρονται στο χώρο. Το διανυσματικό μέγεθος, το οποίο καθορίζει  
 πόσο ισχυρό είναι ένα μαγνητικό πεδίο στα διάφορα σημεία του χώρου, εί-  
 ναι το γνωστό σας μέγεθος, πεδίο  $\vec{B}$ .

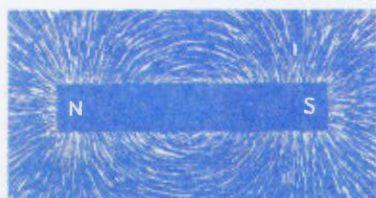


Εικόνα 1.13

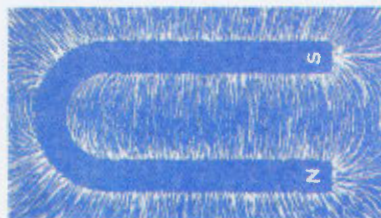
Α. Άπωση

Β. Άπωση

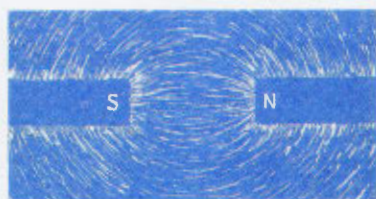
Γ. Έλξη



(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 1.14

Το μαγνητικό φάσμα ευθύγραμμου μαγνήτη (α), πεταλοειδούς μαγνήτη (β), δύο ετε-  
 ρώνυμων μαγνητικών πόλων (γ) και δύο ομώνυμων μαγνητικών πόλων (δ)

Η εποπτική απεικόνιση των μαγνητικών πεδίων επιτυγχάνεται με τη  
 βοήθεια των δυναμικών γραμμών. Οι δυναμικές είναι νοητές κα-  
 μπύλες σε κάθε σημείο των οποίων το τοπικό  $\vec{B}$  είναι εφραπτόμε-  
 νο. Συμβατικά οι δυναμικές γραμμές, έξω από τον μαγνήτη, ξεκινούν από το  
 βόρειο πόλο του και καταλήγουν στο νότιο. Οι δυναμικές γραμμές συνεχίζο-  
 νται στο εσωτερικό του μαγνήτη. Στην εικόνα (1.14) απεικονίζονται, με την  
 βοήθεια των δυναμικών γραμμών τους, τα μαγνητικά φάσματα των μαγνη-  
 τικών πεδίων που δημιουργούνται από διάφορους μαγνήτες.



## 1.5 ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΕΙΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ

Το βασικό ερώτημα είναι: γιατί άλλα σώματα εμφανίζουν μαγνητικές ιδιότητες και άλλα όχι; Ή, ακόμα, πού οφείλονται οι μαγνητικές ιδιότητες των μόνιμων μαγνητών; Κάτω από ποιες συνθήκες μπορούμε να μετατρέψουμε κάποια μέταλλα σε μαγνήτες και πώς μπορούμε να τους αφαιρέσουμε τις μαγνητικές τους ιδιότητες;. Στην παράγραφο (1.2) είδαμε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει διάφορους αγωγούς δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Η εξήγηση, λοιπόν, των μαγνητικών ιδιοτήτων των διάφορων υλικών, μπορεί να αναζητηθεί στην ύπαρξη ηλεκτρικών ρευμάτων. Όταν όμως εξετάζουμε ένα φυσικό μαγνήτη, δε διαπιστώνουμε ότι διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Πώς θα λυθεί το πρόβλημα; Η απάντηση είναι ότι πρέπει να διεισδύσουμε στο μικρόκοσμο του μαγνήτη. Ας μην ξεχνάμε ότι, σε τελευταία ανάλυση, όλη η ύλη αποτελείται από άτομα.

Ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή με την υπόδειξη ενός πειράματος, το οποίο μπορείτε να πραγματοποιήσετε, εάν το εργαστήριό σας έχει αρκετούς ραβδόμορφους μαγνήτες και έχετε την ευχέρεια να καταστρέψετε κάποιον από αυτούς. Στην εικόνα (1.15) φαίνεται ένας ραβδόμορφος μαγνήτης με τους δύο πόλους του. Κόβουμε το μαγνήτη στη μέση. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν δύο όμοιοι μαγνήτες που ο καθένας έχει δύο πόλους.



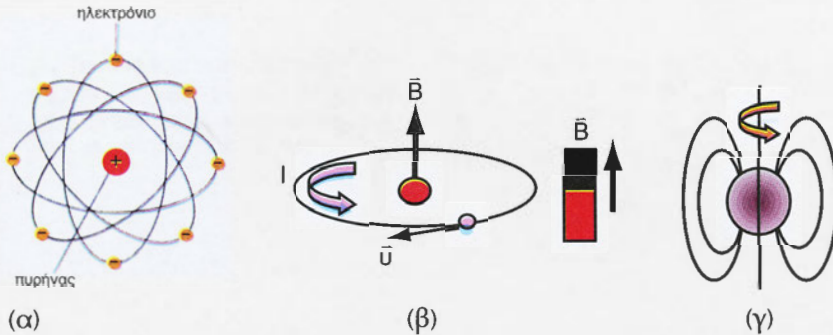
**Εικόνα 1.15**

*Η συνεχής διαίρεση ενός μαγνήτη σε δύο κομμάτια*

Ας κόψουμε τους μαγνήτες αυτούς στη μέση. Το αποτέλεσμα θα είναι τέσσερις μαγνήτες που ο καθένας έχει δύο πόλους. Το ίδιο θα επαναλαμβάνεται κάθε φορά που θα κόβουμε τους μαγνήτες στη μέση. Από κάθε μικρό μαγνήτη θα προκύπτουν δύο νέοι μικρότεροι. Αν, λοιπόν, είχατε βάλει στόχο να απομονώσετε ένα μαγνητικό πόλο, καλό είναι να το πάρετε απόφαση. Μεμονωμένοι μαγνητικοί πόλοι δεν υπάρχουν.

Το ερώτημα είναι: πού θα μπορούσαμε να φτάσουμε διαιρώντας συνεχώς τους μαγνήτες; Η απάντηση είναι ότι θα φτάσουμε σε εκείνη την οντότητα, η οποία είναι το βασικό συστατικό κάθε σώματος, δηλαδή στο άτομο. Σ' αυτό θα αναζητήσουμε την εξήγηση των μαγνητικών ιδιοτήτων των διάφορων σωμάτων. Το άτομο αποτελεί αυτό το οποίο ονομάζουμε **στοιχειώ-**

**δη μαγνήτη.** Αυτό σημαίνει ότι το ίδιο το άτομο πρέπει να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Πραγματικά, αυτό ακριβώς, συμβαίνει.



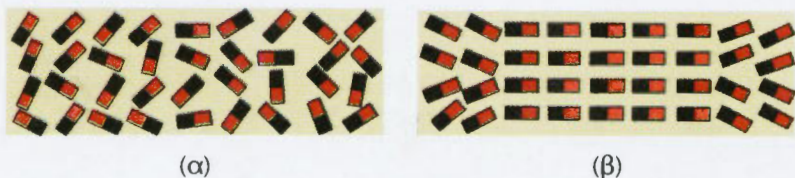
**Εικόνα 1.16**

Στο (α) φαίνεται ένα άτομο και η εξωτερική στιβάδα του. Στο (β) φαίνεται η ισοδυναμία του κυκλικού ρεύματος του ηλεκτρονίου και ενός μικροσκοπικού ραβδόμορφου μαγνήτη. Το ίδιο το ηλεκτρόνιο, λόγω της ιδιοπεριστροφής του, αποτελεί μικροσκοπικό μαγνήτη. (γ)

Στην εικόνα (1.16α) φαίνεται το άτομο ενός στοιχείου. Σύμφωνα με την κλασική άποψη αποτελείται από τον πυρήνα και από τα ηλεκτρόνια τα οποία περιφέρονται γύρω από αυτόν. Το ηλεκτρόνιο φέρει το στοιχειώδες αρνητικό φορτίο. Το περιφερόμενο ηλεκτρόνιο ισοδυναμεί με ηλεκτρικό ρεύμα. Μπορούμε να φανταστούμε ότι είναι ένας κυκλικός ρευματοφόρος αγωγός. Στην παράγραφο (1.1) μάθαμε ότι κάθε ρευματοφόρος αγωγός δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Τα άτομα, λοιπόν, μπορούν να αποτελούν τους στοιχειώδεις μαγνήτες. Το μαγνητικό πεδίο των ατόμων μπορεί να οφείλεται στα περιφερόμενα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας, διότι τα μαγνητικά πεδία των συμπληρωμένων στιβάδων αλληλοαναιρούνται και αλληλοεξουδετερώνονται. Στην εικόνα (1.16β) φαίνεται ένα ηλεκτρόνιο της εξωτερικής στιβάδας ενός ατόμου. Το αρνητικό ηλεκτρόνιο, περιφερόμενο γύρω από τον πυρήνα, ισοδυναμεί με ρεύμα συμβατικής φοράς, αντίθετης με τη φορά περιφοράς του. Το ρεύμα του ηλεκτρονίου μπορεί να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο. Αν το άτομο έχει περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα, το μαγνητικό πεδίο θα είναι το διανυσματικό άθροισμα των μαγνητικών πεδίων των ηλεκτρονίων. Είναι δυνατόν το σύνθετο μαγνητικό πεδίο να είναι μηδέν. Είναι, επίσης, δυνατόν τα άτομα ενός υλικού (οι στοιχειώδεις μαγνήτες) να δημιουργούν τα δικά τους μαγνητικά πεδία, αλλά το ίδιο το υλικό να μην εμφανίζει μακροσκοπικά μαγνητικές ιδιότητες, λόγω του τυχαίου προσανατολισμού των στοιχειωδών μαγνητών, όπως φαίνεται στην εικόνα (1.17α). Στην εικόνα (1.17β) φαίνεται ο προσανατολισμός των στοιχειωδών μαγνητών, όταν το υλικό τοποθετηθεί σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο.



Εκτός από το μαγνητικό πεδίο, λόγω της περιφοράς των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα, το κάθε ηλεκτρόνιο δημιουργεί και ένα πρόσθετο μαγνητικό πεδίο λόγω της ιδιοπεριστροφής του.



**Εικόνα 1.17**

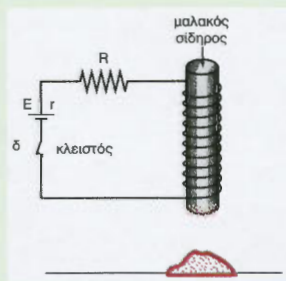
- α) Οι στοιχειώδεις μαγνήτες έχουν τυχαίο προσανατολισμό. Το υλικό δεν παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες.  
 β) Οι στοιχειώδεις μαγνήτες έχουν σε μεγάλο βαθμό τον ίδιο προσανατολισμό. Το υλικό παρουσιάζει μαγνητικές ιδιότητες.

## 1.6 ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΥΛΙΚΑ

### Πείραμα

Παίρνουμε κυλινδρική ράβδο από μαλακό σίδηρο. Την πλησιάζουμε σε μια μικρή ποσότητα από ρινίσματα σιδήρου ή σιδερένιες καρφίτσες και παρατηρούμε ότι δεν ασκεί καμία δράση πάνω τους. Γύρω από τη ράβδο τυλίγουμε ένα χάλκινο μονωμένο σύρμα, ώστε να σχηματιστεί στενή περιέλιξη, η οποία να καλύπτει όλο, σχεδόν, το μήκος της ράβδου. Φροντίζουμε ώστε το μήκος της ράβδου να είναι μεγαλύτερο από το πενταπλάσιο της διαμέτρου των περιελίξεων. Με τον τρόπο αυτό κατασκευάσαμε ένα σωληνοειδές το οποίο έχουμε εφοδιάσει με σιδενένιο πυρήνα. Τα άκρα του σύρματος τα συνδέουμε με τους πόλους πηγής συνεχούς τάσης. Στο κύκλωμα παρεμβάλλουμε σε σειρά αντιστάτη και ανοιχτό διακόπτη. Με ανοικτό το διακόπτη, πλησιάζουμε το ένα άκρο του σιδερένιου πυρήνα στα ρινίσματα σιδήρου και παρατηρούμε ότι η ράβδος δεν ασκεί επίδραση σ' αυτά. Κλείνουμε το διακόπτη και παρατηρούμε ότι τα ρινίσματα σιδήρου έλκονται και προσκολλώνται στη ράβδο. Ανοίγουμε το διακόπτη και παρατηρούμε ότι τα ρινίσματα αποκολλώνται από τη ράβδο. Τούτο σημαίνει ότι η ράβδος, όταν βρεθεί στο μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί η περιέλιξη, η οποία διαρρέεται από ρεύμα, αποκτά την ιδιότητα να έλκει μικρά σιδερένια αντικείμενα, δηλαδή παρατηρούμε ότι η ράβδος έγινε μαγνήτης. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι το υλικό **μαγνητίστηκε**. Η μαγνήτιση της σιδερένιας ράβδου ήταν πρόσκαιρη και διατηρήθηκε όσο

υπήρχε το ρεύμα στις σπείρες. Αντικαθιστούμε τη ράβδο από μαλακό σίδηρο με άλλη από χάλυβα και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία. Θα παρατηρήσουμε ότι και στην περίπτωση αυτή η ράβδος μαγνητίζεται. Τώρα όμως, όταν κλείσουμε το διακόπτη, η ράβδος δε χάνει την μαγνήτισή της. Στη περίπτωση αυτή έχουμε ένα **μόνιμο μαγνήτη**. Εάν βγάλουμε τη ράβδο από το σωληνοειδές, θα εξακολουθήσει να έλκει μικρά ρινίσματα σιδήρου.



**Εικόνα 1.18**

Συμπεριφορά υλικού σε μαγνητικό πεδίο

## Εξήγηση

Όταν η σιδερένια ράβδος βρίσκεται έξω από το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς, οι στοιχειώδεις μαγνήτες της έχουν τυχαίο προσανατολισμό, με αποτέλεσμα η ράβδος να μην εμφανίζει μαγνήτιση στο σύνολό της. Όταν η ράβδος βρίσκεται μέσα στο σωληνοειδές και κλείσουμε το διακόπτη, το σωληνοειδές διαρρέεται από ρεύμα και στο εσωτερικό του δημιουργείται μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_0$ . Το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_0$  προσανατολίζει τους στοιχειώδεις μαγνήτες στην ίδια κατεύθυνση με τη δική του. Τούτο σημαίνει ότι μέσα στη σιδερένια ράβδο αναπτύσσεται μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}'$  ομόρροπο με το αρχικό  $\vec{B}_0$ . Το σύνθετο πεδίο θα είναι  $B = B_0 + B'$ .

Επειδή τα πεδία  $\vec{B}_0$  και  $\vec{B}'$  είναι ομόρροπα, το μαγνητικό πεδίο ενισχύεται. Στην περίπτωση κάποιων κραμάτων του σιδήρου το μέτρο του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  μπορεί να είναι και αρκετές χιλιάδες φορές μεγαλύτερο

από το μέτρο του πεδίου  $\vec{B}_0$ , το οποίο προκάλεσε τη μαγνήτιση.

Το πηλίκο του μέτρου του ολικού μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του υλικού και του μέτρου του μαγνητικού πεδίου που προκάλεσε την μαγνήτιση του υλικού, ονομάζεται σχετική (μαγνητική διαπερατότητα  $K_m$ )

$$K_m = \frac{B}{B_0} \quad (10)$$

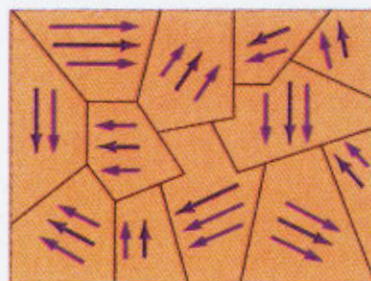
Υλικά όπως ο σίδηρος έχουν μεγάλη σχετική μαγνητική διαπερατότητα και ονομάζονται σιδηρομαγνητικά. Άλλα τέτοια υλικά είναι το κοβάλτιο και το νικέλιο.



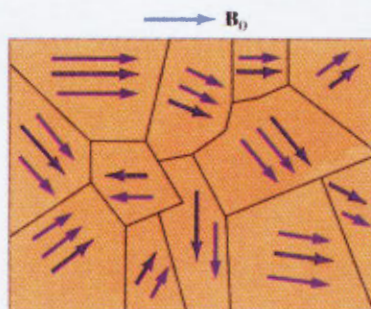
Αν προσπαθούσαμε να επαναλάβουμε το προηγούμενο πείραμα χρησιμοποιώντας αργίλιο αντί για σίδηρο, θα παρατηρούσαμε μία πολύ ασθενή μαγνήτιση του αργιλίου. Τι είναι εκείνο που κάνει το σίδηρο να μαγνητίζεται έντονα και το αργίλιο λίγο; Η απάντηση βρίσκεται στην εσωτερική δομή των μετάλλων. Στο εσωτερικό του σιδήρου οι στοιχειώδεις μαγνήτες δεν έχουν απολύτως τυχαίο προσανατολισμό, αλλά είναι ομαδοποιημένοι σε σύνολα τα οποία ονομάζονται **περιοχές**. (ή περιοχές Weiss) Σε κάθε περιοχή ο προσανατολισμός των στοιχειωδών μαγνητών είναι απολύτως ο ίδιος. Η όλη εικόνα έχει τη μορφή μωσαϊκού. Σε ένα υλικό που δεν έχει μαγνητιστεί, οι περιοχές έχουν τυχαίο προσανατολισμό και το υλικό δεν παρουσιάζει μακροσκοπικά μαγνήτιση (εικ. 1.19α). Σε ένα συνηθισμένο κομμάτι σιδήρου κάθε περιοχή μπορεί να περιέχει μέχρι  $10^{16}$  άτομα. Οι διαστάσεις της περιοχής είναι της τάξεως κλάσματος του χιλιοστού. Όταν τοποθετούμε ένα κομμάτι σιδήρου στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς, το μαγνητικό πεδίο ασκεί δυνάμεις στις περιοχές. Οι περιοχές οι οποίες έχουν την ίδια κατεύθυνση-ή περίπου την ίδια-με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου μεγαλώνουν και ταυτόχρονα προσανατολίζονται στην κατεύθυνση του εξωτερικού μαγνητικού πεδίου, ενώ οι περιοχές που έχουν διαφορετική κατεύθυνση μικραίνουν (εικ. 1.19β). Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι οι περιοχές, σε μεγάλο βαθμό, ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και το υλικό μαγνητίζεται.

Υλικά όπως το αργίλιο, τα οποία μαγνητίζονται ελάχιστα, όταν τοποθετηθούν σε μαγνητικό πεδίο, ονομάζονται **παραμαγνητικά**. Το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό αυτών των υλικών ενισχύεται ελάχιστα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν ο αέρας, το αργίλιο, το ουράνιο κ.ά.

Υπάρχει, τέλος, και μια τρίτη κατηγορία υλικών, τα οποία, όταν τοποθετηθούν σε μαγνητικό πεδίο αποκτούν μαγνήτιση με κατεύθυνση αντίθετη με

 $B_0 = 0$ 

(α)

 $B_0$ 

(β)

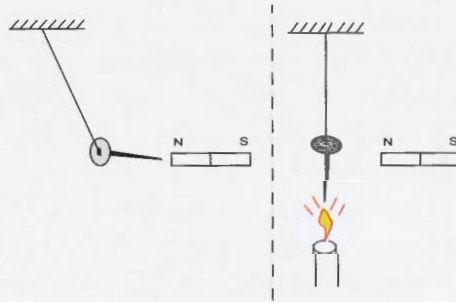
**Εικόνα 1.19**

α. Περιοχές Weiss σιδηρομαγνητικού υλικού

β. Οι περιοχές Weiss προσανατολίζονται όταν το σιδηρομαγνητικό υλικό τοποθετηθεί σε μαγνητικό πεδίο.

την κατεύθυνση του πεδίου  $\vec{B}_0$ . Τα υλικά αυτά ονομάζονται **διαμαγνητικά** και σ' αυτά περιλαμβάνονται το βισμούθιο, το νερό, ο υδράργυρος κ.ά. Αν, λοιπόν, στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς τοποθετήσουμε ένα διαμαγνητικό υλικό, το μαγνητικό πεδίο εξασθενίζει ελαφρά. Αν το υλικό είναι παραμαγνητικό, το μαγνητικό πεδίο ενισχύεται ελαφρά. Αν, τέλος, το υλικό είναι **σιδηρομαγνητικό**, το μαγνητικό πεδίο ενισχύεται σημαντικά. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι, αν το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς χωρίς πυρήνα έχει τιμή  $B=10^{-3}\text{T}$ , η εισαγωγή σιδερένιου πυρήνα με  $K_m = 1200$  ανεβάζει το μέτρο του  $\vec{B}$  στην τιμή  $B=1,2\text{ T}$ .

Θα εξετάσουμε τώρα την επίδραση της θερμοκρασίας στη μαγνήτιση ενός σιδηρομαγνητικού υλικού. Στην εικόνα (1.20) έχουμε κρεμάσει μια μεγάλη σιδερένια πρόκα από ένα σταθερό σημείο με την βοήθεια νήματος. Πλησιάζουμε σ' αυτήν ένα μόνιμο μαγνήτη και παρατηρούμε την έλξη που αναπτύσσεται. Θερμαίνουμε την πρόκα και αυξάνουμε βαθμιαία τη θερμοκρασία της. Παρατηρούμε ότι η έλξη εξασθενίζει και, τελικά,



**Εικόνα 1.20**

*Η αύξηση της θερμοκρασίας καταστρέφει προοδευτικά τις μαγνητικές ιδιότητες των υλικών τα οποία είναι μαγνητισμένα*

εξαφανίζεται. Φαίνεται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας δρα ανταγωνιστικά στη μαγνήτιση της πρόκας. Αυτό εξηγείται εύκολα, αν σκεφτούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση της τυχαίας κίνησης των ατόμων και, κατά συνέπεια, καταστρέφει τον προσανατολισμό των περιοχών Weiss. Υπάρχει μια θερμοκρασία, ορισμένη για κάθε υλικό, στην οποία αυτό χάνει εντελώς τις μαγνητικές του ιδιότητες. Η θερμοκρασία αυτή ονομάζεται **θερμοκρασία Curie**,  $T_c$  προς τιμήν του Γάλλου φυσικού Pierre Curie. Η θερμοκρασία Curie για το σίδηρο είναι  $T_c=1043\text{ K}$ . Αν αρχίσουμε να ελαττώνουμε τη θερμοκρασία, το υλικό αποκτά εκ νέου τις μαγνητικές του ιδιότητες και έλκεται από τον μαγνήτη, εφόσον αυτός δεν απομακρυνθεί

## 1.7 Ο ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΗΣ

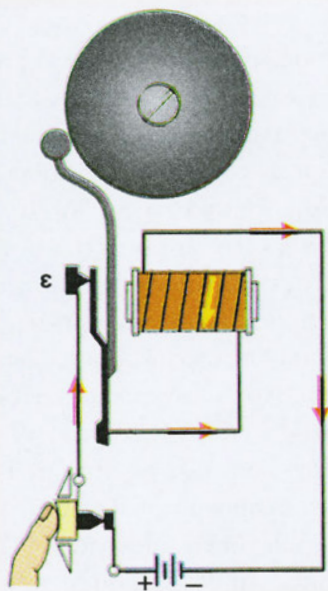
Ο ηλεκτρομαγνήτης είναι ένας τεχνητός μαγνήτης που παρουσιάζει παροδική μαγνήτιση. Αποτελείται από έναν πυρήνα από μαλακό σίδηρο, γύρω από τον οποίον έχει τυλιχτεί, συνήθως σε πυκνή περιέλιξη, ένα χάλκινο σύρμα εικόνα (1.21). Τα άκρα του σωληνοειδούς συνδέονται με πηγή συνεχούς τάσης.

**Εικόνα 1.21**

Ένας απλός ηλεκτρομαγνήτης. Το πηνίο έχει τυλιχτεί σε σιδερένιο πυρήνα. Εδώ, η περιέλιξη είναι αραιή. Μπορεί, όμως, να είναι πυκνή και, μάλιστα, να έχουμε επάλληλες περιελίξεις, που να είναι τοποθετημένες η μία πάνω στην άλλη

Όταν κλείσουμε το διακόπτη, από το σωληνοειδές διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα και στο εσωτερικό του δημιουργείται μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο προκαλεί τη μαγνήτιση του πυρήνα του μαλακού σιδήρου. Επειδή η (σχετική) μαγνητική επιδεκτικότητα του μαλακού σιδήρου είναι μεγάλη, το σύνθετο μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του είναι εξαιρετικά ισχυρό (εικ. 1.21).

Στην εικόνα (1.22) φαίνεται ένας ηλεκτρομαγνήτης, ο οποίος χρησιμοποιείται στο ηλεκτρικό κουδούνι μιας πόρτας. Μόλις πιέσουμε το διακόπτη, κλείνει το κύκλωμα και διέρχεται ρεύμα από το πηνίο με αποτέλεσμα να έλκεται ο σπλισμός ο οποίος συνδέεται με το μικρό πλήκτρο. Με αυτό τον τρόπο, αφενός το πλήκτρο χτυπάει στο μεταλλικό αντηχείο, αφετέρου διακόπτεται το κύκλωμα. Όταν το κύκλωμα διακοπεί, ο σιδερένιος πυρήνας απομαγνητίζεται και παύει να έλκει το πλήκτρο με αποτέλεσμα να απομακρύνεται το πλήκτρο από το αντηχείο και να αποκαθίσταται η επαφή ε, λόγω της ελαστικότητας του ελασματος. Η αποκατάσταση της επαφής έχει ως αποτέλεσμα να επαναληφθεί η κυκλοφορία ρεύματος στο κύκλωμα το οποίο περιλαμβάνει το πηνίο. Από δω και πέρα επαναλαμβάνεται συνεχώς ο ίδιος κύκλος, για όσο χρονικό διάστημα πιέζουμε το κουμπί.

**Εικόνα 1.22**

Το κύκλωμα ενός ηλεκτρικού κουδουνιού. Μόλις πιέσουμε το πλήκτρο κλείνει το κύκλωμα



## ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Μια πολύ ενδιαφέρουσα κατηγορία ηλεκτρομαγνητών είναι οι υπεραγώγιμοι ηλεκτρομαγνήτες. Η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας που ανακαλύφθηκε το 1911 από τον Ολλανδό φυσικό Kamerlingh Onnes ο οποίος έψυξε Hg σε θερμοκρασία περίπου 4 K (-269 °C), χρησιμοποιώντας υγρό He. Ο Onnes παρατήρησε ότι η αντίσταση του Hg, όταν ήταν σε θερμοκρασία 4,15 K, έπεσε απότομα κατά 100 000 φορές. Αυτό σημαίνει ότι, πρακτικά, η αντίσταση του Hg σε αυτές τις θερμοκρασίες μηδενίζεται. Αν, λοιπόν, ψύξουμε έναν κυκλικό αγωγό σ' αυτή τη θερμοκρασία και του διοχετεύσουμε ηλεκτρικό ρεύμα, το ρεύμα αυτό θα εξακολουθήσει να κυκλοφορεί για πολλά χρόνια. Το γεγονός ότι ο αγωγός σ' αυτές της συνθήκες δεν παρουσιάζει αντίσταση, μας δίνει τη δυνατότητα να παράγουμε υψηλά ρεύματα χωρίς απώλειες λόγω του φαινομένου Joule. Αν, λοιπόν, το σύρμα του σωληνοειδούς είναι από υπεραγώγιμο υλικό και διατηρείται σε θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν (-273 °C), είναι δυνατόν να επιτύχουμε την κυκλοφορία υψηλών ρευμάτων, πράγμα που στη συνέχεια σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε μαγνητικά πεδία εξαιρετικά ισχυρά. Οι υπεραγώγιμοι ηλεκτρομαγνήτες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε κινητήρες και άλλες μηχανές, για να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ. Υπεραγώγιμοι ηλεκτρομαγνήτες, οι οποίοι ψύχονται με υγρό He, χρησιμοποιούνται εδώ και αρκετό καιρό στους επιταχυντές σωματιδίων. Τέτοιοι μαγνήτες θα μπορούν να χρησιμοποιούνται για να ανυψώνουν και να κινούν τρένα και ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Το δύσκολο σημείο είναι ότι η υπεραγωγιμότητα απαιτεί πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, η πραγματοποίηση των οποίων είναι δύσκολη και δαπανηρή. Η έρευνα έχει οδηγήσει στην κατασκευή υλικών, τα οποία γίνονται υπεραγώγιμα σε θερμοκρασίες αρκετά πάνω από το απόλυτο μηδέν. Ελπίδες προς αυτή την κατεύθυνση δίνουν κάποια κεραμικά υλικά. Μπορείτε να φανταστείτε τι θα συνέβαινε, αν κάποιος κατασκεύαζε υπεραγώγιμο υλικό σε θερμοκρασία ψυγείου ή θερμοκρασία δωματίου; Η απουσία ηλεκτρικής αντίστασης ανοίγει πολλούς δρόμους. Είναι πολύ πιθανό να ακούσετε περισσότερα για την υπεραγωγιμότητα στο πολύ κοντινό μέλλον.

## ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2

Θα κατασκευάσουμε έναν ηλεκτρομαγνήτη με πολύ πρόχειρα υλικά. Πάρτε μια σιδερένια πρόκα και τυλίξτε γύρω της, σε πυκνή περιέλιξη, μονωμένο χάλκινο σύρμα, ώστε να καλυφτούν περίπου τα  $\frac{3}{4}$  της πρόκας. Τα

άκρα του σύρματος συνδέστε τα με μία μπαταρία των 9V.

1. Ακουμπήστε το ένα άκρο της πρόκας σε ένα μικρό σωρό από καρφίτσες. Τι παρατηρείτε;
2. Σηκώστε λίγο το άκρο του μαγνήτη και διακόψτε το κύκλωμα. Τι παρατηρείτε;
3. Χρησιμοποιήστε τώρα 4 πρόκες του ίδιου μήκους και σχηματίστε πυκνή περιέλιξη του ίδιου μήκους με την αρχική. Επαναλάβετε το βήμα 1. Τι παρατηρείτε;
4. Χρησιμοποιήστε δύο μπαταρίες των 9V σε σειρά και επαναλάβετε το βήμα 3. Τι παρατηρείτε;
5. Να επαναλάβετε τις διαδικασίες του βήματος 1, αλλά τώρα το μήκος της περιέλιξης να είναι το  $\frac{1}{3}$  της αρχικής. Τι παρατηρείτε;
6. Να επαναλάβετε το βήμα 5 σχηματίζοντας δύο στρώσεις τυλιγμάτων με τους επόμενους δύο τρόπους:
  - A. Όταν τελειώσετε το πρώτο στρώμα, σχηματίστε το δεύτερο, αρχίζοντας από το τέλος του πρώτου και τυλίγοντας το σύρμα προς τα πίσω.
  - B. Όταν τελειώσετε το πρώτο στρώμα, πηγαίνετε στην αρχή του και αρχίστε να τυλίγετε και το δεύτερο στρώμα, όπως τυλίξατε το πρώτο. Τι παρατηρείτε;

Εφόσον η κατασκευή σας επιτύχει πρέπει να είστε σε θέση να εκτιμήσετε ποιοτικά τους παράγοντες οι οποίοι προσδιορίζουν το μέτρο του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί αυτός ο ηλεκτρομαγνήτης.



## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Σε όλα τα προβλήματα η τιμή της σταθεράς  $k_m$  θα λαμβάνεται ίση με

$$k_m = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

1. Ο βόρειος πόλος μιας μαγνητικής βελόνας στρέφεται προς το Βόρειο Γεωγραφικό Πόλο της Γης. Πού βρίσκεται ο Βόρειος Μαγνητικός Πόλος της Γης;

2. Η δέσμη ηλεκτρονίων ενός παλμογράφου εκτρέπεται προς τα δεξιά της οθόνης για παρατηρητή ο οποίος κοιτάζει προς την οθόνη. Σε τι είδους εξωτερικό πεδίο μπορεί να οφείλεται η εκτροπή αυτή;
3. Ένας μικρός ραβδόμορφος μαγνήτης σχηματίζει ένα μαγνητικό δίπολο. Ένας μικρός κυκλικός βρόχος που διαρρέεται από ρεύμα σχηματίζει, επίσης, ένα μαγνητικό δίπολο. Χρησιμοποιήστε αυτή την αναλογία για να σχεδιάσετε τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου του μαγνητικού διπόλου, αφού πρώτα κάνετε το ίδιο για το μαγνητικό πεδίο του κυκλικού αγωγού.
4. Δύο μικροί κυκλικοί αγωγοί είναι τοποθετημένοι σε οριζόντιο τραπέζι, όπου μπορούν να ολισθαίνουν χωρίς τριβή. Διαβιβάζουμε στους αγωγούς ηλεκτρικό ρεύμα. Να εξετάσετε εάν θα ασκηθούν δυνάμεις ανάμεσα στους αγωγούς. Να διακρίνετε περιπτώσεις ανάλογα με τη φορά των ρευμάτων.
5. Έχετε ένα σύρμα συγκεκριμένου μήκους και θέλετε να κατασκευάσετε ένα κυκλικό αγωγό. Προκειμένου να έχετε ισχυρότερο μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του, τι είναι προτιμότερο: να κατασκευάσετε μία μοναδική περιέλιξη ή να κατασκευάσετε  $N$  περιελίξεις;
6. Να συμπληρώσετε τα κενά στο επόμενο κείμενο:  
 Κάθε αγωγός ο οποίος διαρρέεται από..... δημιουργεί στο χώρο .....(2). Το πεδίο  $\vec{B}$  είναι .....στις δυναμικές γραμμές. Όταν ένας ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός τοποθετηθεί παράλληλα προς τις δυναμικές γραμμές ομογενούς πεδίου  $\vec{B}$ , η δύναμη που δέχεται είναι....., ενώ, όταν τοποθετηθεί κάθετα, η δύναμη την οποία δέχεται γίνεται.....Οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός είναι..... Τα επίπεδα των δυναμικών γραμμών είναι.....στον αγωγό.
7. Να κάνετε τις αντιστοιχίσεις μεγεθών – μονάδων:  

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| A. Ηλεκτρικό ρεύμα $I$   | α. 1 T |
| B. Δύναμη $F$            | β. 1 C |
| Γ. Πεδίο $\vec{B}$       | γ. 1 A |
| Δ. Ηλεκτρικό φορτίο $q$  | δ. 1 N |
| E. Σχετική διαπερατότητα |        |



8. Τοποθετείτε δύο ευθύγραμμους μαγνήτες πάνω σε ένα οριζόντιο τραπέζι έτσι, ώστε οι άξονές τους να βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία και οι βόρειοι πόλοι τους να είναι ακριβώς απέναντι. Να επιλέξετε τη σωστή απάντηση

A. Κάθε μαγνήτης ασκεί στον άλλο απωστική δύναμη.  
 B. Κάθε μαγνήτης ασκεί στον άλλο ελκτική δύναμη.  
 Γ. Μεταξύ των μαγνητών δεν ασκούνται δυνάμεις.

9. Είναι δυνατόν ένας ακίνητος βόρειος πόλος ενός μαγνήτη να ασκήσει απωστική δύναμη σε ένα ακίνητο θετικό φορτίο; Να αιτιολογήσετε την απάντησή σας.

10. Στο απέναντι σχήμα φαίνονται δύο παράλληλοι ευθύγραμμοι ρευματοφόροι αγωγοί μεγάλου μήκους. Σε ποια περιοχή του επιπέδου τους υπάρχει πιθανότητα το ολικό μαγνητικό πεδίο να είναι μηδέν; Είναι δυνατόν το ολικό μαγνητικό πεδίο να είναι μηδέν σε κάποιο σημείο του χώρου, εκτός του επιπέδου των αγωγών; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.



11. Ένα σωληνοειδές (I) έχει  $N$  σπείρες και μήκος  $\ell$ . Άλλο σωληνοειδές (II) έχει  $2N$  σπείρες και μήκος  $\ell/2$ . Διαβιβάζουμε στα σωληνοειδή το ίδιο ρεύμα. Να επιλέξετε τη σωστή απάντηση όσον αφορά τα μέτρα των μαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό των σωληνοειδών:

A. Το πεδίο στο (I) είναι ίδιο με το πεδίο στο (II).  
 B. Το πεδίο στο (I) είναι διπλάσιο του πεδίου στο (II).  
 Γ. Το πεδίο στο (II) είναι τετραπλάσιο του πεδίου στο (I).  
 Δ. Δεν ισχύει τίποτα από τα παραπάνω.

12. Ένα σωληνοειδές φέρει μία στρώση μονωμένων σπειρών στενής περιέλιξης. Πάνω στη στρώση αυτή τυλίγουμε μια δεύτερη στρώση με τον ίδιο αριθμό σπειρών, αλλά με τρόπο ώστε το ρεύμα να έχει αντίθετη φορά στις δύο στρώσεις. Το πεδίο B στο εσωτερικό του σωληνοειδούς:

A. Μένει το ίδιο  
 B. Διπλασιάζεται  
 Γ. Μηδενίζεται

Να επιλέξετε την σωστή απάντηση.

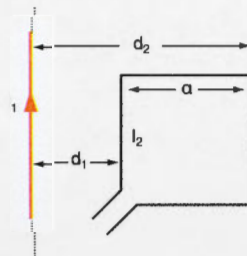


13. Ευθύγραμμος ρευματοφόρος αγωγός είναι τοποθετημένος κατά μήκος του άξονα ενός σωληνοειδούς. Να εξετάσετε εάν ο αγωγός θα δεχτεί μαγνητική δύναμη αν στο σωληνοειδές διαβιβάσουμε ηλεκτρικό ρεύμα.
14. Κυκλικός αγωγός έχει ακτίνα  $R$  και διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . Ευθύγραμμος αγωγός διαρρέεται από ίδιο ρεύμα  $I$ . Είναι δυνατόν το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του κυκλικού αγωγού να έχει το ίδιο μέτρο με το μέτρο του μαγνητικού πεδίου του ευθύγραμμου αγωγού σε απόσταση  $d=R$  από αυτόν;
15. Κυκλικός αγωγός έχει ακτίνα  $R = \frac{\pi}{2} \text{ m}$  και διαρρέεται από ρεύμα  $I=20\text{A}$ .

Να υπολογίσετε το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του.

16. Δύο κυκλικοί αγωγοί έχουν ακτίνες  $R_1 = 80\text{cm}$  και  $R_2 = 40\text{cm}$ . Οι αγωγοί είναι τοποθετημένοι στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, έτσι ώστε τα κέντρα τους να συμπίπτουν. Διαβιβάζουμε στους αγωγούς ρεύματα  $I_1 = 4 \text{ A}$  και  $I_2 = 8 \text{ A}$  αντιστοίχως. Να υπολογίσετε το μαγνητικό πεδίο στο κοινό κέντρο, εάν τα ρεύματα είναι: α. Ομόρροπα β. Αντίρροπα.
17. Έχουμε μια δέσμη από 18 μονωμένους ευθύγραμμους αγωγούς σε στενή επαφή. Κάθε αγωγός διαρρέεται από ρεύμα  $I$ . Όλα τα ρεύματα έχουν την ίδια κατεύθυνση. Διαπιστώθηκε ότι σε απόσταση  $R=9\text{cm}$ , το μαγνητικό πεδίο είχε μέτρο  $B=4 \times 10^{-4} \text{ T}$ . Να υπολογίσετε το ρεύμα  $I$ .
18. Ημικυκλικός αγωγός ακτίνας  $R=2\text{m}$  διαρρέεται από ρεύμα  $I=20\text{A}$ . Να υπολογίσετε το μαγνητικό πεδίο στο κέντρο του.
19. Ευθύγραμμος αγωγός  $Ax$  έχει πολύ μεγάλο μήκος και διαρρέεται από ρεύμα  $I=20\text{A}$ . Να υπολογίσετε το μαγνητικό πεδίο σε σημείο,  $M$  το οποίο απέχει από το άκρο  $A$  απόσταση  $R=0,2\text{m}$ . Το τμήμα  $MA$  είναι κάθετο στον αγωγό  $Ax$ .

20. Στην απέναντι εικόνα, ο ευθύγραμμος αγωγός με άπειρο μήκος διαρρέεται από ρεύμα  $I_1=20\text{A}$ . Ο συρμάτινος αγωγός με το τετράγωνο σχήμα διαρρέεται από ρεύμα  $I_2=40\text{A}$ . Να υπολογίσετε τη δύναμη την οποία δέχεται ο συρμάτινος αγωγός. Οι δύο αγωγοί βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Δες απέναντι πλευρές του συρμάτινου α-



γωγού είναι παράλληλες προς τον ευθύγραμμο αγωγό. Να διακρίνετε δύο περιπτώσεις ανάλογα με τη φορά του ρεύματος  $I_2$ . Αν η μάζα του συρμάτινου αγωγού είναι  $m=20\text{gr}$ , να υπολογίσετε την αρχική του επιτάχυνση.

Δίνεται:  $\alpha=3\text{cm}$ ,  $d_1=9\text{cm}$ . Να αγνοήσετε την ύπαρξη του πεδίου βαρύτητας της Γης.

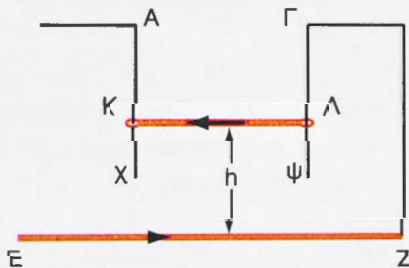
21. Δύο ευθύγραμμοι και παράλληλοι αγωγοί (Α) και (Γ) με πολύ μεγάλο μήκος διαρρέονται από ομόρροπα ρεύματα  $I_A=4\text{A}$  και  $I_\Gamma=8\text{A}$  και απέχουν απόσταση  $d=1\text{m}$ . Να υπολογίσετε το μαγνητικό πεδίο:

Α. Στο μέσο Μ της απόστασης των αγωγών

Β. Σε σημείο Λ, το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο των αγωγών και απέχει από τον (Α)  $d_1=1\text{m}$ . (προς την πλευρά που δε βρίσκεται ο Γ).

Σε σημείο Κ το οποίο βρίσκεται πάνω στο επίπεδο των αγωγών και απέχει από τον (Γ)  $d_2=1\text{m}$  (προς την πλευρά που δε βρίσκεται ο Α).

22. Ο αγωγός ΚΛ με  $\ell=2\text{m}$  έχει μάζα  $m=3\text{gr}$  και μπορεί να ολισθαίνει χωρίς τριβές στους κατακόρυφους αγωγούς ΑΧ και ΓΨ, ενώ βρίσκεται σε συνεχή επαφή μαζί τους. Πόσο ρεύμα  $I$  πρέπει να διαβιβάσουμε στο σύστημα, ώστε ο αγωγός ΚΛ να παραμένει ακίνητος σε ύψος  $h=1\text{cm}$  πάνω από τον αγωγό ΕΖ, ο οποίος θεωρείται ότι έχει πολύ μεγάλο μήκος; Δίνεται  $g=10\text{m/s}^2$ .



23. Ένα σωληνοειδές έχει μήκος  $\ell=10\text{cm}$  και  $N=10^3$  σπείρες. Πόσο είναι το ρεύμα το οποίο πρέπει να διοχετεύσουμε στο σωληνοειδές, ώστε το πεδίο στο εσωτερικό του να έχει μέτρο  $B=8 \times 10^{-4}\text{T}$

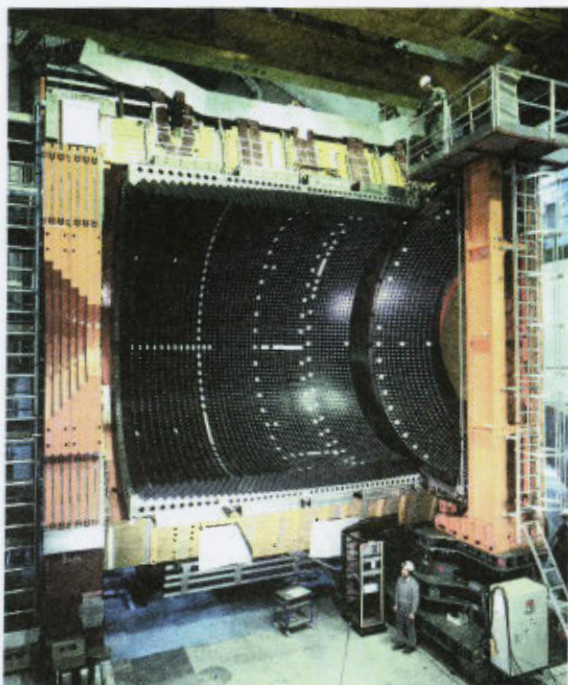
24. Το μήκος ενός κατακόρυφου μεταλλικού αγωγού γείωσης ενός αλεξικέραυνου είναι  $20\text{m}$ . Εξαιτίας ενός κεραυνού, το ρεύμα από τον αγωγό είναι  $10^4\text{A}$ . Στην περιοχή του αγωγού το μαγνητικό πεδίο της Γης είναι οριζόντιο και έχει μέτρο  $0,5 \times 10^{-4}\text{T}$ . Να υπολογίσετε την δύναμη την οποία δέχεται ο αγωγός στη διάρκεια της ροής του ρεύματος.

25. Στο εσωτερικό ενός σωληνοειδούς με μεγάλο μήκος το μαγνητικό πεδίο έχει μέτρο  $B=4 \text{ mT}$ . Η διάμετρος κάθε σπείρας του σωληνοειδούς είναι  $10 \text{ cm}$ . Ευθύγραμμος αγωγός, διαρρεόμενος από ρεύμα  $5 \text{ A}$ , περνάει από το μέσο του άξονα του σωληνοειδούς και είναι κάθετος σ' αυτόν. Να υπολογίσετε:
- A. Τη δύναμη την οποία δέχεται ο ευθύγραμμος αγωγός.
- B. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο σε απόσταση  $3 \text{ cm}$  από τον άξονα του σωληνοειδούς.
26. Ευθύγραμμος αγωγός (α) με πολύ μεγάλο μήκος διαρρέεται από ρεύμα  $I_1=10\text{A}$ . Άλλος ευθύγραμμος αγωγός (β) είναι παράλληλος προς τον πρώτο και διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I_2=40\text{A}$ . Η απόσταση των δύο αγωγών είναι  $d=5\text{cm}$ . Να υπολογίσετε τη δύναμη την οποία ασκεί ο αγωγός (α) σε τμήμα του αγωγού (β) μήκους  $\ell=1\text{m}$ , εάν τα ρεύματα είναι: α. Ομόρροπα β. Αντίρροπα.



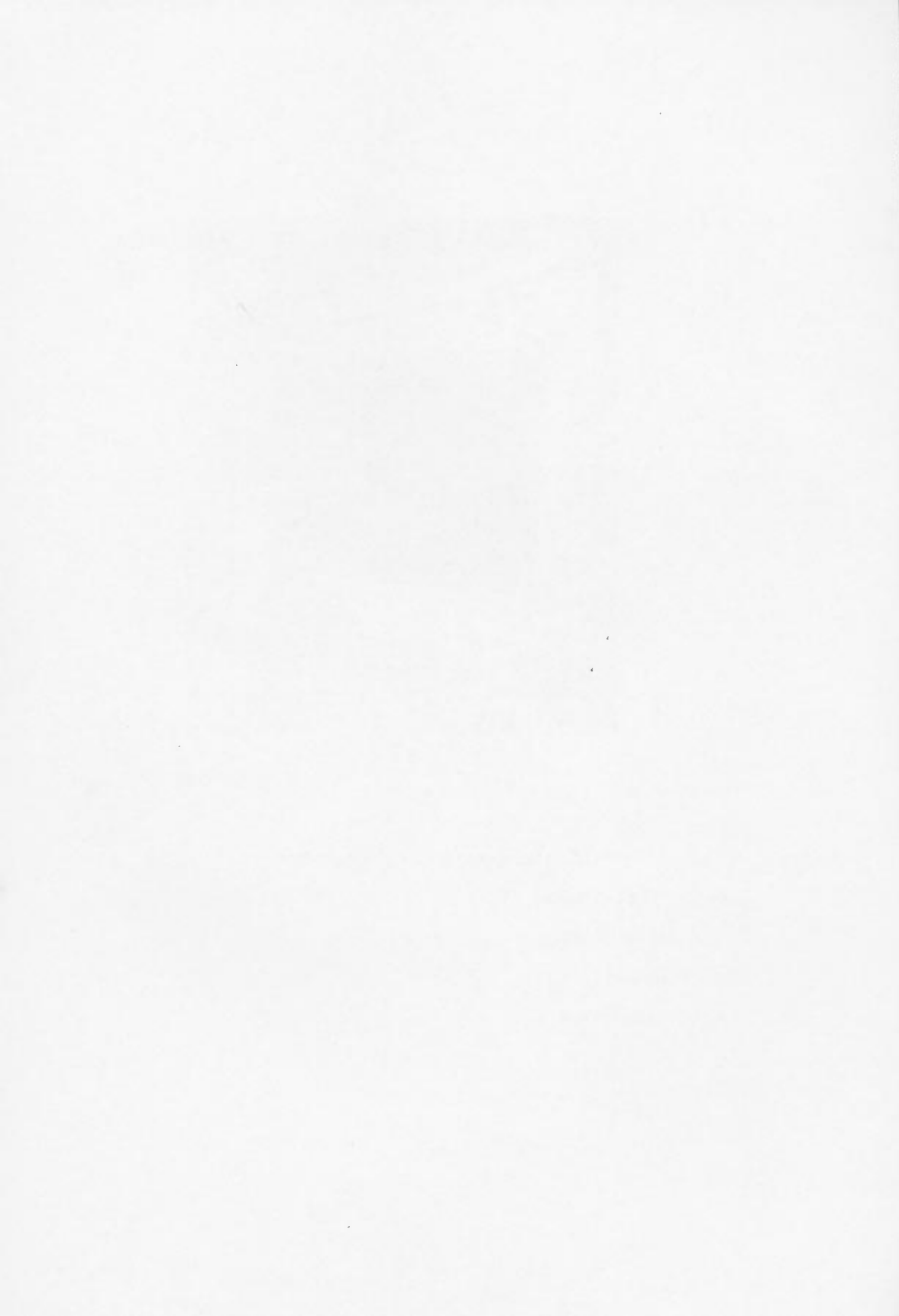


## κεφάλαιο 2



### ΕΠΑΓΩΓΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

- Το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής
- Νόμος της επαγωγής
- Αμοιβαία επαγωγή
- Αυτεπαγωγή
- Κανόνας του Lenz



## 2.1 ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

*Οι αόρατες επιδράσεις της βαρύτητας και  
των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων παραμένουν μαγικές,  
περιγράψιμες μεν αλλά παρά ταύτα αδυσώπητες,  
μη ανθρώπινες, αλλότριες, μαγικές.  
B. K. Ridley*

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι η καρδιά και ο τροφοδότης του σημερινού τεχνολογικού πολιτισμού μας. Έχετε αναρωτηθεί πώς παράγονται τα τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται, σε καθημερινή βάση, η χώρα μας; Μπορείτε να φανταστείτε τα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτούνται για βιομηχανική και οικιακή χρήση σε παγκόσμια κλίμακα; Γνωρίζετε ότι κανένα είδος ενέργειας δεν παράγεται από το τίποτα. Αυτό ισχύει και για την ηλεκτρική ενέργεια. Κατ' ανάγκη πρέπει να διαθέτουμε ενέργεια κάποιας άλλης μορφής την οποία να μπορούμε να μετατρέψουμε σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στην αρχή ο βασικός τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν αυτός που βασιζόταν στη μετατροπή χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική (ηλεκτροχημικές πηγές). Η μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική επιτυγχανόταν με την βοήθεια χημικών αντιδράσεων. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη μορφή αυτή δεν ήταν πολύ αποδοτική.

Η επανάσταση έγινε από τον Faraday ο οποίος πρόσφερε στην ανθρωπότητα τη δυνατότητα παραγωγής άφθονης και σχετικά φτηνής ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άποψη αυτή τα πειράματα του Faraday δεν έχουν μόνο τεράστια επιστημονική αξία, αλλά σηματοδοτούν την αυγή της τεχνολογικής εποχής μας και σφραγίζουν βαθιές αλλαγές σε πολλούς τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Ας πάρουμε τα πράγματα από την αρχή ακολουθώντας, κατά κάποιο τρόπο, τις σκέψεις του Faraday. Θα χρειαστούμε μόνο ένα σωληνοειδές, ένα μόνιμο μαγνήτη και ένα γαλβανόμετρο με την ένδειξη 0 (μηδέν) στη μέση της κλίμακας.

### Πείραμα

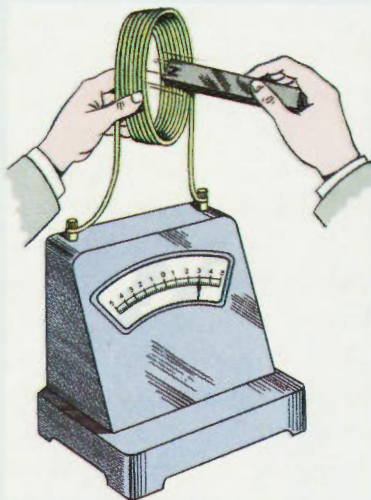
Στην εικόνα (2.1) φαίνεται ένα πηνίο τα άκρα του οποίου έχουν συνδεθεί με τους ακροδέκτες του γαλβανομέτρου. Όταν ο μαγνήτης είναι ακίνητος σε οποιαδήποτε θέση, η ένδειξη του γαλβανομέτρου είναι 0.

- Πλησιάζουμε το μαγνήτη προς το σωληνοειδές, εισάγοντας ένα μέρος

του στο εσωτερικό του.

Παρατηρούμε ότι, **κατά την διάρκεια της κίνησης**, το όργανο παρέχει ενδείξεις μη μηδενικές. Τούτο σημαίνει ότι από το γαλβανόμετρο περνά ηλεκτρικό ρεύμα.

- Ακινητοποιούμε τον μαγνήτη σε κάποια θέση, μέσα ή έξω από το σωληνοειδές. Διαπιστώνουμε ότι η βελόνα του οργάνου επιστρέφει στην ένδειξη 0. Τούτο σημαίνει ότι από το όργανο δεν περνάει ηλεκτρικό ρεύμα.
- Απομακρύνουμε το μαγνήτη από το σωληνοειδές. Παρατηρούμε ότι, στη διάρκεια της απομάκρυνσης, το όργανο παρέχει πάλι ενδείξεις μη μηδενικές. Τούτο σημαίνει ότι από το γαλβανόμετρο περνά ηλεκτρικό ρεύμα.
- Επαναλαμβάνουμε τις διαδικασίες 1 και 3, εστιάζοντας την προσοχή μας στην κατεύθυνση προς την οποία εκτρέπεται η βελόνα σε κάθε περίπτωση. Παρατηρούμε ότι, αν στην περίπτωση 1 η βελόνα εκτρέπεται προς τη μια περιοχή της κλίμακας, π.χ. αριστερά από το μηδέν, στην άλλη περίπτωση εκτρέπεται προς την άλλη περιοχή της κλίμακας, δεξιά από το μηδέν. Το συμπέρασμα είναι ότι οι φορές των ρευμάτων στις δύο περιπτώσεις είναι αντίθετες.
- Κινούμε το μαγνήτη παλινδρομικά μέσα στο σωληνοειδές. Παρατηρούμε ότι η βελόνα κινείται συνεχώς ανάμεσα στις δύο περιοχές αριστερά και δεξιά από το μηδέν.



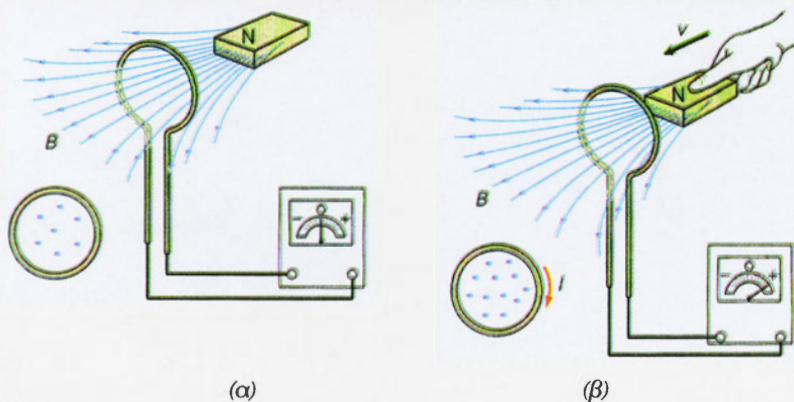
**Εικόνα 2.1**

Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος με την σχετική κίνηση ενός μαγνήτη και ενός πηνίου που αποτελεί μέρος του κυκλώματος

Είναι φανερό ότι κατορθώσαμε να παράγουμε ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια. Το ερώτημα είναι: από μετατροπή ποιας ενέργειας προέκυψε η ηλεκτρική; Η απάντηση είναι απλή, αν σκεφτούμε ότι στο κύκλωμα είχαμε ρεύμα μόνο κατά τη διάρκεια της κίνησης του μαγνήτη. Η κίνηση όμως του μαγνήτη σημαίνει ανταλλαγή μηχανικής ενέργειας. Τήν μηχανική ενέργεια τη δαπανήσαμε εμείς οι οποίοι κινούσαμε τον μαγνήτη. Αυτή η ενέργεια μετατράπηκε σε ηλεκτρική.



Το φαινόμενο που μελετάμε ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητική επαγωγή**. Μπορούμε να πούμε ότι στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής είναι δυνατόν να έχουμε μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.



**Εικόνα 2.2**

- α. Ο μαγνήτης είναι ακίνητος σε κάποια απόσταση από το ακλόνητο κύκλωμα. Δεν καταγράφεται κυκλοφορία ρεύματος.  
β. Ο μαγνήτης πλησιάζει προς το ακλόνητο πλαίσιο. Το γαλβανόμετρο καταγράφει κυκλοφορία ρεύματος.

Θυμηθείτε τη μορφή του μαγνητικού πεδίου ενός μόνιμου μαγνήτη, όπως παραστατικά εικονίζεται με τη βοήθεια των δυναμικών γραμμών. Δείτε την εικόνα (2.2). Στο στιγμιότυπο α διαπιστώνουμε ότι κάποιος αριθμός δυναμικών γραμμών περνάει από το σωληνοειδές. Στο στιγμιότυπο β, όπου ο μαγνήτης έχει πλησιάσει στο σωληνοειδές, ο αριθμός των δυναμικών γραμμών είναι μεγαλύτερος. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της προσέγγισης του μαγνήτη προς το σωληνοειδές, μεταβάλλεται και ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από αυτό. Θα χρειαστούμε ένα νέο μέγεθος το οποίο να παρέχει μια ποσοτική έκφραση για τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που περνούν μέσα από μια επίπεδη επιφάνεια. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται **μαγνητική ροή  $\Phi$** .

Να παρατηρήσετε ότι, εάν ταυτοχρόνως με την κίνηση του μαγνήτη, μετακινούσαμε και το σωληνοειδές με τέτοιο τρόπο, ώστε η σχετική τους θέση να παραμένει αμετάβλητη, δε θα είχαμε κυκλοφορία ρεύματος στο σωληνοειδές, διότι δε θα άλλαζε ο αριθμός των δυναμικών γραμμών οι οποίες το διαπερνούν.

Θεωρούμε επίπεδη επιφάνεια με εμβαδόν  $A$ , η οποία βρίσκεται σε ομογενές πεδίο  $\vec{B}$ . Ας υποθέσουμε ότι η επιφάνεια τέμνεται πλάγια από τις δυναμικές γραμμές και ας ονομάσουμε  $\varphi$  τη γωνία που σχηματίζεται από την

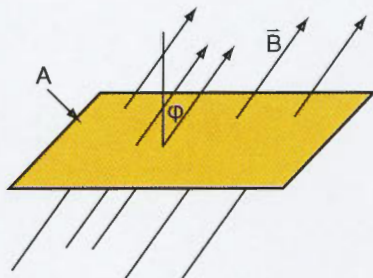
κάθετη στην επιφάνεια και το διάνυσμα  $\vec{B}$  (εικ. 2.3). Η κάθετη λαμβάνεται ως διάνυσμα με αυθαίρετη θετική φορά.

Η μαγνητική ροή μέσα από την επιφάνεια  $A$  είναι το βαθμωτό μέγεθος  $\Phi$  το οποίο ορίζεται από την σχέση:

$$\Phi = AB\sin\varphi \quad (11)$$

Να παρατηρήσετε ότι:

- Εάν  $\varphi=0$ , οπότε το  $\vec{B}$  είναι κάθετο στην επιφάνεια,  $\sin\varphi=1$  και η ροή έχει την μέγιστη τιμή της, η οποία είναι  $\Phi_{\max} = BA$
- Εάν  $\varphi=90^\circ$ , οπότε το  $\vec{B}$  είναι παράλληλο προς την επιφάνεια,  $\sin\varphi=0$  και η ροή έχει την τιμή 0.



**Εικόνα 2.3**

Η επιφάνεια τέμνεται από έναν αριθμό δυναμικών γραμμών.

Η μονάδα της μαγνητικής ροής προκύπτει από τη σχέση (11) και στο σύστημα SI ονομάζεται 1 weber (1 Wb).

Έτσι:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Tm}^2$$

Είναι φανερό ότι η κίνηση του μαγνήτη προς και από το σωληνοειδές μεταβάλλει τη μαγνητική ροή η οποία περνά από αυτό.

Από τη σχέση (11) φαίνεται ότι η μαγνητική ροή  $\Phi$  είναι δυνατόν να μεταβάλλεται με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- Με μεταβολή του εμβαδού  $A$  της επιφάνειας
- Με μεταβολή του μέτρου  $B$  του μαγνητικού πεδίου
- Με μεταβολή της γωνίας  $\varphi$ , η οποία σχηματίζεται από την κάθετη στην επιφάνεια και το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$

### ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ

Μπορείτε να αιτιολογήσετε το γιατί δαπανάμε μηχανική ενέργεια, όταν μετακινούμε το μαγνήτη σε σχέση με το σωληνοειδές; Η μεταφορά ενέργειας από έναν παράγοντα σε έναν άλλο γίνεται μέσω του έργου κάποιας δύναμης. Προσπαθήστε να προσδιορίσετε αυτή τη δύναμη.

## 2.2 ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

### Πείραμα

Ας επανέλθουμε στο αρχικό πείραμα και ας το εκτελέσουμε με ένα διαφορετικό τρόπο. Τοποθετούμε το ένα άκρο του μαγνήτη κοντά στο ένα άκρο του σωληνοειδούς και το διατηρούμε ακίνητο. Το γαλβανόμετρο δείχνει 0. Ωθούμε το μαγνήτη πολύ αργά στο εσωτερικό του σωληνοειδούς, μέχρι ένα προκαθορισμένο σημείο και καταγράφουμε την ένδειξη του γαλβανομέτρου. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία, αλλά τώρα ωθούμε το μαγνήτη μέχρι το ίδιο προκαθορισμένο σημείο πιο γρήγορα. Η ένδειξη την οποία καταγράφει τώρα το όργανο είναι μεγαλύτερη. Εάν επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία ωθώντας τον μαγνήτη μέχρι το ίδιο προκαθορισμένο σημείο σε χρονικά διαστήματα που γίνονται συνεχώς μικρότερα, παρατηρούμε ότι, αντιστοίχως, οι ενδείξεις του οργάνου συνεχώς αυξάνονται.

Οι ενδείξεις τις οποίες καταγράφει το όργανο δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από τη μεταβολή της συνολικής μαγνητικής ροής, αφού σε όλες τις περιπτώσεις είναι ίδια. Εξαρτώνται από τις μεταβολές της ροής σε συνδυασμό με το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο πραγματοποιούνται και, μάλιστα, οι ενδείξεις είναι τόσο μεγαλύτερες όσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο γίνεται μια συγκεκριμένη μεταβολή  $\Delta\Phi$  της μαγνητικής ροής. Αυτό θα πεί ότι υπεισέρχεται όχι η μεταβολή  $\Delta\Phi$  της ροής αλλά το πηλίκο  $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  το οποίο ονομάζεται ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής

το οποίο ονομάζεται **ρυθμός μεταβολής της μαγνητικής ροής** ή, απλά, **“ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.”** Όσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο γίνεται μια ορισμένη μεταβολή της ροής, τόσο η ταχύτητα μεταβολής της ροής είναι μεγαλύτερη. Ο προσεκτικός και ακριβής πειραματισμός φανερώνει ότι η ένδειξη του οργάνου είναι ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Θα μπορούσαμε με τη βοήθεια του γαλβανομέτρου, το οποίο είναι όργανο που μετρά ασθενή ρεύματα, να διαπιστώσουμε ότι το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι ανάλογο με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Γνωρίζετε, ήδη, από τον πρώτο κύκλο σπουδών σας ότι η αιτία κυκλοφορίας ρεύματος σε ένα κύκλωμα είναι κάποια ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) η οποία δημιουργείται στο κύκλωμα. Έτσι, εάν συνδέσουμε τους πόλους



μιας ηλεκτρικής πηγής με έναν αντιστάτη, η ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής εξασφαλίζει τη δίοδο ρεύματος μέσα από το κύκλωμα. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με το κύκλωμα του σωληνοειδούς και του οργάνου που έχει συνδεθεί στα άκρα του σωληνοειδούς. Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα οφείλεται σε κάποια ηλεκτρεγερτική δύναμη, η οποία αναπτύσσεται στο σωληνοειδές και η οποία οφείλεται στη χρονική μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από αυτό. Αυτή η ηλεκτρεγερτική δύναμη ονομάζεται **επαγωγική ηλεκτρεγερτική δύναμη ή ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή**.

Η πειραματική μελέτη των παραγόντων οι οποίοι καθορίζουν την επαγωγική ΗΕΔ οδηγεί στη διατύπωση του νόμου του Faraday, σύμφωνα με τον οποίο:

#### ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η ΗΕΔ από επαγωγή είναι:

- ανάλογη με τον αριθμό των σπειρών του σωληνοειδούς.
- ανάλογη με την ταχύτητα μεταβολής της μαγνητικής ροής.

Με μαθηματική γραφή οι δύο διαπιστώσεις εκφράζονται από τη σχέση:

$$E_{\text{επαγ.}} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} N \quad \text{Νόμος της επαγωγής} \quad (12)$$

Το αρνητικό πρόσημο (-) εισάγεται λόγω του κανόνα του Lenz, τον οποίο θα μελετήσουμε στην συνέχεια.

#### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4

Ένα σωληνοειδές με  $N=10^3$  σπείρες βρίσκεται έξω από ομογενές μαγνητικό με  $B=0,2$  T. Τα άκρα του σωληνοειδούς συνδέονται με αντιστάτη αντίστασης  $R=20\Omega$ . Το εμβαδόν κάθε σπείρας του είναι  $A=4\text{cm}^2$ . Ο άξονας του σωληνοειδούς είναι παράλληλος προς το μαγνητικό πεδίο. Εισάγουμε το σωληνοειδές στο μαγνητικό πεδίο, ώστε ο άξονάς του να είναι συνεχώς παράλληλος προς αυτό. Το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που αρχίζει η είσοδος μέχρι να ολοκληρωθεί είναι  $\Delta t = 0,2$  s. Να υπολογίσετε:

- την τιμή της μέσης ΗΕΔ που αναπτύσσεται στο σωληνοειδές.
- την μέση τιμή του ρεύματος που θα περάσει από το σωληνοειδές.
- Αν βγάλουμε το σωληνοειδές από το πεδίο με την ίδια διαδικασία και στο ίδιο χρονικό διάστημα, τι θα αλλάξει;



**Λύση**

α. Η ΗΕΔ από επαγωγή θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$\mathcal{E} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} N \quad (\alpha)$$

Έχουμε :  $\Delta \Phi = \Phi_{\text{τελ.}} - \Phi_{\text{αρχ.}} = BA - 0 = BA$ . Η (α) γράφεται:

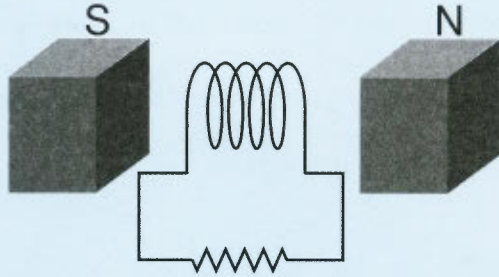
$$\mathcal{E} = - \frac{BA}{\Delta t} N$$

Με αντικατάσταση έχουμε:  $\mathcal{E} = - \frac{0,2 \times 4 \times 10^{-4}}{0,2} \times 10^{-3} = -0,4V$

Το μέτρο της επαγωγικής ΗΕΔ είναι  $\mathcal{E} = 0,4V$ .

β. Το ρεύμα θα είναι  $I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{0,4}{20} = 20 \text{ mA}$

γ. Στην περίπτωση αυτή, η αντικατάσταση θα δώσει  $\mathcal{E} = +0,4V$ . Τούτο σημαίνει ότι θα αλλάξει η φορά του ρεύματος.

**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4**

Κατασκευάστε ένα μικρό πηνίο από μονωμένο χάλκινο σύρμα με περίπου 10 σπείρες. Ενώστε τα ελεύθερα άκρα του με ένα λαμπάκι. Πλησιάστε το πηνίο απότομα ανάμεσα στους πόλους ενός ισχυρού μαγνήτη. Τι παρατηρείτε; Διατηρήστε το λαμπάκι ακίνητο μέσα στο πεδίο για λίγα δευτερόλεπτα. Τι παρατηρείτε; Απομακρύνετε το λαμπάκι απότομα από το μαγνητικό πεδίο. Τι παρατηρείτε;

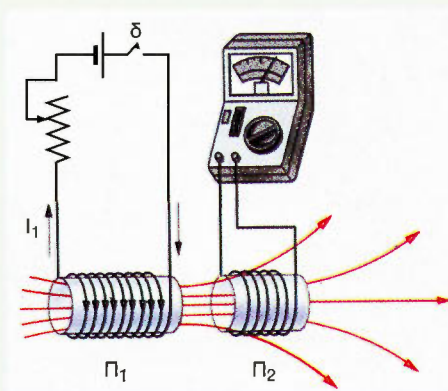


## 2.3 ΑΜΟΙΒΑΙΑ ΕΠΑΓΩΓΗ (φαινόμενο)

Το φαινόμενο της ανάπτυξης ΗΕΔ από επαγωγή παρατηρείται κάθε φορά που η μαγνητική ροή, η οποία περνάει μέσα από ένα κύκλωμα, μεταβάλλεται. Η μεταβολή αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με πολλούς τρόπους. Θα εξετάσουμε αυτόν που οδηγεί στο φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής.

### Πείραμα

Στην εικόνα (2.4) τα πηνία  $\Pi_1$  και  $\Pi_2$  έχουν τοποθετηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι άξονές τους να συμπίπτουν. Τα άκρα του πηνίου  $\Pi_1$  έχουν συνδεθεί με τους πόλους ηλεκτρικής πηγής με την παρεμβολή αντιστάτη μεταβλητής αντίστασης και ανοιχτού διακόπτη. Τα άκρα του πηνίου  $\Pi_2$  έχουν συνδεθεί με αμπερόμετρο.



Εικόνα 2.4

#### Βήμα 1. Κλείνουμε το διακόπτη

δ και ταυτόχρονα παρατηρούμε το αμπερόμετρο στο κύκλωμα του πηνίου  $\Pi_2$ . Διαπιστώνουμε ότι το όργανο καταγράφει ένδειξη. Τούτο σημαίνει ότι στα άκρα του πηνίου  $\Pi_2$  αναπτύχθηκε επαγωγική ΗΕΔ. Επειδή έχουμε κλειστό κύκλωμα, πέρασε ρεύμα το οποίο καταγράφηκε από το αμπερόμετρο.

#### Βήμα 2.

Μετά το κλείσιμο του διακόπτη η ένδειξη του οργάνου μηδενίζεται. Μετακινούμε το δρομέα της ρυθμιστικής αντίστασης και παρατηρούμε ότι, στη διάρκεια της μετακίνησης, το αμπερόμετρο καταγράφει ένδειξη. Η μετακίνηση του δρομέα στη ρυθμιστική αντίσταση του κυκλώματος  $\Pi_1$  έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή του ρεύματος σ' αυτό το κύκλωμα. Επαναλαμβάνουμε μερικές φορές το πείραμα, προκαλώντας την ίδια μετακίνηση του δρομέα σε χρονικά διαστήματα τα οποία προοδευτικά ελαττώνουμε. Θα παρατηρήσουμε ότι η ένδειξη του οργάνου συνεχώς αυξάνεται.

## Ερμηνεία

**Βήμα 1.** Με το κλείσιμο του διακόπτη το πηνίο  $\Pi_1$ , διαρρέεται από ρεύμα. Στο χώρο δημιουργείται μαγνητικό πεδίο και κάποιες από τις δυναμικές γραμμές του διέρχονται και από το πηνίο  $\Pi_2$ . Αυτό σημαίνει ότι η μαγνητική ροή στο πηνίο  $\Pi_2$ , η οποία πριν από το κλείσιμο του διακόπτη ήταν μηδέν έχει τώρα κάποια τιμή. Η μεταβολή της ροής επάγει στο πηνίο  $\Pi_2$  ΗΕΔ, η οποία δημιουργεί ρεύμα το οποίο καταγράφεται από το αμπερόμετρο.

*Προσέξτε:* Η ένδειξη του αμπερομέτρου στο πηνίο  $\Pi_2$  διαρκεί για πολύ μικρό χρονικό διάστημα μετά το κλείσιμο του διακόπτη. Από τη στιγμή που το ρεύμα στο πηνίο  $\Pi_1$  σταθεροποιηθεί, το αμπερόμετρο στο πηνίο  $\Pi_2$  θα δείχνει μηδέν.

**Βήμα 2.** Στο χρονικό διάστημα της μετακίνησης του δρομέα της ρυθμιστικής αντίστασης στο πηνίο  $\Pi_1$ , το ρεύμα που το διαρρέει μεταβάλλεται. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μεταβάλλεται και το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  σε κάθε σημείο του χώρου. Τούτο σημαίνει ότι η μαγνητική ροή η οποία περνάει από το πηνίο  $\Pi_2$  μεταβάλλεται. Η μεταβαλλόμενη ροή επάγει στο πηνίο  $\Pi_2$  ΗΕΔ, η οποία δημιουργεί ρεύμα το οποίο καταγράφεται από το αμπερόμετρο.

*Προσέξτε:* Το αμπερόμετρο στο πηνίο  $\Pi_2$  θα καταγράφει ένδειξη, μόνο για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η κίνηση του δρομέα στη ρυθμιστική αντίσταση του πηνίου  $\Pi_1$ .

Μετά από αυτό το πείραμα μπορούμε να περιγράψουμε συνοπτικά το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής ως εξής:

Η αμοιβαία επαγωγή είναι το φαινόμενο της εμφάνισης επαγωγικής ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα λόγω των μεταβολών του ρεύματος σε γειτονικό κύκλωμα.

*Προσέξτε:* Για να εκδηλωθεί το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής, πρέπει ανάμεσα στα δύο κυκλώματα να υπάρχει **μαγνητική σύζευξη**. Τούτο επιτυγχάνεται, εαν μέρος της μαγνητικής ροής που οφείλεται στο ρεύμα του ενός πηνίου διέρχεται και από το άλλο πηνίο. Στην περίπτωση που ολόκληρη η μαγνητική ροή η οποία οφείλεται στο ρεύμα του ενός πηνίου διέρχεται και από το άλλο, ομιλούμε για **πλήρη σύζευξη**.

Το επόμενο βήμα είναι να διατυπώσουμε το νόμο για το φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής, δηλαδή τη μαθηματική σχέση η οποία προσδιορίζει τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η τιμή της ΗΕΔ από αμοιβαία επαγωγή.

Ένας εύκολος τρόπος είναι να μετακινούμε το δρομέα, ώστε να καλύπτει πάνω στην ρυθμιστική αντίσταση την ίδια απόσταση σε συνεχώς μειούμενα



χρονικά διαστήματα. Θα παρατηρήσουμε ότι όσο μικρότερο είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο καλύπτεται η ίδια απόσταση, τόσο περισσότερο είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει το πηνίο  $\Pi_2$ , πράγμα που σημαίνει ότι η ΗΕΔ η οποία αναπτύσσεται στο πηνίο  $\Pi_2$  θα είναι μεγαλύτερη. Όταν όμως μειώνεται το χρονικό διάστημα στο οποίο καλύπτεται μια σταθερή απόσταση πάνω στη ρυθμιστική αντίσταση, αυξάνεται ο ρυθμός μεταβολής του ρεύματος στο πηνίο  $\Pi_1$ . Με προσεκτική πειραματική μελέτη, μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι η ΗΕΔ από επαγωγή  $E_2$ , η οποία αναπτύσσεται στο πηνίο  $\Pi_2$ , είναι ανάλογη με το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος  $\Delta I_1 / \Delta t$  στο πηνίο  $\Pi_1$ .

#### ΝΟΜΟΣ ΑΜΟΙΒΑΙΑΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η ΗΕΔ από επαγωγή, η οποία αναπτύσσεται στο ένα από δύο πηνία τα οποία παρουσιάζουν μαγνητική σύζευξη, είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος στο άλλο πηνίο.

$$E_2 = -M \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad (13)$$

Ο συντελεστής  $M$  ονομάζεται **συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής** ή απλώς **αμοιβαία επαγωγή** των δύο πηνίων και εξαρτάται από:

- τα γεωμετρικά στοιχεία των δύο πηνίων (μήκος, διάμετρο)
- τη φύση του υλικού στο εσωτερικό τους.
- η σχετική τους θέση.

Το αρνητικό πρόσημο (-) εισάγεται λόγω του κανόνα του Lenz.

Η μονάδα της αμοιβαίας επαγωγής στο SI είναι, όπως φαίνεται από τη

σχέση (8), ίση με:  $1 \frac{Vs}{A}$  και ονομάζεται **1henry (1H)** προς τιμή του Αμερι-

κανού φυσικού Henry (Χένρη)  $1H = 1 \frac{Vs}{A}$

#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Κατασκευάστε τα δύο πηνία που φαίνονται στην απέναντι εικόνα και τροφοδοτήστε το ένα με συνεχές σταθερό ρεύμα. Τα άκρα του δεύτερου πηνίου να τα συνδέσετε με τους ακροδέκτες γαλβανομέτρου, το οποίο έχει το μηδέν στη μέση της κλίμακας.

1. Κρατήστε το πηνίο 1 ακίνητο και πλησιάστε προς αυτό το πηνίο 2. Τι



παρατηρείτε σχετικά με την ένδειξη του οργάνου; Αιτιολογήστε.

2. Κρατήστε το πηνίο 1 ακίνητο και απομακρύνετε το πηνίο 2. Τι παρατηρείτε σχετικά με την ένδειξη του οργάνου; Αιτιολογήστε.

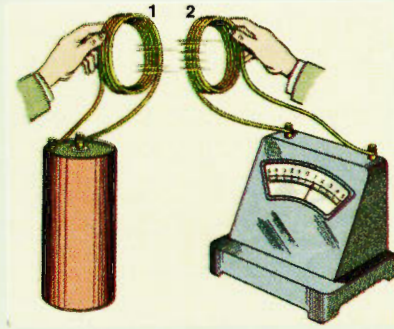
3. Επαναλάβετε τα 1 και 2, κρατώντας ακίνητο το πηνίο 2. Αιτιολογήστε τις παρατηρήσεις σας.

4. Κινήστε και τα δύο πηνία ώστε να πλησιάζουν. Τι παρατηρείτε; Αιτιολογήστε. Κινήστε και τα δύο πηνία ώστε να απομακρύνονται. Τι παρατηρείτε; Αιτιολογήστε.

5. Στρέψτε το πηνίο 2 κατά  $90^\circ$  ως προς την διάμετρο  $AA'$ . Τι παρατηρείτε; Αιτιολογήστε.

6. Στρέψτε το πηνίο 2 γύρω από τη διάμετρο  $AA'$ , ώστε το επίπεδό του να γίνει κάθετο στο επίπεδο του πηνίου 1 και στη συνέχεια πλησιάστε το πηνίο 2 στο πηνίο 1, χωρίς να αλλάξετε τον προσανατολισμό του. Τι παρατηρείτε; Αιτιολογήστε.

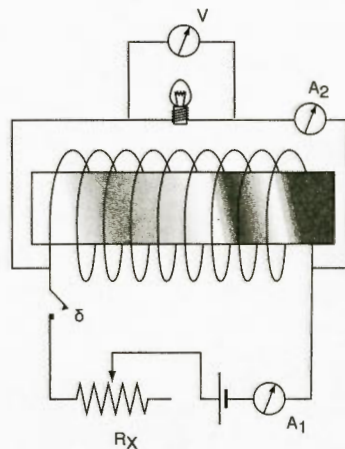
7. Κινήστε τα πηνία προς τα αριστερά με την ίδια ταχύτητα, ώστε η σχετική τους θέση να μην μεταβάλλεται. Τι παρατηρείτε; Αιτιολογήστε.



## 2.4 ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗ (φαινόμενο)

Στην εικόνα (2.5) φαίνεται ένα κύκλωμα με το οποίο μπορούμε να μελετήσουμε μια άλλη εκδήλωση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Τα άκρα του σωληνοειδούς έχουν συνδεθεί με τους πόλους πηγής συνεχούς τάσης. Στο κύκλωμα παρεμβάλλονται σε σειρά μιλιαμπερόμετρο  $A_1$ , ρυθμιστική αντίσταση  $R_x$  και διακόπτης  $\delta$ .

Παράλληλα προς το σωληνοειδές έχει συνδεθεί λαμπτήρας με μικρή τάση λειτουργίας. Στο κύκλωμα του λαμπτήρα παρεμβάλλεται μιλιαμπερόμετρο  $A_2$  και τα άκρα του λαμπτήρα συνδέονται με βολτόμετρο μεγάλης αντίστασης.



**Εικόνα 2.5**

Ένα απλό κύκλωμα για την πειραματική μελέτη του φαινομένου της αυτεπαγωγής.

## Πείραμα

- Κλείνουμε το διακόπτη και ρυθμίζουμε την αντίσταση, ώστε ο λαμπτήρας μόλις να φωτοβολεί. Ο σιδερένιος πυρήνας χρησιμοποιείται, για να επιτύχουμε ισχυρό μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του και, κατά συνέπεια, αυξημένη μαγνητική ροή. Από το κύκλωμα διέρχεται ρεύμα και το μιλιαμπερόμετρο καταγράφει κάποια τιμή.
- Ανοίγουμε απότομα το διακόπτη και παρατηρούμε ότι ο λαμπτήρας φωτοβολεί έντονα και, ταυτόχρονα, το μιλιαμπερόμετρο στο κύκλωμα του σωληνοειδούς και το βολτόμετρο στα άκρα του δίνουν στιγμιαίες ενδείξεις.

## Ερμηνεία

Όταν ανοίξαμε το διακόπτη διακόπηκε το κύκλωμα που τροφοδοτούσε τον λαμπτήρα με ρεύμα, το οποίο ήταν υπεύθυνο για την ασθενή φωτοβολία του. Ποια ήταν, λοιπόν, η αιτία που προκάλεσε την έντονη φωτοβολία του στη συνέχεια; Και από πού προήλθε η ηλεκτρική ενέργεια που προκάλεσε αυτή τη φωτοβολία;

Όσο ο διακόπτης ήταν κλειστός, από το κύκλωμα περνούσε ηλεκτρικό ρεύμα και στο εσωτερικό του σωληνοειδούς είχε δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο, το οποίο παρήγαγε μαγνητική ροή. Με το άνοιγμα του διακόπτη το ρεύμα στο κύκλωμα μηδενίστηκε σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, με αποτέλεσμα να καταργηθεί το μαγνητικό πεδίο στο σωληνοειδές και, κατά συνέπεια, να μηδενιστεί μέσα σε μικρό χρονικό διάστημα η μαγνητική ροή που περνούσε από αυτό. Το άνοιγμα, λοιπόν, του διακόπτη προκάλεσε απότομη μεταβολή (ελάττωση) της μαγνητικής ροής. Η μεταβολή όμως της μαγνητικής ροής σε ένα κύκλωμα είναι η αιτία εμφάνισης επαγωγικής ΗΕΔ στο κύκλωμα. Το συμπέρασμα από το πείραμά μας είναι, τώρα, απλό: η μεταβολή της μαγνητικής ροής του σωληνοειδούς δημιούργησε στα άκρα του μεγάλη επαγωγική ΗΕΔ. Από τον τύπο

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

καταλαβαίνουμε αμέσως ότι το μέτρο της ΗΕΔ πρέπει να είναι μεγάλο, διότι το χρονικό διάστημα  $\Delta t$  μεταβολής της ροής είναι πολύ μικρό. Η ΗΕΔ αυτή προκάλεσε την κυκλοφορία ρεύματος στο κύκλωμα του σωληνοειδούς, το οποίο περιέχει το λαμπτήρα, με αποτέλεσμα να φωτοβολήσει έντονα. Το

φαινόμενο που εξετάσαμε είναι ειδική περίπτωση του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής και ονομάζεται **αυτεπαγωγή**. Η ΗΕΔ εμφανίστηκε λόγω της μεταβολής της μαγνητικής ροής. Η μεταβολή της μαγνητικής ροής οφείλεται στη μεταβολή (μηδενισμό) του μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς. Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς οφείλεται στη μεταβολή (μηδενισμό) του ρεύματος  $I$ , το οποίο περνούσε από αυτό. Μπορούμε, λοιπόν, να πούμε:

Το φαινόμενο της αυτεπαγωγής συνίσταται στην εμφάνιση επαγωγικής ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα, λόγω μεταβολής του ρεύματος το οποίο διαρρέει αυτό το ίδιο το κύκλωμα.

Μπορούμε να διαπιστώσουμε πειραματικά, αλλά και να αποδείξουμε θεωρητικά ότι το μέτρο της ΗΕΔ από αυτεπαγωγή εξαρτάται από το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος, το οποίο διαρρέει το πηνίο και μάλιστα είναι ανάλογο με το ρυθμό αυτό. Η διαπίστωση αυτή αποτελεί το νόμο για το φαινόμενο της αυτεπαγωγής, ο οποίος μπορεί να εκφραστεί με την επόμενη σχέση:

$$E_{\text{αυτ}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (14)$$

όπου  $L$  συντελεστής, η τιμή του οποίου εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του σωληνοειδούς και τη φύση του υλικού στο εσωτερικό του. Ο συντελεστής  $L$  ονομάζεται **συντελεστής αυτεπαγωγής** ή **απλώς αυτεπαγωγή** του πηνίου και η τιμή του δίνεται από τη σχέση:

$$L = \mu \mu_0 \frac{A}{\ell} N^2 \quad (15)$$

όπου:

- $\mu$  : η σχετική διαπερατότητα του υλικού
- $\mu_0$  : η (μαγνητική) διαπερατότητα του κενού
- $A$  : το εμβαδόν διατομής του σωληνοειδούς
- $\ell$  : το μήκος του σωληνοειδούς.
- $N$  : ο αριθμός των σπειρών

Η μονάδα της αυτεπαγωγής  $L$  είναι η ίδια με την μονάδα της αμοιβαίας επαγωγής  $M$ , δηλαδή το 1 henry ( $1 \text{ H} = 1 \text{ Vs/A}$ ).



### ΝΟΜΟΣ ΑΥΤΕΠΑΓΩΓΗΣ

Η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή, η οποία αναπτύσσεται σε ένα κύκλωμα είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής του ρεύματος, το οποίο διαρρέει το κύκλωμα.

$$E_{\text{αυτ}} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Η αυτεπαγωγή  $L$  εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του κυκλώματος και τη φύση του γύρω μέσου.

## 2.5 ΚΑΝΟΝΑΣ ΤΟΥ LENZ

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, στις οποίες εξετάζαμε φαινόμενα εμφάνισης επαγωγικής ΗΕΔ σε ένα κύκλωμα λόγω μεταβολής της μαγνητικής ροής του κυκλώματος, καταλήξαμε σε έναν τύπο για την τιμή της εμφανιζόμενης ΗΕΔ. Στο δεύτερο μέλος της ισότητας τοποθετούσαμε “αυθαίρετα” το αρνητικό πρόσημο και λέγαμε μονότονα ότι η παρουσία του οφείλεται στον κανόνα του Lenz. Έφτασε, λοιπόν, η ώρα να εξετάσουμε τι ακριβώς σημαίνει αυτός ο κανόνας και ποια είναι η βαθύτερη σημασία του.

Ο κανόνας του Lenz μας επιτρέπει να προσδιορίζουμε εύκολα τη φορά ενός επαγωγικού ρεύματος ή μιας επαγωγικής τάσης (η φορά της επαγωγικής τάσης είναι η ίδια με τη φορά του ρεύματος το οποίο παράγει ή μπορεί να παραγάγει αυτή η τάση). Ας κάνουμε το επόμενο πείραμα.

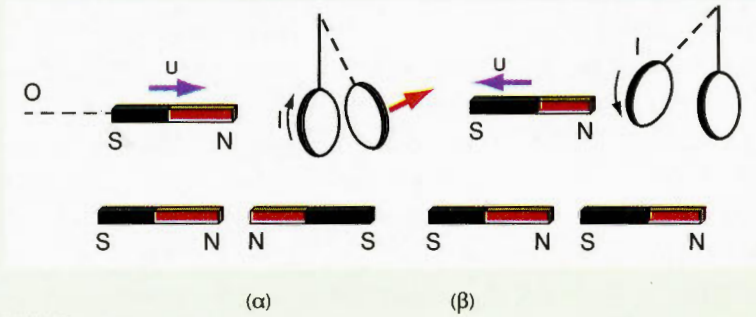
### Πείραμα

Στην εικόνα (2.6) φαίνεται ένας ραβδόμορφος μαγνήτης που είναι τοποθετημένος απέναντι από έναν κυκλικό αγωγό από αργίλιο, ο οποίος κρέμεται με τη βοήθεια ενός μονωτικού νήματος από μετάξι, από κάποια οριζόντια οροφή. Ο βόρειος πόλος του μαγνήτη είναι απέναντι από τον κυκλικό αγωγό και σε μικρή απόσταση από αυτόν, π.χ. 2-3cm. Φροντίζουμε ώστε ο άξονας του μαγνήτη να είναι κάθετος στο επίπεδο του αγωγού και η προέκτασή του να περνάει περίπου από το κέντρο του. Αρχικά, ο μαγνήτης διατηρείται ακίνητος σ’ αυτή τη θέση. Ο μεταλλικός δακτύλιος είναι και αυτός ακίνητος και το νήμα εξάρτησης είναι κατακόρυφο.

- Κινούμε απότομα τον μαγνήτη πάνω στη διεύθυνσή του, ώστε να πλησιάζει προς τον δακτύλιο με το βόρειο πόλο του. Παρατηρούμε ότι ο δακτύλιος κινείται και αυτός προς την πλευρά προς την οποία κινείται



ο μαγνήτης, τείνοντας να απομακρυνθεί από αυτόν. Μοιάζει σαν ο μαγνήτης να απωθεί το δακτύλιο.



