

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Όταν είμαστε υποχρεωμένοι να πορευθούμε στο σκοτάδι, στο άγνωστο, όπου δεν γνωρίζουμε τί ενδέχεται να συναντήσουμε, το άμεσο και φυσιολογικό συναίσθημα είναι ο φόβος απροσδιόριστων κινδύνων και ίσως μη δικαιολογημένος πανικός. Οι διαστάσεις ενδεχόμενων κινδύνων διογκώνονται, πράγμα που δεν επιτρέπει τη νηφάλια αντιμετώπιση και που, με τη σειρά του, ενδέχεται να επιφέρει, και συνήθως επιφέρει, πολύ σημαντικότερες αρνητικές επιπτώσεις από εκείνες του πραγματικού κινδύνου, ιδίως αν αυτός αντιμετωπισθεί νηφάλια και με την αντικειμενικότητα της επιστημονικής γνώσης.

Τυπική τέτοια περίπτωση είναι αυτή της ραδιενέργειας, η οποία αντιμετωπίζεται με υπερβολικό φόβο, ακριβώς λόγω της περί αυτήν άγνοιας. Δύο ενδεικτικά παραδείγματα, ένα παλαιότερο και ένα πρόσφατο:

Από ατύχημα στον αντιδραστήρα 4 του Τσέρνομπιλ τον Απρίλιο του 1986 ήλθε και στη χώρα μας ραδιενεργό νέφος στις αρχές Μαΐου 1986. Μέρος αυτού του νέφους εναποτέθηκε με τις βροχές στο έδαφος, σε μεγαλύτερο βαθμό στη δυτική Μακεδονία και στη Βόρειο Θεσσαλία. Μολονότι υπήρξε σημαντική και μακροχρόνια ραδιενεργός ρύπανση των εδαφών αυτών, όπως εκτιμούσαμε τότε, και όπως θα δούμε, είναι πλέον επιστημονικά τεκμηριωμένο ότι οι επιπτώσεις στην υγεία του πληθυσμού της Ελλάδας είναι ασήμαντες. Η σημαντικότερη επίπτωση στην υγεία του πληθυσμού από την έλευση αυτού του νέφους υπήρξε ο πανικός και οι εξ αυτού αναίτιες 3.000 εκτρώσεις.

Κατά την διάρκεια του πολέμου στην Γιουγκοσλαβία (1999) και μετά από αυτόν (2000) υπήρξε έντονος φόβος στη χώρα μας, και περισσότερο στον πληθυσμό της βόρειας Ελλάδας, ότι είχαν μεταφερθεί στην ατμόσφαιρα της χώρας μας ποσότητες απεμπλουτισμένου ουρανίου ικανές να επιβαρύνουν την υγεία του πληθυσμού. Τούτο δε παρά τις διαβεβαιώσεις περί του αντιθέτου των αρμοδίων επιστημόνων και της Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε), οι οποίες βασίζονταν όχι μόνο σε επιστημονικές εκτιμήσεις, αλλά κυρίως σε εκτεταμένες και επανειλημμένες μετρήσεις στη βόρεια Ελλάδα μέχρι και τα σύνορά μας. Στη συνέχεια υπήρξε πανι-

κός στους Έλληνες στρατιώτες που υπηρετούσαν στη Βοσνία και στο Κόσοβο. Και αυτός ο πανικός ήταν επιστημονικά αβάσιμος, όπως προέκυψε από τις εκτεταμένες μετρήσεις κλιμακίων της Ε.Ε.Α.Ε στους χώρους όπου διαβιούν και επιχειρούν οι Έλληνες στρατιώτες. Οι μετρήσεις αυτές απέδειξαν ότι ουδείς κίνδυνος υπήρχε για την υγεία τους από απεμπλουτισμένο ουράνιο.

Και στις δύο αυτές περιπτώσεις καθοριστικός παράγον για την πρόκληση πανικού υπήρξε η εκτεταμένη κινδυνολογία, διά των Μ.Μ.Ε, ημιμαθών ως προς την ραδιενέργεια επιστημόνων. Η ανεύθυνη κινδυνολογία κατέστη αποτελεσματική ακριβώς λόγω του φόβου προς την άγνωστη για το ευρύ κοινό και μη ορατή ραδιενέργεια. Αλλά, βεβαίως, η ραδιενέργεια μετρείται και προσδιορίζεται με ειδικά όργανα από εξειδικευμένους επιστήμονες.

Σκοπός του βιβλίου αυτού είναι να εκλαϊκεύσει τη ραδιενέργεια, χωρίς επιστημονικούς συμβιβασμούς, ώστε ο υπεύθυνος πολίτης, όντας ενημερωμένος, να είναι σε θέση να εκτιμά νηφάλια τους ενδεχόμενους κινδύνους και να αξιολογεί σχετικές προτάσεις και θέσεις που σχετίζονται με την υγεία, την ποιότητα ζωής και το περιβάλλον.

Το βιβλίο απευθύνεται σε μαθητές και αποφοίτους Λυκείου, σε φοιτητές και πτυχιούχους ΑΕΙ και ΤΕΙ όλων των γνωστικών αντικειμένων. Η κατανόησή του δεν προϋποθέτει μαθηματικές γνώσεις, πλην των τεσσάρων πράξεων της αριθμητικής: πρόσθεσης, αφαίρεσης, πολλαπλασιασμού και διαίρεσης. Έχει γραφεί με αφετηρία την υπόθεση ότι ο αναγνώστης δεν έχει γνώσεις φυσικής. Έτσι, στην Εισαγωγή (ενότητα I) περιγράφονται από μηδενική βάση με απλό τρόπο και με αναδρομή σε προσλαμβάνουσες παραστάσεις του καθενός, οι έννοιες της φυσικής και τα φαινόμενα που είναι αισθητά στην ανθρώπινη κλίμακα και απαραίτητα για την κατανόηση της ραδιενέργειας. Είναι αυτονόητο ότι ο αναγνώστης που είναι εξοικειωμένος με αυτές τις έννοιες μπορεί να παραλείψει την ενότητα της εισαγωγής.

Στην ενότητα II γίνεται κατάδυση στον μικρόκοσμο της ύλης, στις κλίμακες του ατόμου και του πυρήνα, γνωριμία με τη δομή τους και με τα στοιχειώδη σωματίδια που τα συγκροτούν. Αποκαλύπτονται η πυρηνική δύναμη και οι ασταθείς πυρήνες.

Με βάση τα ανωτέρω, καθίσταται δυνατή στην ενότητα III η κατανόηση της φύσης και των ιδιοτήτων της ραδιενέργειας και της σχάσης και αποκαλύπτεται ο ενεργειακός κολοσσός του πυρήνα, η προέλευση της ενέργειας των πυρηνικών αντιδράσεων και της ατομικής βόμβας.

Μετά από αυτά, στην ενότητα IV (Προστασία από τη ραδιενέργεια) ο αναγνώστης είναι σε θέση να αντιληφθεί τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος φυσικής ραδιενέργειας, στο οποίο ο άνθρωπος ανέκαθεν έζησε και αναπτύχθηκε, και τα μεγέθη (δόσεις ακτινοβολιών) που είναι αντικειμενικά μέτρα του μεγέθους του κινδύνου από την έκθεση σε ραδιενεργό ακτινοβολία, καθώς και τα θεσμοθετημένα όρια δόσεων για την προστασία της υγείας. Με την ολοκλήρωση αυτής της ενότητας ο αναγνώστης πρέπει να έχει τη δυνατότητα να αντιλαμβάνεται την πραγματική διάσταση ραδιολογικών συμβάντων, εφόσον βέβαια του παρέχεται η αναγκαία σχετική πληροφόρηση.

Στην ενότητα V (Πυρηνική τεχνολογία) περιγράφονται οι αρχές λειτουργίας, καθώς και οι διαφορές μεταξύ των πυρηνικών αντιδραστήρων, αφ' ενός, και των ατομικών βομβών, αφ' ετέρου. Εξετάζεται το θέμα της ασφάλειας των πυρηνικών αντιδραστήρων και το αμφιλεγόμενο θέμα της διαχείρισης των πυρηνικών καταλοίπων. Η ενότητα τελειώνει με την περιγραφή των εφαρμογών της πυρηνικής τεχνολογίας στους τομείς της υγείας και της παραγωγής.

Στην ενότητα VI περιγράφονται το ιστορικό, οι αιτίες και οι συνέπειες του ατυχήματος του Τσέρνομπιλ, με ιδιαίτερη βαρύτητα στις επιπτώσεις του στην Ελλάδα.

Το βιβλίο ολοκληρώνεται με τον επίλογο.



Θέλω να ευχαριστήσω και από τη θέση αυτή τους συναδέλφους που διάβασαν τμήματα του βιβλίου και συνέβαλαν με τις παρατηρήσεις των στη βελτίωσή του. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τους καθηγητές του Α.Π.Θ. Θ. Τσιμπούκη και Α. Κλούβα και τους συναδέλφους του Εθνικού Κέντρου Έρευνας Φυσικών Επιστημών (Ε.Κ.Ε.Φ.Ε.) «Δημόκριτος»: Ε. Σιδέρη, που είχε σημαντική συμβολή στη διαμόρφωση των κεφαλαίων των βιολογικών επιπτώσεων και της αφετηρίας των, καθώς επίσης τους Σ. Μεσολορά, Ι. Σταματελάτο και Κ. Μεργιά. Ευχαριστώ τον διευθυντή των Πανεπιστημιακών Εκδόσεων Κρήτης (Π.Ε.Κ.) Στέφανο Τραχανά καθώς και το Διοικητικό Συμβούλιο του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» για την ανάληψη της έκδοσης αυτού του έργου. Ως γνωστόν, οι Π.Ε.Κ. αποτελούν τον εγκυρότερο εκδοτικό οίκο επιστημονικών βιβλίων. Επίσης να μνημονεύσω τις εύστοχες παρατηρήσεις του Ιωάννη Παπαδόγγονα καθώς και τη φιλολογική επιμέλεια του Βίκτωρα Αθανασιάδη. Είναι, βέβαια, αυτονόητο ότι τα όποια λάθη και παραλείψεις βαρύνουν τον γράφοντα. Θέλω τέλος να ευχαριστήσω την κ. Σ. Μπόττα για την υπομονή της να επιμεληθεί τη δακτυλογράφηση μεγάλου μέρους των χειρογράφων και να φιλοτεχνήσει στον υπολογιστή αρκετά από τα σχήματα στην πρώτη μορφή τους.

