

EINSTEIN - INFELD

**Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΙΔΕΩΝ  
ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ**

Μετάφραση:  
**ΓΙΑΝΝΗ ΚΑΒΑΛΙΕΡΑΤΟΥ**  
Χημικού Μηχανικού & Μεταλλειολόγου Ε.Μ.Π.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πρὶν ἀρχίσετε τὴν ἀνάγνωσι αὐτοῦ τοῦ βιβλίου, θὰ περιμένετε καὶ μὲ τὸ δίκιο σας νὰ σᾶς δοθεῖ μιά ἀπάντησι στὰ παρακάτω ἀπλά ἐρωτήματα: Γιά ποιὸ σκοπὸ γράφτηκε αὐτὸ τὸ βιβλίον; Σὲ ποιὸν φανταστικὸ ἀναγνώστη ἀπευθύνεται;

Εἶναι δύσκολο νὰ ἀπαντήσῃ κανεὶς, ἀπ' τὴν ἀρχή, μὲ ἀπλό καὶ πειστικὸ τρόπο σ' αὐτὲς τὶς ἐρωτήσεις. Θάταν πῶς εἶκοιο νὰ τὸ κάναμε, πρᾶγμα ποῦ θάταν ἄσκοπο, στὸ τέλος τοῦ βιβλίου. Βρίσκουμε ὅτι εἶναι πῶς εἶκοιο νὰ ποῦμε τί ἀκριβῶς δὲν εἶναι αὐτὸ τὸ βιβλίον. Δὲν γράψαμε ἓνα ἐγχειρίδιον φυσικῆς, δὲν θὰ βρῆτε σ' αὐτὸ τὸ βιβλίον μιά σειρά ἀπὸ συστηματικὰ μαθήματα ὅπου ἐκτίθενται τὰ γεγονότα καὶ οἱ στοιχειώδεις θεωρίαι τῆς φυσικῆς. Ἡ πρόθεσίς μας ἦταν περισσότερο νὰ σκιαγραφήσουμε μὲ ἀδρές (γενικῆς) γραμμῆς τὶς προσπάθειαι ποῦ ἔκανε τὸ ἀνθρώπινον πνεῦμα γιά νὰ βρεῖ τὶς σχέσεις ποῦ ὑπάρχουν ἀνάμεσα στὸν κόσμον τῶν ιδεῶν καὶ στὸν κόσμον τῶν φαινομένων.

Προσπαθήσαμε νὰ ἀποκαλύψουμε τὶς κινητήριαι δυνάμεις ποῦ ὑποχρεώνουν τὴν ἐπιστῆμην νὰ ἐφεύρει τὶς ιδέαι ποῦ ἀντιστοιχοῦν στὴ πραγματικότητα τοῦ κόσμου μας. Ἡ ἐκθεσίς μας ὅμως ἔπρεπε νὰ εἶναι πῶς ἀπλή.

Μέσα ἀπ' τὸ λαβύρινθο τῶν γεγονότων καὶ τῶν ἀπόψεων εἴμαστε ὑποχρεωμένοι νὰ ἐπιλέξουμε κάποιον μέγαν δρόμον

αυτόν που μας φαινότανε πιο χαρακτηριστικός και πιο αντιπροσωπευτικός. Τα γεγονότα και οι θεωρίες που δεν βρίσκονται σ' αυτό το δρόμο δεν τα πήραμε καθόλου υπ' όψη μας. Λόγου του γενικού μας σκοπού αναγκασθήκαμε να κάνουμε μία ώριση επιλογή τῶν γεγονότων και τῶν ιδεῶν. Ἡ σπουδαιότητα ενός προβλήματος δεν ἔπρεπε να κριθεῖ με βάση τὸν ἀριθμὸ τῶν σελίδων που τοῦ ἀφιέρωσαν. Μερικὲς βασικὲς κατευθύνσεις τῆς σκέψης ἀφέθηκαν στὴ πάντα, ὄχι γιατί μᾶς φάνηκαν χωρίς σημασία, ἀλλὰ γιατί δὲν βρισκόντουσαν κατὰ μῆκος τοῦ δρόμου που διαλέξαμε.

Σ' ὅλη τὴ διάρκεια που γράφαμε αὐτὸ τὸ βιβλίο εἶχαμε ἀτέλειωτες συζητήσεις πάνω στα χαρακτηριστικὰ γνωρίσματα τοῦ ιδανικοῦ μας ἀναγνώστη, καὶ ἀφιέρωσαμε πολλές ὥρες, φροντίζοντας πολὺ γι' αὐτόν. Ἐπρεπε κατὰ τὴ γνώμη μας, νὰ ἀντισταθμίσουμε τὴν παντελῆ ἔλλειψη συγκεκριμένων γνώσεων στὴ φυσικὴ καὶ στὰ μαθηματικὰ μ' ἓναν πολὺ μεγάλο ἀριθμὸ ἀπὸ ἄλλα πλεονεκτήματα. Τὸν βρήκαμε γεμάτο ἀπὸ ἐνδιαφέροντα γιὰ τίς ιδέες τῆς φυσικῆς καὶ τῆς φιλοσοφίας καὶ ὑποχρεωθήκαμε νὰ θαυμάσουμε τὴν ὑπομονὴ μὲ τὴν ὁποία ἀγωνίζονταν γιὰ νὰ ξεπεράσει τὰ πειράματα τὰ λιγώτερο ἐνδιαφέροντα καὶ τὰ περισσότερα δύσκολα γι' αὐτόν. Συνειδητοποίησε ὅτι γιὰ νὰ καταλάβει μιὰ ὀρισμένη σελίδα ἔπρεπε πρῶτα νὰ διαβάσει μὲ προσοχὴ αὐτὲς που πρηγοῦνταν. Ἦξερε ὅτι ἓνα ἐπιστημονικὸ βιβλίο, ἀκόμη κι ὅταν ἔχει ἐκλαϊκευτικὸ χαραχτήρα δὲν μπορεῖ νὰ διαβαστεῖ μὲ τὸν ἴδιο τρόπο σὰν μυθιστόρημα. Τὸ βιβλίο αὐτὸ εἶναι μιὰ ἀπλή συνομιλία ἀνάμεσα σὲ σᾶς καὶ μᾶς. Ἀφήνουμε σὲ σᾶς τὴν φροντίδα νὰ κρίνετε ἂν εἶναι πληκτικὸ ἢ ἐνδιαφέρον, ἄνοστο ἢ τονωτικὸ. Ὁ σκοπὸς που γράφτηκε αὐτὸ τὸ βιβλίο θὰ ἐκπληρωθεῖ ἂν αὐτὲς οἱ σελίδες σᾶς δώσουν μιὰ ιδέα γιὰ τὸν αἰώνιο ἀγῶνα τοῦ ἐφευρετικοῦ πνεύματος τοῦ ἀνθρώπου νὰ φτύσει σὲ μιὰ πιο τέλεια κατανόηση τῶν νόμων που κυβερνοῦν τὰ φυσικὰ φαινόμενα.

Α.Ε καὶ Λ.Ι.

## 1. Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

### ΤΟ ΜΕΓΑΛΟ ΜΥΣΤΗΡΙΩΔΕΣ ΡΟΜΑΝΤΖΟ

Ἐπάρχουν πολλὰ μυθιστορήματα, που προέρχονται ἀπ' τὸν κόσμον τῆς ἀνθρώπινης φαντασίας, μέσα στα ὁποῖα περιγράφονται ἀνεξιχνίαστα τέλεια μυστήρια. Ὡστόσο ἂν διαβάσουμε μὲ προσοχὴ ἓνα τέτοιο μυθιστόρημα, θὰ δοῦμε ὅτι μέσα ὑπάρχουν ὅλα ἐκεῖνα τὰ ἔχνη, ὅλα τὰ νήματα που θὰ μᾶς καθοδηγοῦσαν νὰ οἰκοδομήσουμε ἀπὸ μόνοι μας τὴ θεωρία τῆς λύσης τῶν μυστηρίων που μέσα ἐκεῖ περιγράφονται. Ἄν προβληματιστοῦμε πάνω στα περιστατικὰ που περιγράφονται ἀπὸ τὴν ἀρχὴ τοῦ βιβλίου καὶ ἀκολουθήσουμε ὀρισμένα κατευθυντήρια νήματα προσεχτικὰ, θὰ βροῦμε τὴν ὀλοκληρωμένη λύση τῶν μυστηρίων, πολὺ πρὶν μᾶς τὴ φανερώσει ὁ ἴδιος ὁ συγγραφέας στὸ τέλος τοῦ βιβλίου. Μάλιστα, ἀντίθετα μὲ τὴ λύση ἑνὸς ἄλλου εἶδους μυστηρίων, αὐτὴ ἡ λύση δὲ μᾶς ἐξαπατᾷ ποτὲ καὶ ἐμφανίζεται ἀκριβῶς τὴ στιγμὴ που τὴ περιμένουμε.

Μποροῦμε ἄραγε νὰ ποῦμε, ὅτι ὁ ἀναγνώστης ἑνὸς τέτοιου βιβλίου, μοιάζει λίγο μὲ ἀνθρώπους που ἀφιέρωσαν τὸν ἑαυτό τους στὴν ἐπιστῆμη καὶ στὸ πέρασμα πολλῶν γενεῶν, συνεχίζουν νὰ ψάχνουν, γιὰ νὰ βροῦν τίς λύσεις τῶν μυστηρίων που περιέχονται στὸ βιβλίο τῆς φύσης; Κατ' ἀρχὴν μιὰ τέτοια σύγκριση δὲν εἶναι σωστὴ καὶ στὴ συνέχεια θὰ πρέπει νὰ ἐγκαταληφθεῖ. Νομίζουμε ὅμως ὅτι ὡς ἓνα βαθμὸ εἶναι δικαιολογημένη καὶ περιέχει μιὰ δόση ἀλήθειας που ἂν τὴ διευρύνουμε

λίγο θά μπορούσε νά μᾶς ἀπεικονίσει καλύτερα τή προσπάθεια τῆς ἐπιστήμης γιά τήν λύση τῶν μυστηρίων τοῦ σύμπαντος. Τό μεγάλο αὐτό βιβλίο τῆς φύσης, πού εἶναι γεμάτο μυστήρια, δέν φανέρωσε μέχρι σήμερα ὅλα τά μυστικά του. Καί οὔτε κἄν εἴμαστε βέβαιοι ὅτι θά βροῦμε κάποτε τίς ὀριστικές λύσεις. Βέβαια ἡ μέχρι σήμερα μελέτη τοῦ μεγάλου βιβλίου τῆς φύσης μᾶς πρόσφερε πολλά: μᾶς δίδαξε ὅτι ἡ φύση ἔχει τή δική της διάλεχτο καί ἂν θέλουμε νά διαβάσουμε τό βιβλίο της πρέπει νά μάθουμε τή γλώσσα της, μᾶς βοήθησε νά ἀνακαλύψουμε πολλά κατευθυντήρια νήματα, ἀνακαλύψεις, πού ἦταν γιά τούς ἐπιστήμονες μιά ὄαση χαρᾶς καί συγκινήσεων στή τόσο συχνά κοπιαστική πορεία τῆς ἐπιστήμης. Οἱ ἐπιστήμονες σήμερα ἔχουν συνειδητοποιήσει ὅτι παρά τούς τόμους πού διαβάστηκαν καί κατανοήθηκαν ἀπό τό μεγάλο βιβλίο τῆς φύσης, εἴμαστε ὥστόσο πολύ μακριά ἀπό μιά ὀριστική καί ὀλοκληρωμένη λύση τῶν μυστηρίων της, ἂν ὑποθέσουμε ὅτι ὑπάρχει μιά τέτοια. Σέ κάθε φάση πού περνᾷ ἡ ἐπιστήμη, προσπαθεῖ νά βρεῖ λύσεις γιά τά φαινόμενα πού νά μὴν ἔρχονται σέ ἀντίθεση μέ τίς νομοτέλειες πού ἤδη ἔχουν ἀνακαλυφθεῖ. Οἱ θεωρίες πού διατυπώνονται μέ τή μορφή δοκιμίων καί γίνονται ἀποδεχτές, ἐξηγοῦν πολλά ζητήματα, ἀλλά μέχρι σήμερα δέν ἔχει βρεθεῖ καμμιά λύση γενικῆς ἰσχύος πού νά ἑναρμονίζεται μ' ὅλες τίς σχέσεις καί νομοτέλειες πού ἔχουν στό παρελθόν ἀνακαλυφθεῖ. Πολύ συχνά μιά θεωρία πού μέ τή πρώτη ματιά φαίνεται νά ἑναρμονίζεται τέλεια μέ τίς προηγούμενες, στό φῶς μιᾶς δεύτερης ἀνάγνωσης ἀποδεικνύεται ἐλλειματική καί ἀνολοκληρωτή. Ἐρχονται στήν ἐπιφάνεια νέα φαινόμενα τά ὁποῖα εἴτε ἀντιφάσκουν μ' αὐτή εἴτε δέν ἐξηγοῦνται ἀπ' αὐτή.

Ὅσο περισσότερο διαβάζουμε τό βιβλίο τῆς φύσης τόσο περισσότερο θαυμάζουμε τό τέλει οἰκοδόμημά του, ἀκόμα κι' ὅταν μιά λύση πού μᾶς φαίνονταν ἀμεμπτη ξεγλυστράει στό βαθμό πού προχωρᾷμε τήν ἔρευνά μας.