**Εικόνα 2.6**

α. Η προσέγγιση του μαγνήτη προκαλεί αφενός την διόδο ρεύματος από τον δακτύλιο και αφετέρου την απομάκρυνσή του από τον μαγνήτη.

β. Η απομάκρυνση του μαγνήτη προκαλεί αφενός την διόδο ρεύματος από τον δακτύλιο (αντίθετης φοράς τώρα) και αφετέρου την προσέγγιση του δακτυλίου προς τον μαγνήτη.

- Ακινητοποιούμε το σύστημα και φέρουμε το μαγνήτη και το δακτύλιο στην αρχική τους θέση. Κινούμε απότομα το μαγνήτη πάνω στη διεύθυνσή του, ώστε να απομακρύνεται από το δακτύλιο. Παρατηρούμε ότι ο δακτύλιος κινείται και αυτός προς την πλευρά προς την οποία κινείται ο μαγνήτης, τείνοντας να τον πλησιάσει. Μοιάζει σαν ο μαγνήτης να έλκει το δακτύλιο.
- Ακινητοποιούμε το σύστημα και το επαναφέρουμε στην αρχική του θέση. Κινούμε το μαγνήτη πάνω στον άξονά του, παλινδρομικά γύρω από την αρχική του θέση, ώστε ο βόρειος πόλος να πλησιάζει και να απομακρύνεται από το δακτύλιο. Παρατηρούμε ότι και ο δακτύλιος αρχίζει να κάνει παλινδρομική κίνηση ακολουθώντας την κίνηση του μαγνήτη.

## Ερμηνεία

- Η προσέγγιση του μαγνήτη στην πρώτη περίπτωση αυξάνει την μαγνητική ροή η οποία περνάει από το δακτύλιο. Αυτό σημαίνει ότι στο δακτύλιο επάγεται ΗΕΔ. Εφόσον ο δακτύλιος αποτελεί κλειστό κύκλωμα, θα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Γνωρίζουμε από την παράγραφο (1.4) ότι ένας κλειστός κυκλικός δακτύλιος ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα συμπεριφέρεται όπως ένας μικρός ραβδόμορφος μαγνήτης που έχει τον άξονά του κάθετο στο επίπεδο του δακτυλίου, στο κέντρο του. Εφόσον ο μαγνήτης απωθεί τον δακτύλιο, πρέπει ο ισοδύνα-

μος με το δακτύλιο μαγνήτης να εμφανίζει βόρειο πόλο στην πλευρά που είναι στραμμένη προς το μαγνήτη που πλησιάζει. Αυτό σημαίνει ότι η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δακτυλίου  $B_{\text{δακτ}}$  θα είναι προς τα αριστερά για τον αναγνώστη που κοιτάει προς τη σελίδα. Γνωρίζοντας την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου το οποίο δημιουργεί ο δακτύλιος μπορούμε με τον κανόνα του δεξιού χεριού να προσδιορίσουμε τη φορά του επαγωγικού ρεύματος το οποίο θα διαρρέει το δακτύλιο. Διαπιστώνουμε έτσι ότι η φορά του ρεύματος θα είναι αριστερόστροφη για παρατηρητή ο οποίος βλέπει από το σημείο Ο. Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη που πλησιάζει έχει κατεύθυνση προς τα δεξιά. Η προσέγγιση του μαγνήτη προς το δακτύλιο αυξάνει τη μαγνητική ροή η οποία περνάει από το δακτύλιο. Η απομάκρυνση του δακτυλίου δείχνει σαν αυτός να “προσπαθεί” να αποφύγει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, η οποία, στην συγκεκριμένη περίπτωση, είναι αύξηση. Τούτο εκδηλώνεται και με τη δημιουργία ρεύματος στο δακτύλιο, το οποίο έχει τέτοια φορά, ώστε να παράγει μαγνητικό πεδίο με κατεύθυνση αντίθετη από την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη που πλησιάζει. Θα αναγνωρίσετε, ίσως, ότι η συμπεριφορά του δακτυλίου παρουσιάζει έναν “αδρανειακό” χαρακτήρα: με την απομάκρυνσή του αντιτίθεται στη μεταβολή της ροής, η οποία, στην συγκεκριμένη περίπτωση, είναι αύξηση.

**Διαπίστωση:** Το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, το οποίο αντιτίθεται στη αύξηση της μαγνητικής ροής η οποία το προκάλεσε.

- Η απομάκρυνση του μαγνήτη στη δεύτερη περίπτωση ελαττώνει τη μαγνητική ροή, η οποία περνάει από το δακτύλιο. Αυτό σημαίνει ότι στο δακτύλιο επάγεται ΗΕΔ. Εφόσον ο δακτύλιος αποτελεί κλειστό κύκλωμα θα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Όπως και πριν, ο κλειστός κυκλικός δακτύλιος ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να θεωρηθεί σαν μικρός ραβδόμορφος μαγνήτης που έχει τον άξονά του κάθετο στο επίπεδο του δακτυλίου, στο κέντρο του. Εφόσον ο μαγνήτης έλκει το δακτύλιο, πρέπει ο ισοδύναμος με το δακτύλιο μαγνήτης να εμφανίζει νότιο πόλο στην πλευρά που είναι στραμμένη προς το μαγνήτη που απομακρύνεται. Αυτό σημαίνει ότι η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δακτυλίου  $B_{\text{δακτ}}$  θα είναι προς τα αριστερά για τον αναγνώστη που κοιτάει προς την σελίδα. Γνωρίζοντας την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του δακτυλίου μπορούμε, με τον κανόνα του δεξιού χεριού, να προσδιορίσουμε τη φορά του επαγωγικού ρεύματος, το οποίο θα διαρρέει το δακτύλιο. Διαπιστώνουμε έτσι ότι η φορά του επαγωγικού ρεύματος θα είναι δεξιόστροφη για παρατηρητή ο οποίος βλέπει α-

πό το σημείο Ο.

Το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη που **απομακρύνεται** έχει κατεύθυνση προς τα δεξιά. Η απομάκρυνση του μαγνήτη από το δακτύλιο **ελαττώνει** την μαγνητική ροή η οποία περνάει από το δακτύλιο. Η **έλεξ** του δακτυλίου από το μαγνήτη δείχνει σαν αυτός να “προσπαθεί” να αποφύγει τη μεταβολή της μαγνητικής ροής, η οποία, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι **ελάττωση**. Τούτο εκδηλώνεται και με τη δημιουργία ρεύματος στο δακτύλιο, το οποίο έχει τέτοια φορά, ώστε να παράγει μαγνητικό πεδίο με κατεύθυνση **ίδια** με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου του μαγνήτη που απομακρύνεται. Και εδώ, η συμπεριφορά του δακτυλίου παρουσιάζει έναν “αδρανειακό χαρακτήρα”: με την προσέγγισή του προς το μαγνήτη αντιστέκεται στη μεταβολή της ροής, η οποία, στη συγκεκριμένη περίπτωση, είναι **ελάττωση**.

**Διαπίστωση:** Το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, το οποίο **αντιτίθεται** στη **ελάττωση** της μαγνητικής ροής.

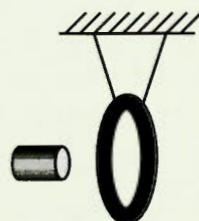
Συνδυάζοντας τα συμπεράσματα των δύο πειραματικών διαδικασιών, μπορούμε να διατυπώσουμε ένα γενικό κανόνα, ο οποίος αφορά την εύρεση της φοράς του επαγωγικού ρεύματος και ονομάζεται κανόνας του Lenz.

### Κανόνας του Lenz

Το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια φορά, ώστε να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, το οποίο **αντιτίθεται** στη **μεταβολή** της μαγνητικής ροής η οποία το προκάλεσε.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 7

Πάρτε ένα δακτύλιο από αλουμίνιο και κρεμάστε τον με δύο μονωτικά νήματα από δύο σταθερά σημεία, έτσι ώστε να κρέμεται ελεύθερα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Πάρτε και ένα ραβδόμορφο μαγνήτη και τοποθετήστε τον, έτσι ώστε ο άξονάς του να είναι κάθετος στο επίπεδο του δακτυλίου και να περνάει από το κέντρο του. Πλησιάστε τον ένα πόλο του μαγνήτη κοντά στο δακτύλιο. Κινήστε το μαγνήτη παλινδρομικά πάνω στον άξονά του, ώστε ένα μέρος του να μπαίνει και να βγαίνει από τον δακτύλιο, χωρίς όμως να ακουμπάει σ’ αυτόν. Μετά από κάποιες προσπάθειες θα επιτύχετε να θέσετε σε παλινδρομική κίνηση και το δακτύλιο. Προσπαθήστε να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό. Αλλάξτε το δακτύλιο με έναν άλ-



λο που να φέρει εγκοπή και επαναλάβετε τη διαδικασία. Τι παρατηρείτε; Προσπαθήστε να εξηγήσετε αυτό το οποίο θα παρατηρήσετε.



### ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Να αντιστοιχίσετε τα επόμενα μεγέθη και μονάδες:

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| A. ΗΕΔ από επαγωγή                 | α. 1N    |
| B. Δύναμη                          | β. 1H    |
| Γ. Συντελεστής αυτεπαγωγής         | γ. 1Volt |
| Δ. Ρεύμα                           | δ. 1A    |
| Ε. Διαφορά δυναμικού               |          |
| Στ. Συντελεστής ανοιβαίας επαγωγής |          |

2. Συρμάτινο πλαίσιο με εμβαδόν  $A$  είναι τοποθετημένο κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$ . Άλλο πλαίσιο με εμβαδόν  $2A$  είναι τοποθετημένο κάθετα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με διπλάσιο  $\vec{B}$ . Η ροή, η οποία περνάει από το δεύτερο πλαίσιο είναι:

- A. Ίδια
- B. Διπλάσια
- Γ. Η μισή
- Δ. Τετραπλάσια

3. Σωληνοειδές είναι τοποθετημένο με τον άξονά του παράλληλο προς τις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου. Όταν βγάλουμε το σωληνοειδές από το πεδίο σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , η ΗΕΔ που επάγεται είναι  $E$ . Εάν η έξοδος γίνει σε διπλάσιο χρονικό διάστημα η ΗΕΔ θα είναι:

- A.  $E$
- B.  $2E$
- Γ.  $E/2$
- Δ.  $-2E$



4. Σε πηνίο Α μεταβάλλουμε την ένταση του ρεύματος το οποίο το διαρρέει με ρυθμό  $\Delta I/\Delta t$ . Η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή, η οποία αναπτύσσεται είναι Ε. Σε πηνίο Β μεταβάλλουμε την ένταση του ρεύματος με διπλάσιο ρυθμό από ότι στο πηνίο Α. Η ΗΕΔ που αναπτύσσεται στο πηνίο Β είναι  $E/2$ .

Για τους συντελεστές αυτεπαγωγής  $L_A$  και  $L_B$  ισχύει:

A.  $L_A = 2L_B$

B.  $L_A = 4L_B$

Γ.  $2L_A = L_B$

Δ.  $L_A = L_B$

5. Όταν ένας μαγνήτης πλησιάζει προς ένα σωληνοειδές που έχει συνδεθεί με γαλβανόμετρο, ώστε ο άξονάς του να είναι παράλληλος προς τον άξονα του σωληνοειδούς, το γαλβανόμετρο δείχνει κάποια ένδειξη. Εάν κινούμε τόσο τον μαγνήτη όσο και το σωληνοειδές με την ίδια ταχύτητα και προς την ίδια κατεύθυνση, η ένδειξη του οργάνου, σε σχέση με την προηγούμενη, θα είναι

A. Μεγαλύτερη

B. Μικρότερη

Γ. Ίση

Δ. Μηδέν

6. Θα μπορούσαν οι τεχνητοί δορυφόροι της Γης να χρησιμοποιούν το μαγνητικό πεδίο της για να παράγεται ΗΕΔ, ικανή να τροφοδοτήσει τις ηλεκτρονικές συσκευές τους;
7. Ένας κλειστός κυκλικός συρμάτινος βρόχος κινείται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο με σταθερή ταχύτητα. Ο βρόχος φέρει σε περιοχή της περιφέρειάς του αμπερόμετρο, το οποίο δεν καταγράφει ένδειξη στη διάρκεια της κίνησης του βρόχου. Μπορείτε να σκεφτείτε ποιο θα είναι το είδος της κίνησης του βρόχου;
8. Πηνίο είναι συνδεδεμένο με αμπερόμετρο. Τοποθετούμε το πηνίο μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, έτσι ώστε ο άξονάς του να είναι παράλληλος προς τις δυναμικές γραμμές. Το χρονικό διάστημα, από τη στιγμή που αρχίζει η είσοδος στο πεδίο μέχρι να ολοκληρωθεί, είναι  $\Delta t$ . Επαναλαμβάνουμε το πείραμα με το ίδιο πηνίο και το ίδιο μαγνητικό πεδίο αλλά τώρα το χρονικό διάστημα εισόδου του πηνίου στο πεδίο είναι  $2\Delta t$ . Και στις δύο περιπτώσεις ο άξονας του πηνίου διατηρείται παράλληλος στο μαγνητικό πεδίο. Το φορτίο που περνάει από διατομή του σύρματος του πηνίου είναι:

A. Μεγαλύτερο στην πρώτη περίπτωση

Β. Μεγαλύτερο στη δεύτερη περίπτωση

Γ. Το ίδιο και στις δύο περιπτώσεις

9. Να συμπληρώσετε τα κενά στο επόμενο κείμενο:

“ Η ΗΕΔ από επαγωγή η οποία αναπτύσσεται σε ένα κλειστό κύκλωμα είναι ανάλογη με τον .....της μαγνητικής ροής. Ο τύπος που παρέχει αυτή την ΗΕΔ είναι ..... Το.....δικαιολογείται με τον κανόνα του Lenz, ο οποίος λέγει ότι το επαγωγικό ρεύμα έχει τέτοια .....ώστε να τείνει να ..... το .....που το προκάλεσε. Η ΗΕΔ από αυτεπαγωγή, η οποία αναπτύσσεται σε ένα πηνίο είναι .....με τον ρυθμό ..... της .....που διαρρέει το πηνίο.

10. Να εντοπίσετε τα λάθη στο επόμενο κείμενο:

“ Για να δημιουργηθεί ΗΕΔ από επαγωγή σε ένα κύκλωμα από το οποίο περνάει μεταβαλλόμενη χρονικά μαγνητική ροή, πρέπει το κύκλωμα να είναι κλειστό. Η μονάδα με την οποία θα μετρήσουμε την ΗΕΔ είναι το 1Τ. Η φορά του επαγωγικού ρεύματος είναι τέτοια, ώστε να ενισχύεται η μεταβολή της μαγνητικής ροής, και προσδιορίζεται με τον κανόνα του Lenz, ο οποίος είναι απόρροια της αρχής διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου”.

11. Επίπεδη νοητή επιφάνεια έχει εμβαδόν  $A=0,6m^2$ . Στην περιοχή που βρίσκεται η επιφάνεια υπάρχει ομογενές μαγνητικό πεδίο με  $B=2T$ . Να υπολογίσετε την μαγνητική ροή μέσα από την επιφάνεια στις επόμενες περιπτώσεις:

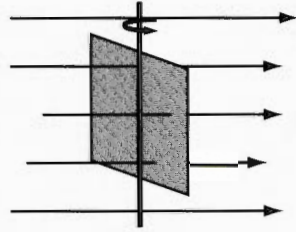
Α. Η επιφάνεια είναι παράλληλη προς τις δυναμικές γραμμές.

Β. Η επιφάνεια είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές.

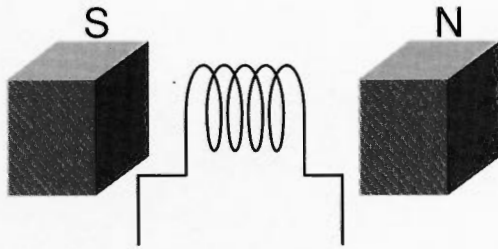
Γ. Η κάθετη στην επιφάνεια σχηματίζει με το μαγνητικό πεδίο γωνία  $\varphi=60^\circ$ .

12. Επίπεδη επιφάνεια με εμβαδόν  $A$  είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου και βρίσκεται ολόκληρη μέσα σε αυτό. Στρέφουμε την επιφάνεια κατά  $60^\circ$  γύρω από άξονα του επιπέδου της, ο οποίος είναι κάθετος στο μαγνητικό πεδίο. Να υπολογίσετε την μεταβολή της μαγνητικής ροής στη διάρκεια της στροφής.

13. Τετράγωνο συρμάτινο πλαίσιο μίας σπείρας έχει πλευρά  $a=0,4\text{cm}$  και είναι τοποθετημένο κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου με  $B=0,02\text{T}$ . Σε χρονικό διάστημα  $\Delta t=0,4\text{s}$ , στρέφουμε το πλαίσιο κατά  $\varphi=90^\circ$  γύρω από άξονα, ο οποίος περνάει από τα μέσα δύο απέναντι πλευρών του και είναι κάθετος στο μαγνητικό πεδίο. Να υπολογίσετε την ΗΕΔ από επαγωγή, η οποία αναπτύσσεται στο πλαίσιο.



14. Πηνίο έχει  $N=50$  σπείρες και βρίσκεται με τον άξονά του παράλληλο προς το ομογενές μαγνητικό πεδίο  $B=0,4\text{T}$ , το οποίο σχηματίζεται ανάμεσα στους ετερόνυμους πόλους δύο όμοιων μαγνητών. Τα άκρα του πηνίου συνδέονται με αντιστάτη αντίστασης  $R=5\Omega$ . Κάθε σπείρα του πηνίου έχει εμβαδόν  $A=2\text{cm}^2$ . Σε χρονικό διάστημα  $\Delta t=0,1\text{s}$ , βγάζουμε το πηνίο από το πεδίο. Να υπολογίσετε:



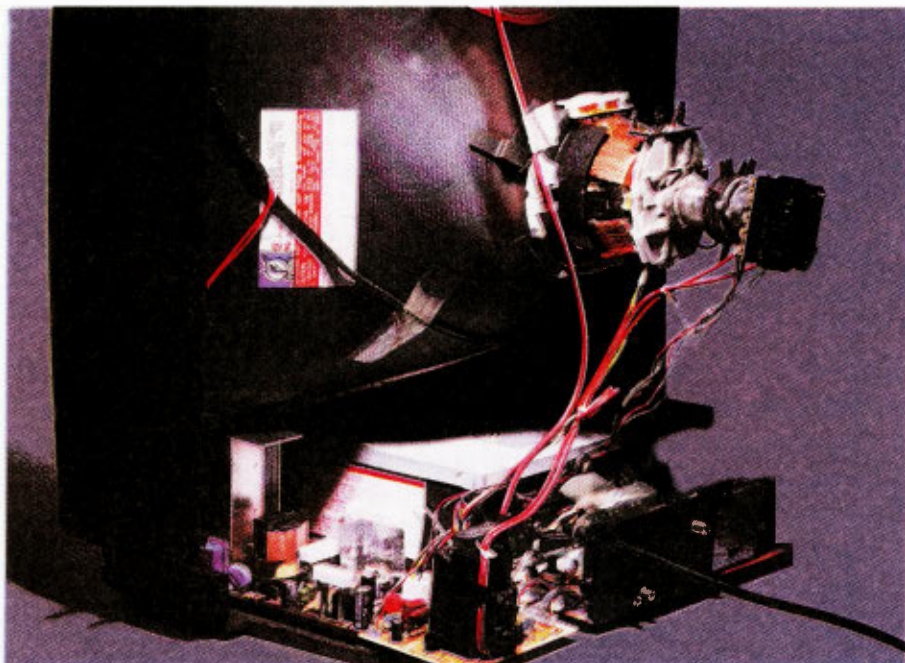
- A. Την τιμή της μέσης ΗΕΔ από επαγωγή η οποία αναπτύχθηκε στο πηνίο.
- B. Την μέση τιμή του ρεύματος το οποίο διαρρέει το κύκλωμα.
- Γ. Το φορτίο το οποίο θα περάσει από διατομή κάθε σύρματος του κυκλώματος.
15. Όταν το ρεύμα το οποίο διαρρέει ένα πηνίο μεταβάλλεται με ρυθμό  $\Delta I/\Delta t=20\text{A/s}$ , αναπτύσσεται στα άκρα του ΗΕΔ από αυτεπαγωγή ίση με  $4\text{ volt}$ . Να υπολογίσετε το συντελεστή αυτεπαγωγής του πηνίου.
16. Ο συντελεστής αυτεπαγωγής ενός πηνίου είναι  $L = 3\text{ mH}$ . Πόσος πρέπει να είναι ο χρονικός ρυθμός μεταβολής του ρεύματος, ώστε στα άκρα του να αναπτύσσεται ΗΕΔ από αυτεπαγωγή ίση με  $1\text{ volt}$ ;
17. Δύο σωληνοειδή A και B έχουν όλα τα στοιχεία τους ίδια εκτός από το μήκος τους. Το μήκος του A είναι  $\ell$ , ενώ το μήκος του B είναι  $2\ell$ . Παρατηρήσαμε ότι, αν το ρεύμα, το οποίο διαρρέει το A, μεταβάλλεται με ρυθμό  $\Delta I/\Delta t$ , αναπτύσσεται στα άκρα του ΗΕΔ από αυτεπαγωγή ίση με

20 Volt. Πόση ΗΕΔ από αυτεπαγωγή θα αναπτυχθεί στα άκρα του Β, αν το ρεύμα μεταβάλλεται με τον ίδιο ρυθμό;

18. Δύο σωληνοειδή είναι τοποθετημένα το ένα μέσα στο άλλο έτσι ώστε οι άξονές τους να συμπίπτουν. Όταν το ρεύμα στο εξωτερικό σωληνοειδές μεταβάλλεται με ρυθμό  $\Delta I/\Delta t = 10 \text{ A/s}$ , η ΗΕΔ από αμοιβαία επαγωγή που αναπτύσσεται στο εσωτερικό σωληνοειδές είναι 2 volt. Ποια είναι η τιμή του συντελεστή αμοιβαίας επαγωγής των δύο σωληνοειδών;



## κεφαλαιο 3



### ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

- Το εναλλασσόμενο ρεύμα και οι μαθηματικές σχέσεις του
- Μετασχηματιστής
- Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας
- Ηλεκτρικές εγκαταστάσεις - Ασφάλειες



### 3.1 ΤΟ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟ ΡΕΥΜΑ ΚΑΙ ΟΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΟΥ

*Ένα σύρμα που οι αναμνήσεις  
του όλες νάναι από ρεύμα  
ηλεκτρικό και ανύποπτα πουλιά.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

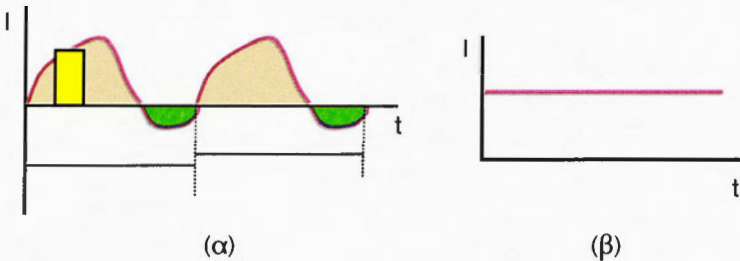
Τα ηλεκτρικά ρεύματα μπορεί να αλλάζουν φορά ή να έχουν συνεχώς την ίδια φορά (3.2α) ή (3.1α). Μπορεί, επίσης, να μεταβάλλονται με το χρόνο (3.1β) ή να είναι σταθερά.(3.2β). Μπορεί να μεταβάλλονται περιοδικά με το χρόνο (3.2β) ή όχι (3.2α).



**Εικόνα 3.1**

α. Ρεύμα που αλλάζει φορά

β. Μεταβλητό ρεύμα σταθερής φοράς



**Εικόνα 3.2**

α. Περιοδικά μεταβαλλόμενο ρεύμα

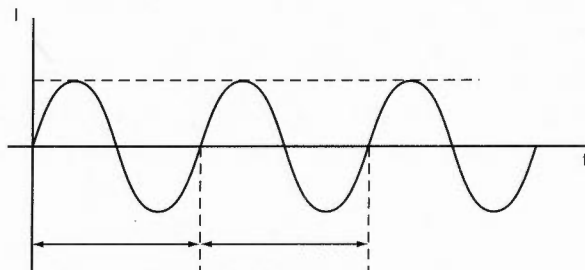
β. Ρεύμα σταθερό με τον χρόνο

Ας εξετάσουμε το περιοδικά μεταβαλλόμενο ρεύμα στην εικόνα 3.2α.

Εάν η μαθηματική έκφραση του ρεύματος ως συνάρτησης του χρόνου είναι ημιτονικής ή συνημιτονικής μορφής, το ρεύμα ονομάζεται **αρμονικό ή απλώς ημιτονικό**. Έχει επικρατήσει τα αρμονικά εναλλασσόμενα ρεύματα να ονομάζονται απλώς εναλλασσόμενα (εικ.3.3). Έτσι, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα θα έχει τη μορφή:

$$I = I_0 \eta\mu \omega t \quad \text{ή} \quad I = I_0 \sigma\upsilon\nu \omega t \quad (14)$$

Στην εικόνα (3.3) απεικονίζεται ένα εναλλασσόμενο ρεύμα (αρμονικό, ημιτονικό).



**Εικόνα 3.3**

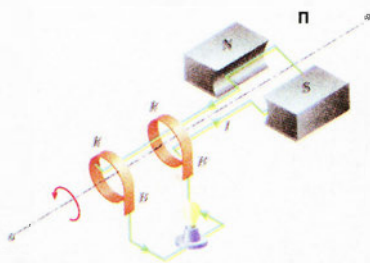
Αρμονικά εναλλασσόμενο ρεύμα ή εναλλασσόμενο

Το μέγεθος  $I_0$  ονομάζεται **πλάτος** του ρεύματος. Το μέγεθος  $\omega$  ονομάζεται **κυκλική συχνότητα** του ρεύματος. Το μέγεθος  $I$  είναι η **στιγμιαία τιμή** του ρεύματος, της οποίας οι τιμές εξαρτώνται από το χρόνο  $t$ .

Τα μεγέθη τάσης ή ρεύματος που είναι σταθερά (ή σχεδόν) με το χρόνο και, φυσικά, δεν αλλάζουν φορά λέγονται συνεχή dc (DC: direct current). Τα εναλλασσόμενα χαρακτηρίζονται με το σύμβολο ac (AC, alternating current).

## Ι. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Η παραγωγή εναλλασσόμενης τάσης στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Σε γενικές γραμμές, η αρχή παραγωγής μιας εναλλασσόμενης τάσης φαίνεται στην εικόνα (3.4). Όταν το πλαίσιο περιστρέφεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, η μαγνητική ροή που διέρχεται από αυτό είναι μεταβλητή και, κατά συνέπεια, στα άκρα του αναπτύσσεται ΗΕΔ από επαγωγή. Εάν η περιστροφή γίνεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  γύρω από άξονα ο οποίος είναι κάθετος στο πεδίο  $\vec{B}$ , αποδεικνύεται ότι η επαγωγική τάση που επάγεται στα άκρα του έχει την μορφή:



**Εικόνα 3.4**

Η περιστροφή του πλαισίου μέσα στο μαγνητικό πεδίο επάγει σε αυτό ΗΕΔ. Εξαιτίας της ΗΕΔ κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα, το οποίο προκαλεί την φωτοβολία του λαμπτήρα.





$$U = U_0 \sin \omega t \quad (15)$$

όπου :

$U_0$  : το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης, το οποίο ισούται με

$$U_0 = \omega N B A \quad (16)$$

$\omega$  : η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πλαισίου

$N$  : ο αριθμός των σπειρών του

$B$  : το μέτρο του μαγνητικού πεδίου

$A$  : το εμβαδόν του πλαισίου

Η στιγμιαία τιμή της τάσης ή του ρεύματος μεταβάλλεται συνεχώς. Κατά συνέπεια, δεν μπορεί να αποτελεί ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για το εναλλασσόμενο ρεύμα. Τα πλάτη είναι, βέβαια, σταθερά και θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικά μεγέθη. Έχουν όμως το μειονέκτημα ότι παρατηρούνται μόνο σε ορισμένες χρονικές στιγμές, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους ακέραιο πολλαπλάσιο της ημιπεριόδου  $T/2$ . Θα ορίσουμε ένα σταθερό χαρακτηριστικό μέγεθος για το εναλλασσόμενο, στηριζόμενοι στην ιδιότητα του ρεύματος να μετατρέπει ολοκληρωτικά την ενέργειά του σε εσωτερική ενέργεια του αγωγού τον οποίο διαρρέει.

Θεωρούμε ένα εναλλασσόμενο ρεύμα, πλάτους  $I_0$  το οποίο διαρρέει αντιστάτη με αντίσταση  $R$ . Το ρεύμα αυτό θερμαίνει τον αντιστάτη. Ας υποθέσουμε ότι σε ένα χρονικό διάστημα  $t$  αναπτύσσεται στον αντιστάτη ποσότητα εσωτερικής ενέργειας  $W_{\text{εναλ}}$ . Ας υποθέσουμε ότι στον ίδιο αντιστάτη εφαρμόζουμε συνεχή σταθερή τάση με αποτέλεσμα να διαρρέεται από συνεχές σταθερό ρεύμα. Ρυθμίζουμε το συνεχές ρεύμα έτσι, ώστε στο ίδιο χρονικό διάστημα  $t$  να αναπτύσσεται σ' αυτόν ποσό εσωτερικής ενέργειας  $W_{\text{συν}}$ , το οποίο ισούται με το  $W_{\text{εναλ}}$ . Στην περίπτωση αυτή, το σταθερό συνεχές ρεύμα ονομάζεται **ενεργός τιμή** του εναλλασσόμενου ρεύματος. Όστε:

Ενεργό τιμή ενός εναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζουμε τη σταθερή τιμή του συνεχούς ρεύματος το οποίο όταν διαρρέει τον ίδιο αντιστάτη τον οποίο διαρρέει το εναλλασσόμενο, και για το ίδιο χρονικό διάστημα, παράγει πάνω του το ίδιο ποσό εσωτερικής ενέργειας με το εναλλασσόμενο.

$$\text{Αποδεικνύεται ότι:} \quad I_{\text{ev}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad (19)$$

Σημειώνουμε ότι, στην πράξη, η αύξηση της εσωτερικής ενέργειας του αντιστάτη οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του με αποτέλεσμα η παραγόμενη εσωτερική ενέργεια να ρέει προς το περιβάλλον με μορφή θερμότητας, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στον αντιστάτη και στο περιβάλλον. Γι' αυτό, συνήθως, γράφουμε:  $W=Q$ .

## Β. Τάσης

Μπορούμε να ορίσουμε και την ενεργό τιμή της τάσης ενός εναλλασσόμενου ρεύματος. Στην περίπτωση αυτή θα χρησιμοποιήσουμε το νόμο του Ohm. Ας υποθέσουμε ότι αντιστάτης διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα με αποτέλεσμα να δημιουργείται στα άκρα του εναλλασσόμενη τάση. Διαβάζουμε στον αντιστάτη συνεχές σταθερό ρεύμα  $I_{\text{ev}}$ . Η συνεχής σταθερή τάση, η οποία αναπτύσσεται στα άκρα του αντιστάτη, ονομάζεται ενεργός τιμή της τάσης του εναλλασσόμενου αρμονικού ρεύματος. Όστε:

Ενεργό τιμή της τάσης ενός εναλλασσόμενου αρμονικού ρεύματος ονομάζουμε τη συνεχή σταθερή τάση, η οποία εμφανίζεται στα άκρα του ιδίου αντιστάτη όταν αυτός διαρρέεται από συνεχές ρεύμα ίσο με  $I_{\text{EV}}$

Αποδεικνύεται ότι: 
$$V_{\text{EV}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \quad (20)$$

Όταν το εναλλασσόμενο ρεύμα διαρρέει ωμικό αντιστάτη, ισχύει ο νόμος του Ohm για τις ενεργές τιμές: 
$$I_{\text{EV}} = \frac{1}{R} V_{\text{EV}} \quad (21)$$

όπως ισχύει και για τα πλάτη: 
$$I_0 = \frac{1}{R} V_0 \quad (22)$$

### III. ΜΕΣΗ ΙΣΧΥΣ

Ας υποθέσουμε ότι πηγή εναλλασσόμενης τάσης τροφοδοτεί έναν καταναλωτή. Ας ονομάσουμε  $W_{(T)}$  την ενέργεια την οποία παρέχει η πηγή στην κατανάλωση σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου.

Μέση ισχύς  $\bar{P}$  του εναλλασσόμενου ρεύματος ονομάζεται το πηλίκο της ενέργειας  $W_{(T)}$  που παρέχει η πηγή στην κατανάλωση σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου  $T$ , δια της περιόδου  $T$ .

$$P = \frac{W_{(T)}}{T} \quad (23)$$

Στην περίπτωση κατά την οποία η κατανάλωση είναι ωμικός αντιστάτης, ο προηγούμενος τύπος παίρνει τη μορφή:

$$P = I_{\text{EV}} V_{\text{EV}} \quad (24)$$

Επειδή ισχύει και  $U_{\text{EV}} = I_{\text{EV}} R$ , μπορούμε να γράψουμε:

$$P = I_{\text{EV}}^2 R \quad (25)$$

Αν λάβουμε υπόψη μας και τη σχέση  $I_{\text{EV}} = \frac{V_{\text{EV}}}{R}$ , η σχέση (20) μπορεί να γρα-

φεί και με την μορφή  $P = \frac{V_{ev}^2}{R}$  (26)

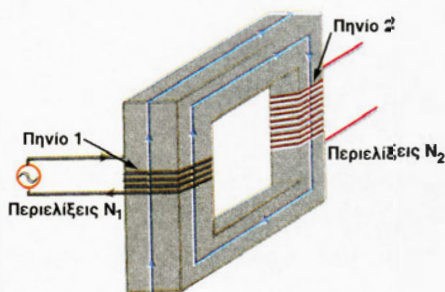
Η ενέργεια (θερμότητα που ρέει προς το περιβάλλον) η οποία παράγεται σε έναν ωμικό αντιστάτη σε χρονικό διάστημα  $t$  υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$W_{(t)} = P t \quad W_{(t)} = I_{ev} V_{ev} t \quad W_{(t)} = I_{ev}^2 R t \quad W_{(t)} = \frac{V_{ev}^2}{R} t \quad (27)$$

### 3.2 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΗΣ

Ο μετασχηματιστής αποτελείται από δύο πηνία τυλιγμένα γύρω από σιδερένιο κλειστό πυρήνα. Ο σιδερένιος πυρήνας είναι κατασκευασμένος από λεπτά φύλλα τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους. Αυτό γίνεται για να περιορίζονται οι απώλειες λόγω των επαγωγικών ρευμάτων τα οποία εμφανίζονται στον σιδερένιο πυρήνα (ρεύματα Foucault).

Ας δούμε τι θα συμβεί, εάν στα άκρα του ενός πηνίου εφαρμόσουμε εναλλασσόμενη τάση. Στο πηνίο θα δημιουργηθεί εναλλασσόμενο ρεύμα, το οποίο θα δημιουργήσει στο εσωτερικό του πυρήνα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου περνούν και από το άλλο πηνίο. Αυτός είναι, άλλωστε, ο ρόλος του σιδερένιου πυρήνα: να παγιδεύει τις δυναμικές γραμμές και να μην τους επιτρέπει την έξοδο στον αέρα, οπότε χάνεται μέρος της ροής για το άλλο πηνίο. Αφού το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται, η μαγνητική ροή η οποία περνάει από το δεύτερο πηνίο θα είναι μεταβλητή. Αυτό σημαίνει ότι στα άκρα του πηνίου αυτού θα αναπτύσσεται μεταβαλλόμενη τάση, η οποία, όπως αποδεικνύεται, είναι εναλλασσόμενη. Διαπιστώνουμε, λοιπόν, ότι η λειτουργία του μετασχηματιστή οφείλεται στο φαινόμενο της αμοιβαίας επαγωγής. Εάν τα άκρα του πηνίου στο οποίο αναπτύσσεται η επαγόμενη τάση δε συνδέονται με κατανάλωση, λέμε ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί στο κενό. Εάν τα άκρα του πηνίου αυτού έχουν συνδεθεί με κατανάλωση, οπότε αυτή θα διαρρέεται από ρεύμα, λέμε ότι ο μετασχηματιστής λειτουργεί υπό φορτίο.



**Εικόνα 3.5**

Μετασχηματιστής. Τα πηνία είναι τυλιγμένα σε δύο απέναντι πλευρές.



Το βασικό ερώτημα είναι: σε τι χρησιμεύει ο μετασχηματιστής; Η απάντηση βρίσκεται σε μια σχέση που συνδέει τα πλάτη ή τις ενεργές τιμές των εναλλασσόμενων τάσεων των πηνίων με τους αριθμούς των σπειρών των δύο πηνίων. Αποδεικνύεται ότι:

$$\frac{V_{ev,1}}{V_{ev,2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (28)$$

όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στο ένα πηνίο και ο δείκτης 2 στο άλλο.

Από τη σχέση 15 προκύπτει ότι η 23 μπορεί να γραφεί:

$$\frac{V_{0,1}}{V_{0,2}} = \frac{N_1}{N_2} \quad (29)$$

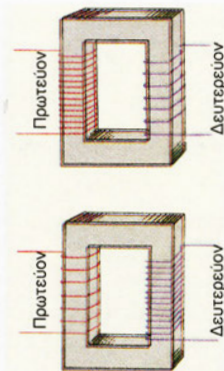
Από τις σχέσεις (28) και (29) προκύπτει ότι:

Τα πλάτη και οι ενεργές τιμές των δύο τάσεων στα πηνία ενός μετασχηματιστή είναι ανάλογα με τον αριθμό των σπειρών τους.

Αυτό σημαίνει ότι στο πηνίο που έχει μεγάλο αριθμό σπειρών το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης θα είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης στο πηνίο με το μικρότερο αριθμό σπειρών. Αυτή η παρατήρηση αποτελεί και το χαρακτηριστικό στοιχείο της λειτουργίας των μετασχηματιστών. Με τους μετασχηματιστές μπορούμε να μεταβάλλουμε το πλάτος ή την ενεργό τιμή μιας εναλλασσόμενης τάσης κατά βούληση.

Αν, λοιπόν, θέλουμε να αυξήσουμε το πλάτος μιας εναλλασσόμενης τάσης, δεν έχουμε παρά να την εφαρμόσουμε στο πηνίο με τις λίγες σπείρες, οπότε στο πηνίο με τις πολλές σπείρες θα λαμβάνεται εναλλασσόμενη τάση με μεγαλύτερο πλάτος.

Στην περίπτωση αυτή ο μετασχηματιστής θα λειτουργεί ως **ανυψωτής τάσης**. Αν θέλουμε να **ελαττώσουμε το πλάτος** μιας εναλλασσόμενης τάσης, πρέπει να την εφαρμόσουμε στο πηνίο με τις **πολλές σπείρες**. Στην περίπτωση αυτή, ο μετασχηματιστής θα λειτουργεί ως **υποβιβαστής τάσης**. Το πηνίο στο οποίο εφαρμόζεται η τάση που πρόκειται να μεταβληθεί ονομάζεται **πρωτεύον**. Το πηνίο στο οποίο λαμβάνεται η μετασχηματισμένη τάση



**Εικόνα 3.6**

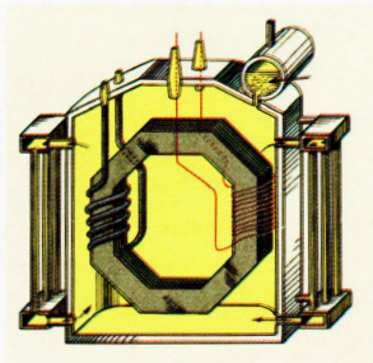
α. Υποβιβαστής τάσης  
β. Ανυψωτής τάσης

ονομάζεται **δευτερεύον**. (εικόνα 3.7). Το αρχικό ερώτημα, το οποίο αφορούσε τη χρήση του μετασχηματιστή, τώρα αλλάζει ως εξής: γιατί θέλουμε να μπορούμε να μεταβάλλουμε το πλάτος μιας εναλλασσόμενης τάσης; Η απάντηση είναι η εξής: διότι αποδεικνύεται ότι η ηλεκτρική ισχύς μπορεί να μεταφερθεί σε μακρινές αποστάσεις, με μικρές απώλειες, μόνο υπό υψηλή τάση, πολύ υψηλότερη από αυτή με την οποία παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια στα εργοστάσια. (Το θέμα αυτό θα εξετάσουμε στην επόμενη παράγραφο.)

Κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή εμφανίζονται απώλειες ενέργειας. Οι απώλειες αυτές οφείλονται:

1. Στις ωμικές αντιστάσεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου (φαινόμενο Joule).
2. Στα ρεύματα που δημιουργούνται (ρεύματα Foucault) στο σιδερένιο πυρήνα, τα οποία προκαλούν τη θέρμανσή του. (Παραγωγή θερμότητας λόγω του φαινομένου Joule των ρευμάτων Foucault).
3. Στο φαινόμενο της μαγνητικής σκέδασης, το οποίο συνίσταται στο γεγονός ότι κάποιες από τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου δεν ολοκληρώνουν τη διαδρομή τους μέσα από το πηνίο του δευτερεύοντος, αλλά βγαίνουν από το σιδερένιο πυρήνα, και συνεπώς ένα μέρος της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου του πρωτεύοντος μπορεί να χάνεται στο περιβάλλον, πράγμα που σημαίνει ότι ένα μέρος της ενέργειας που προσφέρεται στο πρωτεύον χάνεται στο περιβάλλον.
4. Στο φαινόμενο της μαγνητικής υστέρησης, το οποίο συνδέεται με την ενέργεια που δαπανάται για την περιοδική αλλαγή του προσανατολισμού των στοιχειωδών μαγνητών του πυρήνα, πράγμα που συντελεί στη θέρμανση του πυρήνα.

Οι απώλειες λόγω του φαινομένου Joule περιορίζονται, αν επιλέξουμε σύρμα με μικρή ειδική αντίσταση για τα πηνία πρωτεύοντος-δευτερεύοντος. Οι απώλειες λόγω ρευμάτων Foucault περιορίζονται με κατασκευή πυρήνων από μονωμένα μεταλλικά φύλλα. Σε μετασχηματιστές υψηλής απόδοσης, οι πυρήνες κατασκευάζονται από σκόνη σιδήρου, η οποία έχει εμποτιστεί με μονωτικό βερνίκι. Παρά ταύτα, δεν είναι δυνατόν να αποφύγουμε τη θέρμανση των μετασχηματιστών, ιδιαίτε-



**Εικόνα 3.7**  
Μετασχηματιστής μεγάλης ισχύος στον οποίο προβλέπεται σύστημα ψύξης

ρα αν πρόκειται για μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος. Για το λόγο αυτό, σ' αυτούς τους μετασχηματιστές προβλέπεται σύστημα ψύξης με το οποίο επιτυγχάνεται η απομάκρυνση της παραγόμενης θερμότητας (εικ. 3.7). Όλοι οι μετασχηματιστές, ανάλογα με την ποιότητα κατασκευής τους, παρουσιάζουν απώλειες ισχύος. Στους μετασχηματιστές πολύ καλής κατασκευής, οι απώλειες μπορούν να περιοριστούν σε 2 % της προσφερόμενης ισχύος. Η ποιότητα κατασκευής ενός μετασχηματιστή προσδιορίζεται από το συντελεστή απόδοσης.

Πολλές φορές χρησιμοποιούμε την έννοια του ιδανικού μετασχηματιστή. Αυτό αποτελεί εξιδανίκευση και χρησιμοποιείται για απλοποίηση των υπολογισμών. Ο ιδανικός μετασχηματιστής έχει συντελεστή απόδοσης 1. Τούτο σημαίνει ότι δεν υπάρχουν απώλειες και ότι η ισχύς η οποία τροφοδοτείται στο πρωτεύον ισούται με την ισχύ η οποία λαμβάνεται στο δευτερεύον.

Συντελεστής απόδοσης  $\alpha$  ενός μετασχηματιστή είναι το πηλίκο της ισχύος  $P_{\text{δευτ.}}$  η οποία λαμβάνεται στο δευτερεύον και της ισχύος  $P_{\text{πρωτ.}}$  η οποία τροφοδοτεί το πρωτεύον.

$$\alpha = \frac{P_{\text{δευτ.}}}{P_{\text{πρωτ.}}} \quad (30)$$

Γνωρίζουμε ότι :  $P_{\text{πρωτ.}} = I_{\text{εν,1}} V_{\text{εν,1}}$   $P_{\text{δευτ.}} = I_{\text{εν,2}} V_{\text{εν,2}}$

Για ιδανικό μετασχηματιστή,  $\alpha=1$ , και η σχέση (24) δίνει:

$$\frac{I_{\text{εν,1}}}{I_{\text{εν,2}}} = \frac{N_2}{N_1} \quad (31)$$

Οι σχέσεις (28) και (29) ισχύουν για κάθε μετασχηματιστή είτε λειτουργεί εν κενώ είτε υπό φορτίο. Η σχέση (31) ισχύει μόνο για ιδανικό μετασχηματιστή.

### 3.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στηρίζεται στο φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Μεγάλα πηνία περιστρέφονται μέσα σε ισχυρά μαγνητικά πεδία και παράγεται εναλλασσόμενη τάση. Η ενέργεια για την περιστροφή των πηνίων μπορεί να εξασφαλίζεται από τη μηχανική ενέργεια μιας υδατόπτωσης ή από την πίεση υπέρθερμου υδρατμού στα πτερύγια μιας τουρμπίνας κτλ. Η παραγωγή του ατμού εξασφαλίζεται με τη χρη-

σιμοποίηση καυσίμου, όπως είναι ο άνθρακας, το πετρέλαιο ή το σχάσιμο υλικό σε πυρηνικούς αντιδραστήρες στους οποίους η ενέργεια που απελευθερώνεται από τη σχάση χρησιμοποιείται για την παραγωγή υπέρθερμου ατμού.

Ένα δίκτυο παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από:

- A. Ένα εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- B. Ένα μετασχηματιστή ανύψωσης της τάσης
- Γ. Ένα σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας
- Δ. Ένα μετασχηματιστή υποβιβασμού της τάσης
- E. Καταναλωτές

Η απαίτηση για μικρό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην υλοποίηση των συστημάτων παραγωγής και μεταφοράς της, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που ο τόπος παραγωγής είναι μακριά από τον τόπο κατανάλωσης. Στην περίπτωση αυτή έχει μεγάλη σημασία η οικονομικότερη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει οι απώλειες στη γραμμή μεταφοράς να είναι όσο το δυνατόν περιορισμένες. Σε κάθε περίπτωση, στη γραμμή μεταφοράς θα έχουμε απώλειες λόγω του φαινομένου Joule. Το βασικό ζητούμενο είναι να περιοριστούν οι απώλειες αυτές. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται με τη χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνδυασμό με τους μετασχηματιστές.

Ας υποθέσουμε ότι ένα εργοστάσιο παράγει ισχύ  $P_{εξ}$  (ενέργεια ανά μονάδα χρόνου) που πρόκειται να μεταφερθεί σε έναν τόπο κατανάλωσης. Την ισχύ αυτή θα την ονομάζουμε **ισχύ εξόδου**  $P_{εξ}$ . Ας ονομάσουμε  $V_{εξ}$  την τάση στην έξοδο του εργοστασίου και  $I$  το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς. Θα έχουμε:

$$P_{εξ} = I V_{εξ} \quad (32)$$

Από τη σχέση (32) φαίνεται ότι τα μεγέθη  $I$  και  $V_{εξ}$  είναι αντιστρόφως ανάλογα. Αυτό σημαίνει ότι, όταν το ένα αυξάνεται, το άλλο ελαττώνεται. Για να είναι οι απώλειες ισχύος, λόγω φαινομένου Joule στη γραμμή μεταφοράς, μικρές, πρέπει το ρεύμα να είναι μικρό. Αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου  $V_{εξ}$  από το εργοστάσιο πρέπει να είναι μεγάλη.

Ας ονομάσουμε  $R$  την αντίσταση της γραμμής μεταφοράς. Η απώλεια ισχύος στη γραμμή μεταφοράς θα είναι:

$$P_{γρ.} = I^2 R \quad (33)$$

Η (33) λόγω της ( 32 ) γίνεται:



$$P_{\gamma\rho.} = \frac{P_{\epsilon\xi.}^2}{V_{\epsilon\xi.}^2} R \quad (34)$$

Η αντίσταση  $R$  της γραμμής μεταφοράς είναι σταθερή για σταθερή απόσταση εργοστασίου-κατανάλωσης και για συγκεκριμένο υλικό των αγωγών μεταφοράς. Εξάλλου, η ισχύς εξόδου  $P_{\epsilon\xi.}$  είναι και αυτή καθορισμένη για ένα συγκεκριμένο εργοστάσιο. Από τη σχέση (34) φαίνεται ότι ο μόνος τρόπος για να περιορίσουμε τις απώλειες ισχύος είναι να αυξήσουμε την τάση  $V_{\epsilon\xi.}$  του εργοστασίου. Για να αυξήσουμε όμως μια τάση, πρέπει αυτή να μπορεί να αυξηθεί. Αυτό συμβαίνει μόνο για το εναλλασσόμενο ρεύμα. Αν το εργοστάσιο παρήγαγε συνεχές ρεύμα δε θα είχαμε αυτή τη δυνατότητα. Η αύξηση του πλάτους ή της ενεργού τιμής της τάσης του εναλλασσόμενου ρεύματος επιτυγχάνεται με τους μετασχηματιστές. Το γενικό σχέδιο, λοιπόν, είναι το εξής: στην έξοδο του εργοστασίου τοποθετούμε μετασχηματιστές ανυψωτές τάσης με τη βοήθεια των οποίων ανυψώνεται η τάση σε μερικές εκατοντάδες χιλιάδες volt. Η ισχύς οδηγείται στον τόπο κατανάλωσης, όπου υφίσταται διαδοχικές μειώσεις με τη βοήθεια μετασχηματιστών οι οποίοι δρουν ως υποβιβαστές τάσης. Στο τελικό στάδιο, η ισχύς που φτάνει στην κατανάλωση προσφέρεται για αστική χρήση με τιμή της τάσης 220V.

### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Μικρό εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί συνοικισμό που βρίσκεται σε απόσταση  $\ell = 30$  km με τη βοήθεια γραμμής μεταφοράς που έχει αντίσταση ανά μονάδα μήκους  $R^* = 0,4 \Omega/\text{m}$ . Η ισχύς εξόδου του εργοστασίου είναι  $P_{\epsilon\xi.} = 1$  MW και η τάση εξόδου του εργοστασίου είναι  $V_{\epsilon\xi.} = 500$  V. Στην έξοδο του εργοστασίου τοποθετείται μετασχηματιστής, ανυψωτής τάσης με λόγο σπειρών  $N_1 / N_2 = 1000$ . Να υπολογίσετε:

- A. Το ρεύμα που παρέχει το εργοστάσιο.
- B. Την τάση στο δευτερεύον του μετασχηματιστή (αρχή της γραμμής).
- Γ. Το ρεύμα που διαρρέει την γραμμή.
- Δ. Την αντίσταση της γραμμής μεταφοράς.
- Ε. Την απώλεια ισχύος στη γραμμή μεταφοράς.
- ΣΤ. Την ισχύ με την οποία τροφοδοτείται ο συνοικισμός
- Z. Την τάση στον συνοικισμό

Η. Την απόδοση της γραμμής.

Θ. Αν στον συνοικισμό τοποθετήσουμε μετασχηματιστή, υποβιβαστή τάσης, ποιος πρέπει να είναι ο λόγος σπειρών πρωτεύοντος-δευτερεύοντος, ώστε η τάση εξόδου να είναι  $V=220\text{ V}$ .

Ι. Αν κάθε μονάδα του συνοικισμού, σε κατάσταση μέγιστης κατανάλωσης, καταναλώνει ισχύ  $P_{\mu\sigma\nu}=22,6\text{ kW}$ , πόσες μονάδες του συνοικισμού μπορούν να δουλεύουν ταυτόχρονα σε συνθήκες πλήρους κατανάλωσης;

**Λύση**

$$\text{Α. Ισχύει: } P_{\varepsilon\zeta.} = I_{\varepsilon\rho\gamma.} V_{\varepsilon\zeta.} \Rightarrow I_{\varepsilon\rho\gamma.} = \frac{P_{\varepsilon\zeta.}}{V_{\varepsilon\zeta.}} = \frac{10^6}{500}\text{ A} = 2 \times 10^3\text{ A}$$

$$\text{Β. Ισχύει: } \frac{V_{\varepsilon\zeta.}}{V_{\gamma\rho.}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{1000} \Rightarrow V_{\gamma\rho.} = 1000 \times V_{\varepsilon\zeta.} = 5 \times 10^5\text{ V}$$

όπου  $V_{\gamma\rho.}$  η τάση στην αρχή της γραμμής μεταφοράς.

Γ. Ο μετασχηματιστής είναι ιδανικός. Άρα :

$$\frac{I_{\gamma\rho.}}{I_{\varepsilon\rho\gamma.}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{1000} \Rightarrow I_{\gamma\rho.} = 2\text{ A}$$

Δ. Η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς είναι :

$$R_{\gamma\rho.} = 2\ell R^* = 60 \times 10^3 \times 0,4\ \Omega = 2,4 \times 10^4\ \Omega$$

Ε. Η απώλεια ισχύος είναι :

$$\Delta P = I_{\gamma\rho.}^2 R_{\gamma\rho.} = 2^2 \times 2,4 \times 10^4\text{ W} = 9,6 \times 10^4\text{ W}$$

ΣΤ. Η ισχύς με την οποία τροφοδοτείται ο συνοικισμός είναι:

$$P_{\text{συν.}} = P_{\varepsilon\rho} - \Delta P = 100 \times 10^4\text{ W} - 9,6 \times 10^4\text{ W} = 90,4 \times 10^4\text{ W}$$

$$\text{Ζ. Η τάση στο συνοικισμό θα είναι: } V_{\text{συν.}} = \frac{P_{\text{συν.}}}{I_{\gamma\rho.}} = \frac{90,4 \times 10^4}{2} = 4,5 \times 10^5\text{ V}$$

Η. Η απόδοση της γραμμής θα είναι:  $\alpha = \frac{P_{\text{συν.}}}{P_{\text{εξ}}} = \frac{90,4}{100} = 90\%$

Θ. Θα έχουμε:  $\frac{V_{\text{συν}}}{V_{\text{κατ}}} = \frac{N_1'}{N_2'} = \frac{4,5 \times 10^5}{220} \approx 2 \times 10^3$

Ι. Ο αριθμός  $k$  των μονάδων που μπορούν να δουλεύουν ταυτόχρονα είναι:

$$k = \frac{90,4 \times 10^4}{22,6 \times 10^3} = 40$$

### 3.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ - ΑΣΦΑΛΕΙΕΣ

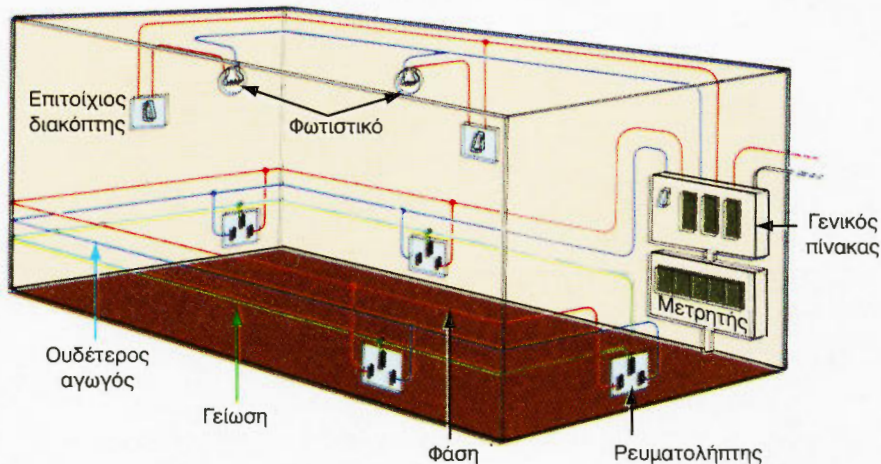
#### ΓΕΝΙΚΑ

Ο τελικός αποδέκτης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η βιομηχανία (ελαφρά και βαριά), οι βιοτεχνίες και η αστική κατανάλωση. Θα μελετήσουμε τον τρόπο εισόδου και αξιοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα συνηθισμένο σπίτι και θα εξετάσουμε τις απαιτήσεις ασφαλούς χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Κάθε κύκλωμα αποτελείται από τη **φάση** και τον **ουδέτερο αγωγό**. Ο **γενικός διακόπτης** στον **πίνακα διανομής** χρησιμεύει για να αποσυνδέει όλα τα κυκλώματα από την γραμμή τροφοδοσίας. Στον πίνακα διανομής υπάρχουν κάποια εξαρτήματα τα οποία ονομάζονται **ασφάλειες**. Σε κάθε ένα από τα κυκλώματα τα οποία ξεκινούν από τον κεντρικό πίνακα παρεμβάλλεται μία ασφάλεια. Στις ασφάλειες θα αναφερθούμε αργότερα. Παρατηρήστε τα δύο καλώδια τα οποία ξεκινούν από το γενικό διακόπτη. Το κύκλωμα αυτό χρησιμοποιείται για τις διάφορες ηλεκτρικές συσκευές μικρής κατανάλωσης. Παρατηρήστε ιδιαίτερα τον πράσινο αγωγό, ο οποίος κινείται παράλληλα προς τη φάση και τον ουδέτερο αγωγό αυτού του κυκλώματος. Το καλώδιο αυτό ονομάζεται **γείωση**. Η γείωση συνδέεται με ειδικούς αγωγούς που τοποθετούνται βαθιά στο έδαφος. Με τη γείωση συνδέονται τα περιβλήματα όλων των ηλεκτρικών συσκευών. Ο ρόλος του καλωδίου γείωσης είναι σημαντικός, διότι σε περίπτωση βραχυκυκλώματος σε μια συσκευή, αποτρέπει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας από τυχαία επαφή με το περίβλημα. Αν για κά-



ποιο λόγο το καλώδιο της φάσης κάνει επαφή με το μεταλλικό περίβλημα μιας ηλεκτρικής συσκευής, αυτό θα αποκτήσει δυναμικό 220V. Αν ακουμπήσουμε το μεταλλικό περίβλημα, μέρος του ρεύματος θα περάσει από το σώμα μας και θα εκτεθούμε σε κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Αν όμως η συσκευή είναι γειωμένη, το ρεύμα διαφεύγει προς τη γη μέσα από το καλώδιο γείωσης, το οποίο παρουσιάζει αντίσταση πολύ μικρότερη από την αντίσταση του σώματος του ανθρώπου. Η αντίσταση του σώματος του ανθρώπου ανάμεσα στο κεφάλι και τα πόδια έχει τιμή περίπου 20 000Ω (20 kΩ). Η τιμή αυτή εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά, κυρίως του δέρματος.



**Εικόνα 3.9**

Η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σπίτι. Να παρατηρήσετε τις διαφορετικές διαδρομές των ζευγών καλωδίων, ανάλογα με τα στοιχεία κατανάλωσης, τα οποία θα τροφοδοτήσουν. Να παρατηρήσετε, επίσης, το πράσινο καλώδιο της γείωσης, το οποίο κινείται παράλληλα προς το ζευγάρι γραμμών το οποίο τροφοδοτεί τις πρίζες.

Να θυμάστε δύο πράγματα:

1. Όταν το ρεύμα πρόκειται να κυκλοφορήσει μεταξύ δύο σημείων και του παρέχονται διάφοροι δρόμοι, θα ακολουθήσει, κυρίως, εκείνον το δρόμο για τον οποίο η αντίσταση έχει την μικρότερη τιμή. Αυτό δε σημαίνει ότι οι άλλοι δρόμοι δε θα διαρρέονται από ρεύμα. Σημαίνει ότι όσο μικρότερη είναι η αντίσταση μιας διαδρομής, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ρεύμα, το οποίο θα ακολουθήσει αυτή τη διαδρομή.
2. Τα φαινόμενα ηλεκτροπληξίας προκαλούνται από το ρεύμα και όχι από την τάση, αυτή καθαυτή.

### Βραχυκύκλωμα

Στην εικόνα 3.10 ο αντιστάτης με αντίσταση  $R=50\ \Omega$  τροφοδοτείται από



πηγή τάσης  $V=100$  volt. Το ρεύμα στο κύκλωμα είναι  $I=V/R=2$  A.

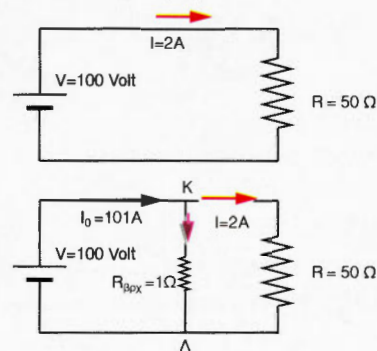
Στο δεύτερο κύκλωμα έχουμε συνδέσει παράλληλα προς τον αντιστάτη  $R$  έναν άλλο αντιστάτη με αντίσταση  $R_{\text{διακλ}}=1\Omega$ . Ο αντιστάτης διακλάδωσης θα διαρρέεται από ρεύμα  $I_{\text{διακλ}}=V/R_{\text{διακλ}}=100$  A. Ο αντιστάτης  $R$  θα διαρρέεται από ρεύμα  $I=V/R=2$  A. Το ολικό ρεύμα που θα διαρρέει την πηγή θα είναι  $I_0=102$  A. Παρατηρούμε ότι το ρεύμα το οποίο διαρρέει την πηγή έγινε 51 φορές μεγαλύτερο. Όσο μικρότερη είναι η αντίσταση διακλάδωσης, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει την πηγή. Στην περίπτωση που ο αντιστάτης διακλάδωσης έχει αντίσταση η οποία τείνει στο μηδέν, η ένταση του ρεύματος το οποίο διαρρέει την πηγή αυξάνεται εξαιρετικά και υπάρχει κίνδυνος να λιώσουν τα καλώδια που συνδέονται στους πόλους της πηγής, εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται σ' αυτά.

**Η ένωση των σημείων K και Λ με αγωγό ασήμαντης αντίστασης χαρακτηρίζεται ως βραχυκύκλωμα των σημείων K και Λ.** Μιλάμε για βραχυκύκλωμα, ακόμα και αν η αντίσταση του αγωγού που συνδέει τα σημεία K και Λ δεν είναι ασήμαντη, αρκεί να είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση του υπόλοιπου κυκλώματος, η οποία έχει συνδεθεί παράλληλα με την αντίσταση διακλάδωσης.

Στις διάφορες συσκευές μπορεί να εμφανιστεί βραχυκύκλωμα στα σημεία όπου η φάση συνδέεται με το μεταλλικό περίβλημα της συσκευής, εφόσον έχει καταστραφεί η μόνωση του καλωδίου και ο αγωγός κάνει επαφή με το μεταλλικό περίβλημα. Εάν δεν είναι γειωμένο το μεταλλικό περίβλημα και το ακουμπήσουμε, το αποτέλεσμα είναι **ηλεκτροπληξία**, η οποία, ανάλογα με τις συνθήκες, μπορεί να είναι θανατηφόρα.

### Ασφάλειες

Οι διάφορες συσκευές που υπάρχουν σε ένα σπίτι συνδέονται παράλληλα και τροφοδοτούνται από τη βασική γραμμή διανομής, η οποία διατρέχει το σπίτι και η οποία, συνήθως, αποτελείται από τη φάση και τον ουδέτερο αγωγό. Αυτό σημαίνει ότι, όσο περισσότερες συσκευές συνδέονται παράλληλα στο δίκτυο, τόσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που "τραβάει" το σπίτι από το δίκτυο διανομής της ΔΕΗ. Τα καλώδια του δικτύου υπολογίζονται για ορισμένο μέγιστο



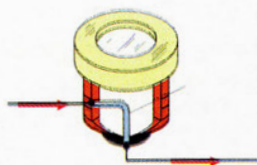
**Εικόνα 3.10**

Για την κατανόηση της έννοιας του βραχυκυκλώματος. Τα σημεία K και Λ, έχουν βραχυκυκλωθεί. Ο αγωγός, ο οποίος τα ενώνει έχει αντίσταση  $1\Omega$ , η οποία είναι πολύ μικρότερη από την αντίσταση του υπάρχοντος αντιστάτη

στο επιτρεπόμενο ρεύμα. Αν το ρεύμα υπερβεί αυτή την τιμή τα καλώδια υπερθερμαίνονται, λιώνουν και καταστρέφονται. Πρέπει, λοιπόν, να φροντίσουμε, ώστε το ρεύμα να μην υπερβεί μια ορισμένη μέγιστη τιμή. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση κατασκευών οι οποίες ονομάζονται **ασφάλειες** ή **αυτόματοι διακόπτες**.

Οι τηκόμενες ασφάλειες αυτοκαταστρέφονται, όταν το ρεύμα υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή, με αποτέλεσμα να διακόπτεται το κύκλωμα. Οι αυτόματοι διακόπτες διακόπτουν το κύκλωμα, όταν η ένταση υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή. Η διακοπή επιτυγχάνεται με μαγνητική ή θερμική μέθοδο. Μια συνηθισμένη τηκόμενη ασφάλεια περιέχει ένα μεταλλικό σύρμα ή ένα μεταλλικό ελασμα, το οποίο λιώνει, όταν η ένταση του ρεύματος υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή. Το χαρακτηριστικό μιας τηκόμενης ασφάλειας είναι το μέγιστο ρεύμα το οποίο μπορεί να αντέξει, χωρίς να λιώσει. Έτσι, όταν χρησιμοποιούμε μία ασφάλεια των 6Α γνωρίζουμε ότι το σύρμα της θα λιώσει, εάν το ρεύμα το οποίο διαρρέει τον κλάδο στον οποίο είναι τοποθετημένη η ασφάλεια υπερβεί τα 6Α.

Οι αυτόματες ασφάλειες λειτουργούν με βάση τα θερμικά ή μαγνητικά αποτελέσματα του ρεύματος. Οι αυτόματοι διακόπτες με βάση τα θερμικά αποτελέσματα του ρεύματος περιέχουν διμεταλλικό ελασμα, το οποίο, όταν η θερμοκρασία υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή, παραμορφώνεται και το κύκλωμα διακόπτεται.



**Εικόνα 3.11**

Διάφοροι τύποι τηκόμενων ασφαλειών

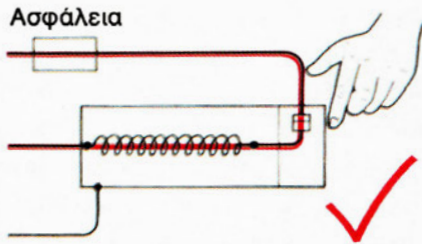
### Προσέξτε:

Όταν διαπιστώσετε ότι κάποια ασφάλεια “κάηκε” ή κάποιος αυτόματος διακόπτης “έπεσε”, πρέπει πάντοτε να προσπαθήσετε να εντοπίσετε την αιτία, πριν αλλάξετε ασφάλεια ή πριν επαναφέρετε τον αυτόματο διακόπτη.

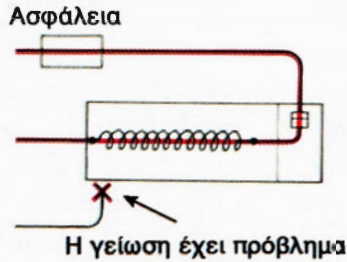
Οι τηκόμενες ασφάλειες και οι αυτόματοι διακόπτες πρέπει να παρεμβάλλονται στο καλώδιο της φάσης και όχι στον ουδέτερο αγωγό.

Ο ουδέτερος αγωγός έχει δυναμικό μηδέν. Τούτο, όμως, δε σημαίνει ότι δε διαρρέεται από ρεύμα. Θα μπορούσαμε, λοιπόν, να παρεμβάλουμε την ασφάλεια στον ουδέτερο αγωγό και να επιτύχουμε και πάλι την διακοπή του ρεύματος όταν λιώσει η ασφάλεια. Το γεγονός όμως είναι ότι η φάση θα εξακολουθούσε να είναι σε υψηλό δυναμικό, πράγμα που είναι επικίνδυνο. Ας

υποθέσουμε, λοιπόν, ότι μία ηλεκτρική συσκευή συνδέεται με τη φάση και τον ουδέτερο αγωγό. Ας υποθέσουμε ακόμα ότι έχουμε τοποθετήσει την ασφάλεια στον αγωγό της φάσης, όπως επιβάλλεται. Ακόμα και στην περίπτωση αυτή υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Ας εξετάσουμε τι θα συμβεί στην περίπτωση που το μονωτικό περίβλημα του αγωγού της φάσης έχει φθαρεί και το καλώδιο έχει γυμνωθεί. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το γυμνό καλώδιο της φάσης να ακουμπήσει στο μεταλλικό περίβλημα της συσκευής, με αναπόφευκτο αποτέλεσμα τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας αν, για τυχαίο λόγο, ακουμπήσουμε το μεταλλικό περίβλημα της συσκευής. Ο κίνδυνος αυτός αποφεύγεται με τη γείωση του περιβλήματος της συσκευής, διότι, αν η γείωση είναι πολύ καλή, θα καεί η ασφάλεια. Ας παρακολουθήσουμε τα επόμενα στιγμιότυπα στα οποία εξετάζονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις.



(α)



(β)

### Εικόνα 3.12

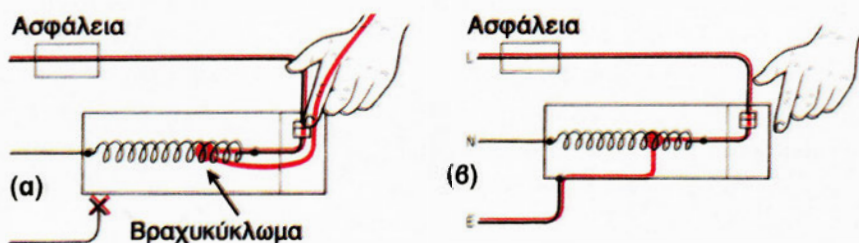
α. Οι κανόνες ασφαλείας πληρούνται. Κανονική και ασφαλής λειτουργία

β. Κατεστραμμένη γείωση. Κίνδυνος ηλεκτροπληξίας αν το καλώδιο της φάσης είναι γυμνό και κάνει επαφή με το περίβλημα

Στην εικόνα (3.12α) η ασφάλεια έχει τοποθετηθεί στην φάση (σωστό) και το μεταλλικό περίβλημα είναι γειωμένο (σωστό). Η εγκατάσταση είναι ασφαλής. Δεν υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας, αν ακουμπήσουμε το μεταλλικό περίβλημα.

Στην εικόνα (3.12β) η γείωση έχει καταστραφεί (πιθανός κίνδυνος). Αν ο αγωγός της φάσης διατηρεί τη μόνωσή του δεν υπάρχει κίνδυνος. Αν όμως το καλώδιο έχει γυμνωθεί και κάνει επαφή με το μεταλλικό περίβλημα, αντιμετωπίζουμε κίνδυνο ηλεκτροπληξίας στην περίπτωση που ακουμπήσουμε το περίβλημα.



**Εικόνα 3.13**

α. Η γείωση δεν είναι καλή, άρα δεν δουλεύει. Το γυμνό καλώδιο της φάσης κάνει επαφή με το μεταλλικό περίβλημα. Σίγουρη η ηλεκτροπληξία σε περίπτωση επαφής με το περίβλημα. β. Η γείωση δουλεύει. Το γυμνό καλώδιο κάνει επαφή με το περίβλημα. Δεν υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας. Καίγεται η ασφάλεια.

Στην εικόνα (3.13α) το σύρμα θέρμανσης έχει ακουμπήσει στο μεταλλικό περίβλημα (κίνδυνος), ενώ η γείωση είναι κατεστρεμμένη (κίνδυνος). Η ηλεκτροπληξία είναι σίγουρη, εάν ακουμπήσουμε το μεταλλικό περίβλημα.

Στην εικόνα (3.13β) η γείωση έχει αποκατασταθεί (σωστό), αλλά το σύρμα θέρμανσης εξακολουθεί να ακουμπάει στο μεταλλικό περίβλημα (κίνδυνος). Όταν η συσκευή μπει σε λειτουργία, το ρεύμα διαρρέει τη φάση, μέρος του σύρματος θέρμανσης και το σύρμα γείωσης. Αν η γείωση είναι καλή, καίγεται η ασφάλεια και δεν υπάρχει κίνδυνος, αν ακουμπήσουμε το μεταλλικό περίβλημα. Υπάρχει πιθανότητα το επιπλέον ρεύμα που περνάει από τη φάση, στην περίπτωση αυτή, να μην προκαλέσει την τήξη της ασφάλειας. Ας υποθέσουμε ότι το ρεύμα κανονικής λειτουργίας της συσκευής είναι 8Α και το εσωτερικό βραχυκύκλωμα προκαλεί αύξηση του ρεύματος στα 11Α. Εάν η ασφάλεια που χρησιμοποιούμε είναι των 13Α, είναι φανερό ότι δεν πρόκειται να λιώσει ώστε να διακοπεί το κύκλωμα. Αντιλαμβάνεστε τότε ότι η ασφάλεια στην εικόνα (3.13β) δεν παρέχει προστασία από ηλεκτροπληξία. Αν ακουμπήσουμε το μεταλλικό περίβλημα, μπορεί να έχουμε φαινόμενα ηλεκτροπληξίας ακόμα και με ρεύμα 100 mA.

Ο ρόλος των ασφαλειών είναι να προστατεύουν τα καλώδια και τις συσκευές από υπερθέρμανση στην περίπτωση που διέρχεται ρεύμα που έχει υπερβεί μια προκαθορισμένη τιμή. Οι ασφάλειες δεν προστατεύουν από ηλεκτροπληξία. Η προστασία από ηλεκτροπληξία παρέχεται από τις γειώσεις των περιβλημάτων των ηλεκτρικών συσκευών και από την τήρηση βασικών κανόνων ασφαλείας.

### Ηλεκτρισμός και ατομική ασφάλεια

Έχετε παρατηρήσει ότι τα πουλιά μπορούν να κάθονται σε ηλεκτροφόρα σύρματα, χωρίς να παθαίνουν ηλεκτροπληξία; Αν κρεμαστείτε από ένα καλώδιο υψηλής τάσης και αιωρείστε στον αέρα, χωρίς να ακουμπάτε σε ο-



ποιοδήποτε άλλο αντικείμενο, δεν κινδυνεύετε από ηλεκτροπληξία. Στις περιπτώσεις αυτές τα πουλιά και εσείς βρίσκεστε στο ίδιο δυναμικό με το καλώδιο. Για να κινδυνεύσετε, πρέπει ανάμεσα σε δύο σημεία του σώματός σας να δημιουργηθεί διαφορά δυναμικού, η οποία θα προκαλέσει τη δίοδο ρεύματος από το σώμα σας. Δε θα κρεμαστείτε, λοιπόν, ποτέ με τα δύο σας χέρια από δύο καλώδια που βρίσκονται σε διαφορετικό δυναμικό, ούτε θα ακουμπήσετε σε κάποιο ρευματοφόρο αγωγό μια μεταλλική σκάλα που μεταφέρετε

Η σοβαρότητα του ατυχήματος, σε περίπτωση που περάσει ρεύμα από το σώμα σας, εξαρτάται από την αντίσταση του σώματός σας μεταξύ των σημείων εισόδου και εξόδου του ρεύματος, διότι η αντίσταση αυτή προσδιορίζει το ρεύμα που θα περάσει από το σώμα σας. Ισχύει:

$$I = \frac{V}{R_{\text{σώματος}}}$$

Η αντίσταση του σώματος ποικίλλει. Αν το δέρμα είναι ξηρό, η αντίσταση μπορεί να είναι 0,5 MΩ ή και περισσότερη. Αν η τάση είναι  $V=220$  Volt, το ρεύμα θα είναι:

$$I = \frac{V}{R_{\text{σώματ.}}} = \frac{120 \text{ V}}{0,5 \times 10^6 \Omega} = 240 \times 10^{-6} \text{ A} = 0,24 \text{ mA}$$

δηλαδή είναι απολύτως ακίνδυνο. Ας υποθέσουμε, όμως, ότι το σώμα είναι υγρό εξαιτίας του ιδρώτα. Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση του σώματος είναι  $R_{\text{σώμα}} = 5 \text{ k}\Omega$ . Στην περίπτωση αυτή η ένταση του ρεύματος είναι:

$$I = \frac{V}{R_{\text{σώματ.}}} = \frac{120 \text{ V}}{5 \times 10^3 \Omega} = 24 \times 10^{-3} \text{ A} = 24 \text{ mA}$$

Αυτό το ρεύμα μπορεί να είναι εξαιρετικά επικίνδυνο. Χώροι εξαιρετικά επικίνδυνοι για ατυχήματα ηλεκτροπληξίας είναι τα λουτρά λόγω των υδρατμών και της επαφής του σώματος με το νερό. Οι διακόπτες πρέπει να βρίσκονται έξω από το δωμάτιο του λουτρού. Δεν επιτρέπεται η χρήση θερμαντικών σωμάτων με γυμνά σύρματα θέρμανσης. Το λουτρό δεν είναι ο κατάλληλος χώρος, για να παρακολουθούμε τηλεόραση ή να ακούμε ραδιόφωνο. Δεν πρέπει να συνδέουμε συσκευές υψηλής κατανάλωσης (ηλεκτρικά πλυντήρια, ηλεκτρικές κουζίνες, θερμαντικά σώματα κ.ά.) σε δίκτυο που είναι προορισμένο για την εξυπηρέτηση συσκευών μικρής κατανάλωσης (σύστημα φωτισμού).

Χρειάζεται να είμαστε προσεκτικοί με τον ηλεκτρισμό, όταν χειριζόμαστε ηλεκτρικές συσκευές.

- Τα καλώδια που χρησιμοποιούμε πρέπει να είναι μονωμένα.
- Το μεταλλικό περίβλημα των συσκευών πρέπει να είναι γειωμένο.
- Να αποφεύγουμε να κάνουμε επαφή με καλώδιο που μπορεί να δημιουργήσει διαφορά δυναμικού με το σώμα μας.

Μην επιτρέψετε να γίνει το σώμα σας ο συνδετικός κρίκος ανάμεσα σε δύο σημεία τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικά δυναμικά.

Για να χρησιμοποιούμε με ασφάλεια τον ηλεκτρισμό, πρέπει να γνωρίζουμε βασικές αρχές και να διαθέτουμε κοινή λογική. Οφείλουμε, δηλαδή, να τον χρησιμοποιούμε με προσοχή και σεβασμό.

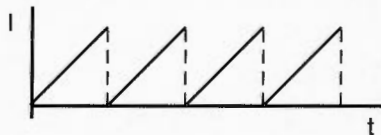


## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

**Όταν αναφερόμαστε σε σταθερές τιμές τάσης ή έντασης, εννοούμε τις ενεργές τιμές αυτών.**

1. Στην απέναντι εικόνα φαίνεται η εξάρτηση ενός ρεύματος από τον χρόνο. Το ρεύμα είναι:

- Α. Συνεχές σταθερό
- Β. Μεταβαλλόμενο
- Γ. Εναλασσόμενο ημιτονοειδές
- Δ. Συνεχές μεταβλητό.



2. Στα άκρα ενός αντιστάτη εφαρμόζουμε μία συνεχή σταθερή τάση  $V_0$  και μία εναλασσόμενη τάση με πλάτος  $V_0$ . Το ρεύμα το οποίο θα κυκλοφορήσει είναι:

- Α. Συνεχές σταθερό
- Β. Εναλασσόμενο
- Γ. Συνεχές μεταβλητό.

3. Στα άκρα ενός αντιστάτη εφαρμόζουμε εναλασσόμενη ημιτονοειδή τάση

με πλάτος  $U_0 = 8\sqrt{2}$  Volt. Η ενεργός τιμή του ρεύματος είναι  $I_{\text{ev}} = 4$  A. Η αντίσταση του αντιστάτη είναι:

- Α.  $2\sqrt{2} \Omega$
- Β.  $2 \Omega$
- Γ.  $4 \Omega$
- Δ.  $\frac{1}{2} \Omega$

4. Θέλουμε να αυξήσουμε το πλάτος μιας εναλλασσόμενης τάσης με την βοήθεια ενός μετασχηματιστή. Για να το επιτύχουμε αυτό πρέπει να εφαρμόσουμε την τάση:
- Α. Στο πηνίο με τις πολλές σπείρες
  - Β. Στο πηνίο με τις λίγες σπείρες
  - Γ. Σε οποιοδήποτε πηνίο
5. Στο πρωτεύον πηνίο ενός μετασχηματιστή εφαρμόζουμε συνεχή σταθερή τάση. Η τάση στο δευτερεύον θα είναι:
- Α. Συνεχής σταθερή
  - Β. Συνεχής μεταβλητή
  - Γ. Μεταβαλλόμενη
  - Δ. Μηδέν.
6. Αν στα άκρα ενός λαμπτήρα πυράκτωσης εφαρμόσουμε εναλλασσόμενη ημιτονοειδή τάση, ο λαμπτήρας θα διαρρέεται από εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα. Το ρεύμα αυτό, όπως γνωρίζετε, αυξομειώνεται παίρνοντας μάλιστα και αρνητικές τιμές, πράγμα που σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται περιοδικά και προς τις δύο δυνατές κατευθύνσεις. Γιατί αυτή η αυξομείωση του ρεύματος δε γίνεται αντιληπτή ως αυξομείωση της φωτεινότητας του λαμπτήρα;
7. Ένας μαθητής, κατά τη διάρκεια του μαθήματος της Φυσικής διατύπωσε τον εξής συλλογισμό:
- “Γνωρίζω ότι, όταν ένας αντιστάτης διαρρέεται από εναλλασσόμενο ημιτονικό ρεύμα, τα ηλεκτρόνια κινούνται περιοδικά γύρω από κάποια σταθερή θέση. Γνωρίζω, ακόμα, ότι η θερμότητα που εκλύεται στο περιβάλλον οφείλεται στις κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα ιόντα. Αν, λοιπόν, στη διάρκεια της κίνησης των ηλεκτρονίων προς τα δεξιά εκλύεται θερμότητα, στη διάρκεια της κίνησης προς τα αριστερά πρέπει να απορροφάται θερμότητα. Τελικά, ο αγωγός δε θα έπρεπε να θερμαίνεται”.
- Τι θα απαντούσατε σ’ αυτό τον μαθητή;
8. Να συμπληρώσετε τα κενά στο επόμενο κείμενο:
- “ Στο εναλλασσόμενο ημιτονοειδές ρεύμα, το οποίο διαρρέει ένα μεταλλικό αντιστάτη, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε .....ενέργεια του αντιστάτη, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η.....του. Λόγω διαφοράς .....με το περιβάλλον, η.....ενέργεια ρέει προς το περιβάλλον ως .....Για να αυξήσουμε το πλάτος μιας εναλλασσόμενης τάσης, πρέπει να την εφαρμόσουμε στο πηνίο με

τις.....σπείρες ενός μετασχηματιστή. Αν ο μετασχηματιστής είναι ....., η ισχύς με την οποία τροφοδοτείται ο μετασχηματιστής στο.....θα ισούται με την ισχύ η οποία αποδίδεται στην .....στο.....

9. Για ποιο λόγο η ηλεκτρική ενέργεια ενός εργοστασίου πρέπει να μεταφέρεται στην κατανάλωση με υψηλή τάση; Γιατί πρέπει να χρησιμοποιείται εναλλασσόμενο ρεύμα για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας; Ποιος είναι ο ρόλος των μετασχηματιστών για στις δύο αυτές απαιτήσεις.
10. Ένα εναλλασσόμενο ρεύμα έχει πλάτος ρεύματος  $I_0 = 10 \text{ A}$  και συχνότητα  $\nu = 60 \text{ Hz}$ . Τι σημαίνουν αυτά τα μεγέθη;
11. Στα άκρα αντιστάτη με αντίσταση  $R = 40 \Omega$  εφαρμόζουμε ημιτονοειδή τάση με ενεργό τιμή  $V_{\text{ev}} = 120 \text{ Volt}$ . Να υπολογίσετε:
  - α. Το πλάτος της τάσης
  - β. Το πλάτος του ρεύματος
  - γ. Την ενεργό τιμή του ρεύματος
12. Λάμπα πυράκτωσης φέρει τα στοιχεία (60W, 110Volt ).Να υπολογίσετε:
  - α. Την ενεργό τιμή του ρεύματος κανονικής λειτουργίας
  - β. Το πλάτος του ρεύματος κανονικής λειτουργίας
  - γ. Την αντίσταση του σύρματος της λάμπας.
13. Στα άκρα ενός αντιστάτη με αντίσταση  $R = 20 \Omega$  εφαρμόζεται εναλλασσόμενη τάση της μορφής :
 
$$U = 60 \sin 300t \quad (\text{SI})$$
 Να υπολογίσετε:
  - A. Το πλάτος και την ενεργό τιμή της τάσης
  - B. Την συχνότητα της τάσης
  - Γ. Το πλάτος και την ενεργό τιμή του ρεύματος στον αντιστάτη
  - Δ. Την ενέργεια που εκλύεται στον αντιστάτη σε χρονικό διάστημα 10 min
14. Δύο λαμπτήρες πυράκτωσης με στοιχεία (120W, 110V) και (90W, 110V) συνδέονται παράλληλα προς πηγή εναλλασσόμενης ημιτονοειδούς τάσης με ενεργό τιμή  $V_{\text{ev}} = 110 \text{ V}$ . Να υπολογίσετε:
  - α. Τις αντιστάσεις των λαμπτήρων
  - β. Τις ενεργές τιμές των ρευμάτων που τις διαρρέουν



15. Τη χρονική στιγμή  $t = 0,004 \text{ s}$ , το ρεύμα σε ένα κύκλωμα το οποίο περιέχει αντιστάσεις έχει, για πρώτη φορά, τιμή ίση με τα 50% της μέγιστης τιμής του και αυξάνεται. Υποθέτοντας ότι για  $t = 0$  είναι και  $I = 0$ , να υπολογίσετε την συχνότητα του ρεύματος.
16. Το ένα πηνίο ενός μετασχηματιστή έχει  $N_1 = 100$  σπείρες και το άλλο  $N_2 = 1500$  σπείρες. Στο πηνίο με τις λίγες σπείρες εφαρμόζουμε εναλασσόμενη τάση με πλάτος  $V_1 = 600 \text{ Volt}$ . Να υπολογίσετε την ενεργό τιμή της τάσης στο άλλο πηνίο.
17. Μερικές μικροσυσκευές λειτουργούν κανονικά με εναλασσόμενη τάση πλάτους  $V_0 = 12 \text{ Volt}$ . Για την τροφοδοσία τους χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές μικρής ισχύος. Ένας τέτοιος μετασχηματιστής θα χρησιμοποιηθεί για την λειτουργία ενός ηλεκτρικού κουδουνιού που λειτουργεί με αυτή την τάση. Η τάση εισόδου στον μετασχηματιστή είναι  $220 \text{ Volt}$  και εφαρμόζεται στο πηνίο που έχει 550 σπείρες. Ποίος πρέπει να είναι ο αριθμός των σπειρών του άλλου πηνίου;
18. Ας υποθέσουμε ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι, κατά μέσον όρο,  $30 \text{ δραχ/kWh}$ . Μια γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδει στην κατανάλωση ισχύ  $1 \text{ MW}$ . Η αντίσταση της γραμμής είναι  $10 \Omega$ . Να υπολογίσετε το κόστος των απωλειών ενέργειας στη γραμμή μεταφοράς για λειτουργία ενός χρόνου, εάν η τάση στην είσοδο της γραμμής είναι:
- A.  $500\,000 \text{ Volt}$       B.  $440 \text{ Volt}$
19. Το πρωτεύον πηνίο ενός ιδανικού μετασχηματιστή έχει  $N_1 = 1200$  σπείρες και τροφοδοτείται με τάση  $V_1 = 220 \text{ Volt}$ . Το δευτερεύον έχει  $N_2 = 40$  σπείρες και συνδέεται στα άκρα αντιστάτη. Η μέση ισχύς την οποία καταναλώνει ο αντιστάτης είναι  $P_2 = 88 \text{ W}$ . Να υπολογίσετε το ρεύμα στο πρωτεύον πηνίο.
20. Ένας μετασχηματιστής χρησιμοποιείται ως υποβιβαστής τάσης και έχει λόγο μετασχηματισμού  $N_2/N_1 = 1/5$ .
- A. Συνδέουμε το πρωτεύον πηνίο με πηγή AC τάσης  $220 \text{ Volt}$ . Να υπολογίσετε την τάση στο δευτερεύον.
- B. Να υποθέσετε ότι ο μετασχηματιστής είναι ιδανικός. Πόσο πρέπει να είναι το ρεύμα το οποίο διαρρέει το πρωτεύον, ώστε ένας αντιστάτης  $40 \Omega$ , τοποθετημένος στο δευτερεύον να απορροφά όλη την ισχύ του κυκλώματος;

- Γ. Πόση θα έπρεπε να είναι η αντίσταση ενός αντιστάτη, ο οποίος θα απορροφούσε την ίδια ισχύ αν συνδεότανε κατευθείαν στην πηγή AC;
21. Εργοστάσιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει στην έξοδό του τάση  $V_{εξ} = 500 \text{ Volt}$ . Η ισχύς εξόδου του εργοστασίου είναι  $P_{εξ} = 100 \text{ MW}$ . Η τάση εξόδου εφαρμόζεται στο πρωτεύον μετασχηματιστή, ο οποίος λειτουργεί ως ανυψωτής τάσης και έχει λόγο σειρών  $N_1/N_2 = 400$ . Το δευτερεύον του μετασχηματιστή συνδέεται προς γραμμή μεταφοράς, η οποία τροφοδοτεί κατανάλωση σε απόσταση  $100 \text{ km}$ . Η αντίσταση ανά μονάδα μήκους του καλωδίου μεταφοράς είναι  $R^* = 10^{-3} \Omega/\text{m}$ . Να υπολογίσετε:
- α. Την αντίσταση της γραμμής μεταφοράς και το ρεύμα στη γραμμή μεταφοράς
  - β. Την απώλεια ισχύος στη γραμμή μεταφοράς και την ισχύ στην κατανάλωση
  - γ. Την τάση στην κατανάλωση και την πτώση τάσης στη γραμμή μεταφοράς

## μέρος 2

### ΚΥΜΑΤΑ





## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

*Αφού και ο Ήλιος και τα κύματα  
είναι μια γραμμή στέλλαβιζή που την  
αποζημιτογραφούμε μονάχα στους καιρούς  
της λύπης και της εξορίας...*

*Οδ. Ελύτης (Το φωτόδεντρο και η δεκάτη τετάρτη ομορφιά)*

Έχετε αναλογιστεί ποτέ όταν ακούτε ραδιόφωνο ή όταν συμμετέχετε σε ζωντανή συναυλία, πώς φθάνουν σε σας οι φωνές του αγαπημένου σας συγκροτήματος; Ή ακόμα, όταν παρακολουθείτε μία ταινία στην τηλεόραση ή στον κινηματογράφο, πώς φθάνει σε σας η εικόνα του αγαπημένου σας ηθοποιού; Είναι εντυπωσιακή η μεγάλη ποικιλία φαινομένων στο γύρω κόσμο μας, ορατό και αόρατο, τα οποία οφείλονται σε κάποιας μορφής κύματα. Οι περισσότερες πληροφορίες που φθάνουν σε μας έχουν τη μορφή ηχητικών ή κάποιου είδους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως είναι τα οπτικά κύματα. Το φως του ήλιου, τα σήματα των τηλεοπτικών και ραδιοφωνικών σταθμών, οι ομιλίες των συνανθρώπων μας διαδίδονται με τη μορφή κυμάτων. Έτσι, όταν βλέπουμε μια αφίσα, κύματα φωτός - ηλεκτρομαγνητικής φύσης - προερχόμενα από την αφίσα φτάνουν στα μάτια μας. Όταν ακούμε τον ήχο της κιθάρας, ηχητικά κύματα που παράγονται από τις χορδές της φθάνουν – μέσω του αέρα - στα αυτιά μας. Όταν αισθανόμαστε ένα σεισμό, ελαστικά κύματα που προέρχονται από την εστία του σεισμού, φθάνουν – μέσω του εδάφους – στα πόδια μας. **Όλα όσα βλέπουμε και ακούμε και πολλά από εκείνα που αισθανόμαστε γίνονται αντιληπτά από κύματα διάφορων μορφών που φθάνουν σε μας.**

Η κυματική κίνηση συνδέεται άμεσα με την ταλάντωση κάποιου σώματος ή κάποιου φυσικού μεγέθους. Έτσι, οποτεδήποτε δημιουργηθεί μια τοπική διαταραχή σε κάποιο ελαστικό μέσο, θα ακολουθήσει και μια ταλάντωση των μορίων του μέσου. Ένα πλήθος τέτοιων ταλαντώσεων συμβαίνουν καθημερινά γύρω μας, όπως στο νερό της επιφάνειας της θάλασσας, στις χορδές της κιθάρας, στην κούνια που κάνει ένα μικρό παιδί, σε σώμα που κρέμεται από ελατήριο, στη μεμβράνη των ντραμς, στις φωνητικές χορδές, σε ένα στερεό. Η ταλάντωση όμως των μερών (σωματιδίων ή υλικών σημείων) κάποιου σώματος δεν αρκεί για να δημιουργήσει ένα κύμα. **Κύμα παράγεται, εάν τα μέρη που ταλαντώνονται αλληλεπιδρούν με άλλα γειτονικά τους μέρη.** Σ' αυτή την περίπτωση, ενέργεια μεταφέρεται από τα πρώτα στα δεύτερα, με αποτέλεσμα να αρχίσουν να ταλαντώνονται και αυτά με παρόμοιο τρόπο. Το αποτέλεσμα της μετάδοσης της ταλάντωσης στα μέρη ενός μέσου είναι η δημιουργία κάποιας μορφής κύματος.