Σεπτέμβριος 2003

Μ. Αντωνόπουλος-Ντόμης

# I

## Εισαγωγή

Μια ποιοτική, χωρίς μαθηματικά, γνωριμία με τη φυσική, με τις δυνάμεις εκείνες της φύσης που είναι αισθητές σε ανθρώπινη κλίμακα.

Δεν προαπαιτούνται γνώσεις φυσικής και η εισαγωγή των εννοιών εκκινεί από, και βασίζεται σε, κοινές προσλαμβάνουσες παραστάσεις της καθημερινής εμπειρίας.

Περιγράφονται: η μάζα, η βαρύτητα και το βαρυτικό πεδίο (Κεφάλαιο 1). Η περιγραφή του ηλεκτρικού φορτίου και της ηλεκτρικής δύναμης οδηγεί στην κατανόηση του ηλεκτρονίου (Κεφάλαιο 2). Στη συνέχεια, η περιγραφή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρομαγνητικού κύματος οδηγεί στην κατανόηση του φωτονίου (Κεφάλαιο 3). Εξηγούνται επίσης οι βασικές, για την κατανόηση της φύσης της ραδιενέργειας, έννοιες της ευσταθούς και της ασταθούς κατάστασης (Κεφάλαιο 4).

Είναι αυτονόητο ότι ο εξοικειωμένος με τις έννοιες αυτές μπορεί να παρακάμψει αυτήν την ενότητα.

Ο μη εξοικειωμένος με τις έννοιες αυτές, που δεν έχει τη διάθεση να «εισαχθεί» σε αυτές, μπορεί να αρχίσει από την «στοχοθετημένη περίληψη» (Κεφάλαιο 5), όπου παρατίθενται οι έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της ραδιενέργειας.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Οι μάζες έλκονται

Η λέξη *μάζα* στα αρχαία ελληνικά σημαίνει «κρίθινος άρτος, κρίθινον πλακούντιον» (κριθαρόψωμο, κριθαρόπιττα). Με αυτή την έννοια την χρησιμοποιεί ο αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος Δημόκριτος, ο οποίος γράφει:

*Ξενιτείη βίον αυτάρκειαν διδάσκει. Μάζα γάρ και στιβάς λιμοῦ και κόπου γλυκύτατα ιάματα,*

δηλαδή

*η ζωή στην ξενιτιά διδάσκει την αυτάρκεια. Διότι το κριθαρένιο ψωμί (η μάζα) και το αχυρένιο στρώμα είναι γλυκύτερες θεραπείες της πείνας και της κόπωσης.*

Η μάζα παρέπεμπε λοιπόν, τότε, σε περιεχόμενο πλήρωσης του ανθρώπινου σώματος. Με την ανάπτυξη της φυσικής επιστήμης η λέξη χρησιμοποιήθηκε διεθνώς (mass) για να παραπέμψει «στο έν τινι σώματι περιεχόμενον ποσόν ύλης», όπως ορίζουν τη μάζα ορισμένα λεξικά<sup>1</sup>. Μπορούμε πράγματι, για τους σκοπούς αυτού του βιβλίου, να σκεφθούμε τη μάζα ως την ποσότητα ύλης που περιέχεται σε ένα αντικείμενο, σε ένα σώμα.

Αν αφήσουμε ένα σώμα σε κάποιο ύψος πάνω από την επιφάνεια της Γης, αυτό θα πέσει πάνω στην επιφάνεια της Γης: κάποια δύναμη έλκει τη μάζα (την ποσότητα της ύλης) του σώματος προς τη Γη. Αυτή η δύναμη, με την οποία έλκεται κάθε σώμα από τη Γη, είναι το γνωστό μας βάρος του σώματος. Ωστε η μάζα κάθε σώματος είναι η ποσότητα της ύλης που περιέχεται σ' αυτό, ενώ το βάρος του είναι η δύναμη με την οποία έλκεται από τη Γη.

---

<sup>1</sup> Στην σύγχρονη καθημερινή γλώσσα χρησιμοποιούμε τη λέξη «μάζα», τις περισσότερες φορές, μεταφορικά. Λέμε π.χ. «μαζική παραγωγή» εννοώντας παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων, «μαζική συγκέντρωση» εννοώντας συγκέντρωση μεγάλου πλήθους, «Μέσα Μαζικής Ενημέρωσης» κ.ο.κ. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις με τη λέξη «μάζα» αναφερόμαστε σε περιεχόμενο (μεγάλων) ποσοτήτων.

Ενώ η γνώση ότι τα σώματα πέφτουν προς τη Γη και δεν απομακρύνονται από αυτήν ήταν γνωστή επί πολλούς αιώνες, ο νόμος της βαρύτητας διατυπώθηκε από τον Νεύτωνα το 1687, οπότε δημοσιεύτηκε το βιβλίο του *Μαθηματικές Αρχές της Φυσικής Φιλοσοφίας* (*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*), το σημαντικότερο ίσως βιβλίο στην ιστορία των φυσικών επιστημών.

Ο Νεύτων φέρεται να ανέφερε ότι συνέλαβε την ιδέα της βαρύτητας καθώς συλλογιζόταν κάποτε με διάθεση ενατένισης και με αφορμή την πτώση ενός μήλου. Διατύπωσε τον νόμο της *παγκόσμιας βαρυτικής έλξης*, σύμφωνα με τον οποίο δύο σώματα έλκονται με δύναμη που είναι ανάλογη προς το γινόμενο των μαζών των δύο σωμάτων και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο<sup>2</sup> της απόστασής των.

Η δύναμη αυτή ασκείται μεταξύ των μαζών ακόμα και όταν ο χώρος μεταξύ τους είναι κενός, ακόμα δηλαδή και όταν δεν περιέχει ύλη.

Αυτή ακριβώς η βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ της μάζας της Γης και της μάζας των σωμάτων είναι εκείνη που κάνει τα σώματα να πέφτουν προς τη Γη. Αυτή η βαρυτική αλληλεπίδραση αναγκάζει, όπως απέδειξε ο Νεύτων, τη Σελήνη να κινείται σε ελλειπτική τροχιά γύρω από τη Γη και τη Γη και τους πλανήτες να κινούνται σε ελλειπτικές τροχιές γύρω από τον Ήλιο. Μολονότι ο χώρος μεταξύ Γης, Σελήνης και Ηλίου είναι κενός, ασκούνται βαρυτικές δυνάμεις, δηλαδή υφίσταται βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ των μαζών αυτών των σωμάτων.

## ΒΑΡΥΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Ας φανταστούμε σε κάποιο σημείο  $A$  του χώρου ένα σώμα μάζας  $m_A$ . Αν σε οποιοδήποτε σημείο  $B$  του χώρου γύρω απ' αυτό το σώμα βρεθεί μάζα  $m_B$ , τότε ασκείται στη μάζα  $m_B$  ελκτική δύναμη από τη μάζα  $m_A$ . Κάθε σημείο  $B$  του άπειρου χώρου γύρω από το  $A$  έχει την ιδιότητα αυτή λόγω της παρουσίας της μάζας  $m_A$  στο  $A$ . Με τον όρο *βαρυτικό πεδίο* ή *πεδίο βαρύτητας της μάζας  $m_A$*  εννοούμε αυτήν ακριβώς την βαρυτική ιδιότητα των σημείων του χώρου, που οφείλεται στην παρουσία της μάζας  $m_A$  στη θέση  $A$ . Έτσι, όταν μιλούμε για το πεδίο βαρύτητας της Γης, εννοούμε τον χώρο γύρω από τη Γη σε συνδυασμό με την εξής ιδιότητα κάθε σημείου αυτού του χώρου: αν στο σημείο αυτό βρεθεί μάζα, τότε ασκείται σε αυτήν ελκτική δύναμη από τη Γη, μεγέθους ανάλογου προς την μάζα της Γης και αντιστρόφως ανάλογου προς το τετράγωνο της απόστασης του σημείου από το κέντρο της Γης.

---

<sup>2</sup> Το τετράγωνο ενός αριθμού  $a$  είναι το γινόμενο του αριθμού  $a$  επί τον εαυτό του και συμβολίζεται με  $a^2$ .

## ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

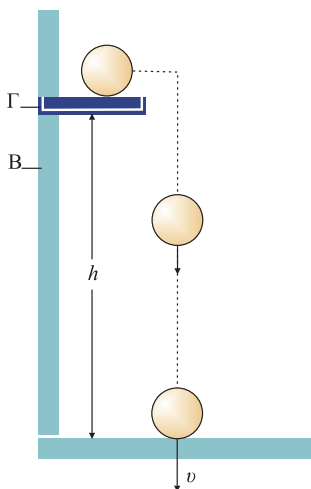
Ταχύτητα ενός κινούμενου αντικείμενου ονομάζεται το μήκος της τροχιάς την οποία αυτό διανύει ανά μονάδα χρόνου. Π.χ., αν ένα αντικείμενο κινείται σε ευθεία τροχιά και κάθε δευτερόλεπτο διανύει 5 μέτρα, έχει ταχύτητα 5 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Αν κινηθεί με την ίδια ταχύτητα επί 3 δευτερόλεπτα, θα διανύσει απόσταση 15 μέτρων κ.ο.κ. Όταν, κοιτάζοντας το ταχύμετρο ενός κινούμενου αυτοκινήτου, παρατηρούμε ότι το αυτοκίνητο «τρέχει με 100 χιλιόμετρα την ώρα», αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα του οχήματος τη στιγμή της παρατήρησης είναι 100 χιλιόμετρα ανά ώρα, δηλαδή αν το όχημα συνεχίσει να κινείται με την ίδια ταχύτητα επί μία ώρα θα διανύσει απόσταση 100 χιλιομέτρων. Αν κινηθεί με αυτήν την ταχύτητα επί 6 λεπτά, δηλαδή επί 1 δέκατο της ώρας, θα διανύσει τροχιά μήκους ίσου προς το γινόμενο: 100 χιλιόμετρα ανά ώρα επί ένα δέκατο της ώρας = 10 χιλιόμετρα.