Ἀπ' τόν καιρό πού ὁ Κόναν Ντόυλ<sup>1</sup> ἔγραφε τίς θαυμάσιες ἱστορίες του μέχρι σήμερα, σχεδόν σ, ὅλες τίς ἀστυνομικές ἱστορίες, φτάνει μιά στιγμή πού ὁ ντετέκτιβ ἔχει συλλέξει ὅλο

τά στοιχεῖα πού εἶχε ἄνᾳγκη γιά νά φτάσει σέ μιά τουλάχιστον πρώτη φάση τῆς λύσης τοῦ μυστηρίου. Τά στοιχεῖα αὐτά φαίνονται συχνά ὀλότελα ξένα μεταξύ τους, ἄσχετα τό ἓνα μέ τ' ἄλλο καί ἀσύνδετα.

Ὁ μέγας ὁμως ντετέκτιβ ξέρεي καλά πῶς γιά τήν ὥρα δέν χρειάζεται νά συνεχίσει τήν ἔρευνά του γιά τήν ἀναζήτηση νέων στοιχείων καί ὅτι ἀπό δῶ καί πέρα μόνο ἡ καθαρὴ σκέψη θά μπορούσε νά φέρει ἀποτελέσματα καί νά φανερώσει τίς σχέσεις πού ὑπάρχουν ἀνάμεσα στά στοιχεῖα πού μαζεύτηκαν.

Προτιμᾷ λοιπόν νά περάσει τήν ὥρα του παίζοντας λίγο βιολί ἢ ξαπλώνεται ἀναπαυτικά στή πολυθρόνα του καπνίζοντας τή πίπα του καί ξαφνικά, ὦ τοῦ θαύματος! Βρίσκει τή λύση. Καί δέ βρίσκει μόνο τή λύση πού ἐξηγεῖ τή σχέση πού ὑπάρχει ἀνάμεσα στίς ἐνδείξεις πού τό καθοδήγησαν καί τά στοιχεῖα πού ἔχει ἤδη στά χέρια του, ἀλλά ξέρει ἀκόμα καί μπορεῖ καί προβλέπει ἄλλα γεγονότα τά ὁποῖα πρόκειται νά συμβοῦν. Καί μιά καί τώρα εἶναι σέ θέση νά ξέρει πρὸς τά ποῦ, πρέπει νά προσανατολίξει τίς ἔρευνές του, μπορεῖ νά βγεῖ, ἂν τοῦ ἀρέσει, γιά νά μαζέψει νέα στοιχεῖα πού θά ἐπαλήθευαν τή θεωρία του.

Ὁ ἐπιστήμονας ὁμως πού προσπαθεῖ νά διαβάσει τό βιβλίο τῆς φύσης — ἐπιτρέψτε μας νά χρησιμοποιήσουμε γιά ἄλλη μιά φορά αὐτή τή τόσο τετριμμένη φράση — πρέπει νά βρεῖ τή λύση ὁ ἴδιος, γιατί δέν θά μπορούσε ὅπως θά μπορούσαν νά κάνουν οἱ ἀνυπόμονοι ἀναγνώστες τῶν ἄλλων βιβλίων, νά πᾶνε στίς τελευταῖες σελίδες καί νά τή βροῦνε.

Στή περίπτωση μας ὁ ἀναγνώστης εἶναι ταυτόχρονα καί ἐρευνητής πού προσπαθεῖ νά ἐξηγήσει τουλάχιστον μερικά, τίς σχέσεις πού ὑπάρχουν ἀνάμεσα στά διάφορα φαινόμενα, θεωρούμενα μέσα στή πλούσια ἀλληλουχία τους.

Γιά νά βρεῖ ὁμως μιά ἔστω καί μερική λύση, ὁ ἐπιστήμονας πρέπει νά μαζέψει ὅλα τά στοιχεῖα πού τοῦ εἶναι προσιτά, ἂν καί χαοτικά καί ἀσύνδετα μεταξύ τους, καί νά τούς δώσει μιά συνοχή νά τούς δώσει μιά ἐξήγηση κι' ἓναν εἰρμό μέ τή

1. Συγγραφέας τοῦ Σέρλοκ Χόλμς (Σ.Μ.)

βοήθεια τῆς δημιουργικῆς σκέψης. Στίς σελίδες πού ἀκολουθοῦν, ἔχουμε σάν σκοπό, νά περιγράψουμε καί νά σκιαγραφήσουμε σέ γενικές γραμμές τήν εξέλιξη τῶν ιδεῶν στή Φυσική καί τήν εξέλιξη τῆς καθαρῆς σκέψης τῶν ἐρευνητῶν. Ἀσχολούμαστε βασικά, μέ τίς βασικές σκέψεις καί ιδέες πού διατυπώθηκαν στήν εξέλιξη τῆς φυσικῆς, καί μέ τό ρόλο πού διαδραματίσανε στή περιπετειώδης προσπάθεια τῆς ἐπιστήμης γιά τή κατανόηση τῶν νόμων πού διέπουν τό φυσικό μας κόσμο.

## ΤΟ ΠΡΩΤΟ ΚΑΤΕΥΘΥΝΤΗΡΙΟ ΝΗΜΑ

Οἱ προσπάθειες πού ἔγιναν γιά νά μελετηθεῖ τό μεγάλο βιβλίο τῶν μυστηρίων τῆς φύσης, εἶναι τόσο παλιές ὅσο καί ἡ ἴδια ἡ ἀνθρώπινη σκέψη. Παρ' ὅλα αὐτά μόνο ἔδω καί 300 περίπου χρόνια οἱ σοφοί ἄρχισαν νά καταλαβαίνουν τή γλώσσα τοῦ βιβλίου τῆς φύσης. Στά 300 τελευταῖα χρόνια ἀναπτύχθηκαν νέες τεχνικές ἐρευνες, νέες συστηματικές μέθοδοι, πού εἶχαν γιά σκοπό νά βρεθοῦν ὀρισμένοι κατευθυντήριοι ἔξονες πού θά μᾶς ὀδηγοῦσαν στήν ἀλήθεια. Στό διάστημα αὐτό, μερικά ἀπό τά αἰνίγματα τῆς φύσης λύθηκαν, ἄν καί πολλές ἀπ' τίς λύσεις πού βρέθηκαν τότε, φάνηκαν πρόχειρες καί ἐπιφανειακές κάτω ἀπ' τό φῶς τῶν μεταγενεστέρων ἐρευνητῶν.

Ἐνα βασικό πρόβλημα πού ἔμεινε γιά χιλιάδες χρόνια σκοτεινό καί ἄλυτο ἐξ αἰτίας τῆς μεγάλης του πολυπλοκότητας, εἶναι τό περίβλημα τῆς κίνησης. Ὅλες οἱ κινήσεις πού παρατηροῦμε στή φύση, ἡ κίνηση μᾶς πέτρας πού πετᾶμε στόν ἀέρα, ἡ κίνηση ἐνός караβιού πού πλέει στή θάλασσα, ἡ κίνηση μᾶς ἄμαξας πού προχωρεῖ στό δρόμο, εἶναι στή πραγματικότητα ἐξαιρετικά πολύπλοκες. Ἄς ἐξετάσουμε ἕνα σῶμα πού βρίσκεται σέ ἀκίνησια, πάνω στό ὁποῖο δέν ἐξασκεῖται καμιά ἐπίδραση. Γιά νά ἀλλάξουμε τή θέση αὐτοῦ τοῦ σώματος, εἴμαστε ὑποχρεωμένοι νά ἀσκήσουμε μιᾶ κάποια ἐπίδραση, νά τό σπρώξουμε ἢ νά τό ἀνασηκώσουμε, ἢ νά ἐξασκήσουμε μιᾶ ἐπίδραση μέ τή βοήθεια ἐνός ἄλλου σώματος ὅπως γιά παρά-

δειγμα, μέ τήν ἀτμομηχανή ἢ τ' ἄλλα. Δημιουργοῦμε ἔτσι τήν ἔμφυτη, αὐτονόητη, ἰδέα, ὅτι ἡ κίνηση ἐνός σώματος σχετίζεται μέ τήν ὄθηση ἢ τήν ἔλξη τοῦ σώματος. Οἱ συχνές καί ἐπαναλαμβανόμενες ἐμπειρίες πού ἔχουμε ἀπό τό κόσμο πού ὑπάρχει γύρω μας, θά μᾶς ὀδηγοῦσαν ἔτσι νά διακινδυνεύσουμε τό παρακάτω συμπέρασμα: ἄν θέλουμε νά κινεῖται ἕνα σῶμα πῶ γρήγορα, πρέπει νά το σπρώχνουμε πῶ δυνατά. Φαίνεται ἔτσι, μέ τή πρώτη ματιά, φυσικό νά συμπεράνουμε ὅτι ὅσο πῶ ἰσχυρή θά εἶναι ἡ ἐπίδραση πού ἐξασκοῦμε στό σῶμα, τόσο πῶ μεγάλη θά εἶναι καί ἡ ταχύτητά του. Μιά ἄμαξα πού σύρεται ἀπό 4 ἄλλα προχωρᾷ πῶ γρήγορα ἀπό μιᾶ ἄλλη πού σύρεται ἀπό 2 μόνο ἄλλα. Βλέπουμε λοιπόν ὅτι ἡ ἔμφυτη ἰδέα πού ἔχουμε γιά τή κίνηση εἶναι οὐσιαστικά συνδεδεμένη μέ κάποια πράξη.

Στούς ἀναγνώστες τῶν ἀστυνομικῶν μυθιστορημάτων, εἶναι πολύ γνωστό ὅτι πολλές φορές ἕνα λανθασμένο ἔχνος, μπερδεύει ὅλη τήν ἱστορία καί ἀναβάλλει τή λύση τοῦ προβλήματος. Αὐτό συμβαίνει καί στήν ἐπιστήμη δταν κάνουμε συλλογισμούς πού βασίζονται στήν ἔμφυτη γνώση πού ἔχουμε γιά τή φύση, αὐτό συνέβηκε καί στή περίπτωση τῆς μελέτης τοῦ φαινομένου τῆς κίνησης, ὅπου ἡ ἔμφυτη γνώση πού εἴχαμε γι' αὐτήν ὀδήγησε σέ ἀνακριβεῖς καί λανθασμένες ἀπόψεις πού ὑποστηρίχτηκαν καί εἶχαν γίνει ἀποδεχτές γιά αἰῶνες ὀλόκληρους.

Ἡ μεγάλη αὐθεντία τῆς ἀρχαιότητας, ὁ Ἀριστοτέλης, ἦταν ἴσως ὁ σπουδαιότερος λόγος τῆς ἐπίμονης πίστεως πού εἶχαν οἱ ἄνθρωποι στήν ἔμφυτη ἰδέα τῆς κίνησης. Στή μηχανική του, ἕνα ἔργο πού δέν ἀμφισβητήθηκε καθόλου ἐπί δύο χιλιάδες ὀλόκληρα χρόνια διαβάζουμε:

Ἐνα σῶμα πού βρίσκεται σέ κίνηση, σταματᾷ, δταν ἡ δύναμη πού τό ὄθει δέν μπορεῖ νά ἐπιδράσει ἄλλο ἐπάνω του,

1. Ὁ Ἀϊνστάϊν χρησιμοποιεῖ τόν ὄρο ἐπίδραση γιατί δέν θέλει νά χρησιμοποιήσει ἀκόμη τόν ὄρο δύναμη.

ώστε να συνεχίσει τη κίνησή του.

Η αποκάλυψη και χρησιμοποίηση της επιστημονικής έννοιας της κίνησης από το Γαλιλαίο, αποτελεί μιά απ' τις πιο σημαντικές κατακτήσεις της ανθρώπινης ιστορίας και χαρακτηρίζει το πραγματικό σημείο άφετηρίας της φυσικής.

Η ανακάλυψη που έκανε ο Γαλιλαίος, μάς έμαθε ότι δεν πρέπει πάντα να εμπιστευόμαστε τα συμπεράσματα εκείνα που πηγάζουν από την άμεση παρατήρηση και την έμφυτη σκέψη, γιατί συχνά μάς οδηγούν σε μιά λανθασμένη επιλογή του δρόμου που πρέπει να ακολουθήσουμε στην έρευνά μας. Για να δούμε όμως, γιατί πέσανε έξω αυτά τα έμφυτα συμπεράσματα στά οποία πίστευε ο κόσμος πριν τις ανακαλύψεις του Γαλιλαίου; Είναι δυνατόν να είναι λανθασμένο το έμφυτο συμπέρασμα π.χ. ότι μιά άμαξα που σύρεται από 4 άλογα θα μετακινείται πιο γρήγορα από μιά άμαξα που τη σέρνουν 2 μόνο άλογα;

Ας εξετάσουμε, λοιπόν, από πιο κοντά τα βασικά χαρακτηριστικά της κίνησης, ξεκινώντας από τις εμπειρίες της καθημερινής ζωής, εμπειρίες που είναι γνωστές στην ανθρωπότητα από τις απαρχές του πολιτισμού της και αποχτήθηκαν στη διάρκεια του σκληρού αγώνα που έκανε ο άνθρωπος για την επιβίωσή του.