Έτσι, η αρχική διαταραχή που δημιουργείται με κάποιο τρόπο στα μόρια μιας περιοχής του μέσου εξαπλώνεται, καθώς περνά ο **χρόνος**, με

πεπερασμένη ταχύτητα σε όλα τα μέρη του μέσου (στο χώρο).

### **Αλλά τι είναι κύμα;**

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, μπορούμε να πούμε ότι **κύμα λέγεται η διάδοση μιας διαταραχής στο χώρο και η εξέλιξή της στο χρόνο.**

Τα κύματα συμμετέχουν στα περισσότερα φυσικά φαινόμενα. Επειδή η Φυσική έχει ως στόχο να μελετήσει και να κατανοήσει το γύρω κόσμο, επισημόνες από διάφορους κλάδους της ασχολούνται με τη μελέτη των κυμάτων. Έτσι:

- οι σεισμολόγοι ασχολούνται με τη μελέτη των σεισμικών κυμάτων και τον τρόπο διάδοσής τους στο στερεό φλοιό της Γης,
- οι ηλεκτρονικοί ασχολούνται με τη μελέτη της φύσης, της εκπομπής, της διάδοσης και της λήψης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στις ραδιοτηλεπικοινωνίες και στην τηλεόραση,
- οι αστροφυσικοί ασχολούνται με τη μελέτη των ακτινοβολιών (ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) που έρχονται από τους μακρινούς Γαλαξίες.

Τα διάφορα κύματα, όπως τα ηχητικά, τα ηλεκτρομαγνητικά, τα κύματα που διαδίδονται σε χορδές ή σε ελατήρια, τα κύματα της θάλασσας κτλ., αποτελούν διαφορετικά είδη κυμάτων. Οι διαφορές τους οφείλονται στο είδος της αλληλεπίδρασης είτε μεταξύ των μορίων, που αποτελούν το μέσο είτε μεταξύ των πεδίων, που διαδίδονται σε ένα χώρο. Το τελευταίο ισχύει για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, όπως θα δούμε παρακάτω. Όλα όμως τα διαφορετικά είδη κυμάτων έχουν κάποιες κοινές χαρακτηριστικές ιδιότητες. Θα ξεκινήσουμε τη μελέτη των κυμάτων από την περιγραφή και την κατανόηση των κοινών αυτών ιδιοτήτων.

Τα κύματα διακρίνονται σε **μηχανικά** και **ηλεκτρομαγνητικά**. Τα **μηχανικά κύματα χρειάζονται για τη διάδοσή τους κάποιο μέσο**, όπως τα κύματα που διαδίδονται στα ελατήρια (μέσο διάδοσης το ελατήριο), τα ηχητικά κύματα (μέσο διάδοσης ο αέρας), τα κύματα του νερού (μέσο διάδοσης το νερό). Αντίθετα, τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα μπορούν να διαδοθούν και στο “κενό”** (όλα τα κύματα της ορατής και αόρατης περιοχής του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος).

## κεφάλαιο 4



### ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

- Εγκάρσια και διαμήκη κύματα
- Ταχύτητα διάδοσης - Συχνότητα - Περίοδος - Μήκος κύματος - Θεμελιώδης εξίσωση κυμάτων
- Ανάκλαση - Διάθλαση - Συμβολή κυμάτων

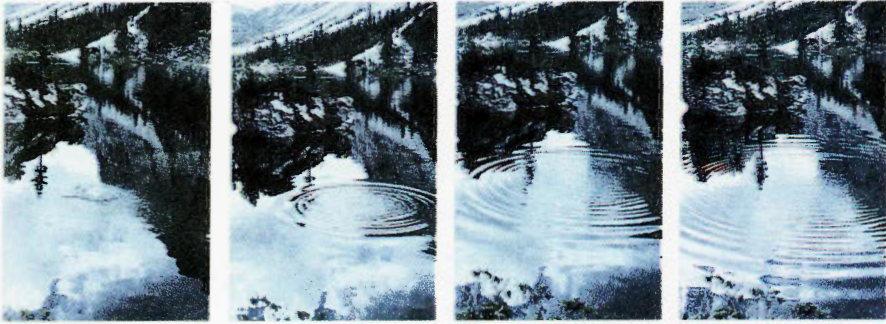




## 4.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ - ΔΙΑΔΟΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

*Κύμα στο φως  
Ξαναγεννάει τα μάτια  
Όπου η Ζωή αρμενίζει προς  
Τ' αγνάντεμα  
Ζωή  
Οδ. Ελύτης (Προσανατολισμοί)*

Όπως ήδη αναφέραμε, **μηχανικό κύμα** είναι η διάδοση μιας διαταραχής σε ένα μέσο (αέριο, υγρό, σχοινί, ελατήριο, κτλ.). Στην εικόνα (4.1) φαίνονται τα κύματα στην επιφάνεια του νερού.



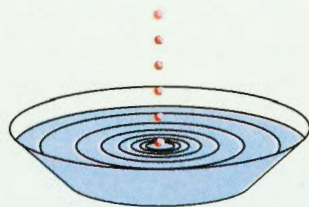
**Εικόνα 4.1**  
Κύματα στην επιφάνεια του νερού

### Ποια είναι η αιτία για τη δημιουργία ενός κύματος;

Για να δημιουργηθεί κύμα, είναι απαραίτητο να προηγηθεί μια **αρχική διαταραχή** σε κάποια περιοχή του μέσου. Σ' αυτή την περίπτωση, θα υπάρξει διαταραχή ενός μικρού αριθμού **σωματίων** ή υλικών σημείων (**μικρά μέρη του υλικού που περιέχουν σχετικά μικρό αριθμό μορίων**).

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Στο κέντρο μιας λεκάνης με νερό που ηρεμεί αφήνουμε να πέσει από μικρό ύψος (περίπου 30 εκατοστά) ένα πολύ ελαφρύ σώμα (π.χ. μία φακή ή μία σταγόνα νερό). Θα παρατηρήσουμε ότι στην επιφάνεια του νερού θα δημιουργηθεί ένας κυκλικός κυματι-



κός παλμός που διαδίδεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Εάν, επιπλέον, ρυθμίσουμε με τέτοιο τρόπο μία βρύση, ώστε να ρίχνει με σταθερό ρυθμό μικρές σταγόνες νερού στο κέντρο της λεκάνης, θα παρατηρήσουμε ότι δημιουργούνται κύματα στην επιφάνεια του νερού της λεκάνης. Σ' αυτή την περίπτωση, τα σωμάτια (υλικά σημεία) του νερού της λεκάνης εκτελούν αμείωτη ταλάντωση.

Όταν ρίχνουμε όμως τη φακή στο νερό, δίνουμε στο νερό (μέσο) **ενέργεια**. Έτσι, η **αρχική διαταραχή είναι αναγκαία, για να δώσει στο υλικό μέσο** (π.χ. στο νερό) **ενέργεια, ώστε να αρχίσουν να ταλαντώνονται τα πρώτα σωμάτια του μέσου** (τα σωμάτια του νερού), **που ήλθαν σε επαφή με την πηγή της διαταραχής** (π.χ. το ελαφρύ σώμα που ρίξαμε στο νερό).

Ένα ερώτημα το οποίο πολύ συχνά δημιουργεί σύγχυση είναι **άν με το κύμα μεταφέρεται μάζα ή ενέργεια**.

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό, ας κάνουμε την ακόλουθη δραστηριότητα:

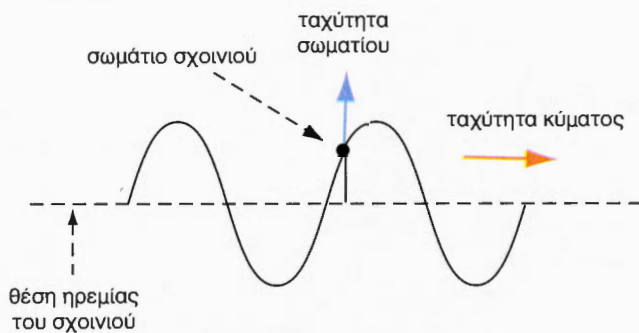
### **ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2**

Επαναλαμβάνουμε το προηγούμενο πείραμα, αφού όμως πρώτα τοποθετήσουμε κομματάκια φελλού σε διάφορα σημεία της ήρεμης επιφάνειας του νερού, τα οποία θα χρησιμοποιήσουμε ως δείκτες. Όταν ηρεμήσει η επιφάνεια του νερού, αφήνουμε να πέσει πάλι ένα ελαφρύ σώμα π.χ. μία φακή ή σταγόνες νερού (με σταθερό ρυθμό), περίπου στο μέσο της λεκάνης. Τότε θα παρατηρήσουμε ότι τα κομματάκια του φελλού αρχίζουν να ταλαντώνονται γύρω από την αρχική τους θέση, χωρίς όμως να απομακρύνονται από τη θέση αυτή. Όταν ηρεμήσει η επιφάνεια του νερού, θα διαπιστώσουμε ότι όλα τα κομματάκια φελλού βρίσκονται σχεδόν στις αρχικές τους θέσεις.

Από την παραπάνω δραστηριότητα προκύπτει ότι με το κύμα δε μεταφέρεται μάζα νερού προς τα τοιχώματα της λεκάνης, διότι σ' αυτή την περίπτωση, τα κομματάκια του φελλού θα είχαν κινηθεί προς τα τοιχώματα και επιπλέον θα είχε δημιουργηθεί ένα βαθούλωμα στο σημείο που έπεσε η φακή, ενώ παράλληλα θα είχε ανυψωθεί η επιφάνεια του νερού στα τοιχώματα της λεκάνης. Το ίδιο θα συνέβαινε και σε οποιοδήποτε άλλο μέσο, όπως είναι η επιφάνεια των ντραμς, ένα σχοινί, ένα ελατήριο, ο αέρας.

Εάν σε κάποιο σημείο οποιουδήποτε μέσου δημιουργηθεί διαταραχή (π.χ. ταλάντωση), θα αρχίσει να μεταδίδεται στο μέσο, διότι όλα τα σωμάτιά του θα αρχίσουν να ταλαντώνονται γύρω από τη θέση ισορροπίας τους, χωρίς τελικά να μετακινούνται από τη θέση αυτή. Όμως, τα σωμάτια αυτά, για να μπορέσουν να ταλαντωθούν, χρειάζονται ενέργεια. Τα σωμάτια παίρνουν διαδοχικά αυτή την ενέργεια από την ενέργεια που εμείς δώσαμε αρχικά στο υλικό μέσο, ρίχνοντας σ' αυτό ένα σώμα (τη φακλή ή τις σταγόνες νερού). Αυτό συμβαίνει, διότι τα σωμάτια του μέσου μπορούν να αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους και έτσι να τους μεταφέρουν μέρος της ενέργειάς τους. Εάν δεν υπήρχε αυτός ο μηχανισμός, η διαταραχή θα περιοριζόταν στα αρχικά σωμάτια και δε θα είχαμε δημιουργία κύματος. Έτσι, αυτό που βλέπουμε ως κύμα είναι η μετάδοση της ταλάντωσης από το ένα σωμάτιο του μέσου στο άλλο, με μια χρονική καθυστέρηση. Συνεπώς, με τα κύματα μεταφέρεται ενέργεια από το ένα σωμάτιο του μέσου στο άλλο, χωρίς να μεταφέρεται μάζα.

**Προσοχή!** Για να κατανοήσουμε την έννοια του κύματος είναι χρήσιμο να προσέξουμε το εξής σημείο: Από τα παραπάνω παραδείγματα φαίνεται ότι σε ένα κύμα διακρίνουμε δύο ειδών κινήσεις: α) την ταλάντωση των σωμάτων του μέσου γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και β) τη διάδοση της διαταραχής στο μέσο (εικόνα 4.2).



**Εικόνα 4.2.**

Ένα κύμα κινείται σ' ένα τεντωμένο σχοινί προς τα δεξιά με ταχύτητα  $v_{\text{κύματος}}$ . Ένα σώματιο του σχοινιού ταλαντώνεται πάνω-κάτω από τη θέση ισορροπίας, με ταχύτητα  $v_{\text{σωματίου}}$ .

Αυτό ήταν ένα σημείο που απασχόλησε διάσημους φιλοσόφους και επιστήμονες, όπως ο Leonardo da Vinci και ο Einstein. Και οι δύο αναφέρουν το εξής παράδειγμα για την κατανόηση των δύο κινήσεων τις οποίες διακρίνουμε στο κύμα: Εάν κάποιος κοιτάξει προσεκτικά έναν αγρό με στάχια, όταν φυσάει αέρας, θα παρατηρήσει ότι δημιουργούνται κύματα στην επιφάνεια του αγρού, τα οποία διαδίδονται προς την κατεύθυνση του αέρα. Τα στά-



χου όμως απλώς ταλαντώνονται γύρω από τη θέση ισορροπίας τους, χωρίς βέβαια να ξεριζώνονται, καθώς τα κύματα διαδίδονται από τη μία άκρη του αγρού στην άλλη.

### Τελικά, τι χρειάζεται για να παραχθεί ένα μηχανικό κύμα;

Σύμφωνα με τα παραπάνω, για να παραχθούν τα μηχανικά κύματα είναι απαραίτητα:

- **η πηγή της διαταραχής** (αίτιο που παρέχει ενέργεια στο μέσο)
- **το μέσο** (αέριο, υγρό, στερεό), στο οποίο μπορεί να διαδοθεί η διαταραχή (ενέργεια)
- **ένας μηχανισμός** με τον οποίο, κάθε σωματίο του μέσου αλληλεπιδρά με τα διπλανά του σωματίδια και τους μεταδίδει ενέργεια (πράγμα που εκδηλώνεται ως ταλάντωση των διπλανών σωματίων).

## 4.2 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΑ

Τα μηχανικά κύματα, διακρίνονται σε δύο τύπους: **τα εγκάρσια και τα διαμήκη**. Οι δύο τύποι κυμάτων διαφέρουν κυρίως στη μορφή. Έχουν όμως τις ίδιες φυσικές ιδιότητες και περιγράφονται από τις ίδιες μαθηματικές εξισώσεις.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

Ένας τρόπος για να παρατηρήσουμε εγκάρσια κύματα είναι ο εξής: Παίρνουμε ένα μεγάλο σχοινί και δένουμε (στερεώνουμε) τη μία άκρη του σε ένα σταθερό σημείο. Τεντώνουμε ελα-

φφρά το σχοινί και κινούμε απότομα μια φορά πάνω – κάτω ή δεξιά – αριστερά την άλλη άκρη του. Τότε, δημιουργείται ένας κυματικός παλμός (διαταραχή) που προχωρεί προς την άλλη άκρη (την ακίνητη) του σχοινιού. Εάν παρατηρήσουμε προσεκτικά, θα δούμε ότι το κάθε σημείο του σχοινιού στο οποίο φθάνει η διαταραχή κινείται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής (εικόνα 4.3.α,β).



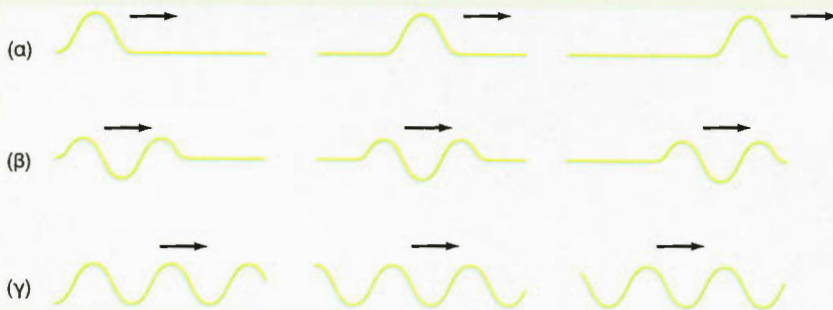
**Εικόνα 4.3**

Στιγμιότυπο κυματικών παλμών που διαδίδονται (α) οριζόντια και (β) κατακόρυφα





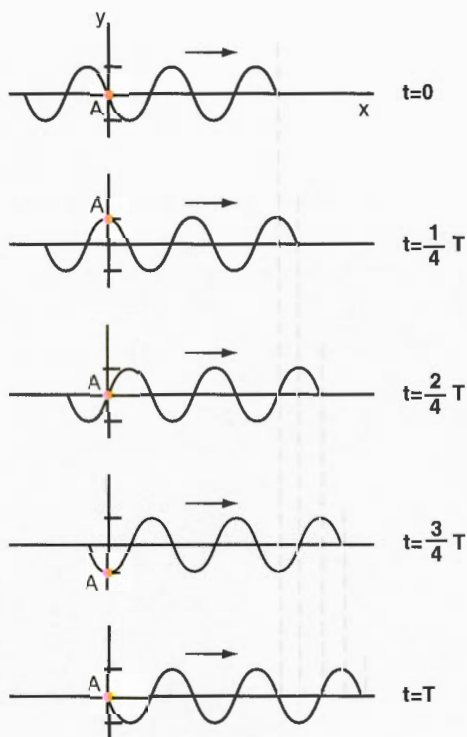
Κατόπιν, επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία κινώντας ρυθμικά, πολλές φορές, πάνω-κάτω την ελεύθερη άκρη του σχοινιού. Εάν φωτογραφίσουμε το κύμα σε μια χρονική στιγμή, θα απεικονίσουμε τη μορφή που έχει το μέσο εκείνη τη χρονική στιγμή. Αυτό ονομάζεται στιγμιότυπο κύματος. Τα κύματα που σχηματίζονται είναι **εγκάρσια**, και έχουν τη μορφή διαδοχικών “**κορυφών**” (σημείων που βρίσκονται ψηλότερα από τα άλλα σε σχέση με τη θέση ισορροπίας) και “**κοιλιών**” (σημείων που βρίσκονται χαμηλότερα από τα άλλα σε σχέση με τη θέση ισορροπίας). Το κάθε σωματίο του σχοινιού ταλαντώνεται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (εικ. 4.4 α,β,γ)



**Εικόνα 4.4**

Στιγμιότυπα κύματος τα οποία δείχνουν τα εγκάρσια κύματα που μεταδίδονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, κατά μήκος ενός τεντωμένου σχοινιού: α) κυματικός παλμός, β) κυματοσυσμός, και γ) συνεχόμενο κύμα.

Αυτό φαίνεται στην εικόνα (4.5), όπου έχουμε επιλέξει ένα σημείο του σχοινιού, το σημείο Α, και σε αργή κίνηση δείχνουμε την ταλάντωσή του (Το σημείο Α είναι το σημείο που βρίσκεται συνεχώς πάνω στον άξονα των  $y$ ). Η κάθετη κίνηση των σωματίων του σχοινιού, σε σχέση με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, λέγεται εγκάρσια. Επομένως, **εγκάρσιο είναι το κύμα στο οποίο όλα τα σωματίνα (υλικά σημεία) του μέσου στο οποίο διαδίδεται, κινούνται (ταλαντώνονται) κάθετα προς τη διεύθυνση της διάδοσης του κύματος.**

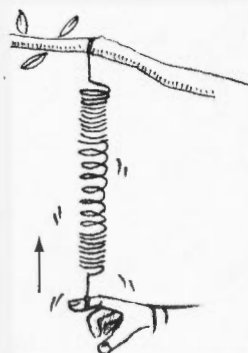
**Εικόνα 4.5**

Στιγμιότυπα εγκάρσιου κύματος, ανά τέταρτο της περιόδου (δες §4.3.2). Να θεωρήσετε ότι το σημείο A είναι το σωματίδιο που βρίσκεται συνεχώς πάνω στον άξονα των y.

Εγκάρσια, για παράδειγμα, κύματα είναι τα κύματα τα οποία μεταδίδονται στις τεντωμένες χορδές των μουσικών οργάνων.

#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

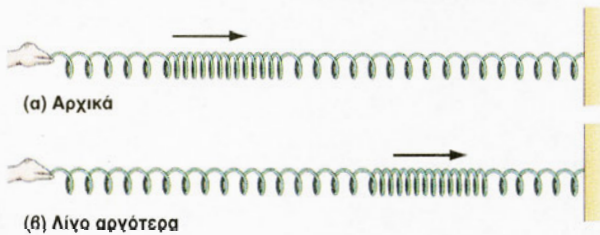
Τα διαμήκη κύματα μπορούμε να τα παρατηρήσουμε ως εξής: Παίρνουμε ένα μακρύ ελατήριο και δένουμε (στερεώνουμε) τη μία άκρη του σε ένα σταθερό σημείο, έτσι ώστε να κρέμεται κατακόρυφα. Διαπιστώνουμε ότι, εάν το χτυπήσουμε απότομα προς τα πάνω στην ελεύθερη άκρη του, δημιουργείται ένας παλμός που κινείται προς την άλλη άκρη του ελατηρίου. Ο παλμός αυτός έχει τη μορφή ενός “πυκνώματος” σπειρών. Με το κτύπημα δημιουργείται ένα πυκνωμα σπειρών, το οποίο διαδίδεται με κάποια ταχύτη-



τα κατά μήκος του ελατηρίου. Αυτό συμβαίνει, διότι το κάθε σημείο του ελατηρίου στο οποίο φθάνει η διαταραχή κινείται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης της διαταραχής.

Κατόπιν, στερεώνουμε στο ελεύθερο άκρο του ελατηρίου ένα μικρό σώμα και, αφού ηρεμήσει, τραβάμε το σώμα ελαφρά κατακόρυφα προς τα κάτω και το αφήνουμε ελεύθερο. Τότε, το ελεύθερο άκρο του ελατηρίου θα αρχίσει να ταλαντώνεται και θα δούμε να σχηματίζονται **διαμήκη κύματα** στο ελατήριο. Τα κύματα στην περίπτωση αυτή έχουν τη μορφή διαδοχικών “πυκνωμάτων” (εκεί όπου συμπιέζεται το ελατήριο) και “αραιωμάτων” (εκεί όπου εκτείνεται το ελατήριο). Αυτό συμβαίνει, διότι η κάθε σπείρα του ελατηρίου, ταλαντώνεται παράλληλα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

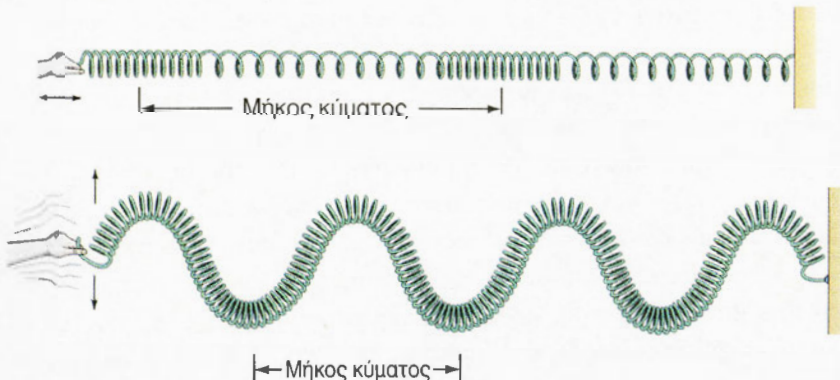
Επομένως, **διαμήκη κύματα είναι τα κύματα στα οποία όλα τα σημεία του μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα, κινούνται (ταλαντώνονται) παράλληλα προς τη διεύθυνση της διάδοσης του κύματος** (εικ. 4.6α, β).



**Εικόνα 4.6**

Δύο στιγμιότυπα κυματικού παλμού που διαδίδεται σε ένα ελατήριο.

Πολλές φορές στο ίδιο μέσο μπορούν να διαδοθούν και εγκάρσια και διαμήκη κύματα. (εικ. 4.7α, β).



**Εικόνα 4.7**

- α) Διακρίνονται τα διαδοχικά πυκνώματα και αραιώματα στο διαμήκες κύμα
- β) Διακρίνονται τα όρη και οι κοιλιάδες στο εγκάρσιο κύμα

**Στα αέρια και στο εσωτερικό των υγρών διαδίδονται μόνον τα διαμήκη κύματα. Στα στερεά διαδίδονται τόσο τα εγκάρσια όσο και τα διαμήκη κύματα.**

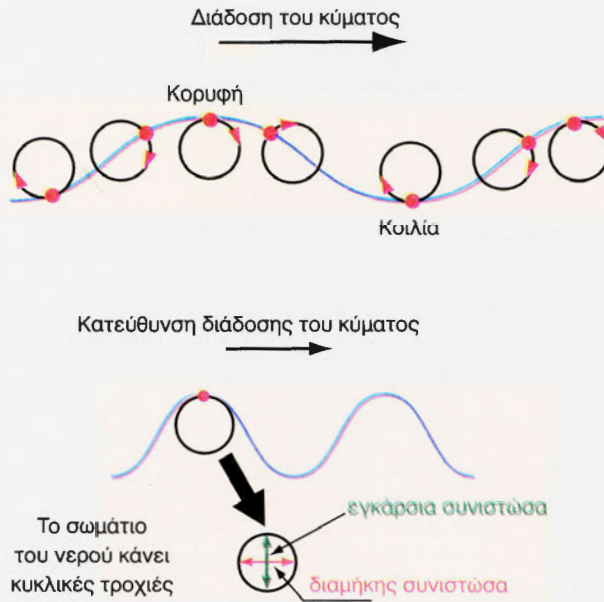
Η διαφορά αυτή οφείλεται στις διαφορετικές δυνάμεις συνοχής μεταξύ στερεών, υγρών και αερίων.

Πολλές φορές ένα κύμα που διαδίδεται σε κάποιο μέσο μπορεί να αποτελέσει την πηγή για τη δημιουργία ενός άλλου κύματος που διαδίδεται σε διαφορετικό μέσο. Παραδείγματος χάριν, όταν κάποιος παίζει κιθάρα, δημιουργεί εγκάρσια κύματα στις χορδές της. Αυτά με τη σειρά τους προκαλούν διαμήκη κύματα στον αέρα, τα οποία υλοποιούνται ως διαδοχικές μεταβολές της πίεσης (πυκνώματα και αραιώματα του αέρα). Όταν φθάσουν στο τύμπανο του αυτιού του ανθρώπου, η μεμβράνη του τύμπανου πάλλεται και δημιουργεί εγκάρσια κύματα, τα οποία, στη συνέχεια, μετατρέπονται σε διαμήκη κύματα στο υγρό που υπάρχει στο εσωτερικό του αυτιού.

### **Τα κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας**

Τα κύματα στην επιφάνεια της θάλασσας δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ούτε εγκάρσια ούτε διαμήκη. Αυτό συμβαίνει, διότι η κίνηση των σωματίων του νερού περιλαμβάνει τόσο εγκάρσιες όσο και διαμήκεις συνιστώσες. Πράγματι, η κίνηση των σωματίων του νερού στην επιφάνεια της θάλασσας δεν είναι ούτε κάθετη ούτε παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Για την ακρίβεια, τα σωματίδια του νερού στην επιφάνεια της θάλασσας κάνουν σχεδόν κυκλικές τροχιές, όπως δείχνει η εικόνα (2.7). Όπως παρατηρούμε, η επιφάνεια του νερού, στην περίπτωση διάδοσης του κύματος, αποτελείται από διαδοχικές “κορυφές” και “κοιλίες”. Τα σωματίδια του νερού που βρίσκονται στις “κορυφές” κινούνται προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ τα σωματίδια του νερού που βρίσκονται στις “κοιλίες” κινούνται αντίθετα. Έτσι, τελικά, δε γίνεται μετατόπιση των σωματίων του νερού κατά τη διάδοση του κύματος.



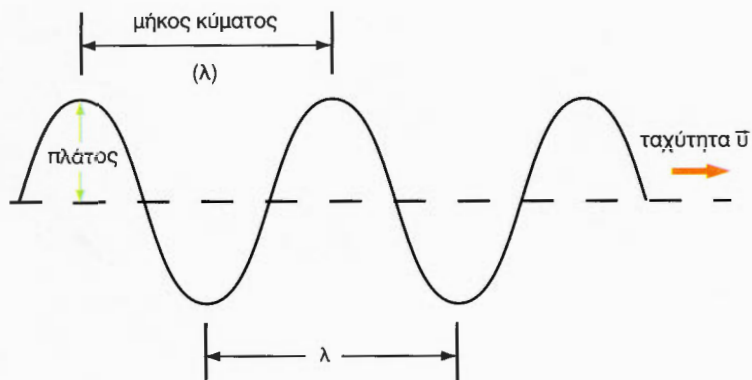
**Εικόνα 4.8**

Τα κύματα στην επιφάνεια του νερού δεν είναι ούτε εγκάρσια, ούτε διαμήκη. Τα σωματίδια στην επιφάνεια του νερού κινούνται σχεδόν κυκλικά και μετατοπίζονται τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα από τη θέση ισορροπίας τους.

### 4.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ – ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ – ΠΕΡΙΟΔΟΣ – ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ – ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗ ΚΥΜΑΤΩΝ

*Όπου και αν βάλω πλώρη εδώ αράζω,  
το σκοτάδι με χρωσάει στο φως.  
Οδ. Ελύτης (Προσανατολισμοί)*

Εάν θεωρήσουμε ότι η κίνηση της πηγής που παράγει το κύμα είναι περιοδική, δηλαδή επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα, τότε το κύμα που παράγεται θα λέγεται **περιοδικό κύμα ή απλώς κύμα**. Όλα τα είδη των περιοδικών κυμάτων έχουν κάποια κοινά χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση κατά την οποία η κίνηση της πηγής είναι απλή αρμονική ταλάντωση, τότε η μαθηματική απεικόνιση του κύματος, έχει τη μορφή ημιτονοειδούς καμπύλης (είναι όμοια με τη μορφή που έχει ένα εγκάρσιο κύμα σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή) και συνοδεύεται από τις αντίστοιχες σχέσεις (βλέπε ένθετο).

**Εικόνα 4.9**

Τα χαρακτηριστικά του στιγμιότυπου ενός κύματος

Στην καμπύλη αυτή (εικ. 4.9) ορίζουμε κάποια χαρακτηριστικά σημεία του κύματος: Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ονομάζεται **“όρος”** ή **“κορυφή”** το σημείο της καμπύλης του κύματος που βρίσκεται ψηλότερα από τα άλλα σημεία σε σχέση με τη θέση ισορροπίας (εικ. 4.9), ενώ **“κοιλία”** το σημείο που βρίσκεται χαμηλότερα από τα άλλα σημεία.<sup>1</sup> Ο όρος **“πλάτος”** αναφέρεται στην απόσταση του “όρους” ή της “κοιλίας” του κύματος, από τη θέση ισορροπίας. Δηλαδή, **το πλάτος ισούται με τη μέγιστη απομάκρυνση των σωματίων του μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα, από τη θέση ισορροπίας τους**. Έτσι, η κατακόρυφη απόσταση από την κορυφή έως την κοιλία ενός κύματος είναι το διπλάσιο του πλάτους (εφόσον το κύμα διαδίδεται σε οριζόντιο επίπεδο).

Τρία φυσικά μεγέθη είναι απαραίτητα για την περιγραφή και τη μελέτη των κυμάτων: η συχνότητα, το μήκος κύματος και η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Φανταστείτε ότι είναι καλοκαίρι, βρισκόσαστε πάνω σε μια βάρκα στο Αιγαίο Πέλαγος και ψαρεύετε. Η θάλασσα είναι ήρεμη και η βάρκα ακίνητη. Ξαφνικά, αρχίζει να φυσάει ένα ελαφρύ μελτέμι, και δημιουργούνται κύματα, που κάνουν τη βάρκα να λικνίζεται. Αισθανόμαστε το κάθε κύμα που έρχεται. Στην αρχή ανυψώνει τη βάρκα ψηλά (κορυφή κύματος) και κατόπιν τη ρίχνει χαμηλά (κοιλία κύματος). Όταν η βάρκα επανέρχεται στην αρχική της θέση, ένα νέο κύμα την αναγκάζει να ξανακάνει την ίδια κίνηση.<sup>2</sup> Η κίνηση της βάρκας, από τη θέση ηρεμίας της επιφάνειας της θάλασσας, προς

<sup>1</sup> Οι όροι “όρος” ή “κορυφή” και “κοιλία” είναι καθιερωμένοι και χρησιμοποιούνται ακόμη και αν δεν είναι οριζόντιο το κύμα

<sup>2</sup> Στην πραγματικότητα το παράδειγμα είναι πιο σύνθετο και υπάρχει μικρή μετατόπιση της βάρκας λόγω της επίδρασης του αέρα.

τα πάνω (ψηλότερα από τη θέση ισορροπίας), κατόπιν προς τα κάτω (χαμηλότερα από τη θέση ηρεμίας), έως την επαναφορά της στη θέση ισορροπίας, ονομάζεται **κύκλος ταλάντωσης** (εικ.4.10). Όσο “μεγαλύτερα” είναι τα κύματα, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος τους και τόσο περισσότερο κουνιέται η βάρκα, άρα τόσο μεγαλύτερος και ο κύκλος ταλάντωσης.

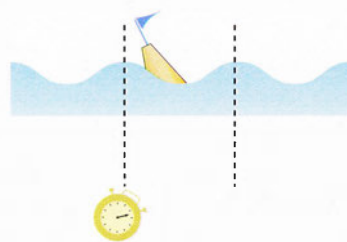


**Εικόνα 4.10**

Ο κύκλος ταλάντωσης της βάρκας. Παρατηρήστε ότι η βάρκα ταλαντώνεται πάνω-κάτω από τη θέση ισορροπίας της, αλλά δεν απομακρύνεται μόνιμα από αυτήν. Το κόκκινο σημείο φανερώνει τη διάδοση του κύματος στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα ταλάντωσης της βάρκας.

### 4.3.1 Συχνότητα

Η αίσθηση που έχουμε πάνω στη βάρκα, αλλάζει πολύ (από ευχάριστη μπορεί να γίνει δυσάρεστη), εάν τα κύματα πυκνώσουν. Η συχνότητα είναι το φυσικό μέγεθος που περιγράφει πόσο “πυκνά ή αραιά” είναι τα κύματα. Δηλαδή, **συχνότητα,  $f$ , κύματος είναι το πηλίκο ενός μεγάλου αριθμού  $n$  (π.χ.  $n=50$ ) κορυφών ή κοιλιών που περνάνε από ένα δεδομένο σημείο** (π.χ. σημαδούρα), **σε κάποιο χρονικό διάστημα  $t$ , δια του χρονικού αυτού διαστήματος  $t$** . Ταυτόχρονα, η ίδια η σημαδούρα ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας με την ίδια συχνότητα  $f$  (εικ.4.11). Η μονάδα μέτρησης της συχνότητας είναι το hertz (Hz). Έτσι, εάν η βάρκα ταλαντώνεται πάνω - κάτω 30 φορές σε 2 λεπτά (120s), η συχνότητά του θα είναι 0,25 ταλαντώσεις το δευτερόλεπτο ή 0,25 hertz (0,25 Hz). Γε-



**Εικόνα 4.11**

Η συχνότητα του κύματος προσδιορίζεται από την μέτρηση των κορυφών που περνάνε από ένα δεδομένο σημείο και από τη μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί.

νικά, ισχύει ότι η συχνότητα ταλάντωσης κάθε σωματίου του μέσου διάδοσης του κύματος είναι ίση με τη συχνότητα του ίδιου του κύματος και είναι ίση με τη συχνότητα της πηγής.

### 4.3.2 Περίοδος

Ένα άλλο φυσικό μέγεθος που περιγράφει το κύμα και συνδέεται άμεσα με τη συχνότητα είναι η περίοδος. **Περίοδος,  $T$ , του κύματος είναι ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ της διέλευσης από το ίδιο σημείο** (π.χ. τη σηματοδούρα), **μιας κορυφής ενός κύματος και της αμέσως επόμενης κορυφής του.** Δηλαδή, ο χρόνος που χρειάζεται η σηματοδούρα όταν συναντά ένα κύμα, για να κάνει μία πλήρη ταλάντωση (έναν κύκλο ταλάντωσης), από τη θέση της ήρεμης θάλασσας, στο υψηλότερο σημείο του, κατόπιν στο χαμηλότερο σημείο του και ύστερα πάλι στη θέση της θέσης ισορροπίας. Έτσι, σύμφωνα με το παραπάνω παράδειγμα, η περίοδος ταλάντωσης της σηματοδούρας θα είναι  $1/0,25\text{s}^{-1}=4\text{s}$ . Η περίοδος και η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογες.

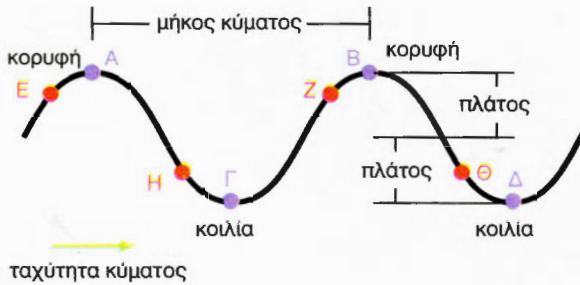
$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

### 4.3.3 Μήκος κύματος

*Κανένα κύμα δεν κρατάει  
στο στήθος του καμία.  
Οδ. Ελύτης (Προσανατολισμοί)*

Το μήκος κύματος είναι ένα σημαντικό μέγεθος για τη μελέτη των κυμάτων. **Μήκος κύματος  $\lambda$  είναι η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών (γειτονικών) κορυφών ενός κύματος** (σημεία Α και Β της εικόνας 4.12), **ή μεταξύ δύο διαδοχικών (γειτονικών) κοιλιών** (σημεία Γ και Δ της εικόνας 4.12), ή γενικά μεταξύ δύο οποιονδήποτε γειτονικών σημείων ενός κύματος που έχουν την ίδια απομάκρυνση από τη θέση ισορροπίας και κινούνται με την ίδια φορά (σημεία Ε και Ζ ή Η και Θ της εικόνας 4.12). **Το μήκος κύματος  $\lambda$  είναι η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων διαδοχικών σημείων του μέσου διάδοσης του κύματος, τα οποία, όταν διαταράσσονται, συμπεριφέρονται ταυτόχρονα, ακριβώς με τον ίδιο τρόπο.** Το μήκος κύματος συνδέεται με τη συχνότητα και την περίοδο. Πράγματι, σύμφωνα με τον ορισμό της περιόδου, στο χρονικό διάστημα μιας περιόδου  $T$  το κύμα διανύει απόσταση ενός μήκους κύματος  $\lambda$  (εικόνες 4.5 και 4.10).



**Εικόνα 4.12**

Στιγμιότυπο κύματος στο οποίο φαίνεται το μήκος κύματος και το πλάτος του κύματος.

Το μήκος κύματος και η συχνότητα είναι φυσικά μεγέθη που έχουν ιδιαίτερη σημασία για τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τα κύματα στην καθημερινή ζωή. **Η συχνότητα του κύματος αποτελεί την ταυτότητά του, ώστε να το διακρίνει κανείς ανάμεσα από τα χιλιάδες άλλα κύματα που συναντάμε στην καθημερινή ζωή, αφού η συχνότητα παραμένει αναλλοίωτη, από όποιο μέσο και αν περάσει το κύμα** π.χ. η συχνότητα της κίτρινης ακτινοβολίας είναι διαφορετική από τη συχνότητα της κόκκινης και διαφορετική από τις συχνότητες εκπομπής των ραδιοφωνικών σταθμών, των ακτίνων Χ και των ακτίνων γ).

#### 4.3.4 Ταχύτητα διάδοσης

Ένα άλλο φυσικό μέγεθος που μας χρειάζεται για τη μελέτη των κυμάτων είναι η ταχύτητα διάδοσής τους. **Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος ισούται με το πηλίκο της απόστασης  $\ell$  που διανύει μία κορυφή του κύματος σε χρόνο  $t$ , δια του χρόνου  $t$ .** Εάν θεωρήσουμε ότι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος για ένα συγκεκριμένο μέσο είναι σταθερή, τότε, σύμφωνα με τους νόμους της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης, ισχύει:

$$v = \frac{\ell}{t} \quad (2)$$

Εάν το κύμα διανύσει απόσταση ίση με ένα μήκος κύματος  $\ell = \lambda$  (3), το χρονικό διάστημα που θα απαιτηθεί θα είναι αντίστοιχα ίσο με μια περίοδο:  $t = T$  (4). Αντικαθιστώντας τις (3) και (4) στην (2) θα έχουμε:

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (5)$$

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

Η σχέση αυτή μπορεί να διατυπωθεί και σε συνάρτηση με τη συχνότητα, ως εξής:

$$v = \lambda f \quad (6)$$

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του μέσου διάδοσης. Ως παράδειγμα αναφέρουμε ότι ο ήχος διαδίδεται στον αέρα και σε θερμοκρασία 20 °C με ταχύτητα 344 m/s, ενώ στα στερεά διαδίδεται με πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα.

### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Ένα κύμα διαδίδεται σε μια χορδή με ταχύτητα 0,50 m/s. Το μήκος κύματος του είναι 25 cm. Να υπολογιστεί η συχνότητα και η περίοδος του κύματος.

#### Λύση

Από τη θεμελιώδη εξίσωση των κυμάτων  $v = \lambda f$ , προκύπτει ότι:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{0,50 \text{ m s}^{-1}}{0,25 \text{ m}} = 2 \text{ s}^{-1} = 2 \text{ Hz}$$

Από τη σχέση  $T = \frac{1}{f}$  προκύπτει ότι:  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{(2 \text{ s}^{-1})} = 0,5 \text{ s}$

### Η μαθηματική περιγραφή του κύματος

*Μην ανησυχείτε για τις δυσκολίες σας στα Μαθηματικά.  
Μπορώ να σας βεβαιώσω ότι οι δικές μου είναι μεγαλύτερες.  
Α. Αϊνστάιν*

Όταν ένα κύμα “ταξιδεύει” σε ένα μέσο, τα σωματίδια (μόρια) του μέσου ταλαντώνονται γύρω από τις θέσεις ισορροπίας τους. Θα ήταν ενδιαφέρον, εάν μπορούσαμε να γνωρίζουμε την απομάκρυνση  $y$  του τυχόντος σωματιδίου από τη θέση ισορροπίας του για κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Εάν θεωρήσουμε ότι τα κύματα είναι περιοδικά και προέρχονται από πηγή που κάνει απλή αρμονική ταλάντωση, τότε οι μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν το κύμα είναι οι ακόλουθες:

$$y = A \eta\mu 2\pi \left( ft - \frac{x}{\lambda} \right), \quad \text{για διάδοση (προς τα δεξιά)}$$

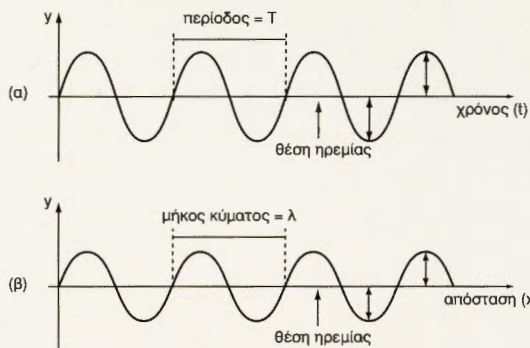
$$y = A \eta\mu 2\pi \left( ft + \frac{x}{\lambda} \right), \quad \text{για διάδοση (προς τα αριστερά)}$$

όπου  $A$  είναι το πλάτος της ταλάντωσης,  $f$  η συχνότητα και  $\lambda$  το μήκος κύματος.

Οι σχέσεις αυτές ισχύουν τόσο για τα εγκάρσια όσο και για τα διαμήκη κύματα, με την προϋπόθεση ότι  $y = 0$ , όταν  $x = 0$  και  $t = 0$ . Όπως παρατηρούμε, εξαρτώνται από δύο παραμέτρους, τις  $x$  και  $t$ . Δηλαδή, η απομάκρυνση  $y$  ενός σημείου του μέσου εξαρτάται τόσο από την απόστασή του από την πηγή ( $x$ ), όσο και από το χρόνο ( $t$ ). Επομένως, δεν μπορούμε να κάνουμε τη γραφική παράσταση των δύο παραπάνω σχέσεων. Μπορούν όμως να γίνουν οι γραφικές παραστάσεις, εάν κρατήσουμε σταθερή τη μία από τις δύο μεταβλητές.

Ας υποθέσουμε ότι ένα σωματίδιο βρίσκεται σε απόσταση  $x$  από την αρχή του συστήματος συντεταγμένων. Από τις παραπάνω σχέσεις μπορεί να προσδιοριστεί η απομάκρυνσή του  $y$  από τη θέση ισορροπίας του για κάθε χρονική στιγμή  $t$  και να γίνει η γραφική παράσταση που την απεικονίζει. Στην περίπτωση αυτή, οι σχέσεις αυτές εκφράζουν την κίνηση που κάνει το σωματίδιο και η οποία είναι απλή αρμονική ταλάντωση (εικ. 4.13α).

Αντίστοιχα, για δεδομένη χρονική στιγμή  $t$ , οι παραπάνω εξισώσεις μας δίνουν ένα “στιγμιότυπο” του κύματος τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, και η γραφική παράσταση που το απεικονίζει φαίνεται στην εικόνα 4.13β.



**Εικόνα 4.13**

α) Απόδοση ταλάντωσης ενός σωματίου που βρίσκεται σε συγκεκριμένη θέση σε συνάρτηση με το χρόνο, και  
β) στιγμιότυπο του κύματος για δεδομένη χρονική στιγμή  $t$

## 4.4 ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Όλα τα κύματα, **μηχανικά και ηλεκτρομαγνητικά**, έχουν μερικές κοινές ιδιότητες. Από αυτές θα μελετήσουμε στη συνέχεια την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη συμβολή. Οι ιδιότητες αυτές θα εξεταστούν ποιοτικά, διότι η ποσοτική εξέτασή τους θα απαιτούσε πολύ πιο βαθιά διερεύνηση. Στο κεφάλαιο της Οπτικής θα μελετηθούν ποσοτικά οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης για το ορατό φως.

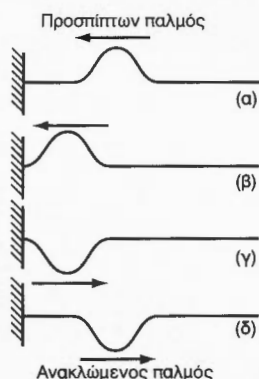
### 4.4.1 Ανάκλαση

*Το ενδόμυχο φως που ασπρογαλιάζει  
κατ' εικόνα και ομοίωση του απείρου.  
Οδ. Ελύτης (Αξιον Εστί)*

#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 5

Το φαινόμενο της ανάκλασης των κυμάτων μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα, εάν κάνουμε το παρακάτω πείραμα: Σε μια λεκάνη με νερό, αφήνουμε να πέσει από μικρό ύψος - στο κέντρο της - ένα μικρό ελαφρύ σώμα (π.χ. μία φακή ή μία σταγόνα νερό). Αμέσως, θα δημιουργηθούν κυκλικοί κυματικοί παλμοί οι οποίοι θα μεταδοθούν ως το τοίχωμα της λεκάνης, όπου θα ανακλαστούν και θα επιστρέψουν πίσω (προς το κέντρο).

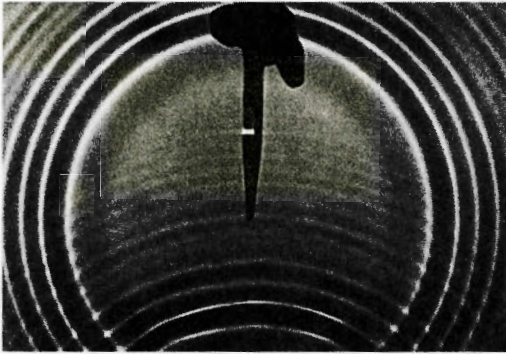
Κατά την ανάκλαση, το φως “αναπηδά” στον καθρέφτη και γυρίζει πίσω, ο ήχος “αναπηδά” στον τοίχο και ξαναγυρίζει ως ηχώ, τα κύματα της θάλασσας χτυπάνε στην προκυμαία και ξαναγυρίζουν πίσω. Δηλαδή, **στην ανάκλαση η ενέργεια που μεταφέρεται από το κύμα αλλάζει κατεύθυνση διάδοσης, καθώς χτυπάει σε μια επιφάνεια. Κάθε φορά λοιπόν, που ένα κύμα φθάνει σε μια ασυνέχεια του μέσου στο οποίο διαδίδεται (π.χ. σε ένα εμπόδιο ή σε μια περιοχή μεταβολής των ιδιοτήτων του μέσου), μέρος του κύματος ή και ολόκληρο το κύμα θα ανακλαστεί, δηλαδή θα αλλάξει η πορεία του στο ίδιο μέσο** (εικόνες 4.14, 4.15).



**Εικόνα 4.14**

Ανάκλαση παλμού στο στερεωμένο άκρο σχοινιού. Ο παλμός που ανακλάστηκε είναι ανεστραμμένος.



**Εικόνα 4.15**

Ανάκλαση κυκλικού κύματος σε ευθύγραμμο τοίχωμα (εμπόδιο). Το ανακλώμενο κύμα είναι το ίδιο με εκείνο που θα δημιουργούσε μία πηγή συμμετρική της αρχικής πίσω από την ανακλαστική επιφάνεια.

**Έχετε αναρωτηθεί ποτέ πώς είναι δυνατόν να βλέπουμε σώματα που δεν εκπέμπουν δικό τους φως;**

**Η ανάκλαση των κυμάτων είναι καθοριστική για τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τον κόσμο.** Εάν τα κύματα δεν είχαν την ιδιότητα της ανάκλασης, θα βλέπαμε ελάχιστα από τα πράγματα που υπάρχουν γύρω μας. Πράγματι, **όλα τα σώματα που δεν εκπέμπουν δικό τους φως (μη αυτόφωτα) θα φαίνονταν μαύρα, διότι τα περισσότερα σώματα τα βλέπουμε, επειδή ανακλούν το φως άλλων αυτόφωτων σωμάτων**, (ήλιος, λάμπες φωτισμού). Θα ζούσαμε σε έναν κόσμο μαύρο, όπου δεν θα διακρίναμε το πρόσωπο των γονιών μας και των φίλων μας, δε θα ξεχωρίζαμε τα χρώματα των λουλουδιών ή το περίγραμμα των περισσότερων σωμάτων γύρω μας.

Αντίστοιχα, οι ήχοι που θα έφταναν σε μας θα ήταν πολύ διαφορετικοί, καθώς δε θα υπήρχε η ανάκλαση τους σε κινητά ή ακίνητα εμπόδια του γύρω χώρου. **Οι ανακλάσεις των ήχων πάνω στα διάφορα εμπόδια (πάτωμα, ταβάνι, τοίχοι, έπιπλα κτλ.) φέρνουν σημαντικές πληροφορίες για το γύρω χώρο και τις ιδιότητές του.** Έτσι, ήχους που προέρχονται από την ίδια πηγή, τους αντιλαμβανόμαστε πολύ διαφορετικά σε ένα μεγάλο άδειο δωμάτιο από ό,τι σε ένα μικρό άδειο δωμάτιο, με την προϋπόθεση βέβαια ότι βρισκόμαστε στην ίδια απόσταση από την πηγή. Επίσης, διαφορετικά αντιλαμβανόμαστε τους ήχους σε ένα άδειο από ό,τι σε ένα γεμάτο δωμάτιο. Διαφορετικά αντιλαμβανόμαστε τον ήχο, όταν ανακλάται σε γυμνό δάπεδο και διαφορετικά, όταν ανακλάται σε δάπεδο καλυμμένο με χαλιά. Οι άνθρωποι που ασχολούνται με την ακουστική των χώρων λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη τους τις διαστάσεις του χώρου, τις διατάξεις των επίπλων, το υλικό των δαπέδων και των τοίχων κτλ., προκειμένου να επιτύχουν ένα καλό ακουστικό αποτέλεσμα.

Στην καθημερινή μας ζωή όταν αντιλαμβανόμαστε έναν ήχο νομίζουμε ότι αυτός φτάνει σε μας κατευθείαν από την πηγή που τον προκάλεσε. Στην

πραγματικότητα όμως ακούμε τον ήχο αυτό, όπως φθάνει σε μας τόσο από την ηχητική πηγή, όσο και από τις πολλαπλές και διαδοχικές ανακλάσεις του στα εμπόδια του γύρω χώρου. Οι πολλαπλές αυτές ανακλάσεις φθάνουν σε μας με μια ελάχιστη χρονική υστέρηση σε σχέση με τον ήχο που φθάνει κατευθείαν από την πηγή. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος, όμως, δεν μπορεί να διακρίνει τη χρονική αυτή υστέρηση και γι' αυτό δεν την αντιλαμβάνομαστε. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να διαφοροποιείται ο αρχικός ήχος και να δίνει διαφορετική αίσθηση στον άνθρωπο (επιμηκύνεται ο χρόνος που διαρκεί ο ήχος).

Γενικά, δηλαδή, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίς την ανάκλαση των φωτεινών και ηχητικών κυμάτων θα ζούσαμε σε έναν κόσμο πολύ φτωχό, μουντό και μονότονο.

#### 4.4.2 Διάθλαση

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα των κυμάτων είναι η ιδιότητα της **διάθλασης**.

Η εντύπωση της απότομης κάμψης σωμάτων στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων διαφορετικής πυκνότητας (π.χ. ένα μολύβι που είναι τοποθετημένο όρθιο μέσα σε ένα ποτήρι μισογεμάτο με νερό) ή το γεγονός ότι κάποιες μέρες οι ήχοι ακούγονται καθαρά σε μακρινές αποστάσεις και κάποιες άλλες μέρες δεν ακούγονται καθόλου στις ίδιες αποστάσεις οφείλονται στη διάθλαση των κυμάτων (ηλεκτρομαγνητικών, ηχητικών κτλ.).

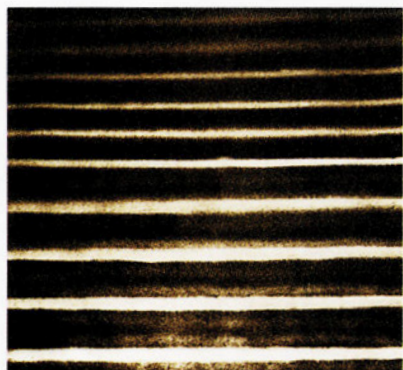
#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Το φαινόμενο της διάθλασης μπορούμε να το παρατηρήσουμε εύκολα, εάν στάξουμε προσεκτικά σταγόνες νερού πάνω στα γράμματα ενός περιοδικού ή μιας εφημερίδας. Αμέσως, θα τα δούμε να μεγεθύνονται. Τα γυαλιά μυωπίας λειτουργούν με ανάλογο τρόπο και διαθλούν το φως, έτσι ώστε να εξουδετερώνουν τις ατέλειες του ματιού (βλ. §9.11).

Τα κύματα του φωτός (που απεικονίζονται από τις φωτεινές ακτίνες) διαθλώνται (κάμπτονται), όταν περνούν από τον αέρα στο γυαλί, στο νερό, σε ένα πρίσμα, και αντίστροφα. Διαθλώνται ακόμη, και όταν περνούν μέσα από στρώματα αέρα διαφορετικής πυκνότητας (βλ. §9.2).

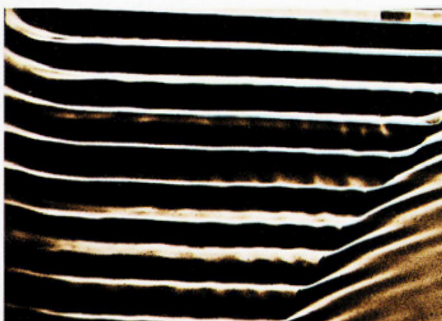
Όταν κύματα νερού αναγκάζονται να περάσουν από μία περιοχή ορισμένου βάθους σε άλλη περιοχή διαφορετικού βάθους, τότε η ταχύτητά τους αλλάζει. Συγκεκριμένα, η ταχύτητα γίνεται μικρότερη, όταν το κύμα περνάει από νερά μεγάλου βάθους σε νερά μικρού βάθους. Αυτό σημαίνει ό-

τι, επειδή η συχνότητα των κυμάτων παραμένει αμετάβλητη, το μήκος κύματός τους θα αλλάξει και θα γίνει μικρότερο στα νερά μικρού βάθους. Οι εικόνες 4.16α και 4.16β δείχνουν φωτογραφίες από τη διάθλαση κυμάτων, όταν το κύμα περνάει από νερά μικρού βάθους σε νερά μεγαλύτερου βάθους: α) όταν το κύμα πέφτει παράλληλα στη διαχωριστική επιφάνεια (εικόνα 4.16α και β) όταν το κύμα πέφτει υπό γωνία στη διαχωριστική επιφάνεια (εικόνα 4.16β).



**Εικόνα 4.16α**

Διάθλαση των κυμάτων, καθώς το κύμα περνάει από ρηχά νερά (στην κορυφή της φωτογραφίας) σε βαθιά νερά (στη βάση της φωτογραφίας). Προσέξτε ότι το μήκος κύματος είναι μικρότερο στα ρηχά νερά.



**Εικόνα 4.16β**

Φωτογραφία της διάθλασης των κυμάτων υπό γωνία, στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο περιοχών διαφορετικού βάθους σε μια λεκάνη με νερό.

Αντίστοιχα, τα κύματα ήχου “λυγίζουν” (αλλάζουν κατεύθυνση), όταν περνούν μέσα από διαφορετικά στρώματα αέρα. Συνεπώς, **διάθλαση είναι η κάμψη (αλλαγή) της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, όταν αλλάζει η ταχύτητα διάδοσής του.** Αυτό συμβαίνει, όταν το κύμα συναντά στην πορεία του ένα άλλο μέσο διάδοσης, το οποίο έχει διαφορετική πυκνότητα από το αρχικό ή διαφορετική θερμοκρασία ή διαφορετικό βάθος. Έτσι, όταν ένα κύμα αλλάζει μέσο διάδοσης, παρατηρείται αλλαγή της πορείας του κύματος.

Όταν το φως περνά από ένα διαφανές μέσο (π.χ. αέρα) σε ένα άλλο (π.χ. γυαλί) διαφορετικής πυκνότητας, η αλληλεπίδραση του φωτός με τα άτομα του νέου μέσου (γυαλιού) προκαλεί καθυστερήσεις που έχουν ως αποτέλεσμα μια σημαντική μείωση της ταχύτητας στο νέο μέσο (γυαλί). Διάθλαση του φωτός συμβαίνει και στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, κατά τη δύση του ηλίου οι ακτίνες του φωτός αναγκάζονται να διατρέξουν όλο και πιο παχιά στρώματα του αέρα (μεγαλύτερο μήκος ατμόσφαιρας), με αποτέλεσμα συνέχεια να κάμπτονται και έτσι ο ήλιος να εμφανίζεται πάνω από



τον ορίζοντα, ενώ έχει ήδη δύσει. Επίσης, το φαινόμενο του αντικατοπτρισμού του ηλιακού φωτός στο δρόμο τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού οφείλεται στη διάθλαση του φωτός στην ατμόσφαιρα λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας των διάφορων στρωμάτων της (εικόνα 4.15).

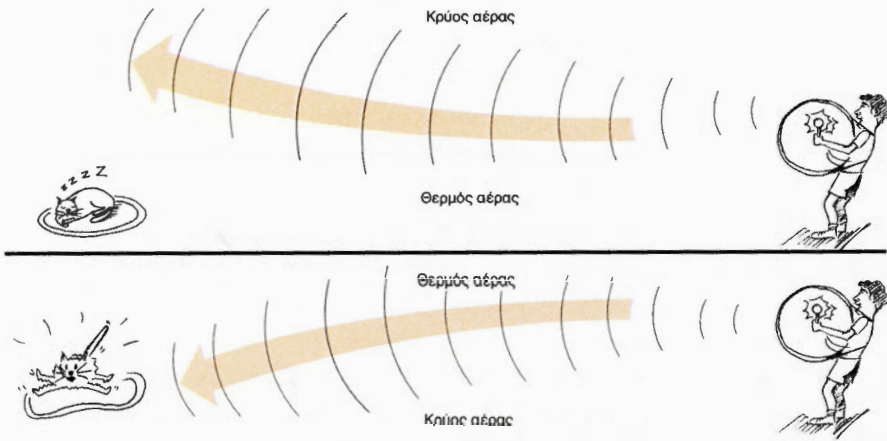


**Εικόνα 4.17**

Τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού, η διάθλαση του ηλιακού φωτός σε στρώματα της ατμόσφαιρας που έχουν διαφορετική θερμοκρασία δημιουργεί στον άνθρωπο την ψευδαίσθηση μιας λίμνης νερού πάνω στον αυτοκινητόδρομο.

Ομοίως, τα ηχητικά κύματα διαθλώνται, όταν περνούν μέσα από στρώματα του αέρα διαφορετικής θερμοκρασίας. Ο ήχος ταξιδεύει με μεγαλύτερη ταχύτητα στο θερμό αέρα και με μικρότερη ταχύτητα στον ψυχρό αέρα. Αυτό συμβαίνει, διότι τα σωματίδια του θερμού αέρα έχουν μεγαλύτερη κινητική ενέργεια και ταχύτητα από τα σωματίδια του ψυχρού αέρα και έτσι μεταφέρουν πιο γρήγορα την πληροφορία (την ενέργεια του ηχητικού κύματος) από σημείο σε σημείο. Επομένως, όταν κρύα στρώματα αέρα είναι πάνω από ζεστά στρώματα αέρα (όπως συμβαίνει συνήθως μια θερμή μέρα), η ταχύτητα του ήχου είναι αυξημένη κοντά στο έδαφος και τα ηχητικά κύματα τείνουν να λυγίσουν προς τα πάνω. Γι' αυτό ο ήχος δεν ακούγεται καλά. Αυτό συμβαίνει με τους κεραυνούς που δεν ακούγονται σε απόσταση μεγαλύτερη από μερικά χιλιόμετρα. Αντίθετα, όταν ζεστά στρώματα αέρα είναι πάνω από κρύα στρώματα αέρα (θερμοκρασιακή αναστροφή), η ταχύτητα του ήχου είναι ελαττωμένη κοντά στο έδαφος, τα ηχητικά κύματα διαθλώνται προς τα κάτω και έτσι οι ήχοι ακούγονται σε μακρινές αποστάσεις. (εικόνα 4.18).



**Εικόνα 4.18**

Τα ηχητικά κύματα κάμπτονται μεταξύ στρωμάτων του αέρα που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες

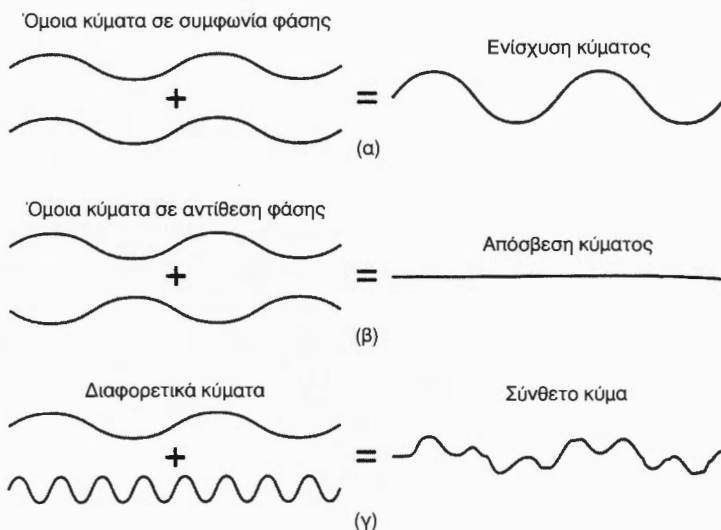
Διάθλαση συμβαίνει και στα σεισμικά κύματα, όταν διατρέχουν το εσωτερικό της γης, όπου συναντούν στρώματα διαφορετικής πυκνότητας. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη της διάθλασης των σεισμικών κυμάτων που καταγράφονται στους διάφορους ανά τη γη σειсмоγράφους, οδήγησαν στη χαρτογράφηση του εσωτερικού της γης, όπως θα δούμε στο σχετικό κεφάλαιο.

### 4.4.3 Συμβολή των κυμάτων

*Κι η αχτίδα του ήλιου  
γίνηγεν, ιδέστε,  
ο μίτος τον θανάτου.  
Οδ. Ελύτης (Αξιον Εστί)*

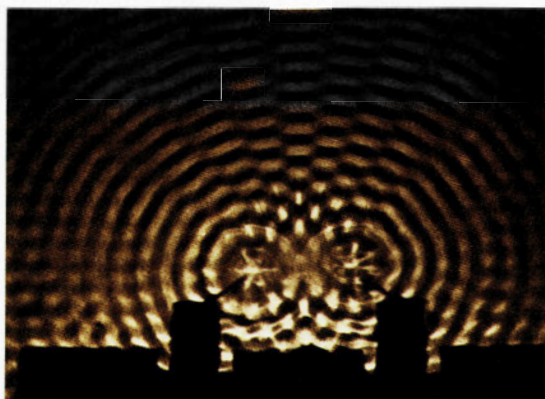
Στον κόσμο που ζούμε μας περιβάλλει ένα πλήθος κυμάτων. Οπουδήποτε και αν βρισκόμαστε σπάνια φθάνει σε μας ένα μόνο κύμα από μία πηγή. Συνήθως, φθάνουν σε μας ταυτόχρονα κύματα από διάφορες πηγές και εκείνο το οποίο εμείς τελικά αντιλαμβανόμαστε είναι το αποτέλεσμα αυτών των κυμάτων. Αλλά τι συμβαίνει όταν κύματα από διάφορες πηγές συναντώνται; Όταν δύο ή περισσότερα κύματα φθάνουν ταυτόχρονα σε ένα σημείο, τότε τα κύματα αυτά συμβάλλουν, δηλαδή “προστίθενται” και προκύπτει ένα σύνθετο κύμα. Η μορφή του σύνθετου κύματος εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο τα επί μέρους κύματα συναντούν το ένα το άλλο. Έτσι, εάν συναντηθούν στο ίδιο σημείο δύο κύματα ίδιου πλάτους και φο-

ράς κίνησης (π.χ. δύο κορυφές ή δύο κοιλίες), τότε τα πλάτη αυτών των κυμάτων “προστίθενται” και έχουμε ενίσχυση του κύματος (Εικόνα 4.19α). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι τα κύματα έφθασαν στο συγκεκριμένο σημείο σε **συμφωνία φάσης**. Εάν συναντηθούν στο ίδιο σημείο δύο κύματα αντίθετου πλάτους (π.χ. κορυφή του ενός κύματος και κοιλία του άλλου), τότε τα πλάτη αυτών των κυμάτων αλληλοαναιρούνται και έχουμε **απόσβεση κύματος** (εικόνα 4.19β). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι τα κύματα έφθασαν στο ίδιο σημείο σε **αντίθεση φάσης**. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση προκύπτει ένα πιο σύνθετο κύμα. (εικόνα 4.19γ). Η συμβολή χαρακτηρίζει όλα τα κύματα: κύματα που διαδίδονται στον αέρα ή στο νερό, κύματα φωτεινά ή ηχητικά, κύματα εγκάρσια ή διαμήκη (εικόνα 4.20).



**Εικόνα 4.19**

Η συμβολή δύο κυμάτων: α) ίδιου πλάτους, ίδιου μήκους κύματος (όμοια κύματα) και σε συμφωνία φάσης δημιουργεί ένα κύμα ίδιου μήκους κύματος και μεγαλύτερου (διπλάσιου) πλάτους, β) ίδιου πλάτους, ίδιου μήκους κύματος (όμοια κύματα) και σε αντίθεση φάσης οδηγεί στην αλληλοεξουδετέρωση των κυμάτων, γ) διαφορετικού πλάτους, διαφορετικού μήκους κύματος (διαφορετικά κύματα) δημιουργεί ένα σύνθετο κύμα.

**Εικόνα 4.20**

Φωτογραφία της συμβολής κυμάτων δύο σημειακών πηγών που είναι σύμφωνες (εκπέμπουν κύματα με ίδιο πλάτος, ίδιο μήκος κύματος και σε συμφωνία φάσης)

Η ακουστική, όπως ήδη έχουμε επισημάνει, μελετά ιδιαίτερα τη συμβολή, διότι, όταν π.χ. γίνεται μία συναυλία σε κλειστό χώρο, εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων στους τοίχους της αίθουσας, έχουμε φαινόμενα συμβολής των ήχων. Το τελικό καλό ή κακό ακουστικό αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο συμβάλλουν οι ήχοι. Γι' αυτό, σε τέτοιες περιπτώσεις, γίνεται ειδική μελέτη ακουστικής για τη σωστή αρχιτεκτονική κατασκευή μιας αίθουσας συναυλιών.



## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

**Στις παρακάτω ερωτήσεις 1-4, να επιλέξετε τη σωστή απάντηση**

1. Τα κύματα μεταφέρουν:
  - α) μάζα
  - β) ηλεκτρικό φορτίο
  - γ) ενέργεια
  - δ) ηλεκτρικό φορτίο και μάζα
2. Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνον:
  - α) στα στερεά και στην επιφάνεια των υγρών
  - β) στα υγρά και στην επιφάνεια των στερεών
  - γ) στα αέρια και στην επιφάνεια των υγρών
  - δ) στα υγρά και στα αέρια

3. Στα εγκάρσια κύματα ελαστικότητας τα σωματίδια του μέσου διάδοσης κινούνται:
- α) σε κυκλικές τροχιές
  - β) σε ελλειπτικές τροχιές
  - γ) παράλληλα προς το διάνυσμα της ταχύτητας διάδοσης του κύματος
  - δ) κάθετα προς το διάνυσμα της ταχύτητας διάδοσης του κύματος
4. Τα κύματα στην επιφάνεια των υγρών είναι:
- α) διαμήκη
  - β) εγκάρσια
  - γ) ταυτοχρόνως και διαμήκη και εγκάρσια
  - δ) πλάγια προς την επιφάνεια του βυθού
5. Πώς συνδέονται το μήκος κύματος και η συχνότητα για κύματα συγκεκριμένης σταθερής ταχύτητας διάδοσης;
6. Ποιες οι διαφορές των εγκάρσιων και των διαμήκων κυμάτων;
7. Υποθέστε ότι ένα διάμηκες κύμα διαδίδεται κατά μήκος ενός ελατηρίου με ταχύτητα 3 m/s. Αυτό σημαίνει ότι μία σπείρα του ελατηρίου θα διανύσει μία απόσταση 3 m σε ένα δευτερόλεπτο; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
8. Ένα αρμονικό κύμα διαδίδεται σε μία χορδή με σταθερή ταχύτητα. Αυτό σημαίνει ότι τα σωματίδια της χορδής θα έχουν πάντα μηδέν επιτάχυνση; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
9. Ένας άνθρωπος που βρίσκεται μέσα σε μία βάρκα στη θάλασσα παρατηρεί ότι, αφού περάσει από μπροστά του μία κορυφή κύματος, οι επόμενες 30 κορυφές περνούν σε χρόνο 4 min. Πόση είναι η συχνότητα του κύματος;
10. Ένα δελφίνι για να βρίσκει το δρόμο του, εκπέμπει ένα αρμονικό ηχητικό κύμα με μήκος κύματος 2,9 cm. Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το κύμα στη θάλασσα είναι 1450 m/s. Να υπολογιστεί η περίοδος του κύματος.
11. Ένα διάμηκες κύμα με συχνότητα 8,0 Hz, χρειάζεται 1,0 s για να διανύσει ένα ελατήριο μήκους 2,0 m. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτού του κύματος.



12. Μία κοπέλα κάνει ηλιοθεραπεία πάνω σε ένα στρώμα θαλάσσης μέσα στη θάλασσα και αισθάνεται να λικνίζεται (να ανυψώνεται και να βυθίζεται) από το κύμα της θάλασσας, κάνοντας έναν πλήρη κύκλο σε 5 s. Οι κορυφές του κύματος που προκαλούν αυτή την κίνηση απέχουν 20 m. Να προσδιοριστεί: α) η συχνότητα και β) η ταχύτητα του κύματος.
13. Τα κύματα της θάλασσας που δημιουργούνται από το πέρασμα ενός σκάφους έχουν ταχύτητα 2 m/s. Ποιο είναι το μήκος κύματος αυτών των κυμάτων, εάν προξενούν σε μια κοντινή σημαδούρα ένα ανεβοκατέβασμα κάθε 4 s;
14. Ένα αγκυροβολημένο σκάφος ταλαντώνεται από κύματα που έχουν κορυφές οι οποίες απέχουν 50 m η μία από την άλλη και κινούνται με ταχύτητα 10 m/s. Ποια είναι η συχνότητα και η περίοδος αυτών των κυμάτων;
15. Σε ένα μέσο, μια πηγή δημιουργεί εγκάρσια κύματα με συχνότητα  $f=10\text{Hz}$ . Σε ένα στιγμιότυπο του εγκάρσιου κύματος, η απόσταση ενός όρους από τη μεθεπόμενη κοιλάδα είναι  $\ell=90\text{cm}$ . Να υπολογιστεί: α) Το μήκος κύματος και η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, β) Η απόσταση από την πηγή που θα έχει φτάσει το κύμα σε χρόνο 6 δευτερολέπτων, καθώς και ο αριθμός των κυμάτων που θα έχουν δημιουργηθεί. γ) Η συχνότητα και το μήκος κύματος, εάν το κύμα κατά τη διάδοσή του, συναντήσει μέσο και η νέα του ταχύτητα σε αυτό είναι  $u'=5\text{m/s}$ .



## κεφάλαιο 5



Η εκκλησία της Αγίας Βαρβάρας στα Πατήσια, μετά το σεισμό που έγινε στην Αθήνα το Σεπτέμβριο του 1999.

### ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

- Αιτίες δημιουργίας των σεισμικών κυμάτων
- Τα είδη των σεισμικών κυμάτων
- Προσδιορισμός του κέντρου ενός σεισμού
- Η κλίμακα μέτρησης του μεγέθους των σεισμών





## 5.1 ΑΙΤΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

*Δος μοι πα στο  
και τα γαν κινήσω.  
Αρχιμήδης*

Η Ελλάδα βρίσκεται σε μια περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα. Όλοι έχουμε τη δυσάρεστη εμπειρία ενός σεισμού. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, συνήθως αισθανόμαστε τη γη να κουνιέται κάτω από τα πόδια μας και τα κτίρια να ταλαντώνονται έντονα. Ο σεισμός είναι ένα φυσικό φαινόμενο, όπως και πολλά άλλα (π.χ. ο κεραυνός, η βροχή, ο άνεμος.). Όταν όμως ο σεισμός είναι ισχυρός, στους περισσότερους ανθρώπους δημιουργούνται αισθήματα φόβου και ανασφάλειας. Είναι σημαντικό για τη ψύχραιμη αντιμετώπιση των σεισμών να κατανοήσουμε πώς δημιουργούνται οι σεισμοί.

Ο στερεός φλοιός της Γης αποτελείται από τεράστιες πλάκες, τις λιθοσφαιρικές πλάκες, οι οποίες βρίσκονται σε διαρκή κίνηση. Συγκεκριμένα, σε ορισμένες περιοχές του στερεού φλοιού της Γης οι λιθοσφαιρικές πλάκες πλησιάζουν (συγκλίνουν), με αποτέλεσμα να βυθίζεται η μία κάτω από την άλλη, σε άλλες περιοχές απομακρύνονται και σε άλλες περιοχές κινούνται παράλληλα - με διαφορετική όμως ταχύτητα - η μία από την άλλη. Εξαιτίας αυτής της κίνησης, οι περιοχές που βρίσκονται στα όρια σύγκλισης ή παράλληλης μετατόπισης των λιθοσφαιρικών πλακών συμπιέζονται και συνεπώς αρχίζουν να παραμορφώνονται και να συσσωρεύουν ενέργεια.

Αυτό μπορεί να διαρκέσει και δεκαετίες. Κάποια στιγμή τα πετρώματα που παραμορφώνονται δεν αντέχουν άλλο, διότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται ξεπερνούν το όριο θραύσης τους, και σπάζουν απότομα δημιουργώντας σεισμό. Στην περιοχή που θραύεται το πέτρωμα δημιουργείται ρήγμα, που ονομάζεται σεισμογόνο ρήγμα. Στο σεισμογόνο ρήγμα, οι δύο επιφάνειες που δημιουργήθηκαν από τη θραύση των πετρωμάτων τρίβονται μεταξύ τους και τα υλικά σημεία που τις αποτελούν αρχίζουν να ταλαντώνονται έντονα. Η τεράστια ενέργεια, που είχε συσσωρευτεί τόσα χρόνια στα παραμορφωμένα πετρώματα απελευθερώνεται και μεταφέρεται με κύματα.

## 5.2 ΤΑ ΕΙΔΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

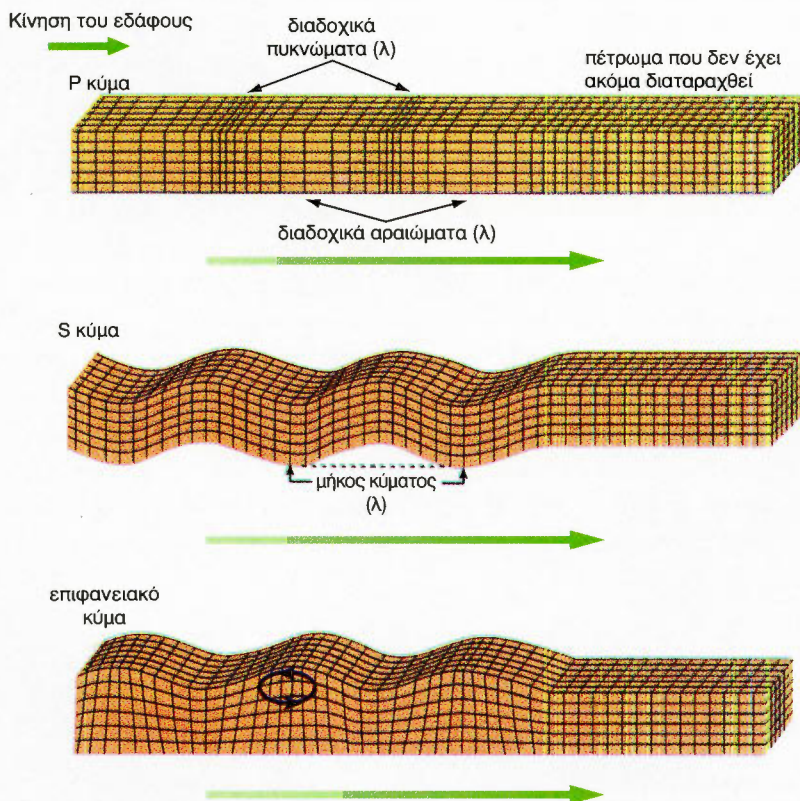
Τα σεισμικά κύματα είναι τριών ειδών: (εικόνα 5.1)

α) **Πρωτογενή κύματα (P κύματα):** είναι ένα σύνολο κυμάτων που ταξιδεύουν στο εσωτερικό της γης ως διαμήκη κύματα συμπίεσης. Η ταχύτητά τους στον ανώτερο φλοιό της γης είναι 6 km/s.

β) **Δευτερογενή κύματα (S κύματα):** είναι ένα σύνολο κυμάτων που ταξιδεύουν στο εσωτερικό της γης ως εγκάρσια κύματα. Η ταχύτητά τους στον ανώτερο φλοιό της γης είναι 3,5 km/s.

γ) **Επιφανειακά κύματα (L κύματα):** είναι εγκάρσια κύματα που κάνουν το έδαφος να κυματίζει όπως συμβαίνει με τα κύματα της θάλασσας. Τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται μόνον στην εξωτερική επιφάνεια της γης. Επειδή ο φλοιός της γης είναι ένα στερεό, δύσκαμπτο αλλά ελαστικό σώμα, ένας σεισμός μεγάλου μεγέθους μπορεί να προκαλέσει κυματισμό του εδάφους, σχετικά μικρού πλάτους αλλά ικανού να επιφέρει μεγάλες καταστροφές. Η ταχύτητά των επιφανειακών κυμάτων είναι περίπου 3,2 km/s.

Τα εγκάρσια (S) και διαμήκη (P) σεισμικά κύματα, καθώς διαδίδονται στο εσωτερικό της γης συναντούν στρώματα διαφορετικής πυκνότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αλλάζει η ταχύτητα διάδοσής τους και συνεπώς και η διεύθυνση διάδοσής τους. Δηλαδή, τα σεισμικά κύματα ανάλογα με το είδος των στρωμάτων που συναντούν, διαθλώνται (αλλάζουν κατεύθυνση).

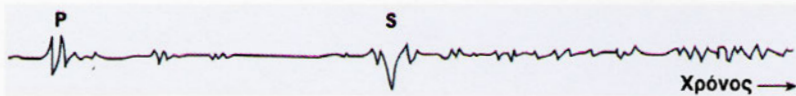


**Εικόνα 5.1**

Τα διαμήκη (P), τα εγκάρσια (S) και τα επιφανειακά (L) σεισμικά κύματα

### 5.3 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΚΕΝΤΡΟΥ ΕΝΟΣ ΣΕΙΣΜΟΥ

Η **εστία** είναι το σημείο (περιοχή) της γης, όπου εκδηλώνεται ο σεισμός. Το **επίκεντρο** ενός σεισμού είναι το πλησιέστερο σημείο στην επιφάνεια της γης που βρίσκεται κατακόρυφα πάνω από την εστία του σεισμού. Οι πρώτες πληροφορίες που παρέχουν οι σεισμολόγοι μετά από κάποιο μεγάλο σεισμό αναφέρονται στο μέγεθός του (βλ. ένθετο) και στο επίκεντρό του. Για να συμβεί αυτό, συνήθως συνδυάζονται ενδείξεις από διάφορους σειсмоγραφικούς σταθμούς. Όταν συμβαίνει ένας σεισμός, οι σειсмоγράφοι καταγράφουν τους χρόνους άφιξης των P και S κυμάτων (εικόνα 5.2). Από τη διαφορά άφιξης των εγκάρσιων και διαμήκων κυμάτων προσδιορίζεται η απόσταση του σεισμού από το σταθμό που τον κατέγραψε. Χρειάζεται η ο συνδυασμός των μετρήσεων από τρεις τουλάχιστον σταθμούς για να προσδιοριστεί το επίκεντρο.



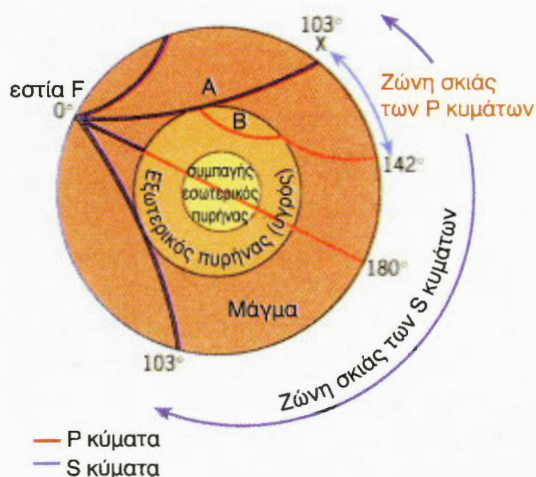
**Εικόνα 5.2**

Σειсмоγράφημα που δείχνει τη διαφορά στο χρόνο άφιξης των διαμήκων (P) και εγκάρσιων (S) κυμάτων ενός σεισμού.

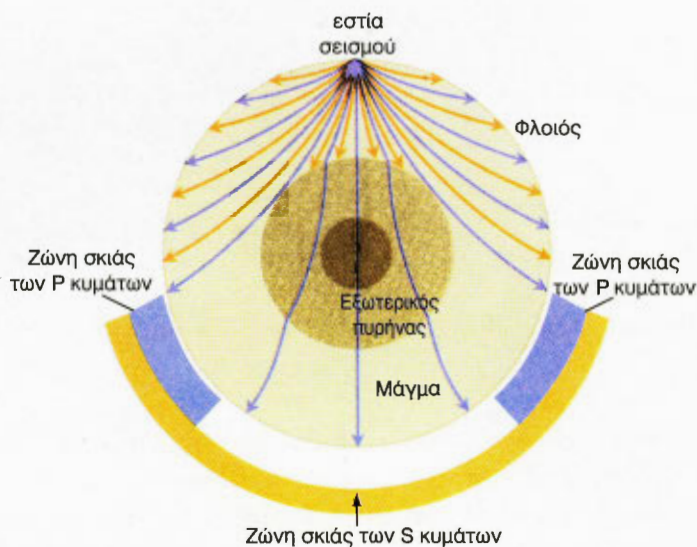
**Με ποιο τρόπο οι γεωλόγοι βγάζουν συμπεράσματα για το εσωτερικό της γης;**

Από τη μελέτη πολλών σεισμικών κυμάτων που έχουν προέλθει από διαφορετικούς σεισμούς, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα για τη σύσταση του εσωτερικού της γης. Έτσι, επειδή τα εγκάρσια κύματα S δεν περνούν καθόλου από τον εξωτερικό πυρήνα αλλά αποκλίνουν, συμπεραίνουμε ότι η περιοχή αυτή του πυρήνα βρίσκεται σε υγρή κατάσταση (Θυμίζουμε ότι τα εγκάρσια κύματα δεν περνούν από το εσωτερικό των υγρών). Όμως, και τα διαμήκη P κύματα αποκλίνουν από την πορεία τους (διαθλώνται), όταν συναντούν μέσα διαφορετικής πυκνότητας, όπως όταν από στερεό μεταβαίνουν σε υγρό (εξωτερικός πυρήνας). Έτσι, η σύγκριση σημάτων από διαφορετικούς σεισμούς μας βοήθησε να βγάλουμε την “ακτινογραφία” του εσωτερικού της γης (εικόνες 5.3, 5.4).



**Εικόνα 5.3**

Πιθανές διαδρομές των P και S κυμάτων που προήλθαν από ένα σεισμό στο F. Διακρίνονται οι περιοχές (ζώνες σκιάς) που δε φτάνουν τα S και P κύματα που προέρχονται από την εστία του σεισμού F.

**Εικόνα 5.4**

Τα κύματα που προκύπτουν από κάθε σεισμό αναλύονται από εκατοντάδες σεισμικούς σταθμούς σε όλα τα μέρη της επιφάνειας της γης. Τόσο τα P όσο και τα S κύματα αυξάνουν την ταχύτητα τους καθώς εισχωρούν στο μάγμα. Έτσι, κάμπτονται προς τα πάνω (διαθλώνται) στην περιοχή του μάγματος. Επιπλέον τα S κύματα δεν μπορούν να εισχωρήσουν στον εξωτερικό πυρήνα της γης επειδή βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, ενώ τα P κύματα διαθλώνται ακόμη περισσότερο σ' αυτόν. Από τον εσωτερικό πυρήνα τα P κύματα περνάνε ελεύθερα γι' αυτό πιστεύεται ότι βρίσκεται σε στερεή σχετικά κατάσταση.



## 5.4 Η ΚΛΙΜΑΚΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΕΓΕΘΟΥΣ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

### Η κλίμακα Richter

Όταν γίνεται ένας μεγάλος σεισμός, το πρώτο πράγμα που θέλουμε να μάθουμε είναι το επίκεντρό του και το μέγεθός του. Το μέγεθος του σεισμού, συνήθως, δίνεται σε νούμερα μιας βαθμολογημένης κλίμακας, της κλίμακας Richter. Το κάθε νούμερο σ' αυτή την κλίμακα αντιπροσωπεύει το ποσόν της ενέργειας που απελευθερώνεται και μεταφέρεται από τα σεισμικά κύματα. Για παράδειγμα, ένας σεισμός μεγέθους 5 Richter απελευθερώνει ενέργεια  $6 \times 10^{10}$  J. Η διαφορά κατά ένα βαθμό στην κλίμακα Richter σημαίνει μια αρκετά μεγάλη διαφορά ως προς την ενέργεια που απελευθερώνεται. Όταν αυξάνει το μέγεθος του σεισμού κατά 1 βαθμό στην κλίμακα Richter, η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια του σεισμού είναι 30 φορές μεγαλύτερη. Αυτό σημαίνει ότι, αν συγκρίνουμε δύο σεισμούς με μεγέθη 4 και 7 Richter, θα διαπιστώσουμε ότι στο δεύτερο σεισμό απελευθερώνεται  $30 \times 30 \times 30 = 27\,000$  φορές περισσότερη ενέργεια.