Μια μάζα που κινείται έχει κινητική ενέργεια. Για παράδειγμα, η μάζα της μπάλας του μπιλιάρδου, που κινείται με κάποια ταχύτητα, έχει κινητική ενέργεια: όταν συγκρουσθεί με άλλη μπάλα που βρίσκεται εν στάσει, θα μεταδώσει στη μάζα της δεύτερης ένα μέρος της κινητικής της ενέργειας και έτσι η δεύτερη μπάλα θα τεθεί σε κίνηση, θα αποκτήσει κάποια ταχύτητα. Μέρος της κινητικής ενέργειας της μάζας του ανέμου μεταδίδεται στα πανιά των ιστιοφόρων πλοίων και τα κινεί. Μέρος της κινητικής ενέργειας της μάζας του ανέμου μεταδίδεται στη φτερωτή του ανεμόμυλου και την κινεί. Μέρος της κινητικής ενέργειας της μάζας του νερού του ποταμού μεταδίδεται στη φτερωτή του υδρόμυλου και την κινεί.

Η κινητική ενέργεια ενός σώματος είναι τόσο πιο μεγάλη όσο πιο μεγάλη είναι η μάζα του και όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητά του. Όταν ένα φύλλο δένδρου, παρασυρόμενο από τον άνεμο πέσει πάνω σε ένα τζάμι, με όση ταχύτητα και αν κινείται, η κινητική του ενέργεια, μεταφερόμενη στο τζάμι, το πολύ που μπορεί να κάνει είναι να δονήσει το τζάμι και να ακούσουμε μικρό θόρυβο: το φύλλο έχει μικρή μάζα και άρα, κινούμενο, έχει μικρή κινητική ενέργεια. Όταν όμως μια πέτρα με ικανή μάζα και κινούμενη με ικανή ταχύτητα πέσει σε ένα τζάμι, μεταδίδοντας πάνω σε αυτό μέρος της κινητικής της ενέργειας, το σπάει. Η ίδια πέτρα, αν πέσει στο τζάμι απαλά, δηλαδή με μικρή ταχύτητα, δεν θα το σπάσει, απλώς θα το δονήσει. Η κινητική ενέργεια ενός σώματος είναι ανάλογη προς μάζα του και ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητάς του.

## ΒΑΡΥΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα σώμα πάνω σε ένα στήριγμα στη θέση Γ, σε ύψος  $h$  πάνω από την επιφάνεια της Γης (Σχήμα 1.1). Όταν το σώμα βρίσκεται ακίνητο πάνω στο στήριγμα έχει κινητική ενέργεια μηδέν. Αν το στήριγμα αφαιρεθεί, τότε το σώμα, ελκόμενο από τη Γη, επιταχύνεται, δηλαδή η ταχύτητά του αυξάνεται συνεχώς, μέχρις ότου πέσει στην επιφάνειά της.



**Σχήμα 1.1.** Το σώμα στο σημείο Γ πάνω στο στίριγμα σε ύψος  $h$  έχει δυναμική ενέργεια. Όταν πέσει, αποκτά ταχύτητα  $v$ , άρα κινητική ενέργεια.

Όταν φτάνει στην επιφάνεια της Γης έχει κινητική ενέργεια ανάλογη προς τη μάζα του και ανάλογη προς το τετράγωνο της ταχύτητας με την οποία φτάνει στην επιφάνεια της Γης. Λέμε λοιπόν ότι το σώμα στο ύψος  $h$  έχει βαρυτική δυναμική ενέργεια, «εν δυνάμει ενέργεια», η οποία, με την επιτάχυνση που υφίσταται το σώμα υπό την επίδραση της δύναμης του βαρυτικού πεδίου κατά την πτώση του σε χαμηλότερα ύψη, μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Η βαρυτική δυναμική ενέργεια ενός σώματος, δηλαδή η δυναμική του ενέργεια λόγω της θέσης του στο βαρυτικό πεδίο της Γης είναι τόσο πιο μεγάλη όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση της θέσης στην οποία βρίσκεται από τη Γη, είναι ανάλογη προς την απόσταση του σώματος από τη Γη. Ωστε η βαρυτική δυναμική ενέργεια που έχει το σώμα εξαρτάται από τη θέση του στο βαρυτικό πεδίο της Γης.

Στην πράξη, αλλά και στη θεωρία, ενδιαφέρουν οι διαφορές της δυναμικής ενέργειας ενός σώματος μεταξύ σημείων του βαρυτικού πεδίου. Στο παράδειγμα του Σχήματος 1.1 η δυναμική ενέργεια του σώματος είναι μεγαλύτερη στη θέση Γ απ' ό,τι στη θέση Β, διότι η θέση Γ βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από τη Γη απ' ό,τι η θέση Β. Ας σκεφτούμε την πτώση του σώματος από τη θέση Γ στη θέση Β. Έστω ότι το σώμα συγκρατείται ακίνητο στη θέση Γ, οπότε η κινητική του ενέργεια είναι μηδέν. Στη συνέχεια, αφήνεται ελεύθερο να πέσει. Τότε, υπό την επίδραση της βαρυτικής δύναμης, θα κινηθεί επιταχυνόμενο από τη θέση Γ προς τη θέση Β. Όταν φτάσει στη θέση Β θα έχει τη δυναμική ενέργεια λόγω της θέσης του στο Β και, επί πλέον αυτής, την κινητική ενέργεια που απέκτησε με την πτώση του από τη θέση Γ στη θέση Β. Δηλαδή η δυναμική ενέργεια του σώματος στη θέση Γ είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στη θέση Β, κατά το μέ-



γεθος της κινητικής ενέργειας που αποκτά κινούμενο από τη θέση  $\Gamma$  στη θέση  $\mathbf{B}$ . Αυτή η κινητική ενέργεια που αποκτά πέφτοντας από τη θέση  $\Gamma$  στη θέση  $\mathbf{B}$  είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά της δυναμικής ενέργειας της θέσης  $\mathbf{B}$  από τη θέση  $\Gamma$ .

Είναι χρήσιμο για τους σκοπούς του βιβλίου<sup>3</sup> να θεωρήσουμε την ανά μονάδα μάζας διαφορά δυναμικής ενέργειας μεταξύ δύο θέσεων. Στο προηγούμενο παράδειγμα, ας συμβολίσουμε την ανά μονάδα μάζας δυναμική ενέργεια του σώματος στη μεν θέση  $\Gamma$  με  $V_{\Gamma}$ , στη δε θέση  $\mathbf{B}$  με  $V_{\mathbf{B}}$ . Τότε, η ανά μονάδα μάζας διαφορά της δυναμικής ενέργειας μεταξύ των θέσεων  $\Gamma$  και  $\mathbf{B}$  του προηγούμενου παραδείγματος είναι  $(V_{\Gamma} - V_{\mathbf{B}})$ . Αυτή είναι η διαφορά της δυναμικής ενέργειας σώματος μάζας ίσης με τη μονάδα της μάζας, π.χ. 1 χιλιόγραμμα, μεταξύ των θέσεων  $\Gamma$  και  $\mathbf{B}$ . Τότε, ένα σώμα μάζας 2 χιλιογράμμων θα έχει διαφορά δυναμικής ενέργειας μεταξύ των δύο θέσεων διπλάσια τού  $(V_{\Gamma} - V_{\mathbf{B}})$  και, γενικά, ένα σώμα μάζας  $m$  θα έχει διαφορά δυναμικής ενέργειας ίση με το γινόμενο της μάζας  $m$  επί  $(V_{\Gamma} - V_{\mathbf{B}})$ .

---

<sup>3</sup> Αυτό διευκολύνει στην αντιστοίχιση εννοιών του βαρυτικού και του ηλεκτρικού πεδίου, που περιγράφεται αργότερα, και συγκεκριμένα στην κατανόηση της διαφοράς δυναμικού στο ηλεκτρικό πεδίο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

# Τα ηλεκτρικά φορτία έλκονται ή απωθούνται και “μαγνητίζουν”

### ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Από αρχαιοτάτων χρόνων διαπιστώθηκε ότι όταν τρίβεται το υλικό που σήμερα ονομάζουμε κεχριμπάρι και στην αρχαία ελληνική ονομαζόταν «ήλεκτρον», αυτό αποκτά την εξής ιδιότητα: ασκεί ελκτική δύναμη σε αντικείμενα που βρίσκονται σε μικρή απόσταση από αυτό. Τραβάει π.χ. μικρά κομματάκια χαρτιού επάνω του. Αν τοποθετήσουμε πάνω σε αυτό το κεχριμπάρι ένα πολύ μικρό κομματάκι χαρτιού και το σηκώσουμε, αυτό τραβάει μαζί του το χαρτάκι, το χαρτάκι δεν πέφτει κάτω. Άρα το «τριμμένο» κεχριμπάρι ασκεί πάνω στο χαρτάκι ελκτική δύναμη μεγαλύτερη από τη δύναμη της βαρύτητας που έλκει το χαρτάκι προς τη Γη.

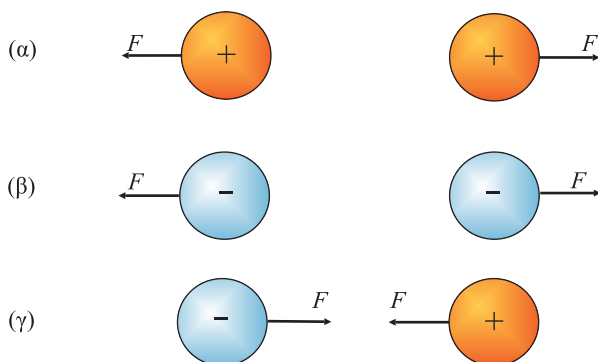
Παρατήρηση πρώτη: το κεχριμπάρι έλκει το χαρτάκι μόνο αν το τρίψουμε αρκετά. Αν δεν το τρίψουμε, δεν έλκει το χαρτάκι. Άρα η δύναμη που ασκεί το «τριμμένο» κεχριμπάρι πάνω στο χαρτάκι δεν οφείλεται στη μάζα του, δεν είναι η βαρυτική έλξη της μάζας του κεχριμπαριού πάνω στη μάζα του χαρτιού.