Ας φαντασθούμε ότι ένας άνθρωπος, σπρώχνει ένα αυτοκίνητο, πάνω σ' έναν όμαλό και λείο δρόμο. Ας υποθέσουμε ότι ξαφνικά σταματά να σπρώχνει το αυτοκίνητο. Τότε το αυτοκίνητο θα συνεχίσει να διανύει μιά κάποια απόσταση πριν σταματήσει τελείως. Γενιέται το ερώτημα: Πώς θα μπορούσαμε να παρατείνουμε αυτή την απόσταση;

Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε με διάφορους τρόπους: π.χ. λιπαίνοντας τις ρόδες του αυτοκινήτου ή κάνοντας το δρόμο ακόμα περισσότερο λείο. Όσο πιο άνετα γυρνάνε οι ρόδες, όσο περισσότερο λείος είναι ο δρόμος, τόσο περισσότερο χρόνο το αυτοκίνητο θα συνεχίζει να κινείται. Τι όμως πετύχαμε με τη λίπανση των τροχών και τη λείανση του

δρόμου; Απλά και μόνο τούτο: έλλατώσαμε τις εξωτερικές επιδράσεις. Αυτό που λέμε τριβή έλλατώθηκε τόσο σ' ότι αφορά τη κίνηση των τροχών όσο και τη κίνηση των τροχών πάνω στο δρόμο. Αυτό αποτελεί ήδη μιά θεωρητική έρμηνεία ενός προφανούς γεγονότος. Στη πραγματικότητα όμως πρόκειται πάλι για μιά φαινομενική γνώση. Ένα βήμα ακόμα όμως αν κάνουμε θα βρούμε το αληθινό κατευθυντήριο άξονα της έρευνας.

Ας φανταστούμε ένα δρόμο ολότελα λείο και ρόδες που γυρίζουν χωρίς καμιά τριβή. Σε μιά τέτοια περίπτωση, δεν θα υπήρχε τίποτα που να μπορούσε να σταματήσει το αυτοκίνητο, και αυτό θα συνέχιζε να κινείται άσταμάτητα. Αυτό όμως το συμπέρασμα το βγάξουμε μόνο αν φανταστούμε μιά εξειδικευμένη εμπειρία, μιά εμπειρία δηλαδή που στη πραγματικότητα δεν μπορεί ποτέ να υπάρξει, δεδομένου ότι είναι αδύνατον να εξαλείψουμε όλες τις εξωτερικές επιδράσεις. Ανεξάρτητα όμως απ' αυτό, αυτή η εξειδικευμένη εμπειρία μάς φανερώνει τον κατευθυντήριο εκείνο άξονα που αποτέλεσε πραγματικά τη βάση της κινητικής μηχανικής.

Συγκρίνοντας τις δύο αυτές μεθόδους προσέγγισης του προβλήματος μπορούμε να πούμε ότι: Η έμφυτη αντίληψη για τη κίνηση, αυτή του Αριστοτέλη μάς διδάσκει πώς όσο πιο μεγάλη είναι η επίδραση που εξασκείται πάνω σ' ένα σώμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το σώμα. Η ταχύτητα δηλαδή δείχνει έδω αν εξασκούνται ή όχι εξωτερικές επιδράσεις πάνω στο σώμα. Ο νέος όμως κατευθυντήριος άξονας που ανακάλυψε ο Γαλιλαίος είναι:

Αν ένα σώμα ούτε ώθείται, ούτε έλκεται ούτε υπόκειται σε οποιαδήποτε άλλη επίδραση ή πιο συνοπτικά αν καμιά εξωτερική δύναμη δεν άσκειται πάνω στο σώμα, τότε αυτό κινείται ομοιόμορφα, δηλαδή πάντοτε με την ίδια ταχύτητα, κατά μήκος μιάς ευθείας γραμμής.

Όπως βλέπουμε έδω η ταχύτητα δεν δείχνει αν εξασκούν-

ται ή όχι εξωτερικές δυνάμεις πάνω στο σώμα. Τό συμπέρασμα του Γαλιλαίου που ήταν σωστό τελειοποιήθηκε μιά γενιά αργότερα από τό Νεύτωνα και ονομάστηκε ό νόμος τής αδράνειας. Είναι συνήθως ό πρώτος νόμος τής φυσικής που μαθαίνουμε απ' έξω στο σχολείο και ασφαλώς θά υπάρχουν μερικοί από μās που θά τόν θυμούνται ακόμα:

Κάθε σώμα, διατηρεί τή κατάσταση τής ακινησίας του ή τής ομοιόμορφης κίνησής του πάνω σε εύθεια γραμμή, όσο δέν υποχρεώνεται νά μεταβάλλει αὐτή του τή κατάσταση από δυνάμεις που εξασκούνται πάνω σ' αὐτό.

Είδαμε ότι αὐτός ό νόμος τής αδράνειας, δέν μπορεί νά πηγάσει άμεσα από τήν έμπειρία αλλά μόνο από τή θεωρητική σκέψη σε συνδιασμό με τήν παρατήρηση. Η έξειδανικευμένη έμπειρία δέν μπορεί νά υπάρξει πραγματική, παρά τό γεγονός ότι οδηγεί σε μιά βαθύτερη κατανόηση τής πραγματικής έμπειρίας. Από τή ποικιλία τών συνθέτων κινήσεων που παρατηρούμε στο κόσμο που βρίσκεται γύρω μας, επιλέγουμε σαν πρώτο παράδειγμα τήν ομοιόμορφη κίνηση. Είναι ή πιο απλή γιατί όταν υπάρχει ομοιόμορφη κίνηση δέν εξασκείται καμμιά εξωτερική δύναμη. Παρ' όλ' αὐτά στή πραγματικότητα ή ομοιόμορφη κίνηση δέν μπορεί ποτέ νά υπάρξει. Μιά πέτρα που αφήνουμε νά πέσει απ' τό ύψος ενός πύργου, ένα αυτοκίνητο που σπρώχνουμε κατά μήκος του δρόμου, δέν μπορούν νά κινούνται κατά τρόπο απόλυτα ομοιόμορφο γιατί δέν μπορούμε νά εξαλείψουμε όλότελα τήν επίδραση όλων τών εξωτερικών δυνάμεων.

Στά καλά αστυνομικά μυθιστορήματα, τά πιο χτυπητά περιστατικά οδηγούν σε άδικαιολόγητες υποψίες. Στίς προσπύθειες που κάνουμε για τή γνώση τών νόμων τής φύσης, βλέπουμε παρόμοια, ότι ή έμφυτη έρμηνεία που δίνουμε στα φαινόμενα είναι όλότελα επιφανειακή και συχνά σφαλερή. Η εικόνα που ή ανθρώπινη σκέψη δημιουργεί για τό κόσμο, μεταβάλλεται συνεχώς. Η συνεισφορά του Γαλιλαίου έγκειται στο ότι καταπολέμησε αὐτή τήν άποψη. Έδω άκριβώς βρίσκεται και ή σημασία τής ανακάλυψης που έκανε.

"Επειτα απ' όλα όσα είπαμε όμως αναφύεται μιά νέα έρώτηση σχετικά με τή κίνηση: "Αν ή ταχύτητα δέν μās δείχνει ότι εξασκούνται σ' ένα σώμα εξωτερικές δυνάμεις τότε τί είναι;

"Η άπάντηση σ' αὐτό τό βασικό έρώτημα δόθηκε από τό Γαλιλαίο και κατά κάποιο τρόπο πιο συγκεκριμένο απ' τό Νεύτωνα. Ο Γαλιλαίος ανακάλυψε ένα νέο κατευθυντήριο νήμα για τήν έρευνα. Για νά βρούμε τή σωστή άπάντηση σ' αὐτό τό έρώτημα, πρέπει νά σκεφτούμε λίγο πιο βαθειά πάνω στη περίπτωση του αυτοκινήτου που κινείται σ' ένα όλότελα λείο δρόμο.

Στήν έξειδανικευμένη μας έμπειρία, ή ομοιομορφία τής κίνησης οφείλονταν στήν άπουσία κάθε εξωτερικής δύναμης. "Ας υποθέσουμε τώρα, ότι δίνουμε στο αυτοκίνητο που κινείται ομοιόμορφα μιά απότομη ώθηση προς τή κατεύθυνση τής κίνησής του. Τί θά συμβεί σε μιά τέτοια περίπτωση; Θα παρατηρήσουμε πρώτα-πρώτα μιά φανερό αύξηση τής ταχύτητάς του. Και είναι τό ίδιο φανερό ότι αν δίναμε στο αυτοκίνητο ένα χτύπημα προς τήν αντίθετη κατεύθυνση τής κίνησης, θα παρατηρούσαμε μιά έλάτωση τής ταχύτητάς του. Στή πρώτη περίπτωση έχουμε επιτάχυνση τής ταχύτητάς του, στη δεύτερη επιβράδυνση τής ταχύτητάς του. Έτσι φτάνουμε στο παρακάτω συμπέρασμα: "Η εξάσκηση μιάς εξωτερικής δύναμης έχει σαν συνέπεια τή μεταβολή τής ταχύτητας." Έτσι βλέπουμε ότι δέν είναι ή ταχύτητα αὐτή καθ' έαυτή αλλά ή μεταβολή της που αποτελεί συνέπεια τής ώθησης ή τής έλξης. Μιά τέτοια επίδραση αύξάνει ή άλλοιώνει τή κίνηση, ανάλογα με τό αν άσκειται στη διεύθυνση τής κίνησης ή προς τήν αντίθετη κατεύθυνση.

Αὐτό ό Γαλιλαίος τό είχε κατανοήσει πάρα πολύ καλά, για αὐτό και στο έργο του «Δυό νέες επιστήμες» έγραφε:

Μιά οποιαδήποτε ταχύτητα που έχει ένα σώμα, διατηρηται συνεχώς τόσο, όσο οι εξωτερικές αίτιες επιτάχυνσης ή επιβράδυνσης τέμνονται, συνθήκη, που πραγματοποιείται μόνο στο οριζόντιο επίπεδο. Γιατί όταν τό επίπεδο πάνω στο οποίο

κινείται τό σώμα είναι κατηφορικό υπάρχει ήδη μία αίτια επιτάχυνσης ενώ όταν είναι άνηφορικό υπάρχει ήδη μία αίτια επιβράδυνσης. Από εδώ βγαίνει τό συμπέρασμα ότι ή κίνηση στό όριζόντιο επίπεδο είναι συνεχής. Γιατί άν ή ταχύτητα είναι όμοιόμορφη, τότε δέν μπορεί νά έλλατωθει ή ν' αύξηθει κι' άκόμα περισσότερο νά εξαλειφθει.

Ακολουθώντας αυτό τό τόσο χρήσιμο καθοδηγητικό νήμα, φτάνουμε σέ μία πολύ βαθειά γνώση του προβλήματος της κίνησης. Έχουμε νά κάνουμε μέ τή σχέση ανάμεσα στη δύναμη και τή μεταβολή της ταχύτητας και όχι μέ τή σχέση ανάμεσα στη δύναμη και τή ταχύτητα αυτή καθ' έαυτή, όπως τείναμε νά πιστεύουμε σύμφωνα μέ τήν έμφυτη και φαινομενική αντίληψη πού είχαμε για τή κίνηση. Αυτή είναι ή βάση της κλασσικής μηχανικής όπως αυτή διατυπώθηκε από τό Νεύτωνα.

Μεταχειριστήκαμε ήδη δύο έννοιες πού διαδραματίζουν ένα πολύ σπουδαίο ρόλο στη κλασσική μηχανική: Τή δύναμη και τή μεταβολή της ταχύτητας. Στη παρατέρα ανάπτυξη της έπιστήμης αυτές οι δύο έννοιες επεχτάθηκαν και γενικεύτηκαν. Πρέπει κατά συνέπεια νά τις εξετάσουμε από πού κοντά. Τί είναι δύναμη; Η αντίληψη πού έχουμε για τό τί σημαίνει αυτός ό όρος, είναι μία έμφυτη αντίληψη. Αυτή ή έμφυτη αντίληψη πού έχουμε για τή κίνηση, συνδέεται μέσα μας μέ τή προσπάθεια πού κάνουμε για νά σπρώξουμε, νά πετάξουμε ή νά σύρουμε ένα σώμα, μ' άλλα λόγια συνδέεται μέ τή μυϊκή αίσθηση και συνοδεύει κάθε μία απ' αυτές τις πράξεις. Αλλά ή γενίκευση της έννοιας της δύναμης πάει πολύ πού μακριά απ' αυτά τά απλά παραδείγματα. Μπορούμε νά διανοηθούμε μία δύναμη χωρίς νά φανταζόμαστε ένα άλογο πού σέρνει μία άμαξα. Μιλάμε για τή δύναμη της έλξης ανάμεσα στον ήλιο και τή γή, ανάμεσα στη γή και στη σελήνη και για τις δυνάμεις που προσδιορίζουν τις παλλοίριες. Μιλάμε για τή δύναμη μέ τήν όποία ή γή υποχρεώνει έμās όπως και όλα τά αντικείμενα πού βρίσκονται γύρω μας νά παραμένουν στη σφαίρα της επιρροής της και για τή δύναμη του άέρα πού προκυλεί κύματα στη θάλασσα ή κουνά τά φύλλα των δέντρων. Κάθε φορά πού

παρατηρούμε μία μεταβολή της ταχύτητας, θεωρούμε ότι υπεύθυνα γι' αυτή τή μεταβολή είναι μία έξωτερική δύναμη, μέ τή γενική έννοια του όρου. Ο Νεύτων έγραφε στις « Αρχές » του:.

Κάθε άσκούμενη δύναμη είναι μία δράση πού άσκειται σ' ένα σώμα, για νά μεταβληθει ή κατάσταση της όμοιόμορφης κίνησής του ή της άκίνησias του πάνω σέ μία ευθεία γραμμή.

Αυτή ή δύναμη βρίσκεται άποκλειστικά στη πράξη και δέν συνεχίζει νά εξασκείται στό σώμα όταν αυτή ή τελευταία σταματήσει νά άσκειται. Γιατί τό σώμα διατηρεί κάθε νέα κατάσταση πού άποχτā από τήν *vis inertiae* και μόνο.

Οι δυνάμεις πού εξασκούνται μπορεί νά είναι διάφορων ειδών: έπίκρουση, ώθηση, ή κεντρόφυγος δύναμη.