**Η κλίμακα Richter για τους σεισμούς**

| Μέγεθος κλίμακας Richter | Αρ. σεισμών ανά χρόνο     | Τυπικά Αποτελέσματα                                                                                |
|--------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <3,4                     | 800 000                   | Ο σεισμός ανιχνεύεται από τους σεισμογράφους.                                                      |
| 3,5 – 4,2                | 30 000                    | Ο σεισμός γίνεται ελάχιστα αντιληπτός.                                                             |
| 4,3 – 4,8                | 4800                      | Ο σεισμός γίνεται αντιληπτός από τον περισσότερο κόσμο: τα παράθυρα τρίζουν.                       |
| 4,9 – 5,4                | 1400                      | Ο σεισμός γίνεται αντιληπτός από όλους: πιάτα μπορεί να σπάσουν, πόρτες ανοιγακλείουν.             |
| 5,5 – 6,1                | 500                       | Ελαφρές καταστροφές στα κτίρια: γίνονται ρωγμές στους σοβάδες, σπάνε τούβλα.                       |
| 6,2 – 6,9                | 100                       | Μεγαλύτερες ζημιές στα κτήρια: καμινάδες πέφτουν, τα σπίτια κουνιούνται από τα θεμέλιά τους.       |
| 7,0 – 7,3                | 15                        | Σοβαρές καταστροφές: οι γέφυρες γκρεμίζονται, οι τοίχοι πέφτουν, τα κτίρια μπορεί να καταρρεύσουν. |
| 7,4 – 7,9                | 4                         | Μεγάλες καταστροφές: τα περισσότερα κτίρια καταρρέουν.                                             |
| >8,0                     | Ένας κάθε 5 έως 10 χρόνια | Ολική καταστροφή: τα επιφανειακά κύματα είναι ορατά και αντικείμενα πετούνται στον αέρα.           |

**Προσοχή:** Τα παραπάνω αποτελέσματα αναφέρονται σε περιοχές που είναι πολύ κοντά στο επίκεντρο του σεισμού. Όσο όμως απομακρυνόμαστε από το επίκεντρο, τόσο τα αποτελέσματα αυτά βαθμιαία εξασθενούν.

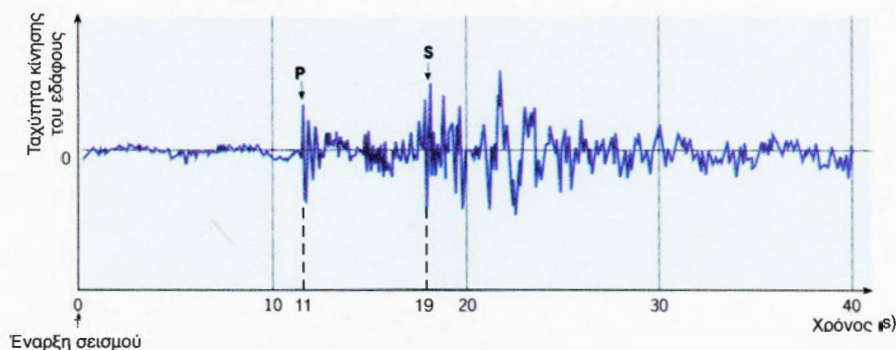
Συχνά αναρωτιόμαστε γιατί τα κτίρια σε ένα μεγάλο σεισμό κουνιούνται τόσο ώστε μερικά μπορεί ακόμη και να καταρρεύσουν.

Όπως ήδη θα καταλάβατε, στην περίπτωση ενός σεισμού, το έδαφος ταλαντώνεται, όπως ακριβώς και η επιφάνεια της θάλασσας σε περίπτωση θαλασσοταραχής. Τα κτίρια θα πρέπει όμως να είναι έτσι δομημένα, ώστε να μπορούν να ακολουθήσουν το έδαφος σ' αυτή την ταλάντωση, χωρίς να καταρρεύσουν. Εάν γίνει σωστή στατική μελέτη και αξιόπιστη κατασκευή ενός κτιρίου, με πρόβλεψη ότι το κτίριο αυτό στη διάρκεια της ζωής του -ιδιαιτέρως στη χώρα μας- θα αντιμετωπίσει οπωσδήποτε κάποιους μεγάλους σεισμούς, τότε είναι σίγουρο ότι θα μπορέσει να αντεπεξέλθει στους μελλοντικούς σεισμούς με ασφάλεια.



## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Ποια από τις ακόλουθες προτάσεις περιγράφει σωστά τη συμπεριφορά των σεισμικών κυμάτων;
  - α) Τα P κύματα απορροφώνται από τον πυρήνα της Γης, ενώ τα S κύματα δεν απορροφώνται.
  - β) Τόσο τα P όσο και τα S κύματα απορροφώνται από τον πυρήνα της Γης.
  - γ) Τόσο τα P όσο και τα S κύματα διαθλώνται στο μάγμα ή στο μανδύα της Γης.
  - δ) Ούτε τα P ούτε τα S κύματα ανακλώνται σε οποιαδήποτε διαχωριστική επιφάνεια στο εσωτερικό της Γης.
2. Ποιες μεθόδους χρησιμοποιούν οι γεωλόγοι για να “δουν” στο εσωτερικό της Γης και, ως εκ τούτου, να χαρτογραφήσουν το εσωτερικό της;
3. Η Εικόνα (5.5) δείχνει ένα τυπικό ίχνος ενός σειсмоγράφου. Τα P κύματα φθάνουν πριν από τα S κύματα, διότι διαδίδονται πιο γρήγορα. Τα P κύματα διαδίδονται με ταχύτητα 6,0 Km/s και τα S κύματα με ταχύτητα 3,5 Km/s στον ανώτερο φλοιό της γης. Το σειсмоγράφημα καταγράφει μόνον τη διαφορά στο χρόνο άφιξης των δύο κυμάτων.

**Εικόνα 5.5**

Σειсмоγράφημα που δείχνει το χρόνο πρώτης άφιξης των P και S κυμάτων.

- α) Να συμπληρωθεί ο παρακάτω πίνακας, έτσι ώστε να δείχνει πόσο μακριά από το επίκεντρο του σεισμού έχουν φθάσει τα P και S κύματα στους αντίστοιχους χρόνους που φαίνονται στον πίνακα.

| Χρόνος<br>σε s         | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|------------------------|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|
| P<br>απόσταση<br>σε Km |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |
| S<br>απόσταση<br>σε Km |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |

- β) Να σχεδιαστεί η γραφική παράσταση της απόστασης από το επίκεντρο, ως προς το χρόνο, και για τους δύο τύπους των κυμάτων.

- γ) Από τη γραφική παράσταση, να υπολογιστεί η απόσταση του επίκεντρου του σεισμού από το σεισμικό σταθμό, για τα συγκεκριμένα P και S κύματα, όπως φαίνονται στην Εικόνα 6.

2. Ναδειχθεί ότι η απόσταση  $L$  ενός σεισμού από το σειсмоγράφο δίνεται από την ακόλουθη σχέση:Z

$$L = \frac{\Delta t v_s v_p}{v_p - v_s}$$

όπου  $\Delta t$  είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων, που διαδίδονται με ταχύτητες  $v_p$  και  $v_s$  αντίστοιχα.

**Σημείωση:** Η ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων μεταβάλλεται σε σχέση με την απόσταση, επειδή κατά τη διάδοσή τους τα σεισμικά κύματα υποχρεώνονται να διασχίσουν στρώματα διαφορετικών τύπων πετρωμάτων. Γι' αυτό οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις είναι καμπύλες γραμμές και όχι ευθείες, όπως προκύπτουν στη δική σας γραφική παράσταση.



## κεφάλαιο 6



Κάρλος Σαντάνα

### ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

- Ο ήχος στον αέρα - Πηγές παραγωγής του ήχου
- Διάδοση του ήχου στον αέρα
- Μέσα διάδοσης του ήχου - Ταχύτητα του ήχου
- Ένταση του ηχητικού κύματος
- Απλοί και σύνθετοι ήχοι
- Υποκειμενικά χαρακτηριστικά των ήχων
- Οι υπέρηχοι και οι εφαρμογές τους



## 6.1. Ο ΗΧΟΣ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ – ΠΗΓΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

*Εάν τας γλώσσαις των ανθρώπων λαλώ και των αγγέλων,  
αγάπην δε μη έχω, γέγονα χαλκός ηχών ή  
κύμβαλον αλαλάζον.  
Απ. Παύλος (Α΄ Προς Κορινθίους)*

Καθημερινά ακούμε γύρω μας διάφορους ήχους: τα γέλια των συμμαθητών μας, τα τραγούδια των Metallica, τον ήχο του κομπρεσέρ, τα κορναρίσματα των αυτοκινήτων, το κλάμα ενός μωρού, τον ήχο της βροχής που πέφτει πάνω στα φύλλα των δέντρων κτλ. Όλοι αυτοί **οι ήχοι είναι κύματα που παράγονται από τις κινήσεις ή τις ταλαντώσεις κάποιου σώματος (της πηγής του ήχου).**

Στις παραπάνω περιπτώσεις οι πηγές του ήχου είναι διαφορετικές. Έτσι, ο ήχος στα διάφορα μουσικά όργανα οφείλεται είτε στην ταλάντωση κάποιων χορδών (κιθάρα, βιολί) είτε στην ταλάντωση του αέρα που περιέχεται σε ένα σωλήνα (φλογέρα, σαξόφωνο), είτε στην ταλάντωση μιας μεμβράνης (ντραμς). Ο ήχος της ανθρώπινης φωνής οφείλεται στην ταλάντωση ή στις κινήσεις των φωνητικών χορδών, ενώ ο ήχος της βροχής πάνω στα φύλλα οφείλεται στην ταλάντωση των υλικών σωματίων των φύλλων που διαταράσσονται από τις σταγόνες της βροχής. Σε κάθε περίπτωση, η ενέργεια την οποία έχει η πηγή – εξαιτίας της οποίας ταλαντώνεται - διαδίδεται κατόπιν, με κάποιο μηχανισμό, στο μέσο που την περιβάλλει (αέρας).

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 1

Συγκεντρωθείτε και προσπαθήστε να διακρίνετε και να καταγράψετε όλους τους ήχους που ακούτε γύρω σας. Κατόπιν, για κάθε ήχο, να καταγράψετε την πηγή παραγωγής του.

Θα εκπλαγείτε από την ποικιλία των ήχων και από την ποικιλία των πηγών παραγωγής τους, που υπάρχουν γύρω σας.

## 6.2. ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΗΧΟΥ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ

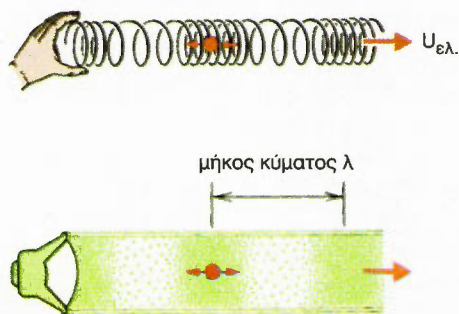
Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο ήχος, αφού παραχθεί από την πηγή παραγωγής, κατόπιν διαδίδεται στο χώρο. Αλλά με ποια μορφή και πώς μεταδίδεται ο ήχος στο χώρο που περιβάλλει την πηγή;

**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 2**

Προσπαθήστε να σκεφθείτε με ποιο τρόπο φθάνει ο ήχος στα αυτιά σας, όταν παίζετε κάποιο μουσικό κομμάτι στην κιθάρα σας, όταν κτυπάτε παλαμάκια ή όταν ακούτε ραδιοφωνο. Μπορείτε να περιγράψετε κάποιο μηχανισμό, με τον οποίο ο ήχος φθάνει από την πηγή παραγωγής του ως εσάς;

Θυμηθείτε τι είχαμε αναφέρει για τα διαμήκη κύματα.

Και στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις (δραστηριότητα 2) υπάρχει μια πηγή παραγωγής ήχου: η ταλάντωση των χορδών της κιθάρας, η ταλάντωση των μορίων των χεριών μας, όταν έρχονται σε επαφή, η ταλάντωση του διαφράγματος στο μεγάφωνο του ραδιοφώνου, όταν ένα κατάλληλο ηλεκτρικό σήμα φθάσει από τον πομπό στο δέκτη (ραδιοφωνο). Σε όλες τις περιπτώσεις παράγεται κάποιας μορφής κύμα (παλμός, κύμα μορφής αρμονικής ή μη κτλ.), το οποίο διαδίδεται στο χώρο. Γενικά, θα μπορούσαμε να πούμε ότι **ο ήχος είναι ενέργεια που διαδίδεται στο χώρο με τη μορφή διαμήκων κυμάτων**. (Εικόνα 1) Αλλά πώς γίνεται αυτό;



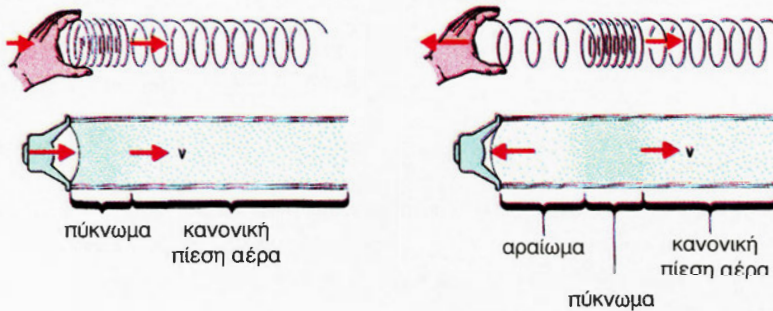
**Εικόνα 6.1**

Τα ελαστικά κύματα που διαδίδονται σε ελατήριο και τα κύματα ήχου είναι διαμήκη κύματα. (Χάριν σύγκρισης με το ελατήριο, τα ηχητικά κύματα έχουν περιοριστεί στο χώρο, όπως συμβαίνει σε ένα ηχητικό σωλήνα).

Στην περίπτωση του ραδιοφώνου, το διάφραγμα του μεγαφώνου του ταλαντώνεται ρυθμικά (διαδοχικά μία προς τα έξω και μία προς τα μέσα), εξαιτίας του ηλεκτρικού σήματος που φθάνει σ' αυτό. Τα σωμάτια του αέρα που είναι σε "επαφή" με το διάφραγμα του μεγαφώνου αρχίζουν να ταλαντώνονται. Τα σωμάτια αυτά μεταδίδουν την ταλάντωση στα γειτονικά τους και αυτά στα γειτονικά τους κ.ο.κ. Έτσι, καθώς το διάφραγμα κινείται προς τα έξω, συμπιέζει τον αέρα που βρίσκεται ακριβώς μπροστά του, όπως στην εικόνα (6.2). Αυτή η συμπίεση του αέρα αυξάνει ελαφρά την πίεση. Η περιοχή της αυξημένης πίεσης ονομάζεται **πύκνωμα** και απομακρύνεται από το μεγάφωνο με την ταχύτητα του ήχου. Το πύκνωμα του αέρα είναι α-



ντίστοιχο με το πύκνωμα των σπείρών σε ένα ελατήριο στο οποίο διαδίδεται ένα διάμηκες κύμα εικόνα (6.2α). Στη συνέχεια, το διάφραγμα του μεγαφώνου κινείται προς τα μέσα. Η προς τα μέσα κίνηση του διαφράγματος δημιουργεί μια περιοχή αραίωσης του αέρα. Στην περιοχή αυτή η πίεση του αέρα είναι ελαφρά μικρότερη από την κανονική. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **αραίωμα** και είναι αντίστοιχη με το αραίωμα των σπειρών σε ένα ελατήριο στο οποίο διαδίδεται ένα διάμηκες κύμα (εικόνα 6.2β).



**Εικόνα 6.2**

α) Όταν το διάφραγμα του μεγαφώνου κινείται προς τα έξω, δημιουργεί ένα πύκνωμα του αέρα β) Όταν το διάφραγμα κινείται προς τα μέσα, δημιουργεί ένα αραίωμα του αέρα. Το αντίστοιχο πύκνωμα και το αραίωμα στο ελατήριο, χρησιμοποιείται απλώς για σύγκριση. Στην πραγματικότητα, η ταχύτητα του κύματος στο ελατήριο είναι πολύ μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Για να το απλοποιήσουμε, και τα δύο κύματα (στο ελατήριο και στον αέρα) φαίνεται να έχουν την ίδια ταχύτητα.

Συνεπώς, το πύκνωμα του αέρα (αυξημένη πίεση) ακολουθεί το αραίωμα του αέρα (ελαττωμένη πίεση). Και τα δύο “ταξιδεύουν” στο χώρο μακριά από το μεγάφωνο με την ταχύτητα του ήχου. Σε όλη αυτή τη διαδικασία, δημιουργούνται περιοδικές αυξομειώσεις της πίεσης σε σχέση με την κανονική πίεση του αέρα (ατμοσφαιρική πίεση).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το διάφραγμα του ραδιοφώνου ταλαντώνεται κατάλληλα και παράγει περιοδικά πυκνώματα και αραιώματα αέρα, τα οποία διαδίδονται στο χώρο με την ταχύτητα του ήχου και φτάνουν στα αυτιά σας (εικόνα 6.3). Τότε, το τύμπανο των αυτιών σας αναγκάζεται να ταλαντωθεί με τον ίδιο ρυθμό και με τη βοήθεια μηχανισμού που περιέχεται στον κοχλία, παράγει τελικά ρυθμικούς ηλεκτρικούς παλμούς που, μέσω του ακουστικού νεύρου, φτάνουν στον εγκέφαλο. Ο εγκέφαλος, όταν λάβει τους ηλεκτρικούς αυτούς παλμούς, τους μεταφράζει στο αίσθημα του ήχου και έτσι έχουμε συνείδηση του τραγουδιού που ακούμε από το ραδιόφωνο. Όπως παρατηρούμε, η μετάδοση του ήχου από την πηγή παραγωγής του, έως ότου τον συνειδητοποιήσει ο εγκέφαλος του ανθρώπου, απαιτεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο και δύσκολο ταξίδι, το οποίο όμως ολοκληρώνεται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

**Εικόνα 6.3**

Σχηματική παράσταση που απεικονίζει τη διάδοση των κυμάτων ήχου από το διάφραγμα του μεγαφώνου έως το αυτί του ανθρώπου. Παρατηρήστε ότι τα σωματίδια του αέρα δε μετακινούνται με το κύμα. Απλώς ταλαντεύονται - κατά μέσο όρο- γύρω από τη θέση που θα είχαν, εάν δε διαταράσσονταν από το κύμα ήχου.

### ΑΣ ΣΚΕΦΤΟΥΜΕ

Πολλές φορές λέμε: “ακούστε τον αέρα που φυσάει”.

Τι πραγματικά ακούμε;

Την κίνηση του αέρα ή τη διαταραχή των σωματιδίων του εξαιτίας της “πρόσκρουσής” τους στα αντικείμενα με τα οποία ο αέρας έρχεται σε “επαφή” (φύλλα δένδρων, παραθυρόφυλλα κτλ.). Η διαταραχή αυτή δημιουργεί αντίστοιχες διαταραχές της πίεσης, οι οποίες φθάνουν στα αυτιά μας ως ήχος.

## 6.3 ΜΕΣΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΗΧΟΥ - ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΗΧΟΥ

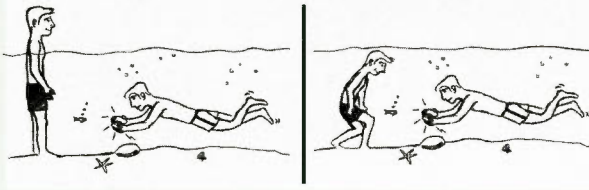
Έχουμε ήδη αναφέρει ότι **ο ήχος δημιουργείται και διαδίδεται μόνον σε διάφορα μέσα, τα οποία μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια**. Αυτό συμβαίνει, διότι για να μεταδοθεί, απαιτεί την ταλάντωση των σωματιδίων του μέσου. Είναι φανερό ότι εάν δεν υπάρχουν σωματίδια (μόρια), άρα μέσο διάδοσης, δεν μπορεί να μεταδοθεί ο ήχος. Επομένως, **ο ήχος δεν είναι δυνατόν να διαδοθεί στο “κενό”**.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 3

Παρακαλέστε ένα φίλο σας να χτυπάει σταθερά και ρυθμικά με ένα μολύβι τη μία άκρη ενός – κατά προτίμηση – μεγάλου ξύλινου τραπέζιου. Εσείς πηγαίνετε στην άλλη άκρη του τραπέζιου και ακούστε προσεκτικά τον ήχο που κάνει το μολύβι, καθώς χτυπάει το τραπέζι. α) στον αέρα και β) όταν ακουμπήσετε το αυτί σας πάνω στο τραπέζι. Παρατηρήσατε καμία διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων;

#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 4

Μια μέρα που θα είσαστε στη θάλασσα, παρακαλέστε κάποιον να χτυπάει δύο πέτρες σταθερά και ρυθμικά μέσα στο νερό. Πηγαίνετε σε απόσταση περίπου δύο μέτρων από εκείνον και προσπαθήστε να ακούσετε προσεκτικά τον ήχο που κάνουν οι πέτρες α) ενώ το κεφάλι σας είναι έξω από το νερό και β) ενώ το κεφάλι σας είναι μέσα στο νερό. Σε ποιο από τα δύο μέσα (αέρας ή νερό) ο ήχος ακούγεται καλύτερα;



Όσοι έχουν ήδη αποκτήσει εμπειρία της παραπάνω δραστηριότητας, θα έχουν παρατηρήσει ότι **ο ήχος διαδίδεται καλύτερα (απορροφάται λιγότερο) στα στερεά και στα υγρά από ότι στα αέρια.**

#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 5

Ταχύτητες του ήχου σε στερεά, υγρά και αέρια

Αφού παρατηρήσετε τις τιμές του παρακάτω πίνακα, να συγκρίνετε την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στον αέρα, στο νερό και στον χάλυβα. Μπορείτε να σκεφθείτε πού μπορεί να οφείλεται η διαφορά στην ταχύτητα του ήχου, όταν διαδίδεται σε διάφορα μέσα;

| Υλικό                        | Ταχύτητα (m/s) |
|------------------------------|----------------|
| <b>Αέρια</b>                 |                |
| Αέρας (0 °C)                 | 331            |
| Αέρας (20 °C)                | 343            |
| Διοξείδιο του άνθρακα (0 °C) | 259            |
| Οξυγόνο (0 °C)               | 316            |
| Ήλιο (0 °C)                  | 965            |
| <b>Υγρά</b>                  |                |
| Χλωροφόρμιο (20 °C)          | 1004           |
| Αιθανόλη (20 °C)             | 1162           |
| Υδράργυρος (20 °C)           | 1450           |
| Φρέσκο νερό (20 °C)          | 1482           |
| <b>Στερεά</b>                |                |
| Χαλκός                       | 5010           |
| Γυαλί (Πυρέξ)                | 5640           |
| Μόλυβος                      | 1960           |
| Ατσάλι                       | 5960           |



Όπως φαίνεται από τον πίνακα που παρατίθεται στη δραστηριότητα 5, ο ήχος στο νερό διαδίδεται με ταχύτητα τετραπλάσια από ό,τι στον αέρα, ενώ στο ατσάλι διαδίδεται με ταχύτητα σχεδόν δεκαεπτά φορές μεγαλύτερη από ό,τι στον αέρα. Η διαφορά αυτή είναι εύκολο να κατανοηθεί εάν θυμηθούμε ότι για να διαδοθεί ο ήχος απαιτεί την ύπαρξη κάποιου μέσου, αφού με τις ταλαντώσεις των μορίων του μέσου μεταδίδεται η κυματική κίνηση στο χώρο. Όσο λοιπόν πιο πυκνή είναι η διάταξη των σωματίων σε ένα μέσο και ισχυρότερη η αλληλεπίδρασή τους, τόσο ευκολότερα (και γρηγορότερα) μεταδίδεται η κυματική κίνηση από το ένα σωματίο στα γειτονικά του σωματίδια. Είναι γνωστό ότι τα περισσότερα στερεά έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα και ισχυρότερες δυνάμεις συνοχής από τα υγρά και αντίστοιχα τα υγρά από τα αέρια. Γι' αυτό το λόγο ο ήχος μεταδίδεται πιο γρήγορα στα στερεά από όσο στα υγρά και αντίστοιχα πιο γρήγορα στα υγρά από όσο στα αέρια.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 6

Σε περίπτωση καταιγίδας έχετε σίγουρα προσέξει ότι η λάμψη της αστραπής έρχεται σε σας πολύ γρηγορότερα από ό,τι ο ήχος της βροντής, αν και τα δύο φυσικά φαινόμενα παράγονται ταυτόχρονα. Πού νομίζετε ότι οφείλεται αυτό; (Εικ. 6.4)

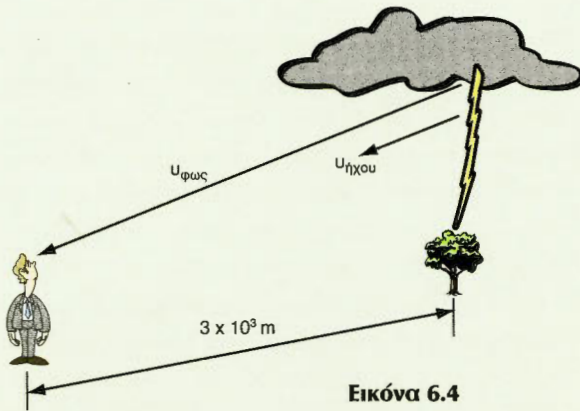
Το φως έχει πολύ μεγαλύτερη ταχύτητα από τον ήχο. Πράγματι, το φως κινείται με ταχύτητα  $v_{\text{φωσ}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , ενώ ο ήχος με ταχύτητα  $v_{\text{ήχου}} = 343 \text{ m/s}$ . Η διαφορά είναι τεράστια και γι' αυτό το λόγο θεωρούμε ότι το φως φθάνει σχεδόν ακαριαία σε μας. Πράγματι, εάν απέχουμε από την καταιγίδα  $S = 3 \text{ km} = 3 \times 10^3 \text{ m}$ , τότε το φως φθάνει σε μας σε χρόνο

$$t_{\text{φ}} = \frac{s}{v} = \frac{3 \times 10^3 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \approx 10^{-5} \text{ s}, \text{ δηλαδή σε χρόνο που δε γίνεται αντιλη-}$$

πτός από τις αισθήσεις μας. Αντίθετα, ο ήχος θα φθάσει σε χρόνο

$$t_{\text{ηχ}} = \frac{s}{v} = \frac{3 \times 10^3 \text{ m}}{343 \text{ m/s}} = 9 \text{ s}, \text{ δηλαδή σε χρόνο ο οποίος μπορεί να μετρηθεί.}$$





Μπορούμε να υπολογίσουμε την απόστασή μας από μία καταιγίδα, μετρώντας τον αριθμό των δευτερολέπτων που μεσολαβούν μεταξύ της αστραπής και της βροντής. Κατόπιν, από τον τύπο  $l = vt$  μπορούμε να υπολογίσουμε την απόσταση.

Γενικά, η ταχύτητα του ήχου στον αέρα εξαρτάται από τον άνεμο, τη θερμοκρασία και την υγρασία και όχι από την ένταση ή τη συχνότητά του. Ως εκ τούτου, όλοι οι ήχοι στις ίδιες συνθήκες διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, η οποία σε θερμοκρασία δωματίου (περίπου  $20^\circ\text{C}$ ) στον αέρα είναι  $343\text{ m/s}$ .

## 6.4 ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΗΧΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

*Κι ήταν σκληρή η σιγή τριγύρω μας  
κι αχάραχτη στο γυαλί του γαλαξίου  
Γ. Σεφέρης (Ημερολόγιο Καταστροφών Γ')*

Τα ηχητικά κύματα, όπως όλα τα κύματα, μεταφέρουν ενέργεια. Η ενέργεια αυτή εκδηλώνεται με διάφορους τρόπους: με την ταλάντωση του ακουστικού τυμπάνου, όταν στο αυτί φθάνει κάποιος ήχος, ή με το σπάσιμο των τζαμιών που μπορεί να ακολουθήσει έναν πολύ ισχυρό κοντινό κρότο.

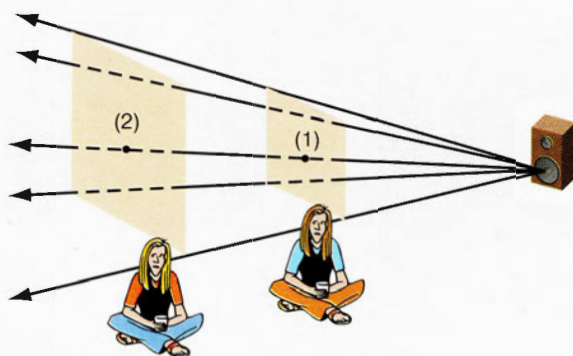
**Το ποσόν της ενέργειας που μεταφέρεται ανά δευτερόλεπτο από ένα ηχητικό κύμα ονομάζεται ισχύς του κύματος** και μετρείται σε joule ανά δευτερόλεπτο δηλαδή watt (W) στο SI και ισούται με την ισχύ της πηγής.

$$P = \frac{W}{t} \quad (1)$$

Τα ηχητικά κύματα που ξεκινούν από μία ηχητική πηγή, καθώς περνά ο χρόνος, απλώνονται στο χώρο και διασπάζουν κάθετα ολοένα και μεγαλύτε-

ρες (νοητές) σφαιρικές επιφάνειες (εικ. 6.5). Συνεπώς, εάν υποθέσουμε ότι τοποθετούμε σε διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή, κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, μια νοητή επιφάνεια συγκεκριμένου εμβαδού, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι, όσο απομακρυνόμαστε από την ηχητική πηγή, τόσο μικρότερο μέρος της αρχικής ενέργειας διασχίζει αυτή την επιφάνεια. Αυτό το αντιλαμβανόμαστε πολύ καθαρά στην καθημερινή ζωή, όπου όσο πιο κοντά σε μια ηχητική πηγή βρισκόμαστε, τόσο πιο έντονα ακούμε τον ήχο της. Πράγματι, το εμβαδόν της επιφάνειας του ανθρώπινου αυτιού είναι συγκεκριμένο και όσο πιο κοντά στην ηχητική πηγή βρισκόμαστε, τόσο περισσότερη ενέργεια ανά δευτερόλεπτο πέφτει πάνω στο αυτί μας.

Ο συνδυασμός της ισχύος του ηχητικού κύματος και του εμβαδού της επιφάνειας από την οποία περνά το κύμα διαμορφώνουν την έννοια της **έντασης του ηχητικού κύματος**.



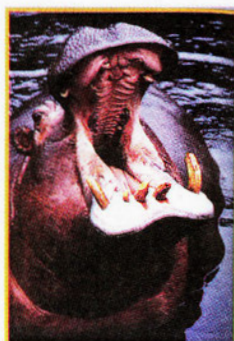
**Εικόνα 6.5**

Η ισχύς που διέρχεται από τις επιφάνειες (1) και (2) είναι ίδια. Από το 1  $\text{cm}^2$  όμως της επιφάνειας 2 διέρχεται λιγότερη ισχύς γι' αυτό και το κορίτσι 2 θα ακούει ασθενέστερα τη μουσική.

Ένταση κύματος  $I$ , σε μια επιφάνεια  $A$  τοποθετημένη κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, είναι το πηλίκο της ισχύος  $P$  του ηχητικού κύματος δια του εμβαδού  $A$  αυτής της επιφάνειας: (εικόνα 6)

$$I = \frac{P}{A} \quad (2)$$

Η μονάδα της έντασης είναι  $\text{W} / \text{m}^2$ .



**Εικόνα 6.6**

Η έννοια της έντασης συνδέει την έννοια της ισχύος ηχητικού κύματος με την έννοια του εμβαδού της επιφάνειας από την οποία περνά αυτή η ισχύς. Το ουρλιαχτό ενός αρσενικού ιπποπόταμου έχει τόσο ένταση όσο και η δυνατότερη ροκ συναυλία.

□ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Ένα ηχείο εκπέμπει ήχο ισχύος  $6 \times 10^{-5} \text{ W}$  (Εικόνα 6.5). Ένα μέρος αυτής της ενέργειας περνά κάθετα από τις επιφάνειες 1 και 2. Τα εμβαδά αυτών των επιφανειών είναι  $A_1 = 3,0 \text{ m}^2$  και  $A_2 = 9,0 \text{ m}^2$ . Να υπολογίσετε την ένταση του ήχου σε κάθε επιφάνεια και να εξηγήσετε γιατί η ακροάτρια 2 ακούει πιο ασθενή ήχο από την ακροάτρια 1.

**Λύση:**

Η ένταση του ήχου σε κάθε επιφάνεια υπολογίζεται από τη σχέση (2)

$$\text{Επιφάνεια 1: } I_1 = \frac{P}{A_1} = \frac{6 \times 10^{-5} \text{ W}}{3,0 \text{ m}^2} = 2 \times 10^{-5} \text{ W / m}^2$$

$$\text{Επιφάνεια 2: } I_2 = \frac{P}{A_2} = \frac{6 \times 10^{-5} \text{ W}}{9,0 \text{ m}^2} = 0,66 \times 10^{-5} \text{ W / m}^2$$

$$\frac{I_1}{I_2} = 3 \Rightarrow I_1 = 3 I_2$$

Η ένταση του ήχου είναι μικρότερη στη μεγαλύτερη επιφάνεια, διότι η ίδια ισχύς περνάει από επιφάνεια τρεις φορές μεγαλύτερη. Το αυτί της ακροάτριας έχει συγκεκριμένη επιφάνεια και επομένως, δέχεται λιγότερη ισχύ, εκεί όπου η ένταση είναι μικρότερη. Άρα η ακροάτρια 2 δέχεται λιγότερη ηχητική ισχύ από την ακροάτρια 1. Αφού λοιπόν λιγότερη ισχύς φτάνει στο αυτί της ακροάτριας 2, ο ήχος θα ακούγεται πιο ασθενής.

Εάν η ηχητική πηγή εκπέμπει ήχο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, η ένταση του ήχου σε κάθε σημείο αποδεικνύεται ότι είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Πράγματι, εάν υποθέσουμε ότι η ηχητική πηγή βρίσκεται στο κέντρο μιας νοητής σφαίρας, σε κάποια χρονική στιγμή  $t$ , η εκπεμπόμενη ηχητική ισχύς  $P$  θα έχει περάσει από μια σφαιρική επιφάνεια εμβαδού  $A = 4\pi r^2$ . Τότε, η ηχητική ένταση σε απόσταση  $r$  θα είναι:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (3)$$

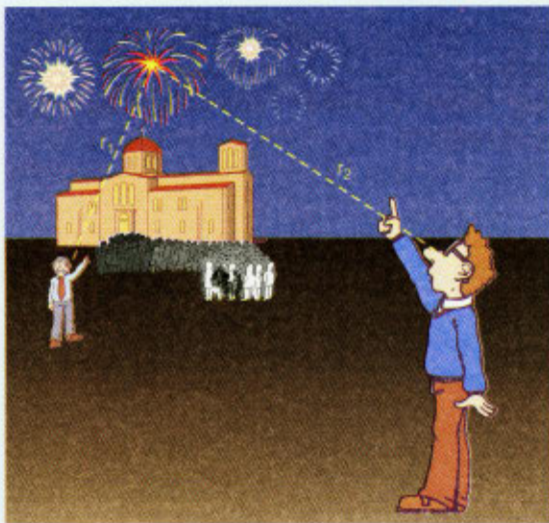
Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, εάν η απόσταση διπλασιαστεί, η ένταση του ήχου σ' αυτή την απόσταση θα υποτετραπλασιαστεί, δεδομένου ότι η επιφάνεια τετραπλασιάζεται.



Θα πρέπει να τονιστεί ότι η σχέση (3) έχει τους περιορισμούς της στην πραγματική ζωή. Έτσι, ισχύει μόνο, εφόσον δεν υπάρχουν τοίχοι, οροφές, πατώματα, έπιπλα κτλ., ώστε να αντανακλάται ο ήχος και τα ηχητικά κύματα να περνούν από την ίδια επιφάνεια περισσότερες από μία φορές.

### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

Τη νύχτα της Ανάστασης ένα πυροτέχνημα σκάει στον ουρανό (Εικόνα 6.7). Τον ήχο από την έκρηξη του πυροτεχνήματος ακούνε δύο άνθρωποι που βρίσκονται σε αποστάσεις  $r_1 = 400 \text{ m}$  και  $r_2 = 1200 \text{ m}$ . Εάν η ένταση που ακούει ο άνθρωπος 2 είναι:  $I_2 = 0,8 \text{ W/m}^2$ , ποια θα είναι η ένταση που ακούει ο άνθρωπος 1; (Υποθέτουμε ότι ο ήχος διαχέεται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και ότι αγνοούνται οι ανακλάσεις στο έδαφος).



**Εικόνα 6.7**

Εάν η έκρηξη ενός πυροτεχνήματος εκπέμπει τον ήχο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε η ένταση σε κάθε απόσταση  $r$  από την ηχητική πηγή είναι

$$I = \frac{P}{4\pi r^2},$$

όπου  $P$ , η ισχύς του ήχου της έκρηξης.

### Λύση

Ο άνθρωπος 1 είναι 3 φορές πιο κοντά στην έκρηξη από τον άνθρωπο 2. Επομένως, η ηχητική ένταση που ακούει ο 1 θα είναι  $3^2 = 9$  φορές μεγαλύτερη από εκείνη που ακούει ο 2.

Ο λόγος των ηχητικών εντάσεων, σύμφωνα με την εξίσωση (3), είναι:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{P}{4\pi r_1^2}}{\frac{P}{4\pi r_2^2}} \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} = \frac{1200 \text{ m}^2}{400 \text{ m}^2} = 9$$

Συνεπώς  $I_1 = 9I_2 = 9 \times 0,8 \text{ W/m}^2 = 7,2 \text{ W/m}^2$



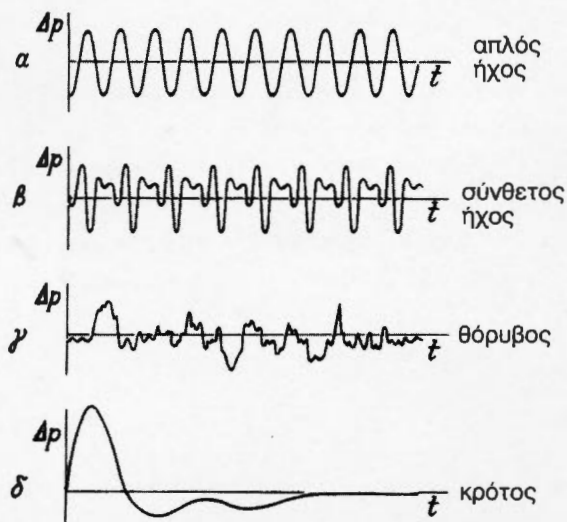
Η ένταση του ήχου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι ανάλογη της ηχητικής ισχύος, η οποία είναι ανάλογη της ενέργειας που μεταφέρεται από το ηχητικό κύμα. Όσο μεγαλύτερη ενέργεια όμως μεταφέρει ένα ηχητικό κύμα, τόσο τα υλικά σημεία του μέσου στο οποίο διαδίδεται θα κάνουν ταλαντώσεις μεγαλύτερου πλάτους. Αποδεικνύεται ότι **η ένταση του ήχου σε ένα σημείο του μέσου διάδοσης είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους ταλάντωσης των υλικών σημείων στο σημείο αυτό** και μπορεί να μετρηθεί με διάφορες συσκευές, όπως π.χ. ο παλμογράφος.

## 6.5 ΑΠΛΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΟΙ ΗΧΟΙ

*Μαζί σου επαλήθευσα τη Φυσική μου  
με χιλιάδες κλειδοκύμβαλα με ανάερα φλάουτα.  
N. Καρούζος (Ερυθρογράφος)*

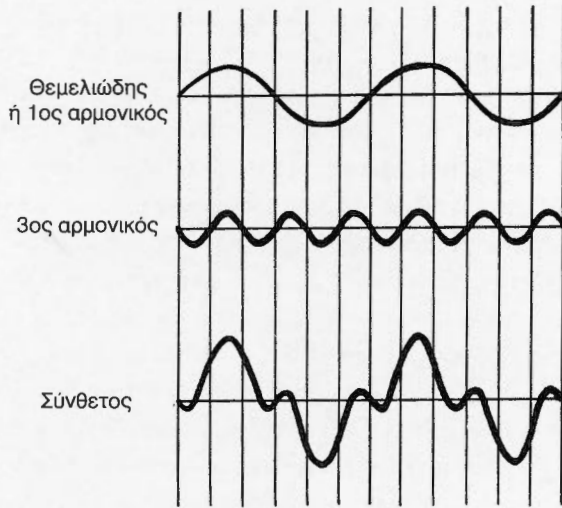
Τους ήχους τους διακρίνουμε σε **μη περιοδικούς** και **περιοδικούς**. Στους **μη περιοδικούς** ανήκουν ο **κρότος** και ο **θόρυβος** (εικόνα 6.9γ και δ). Στους **περιοδικούς** ανήκουν οι ήχοι τους οποίους μελετήσαμε έως τώρα. Πράγματι, όπως έχουμε ήδη αναφέρει **ήχους ονομάζουμε τις περιοδικές μεταβολές της πίεσης του αέρα (περιοδικά κύματα), που η συχνότητά τους βρίσκεται στην ακουστή περιοχή των συχνοτήτων (20 Hz – 20 000 Hz)**. Όμως οι ήχοι τους οποίους ακούμε καθημερινά, σπάνια αποτελούνται από μία μόνο συχνότητα. Συνήθως, είναι το αποτέλεσμα της σύνθεσης περισσότερων της μιας συχνοτήτων. Γι' αυτό το λόγο, οι **περιοδικοί ήχοι** διακρίνονται σε **απλούς** και **σύνθετους**.

**Απλός ήχος είναι ο ήχος του οποίου η μεταβολή της πίεσης (η ταλάντωση των σωματίων του), κατά τη διάδοσή του στον αέρα, είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου, δηλαδή το κύμα έχει τη μορφή του απλού αρμονικού κύματος (ημιτονοειδής συνάρτηση του χρόνου) που επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα με αμείωτο πλάτος** (εικόνα 6.9α). Ο απλός ήχος χαρακτηρίζεται από τη συχνότητά του και το πλάτος της περιοδικής μεταβολής της πίεσης ή της ταλάντωσης των σωματίων του αέρα στον οποίο διαδίδεται. Ο απλός ήχος χαρακτηρίζεται από μία μόνο συχνότητα. Έναν τέτοιο ήχο παράγει το διαπασών (εικόνα 6.9α).

**Εικόνα 6.9**

Μεταβολή της πίεσης του αέρα, κατά τη διάδοση ηχητικού κύματος, σε συνάρτηση με το χρόνο για α) απλό ήχο, β) σύνθετο ήχο, γ) θόρυβο και δ) κρότο.

**Σύνθετος ήχος είναι ο ήχος στον οποίο η μεταβολή της πίεσης του αέρα είναι περιοδική (επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα), αλλά δεν είναι αρμονική (εικόνα 6.9β).** Ο σύνθετος ήχος αποτελείται από πολλούς απλούς ήχους, των οποίων οι συχνότητες είναι ακέραια πολλαπλάσια μίας συχνότητας. Η **μικρότερη** αυτή **συχνότητα** ονομάζεται **θεμελιώδης** και ο ήχος που αντιστοιχεί σ' αυτήν λέγεται **απλός ή πρώτος αρμονικός ή θεμελιώδης**. Ο σύνθετος ήχος χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα και το πλάτος καθενός από τους απλούς ήχους από τους οποίους αποτελείται. Μεταξύ αυτών κυριαρχεί ο πρώτος αρμονικός. Οι ήχοι που αντιστοιχούν στις συχνότητες των άλλων – εκτός του πρώτου αρμονικού – απλών ήχων λέγονται **ανώτεροι αρμονικοί**. (εικόνα 6.10).

**Εικόνα 6.10**

Ο απλός ήχος και οι ανώτεροι αρμονικοί συντίθενται για να δώσουν ένα σύνθετο κύμα

## 6.6 ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΗΧΩΝ

Ως τώρα έχουν αναλυθεί διάφορες φυσικές ιδιότητες του ήχου και έχουν οριστεί φυσικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον ήχο, όπως η συχνότητα και η ένταση. Όμως ο ήχος σχετίζεται με μια από τις σημαντικότερες αισθήσεις του ανθρώπου, την ακοή, η οποία τον πληροφορεί κάθε στιγμή για το γύρω χώρο του. Οι πληροφορίες αυτές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το πώς ο κάθε άνθρωπος αντιλαμβάνεται τους ήχους. Συχνά, τον ίδιο ήχο διαφορετικοί άνθρωποι τον αντιλαμβάνονται με διαφορετικό τρόπο. Επιπλέον, το ανθρώπινο αυτί δεν είναι ένα απλό φυσικό όργανο που απλώς καταγράφει τις φυσικές “αντικειμενικές” ιδιότητες του ήχου. Απεναντίας, είναι ένα ευαίσθητο όργανο που μεταφέρει στον εγκέφαλο πλούσιες πληροφορίες - για κάθε ήχο - με ένα σύνθετο τρόπο. Έτσι, παράλληλα με τις φυσικές “αντικειμενικές” ιδιότητες του ήχου, υπάρχουν και οι υποκειμενικές ιδιότητες, που αναφέρονται στον τρόπο με τον οποίο ο κάθε άνθρωπος αντιλαμβάνεται αυτές τις φυσικές ιδιότητες.

### 6.6.1 Το ύψος του ήχου

Το **ύψος** του ήχου αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται τη **συχνότητα** του ηχητικού κύματος. Εάν περιοριστούμε στη μελέτη των ήχων μίας συχνότητας (απλών ήχων) κάθε φορά, θα παρατηρή-

σουμε ότι, όταν η συχνότητά τους είναι μεγάλη (γρήγορες ταλαντώσεις της ηχητικής πηγής), τότε ο ήχος που αντιλαμβανόμαστε είναι οξύς (πρίμος): ψηλός και διαπεραστικός (υψηλή νότα). Εάν όμως η συχνότητα των ηχητικών κυμάτων είναι μικρή (αργές ταλαντώσεις της ηχητικής πηγής), τότε ο ήχος που αντιλαμβανόμαστε είναι βαθύς (μπάσος): χαμηλός και βαθύς (χαμηλή νότα). Έτσι, αλλάζοντας τη συχνότητα ταλάντωσης της ηχητικής πηγής, παίρνουμε διαφορετικές νότες.

Οι μουσικοί επιτυγχάνουν αλλαγή της συχνότητας, αλλάζοντας το μήκος, την τάση ή το πάχος του ταλαντούμενου αντικειμένου. Έτσι, στα έγχορδα η επιθυμητή συχνότητα (νότα) επιτυγχάνεται: α) με την κατάλληλη επιλογή της χορδής (διαφορετικό πάχος – μάζα της χορδής), β) με τη ρύθμιση της τάσης της χορδής (κούρδισμα του οργάνου) και γ) με τη μεταβολή του μήκους κάθε χορδής (πάτημα με το δάχτυλο στο κατάλληλο μήκος). Στα πνευστά, αντίστοιχα, η επιθυμητή συχνότητα (νότα) επιτυγχάνεται και με τη μεταβολή του μήκους της ταλαντούμενης στήλης του αέρα (με το άνοιγμα ή το κλείσιμο των οπών του οργάνου).

**Το αυτί του μέσου ανθρώπου μπορεί να συλλάβει ήχους που έχουν συχνότητα από 20 Hz έως 20 000 Hz.** Όσο περνάει όμως η ηλικία περιορίζεται η ικανότητα του ανθρώπου να ακούει ήχους υψηλής συχνότητας. Έτσι, ένας άνθρωπος μέσης ηλικίας δεν μπορεί να ακούσει ήχους που έχουν συχνότητα μεγαλύτερη των 14 000 Hz.

## 6.6.2 Ακουστότητα

Η **ακουστότητα** αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται την **ένταση** του ήχου. Πράγματι, όταν τα ηχητικά κύματα φθάσουν στο ανθρώπινο αυτί, ξεκινά μια διαδικασία, κατά την οποία ένα κατάλληλο νευρικό ερέθισμα φθάνει στον ανθρώπινο εγκέφαλο, ο οποίος το ερμηνεύει ως δυνατό ή ως ασθενή ήχο, ανάλογα με την ένταση του ηχητικού κύματος. Ήχοι μεγάλης έντασης ερμηνεύονται ως δυνατοί ήχοι και ήχοι μικρής έντασης ερμηνεύονται ως ασθενείς ήχοι. Όμως, η ένταση δεν είναι ανάλογη της ακουστότητας, διότι εάν διπλασιαστεί η ένταση δε διπλασιάζεται και η ακουστότητα.

Η ακουστότητα ανήκει στα “υποκειμενικά” γνωρίσματα του ήχου. Ο άνθρωπος αντιλαμβάνεται κατά έναν πολύ περίεργο τρόπο την ένταση του ήχου. Αυτό φαίνεται καθαρά από το παρακάτω παράδειγμα: εάν μία μέρα καθώς ακούτε ραδιόφωνο, αποφασίσετε να το “δυναμώσετε”, έως το σημείο που σας δίνεται η εντύπωση ότι ακούτε τον ήχο του δύο φορές δυνατότερα από ότι πριν, να γνωρίζετε ότι η ένταση του ήχου αυξήθηκε περίπου περίπου 100 φορές, ενώ εάν το “δυναμώσετε” και άλλο έως ότου να



νομίζετε ότι ακούτε τον ήχο του τρεις φορές δυνατότερα, η ένταση του ήχου θα έχει αυξηθεί περίπου 1000 φορές. **Στην καθημερινή ζωή, οι δυνατότεροι ήχοι τους οποίους ο άνθρωπος μπορεί να ανεχθεί - χωρίς να νιώσει πόνο στο αυτί - έχουν ένταση ένα τρισεκατομμύριο φορές μεγαλύτερη από την ένταση των πιο ασθενών ήχων που μπορεί να ακούσει.** Η αίσθησή όμως που έχει ως προς τη διαφορά των δύο ακραίων – ως προς την έντασή τους - ήχων (των πιο δυνατών και των πιο ασθενών) είναι πολύ διαφορετική, δηλαδή αισθάνεται ότι η διαφορά τους είναι πολύ μικρότερη. Συγκεκριμένα, **ο ανθρώπινος εγκέφαλος αντιλαμβάνεται ότι ο πιο δυνατός ήχος διαφέρει από τον πιο ασθενή μόνον 120 φορές.** Παρατηρούμε, δηλαδή ότι αλλιώς “μετράει” η Φυσική την ένταση του ήχου και αλλιώς την “μετράει” (υποκειμενικά) ο ανθρώπινος εγκέφαλος.

Αναλογιστείτε τι θα συνέβαινε, αν δε λειτουργούσε έτσι ο ανθρώπινος εγκέφαλος και το αποτέλεσμα του ηχητικού ερεθίσματος ήταν ανάλογο με την έντασή του. Θα μπορούσαμε να ακούσουμε ένα φάσμα ήχων του οποίου η διαφορά μεταξύ των δύο ακραίων τιμών θα ήταν ένα τρισεκατομμύριο φορές. Αυτό θα δημιουργούσε σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία του εγκεφάλου. Οι τεράστιες διαφορές στις εντάσεις των ήχων εξομαλύνονται με τη δυνατότητα του εγκεφάλου να τις αντιλαμβάνεται λογαριθμικά και όχι αναλογικά. Έτσι, ο άνθρωπος τις τεράστιες διαφορές, ως προς την ένταση, μεταξύ των ήχων τις “αντιλαμβάνεται” ως πολύ μικρότερες.

Σε έναν ήχο συχνότητας 1000 Hz, η μικρότερη ένταση που μπορεί το ανθρώπινο αυτί να ανιχνεύσει είναι  $1 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Αυτή η ένταση αποτελεί το κατώφλι της ακουστότητας. Στο άλλο άκρο, η συνεχής έκθεση σε εντάσεις μεγαλύτερες του  $1 \text{ W/m}^2$  (όριο πόνου) μπορεί να είναι επώδυνη και να οδηγήσει σε μόνιμες βλάβες. Το ανθρώπινο αυτί έχει την ικανότητα να αντιλαμβάνεται μεγάλη περιοχή εντάσεων.

Η μονάδα με την οποία “μετράμε” (αξιολογούμε) την ακουστότητα του ήχου είναι το ντεσιμπέλ (db).

### Σύγκριση των ηχητικών εντάσεων: το ντεσιμπέλ

Το ντεσιμπέλ (db) είναι η μονάδα μέτρησης που χρησιμοποιείται για τη σύγκριση δύο εντάσεων ήχου, η μία των οποίων, συνήθως, χρησιμοποιείται ως ένταση αναφοράς. Η απλούστερη μέθοδος για να συγκρίνουμε τις εντάσεις δύο τυχαίων ήχων είναι να υπολογίσουμε το λόγο τους. Για παράδειγμα, εάν συγκρίνουμε την ένταση  $I = 6 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$  με την  $I_0 = 2 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ , θα υπολογίσουμε αρχικά το λόγο  $I / I_0 = 3$  και θα συμπεράνουμε ότι η ένταση  $I$  είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από την  $I_0$ .

Όμως, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, ο ανθρώπινος εγκέφαλος αντιδρά με έναν ιδιαίτερο τρόπο στην ένταση του ήχου. Εξαιτίας αυτής της ιδιομορφίας ως πιο κατάλληλη να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση δύο εντάσεων κρίθηκε η λογαριθμική κλίμακα. Έτσι, **το επίπεδο  $\beta$  της έντασης** ορίζεται ως:

$$\beta \text{ (σε ντεσιμπέλ)} = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad (4)$$

όπου " $\log_{10}$ " αναφέρεται στο λογάριθμο με βάση 10.  $I_0$  είναι η ένταση του επιπέδου αναφοράς με την οποία συγκρίνεται η  $I$  και πολλές φορές είναι το όριο ακουστότητας:  $I_0 = 1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2$ . Για παράδειγμα: για έναν ήχο έντασης  $I = 8,0 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$  το επίπεδο έντασης είναι:

$$\beta = 10 \log_{10} \left( \frac{8,0 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2}{1,0 \times 10^{-12} \text{ W/m}^2} \right) = 10 \log_{10} 8 \times 10^7 = 70 \times (0,9) = 63 \text{ db}$$

Συνεπώς, η ένταση  $I$  είναι 63 ντεσιμπέλ μεγαλύτερη του  $I_0$ .

**Πρέπει να σημειωθεί** ότι: το dB είναι καθαρός αριθμός, και επίσης, εάν

$$I = I_0, \text{ τότε } \beta = 10 \log_{10} \left( \frac{I_0}{I} \right) = 10 \log_{10} 1 = 0. \text{ Επομένως, επίπεδο έντα-}$$

σης 0 ντεσιμπέλς δε σημαίνει ότι η ηχητική ένταση είναι 0, σημαίνει ότι  $I = I_0$ .

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τη σχέση μεταξύ ακουστότητας, έντασης και ντεσιμπέλ για κάποιους γνωστούς ήχους. Ως επίπεδο αναφοράς θεωρήθηκε το κατώφλι ακουστότητας.

Πίνακας

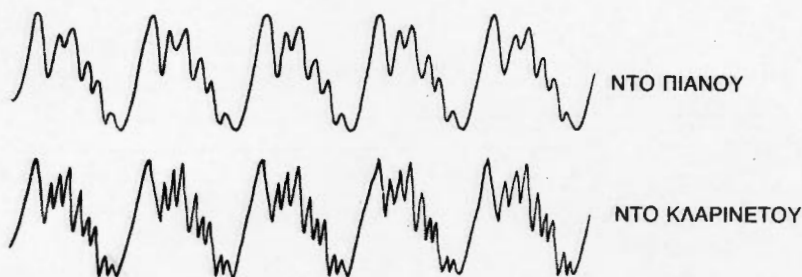
|                                                         | Ένταση I (W/m <sup>2</sup> ) | Επίπεδο (db) Έντασης |
|---------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|
| Κατώφλι ακουστότητας                                    | $1,0 \times 10^{-12}$        | 0                    |
| Θρόισμα φύλλων                                          | $1,0 \times 10^{-11}$        | 10                   |
| Ψίθυρος                                                 | $1,0 \times 10^{-10}$        | 20                   |
| Κανονική συζήτηση (1m)                                  | $3,2 \times 10^{-6}$         | 65                   |
| Μέσα σε αυτοκίνητο σε ώρα μεγάλης κυκλοφοριακής κίνησης | $1,0 \times 10^{-4}$         | 80                   |
| Αυτοκίνητο χωρίς σιλανσιέ                               | $1,0 \times 10^{-2}$         | 100                  |
| Ζωντανή ροκ συναυλία                                    | 1,0                          | 120                  |
| Όριο πόνου                                              | 10                           | 130                  |

### 6.6.3 Χροιά

Ο κάθε άνθρωπος όταν μιλάει ή τραγουδάει, έχει το δικό του χαρακτηριστικό ήχο, τη δικιά του φωνή, που είναι διαφορετική από τις άλλες φωνές και τον κάνει να ξεχωρίζει από τους άλλους. Παρόμοια το κάθε μουσικό όργανο έχει το δικό του χαρακτηριστικό ήχο. Έτσι, η ίδια νότα ακούγεται αλλιώς στο πιάνο και αλλιώς στο βιολί. **Αυτή η ιδιαιτερότητα του ήχου που χαρακτηρίζει τη φωνή του κάθε ανθρώπου και τον ήχο κάθε μουσικού οργάνου ονομάζεται ηχόχρωμα ή χροιά.**

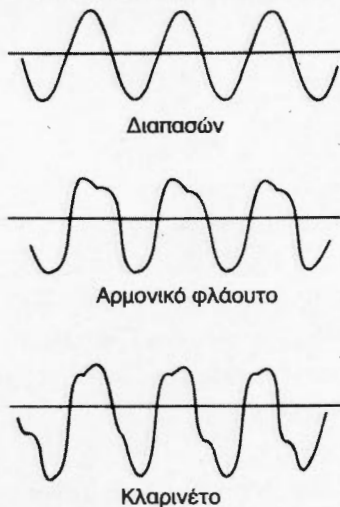
Πού όμως οφείλεται αυτή η ιδιαιτερότητα του κάθε ήχου;

**Η χροιά οφείλεται στο γεγονός ότι οι μουσικοί ήχοι δεν είναι απλοί (δεν αποτελούνται από μία μόνον συχνότητα) αλλά είναι σύνθετοι, δηλαδή είναι προϊόντα σύνθεσης πολλών συχνοτήτων.** Ο κάθε μουσικός ήχος καθορίζεται κυρίως από τη βασική ή θεμελιώδη συχνότητα (τη χαμηλότερη συχνότητα). Όμως, τη χροιά σε έναν ήχο τη δίνουν οι υψηλότερες συχνότητες των ανωτέρων αρμονικών, που είναι ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας. Έτσι, μία νότα στο πιάνο και η ίδια νότα στο κλαρινέτο έχουν τον ίδιο θεμελιώδη, την ίδια βασική συχνότητα, έχουν όμως διαφορετικούς ανώτερους αρμονικούς (εικόνα 6.11).

**Εικόνα 6.11**

Η χροιά του ήχου στο πιάνο και στο κλαρινέτο για την ίδια νότα.

Απλούς ήχους (ήχους μίας μόνον συχνότητας) μπορεί να παράγει το διαπασών. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται ήχοι ίδιας συχνότητας από ένα διαπασών και από δύο μουσικά όργανα (εικόνα 6.12).

**Εικόνα 6.12**

Ήχοι ίδιας συχνότητας από: α) ένα διαπασών (απλός ήχος), β) ένα φλάουτο (σύνθετος ήχος) και γ) ένα κλαρινέτο (σύνθετος ήχος)

## 6.7 ΟΙ ΥΠΕΡΗΧΟΙ ΚΑΙ ΟΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΟΥΣ

Οι υπέρηχοι είναι ήχοι υψηλής συχνότητας, μεγαλύτερης των 20 000 Hz. Οι υπέρηχοι δε γίνονται αντιληπτοί από τον άνθρωπο, διότι βρίσκονται πέρα από την περιοχή του φάσματος των ακουστών ήχων. Όμως, οι υπέρηχοι γίνονται αντιληπτοί από τα αισθητήρια όργανα της ακοής πολλών ζώων, τα οποία ακούνε ήχους διαφορετικής περιοχής συχνοτήτων από ό,τι ο άνθρωπος. Έτσι, τα δελφίνια, οι φάλαινες, οι ρινόκεροι, οι νυχτερίδες και άλλα



ζώα χρησιμοποιούν τους υπέρηχους για να συνεννοούνται με τους συντρόφους τους, για να πλοηγούνται στο χώρο, για να εντοπίζουν την τροφή τους κτλ. (εικόνα 6.13). Χρησιμοποιούνται επίσης από τον άνθρωπο σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές.



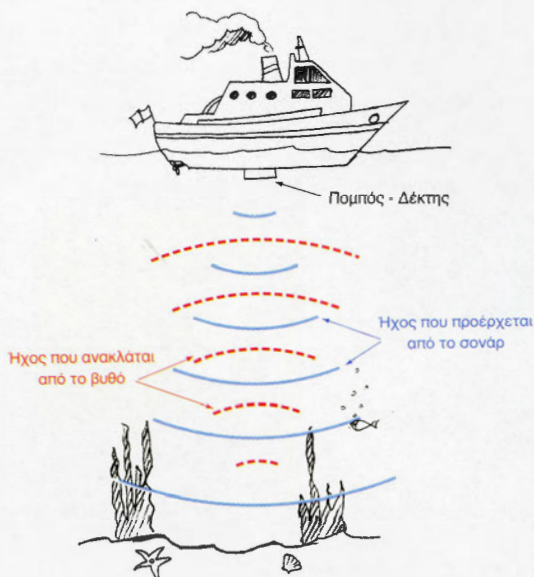
**Εικόνα 6.13**

Οι ρινόκεροι επικοινωνούν και με υπόηχους ενώ τα δελφίνια με υπέρηχους.

### 6.7.1 Σόναρ (ηχοβολιστικές συσκευές)

Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται στις συσκευές αυτές είτε για την ανίχνευση σωμάτων που κινούνται υποβρυχίως είτε για την εξέταση της μορφολογίας του βυθού είτε για τον προσδιορισμό του βάθους σε ένα συγκεκριμένο σημείο.

Μια μονάδα σόναρ αποτελείται κυρίως από έναν πομπό και ένα δέκτη υπέρηχων. Τοποθετείται κάτω από την καρίνα του πλοίου, όπως δείχνει το σχήμα (εικόνα 6.14). Το σόναρ λειτουργεί ως εξής: ο πομπός εκπέμπει ένα σύντομο παλμό υπέρηχων, ο οποίος ανακλάται, επιστρέφει και ανιχνεύεται από το δέκτη. Με αυτό τον τρόπο, προσδιορίζεται το βάθος: α) από το συνολικό χρόνο  $t$  που κάνει ο παλμός κατά τη διαδρομή του από τον πομπό στο βυθό και από εκεί στο δέκτη και β) από την ταχύτητα  $υ$  του ήχου στο νερό, η οποία θεωρείται γνωστή. Τότε, το βάθος  $l$  ( $2l=ut$ ) καταγράφεται αυτόματα στο κατάλληλο όργανο μέτρησης.

**Εικόνα 6.14**

Το σόναρ χρησιμοποιεί τους υπερήχους, για να υπολογίζει το βάθος της θάλασσας σε μια περιοχή ή για να προσδιορίζει τη μορφολογία του βυθού.

### 6.7.2 Οι υπέρηχοι στην ιατρική

Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην Ιατρική για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς. Για το σκοπό αυτό έχουν κατασκευαστεί κατάλληλες συσκευές. Σε γενικές γραμμές, η λειτουργία των συσκευών αυτών μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Ένας παλμός υψηλής συχνότητας εκπέμπεται από τον πομπό της συσκευής και κατευθύνεται στο σώμα του ανθρώπου και ειδικότερα στην περιοχή εκείνη του σώματος που πρόκειται να εξεταστεί. Όπως και στο σόναρ, ο παλμός αυτός, αφού εισέλθει στο σώμα, ανακλάται πάνω σε διάφορα “εμπόδια”. Τα “εμπόδια” αυτά μπορεί να είναι, για παράδειγμα, οι ιστοί που περιβάλλουν τα όργανα του σώματος και τα διαχωρίζουν από το γύρω χώρο. Οι ιστοί έχουν διαφορετική πυκνότητα τόσο από το εσωτερικό των οργάνων τα οποία περικλείουν όσο και από το γύρω χώρο. Έτσι, ο υπερηχητικός παλμός μέσα στο σώμα ανακλάται, κάθε φορά που συναντά τη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο περιοχών που έχουν διαφορετικές πυκνότητες και επιστρέφει στο δέκτη. Αυτές οι ανακλάσεις των υπερήχων σχηματίζουν το υπερηχογράφημα, το οποίο απεικονίζει την εσωτερική ανατομία μιας συγκεκριμένης περιοχής του σώματος.

Όμως, προκειμένου να επιτευχθεί με τη μέθοδο αυτή η ανίχνευση ανατομικών χαρακτηριστικών ή ξένων προς το σώμα αντικειμένων, θα πρέπει το μήκος κύματος των ηχητικών κυμάτων να είναι περίπου ίδιου μεγέθους ή μικρότερου του αντικειμένου που πρόκειται να ανιχνευτεί. Για το λόγο αυτό

επιλέγονται συνήθως συχνότητες από 1 MHz έως 15 MHz (1 MHz = 1 000 000 Hz). Πράγματι, δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου σε έναν ιστό είναι περίπου  $v = 1540$  m/s, εύκολα προκύπτει ότι το μήκος κύματος  $\lambda$  ενός υπερήχου συχνότητας  $f = 5$  MHz είναι  $\lambda = v/f = 0,3$  mm. Επομένως, εάν θέλουμε να εντοπίσουμε πολύ μικρά αντικείμενα ή να διερευνήσουμε ένα τμήμα τους, θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε υπερήχους συχνότητας μεγαλύτερης των 5 MHz και μήκους κύματος μικρότερου των 0,3 mm. (Υπερήχους υψηλής συχνότητας εκπέμπουν οι νυχτερίδες προκειμένου να εντοπίσουν την τροφή τους, που αποτελείται από έντομα μικρών διαστάσεων).

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 7

Ρωτήστε γνωστούς, συγγενείς και φίλους εάν έχουν κάνει ποτέ υπερηχογράφημα. Καταγράψτε σε έναν πίνακα τον αριθμό των ανθρώπων που έχουν κάνει υπερηχογράφημα σε σχέση με το σύνολο των ανθρώπων τους οποίους ρωτήσατε, καθώς και το σκοπό για τον οποίο έκαναν το υπερηχογράφημα.

| Αριθμός ανθρώπων που έκαναν υπερηχογράφημα / το σύνολο των ερωτηθέντων | Λόγος για τον οποίο έγινε το υπερηχογράφημα |
|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                                                                        |                                             |
|                                                                        |                                             |
|                                                                        |                                             |
|                                                                        |                                             |
|                                                                        |                                             |

Ο αριθμός των ανθρώπων που έχουν κάνει υπερηχογράφημα είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος από ό,τι περιμένατε;

### Γυναικολογία

α) Οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη μαιευτική, και ειδικότερα δίνουν τη δυνατότητα να παρακολουθείται το αναπτυσσόμενο έμβρυο κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης (εικόνα 6.15). Επειδή το έμβρυο περιβάλλεται από τον αμνιωτικό σάκο, κατά το υπερηχογράφημα, μπορεί να διακριθεί από τα άλλα ανατομικά χαρακτηριστικά της εγκύου. Έτσι, μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος του εμβρύου, η θέση του και τυχόν αποκλίσεις από τη φυσιολογική ανάπτυξή του. β) Οι υπέρηχοι επίσης χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ινομυωμάτων (ογκιδίων) στη μήτρα των γυναικών ή ως μέθοδος εξέτασης της όλης κατάστασης της μήτρας.



**Εικόνα 6.15**

*Η συσκευή υπερήχων χρησιμοποιείται για την απεικόνιση του εμβρύου στο εσωτερικό της μήτρας*

### **Άλλοι κλάδοι της Ιατρικής**

Οι υπερήχοι χρησιμοποιούνται ευρύτατα και σε άλλους κλάδους της Ιατρικής. Έτσι, με υπερήχους ανιχνεύονται κακοήθειες στο συκώτι, στο πάγκρεας, στα νεφρά και στον εγκέφαλο. Επίσης, σε περίπτωση εσωτερικής αιμορραγίας, οι υπερήχοι εντοπίζουν την περιοχή που αιμορραγεί, και προσδιορίζουν χονδρικά την ποσότητα του αίματος που χάθηκε.

Μια άλλη εφαρμογή τους αφορά την καρδιολογία, στην οποία χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της παλμικής κίνησης των καρδιακών βαλβίδων και των μεγάλων αρτηριών. Στη χειρουργική, ειδικές συσκευές υπερήχων χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση όγκων από τον εγκέφαλο ή για επεμβάσεις στον αμφιβληστροειδή.



### **ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ**

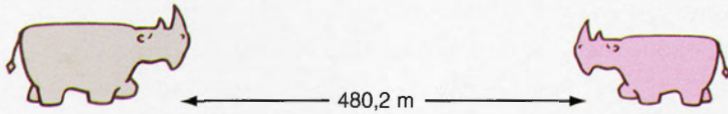
**Στις παρακάτω ερωτήσεις 1-5, να επιλέξετε τη σωστή απάντηση**

1. Ο ήχος στα αέρια είναι:
  - α) εγκάρσιο κύμα
  - β) διάμηκες κύμα
  - γ) εν μέρει εγκάρσιο και εν μέρει διάμηκες κύμα
  - δ) ηλεκτρομαγνητικό κύμα



2. Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται γρηγορότερα σε:
  - α) στερεά
  - β) υγρά
  - γ) αέρια
  - δ) κενό
  
3. Ένας ακουστός ήχος θα μπορούσε να έχει συχνότητα:
  - α) 0,1 Hz
  - β) 100 Hz
  - γ) 1 MHz
  - δ) 100 MHz
  
4. Όσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα ενός ηχητικού κύματος σε ένα μέσο, τόσο:
  - α) μικρότερο το ύψος του (γίνεται πιο μπάσος)
  - β) μεγαλύτερο το ύψος του (γίνεται πιο πρίμος)
  - γ) δυνατότερα ακούγεται
  - δ) μεγαλύτερο το μήκος κύματός του.
  
5. Σε έναν τόπο, κεραυνός ακούγεται 12 s μετά την αστραπή. Πόσο μακριά από τον τόπο αυτό έπεσε η αστραπή; ( $v_{\text{ήχ.}} = 340 \text{ m/s}$ ,  $v_{\text{φωτ.}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )
  - α) 2 Km
  - β) 3 Km
  - γ) 4 Km
  - δ) 8 Km
  
6. Κατά τη διάδοση ενός ηχητικού κύματος, υπάρχουν σωμάτια του μέσου τα οποία παραμένουν πάντοτε ακίνητα; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.
  
7. Σε ένα ηχείο παράγεται ηχητικό κύμα. Το μήκος κύματος του ήχου αυξάνει, ελαττώνεται ή παραμένει το ίδιο, καθώς το κύμα ταξιδεύει από τον αέρα στο νερό; Αιτιολογήστε την απάντησή σας. (Σημείωση: η συχνότητα δεν αλλάζει, καθώς ο ήχος περνάει από τον αέρα στο νερό).
  
8. Μερικά ζώα επιβιώνουν λόγω της οξείας ακοής τους. Όπως διαπιστώνεται, τα πτερύγια των αυτιών των συγκεκριμένων ζώων είναι σχετικά μεγάλα. Να εξηγήσετε πώς αυτό το ανατομικό χαρακτηριστικό βοηθάει να αυξηθεί η ευαισθησία της ακοής αυτών των ζώων σε ήχους χαμηλής έντασης.

9. Ένας ρινόκερος καλεί το ταίρι του, χρησιμοποιώντας υπόηχους συχνότητας 5,0 Hz. Το ταίρι του βρίσκεται 480,2 m μακριά. Η ταχύτητα του ήχου είναι 343 m/s. Πόσα μήκη κύματος περιλαμβάνονται μεταξύ των δύο ζώων;



10. Μια έκρηξη γίνεται στην άκρη μιας προβλήτας (μόλος). Ο ήχος φθάνει στην άλλη άκρη της προβλήτας, διαδιδόμενος από τρία μέσα: αέρα, νερό και μια λεπτή κουπαστή από συμπαγές ατσάλι. Οι ταχύτητες του ήχου στον αέρα, στο νερό και στην κουπαστή είναι αντίστοιχα 343 m/s, 1482 m/s και 5040 m/s. Ο ήχος διανύει απόσταση 500 m σε κάθε μέσο.  
 α) Από ποιο μέσο ο ήχος θα φτάσει πρώτος, από ποιο δεύτερος και από ποιο τρίτος; β) Αφού φτάσει ο πρώτος ήχος, μετά από πόσο χρόνο θα φτάσει ο δεύτερος και μετά από πόσο χρόνο ο τρίτος;
11. Ένα μέσο ανθρώπινο αυτί έχει επιφάνεια εμβαδού  $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Η ένταση του ήχου κατά τη διάρκεια μιας κανονικής συζήτησης είναι περίπου  $3,5 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$  στο αυτί του ακροατή. Να υποθέσετε ότι ο ήχος φθάνει κάθετα στην επιφάνεια του αυτιού. Σ' αυτή την περίπτωση, πόση ισχύς συλλαμβάνεται από το αυτί του ανθρώπου;
12. Η μέση ένταση ήχου σε ένα πολυσύχναστο εστιατόριο είναι  $3,5 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$ . Πόση ενέργεια εισέρχεται σε κάθε αυτί (επιφάνειας εμβαδού  $2,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ) σε ένα γεύμα διάρκειας μίας ώρας;



## κεφάλαιο 7



Φωτογραφία στο υπέρυθρο, ψευδοχρωματισμένη.

### ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

- Παραγωγή και διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα





## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

*Το «κενό» υπάρχει  
όσο δεν πέφτεις μέσα του.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

Ένα σημαντικό μέρος των πληροφοριών που φθάνουν σε μας από το γύρω κόσμο έχουν τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Μεταξύ αυτών είναι και οι πληροφορίες που παίρνουμε από το μακρινό σύμπαν. Η ακτινοβολία αυτή, για να φθάσει σε μας, συχνά διατρέχει αποστάσεις εκατομμυρίων ετών φωτός, μέσα από περιοχές “κενού”. Έτσι, μας γυρνά πίσω στο χρόνο, μεταφέροντας πολύτιμες πληροφορίες αναφορικά με τη γέννηση, την ωριμότητα και το θάνατο των άστρων, καθώς και την εξέλιξη του σύμπαντος. Αυτό συμβαίνει διότι η ακτινοβολία που φθάνει σήμερα σε μας έχει εκπεμφθεί πριν από πολλά εκατομμύρια χρόνια, όσα χρειάστηκε για να διανύσει την απόσταση από τη μακρινή πηγή (άστρο, γαλαξίας) μέχρι τη Γη. Επομένως, η παρατήρηση των άστρων μας βοηθά να διεισδύσουμε βαθιά όχι μόνον στο χώρο, αλλά να δούμε και πίσω, στο παρελθόν.

Από την ακτινοβολία αυτή, ένα ελάχιστο τμήμα της γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι, ενώ το υπόλοιπο ανιχνεύεται μόνον με κατάλληλες συσκευές. Εκτός όμως από τις πληροφορίες που έρχονται από το μακρινό σύμπαν, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κυριαρχεί και στον καθημερινό κόσμο μας. Έτσι, τα σήματα των ραδιοτηλεοπτικών σταθμών, οι εφαρμογές των μικροκυμάτων, οι ακτινογραφίες κτλ. αξιοποιούν διάφορες περιοχές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

## 7.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τι είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία;

**Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ενέργεια που μεταφέρεται στο χώρο. Η μεταφορά ενέργειας επιτυγχάνεται με γρήγορες ταλαντώσεις ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Οι ταλαντώσεις αυτές διαδίδονται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, όπως είναι τα ραδιοφωνικά, τα μικροκύματα, το ορατό φως, οι ακτίνες Χ, οι ακτίνες γ κτλ.**

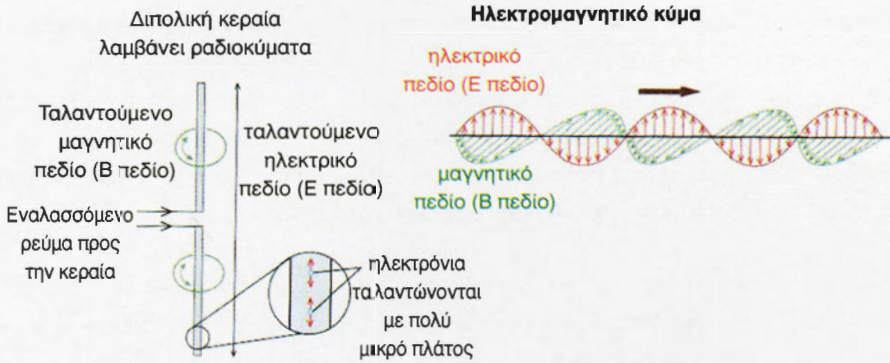
Πώς όμως είναι δυνατόν τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα να διαδίδονται στο “κενό”, και μάλιστα σε τεράστιες αποστάσεις;

Είχαμε αναφερθεί και στην αρχή αυτού του κεφαλαίου στο γεγονός ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, σε αντίθεση με τα μηχανικά, δε χρειάζονται κάποιο υλικό μέσο για να μεταδοθούν. Αυτό είναι δυνατόν εξαιτίας της φύσης τους. Για να το καταλάβουμε αυτό, θα πρέπει να εξηγήσουμε γιατί τα

κύματα αυτά ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά.

Έχετε ήδη διδαχτεί τι είναι το ηλεκτρικό και τι το μαγνητικό πεδίο. Να υπενθυμίσουμε ότι το **ηλεκτρικό πεδίο** παράγεται από την απλή παρουσία των **φορτίων** (κινούμενων ή ακίνητων), ενώ το **μαγνητικό πεδίο** παράγεται από την **κίνηση των φορτίων** και είναι ανάλογο της έντασης του ρεύματος που δημιουργείται από αυτά τα φορτία. Τα παραπάνω ήταν γνωστά στους φυσικούς ήδη από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Τότε ο Faraday ανακάλυψε ότι, όταν το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Τις γνώσεις αυτές συνέθεσε με μεγαλοφυή τρόπο ο J.C.Maxwell το 1862 σε μια θεωρία που ενώνει τον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό. Απέδειξε δηλαδή ότι: **ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί (γεννά) ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, και αντίστροφα (στη συνέχεια) ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.** Από τη στιγμή που μια αιτία (ένα κινούμενο φορτίο) δημιουργήσει ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο, αυτόματα αρχίζει μία αέναη διαδικασία, κατά την οποία διαδοχικά δημιουργείται το ένα πεδίο από το άλλο (ηλεκτρικό από μαγνητικό και αντίστροφα). Με αυτή τη διαδικασία, δημιουργείται ένα αυτοσυντηρούμενο ζευγάρι πεδίων που “ταξιδεύει” στο χώρο σε μεγάλες αποστάσεις από την αρχική πηγή.

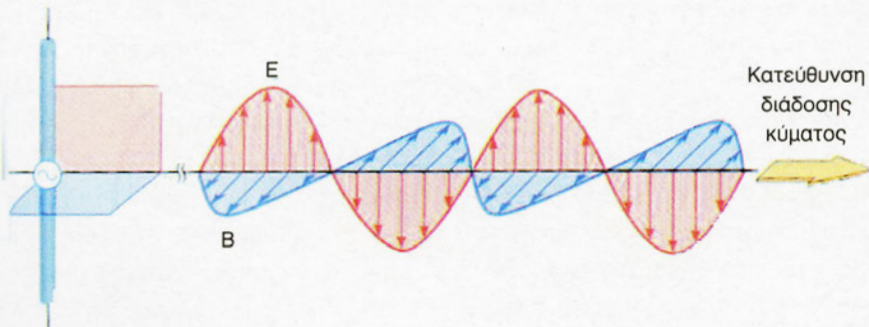
Η πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι ένα μεταβαλλόμενο (συχνά εναλλασσόμενο) ρεύμα που διατρέχει ένα μεταλλικό σύρμα (π.χ. μία κεραία πομπού). Για παράδειγμα, ένα σήμα ραδιοφώνου παράγεται από ηλεκτρόνια που ταλαντώνονται πάνω κάτω μέσα σε μια κεραία (εικόνα 7.1.). Έτσι, παράγονται ζευγάρια αλληλοσυνδεόμενων πεδίων, ηλεκτρικών και μαγνητικών, που ταλαντώνονται στη συχνότητα του ρεύματος των ηλεκτρονίων. Συνεπώς, τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι η διάδοση των αλληλεξαρτώμενων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων στο χώρο και στο χρόνο. Η διάδοσή τους δεν απαιτεί την ύπαρξη κάποιου μέσου, δηλαδή μπορούν να μεταδοθούν τόσο στο “κενό” όσο και σε οποιοδήποτε άλλο μέσο (αέριο, υγρό, στερεό).** Τα μεταβαλλόμενα πεδία (ηλεκτρικά και μαγνητικά), κατά τη διάδοσή τους, συμπεριφέρονται όπως όλα τα κύματα. Έχουν δηλαδή τις ιδιότητες της ανάκλασης, της διάθλασης, της περίθλασης, της συμβολής κ.ά. Όταν τα κύματα αυτά φθάσουν σε ένα άλλο μεταλλικό σύρμα (π.χ. κεραία δέκτη), το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο ασκεί μια μεταβαλλόμενη ηλεκτρική δύναμη στα ηλεκτρόνια της κεραίας τα οποία ταλαντώνονται σε συντονισμό με τις μεταβολές του πεδίου.



**Εικόνα 7.1**

Κίνηση ηλεκτρονίων σε μια κεραία εκπομπής ραδιοφώνου και το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που παράγεται από την ταλάντωση των ηλεκτρονίων.

Στην περίπτωση κατά την οποία τα πεδία παράγονται από ένα αρμονικό εναλλασσόμενο ρεύμα, τότε η ταλάντωση των ηλεκτρονίων στον αγωγό είναι απλή αρμονική ταλάντωση και τα παραγόμενα πεδία έχουν αντίστοιχη μορφή. **Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα, διότι τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, ενώ ταυτόχρονα είναι κάθετα και μεταξύ τους.** Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.2, το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού  $\vec{E}$  και του μαγνητικού πεδίου  $\vec{B}$  ταλαντώνονται κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Έτσι, εάν τοποθετηθεί ένα ηλεκτρικό φορτίο σε κάποιο σημείο της διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, λόγω του ηλεκτρικού πεδίου θα ταλαντωθεί γύρω από τη θέση ισορροπίας του.



**Εικόνα 7.2**

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μακριά από την κεραία. Το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  και το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  είναι κάθετα μεταξύ τους. Ταυτόχρονα και τα δύο είναι κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται εύκολα. **Κάθε φορά που ένα φορτισμένο σωματίδιο επιταχύνεται ή επιβραδύνεται, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (ενέργεια).** Πράγματι, εάν κουνήσουμε πέρα-δώθε ένα φορτισμένο αντικείμενο, θα δημιουργηθούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Δεν είναι εύκολο όμως να τα αντιληφθούμε διότι η συχνότητά τους είναι πολύ έξω από την περιοχή συχνοτήτων που μπορεί να συλλάβει το ανθρώπινο μάτι. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται σε τεράστιο εύρος συχνοτήτων.

Οι ραδιοφωνικοί σταθμοί χρειάζονται ειδική άδεια για να εκπέμπουν σε συγκεκριμένη συχνότητα. Πράγματι, είναι υποχρεωμένοι να εκπέμπουν πάντα μόνο σ' αυτή στη συχνότητα, μέσω της οποίας αναγνωρίζονται στην ζώνη συχνοτήτων του ραδιοφώνου. Για παράδειγμα, ο σταθμός Geronimo Groony εκπέμπει σε συχνότητα 88,8 MHz στα FM, ο σταθμός Rock FM εκπέμπει σε συχνότητα 96,8 MHz στα FM, ενώ ο Μελωδία εκπέμπει σε συχνότητα 100 MHz στα FM κτλ. Συχνότητα 100 MHz σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια στην κεραία του πύργου εκπομπής του ραδιοφωνικού σταθμού πάλλονται 100 000 000 φορές ανά ένα δευτερόλεπτο.

## 7.2 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

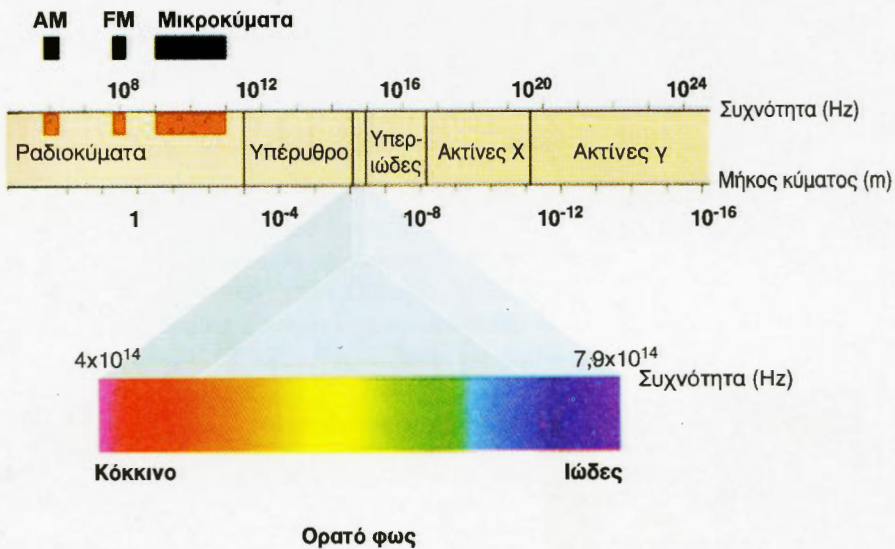
*Είπες εδώ και χρόνια  
«Κατά βάθος είμαι ζήτημα φωτός»  
Γ. Σεφέρης (Τρία χρόνια ποιήματα)*

Η ταχύτητα όλων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο “κενό” είναι η ίδια ( $c = 3 \times 10^8$  m/s), ανεξαρτήτως της συχνότητάς τους. Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται **ταχύτητα του φωτός στο κενό** και είναι εξαιρετικά σημαντική για τον τρόπο ερμηνείας της λειτουργίας του σύμπαντος. Διότι, όπως απέδειξε ο Maxwell, μόνον στην ταχύτητα αυτή η αμοιβαία επαγωγή (αλληλοδημιουργία) των πεδίων (ηλεκτρικού και μαγνητικού) μπορεί να συνεχιστεί επ' άπειρον χωρίς απώλεια ενέργειας. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να έχει κάποιο σώμα και επίσης η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης πληροφορίας από σημείο σε σημείο. Στον αέρα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ίδια περίπου ταχύτητα με την οποία διαδίδονται στο κενό, αλλά στα άλλα υλικά μέσα (γυαλί, νερό κτλ.) διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα.



## 7.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

Υπάρχουν πολλά είδη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Τα διάφορα είδη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές και στις εφαρμογές τους και στις μεθόδους παραγωγής τους. Όλα όμως έχουν την ίδια φύση και όλα παράγονται από επιταχυνόμενα φορτία. Διαδίδονται στο “κενό” με την ίδια ταχύτητα, διαφέρουν όμως μεταξύ τους ως προς τη συχνότητα και το μήκος κύματος. Η συχνότητα  $f$  και το μήκος κύματος  $\lambda$  συνδέονται με τη θεμελιώδη σχέση της κυματικής:

$$c = \lambda f$$


**Εικόνα 7.3**

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η ορατή περιοχή του φάσματος είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με τις άλλες περιοχές του.

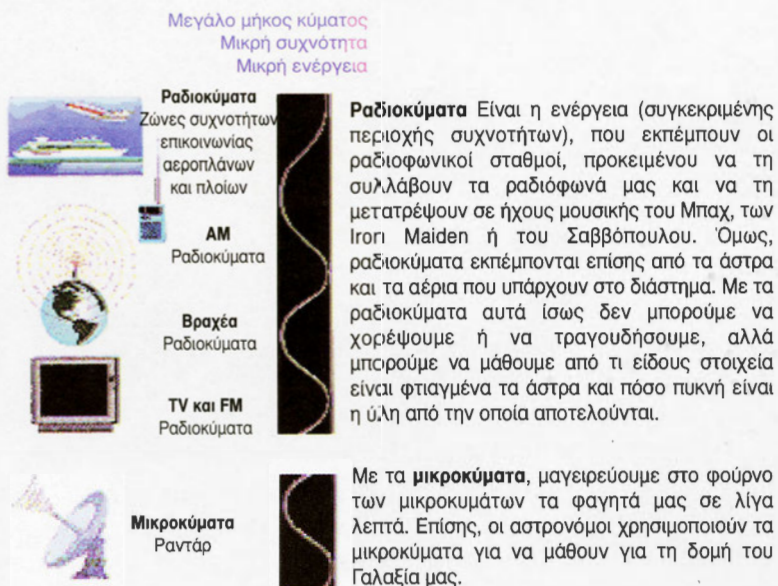
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελείται από τα μήκη κύματος και τις αντίστοιχες συχνότητες όλων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η εικόνα 7.3 δείχνει ολόκληρη την περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Καλύπτει μία τεράστια και συνεχή περιοχή ακτινοβολιών, που περιλαμβάνει τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, την υπέρυθρη ακτινοβολία, την ορατή, την υπεριώδη, τη Χ και τη γ. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα διαιρείται αντίστοιχα σε επτά περιοχές: Ραδιοκύματα, Μικροκύματα, Υπέρυθρη ακτινοβολία, Ορατό φως, Υπεριώδη ακτινοβολία, ακτίνες Χ και ακτίνες Γάμα.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των διάφορων περιοχών του φάσματος και – πολλές φορές – στα άκρα η μία υπερκαλύπτει την άλλη.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί ακόμη να περιγραφεί ως ένα ρεύμα σωματιδίων χωρίς μάζα, που διαδίδονται στο χώρο όπως τα κύματα και κινούνται με την ταχύτητα του φωτός. **Κάθε τέτοιο σωματίδιο χωρίς μάζα περιλαμβάνει ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας, ισοδυναμεί με μία ομάδα κυμάτων (κυματοσυσμμό) και ονομάζεται φωτόνιο.** Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από τέτοια φωτόνια. **Οι διάφοροι τύποι ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαφέρουν μόνον ως προς την ποσότητα ενέργειας που περιέχεται στα φωτόνια** (δες §8.1). Έτσι, τα ραδιοκύματα έχουν φωτόνια με χαμηλές ενέργειες, τα μικροκύματα έχουν λίγο περισσότερη ενέργεια από τα ραδιοκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία έχει ακόμη περισσότερη, η ορατή, η υπεριώδης και οι ακτίνες Χ διαδοχικά περισσότερη και τέλος οι ακτίνες Γάμα έχουν την περισσότερη ενέργεια από όλες τις άλλες ακτινοβολίες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Συνοπτικά, οι διάφορες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εμφανίζονται στην εικόνα (7.4), ενώ αναλυτικά παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

#### Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα





**Υπέρυθρο.** Η ακτινοβολία που δεχόμαστε στην περιοχή συχνοτήτων του υπέρυθρου, είναι εκείνη που μας θερμαίνει, είτε προέρχεται από τον Ήλιο, είτε από οποιοδήποτε άλλο σώμα. Στο διάστημα, η υπέρυθη ακτινοβολία χαρτογραφεί την ενδοαστρική ζώνη.