Παρατήρηση δεύτερη: η μάζα της Γης είναι κολοσσιαία σε σχέση με τη μάζα του κεχριμπαριού. Αφού, όπως είδαμε, η βαρυτική δύναμη είναι ανάλογη προς τη μάζα, έπεται ότι η βαρυτική ελκτική δύναμη που ασκεί η Γη πάνω στο χαρτάκι είναι αναλόγως κολοσσιαία μεγαλύτερη από τη βαρυτική ελκτική δύναμη που ασκεί η μάζα του κεχριμπαριού πάνω στο χαρτάκι. Άρα, αφού το κεχριμπάρι που έχει υποστεί τριβή δεν αφήνει το χαρτάκι να πέσει στη Γη, επιβεβαιώνεται ότι η δύναμη που ασκεί στο χαρτάκι δεν οφείλεται στη μάζα του, δεν είναι η βαρυτική του δύναμη και, επί πλέον, ότι αυτή «η άλλου είδους δύναμη» είναι πολύ ισχυρότερη από τη βαρυτική.

Οι σήμερα οικείοι όροι *ηλεκτρισμός* και *ηλεκτρικά φαινόμενα* αντλούν τη ρίζα των από το «ήλεκτρον». Επιστημονικές μελέτες, ήδη από τον 18<sup>ο</sup> αιώνα, αποκάλυψαν ότι η ύλη διαθέτει, εκτός από τη μάζα στην οποία οφείλεται η βαρυτική δύναμη, και ένα άλλο μέγεθος που ονομάστηκε ηλεκτρικό φορτίο και στο οποίο οφείλεται η δύναμη που ονομάστηκε ηλεκτρική. Σε διαφοροποίηση από τη βαρυ-

τική δύναμη μεταξύ των μαζών που είναι πάντα ελκτική, διαπιστώθηκε ότι οι ηλεκτρικές δυνάμεις μπορεί να είναι ελκτικές ή απωστικές. Διαπιστώθηκε επίσης ότι υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικών φορτίων και, αυθαίρετα, το ένα είδος ονομάστηκε «θετικό ηλεκτρικό φορτίο» και το άλλο «αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο».

Τα επίθετα «θετικό» και «αρνητικό» δόθηκαν διότι η μαθηματική τους απεικόνιση (*συν* για το θετικό και *πλην* για το αρνητικό) διευκολύνει την απλή μαθηματική έκφραση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων που παρατηρήθηκαν. Αυτά δε τα επίθετα δόθηκαν αφού διαπιστώθηκε η εξής ιδιότητα των ηλεκτρικών φορτίων: τα ομώνυμα (δηλαδή του ίδιου είδους) ηλεκτρικά φορτία απωθούνται και τα ετερόνυμα (δηλαδή τα διαφορετικού είδους) ηλεκτρικά φορτία έλκονται. Δηλαδή: η δύναμη  $F$  που ασκείται μεταξύ ενός θετικού και ενός αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου είναι ελκτική, ωθεί τα σώματα που φέρουν τα φορτία αυτά να πλησιάσουν το ένα προς το άλλο (Σχήμα 2.1γ). Αντίθετα, η δύναμη μεταξύ δύο αρνητικών φορτίων (Σχήμα 2.1β), ή μεταξύ δύο θετικών φορτίων (Σχήμα 2.1α) είναι απωστική: ωθεί τα σώματα που φέρουν τα φορτία αυτά να απομακρυνθούν το ένα από το άλλο.



Σχήμα 2.1. Τα θετικά φορτία σημειώνονται εδώ με + και τα αρνητικά με -. (α) τα θετικά απωθούνται, η δύναμη από το ένα στο άλλο τείνει να απομακρύνει το ένα από το άλλο· (β) τα αρνητικά επίσης απωθούνται· (γ) ένα θετικό και ένα αρνητικό έλκονται.

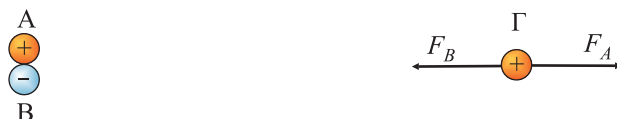
Ας φανταστούμε δύο κομμάτια ύλης σε κάποια απόσταση  $d$ . Έστω ότι το ένα φέρει ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου  $q_1$  και το άλλο ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου  $q_2$ . Η δύναμη  $F$  η οποία ασκείται από καθένα από αυτά τα κομμάτια ύλης πάνω στο άλλο (απωστική αν τα φορτία που φέρουν είναι ομώνυμα, ελκτική αν είναι ετερόνυμα) είναι τόσο πιο μεγάλη όσο μεγαλύτερα είναι τα ηλεκτρικά φορτία που φέρουν και όσο μικρότερη είναι η μεταξύ τους απόσταση. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη προς το γινόμενο  $q_1 \cdot q_2$  των ηλεκτρικών φορτίων και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο  $d^2$  της μεταξύ τους απόστασης  $d$ . Η σχέση αυτή μεταξύ δύναμης, ηλεκτρικών φορτίων και απόστασης ονομάζεται νόμος του Κουλόμπ, προς τιμήν του Charles Coulomb που την ανακάλυψε (18<sup>ος</sup> αιώνας).

Και η δύναμη αυτή, δηλαδή και η δύναμη μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων, όπως και η βαρυτική, ασκείται ακόμα και όταν ο χώρος μεταξύ των φορτίων είναι κενός, δηλαδή και όταν δεν περιέχει ύλη.

Θα πρέπει να προσέξουμε την αντιστοιχία του νόμου του Κουλόμπ για το μέγεθος της δύναμης μεταξύ δύο ηλεκτρικών φορτίων με τον νόμο του Νεύτωνα για το μέγεθος της βαρυτικής δύναμης μεταξύ δύο μαζών.

Βασική διαφορά των δύο αυτών δυνάμεων είναι ότι η βαρυτική δύναμη μεταξύ μαζών είναι πάντοτε ελκτική, ενώ η ηλεκτρική δύναμη είναι ελκτική αν τα φορτία είναι ετερόνυμα και απωστική αν τα φορτία είναι ομόνυμα.

Ας φανταστούμε τώρα ένα σύμπλεγμα δύο μικρών σωμάτων Α και Β, εκ των οποίων το Α φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο και το Β αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο, ποσότητας ίσης προς αυτήν του θετικού φορτίου που φέρει το Α (Σχήμα 2.2). Ας υποθέσουμε ακόμα ότι τα δύο σώματα βρίσκονται σε επαφή, ακουμπούν το ένα στο άλλο. Λόγω της ελκτικής δύναμης μεταξύ των ετερόνυμων φορτίων που φέρουν, τα σώματα Α και Β θα παραμείνουν «σε επαφή», θα συμπεριφέρονται ως ένα «ενιαίο σύμπλεγμα», αν δεν παρέμβει κάποια εξωτερική δύναμη να διασπάσει την «επαφή» τους και να τα χωρίσει. Έστω, τώρα, ότι εκεί κοντά στο «ενιαίο σύμπλεγμα» βρίσκεται κάποιο τρίτο σώμα που φέρει, π.χ., θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Τότε, πάνω σε αυτό το τρίτο σώμα το μεν θετικό φορτίο του «ενιαίου συμπλέγματος» θα ασκεί απωστική δύναμη  $F_A$  και το αρνητικό φορτίο θα ασκεί ελκτική δύναμη  $F_B$ .



Σχήμα 2.2. Το σώμα Α φέρει θετικό φορτίο ίσο και αντίθετο προς το αρνητικό φορτίο που φέρει το σώμα Β. Τα σώματα Α και Β βρίσκονται σε επαφή. Σώμα Γ που φέρει κάποιο ηλεκτρικό φορτίο, βρίσκεται σε απόσταση από το σύμπλεγμα των Α και Β. Το φορτίο του Γ δεν «αντιλαμβάνεται» την παρουσία του συμπλέγματος των Α και Β. Το σύμπλεγμα των Α και Β είναι και συμπεριφέρεται ως ηλεκτρικά ουδέτερο.

Αφού στο σύμπλεγμα το θετικό φορτίο του Α είναι ίσο σε μέγεθος με το αρνητικό φορτίο του Β, οι δύο αυτές δυνάμεις είναι ίσες σε μέγεθος και αντίθετες: το θετικό φορτίο του συμπλέγματος απωθεί το τρίτο σώμα με την ίδια δύναμη με την οποία το αρνητικό φορτίο του συμπλέγματος έλκει το τρίτο σώμα. Η μία δύναμη αναιρεί την άλλη και το αποτέλεσμα είναι να μην ασκείται δύναμη πάνω στο τρίτο σώμα. Ωστε το ζεύγος του θετικού και αρνητικού φορτίου του συμπλέγματος ουδεμία επίδραση έχει επάνω στο φορτίο του τρίτου σώματος. Συνεπώς είναι σαν να μην υπάρχουν τα φορτία του συμπλέγματος. Λέμε λοιπόν ότι αυ-

τό το «ενιαίο σύμπλεγμα» είναι «ηλεκτρικά ουδέτερο». Στο εσωτερικό του συμπλέγματος τα ίσα σε μέγεθος και αντίθετα φορτία κρατούν το σύμπλεγμα ενιαίο, αλλά, ως προς το εξωτερικό του συμπλέγματος, αυτά ουδεμία ηλεκτρική επίδραση έχουν: οι επιδράσεις τους αλληλοαναιρούνται. Θα δούμε αργότερα ότι τα άτομα, υπό συνήθεις συνθήκες, είναι τέτοια συμπλέγματα.

Κάθε μεγάλο σώμα, όπως π.χ. η Γη, η Σελήνη και ο Ήλιος, περιέχει αριθμό σωματίων με θετικά ηλεκτρικά φορτία περίπου ίσο προς τον αριθμό των σωματίων με αρνητικά ηλεκτρικά φορτία. Έτσι, καθένα από αυτά τα μεγάλα σώματα είναι, όσον αφορά στον εξωτερικό του χώρο, σχεδόν ηλεκτρικά ουδέτερο και οι ηλεκτρικές δυνάμεις που ασκούν αυτά τα μεγάλα σώματα σε ηλεκτρικά φορτία ευρισκόμενα έξω από αυτά είναι σχετικά μικρές.