Όταν αφήσουμε νά πέσει μία πέτρα απ' τό ύψος ενός πύργου, ή κίνηση, της δέν είναι όμοιόμορφη. Η ταχύτητα της μεγαλώνει όσο περισσότερο πέφτει προς τό έδαφος. Οδηγούμαστε έτσι στό συμπέρασμα ότι πρέπει για νά γίνεται αυτό νά άσκειται στη πέτρα μία έξωτερική δύναμη ή μ' άλλα λόγια ότι ή γή έλκει τή πέτρα.

Ας πάρουμε ένα άλλο παράδειγμα. Τί συμβαίνει όταν μία πέτρα πετάγεται από κάτω προς τά πάνω κάθετα. Η ταχύτητα της έλλατώνεται μέχρι τή στιγμή πού φτάνει τό ύψιστο σημείο και μετά αρχίζει νά πέφτει. Αυτή ή επιβράδυνση της ταχύτητας καθορίζεται και όφείλεται στην ίδια εκείνη δύναμη πού καθορίζει και προκαλεί τήν επιτάχυνση ενός σώματος πού πέφτει.

Στη πρώτη περίπτωση ή δύναμη δρά προς τή κατεύθυνση της κίνησης στην δεύτερη δρά προς τήν αντίθετη κατεύθυνση.

Η δύναμη παραμένει πάντα ή ίδια, αλλά προκαλεί τήν επιτάχυνση ή επιβράδυνση της ταχύτητας ανάλογα μέ τό άν αφήσουμε τή πέτρα νά πέσει από πάνω προς τά κάτω ή άν τήν πετάξουμε από κάτω προς τά πάνω.

## ΤΑ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ

Όλες οι κινήσεις που εξετάσαμε μέχρι τώρα ήταν *εὐθύγραμμες* κινήσεις, δηλαδή, γινόντουσαν πάνω σέ εὐθεία γραμμή. Τώρα μπορούμε νά σπρώξουμε τήν ἀνάλυσή μας ἕνα βῆμα πιά μακρῶς. Πετυχαίνουμε μιά βαθύτερη γνώση τῶν νόμων τῆς φύσης, ἀναλύοντας τίς πιά ἀπλές περιπτώσεις σ' αὐτές τίς πρῶτες μας προσπάθειες καί βάζοντας στή πάντα τίς πολύπλοκες καταστάσεις. Μιά εὐθεία γραμμή εἶναι πιά ἀπλή ἀπό μιά καμπύλη. Δέν εἶναι ἀστόσο δυνατόν νά μᾶς ἱκανοποιήσει μόνο ἡ γνώση τῆς εὐθύγραμμης κίνησης. Οἱ κινήσεις τῆς σελήνης, τῆς γῆς, τῶν πλανητῶν, ἀκριβῶς δηλαδή ἐκεῖνες οἱ κινήσεις ὅπου οἱ ἀρχές τῆς μηχανικῆς ἐφαρμόστηκαν μέ ἐκπληκτική ἐπιτυχία, εἶναι κινήσεις πού ἀκολουθοῦν καμπύλες γραμμές. Τό πέρασμα ἀπό τήν εὐθύγραμμη κίνηση στή καμπυλόγραμμη κίνηση παρουσιάζει νέες δυσκολίες. Ἄν ὅμως θέλουμε νά κατανοήσουμε τίς ἀρχές τῆς κλασσικῆς μηχανικῆς πού μᾶς πρόσφεραν τά πρῶτα καθοδηγητικά νήματα καί ἀποτέλεσαν ἔτσι τό σημεῖο ἀφετηρίας τῆς ἐπιστημονικῆς ἐξέλιξης, πρέπει νά ἔχουμε τό κουράγιο νά ξεπεράσουμε αὐτές τίς δυσκολίες.

Ἄς ἐξετάσουμε μιά ἄλλη ἐξειδανικευμένη ἐμπειρία, τή περίπτωση ὅπου μιά τελείως στρογγυλή σφαῖρα κυλᾷ ὁμοίμορφα πάνω σ' ἕνα λείο τραπέζι. Ξέρουμε ὅτι ἂν δώσουμε στή σφαῖρα ἕνα χτύπημα, ἂν δηλαδή ἐξασκήσουμε μιά ἐξωτερική δύναμη, ἡ ταχύτητά της θά μεταβληθεῖ. Ἄς ὑποθέσουμε τώρα ὅτι ἡ κατεύθυνση τοῦ χτυπήματος δέν εἶναι ὅπως μέ τή περίπτωση τοῦ αὐτοκινήτου πρὸς τή κατεύθυνση τῆς κίνησης ἀλλά πρὸς τήν ὀλότελα ἀντίθετη κατεύθυνση, ἄς ποῦμε ὅτι εἶναι κάθετη πρὸς αὐτή. Τί θά συμβεῖ στή σφαῖρα; Τρεῖς φάσεις τῆς κίνησης θά μπορούσαμε νά διακρίνουμε: τήν ἀρχική κίνηση, τήν ἄσκηση τῆς δύναμης καί τήν τελική κίνηση ἀφοῦ ἡ δύναμη πάψει νά ἐξασκεῖται. Σύμφωνα μέ τό νόμο τῆς ἀδράνειας, οἱ ταχύτητες πρὶν καί μετά τήν δράση τῆς δύναμης

εἶναι τελείως ὁμοίμορφες. Ὑπάρχει ὁμως μιά διαφορά ἀνάμεσα στήν ὁμοίμορφη κίνηση πού εἶχε ἡ σφαῖρα πρὶν τήν δράση τῆς δύναμης καί τήν ὁμοίμορφη κίνηση πού ἔχει μετά τήν ἄσκηση τῆς δύναμης: Ἡ κατεύθυνση τῆς κίνησης ἄλλαξε.

Ἡ ἀρχική πορεία πού διάνυσε ἡ σφαῖρα καί ἡ διεύθυνση τῆς κίνησης εἶναι κάθετες ἢ μιά στήν ἄλλη. Ἡ τελική κίνηση δέν θά ἀκολουθήσει καμιά ἀπ' αὐτές τίς δύο γραμμές, ἀλλά μιά πορεία πού θά βρῖσκεται κάπου ἀνάμεσά τους, πιά κοντά πρὸς τήν διεύθυνση τῆς δύναμης ἂν ἡ δύναμη εἶναι ἰσχυρή καί ἡ ἀρχική ταχύτητα μικρή, πιά κοντά πρὸς τήν ἀρχική γραμμή τῆς κίνησης, ἂν τό χτύπημα εἶναι ἀδύνατο καί ἡ ἀρχική ταχύτητα μεγάλη.

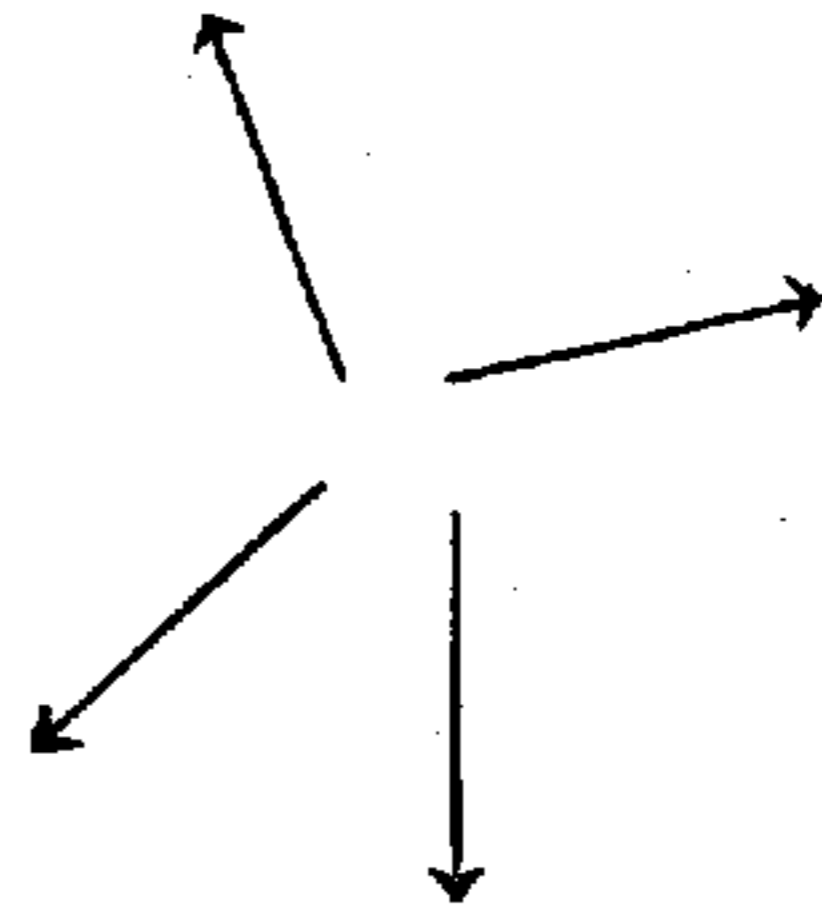
Φτάσαμε ἔτσι σ' ἕνα νέο συμπέρασμα, πού βασίζεται στό νόμο τῆς ἀδράνειας: Γενικά, ἡ δράση μᾶς ἐξωτερικῆς δύναμης δέν ἀλλάζει μόνο τή ταχύτητα ἀλλά ἐπίσης καί τή διεύθυνση τῆς κίνησης. Ἡ γνώση αὐτοῦ τοῦ γεγονότος μᾶς προετοιμάζει γιά τήν γενίκευση πού εἰσάγουμε στή φυσική μέ τήν ἔννοια τῶν *διανυσμάτων*. Μποροῦμε νά συνεχίσουμε νά κάνουμε χρήση τοῦ ἀρχικοῦ συλλογισμοῦ. Τό σημεῖο τῆς ἀφετηρίας μας εἶναι καί πάλι ὁ νόμος τῆς ἀδράνειας τοῦ Γαλιλαίου. Εἴμαστε ἀκόμα πολύ μακρῶς ἀπό τό νά ἐξαντλήσουμε ὅλες τίς συνεισφορές αὐτοῦ τοῦ πολύτιμου καθοδηγητικοῦ νήματος πού θά μᾶς φτάσει στή λύση τοῦ αἰνίγματος τῆς κίνησης.

Ἄς ἐξετάσουμε δύο σφαῖρες πού κινοῦνται πάνω σ' ἕνα τραπέζι σέ διαφορετικές διευθύνσεις. Γιά νάχουμε μιά πιά συγκεκριμένη εἰκόνα μποροῦμε νά ὑποθέσουμε ὅτι οἱ δύο αὐτές διευθύνσεις εἶναι κάθετες ἢ μιά στήν ἄλλη. Ἐπειδή καμιά ἐξωτερική δύναμη δέν ἀσκεῖται πάνω στίς σφαῖρες, οἱ κινήσεις τους εἶναι ὀλότελα ὁμοίμορφες. Ἄς ὑποθέσουμε ἀκόμα ὅτι οἱ ταχύτητες τους εἶναι ἴσες, δηλαδή ὅτι κι οἱ δύο σφαῖρες καλύπτουν τήν ἴδια ἀπόσταση μέσα στόν ἴδιο χρόνο. Εἶναι ὁμως σωστό νά ποῦμε ὅτι οἱ δύο σφαῖρες ἔχουν τήν ἴδια ταχύτητα; Ἡ ἀπάντηση μπορεῖ νά εἶναι ναί ἢ ὄχι. Ὄταν τά ταχύμετρα δύο αὐτοκινήτων δείχνουν 60 χλμ. τήν ὥρα, ἔχει ἐπικρατήσει ἡ συνήθεια νά θεωροῦμε ὅτι τά δύο αὐτοκίνητα

Έχουν την ίδια ταχύτητα ανεξάρτητα απ' τις διευθύνσεις που ακολουθούν. Αλλά η επιστήμη πρέπει να έχει μία διάλεχτο ξάστερη και έννοιες καθαρές. Συχνά οι επιστημονικές έννοιες είναι στην αρχική τους προέλευση αυτές που μεταχειρίζεται ή συνηθισμένη διάλεχτος στις τρέχουσες υποθέσεις της ζωής, στη πορεία της όμως εξελίσσονται μ' ένα τρόπο όλοτελα διαφορετικό, χάνουν τη διαφορούμενη έννοια που έχουν στη συνηθισμένη γλώσσα, κερδίζουν σε ακρίβεια, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοσθούν στο πεδίο της επιστημονικής σκέψης.