Το **ορατό**, είναι το μόνο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που γίνεται αντιληπτό από τα μάτια μας. Ορατή ακτινοβολία εκπέμπεται από διάφορα σώματα, όπως οι πυγολαμπίδες, οι λάμπες φωτισμού, τα αστέρια.... Ορατή ακτινοβολία εκπέμπεται επίσης όταν ταχέως κινούμενα σωματίδια χτυπούν άλλα σωματίδια.

**Υπεριώδες.** Ο Ήλιος είναι πηγή της υπεριώδους (ή UV) ακτινοβολίας. Η ενέργεια που εκπέμπεται σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων, το καλοκαίρι μπορεί να προξενήσει εγκαύματα στο δέρμα μας. Η παρατεταμένη έκθεση στον ήλιο μακροπρόθεσμα μπορεί να προκαλέσει καρκίνο του δέρματος.

Οι **ακτίνες Χ** χρησιμοποιούνται από τους γιατρούς, όταν θέλουν να εξετάσουν τα οστά μας ή από τους οδοντίατρους όταν θέλουν να εξετάσουν προσεκτικά τα δόντια μας. Επίσης, στο Σύμπαν πολύ θερμά αέρια εκπέμπουν ακτίνες Χ.

**Ακτίνες Γάμα.** Οι ακτίνες γ εκπέμπονται κυρίως από ραδιενεργά υλικά. Επίσης, μπορεί να δημιουργηθούν και σε μεγάλους επιταχυντές σωματιδίων, κατά τη διάρκεια πειραμάτων που εκτελούν οι φυσικοί, προσπαθώντας να κατανοήσουν τη δομή της ύλης. Όμως, ο μεγαλύτερος δημιουργός ακτίνων γ είναι ολόκληρο το Σύμπαν, το οποίο εκπέμπει ακτίνες Γάμα με όλους τους δυνατούς τρόπους.

#### Εικόνα 7.4

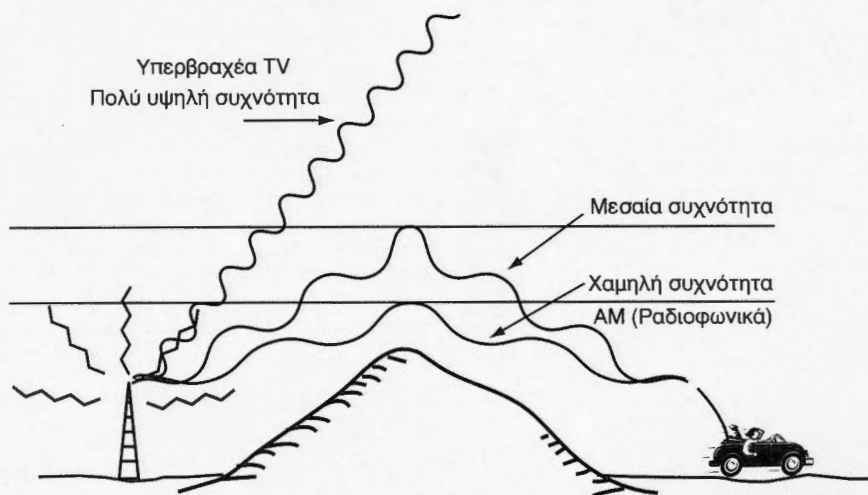
Οι περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Είναι φανερή η μεταβολή του μήκους κύματος από περιοχή σε περιοχή. Η μεταβολή όμως αυτή όπως απεικονίζεται είναι απλώς ενδεικτική, διότι στην πραγματικότητα οι διαφορές στο μήκος κύματος μεταξύ των διαφόρων περιοχών είναι τεράστιες και κυμαίνονται από  $10^4$  m (10 Km) για τη μία άκρη του φάσματος (ραδιοκύματα), έως  $10^{-14}$  m για την άλλη άκρη του φάσματος (ακτίνες Γάμα).



### 7.3.1 Ραδιοκύματα

Τα ραδιοκύματα καλύπτουν την περιοχή που έχει τις μικρότερες συχνότητες (από  $\sim 10$  Hz έως  $\sim 10^9$  Hz) και τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (από  $\sim 10^7$  m έως 0,1 m) από κάθε άλλη περιοχή του φάσματος. Η φύση και οι ιδιότητες των ραδιοκυμάτων μελετήθηκαν από τον Hertz, ο οποίος σχεδίασε και πραγματοποίησε πολλά σχετικά πειράματα. Τα ραδιοκύματα διαδίδονται τόσο στο “κενό” όσο και στην ατμόσφαιρα της Γης.

Τα ραδιοκύματα χρησιμοποιούνται συνήθως στη ραδιοφωνία και στην τηλεόραση. Παράγονται κατά την ταλάντωση των ηλεκτρονίων σε έναν αγωγό που λειτουργεί ως κεραία εκπομπής (πομπός). Εάν ένας άλλος αγωγός προσανατολιστεί κατάλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κεραία λήψης (δέκτης). Σ’ αυτή την περίπτωση, τα ηλεκτρόνια του δέκτη θα αρχίσουν να ταλαντώνονται σύμφωνα με το σήμα που εξέπεμψε η κεραία εκπομπής. Το σήμα που λαμβάνεται στην κεραία του δέκτη είναι ασθενές και χρειάζεται να ενισχυθεί κατάλληλα από τη συσκευή του δέκτη (ραδιόφωνο, τηλεόραση).



**Εικόνα 7.5**

Οι πολύ υψηλές συχνότητες των ραδιοκυμάτων (FM και TV) περνούν ελεύθερα από την ατμόσφαιρα, ενώ τα κύματα με τις μικρότερες συχνότητες (AM) ανακλώνται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας.

Πρέπει να τονιστεί ότι ραδιοκύματα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση του ήχου, παρόλο που δεν είναι ηχητικά κύματα. Συχνά όμως, πληροφορίες όπως ο ήχος ή η εικόνα μιας τηλεοπτικής εκπομπής χρειάζεται να μετασχηματιστούν και να κωδικοποιηθούν σε σήματα ραδιοκυμάτων. Έτσι, μεταδί-



δονται ως ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία κατόπιν αποκωδικοποιούνται κατάλληλα στη συσκευή του δέκτη. Η κωδικοποίηση του αρχικού σήματος γίνεται με μια διαδικασία που λέγεται διαμόρφωση και μπορεί να είναι είτε **διαμόρφωση του πλάτους AM (Amplitude Modulation)** του κύματος είτε **διαμόρφωση της συχνότητας FM (Frequency Modulation)**. Έτσι, προκύπτουν οι AM και FM ζώνες εκπομπής του ραδιοφώνου (εικ.4.5). Ακόμηση πιο σύνθετα σχήματα μετασχηματισμού χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της πληροφορίας διάφορων επικοινωνιακών συστημάτων (π.χ. τηλεοπτικών σημάτων).

### 7.3.2 Μικροκύματα

Τα μικροκύματα καλύπτουν την περιοχή που έχει συχνότητες μεγαλύτερες του 1 GHz (από  $\sim 10^9$  Hz έως  $\sim 10^{12}$  Hz). Παράγονται από ειδικές ηλεκτρονικές διατάξεις. Ταξιδεύουν στον αέρα και συλλαμβάνονται από κεραίες σε σχήμα πιάτου που συνήθως τοποθετούνται στις ταράτσες υψηλών κτιρίων.

Τα διάφορα συστήματα ραντάρ εκπέμπουν σήματα των μικροκυμάτων πολύ μικρού μήκους κύματος. Στους πομπούς των ραντάρ, τα ηλεκτρόνια ταλαντώνονται σε μικρές μεταλλικές κοιλότητες, οι οποίες περιέχουν ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που παράγονται έχουν συχνότητες που εξαρτώνται από το μέγεθος της κοιλότητας και από την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Τα παραγόμενα κύματα οδηγούνται έξω από την κοιλότητα με ένα μεταλλικό σωλήνα, ανακλώνται από τα μεταλλικά τοιχώματα του ραντάρ, προσανατολίζονται προς τη σωστή κατεύθυνση με μια μικρή κεραία που βρίσκεται στην εστία του μεταλλικού κατόπτρου, και εκπέμπονται ως μία δέσμη. Το μεταλλικό κάτοπτρο και η κεραία του μπορούν επίσης να λειτουργήσουν και ως δέκτες αντίστοιχης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Τα ραδιοτηλεσκόπια μετρούν και καταγράφουν την κατανομή του υδρογόνου σε όλο τον ενδογαλαξιακό χώρο. Η ανίχνευση μικρών ανωμαλιών στην αρχέγονη αυτή ακτινοβολία που υπάρχει σε όλο το σύμπαν και αντιστοιχεί στην περιοχή των μικροκυμάτων, επιτρέπει στους αστρονόμους να βγάλουν πολύτιμα συμπεράσματα για την εξέλιξη του σύμπαντος.

Στην καθημερινή ζωή, τα μικροκύματα χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους φούρνους μικροκυμάτων για το γρήγορο ζέσταμα ή το μαγείρεμα του φαγητού. Η συχνότητα των μικροκυμάτων που χρησιμοποιούνται στους φούρνους αυτούς, είναι παρόμοια με τη συχνότητα ταλάντωσης των μορίων του νερού. Είναι δηλαδή σε συντονισμό με τα μόρια του νερού. Έτσι, η ενέργεια των μικροκυμάτων μεταφέρεται γρήγορα στα μόρια του νερού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται γρήγορα η θερμοκρασία των τροφών που περιέχουν νερό.

### 7.3.3 Υπέρυθρη ακτινοβολία

*... σ' ανελέητο ήλιο σ' έναν ουρανό  
που πυραχτώνει διαμπερής αθωότητα  
Ν. Καρούζος (Ερυθρογράφος)*

Η υπέρυθρη ακτινοβολία εκτείνεται πέρα από την ερυθρή περιοχή του ορατού φάσματος. Αλληλεπικαλύπτεται με τα μικρού μήκους κύματος, μικροκύματα. Η υπέρυθρη ακτινοβολία οφείλεται στις ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων των ατόμων που αποτελούν ένα σώμα. Η θερμοκρασία ενός σώματος εκφράζει το γεγονός ότι τα άτομα του σώματος κινούνται ως αποτέλεσμα των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Εξαιτίας αυτών των αλληλεπιδράσεων, τα ηλεκτρόνιά τους πάλλονται και ακτινοβολούν ενέργεια στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος.

Όλα τα σώματα εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος. Όσο πιο ζεστό είναι ένα σώμα, τόσο μεγαλύτερη ενέργεια ανά δευτερόλεπτο εκπέμπει προς τα έξω με τη μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας. Έτσι, μια φωτογραφία στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος παρέχει ένα χάρτη “ζεστών” και “ψυχρών” περιοχών του σώματος. Επειδή είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθούν τα φιλμ υπέρυθρης ακτινοβολίας, σήμερα έχουν αντικατασταθεί σε μεγάλο βαθμό από ηλεκτρονικές ανιχνευτικές διατάξεις, οι οποίες καταγράφουν τις διαφορές θερμοκρασίας και λειτουργούν όπως οι τηλεοπτικές κάμερες. Οι πληροφορίες που συγκεντρώνουν αξιοποιούνται με ποικίλους τρόπους.

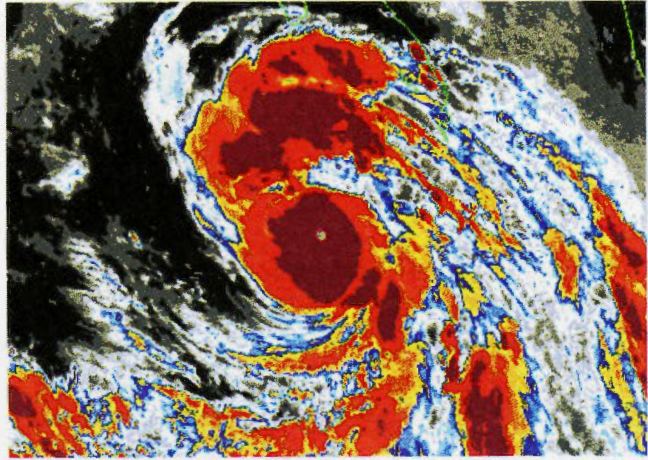
Οι ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας είναι πολύ ευαίσθητοι στη θερμοκρασία του ανθρώπινου σώματος και γι' αυτό χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό και τη διάσωση ατόμων που έχουν παγιδευτεί από μια φωτιά ή ένα σεισμό.

Επιπλέον, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στους διάφορους δορυφόρους της Γης είτε για στρατιωτικούς είτε για ειρηνικούς σκοπούς. Οι εφαρμογές τους στις στρατιωτικές επιχειρήσεις είναι συνήθως κατασκοπευτικού χαρακτήρα. Εκτεταμένη χρήση τους έγινε στον πόλεμο του Βιετνάμ, τον πόλεμο του Κόλπου (Ιράκ) όπως και της Γιουγκοσλαβίας. Έτσι, μπορούν να εντοπίζουν ανθρώπινες δραστηριότητες (λειτουργίες στρατιωτικών τμημάτων ή αντάρτικων ομάδων) μέσα σε δάση ή σπηλιές. Έχει αναφερθεί ότι με τη βοήθεια συσκευών υπέρυθρης ακτινοβολίας εντοπίστηκε στα δάση της Βολιβίας ο Τσε Γκεβάρα και η αντάρτικη ομάδα που τον συνόδευε.

Ευτυχώς όμως οι εφαρμογές τους για την εξυπηρέτηση του ανθρώπου είναι πολλές και εντυπωσιακές (εικόνα 7.6). Έτσι, ανιχνευτές υπέρυθρης ακτινοβολίας παρακολουθούν από τους δορυφόρους, τις γεωργικές καλλιέρ-



γειες, και ειδοποιούν τους αγρότες εάν τα φυτά που αναπτύσσονται έχουν προσβληθεί από ασθένειες (τα υγιή φυτά διαφέρουν ως προς τη συχνότητα εκπομπής της υπέρυθρης ακτινοβολίας από τα ασθενή) ή κατά πόσο υποφέρουν από έλλειψη νερού. Επίσης, καταγράφουν τις διαφορές θερμοκρασίας στην ξηρά και στη θάλασσα.



**Εικόνα 7.6**

Φωτογραφία τυφώνα στο υπέρυθρο. Η εικόνα έχει ψευδοχρωματιστεί. Το χρώμα των σύννεφων φανερώνει τις θερμοκρασίες και τα ύψη τους από την επιφάνεια της γης. Το σκούρο κόκκινο σηματοδοτεί τα θερμότερα και χαμηλότερα ενώ το άσπρο τα πιο ψυχρά και υψηλά.

Με αυτό τον τρόπο, μπορούν να εντοπίσουν παγόβουνα και να ειδοποιήσουν τα πλοία που πλέουν κοντά τους ή να ανιχνεύσουν τις πυρκαγιές που ξεσπούν σε διάφορα σημεία της γης. Επίσης, κάνουν χαρτογράφηση της ορυκτολογικής σύστασης της γης, εφόσον το κάθε ορυκτό εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία σε λίγο διαφορετική συχνότητα από τα άλλα. Χρησιμοποιούνται ακόμη για κλιματολογικές μελέτες, διότι ανιχνεύουν τα πυκνά νέφη, καθώς και τις περιοχές με διαφορετική υγρασία.

Σε διαφορετική κλίμακα, ηλεκτρονικές διατάξεις που εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα σπίτια μας, για τον εξ αποστάσεως τηλεχειρισμό συσκευών, όπως τηλεοράσεων, βίντεο, στερεοφωνικών συσκευών κτλ.

Η υπέρυθρη ακτινοβολία όχι μόνον εκπέμπεται, αλλά και απορροφάται από τις μάζες των σωμάτων. Στην περίπτωση αυτή, αυξάνεται η κινητική ενέργεια των μορίων του σώματος και αντίστοιχα αυξάνεται και η θερμοκρασία του. Το ανθρώπινο δέρμα είναι πολύ ευαίσθητο στην ακτινοβολία αυτής της περιοχής του φάσματος, με αποτέλεσμα να αισθανόμαστε την “ζέση”, όταν υπέρυθρη ακτινοβολία πέσει στο σώμα μας, όπως συμβαίνει όταν καθόμαστε απέναντι στα ηλεκτρικά σώματα ή στον ήλιο (ακόμη και το χειμώνα).

Η υπέρυθρη ακτινοβολία διαδίδεται στον ξηρό αέρα, αλλά δε διαδίδεται μέσα από υδρατμούς. Η ιδιότητα αυτή χρησιμοποιείται στα αλκοτέστ, για

την ανίχνευση του οιοπνεύματος στον οργανισμό ενός ανθρώπου. Έτσι, υπέρυθρες ακτίνες περνούν από δείγμα εκπνοής του εξεταζόμενου. Η διαφορετική απορρόφησή τους από τα αέρια που περιέχονται στην εκπνοή του ανιχνεύει την ύπαρξη του οιοπνεύματος.

Η ατμόσφαιρα της Γης είναι μερικώς μόνον διαφανής στην υπέρυθρη ακτινοβολία που έρχεται κυρίως από τον Ήλιο, αλλά και από άλλα ουράνια σώματα. Αυτό συμβαίνει, διότι οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και άλλα αέρια απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία. Επειδή όμως οι υδρατμοί ελαττώνονται όσο αυξάνει το υψόμετρο, ο ήλιος “καίει” ιδιαίτερα στις κορυφές των βουνών. Οι ορειβάτες και οι σκιέρ γνωρίζουν ότι στις κορυφές υψηλών βουνών, τις ηλιόλουστες μέρες αισθάνονται έντονα τη ζέση από τις ακτίνες του ήλιου, ενώ, την ίδια στιγμή, στη σκιά παγώνουν. Οι αστρονόμοι, για να ελαχιστοποιήσουν ή να μηδενίσουν την ατμοσφαιρική απορρόφηση, τοποθετούν τα τηλεσκόπια με τα οποία παρατηρούν και καταγράφουν τις πληροφορίες που έρχονται από το διάστημα, στην υπέρυθρη περιοχή του φάσματος, στις κορυφές υψηλών βουνών ή σε δορυφόρους που κινούνται σε τροχιά γύρω από τη Γη.

### 7.3.4 Το ορατό φως

Το ανθρώπινο μάτι ανταποκρίνεται σε μια μικρή μόνο περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η οποία είναι γνωστή ως περιοχή του ορατού φωτός. Είναι πράγματι εντυπωσιακό να συνειδητοποιήσουμε ότι το μάτι μας συλλαμβάνει μόνον το 1 τρισεκατομμυριοστό της πληροφορίας που φθάνει σε μας με τη μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το μάτι του ανθρώπου, με τρόπο που θα αναπτυχθεί παρακάτω, στο κεφάλαιο της Οπτικής, μπορεί να ξεχωρίζει τις έξι βασικές περιοχές χρωμάτων (κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε και ιώδες). Κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε διαφορετικό μήκος κύματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όλα τα σώματα εκπέμπουν ακτινοβολία. Για να είναι όμως ορατή αυτή η ακτινοβολία, θα πρέπει το σώμα να έχει θερμοκρασία μερικών χιλιάδων βαθμών Κελσίου, όπως συμβαίνει με τον Ήλιο που έχει θερμοκρασία 5500 °C στην επιφάνειά του. Δεν είναι τυχαίο ότι τα μάτια μας είναι πιο ευαίσθητα σ' αυτή την περιοχή του φάσματος. Κατ' αρχήν ο ήλιος είναι λαμπρότερος στα μήκη κύματος του ορατού φωτός. Επιπλέον, η ατμόσφαιρα της Γης είναι αρκετά διαφανής στο ορατό φως, αδιαφανής στο μεγαλύτερο μέρος της υπεριώδους και ημιδιαφανής στο υπέρυθρο. Έτσι, παρά το γεγονός ότι τα μάτια του ανθρώπου είναι ευαίσθητα σε μια ελάχιστη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, εντούτοις η περιοχή



αυτή αποδεικνύεται ότι είναι και η πιο σημαντική για τις συνθήκες ζωής στην επιφάνεια της Γης.

Περισσότερα όμως για το ορατό φως θα μάθετε στο αντίστοιχο κεφάλαιο της Οπτικής.

### 7.3.5 Η υπεριώδης ακτινοβολία

*... ως και τα σύννεφα είναι ναρχοθετημένα  
το νου σας: από μας η άνοιξη εξαρτάται.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

Υπεριώδης είναι η ακτινοβολία που εκτείνεται πέραν της ιώδους, στη μη ορατή περιοχή του φάσματος. Η ακτινοβολία αυτή, πολλές φορές, κάνει τα ρούχα μας να λάμπουν στο σκοτάδι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα απορρυπαντικά που χρησιμοποιούνται για το πλύσιμο των ρούχων περιέχουν και φωσφορίζουσες ουσίες, που μπαίνουν ανάμεσα στα νήματα των ρούχων και όταν φωτίζονται από υπεριώδη ακτινοβολία, την επανεκπέμπουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο ορατό μέρος του φάσματος. Το φαινόμενο αυτό το εκμεταλλεύονται οι ντίσκο για τη δημιουργία ειδικών εφέ.

Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι υψηλής ενέργειας ακτινοβολία. Δηλαδή, τα υπεριώδη ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας, πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα κύματα του ορατού φωτός και της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Αυτό συμβαίνει, διότι η ενέργεια των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι ανάλογη της συχνότητάς τους (Οι συχνότητες της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερες από τις συχνότητες του ορατού φωτός). Γι' αυτό το λόγο η υπεριώδης ακτινοβολία είναι πολύ επιζήμια για τους ζωντανούς οργανισμούς. Μπορεί να καταστρέψει τους ιστούς του δέρματος και να προκαλέσει σοβαρές βλάβες στα μάτια.

Η υπεριώδης ακτινοβολία είναι υπεύθυνη για τη δημιουργία εγκαυμάτων κατά τη διάρκεια της ηλιοθεραπείας το καλοκαίρι. Έτσι, εάν η έκθεση του σώματος στην υπεριώδη είναι ελεγχόμενη, βοηθά στην ανάπτυξη της μελανίνης και στο μαύρισμα του δέρματος. Η παρατεταμένη όμως έκθεσή του σ' αυτό το τμήμα του φάσματος, μπορεί να προκαλέσει εγκαυματα στο δέρμα. Αυτό σημαίνει κατα-



**Εικόνα 7.7**

Καλό είναι να αποφεύγεται η ηλιοθεραπεία το καλοκαίρι, ιδιαίτερα τις ώρες μεταξύ 11π.μ. και 3μ.μ.

στροφή των κυττάρων της επιδερμίδας. Εάν μάλιστα το φαινόμενο αυτό επαναληφθεί, μπορεί να οδηγήσει σε καρκίνο του δέρματος (εικ.7.7). Γι' αυτό είναι πολύ επικίνδυνο να χρησιμοποιούμε λάμπες υπεριώδους για να επιτύχουμε γρήγορο μαύρισμα. Επίσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υπεριώδης ακτινοβολία, εξαιτίας της υψηλής ενέργειας που μεταφέρει, είναι εξαιρετικά επιζήμια για τα μάτια. Οι οφθαλμίατροι συμβουλεύουν να φορούν όλοι οι άνθρωποι γυαλιά ηλίου, προκειμένου να προστατεύσουν τα μάτια τους.

**Έχετε αναρωτηθεί γιατί τα γυαλιά ηλίου, που είναι διαφανή στο ορατό φως, μπορούν να προστατεύσουν αποτελεσματικά τα μάτια μας από τη βλαβερή επίδραση του ήλιου (την υπεριώδη ακτινοβολία);**

Ευτυχώς, υπάρχουν πολλά υλικά που ενώ είναι διαφανή στο ορατό φως, είναι αδιαφανή στην υπεριώδη ακτινοβολία. Τέτοιο υλικό είναι το γυαλί. Γι' αυτό συνιστάται να φορούν γυαλιά ηλίου (ενισχυμένα με ειδικά φίλτρα για την υπεριώδη ακτινοβολία) όλοι οι άνθρωποι, ιδιαίτερα το καλοκαίρι. Έτσι, όσο και αν αυτό φαίνεται περίεργο, μαυρίζουμε ελάχιστα το καλοκαίρι, όταν οι ακτίνες πέφτουν πάνω μας μέσα από τα τζάμια ενός παραθύρου.

Είναι φανερό ότι η υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει σημαντικές βλάβες στον ανθρώπινο οργανισμό, γι' αυτό είναι πολύτιμη η ζώνη του όζοντος που υπάρχει στη στρατόσφαιρα και εμποδίζει το μεγαλύτερο τμήμα της ακτινοβολίας αυτής να φθάσει στη Γη (μόνον τα μεγάλου μήκους κύματος κύματα της υπεριώδους περνάνε τη ζώνη του όζοντος). Χωρίς την προστασία της ζώνης του όζοντος, η υψηλής ενέργειας υπεριώδης ακτινοβολία θα έφθανε στη Γη και θα κατέστρεφε τους βιολογικούς ιστούς. Η ζώνη του όζοντος είναι η ασπίδα της ζωής ενάντια στην καταστροφική υπεριώδη ακτινοβολία που εκπέμπεται κυρίως από τον Ήλιο. Γι' αυτό και η καταστροφή της από τις ανθρώπινες δραστηριότητες, με τη συνακόλουθη δημιουργία της τρύπας του όζοντος, στρέφεται ενάντια στον άνθρωπο και στην επιβίωσή του. Έτσι, έως ότου σταματήσουν όλες οι ανθρώπινες δραστηριότητες που καταστρέφουν τη ζώνη του όζοντος, θα πρέπει να αποφεύγουμε την άσκοπη έκθεσή μας στην υπεριώδη ακτινοβολία και, όταν αυτό είναι αδύνατο, να φροντίζουμε για την αποτελεσματική προφύλαξή μας.

### 7.3.6 Οι ακτίνες X

Οι ακτίνες X έχουν μήκη κύματος ακόμη μικρότερα και συχνότητες ακόμη μεγαλύτερες από αυτές της υπεριώδους ακτινοβολίας. Ανακαλύφθηκαν τυχαία από τον Roentgen, κατά τη διάρκεια πειραμάτων, περίπου έναν αιώνα πριν. Επειδή στην αρχή, η φύση των ακτίνων αυτών ήταν άγνωστη, οι επιστήμονες που ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση τους, τους έδωσαν το όνομα

Χ. Γρήγορα διαπίστωσαν ότι επρόκειτο για μια πολύ διεισδυτική ακτινοβολία, που μπορούσε να περάσει από υλικά αδιαφανή για το ορατό φως, ενώ μπορούσε να προσβάλλει τις φωτογραφικές πλάκες. Αργότερα, ανακάλυψαν ότι η άγνωστη ακτινοβολία ήταν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, πολύ μικρού μήκους κύματος και συνεπώς, πολύ υψηλής ενέργειας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, γρήγορα διαπιστώθηκε ότι οι ακτίνες Χ μπορούν να περνούν από μαλακούς ιστούς, αλλά επιλεκτικά να απορροφώνται από υλικά μεγαλύτερης πυκνότητας, όπως τα οστά και τα μέταλλα. Αυτό οδήγησε, σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά την ανακάλυψή τους, στη μάλλον βιαστική και επικίνδυνη αξιοποίησή τους στην Ιατρική, για διάγνωση και για θεραπεία ασθενειών. Σήμερα γνωρίζουμε ότι επειδή οι ακτίνες Χ μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας και είναι πολύ διεισδυτικές, η υπερβολική χρήση τους μπορεί να προκαλέσει βλάβες στα κύτταρα του ανθρώπου. Γι' αυτό συνιστάται η περιορισμένη χρήση τους και μόνον για εντελώς απαραίτητους λόγους (διαπίστωση καταγμάτων, φυματίωσης κτλ.).

Οι ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται κυρίως για ιατρικές διαγνώσεις όπως για ακτινοσκοπήσεις, για τον έλεγχο καταγμάτων κτλ. (εικόνα 7.8). Επίσης, χρησιμοποιούνται στη ναυπηγική για τον έλεγχο της συγκόλλησης μεταλλικών επιφανειών στα πλοία. Η αξιοποίησή τους στην κρυσταλλογραφία για τη μελέτη της δομής των υλικών οδήγησε, εκτός των άλλων, σε αντίστοιχες εφαρμογές στη Βιολογία που βοήθησαν στην ανακάλυψη της ελικοειδούς δομής του DNA.



**Εικόνα 7.8**

Ακτινογραφία των οστών χεριού, όπου απεικονίζεται το σπάσιμο του οστού.

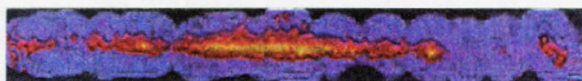


### 7.3.7 Οι ακτίνες γάμα

*Ροές της θάλασσας και σεις  
των άστρων μακρινές επιρροές παρασταθείτε μου  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

Οι ακτίνες γάμα έχουν τα μικρότερα μήκη κύματος και αντίστοιχα τις μεγαλύτερες συχνότητες από όλες τις ακτινοβολίες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Είναι ακτινοβολία εξαιρετικά υψηλής ενέργειας. **Μία ομάδα κυμάτων ακτίνων γ μπορεί να μεταφέρει περίπου 10 εκατομμύρια φορές περισσότερη ενέργεια από μια αντίστοιχη ομάδα κυμάτων ορατού φωτός.**

Οι ακτίνες γ παράγονται στη γη κατά τη ραδιενεργό διάσπαση των πυρήνων, ως συνέπεια των αλλαγών στην εσωτερική ενέργεια του πυρήνα. Παράγονται επίσης κατά τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις στο εσωτερικό του ήλιου. Επιπλέον, ένα σημαντικό ποσοστό ακτίνων γ δημιουργείται κατά τη σύγκρουση των σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας, που προέρχεται από διάφορα σημεία του σύμπαντος, με τα μόρια ή άτομα των στοιχείων που συναντούν στην ανώτερη ατμόσφαιρα της Γης. Πολλές από αυτές τις ακτίνες γ καταφέρνουν να διαπεράσουν την ατμόσφαιρα και να φτάσουν στην επιφάνεια της Γης (εικ.7.10)



**Εικόνα 7.10**

Ο Γαλαξίας, όπως φαίνεται όταν τον παρατηρούμε στην περιοχή των ακτίνων γάμα. Οι ακτίνες αυτές εκπέμπονται κατά τις πυρηνικές αντιδράσεις που προκύπτουν κατά τη σύγκρουση ταχύτητα κινούμενων πυρήνων (πρωτονίων) με τα μόρια του υδρογόνου των ενδογαλαξιακών νεφών.

### 7.3.8 Βλάβες που δημιουργούνται από την ιοντίζουσα (υπεριώδης, X και γ) ακτινοβολία

Η υπεριώδης, η X και η ακτινοβολία γ έχουν τα μικρότερα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και μεταφέρουν τα υψηλότερα ποσά ενέργειας. Γι' αυτό μπορούν να καταστρέφουν τους ιστούς των ζωντανών οργανισμών. Ιοντίζουν τα άτομα και τα μόρια στα κύτταρα των ζωντανών οργανισμών και διακόπτουν τις βιοχημικές διαδικασίες τους. Τότε τα κύτταρα αυτά μπορεί να νεκρωθούν ή ακόμη χειρότερο να υποστούν μεταλλάξεις και να μετατραπούν σε καρκινικά. Μικρές αλλαγές στο DNA των κυττάρων του



σπέρματος ή του ωαρίου είναι ιδιαίτερα επικίνδυνες διότι μπορεί να προκαλέσουν μεταλλάξεις που θα εμφανιστούν στους απογόνους.

Αντίθετα, στην Ιατρική η ιοντίζουσα ακτινοβολία χρησιμοποιείται για τη θεραπεία του καρκίνου. Οι ειδικοί γιατροί βομβαρδίζουν επιλεκτικά με αυτήν τα καρκινικά κύτταρα, τα οποία καταστρέφονται, ενώ πολύ μικρότερη ζημιά παθαίνουν, τα κοντινά τους υγιή κύτταρα.

\*

Όπως διαπιστώσαμε, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκτείνονται σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων. Ενώ όλα διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα, μπορεί να έχουν πολύ διαφορετικά μήκη κύματος και να μεταφέρουν διαφορετικά ποσά ενέργειας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να έχουν πολύ διαφορετικές ιδιότητες και ως εκ τούτου να βρίσκουν πολλές και διαφορετικές εφαρμογές, μερικές από τις οποίες περιγράψαμε παραπάνω. Οι αστρονόμοι εκμεταλλεύονται όλα τα μήκη κύματος της ορατής και μη ορατής περιοχής του φάσματος, προκειμένου να συλλέξουν πληροφορίες για το σύμπαν. Έτσι, διαπιστώνουμε ότι ο όρος “κενό”, που έχουμε χρησιμοποιήσει επανειλημμένα, δεν είναι απόλυτα σωστός, διότι στην πραγματικότητα το “κενό” μπορεί να θεωρηθεί ως ένας ωκεανός ακτινοβολιών και πληροφοριών που έρχονται από όλες τις μεριές του σύμπαντος.



## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Τα ραδιοκύματα διαδίδονται:
  - α) πολύ πιο αργά από το ορατό φως
  - β) ελάχιστα πιο αργά από το ορατό φως
  - γ) με την ίδια ταχύτητα με το ορατό φως
  - δ) πιο γρήγορα από το ορατό φως.
2. Η υπέρυθη ακτινοβολία ( $f = 10^{14}$  Hz) έχει μήκος κύματος πιο κοντά στο:
  - α) 1 m
  - β) 1 mm
  - γ) 1  $\mu\text{m}$
  - δ) 1 nm
3. Οι διαφορετικές ιδιότητες που εκδηλώνουν τα διάφορα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (μικροκύματα, ραδιοκύματα, υπέρυθη ακτινοβολία, ορατό φως, υπεριώδης ακτινοβολία, ακτίνες X και ακτίνες γ) οφείλονται:
  - α) στην ταχύτητά τους

- β) στο πλάτος τους
- γ) στην έντασή τους
- δ) στο μήκος κύματός τους.

**4. Η υπεριώδης ακτινοβολία:**

- α) έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος από το ιώδες φως
- β) κινείται διαμέσου της ατμόσφαιρας της Γης χωρίς εμπόδιο
- γ) έχει μεγαλύτερη συχνότητα από το ιώδες φως
- δ) έχει μικρότερη συχνότητα από το ιώδες φως.

**5. Ποια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος θα επιλέγατε για την αποστολή σήματος α) σε μακρινό σταθμό εδάφους και β) στο διάστημα; Αιτιολογήστε την απάντησή σας.**

**6. Γιατί η ιοντίζουσα ακτινοβολία (ακτίνες Χ και ακτίνες γ) δημιουργεί βλάβες στους βιολογικούς ιστούς;**

**7. Γιατί τα τελευταία χρόνια η υπεριώδης ακτινοβολία προξενεί περισσότερες βλάβες στους ανθρώπους. Ποια η λειτουργία του φυσικού μηχανισμού που προφυλάσσει όλους τους οργανισμούς από τις βλαβερές υπεριώδεις ακτίνες; Πώς ο άνθρωπος μπορεί να προφυλαχτεί από την υπεριώδη ακτινοβολία;**

**8. Ο Νήλ Αρμστρονγκ ήταν ο πρώτος άνθρωπος που περπάτησε στη Σελήνη. Η απόσταση Γης – Σελήνης είναι  $3,85 \times 10^8$  m. α) Σε πόσο χρόνο έφθασε η φωνή του στη Γη με τη βοήθεια των ραδιοκυμάτων; β) Να υπολογιστεί ο χρόνος επικοινωνίας με τον πρώτο αστροναύτη που κάποια μέρα θα περπατήσει στον Άρη, του οποίου η μέση απόσταση από τη Γη είναι  $5,6 \times 10^{10}$  m.**

**9. Κάποιες από τις ακτίνες Χ που παράγονται από ένα μηχάνημα ακτίνων Χ έχουν μήκος κύματος 2,1 nm. Ποια είναι η συχνότητά τους;**

**10. Οι τηλεοράσεις συχνά χρησιμοποιούν εσωτερικές κεραίες. Μια εσωτερική κεραία αποτελείται από ένα ζευγάρι μεταλλικών ράβδων. Το μήκος κάθε ράβδου είναι το ένα τέταρτο του μήκους κύματος ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, του οποίου η συχνότητα είναι 150 MHz. Πόσο μήκος έχει η κάθε ράβδος;**

11. Ένας ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει ένα ραδιοκύμα του οποίου το μήκος κύματος είναι 250 m. α) Πόση είναι η συχνότητα του κύματος; β) Αυτό το ραδιοκύμα είναι AM ή FM;
12. Ο λαμπρότερος αστέρας στον ουρανό είναι ο Σείριος, ο οποίος απέχει από εμάς  $8,3 \times 10^{16}$  m. Όταν κοιτάζουμε αυτόν τον αστέρα, στην πραγματικότητα πόσο πίσω στο χρόνο τον βλέπουμε; Να δώσετε την απάντησή σας σε έτη. (Ένα έτος έχει 365 μέρες).





## μέρος 3

### ΟΠΤΙΚΗ



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

*Και είπε ο θεός,  
γεννηθήτω φως.  
Και εγένετο φως  
(Γένεση)*

Όλοι μας, από τη στιγμή που ερχόμαστε στον κόσμο μέχρι που φεύγουμε από αυτόν, συνδεόμαστε άμεσα ή έμμεσα με το φως και τα φαινόμενα που το χαρακτηρίζουν. Εκφράσεις όπως “φως μου...”, “σκοτεινές δυνάμεις...”, “με φωτίσεις...” φανερώνουν τη σημασία και το ρόλο που παίζει το φως στη ζωή μας. Ποιος άλλωστε δεν έχει εντυπωσιαστεί από το είδωλό του στα ήρεμα νερά μιας λίμνης, από το “σπάσιμο” των κουπιών της βάρκας στο θαλασσινό νερό, από το μεγαλείο του ουράνιου τόξου μετά από μια σύντομη μπόρα, από το βέλος του ήλιου που σκίζει το μισοσκοτάδο μέσα από τη χαράμδα στις γρίλιες και, τέλος, από το θέαμα του έναστρου ουρανού μια σκοτεινή νύχτα.

Όλα αυτά και, περισσότερο ίσως από όλα, η πρωταρχική σημασία που έχει το φως για την ύπαρξη και τη διατήρηση της ζωής στον κόσμο μας, πράγμα που οι πρώτοι άνθρωποι το ένιωθαν πιο πολύ από όσο εμείς σήμερα, είχαν ως αποτέλεσμα, από τη χαράυγή της ανθρώπινης ιστορίας, το φως να αντιμετωπίζεται με δέος, και οι πρώτοι άνθρωποι να λατρεύουν τις πηγές του σαν θεότητες (Θεά Εστία, Θεός Ήλιος, Απόλλωνας).

Η πρώτη, λοιπόν, προσέγγιση της έννοιας του φωτός από τον άνθρωπο, όπως και όλων σχεδόν των φυσικών φαινομένων, υπήρξε θεοκρατική. Στη συνέχεια όμως, οι άνθρωποι σπρωγμένοι από την έντονη επιθυμία να εκλογικεύσουν τον κόσμο που τους περιβάλλει άρχισαν να διατυπώνουν διάφορες θεωρίες που ερμήνευαν, άλλες με λιγότερη και άλλες με περισσότερη επιτυχία, τα παρατηρούμενα φαινόμενα.

Οι πρώτοι που προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τη φύση του φωτός και τη διαδικασία της όρασης, ήταν οι Αρχαίοι Έλληνες. Κατ’ αυτούς (Πλατωνική Σχολή- 4ος αιώνας π.Χ.) από τα μάτια πηγάζουν φωτεινές ακτίνες υπό μορφή νημάτων τα οποία σαρώνουν το οπτικό πεδίο και καθιστούν δυνατή την όραση με κάποιο μηχανισμό αφής. Άλλοι πάλι (Δημόκριτος-5ος αιώνας π.Χ.) πίστευαν ότι τα φωτεινά σώματα εκπέμπουν στιβάδες ατόμων υπό μορφή μεμβρανών που διατηρούν τη μορφή των επιφανειών από τις οποίες αποσπάστηκαν.

Ο Αρχιμήδης ανέπτυξε τη θεωρία των κατόπτρων, ο Πτολεμαίος μελέτησε τη διάθλαση του φωτός, ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς διατύπωσε τη γνωστή αρχή του ελαχίστου δρόμου, που, κάπως τροποποιημένη, ισχύει και σήμερα. Σύμφωνα με αυτήν, το φως κατά τη μετάβασή του από ένα σημείο σε ένα άλλο ακολουθεί το συντομότερο δρόμο.

Είναι αλήθεια ότι τις περισσότερες πληροφορίες που δεχόμαστε τις λαμβάνουμε με τη βοήθεια της όρασης. Από την αρχή του πολιτισμού, τους ανθρώπους απασχολούσαν τα ίδια ερωτήματα που, πιθανόν, απασχολούν και σας σήμερα. Για παράδειγμα: Τι είναι το φως; Πώς ταξιδεύει και πόσο γρήγορα; Γιατί μερικά πράγματα είναι χρωματιστά, ενώ άλλα φαίνονται λευκά και άλλα μαύρα; Πώς μπορούμε και βλέπουμε μέσα από διάφορα σώματα;

Η αναζήτηση των απαντήσεων στα προηγούμενα ερωτήματα κράτησε αιώνες. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα προσπαθήσουμε να τις προσεγγίσουμε μαζί.

Θα μάθουμε πώς και γιατί το φως “κάμπτεται” (διαθλάται), καθώς περνά από ένα διαφανές μέσο σε ένα άλλο. Θα εξετάσουμε πώς αντανακλάται, όπως επίσης και γιατί στο λευκό φως περιέχεται ένα πλήθος χρωμάτων (φάσμα). Με τη βοήθεια αυτών των γνώσεων θα καταλάβουμε πώς κατασκευάζονται και πώς λειτουργούν οι φακοί και τα κάτοπτρα και κατ’ επέκταση τα οπτικά όργανα.

Εφαρμογές των ιδιοτήτων του φωτός στις τηλεπικοινωνίες, στους υπολογιστές και στη βιομηχανία θα συνεχίσουν να εμφανίζονται με όλο και γρηγορότερους ρυθμούς. Μπορούμε να πούμε ότι η τεχνολογική εξέλιξη στον εικοστό αιώνα χαρακτηρίστηκε κυρίως από τη γνώση που αποκτήσαμε για τη συμπεριφορά των ηλεκτρονίων (ηλεκτρονική). Η γνώση μας για τη συμπεριφορά του φωτός (φωτονική) θα χαρακτηρίσει την τεχνολογική εξέλιξη του εικοστού πρώτου αιώνα.



## κεφάλαιο 8



### ΦΩΣ – ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΚΑΤΟΠΤΡΑ

- Φύση του φωτός – Θεωρία των κβάντα
- Ευθύγραμμη διάδοση του φωτός
- Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός
- Ανάκλαση του φωτός
- Νόμοι της ανάκλασης - Διάχυση
- Τα επίπεδα κάτοπτρα και τα είδωλά τους
- Τα σφαιρικά κάτοπτρα και τα είδωλά τους



## 8.1 ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ - ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΚΒΑΝΤΑ

*Τις Δευτέρες, τις Τετάρτες και τις Παρασκευές το φως είναι κύμα  
τις Τρίτες, τις Πέμπτες και τα Σάββατα το φως είναι σωματίδια  
τις Κυριακές σκεπτόμαστε πώς γίνεται αυτό;  
R. Feynman*

Όλοι μας έχουμε την εμπειρία ενός απόλυτα σκοτεινού δωματίου μέσα στο οποίο δε βλέπουμε τίποτα. Ξαφνικά, κάποιος ανάβει ένα σπέρτο και αμέσως βλέπουμε τα αντικείμενα γύρω μας. Το αναμένο σπέρτο και κάθε άλλο σώμα που παράγει φως λέμε ότι είναι μια φωτεινή πηγή. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι:

**Το φως είναι το αίτιο που ενεργοποιεί το αισθητήριο της όρασης.**

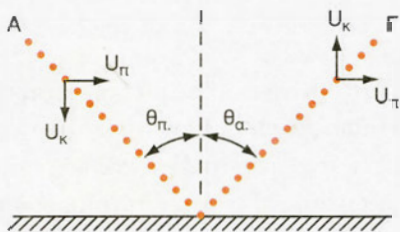
Τα σώματα που παράγουν φως τα ονομάζουμε **φωτεινές πηγές** ή **αυτόφωτα σώματα**. Τα περισσότερα από τα σώματα που μας περιβάλλουν γίνονται ορατά, μόνο όταν το φως που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός πέφτει επάνω τους. Γι' αυτό το λόγο ονομάζονται **ετερόφωτα σώματα**. Τα ετερόφωτα σώματα τα διακρίνουμε σε **αδιαφανή**: αυτά που δεν επιτρέπουν την διέλευση του φωτός από το εσωτερικό τους, και σε **διαφανή**: αυτά που αφήνουν το φως να διέρχεται από μέσα τους εν μέρει ή στο σύνολό του.

Το πρώτο ερώτημα που γεννιέται σε κάποιον που ασχολείται με τα οπτικά φαινόμενα είναι ασφαλώς το "τι είναι το φως;". Η αναζήτηση της απάντησης στο θεμελιακό αυτό ερώτημα κρατάει χιλιάδες χρόνια, από την εποχή του Αριστοτέλη και του Δημόκριτου μέχρι τις μέρες μας.

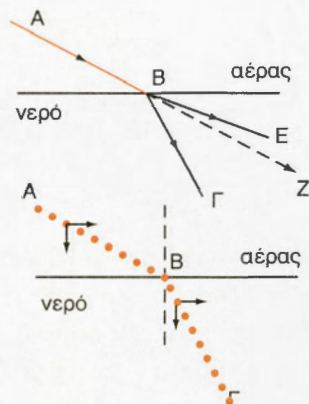
Βέβαια, η απάντηση που δώσαμε στην αρχή στο ερώτημα αυτό δεν θα πρέπει να σας ικανοποιεί και πολύ, διότι μοιάζει με υπεκφυγή. Δεν μας λέει τί είναι το φως, αλλά το τι κάνει το φως.

Ας παρακολουθήσουμε τις κυριότερες προσπάθειες που έγιναν για να δοθεί μια καλύτερη απάντηση.

Στα παλιότερα χρόνια δυο απόψεις κυριαρχούσαν στη σκέψη των επιστημόνων. Η μια άποψη υποστήριζε ότι το φως αποτελείται από σωματίδια που κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Βασικός εκπρόσωπος και υποστηρικτής αυτής της άποψης υπήρξε ο Νεύτωνας, που ονόμασε μάλιστα αυτά τα σωματίδια φωτοφόρα.

**Εικόνα 8.1**

Το μοντέλο της ανάκλασης σύμφωνα με το Νεύτωνα. Η ανάκλαση του φωτός εξηγείται από το Νεύτωνα ως κρούση τελείως ελαστικών σφαιρών (φωτοφόρων σωματιδίων) σε σκληρή ελαστική επιφάνεια.

**Εικόνα 8.2**

Όταν μια ακτίνα φωτός περνά από τον αέρα στο νερό, δε συνεχίζει στην προέκταση της AB που είναι η BZ, αλλά ακολουθεί τη BΓ. Ο Καρτέσιος υποστήριζε ότι, αν το φως αποτελείτο από σωματίδια, θα έπρεπε να ακολουθεί την BE. Ο Νεύτωνας δικαιολογούσε τη τροχιά ABΓ θεωρώντας την ως αποτέλεσμα της μεγαλύτερης έλξης που ασκεί στα φωτοφόρα σωματίδια το πυκνότερο μέσο.

Η άλλη άποψη υποστήριζε ότι το φως είναι κυματική διάδοση ενέργειας. Βασικός εκπρόσωπος, δημιουργός και υποστηρικτής αυτής της θεωρίας υπήρξε ο Χώυχενς (Huygens 1678). Η άποψη αυτή ερμήνευε με μεγαλύτερη επιτυχία πολλά οπτικά φαινόμενα, η αυθεντία όμως του Νεύτωνα ήταν τόσο μεγάλη, που επεσκίαζε τις επιτυχημένες ερμηνείες οπτικών φαινομένων με την κυματική θεωρία και εμπόδισε την επικράτησή της για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Η ανακάλυψη νέων οπτικών φαινομένων τα οποία εξηγούνται επιτυχώς μόνο με την κυματική θεωρία του φωτός οδήγησε σταδιακά στην επικράτηση αυτής της άποψης.

Η πεποίθηση για την κυματική φύση του φωτός έγινε ακλόνητη, ιδιαίτερα μετά τη διατύπωση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας από τον Μάξγουελ (Maxwell) οπότε κατεδείχθη η ταύτιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και του φωτός.

Γρήγορα όμως και πάλι, παρατηρήθηκαν νέα φαινόμενα (ακτινοβολία μελανού σώματος, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton) που στάθηκε αδύνατο να ερμηνευθούν με την κλασική κυματική ηλεκτρομαγνητική θεωρία για τη φύση του φωτός.

Τα φαινόμενα αυτά ερμηνεύτηκαν ικανοποιητικά όταν έγινε αποδεκτό ό-



τι το φως εκπέμπεται και απορροφάται κατά ορισμένες ποσότητες (κβάντα). Το φως, κατά τον Άϊνσταϊν (Einstein), αποτελείται από εντοπισμένες στο χώρο, κατά κάποιο τρόπο, οντότητες, τις οποίες σήμερα ονομάζουμε **φωτόνια**. Αυτό αποτέλεσε την αρχή της θεωρίας των κβάντα.

Αλήθεια, πόσο μας θυμίζουν τα **φωτόνια** του Άϊνσταϊν τα **φωτοβόλα σωματίδια** του Νεύτωνα; Μια μικρή αλλαγή δικαιολογείται, άλλωστε, μετά από ένα ταξίδι διακοσίων ετών στο χρόνο.

### Τί είναι λοιπόν το φως;

Μετά από όλα όσα αναφέραμε, μπορούμε να πούμε πως σήμερα πιστεύουμε ότι: **“μια δέσμη φωτός είναι μια ροή φωτονίων”**. Κάθε φωτόνιο είναι ένας παλμός ενέργειας, ένα **κβάντο** ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. (Εικ. 3.3) Κάθε φωτόνιο διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα  $c$  και περιεκλείει ενέργεια  $E$  που παρέχεται από τη σχέση:

$$E = hf \quad (8.1)$$

όπου  $f$ : η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος

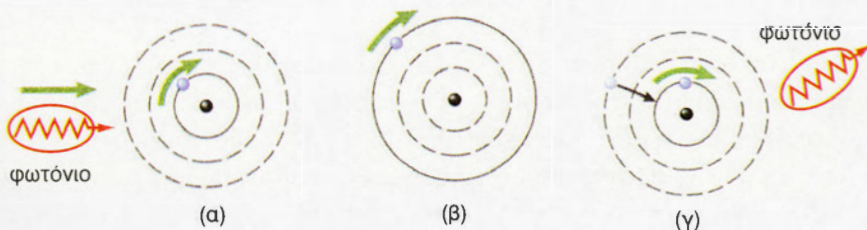
$h$ : μια παγκόσμια σταθερά που ονομάζεται σταθερά δράσης του

Πλάνκ (Planck), προς τιμή του θεμελιωτή της κβαντικής θεωρίας.

Η σταθερά  $h$  ισούται με:

$$\begin{aligned} h &= 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \text{ ή} \\ h &= 6,626 \times 10^{-34} \text{ J/Hz} \end{aligned}$$

και εκφράζει την ενέργεια ανά μονάδα συχνότητας της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (που σημαίνει ότι, όταν η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αυξάνεται κατά ένα 1 Hz, η ενέργεια του φωτονίου μεγαλώνει κατά  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J}$ ).



**Εικόνα 8.3**

Μοντέλο αλληλεπίδρασης του φωτονίου με ένα άτομο:

(α) Συνάντηση φωτονίου με άτομο.

(β) Απορρόφηση του φωτονίου με αποτέλεσμα τη διέγερση του ατόμου.

(γ) Εκπομπή του φωτονίου με αποτέλεσμα την αποδιέγερση του ατόμου.

Τα φωτόνια εκπέμπονται και απορροφώνται από τα άτομα, όταν τα η-

λεκτρόνιά τους μεταβαίνουν σε άλλη στοιβάδα από αυτήν στην οποία περιφέρονται. Εκπομπή έχουμε, όταν ηλεκτρόνιο μεταπίπτει σε στοιβάδα χαμηλότερης ενέργειας και απορρόφηση, όταν ηλεκτρόνιο μεταπηδά σε υψηλότερης ενέργειας στιβάδα (εικ. 8.3), (διέγερση, αποδιέγερση).

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 8.1

Να κατατάξετε τα ακόλουθα σώματα σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες: αυτόφωτα, αδιαφανή, διαφανή.

Ήλιος, φεγγάρι, άστρα, δέντρα, βουνά, αναμμένο κερί, τζάμι, νερό, έπιπλα, αέρας, θαλασσινό νερό, αυτοκίνητο, φώτα αυτοκινήτου, πουλιά, ζώα, πυγολαμπίδες.

## 8.2 ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

*Απ' άστρο σ' άστρο  
πάλλεται το φως.  
Τέννυσον*

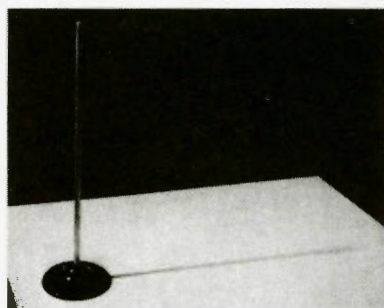
Όλοι μας ασφαλώς έχουμε παρατηρήσει τη σκιά μας, καθώς και τη σκιά που άλλα σώματα δημιουργούν, όταν φωτίζονται. Ποιος άλλωστε δεν έχει διασκεδάσει σε κάποια παράσταση του Καραγκιόζη (Θέατρο σκιών);

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 8.2

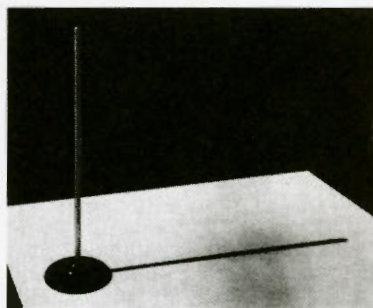
Σταθείτε, όταν νυχτώσει, στο δρόμο κοντά σε ένα φωτιστικό του δήμου και παρατηρήστε τη σκιά σας. Θα δείτε ότι, ενώ τα πόδια σας διαγράφονται ευκρινώς, η σκιά που σχηματίζει το κεφάλι σας είναι λίγο συγκεχυμένη. Στη συνέχεια, απομακρυνθείτε λίγο. Θα παρατηρήσετε ότι η ασάφεια αυξάνει και επεκτείνεται και στη σκιά των ποδιών σας. Πώς το εξηγείτε αυτό;

**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 8.3**

Σε ένα σκοτεινό δωμάτιο, φωτίστε με έναν προβολέα μια κατακόρυφη ράβδο (εικ. 8.4). Θα παρατηρήσετε ότι η σκιά διευρύνεται και γίνεται ασαφής, όσο η απόσταση των διάφορων σημείων της ράβδου από τα αντίστοιχα σημεία της σκιάς της αυξάνει (εικ. 8.4.α). Σκεπάστε, στη συνέχεια, τη φωτεινή επιφάνεια του προβολέα με αδιαφανές χαρτόνι το οποίο στο κέντρο του έχει μια πολύ μικρή τρύπα. Τώρα, η πηγή του φωτός είναι η **μικρή** τρύπα. Θα παρατηρήσετε ότι η σκιά της ράβδου είναι πλέον ευκρινής σε όλη της την έκταση (εικ. 8.4.β).



(α)



(β)

**Εικόνα 8.4**

(α) Η σκιά της ράβδου που δημιουργείται από πηγή με διαστάσεις.

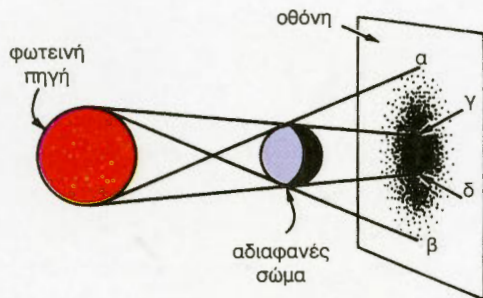
(β) Η σκιά της ίδιας ράβδου που δημιουργείται από σημειακή πηγή.

Οι παρατηρήσεις από τις προηγούμενες δραστηριότητες μπορούν να εξηγηθούν, αν δεχθούμε ότι: **Το φως από κάθε σημείο μιας φωτεινής πηγής διαδίδεται ευθύγραμμα προς όλες τις κατευθύνσεις.** (Το μέσο διάδοσης υποτίθεται ότι είναι ομογενές).

Το γεγονός ότι οι πολύ μικρές φωτεινές πηγές, που μπορούν να θεωρηθούν σημειακές, δημιουργούν σκιές με πολύ σαφή όρια μαζί με την παραδοχή της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός, μας βοηθά να καταλάβουμε γιατί οι φωτεινές πηγές με μεγαλύτερες διαστάσεις, όπως ο ήλιος, δημιουργούν ασαφείς σκιές (παρασκιά).

Στο σχήμα (εικ. 8.5) φαίνεται πώς σχηματίζεται η σκιά ενός σώματος, όταν η φωτεινή πηγή έχει διαστάσεις, όπως, για παράδειγμα, ο ήλιος.



**Εικόνα 8.5**

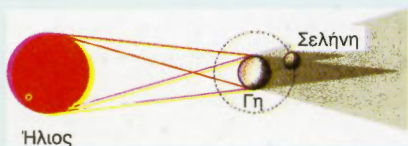
Δημιουργία σκιάς και παρασκιάς

Στην περιοχή της οθόνης που περικλείεται από τον κύκλο ο οποίος έχει διάμετρο γδ, δεν μπορεί να φτάσει φως από καμιά περιοχή της φωτεινής πηγής, εφόσον το φως ταξιδεύει ευθύγραμμα. Συνεπώς, αυτή η περιοχή είναι εντελώς σκοτεινή και ονομάζεται **σκιά**.

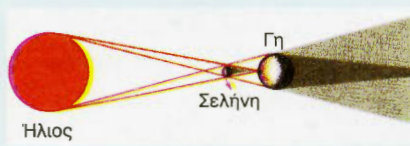
Στην περιοχή της οθόνης όμως που περιέχεται ανάμεσα στον κύκλο με διάμετρο αβ και στον κύκλο με διάμετρο γδ, φτάνει εν μέρει από κάποια σημεία της πηγής φως, με αποτέλεσμα η περιοχή αυτή να εμφανίζεται λιγότερο σκοτεινή. Η φωτεινότητά αυτής της περιοχής προοδευτικά αυξάνεται, καθώς πλησιάζουμε την εξωτερική περιφέρεια. Η περιοχή αυτή με την προοδευτικά αυξανόμενη φωτεινότητα ονομάζεται **παρασκιά**.

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ 8.1

Οι περιοχές της Γης που βρίσκονται εντός της σκιάς της σελήνης έχουν **ολική έκλειψη ηλίου**. Αυτές που βρίσκονται στην παρασκιά έχουν **μερική έκλειψη ηλίου** (εικ. 8.6).

**Εικόνα 8.6**

(α) Σχηματική έκλειψη σελήνης

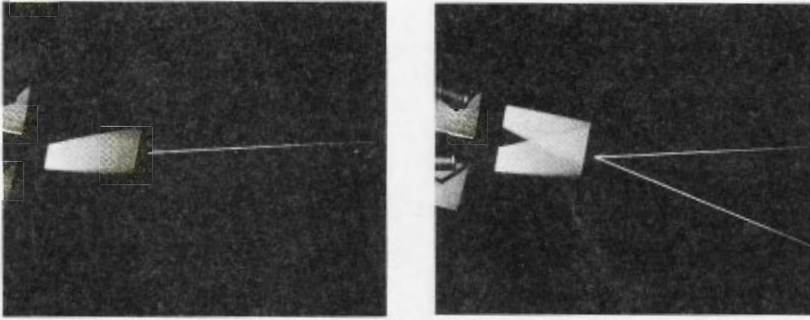


(β) Σχηματική έκλειψη ηλίου

Μια πολύ χρήσιμη έννοια για την περιγραφή των φαινομένων που συνδέονται με τη διάδοση του φωτός είναι η έννοια της **ακτίνας**.

Μια ακτίνα φωτός σχηματίζεται, αν στην πορεία μιας δέσμης που προέρχεται από τον προβολέα, παρεμβάλλουμε ένα αδιαφανές πέτασμα στο οποίο έχουμε κάνει μια πολύ μικρή κυκλική οπή (εικ. 8.7). Τα αποτελέσματα είναι καλύτερα, αν η οπή είναι μακριά από τον προβολέα ή αν χρησιμοποιούμε δύο οπές, τη μια μετά την άλλη, σε κάποια απόσταση. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο, αν η πηγή έχει μεγάλες διαστάσεις.



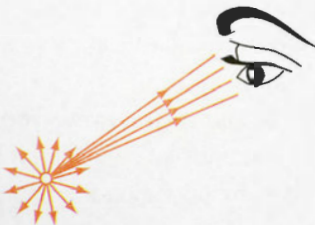
**Εικόνα 8.7**

Μια πειραματική μέθοδος για να δείξουμε (α) τη δημιουργία μιας λεπτής δέσμης φωτός και (β) ότι δύο δέσμες φωτός περνούν η μία μέσα από την άλλη, χωρίς να επηρεάζονται.

Στην πράξη, βέβαια, το φως που εξέρχεται από τη μικρή οπή έχει πάντα τη μορφή μιας λεπτής κωνικής δέσμης, η δε οπή δεν μπορεί να μικρύνει πέρα από ένα όριο. Μπορούμε όμως να υποθέσουμε ότι, συνεχίζοντας τη διαδικασία σμίκρυνσης της οπής, θα φθάναμε στο να συμπέσει η φωτεινή δέσμη με τη γεωμετρική ευθεία που έχει τη διεύθυνσή της. Αυτή, λοιπόν, την **ευθεία** ονομάζουμε **ακτίνα φωτός**.

Τις ακτίνες χρησιμοποιούμε για να σχεδιάσουμε την πορεία του φωτός στις διάφορες οπτικές διατάξεις. Όπως οι γραμμές χρησιμοποιούνται από έναν αρχιτέκτονα για να σχεδιάσει ένα σπίτι ή από έναν ηλεκτρονικό, για να απεικονίσει ένα κύκλωμα. Οι γραμμές, όμως, δεν είναι ούτε οι τοίχοι του σπιτιού ούτε τα καλώδια του κυκλώματος.

Στις διάφορες εφαρμογές θα υποθέτουμε ότι το φως εκπέμπεται από τις φωτεινές πηγές υπό μορφή ευθύγραμμων φωτεινών ακτίνων. Στην πραγματικότητα όμως, το φως φτάνει στα μάτια μας πάντα με τη μορφή λεπτής κωνικής φωτεινής δέσμης (εικ. 8.8).

**Εικόνα 8.8**

Λεπτή κωνική δέσμη φωτός που φτάνει στο μάτι μας από μια φωτεινή πηγή.

Την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός εκμεταλλευόμαστε και στη περίπτωση που δείχνει η εικόνα (8.9).

**Εικόνα 8.9**

Οπτικός, τοπογραφικός καθορισμός του υψομέτρου

Στο επόμενο κεφάλαιο θα διαπιστώσουμε πόσο χρήσιμη είναι η έννοια της **ακτίνας φωτός**. Το κεφάλαιο της οπτικής που εξετάζει την πορεία των ακτίνων σε διάφορα μέσα λέγεται γεωμετρική οπτική.

### ΑΣ ΣΚΕΦΤΟΥΜΕ...

Είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο ότι το φως μπορεί να θεωρηθεί είτε σωματίδιο (φωτόνιο) είτε ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Πώς θα μπορέσουμε να συμβιβάσουμε την έννοια της ακτίνας με τις δύο αυτές όψεις του φωτός;

Αν θεωρούσατε το φως σωματίδιο (φωτόνιο), τί θα λέγατε ότι εκφράζει η έννοια της ακτίνας;

Μήπως η ιδέα ενός σφαιρικού μπαλονιού που φουσκώνει και η διαδρομή που ακολουθούν τα διάφορα σημεία στην επιφάνειά του, σας βοηθά να βρείτε με τι θα ταυτίζαμε την έννοια της ακτίνας, στην περίπτωση που το φως θεωρείται ηλεκτρομαγνητικό κύμα;

## 8.3 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ένας από τους πρώτους που προσπάθησαν να μετρήσουν την ταχύτητα του φωτός ήταν ο Γαλιλαίος. Δεν το πέτυχε όμως και απλώς κατέληξε στο συμπέρασμα ότι: “αν η διάδοση του φωτός δεν είναι ακαριαία, η ταχύτητά του είναι πάρα πολύ μεγάλη”.

Η πρώτη ποσοτική μέτρηση της ταχύτητας του φωτός,  $c$ , έγινε από το Δανό αστρονόμο Roemer (Ρέμερ) ο οποίος, εκμεταλλευόμενος την κίνηση της Γης γύρω από τον ήλιο, και την κίνηση ενός από τους δορυφόρους του Δία γύρω από αυτόν, βρήκε την τιμή  $2,1 \times 10^8$  m/s.

Το βασικό σφάλμα στη μέτρηση του Roemer οφείλεται στη λαθεμένη γνώση που υπήρχε την εποχή εκείνη για την τιμή της ακτίνας της τροχιάς της Γης γύρω από τον Ήλιο. Το 1849 ο Γάλλος φυσικός Φιζώ (Fizeau) μέτρησε το χρόνο τον οποίο χρειάζεται το φως για να διανύσει την απόσταση α-

νάμεσα σε δύο βουνά που απείχαν 8,6 km και υπελόγισε την ταχύτητά του στην τιμή  $3,1 \times 10^8$  m/s.

Οι πρώτες υψηλής ακριβείας μετρήσεις έγιναν από τον Αμερικανό φυσικό (Michelson) Μάικελσον, το 1920. Ο Μάικελσον, όπως και ο Φιζώ, μέτρησε το χρόνο διαδρομής του φωτός μεταξύ δύο βουνών που απείχαν 70 km. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησε μια διάταξη με σύστημα περιστρεφόμενων κατόπτρων.

Με τη βοήθεια αυτής της διάταξης βρήκε ότι η ταχύτητα του φωτός την τιμή:  $c = 2,999\,796 \times 10^8$  m/s.

Πειράματα για την ταχύτητα του φωτός, που έδωσαν πολύ καλύτερες τιμές ( $c = 2,999\,796 \times 10^8$  m/s), πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1970 με τη βοήθεια μετρήσεων του μήκους κύματος και της συχνότητας του φωτός που εκπέμπουν τα Laser. Σήμερα, έχει προσδιοριστεί τόσο καλά που η αποδεκτή τιμή της που είναι:  $c = 2,997\,924\,58 \times 10^8$  m (ακριβώς), λαμβάνεται ως παγκόσμια σταθερά χωρίς σφάλμα μέτρησης.

Το φως "ταξιδεύει" γρηγορότερα στο "κενό". Η ταχύτητά του στα διάφορα υλικά είναι πάντα μικρότερη από το c. Ακόμη, η ταχύτητά του σ' αυτά εξαρτάται από τη συχνότητά του και το ίδιο το υλικό. Στον πίνακα (8.1) παρουσιάζεται η ταχύτητα του φωτός σε διάφορα υλικά.

Πίνακας 8.1

Ταχύτητα φωτός με μήκος κύματος 589 nm.

| Υλικό       | Ταχύτητα ( $\times 10^8$ m/s) |
|-------------|-------------------------------|
| Κενό        | 2,997 924 58 (ακριβώς)        |
| Αέρας       | 2,9970                        |
| Νερό        | 2,25                          |
| Οινόπνευμα  | 2,20                          |
| Βενζόλιο    | 2,00                          |
| Στεφανύαλος | 1,97                          |
| Πλέξι γκλας | 1,89                          |
| Διαμάντι    | 1,24                          |

## 8.4 ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

*να μη μάτην ο Θεός περιάγει  
τας ημετέρας όψεις, κατ' ίσας το φως  
ανακλά γωνίας.  
Ἦρων ο Αλεξανδρεὺς*

Εικόνες όπως αυτή που βλέπουμε (εικ. 8.10), σίγουρα θα σας είναι γνωστές και σφαλώς θα έχουν τραβήξει το βλέμμα σας.





Εικόνα 8.10



Εικόνα 8.11

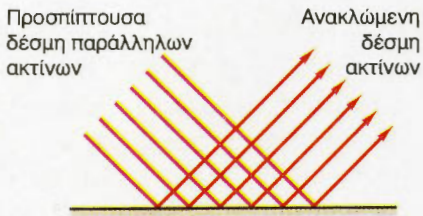
Αλλά και κατά την καθημερινή ατομική περιποίηση σας (εικ. 8.11) θα σας έχει κινήσει την περιέργεια αυτό που αντικρίζεται απέναντί σας στον καθρέφτη, όσο κι αν η συνεχής επανάληψη έχει ελαττώσει την εντύπωση που προκαλεί. Ποιο είναι όμως το γενικό φαινόμενο που κρύβεται πίσω από εικόνες και παρατηρήσεις όπως αυτές.

Όλα τα σώματα, διαφανή ή αδιαφανή, ανακλούν ένα μέρος από το φως που πέφτει επάνω τους. Δηλαδή, ένα μέρος από το φως που πέφτει επάνω τους επιστρέφει στο μέρος από όπου προήλθε. Αυτό ακριβώς ονομάζουμε **ανάκλαση** (κανονική) (εικ. 8.12).

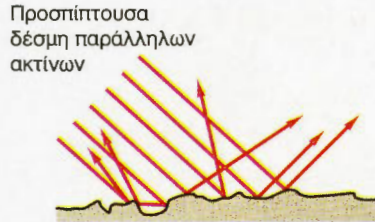
Οι περισσότερες επιφάνειες των διάφορων σωμάτων προκαλούν μια **ακανόνιστη ανάκλαση** (διάχυση), δηλαδή σκορπίζουν το φως σε διάφορες κατευθύνσεις (εικ. 8.13). Με τη βοήθεια αυτού του διασκορπισμού του φωτός καθίσταται δυνατή η παρατήρηση των διάφορων σωμάτων, η αντίληψη της υφής τους και του χρώματός τους και η διάκρισή τους από τα άλλα σώματα του περιβάλλοντός τους.

Μερικά υλικά, όπως τα πολύ καλά στιλβωμένα φύλλα αργύρου, αλουμινίου, χάλυβα ή χαλκού απορροφούν ελάχιστη ποσότητα από το φως που πέφτει επάνω τους και το υπόλοιπο το ανακλούν με πολύ πιο κανονικό τρόπο από όσο οι τραχιές και ακατέργαστες επιφάνειες των διάφορων άλλων υλικών (εικ. 8.13). Ένας συνηθισμένος καθρέφτης, αποτελείται από μια λεπτή μεμβράνη αργύρου τοποθετημένη στην πίσω επιφάνεια μιας γυάλινης πλάκας.



**Εικόνα 8.12**

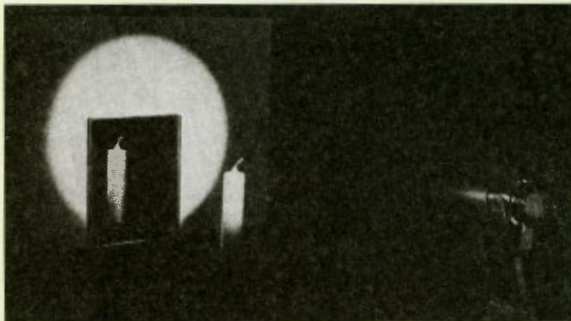
Δεσμή φωτός προσπίπτει σε λεία και στιλπνή επιφάνεια. Η διεύθυνση των ανακλώμενων ακτίνων είναι για όλες η ίδια. Ο παρατηρητής θα δει το ανακλώμενο φως, μόνο αν βρεθεί στην κατάλληλη διεύθυνση.

**Εικόνα 8.13**

Δεσμή φωτός προσπίπτει σε ανώμαλη επιφάνεια. Η διεύθυνση των ανακλώμενων ακτίνων είναι τυχαία, οπότε, σε όποια θέση και αν βρεθεί ο παρατηρητής, θα αντιληφθεί μέρος του ανακλώμενου φωτός.

#### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 8.4

Πάρτε ένα κομμάτι λευκό χαρτόνι και επάνω του στερεώστε έναν καθρέφτη. Ακριβώς μπροστά από τον καθρέφτη τοποθετήστε ένα κερί. Φωτίστε το χαρτόνι με έναν προβολέα ή με ένα φακό, όπως φαίνεται στην εικόνα (8.14), ενώ ο χώρος στον οποίο βρίσκεστε πρέπει να είναι σκοτεινός. Τοποθετήστε σε μια θέση, πλάγια ως προς την ευθεία που ενώνει τον προβολέα με το κερί, και το κάτοπτρο.

**Εικόνα 8.14**

Θα παρατηρήσετε ότι το χαρτόνι εμφανίζεται φωτεινό και λευκό, ενώ ο καθρέφτης εμφανίζεται εντελώς σκοτεινός. Η ίδια ποσότητα φωτός όμως πέφτει τόσο πάνω στο χαρτόνι όσο και πάνω στον καθρέφτη για τον οποίο ξέρουμε ότι λειτουργεί, διότι πίσω από αυτόν βλέπουμε το κερί.

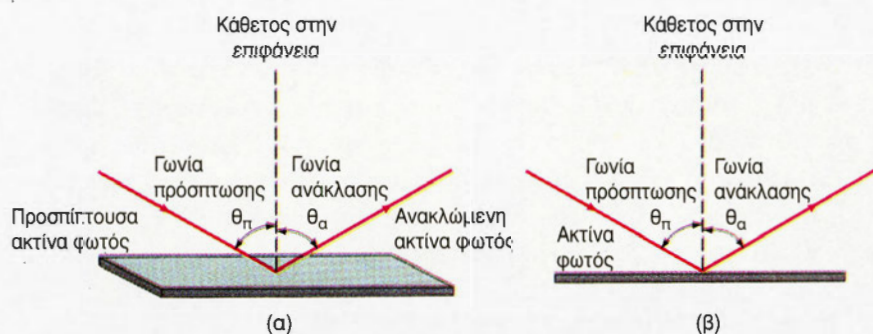
Πώς εξηγείται, λοιπόν, το ότι στην εικόνα το χαρτί εμφανίζεται πολύ φωτεινότερο από τον καθρέφτη;

Η προηγούμενη δραστηριότητα μας βοηθά να καταλάβουμε τη σημαντική διαφορά που υπάρχει στον τρόπο με τον οποίο τα διάφορα σώματα συμπεριφέρονται όταν το φως πέφτει επάνω τους.

## 8.5 ΝΟΜΟΙ ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ - ΔΙΑΧΥΣΗ

Όταν το φως πέφτει στην επιφάνεια ενός σώματος, ένα μέρος του ανακλάται, όπως είδαμε. Το υπόλοιπο είτε απορροφάται από το σώμα και μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια (που το ζεσταίνει) ή, αν το σώμα είναι διαφανές, όπως το γυαλί ή το νερό, ένα μέρος του διέρχεται μέσα από αυτό. Στην περίπτωση ενός καλά επαργυρωμένου καθρέφτη πάνω από το 95% του φωτός που πέφτει επάνω του ανακλάται.

Λεπτή δέσμη φωτός προσπίπτει σε μια επίπεδη επιφάνεια. Η γωνία την οποία σχηματίζει η προσπίπτουσα δέσμη με την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης ονομάζεται **γωνία πρόσπτωσης  $\theta_{\pi}$** . Η γωνία την οποία σχηματίζει η ανακλώμενη δέσμη με την κάθετο στο ίδιο σημείο ονομάζεται **γωνία ανάκλασης  $\theta_{\alpha}$** .



**Εικόνα 8.15**

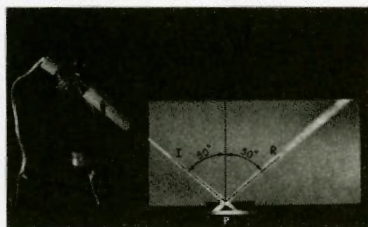
Ο νόμος της ανάκλασης και η πορεία του φωτός κατά την ανάκλασή του, όπως φαίνεται, όταν κοιτάμε την επιφάνεια λοξά από πάνω (α) και από τα πλάγια (εγκαρσίως) (β).

### Νόμοι ανάκλασης

- Για επίπεδες επιφάνειες, η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετος στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο που είναι κάθετο στην ανακλώσα επιφάνεια.
- Η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης.

$$\theta_{\pi} = \theta_{\alpha}$$

Ο νόμος αυτός ήταν γνωστός και στους αρχαίους Έλληνες και μπορείτε εύκολα να τον αποδείξετε με τη βοήθεια ενός καθρέφτη και ενός προβολέα (εικ. 8.16).

**Εικόνα 8.16**

(α) Κανονική ανάκλαση από μια λεία και στιλπνή επιφάνεια.

(β) Επιβεβαιώνεται ότι η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με την γωνία ανάκλασης.

Όταν μια λεπτή δέσμη φωτός πέφτει πάνω σε έναν καθρέφτη, θα δούμε το ανακλώμενο φως, μόνο στην περίπτωση που είμαστε σε κατάλληλη θέση, ενώ στην περίπτωση που πέφτει πάνω σε μια τραχιά επιφάνεια, όπως είναι η επιφάνεια ενός χαρτιού ή ενός επίπλου, το φως ανακλάται ακανόνιστα (διαχέεται) και έτσι βλέπουμε το αντικείμενο, απ' όπου και αν το κοιτάξουμε. Για να θεωρείται μια επιφάνεια τραχιά και να διαχέει το φως, δεν είναι απαραίτητο να την αισθανόμαστε με την αφή ως τραχιά. Αρκεί να παρουσιάζει ανομοιογένεια σε μικροσκοπικό επίπεδο.

- Μπορείτε τώρα να απαντήσετε στο ερώτημα στο τέλος της δραστηριότητας (8.4);

### ΑΣ ΣΚΕΦΤΟΥΜΕ ΒΑΘΥΤΕΡΑ...

Μετά από όλα όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως τι γνώμη σχηματίζατε για την επιφάνεια της σελήνης. Θα πρέπει να είναι λεία και στιλπνή σαν καθρέφτης ή ακανόνιστη και τραχιά; Πώς αιτιολογείτε την άποψή σας;

Σκεφτείτε το ρόλο της διάχυσης στο φωτισμό των διάφορων χώρων με φυσικό ή τεχνητό φως.

Πώς εξηγείτε το ότι, πριν ακόμη ο ήλιος ανατείλει, υπάρχει αρκετό φως; Σε τι οφείλεται το φως αυτό;

## 8.6 ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΩΛΑ ΤΟΥΣ

*Κάτοπτρον είδους χαλκός εστίν,  
οίνος δε νου.  
Αισχύλος*

Όταν κοιτάζουμε έναν καθρέφτη που βρίσκεται μπροστά μας, βλέπουμε σ' αυτόν τον εαυτό μας και διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται δίπλα μας και



πίσω μας. Όλα αυτά που βλέπουμε φαίνονται να είναι μπροστά μας, πίσω από τον καθρέφτη, αλλά φυσικά όλοι ξέρουμε ότι δεν είναι στην πραγματικότητα εκεί. Αυτά που βλέπουμε είναι τα **ειδωλα** μόνο των αντικειμένων.

Όπως φαίνεται στην εικόνα (8.17), ακτίνες ξεκινούν από ένα σημείο του πώματος του μπουκαλιού σχηματίζοντας μια κωνική δέσμη, ανακλώνται στον καθρέφτη και φτάνουν στο μάτι μας. Το ίδιο μπορεί να γίνει από οποιοδήποτε άλλο σημείο του μπουκαλιού.

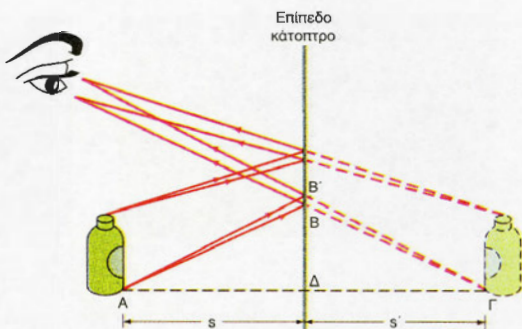
Δέσμες ακτίνων φωτός ξεκινούν από κάθε σημείο της επιφάνειας του μπουκαλιού αλλά μόνο εκείνες που πέφτουν στον καθρέφτη με την κατάλληλη κατεύθυνση θα φτάσουν στο μάτι μας. Οι κωνικές δέσμες που φτάνουν στο μάτι μας από τα διάφορα σημεία του μπουκαλιού **φαίνονται** σαν να εκπορεύονται από σημεία πίσω από τον καθρέφτη. Το σύνολο των σημείων αυτών αποτελεί το "είδωλο" του μπουκαλιού. Δηλαδή, ο εγκέφαλός μας ερμηνεύει τα ερεθίσματα που δέχεται το μάτι μας από τις προσπίπτουσες σ' αυτό δέσμες φωτός σαν το φως να είχε ακολουθήσει μια εξ ολοκλήρου ευθύγραμμη διαδρομή. Δηλαδή, θεωρεί ότι το αντικείμενο βρίσκεται στην προέκταση της ανακλώμενης ακτίνας. Το σημείο από το οποίο **φαίνεται** να εκπορεύεται η κάθε δέσμη φωτός που φτάνει στο μάτι μας, είναι ένα σημείο του ειδώλου του μπουκαλιού. Για κάθε σημείο του αντικειμένου υπάρχει ένα αντίστοιχο σημείο στο είδωλό του.

Από την εικόνα (8.17) προκύπτει ότι  $s = s'$  εφόσον τα τρίγωνα  $\triangle ADB$  και

$\triangle B\Gamma\Delta$  είναι ίσα (Ορθογώνια,  $BD$  κοινή και  $\hat{A}B\Delta = \hat{\Gamma}B\Delta$ ). Συμπεραίνουμε συνεπώς ότι:

**Η απόσταση του ειδώλου,  $s'$ , από το επίπεδο κάτοπτρο θα είναι ίση με την απόσταση του αντικειμένου,  $s$  από αυτό.**

Στην περίπτωση της εικόνας (8.17) οι φωτεινές ακτίνες που ξεκινούν από το αντικείμενο (μπουκάλι) δε φτάνουν στη θέση στην οποία βρίσκεται το είδωλο και γι' αυτό το είδωλο αυτό δεν μπορεί να σχηματιστεί σε οθόνη ή σε φιλμ που θα είχε τοποθετηθεί στη θέση αυτή. Για το λόγο αυτό το είδωλο που σχηματίζεται από τις νοητικές προεκτάσεις των φωτεινών ακτινών που φτάνουν στα μάτια μας, μετά την ανάκλασή τους από επίπεδο κάτο-



**Εικόνα 8.17**

Σχηματισμός φανταστικού ειδώλου από επίπεδο κάτοπτρο.

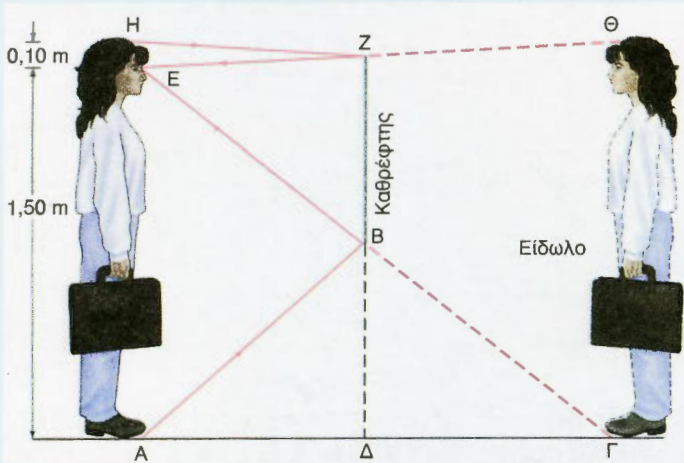


πτρο, ονομάζεται **φανταστικό είδωλο**.

Ο εγκέφαλός μας έχει τόσο πολύ εξοικειωθεί με την ιδέα της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός, ώστε μας δημιουργεί την αίσθηση ότι η φωτεινή πηγή βρίσκεται πάντα στη θέση απ' όπου έρχονται ή φαίνονται ότι έρχονται οι φωτεινές ακτίνες. Συνήθως, λέμε "βλέπω εκεί μια φωτεινή πηγή".

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ 8.2. Το μέγεθος ενός καθρέφτη.

Πόσο πρέπει να είναι το ελάχιστο ύψος ενός καθρέφτη και πόσο πρέπει να απέχει το κάτω άκρο του από το δάπεδο, ώστε μια μαθήτρια με ύψος 1,60 m να μπορεί να δει ολόκληρο το σώμα της.



**Εικόνα 8.18**

Πώς βλέπουμε τον εαυτό μας στον καθρέφτη.

Για να μπορεί να δει η κοπέλα τα παπούτσια της πρέπει η ακτίνα από το A να ανακλάται στο B έτσι ώστε η γωνία  $\angle ABD$  να είναι ίση με την γωνία  $\angle EBZ$  συνεπώς το ύψος BD πρέπει να είναι το μισό του ύψους  $AE = 1,50$  m. Άρα  $BD = 0,75$  m. Ομοίως αν η κοπέλα θέλει να δει την κορυφή του κεφαλιού της πρέπει το πάνω άκρο του καθρέφτη να φτάνει στο σημείο Z το οποίο είναι 5 cm κάτω από την κορυφή του κεφαλιού της. Συνεπώς  $\Gamma\Delta$  πρέπει να είναι 1,55 m και ο καθρέφτης πρέπει να έχει ελάχιστο ύψος  $\Gamma B = (1,55\text{ m} - 0,75\text{ m}) = 0,80$  m. Το κάτω άκρο του καθρέφτη πρέπει να απέχει από το δάπεδο 0,75 m.

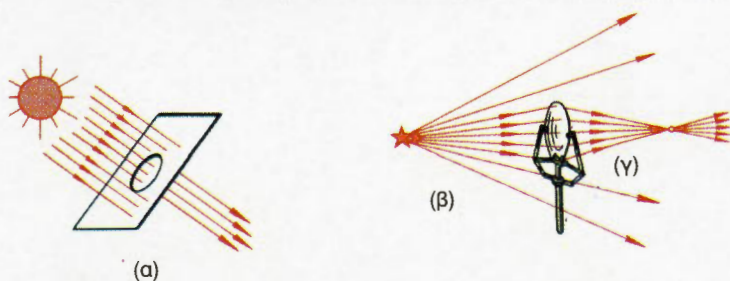
**Συμπέρασμα:** Για να μας δείχνει ολόκληρους ένας καθρέφτης πρέπει να έχει τουλάχιστον το μισό μας ύψος.

**Ερώτηση:** Το αποτέλεσμα αυτό εξαρτάται και από την απόστασή μας από τον καθρέφτη;

## 8.7 ΤΑ ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΩΛΑ ΤΟΥΣ

Όλοι ασφαλώς θα έχει τύχει να δείτε το ειδωλό σας σε ένα μεταλλικό βάζο ή σε μία μπάλα του χριστουγεννιάτικου δέντρου ή σε ένα καλά γυαλισμένο μπουλ. Σίγουρα, θα έχετε διαπιστώσει ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα σ' αυτό που βλέπετε στις περιπτώσεις αυτές και σε ό,τι βλέπετε, όταν κοιτάτε ένα συνηθισμένο καθρέφτη.

Στην προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι τα επίπεδα κάτοπτρα μπορούν να αλλάξουν μόνο τη διεύθυνση μιας φωτεινής δέσμης όχι όμως και τη μορφή της. Δεν μπορούν, δηλαδή, να την μετατρέψουν από αποκλίνουσα σε συγκλίνουσα ή από παράλληλη σε συγκλίνουσα και αντιστρόφως.



**Εικόνα 8.19**

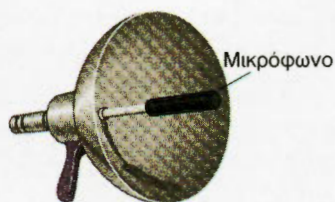
Διάφορα είδη φωτεινών δεσμών: (α) Παράλληλη (β) Αποκλίνουσα (γ) Συγκλίνουσα

Σε περίπτωση που ενδιαφερόμαστε για κάτι τέτοιο, είμαστε αναγκασμένοι να καταφύγουμε σε μη επίπεδα κάτοπτρα. Αυτό κάνουμε, όταν θέλουμε π.χ. να συγκεντρώσουμε το ηλιακό φως σε ένα σημείο και να πετύχουμε έτσι πολύ υψηλές θερμοκρασίες (εικ. 8.20), ή να συλλάβουμε μια ασθενή δέση κυμάτων από μια συγκεκριμένη κατεύθυνση (εικ. 8.21).



**Εικόνα 8.20**

Διάταξη για την τήξη του νατρίου

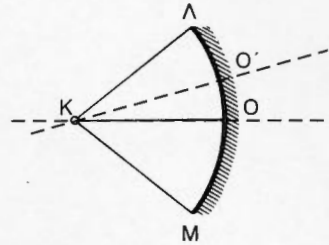


**Εικόνα 8.21**

Κατευθυντικό μικρόφωνο

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η περίπτωση χρησιμοποίησης κατόπτρου του οποίου η επιφάνεια έχει σχήμα τμήματος σφαίρας.

Θα ονομάζουμε **κύριο άξονα** ενός κατόπτρου τον άξονα συμμετρίας του (ΚΟ), **κορυφή** δε, το σημείο (Ο) της τομής του κύριου άξονα με το κάτοπτρο. Κάθε ευθεία που διέρχεται από το κέντρο Κ του κατόπτρου και κάποιο άλλο σημείο (Ο') της επιφάνειάς του θα ονομάζεται **δευτερεύων άξονας**.



**Εικόνα 8.22**

Σφαιρικό κάτοπτρο

Ένα σφαιρικό κάτοπτρο ονομάζεται **κυρτό**, όταν η ανάκλαση του φωτός γίνεται στην κυρτή επιφάνειά του. Θα το λέμε **κοίλο**, όταν η ανάκλαση γίνεται στην κοίλη επιφάνειά του. Τέλος, θα ονομάζουμε **άνοιγμα** του κατόπτρου την γωνία ΑΚΜ.