Αντίθετα, επειδή η βαρυτική δύναμη μεταξύ μαζών είναι πάντα ελκτική, οι βαρυτικές δυνάμεις που ασκούν τα επιμέρους σωματίδια τα οποία συγκροτούν το μεγάλο σώμα, προς τρίτο σώμα ευρισκόμενο έξω από το μεγάλο σώμα, είναι μεν ασθενείς, αλλά αθροιζόμενες παράγουν σημαντική δύναμη. Έτσι, η καθοριστική δύναμη π.χ. μεταξύ Γης και Ηλίου είναι η βαρυτική.

## ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Ας υποθέσουμε τώρα ότι σε κάποιο σημείο  $A$  του χώρου υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο. Αν σε οποιοδήποτε σημείο  $B$  του χώρου βρεθεί άλλο ηλεκτρικό φορτίο, τότε, όπως είδαμε, ασκείται πάνω σε αυτό δύναμη που είναι ανάλογη προς το μέγεθος του φορτίου που βρίσκεται στο  $A$  και αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της αποστάσεως του  $B$  από το  $A$ . Έτσι, λόγω της παρουσίας του ηλεκτρικού φορτίου στο  $A$ , όλα τα σημεία του χώρου αποκτούν αυτή την ιδιότητα. Αυτή ακριβώς την ιδιότητα του χώρου εννοούμε όταν μιλούμε για «ηλεκτρικό πεδίο λόγω του φορτίου στο σημείο  $A$ ».

## ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ

Έχει διαπιστωθεί ότι κάθε ηλεκτρικό φορτίο που υπάρχει στη φύση είναι ακέραιο πολλαπλάσιο μιας στοιχειώδους αδιαίρετης ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου, που ονομάζεται **κβάντο**<sup>1</sup> του ηλεκτρικού φορτίου. Το κβάντο του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου θα το συμβολίσουμε με  $e^-$  και το κβάντο του θετικού ηλεκτρικού φορτίου με  $e^+$ . Το  $e^-$  είναι ίσο και αντίθετο προς το  $e^+$ . Στη φύση δεν έχει μετρηθεί ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου μικρότερη από το κβάντο, ούτε έχει βρεθεί ηλεκτρικό φορτίο που να μην είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του κβάντου. Π.χ., δεν υπάρχει φορτίο ίσο με μιάμιση φορά το κβάντο, ή δέκα χιλιάδες φορές και τρία

<sup>1</sup> κβάντο: ελάχιστη ποσότητα ενός διάκριτου μεγέθους, από το αγγλικό quantum που σημαίνει *ποσόν*, και αποτελεί μετεξέλιξη της αντίστοιχης λατινικής λέξης quantum που είναι ερωτηματική αντωνυμία και σημαίνει *πόσο*.

τέταρτα του κβάντου  $e$ . Λέμε λοιπόν ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι **κβαντωμένο**, με την έννοια ότι δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, παρά μόνον τιμές που είναι ακέραια πολλαπλάσια του κβάντου  $e$ . Οποιοδήποτε ηλεκτρικό φορτίο στη φύση είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του κβάντου  $e$ .

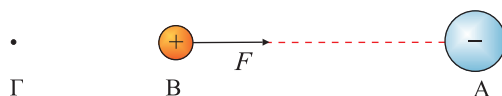
Το ηλεκτρόνιο είναι στοιχειώδες σωματίδιο, συστατικό της ύλης. Με τις λέξεις «στοιχειώδες σωματίδιο» εννοούμε σωματίδιο αδιαίρετο, που δεν είναι δυνατόν να διαιρεθεί, που δεν συγκροτείται από άλλα απλούστερα σωματίδια. Το ηλεκτρόνιο φέρει αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο ίσο με το κβάντο  $e^-$  του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου. Η μάζα του είναι εξαιρετικά μικρή σε σχέση με τα μεγέθη μάζας της ανθρώπινης κλίμακας. Η μάζα ενός χιλιογράμμου είναι μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου κατά χίλιες επί ένα δισεκατομμύριο επί ένα δισεκατομμύριο επί ένα δισεκατομμύριο φορές.

Στους μεταλλικούς αγωγούς ηλεκτρικών φορτίων υπάρχει, σε κάθε θέση του αγωγού, μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων που είναι διαθέσιμα για μετακίνηση. Αυτά ονομάζονται ελεύθερα ηλεκτρόνια και η μετακίνησή τους εντός του αγωγού, υπό κατάλληλες συνθήκες, συνιστά ροή ηλεκτρικού ρεύματος.

### ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ας φανταστούμε (Σχήμα 2.3) ότι στο σημείο Α υπάρχει ακίνητο σώμα που φέρει αρνητικό φορτίο  $Q$ . Το φορτίο  $Q$  συνεπάγεται ηλεκτρικό πεδίο, δηλαδή σε οποιοδήποτε ηλεκτρικό φορτίο βρεθεί σε οποιαδήποτε θέση του χώρου θα ασκηθεί ηλεκτρική δύναμη. Έστω επίσης ότι στο σημείο Β υπάρχει σώμα που φέρει θετικό ηλεκτρικό φορτίο  $q$ . Το αρνητικό φορτίο  $Q$  ασκεί στο θετικό φορτίο  $q$  ελκτική ηλεκτρική δύναμη  $F$ , η οποία ωθεί το σώμα στην κατεύθυνση από το Β προς το Α.

Προκειμένου το σώμα να μείνει ακίνητο στη θέση Β, θα πρέπει να ασκηθεί επ' αυτού κάποια άλλη δύναμη, ίση και αντίθετη προς την δύναμη  $F$  που το ωθεί προς το Α. Έστω ότι τέτοια δύναμη ασκείται πάνω στο σώμα, π.χ. από κάποιο ανθρώπινο χέρι που έτσι το κρατά ακίνητο στη θέση Β. Όντας ακίνητο στη θέση Β, έχοντας ταχύτητα μηδέν, έχει κινητική ενέργεια μηδέν. Αν αφεθεί ελεύθερο, αν δηλαδή πάψει να ασκείται επ' αυτού αυτή η άλλη δύναμη που εξισορροπεί τη δύναμη  $F$  και το κρατά ακίνητο, τότε, υπό την επίδραση της δύναμης  $F$ , θα μετακινηθεί επιταχυνόμενο από το Β προς το Α με συνεχώς αυξανόμενη ταχύτητα, θα αποκτήσει κινητική ενέργεια. Λέμε λοιπόν ότι το σώμα που φέρει το φορτίο  $q$  έχει στη θέση Β ηλεκτρική δυναμική ενέργεια, «εν δυνάμει» ενέργεια, η οποία κατά την επιτάχυνση του σώματος, υπό την επίδραση της δύναμης του πεδίου, μετατρέπεται σε κινη-



Σχήμα 2.3. Το σώμα στη θέση Β, φέροντας ηλεκτρικό φορτίο, έχει δυναμική ενέργεια λόγω του ηλεκτρικού φορτίου στη θέση Α.

τική ενέργεια. Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια που έχει το φορτίο  $q$ , λόγω του ηλεκτρικού πεδίου, εξαρτάται από τη θέση του φορτίου  $q$  στον χώρο.

Στην πράξη, αλλά και στη θεωρία, ενδιαφέρουν οι διαφορές της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας και οι αντίστοιχες διαφορές δυναμικού μεταξύ των διαφόρων σημείων του ηλεκτρικού πεδίου. Στο παράδειγμα του Σχήματος 2.3 η δυναμική ενέργεια του σώματος που φέρει το φορτίο  $q$  είναι μεγαλύτερη στη θέση Γ από ό,τι στη θέση Β. Αυτό μπορεί να γίνει αντιληπτό αν σκεφθούμε τα εξής: αρχικά το σώμα κρατείται ακίνητο στη θέση Γ. Στη συνέχεια αφήνεται ελεύθερο, οπότε υπό την επίδραση της ηλεκτρικής δύναμης, κινείται επιταχυνόμενο από τη θέση Γ προς τη θέση Β. Όταν φτάσει στη θέση Β, θα έχει τη δυναμική ενέργεια λόγω της θέσης του στο Β και, επί πλέον αυτής, την κινητική ενέργεια που απέκτησε κατά την επιτάχυνσή του από τη θέση Γ στη θέση Β, υπό την επίδραση της δύναμης του πεδίου. Δηλαδή η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του σώματος στη θέση Γ είναι μεγαλύτερη από την ηλεκτρική δυναμική του ενέργεια στη θέση Β, κατά το μέγεθος της κινητικής ενέργειας που αποκτά επιταχυνόμενο από τη θέση Γ στη θέση Β. Αυτή η κινητική ενέργεια την οποία αποκτά υπό την επίδραση της δύναμης του πεδίου είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας μεταξύ των θέσεων Β και Γ.

Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια είναι σε πλήρη αντιστοιχία με τη βαρυτική δυναμική ενέργεια. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 1, αν στο βαρυτικό πεδίο της Γης ένα σώμα, όντας αρχικά ακίνητο στη θέση Γ (Σχήμα 1.1), αφηθεί να πέσει προς μια θέση Β, χαμηλότερου υψομέτρου από την Γ, καθώς πέφτει επιταχύνεται, οπότε η βαρυτική δυναμική ενέργειά του μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Όταν φτάσει στη θέση Β, η κινητική ενέργειά του είναι ίση με τη διαφορά της δυναμικής του ενέργειας στις δύο θέσεις Γ και Β. Αντίστοιχα συμβαίνουν στο σώμα που φέρει το ηλεκτρικό φορτίο  $q$  στο Σχήμα 2.3.