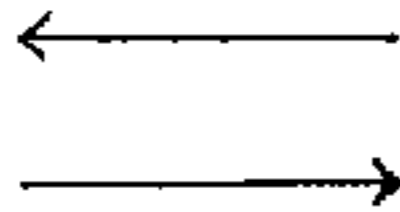
Από την άποψη της φυσικής, είναι καλύτερα να πούμε ότι οι ταχύτητες δύο σφαιρών που κινούνται προς διάφορες διευθύνσεις, είναι διαφορετικές. Αν κι' αυτό δεν είναι παρά μία καθαρά συμβατική υπόθεση, είναι πιο σκόπιμο να πούμε ότι 4 αυτοκίνητα που ξεκινούν απ' το ίδιο σημείο προς 4 διαφορετικές διευθύνσεις δεν έχουν την ίδια ταχύτητα ακόμα κι' όταν οι ταχύτητες που γράφονται στα ταχύμετρα είναι όλες 60 χλμ. την ώρα. Αυτή η διάκριση ανάμεσα στη κίνηση και στη ταχύτητα δείχνει καλά, πως η φυσική ξεκινώντας από μία έννοια που χρησιμοποιούμε στη καθημερινή ζωή, την τροποποιεί κατά τρόπο γόνιμο για τη παραπέρα ανάπτυξη της επιστήμης. Όταν μετράμε ένα μήκος, το αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται μ' ένα κάποιο αριθμό μονάδων. Το μήκος μιας βέργας μπορεί να είναι 2 μέτρα και 50 εκατοστά, το βάρος ενός αντικειμένου 1500 γραμμάρια, ένα διάστημα χρόνου τόσα λεπτά ή τόσα δευτερόλεπτα. Σε κάθε μία απ' αυτές τις περιπτώσεις το αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται μ' έναν αριθμό. Στη φυσική όμως ένας αριθμός είναι άσπαστο ανεπαρκής για να εκφράσει από μόνος του ώρισμένες έννοιες. Η διαπίστωση αυτού του γεγονότος έχει σαν συνέπεια μία καθαρή πρόοδο της επιστημονικής έρευνας. Για να χαρακτηρίσουμε μία ταχύτητα, ή διεύθυνση είναι το ίδιο βασική όσο κι' ένας αριθμός. Μία τέτοια ποσότητα που έχει ένα μέγεθος και μία διεύθυνση ονομάζεται *διάνυσμα*. Το σύμβολο που χρησιμοποιούμε για να τη παραστήσουμε είναι ένα βέλος. Μία ταχύτητα μπορεί να εκφράζεται γραφικώς μ' ένα βέλος ή πιο συνοπτικά

μ' ένα διάνυσμα, το οποίου το μήκος εκφραζόμενο σε μετρικές μονάδες, είναι το μέτρο της ταχύτητας και το οποίου η διεύθυνση είναι το μέτρο της κίνησης.



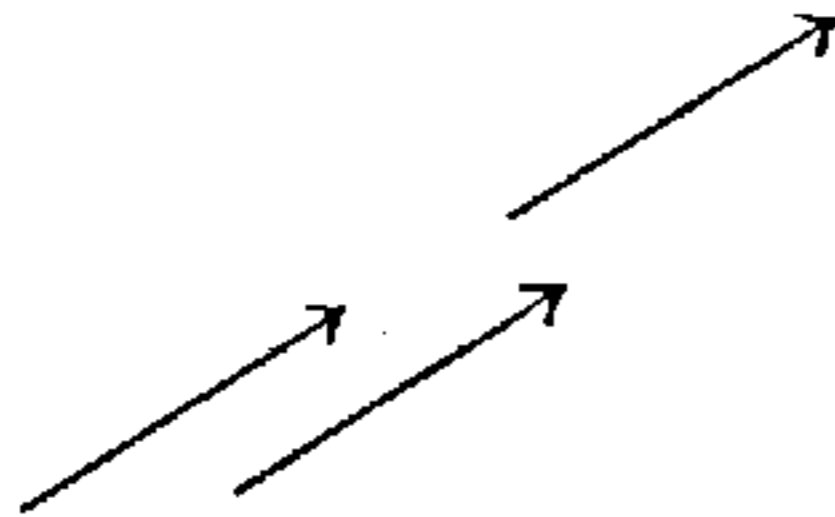
Αν 4 αυτοκίνητα ξεκινούν απ' το ίδιο σημείο, προς διάφορες διευθύνσεις με μία ίση ταχύτητα, τότε οι κινήσεις τους μπορούν να παρασταθούν γραφικώς με 4 διανύσματα ίσου μήκους, όπως τό δείχνει τό παραπάνω διάγραμμα. Στη κλίμακα την οποία μεταχειριζόμαστε 1 εκατοστόμετρο αντιστοιχεί με 60 χιλ. της ώρας. Μ' αυτό τό τρόπο, μία οποιαδήποτε ταχύτητα, μπορεί να παρασταθεί μ' ένα διάνυσμα και, αντίστροφα, ένα τέτοιο διάγραμμα διανυσματικό επιτρέπει, όταν η κλίμακα είναι γνωστή, να γνωρίσουμε την ταχύτητα.

Όταν δύο αυτοκίνητα διασταυρώνονται πάνω σ' ένα δρόμο



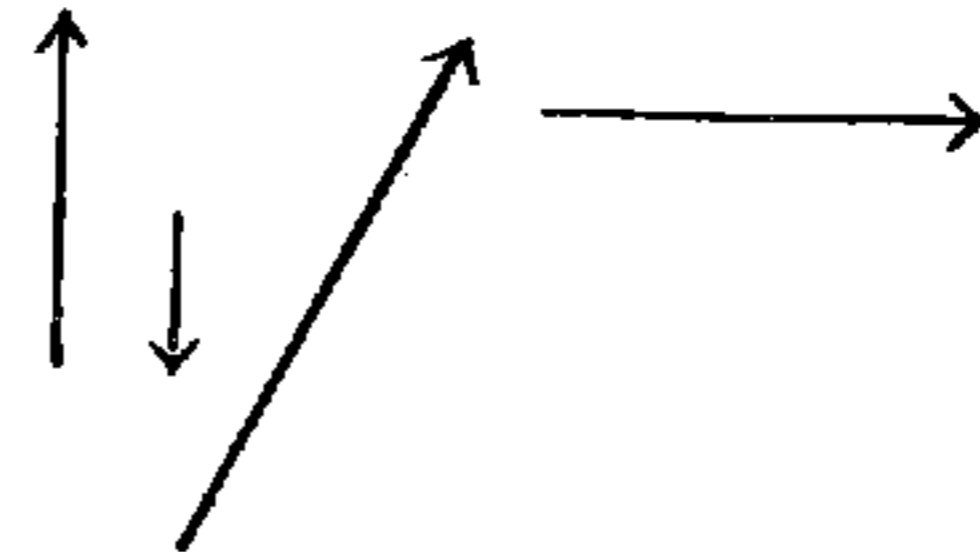
καί τά ταχύμετρά τους δείχνουν 60 χλμ. τήν ὥρα, ἀναπαριστοῦμε γραφικῶς τήν ταχύτητά τους μέ δύο διαφορετικά διανύσματα τῶν ὁποίων τά βέλη προσανατολίζονται πρὸς ἀντίθετες κατευθύνσεις.

Ἔτσι οἱ ἀντίθετες διευθύνσεις τῶν τραίνων πρὸς τό βορρά ἢ πρὸς τό Νοτιά γιά παράδειγμα μποροῦν ν' ἀπεικονιστοῦν μέ βέλη. Ἀλλά ὅλα τά τραίνα πού περνοῦν μέ τήν ἴδια ταχύτητα



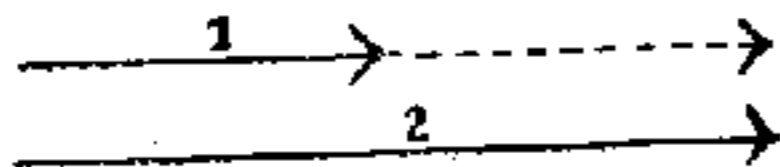
μπροστά ἀπό τούς διάφορους σταθμούς, ἢ πάνω σέ παράλληλες τροχιές ἔχουν τήν ἴδια κίνηση, πρᾶγμα πού μποροῦμε νά δείξουμε μ' ἓνα καί μόνο διάνυσμα. Ἐνα τέτοιο διάνυσμα δέν δείχνει ἀπό ποιούς σταθμούς περνᾷ τό τραῖνο οὔτε σέ ποιᾷ ἀπ' τίς παράλληλες γραμμές περνᾷ. Μ' ἄλλα λόγια, σύμφωνα μέ τή σύμβαση πού δεχτήκαμε, ὅλα τά διανύσματα πού ἀπεικονίζονται πάρα κάτω μποροῦν νά θεωροῦνται σάν ἴσα μεταξύ τους. Βρίσκονται πάνω στήν ἴδια εὐθεία ἢ πάνω σέ παράλληλες γραμμές, ἔχουν τό ἴδιο μήκος καί τέλος τά βέλη τους εἶναι προσανατολισμένα πρὸς τήν ἴδια διεύθυνση.

Τό πρῶτο σχῆμα ἀπό τά παρακάτω σχήματα ἀπεικονίζει διάφορα διανύσματα, γιατί ξεχωρίζουν εἴτε ἐπειδή τό μήκος τους δέν εἶναι ἴδιο, εἴτε ἐπειδή ἡ διεύθυνσή τους εἶναι διαφορετική, εἴτε καί γιά τίς δύο αὐτές αἰτίες.



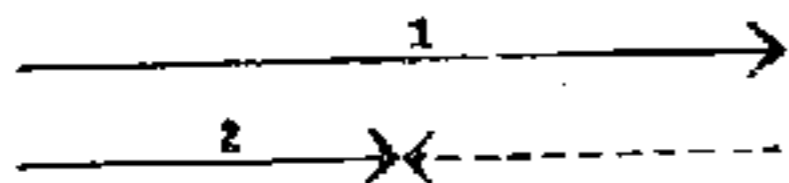
Τά ἴδια διανύσματα μποροῦν νά ἀπεικονιστοῦν καί μ' ἄλλο τρόπο, ὅπου ὅλα ἔχουν ἓνα κοινό σημεῖο ἀφετηρίας. Ἐπειδή τό σημεῖο ἀφετηρίας δέν ἔχει σημασία, τά διανύσματα αὐτά μποροῦν ν' ἀπεικονίζονται τίς ταχύτητες τεσσάρων αὐτοκινήτων πού ξεκινοῦν ἀπ' τό ἴδιο σημεῖο ἢ τίς ταχύτητες τεσσάρων αὐτοκινήτων πού κινοῦνται πρὸς διάφορες περιοχές τῆς χώρας, πού κινοῦνται μέ τίς ταχύτητες καί τίς διευθύνσεις πού ἀναφέραμε πιο πάνω.

Αὐτή ἡ διανυσματική ἀπεικόνιση, μπορεῖ τώρα νά χρησιμοποιηθεῖ γιά νά περιγράψει τά φαινόμενα πού σχετίζονται μέ τήν εὐθύγραμμη κίνηση γιά τήν ὁποία μιλήσαμε πιο πάνω. Μιλήσαμε παραπάνω, γιά ἓνα αὐτοκίνητο πού κινεῖται ὁμοίωμα πάνω σέ μιά εὐθεία γραμμή καί πού δέχεται ἓνα χτύπημα πρὸς τήν κατεύθυνση τῆς κίνησης του πού τοῦ ἐπιταχύνει τή



ταχύτητα. Μπορούσαμε να απεικονίσουμε γραφικά αυτό το φαινόμενο με δύο διανύσματα, ένα πιο μικρό που απεικονίζει την ταχύτητα πριν το χτύπημα κι ένα πιο μεγάλο προς την ίδια διεύθυνση που απεικονίζει την ταχύτητα μετά το χτύπημα.

Η έννοια του διανύσματος ποδναι φτιαγμένο με παύλες είναι σαφής. Απεικονίζει την μεταβολή της ταχύτητας για την οποία, τό ξέρουμε καλά, αίτια είναι τό χτύπημα. Στη περίπτωση που ή δύναμη έξασκεΐται στην αντίθετη πορεία της κίνησης, έτσι ώστε τ' αυτοκίνητο να επιβραδύνει τή κίνησή του, τό διάγραμμα είναι λίγο διαφορετικό. Πάλι τό διακεκομένο διάνυσμα θ' απεικονίζει μιά αλλαγή της ταχύτητας αλλά σ' αυτή τή περίπτωση ή διεύθυνση είναι διαφορετική. Γίνεται έτσι σαφές ότι διανύσματα δέν είναι μόνο οί ταχύτητες αλλά επίσης και οί μεταβολές τους. Κι' αφού κάθε μεταβολή της ταχύτητας οφείλεται σέ μιά έξωτερική δύναμη, τότε κι' αυτή επίσης πρέπει να απεικονίζεται μ' ένα διάνυσμα.



Γιά να χαρακτηρίσουμε μιά δύναμη δέν άρκει να υποδείξουμε μέ πόση ισχύ σπρώχνουμε τό αυτοκίνητο αλλά οφείλουμε επίσης να κάνουμε μνεία του προς ποιά κατεύθυνση τό σπρώχνουμε. Η δύναμη, όπως και ή ταχύτητα και ή μεταβολή

της είναι αναγκαία να απεικονίζεται μ' ένα διάνυσμα κι' όχι μ' έναν αριθμό. Επομένως ή έξωτερική δύναμη είναι κι αυτή επίσης ένα διάνυσμα και οφείλει να έχει τήν ίδια διεύθυνση με τή μεταβολή της ταχύτητας. Στα δύο τελευταία διαγράμματα, τά διακεκομένα διανύσματα δείχνουν τόσο τή διεύθυνση της δύναμης τόσο καλά όσο και τή μεταβολή της ταχύτητας.

Μετά άπ' όλα αυτά μπορεί να βρεθεί κάποιος που να παρατηρήσει ότι δέν βλέπει κανένα πλεονέκτημα άπό τήν εισαγωγή των διανυσμάτων στην ανάλυσή μας. Όλα όσα είπαμε είναι ή μετάφραση σέ μιά ξένη και μπερδεμένη γλώσσα, φαινομένων ήδη γνωστών. Σ' αυτό τό στάδιο της ανάλυσης θάταν πραγματικά δύσκολο να πείσουμε κάποιον ότι έχει άδικο. Για τήν ώρα έχει σίγουρα δίκιο. Θα δομε όμως άργότερα ότι αυτή ή παρύξενη διάλεχτος μās οδηγεί σέ μιά πολύ σπουδαία γενίκευση, όπου τά διανύσματα παίζουν ένα σημαντικό ρόλο.

## ΤΟ ΑΙΝΙΓΜΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Στό μέτρο και στό βαθμό που ή μελέτη μας περιορίζεται μόνο στη κίνηση που γίνεται κατά μήκος μιάς ευθείας γραμμής, είμαστε ακόμα πολύ μακριά άπό τό να κατανοήσουμε τίς κινήσεις που παρατηρούμε στη φύση. Πρέπει να εξετάσουμε τίς κινήσεις που ακολουθούν μιά καμπύλη γραμμή, και ό άμεσος στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε τους νόμους που διέπουν αυτές τίς κινήσεις, πράγμα που δέν είναι και πολύ εύκολο. Στη περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης, οί έννοιες της ταχύτητας, της μεταβολής της ταχύτητας και της δύναμης, άποδείχτηκαν έξαιρετικά χρήσιμες. Δέν βλέπουμε όμως άμεσα, πως θα μπορούσαν να εφαρμοσθούν αυτές τίς έννοιες στη κίνηση που γίνεται πάνω σέ μιά καμπύλη γραμμή. Πραγματικά, είναι δυνατόν να φαντασθούμε ότι οί παλιές έννοιες θάταν άκατάλληλες να μās περιγράψουν όλες τίς κινήσεις γενικά, και ίσως βρεθούμε στην ανάγκη να βρούμε άλλες καινούργιες έννοιες.

Πρέπει τώρα ν' ακολουθήσουμε τό παλιό δρόμο πού χαράξαμε ή πρέπει νά βροῦμε ἕνα νέο μονοπάτι;

Ἡ γενίκευση μιᾶς ἔννοιας εἶναι μιὰ μέθοδος πού χρησιμοποιεῖται πολύ συχνά στήν ἐπιστήμη. Ἡ μέθοδος τῆς γενίκευσης δέν μπορεῖ νά εφαρμοσθεῖ μ' ἕνα καί μοναδικό τρόπο, γιατί συνήθως ἔχουμε τή δυνατότητα νά τήν ἐφαρμόσουμε στή πράξη μέ περισσότερους τρόπους. Ὅποια ὁμως μέθοδος γενίκευσης κι' ἂν ἐφαρμόσουμε πρέπει νά ἱκανοποιεῖται αὐστηρά ἡ παρακάτω ἀπαίτηση: Ὅποιαδήποτε γενικευμένη ἔννοια πρέπει πάντα νά ἀνάγεται στό πρωταρχικό μας συλλογισμό όταν οἱ ἀρχικές συνθήκες πραγματοποιοῦνται.

Αὐτό μποροῦμε νά τό ἐξηγήσουμε καλύτερα μέ τό παρακάτω παράδειγμα. Μποροῦμε νά προσπαθήσουμε νά γενικεύσουμε τίς παλιές ἔννοιες τῆς ταχύτητας τῆς μεταβολῆς τῆς ταχύτητας καί τῆς δύναμης γιά τή περίπτωση τῆς κίνησης πάνω σέ μιὰ καμπύλη γραμμή.

Ἀπό τεχνική ἄποψη όταν μιλάμε γιά καμπύλες συμπεριλαμβάνουμε σ' αὐτή τήν ἔννοια καί τίς εὐθείες γραμμές. Ἡ εὐθεῖα γραμμή ἀποτελεῖ εἰδικό καί ἀπλό παράδειγμα μιᾶς καμπύλης. Ἐπομένως ἂν ἡ ταχύτητα, ἡ μεταβολή τῆς ταχύτητας καί ἡ δύναμη ἰσχύουν γιά τήν κίνηση πάνω σέ μιὰ καμπύλη γραμμή, ἰσχύουν αὐτόματα καί γιά τήν κίνηση πού γίνεται κατά μήκος μιᾶς εὐθείας γραμμῆς. Ἀλλά τό ἀποτέλεσμα αὐτό σέν πρέπει νά ἔρχεται σέ ἀντίφαση μέ τά συμπεράσματα στά ὁποῖα καταλήξαμε πρίν. Ἄν ἡ καμπύλη γίνεται εὐθεῖα γραμμή, ὅλες οἱ γενικοποιημένες ἔννοιες πρέπει νά ἀνάγονται στίς γνωστές ἔννοιες πού περιγράφουν τήν καμπυλόγραμμη κίνηση. Αὐτός ὁμως ὁ ὅρος δέν εἶναι ἐπαρκής γιά νά προσδιορίσει τή γενίκευση κατά τρόπο ὀριστικό. Ἀφήνει τό δρόμο ἀνοιχτό σέ πολλές δυνατότητες. Ἡ ἱστορία τῆς ἐπιστήμης ἔδειξε ὅτι ἀκόμα καί οἱ πιό ἀπλές γενικεύσεις ἀποδείχθηκαν ἄλλοτε πολύ γόνιμες ἄλλοτε καθόλου χρήσιμες. Πρέπει πρῶτα-πρῶτα νά κάνουμε μιὰ εἰκασία. Εἶναι εὐκόλο στή περίπτωσή μας νά υποθέσουμε ὅτι ἡ μέθοδος τῆς γενίκευσης πού ἀκολουθοῦμε εἶναι σωστή. Οἱ νέες ἔννοιες πού πηγάζουν ἀποδεικνύονται

τότε πολύ γόνιμες καί μᾶς βοηθοῦν νά κατανοήσουμε τόσο τή κίνηση μιᾶς πέτρας πού πετᾶμε, ὅσο καί τή κίνηση τῶν πλανητῶν. Ἄς δοῦμε ὁμως τώρα ποιά εἶναι ἡ πραγματική ἔννοια τῶν λέξεων, ταχύτητα, μεταβολή τῆς ταχύτητας καί δύναμη στή γενική περίπτωση τῆς κίνησης πάνω σέ μιὰ καμπύλη γραμμή. Ἄς ἀρχίσουμε μέ τήν ταχύτητα.

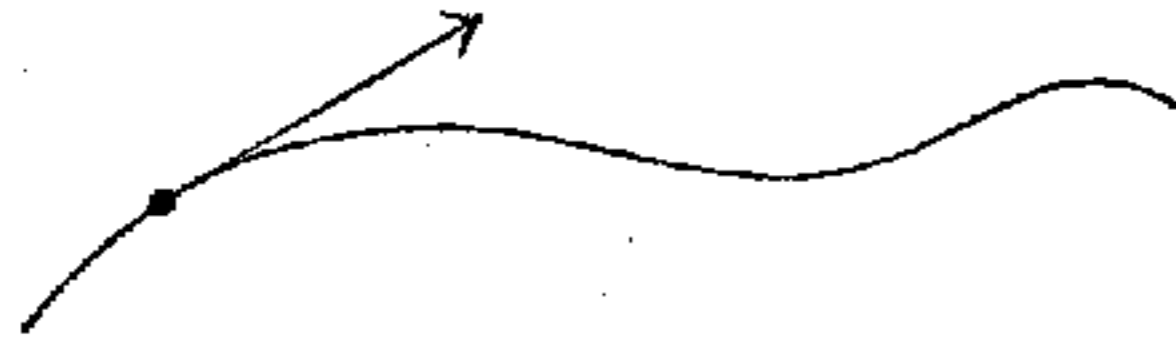
Ἄς υποθέσουμε ὅτι ἕνα πολύ μικρό σῶμα, κινεῖται πάνω σέ μιὰ καμπύλη γραμμή ἀπό τ' ἀριστερά πρὸς τά δεξιά.



Ἐνα τέτοιο μικροσκοπικό σῶμα τό ὀνομάζουμε συχνά μόριο.

Στό σχῆμα μας, τό σημαδάκι πάνω στή καμπύλη δείχνει τή θέση πού ἔχει τό μόριο σέ μιὰ κάποια στιγμή τοῦ χρόνου. Ποιά εἶναι ἡ ταχύτητα πού ἀντιστοιχεῖ σ' αὐτή τή στιγμή καί σ' αὐτή τή θέση; Πάλι τό κατευθυντήριο νῆμα τοῦ Γαλιλαίου θά μᾶς ὀδηγήσει νά βροῦμε πῶς θά εἰσάγουμε τήν ἔννοια τῆς ταχύτητας. Πρέπει ὁμως γιά μιὰ ἀκόμα φορά νά χρησιμοποιήσουμε τή φαντασία μας καί νά φαντασθοῦμε μιὰ ἐμπειρία ἐξειδανικευμένη. Τό μόριο κινεῖται πάνω σέ μιὰ καμπύλη ἀπ' τ' ἀριστερά πρὸς τά δεξιά κάτω ἀπ' τήν ἐπίδραση ἐξωτερικῶν δυνάμεων. Ἄς φαντασθοῦμε ὅτι σέ μιὰ ὁρισμένη στιγμή, ὅλες αὐτές οἱ δυνάμεις σταματᾶνε ἀπότομα νά ἐξασκοῦνται πάνω στό σημείο πού σημειώσαμε στή καμπύλη. Στή περίπτωση αὐτή σύμφωνα μέ τό νόμο τῆς ἀδράνειας ἡ κίνηση τοῦ σημείου θά πρέπει νά εἶναι ὁμοιόμορφη. Βέβαια, στή πράξη δέν μποροῦμε ποτέ νά ἐξαλείψουμε ὀλότελα τίς ἐξωτερικές ἐπιδράσεις στίς

ὁποῖες ὑπόκειται ἓνα σῶμα. Μποροῦμε μόνο νά ὑποθέσουμε «τί θά γινόντανε ἄν...;» καί νά κρίνουμε τήν ὀρθότητα τῆς ὑπόθεσης πού κάναμε ἀπό τά συμπεράσματα πού μποροῦν νά πηγάζουν ἀπ' αὐτή καί ἀπό τό πόσο ἐπαληθεύεται ἀπό τήν ἐμπειρία μας.



Τό διάνυσμα στό παρακάτω σχῆμα δείχνει τήν ὑποτιθέμενη διεύθυνση τῆς ὁμοιόμορφης κίνησης, ἄν ὅλες οἱ ἐξωτερικές δυνάμεις παύανε νά ἀσκοῦνται πάνω στό σῶμα.

Εἶναι ἡ διεύθυνση τῆς λεγομένης ἐφαπτομένης. Παρατηρώντας ἓνα μόριο μ' ἓνα μικροσκόπιο, βλέπουμε ὅτι τό πολύ μικρό κομματάκι τῆς καμπύλης φαίνεται σάν ἓνα μικρό τμήμα. Ἡ ἐφαπτομένη εἶναι ἡ προέχτασή της. Τό χαραγμένο διάνυσμα ἀπεικονίζει ἔτσι τήν ταχύτητα σέ μιά δοσμένη στιγμή. Τό διάνυσμα τῆς ταχύτητας βρίσκεται πάνω στήν ἐφαπτομένη. Τό μήκος της ἀπεικονίζει τό μέγεθος τῆς ταχύτητας ἔτσι ὅπως τήν δείξαμε, γιά παράδειγμα, ἀπ' τό ταχύμετρο ἑνός αὐτοκινήτου.

Ἡ ἐξιδανικευμένη μας ἐμπειρία, σ' ὅτι ἀφορᾷ τήν ἐκμηδένιση τῆς κίνησης γιά νά βροῦμε τό διάνυσμα ταχύτητα, δέν πρέπει νά παρθεῖ καί πολύ σιά σοβαρά. Μᾶς βοηθᾷ μονάχα νά καταλάβουμε αὐτό πού ὀνομάζουμε διάνυσμα ταχύτητας καί μᾶς δίνει τή δυνατότητα νά τό προσδιορίσουμε σέ μιά δοσμένη στιγμή καί σ' ἓνα δοσμένο σημεῖο.

Στό παρακάτω σχῆμα, ἀπεικονίζονται τά διανύσματα τῶν ταχυτήτων, γιά τρεῖς διαφορετικές θέσεις ἑνός μορίου πού κινεῖται πάνω σέ μιά καμπύλη. Σ' αὐτή τή περίπτωση δέν εἶναι μόνο ἡ διεύθυνση, ἀλλά ἐπίσης καί τό μέγεθος τῆς ταχύτητας, δοσμένο μέ τό μήκος τοῦ διανύσματος, πού ποικίλει στή διάρκεια τῆς κίνησης.



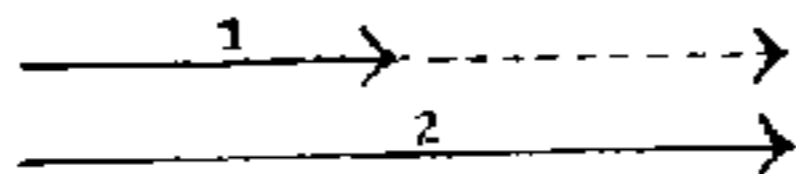
Αὐτή ἡ νέα ἔννοια τῆς ταχύτητας ἱκανοποιεῖ τήν ἀπαίτηση πού διατυπώσαμε γιά ὅλες τίς γενικεύσεις δηλαδή: ἀνάγεται στή γνωστή μας ἀρχική ἔννοια, ἄν ἡ καμπύλη, γίνεῖ μιά εὐθεία γραμμή; Καί βέβαια. Ἡ ἐφαπτομένη μᾶς εὐθείας γραμμῆ ταυτίζεται μ' αὐτή. Τό διάνυσμα τῆς ταχύτητας βρίσκεται στή γραμμῆ τῆς κίνησης, ἀκριβῶς ὅπως στή περίπτωση τοῦ αὐτοκινήτου πού κινεῖται ἢ τῶν σφαιρῶν πού κυλᾷνε.