(α)



(β)

**Εικόνα 8.23**

(α) Ένας κοίλος καθρέφτης για το ξύρισμα.

(β) Ένας κυρτός καθρέφτης τοποθετημένος σε super market για παρακολούθηση.

Τα κοίλα κάτοπτρα χρησιμοποιούνται στο ξύρισμα ή στον καλλωπισμό, διότι δίνουν μεγεθυμένα ειδώλα και έτσι παρατηρούμε καλύτερα τις ατέλειες (εικ. 8.23α). Αντίθετα, τα κυρτά κάτοπτρα χρησιμοποιούνται στα super market και στις διασταυρώσεις των δρόμων, διότι δίνουν μικρά ειδώλα και έτσι μπορούμε να βλέπουμε μεγαλύτερο τμήμα του χώρου (μεγαλύτερο οπτικό πεδίο) (εικ. 8.23β).

Για να καταλάβουμε πώς τα σφαιρικά κάτοπτρα σχηματίζουν ειδώλα, θεωρούμε κατ' αρχάς ένα αντικείμενο που βρίσκεται πολύ μακριά από ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο (εικ. 8.24).



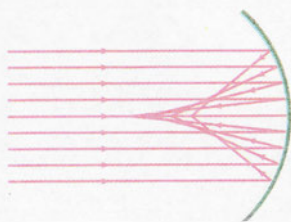
**Εικόνα 8.24**

Οι ακτίνες από ένα μακρινό αντικείμενο πέφτουν σχεδόν παράλληλα στο σφαιρικό κάτοπτρο.

Οι ακτίνες που θα φθάνουν στο κάτοπτρο από κάθε σημείο του αντικείμενου θα είναι σχεδόν παράλληλες. Οι φωτεινές ακτίνες που θα φτάσουν σε ένα κάτοπτρο από ένα σώμα που βρίσκεται σε “άπειρη” απόσταση από αυτό (π.χ. Ήλιος, αστέρια) θεωρούνται με μεγάλη προσέγγιση παράλληλες.

**Προσοχή:** Θα μπορούμε να λέμε ότι ένα αντικείμενο βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από ένα κάτοπτρο, αν η απόσταση αυτή είναι πολύ μεγάλη σε σχέση με την ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου, που είναι η ακτίνα της σφαιρικής επιφάνειάς του.

Ας εξετάσουμε τώρα την περίπτωση μιας δέσμης παράλληλων ακτίνων που πέφτουν πάνω σε ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο (εικ. 8.25).

**Εικόνα 8.25**

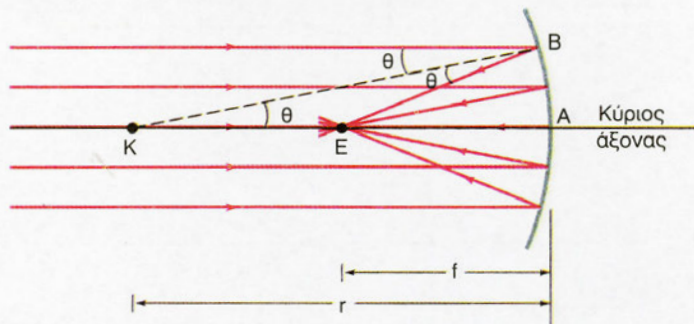
Παράλληλες ακτίνες που πέφτουν σε ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο δε συγκεντρώνονται στο ίδιο ακριβώς σημείο.

Αν εφαρμόσουμε το νόμο της ανάκλασης για καθεμία από αυτές τις ακτίνες στο σημείο που συναντά το κάτοπτρο, διαπιστώνουμε ότι μετά την ανάκλασή τους από το κάτοπτρο δεν συναντώνται στο ίδιο σημείο, οπότε δεν έχουμε σαφές είδωλο του αντικείμενου που εξέπεμψε την παράλληλη δέσμη. **Συνεπώς, ένα σφαιρικό κοίλο κάτοπτρο δε δίνει ευκρινή είδωλα, όπως ένα επίπεδο κάτοπτρο.**

Υπάρχει όμως ένας τρόπος να ξεφύγουμε από αυτή τη δυσκολία, αν το σφαιρικό κάτοπτρο που θα χρησιμοποιήσουμε έχει **μικρό άνοιγμα** (αποτελεί δηλαδή, μικρό μέρος της σφαιρικής επιφάνειας) σε σχέση με την ακτίνα του, έτσι ώστε οι γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης να είναι πολύ μικρές.



Στην περίπτωση αυτή οι ακτίνες, μετά την ανάκλασή τους, θα συναντώνται σχεδόν όλες στο ίδιο σημείο Ε (εικ. 8.26).



**Εικόνα 8.26**

Ακτίνες παράλληλες προς τον κύριο άξονα ενός σφαιρικού κατόπτρου μετά την ανάκλασή τους διέρχονται όλες από την κύρια εστία Ε του κατόπτρου εφόσον το άνοιγμα του κατόπτρου είναι μικρό σε σχέση με την ακτίνα καμπυλότητάς του  $r$ .

Το σημείο αυτό θα το λέμε **κύρια εστία** Ε του κατόπτρου εφόσον οι φωτεινές ακτίνες είναι παράλληλες προς τον **κύριο άξονα** του κατόπτρου, όπως στην περίπτωση της εικόνας (8.26).

Η απόσταση της κύριας εστίας Ε από την κορυφή Ο του κατόπτρου ονομάζεται **εστιακή απόσταση** του κατόπτρου και συμβολίζεται με το γράμμα  $f$ .

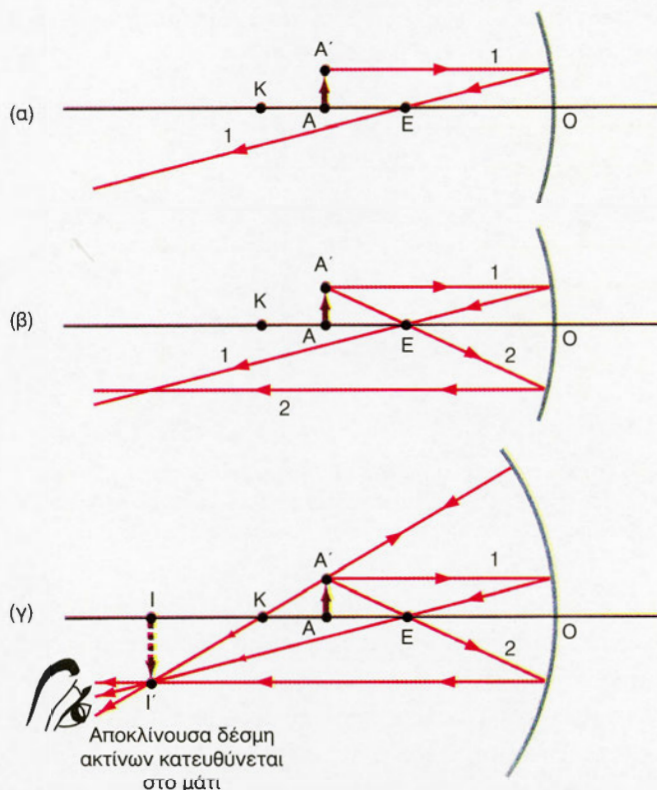
Ένας απλός τρόπος για να προσδιορίσουμε τη θέση της κύριας εστίας ενός κοίλου κατόπτρου είναι να βρούμε το είδωλο ενός αντικειμένου που βρίσκεται σε "άπειρη" απόσταση π.χ. του Ήλιου. Δηλαδή, **το είδωλο ενός αντικειμένου που βρίσκεται στον κύριο άξονα σε "άπειρη" απόσταση από ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο με μικρό άνοιγμα σχηματίζεται στην κύρια εστία του κατόπτρου.**

Από την γεωμετρία του σχήματος (8.26), με την προϋπόθεση ότι το άνοιγμα του κατόπτρου είναι μικρό, προκύπτει ότι:  $(ΚΟ) = 2(ΕΟ)$ , δηλαδή, αποδεικνύεται ότι: **η εστιακή του απόσταση είναι ίση με το μισό της ακτίνας του:**

$$f = \frac{r}{2} \quad (8.2)$$

Είδαμε ότι το είδωλο ενός αντικειμένου που βρίσκεται στον κύριο άξονα σε "άπειρη" απόσταση από ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο με μικρό άνοιγμα σχηματίζεται στην εστία του κατόπτρου. Πού όμως σχηματίζεται το είδωλο ενός αντικειμένου που δε βρίσκεται στο "άπειρο";

Για να απαντήσουμε στο ερώτημα αυτό, ας εξετάσουμε την περίπτωση που απεικονίζεται στα διαγράμματα της εικόνας (8.27).

**Εικόνα 8.27**

Σχηματισμός ειδώλων από σφαιρικά κάτοπτρα. Οι ακτίνες ξεκινούν από το σημείο  $A'$  του αντικειμένου. Στα διαγράμματα απεικονίζονται οι τρεις πιο χρήσιμες ακτίνες για τον προσδιορισμό του ειδώλου.

Θεωρούμε ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο με μικρό άνοιγμα και ένα φωτεινό αντικείμενο  $AA'$  σε τυχαία θέση πάνω στον κύριο άξονα και κάθετα σ' αυτόν. Από τα άπειρα σημεία του αντικειμένου εκπέμπονται άπειρες ακτίνες. Χρειαζόμαστε πολύ λιγότερες από τις άπειρες ακτίνες που ανακλώνται από το κάτοπτρο, για να βρούμε τα ειδώλα των σημείων του αντικειμένου μας.

Παρατηρούμε ότι από όλες τις ακτίνες που πηγάζουν από κάθε σημείο (π.χ. το  $A'$ ) του αντικειμένου, μπορούμε να εστιάσουμε την προσοχή μας στην πορεία των εξής τριών χαρακτηριστικών ακτίνων, που φαίνονται στα διαγράμματα α, β, γ της εικόνας (8.27) αντίστοιχα:

- α) **Την ακτίνα 1**, η οποία οδεύει παράλληλα προς τον κύριο άξονα και μετά την ανάκλασή της στην επιφάνεια του κατόπτρου περνάει από την κύρια εστία  $E$  αυτού σύμφωνα με όσα είπαμε προηγουμένως (εικ. 8.27α).
- β) **Την ακτίνα 2**, η οποία περνάει πρώτα από την κύρια εστία  $E$  και στη συνέχεια, αφού ανακλαστεί στο κάτοπτρο, οδεύει παράλληλα προς τον κύριο άξονα (εικ. 8.27β) και

γ) Την ακτίνα 3, η οποία, αφού προσπέσει κάθετα στην επιφάνεια του σφαιρικού κατόπτρου, ανακλάται κατά την ίδια διεύθυνση διερχόμενη από το κέντρο καμπυλότητας  $K$  του κατόπτρου (εικ. 8.27γ).

Επειδή οι τρεις αυτές ακτίνες πηγάζουν από το ίδιο σημείο του αντικειμένου, μετά την ανάκλασή τους περνάνε από το ίδιο σημείο  $I'$ , το οποίο θα είναι το είδωλο του σημείου  $A'$ . Στο σημείο  $I'$  θα πρέπει να συναντιούνται και όλες οι άλλες ακτίνες που πηγάζουν από το  $A'$  και ανακλώνται στο κάτοπτρο, με την προϋπόθεση ότι το κάτοπτρο έχει μικρό άνοιγμα.

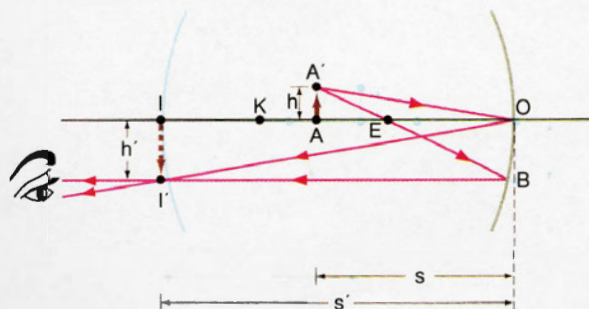
Την ίδια διαδικασία μπορούμε να ακολουθήσουμε και για κάθε άλλο σημείο του αντικειμένου. Αυτό, όμως, δεν είναι αναγκαίο, διότι όλα τα σημεία του ειδώλου θα βρίσκονται πάνω στην κάθετο στον κύριο άξονα από το  $I'$ . Δηλαδή, το είδωλο του  $AA'$  θα είναι το  $II'$ .

Το μάτι του παρατηρητή θα μπορεί να παρατηρήσει το είδωλο  $II'$  του αντικειμένου  $AA'$ , όταν βρίσκεται στα αριστερά του ειδώλου, έστι ώστε μερικές από τις ακτίνες που εκπέμπονται από το αντικείμενο, αφού ανακλαστούν στο κάτοπτρο και σχηματίσουν το είδωλο, να εισχωρήσουν στο μάτι (εικ. 8.27γ).

**Προσοχή!** Το είδωλο που βλέπουμε στη περίπτωση αυτή είναι **πραγματικό**, διότι σχηματίζεται από υπαρκτές (πραγματικές) ακτίνες (και όχι από προεκτάσεις τους) και συνεπώς, μπορεί να σχηματιστεί πάνω σε μια οθόνη ή σε ένα φωτογραφικό φιλμ.

Με τη βοήθεια διαγραμμάτων, όπως αυτά της εικόνας (8.27), μπορούμε, σχεδόν πάντα, έστω και κατά προσέγγιση να βρίσκουμε τη θέση του ειδώλου, όταν ξέρουμε τη θέση του κατόπτρου και του αντικειμένου. Είναι, όμως, μια διαδικασία χρονοβόρα, που δε δίνει μεγάλη ακρίβεια και δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί, λόγω της δυσκολίας να είναι το άνοιγμα μικρό ώστε να πληρούται η συνθήκη μικρού ανοίγματος.

Αναζητήσαμε και βρήκαμε μια σχέση που μας δίνει τη θέση του ειδώλου, αν ξέρουμε την θέση του αντικειμένου και την ακτίνα του σφαιρικού κατόπτρου.



**Εικόνα 8.28**

Διάγραμμα με το οποίο μπορούμε να βρούμε τη θέση του ειδώλου καθώς και τη μεγέθυνση των κατόπτρων.



$$\text{Εξίσωση των κατόπτρων: } \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \quad (8.3)$$

όπου:

$s$  = η απόσταση αντικειμένου-κορυφής κατόπτρου

$s'$  = η απόσταση ειδώλου-κορυφής κατόπτρου

$f$  = η εστιακή απόσταση του κατόπτρου

$r$  = η ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου.

Εκτός από τη θέση του ειδώλου, μας ενδιαφέρει να γνωρίζουμε και το μέγεθος του ειδώλου, σε σχέση με το μέγεθος του αντικειμένου (μεγέθυνση), καθώς και τη φύση του (πραγματικό ή φανταστικό είδωλο).

Θα ονομάζουμε **γραμμική μεγέθυνση**  $m$ , το λόγο του ύψους του ειδώλου

( $h'$ ) προς το ύψος του αντικειμένου ( $h$ ):  $m = \frac{h'}{h}$ .

Από την εικόνα (8.28) προκύπτει, με τη σύγκριση των όμοιων τριγώνων ΑΑ'Ο και Ι'ΙΟ, ότι:

$$\text{Γραμμική μεγέθυνση για κοίλα κάτοπτρα: } m = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s} \quad (8.4)$$

(το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι το είδωλο είναι ανεστραμμένο σε σχέση με το αντικείμενο).

### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 8.1

Ένα μικρό πiónι ύψους 1,5 cm βρίσκεται 20,0 cm μπροστά από ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο, του οποίου η ακτίνα είναι 30,0 cm, κάθετα στον κύριο άξονα. Βρείτε (α) τη θέση του ειδώλου του και (β) το μέγεθός του.

#### Λύση

Η εστιακή απόσταση είναι  $f = \frac{r}{2} = \frac{30,0}{2} \text{ cm} = 15,0 \text{ cm}$   $\text{cm} = 15,0 \text{ cm}$ .

Το διάγραμμα ακτίνων θα μοιάζει με αυτό των σχημάτων (8.28) και (8.27). Επειδή  $s=20,0 \text{ cm}$ , από τη σχέση (8.3) έχουμε:

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = \frac{1}{15,0 \text{ cm}} - \frac{1}{20,0 \text{ cm}} = 0,0167 \text{ cm}^{-1}$$

$$\text{Συνεπώς: } s' = \frac{1}{0,0167 \text{ cm}^{-1}} = 60,0 \text{ cm} .$$



Άρα, το είδωλο θα βρίσκεται σε απόσταση 60,0 cm από την κορυφή του κατόπτρου και προς την ίδια πλευρά που είναι και το αντικείμενο.

Η γραμμική μεγέθυνση προκύπτει από τη σχέση (8.4)

$$m = -\frac{60,0}{20,0} = -3,0$$

Συνεπώς, το ύψος του ειδώλου θα είναι :

$$h' = mh = (-3,0)(1,5 \text{ cm}) = -4,5 \text{ cm}$$

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι το είδωλο θα είναι ανεστραμμένο.

### Προσοχή

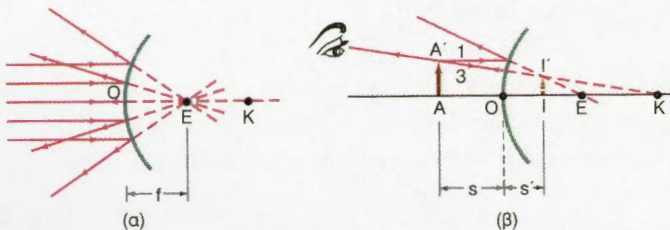
Αν το αντικείμενο του προηγούμενου παραδείγματος τοποθετείτο στη θέση του ειδώλου του, το είδωλό του θα σχηματιζόταν στην αρχική θέση του αντικειμένου.

Αυτό συμβαίνει, διότι, όπως φαίνεται και από τα σχήματα (8.27) και (8.28), αν αντιστρέψουμε την πορεία των φωτεινών ακτίνων, το είδωλο γίνεται αντικείμενο και το αντικείμενο είδωλο. Το ίδιο προκύπτει και από το γεγονός ότι η σχέση (8.4) είναι συμμετρική ως προς τα  $s'$  και  $s$ .

**Κυρτά κάτοπτρα.** Στα κυρτά κάτοπτρα οι φωτεινές ακτίνες ανακλώνται στην κυρτή επιφάνεια. Η διαδικασία για τη γραφική εύρεση του ειδώλου, που ακολουθήσαμε για το κοίλα κάτοπτρα, μπορεί, εξίσου καλά, να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση των **κυρτών** κατόπτρων. Η εξίσωση (8.3) των κοίλων κατόπτρων ισχύει και για τα κυρτά κάτοπτρα, με τη διαφορά ότι τα μεγέθη: εστιακή απόσταση  $f$ , απόσταση ειδώλου  $s'$  και απόσταση αντικειμένου  $s$  πρέπει να οριστούν πολύ προσεκτικά.

### Εικόνα 8.29

Κυρτό κάτοπτρο  
(α) Η κύρια εστία  $E$  βρίσκεται πίσω από το κάτοπτρο (β) Το είδωλο  $I$  του αντικειμένου  $AA'$  είναι φανταστικό, ορθό και μικρότερο από το αντικείμενο.



Στην εικόνα (8.29) μια παράλληλη δέσμη ακτίνων προσπίπτει σε ένα κυρτό κάτοπτρο παράλληλα προς τον κύριο άξονα και αποκλίνει μετά την ανάκλασή της σ' αυτό. Οι προεκτάσεις των ανακλώμενων ακτίνων διέρχονται από την κύρια εστία  $E$ .

### Προσοχή

Και στην περίπτωση των κυρτών κατόπτρων για να έχουμε σαφές είδωλο πρέπει να δεχτούμε ότι το κάτοπτρο είναι μικρό σε σχέση με την ακτίνα του.

Οι ανακλώμενες ακτίνες αποκλίνουν και φαίνονται σαν να προέρχονται από το σημείο Ε πίσω από το κάτοπτρο. Αυτό το σημείο είναι η **κύρια εστία** του κυρτού κατόπτρου και η απόστασή του από την κορυφή του κατόπτρου είναι η **εστιακή απόσταση**  $f$ . Η κύρια εστία σ' αυτή την περίπτωση είναι **φανταστική**.

Στην περίπτωση αυτή αποδεικνύεται ότι και πάλι ισχύει:

$$f = \frac{r}{2}$$

Από το σχήμα (8.29β) διαπιστώνουμε ότι, όπου και αν βρίσκεται ένα αντικείμενο μπροστά από ένα κυρτό κάτοπτρο, το είδωλό του θα είναι φανταστικό, ορθό και μικρότερο από το αντικείμενο. Για να το προσδιορίσουμε γραφικά, σχεδιάζουμε τη πορεία των ακτίνων 1 και 3 σύμφωνα με τους κανόνες που ακολουθήσαμε και στην περίπτωση του σχήματος (8.27).

Η εξίσωση των κατόπτρων:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

καθώς και η εξίσωση της μεγέθυνσης:

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s}$$

ισχύουν και για τα κυρτά κάτοπτρα με τη διαφορά ότι η εστιακή απόσταση  $f$  πρέπει να λαμβάνεται με αρνητικό πρόσημο, όπως και η απόσταση  $s'$  του ειδώλου και η ακτίνα  $r$ .

### ΕΦΑΡΜΟΓΗ 8.3. Καθρέφτης αυτοκινήτου.

Ένας κυρτός καθρέφτης αυτοκινήτου έχει ακτίνα καμπυλότητας 40,0 cm. Καθορίστε τη θέση και το μέγεθος του ειδώλου ενός αυτοκινήτου που βρίσκεται πίσω μας σε απόσταση 10,0 m από τον καθρέφτη.

### Λύση

Το διάγραμμα των ακτίνων θα είναι όπως αυτό του σχήματος (8.29β), μόνο που η μεγάλη απόσταση του αντικειμένου  $s = 10,0$  m κάνει δύσκολη τη ρεαλιστική σχεδίαση υπό κλίμακα. Χρησιμοποιώντας όμως τη σχέση:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

όπου  $s = 10,0 \text{ m}$ ,  $r = -40,0 \text{ cm}$  και  $f = -20,0 \text{ cm}$  έχουμε:

$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{f} - \frac{1}{s} = -\frac{1}{0,2 \text{ m}} - \frac{1}{10,0 \text{ m}} = -\frac{10,2 \text{ m}}{2 \text{ m}^2} = -5,1 \text{ m}^{-1}$$

ή  $s' = -0,196 \text{ m}$ .

Συνεπώς, το φανταστικό είδωλο θα βρίσκεται  $19,6 \text{ cm}$  πίσω από το κάτοπτρο.

Η γραμμική μεγέθυνση προκύπτει από τη σχέση:

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{-0,196 \text{ m}}{10,0 \text{ m}} = 0,0196 \quad \text{ή} \quad m = \frac{1}{51}.$$

Συνεπώς το είδωλο θα είναι ορθό και 51 φορές μικρότερο από το αντικείμενο.

## ΥΠΟΔΕΙΞΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ

1. Πάντα να κάνετε ένα διάγραμμα των τριών χαρακτηριστικών ακτίνων, έστω και αν πρόκειται να λύσετε το πρόβλημα υπολογιστικά. Το διάγραμμα μας βοηθά να ελέγχουμε αν η λύση που βρήκαμε είναι σωστή. Να σχεδιάζετε τουλάχιστον δύο από τις βασικές ακτίνες που περιγράψαμε στο σχήμα (8.27).
2. Να χρησιμοποιείτε τις εξισώσεις:

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \quad \text{και} \quad m = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s}$$

λαμβάνοντας υπόψη τις ακόλουθες συμβάσεις για τα πρόσημα.

### 3. Σύμβαση προσήμων.

- α) Όταν το αντικείμενο, το είδωλο ή η κύρια εστία βρίσκονται στην ανακλαστική πλευρά (μπροστά από το κάτοπτρο) του κατόπτρου (κοίλου ή κυρτού), που στην περίπτωση των διαγραμμάτων μας είναι η αριστερή, οι αντίστοιχες αποστάσεις λαμβάνονται θετικές. Αν οποιοδήποτε από τα προηγούμενα στοιχεία βρίσκεται στην μη ανακλαστική πλευρά του κατόπτρου (πίσω ή δεξιά του), η αντίστοιχη απόσταση θα λαμβάνεται ως αρνητική.
- β) Το ύψος του ειδώλου  $h_i$  λαμβάνεται ως θετικό, αν το είδωλο είναι όρθιο, και ως αρνητικό, αν είναι ανεστραμμένο σε σχέση με το αντικείμενο (συνήθως  $h_o$  είναι όρθιο, άρα θετικό).





## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Γιατί στη σκιά ενός ανθρώπου που σχηματίζεται στο έδαφος από ένα φωτιστικό του δρόμου που βρίσκεται πίσω του, τα πόδια του διακρίνονται ευκρινώς, ενώ το κεφάλι του είναι ασαφές;
2. Στην οροφή του δωματίου βρίσκεται μια επιμήκης λάμπα φθορισμού. Πώς πρέπει να κρατάμε ένα μολύβι πάνω από το τραπέζι, ώστε να σχηματισθεί σ' αυτό η σκιά του ευκρινώς;
3. Καθώς οι ακτίνες του ηλίου περνούν από μικρά ανοίγματα στην κορυφή του φυλλώματος ενός ψηλού δέντρου, σχηματίζουν στο έδαφος μικρούς φωτεινούς κύκλους με μέση διάμετρο  $d = 10 \text{ cm}$ . Ποιο είναι περίπου το ύψος  $h$  του δέντρου; (Η απόσταση Γης-Ήλιου είναι  $H \approx 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$  και η διάμετρος  $D$  του ήλιου είναι  $D \approx 109 \text{ m}$ .)
4. Ένα αεροπλάνο πετά πάνω από μια περιοχή σε χαμηλό ύψος και στο έδαφος σχηματίζεται η σκιά του. Αν μπορούσατε να την μετρήσετε θα βρίσκατε τις διαστάσεις της:
  - α) Σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές του αεροπλάνου.
  - β) Σημαντικά μικρότερες από αυτές του αεροπλάνου.
  - γ) Περίπου ίδιες.

Σημειώστε το σωστό.

5. Πώς πρέπει να τοποθετηθούν μια σημειακή πηγή, ένα επίπεδο αντικείμενο και μια οθόνη ώστε το περίγραμμα της σκιάς του αντικειμένου στην οθόνη να είναι όμοιο με το περίγραμμα του αντικειμένου;
6. Διατυπώστε τους νόμους της ανάκλασης.
7. Τι διαφέρει η κανονική ανάκλαση από τη διάχυση (ακανόνιστη ανάκλαση). Δώστε παραδείγματα.
8. Στη βιτρίνα ενός καταστήματος είναι γραμμένη η λέξη ΕΚΠΤΩΣΕΙΣ. Μέσα από το κατάστημα η λέξη φαίνεται ανάποδα. Κάποιος μέσα στο κατά-



στημα, που κοιτάζει στον καθρέφτη που βρίσκεται απέναντι από τη βιτρίνα, θα τη διαβάξει κανονικά;

9. Τι είδους σφαιρικό κάτοπτρο θα χρησιμοποιούσατε για να ανάψετε φωτιά με το ηλιακό φως; α) κοίλο β) κυρτό. Πού θα τοποθετούσατε το χαρτί που θέλετε να το ανάψετε αν η ακτίνα του κατόπτρου είναι 30 cm;
10. Όταν κοιτάζετε την πίσω πλευρά από ένα γυαλιστερό κουταλάκι του γλυκού που το κρατάτε με το χέρι σας τεντωμένο μπροστά σας, βλέπετε τον εαυτό σας ορθό, ενώ όταν κοιτάζετε από την κοίλη (εσωτερική) πλευρά του, τον βλέπετε ανεστραμμένο. Εξηγείστε.
11. Με ποιο τρόπο θα υποστηρίζατε την άποψη ότι η επιφάνεια της σελήνης είναι μάλλον άγρια και ανώμαλη παρά λεία και στιλπνή.
12. Εξηγείστε την εικόνα που έχετε από την αντανάκλαση της σελήνης στη θάλασσα.
13. Γιατί ένας επίπεδος καθρέφτης παρόλο που αντιστρέφει το δεξί και το αριστερό δεν αντιστρέφει το πάνω και το κάτω;
14. Ο Αρχιμήδης έκαιγε το ρωμαϊκό στόλο στο λιμάνι των Συρακουσών εστιάζοντας τις ακτίνες του ηλίου με μεγάλα σφαιρικά κάτοπτρα. Εξετάστε αν αυτό είναι λογικό.
15. Ποια είναι η εστιακή απόσταση ενός επίπεδου κατόπτρου; Ποια είναι η μεγέθυνσή του;
16. Ισχύει η εξίσωση των σφαιρικών κατόπτρων και για επίπεδα κάτοπτρα; Εξηγείστε.
17. Θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε επίπεδο καθρέφτη στη θέση της οθόνης στον κινηματογράφο;
20. Ηλιακό φως ανακλάται από οριζόντιο καθρέφτη και πέφτει σε κατακόρυφη οθόνη. Στον καθρέφτη ισορροπεί ένα μολύβι όρθιο. Πώς θα είναι η σκιά του στην οθόνη;





## κεφάλαιο 9

### ΔΙΑΘΛΑΣΗ – ΦΑΚΟΙ – ΟΡΑΣΗ

- Διάθλαση του φωτός
- Νόμος της διάθλασης - (Νόμος του Snell)
- Ορική γωνία – Ολική ανάκλαση
- Διάδοση του φωτός σε διαφανή πλάκα – Πρίσμα
- Οι φακοί και τα είδωλά τους
- Συγκλίνοντες και αποκλίνοντες λεπτοί φακοί – Διάγραμμα ακτίνων
- Μεγέθυνση Φακού – Ισχύς Φακού
- Σφάλματα φακών
- Όραση – Μηχανισμός όρασης
- Ανωμαλίες όρασης





## 9.1 ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

*Κοίταζα πόσο διάφανοι  
γίνονται εκείνοι που αγαπάνε...  
Οδ. Ελύτης (Μαρία Νεφέλη)*

Είδαμε στην παράγραφο (3.4) ότι, όταν το φως πέφτει στην επιφάνεια ενός σώματος, ανάλογα με το υλικό του σώματος και τη μορφή της επιφάνειας ένα μέρος του φωτός ανακλάται, δηλαδή επιστρέφει στη περιοχή του χώρου απ' όπου προήλθε. Το φαινόμενο αυτό το ονομάσαμε **ανάκλαση**. Το υπόλοιπο φως θα εισχωρεί στο εσωτερικό αυτού του σώματος σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βάθος, ανάλογα με το πόσο διαφανές είναι το υλικό από το οποίο αποτελείται το σώμα, στην επιφάνεια του οποίου προσπίπτει το φως.

Ένα ποτήρι με θαλασσινό νερό είναι το ίδιο διαφανές και διαυγές όπως και το νερό της βρύσης. Είναι γνωστό, όμως, ότι σε βάθος μεγαλύτερο από εκατό μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας επικρατεί σκοτάδι, διότι το φως δε φτάνει μέχρι εκεί.

Τι έγινε η ενέργεια του φωτός η οποία είχε αρχικά εισχωρήσει κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας; Προφανώς δε χάθηκε. Η ενέργεια του φωτός σταδιακά άλλαξε μορφή, έγινε εσωτερική ενέργεια. Με αυτό τον τρόπο μας ζεσταίνει ο ήλιος, όταν λιαζόμαστε, τις κρύες χειμωνιατικές μέρες.

Αυτό που περιγράψαμε πιο πάνω, δηλαδή η σταδιακή ελάττωση της ποσότητας του φωτός, καθώς αυτό διανύει κάποια απόσταση στο εσωτερικό ενός σώματος, ονομάζεται **απορρόφηση** του φωτός. Όλα τα σώματα, άλλα σε μεγαλύτερο και άλλα σε μικρότερο βαθμό, απορροφούν το φως. Αυτά που απορροφούν ελάχιστα το φως τα λέμε **διαφανή**, ενώ αυτά που απορροφούν πολύ το φως τα λέμε **αδιαφανή**.

Στην παράγραφο (3.3) είδαμε ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι:  $c = 2,997\ 924\ 58 \times 10^8$  m/s (ακριβώς). Την τιμή αυτή συνήθως την στρογγυλεύουμε στην τιμή:

$$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Στον αέρα η ταχύτητά του είναι ελάχιστα μικρότερη (βλέπε πίνακα (8.1)). Σε όλα τα άλλα υλικά η ταχύτητά του είναι μικρότερη. Στο νερό π.χ. η ταχύτητά του είναι περίπου τα  $\frac{3}{4}$  της ταχύτητάς του στο κενό.

Ο λόγος της ταχύτητας  $c$  του φωτός στο κενό δια της ταχύτητας  $v$  του



Εικόνα 9.1

φωτός σε ένα διαφανές υλικό ονομάζεται **δείκτης διάθλασης**,  $n$ , του υλικού αυτού.

**Δείκτης διάθλασης:** 
$$n = \frac{c}{v} \quad (9.1)$$

Ο δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος ή ίσος με τη μονάδα ( $n \geq 1$ ) και η τιμή του για διάφορα υλικά δίνεται στον πίνακα (9.1).

Από τη σύγκριση των πινάκων (9.1) και (8.1) εύκολα διαπιστώνουμε ότι: **όσο μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης έχει ένα υλικό, τόσο μικρότερη θα είναι η ταχύτητα του φωτός σ' αυτό.**

**Πίνακας 9.1**  
**Δείκτες διάθλασης**

(για φως με μήκος κύματος  $\lambda = 589 \text{ nm}$ )

| Υλικό                    | $n = c / v$ |
|--------------------------|-------------|
| Κενό                     | 1,000 0     |
| Αέρας                    | 1,000 3     |
| Νερό                     | 1,33        |
| Οινόπνευμα               | 1,36        |
| Χαλαζίας                 | 1,46        |
| Στεφανύαλος              | 1,52        |
| Πυριτύαλος               | 1,58        |
| Πλέξι γκλας              | 1,51        |
| Χλωριούχο νάτριο (αλάτι) | 1,53        |
| Διαμάντι                 | 2,42        |

Η ταχύτητα του φωτός στα διάφορα διαφανή υλικά δεν είναι η ίδια για όλα τα χρώματα του ορατού φωτός και, επειδή το κάθε χρώμα του ορατού φωτός καθορίζεται από το μήκος κύματός του, όπως θα δούμε αργότερα, γι' αυτό για τον καθορισμό του δείκτη διάθλασης των διάφορων υλικών στον πίνακα (9.1) έχει επιλεγεί το κίτρινο χρώμα με μήκος κύματος  $\lambda = 589 \text{ nm}$ .

#### ❑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9.1 Η ταχύτητα του φωτός στο διαμάντι.

Υπολογίστε την ταχύτητα του φωτός (με μήκος κύματος  $\lambda = 589 \text{ nm}$ ) στο διαμάντι.

#### Λύση

Από τον πίνακα (9.1) ξέρουμε για το διαμάντι ότι:  $n = 2,42$ . Συνεπώς, η ταχύτητα με την οποία το φως θα ταξιδεύει στο εσωτερικό του διαμαντιού θα είναι:

$$v = \frac{c}{n} = \frac{c}{2,42} = 0,413 c = 0,413 3,0 \times 10^8 \text{ m/s} = 1,24 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (\text{βλ. Πιν. 8.1})$$

Το ότι το φως ταξιδεύει με μικρότερη ταχύτητα στο εσωτερικό των διάφορων υλικών από ότι στο κενό, μπορεί να αποδοθεί στο ότι τα φω-

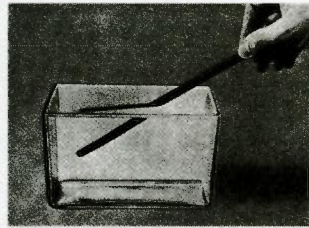
τόνια από τα οποία αποτελείται αλληλεπιδρούν με τα μόρια των υλικών (απορρόφηση και επανεκπομπή) με αποτέλεσμα να χρειάζονται περισσότερο χρόνο συνολικά για να διανύσουν μια απόσταση σε σχέση με το χρόνο που θα χρειαζόντουσαν να διανύσουν την ίδια απόσταση στο κενό. Σκεφθείτε ένα δρομέα να τρέχει εκατό μέτρα ελεύθερα και τον ίδιο να τρέχει εκατό μέτρα με εμπόδια.

## 9.2 ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ (ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ SNELL)

*Ο ήλιος κυκλοδίδωκτος, ως αράχνη, μ' εδίπλωνε  
και με φως και με θάνατον ακαταπαύστως.  
Ανδ. Κάλβος*

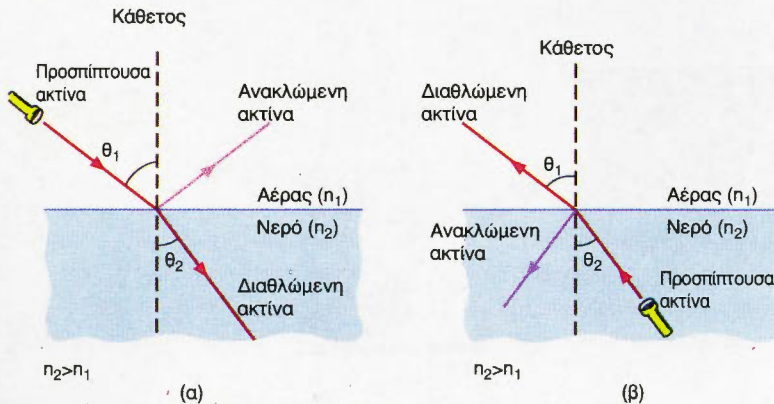
Όλοι θα έχουμε παρατηρήσει εικόνες όπως αυτή (εικ. 9.2).

Η παράδοση συμπεριφορά του φωτός στην εικόνα αυτή μπορεί να γίνει κατανοητή, αν σκεφτούμε ότι το φως, καθώς μεταβαίνει από ένα διαφανές μέσο σε ένα άλλο με γωνία πρόσπτωσης διαφορετική από  $0^\circ$ , αλλάζει όχι μόνο την τιμή της ταχύτητάς του αλλά και τη διεύθυνσή του.



Εικόνα 9.2

Αυτή η αλλαγή της διεύθυνσης μιας φωτεινής ακτίνας κατά τη μετάβασή της από ένα διαφανές μέσο σε ένα άλλο ονομάζεται **διάθλαση** (εικ. 9.3).



Εικόνα 9.3

Σχηματική αναπαράσταση της πορείας μιας φωτεινής δέσμης από τον αέρα στο νερό (α) και αντιστρόφως (β).

**Η πορεία του φωτός είναι η ίδια και για τις δύο κατευθύνσεις.**

**Αρχή Αντίστροφης πορείας του φωτός**



Η γωνία  $\theta_1$  είναι η γωνία πρόσπτωσης και η γωνία  $\theta_2$  είναι η γωνία διάθλασης.

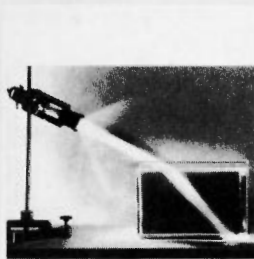
Στο σχήμα (9.3α) παρατηρούμε ότι η φωτεινή ακτίνα πλησιάζει την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, όταν αυτή από τον αέρα εισέρχεται στο νερό. Αυτό είναι κάτι που συμβαίνει πάντα, όταν το φως εισέρχεται σε υλικό όπου η ταχύτητά του είναι **μικρότερη**. Όταν το φως από ένα μέσο εισέρχεται σε ένα άλλο στο οποίο η ταχύτητά του είναι **μεγαλύτερη** (εικ. 9.3β), η ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετο.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.1

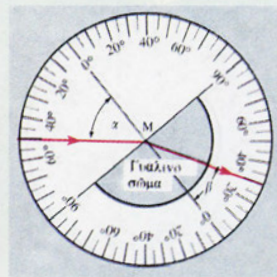
- α) Χρησιμοποιήστε το γυάλινο δοχείο της εικόνας (9.4), στο οποίο έχετε βάλει νερό και σε πλάγια θέση ένα μολύβι ή ένα καλαμάκι αναψυκτικού. Θα διαπιστώσετε ότι το μολύβι και το καλαμάκι φαίνονται σαν να έχουν σπάσει (εικ. 9.4α).
- β) Κατευθύνετε πλάγια τη δέσμη προβολέα ή τη δέσμη laser προς την επιφάνεια του νερού. Θα διαπιστώσετε ότι η δέσμη του φωτός δεν ακολουθεί ευθύγραμμη διαδρομή αλλά κάμπτεται απότομα, μόλις περάσει από την επιφάνεια του νερού (εικ. 9.4β).
- γ) Τέλος, με τη βοήθεια ενός βαθμονομημένου δίσκου και μιας ημικυκλικής γυάλινης πλάκας, όπως φαίνεται στο σχήμα (9.4γ), μπορούμε να διαπιστώσουμε όσα αναφέραμε για τη διάθλαση και ακόμη να μελετήσουμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η γωνία διάθλασης, όταν αλλάζει η γωνία πρόσπτωσης.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 9.4



Συνεχίζοντας τη δραστηριότητα (9.1γ) μπορούμε να καταρτίσουμε τον πίνακα (9.2).

Η αναλυτική έκφραση που δείχνει την εξάρτηση της γωνίας διάθλασης από τη γωνία πρόσπτωσης βρέθηκε το 1621 από τον Will. Snell (Σνελ) και είναι γνωστή ως νόμος του Snell.

**Νόμος του Snell:**  $n_1 \mu \theta_1 = n_2 \mu \theta_2$  (9.2)

όπου  $\theta_1$  και  $\theta_2$  είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης αντιστοίχως και  $n_1$  και  $n_2$  οι αντίστοιχοι δείκτες διάθλασης των δύο υλικών εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας.

Στη διάθλαση οφείλονται πολλά από τα φαινόμενα τα οποία παρατηρούμε στην καθημερινή μας ζωή.

(α) Στην εικόνα 9.5 παριστάνεται ένα φαινόμενο που συχνά βλέπουμε στην ακροθαλασσιά και στις πισίνες. Τα πόδια ενός ανθρώπου που βρίσκεται στο νερό φαίνονται κοντύτερα.

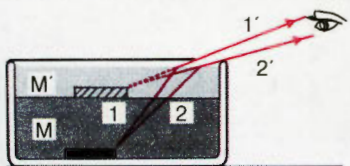


**Εικόνα 9.5**

Τα πόδια μιας λουόμενης φαίνονται να έχουν κοντύνει.

Οι ακτίνες που ξεκινούν από τα πέλματα της λουόμενης κάμπτονται στην επιφάνεια. Τα μάτια του παρατηρητή που βρίσκεται στην αμμουδιά δέχονται τις ακτίνες που διαθλώνται. Ο εγκέφαλός του τις προεκτείνει και νομίζει ότι το αντικείμενο (πέλματα) βρίσκεται στο σημείο τομής αυτών των προεκτάσεων. Το αποτέλεσμα είναι τα πέλματα να “φαίνονται” ότι βρίσκονται πιο ψηλά από όσο είναι στην πραγματικότητα.

β) Ομοίως, αν τοποθετήσετε ένα νόμισμα στον πυθμένα του δοχείου, θα διαπιστώσετε ότι αυτό εμφανίζεται ανυψωμένο (εικ. 9.6).



**Εικόνα 9.6**

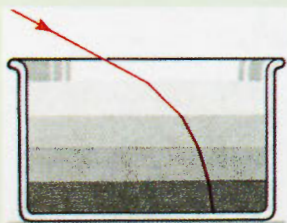
Φαινομενική ανύψωση του νομίσματος

Και τα δύο φαινόμενα που περιγράψαμε οφείλονται σε ένα γενικό φαινόμενο που εξηγείται με τη διάθλαση και ονομάζεται **φαινομενική ανύψωση**.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.2 Διάθλαση του φωτός σε σώμα, που εμφανίζει σταδιακή μεταβολή της πυκνότητάς του.

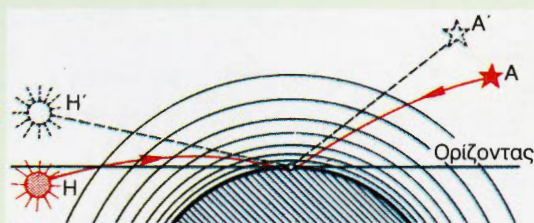
Στο γυάλινο δοχείο που χρησιμοποιήσαμε στη δραστηριότητα (9.1β) τοποθετούμε πρώτα ένα στρώμα πυκνού αλατόνευρο και στη συνέχεια από πάνω του προσθέτουμε σιγά-σιγά, χωρίς να προκαλέσουμε ανάδευση, καθαρό νερό. Μετά από λίγη ώρα, λόγω του φαινομένου της διάχυσης, θα έχει σχηματιστεί στο δοχείο ένα διάλυμα του οποίου η πυκνότητα θα αυξάνεται από την επιφάνεια προς τον πυθμένα.

Στη συνέχεια, κατευθύνουμε πλάγια προς το διάλυμα τη δέσμη ενός προβολέα ή ακτίνες Laser και παρατηρούμε την πορεία που ακολουθεί. Διαπιστώνουμε ότι η πορεία της δέσμης είναι τώρα σχεδόν καμπύλη (εικ. 9.7).



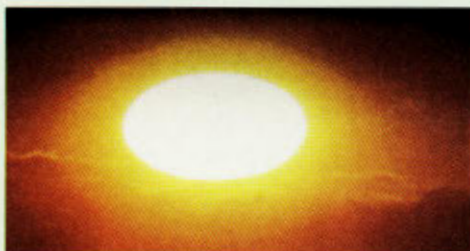
**Εικόνα 9.7**

Πορεία μιας φωτεινής δέσμης σε δοχείο που περιέχει στρώματα υγρού των οποίων η πυκνότητα αυξάνει με το βάθος. (Στην πραγματικότητα το φαινόμενο δεν είναι τόσο έντονο).



**Εικόνα 9.8**

Τα άστρα και τον ήλιο λόγω της μεταβολής της πυκνότητας της ατμόσφαιρας σε συνάρτηση με το ύψος δεν τα βλέπουμε στην πραγματική τους θέση αλλά υπερυψωμένα.



**Εικόνα 9.9**

Ο ηλιακός δίσκος κατά τη δύση φαίνεται πεπλατυσμένος.

Το ίδιο συμβαίνει και με το φως των αστρων και του ήλιου κατά την διέλευσή του μέσα από την ατμόσφαιρα μέχρι να φτάσει στα μάτια μας. Η

ατμόσφαιρα γίνεται όλο και πυκνότερη καθώς το φως πλησιάζει την επιφάνεια της γης. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μην βλέπουμε τα αστέρια και τον ήλιο, όταν δεν είναι στο Ζενίθ, στην πραγματική τους θέση, αλλά υπερυψωμένα (εικ. 9.8). Ακόμη βλέπουμε τον ήλιο, όταν πρόκειται να δύσει πεπλατυσμένο, διότι το κάτω άκρο του ανυψώνεται περισσότερο από όσο το επάνω (εικ. 9.9).

### 9.3 ΟΡΙΚΗ ΓΩΝΙΑ - ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ

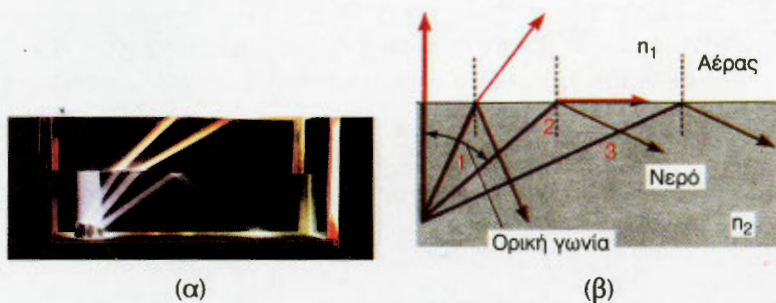
Στον πίνακα (9.2) που προέκυψε από τη δραστηριότητα (9.1γ) βλέπουμε ότι μπορούμε να αυξήσουμε τη γωνία πρόσπτωσης μέχρι τις  $90^\circ$ , ενώ η γωνία διάθλασης παραμένει μικρότερη από τις  $30^\circ$ .

Τί θα συμβεί όμως, αν αντιστρέψουμε την πορεία της δέσμης; Αν, δηλαδή, ο προβολέας ή το Laser βρίσκεται μέσα στο νερό και το φως του εξέρχεται προς τον αέρα, ενώ αυξάνουμε συνεχώς τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης στο πυκνότερο υλικό (νερό).

Θα διαπιστώσουμε τότε ότι, καθώς θα αυξάνουμε τη γωνία πρόσπτωσης στο νερό θα αυξάνεται και η γωνία διάθλασης στον αέρα πολύ περισσότερο (ακτίνα 1, εικόνα 9.10β), μέχρις ότου, για κάποια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, η γωνία διάθλασης γίνει  $90^\circ$  (ακτίνα 2, εικ. 9.10β). Η μεγαλύτερη αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης (ακτίνα 3, εικ. 9.10β) έχει ως αποτέλεσμα να ανακλάται η δέσμη και να επιστρέφει το σύνολο του προσπίπτοντος φωτός στο νερό.

Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή την ανάκλαση του συνόλου του προσπίπτοντος φωτός στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφανών υλικών, όταν το φως προέρχεται από το πυκνότερο υλικό, ονομάζουμε **ολική εσωτερική ανάκλαση**. Την χαρακτηριστική γωνία πρόσπτωσης, για την οποία η γωνία διάθλασης γίνεται  $90^\circ$  και για περαιτέρω αύξησή της εκδηλώνεται το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης, ονομάζουμε **ορική ή οριακή γωνία**  $\theta_{op}$ .



**Εικόνα 9.10**

α) Φωτεινές δέσμες που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια νερού-αέρα από φωτεινή πηγή βυθισμένη στο νερό.

β) Γραφική αναπαράσταση της πορείας των ακτίνων στην διαχωριστική επιφάνεια νερού-αέρα προερχόμενες από το νερό υπό διάφορες γωνίες πρόσπτωσης. Όταν η γωνία πρόσπτωσης γίνει μεγαλύτερη από την ορική γωνία  $\theta_{op}$ , τότε συμβαίνει ολική ανάκλαση.

Με τη βοήθεια του νόμου του Snell (εικ. 9.10β) βρίσκουμε ότι:

$$\eta\mu\theta_{op} = \frac{n_1}{n_2} \quad (n_1 < n_2) \quad (9.3)$$

### ΑΣ ΣΚΕΦΤΟΥΜΕ

ΑΣ υποθέσουμε ότι με ένα Laser θέλετε να στείλετε σήματα σε ένα διαστημόπλοιο (εικ. 9.11). Πρέπει να σκοπεύσετε κατευθείαν το διαστημόπλοιο; Λίγο χαμηλότερα ή λίγο ψηλότερα; (Λάβετε υπόψη σας ότι το φως που έρχεται από το διαστημόπλοιο στα μάτια σας ακολουθεί την ίδια διαδρομή την οποία θα ακολουθήσει το φως του laser, για να φτάσει από το φακό στο διαστημόπλοιο).

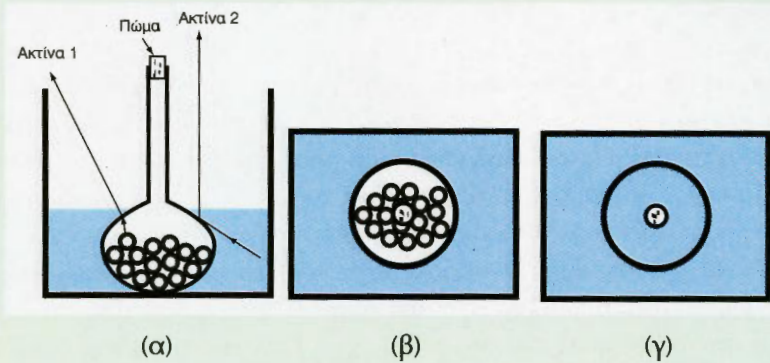
**Εικόνα 9.11**

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.3 Τα βότσαλα που εξαφανίζονται.

Σε δοχείο τοποθετούμε μια φιάλη, όπως στην εικόνα (9.12α), όπου προηγουμένως έχουμε ρίξει μερικές μπίλιες ή μερικά βότσαλα. Στη συνέχεια,



ρίχνουμε νερό στο δοχείο και κοιτάζουμε τη φιάλη κατακόρυφα, ακριβώς πάνω από το πώμα. Αυτό που βλέπουμε είναι αυτό που φαίνεται στην εικόνα (9.12β). Δηλαδή, βλέπουμε το πώμα, γύρω από αυτό τις μπίλιες και έξω από τη φιάλη το νερό. Συμπληρώνοντας το νερό στο δοχείο, διαπιστώνουμε ότι κάποια στιγμή, καθώς ανεβαίνει η στάθμη του νερού, οι μπίλιες χάνονται από το οπτικό μας πεδίο. Αυτό που βλέπουμε τώρα είναι μια φιάλη γεμάτη μόνο με νερό, όπως δείχνει η εικόνα (9.12γ).



**Εικόνα 9.12**

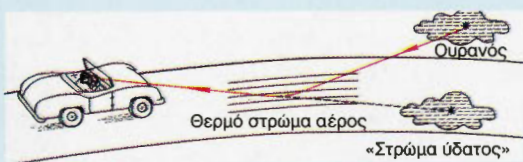
Μπορούμε να ερμηνεύσουμε το φαινόμενο αν παρακολουθήσουμε την πορεία των ακτίνων (1) και (2) (εικ. 9.12α). Όταν χάνουμε από τα μάτια μας τις μπίλιες, η ακτίνα (1) διαθλάται στην επιφάνεια του νερού και το φως από τις μπίλιες δεν πέφτει στα μάτια μας. Η ακτίνα (2), καθώς εισέρχεται στα γυάλινα τοιχώματα της φιάλης, υφίσταται ολική ανάκλαση και όταν εξέρχεται φτάνει στα μάτια μας, οπότε εμείς βλέπουμε στο εσωτερικό της φιάλης να υπάρχει μόνο νερό.

### **ΕΦΑΡΜΟΓΗ 9.1 Η “βρεγμένη” άσφαλτος το καλοκαίρι.**

Όλοι θα έχετε παρατηρήσει, κυρίως το καλοκαίρι, ότι, όταν ταξιδεύετε με αυτοκίνητο, ιδιαίτερα τις ζεστές ώρες της ημέρας, νομίζετε ότι η άσφαλτος σε μια απόσταση 200 ~ 300 μέτρα μπροστά σας φαίνεται να είναι βρεγμένη (9.13α). Μόλις πλησιάσετε, καταλαβαίνετε ότι αυτό είναι οθμαλμαπάτη. Πώς το εξηγείται αυτό;



(α)



(β)

**Εικόνα 9.13**

(α) Η πορεία του φωτός δημιουργεί την ψευδαίσθηση ότι η ασφάλτος μπροστά είναι “βρεγμένη”. (β) Η ίδια πορεία του φωτός ερμηνεύει και τον αντικατοπτρισμό στην έρημο.

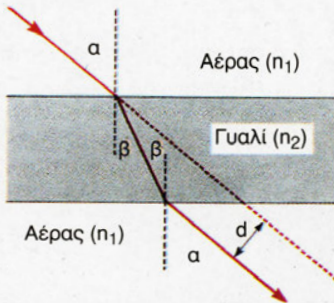
Ο αέρας κοντά στην επιφάνεια της ασφάλτου είναι πολύ πιο θερμός από τον αέρα των υπερκείμενων στρωμάτων. Συνεπώς, η πυκνότητα του αέρα ελαττώνεται, καθώς πλησιάζουμε προς την επιφάνεια της ασφάλτου. Το φως του ουρανού, στην πορεία του προς την επιφάνεια της ασφάλτου, διανύει όλο και αραιότερα στρώματα με αποτέλεσμα, αν η αρχική γωνία πρόσπτωσης είναι αρκετά μεγάλη, στο τελικό στρώμα κοντά στην ασφάλτο να συμβεί ολική ανάκλαση (εικ. 9.13α). Στα μάτια των επιβατών φτάνει το φως του ουρανού, αφού έχει υποστεί ολική ανακλαση στο στρώμα του αέρα πάνω από την ασφάλτο. Έτσι, βλέπουμε στην ευθύγραμμη προέκταση των ανακλώμενων ακτίνων το φανταστικό είδωλο του γαλάζιου ουρανού, το οποίο δίνει τη ψευδαίσθηση επιφάνειας νερού που κυματίζει, επειδή συγχρόνως τρεμοπαίζει, επειδή οι στιβάδες του αέρα αναδεύονται. Με τον ίδιο τρόπο εξηγείται και το φαινόμενο του αντικατοπτρισμού που παρατηρείται στην έρημο (9.13β).

## 9.4 ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΕ ΔΙΑΦΑΝΗ ΠΛΑΚΑ - ΠΡΙΣΜΑ

*Κοίταζα πόσο διάφανοι  
γίνονται εκείνοι που αγαπάνε.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

Όλοι ξέρουμε ότι στις σύγχρονες οικοδομές, για λόγους ηχομόνωσης και θερμομόνωσης, χρησιμοποιούνται παράθυρα με διπλά τζάμια. Η εικόνα όμως που έχουμε για τον έξω κόσμο είναι η ίδια είτε βλέπουμε μέσα από διπλά τζάμια είτε μέσα από μονά τζάμια ή και χωρίς αυτά. Συμπεραίνουμε, συνεπώς, ότι παράλληλες πλάκες διαφανούς υλικού δεν αλλοιώνουν την πορεία των φωτεινών ακτινών. Είναι όμως ακριβώς έτσι;

Ας υποθέσουμε ότι μια φωτεινή ακτίνα από τον εξωτερικό χώρο πέφτει σε μία από τις δύο παράλληλες επιφάνειες μιας διαφανούς πλάκας πάχους  $l$  κατασκευασμένης από υλικό με δείκτη διάθλασης  $n_1$ , υπό γωνία πρόσπτωσης (εικ. 9.14). Μετά την είσοδό της στην πλάκα, επειδή εισέρχεται σε πυκνότερο μέσο από τον αέρα, θα πλησιάσει την κάθετο με την οποία θα σχηματίσει γωνία  $\beta$ , σύμφωνα με το νόμο του Snell. Όταν η ακτίνα φθάσει στην απέναντι έδρα, θα σχηματίσει με την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης, την ίδια γωνία (ως εντός εναλλάξ) και στη συνέχεια, εξερχόμενη προς τον αέρα θα σχηματίσει με την κάθετο γωνία  $\alpha$ , σύμφωνα πάλι με το νόμο του Snell. Η ακτίνα, λοιπόν, μετά την έξοδό της από την πλάκα δεν έχει αλλάξει διεύθυνση σε σχέση με την προσπίπτουσα. Απλώς έχει υποστεί μια παράλληλη μετατόπιση κατά  $d$ .



**Εικόνα 9.14**

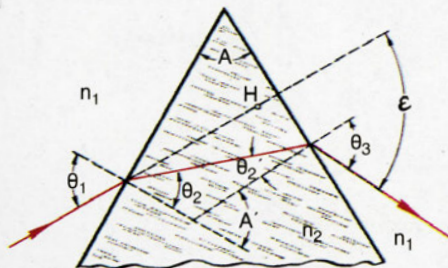
Πορεία μιας φωτεινής ακτίνας που προσπίπτει πλαγίως σε μία διαφανή πλάκα με παράλληλες έδρες.

**Συμπέρασμα:** Μια φωτεινή ακτίνα που προσπίπτει πλαγίως σε μια πλάκα με παράλληλες έδρες υφίσταται παράλληλη μόνο μετατόπιση.

Η μετατόπιση  $d$  αυξάνει, όταν αυξάνει η γωνία πρόσπτωσης και το πάχος της πλάκας.

Στην περίπτωση κάθετης πρόσπτωσης η μετατόπιση είναι μηδέν.

**Πρίσμα** ονομάζουμε κάθε διαφανές σώμα του οποίου οι επιφάνειες εισόδου και εξόδου των φωτεινών ακτινών είναι επίπεδες αλλά όχι παράλληλες (εικ. 9.15).



**Εικόνα 9.15**

Σχηματική αναπαράσταση της πορείας των ακτίνων μέσα από ένα πρίσμα.

$A$  = θλαστική γωνία του πρίσματος

$\epsilon$  = γωνία εκτροπής

$\theta_1$  = γωνία πρόσπτωσης,

$\theta_2$  = γωνία διάθλασης

$\theta_2'$  = γωνία πρόσπτωσης,

$\theta_3$  = γωνία διάθλασης

$n_1$  = δείκτης διάθλασης περιβάλλοντος (αέρα)

$n_2$  = δείκτης διάθλασης του υλικού του πρίσματος (γυαλί).



Αποδεικνύεται ότι η εκτροπή  $\epsilon$  που επιφέρει ένα πρίσμα στην πορεία μιας ακτίνας, εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ , από τη θλαστική γωνία  $A$  και από το δείκτη διάθλασης  $n_1$  του υλικού του πρίσματος.

Στην περίπτωση που η γωνία  $A$  (θλαστική) είναι μικρή και εφόσον το πρίσμα περιβάλλεται από αέρα ( $n_1 \approx 1$ ), αποδεικνύεται ότι η γωνία της μικρότερης εκτροπής δίνεται από τη σχέση:

$$\epsilon \approx A (n - 1) \quad (9.4)$$

όπου  $n$  ο δείκτης διάθλασης του υλικού του πρίσματος.

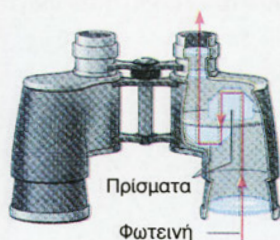
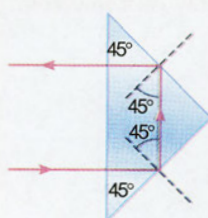
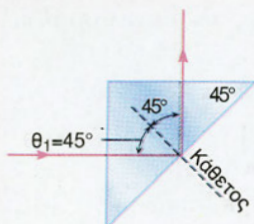
Γενικά, έχουμε ελάχιστη εκτροπή του φωτός κατά τη διέλευσή του από ένα πρίσμα, αν οι γωνίες πρόσπτωσης και εξόδου είναι ίσες και η όλη διαδικασία είναι συμμετρική ως προς τη διχοτόμο της γωνίας  $A$ .

Τα πρίσματα για τα οποία ισχύει η σχέση (9.4) ονομάζονται **λεπτά πρίσματα**.

Είδαμε ότι η ορική γωνία παρέχεται από τη σχέση:  $\eta\mu\theta_{op} = n_1/n_2$  όπου  $n_1$  ο δείκτης διάθλασης του αέρα και  $n_2$  ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού. Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι, για τη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού-αέρα, η ορική γωνία είναι:

$$\eta\mu\theta_{op} = \frac{1,00}{1,52} \quad \text{συνεπώς } \theta_{op} = 41,14^\circ.$$

Πρίσματα από γυαλί, που έχουν τη μορφή ορθογώνιου τριγώνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον τρόπο που φαίνεται στην εικόνα (9.16), ώστε να αλλάζουν κατά  $90^\circ$  ή  $180^\circ$  την πορεία μιας φωτεινής ακτίνας. Τα πρίσματα αυτά έχουν πολλές εφαρμογές, όπως στα κυάλια (εικ. 9.17), στους ανακλαστήρες ποδηλάτων, στη σήμανση δρόμων (μάτια της γάτας), στα περισκόπια και ονομάζονται πρίσματα **ολικής ανάκλασης**.



**Εικ. 9.16**

Πρίσματα ολικής ανάκλασης

(α) Εκτροπή της ακτίνας κατά  $90^\circ$  λόγω ολικής ανάκλασης.

(β) Εκτροπή της ακτίνας κατά  $180^\circ$  λόγω ολικής ανάκλασης.

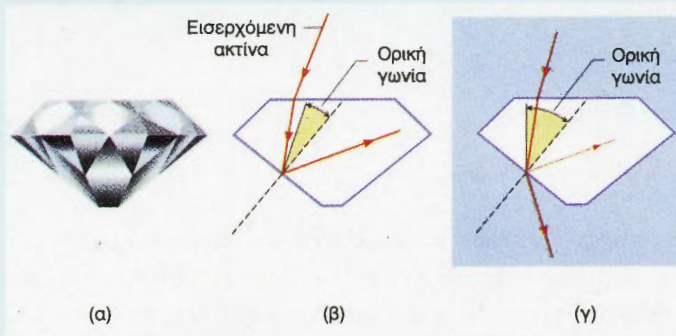
**Εικ. 9.17**

Κυάλια



**ΕΦΑΡΜΟΓΗ 9.2 Η λάμψη των διαμαντιών**

Είδαμε ότι ο δείκτης διάθλασης του διαμαντιού είναι  $n = 2,42$ , οπότε η ορική γωνία είναι  $24,4^\circ$ . Συνεπώς, όταν το διαμάντι έχει υποστεί κατεργασία τέτοια, ώστε οι έδρες του να έχουν τον κατάλληλο προσανατολισμό (εικ. 9.18α), το φως που εισέρχεται σ' αυτό υφίσταται διαδοχικές ολικές ανακλάσεις (εικ. 9.18β), μέχρι να βγει από την επάνω έδρα. Η διαδρομή αυτή του φωτός στο εσωτερικό του διαμαντιού προκαλεί τη χαρακτηριστική λάμψη του. Αν το ίδιο διαμάντι τοποθετηθεί μέσα στο νερό, τότε η ορική γωνία αυξάνει στις  $33,3^\circ$  (εικ. 9.18γ) με αποτέλεσμα ένα μέρος του εισερχόμενου φωτός να εξέρχεται από τις παράπλευρες έδρες και έτσι να ελαττώνεται η λάμψη του.

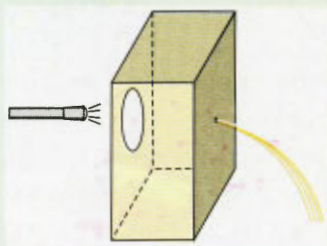
**Εικόνα 9.18**

- α) Ένα διαμάντι κατάλληλα επεξεργασμένο.  
 β) Κοντά στη βάση του διαμαντιού το φως παθαίνει ολική ανάκλαση, διότι προσπίπτει υπό γωνία μεγαλύτερη από την ορική γωνία διαμαντιού-αέρα.  
 γ) Όταν το διαμάντι είναι βυθισμένο στο νερό, το φως υφίσταται μερική ανάκλαση και διάθλαση, επειδή η γωνία πρόσπτωσης είναι μικρότερη από την ορική γωνία διαμαντιού-νερού.

**Προσοχή:** Η μεγάλη σημασία της ολικής (εσωτερικής) ανάκλασης έγκειται στο ότι *όλη* η ενέργεια της φωτεινής δέσμης ανακλάται, ενώ, ακόμη και με τα καλύτερα κάτοπτρα, το ποσοστό του ανακλωμένου φωτός δεν ξεπερνά το 90% του φωτός που προσπίπτει επάνω τους. Αυτό το αντιλαμβανόμαστε, όταν βρεθούμε σε χώρο με παράλληλους καθρέφτες (π.χ. σε ασανσέρ ή σε σουπερμάρκετ), οπότε βλέπουμε πολλά είδωλα του εαυτού μας που όμως γίνονται όλο και ασθενέστερα, λόγω απορρόφησης μέρους του φωτός που πέφτει επάνω τους σε κάθε ανάκλαση.

**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.4**

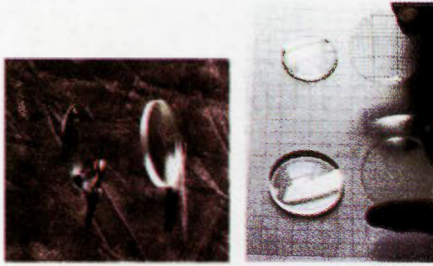
Πάρτε ένα άδειο χάρτινο κουτί από φρέσκο γάλα. Αφού το πλύνετε καλά, κάντε στη μια έδρα του μια στρογγυλή τρύπα ακτίνας περίπου 2 cm. Στη συνέχεια, κολλήστε καλά επάνω της μια διαφανή ζελατίνα και, αφού στεγνώσετε καλά το κουτί γεμίστε το με νερό. Ανοίξτε, ακριβώς απέναντι από την ζελατίνα, μια μικρή τρύπα και φωτίστε με ένα φακό από την άλλη πλευρά. Θα δείτε το νερό να πετάγεται από την τρύπα σχηματίζοντας μια φωτεινή καμπύλη. Πώς συμβαίνει αυτό;

**Εικόνα 9.19**

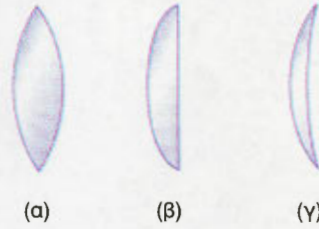
Μήπως έτσι εξηγούνται οι πολύ εντυπωσιακοί φωτεινοί πίδακες που παρατηρούμε στα συντριβάνια;

**9.5 ΟΙ ΦΑΚΟΙ ΚΑΙ ΤΑ ΕΙΔΩΛΑ ΤΟΥΣ**

Ένας φακός είναι ένα κομμάτι γυαλιού ή άλλου διαφανούς υλικού, το οποίο χρησιμοποιείται για να κατευθύνει ή να ελέγξει την πορεία των φωτεινών ακτίνων. Συνήθως, οι επιφάνειες των φακών είναι τμήματα σφαίρας, αν και δεν είναι σπάνια η χρήση φακών με άλλα σχήματα (παραβολικό, κυλινδρικό κτλ.) (εικ. 9.20). Η διάθλαση του φωτός στις επιφάνειες ενός φακού εξαρτάται από το σχήμα του, το δείκτη διάθλασης του υλικού του και το είδος του υλικού που τον περιβάλλει (συνήθως αέρας). Επειδή οι φακοί μπορούν να δημιουργήσουν ειδώλα με πιο εύκολο τρόπο από ότι τα κάτοπτρα, αποτελούν τη βάση για την κατασκευή των περισσότερων οπτικών οργάνων, από φωτογραφικές μηχανές και κιάλια μέχρι μικροσκόπια και τηλεσκόπια. Τα ίδια μας τα μάτια είναι οπτικά όργανα που χρησιμοποιούν φακούς και λειτουργούν περίπου όπως μια φωτογραφική μηχανή. Μπορούμε να διακρίνουμε τους φακούς σε δύο κατηγορίες: α) Στους **συγκλίνοντες φακούς** (εικ. 9.21) που ονομάζονται έτσι, επειδή διαθλούν τις προσπίπτουσες παράλληλες ακτίνες, έτσι ώστε να συγκλίνουν σε ένα σημείο (εστιακό σημείο) που βρίσκεται στην **άλλη** πλευρά του φακού από αυτή της προσπίπτουσας δέσμης. Ένα μακρινό αντικείμενο, το οποίο βλέπουμε μέσα από έναν τέτοιο φακό, εμφανίζεται μικρότερο και ανεστραμμένο, αν ο φακός βρίσκεται στην κατάλληλη απόσταση από το μάτι (εικ. 9.22γ), ενώ ένα αντικείμενο κοντά στον ίδιο φακό εμφανίζεται όρθιο και μεγεθυμένο (εικ. 9.22δ).

**Εικόνα 9.20**

(α) Συγκλίνων φακός (αριστερά) και αποκλίνων (δεξιά).  
 (β) Συγκλίνοντες φακοί (επάνω.) Αποκλίνοντες φακοί (κάτω)

**Εικόνα 9.21**

Συγκλίνοντες φακοί.  
 (α) αμφίκυρτος  
 (β) επιπεδόκυρτος  
 (γ) κυρτόκοιλος

β) Στους **αποκλίνοντες φακούς**, οι οποίοι, σε αντίθεση με τους προηγούμενους, είναι λεπτότεροι στο μέσον τους (εικ. 9.23). Αυτοί ονομάζονται έτσι, διότι διαθλούν μια προσπίπτουσα δέσμη παράλληλων ακτίνων, έτσι ώστε, αφού περάσει από μέσα τους, να αποκλίνει και να φαίνεται σαν να πηγάζει από ένα σημείο (εστιακό σημείο) που βρίσκεται στην **ίδια** πλευρά με την προσπίπτουσα δέσμη. Κάθε αντικείμενο που παρατηρούμε μέσα από έναν τέτοιο φακό εμφανίζεται **πάντοτε** όρθιο και μικρότερο από ότι αν το παρατηρούσαμε με γυμνό μάτι, ανεξάρτητα από την απόσταση που έχει το αντικείμενο από το φακό και ο φακός από το μάτι μας (εικ. 9.24).



(α)



(β)





(γ)



(δ)

**Εικόνα 9.22**

(α) Ο συγκλίνων φακός σχηματίζει ειδωλο στην οθόνη. (β) Το ίδιο ειδωλο μπορούμε να το δούμε με τα μάτια μας. (γ) Όταν το αντικείμενο είναι μακριά, το ειδωλο είναι ανεστραμμένο και μικρότερο από το αντικείμενο (δ) Όταν το αντικείμενο είναι κοντά στο φακό, το ειδωλο είναι ορθό και μεγαλύτερο από το αντικείμενο (φανταστικό).



(α)



(β)



(γ)

**Εικόνα 9.23**

Τύποι αποκλινόντων φακών

(α) αμφίκοιλος

(β) επιπεδόκοιλος

(γ) κοιλόκυρτος

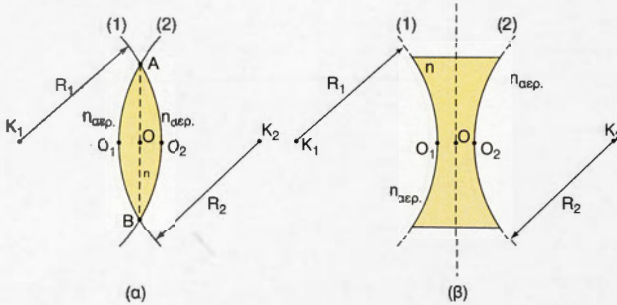
**Εικόνα 9.24**

Το ειδωλο ενός αντικειμένου που παρατηρούμε μέσα από αποκλινόντα φακό είναι πάντα όρθιο και μικρότερο από όπτι θα το βλέπαμε χωρίς το φακό.

## 9.6 ΣΥΓΚΛΙΝΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΚΛΙΝΟΝΤΕΣ ΛΕΠΤΟΙ ΦΑΚΟΙ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΚΤΙΝΩΝ

Στην εικόνα (9.25) απεικονίζεται σχηματικά ένας συγκλίνων και ένας αποκλίνων φακός. Είναι και οι δύο από διαφανές υλικό και έχουν δείκτη διάθλασης  $n$ . Οι φακοί περιορίζονται από δύο σφαιρικές επιφάνειες (1) και (2) με κέντρα  $K_1$  και  $K_2$  και ακτίνες  $R_1$  και  $R_2$  αντιστοίχως. Περιβάλλονται από αέρα με δείκτη διάθλασης  $n_{\text{αερ}} \approx 1$ .



**Εικόνα 9.35**

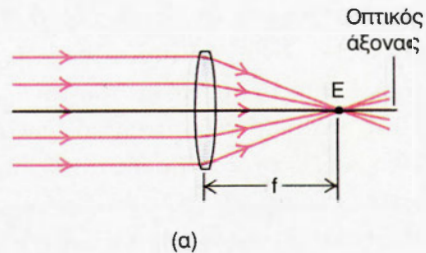
Σχηματική παράσταση ενός συγκλίνοντος (α) και ενός αποκλίνοντος (β) λεπτού φακού.

Η ευθεία  $K_1K_2$  που είναι άξονας συμμετρίας του φακού ονομάζεται **κύριος άξονας**, το δε σημείο  $O$ , στο οποίο ο κύριος άξονας συναντά την ευθεία  $AA'$ , ονομάζεται **οπτικό κέντρο** του φακού. Ένας φακός του οποίου το πάχος  $O_1O_2$  είναι πολύ μικρό σε σχέση με τις ακτίνες  $R_1$  και  $R_2$  ονομάζεται **λεπτός φακός**.

Φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν σε λεπτό συγκλίνοντα φακό παράλληλα προς τον κύριο άξονα συγκεντρώνονται σε ένα σημείο που ονομάζεται **κύρια εστία**  $E$  (στην πραγματικότητα δεν είναι ακριβώς σημείο αλλά μια πολύ μικρή περιοχή) (εικ. 9.26). Οι φωτεινές ακτίνες από ένα σημείο μιας πολύ μακρινής φωτεινής πηγής μπορούν να θεωρηθούν σχεδόν παράλληλες (εικ. 9.27α), οπότε μπορούμε να πούμε ότι η κύρια εστία είναι η θέση του ειδώλου ενός αντικειμένου που βρίσκεται στο "άπειρο" αλλά επάνω στον κύριο άξονα του φακού. (εικ. 9.27α)

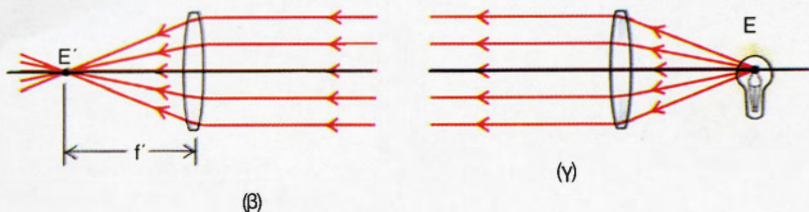
**Εικόνα 9.26**

Κάθε μακρινό φωτεινό σημείο σχηματίζει το είδωλό του στην κύρια εστία.

**Εικόνα 9.27α**

Η απόσταση της κύριας εστίας από το οπτικό κέντρο ονομάζεται **εστιακή απόσταση**.

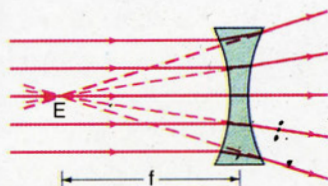
Η απόσταση της κύριας εστίας  $E$  από το οπτικό κέντρο του φακού  $O$  ονομάζεται **εστιακή απόσταση**  $f$  (εικ. 9.27α).

**Εικόνα 9.27**

- (α) Ένας φακός μπορεί να αντιστραφεί, έτσι ώστε το φως να πέφτει σ' αυτόν από την αντίθετη πλευρά.  
 (β) Αν στην κύρια εστία του συγκλίνοντος φακού τεθεί σημειακή φωτεινή πηγή, οι ακτίνες θα εξέλθουν από το φακό παράλληλες προς τον άξονα.

Το φως από όποια πλευρά του φακού και αν προέρχεται μετά τη διέλευσή του από αυτόν θα ακολουθεί την ίδια πορεία. Οι εστιακές αποστάσεις είναι ίδιες και από τις δύο πλευρές του φακού, έστω και αν οι ακτίνες των δύο επιφανειών του είναι διαφορετικές.

Για τους αποκλίνοντες φακούς η κύρια εστία E θα ορίζεται ως το σημείο εκείνο του κύριου άξονα από το οποίο φαίνονται να πηγάζουν οι φωτεινές ακτίνες μιας παράλληλης προς τον οπτικό άξονα δέσμης, μετά τη διέλευσή τους μέσα από τον φακό (εικ. 9.28). Η εστιακή απόσταση  $f$  για τους αποκλίνοντες φακούς, όπως και για τους συγκλίνοντες, θα είναι η απόσταση της κύριας εστίας E από το οπτικό κέντρο του φακού.

**Εικόνα 9.38**

Κύρια εστία και εστιακή απόσταση αποκλίνοντος φακού.

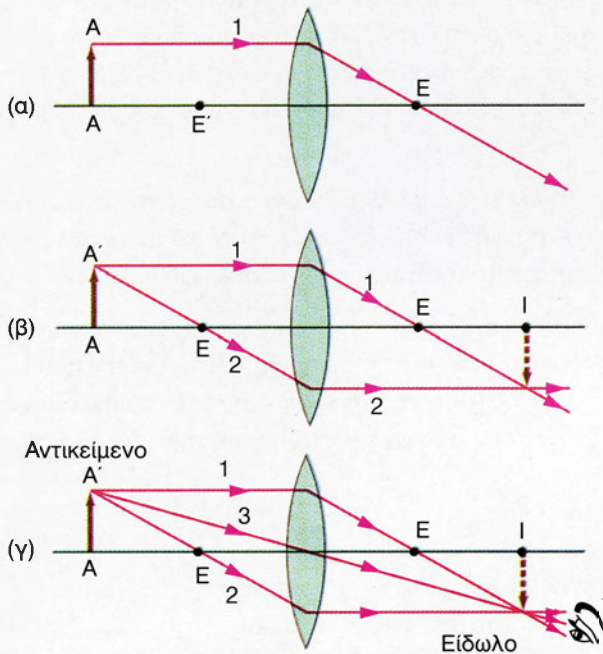
Ένα πολύ χρήσιμο στοιχείο ενός φακού είναι η εστιακή του απόσταση. Με τη βοήθεια της εστιακής απόστασης είναι εύκολο να βρούμε τη θέση του ειδώλου ενός φωτεινού αντικειμένου που σχηματίζεται είτε από συγκλίνοντα είτε από αποκλίνοντα φακό. Για το σκοπό αυτό, όπως και στην περίπτωση των κατόπτρων, χρησιμοποιούμε ένα απλό σχεδιάγραμμα στο οποίο απεικονίζουμε τον οπτικό άξονα του φακού, το φακό, την κύρια εστία του E και το φωτεινό αντικείμενο, που το παριστάνουμε, συνήθως, με ένα όρθιο βέλος στα αριστερά του φακού.

Για να προσδιορίσουμε το είδωλο ενός φωτεινού σημείου του αντικειμένου, χρησιμοποιούμε τρεις ακτίνες που "πηγάζουν" από αυτό. Οι ακτίνες αυτές ακολουθούν την πορεία που φαίνεται στην εικόνα (9.29) (**προσοχή:** σχεδιάζονται σαν να υφίστανται μια μόνο διάθλαση στο φακό).

**Ακτίνα 1:** Ξεκινά από την κορυφή του αντικειμένου. Οδεύει παράλληλα προς τον κύριο άξονα και στη συνέχεια αφού διαθλαστεί από το φακό, διέρχεται από την κύρια εστία E (εικ.9.29α).

**Ακτίνα 2:** Ξεκινά από την κορυφή του αντικειμένου, διέρχεται από την κύρια εστία  $E$  και, αφού διαθλαστεί από το φακό, συνεχίζει παράλληλα προς τον κύριο άξονα (εικ.9.29β).

**Ακτίνα 3:** Ξεκινά από την κορυφή του αντικειμένου και διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού. Μετά τη διέλευσή της από το φακό συνεχίζει προς την ίδια κατεύθυνση και διέρχεται από το σημείο τομής των ακτίνων (1) και (2) (εικ. 9.29).

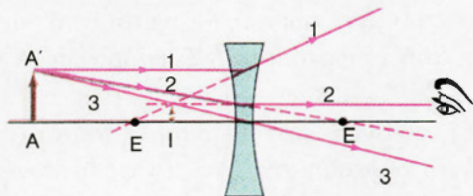


**Εικόνα 9.29**

Διαδικασία της κατασκευής του ειδώλου ενός αντικειμένου που σχηματίζει συγκλινών φακός, Ακτίνες φεύγουν από κάθε σημείο του αντικειμένου προς όλες τις κατευθύνσεις. Εδώ, φαίνεται η διαδρομή των τριών πιο χρήσιμων ακτίνων που μας παρέχουν το είδωλο ενός σημείου του αντικειμένου.

Το σημείο αυτό είναι το είδωλο της κορυφής του αντικειμένου. Όλα τα άλλα σημεία του ειδώλου μπορούν να κατασκευαστούν με τον ίδιο τρόπο, οπότε προκύπτει το είδωλο του αντικειμένου, που στην περίπτωση αυτή είναι **αντεστραμμένο** και **πραγματικό**, διότι σχηματίζεται από πραγματικές φωτεινές ακτίνες και μπορεί να αποτυπωθεί πάνω σε φωτογραφικό φιλμ ή να απεικονιστεί σε οθόνη, ή ακόμη και να το δούμε με τα μάτια μας.



**Εικόνα 9.30**

Σχηματισμός ειδώλου από αποκλίνοντα φακό με τη χρήση των ακτίνων (1), (2) και (3) του σχήματος (9.30)

Την ίδια διαδικασία μπορούμε να ακολουθήσουμε και για έναν αποκλίνοντα φακό, όπως φαίνεται στην εικόνα (9.30). Στην περίπτωση αυτή οι τρεις ακτίνες, μετά τη διάθλασή τους από το φακό, φαίνονται να πηγάζουν από ένα σημείο που βρίσκεται στην ίδια πλευρά του φακού με το αντικείμενο. Το σημείο αυτό είναι το είδωλο, και επειδή από αυτό δε διέρχονται οι πραγματικές φωτεινές ακτίνες αλλά οι γεωμετρικές προεκτάσεις τους, λέμε ότι είναι **φανταστικό**.

**Προσοχή:** Το φανταστικό είδωλο δεν μπορεί να αποτυπωθεί σε φιλμ ή να προβληθεί σε οθόνη είναι όμως ορατό από τα μάτια μας τα οποία δεν ξεχωρίζουν τα πραγματικά από τα φανταστικά είδωλα.

Για τον προσδιορισμό της θέσης του ειδώλου ενός αντικειμένου που σχηματίζει ένας φακός, είτε αυτός είναι συγκλίνων είτε αποκλίνων, αρκεί να γνωρίζουμε την απόσταση του αντικειμένου από το φακό  $s$  και την εστιακή απόσταση του φακού  $f$ , και να εφαρμόσουμε τη σχέση:

**Εξίσωση των φακών:** 
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (9.5)$$

όπου:  $s$  είναι η απόσταση αντικειμένου-φακού

$s'$  είναι η απόσταση ειδώλου-φακού

$f$  είναι η εστιακή απόσταση του φακού.

Η σχέση (9.5) είναι ίδια με την αντίστοιχη σχέση (8.3) που ισχύει για τα κάτοπτρα. Για τη σωστή όμως εφαρμογή της πρέπει να ακολουθούμε με προσοχή τους ακόλουθους κανόνες:

1. Η εστιακή απόσταση  $f$  λαμβάνεται ως θετική για τους συγκλίνοντες και ως αρνητική για τους αποκλίνοντες φακούς.
2. Η απόσταση του αντικειμένου  $s$  λαμβάνεται πάντα ως θετική.
3. Η απόσταση του ειδώλου  $s'$  είναι θετική για πραγματικά και αρνητική για φανταστικά είδωλα.
4. Το ύψος  $h'$  του ειδώλου είναι θετικό, όταν το είδωλο είναι ορθό, και αρνητικό, αν είναι ανεστραμμένο ως προς το αντικείμενο. (Το ύψος  $h$  του αντικειμένου λαμβάνεται πάντα ως θετικό).



## 9.7 ΜΕΓΕΘΥΝΣΗ ΦΑΚΟΥ - ΙΣΧΥΣ ΦΑΚΟΥ

*Να βλέπεις ένα κόσμο σ' έναν κόκκο άμμου  
και τον ουρανό σ' ένα λουλούδι.  
Wil. Blake*

Οι οπτικοί και οι οφθαλμίατροι, αντί να χρησιμοποιούν την εστιακή απόσταση για να καθορίζουν την αποτελεσματικότητα των φακών που χρησιμοποιούμε στα γυαλιά μας ή στους φακούς επαφής, χρησιμοποιούν το αντίστροφο μέγεθος της εστιακής απόστασης, που το ονομάζουν **Διαθλαστική Ισχύ** του φακού.

**Διαθλαστική ισχύς:** 
$$P = \frac{1}{f} \quad (9.6)$$

Η μονάδα της διαθλαστικής ισχύος των φακών είναι η **διοπτρία** (D) και είναι:

$$1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$$

Για παράδειγμα: Ένας φακός με εστιακή απόσταση  $f = 20 \text{ cm}$  έχει διαθλαστική ισχύ:

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,2 \text{ m}} = 5,0 \text{ D}$$

Από τον κανόνα (1) που διατυπώσαμε στην προηγούμενη παράγραφο προκύπτει ότι η διαθλαστική ισχύς σε διοπτρίες ενός συγκλίνοντος φακού θα είναι θετική, ενώ η διαθλαστική ισχύς ενός αποκλίνοντος φακού θα είναι αρνητική. Γι' αυτό το λόγο τους συγκλίνοντες φακούς τους λέμε και **θετικούς** ενώ τους αποκλίνοντες **αρνητικούς**.

Όπως στην περίπτωση των κατόπτρων, έτσι και στην περίπτωση των φακών μία χρήσιμη ιδιότητα είναι αυτή με την οποία πετυχαίνεται η μεγέθυνση του ειδώλου ενός αντικειμένου.

Θα ονομάζουμε **μεγέθυνση**,  $m$ , το λόγο του ύψους  $h_1$  του ειδώλου προς το ύψος  $h'$  του αντικειμένου:

$$m = \frac{h'}{h} \quad (9.7)$$

Με βάση τους κανόνες που προηγουμένως διατυπώσαμε έχουμε:

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s} \quad (9.8)$$

Δηλαδή, για ορθό είδωλο ( $h' > 0$ ) η μεγέθυνση είναι θετική, ενώ για ανεστραμμένο είδωλο ( $h' < 0$ ) η μεγέθυνση είναι αρνητική.

□ **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 9.2** Αντικείμενο κοντά σε συγκλίνοντα φακό.

Ένα γραμματόσημο βρίσκεται 10 cm μπροστά από ένα συγκλίνοντα φακό εστιακής απόστασης 15 cm. Καθορίστε τη θέση και το μέγεθος του ειδώλου: α) με τη βοήθεια των τύπων και β) με τη βοήθεια διαγράμματος οπτικών ακτίνων.

**Λύση**

α) Από τη σχέση:  $\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$  θέτοντας  $s=10$  cm και  $f=15$  cm έχουμε:

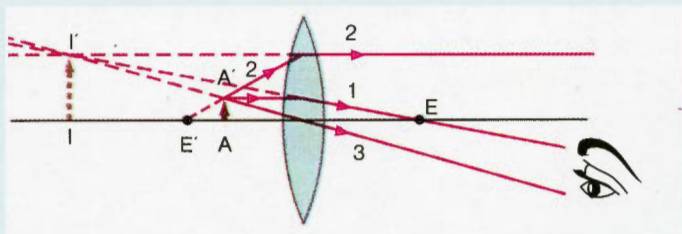
$$\frac{1}{s'} = \frac{1}{15 \text{ cm}} - \frac{1}{10 \text{ cm}} = -\frac{1}{30 \text{ cm}}$$

Συνεπώς,  $s'=-30$  cm. Επειδή το  $s'$  προέκυψε αρνητικό, συμπεραίνουμε ότι το είδωλο είναι φανταστικό και στην ίδια μεριά του φακού με το αντικείμενο. Η μεγέθυνση προκύπτει από τη σχέση:

$$m = -\frac{s'}{s} = -\frac{(-30 \text{ cm})}{10 \text{ cm}} = 3,0$$

Το είδωλο είναι τριπλάσιο από το αντικείμενο και ορθό. Σ' αυτή την περίπτωση ο φακός χρησιμοποιείται απλώς ως μεγεθυντικός για την καλύτερη και ευκρινέστερη παρατήρηση.