Ας θεωρήσουμε τώρα θετικό ηλεκτρικό φορτίο μεγέθους ίσου προς τη μονάδα του φορτίου. Η διαφορά της ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας που έχει η μονάδα του θετικού ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ δύο θέσεων στον χώρο ονομάζεται **διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού** ή απλώς **διαφορά δυναμικού**. Π.χ., η διαφορά δυναμικού των σημείων Β και Γ του Σχήματος 2.3 είναι η διαφορά της δυναμικής ενέργειας που έχει η μονάδα του θετικού ηλεκτρικού φορτίου στις θέσεις Γ και Β και είναι ίση με την κινητική ενέργεια που θα αποκτήσει σώμα φέρον τη μονάδα του θετικού ηλεκτρικού φορτίου αν αφηθεί να μετακινηθεί από το Γ στο Β (λέμε αν «πέσει από το Γ στο Β», κατ’ αντιστοιχία με το βαρυτικό πεδίο). Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των Γ και Β συμβολίζεται ως  $V_{\Gamma} - V_{\text{B}}$ , η δε μονάδα της διαφοράς δυναμικού ονομάζεται βολτ (volt).

Αφού η διαφορά δυναμικού  $V_{\Gamma} - V_{\text{B}}$  είναι η διαφορά της δυναμικής ενέργειας της μονάδας φορτίου στα σημεία Γ και Β, η διαφορά δυναμικής ενέργειας δύο μονάδων φορτίου θα είναι διπλάσια τού  $(V_{\Gamma} - V_{\text{B}})$  και, γενικά, η διαφορά της δυναμικής ενέργειας  $q$  μονάδων φορτίου στις θέσεις Γ και Β θα είναι το γινόμενο του φορτίου  $q$  επί τη διαφορά δυναμικού  $(V_{\Gamma} - V_{\text{B}})$ .

Η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού ονομάζεται και **ηλεκτρική τάση**, ή απλώς **τάση**. Στην Ελλάδα, η τάση που παρέχει η ΔΕΗ στην κατανάλωση, π.χ. στα σπίτια μας, είναι συνήθως 220 βολτ. Στα σπίτια μας φθάνουν συνήθως δύο αγωγοί, δύο σύρματα, της ΔΕΗ<sup>2</sup>. Όταν λέγεται ότι η τάση της ΔΕΗ είναι 220 βολτ, εννοείται ότι η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ αυτών των δύο αγωγών είναι 220 βολτ. Όταν λέγεται ότι μια ηλεκτρική μπαταρία είναι εξάβολτη (6 volt), εννοείται ότι η διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού μεταξύ των δύο ακροδεκτών (πόλων) της μπαταρίας είναι 6 βολτ.

### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΒΟΛΤ

Όταν ένα σώμα που φέρει τη στοιχειώδη ποσότητα, το κβάντο  $e$  του ηλεκτρικού φορτίου «πέφτει» σε διαφορά δυναμικού ενός βολτ (1 V), αποκτά κινητική ενέργεια ίση με  $e$  επί 1 V. Όπως είδαμε, το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι ίσο με το κβάντο  $e^-$  του αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου. Όταν ένα ηλεκτρόνιο μετακινηθεί μεταξύ δύο σημείων με διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού 1 βολτ αποκτά κινητική ενέργεια  $e$  επί 1 V. Αυτό το μέγεθος ενέργειας δίνει την τάξη μεγέθους των ενεργειακών μεταβολών στην κλίμακα του ατόμου (Κεφάλαιο 6). Ορίζεται λοιπόν ως μονάδα ενέργειας το ηλεκτρονιοβόλτ (electronvolt), το οποίο συμβολίζεται ως eV και είναι:

$$\text{Ηλεκτρονιοβόλτ: } 1 \text{ eV} = e \cdot 1 \text{ volt.}$$

Για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και τα φωτόνια θα μιλήσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Μπορούμε πάντως από τώρα να πούμε ότι το φως εκπέμπεται και διαδίδεται υπό τη μορφή στοιχειωδών «κόκκων», των φωτονίων. Κάθε τέτοιος «κόκκος» της ορατής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (οι «κόκκοι» που ονομάζουμε φως) έχει ενέργεια που κυμαίνεται από 1,7 eV έως 3,1 eV. Παραδείγματος χάριν, οι «κόκκοι» του ερυθρού φωτός έχουν ενέργεια γύρω στα 1,8 eV, του κίτρινου γύρω στα 2,1 eV, του πράσινου γύρω στα 2,3 eV και του κυανού γύρω στα 2,8 eV.

Προκειμένου να βράσει το νερό, πρέπει να προσδοθεί σε κάθε μόριο του νερού ενέργεια της τάξεως των δεκάτων του ηλεκτρονιοβόλτ.

Τα σωματίδια που εκπέμπονται από τα ραδιενεργά υλικά έχουν ενέργειες που κυμαίνονται μεταξύ μερικών δεκάδων χιλιάδων έως και μερικών εκατομμυρίων ηλεκτρονιοβόλτ. Ορίζονται λοιπόν τα πολλαπλάσια του ηλεκτρονιοβόλτ (eV) ως εξής: ένα κιλο-ηλεκτρονιοβόλτ (1 keV) είναι χίλια ηλεκτρονιοβόλτ και ένα μεγα-ηλεκτρονιοβόλτ (1 MeV) είναι ένα εκατομμύριο ηλεκτρονιοβόλτ:

$$\text{Κιλο-ηλεκτρονιοβόλτ: } 1 \text{ keV} = 1000 \text{ eV}$$

$$\text{Μεγα-ηλεκτρονιοβόλτ: } 1 \text{ MeV} = 1.000.000 \text{ eV} = 1000 \text{ keV.}$$

<sup>2</sup> Αυτό συμβαίνει όταν παίρνουμε μονοφασική παροχή από τη ΔΕΗ.



## ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Οι αρχαίοι Έλληνες ανακάλυψαν ότι κάποιοι λίθοι, κυρίως από την περιοχή της Μαγνησίας, είχαν την ιδιότητα να έλκουν κομμάτια σιδήρου και τους ονόμασαν «μαγνήτες λίθους».

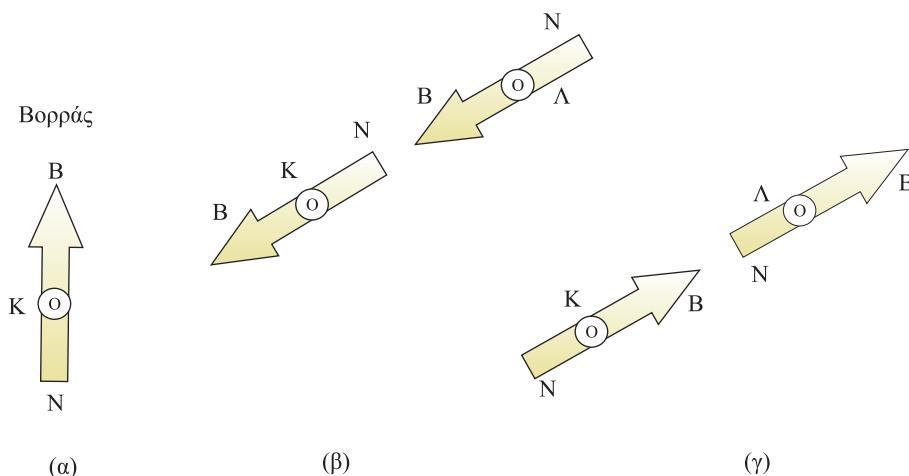
Οι περισσότεροι γνωρίζουν τον ραβδοειδή μαγνήτη, όπως είναι π.χ. η μαγνητική βελόνα της κοινής μαγνητικής πυξίδας.



**Σχήμα 2.4.** Ο ραβδοειδής μαγνήτης στρέφει το άκρο του Β προς «Βορράν» και το άλλο άκρο του Ν προς «Νότον». Το άκρο Β ονομάζεται βόρειος πόλος και το άκρο Ν νότιος πόλος του μαγνήτη.

Ας θεωρήσουμε έναν τέτοιο μαγνήτη, όπως στο Σχήμα 2.4. Ο μαγνήτης αυτός στηρίζεται και ισορροπεί πάνω σε ακίδα, γύρω από την οποία μπορεί να περιστρέφεται. Γνωρίζουμε ότι, αν δεν υπάρχει άλλος μαγνήτης εκεί κοντά, ο μαγνήτης ισορροπεί έτσι ώστε το ένα του άκρο να δείχνει προς Βορράν και το άλλο προς Νότον. Το άκρο του ραβδοειδούς μαγνήτη που δείχνει προς Βορράν ονομάζεται βόρειος πόλος και το άλλο άκρο του νότιος πόλος του μαγνήτη. Ας συμβολίσουμε έναν τέτοιο μαγνήτη με ένα βέλος όπως στο Σχήμα 2.5α.

Ο μικρός κύκλος παριστάνει την κορυφή της ακίδας επί της οποίας ο μαγνήτης μπορεί να περιστρέφεται. Στο Σχήμα 2.5α ο μαγνήτης στη θέση Κ δεν έχει



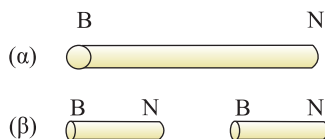
**Σχήμα 2.5.** (α) Ο μαγνήτης, τοποθετημένος στη θέση Κ, δεν έχει κοντά του άλλο μαγνήτη, οπότε ισορροπεί προσανατολιζόμενος έτσι, ώστε ο βόρειος πόλος του να δείχνει προς Βορράν. Πλησιάζουμε αρκετά κοντά του, στη θέση Λ, έναν άλλο τέτοιο μαγνήτη. Τότε αυτοί θα ισορροπήσουν περικού όπως στο (β), ή στο (γ). Ουδείς εκ των βόρειων πόλων των μαγνητών δείχνει προς Βορράν.

κοντά του άλλο μαγνήτη, οπότε ισορροπεί έτσι ώστε ο βόρειος πόλος του Β να δείχνει προς Βορράν. Γνωρίζουμε ότι οι ομώνυμοι πόλοι μαγνητών απωθούνται και οι ετερόνυμοι έλκονται: αν ο βόρειος πόλος ενός μαγνήτη πλησιάσει τον βόρειο πόλο ενός άλλου, θα απωθήσει ο ένας τον άλλο. Το ίδιο θα συμβεί αν πλησιάσουν οι νότιοι πόλοι δύο μαγνητών. Αντίθετα, ο βόρειος πόλος έλκει το νότιο πόλο ενός άλλου.