Τό ἐπόμενο βῆμα τῆς ἀνάλυσής μας εἶναι νά προκαλέσουμε μιά μεταβολή τῆς ταχύτητας σ' ἓνα μόριο πού κινεῖται πάνω σέ μιά καμπύλη γραμμῆ. Κι' αὐτό ἐπίσης μπορεῖ νά γίνη μέ διάφορους τρόπους ἀπ' τοῦς ὁποίους διαλέξαμε τόν πῶ ἀπλό καί τό πῶ συνηθισμένο. Τό παραπάνω σχῆμα, μᾶς ἀπεικόνιζε πολλά διανύσματα ταχυτήτων πού ἀντιστοιχοῦσαν σέ διάφορα σημεῖα τῆς κινήσεως πάνω, στίς ἐφαπτόμενες στά



σημεία αυτά. Τά δύο πρώτα μπορούν νά αντιμετωπισθοῦν ἔτσι, ὥστε νά ἔχουν ἓνα κοινό σημεῖο ἀφετηρίας, πρᾶγμα πού ὅπως εἶδαμε εἶναι δυνατόν νά κάνουμε μέ τά διανύσματα. Ὀνομάζουμε τό διακεκομένο διάνυσμα, μεταβολή τῆς ταχύτητας.

Τό σημεῖο ἀφετηρίας του συμπίπτει μέ τό ἄκρο ὅπου καταλήγει τό πρώτο διάνυσμα, καί τό ἄκρο του μέ τό ἄκρο τοῦ δευτέρου. Αὐτός ὁ ὀρισμός τῆς μεταβολῆς τῆς ταχύτητας θά μπορούσε ἀπό πρώτη ὄψη, νά φανεῖ τεχνικός καί στεροῦμενος σημασίας. Γίνεται ὅμως πιά σαφές στήν εἰδική περίπτωση ὅπου τά διανύσματα 1 καί 2 ἔχουν τήν ἴδια διεύθυνση. Αὐτό σημαίνει ὅτι περνᾶμε στή περίπτωση κίνησης σέ εὐθεία γραμμή. Ἄν τά δύο διανύσματα ἔχουν τήν ἴδια ἀρχή, τό διακεκομένο διάνυσμα ἐνώνει πάλι τά ἄκρα τους. Τό σχῆμα



εἶναι τώρα τό ἴδιο μ' αὐτό τῆς σελίδας (26) καί ξαναφτάνουμε ἔτσι στόν ἀρχικό συλλογισμό, σάν εἰδική περίπτωση τοῦ νέου. Πρέπει νά σημειωθεῖ ὅτι στό σχῆμα μας ὑποχρεωθήκαμε νά ξεχωρίσουμε τίς δύο γραμμές πού στή πραγματικότητα, συμπίπτουν καί δέν ξεχωρίζουν ἢ μιά ἀπ' τήν ἄλλη.

Μᾶς ἀπομένει τώρα νά κάνουμε τό τελευταῖο βῆμα στή διαδικασία τῆς γενίκευσης. Εἶναι ἡ πιά σημαντική ἀπό τίς ὑποθέσεις πού κάναμε μέχρι τώρα. Ἡ συσχέτιση ἀνάμεσα στή δύναμη καί τή μεταβολή τῆς ταχύτητας ἔπρεπε νά γίνει κατά τέτοιο τρόπο, ὥστε νά βροῦμε ἓνα καθοδηγητικό νῆμα πού μᾶς ἐπιτρέπει νά κατανοήσουμε τό γενικό πρόβλημα τῆς κίνησης.

Τό καθοδηγητικό νῆμα μέ τό ὁποῖο ἐξηγήσαμε τή κίνηση κατά μήκος μιᾶς εὐθείας γραμμῆς ἦταν ἀπλό: μιᾶ ἐξωτερική δύναμη εἶναι ὀρθόθνη γιά τή μεταβολή τῆς ταχύτητας· τό διάνυσμα δύναμη ἔχει τήν ἴδια κατεύθυνση μέ τό διάνυσμα ἀλλαγῆς τῆς ταχύτητας. Τώρα, ποιό θάναί τό καθοδηγητικό νῆμα γιά τήν καμπυλόγραμμη γίνηση; Ἀκριβῶς τό ἴδιο. Ἡ μόνη διαφορά εἶναι ὅτι ἡ ἀλλαγή τῆς ταχύτητας θάχει τώρα μιᾶ ἔννοια πιά πλατειά ἀπ' ὅτι πρίν. Ἄν ρίξουμε μιᾶ ματιά στά διακεκομένα διανύσματα τῶν δύο τελευταίων σχημάτων, αὐτό γίνεται μέ σαφήνεια ἀντιληπτό. Ἄν ἡ ταχύτητα εἶναι γνωστή γιά ὅλα τά σημεία τῆς καμπύλης, ἡ διεύθυνση τῆς ταχύτητας σέ ἓνα ὁποιοδήποτε σημεῖο μπορεῖ νά βρεθεῖ ἀμέσως, ἀνά πᾶσα στιγμή. Πρέπει νά ἀπεικονίσουμε τά διανύσματα τῶν ταχυτήτων γιά δύο ξεχωριστές χρονικές στιγμές πού ἀπέχουν μικρό διάστημα χρόνου, πού κατά συνέπεια, ἀντιστοιχοῦν σέ θέσεις πού βρίσκονται πολύ κοντά ἢ μιά μέ τήν ἄλλη. Τό διάνυσμα πού ἐνώνει τό ἄκρο τοῦ πρώτου διανύσματος μέ τό ἄκρο τοῦ δευτέρου δείχνει τή διεύθυνση τῆς ἐξασκούμενης δυνάμεις. Ἐκεῖνο ὅμως πού εἶναι βασικό, εἶναι νά χωρίζονται τά δύο διανύσματα τῶν ταχυτήτων μόνο μ' ἓνα «πολύ μικρό» διάστημα χρόνου. Ἡ ἀνάλυση τῶν ἐκφράσεων «πολύ κοντινός», πολύ «κοντός» δέν εἶναι καθόλου ἀπλή.

Εἶναι πραγματικά αὐτή ἡ ἀνάλυση πού ὀδήγησε τό Νεύτων καί τόν Λάιμπνιτς στήν ἀνακάλυψη τοῦ ἀπειροστικοῦ λογισμοῦ.

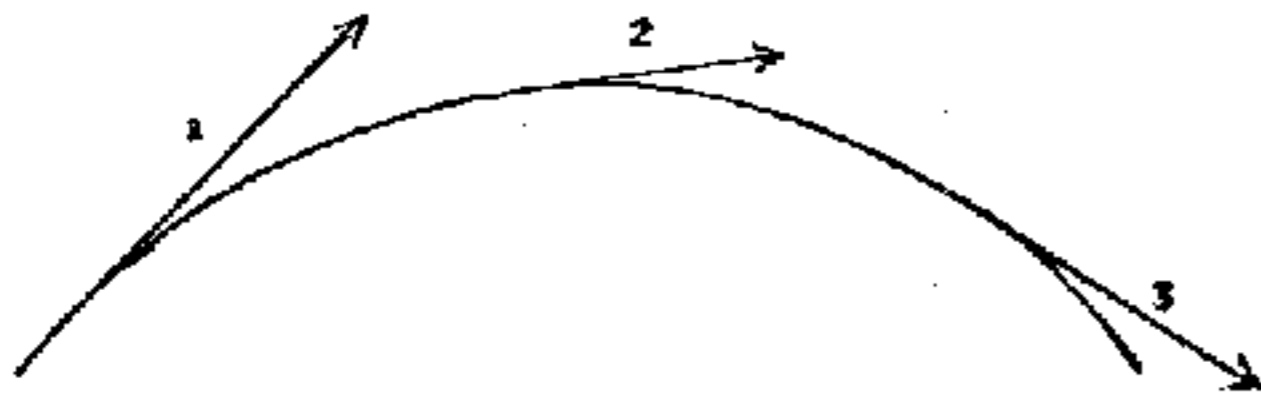
Εἶναι ἓνας κουραστικός καί μέ φροντίδα φτιαγμένος δρόμος πού ὀδήγησε στή γενίκευση τῆς κατευθυντήριας ιδέας τοῦ Γαλιλαίου. Δέν μποροῦμε νά δείξουμε ἐδῶ πόσο πολύ οἱ

συνέπειες αυτής της γενίκευσης αποδείχθηκαν χρήσιμες και γόνιμες. Η εφαρμογή τους οδηγεί σε εξηγήσεις απλές και θετικές πολλών γεγονότων που φαινόταν χωρίς συνοχή και άκατανόητα.

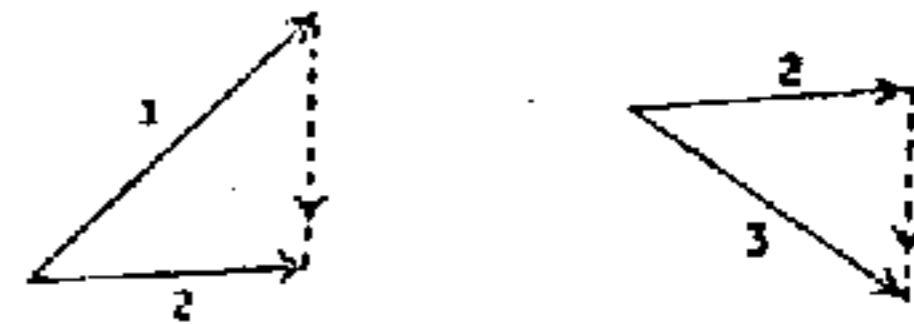
Από την υπερβολικά πλούσια ποικιλία των κινήσεων θα διαλέξουμε μόνο τις πιο απλές και για να εξηγήσουμε θα εφαρμόσουμε το νόμο που μόλις διατυπώσαμε.

Μιά μπάλα που εκτοξεύεται από ένα κανόνι, μία πέτρα που πετάγεται πλάγια, το νερό ενός σωλήνα ποτίσματος, ακολουθούν γνωστές τροχιές αυτού του τύπου, δηλαδή μία παραβολή. Ας υποθέσουμε ότι ένα ταχύμετρο είναι ενδεδειγμένο σε μία πέτρα, έτσι ώστε να μπορεί να γράφεται το διάνυσμα της ταχύτητας,  $v$  οποιαδήποτε στιγμή.

Ας υποθέσουμε ότι το αποτέλεσμα απεικονίζεται από το παρακάτω σχήμα:

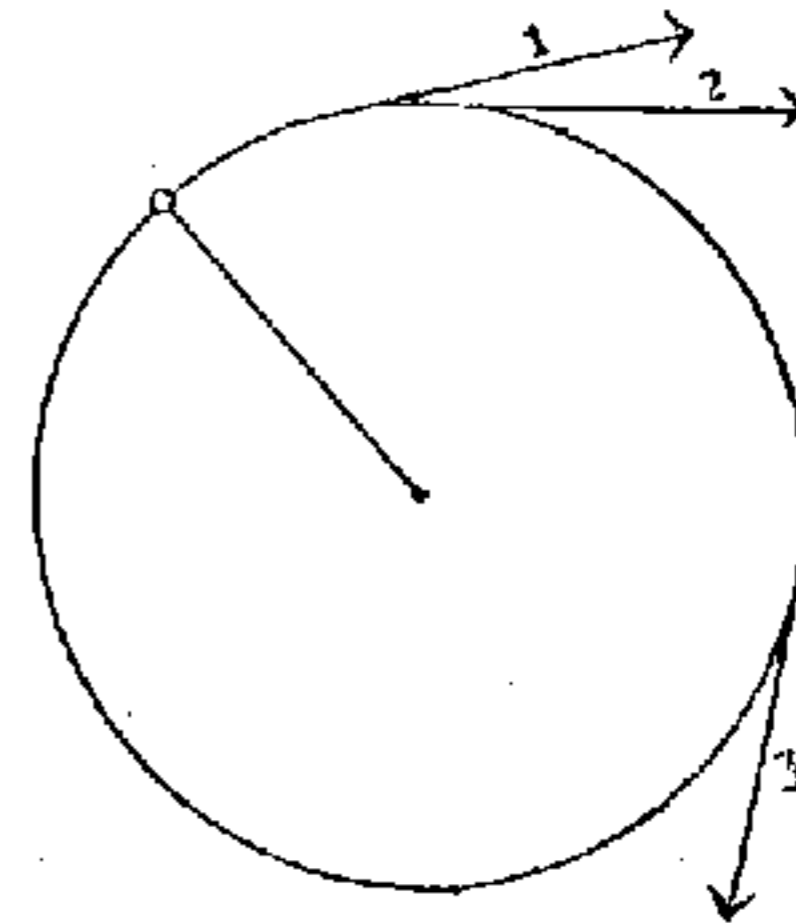


Η διεύθυνση της δύναμης που εξασκείται σε μία πέτρα είναι ακριβώς αυτή της μεταβολής της ταχύτητας και είδαμε πώς αυτή μπορεί να προσδιορισθεί. Το αποτέλεσμα όπως το δείχνει το παρακάτω σχήμα, δείχνει ότι η δύναμη είναι κάθετη και με διεύθυνση προς τα κάτω. Αυτό ακριβώς συμβαίνει όταν αφήνουμε να πέσει μία πέτρα απ' το ύψος ενός πύργου.

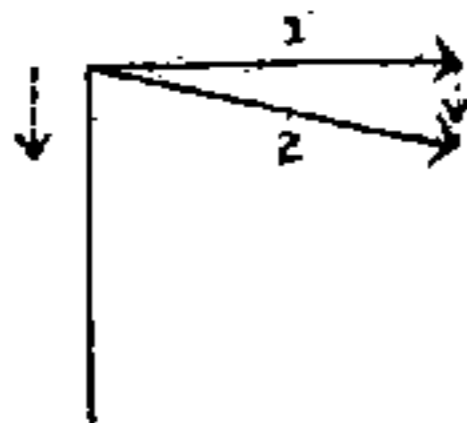


Οι παραβολές είναι τελείως διαφορετικές, όπως και οι ταχύτητες, αλλά η μεταβολή της ταχύτητας έχει την ίδια διεύθυνση, δηλαδή προς το κέντρο της γης.