β) Ο προσδιορισμός του ειδώλου με τη βοήθεια διαγράμματος φαίνεται στο σχήμα (9.31).

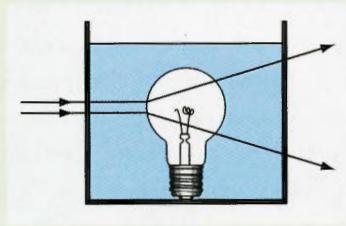


**Εικόνα 9.31**

Ένα αντικείμενο που βρίσκεται μεταξύ κύριας εστίας και συγκλίνοντος φακού δημιουργεί φανταστικό είδωλο.

**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.5 Κατασκευή ενός αποκλίνοντος φακού.**

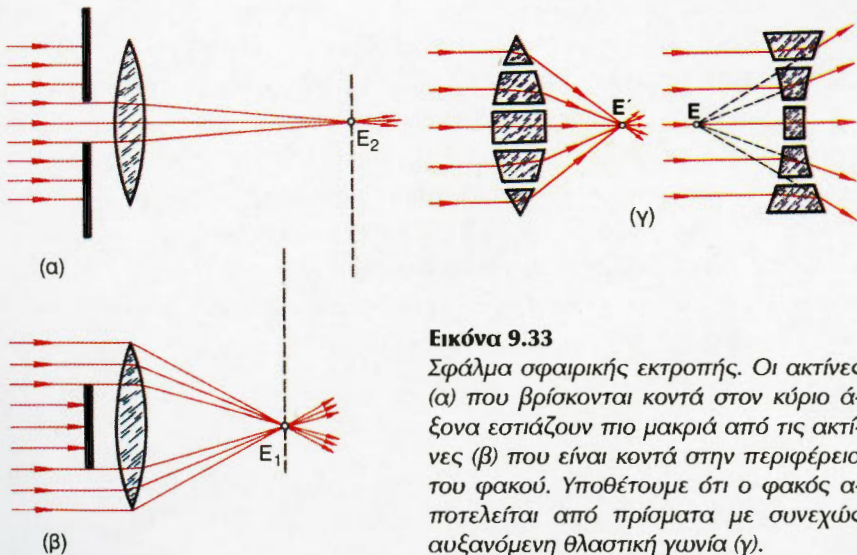
Ένα μικρό γυάλινο δοχείο (ή ένα δοχείο από διαφανές πλαστικό) και ένας “καμένος” διαφανής λαμπτήρας πυράκτωσης είναι ότι χρειαζόμαστε, για να φτιάξουμε έναν καλό αποκλίνοντα φακό (εικ. 9.32).

**Εικόνα 9.32**

Κολλήστε το λαμπτήρα στον πυθμένα του δοχείου με δυνατή κόλλα, ώστε να μπορεί να υπερνικήσει την άνωση. Στη συνέχεια, γεμίστε το δοχείο με νερό και παρατηρήστε διάφορα αντικείμενα μέσα από αυτό. Αν χρησιμοποιήσετε μικρά laser και ρίξετε στο νερό μερικές σταγόνες γάλα, θα μπορέσετε να δείτε την πορεία των φωτεινών ακτίνων.

**9.8 ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΦΑΚΩΝ**

Προηγουμένως αποδεχτήκαμε ότι οι φακοί για τους οποίους μιλάμε (και τους οποίους χρησιμοποιούμε) είναι λεπτοί. Ο λόγος για τον οποίο το δεχόμαστε αυτό γίνεται εύκολα κατανοητός, αν παρατηρήσουμε προσεκτικά το σχήμα (9.33).

**Εικόνα 9.33**

Σφάλμα σφαιρικής εκτροπής. Οι ακτίνες (α) που βρίσκονται κοντά στον κύριο άξονα εστιάζουν πιο μακριά από τις ακτίνες (β) που είναι κοντά στην περιφέρεια του φακού. Υποθέτουμε ότι ο φακός αποτελείται από πρίσματα με συνεχώς αυξανόμενη θλαστική γωνία (γ).

### • Σφάλμα σφαιρικότητας

Μπορεί να θεωρηθεί ότι ένας φακός σχηματίζεται από πολλά πρίσματα τοποθετημένα το ένα μετά το άλλο, (σχ. 9.33γ) έτσι ώστε η θλαστική τους γωνία να αυξάνει από το μέσο, όπου είναι μηδέν, προς τα άκρα, όπου παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Μπορούμε συνεπώς να αντιληφθούμε, κάνοντας μια απλή γεωμετρική κατασκευή για την εκτροπή του φωτός από τα λεπτά πρίσματα, ότι οι ακτίνες του φωτός κοντά στον κύριο άξονα του φακού θα εστιάζουν στη θέση  $E_2$  πιο μακριά από το φακό από τη θέση  $E_1$  που θα εστιάζουν οι περιφερειακές ακτίνες. Αποτέλεσμα της προηγούμενης ανάλυσης είναι ότι οι φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από ένα σημείο ενός αντικειμένου να μην εστιάζουν όλες στο ίδιο σημείο αλλά να σχηματίζουν συγκεχυμένη κοιλίδα. Αυτό συνιστά το λεγόμενο **σφάλμα εκ σφαιρικότητας**. Για να διορθωθεί αυτό, στα οπτικά όργανα μεγάλης ακριβείας, χρησιμοποιούνται συνδυασμοί φακών.

### • Χρωματικό σφάλμα

Ένα άλλο συνηθισμένο σφάλμα των φακών οφείλεται στο ότι η γωνία εκτροπής μιας φωτεινής ακτίνας, όπως είδαμε, εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης  $n$  του υλικού σύμφωνα με τη σχέση:

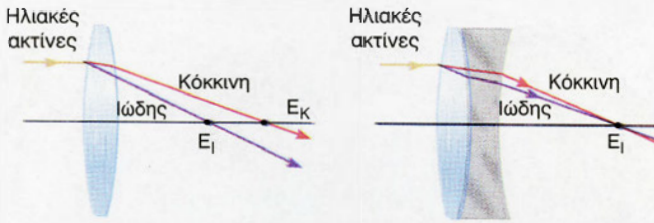
$$\epsilon \approx A(n - 1)$$

(Η σχέση αυτή ισχύει στην απλή περίπτωση της ελάχιστης εκτροπής, αλλά και γενικότερα η εκτροπή εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης του υλικού του πρίσματος).

Ο δείκτης διάθλασης όμως των διάφορων υλικών, όπως θα μάθουμε, εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός που διέρχεται μέσα από αυτά.

Συγκεκριμένα, ο δείκτης διάθλασης είναι μεγαλύτερος για τα μικρότερα μήκη κύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γωνία εκτροπής των φωτεινών ακτίνων με ιώδες χρώμα να είναι μεγαλύτερη από τη γωνία εκτροπής για τις κόκκινες. Το ηλιακό φως, συνεπώς, διερχόμενο από ένα φακό δε δημιουργεί μία εστία αλλά διαφορετικές για τα διαφορετικά χρώματα που περιλαμβάνει (εικ. 9.34). Στην εικόνα (9.34α), για λόγους ευκρίνειας, απεικονίζεται η εστία του ιώδους  $E_i$  και η εστία του ερυθρού  $E_K$ .



**Εικόνα 9.34**

Σφάλμα χρωματικής εκτροπής.

(α) Οι ιώδεις ακτίνες εστιάζουν πλησιέστερα στο φακό από ότι οι ερυθρές.

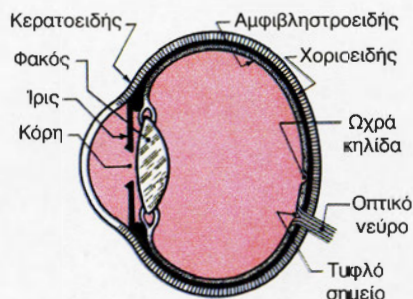
(β) Το σφάλμα χρωματικής εκτροπής διορθώνεται με τη χρήση αποκλίνοντος φακού κατάλληλου υλικού.

Αυτό το είδος του σφάλματος των φακών ονομάζεται **χρωματικό** και μπορεί να διορθωθεί με τη χρησιμοποίηση σύνθετων φακών, όπως αυτός που φαίνεται στην εικόνα (9.34β), ο οποίος αποτελείται από συγκλίνοντα και αποκλίνοντα φακό από διαφορετικό γυαλί με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Οι δείκτες διάθλασης έχουν επιλεγεί έτσι, ώστε οι ιώδεις και οι ερυθρές ακτίνες να συγκλίνουν στην ίδια εστία. Ένας τέτοιος συνδυασμός φακών ονομάζεται **αχρωματικός**. Όλες οι καλές φωτογραφικές μηχανές χρησιμοποιούν αχρωματικούς φακούς.

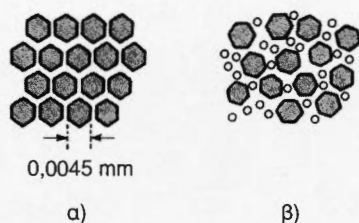
## 9.9 ΟΡΑΣΗ - ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΟΡΑΣΗΣ

*Ανοιχτά, περήφανα τα μάτια του  
κι όλο το δάσος να σαλεύει ακόμη  
στον αζηλίδωτο αμφιβληστροειδή.  
Οδ. Ελύτης (Η αυτοψία)*

Όλοι ξέρουμε τη μεγάλη σημασία που έχει η αίσθηση της όρασης στη ζωή μας και την αξία που αποδίδουμε στο όργανο που την καθιστά δυνατή, το μάτι.

**Εικόνα 9.35**

Οριζόντια τομή του δεξιού οφθαλμού του ανθρώπου.

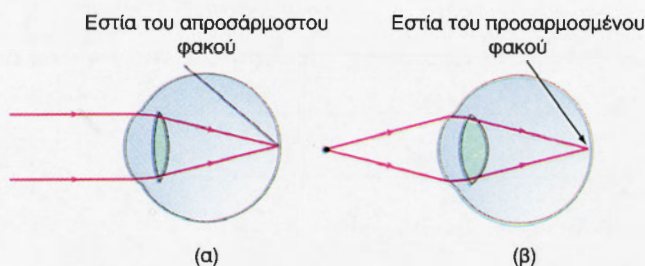
**Εικόνα 9.36**

Μεγεθυμένα τμήματα του αμφιβληστροειδή χιτώνα: α) κωνία στην ωχρά κηλίδα, β) κωνία και ραβδία σε άλλη θέση.

Στην εικόνα (9.35) φαίνεται το εσωτερικό του οφθαλμού. Ο **αμφιβληστροειδής χιτώνας** αποτελεί το βασικότερο στοιχείο όρασης. Σ' αυτόν καταλήγουν τα εκατομμύρια των διακλαδώσεων του οπτικού νεύρου, όπου βρίσκονται τα 7 περίπου εκατομμύρια **κωνία** και τα 120 περίπου εκατομμύρια **ραβδία** που είναι υπεύθυνα, τα μεν πρώτα για την ευαισθησία μας στα χρώματα, τα δε δεύτερα για την ικανότητά μας να βλέπουμε στο ημίφως (σκοτάδι) αλλά δεν είναι ευαίσθητα στα χρώματα, με εξαίρεση τις αποχρώσεις του γκριζου. Γι' αυτό όλα τα αντικείμενα την νύχτα φαίνονται γκριζα. Η όραση των χρωμάτων εξηγείται από το γεγονός ότι υπάρχουν τριών ειδών κωνία τα οποία κατανέμονται ανάμικτα και ομοιόμορφα στην κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδούς. Μερικά από τα κωνία είναι ευαίσθητα στο γαλάζιο, μερικά στο πράσινο και άλλα στο πορτοκαλέρυθρο. Συνεργαζόμενα μπορούν να μεταδώσουν ακριβείς πληροφορίες για τις αποχρώσεις του αντικειμένου. Τούτο επιτυγχάνεται με τρόπο ανάλογο με αυτόν που χρησιμοποιείται στον καθοδικό σωλήνα της έγχρωμης τηλεόρασης. Στην οθόνη της η επιστροφή αποτελείται από τρεις τύπους φωσφόρων: έναν που παρήχει κόκκινο φως, έναν πράσινο και ένα γαλάζιο. Η μεγαλύτερη συκέντρωση κωνίων παρατηρείται στην **ωχρά κηλίδα**, που έχει διάμετρο 1mm και περιλαμβάνει 160.000 περίπου κωνία. Γι' αυτό η ωχρά κηλίδα έχει τη μέγιστη ευαισθησία στη διάκριση των χρωμάτων (εικ. 9.36).

Η **ίριδα** ανοιγοκλείνει σαν διάφραγμα, για να ρυθμίσει την ένταση του φωτός που διέρχεται από την κόρη και πέφτει πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Η ελάχιστη διάμετρος της κόρης είναι 2 mm και η μέγιστη 8 mm. Ο **φακός** αποτελείται από ένα ελαστικό ημιστερεό διαφανές υλικό με δείκτη διάθλασης  $n = 1.33$ . Ο φακός δεν παίζει και σπουδαίο ρόλο στη διάθλαση των οπτικών ακτίνων. Τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη διάθλαση έχει ο κερατοειδής χιτώνας ( $n = 1,376$ ) που χρησιμεύει και ως προστατευτικό κάλυμμα του φακού. Ο κύριος ρόλος του φακού είναι η λεπτή ρύθμιση της ε-

στίασης σε διαφορετικές αποστάσεις. Αυτό επιτυγχάνεται με τους **ακτινωτούς μύς**, οι οποίοι αλλάζουν την καμπυλότητα των φακών και συνεπώς και την εστιακή τους απόσταση (εικ. 9.48).



**Εικόνα 9.37**

Προσαρμογή ενός κανονικού οφθαλμού. α) Φακός **λεπτός** (εστίαση στο άπειρο). β) Φακός **παχύς** (εστίαση σε κοντινό αντικείμενο).

Όταν ο φακός εστιάσει σε μακρινό αντικείμενο, οι μύες είναι χαλαρωμένοι και ο φακός λεπτός. Για να εστιάσει σε κοντινό αντικείμενο οι μύες συστέλλονται και ο φακός διογκώνεται στο μέσο μικραίνοντας έτσι την εστιακή του απόσταση, με αποτέλεσμα τα είδωλα των κοντινών αντικειμένων να σχηματίζονται στον αμφιβληστροειδή πίσω από την κύρια εστία.

Αυτή η διαδικασία εστίασης του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, η οποία επιτυγχάνεται με μεταβολή του πάχους του φακού του οφθαλμού, ονομάζεται **προσαρμογή**. Η διαδικασία της προσαρμογής γίνεται αυτόματα και αντιστοιχεί στο “ζουμάρισμα” του φακού της φωτογραφικής μηχανής. Επειδή η καμπύλωση του φακού δεν μπορεί να είναι απεριόριστη, η προσαρμογή έχει ένα όριο που το ονομάζουμε **ανώτατο σημείο** και που σε μικρή ηλικία (παιδική) φτάνει και τα 10 cm. Η πιο μικρή απόσταση στην οποία βλέπουμε εμείς οι ενήλικες, χωρίς ιδιαίτερη προσπάθεια, μικρά αντικείμενα επί πολύ ώρα (π.χ. όταν διαβάζουμε), είναι περίπου 25 cm και ονομάζεται **ελάχιστη απόσταση ευκρινούς όρασης**.

Ο κερατοειδής χιτώνας, το υδατώδες υγρό, το υαλώδες σώμα και ο φακός συνιστούν όλα μαζί ένα σύστημα που είναι οπτικά ισοδύναμο με λεπτό φακό ισχύος περίπου  $P = 60 - 70 \text{ D}$ , ή, αντιστοίχως, εστιακής απόστασης  $f = 1,43 - 1,66 \text{ cm}$ . Ο φακός σχηματίζει πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα ένα είδωλο **πραγματικό, ανεστραμμένο και μικρότερο** από το παρατηρούμενο αντικείμενο. Μπορούμε να πούμε ότι ο αμφιβληστροειδής χιτώνας είναι η “οθόνη” στην οποία σχηματίζονται οι εικόνες του περιβάλλοντός μας. Η περιοχή γύρω από την είσοδο του οπτικού νεύρου είναι οπτικώς ανενεργός και ονομάζεται **τυφλό σημείο**. Αυτή δημιουργεί στο οπτικό πεδίο κάθε οφθαλμού μια περιοχή μη ορατή που εκτείνεται  $6^\circ$  οριζόντια και  $8^\circ$  κάθετα



από τον οπτικό άξονα. Η ύπαρξή της δε γίνεται εύκολα αντιληπτή, επειδή η αόρατη περιοχή που αντιστοιχεί στο τυφλό σημείο του ενός οφθαλμού βρίσκεται στο οπτικό πεδίο του άλλου.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.8 Επιβεβαίωση της ύπαρξης του τυφλού σημείου



**Εικόνα 9.38**

Διαπίστωση του τυφλού σημείου.

Κλείστε το αριστερό μάτι και κοιτάξτε το σταυρό του σχήματος (9.38) με το δεξί. Στην απόσταση των 25 cm το είδωλο του τετραγώνου του σχήματος πέφτει στο τυφλό σημείο και συνεπώς δεν το βλέπετε. Πλησιάστε σιγά-σιγά το σχήμα στο μάτι σας. Θα διαπιστώσετε ότι θα ξαναδείτε το τετράγωνο αλλά θα πάψετε να βλέπετε τη κηλίδα. Εάν πλησιάσετε περισσότερο η κηλίδα επανεμφανίζεται.

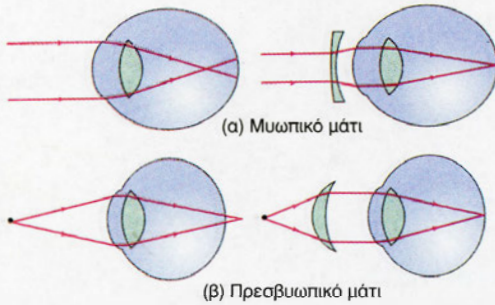
## 9.10 ΑΝΩΜΑΛΙΕΣ ΟΡΑΣΗΣ

*Η ιστορία είναι φτιαγμένη από λάθη!  
Κι όμως – επιφανειακά – ο κόσμος δείχνει εντάξει.  
G. Snyder*

Η ικανότητα προσαρμογής του οφθαλμού σε διάφορες αποστάσεις δεν είναι πάντα αποτελεσματική και αυτό έχει ως συνέπεια να εμφανίζονται δύο από τις κυριότερες ανωμαλίες της όρασης.

- α) Η **μυωπία** παρουσιάζεται σε έναν οφθαλμό που μπορεί να εστιάσει μόνο σε κοντινά αντικείμενα, έτσι ώστε τα μακρινά αντικείμενα να τα βλέπει καθαρά. Οφείλεται σε ένα βολβό του οφθαλμού που είναι περισσότερο επιμήκης από το κανονικό. Τα είδωλα των μακρινών αντικειμένων σχηματίζονται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή. Η διόρθωση της μυωπίας επιτυγχάνεται με έναν αποκλίνοντα φακό μπροστά από το φακό του οφθαλμού (εικ. 9.39α).



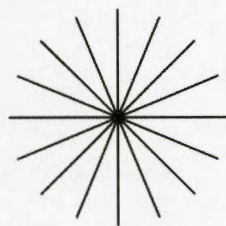
**Εικόνα 9.39**

Διόρθωση (α) της μυωπίας με αποκλίνοντα φακό και (β) της πρεσβυωπίας με συγκλίνοντα φακό.

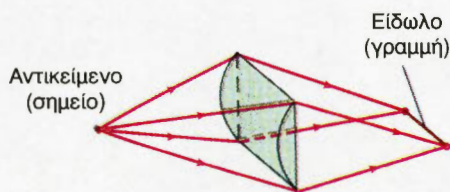
β) Η **υπερμετρώπια** είναι ακριβώς το αντίθετο της μυωπίας. Οφείλεται στο ότι ο βολβός του οφθαλμού έχει μήκος μικρότερο από το κανονικό με αποτέλεσμα οι ακτίνες που προσπίπτουν στο φακό παράλληλα (από τα μακρινά αντικείμενα) εστιάζουν πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Δηλαδή για να δει το μάτι τα μακρινά αντικείμενα να χρειάζεται να κάνει τη διαδικασία της προσαρμογής. Έτσι όμως, εξαντλείται η ικανότητα προσαρμογής και για να δει τα κοντινά, χρειάζεται πρόσθετη βοήθεια από ένα συγκλίνοντα φακό μπροστά του (εικ. 9.39β).

Σε μεγάλη ηλικία, σε ανθρώπους που βλέπουν κανονικά σε νεαρή ηλικία, ο φακός χάνει την ικανότητα να προσαρμόζεται. Αυτό οφείλεται στη χαλάρωση των ακτινωτών μυών. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο άνθρωπος πάσχει από **πρεσβυωπία**. Η ελάχιστη απόσταση ευκρινούς όρασης αυξάνει. Γι' αυτό, όταν διαβάσει χωρίς γυαλιά ένας πρεσβύωπας, πρέπει να κρατά το κείμενο πιο μακριά. Μπορεί όμως να διακρίνει καλά τα μακρινά αντικείμενα. Για κοντινά αντικείμενα και για διάβασμα χρειάζεται γυαλιά με **συγκλίνοντες** φακούς.

γ) Ο **αστιγματισμός** συνήθως προκαλείται από έναν όχι συμμετρικά σφαιρικό κερατοειδή χιτώνα ή φακό, έτσι ώστε τα σημεία να εμφανίζονται σαν μικρές γραμμές που προκαλούν ασάφεια στο είδωλο. Ένα αστιγματικό μάτι εστιάζει τις ακτίνες στη κατακόρυφη διεύθυνση σε μικρότερη απόσταση από ότι τις ακτίνες στην οριζόντια διεύθυνση. Ο αστιγματισμός ελέγχεται αν κοιτάζουμε με το ένα μάτι κάθε φορά σε ένα σχέδιο σαν αυτό της εικόνας (9.40). Εφόσον υπάρχει αστιγματισμός, οι ακτίνες που είναι κοντά στην κατακόρυφο θα εστιάζουν σε διαφορετικές αποστάσεις από αυτές που είναι κοντά στην οριζόντιο με αποτέλεσμα άλλες να φαίνονται πιο έντονες και άλλες πιο θαμπές.

**Εικόνα 9.40**

Έλεγχος του αστιγματισμού από τον τρόπο που βλέπουμε το ακτινωτό αυτό σχήμα.

**Εικόνα 9.41**

Ένας κυλινδρικός φακός σχηματίζει μία γραμμή ως είδωλο ενός σημείου.

Η διόρθωση του αστιγματισμού γίνεται με την προσθήκη κυλινδρικών φακών (εικ.9.41) στους φακούς μυωπίας ή πρεσβυωπίας.

### **ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 9.6 Μετείκασμα** (Διάρκεια οπτικής εντύπωσης)

Συνδέστε ένα μικρό λαμπάκι φακού με μια μπαταρία των 15 V. Δέστε τα μαζί και κρεμάστε τα από ένα σχοινί μήκους μισού μέτρου. Αρχίστε να περιστρέφετε το σύστημα στην αρχή αργά και στη συνέχεια πιο γρήγορα μέσα σε ένα σκοτεινό δωμάτιο. Θα διαπιστώσετε ότι, ενώ στην αρχή αντιλαμβάνεστε το φωτεινό λαμπάκι ως φωτεινή κηλίδα που περιστρέφεται, στη συνέχεια, όταν η γωνιακή ταχύτητα αυξηθεί, θα σας δίνει την εντύπωση φωτεινών κυκλικών τόξων και τέλος, μιας συνεχούς φωτεινής περιφέρειας κύκλου.

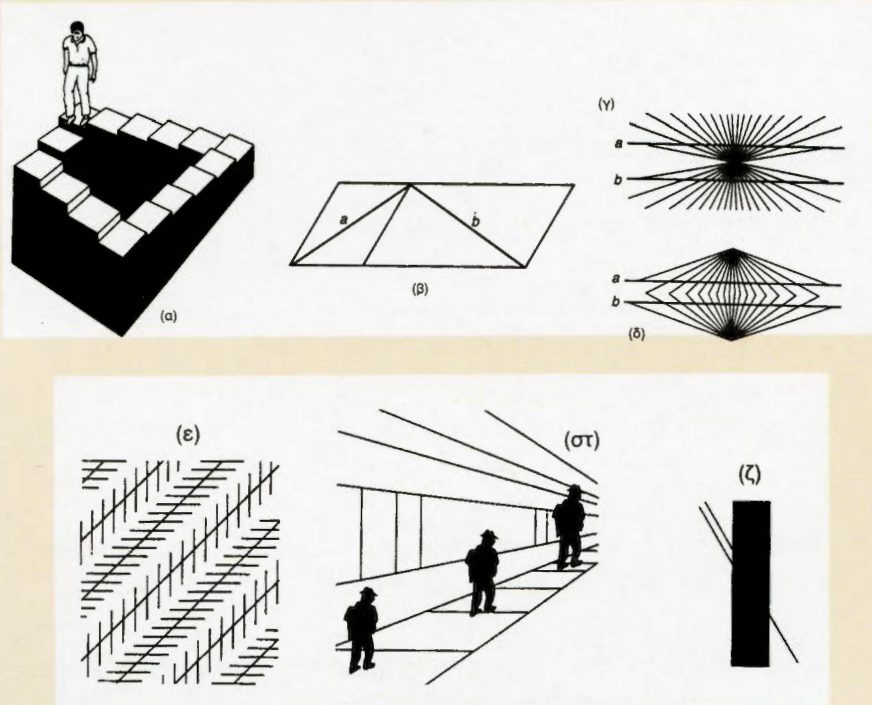
Η κατανόηση και η εξήγηση της προηγούμενης δραστηριότητας βασίζεται στο ότι ο εγκέφαλος του ανθρώπου διατηρεί μια οπτική εντύπωση περίπου για  $1/10$  του δευτερολέπτου, ακόμη και μετά την εξαφάνιση του αντικειμένου που προξένησε την οπτική εντύπωση. Η ιδιότητα αυτή της ανθρώπινης όρασης ονομάζεται **μετείκασμα**.

Στην ιδιότητα αυτή βασιζόμαστε η λειτουργία τόσο του κινηματογράφου όσο και της τηλεόρασης (οι διαδοχικές εικόνες προβάλλονται με ρυθμό 24 εικόνες το δευτερόλεπτο).

**Προσοχή.** Για να είναι η κίνηση φυσική, πρέπει ο ρυθμός λήψης των φωτογραφιών να είναι ίδιος με το ρυθμό προβολής τους (π.χ. 24 ανά δευτερόλεπτο). Αν ο ρυθμός λήψης είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό προβολής, τότε έχουμε την εντύπωση της αργής κίνησης (slow motion). Αντίθετα, αν ο ρυθμός λήψης είναι μικρότερος από το ρυθμό προβολής, έχουμε την εντύπωση της γρήγορης κίνησης.

## Οπτικές Απάτες

Από όλα όσα αναφέραμε πιο πάνω καταλαβαίνει κανείς ότι η αίσθηση της όρασης είναι μια σύνθετη λειτουργία στην οποία συνεργάζεται τόσο ο οφθαλμός ως αισθητήριο όργανο όσο και ο εγκέφαλος ως κέντρο επεξεργασίας των πληροφοριών τις οποίες συλλέγουν τα μάτια μας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές φορές να οδηγούμεθα σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με αυτό που παρατηρούμε. Τότε ακριβώς μιλάμε για οφθαλμαπάτη. Στην εικόνα 9.57 παρουσιάζονται μερικές τέτοιες περιπτώσεις οφθαλμαπάτης.



**Εικόνα 9.42** Διάφορες περιπτώσεις οφθαλμαπάτης.

(α) Ο άνθρωπος ανεβαίνει ή κατεβαίνει; (β) Η διαγώνιος  $b$  είναι μεγαλύτερη από την  $a$ ; (γ) Οι γραμμές  $a$  και  $b$  είναι παράλληλες; (δ) Ποια οριζόντια γραμμή είναι μεγαλύτερη; (ε) Οι διαγώνιες γραμμές είναι παράλληλες; (στ) Ποιος άνθρωπος είναι πιο ψηλός; (ζ) Ποια γραμμή από τις επάνω είναι η προέκταση της κάτω; Για να απαντήσετε μην πιστέψετε στα μάτια σας. Χρησιμοποιήστε όργανα.





## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Ο λόγος της ταχύτητας του ..... στο κενό δια της ταχύτητας του φωτός σ' ένα ..... ονομάζεται δείκτης ..... του ..... αυτού.

Συμπληρώστε τα κενά.

2. Όσο μεγαλύτερο ..... διάθλασης έχει ένα ..... τόσο ..... θα είναι η ..... του φωτός στο ..... αυτό.

Συμπληρώστε τα κενά.

3. Διατυπώστε το νόμο του Snell.

4. Τι ονομάζουμε ολική ανάκλαση.

5. Ποια γωνία ονομάζουμε "ορική γωνία".

6. Το νερό είναι όπως ξέρουμε διαφανές και άχρωμο. Πώς λοιπόν βλέπουμε μια σταγόνα νερού που βρίσκεται πάνω σ' ένα τραπέζι;

7. Υπάρχει περίπτωση το ηλιακό φως που πέφτει στην επιφάνεια μιας ήρεμης λίμνης να υποστεί ολική ανάκλαση;

8. Πόση είναι η γωνία διάθλασης, όταν μια ακτίνα φωτός προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δυο διαφανών μέσων, κάθετα;

9. Είναι παρατηρημένο ότι τα υφάσματα, τα πλακάκια και εν γένει οι επιφάνειες πολλών σωμάτων όταν βραχούν αναδεικνύουν εντονότερα και καθαρότερα τα χρώματά. Πώς το εξηγείτε αυτό;

10. Στην εξοχή τη νύχτα με αστροφεγγιά παρατηρούμε τα αστέρια να τρεμοσβήνουν. Πώς εξηγείται αυτό; Ένας αστροναύτης σε τροχιά γύρω από τη γη, θα διαπιστώσει το ίδιο ή όχι και γιατί;

11. Θεωρήστε ότι στη θέση Π βρίσκεται μια χελώνα καρέτα-καρέτα στην αμμουδιά και επιθυμεί να φτάσει στο σημείο Φ στη θάλασσα όπου έχει τη



φωλιά της στο συντομότερο χρόνο. Ποιά από τις εικονιζόμενες διαδρομές θα επιλέξει αν η κίνησή της στην άμμο είναι πολύ πιο αργή από την κίνησή της στο νερό; Βλέπετε στην περίπτωση αυτή κάποιες ομοιότητες με την διάθλαση του φωτός; Σχολιάστε τις. Τι συμπεράσμα βγάζετε;

12. Τους φακούς τους διακρίνουμε σε ..... και σε .....  
Ένα αντικείμενο που το παρατηρούμε μέσα από ένα συγκλίνοντα φακό μπορεί να εμφανίζεται ..... και ανεστραμμένο ή όρθιο και ..... ανάλογα αν το αντικείμενο βρίσκεται ..... ή ..... στον φακό. Αντίθετα ένα αντικείμενο που το παρατηρούμε μέσα από αποκλίνοντα φακό εμφανίζεται πάντα ..... και ..... από ότι αν το παρατηρούσαμε με γυμνό μάτι.

Συμπληρώστε τα κενά.

13. Αναφέρατε ποια είναι τα σφάλματα των φακών και που οφείλονται.
14. Έχετε ένα ενυδρείο και παρατηρείται διάφορα τροπικά ψαράκια μέσα σ' αυτό. Το μέγεθός τους είναι:  
α) Ίδιο με το πραγματικό;  
β) Μεγαλύτερο από το πραγματικό;  
γ) Μικρότερο από το πραγματικό;
15. Δείξτε ότι τα πραγματικά είδωλα που σχηματίζονται από λεπτούς φακούς είναι πάντα ανεστραμμένα ενώ τα φανταστικά είναι πάντα ορθά εφόσον το αντικείμενο είναι πραγματικό.
16. Μπορούν τα πραγματικά είδωλα να προβληθούν σε οθόνη; τα φανταστικά μπορούν; Μπορούμε να τα φωτογραφήσουμε και τα δύο;
17. Ένας λεπτός συγκλίνων φακός πλησιάζει ένα αντικείμενο. Το πραγματικό του είδωλο αλλάζει α) σε θέση β) σε μέγεθος; Περιγράψτε και εξηγήστε.
18. Συγκρίνετε την εξίσωση των κατόπτρων με την εξίσωση των φακών. Σχολιάστε ομοιότητες και διαφορές.

**19.** Μια γάτα κοιτάζει ένα συγκλίνοντα φακό με την ουρά της στον αέρα. Κάτω από ποιές προϋποθέσεις θα μπορούσε το ειδώλο της μύτης της να είναι φανταστικό και αυτό της ουράς της πραγματικό; Πώς θα ήταν το ειδώλο της υπόλοιπης γάτας;

**20.** Ένα αντικείμενο βρίσκεται 9,30 cm αριστερά από ένα αποκλίνοντα φακό με εστιακή απόσταση  $f = -6,00$  cm. Βρείτε την απόσταση του ειδώλου καθώς και το είδος του, και τη μεγέθυνσή του.

**21.** Η μεγεθυντική ικανότητα ενός μεγεθυντικού φακού μέσα στο νερό είναι:  
α) μεγαλύτερη, β) μικρότερη, γ) ίδια με αυτή που έχει στον αέρα.  
Σημειώστε το σωστό.

**22.** Είναι γνωστό ότι με ένα συγκεντρωτικό φακό εστιάζουμε τις ηλιακές ακτίνες και στην εστία δημιουργείται υψηλή θερμοκρασία. Είναι δυνατόν να κατασκευασθεί φακός ώστε στην εστία του να δημιουργείται θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή στην επιφάνεια του ηλίου;

**23.** Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας για τον οφθαλμό είναι ότι:  
α) Το διάφραγμα για τη φωτογραφική μηχανή.  
β) Το φιλμ για τη φωτογραφική μηχανή.  
γ) Το κλείστρο για τη φωτογραφική μηχανή.

Σημειώστε το σωστό.

**24.** Τα κωνία είναι υπεύθυνα για να διακρίνουμε:

- α) στο σκοτάδι
- β) τα σχήματα
- γ) τα χρώματα.

Τα ραβδία είναι υπεύθυνα για να διακρίνουμε:

- α) στο σκοτάδι
- β) τα σχήματα
- γ) τα χρώματα.

Σημειώστε το σωστό.

**25.** Συσχετίστε τις ακόλουθες ανωμαλίες της όρασης με την σωστή περιγραφή τους.

**Ανωμαλία**

1. Μυωπία
2. Υπερμετρωπία
3. Πρεσβυωπία
4. Αστιγματισμός
5. Αχρωματοψία

**Περιγραφή**

- α. Δεν διακρίνεις κοντινά αντικείμενα.
- β. Τα σημεία φαίνονται σαν γραμμές.
- γ. Τα βλέπεις όλα μεγεθυμένα.
- δ. Δεν διακρίνεις μακρινά αντικείμενα.
- ε. Δε διακρίνεις τα χρώματα.

26. Ένας πρεσβύωπας βλέπει να διαβάσει χωρίς γυαλιά σε απόσταση 80 cm. Τι ισχύ πρέπει να έχουν οι διορθωτικοί φακοί που θα βάλει στα γυαλιά του ώστε να βλέπει να διαβάζει σε απόσταση 25 cm. (Υπόδειξη: υποθέστε ότι οι διορθωτικοί φακοί απέχουν από τα μάτια του 2 cm).
27. Έχετε μια φωτογραφική μηχανή της οποίας ο φακός έχει εστιακή απόσταση 55 mm. Καθώς ένα αντικείμενο πλησιάζει από πολύ μακριά μέχρι 25 cm μπροστά από το φακό, πόσο πρέπει ο φακός να μετακινηθεί ώστε το είδωλο του αντικειμένου να εστιάζει συνεχώς στο φιλμ; Ο φακός θα πλησιάσει ή θα απομακρυνθεί από το φιλμ;
28. Ένας φωτογράφος πλησιάζει το "θέμα" του και "εστιάζει". Ο φακός της μηχανής πλησιάζει ή απομακρύνεται από το φιλμ;
29. Δυο φίλοι, ένας μύωπας και ένας πρεσβύωπας, βλέπουν τα αντικείμενα με τα γυαλιά του όπως κάθε άλλος άνθρωπος με κανονικά μάτια. Αν ο πρεσβύωπας κατά λάθος φορέσει τα γυαλιά του μύωπα φίλου του, διαπιστώνει ότι βλέπει καθαρά μόνο αντικείμενα στο άπειρο (πολύ μακρινά). Σε ποια ελάχιστη απόσταση ο μύωπας θα μπορεί να διαβάσει αν φορέσει κατά λάθος τα γυαλιά του πρεσβύωπα;
30. Οι δίσκοι του ηλίου και της σελήνης όταν βρίσκονται στον ορίζοντα φαίνονται μεγεθυμένοι σε σχέση με τις διαστάσεις τους όταν βρίσκονται ψηλά στον ουρανό. Πώς μπορεί να αποδειχθεί πειραματικά με τη βοήθεια ενός φακού ότι η μεγέθυνση αυτή είναι φαινομενική.
31. Γιατί ένας κολυμβητής βλέπει μόνο ασαφή περιγράμματα των αντικειμένων αν ανοίγει τα μάτια του μέσα στο νερό, ενώ τα βλέπει ευκρινώς όταν φοράει μάσκα;

32. Προσπαθώντας κάποιος να ξεγελάσει τους φίλους του φωτογράφησε ένα γάιδαρο αφού προηγούμενα κάλυψε το φακό της μηχανής του μ' ένα γυαλί με στενές μαύρες λουρίδες ώστε ο γάιδαρος να φαίνεται σαν ζέβρα. Τι νομίζετε ότι θα ήταν το αποτέλεσμα στη φωτογραφία;
33. Ένας μαθητής επηρεασμένος από έργα επιστημονικής φαντασίας ισχυρίζεται ότι είναι δυνατόν να γίνει κάποιος τελείως αόρατος και να εξακολουθεί να διατηρεί όλες του τις ικανότητες. Κάποιος άλλος όμως επιμένει ότι ένας τελείως αόρατος άνθρωπος είναι αδύνατο να διαθέτει την ικανότητα της όρασης. Εξηγείστε ποιος από τους δύο έχει δίκιο.



## κεφάλαιο 10



### ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΜΟΣ – ΠΟΛΩΣΗ – LASER

- Διασκεδασμός του φωτός
- Ανάλυση του φωτός
- Ανασύνθεση του λευκού φωτός
- Το ουράνιο τόξο
- Γραμμικά φάσματα εκπομπής
- Φασματοσκόπιο – Φάσματα απορρόφησης (Γραμμικά - συνεχή)
- Φασματοσκοπική ανάλυση
- Πόλωση του φωτός
- Laser, εφαρμογές και χρήση

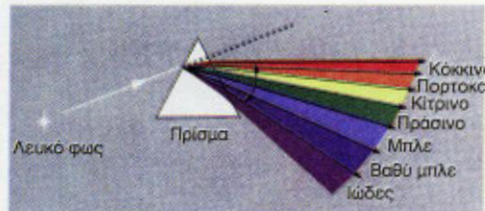
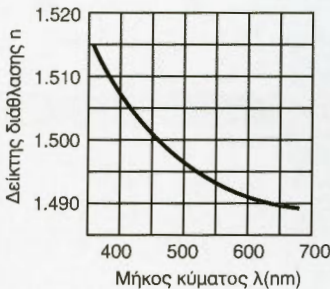


## 10.1 ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΜΟΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Όλοι μας έχουμε θαυμάσει κάποτε το μεγαλείο του ουράνιου τόξου και τη γοητεία του λαμπυρίσματος ενός διαμαντιού. Έχουμε παρατηρήσει ακόμη ότι ένα από τα ελαττώματα των φακών είναι η λεγόμενη χρωματική εκτροπή. Για όλα αυτά τα θαυμαστά αλλά και παράξενα, μερικές φορές, φαινόμενα “ευθύνεται” το γεγονός ότι ο δείκτης διάθλασης των διαφανών υλικών εξαρτάται από τη συχνότητα (χρώμα) του διερχόμενου φωτός.

Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης των υλικών από τη συχνότητα του φωτός ονομάζεται **διασκεδασμός**. Το νερό, το γυαλί, το πλέξιγκλας, ο χαλαζίας προκαλούν διασκεδασμό στο φως, δηλαδή το αναλύουν σε απλούστερα χρώματα. Όπως έχουμε πει, το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Συνεπώς, θα ισχύει και γι’ αυτό η γνωστή σχέση:  $v = \lambda f$ . Εξάλλου είπαμε ότι ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού εκφράζει το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός στο κενό  $c$  προς την ταχύτητά του στο υλικό.

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda_o f}{\lambda f} = \frac{\lambda_o}{\lambda} \quad (10.1)$$



**Εικόνα 10.1**

(α) Μεταβολή του δείκτη διάθλασης με το μήκος κύματος για το πλαστικό που χρησιμοποιείται στη κατασκευή φακών. (β) Ανάλυση του λευκού φωτός.

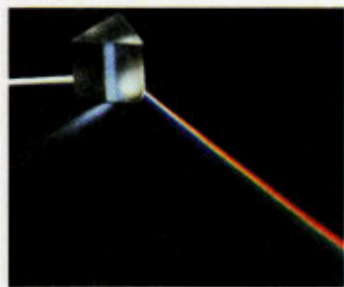
## 10.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Η σχέση (10.1) παριστάνεται γραφικά στην εικόνα (10.1α). Όταν μιλήσαμε για την διάθλαση (βλ. παραγρ. 9.1), είδαμε ότι η γωνία διάθλασης μιας φωτεινής ακτίνας, όταν αυτή περνά από ένα μέσο σε άλλο, εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης των μέσων. Ιδιαίτερα, αν το ένα μέσο είναι ο αέρας

( $n_{\text{αερ}} \approx 1$ ) θα εξαρτάται μόνο από το δείκτη διάθλασης του άλλου μέσου και θα αυξάνει όσο μεγαλύτερος είναι αυτός. Εξάλλου από τη σχέση (10.1) προκύπτει ότι όσο μικρότερο μήκος κύματος έχει ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο δείκτης διάθλασης, ο οποίος θα εμφανίζει γι' αυτό το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ένα διαφανές υλικό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια δέσμη λευκού φωτός, η οποία αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα με διαφορετικές συχνότητες οι οποίες αντιστοιχούν στα διάφορα χρώματα που περιέχει, όταν περάσει τη διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφορετικών διαφανών μέσων (αέρα – γυαλί ή αέρα – νερό) να αναλύεται στα χρώματα που τη συνθέτουν (εικ. 10.1β). Αυτό συμβαίνει, γιατί το κάθε χρώμα υφίσταται διαφορετική εκτροπή και μάλιστα τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητά του η οποία αυξάνει από το κόκκινο προς το ιώδες.

Ο Νεύτωνας έκανε το ίδιο πράγμα με αυτό που κάνατε εσείς στην προηγούμενη δραστηριότητα χρησιμοποιώντας ένα πρίσμα (εικ. 10.2), και είδε την ανάλυση του λευκού φωτός στα βασικά του χρώματα τα οποία είναι: κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλέ, σκούρο μπλέ και ιώδες.

Το ίδιο θα παρατηρούσατε και σεις όχι μόνο στο ηλιακό φως αλλά και αν, αντί του ηλιακού φωτός, χρησιμοποιούσατε μια ισχυρή δέσμη φωτός μιας λάμπας πυράκτωσης. Θα σχηματιζόταν τότε μια χρωματιστή περιοχή που θα έμοιαζε με την εικόνα (10.3).



**Εικόνα 10.2**

Ανάλυση του ηλιακού φωτός με τη βοήθεια πρισμάτων.



**Εικόνα 10.3**

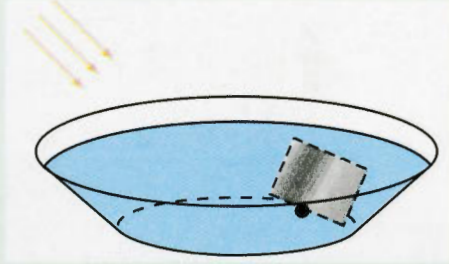
Ανάλυση του φωτός που προέρχεται από πυρακτωμένο στερεό σώμα.

### ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 10.1 Αναλύστε το φως στα χρώματά του.

Πάρτε ένα αλουμινένιο ταψάκι, στερεώστε στη βάση και στα τοιχώματά ένα καθρεφτάκι, όπως φαίνεται στην εικόνα (10.4), και γεμίστε το με νερό. Μια ηλιόλουστη μέρα που ο ήλιος θα μπαίνει στο δωμάτιό σας (ή στην τάξη) τοποθετήστε το έτσι, ώστε οι ακτίνες του ήλιου να πέφτουν πλάγια πάνω στο καθρεφτάκι. Με κάποια προσπάθεια θα καταφέρετε να σχηματιστεί στο ταβάνι ή στον τοίχο της αίθουσας μια καλή εικόνα



του φάσματος του ηλιακού φωτός. Προσέξτε ώστε οι ανακλώμενες από το καθρεφτάκι ακτίνες να μην πέφτουν στην επιφάνεια του νερού με γωνία μεγαλύτερη της ορικής ( $\theta_{op} = 49^\circ$ ). Τι περιμένετε να συμβεί στη περίπτωση που υπερβείτε αυτή τη γωνία;



**Εικόνα 10.4**

Ένα μικρό καθρεφτάκι βυθισμένο σε δοχείο με νερό μπορεί να λειτουργήσει ως ένα απλό σύστημα ανάλυσης του ηλιακού φωτός.

Από όλα τα προηγούμενα συμπεραίνουμε ότι, όταν δέσμη λευκού φωτός προερχόμενη από τον ήλιο ή άλλο πυρακτωμένο στερεό σώμα διέρχεται από πρίσμα ή από άλλο διαφανές μέσο, αναλύεται σε συνεχή διαδοχή χρωμάτων από το κόκκινο μέχρι το ιώδες, και αυτό ονομάζεται **συνεχές φάσμα**.

Στη συνέχεια, ο Νεύτωνας έκανε το πείραμα που περιγράφεται στην εικόνα (10.5). Απομόνωσε την ακτίνα ενός χρώματος από αυτά στα οποία είχε αναλυθεί προηγουμένως μια δέσμη λευκού φωτός και την οδήγησε σε δεύτερο πρίσμα. Διαπίστωσε ότι μία ακτίνα φωτός ενός απλού χρώματος δεν αναλύεται περισσότερο.

Το φως αυτό που δεν αναλύεται περισσότερο με τη βοήθεια ενός πρίσματος ονομάζουμε **μονοχρωματικό** ή απλό χρώμα.

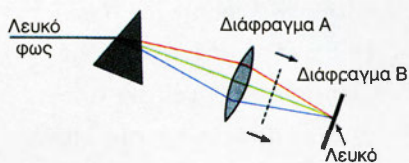
### 10.3 ΑΝΑΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ

*Εάν αποσυνθέσεις την Ελλάδα,  
στο τέλος θα δεις να σου απομένουν μια ελιά,  
ένα αμπέλι και ένα καράβι.  
Που σημαίνει με άλλα τόσα την ξαναφτιάχνεις...  
Οδ. Ελύτης (Ο μικρός ναυτίλος)*

Το φως του ήλιου (λευκό) φως, καθώς και το φως που προέρχεται από πυρακτωμένη πηγή, αποτελείται από μια συνεχή ακολουθία τέτοιων μονοχρωματικών ακτινοβολιών.

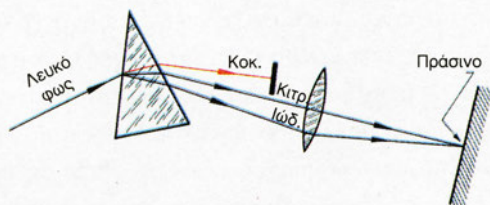
**Εικόνα 10.5**

Το φως καθενός από τα χρώματα του φάσματος δεν αναλύεται περισσότερο.

**Εικόνα 10.6**

Όταν τα χρώματα στα οποία αναλύεται το λευκό φως επανασυντεθούν, προκύπτει και πάλι λευκό φως.

Ο Νεύτωνας με το πείραμα που περιγράφεται στην εικόνα (10.6) έδειξε ότι, αν το φως που προκύπτει μετά την ανάλυση του λευκού φωτός από ένα πρίσμα το συγκεντρώσουμε με τη βοήθεια ενός φακού σε μια κηλίδα, θα προκύψει πάλι λευκό φως. Από αυτό συμπεραίνουμε ότι το λευκό φως όχι μόνο αναλύεται στα χρώματα του φάσματος αλλά μπορεί να **ανασυντεθεί** από αυτά.

**Εικόνα 10.7**

Σύνθετα χρώματα σχηματίζονται από τη σύνθεση όλων των άλλων χρωμάτων του φάσματος πλην ενός.

Αν το πείραμα της εικόνας (10.6) το εκτελέσουμε έτσι, ώστε με τη βοήθεια διαφράγματος να μπορούμε να αποκόπτουμε μέρος του φάσματος, π.χ. το κόκκινο (10.7) θα παρατηρήσουμε ότι η κηλίδα στην οθόνη δεν είναι πλέον λευκή αλλά πράσινη. Το πράσινο αυτό χρώμα που προέκυψε από την ανασύνθεση των υπόλοιπων χρωμάτων του φάσματος πλην του κόκκινου δεν είναι απλό (βασικό) χρώμα αλλά **σύνθετο**. Αν στη συνέχεια αφήσουμε να πέσει στην κηλίδα και το κόκκινο χρώμα, που προηγουμένως είχαμε αποκόψει, θα προκύψει πάλι λευκό.

Τα χρώματα πράσινο και κόκκινο που συντιθέμενα μας δίνουν λευκό τα λέμε **συμπληρωματικά**. Συμπληρωματικά χρώματα είναι επίσης το κίτρινο και το μπλε.

Την **ανασύνθεση** του λευκού φωτός από

**Εικόνα 10.8**

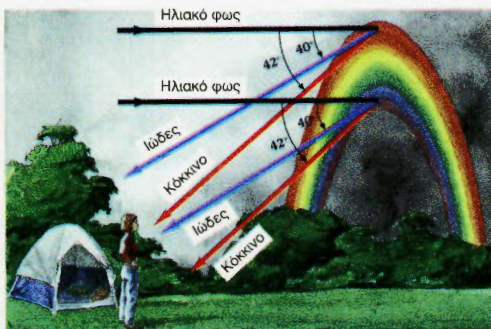
Δίσκος του Νεύτωνα Με την γρήγορη περιστροφή του σχηματίζεται η εντύπωση ότι είναι λευκός.

τα βασικά χρώματα του φάσματος μπορούμε να την επιτύχουμε και με τη βοήθεια του **δίσκου του Νεύτωνα** (10.8). Αν περιστρέψουμε το δίσκο αρκετά γρήγορα μας δίνεται η εντύπωση ότι είναι λευκός. Στη περίπτωση αυτή, η μείξη των χρωμάτων και η εντύπωση του λευκού φωτός γίνεται στον εγκέφαλό μας σε συνδυασμό με το φαινόμενο της διάρκειας της οπτικής εντύπωσης που ονομάσαμε **μετείκασμα**.

## 10.4 ΤΟ ΟΥΡΑΝΙΟ ΤΟΞΟ

Ένα πολύ εντυπωσιακό αποτέλεσμα του συνδυασμού της ολικής ανάκλασης και της ανάλυσης του φωτός είναι ένα από τα πιο θαυματικά φαινόμενα της φύσης, το **ουράνιο τόξο**.

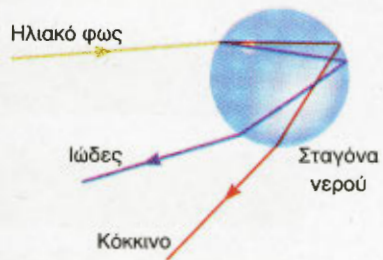
Πολλές φορές, όταν συμβαίνει να υπάρχει ήλιος και ταυτόχρονα βροχόπτωση, θα έχετε δει να σχηματίζεται στον ουρανό το ουράνιο τόξο (εικ. 10.9α). Για να παρατηρήσετε το ουράνιο τόξο, πρέπει το φως του ήλιου να έρχεται από πίσω και εσείς να κοιτάτε προς το σύννεφο της βροχής. Το φως, κατά την είσοδό του στη σταγόνα διαθλάται και υφίσταται ανάλυση στα επτά βασικά χρώματά του. Στη συνέχεια, οι απλές ακτινοβολίες υφίστανται ολική ανάκλαση και διάθλαση, βγαίνουν από τη σταγόνα και κατευθύνονται στα μάτια μας (εικ. 10.10). Η διεύθυνση από τον ήλιο σε σας και η διεύθυνση από σας προς το σύννεφο πρέπει να σχηματίζει γωνία  $42^\circ$ .



**Εικόνα 10.9**

Σχηματισμός του ουράνιου τόξου.

Πολλές φορές, όταν η αντίστοιχη γωνία είναι  $51^\circ$ , σχηματίζεται και δεύτερο (δευτερεύον) ασθενέστερο ουράνιο τόξο, με ανεστραμμένη τη σειρά των χρωμάτων.



**Εικόνα 10.10**

Πορεία του φωτός στην σταγόνα του νερού για το σχηματισμό του ουράνιου τόξου



**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 10.2 Τεχνητό ουράνιο τόξο.**

Με ένα λάστιχο του ποτίσματος ψεκάστε μπροστά σας, όταν ο ήλιος βρίσκεται στην κατάλληλη θέση, και προσπαθήστε να δείτε το ουράνιο τόξο που θα σχηματιστεί. Το πλήρες ουράνιο τόξο, είναι περιφέρεια κύκλου και μπορεί να το δει κανείς, όταν βρίσκεται σε ένα αεροπλάνο. Συνήθως, βλέπουμε το μέρος της περιφέρειας που βρίσκεται πάνω από τον ορίζοντα και γι' αυτό δεν μπορούμε να δούμε ουράνιο τόξο, όταν ο ήλιος απέχει περισσότερο από  $42^\circ$  από τον ορίζοντα.

**10.5 ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ**

Εκτός από το **συνεχές φάσμα εκπομπής** ενός πυρακτωμένου στερεού (εικ. 10.3α) που είδαμε ότι προκύπτει από την ανάλυση του λευκού φωτός, έχουμε φάσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του φωτός που εκπέμπουν οι λυχνίες διάφορων αερίων τα οποία διεγείρονται σε εκπομπή λόγω υψηλής τάσης. Τέτοιες λυχνίες είναι: ατμών νατρίου (Na), ατμών υδραργύρου (Hg), καθώς και λυχνίες άλλων αερίων π.χ. υδρογόνου (H), οξυγόνου ( $O_2$ ), ηλίου (He). Τα φάσματα που προκύπτουν από την ανάλυση του φωτός που εκπέμπουν αυτά τα αέρια και οι ατμοί φαίνονται στην εικόνα (10.11) και, όπως παρατηρούμε, αποτελούνται από μερικές μόνο συχνότητες (ή μήκη κύματος) που απεικονίζονται στο φακό σαν λεπτές φωτεινές γραμμές οι οποίες ονομάζονται **φασματικές γραμμές**. Γι' αυτό ονομάζονται **γραμμικά φάσματα εκπομπής**.

**Εικόνα 10.11**

(α) Φάσμα εκπομπής ατομικού υδρογόνου  
(β) Φάσμα εκπομπής ατμών υδραργύρου

(γ) Φάσμα εκπομπής ατμών νατρίου  
(δ) Ηλιακό γραμμικό φάσμα απορρόφησης

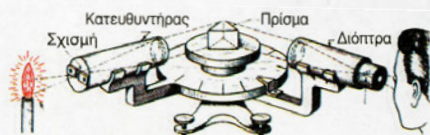


Από τα προηγούμενα καταλαβαίνουμε ότι τα φάσματα εκπομπής μπορεί να είναι συνεχή ή γραμμικά ανάλογα με το αν προέρχονται από διάπυρα στερεά ή αέρια.

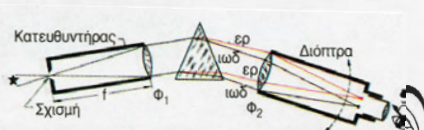
## 10.6 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΟ - ΦΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ (ΓΡΑΜΜΙΚΑ - ΣΥΝΕΧΗ)

*Έχεις τα πινέλα, έχεις τα χρώματα,  
ζωγράφισε τον Παράδεισο και μπες μέσα.  
Νικ. Καζαντζάκης*

Για να παρατηρήσουμε το φάσμα μιας ουσίας, χρησιμοποιούμε ειδικά όργανα που τα λέμε φασματοσκόπια (εικ.10.12α). Ένα φασματοσκόπιο αποτελείται από τρία κύρια μέρη: α) τον κατευθυντήρα, β) το πρίσμα και γ) την διόπτρα (εικ. 10.12β).



(α)



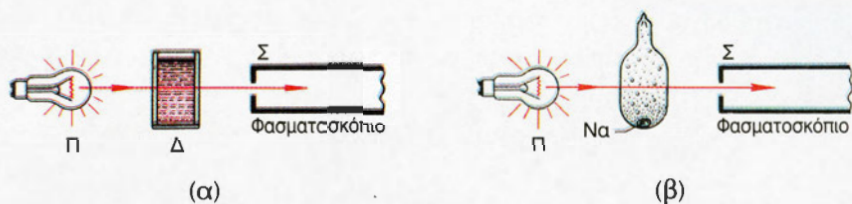
(β)

**Εικόνα 10.12**

(α) σχηματική αναπαράσταση της συσκευής ενός φασματοσκοπίου και της αρχής λειτουργίας ενός φασματοσκοπίου (β).

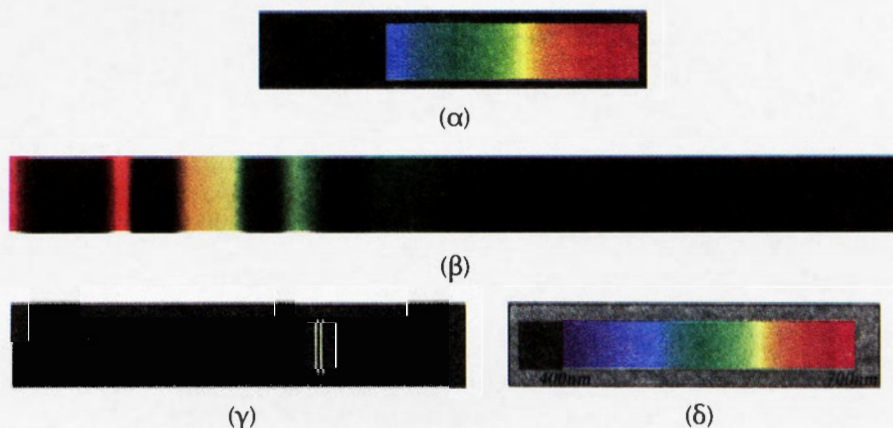
Ο κατευθυντήρας αποτελείται από ένα σωλήνα εφοδιασμένο με δύο φακούς και μια σχισμή της οποίας το πλάτος μπορούμε να ρυθμίζουμε. Το πρίσμα βρίσκεται τοποθετημένο πάνω σε γωνιομετρική τράπεζα ακλόνητα συνδεδεμένη με τον κατευθυντήρα. Γύρω από την τράπεζα στρέφεται η διόπτρα που αποτελείται από ένα σωλήνα με προσοφθάλμιο σύστημα εφοδιασμένο με σταυρόνημα.

Αν ανάμεσα σε μια φωτεινή πηγή που εκπέμπει λευκό φως λόγω πυράκτωσης και στον κατευθυντήρα ενός φασματοσκοπίου παρεμβάλουμε ένα διαφανές έγχρωμο υλικό, στερεό ή υγρό (εικ. 10.13α), θα διαπιστώσουμε ότι από το συνεχές φάσμα εκπομπής της πηγής λείπουν μερικές περιοχές που εμφανίζονται τώρα σκοτεινές. Αυτό οφείλεται στο ότι τα φωτόνια, που έχουν συχνότητες οι οποίες αντιστοιχούν στα χρώματα των περιοχών που εμφανίζονται σκοτεινές, απορροφήθηκαν από τα μόρια του υλικού.

**Εικόνα 10.13**

Διάταξη για την παρατήρηση του φάσματος απορρόφησης (α) ενός υγρού (β) ατμών νατρίου.

Τα φάσματα αυτά τα ονομάζουμε **συνεχή φάσματα απορρόφησης**. Αν το υλικό είναι π.χ. κόκκινη γυάλινη πλάκα ή διάλυμα χλωροφύλης (πράσινο), τα αντίστοιχα φάσματα θα είναι, όπως φαίνονται στην εικόνα (10.14α,β), αντιστοίχα. Έστω τώρα ότι μεταξύ της ίδιας πηγής λευκού φωτός και του κατευθυντήρα του φασματοσκοπίου έχει παρεμβληθεί άχρωμο διαφανές δοχείο στο οποίο υπάρχει σε αυξημένη συγκέντρωση κάποιο αέριο (εικ. 10.13β) π.χ. He, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, ατμοί Hg, ατμοί Na κ.τ.λ.

**Εικόνα 10.14**

Φάσμα απορρόφησης:

(α) κόκκινης γυάλινης πλάκας

(β) διαλύματος χλωροφύλλης

(γ) ατμών νατρίου

(δ) το φάσμα εκπομπής των ατμών νατρίου

**Εικόνα 10.15**

Ηλιακό φάσμα. Οι σκοτεινές γραμμές οφείλονται στη απορρόφηση του φωτός από τα στοιχεία της χρωμόσφαιρας.

Το φάσμα που θα παρατηρήσουμε τότε θα είναι συνεχές, μόνο που θα εμφανίζονται λεπτές σκοτεινές γραμμές στη θέση ακριβώς των φωτεινών γραμμών που υπάρχουν στο αντίστοιχο γραμμικό φάσμα εκπομπής του αερίου (10.14γ). Αυτού του είδους τα φάσματα ονομάζονται **γραμμικά φάσματα απορρόφησης**. Τέτοιο είναι το φάσμα που παίρνουμε από την ανάλυση του ηλιακού φωτός (εικ.10.15). Οι γραμμές απορρόφησης οφείλονται στη διέλευση του ηλιακού φωτός από την χρωμόσφαιρα του ηλίου, που περιέχει μεγάλο πλήθος υλικών σε αέρια κατάσταση, και από την ατμόσφαιρα της Γης.

**Παρατήρηση:** Άλλο είναι το χρώμα που παρουσιάζει ένα υλικό λόγω ανάκλασης του φωτός στην επιφάνεια και άλλο, όταν το φως περνάει μέσα από αυτή. Π.χ. είναι γνωστό σε όλους ότι ο χρυσός εμφανίζει κίτρινο χρώμα. Αν όμως σχηματίσουμε ένα πολύ λεπτό φύλλο χρυσού και το κοιτάζουμε μπροστά από έντονο λευκό φως, θα το δούμε πράσινο.

### Το γαλάζιο χρώμα του Ουρανού.

*Θεέ μου, τι μπλε ξοδεύεις  
για να μη Σε βλέπουμε.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

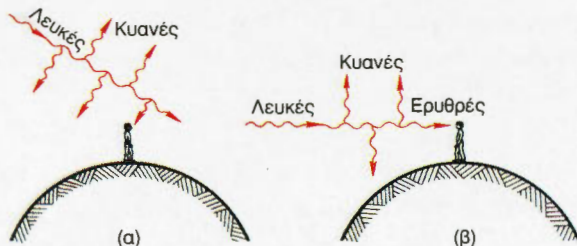
Ένα άλλο εντυπωσιακό φαινόμενο είναι το γαλάζιο χρώμα που φαίνεται να έχει ο ουρανός, ενώ ο αέρας, όπως ξέρουμε, είναι τελείως άχρωμος και διαφανής.

Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με τη βοήθεια της **διάχυσης** (ή σκέδασης), δηλαδή της ακανόνιστης διασποράς του φωτός σε διάφορες κατευθύνσεις, όταν αυτό διέρχεται από μέσο με αιωρούμενα σωματίδια διαστάσεων συγκρίσιμων προς το μήκος κύματός του. Για τη διάχυση που οφείλεται σε μικρά αιωρούμενα σωματίδια ισχύει ο ακόλουθος νόμος γνωστός και ως νόμος του Rayleigh (Ρέιλεϊ): **“Φως μεγάλου μήκους κύματος διαχέεται πολύ λιγότερο από φως μικρού μήκους κύματος”**. Συμπεραίνουμε συνεπώς ότι το ηλιακό φως, καθώς διασχίζει την ατμόσφαιρα, διαχέεται από τα μόρια του ατμοσφαιρικού αέρα, η ποσότητα όμως της διαχεομένης κυανής και ιώδους ακτινοβολίας είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι της ερυθράς και κίτρινης, με αποτέλεσμα να επικρατεί στην ατμόσφαιρα το γαλάζιο χρώμα. Με τον ίδιο τρόπο εξηγείται και το κόκκινο χρώμα που υπάρχει στον ορίζοντα κατά την ανατολή και ιδιαίτερα κατά την δύση του Ηλίου (εικ.10.16).

Όταν ο Ήλιος βρίσκεται ψηλά στον ουρανό, η κυανή συνιστώσα του ηλιακού φωτός σκεδάζεται πολύ περισσότερο από τα άλλα χρώματα, με αποτέλεσμα το διάχυτο φως του ουρανού που φτάνει στα μάτια μας να



περιέχει σε μεγαλύτερο ποσοστό το γαλάζιο χρώμα. Όταν όμως ο Ήλιος βρίσκεται στον ορίζοντα κατά την ανατολή ή τη δύση του, τότε οι ηλιακές ακτίνες που φθάνουν απευθείας στα μάτια μας έχουν χάσει σε μεγάλο ποσοστό την κυανή τους συνιστώσα, οπότε επικρατεί το κόκκινο χρώμα που σκεδάζεται λιγότερο από όλα τα άλλα.



**Εικόνα 10.16**

(α) Στον παρατηρητή φτάνουν οι κυανές ακτίνες από σκέδαση

(β) Στον παρατηρητή φτάνουν οι κόκκινες ακτίνες που μένουν μετά τη σκέδαση των κυανών ακτίνων

## 10.7 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης των διάφορων ουσιών αποτελούν για την φυσική κάτι ανάλογο με αυτό που σημαίνουν τα “δακτυλικά αποτυπώματα” για την αστυνομία. Μελετώντας τα φάσματα απορρόφησης διάφορων υλικών μπορούμε να ανιχνεύσουμε και τα απειροελάχιστα ίχνη κάποιων στοιχείων σ’ αυτές. Από το γραμμικό φάσμα απορρόφησης που λαμβάνουμε από τον ήλιο μαθαίνουμε τη σύσταση της ατμόσφαιρας του Ήλιου (χρωμόσφαιρας) αλλά και της δικής μας ανώτερης ατμόσφαιρας. Το ίδιο ισχύει και για την γνώση της σύστασης της ατμόσφαιρας των άλλων πλανητών του ηλιακού μας συστήματος. Αναλύοντας το φως των μακρινών άστρων και των ακόμη πιο μακρινών γαλαξιών, μάθαμε ότι όλος ο γνωστός κόσμος είναι φτιαγμένος από τα ίδια υλικά, τα γνωστά στοιχεία του περιοδικού πίνακα. Επειδή η θέση των γραμμών στα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης επηρεάζεται από την ταχύτητα της πηγής που τα εκπέμπει, μπορούμε μελετώντας τα να μάθουμε την ταχύτητα των ουράνιων σωμάτων. Τέλος, το πλάτος και η μορφή των φασματικών γραμμών επηρεάζονται από την ύπαρξη ισχυρών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, αποκαλύπτοντάς μας έτσι τις φυσικές συνθήκες από την οποία επικρατούν στην περιοχή που εκπέμπεται το φως που παρατηρούμε εδώ στη γη. Τέλος, επειδή το φως ταξιδεύει με ταχύτητα  $c = 300\,000 \text{ km/s}$ , αυτά που μαθαίνουμε από το φως των ουράνιων σωμάτων μας πληροφορούν για το τι συνέ-

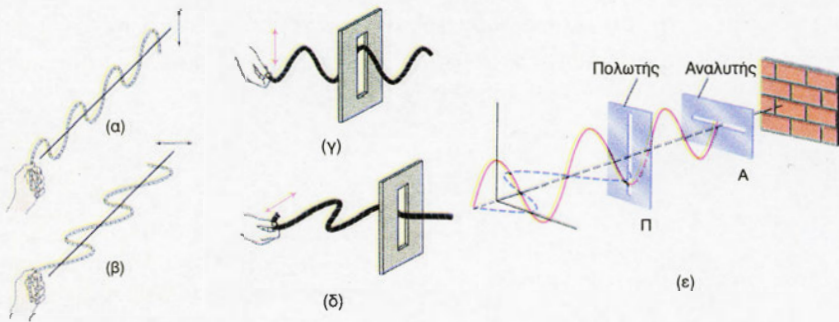


βαινε σ' αυτά πριν από λίγα λεπτά, για τους κοντινούς μας πλανήτες πριν από χιλιάδες ή εκατομμύρια χρόνια, για τα μακρινά άστρα ή τους πιο μακρινούς γαλαξίες.

## 10.8 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

*Τόσο εύλογο το Ακατανόητο.  
Οδ. Ελύτης (Αξιόν Εστί)*

Έχουμε μάθει ότι το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία είναι εγκάρσια. Δηλαδή, τόσο το ηλεκτρικό πεδίο όσο και το μαγνητικό πεδίο διατηρούνται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης. Όταν το επίπεδο ταλάντωσης ενός εγκάρσιου κύματος παραμένει σταθερό, λέμε ότι το κύμα είναι γραμμικά πολωμένο (εικ. 10.17α,β).



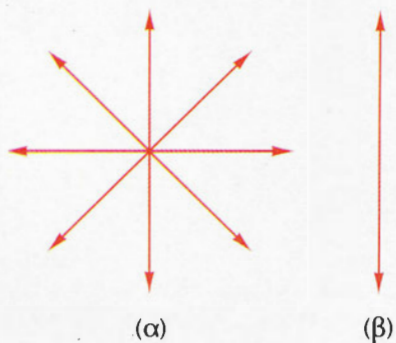
**Εικόνα 10.17**

Κατακόρυφα (α) και οριζόντια (β) γραμμικά πολωμένο εγκάρσιο κύμα. Κατακόρυφα πολωμένο κύμα διέρχεται από κατακόρυφη (γ) σχισμή ενώ οριζόντια πολωμένο κύμα δε διέρχεται από την ίδια κατακόρυφη σχισμή (δ). Εγκάρσιο κύμα με τυχαία ή συνεχώς μεταβαλλόμενη πόλωση πολώνεται κατακόρυφα μετά τη διέλευσή του από κατακόρυφη σχισμή (π) και εξασθενίζει τελείως, στο σημείο που συναντά την οριζόντια σχισμή Α (ε).

Κατακόρυφα (γραμμικά) πολωμένα εγκάρσια μηχανικά κύματα διέρχονται από κατακόρυφη σχισμή (εικ.10.17γ), ενώ οριζόντια πολωμένο κύμα δε διέρχεται από την ίδια κατακόρυφη σχισμή (εικ.10.17δ). Στην περίπτωση του φωτός, που αποτελεί, όπως είδαμε, ένα συνδυασμένο εγκάρσιο κύμα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου, εφόσον παραμένει σταθερό, ονομάζεται επίπεδο (γραμμικώς) **πόλωσης** του φωτός.

Πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπουν οι κεραίες των τηλεοπτικών σταθμών. Θα έχετε παρατηρήσει ασφαλώς ότι οι κεραίες της τηλεόρασης που υπάρχουν στις ταράτσες των πολυκατοικιών αποτελούνται από μικρούς σωλήνες αλουμινίου τοποθετημένους, τις περισσότερες φορές, στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο. Σ' αυτή την περίπτωση, συμπεραίνουμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπουν οι κεραίες των τηλεοπτικών σταθμών είναι οριζόντια πολωμένα. Αλλά και το φως που εκπέμπουν τα άτομα κατά την αποδιέγερσή τους μπορεί να είναι πολωμένο. Επειδή όμως το φυσικό φως που εκπέμπει ένα διάπυρο στερεό ή διεγερμένο αέριο προέρχεται από την σύνθεση τεράστιου πλήθους ατομικών φωτεινών εκπομπών με τυχαίο επίπεδο πόλωσης, **το φυσικό φως** δεν παρουσιάζει συγκεκριμένο επίπεδο πόλωσης.

Αν θεωρήσουμε ότι το φυσικό φως διαδίδεται κάθετα προς το επίπεδο της σελίδας, το άνυσμα του ηλεκτρικού του πεδίου θα είναι όπως στην εικ. (10.19α). Το φυσικό μη πολωμένο φως θα μπορούσαμε να το μετατρέψουμε σε γραμμικά πολωμένο π.χ. στο κατακόρυφο επίπεδο (εικ.10.18β), αν μόνο οι κατακόρυφες συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου παρέμεναν, οι δε οριζόντιες με κάποιο τρόπο εξαφανίζονταν. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με διατάξεις που συμπεριφέρονται όπως οι σχισμές Π και Α στην εικόνα (10.19).

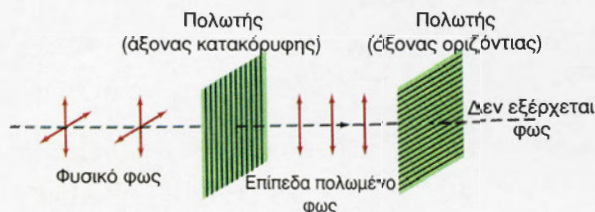


**Εικόνα 10.18**

- (α) Φυσικό φως. Το άνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου έχει όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς.  
(β) Πολωμένο φως στο κατακόρυφο επίπεδο

Η διάταξη που παίζει το ρόλο της σχισμής Π στην εικόνα (10.19) ονομάζεται **πολωτής** και είναι αυτή που μετατρέπει το φυσικό φως από μη πολωμένο σε γραμμικά πολωμένο. Η διεύθυνση που συμπίπτει με το επίπεδο του ηλεκτρικού πεδίου το οποίο διέρχεται ανεμπόδιστο από τον πολωτή ονομάζεται **άξονας του πολωτή**. Η διάταξη που παίζει το ρόλο της σχισμής Α στην εικόνα (10.19) ονομάζεται **αναλύτης** και δεν είναι παρά η ίδια διάταξη με αυτήν του πολωτή στραμμένη απλώς κατά  $90^\circ$ , ώστε ο άξονάς της να είναι κάθετος στον άξονα του πολωτή (εικ.10.19). Παλιότερα ως πολωτή και αναλύτη χρησιμοποιούσαν ένα ορυκτό που λέγεται τουρμαλίνη. Σήμε-

ρα όμως, χρησιμοποιούνται τα πολαρόιντ (Polaroid) που δεν είναι παρά συνθετικά πλαστικά φύλλα που ανακαλύφθηκαν από τον E.H. Land το 1928. Όταν κοιτάμε μέσα από αυτά, απλώς μειώνεται η φωτεινότητα. Αν όμως διασταυρώσουμε δύο τέτοια polaroid με τους άξονές του κάθετους, τότε το φως που περνά μέσα από αυτά ελαχιστοποιείται (εικ.10.20).



**Εικόνα 10.19**

Φυσικό (μη πολωμένο) φως προσπίπτει σ' ένα πολαρόιντ και εξέρχεται πολωμένο παράλληλα προς τον άξονα του πολωτή. Στη συνέχεια προσπίπτει σ' ένα άλλο πολαρόιντ που δρα ως αναλύτης. Εφ' όσον ο άξονας του δεύτερου είναι κάθετος στον άξονα του πρώτου το εξερχόμενο φως από τον αναλύτη μηδενίζεται.



**Εικόνα 10.20**

Τα πολαρόιντ χρησιμοποιούνται στην κατασκευή γυαλιών. Δυο τέτοια γυαλιά μπορούμε να τα χρησιμοποιήσουμε σαν πολωτή και αναλύτη.

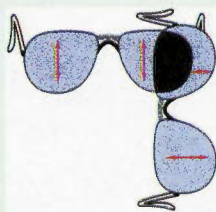
Από την προηγούμενη δραστηριότητα συμπεραίνουμε ότι, όταν το φυσικό φως διέρχεται μέσα από το πρώτο πολαρόιντ εξέρχεται πολωμένο, αλλά και με μειωμένη ένταση, διότι έχει χάσει τις μισές του συνιστώσες. Το πρώτο πολαρόιντ λειτουργεί δηλαδή ως **πολωτής**. Στη συνέχεια, το πολωμένο φως προσπίπτει στο δεύτερο πολαρόιντ και ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζουν οι άξονές τους, η έντασή του, μετά τη διέλευσή του και από το δεύτερο πολαρόιντ, μπορεί να μείνει αμετάβλητη (παράλληλοι άξονες) ή να φτάσει μέχρι πλήρους μηδενισμού (κάθετοι άξονες). Το δεύτερο πολαρόιντ λειτουργεί δηλαδή ως **αναλύτης**.

Το φυσικό φως μπορεί να μετατραπεί σε πολωμένο κατά την ανάκλασή του σε στιλπνή επιφάνεια (μη μεταλλική). Υπάρχει μάλιστα μια γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται γωνία πόλωσης ή γωνία Brewster  $\theta_B$ , η οποία καθιστά το ανακλώμενο φως ολικά πολωμένο σε διεύθυνση παράλληλη προς την ανακλώσα επιφάνεια (εικ.10.24).

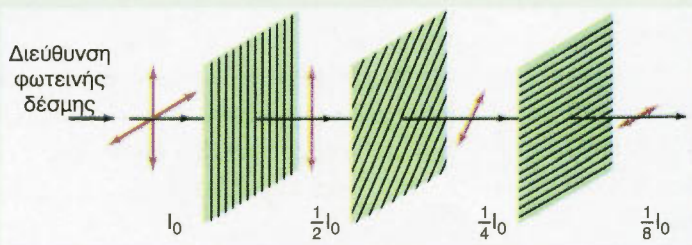


**ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 10.3 Παίζοντας με τα Polaroid (1).**

Θα νόμιζε κανείς ότι τα πολαρόιντ είναι κάτι το σπάνιο, που μόνο στα επιστημανικά εργαστήρια μπορεί να βρει κανείς. Αντίθετα, είναι εύκολο να αποκτήσετε μερικά (π.χ. παλιά γυαλιά ηλίου, οι οθόνες από χαλασμένα ηλεκτρονικά παιχνίδια ή η οθόνη από χαλασμένου υπολογιστές τσέπης). Εύκολα μπορείτε να διαπιστώσετε ότι ένα μόνο πολαρόιντ το μόνο που κάνει είναι να μειώνει την ένταση του φωτός που πέφτει στα μάτια σας. Αν όμως χρησιμοποιήσετε δύο και περιστρέφεται το ένα ως προς το άλλο σιγά σιγά (εικ.10.21), θα διαπιστώσετε ότι η ένταση του φωτός που πέφτει στα μάτια σας ελαττώνεται βαθμιαία έως ότου μηδενίζεται τελείως, όταν **οι άξονές τους γίνουν κάθετοι**.

**Εικόνα 10.21****ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ 10.4 Παίζοντας με τα Polaroid (2).**

Αν έχετε καταφέρει να βρείτε περισσότερα από δύο πολαρόιντ μπορείτε να κάνετε ένα πολύ εντυπωσιακό πείραμα. Όπως είδαμε στην προηγούμενη δραστηριότητα, συνδυάζοντας δύο πολαρόιντ με κάθετους τους άξονές τους διαπιστώνετε ότι το εξερχόμενο φως μηδενίζεται. Προσθέστε τώρα ένα τρίτο πολαρόιντ (με τον άξονά του να σχηματίζει γωνία με τους άξονες των δύο άλλων πολαρόιντ) ανάμεσα στα δύο προηγούμενα, χωρίς να αλλάξετε τον προσανατολισμό τους. Θα παρατηρήσετε (με έκπληξη φαντάζομαι) ότι το φως εμφανίζεται με το συνδυασμό των τριών πολαρόιντ, ενώ όταν αφαιρέσετε το μεσαίο, το φως πάλι χάνεται. Η ερμηνεία αυτής της παράδοξης συμπεριφοράς γίνεται με τη βοήθεια της εικόνας (10.22).

**Εικόνα 10.22.**



Το φως από το πολαρόιντ Α εξέρχεται πολώμενο και με τη μισή από την αρχική έντασή του. Από το Β, που ο άξονάς του σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με αυτόν του Α εξέρχεται πολώμενο στη διεύθυνση αυτή και με ένταση μισή από την προηγούμενη. Από το Γ τώρα, για τον ίδιο λόγο, θα εξέλθει πολώμενο οριζόντια και με ένταση πάλι μισή της προηγούμενης, δηλαδή  $1/8$  της αρχικής. Αν δεν υπήρχε το μεσαίο πολαρόιντ, η ένταση του εξερχόμενου φωτός από το Γ θα ήταν μηδέν, αφού και οι άξονές του είναι κάθετοι.

## 10.9 LASER

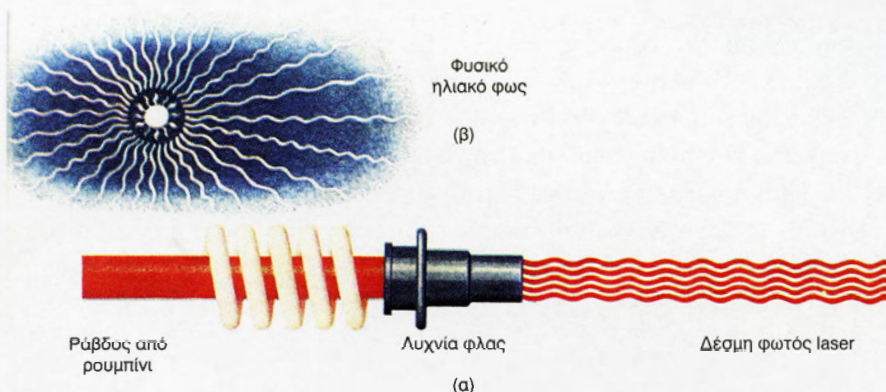
*Προσπάθησε να οδηγήσεις την τεχνική τελειότητα  
στη φυσική της κατάσταση.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

Όπως αναφέραμε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου αυτού, ο εικοστός πρώτος αιώνας θα είναι ο αιώνας της “φωτονικής”, όπως ο προηγούμενος υπήρξε ο αιώνας της “ηλεκτρονικής”. Δηλαδή, θα είναι ένας αιώνας στη διάρκεια του οποίου η τεχνολογική πρόοδος θα είναι βασισμένη στην κατανόηση και εκμετάλλευση των ιδιοτήτων των “φωτονίων”.

Το πιο αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της εξέλιξης είναι τα laser (λέιζερ), οι γνωστές μας συσκευές με την πολύ λεπτή και έντονη δέσμη φωτός (συνήθως κόκκινο) που φτάνει σε πολύ μεγάλη απόσταση.

Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων light amplification (by) stimulated emission (of) radiation (ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας).

Το laser είναι μια διάταξη που μπορεί να παράγει πολύ έντονη δέσμη φωτός, της οποίας οι ακτίνες μένουν σχεδόν παράλληλες για μεγάλη απόσταση, και του οποίου η συχνότητα βρίσκεται σε μια πολύ στενή περιοχή συχνοτήτων, δηλαδή είναι όπως λέμε **μονοχρωματικό** και συγχρόνως είναι **σύμφωνο** και έχει καθορισμένη πόλωση, δηλαδή όλα τα κύματα που απαρτίζουν τη δέσμη σε κάθε εγκάρσια διατομή της έχουν την ίδια φάση. Η εκπεμπόμενη δέσμη σχηματίζει σχεδόν ένα τέλει αρμονικό κύμα. Αντίθετα, μια συνηθισμένη φωτεινή πηγή, όπως ο Ήλιος, εκπέμπει φως που η πόλωσή του και η φάση σε δεδομένο σημείο συνεχώς αλλάζουν. Συνεπώς, η δέσμη φωτός δεν είναι τόσο συγκεντρωμένη, αλλά αποκλίνει (ανοίγει) αρκετά ανάλογα με την απόσταση (εικ. 10.23).

**Εικόνα 10.23**

(α) Δέσμη laser σύγχρονου φωτός      (β) Το ασύμφωνο φυσικό φως του ήλιου.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ένταση του φωτός να ελαττώνεται γρήγορα σε συνάρτηση με την απόσταση. Ακόμη το φυσικό φως είναι **ασύμφωνο**, δηλαδή τα διάφορα τμήματα της φωτεινής δέσμης, ακόμη και στο ίδιο σημείο του χώρου, δεν έχουν την ίδια μορφή μεταξύ τους. Αυτό οφείλεται στο ότι τα διεγερμένα άτομα του πυρακτωμένου νήματος ενός συνηθισμένου λαμπτήρα πυράκτωσης εκπέμπουν το φως τελείως ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, έτσι ώστε κάθε εκπεμπόμενο φωτόνιο να μπορεί να θεωρηθεί κυματοσυρμός με μήκος περίπου 30 cm και διάρκεια  $10^{-8}$  s. Αυτοί οι κυματοσυρμοί που απαρτίζουν το φυσικό φως στην ίδια περιοχή του χώρου την ίδια χρονική στιγμή εμφανίζουν τυχαίες διαφορές, ενώ ακριβώς το αντίθετο ισχύει για το φως του laser.

Η δέσμη laser, όπως ξέρουμε, είναι εξαιρετικά λεπτή. Το εύρος της καθορίζεται από το μέγεθος του ανοίγματος από το οποίο εξέρχονται τα φωτόνια. Η δέσμη του laser παραμένει λεπτή και δε διευρύνεται και μετά την έξοδό της, γιατί όλα τα φωτόνια που την απαρτίζουν κινούνται παράλληλα προς τον άξονα του κυλίνδρου, ενώ φωτόνιο που τυχόν θα είχε διεύθυνση διαφορετική, μετά την ανάκλαση από τα κάτοπτρα αναγκάζεται να εξέλθει από τον κύλινδρο. Τέλος επειδή η δέσμη μπορεί να γίνει εξαιρετικά λεπτή, η έντασή της (η ισχύς της ανά μονάδα επιφάνειας της διατομής της) μπορεί να γίνει πάρα πολύ μεγάλη.

Τα laser, λόγω των πολύ εντυπωσιακών ιδιοτήτων που εμφανίζει η δέσμη φωτός την οποία παράγουν, έχουν πολλές και ποικίλες εφαρμογές. Οι κυριότερες από τις εντυπωσιακές αυτές ιδιότητες της δέσμης του laser που εκμεταλλευόμαστε στις διάφορες εφαρμογές είναι: η μεγάλη ένταση, η μεγάλη λεπτότητα της δέσμης, η εξαιρετικά στενή περιοχή συχνοτήτων (σχεδόν μονοχρωματική), η μεγάλη σταθερότητα της συχνότητας, η διατήρηση της ίδιας κυματικής κατάστασης (φάσης) σε όλη την έκταση μιας τυχούσας ε-

γκάρσιαι διατομής της, η διατήρηση της παραλληλίας της δέσμης σε πολύ μεγάλη απόσταση.



## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Η εξάρτηση του ..... διάθλασης των υλικών από τη ..... του φωτός ονομάζεται .....

Συμπληρώστε τα κενά.

2. Ένα διάπυρο στερεό εκπέμπει φως του οποίου το φάσμα είναι:

α) Γραμμικό. β) Συνεχές. γ) Συνεχές διακοπτόμενο. δ) Εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Σημειώστε το σωστό.

3. Το φάσμα του φωτός που εκπέμπεται από λυχνίες που περιέχουν διεγερμένα αέρια είναι:

α) Γραμμικό. β) Συνεχές. γ) Συνεχές διακοπτόμενο. δ) Εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Σημειώστε το σωστό.

4. Φάσμα απορρόφησης ονομάζουμε το φάσμα του φωτός που εκπέμπει πυρακτωμένο στερεό σώμα το οποίο όμως έχει προηγουμένως:

α) Ανακλαστεί σε διαχωριστική επιφάνεια δυο διαφανών υλικών.  
β) Διαθλασθεί σε διαχωριστική επιφάνεια δυο διαφανών υλικών.  
γ) Διέλθει από το εσωτερικό ενός υλικού.

Σημειώστε το σωστό.

5. Το συνεχές φάσμα απορρόφησης λαμβάνεται αν ανάμεσα στην πηγή του λευκού φωτός και τον παρατηρητή παρεμβληθεί:

α) Στερεό αδιαφανές σώμα. β) Στερεό διαφανές σώμα.  
γ) Υγρό διαφανές σώμα. δ) Αέριο σώμα.

Σημειώστε τα σωστά.

6. Γραμμικό φάσμα απορρόφησης λαμβάνεται αν ανάμεσα στην πηγή του λευκού φωτός και του παρατηρητή παρεμβληθεί:

- α) Στερεό αδιαφανές σώμα. β) Στερεό διαφανές σώμα.  
 γ) Υγρό διαφανές σώμα. δ) Αέριο σώμα.

Σημειώστε το σωστό.

7. Το φάσμα του ηλιακού φωτός που φτάνει στην επιφάνεια της γης είναι:

- α) Συνεχές εκπομπής. β) Συνεχές απορρόφησης.  
 γ) Γραμμικό εκπομπής. δ) Γραμμικό απορρόφησης.

Σημειώστε το σωστό και δικαιολογήστε την επιλογή σας.

8. Είδαμε ότι τα διεγερμένα αέρια εκπέμπουν φως του οποίου το φάσμα είναι γραμμικό. Από την ανάλυση όμως του ηλιακού φωτός με ένα πρίσμα ή στο ουράνιο τόξο διαπιστώνουμε ότι φως του ηλίου παρουσιάζει σχεδόν συνεχές φάσμα. Πώς συμβιβάζεται αυτό με το γεγονός ότι όλα τα συστατικά του ηλίου λόγω της υψηλής θερμοκρασίας βρίσκονται σε αέριο (πλήρως ιοντισμένα) κατάσταση;

9. Πολλές φορές στην εξοχή όταν κοιτάμε τη νύχτα τον έναστρο ουρανό βλέπουμε ότι τα άστρα δεν έχουν όλα το ίδιο χρώμα. Άραγε μπορούμε να πούμε ποια είναι πιο θερμά μόνο από το χρώμα τους; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

10. Λέμε ότι ένα ..... κύμα είναι γραμμικά πολωμένο όταν το επίπεδο ..... παραμένει .....

Συμπληρώστε τα κενά.

11. Επίπεδο πόλωσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ονομάζουμε το επίπεδο ..... του ..... πεδίου εφόσον παραμένει .....

Συμπληρώστε τα κενά.

12. Πολωτής είναι κάθε διάταξη που μετατρέπει ένα ..... μη ..... φως σε ..... πολωμένο.

Συμπληρώστε τα κενά.