Επανερχόμεθα στον μαγνήτη που βρίσκεται στη θέση Κ. Πλησιάζουμε αρκετά κοντά του, στη θέση Λ, έναν άλλο παρόμοιο μαγνήτη. Τότε, λόγω των δυνάμεων που θα ασκηθούν μεταξύ βορείων και νοτίων πόλων των δύο μαγνητών, αυτοί θα ισορροπήσουν, περίπου όπως στο Σχήμα 2.5β, ή όπως στο Σχήμα 2.5γ, όπου ουδείς εκ των βορείων πόλων δείχνει προς Βορράν.

Από το γνωστό αυτό παράδειγμα συμπεραίνουμε ότι η παρουσία του μαγνήτη στη θέση Κ προσδίδει στον χώρο γύρω από αυτόν την εξής ιδιότητα: σε οποιοδήποτε σημείο Λ του χώρου αν βρεθεί άλλος μαγνήτης ασκούνται επ' αυτού μαγνητικές δυνάμεις λόγω της παρουσίας του μαγνήτη στη θέση Κ.

Θα πρέπει να σημειώσουμε μια σημαντική διαφορά με τα ηλεκτρικά φορτία: θετικά και αρνητικά ηλεκτρικά φορτία μπορούν να υπάρξουν ως αυθύπαρκτες οντότητες ανεξάρτητες η μία από την άλλη, π.χ. ένα σωματίο μπορεί να έχει μόνο θετικό ή μόνο αρνητικό φορτίο, όπως π.χ. το ηλεκτρόνιο. Αν, αντίθετα, προσπαθήσουμε να αποσπάσουμε τον βόρειο από τον νότιο πόλο ενός μαγνήτη, π.χ. κόβοντας τον μαγνήτη σε δύο κομμάτια, τότε κάθε ένα από τα κομμάτια θα έχει βόρειο και νότιο πόλο, όπως στο Σχήμα 2.6. Οι μαγνητικοί πόλοι βρίσκονται στη φύση πάντα κατά ζεύγη βορείου-νοτίου και ποτέ κατά μόνους βόρειος πόλος ή κατά μόνους νότιος πόλος.



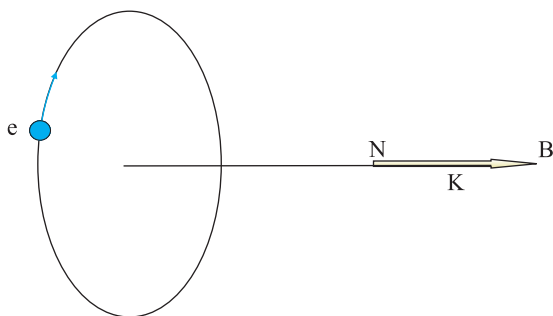
Σχήμα 2.6. Ο μαγνήτης του (α) τεμαχίστηκε και προέκυψαν οι δύο μαγνήτες του (β).

Έχει επίσης διαπιστωθεί ότι η παρουσία μαγνήτη προσδίδει σε κάθε σημείο του χώρου γύρω από τον μαγνήτη και την εξής ιδιότητα: αν στο σημείο του χώρου βρεθεί *κινούμενο* ηλεκτρικό φορτίο, τότε ασκείται επ' αυτού δύναμη.

Όστε, η παρουσία μαγνήτη σε κάποια θέση στον χώρο δημιουργεί **μαγνητικό πεδίο**, με την έννοια ότι οποιοδήποτε σημείο του χώρου έχει την εξής ιδιότητα: αν βρεθεί στο σημείο αυτό μαγνήτης ή *κινούμενο* ηλεκτρικό φορτίο, ασκούνται επ' αυτών δυνάμεις. Η ιδιότητα αυτή του χώρου υπάρχει, δηλαδή ασκούνται μαγνητικές δυνάμεις, ανεξάρτητα από το αν ο χώρος μεταξύ των δύο μαγνητών ή μεταξύ μαγνήτη και κινούμενου ηλεκτρικού φορτίου περιέχει κάποιο υλικό (π.χ. αέρα) ή αν μεταξύ τους υπάρχει κενό.

Η Γη ασκεί μαγνητικές δυνάμεις, είναι μαγνήτης. Ο νότιος μαγνητικός πόλος της Γης βρίσκεται κοντά στον βόρειο γεωγραφικό πόλο της, αλλά δεν συμπίπτει με αυτόν. Γι' αυτό έλκει τον βόρειο πόλο της μαγνητικής βελόνας της πυξίδας και τον κατευθύνει προς αυτόν, δηλαδή προς τον μαγνητικό νότιο πόλο της Γης. Ο βόρειος μαγνητικός πόλος της Γης βρίσκεται κοντά στον νότιο γεωγραφικό πόλο της (αλλά δεν συμπίπτει με αυτόν). Γι' αυτό έλκει και κατευθύνει προς αυτόν τον νότιο πόλο της μαγνητικής βελόνας της πυξίδας.

Έχει επίσης διαπιστωθεί ότι η πηγή οποιασδήποτε μαγνητικής δύναμης είναι κινούμενα ηλεκτρικά φορτία: Δηλαδή τα ηλεκτρικά ρεύματα. Το **ηλεκτρικό ρεύμα** (ή απλώς **ρεύμα**) είναι η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που ρέει σε έναν αγωγό (π.χ. ηλεκτροφόρο σύρμα), ή σε μία συσκευή, ανά μονάδα χρόνου, π.χ. ανά δευτερόλεπτο. Παραδείγματος χάριν, ας φανταστούμε ότι ένα ηλεκτρόνιο κινείται σε κάποια τροχιά, π.χ. κυκλική (Σχήμα 2.7). Αυτό το κινούμενο ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου παράγει μαγνητική δύναμη, είναι ένας μαγνήτης. Έτσι, στο παράδειγμα του Σχήματος 2.7, αν βρεθεί μαγνητική βελόνα στη θέση K, η μαγνητική δύναμη από το κινούμενο ηλεκτρόνιο θα την προσανατολίσει όπως παριστάνεται στο σχήμα. Ωστε ηλεκτρόνιο κινούμενο σε κλειστή τροχιά είναι ένας μικροσκοπικός μαγνήτης. Βεβαίως, οποιοδήποτε φορτίο, θετικό ή αρνητικό, κινούμενο σε κλειστή τροχιά, είναι ένας μαγνήτης. Οι μαγνητικές δυνάμεις των γνωστών μας μόνιμων μαγνητών προκαλούνται από κινήσεις ηλεκτρικών φορτίων στη μικροκλίμακα<sup>3</sup> του υλικού τους.



**Σχήμα 2.7.** Το ηλεκτρόνιο που κινείται σε κάποια τροχιά, όπως π.χ. στην κυκλική τροχιά του σχήματος, παράγει μαγνητικές δυνάμεις. Ως εκ τούτου, η μαγνητική βελόνα NB που βρίσκεται στο σημείο K προσανατολίζεται όπως στο σχήμα.

Ωστε, τόσο οι ηλεκτρικές δυνάμεις όσο και οι μαγνητικές δυνάμεις είναι εκφάνσεις της ίδιας φυσικής οντότητας, δηλαδή των ηλεκτρικών φορτίων. Οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι, όπως είδαμε, αποτέλεσμα της παρουσίας ηλεκτρικών φορτίων. Οι μαγνητικές δυνάμεις είναι αποτέλεσμα της κίνησης ηλεκτρικών φορτίων. Όταν ηλεκτρικό φορτίο κινείται, επάγεται στον χώρο τόσο ηλεκτρικό όσο και μαγνητικό πεδίο, οπότε στην ιδιότητα αυτή του χώρου αναφερόμαστε με τον όρο **ηλεκτρομαγνητικό πεδίο** και στο ζεύγος των αντίστοιχων δυνάμεων (ηλεκτρικής και μαγνητικής) αναφερόμαστε με τον όρο **ηλεκτρομαγνητική δύναμη**.

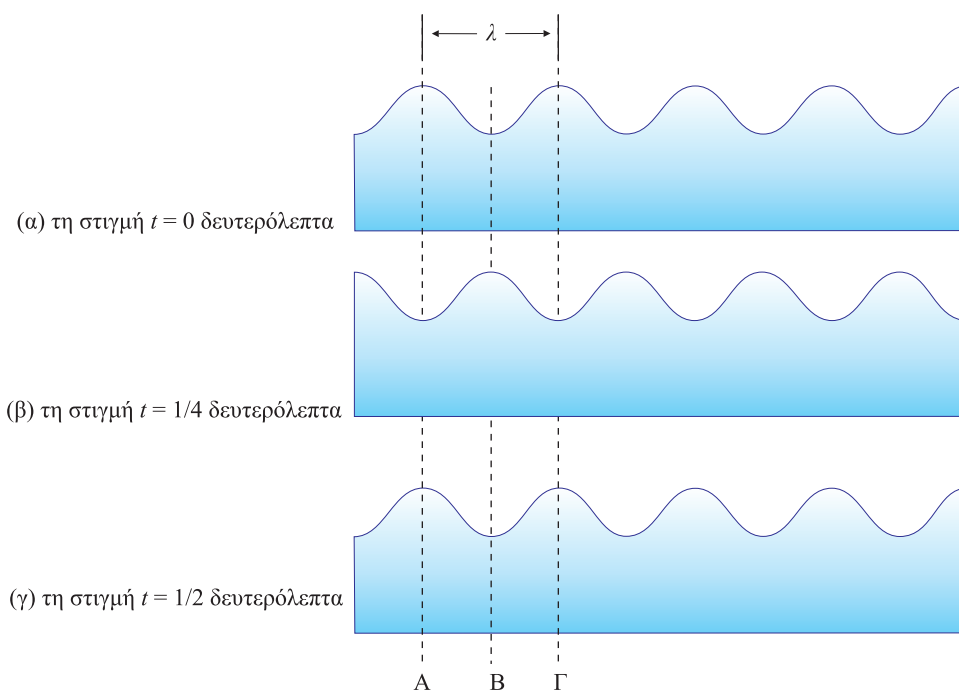
<sup>3</sup> Εννοούμε στα άτομα, που θα περιγραφούν στο Κεφάλαιο 6.

## Τα φωτόνια που βλέπουμε αλλά και αυτά που δεν βλέπουμε

### ΤΟ ΚΥΜΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΑΣ

Ας φανταστούμε ότι φωτογραφίζουμε τα κύματα σε μικρό κομμάτι της επιφάνειας της θάλασσας σε διαδοχικές χρονικές στιγμές. Το Σχήμα 3.1 αναπαριστά αυτές τις φωτογραφίες. Συγκεντρώνουμε την προσοχή μας στις θέσεις Α, Β και Γ. Στη θέση Α, τη στιγμή  $t = 0$  δευτερόλεπτα, βλέπουμε κορυφή, το μέγιστο ύψος της επιφάνειας της θάλασσας. Με την πάροδο του χρόνου, το ύψος στη θέση αυτή μειώνεται, ώσπου, μετά από  $1/4$  του δευτερολέπτου, δηλαδή τη στιγμή  $t = 1/4$  δευτερόλεπτα το ύψος είναι ελάχιστο, έχουμε «βαθούλωμα» στη θέση αυτή. Στη συνέχεια, το ύψος αυξάνεται και μετά από άλλο  $1/4$  του δευτερολέπτου, δηλαδή τη στιγμή  $t = 1/2$  δευτερόλεπτα, έχουμε και πάλι κορυφή, και πάλι μέγιστο ύψος στη θέση αυτή. Αυτό συνεχίζεται περιοδικά: μετά από άλλο  $1/4$  του δευτερολέπτου, δηλαδή τη στιγμή  $t = 3/4$  δευτερόλεπτα, θα έχουμε και πάλι βαθούλωμα, μετά από άλλο  $1/4$  του δευτερολέπτου, δηλαδή τη στιγμή  $t = 1$  δευτερόλεπτα, θα έχουμε και πάλι κορυφή κ.ο.κ. Παρόμοια συμβαίνουν και στη θέση Γ. Στη θέση Β, τη στιγμή  $t = 0$  δευτερόλεπτα έχουμε βαθούλωμα, ελάχιστο ύψος. Με την πάροδο του χρόνου, το ύψος στη θέση αυτή αυξάνεται, ώσπου μετά από  $1/4$  του δευτερολέπτου, δηλαδή τη στιγμή  $t = 1/4$  δευτερόλεπτα, έχουμε κορυφή, μέγιστο ύψος. Στη συνέχεια, το ύψος μειώνεται ώσπου, μετά από  $1/4$  του δευτερολέπτου, δηλαδή τη στιγμή  $t = 1/2$  δευτερόλεπτα, έχουμε και πάλι βαθούλωμα στη θέση αυτή. Και αυτή η αυξομείωση του ύψους στη θέση Β συνεχίζεται με την ίδια περιοδικότητα. Όταν κοιτάζουμε το κύμα της θάλασσας, το μάτι μας γελιέται. Αν δεν επικεντρώσουμε την προσοχή μας σε ένα σημείο της θάλασσας, δεν αντιλαμβανόμαστε ότι σε κάθε θέση της επιφάνειας συμβαίνει μια περιοδική διαταραχή του ύψους της ίδιας μάζας και σχηματίζουμε την εντύπωση ότι συμβαίνει μεταφορά μάζας.

Έτσι, π.χ. από την εικόνα της φωτογραφίας (α) τη στιγμή  $t = 0$  δευτερόλεπτα, της φωτογραφίας (β) τη στιγμή  $t = 1/4$  δευτερόλεπτα και της φωτογραφίας (γ) τη στιγμή  $t = 1/2$  δευτερόλεπτα σχηματίζεται η ψευδαίσθηση ότι η μάζα της επιφάνειας της θάλασσας που ήταν τη στιγμή  $t = 0$  στη θέση Α, η μάζα της κορυφής που



Σχήμα 3.1. Φωτογραφίες των κυμάτων σε μια μικρή περιοχή της επιφάνειας της θάλασσας, κατά διαδοχικές χρονικές στιγμές. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών είναι το μήκος κύματος.

ήταν τη στιγμή  $t = 0$  δευτερόλεπτα στη θέση Α μεταφέρθηκε στη θέση Β τη στιγμή  $t = 1/4$  δευτερόλεπτα και στη θέση Γ τη στιγμή  $t = 1/2$  δευτερόλεπτα.

Πρόκειται για οφθαλμαπάτη: αυτό που πραγματικά συμβαίνει με το κύμα είναι περιοδική αυξομείωση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε κάθε θέση, χωρίς σημαντική οριζόντια μετακίνηση θαλάσσιας μάζας. Εκείνο που μεταδίδεται με το κύμα από θέση σε θέση είναι η διαταραχή, η περιοδική αυξομείωση του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας. Αυτό μπορεί να το διαπιστώσει κανείς αν συγκεντρώσει το βλέμμα του σε μία μόνο θέση της θάλασσας, π.χ. σε μια σημαδούρα ή σε έναν φελλό πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας. Με τον ίδιο τρόπο, αν σε μια λεκάνη με νερό βάλουμε το δάχτυλό μας σε μια θέση και το βυθίζουμε και το ανασύρουμε περιοδικά, θα δούμε τη διαταραχή που προκαλούμε σε αυτήν τη θέση να μεταδίδεται κυκλικά με κύματα στην υπόλοιπη επιφάνεια του νερού, χωρίς να μεταφέρεται οριζόντια μάζα νερού: εκείνο που μεταδίδεται οριζόντια είναι η διαταραχή την οποία προκαλέσαμε σε ένα σημείο. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο έχουμε όταν πετάμε μια πέτρα στην επιφάνεια μιας ήρεμης λίμνης.

Ωστε το κύμα της θάλασσας είναι η μετάδοση στον χώρο, εν προκειμένω στην επιφάνεια της θάλασσας, μιας διαταραχής, της περιοδικής αυξομείωσης του ύψους της επιφάνειας της θάλασσας σε κάθε θέση.

Ο αριθμός των κύκλων διαταραχής που πραγματοποιούνται σε κάθε θέση ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα του κύματος, η δε χρονική διάρκεια ενός πλήρους κύκλου ονομάζεται περίοδος του κύματος. Στο παράδειγμα, ένας πλήρης κύκλος διαρκεί (έχει περίοδο)  $T = 0,5$  δευτερόλεπτα. Άρα σε 1 δευτερόλεπτο θα έχουμε 2 κύκλους. Η συχνότητα μετρείται σε κύκλους ανά δευτερόλεπτο και η μονάδα αυτή έχει το όνομα χερτς (hertz) και συμβολίζεται με Hz. Έτσι, όταν μιλούμε για 7 Hz, αντιλαμβανόμαστε συχνότητα 7 κύκλων ανά δευτερόλεπτο. Το κύμα του παραδείγματος έχει συχνότητα 2 Hz.

Στο κύμα, η διαταραχή μεταδίδεται στον χώρο από σημείο σε σημείο χωρίς μετακίνηση μάζας. Η ταχύτητα μετάδοσης της διαταραχής ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Στο κύμα του παραδείγματος έχουμε στη θέση Α κορυφή τη στιγμή  $t = 0$  δευτερόλεπτα, ενώ στη θέση Β έχουμε «λακκούβα». Έστω ότι η απόσταση ΑΒ είναι 1 μέτρο. Μετά από  $1/4$  δευτερόλεπτα, δηλαδή τη στιγμή  $t = 1/4$  δευτερόλεπτα, στο σημείο Β έχουμε «κορυφή». Δηλαδή η μέγιστη διαταραχή της θέσης Α εμφανίζεται στη θέση Β, που απέχει από τη θέση Α κατά ένα μέτρο, μετά από χρόνο  $1/4$  του δευτερολέπτου. Άρα η διαταραχή διαδόθηκε σε απόσταση ενός μέτρου σε χρόνο ενός τετάρτου του δευτερολέπτου. Άρα, σε ένα δευτερόλεπτο διαδίδεται σε απόσταση 4 μέτρων. Ωστε η ταχύτητα του κύματος του παραδείγματος είναι 4 μέτρα ανά δευτερόλεπτο.

Τα ακουστικά κύματα είναι διαταραχές της πίεσης που μεταδίδονται σε κάποιο υλικό, π.χ. στην ατμόσφαιρα. Και πάλι, εκείνο που μεταδίδεται στο υλικό είναι η διαταραχή της πίεσης και όχι η μάζα του υλικού. Αυτό μπορεί να γίνει αμέσως φανερό, αν αναλογισθούμε τί συμβαίνει όταν ακουμπάμε το αυτί μας στις σιδηροτροχιές του τρένου και ακούμε τον θόρυβο του τρένου που βρίσκεται σχετικά μακριά χωρίς να το βλέπουμε: εκείνο που ακούμε είναι η διαταραχή της πίεσης που προκαλούν οι ρόδες του τρένου πάνω στις σιδηροτροχιές και η οποία διαταραχή της πίεσης διαδίδεται μέσα στις σιδηροτροχιές. Βεβαίως, δεν μεταφέρεται μάζα σιδήρου διά της σιδηροτροχιάς.

Το ανθρώπινο αυτί ανταποκρίνεται, αντιλαμβάνεται ακουστικά κύματα στο εύρος συχνοτήτων από 20 έως 18.000 κύκλους ανά δευτερόλεπτο (Hz). Διαταραχές της πίεσης σε συχνότητες μεγαλύτερες από 18.000 Hz δεν γίνονται αντιληπτές από το ανθρώπινο αυτί και ονομάζονται υπέρηχοι, τα δε αντίστοιχα κύματα ονομάζονται υπερηχητικά κύματα, με εφαρμογές μεταξύ άλλων στη διαγνωστική ιατρική.

Η ταχύτητα του ηχητικού κύματος στον αέρα είναι περίπου 330 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Έτσι, αν κάποιος χτυπήσει μια μεταλλική επιφάνεια με σφυρί σε απόσταση 330 μέτρων από εμάς, θα ακούσουμε τον ήχο από το χτύπημα 1 δευτερόλεπτο μετά το χτύπημα. Αν βρισκόμαστε σε απόσταση  $2 \cdot 330 = 660$  μέτρα, θα ακούσουμε τον ήχο 2 δευτερόλεπτα μετά το χτύπημα κ.ο.κ.