13. Η διεύθυνση που συμπίπτει με το ..... του ηλεκτρικού ..... που διέρχεται ..... από τον πολωτή ονομάζεται ..... του πολωτή.

Συμπληρώστε τα κενά.



**14.** Αναλυτής είναι μια διάταξη με τη βοήθεια της οποίας διαπιστώνουμε αν ένα κύμα:

- α) Αναλύεται σε άλλα απλούστερα.
- β) Είναι μονοχρωματικό.
- γ) Είναι πολωμένο.
- δ) Τίποτα από τα προηγούμενα.

Σημειώστε το σωστό.

**15.** Τα γυαλιά Polaroid μας βοηθάνε να βλέπουμε καλύτερα στις χιονισμένες βουνοπλαγιές και στη θάλασσα γιατί:

- α) Κόβουν την υπεριώδη ακτινοβολία.
- β) Μειώνουν το συνολικό ποσό φωτός που πέφτει στα μάτια.
- γ) Κόβουν την πολωμένη συνιστώσα του φωτός που προέρχεται από ανάκλαση στο χιόνι ή στο νερό.

Σημειώστε το σωστό.

**16.** Για να διαπιστώσουμε ότι το φως του ουρανού είναι πολωμένο πρέπει να κοιτάζουμε μέσα από ένα πολαρόιντ:

- α) Τον ηλιακό δίσκο.
- β) Τον ουρανό κατακόρυφα προς τα επάνω ανεξάρτητα από τη θέση του ηλίου.
- γ) Προς τη Δύση και σε διεύθυνση που να σχηματίζει ορθή γωνία με τη διεύθυνση του ηλίου ως προς εμάς.
- δ) Σε τυχαία κατεύθυνση.

Σημειώστε το σωστό.

**17.** Ποια από τις παρακάτω ιδιότητες δεν ανήκει στο φως του laser:

- α) μονοχρωματικό, β) διάχυτο, γ) εντοπισμένο, δ) σύμφωνο.

Σημειώστε το σωστό.

**18.** Μια συνηθισμένη περίπτωση αντικατοπτρισμού είναι αυτός που συμβαίνει τις ζεστές μέρες οπότε έχουμε την εντύπωση ότι επάνω στον αυτοκινητόδρομο υπάρχουν νερά. Κάποιος ισχυρίζεται ότι με τη βοήθεια γυαλιών πολαρόιντ μπορεί να καταλάβει αν πράγματι υπάρχουν νερά ή πρόκειται περί οφθαλμαπάτης. Εξηγείστε αν έχει δίκιο ή όχι.



# μέρος 4

## ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ





## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

*Δεν γνωρίζεις τον εαυτό σου  
παρά στο μέτρο που γνωρίζεις τον κόσμο.  
Πλάτων*

Πριν από πάρα πολλά χρόνια ξεκίνησε σ' αυτή τη γωνιά της γης που σήμερα κατοικούμε η περιπέτεια της ερμηνείας του κόσμου. Σ' αυτή την περιπέτεια ένας από τους πρώτους ερευνητές υπήρξε ο Δημόκριτος από τα Αβδηρα της Θράκης ( ) που πρώτος διατύπωσε την άποψη ότι ο κόσμος μας είναι φτιαγμένος από κάποια σταθερά αναλλοίωτα και αδιαίρετα στοιχεία που τα ονόμασε άτομα.

Σήμερα γνωρίζουμε ότι το σύνολο των στοιχείων από τα οποία είναι φτιαγμένος ο κόσμος μας είναι λίγο περισσότερα από εκατό και τόσα ακριβώς είναι και τα διαφορετικά άτομα.

Αυτά που ονομάζουμε σήμερα άτομα δεν είναι βέβαια αυτά που εννοούσε ο Δημόκριτος, μια και τα άτομα, όπως τα ξέρουμε εμείς σήμερα, δεν είναι ούτε αναλλοίωτα ούτε αδιαίρετα, αφού αποτελούνται από άλλα στοιχειωδέστερα συστατικά. Σήμερα γνωρίζουμε ότι όλα τα άτομα των διάφορων στοιχείων αποτελούνται από έναν πυρήνα και από ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από αυτόν, όπως οι πλανήτες περιφέρονται γύρω από τον Ήλιο, κάτι που σε γενικές γραμμές θυμίζει χονδρικά το ηλιακό σύστημα.

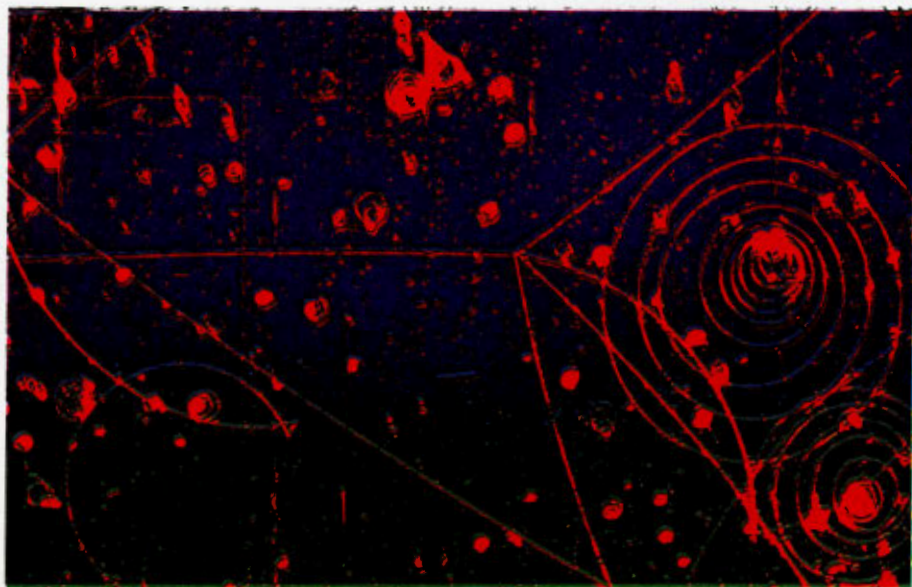
Ο πυρήνας των ατόμων είναι ένα πολύ μικρό και πυκνό αντικείμενο φτιαγμένο από δύο διαφορετικά υλικά: τα **πρωτόνια** και τα **νετρόνια**.<sup>1</sup> Το πρωτόνιο έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο ίσο κατά μέτρο με το φορτίο του ηλεκτρονίου και μάζα περίπου 1890 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτρονίου. Τα νετρόνια έχουν περίπου 0,1% μεγαλύτερη μάζα από τα πρωτόνια και, όπως δηλώνει και το όνομά τους, δεν έχουν ηλεκτρικό φορτίο. Κάθε πυρήνας χαρακτηρίζεται από τον **ατομικό του αριθμό Z**, που είναι το πλήθος των πρωτονίων του και τον **μαζικό του αριθμό A**, που είναι το σύνολο των πρωτονίων και των νετρονίων που περιέχει. Ο τυπικός συμβολισμός των πυρήνων είναι  ${}^A_ZX$ , π.χ.  ${}^{238}_{92}\text{U}$ , πράγμα που σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος πυρήνας περιέχει 238 πρωτόνια και νετρόνια από τα οποία τα 92 είναι πρωτόνια και συνεπώς τα  $238 - 92 = 146$  είναι νετρόνια. Το U είναι το χημικό σύμβολο του 92ου στοιχείου του περιοδικού πίνακα που ονομάζεται **ουράνιο**. Είναι δυνατόν να έχουμε πυρήνα με τον ίδιο ατομικό αριθμό Z αλλά με διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Τα άτομα με τέτοιους πυρήνες έχουν

<sup>1</sup> Τα τελευταία χρόνια η φυσική έχει κάνει ένα τεράστιο βήμα στη μελέτη του μικρόκοσμου. Έχει διαπιστωθεί ότι τα πρωτόνια και τα νετρόνια δεν είναι στοιχειώδη αλλά σύνθετα. Αποτελούνται από μικρότερα σωματίδια τα οποία λέγονται quarks. Αυτά αλληλεπιδρούν πολύ ισχυρά μεταξύ τους και γι' αυτό το λόγο δεν βρίσκονται ελεύθερα στη φύση. Η περιορισμένη έκταση του βιβλίου δεν μας επιτρέπει να επεκταθούμε περισσότερο επί του θέματος αυτού.

ακριβώς την ίδια χημική συμπεριφορά και βρίσκονται στην ίδια θέση του περιοδικού συστήματος γι' αυτό και ονομάζονται **ισότοπα**. Σήμερα, γνωρίζουμε περισσότερα από 100 φυσικά ή τεχνητά χημικά στοιχεία και περισσότερα από 300 ισότοπα.

Για τη διατήρηση της ευστάθειας του πυρήνα **τρεις** δυνάμεις παίζουν σημαντικό ρόλο. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται μεταξύ τους, σε πείσμα των απωστικών ηλεκτρικών δυνάμεων, λόγω των θετικών τους φορτίων με τις πολύ **ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις** που όμως έχουν πολύ μικρή ακτίνα δράσης (εμβέλεια). Οι **ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις** είναι πολύ ασθενέστερες, αλλά αποκτούν σταδιακά σημασία και παίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς ο αριθμός των πρωτονίων στον πυρήνα αυξάνει. Τέλος, οι **ασθενείς πυρηνικές δυνάμεις**, πολύ ασθενέστερες και από τις ηλεκτρικές, είναι υπεύθυνες για τη **βήτα διάσπαση**, μια διαδικασία κατά τη οποία τα νετρόνια του πυρήνα μπορούν να μετατρέπονται σε πρωτόνια με την ταυτόχρονη εκπομπή ηλεκτρονίων και κάποιων άλλων σωματιδίων που λέγονται νετρίνα.

# κεφάλαιο 11



## ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

- Ραδιενέργεια
- Ακτινοβολία  $\alpha, \beta, \gamma$
- Απαριθμητής Geiger (Γκάιγκερ)
- Κοσμική ακτινοβολία
- Μονάδες ραδιενέργειας
- Πυρηνική σχάση και σύντηξη
- Επιπτώσεις της ραδιενέργειας





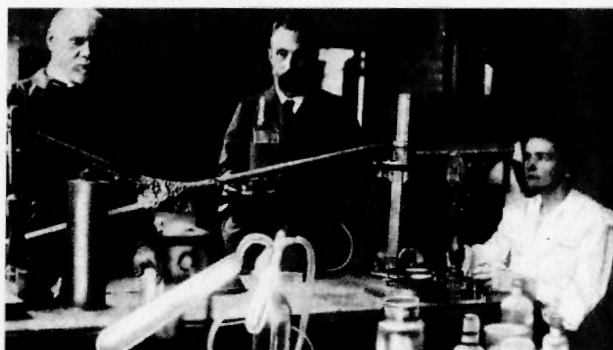
## 11.1 ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

*Το τέλος μου  
είναι η αρχή μου.  
T. C. Eliot*

Όπως πάρα πολλές άλλες σπουδαίες ανακαλύψεις, έτσι και η ανακάλυψη της ραδιενέργειας έγινε κατά τύχη από τον Antoine Henri Becquerel (1852-1908), ο οποίος το 1896, 15 ολόκληρα χρόνια πριν ο Rutherford (Ράδερφορντ) συμπεράνει την ύπαρξη του πυρήνα των ατόμων, τυχαία παρατήρησε ένα καθαρά πυρηνικό φαινόμενο.

Συγκεκριμένα, ο Becquerel (Μπεκέρελ) παρατήρησε ότι διάφορα ορυκτά που περιείχαν στην σύνθεσή τους ουράνιο παρήγαγαν μια αόρατη ακτινοβολία που μπορούσε να διαπεράσει τα στερεά αδιαφανή τοιχώματα ενός κουτιού και να προκαλέσει αμαύρωση φωτογραφικών πλακών.

Η ακτινοβολία που εξέπεμπαν τα ορυκτά αυτά είχε και άλλες συνέπειες. Προκαλούσε έντονο ιοντισμό του αέρα με αποτέλεσμα την γρήγορη εκφόρτιση ενός ηλεκτροσκοπίου που ενδεχομένως θα βρισκόταν κοντά σε τέτοια πετρώματα.

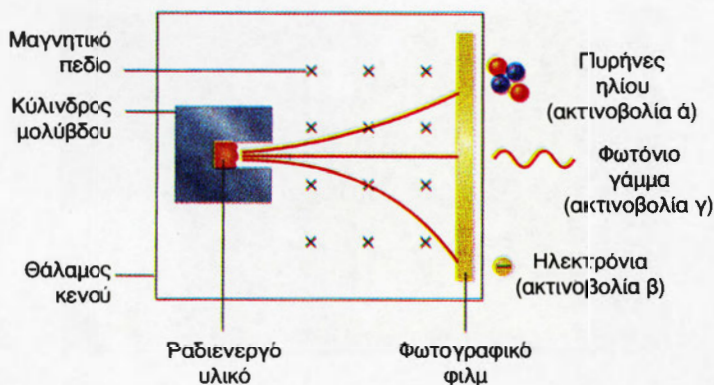


Εικόνα 11.1

Στη συνέχεια, το ζεύγος Piere και Marie Curie (Κιουρί) (εικ. 11.1) έδειξαν ότι τα ορυκτά του ουρανίου περιείχαν επίσης ίχνη δύο νέων στοιχείων, του Πολώνιου ( $Z = 84$ ) και του Ραδίου ( $Z = 88$ ) τα οποία ήταν πολύ πιο δραστήρια στην εκπομπή αυτής της καινούριας ακτινοβολίας από ό,τι το ουράνιο. Γι' αυτό, το φαινόμενο της εκπομπής αυτής της ακτινοβολίας το ονόμασαν **ραδιενέργεια**, τα δε στοιχεία όπως το Ουράνιο, το Ράδιο, το Πολώνιο και άλλα που ανακαλύφθηκαν αργότερα και εμφάνιζαν το φαινόμενο της ραδιενέργειας, ονομάστηκαν ραδιενεργά. Σήμερα γνωρίζουμε και άλλα ραδιενεργά στοιχεία όπως το Θόριο και το Ακτίνιο. Όλα τα ραδιενεργά στοιχεία βρίσκονται στο τέλος του περιοδικού πίνακα.

Η ραδιενέργεια των ραδιενεργών στοιχείων, οφείλεται στην αστάθεια που παρουσιάζουν μερικοί πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό (που ονομάζονται νουκλίδια). Οι πυρήνες αυτοί (νουκλίδια) διασπώνται **αυτόματα** και σε τελείως **τυχαίες** χρονικές στιγμές, παράγουν ένα καινούριο νουκλίδιο (άλλο χημικό στοιχείο) και ταυτόχρονα εκπέμπουν θραύσματα που σαν να είναι "βλήματα" κινούνται με μεγάλη ταχύτητα.

Γρήγορα διαπιστώθηκε ότι η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα ραδιενεργά στοιχεία αποκόπτεται σχεδόν πλήρως από μια πλάκα μολύβδου πάχους μερικών εκατοστών (4 - 5 cm), οπότε με τη βοήθεια της μεθόδου που εικονίζεται στην εικόνα (11.2) μπορούμε να εξετάσουμε τις ιδιότητες και να ανιχνεύσουμε την φύση της ακτινοβολίας αυτής. Συγκεκριμένα, μικρή ποσότητα ραδιενεργού υλικού τοποθετημένη σε μολύβδινο κουτί με παχιά μολύβδινη πλάκα στο μέσον της οποίας υπάρχει μικρή τρύπα, μέσα από την οποία, όταν διέρχεται η παραγόμενη ακτινοβολία, σχηματίζει λεπτή δέσμη. Η δέσμη αυτή στη συνέχεια εισέρχεται σε μαγνητικό πεδίο που έχει διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της δέσμης. Παρατηρούμε τότε ότι η ραδιενεργός δέσμη αναλύεται σε τρεις "συνιστώσες" καθεμιά από τις οποίες σχηματίζει διαφορετική κοιλίδα στη φωτογραφική πλάκα που βρίσκεται απέναντι από την τρύπα.



**Εικόνα 11.2**

Μέσα σε μαγνητικό πεδίο η ραδιενεργός ακτινοβολία εκτρέπεται και διαχωρίζεται σε τρεις "συνιστώσες" την α, τη β και τη γ.

Η μία συνιστώσα εκτρέπεται από το μαγνητικό πεδίο σε τέτοια κατεύθυνση που συμπίπτει με την κατεύθυνση που θα εκτρέπονταν από το μαγνητικό πεδίο θετικά φορτισμένα κινούμενα σωματίδια. Τη συνιστώσα αυτή ονομάσαμε ακτινοβολία α.

Η άλλη συνιστώσα εκτρέπεται πολύ πιο έντονα από το μαγνητικό πεδίο σε αντίθετη κατεύθυνση, ως εάν αποτελείται από αρνητικά φορτισμένα κινούμενα σωματίδια. Την συνιστώσα αυτή ονομάσαμε ακτινοβολία β.

Η τρίτη συνιστώσα παραμένει ανεπηρέαστη από την ύπαρξη του μαγνητικού πεδίου, σαν να την αποτελούσαν ουδέτερα σωματίδια σαν να ήταν ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Την ίδια συμπεριφορά θα έδειχναν και οι τρεις συνιστώσες, αν αντί μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούσαμε ηλεκτρικό πεδίο.

## 11.2 ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ α, β, γ

*Κάνε άλμα  
πιο γρήγορο απ' τη φθορά.  
Οδ. Ελύτης (Μ. Νεφέλη)*

Από τη λεπτομερή μελέτη και ανάλυση των αποτελεσμάτων τέτοιων πειραμάτων καταλήξαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα, όσον αφορά τη φύση και τις ιδιότητες των ακτινοβολιών α, β και γ.

**α. Η ακτινοβολία α αποτελείται από σωματίδια α τα οποία είναι πυρήνες ηλίου ( ${}^4\text{He}$ ).**

Από το γεγονός ότι όλα τα σωματίδια α που εκπέμπονται από ένα ραδιενεργό πυρήνα καμπυλώνονται το ίδιο από το μαγνητικό πεδίο προκύπτει ότι όλα εκπέμπονται με την ίδια αρχική ταχύτητα.

**β. Η ακτινοβολία β αποτελείται από ηλεκτρόνια.**

Από το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια που απαρτίζουν την ακτινοβολία β δεν εκτρέπονται όλα εξίσου από το μαγνητικό πεδίο συμπεραίνουμε ότι τα ηλεκτρόνια της ακτινοβολίας β εκπέμπονται κατά τη διάσπαση του πυρήνα με διαφορετικές ταχύτητες, που μπορεί να είναι από πολύ μικρές (σχεδόν μηδενικές) μέχρι πολύ μεγάλες (σχεδόν ίσες με την ταχύτητα του φωτός).

**Προσοχή:** Το γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια της ακτινοβολίας β εκπέμπονται κατά τη διάσπαση των ραδιενεργών πυρήνων δεν πρέπει να μας οδηγήσει στο λανθασμένο συμπέρασμα ότι ο πυρήνας διαθέτει ηλεκτρόνια. Αντίθετα, γνωρίζουμε ότι ο πυρήνας διαθέτει **μόνο** πρωτόνια και νετρόνια. Τα ηλεκτρόνια της ακτινοβολίας β παράγονται κατά τη στιγμή της διάσπασης με τη βοήθεια της ασθενούς αλληλεπίδρασης που μετατρέπει ένα νετρόνιο σε πρωτόνιο (που παραμένει στον πυρήνα), σε ένα ηλεκτρόνιο που εκτινάσσεται και σε ένα άλλο στοιχειώδες σωματίδιο που ονομάζεται αντινεutrino ( $\bar{\nu}$ ) δεν έχει πιθανόν μάζα και κινείται με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός (αν έχει μάζα μηδέν).



**γ. Η ακτινοβολία γ αποτελείται από (φωτόνια) ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που έχουν μήκος κύματος μικρότερο και από τις πιο “σκληρές” ακτίνες Roentgen.**

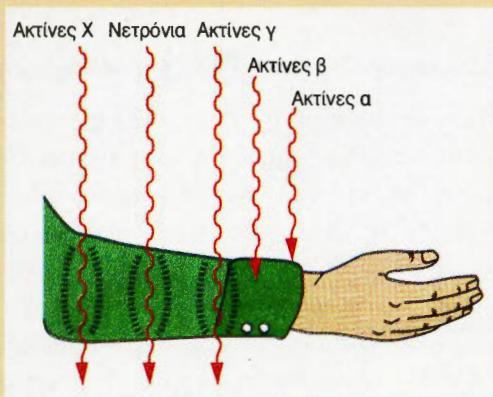
Συμπεραίνουμε ότι πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, από το γεγονός ότι εμφανίζουν πολύ μεγάλη διεισδυτικότητα. Συγκεκριμένα, μπορούν να διαπεράσουν πλάκες μολύβδου πάχους αρκετών εκατοστών ευκολότερα απ’ όσο οι ακτίνες Χ. Εξάλλου και αυτές, όπως και οι ακτίνες Χ και κάθε άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δεν εκτρέπονται από ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία.

**Προσοχή:** Όπως και στην περίπτωση της ακτινοβολίας β, έτσι και στην περίπτωση γ δεν πρέπει να νομίσουμε ότι τα φωτόνια της ακτινοβολίας γ είναι συστατικό του πυρήνα. Απλώς, όπως στην περίπτωση των ατόμων τα διεγερμένα άτομα εκπέμπουν ένα φωτόνιο (συνήθως στην ορατή περιοχή), όταν αποδιεγείρονται και επανέρχονται στην κατάσταση ηρεμίας τους (θεμελιώδης κατάσταση), έτσι και στους ραδιενεργούς πυρήνες, μετά τη διάσπασή τους, ο απομένων **θυγατρικός** πυρήνας, βρίσκεται σε κατάσταση κατά την οποία τα συστατικά του διαθέτουν αυξημένη ενέργεια. Επανερχόμενος στη συνέχεια στη θεμελιώδη κατάσταση, εκπέμπει την πλεονάζουσα ενέργεια υπό μορφή φωτονίου ακτινοβολίας γ.

### **Εμβέλεια** (ακτίνα δράσης).

Οι διάφορες συνιστώσες της ραδιενεργού ακτινοβολίας έχουν διαφορετική ακτίνα δράσης (εμβέλεια). Συγκεκριμένα, η ακτινοβολία α που, όπως είδαμε, αποτελείται από σωμάτια – α (πυρήνες  ${}^4_2\text{He}$ ) κινούμενα με την ίδια ταχύτητα, καθώς διέρχεται μέσα από την ύλη, προκαλεί ιονισμό των

ατόμων που την απαρτίζουν, λόγω συγκρούσεων των σωματίων α με αυτά. Κάθε όμως τέτοια σύγκρουση, που προκαλεί ιονισμό, επιφέρει ελάττωση της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου α, με αποτέλεσμα τη βαθμιαία ελάττωση της ταχύτητάς του, μέχρις ότου σταματήσει τελείως. Το μήκος της διαδρομής που εκτελεί ένα ιονίζον σωματίδιο μέσα στην ύλη, μέχρι να ακινητοποιηθεί, ονομάζεται **εμβέλεια**. Είναι προφανές ότι η εμβέ-





λεια των σωματιδίων  $\alpha$  θα εξαρτάται από την αρχική τους ταχύτητα και ανάλογα με το είδος του ραδιενεργού στοιχείου που υπάρχει στον αέρα μπορεί να φτάσει τα 10cm. Μέσα στα διάφορα στερεά η εμβέλεια είναι πολύ μικρότερη και αρκεί ένα φύλλο από χαρτί ή ένα φύλλο ασημόχαρτου, όπως αυτά που υπάρχουν στα κουτιά των τσιγάρων, για να σταματήσει πλήρως τη δέσμη των σωματίων  $\alpha$ .

Η ακτινοβολία  $\beta$ , που αποτελείται, όπως είπαμε, από ηλεκτρόνια, προκαλεί πολύ λιγότερο ιοντισμό από ό,τι η ακτινοβολία  $\alpha$  και γι' αυτό η εμβέλειά της είναι μεγαλύτερη. Στον αέρα η εμβέλεια των ταχύτερων ηλεκτρονίων, από αυτά που περιέχονται στην ακτινοβολία  $\beta$ , φτάνει τα μερικά μέτρα, μέσα δε στο αργίλιο (αλουμίνιο) τα μερικά mm.

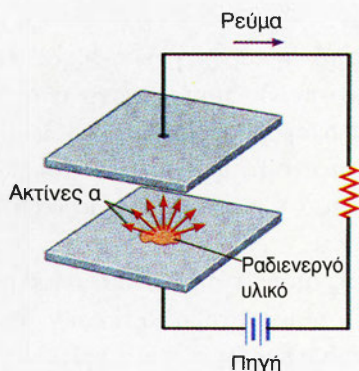
Τέλος, η ακτινοβολία  $\gamma$ , που αποτελείται από φωτόνια, είναι η πιο διεισδυτική και έχει τη μεγαλύτερη εμβέλεια. Στον αέρα απλώνεται σε απόσταση πολλών μέτρων, περνάει μέσα από τοίχους, και χρειάζεται φύλλο μολύβδου πάχους αρκετών cm, για να την σταματήσει τελείως.

## 11.3 ΑΠΑΡΙΘΜΗΤΗΣ GEIGER (ΓΚΑΙΓΚΕΡ)

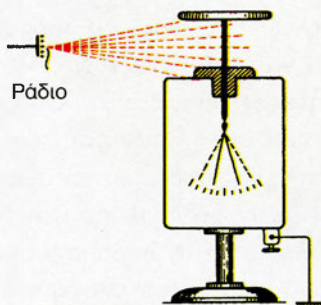
*Η απουσία της ένδειξης δεν αποτελεί  
ένδειξη της απουσίας.  
Ανώνυμος*

Είδαμε ότι η βασική ιδιότητα των ραδιενεργών ακτινοβολιών  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ , όπως και της ακτινοβολίας  $X$  και της υπεριώδους, είναι ότι προκαλούν ιοντισμό στα άτομα μέσα από τα οποία διέρχονται. Πράγματι, αν πλησιάσουμε σε ένα φορτισμένο επίπεδο πυκνωτή μια ραδιενεργό πηγή, θα διαπιστώσουμε (εικ. 11.3) ότι ο χώρος ανάμεσα στους οπλισμούς του γίνεται αγωγίμος λόγω της δημιουργίας ιόντων στον αέρα που βρίσκεται ανάμεσά τους.

Το ίδιο (ανάλογο) παρατηρούμε, αν σε φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο πλησιάσουμε ραδιενεργό παρασκεύασμα (εικ. 11.4). Θα διαπιστώσουμε δηλαδή ότι τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου, που προηγουμένως ήταν ανοιχτά, κλείνουν πολύ γρήγορα, διότι ο αέρας που περιβάλλει το δίσκο του καθίσταται αγωγίμος λόγω των ιόντων που παράγονται και τα οποία προκαλούν την ταχεία εκφόρτιση του ηλεκτροσκοπίου.

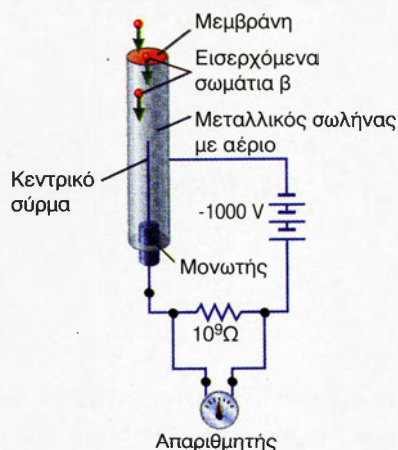
**Εικόνα 11.3**

Ο πυκνωτής εκφορτίζεται με την ραδιενεργό ακτινοβολία.

**Εικόνα 11.4**

Η ραδιενεργός ακτινοβολία ιοντίζει τον αέρα και προκαλεί εκφόρτιση του ηλεκτροσκοπίου.

Ακριβώς την ιδιότητα που έχουν οι διάφορες ακτινοβολίες να ιοντίζουν τα άτομα που συναντούν στην πορεία τους εκμεταλλευόμαστε και στην περίπτωση του απαριθμητή Geiger. Ο απαριθμητής Geiger αποτελείται από ένα μικρό μεταλλικό σωλήνα στον άξονα του οποίου υπάρχει πολύ λεπτό μεταλλικό σύρμα απομονωμένο από τα τοιχώματα του σωλήνα (εικ. 11.5). Στο σύρμα εφαρμόζεται μια θετική τάση περίπου 600 - 1000 V ως προς το μεταλλικό του περίβλημα. Μέσα στο σωλήνα υπάρχει αδρανές αέριο σε υποπίεση (περίπου 1/3 της ατμοσφαιρικής). Ο σωλήνας κλείνεται εμπρός με ένα πολύ λεπτό παράθυρο από μαρμαρυγία (μίκρα) με επιφανειακή πυκνότητα μικρότερη από  $10 \text{ mg/cm}^2$ . Οι ακτίνες α μπορούν να διαπεράσουν αυτό το παράθυρο χωρίς σημαντική απώλεια στην ενέργειά τους. Κάθε σωματίο α ή β που θα εισέλθει στο σωλήνα προκαλεί ιοντισμό του αερίου με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί εκκένωση. Τα θετικά ιόντα που δημιουργούνται κινούνται προς τα αρνητικά φορτισμένα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα από όπου αναπληρώνουν τα ηλεκτρόνια που έχουν χάσει. Το παραγόμενο στιγμιαίο ρεύμα διέρχεται μέσα από την αντίσταση R. Όταν δεν υπάρχει εκκένωση, μεταξύ σύρματος και μεταλλικού σωλήνα εφαρμόζεται ολόκληρη η τάση της πηγής.

**Εικόνα 11.5**

Απαριθμητής Geiger

Με την εκκένωση και τη δίοδο ρεύματος από την αντίσταση, επέρχεται σ' αυτή πτώση τάσης,  $U = IR$ , η οποία αφαιρείται από την τάση στα άκρα του απαριθμητή, με αποτέλεσμα να σταματά η εκκένωση και η τάση να επανακτά την αρχική της τιμή. Έτσι, ο θάλαμος του Geiger είναι πάλι έτοιμος για μια νέα εκκένωση. Η απότομη αλλαγή τάσης, που γίνεται στα άκρα της αντίστασης με κάθε εκκένωση, μεταβιβάζεται σ' έναν ενισχυτή και από εκεί σε μια ηλεκτρονική απαριθμητική διάταξη. Έτσι απαριθμείται κάθε σωματίδιο που θα διέλθει με μεγάλη ταχύτητα μέσα από το σωλήνα του Geiger, προκαλώντας ιονισμό. Με τον απαριθμητή μπορεί να συνδεθεί και ένα μεγάφωνο οπότε κάθε εκκένωση θα ακούγεται σαν ένας απότομος χτύπος.

## 11.4 ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

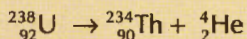
Με τη βοήθεια ενός απαριθμητή Geiger συνδεδεμένου με μεγάφωνο, μπορούμε να διαπιστώσουμε ένα πολύ ενδιαφέρον και περίεργο φαινόμενο. Αν απομακρύνουμε από κοντά του κάθε πηγή ραδιενέργειας, κι αν ακόμη τον καλύψουμε με φύλλα μολύβδου αρκετού πάχους, θα διαπιστώσουμε ότι σε ακονόνιστα χρονικά διαστήματα εξακολουθεί να δίνει κρούσεις στο μεγάφωνο. Τούτο σημαίνει ότι κάποια άλλη ακτινοβολία, πέρα από αυτές που γνωρίσαμε, πολύ πιο διεισδυτική από αυτές είναι η αιτία που προκαλεί τη λειτουργία του απαριθμητή. Η προέλευση αυτής της ακτινοβολίας δεν είναι γήινη και γι' αυτό ονομάστηκε **κοσμική ακτινοβολία** ή **κοσμικές ακτίνες**. Η κοσμική ακτινοβολία διακρίνεται σε **πρωτογενή** και **δευτερογενή**. Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από πρωτόνια αλλά και διάφορους άλλους πυρήνες, που κινούμενοι ανάμεσα στα άστρα αποκτούν τεράστιες ταχύτητες. Στη συνέχεια, εισερχόμενοι στην ανώτερη ατμόσφαιρα συγκρούονται με τα μόρια του αέρα και προκαλούν πυρηνικές αντιδράσεις. Έτσι, στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας φτάνει η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία η οποία αποτελείται από έναν καταιγισμό ηλεκτρονίων, ποζιτρονίων, πρωτονίων, νετρονίων, μιονίων και φωτονίων. Από συστηματικές μελέτες βρέθηκε ότι στο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας από  $1 \text{ m}^2$  ανά δευτερόλεπτο διέρχονται περίπου ένα με δύο σωματίδια οφειλόμενα στις κοσμικές ακτίνες. Ο αριθμός αυτός αυξάνει προς τους πόλους σε συνάρτηση και με την απόσταση από την επιφάνεια της θάλασσας.



**Μεταστοιχείωση – Χρόνος Υποδιπλασιασμού.**

Είδαμε ότι τα σωματίδια  $\alpha$  που εκπέμπονται από έναν πυρήνα με την ακτινοβολία  $\alpha$ , είναι πυρήνες ηλίου, δηλαδή αποτελούν ένα συγκρότημα από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Είναι φανερό ότι ο πυρήνας που εξέπεμψε ένα σωματίδιο  $\alpha$  δεν είναι πια ο ίδιος, αφού έχει χάσει δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια και συνεπώς έχει παραχθεί ένα καινούριο στοιχείο.

Πράγματι το 1903 για πρώτη φορά οι Rutherford (Ράδερφορντ) και Soddy (Σόντι) έδειξαν ότι, όταν το νουκλίδιο του ουρανίου εκπέμπει ένα σωματίδιο  $\alpha$ , μετατρέπεται στο νουκλίδιο θόριο 234. Συμβολικά αυτό γράφεται:



Η διαδικασία την οποία περιγράψαμε πιο πάνω ονομάζεται **μεταστοιχείωση** και συμβαίνει όχι μόνο κατά την εκπομπή ενός σωματιδίου  $\alpha$  αλλά και κατά την εκπομπή ακτινοβολίας  $\beta$ , διότι, όπως είπαμε, η εκπομπή σωματιδίων  $\beta$  από έναν πυρήνα συνοδεύεται πάντα από μετατροπή ενός νετρονίου σε πρωτόνιο, οπότε και πάλι προκύπτει ένα καινούριο χημικό στοιχείο. Μεταστοιχείωση **δεν** παρατηρείται κατά την εκπομπή των ακτίνων  $\gamma$ .

Η εκπομπή των σωματιδίων  $\alpha$ ,  $\beta$  από τους πυρήνες κατά το φαινόμενο της ραδιενέργειας και η επακόλουθη μετατροπή τους σε άλλους πυρήνες είναι ένα τελειώς τυχαίο γεγονός και χαρακτηρίζεται από ένα **χρόνο υποδιπλασιασμού**  $T$  που είναι ο χρόνος ο οποίος απαιτείται, ώστε οι μισοί από τους υπάρχοντες πυρήνες να διασπαστούν, εκπέμποντας κάποιο σωματίδιο ( $\alpha$  ή  $\beta$ ) και να μετατραπούν σε άλλους πυρήνες.

Για να γίνει κατανοητή η έννοια του χρόνου υποδιπλασιασμού, φανταστείτε την ακόλουθη περίπτωση.

Σε ένα πολύ μεγάλο γήπεδο ένα μεγάλο πλήθος θεατών παρακολουθεί ένα βαρετό αγώνα ποδοσφαίρου. Αν όλοι στρίψουν ένα νόμισμα λέγοντας: “κορώνα μένω – γράμματα φεύγω”, περίπου οι μισοί θα έχουν απομείνει μετά το πρώτο στρίψιμο. Στη συνέχεια, εφόσον συνεχίσουν να στρίβουν το νόμισμα, περίπου οι μισοί των προηγούμενων θα μείνουν μετά το δεύτερο στρίψιμο και ούτω καθεξής. Δεν μπορούμε με κανένα τρόπο να προβλέψουμε πότε ένας συγκεκριμένος θεατής θα φύγει από το γήπεδο και η διαδικασία λέμε ότι είναι τυχαία. Επειδή, όμως, οι μισοί θεατές εγκαταλείπουν το γήπεδο μετά από κάθε “στρίψιμο”, ο χρόνος ανάμεσα σε δυο διαδοχικά “στριψήματα” ονομάζεται χρόνος υποδιπλασιασμού των θεατών.

Ας επανέλθουμε τώρα στους ραδιενεργούς πυρήνες. Αν τη χρονική στιγμή  $t=0$  υπήρχαν  $N_0$  ραδιενεργοί πυρήνες, μετά από χρόνο  $t = T$  (ίσο



με το χρόνο υποδιπλασιασμού) θα έχουν απομείνει περίπου  $N_0/2$  πυρήνες από τους αρχικούς. Μετά από χρόνο  $t=2T$  (όταν θα έχει περάσει χρόνος διπλάσιος από το χρόνο υποδιπλασιασμού) θα έχουν απομείνει  $N_0/4$  πυρήνες. Μετά από χρόνο  $t = 3T$  θα έχουν απομείνει  $N_0/8$  πυρήνες και ούτω καθεξής. Ανάλογα με το είδος του ραδιενεργού στοιχείου ο χρόνος υποδιπλασιασμού μπορεί να κυμαίνεται από ένα μικρό κλάσμα του δευτερολέπτου μέχρι εκατομμύρια χρόνια. Για να βρούμε τον αριθμό των ραδιενεργών πυρήνων που έχουν απομείνει, όταν ο χρόνος που έχει περάσει δεν είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του χρόνου υποδιπλασιασμού  $T$ , σκεπτόμαστε ως εξής:

Η ελάττωση  $\Delta N$  του αριθμού των πυρήνων κατά τη διάρκεια του μικρού χρονικού διαστήματος  $\Delta t$  είναι ανάλογη του αριθμού των πυρήνων  $N$  και του χρονικού διαστήματος  $\Delta t$ , δηλαδή:

$$\Delta N = - \lambda N \Delta t \quad (11.1)$$

Το αρνητικό σημείο υποδηλώνει ότι πρόκειται για ελάττωση του αριθμού των πυρήνων και συνεπώς το  $\Delta N$  είναι αρνητικό. Η σταθερά της αναλογίας  $\lambda$  ονομάζεται **σταθερά διάσπασης** και δίδεται από τη σχέση:

$$\lambda = 0,693/T \quad (11.2)$$

## 11.5 ΜΕΓΕΘΗ ΚΑΙ ΜΟΝΑΔΕΣ ΡΑΔΙΟΑΚΤΙΝΙΒΟΛΗΣΗΣ

*Όταν μπορείς να μετρήσεις αυτό για το οποίο μιλάς και να το εκφράσεις με αριθμούς, κάτι ξέρεις γι' αυτό. Μπορεί να είναι η αρχή της γνώσης, αλλά μόλις έχεις προχωρήσει στη σκέψη σου στο επίπεδο της επιστήμης.*  
Λόρδος Κέλβιν



Εικόνα 11.6

Οι διάφορες ακτινοβολίες έχουν πολλές εφαρμογές στην ιατρική και στη βιομηχανία και η σωστή αξιοποίησή τους προϋποθέτει καλή γνώση των μονάδων μέτρησης που χρησιμοποιούνται στις διάφορες περιπτώσεις.

Τέσσερις κυρίως βασικές παράμετροι πρέπει να καθοριστούν σε μια περίπτωση ραδιοακτινοβόλησης: η **ενεργότητα (A)**, η **έκθεση**, η **απορροφηθείσα δόση** και η **βιολογικά ισοδύναμη δόση**.

Η **ενεργότητα** ή ραδιενέργεια είναι ο ρυθμός διασπάσεων των πυρήνων ενός ραδιενεργού υλικού και παλιότερα μετριόταν σε κιουρί (curie) όπου:

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ διασπάσεις/s} \quad (11.3)$$

Το ράδιο ενεργότητας 1 Ci αντιστοιχεί σε μάζα ραδίου περίπου 1g. Η μονάδα ενεργότητας που χρησιμοποιείται σήμερα και ανήκει στο SI (Διεθνές Σύστημα Μονάδων) είναι το becquerel (Bq) και ισούται με μια διάσπαση ανά δευτερόλεπτο.

Η ενεργότητα (A) ενός δείγματος σχετίζεται με το χρόνο υποδιπλασιασμού του. Είδαμε ότι:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad \text{και} \quad \lambda = 0,693/T$$

Συνεπώς:

$$A = \frac{-\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{0,693}{T} N = \frac{0,693}{T} n N_A \quad (11.4)$$

όπου n είναι ο αριθμός γραμμομορίων της ραδιενεργού ουσίας και  $N_A$  είναι η σταθερά του Avogadro  $N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  (ο αριθμός των ατόμων σε ένα mole).

### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11.1

Το  $^{60}\text{Co}$  (κοβάλτιο 60) διασπάται με χρόνο υποδιπλασιασμού 5,27 χρόνια  $= 1,66 \cdot 10^8 \text{ s}$  σε  $^{60}\text{Ni}$ , το οποίο στη συνέχεια εκπέμπει δύο ακτίνες γ, που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στη θεραπεία του καρκίνου. Πόση είναι η μάζα μιας ραδιενεργού πηγής  $^{60}\text{Co}$  ενεργότητας 1000-Ci;

#### Λύση

Από τη σχέση (11.4), λύνοντας ως προς το αριθμό των γραμμομορίων n έχουμε:

$$n = \frac{AT}{0,693 N_A} = \frac{1000 \times 3,7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} \times 1,66 \times 10^8 \text{ s}}{0,693 \times 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 0,0147 \text{ mol}$$

Επειδή 1 mol  $^{60}\text{Co}$  έχει μάζα 60 g, η μάζα του δείγματος είναι:

$$m = (0,0147 \text{ mol}) (60 \text{ g mol}^{-1}) = 0,882 \text{ g.}$$



**Έκθεση και απορροφηθείσα δόση.** Η έκθεση δείχνει το ποσό του ιοντισμού που προκαλείται σε ένα υλικό, ενώ η απορροφηθείσα δόση εκφράζει την ενέργεια που απορρόφησε το υλικό από την ακτινοβολία που δέχθηκε. **Συνεπώς, η απορροφηθείσα δόση εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού και της ακτινοβολίας, ενώ η έκθεση καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας μόνο.**

Η έκθεση ορίζεται μόνο για τις ακτίνες X και τις ακτίνες γ με ενέργειες μέχρι 3 MeV και όχι για άλλες μορφές ακτινοβολίας.

Μονάδα έκθεσης παλαιότερα ήταν το roentgen (R) που ορίζεται ως το ποσό του θετικού φορτίου από ιοντισμό που προκαλείται σε ένα χιλιόγραμμο ξηρού αέρα υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (1 atm, 0 °C).

$$1 \text{ roentgen (ρέντγκεν)} = 1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (11.6)$$

Δηλαδή, 1 R ακτίνων X ή ακτίνων γ παράγει  $2,58 \cdot 10^{-4}$  C θετικών φορτίων σε ένα χιλιόγραμμο ξηρού αέρα υπό κανονικές συνθήκες και φυσικά ένα ίσο κατά μέτρο ποσό αρνητικών ιόντων. Σήμερα, χρησιμοποιείται η μονάδα του SI που είναι 1 κουλόμπ/χιλιόγραμμο, δηλαδή 1 C/kg.

Η απορροφηθείσα δόση D είναι η ενέργεια που αποδόθηκε στους ιστούς ενός οργανισμού ανά μονάδα μάζας των ιστών. Μονάδα της απορροφηθείσης δόσης ήταν παλαιότερα το 1 rad (radiation absorbed dose) όπου:

$$1 \text{ rad} = 0,01 \text{ J/kg} \quad (11.7)$$

**Έκθεση 1 R σε ακτίνες X ή ακτίνες γ προκαλεί απορροφηθείσα δόση σε μαλακούς ιστούς περίπου 1 rad.** Η μονάδα που χρησιμοποιείται σήμερα και ανήκει στο (SI) είναι το gray (γκρέι)

$$1 \text{ gray (Gy)} = 1 \text{ J/kg}$$

**Αντίθετα με την έκθεση, η απορροφηθείσα δόση χρησιμοποιείται για όλα τα είδη των ακτινοβολιών που μπορούν να προκαλέσουν ιοντισμό και όχι μόνο για τις ακτίνες X και τις ακτίνες γ με ενέργεια μικρότερη από 3 MeV.**

#### □ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 11.2

Είναι γνωστό ότι οι ζωντανοί ιστοί, όταν δεχθούν δόση 10.000 rad καταστρέφονται τελείως. Αν δεχθούμε ότι η ενέργεια που παίρνουν οι ιστοί από την ακτινοβολία παραμένει εξ ολοκλήρου σ' αυτούς, πόσο θα αυξηθεί η θερμοκρασία τους, όταν δεχθούν δόση 1000 rad; (Δίδεται ότι η ειδική θερμότητα των ιστών είναι η ίδια περίπου με αυτή του νερού,  $c = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

**Λύση**

Ξέρουμε από την προηγούμενη τάξη ότι η θερμότητα  $\Delta Q$  που χρειάζεται για να προκαλέσει μεταβολή της θερμοκρασίας κατά  $\Delta T$  σε μάζα ενός υλικού με ειδική θερμότητα  $c$ , είναι:

$$\Delta Q = m c \Delta T \quad (1)$$

Στην περίπτωση μας 10.000 rad ισοδυναμούν με απορροφηθείσα ενέργεια ανά μονάδα μάζας:

$$\frac{\Delta Q}{m} = 1000 \times 0,01 \text{ J kg}^{-1} = 100 \text{ J kg}^{-1} \quad (2)$$

Συνεπώς, από τη σχέση (1) έχουμε:  $\Delta T = \frac{\Delta Q}{m} \frac{1}{c}$

και λόγω της (2) έχουμε:

$$100 \text{ J kg}^{-1} \times \frac{1}{4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}} = 0,0239 \text{ K}$$

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας είναι ασήμαντη. Πώς εξηγείται τότε η θανατηφόρα δράση της ακτινοβολίας; Η απάντηση είναι ότι η ενέργεια της ακτινοβολίας δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την έκταση του ιστού και ότι η δράση των ακτινοβολιών δε σχετίζεται μόνο με την αύξηση της θερμοκρασίας αλλά και με χημικές και πυρηνικές μετατροπές στα άτομα των κυττάρων. Αντίθετα, η ενέργεια λαμβάνεται σε σχετικά μεγάλες ποσότητες από μεμονωμένα άτομα σε συγκεκριμένες τυχαίες θέσεις με αποτέλεσμα την αποσύνθεση κρίσιμων βιολογικών μορίων.

Η απορροφηθείσα δόση αναφέρεται σε ένα φυσικό φαινόμενο, τη μετάδοση ενέργειας σε ένα υλικό. Εν τούτοις, τα αποτελέσματα της ακτινοβολίας σε ένα ζωντανό ιστό εξαρτώνται από το είδος της ακτινοβολίας και από την ενέργειά της. Είναι προφανές ότι άλλη επίδραση θα έχει σε ένα ζωντανό ιστό η ακτινοβολία α από ότι η β, έστω και αν έχουν την ίδια ενέργεια, διότι η ακτινοβολία β είναι πολύ περισσότερο διεισδυτική.

Ο **συντελεστής ποιότητας (QF)** μιας συγκεκριμένης ακτινοβολίας ορίζεται από τη σύγκριση των βιολογικών της αποτελεσμάτων προς εκείνα μιας πρότυπης ακτινοβολίας, που συνήθως είναι η ακτινοβολία Χ ενέργειας 200 keV. Ο συντελεστής ποιότητας (QF) εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας και της ενέργειάς της και από το ζωτικό είδος και το βιολογικό φαι-



νόμενο που εξετάζουμε, όπως φαίνεται στον πίνακα (11.1). Τα θετικά ιόντα (σωματίδια α), που αποδίδουν περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα μήκους διαδρομής τους από ό,τι οι ακτίνες β (ηλεκτρόνια) και οι ακτίνες γ (φωτόνια), γενικά προκαλούν μεγαλύτερη βιολογική καταστροφή από ότι η ίδια η απορροφηθείσα δόση ακτίνων β ή γ. Εντούτοις, η επίδρασή τους συχνά περιορίζεται στην επιφάνεια των ιστών, διότι έχουν πολύ μικρή εμβέλεια.

Η **βιολογικά ισοδύναμη δόση** σε rem (roentgen equivalent for man = ισοδύναμο της ακτινοβολίας roentgen για τον άνθρωπο). Για παράδειγμα, μπορεί να σχηματιστεί καταρράκτης στα μάτια είτε με 1 rad ακτίνων Χ ενέργειας 200 KeV είτε με 0,1 rad νετρονίων, δηλαδή 1 rem. **Σε κάθε περίπτωση η βιολογικά ισοδύναμη δόση (σε rem) ισούται με την απορροφηθείσα δόση (σε rad) επί το συντελεστή ποιότητας QF.**

Ένα rem οποιασδήποτε ακτινοβολίας προκαλεί την ίδια βιολογική φθορά με αυτή που προκαλείται από ένα rad ακτίνων Χ ενέργειας 200 KeV.

Στο διεθνές σύστημα μονάδων η βιολογικά ισοδύναμη δόση μετράται σε sievert (Sv - σίβερ) και ισούται με την απορροφηθείσα δόση σε (Gy) επί τον συντελεστή ποιότητας (QF).

Πίνακας 11.1

| <b>Τυπικές τιμές του QF.</b><br><b>Εξ ορισμού QF = 1 για ακτίνες Χ 200 keV</b> |       |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Ακτινοβολία                                                                    | QF    |
| $^{60}\text{Co}$ ακτίνες γ (1,17 και 1,33 MeV)                                 | 0,7   |
| 4-MeV ακτίνες γ                                                                | 0,6   |
| Ακτίνες β                                                                      | 1,0   |
| Πρωτόνια (1 - 10 MeV)                                                          | 2,0   |
| Νετρόνια                                                                       | 2-10  |
| Ακτίνες α                                                                      | 10-20 |

Πίνακας 11.2

|                          | Μονάδα         | Ορισμός                                                    |
|--------------------------|----------------|------------------------------------------------------------|
| Ενεργότητα               | curie (Ci)     | $3,70 \times 10^{10}$ διασπάσεις/s                         |
|                          | becquerel (Bq) | 1 διάσπαση/s                                               |
| Έκθεση (ακτίνες x ή γ)   | roentgen (R)   | $2,58 \times 10^{-4} \text{ Ckg}^{-1}$ σε ξηρό αέρα (Κ.Σ.) |
| Απορροφηθείσα δόση       | rad            | $0,01 \text{ Jkg}^{-1}$                                    |
|                          | gray (Gy)      | $1 \text{ Jkg}^{-1}$                                       |
| Βιολογικά ισοδύναμη δόση | rem            | $\text{QF} \times (\text{δόση σε rads})$                   |
|                          | sievert (Sv)   | $\text{QF} \times (\text{δόση σε grays})$                  |

## 11.6 ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΧΑΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΞΗ

(Ο Δόκτωρ Τζέκυλ και ο Μίστερ Χάιντ του ενεργειακού μας μέλλοντος)

*Ζυμώνετε, μέρες και νύχτες, ζυμώνετε,  
τον ουράνιο πηλό σας και μεις περιμέναμε,  
αχτίνες ωραίες, παντοδύναμες, αστέρια  
και χρώματα να πεταχτούν απ' τα χέρια σας.  
N. Βρεττάκος (Γράμμα στον P. Οπενχάιμερ)*

Για χιλιάδες χρόνια ο άνθρωπος έπαιρνε την ενέργεια που χρειαζόταν από την καύση των ξύλων στην αρχή, των λιθανθράκων και άλλων μορφών γαι-ανθράκων αργότερα, και του πετρελαίου πρόσφατα. Στην πραγματικότητα όμως εκείνο που εκμεταλλευόταν ήταν η ηλιακή ενέργεια (ενέργεια του Ήλιου που έφτανε στη Γη με τη βοήθεια του φωτός). Πράγματι, η ενέργεια από τη καύση όλων αυτών των υλικών δεν είναι παρά ένα μέρος της ηλιακής ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στα υλικά αυτά κατά τη διάρκεια των εκατομμυρίων χρόνων που προηγήθηκαν της εμφάνισης του ανθρώπου. Οι ανάγκες όμως σήμερα της ανθρωπότητας σε ενέργεια έχουν αυξηθεί τρομακτικά, ενώ συγχρόνως τα διαθέσιμα αποθέματα των πάσης φύσεως καυσίμων, όπως αυτά που αναφέραμε, έχουν μειωθεί σημαντικά και οι προβλέψεις για το κοντινό μέλλον είναι δυσμενείς.

Προβάλλει, συνεπώς, αμείλικτη η ανάγκη της αναζήτησης ενός άλλου τρόπου παραγωγής ενέργειας, που να μη βασίζεται στα παραδοσιακά καύσιμα.

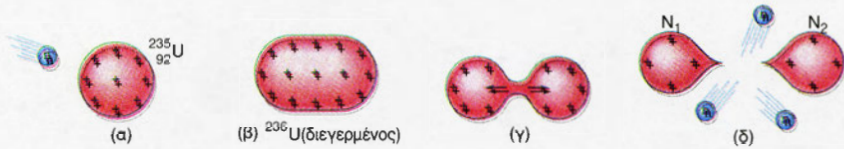
Ο τρόπος αυτός βρέθηκε πριν από 60 περίπου χρόνια, όταν οι γερμανοί φυσικοί Otto Hahn και Fritz Strassman έκαναν μία εντυπωσιακή ανακάλυψη. Βρήκαν ότι το ουράνιο  $-235$  ( $^{235}_{92}\text{U}$ ), όταν βομβαρδιστεί με νετρόνια, χωρίζεται σε δύο μικρότερους πυρήνες με το μισό περίπου μέγεθος από αυτό του αρχικού πυρήνα.

Το νέο αυτό φαινόμενο ονομάστηκε σχάση (fission) και παρατηρείται πιο συχνά στο ουράνιο  $-235$  από ό,τι στο πιο γνωστό ουράνιο  $-238$ .

### 11.6.1 Σχάση

Τη διαδικασία της σχάσης μπορούμε να την συλλάβουμε ως εικόνα, αν φανταστούμε τον πυρήνα του ουρανίου σαν μια σταγόνα νερού (εικ.11.7). Σύμφωνα με αυτή την προσομοίωση, το νετρόνιο που απορροφάται από τον πυρήνα του  $^{235}_{92}\text{U}$  του αυξάνει την εσωτερική ενέργεια (όπως αν θερμάνουμε τη σταγόνα). Η αυξημένη εσωτερική ενέργεια του "διεγερμένου" τώρα πυρήνα εκδηλώνεται με αυξημένη κινητικότητα των πρωτονίων και των νετρονίων του, με αποτέλεσμα να αποκτήσει απροσδόκητα επίμηκες σχήμα

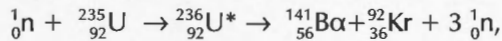
(εικ.11.7β). Όταν ο πυρήνας βρεθεί σ' αυτή την κατάσταση (εικ. 11.7 γ), η έλξη των ακραίων περιοχών του μέσω των μικρής εμβέλειας ισχυρών πυρηνικών δυνάμεων εξασθενίζει, λόγω της αυξημένης απόστασης, και οι ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις επικρατούν. Έτσι, ο πυρήνας θραύεται σε δύο πυρήνες, ενώ συγχρόνως εκτινάσσονται και μερικά νετρόνια (εικ. 11.7δ). Ο σύνθετος πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση παραμένει για χρόνο λιγότερο από  $10^{-12}$  s, κάτι που σημαίνει ότι η διαδικασία εξελίσσεται πολύ γρήγορα.



**Εικόνα 11.7**

Σχάση ενός πυρήνα  $^{235}_{92}\text{U}$  αφού έχει συλλάβει νετρόνιο, σύμφωνα με το μοντέλο της σταγόνας.

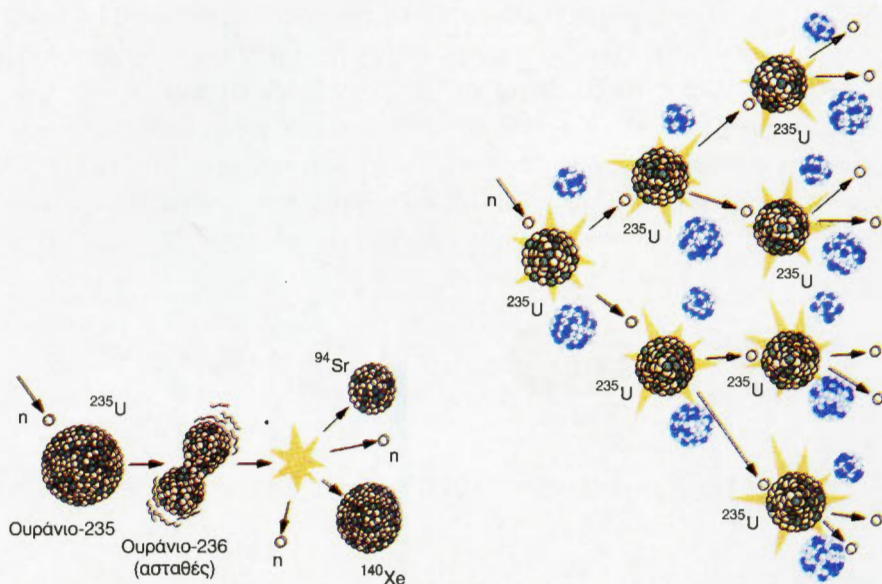
Μια τυπική περίπτωση σχάσης παριστάνεται από την ακόλουθη αντίδραση:



αν και πάρα πολλές άλλες μπορούν να συμβούν.

Τεράστια ποσά ενέργειας απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της σχάσης. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από τη μετατροπή μάζας σε ενέργεια, σύμφωνα με τη σχέση του Άινσταϊν  $E = mc^2$ . Το άθροισμα των μαζών των προϊόντων την σχάσης είναι μικρότερο από την αρχική μάζα του διεγερμένου πυρήνα. Η μάζα που μετατρέπεται σε ενέργεια ισούται με την επιπλέον ενέργεια που χρειάζεται ένας ογκώδης πυρήνας, σαν αυτόν του ουρανίου, για να συγκρατήσει τα πρωτόνια του, και ισούται περίπου με  $3,2 \times 10^{11}$  J. Εκ πρώτης όψεως η ενέργεια αυτή φαίνεται ασήμαντη. Αλλά, αν σκεφτούμε ότι με τη διαδικασία της αλυσιδωτής αντίδρασης (εικ. 11.8) περισσότερες από  $10^{24}$  τέτοιες διασπάσεις μπορούν να συμβούν σε εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου, καταλαβαίνουμε ότι τεράστια ποσά ενέργειας και ισχύος είναι διαθέσιμα σε αξιοποιήσιμο επίπεδο.



**Εικόνα 11.8**

Σχηματική αναπαράσταση μιας αλυσιδωτής αντίδρασης.

Μια **αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση** θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και τα τεράστια ποσά της πυρηνικής ενέργειας θα μπορούσαν να διατεθούν στην κατανάλωση. Ο Fermi (εικ. 11.9) και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι αυτό είναι εφικτό κατασκευάζοντας τον πρώτο πυρηνικό αντιδραστήρα το 1942 (εικ. 11.9).

**Εικόνα 11.9**

Ο Enrico Fermi στο εργαστήριό του. Συνέβαλε ουσιαστικά στην ανάπτυξη της Θεωρητικής όσο και της Πειραματικής Φυσικής.

Από τότε που κατασκευάστηκε ο πρώτος αυτός πυρηνικός αντιδραστήρας έως σήμερα, πολλοί αντιδραστήρες έχουν κατασκευαστεί σε διάφορες χώρες και έχουν συντελέσει στην αντιμετώπιση του ενεργειακού προβλήματος σε ένα σημαντικό ποσοστό, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δε δημιούργησαν άλλα προβλήματα, ίσως εξίσου σοβαρά, όπως θα δούμε.

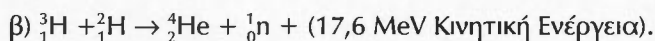
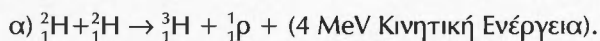


## 11.6.2 Σύντηξη

Η λύση του ενεργειακού προβλήματος της ανθρωπότητας θα μπορούσε ίσως να είναι η ενέργεια που ελευθερώνεται κατά την αντίστροφη ακριβώς διαδικασία της σχάσης που είναι η σύντηξη δύο ελαφρών πυρήνων σε ένα βαρύτερο. Η πυρηνική σύντηξη αποτελεί πολύ περισσότερο ελκυστική λύση ως μέθοδος παραγωγής ενέργειας, τόσο διότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι πρακτικά ανεξάντλητα όσο και διότι τα τελικά προϊόντα της είναι σταθερά και δεν παρουσιάζουν τα γνωστά προβλήματα διάθεσης των πυρηνικών αποβλήτων της σχάσης.

Εν τούτοις η επίτευξη της ελεγχόμενης σύντηξης και η λήψη από αυτή χρήσιμης ισχύος είναι ακόμη και σήμερα μια μεγάλη επιστημονική και τεχνολογική πρόκληση.

Σήμερα οι προσπάθειες για επίτευξη ελεγχόμενης σύντηξης επικεντρώνονται στις αντιδράσεις μεταξύ των ισοτόπων του υδρογόνου, του δευτέρου ( $^2\text{H}$ ) και του τρίτιου ( $^3\text{H}$ ).



Και στις δύο περιπτώσεις οι θετικοί πυρήνες πρέπει, για να πλησιάσουν τόσο πολύ ώστε να δράσουν οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις και να τους ενώσουν, να υπερνικήσουν τις ισχυρές απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις. Για να το επιτύχουν αυτό, χρειάζονται να έχουν κινητική ενέργεια τουλάχιστον 0,2 MeV. Τέτοιες κινητικές ενέργειες μπορούν να αποκτήσουν οι πυρήνες του δευτέρου και του τρίτιου, αν βρεθούν σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από μερικά εκατομμύρια βαθμούς Κελσίου.

Ο Ήλιος και τα άλλα άστρα έχουν θερμοκρασία αρκετών εκατομμυρίων βαθμών στο εσωτερικό τους και έτσι μπορούν και συντηρούν αντιδράσεις σύντηξης. Όλη η ενέργεια που εκπέμπει ο Ήλιος προέρχεται από τη διαδικασία της σύντηξης. Ο Ήλιος με τη διαδικασία της σύντηξης μετατρέπει σε ενέργεια κάθε δευτερόλεπτο περίπου  $4,4 \times 10^6$  τόνους μάζας, την οποία ακτινοβολεί στο διάστημα.

Από όσα είπαμε έως τώρα, καταλαβαίνει κανείς ότι, παρ' όλο που οι ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας συνεχώς αυξάνουν, οι προσπάθειες για εξεύρεση άφθονης, φτηνής και ασφαλούς πηγής ενέργειας δεν έχουν ακόμη καρποφορήσει και ίσως να καθυστερήσουν πολύ ακόμη. Πρέπει, επομένως, να καταβάλουμε συνεχή και συστηματική προσπάθεια για εξοικονόμηση και ορθολογική χρήση των διαθέσιμων ενεργειακών πηγών, και ακόμη για την εκμετάλλευση και την αξιοποίηση στο μέγιστο δυνατό βαθμό των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας (αιολική, ηλιακή, γεωθερμική κτλ.).

## 11.7 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

*Φίλε Οπενχάιμερ, βάζοντας τ' αυτί σας στο χώμα,  
στο βάρος που υπάρχει σ' ένα ψίχουλο άμμου,  
θ' ακούσετε τη διπλή του βοή.  
Μοιρασμένα το φως και το σκότος στα βάθη του,  
το καθένα τους χωριστά περιμένουν.  
Το φως περιμένει το χέρι μας.  
Το σκότος το λάθος μας.  
N. Βρεττάκος (Γράμμα στον . Οπενχάιμερ)*

Είναι αλήθεια δύσκολο να συλλάβει κανείς πόσο λίγα γνωρίζουμε για κάτι που με τόση ευκολία χρησιμοποιούμε. Κανένας στην πραγματικότητα δεν ξέρει σε πόση ραδιενέργεια και για πόσο χρονικό διάστημα μπορεί να εκτεθεί ο ανθρώπινος οργανισμός χωρίς σοβαρό κίνδυνο. Και όμως, συνεχώς καταρτίζονται προγράμματα παραγωγής ενέργειας με πυρηνικά εργοστάσια σε όλο και πιο πολλές χώρες. Άραγε η αιτία είναι η παντελής αδιαφορία για τον άνθρωπο μπροστά στην προοπτική του εύκολου κέρδους ή η εγκληματική άγνοια των επιστημονικών δεδομένων από εκείνους που παίρνουν τις αποφάσεις;

Όλοι οι κάτοικοι του πλανήτη είμαστε κατά κάποιο τρόπο πειραματόζωα αφού καθημερινά δεχόμαστε αρκετές ποσότητες ραδιενέργειας που εκπέμπεται από φυσικές και τεχνητές πηγές. Σύμφωνα με στατιστικές, ο μέσος Ευρωπαίος εκτίθεται κάθε χρόνο σε συνολική ακτινοβολία 100 - 200 mrem, που αντιστοιχεί σε 10 - 20 ακτινογραφίες. Η μισή τουλάχιστον από αυτή την ποσότητα προέρχεται από τον ήλιο και τις κοσμικές ακτίνες που διαπερνούν το φυσικό φίλτρο της ατμόσφαιρας, το 45% από τα ιατρικά μηχανήματα και το υπόλοιπο 5% από τα πυρηνικά απόβλητα που θάβονται στη γη, τα κοιτάσματα ραδιενεργών ουσιών, τα πυρηνικά εργοστάσια και ακόμα από κοινές οικιακές συσκευές όπως οι τηλεοράσεις και οι κουζίνες.

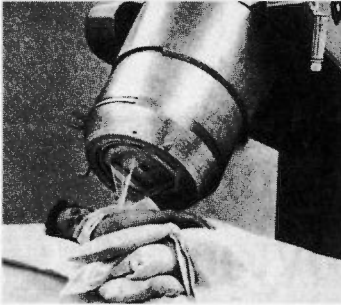
Οι συνέπειες της ραδιενέργειας οφείλονται στην επίδραση των ακτινοβολιών που τη συνοδεύουν στους ζωντανούς κυρίως οργανισμούς. Λέγοντας ακτινοβολίες εννοούμε τις α (πυρήνες ηλίου), τις β (ηλεκτρόνιο), τις γ (ηλεκτρομαγνητική πολύ υψηλής συχνότητας). Σ' αυτές μπορούμε να συμπεριλάβουμε και τις ακτίνες -X- καθώς και την υπεριώδη ακτινοβολία. Όλες οι προηγούμενες ακτινοβολίες, επειδή μπορούν να προκαλέσουν ιοντισμό των ατόμων της ύλης που συναντούν στη διαδρομή τους, ονομάζονται **ιοντίζουσες ακτινοβολίες**.

Όπως όλα τα πράγματα που έχει εφεύρει ο άνθρωπος έτσι και η ραδιενέργεια έχει δύο όψεις την καλή και την κακή.

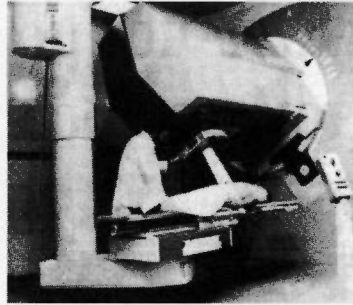
► Θα αναφερθούμε πρώτα στις θετικές συνέπειες της ραδιενέργειας.

Οι ενεργητικές εφαρμογές των ραδιοσοτόπων και των ακτινοβολιών στην ιατρική είναι πάρα πολλές. Είναι γνωστό ότι με τα ραδιοϊσότοπα ανιχνεύουμε και με την ακτινοβολία που εκπέμπουν καταπολεμούμε τα νεοπλάσματα (καρκίνους) που αναπτύσσονται σε διάφορα όργανα του ανθρώπου.

Αλλά και με απευθείας ακτινοβολήση από εξωτερικές πηγές και με κατάλληλα όργανα (εικ. 11.11 και εικ. 11.12) επιτυγχάνεται η καταπολέμηση του καρκίνου στις διάφορες μορφές του.



Εικόνα 11.11



Εικόνα 11.12

Οι εφαρμογές της ραδιενέργειας δεν περιορίζονται μόνο στη θεραπευτική και διαγνωστική αξιοποίησή της.

Σε πάρα πολλούς τομείς της τεχνολογίας και της επιστήμης η ραδιενέργεια βοήθησε και βοηθά την εξέλιξη. Η Γεωλογία, η Γεωπονική, η Υδρολογία, η Μεταλλουργία είναι μερικοί μόνο από τους τομείς στους οποίους η ραδιενέργεια προσέφερε σημαντικές υπηρεσίες. Αλλά και τεχνολογικές εφαρμογές, όπως ο πυρηνικός ανιχνευτής φωτιάς και το πυρηνικό αλεξικέραυνο, είναι μερικές μόνο από τις πρακτικές εφαρμογές της.

Τέλος, δεν πρέπει να παραλείψουμε την συμβολή της ραδιενέργειας στην Ιστορία και στην Τέχνη. Στην Ιστορία συνέβαλε ουσιαστικά με τον προσδιορισμό της ηλικίας των διάφορων αρχαιολογικών ευρημάτων με τη μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης με  $^{14}\text{C}$ . Στην Τέχνη συνέβαλε με τη δυνατότητα ανίχνευσης ελάχιστων ποσοτήτων χρωστικών, ώστε να καθίσταται δυνατή η αποκατάσταση φθαρμένων έργων τέχνης.

Ακόμη η ακτινοβολήση με ραδιενέργεια χρησι-



Εικόνα 11.13

Το σεντόνι του Τορίνο που πιστεύεται ότι απεικονίζει το πρόσωπο του Χριστού. Με τη μέθοδο της ραδιοχρονολόγησης με  $\text{C-14}$  διαπιστώθηκε ότι υφάνθηκε μεταξύ των ετών 1260-1390 μ.Χ.

μπορείται στη βιομηχανία τροφίμων για την συντήρηση των τροφών, αφού με αυτό τον τρόπο νεκρώνονται, όπως θα δούμε, τα ζωντανά κύτταρα και οι λοιποί μικροοργανισμοί, αλλά και για την αποστείρωση διάφορων συσκευών καισκευασμάτων.

### ► Βλαβερές συνέπειες της ραδιενέργειας.

Τα διάφορα υλικά σώματα, όταν εκτίθενται σε ραδιενεργό ακτινοβολία, υφίστανται διάφορες αλλοιώσεις.

Το μέγεθος των αλλοιώσεων αυτών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι: το είδος της ακτινοβολίας, η ενέργεια της ακτινοβολίας και η φύση του ακτινοβολούμενου υλικού.

Μπορούμε να επιδράσουμε στις ιδιότητες π.χ. διάφορων υλικών και να τις βελτιώσουμε ή να τις αποδυναμώσουμε, αν τα εκθέσουμε επί μακρό χρονικό διάστημα σε έντονη ακτινοβολή. Αυτό οφείλεται στο ότι οι συνεχείς συγκρούσεις των σωματιδίων των διάφορων ακτινοβολιών με τα άτομα των υλικών επιφέρουν μετατόπιση αυτών με αποτέλεσμα τη μεταβολή της κρυσταλλικής δομής του υλικού και, κατά συνέπεια, των ιδιοτήτων του που επηρεάζονται από αυτή. Κάτι τέτοιο π.χ. συμβαίνει με το υλικό της “καρδιάς” των πυρηνικών αντιδραστήρων.

Στους ζωντανούς οργανισμούς οι ραδιενεργές ακτινοβολίες μπορεί να έχουν πολύ σοβαρότερες συνέπειες. Όταν ακτινοβολία διέρχεται από ζωντανά κύτταρα, μπορεί να αλλάξει ή να καταστρέψει τη δομή σημαντικών μορίων, με αποτέλεσμα την δυσλειτουργία ή και το θάνατο των κυττάρων αυτών και τελικά ολόκληρου του οργανισμού. Συνήθως, τα κύτταρα που αναπτύσσονται ή διαιρούνται πιο γρήγορα είναι τα πλέον ευαίσθητα στη ραδιενεργό ακτινοβολή. Τα καρκινικά κύτταρα πολλαπλασιάζονται πολύ πιο γρήγορα και αυτό ακριβώς εκμεταλλευόμαστε, για να τα καταπολεμήσουμε με την ακτινοβολή. Για τον ίδιο λόγο τα έμβρυα και τα νήπια είναι πολύ πιο ευπρόσβλητα στην ακτινοβολή από ό,τι οι ενήλικες. **Αυτός είναι και ο λόγος που δεν πρέπει οι έγκυες γυναίκες να εκτίθενται στην ακτινοβολή-ση ακόμη και μιας απλής ακτινογραφίας.**

Η περιορισμένη γνώση που έχουμε για τις άμεσες συνέπειες που έχει στους ανθρώπους η ραδιενεργός ακτινοβολή σε μεγάλες δόσεις προέρχεται μόνο από την παρατήρηση των θυμάτων των ατομικών βομβών της Χιροσίμα και του Ναγκασάκι και των ατυχημάτων που έχουν συμβεί στους πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

Πλήρης έκθεση του ανθρώπου σε δόσεις κάτω των 25 rem δεν έχει παρατηρήσιμες συνέπειες.

Αύξηση της δόσης σε 100 rem προκαλεί βλάβη στο μυελό των οστών και με δόση πάνω από 800 rems εμφανίζονται διαταραχές στο γαστροπεπτικό



σύστημα. Για δόση μεγαλύτερη από 500 rem ο θάνατος επέρχεται μετά από διάστημα μερικών ημερών ή εβδομάδων.

Μη θανατηφόρες δόσεις, δόσεις μικρής διάρκειας και δόσεις που ελήφθησαν σταδιακά σε μακρά χρονικά διαστήματα, μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο μετά από μια λανθάνουσα περίοδο μερικών χρόνων, κατά τη διάρκεια της οποίας δεν είναι ανιχνεύσιμα σημάδια ασθένειας.

Η πιθανότητα θανάτου από καρκίνο διπλασιάζεται, όταν η δόση βρίσκεται μεταξύ των 100 και 500 rem. Από πολλά πειράματα σε ζώα και από τα διαθέσιμα στοιχεία παρατηρήσεων σε ανθρώπους συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αύξηση στην πιθανότητα εμφάνισης καρκίνου είναι ευθέως ανάλογη της συνολικά συσσωρευμένης δόσης κάθε μορφής (ακτινοβολία -Χ-, ακτινοβολία υπεριώδη, α, β, γ, κοσμική).

### ► ΓΕΝΕΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.

Αν και οι γενετικές μεταλλάξεις που συνέβησαν στα βιολογικά είδη κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων χρόνων μαζί με τη φυσική επιλογή απετέλεσαν τον κύριο μηχανισμό για την εμφάνιση του ανθρώπινου είδους στην σημερινή μορφή του, οι περισσότερες αιφνίδιες μεταλλάξεις είναι επιβλαβείς.

Κάθε αύξηση στο ρυθμό μεταλλάξεων του γενετικού υλικού των κυττάρων σημαίνει περισσότερους θανάτους εμβρύων αλλά και περισσότερες γεννήσεις ανθρώπων με εκ γενετής ανωμαλίες. Αυτό, πέρα από την προσωπική τραγωδία που συνεπάγεται, σημαίνει ότι, με την αυξημένη σήμερα ικανότητα της ιατρικής επιστήμης να διατηρεί τους ανθρώπους αυτούς ζωντανούς μέχρι την πιθανή αναπαραγωγή τους, αυξάνεται και η συσσώρευση ελαττωματικών γονιδίων στη γενετική δεξαμενή του ανθρώπινου γένους, με αποτέλεσμα το σταδιακό εκφυλισμό του.

Οι μεταλλάξεις, εκτός από τη ραδιενεργό ακτινοβολία, μπορεί να αυξηθούν πάνω από το μέσο όρο και από άλλες αιτίες π.χ. αυξημένη θερμοκρασία, λήψη χημικών ουσιών κτλ. Οι μεταλλάξεις που προκαλούνται από την ακτινοβολία είναι όμοιες με αυτές που συμβαίνουν φυσιολογικά. Σήμερα, είναι αποδεκτό ότι ο ρυθμός τους είναι ανάλογος προς την απορροφούμενη δόση, ανεξάρτητα από το πόσο μικρή είναι, και **δεν υφίσταται όριο ασφαλείας ή μηχανισμός αποκατάστασης**. Η δόση που διπλασιάζει το ρυθμό μεταλλάξεων είναι ανάμεσα στα 25 και 150 rem.

Πίνακας 11.3

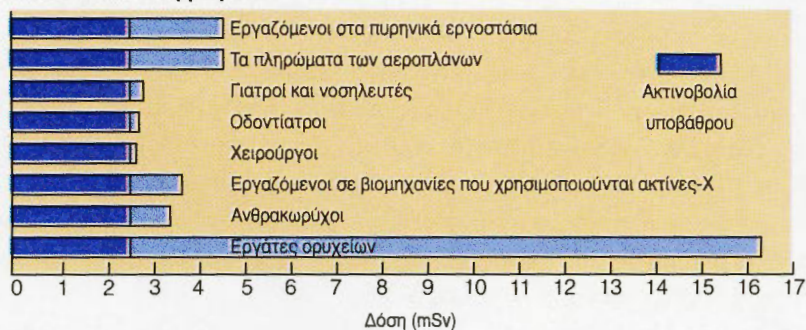
Επιπτώσεις της ραδιενέργειας στους ανθρώπους

| Δόση (mSv) | Όρια - Αποτελέσματα                                           |
|------------|---------------------------------------------------------------|
| 5          | Ετήσια μέγιστη επιτρεπόμενη δόση για κάθε άνθρωπο.            |
| 50         | Ετήσιο ανεκτό όριο για ασθενείς και εργαζομένους.             |
| 1000       | Ραδιοασθένεια.                                                |
| 1500       | Μείωση των σπερματοζωαρίων και ωαρίων (πρόκληση στειρότητας). |
| 2500       | Στείρωση για πάνω από δύο χρόνια.                             |
| 4000       | Πιθανότητα θανάτου 50%.                                       |
| 10000      | Θάνατος.                                                      |

Πίνακας 11.4

Μερικοί άνθρωποι εκτίθενται σε πρόσθετη ακτινοβολία εξαιτίας του επαγγέλματός τους

## Ακτινοβολία και επαγγέλματα



Από όλα όσα αναφέραμε, καταλαβαίνει κανείς ότι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα της εποχής μας είναι η διάθεση και η ασφαλής αποθήκευση των πυρηνικών αποβλήτων.

Οι πυρηνικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η βιομηχανία, τα νοσοκομεία και τα ερευνητικά εργαστήρια, όλα παράγουν ραδιενεργά απόβλητα (σκουπίδια). Δεν είναι μόνο τα ραδιενεργά υλικά αυτά καθεαυτά το πρόβλημα, αλλά και τα μολυσμένα από ραδιενέργεια ρούχα, εργαλεία και κάθε είδους άλλο υλικό. Ιδιαίτερα για τους πυρηνικούς αντιδραστήρες, το πρόβλημα είναι έντονο, διότι τα προϊόντα των πυρηνικών αντιδραστήρων, καθώς και τα μέταλλα της καρδιάς του αντιδραστήρα, όταν αυτή αντικαθίσταται, περιέχουν ισότοπα με μεγάλους χρόνους υποδιπλασιασμού και πρέπει να αποθηκευτούν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να μην

προκαλέσουν περαιτέρω μόλυνση του περιβάλλοντος.

Τα πυρηνικά απόβλητα σήμερα μεταφέρονται σε διάφορες περιοχές του πλανήτη και, αφού τοποθετηθούν σε καλά σφραγισμένα μεταλλικά κιβώτια, ελεγμένα, ώστε να αντέχουν στη μακροχρόνια διάβρωση και σε κάθε άλλου είδους παραμόρφωση, θάβονται βαθιά στο υπέδαφος.



## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ - ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Τι ονομάζουμε ραδιενέργεια;
2. Που οφείλεται η ραδιενέργεια;
3. Ποιες είναι οι συνιστώσες της ραδιενεργού ακτινοβολίας;
4. Τι είδους είναι η κάθε συνιστώσα της ραδιενεργού ακτινοβολίας;
5. Με ποιο τρόπο μπορούμε να διαπιστώσουμε το είδος της κάθε συνιστώσας της ραδιενεργού ακτινοβολίας;
6. Περιγράψτε έναν απαριθμητή Geiger.
7. Εξηγείστε με λίγα λόγια τη λειτουργία του απαριθμητή Geiger.
8. Η κοσμική ..... διακρίνεται σε ..... και δευτερογενή.  
Συμπληρώστε τα κενά.
9. Η ..... κοσμική ακτινοβολία αποτελείται κυρίως από ..... ενώ η ..... αποτελείται από ένα καταιγισμό ....., ποζιτρονίων, ....., ..... και φωτονίων.  
Συμπληρώστε τα κενά.
10. Ποιες είναι οι τέσσερις βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν μια ραδιοακτινοβολήση;
11. Ενεργότητα είναι ο ..... διασπάσεων των πυρήνων ενός ..... υλικού.  
Συμπληρώστε τα κενά.

12. Έκθεση είναι το ποσό του ..... που προκαλείται λόγω ..... σ' ένα υλικό.

Συμπληρώστε τα κενά.

13. Απορροφηθείσα δόση είναι η ..... που απορρόφησε το ..... από την ..... που δέχθηκε.

Συμπληρώστε τα κενά.

14. Το 1 Ci είναι μονάδα:

α) Απορροφηθείσας δόσης, β) Ενεργότητας, γ) Έκθεσης.

Σημειώστε το σωστό.

15. Το 1 Ci ισούται με:

α)  $7,3 \times 10^6$  διασπάσεις / s, β)  $3,7 \times 10^{10}$  διασπάσεις / s

γ)  $7,3 \times 10^{20}$  διασπάσεις / s .

Σημειώστε το σωστό

16. Το 1 Bq είναι μονάδα:

α) Ενεργότητας, β) Απορροφηθείσας δόσης, γ) Έκθεσης.

Σημειώστε το σωστό.

17. Το 1 Bq ισούται με:

α) 1000 διασπάσεις /s, β) 1 διάσπαση /s, γ) 10 διασπάσεις /s.

Σημειώστε το σωστό.

18. Το R (roentgen) είναι μονάδα:

α) Ενεργότητας, β) Έκθεσης, γ) Απορροφηθείσας δόσης.

Σημειώστε το σωστό.

19. Το R (roentgen) ορίζεται ως το ..... του ..... φορτίου από ..... που προκαλείται σε 1 kg ξηρού ..... υπό ..... συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Συμπληρώστε τα κενά.

20. Ένα R (roentgen) ισούται με:

α)  $5,5 \times 10^{-5}$  C/kg, β)  $2,58 \times 10^{-4}$  C/kg, γ)  $3,72 \times 10^{-6}$  C/kg.

Σημειώστε το σωστό.

21. Προκειμένου για ζωντανούς οργανισμούς η απορροφηθείσα δόση είναι η ..... που απεδόθη στους ..... τους οργανισμούς ανά ..... μάζας των ιστών.

Συμπληρώστε τα κενά.



22. Το rad είναι μονάδα:

- α) Ενεργότητας, β) Απορροφηθείσας δόσης, γ) Έκθεσης.

Σημειώστε το σωστό.

23. Το 1 rad ισούται με:

- α) 0,1 J/kg, β) 0,01 J/kg, γ) 0,001 J/kg.

Σημειώστε το σωστό.

24. Το Gy (gray) είναι μονάδα:

- α) Ενεργότητας, β) Έκθεσης, γ) Απορροφειθείσας δόσης.

Σημειώστε το σωστό.

25. Έκθεση 1 R σε ακτίνες ..... ή ακτίνες ..... προκαλεί απορροφηθείσα ..... σε μαλακούς ..... περίπου .....

Συμπληρώστε τα κενά.

26. Ο συντελεστής ποιότητας (QF) μιας συγκεκριμένης ..... ορίζεται από τη σύγκριση των ..... αποτελεσμάτων προς εκείνα μιας ..... ακτινοβολίας που συνήθως είναι η ακτινοβολία ....., ενέργειας .....

Συμπληρώστε τα κενά.

27. Ο συντελεστής ποιότητας (QF) εξαρτάται από το ..... της ακτινοβολίας και την ..... της από το ..... είδος και το ..... φαινόμενο που εξετάζουμε.

Συμπληρώστε τα κενά.

28. Η μονάδα μέτρησης της βιολογικά ισοδύναμης δόσης είναι:

- α) 1 ram, β) 1 rem, γ) 1 rom

Σημειώστε το σωστό.

29. Σε κάθε περίπτωση η βιολογικά ..... δόση (σε rem) ..... με την ..... δόση (σε rad) επί τον ..... ποιότητας (QF).

Συμπληρώστε τα κενά.

30. Ένα rem οποιασδήποτε ακτινοβολίας προκαλεί την ίδια βιολογική φθορά μ' αυτή που προκαλείται από:

- α) 1 rad ακτινών - X - 100 KeV

- β) 1 rad ακτινών - X - 200 KeV

γ) 1 rad ακτινών – X – 500 KeV

δ) Τίποτα από τα προηγούμενα.

Σημειώστε το σωστό.

31. Στο διεθνές σύστημα μονάδων η βιολογικά ισοδύναμη δόση μετράται σε:

α) rem    β) rad    γ) bq    δ) Sv

Σημειώστε το σωστό.

32. Συμπληρώστε σωστά τις ακόλουθες σχέσεις:

α)  $\text{Rem} = QF \times (\dots\dots\dots)$ , β)  $\dots\dots = QF \times (\text{Gy})$

γ)  $\dots\dots = QF \times (\text{rad})$ , δ)  $\text{Sv} = QF \times (\dots\dots)$

33. Στους ζωντανούς οργανισμούς οι ραδιενεργές ακτινοβολίες μπορεί να έχουν πολύ σοβαρές συνέπειες διότι:

α) Υπό ορισμένες προϋποθέσεις μπορεί να προκαλέσουν τον άμεσο θάνατο.

β) Κάτω από άλλες προϋποθέσεις μπορεί να προκαλέσουν την εμφάνιση και ανάπτυξη καρκίνου.

γ) Μπορεί να προκαλέσουν γενετικές ανωμαλίες λόγω πρόκλησης μεταλλάξεων.

δ) Προκαλούν μεταδοτικές ασθένειες.

Σημειώστε το λάθος.

34. Η πιθανότητα θανάτου από καρκίνο διπλασιάζεται όταν η δόση βρίσκεται ανάμεσα:

α) 10 και 50 rem, β) 50 και 100 rem, γ) 100 και 500 rem.

Σημειώστε το σωστό.

35. Η δόση που διπλασιάζει το ρυθμό μεταλλάξεων βρίσκεται ότι είναι ανάμεσα στα:

α) 5 – 10 rem, β) 10 – 25 rem, γ) 25 – 150 rem.

Σημειώστε το σωστό.

36. Σήμερα όσον αφορά τη πρόκληση μεταλλάξεων είναι γενικά αποδεκτό ότι:

α) Είμαστε ασφαλείς εφόσον η συνολική απορροφηθείσα δόση είναι μικρότερη από:

i) 200 rem    ii) 100 rem    iii) 10 rem

β) Δεν υφίσταται όριο ασφαλείας και γι' αυτό πρέπει να αποφεύγουμε

ακόμη και την παρατεταμένη έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία του Ήλιου.

Σημειώστε το σωστό.

37. Ο λόγος για τον οποίο οι έγκυες γυναίκες δεν πρέπει να βγάζουν ούτε μια ακτινογραφία είναι:

α) Μπορεί να ζαλιστούν.

β) Μπορεί να λιποθυμήσουν.

γ) Γιατί τα κύτταρα του εμβρύου που πολλαπλασιάζονται είναι πολύ πιο ευαίσθητα στην ακτινοβολήση.

Σημειώστε το σωστό.

38. Σχάση ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο ένας ..... πυρήνας ..... σε δύο άλλους ..... πυρήνες.

Συμπληρώστε τα κενά.

39. Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη σχάση προέρχεται από τη ..... μάζα σε ..... σύμφωνα με τη σχέση....., διότι το ..... την μαζών των ..... της σχάσης είναι ..... από την αρχική μάζα του ..... πυρήνα.

Συμπληρώστε τα κενά.

40. Σύντηξη ονομάζουμε το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ..... πυρήνες ενώνονται σε ένα ..... πυρήνα.

Συμπληρώστε τα κενά





# **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## **ΕΛΛΗΝΙΚΗ**

1. Κ. Αλεξόπουλος Δ. Μαρίνος, "Φυσική" εκδ. Στρουμπούκη
2. Γ. Καλκάνης, Δ. Κωστόπουλος "Φυσική Μηχανική"
3. Π. Ευθυμίου, Κ. Ευταξίας, Κ. Κουρούτας, Π. Σκούντζος "Φυσική Ι (Οπτική - Μηχανική)"
4. Κ. Ευταξίας, Θ. Λεβεντούρη, Π. Σκούντζος "Οδηγός Μελέτης για την Κυματική Οπτική"
5. Δ. Κωστόπουλος, Θ. Κλωνάρη "Ο Κόσμος μας - Επιστήμες της Γης"

## **ΞΕΝΗ**

1. J. T. Shipman, J. D. Wilson, A. W. Todd. "An introduction to physical science" Houghton Mifflin Company.
2. J. D. Cutnell, K. W. Johnson, "Physics", John Wiley and Sons, Inc.
3. J. I. Childers, "Physics", Mc Graw Hill.
4. S. Parsons, I. Pritchard, "Physics", Collins GCSE Sciences.
5. Mitchel Wilson "Energy", Life Science Library.
6. D. C. Heath and Company "Physics", Physical Science Study Comittee.
7. D. C. Giancoli "Physics: Principles with Applications" Prentice Hall Upper Saddle River.
8. F. J. Bueche, D. A. Jerde "Principles of Physics" Mc Graw-Hill.
9. P. M. Fishbane, S. Gasiorowicz, S. T. Thornton "Physics for scientists and Engineers", Prentice Hall Upper Saddle River.
10. J. Schad "Physical Science: A Unified Approach" Brooks/Cole Publishing Company.
11. K. Dobson, D. Grace, D. Lovett "Physics" Collins Educational.
12. J. Jardine "Physics is fun", Heineman Educational Books.
13. J. Breithaupt "Understanding Physics for Advanced Level", Stanley Thornes.
14. D. G. Hewitt "Οι Έννοιες της Φυσικής" Τόμος Ι και ΙΙ, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης.
15. R. A. Serway "Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics", Saunders Golden Sunburst Series, Saunders College Publishing.

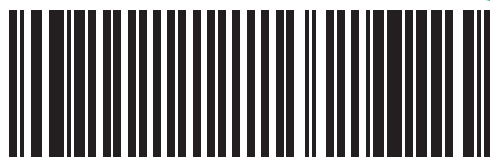
Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του Νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946, 108, Α').

*Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Διά Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων/ ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.*



Κωδικός βιβλίου: 0-24-0009  
ISBN 978-960-06-3197-5

**ITYE**  
"ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ"  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΕΚΔΟΣΕΩΝ



(01) 000000 0 24 0009 9