Αν έχουμε μία πέτρα δεμένη σε ένα σπάγγο, και τη γυρίζουμε σε οριζόντιο πλάνο αυτή διαγράφει μία κυκλική τροχιά.



“Όλα τὰ διανύσματα στό διάγραμμα πού ἀπεικονίζει αὐτή τή κίνηση, ἔχουν τό ἴδιο μήκος ἂν ἡ ταχύτητα εἶναι ὁμοιόμορφη. Ὡστόσο δέν εἶναι, γιατί ἡ τροχιά δέν εἶναι εὐθεία γραμμή. Μόνο ἡ εὐθύγραμμη κίνηση καί ὁμοιόμορφη δέν συνεπάγεται καμιά δύναμη. Ἐδῶ ὡστόσο ὑπάρχει καί ἡ ταχύτητα ἀλλάζει, ὄχι σέ μέγεθος ἀλλά σέ διεύθυνση. Σύμφωνα μέ τό νόμο τῆς κίνησης, πρέπει ἐδῶ νά ὑπάρχει κάτι πού εἶναι ὑπεύθυνο γιά τή μεταβολή αὐτή ἡ δύναμη, στή περίπτωση μας ἀσκεῖται ἀνάμεσα στή πέτρα καί στό χέρι πού κρατᾶ τό κορδόνι.” Ἔτσι προβάλλει ἄμεσα τό παρακάτω ἐρώτημα: Πρός ποιά κατεύθυνση ἐξασκεῖται ἡ δύναμη; Τήν ἀπάντηση θά μᾶς τήν δώσει ξανά τό διανυσματικό διάγραμμα. Φτιάχνουμε τὰ διανύσματα ταχυτήτων, γιά δύο πολύ κοντινά διανύσματα καί ἔπειτα τό διάνυσμα τῆς μεταβολῆς τῆς ταχύτητας. Αὐτή ἡ τελευταία ὅπως βλέπουμε, διευθύνεται κατά μήκος τοῦ σπάγγου πρὸς τό κέντρο τοῦ κύκλου καί πάντα κάθετα πρὸς τό διάνυσμα ταχύτητας ἢ πρὸς τήν ἐφαπτομένη.



Μ' ἄλλα λόγια, τό χέρι ἀσκεῖ μία δύναμη στή πέτρα μέσω τοῦ σπάγγου.

Πολύ παρόμοιο εἶναι τό ἐνδιαφέρον παράδειγμα τῆς περιστροφῆς τῆς σελήνης γύρω ἀπ' τή γῆ. Μποροῦμε νά τήν θεωρήσουμε σάν μιᾶ κυκλική κίνηση κατά προσέγγιση ὁμοιόμορφη. Ἡ διεύθυνση τῆς δύναμης, ἔχει διεύθυνση πρὸς τή γῆ, γιά τόν ἴδιο λόγο πού στό προηγούμενο παράδειγμα εἶχε

διεύθυνση πρὸς τό χέρι πού κράταγε τό σπάγγο. Ἐδῶ βέβαια δέν ὑπάρχει σπάγγος πού νά ἐνώνει τή Γῆ καί τή Σελήνη, μπορούμε ὅμως νά φαντασθοῦμε μιᾶ ἰδεατή γραμμή πού ἐνώνει τὰ κέντρα τῶν δύο αὐτῶν σωμάτων ἡ δύναμη ἀσκεῖται κατά μήκος αὐτῆς τῆς γραμμῆς καί ἔχει κατεύθυνση πρὸς τό κέντρο τῆς Γῆς, ἀκριβῶς ὅπως ἡ δύναμη πού ἀσκεῖται σέ μιᾶ πέτρα πού πετᾶμε στόν ἀέρα ἢ πού ἀφήνουμε νά πέσει ἀπό τό ὕψος ἑνός πύργου.

“Όλα ὅσα εἶπαμε σχετικά μέ τή κίνηση, μποροῦν νά συνοψισθοῦν σέ μιᾶ καί μόνο πρόταση: *Ἡ δύναμη καί ἡ μεταβολή τῆς ταχύτητας εἶναι διανύσματα πού ἔχουν τήν ἴδια διεύθυνση.*

Αὐτό εἶναι τό πρωταρχικό καθοδηγητικό νῆμα πού μᾶς ὀδηγεῖ στή λύση τοῦ αἰνίγματος γιά τή κίνηση, ἀλλά βεβαίως δέν ἀρκεῖ γιά νά μᾶς δώσει μιᾶ ὀλοκληρωμένη ἐξήγηση ὅλων τῶν κινήσεων πού μποροῦμε νά παρατηρήσουμε. Τό πέρασμα ἀπό τό τρόπο σκέψης τοῦ Ἀριστοτέλη σ' αὐτόν τοῦ Γαλιλαίου, ἀποτέλεσε τόν πιό σημαντικό ἀκρογωνιαῖο λίθο στή θεμελίωση τῆς ἐπιστήμης. Ἀπό τή στιγμή πού αὐτή ἡ ρήξη ὀλοκληρώθηκε, ἡ πορεία τῆς μεταγενέστερης ἀνάπτυξης ἔγινε ξεκάθαρη.

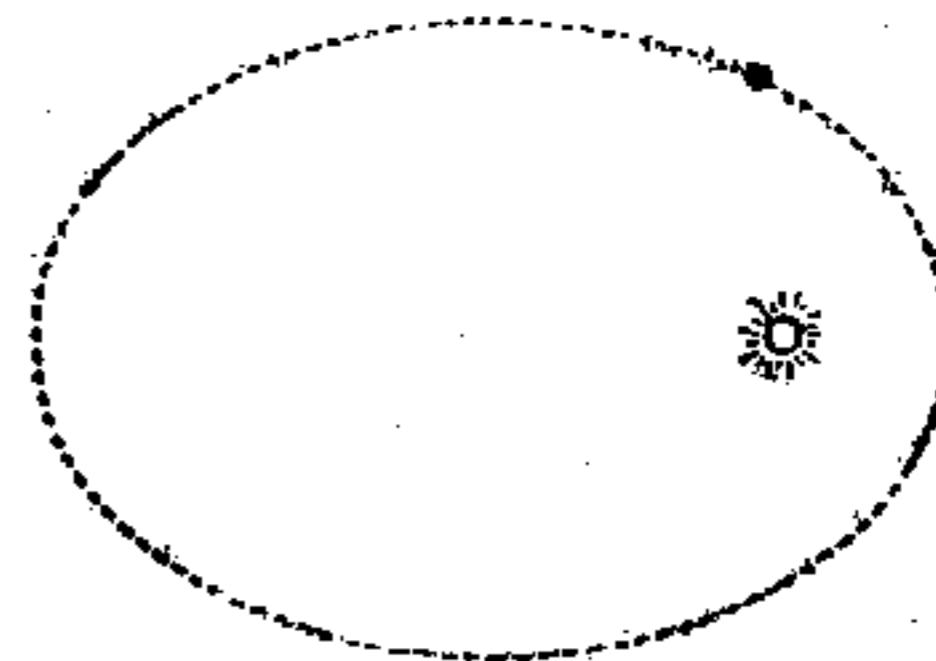
Ἐδῶ μᾶς ἐνδιαφέρουν οἱ πρώτες φάσεις τῆς ἀνάπτυξης, ἀκολουθώντας τούς πρωταρχικούς δρόμους, καί δείχνοντας πῶς μέσα ἀπ' τήν ὀδυνηρή πάλη μέ τίς παλιές γερασμένες ιδέες γενιῶνται οἱ σύγχρονες ἐννοιες τῆς Φυσικῆς. Συγκεντρώνουμε τή προσοχή μας ἀποκλειστικά στήν ἐργασία τῶν σκυπανέων στρατιωτῶν τῆς ἐπιστήμης, πού συνίσταται στήν εὕραση τῶν νέων καί ἀναπάντεχων δρόμων ἀνάπτυξης, καί στίς περιπέτειες τῆς ἐπιστημονικῆς σκέψης, πού δημιουργεῖ μιᾶ διαρκῶς καινούρια καί διαφορετική εἰκόνα τοῦ σύμπαντος. Τά πρώτα ἀποφασιστικά βήματα ἔχουν πάντα ἕνα ἐπαναστατικό χαρακτήρα. Ἡ ἐπιστημονική φαντασία βρίσκει τίς παλιές ἐννοιες πολύ στενές καί τίς ἀντικαθιστᾶ μέ καινούργιες. Ἡ συνεχῆς ἀνάπτυξη στό δρόμο πού ἤδη ἀνοίχτηκε, διατηρεῖ τόν ἐξελικτικό της χαρακτή-

ρα μέχρι πού φθάνει σ' ένα σημείο απ' όπου αρχίζει και παρακμάζει. Σ' αυτό τό σημείο πρέπει νά κατανοηθεῖ ένα καινούργιο πεδίο. Γιά νά κατανοήσουμε, ὥστόσο ποιές εἶναι οἱ αἰτίες καί οἱ δυσκολίες πού μᾶς ἀναγκάζουν νά εἰσάγουμε μιά ἀλλαγὴ στίς βασικές ἔννοιες, δέν ἀρκεῖ νά γνωρίζουμε μόνο τίς ἀρχικές ὑποδείξεις ἀλλά ἐπίσης καί τά συμπεράσματα πού μπορούμε νά βγάλουμε απ' αὐτές.

“Ένα απ' τά πιό χτυπητά χαρακτηριστικά τῆς σύγχρονης φυσικῆς εἶναι ὅτι τά συμπεράσματα πού βγαίνουν ἀπό τίς ἀρχικές ἐνδείξεις δέν εἶναι μόνο ποσοτικά ἀλλά καί ποιοτικά. “Ας ξαναπάρουμε τό παράδειγμα μιᾶς πέτρας πού πέφτει ἀπό τό ὕψος ἑνός πύργου. Εἶδαμε ὅτι ὅσο πέφτει πρὸς τή γῆ τόσο αὐξάνει ἡ ταχύτητά της. Θέλουμε ὅμως νά ἐμβαθύνουμε περισσότερο σ' αὐτό τό φαινόμενο. Ποιό εἶναι τό μέγεθος αὐτῆς τῆς μεταβολῆς τῆς ταχύτητας; Ποιά εἶναι ἡ θέση καί ἡ ταχύτητα τῆς πέτρας σέ μιά ὁποιαδήποτε στιγμή, ἀφ' ὅτου ἄρχισε νά πέφτει; Θέλουμε νά γίνουμε ἱκανοί νά προβλέψουμε καί νά προσδιορίσουμε ἀπό τήν πείρα ἂν αὐτές οἱ προβλέψεις καί στή συνέχεια οἱ ἀρχικές ὑποθέσεις ἐπαληθεύονται.

Γιά νά βγάλουμε ποσοτικά συμπεράσματα, πρέπει νά κάνουμε χρήση τῆς γλώσσας τῶν μαθηματικῶν. Τό μεγαλύτερο μέρος τῶν βασικῶν ιδεῶν τῆς ἐπιστήμης εἶναι οὐσιωδῶς ἀπλό καί μπορούν γενικά νά διατυπωθοῦν σέ μιά γλώσσα ποῦναι κατανοητή σ' ὅλους. Ἀλλά γιά νά μπορεί νά παρακολουθήσει κανείς αὐτές τίς ιδέες ἀπό κοντά πρέπει νά κατέχει μιά τεχνική ἐρεῦνης πολύ ραφιναρισμένη. Τά μαθηματικά σάν ὄργανο λογισμοῦ εἶναι ἀπαραίτητα, ἂν θέλουμε νά βγάλουμε συμπεράσματα πού νά μπορούν νά συγκριθοῦν μέ τήν ἐμπειρία. Στό βαθμό πού ἀσχολοῦμαστε μόνο μέ βασικές ἀρχές τῆς φυσικῆς, στόν ἴδιο βαθμό μπορούμε νά μεταχειρίζομαστε τή γλώσσα τῶν μαθηματικῶν. Κι' ἀφοῦ αὐτό σ' αὐτές τίς σελίδες τό κάνουμε κατά τρόπο σταθερό, εἴμαστε ἀναγκασμένοι, μέ τήν εὐκαιρία, νά παραθέσουμε, χωρίς ἀπόδειξη, μερικά γιά τά ἀναγκαῖα συμπεράσματα γιά νά κατανοήσουμε τίς ἐνδιαφέρουσες ἀπόψεις, πού

θά παρουσιασθοῦν στή μεταγενέστερη ἐξέλιξη. Τό ἀντίτιμο πού πρέπει νά πληρώσουμε γιά τήν ἐγκατάλειψη τῆς γλώσσας τῶν μαθηματικῶν εἶναι μιά ἀπώλεια σέ ἀκρίβεια καί ἡ ἀνάγκη νά παραθέτουμε κάπου-κάπου ὄρισμένα συμπεράσματα χωρίς νά δείχνουμε πῶς φθάσαμε σ' αὐτά.



“Ένα πολύ σπουδαῖο παράδειγμα κίνησης εἶναι αὐτό τῆς Γῆς γύρω ἀπό τόν “Ἡλιο, καί ξέρουμε ὅτι ἡ τροχιά της εἶναι μιά κλειστή καμπύλη πού ὀνομάζουμε ἔλλειψη. Ἡ κατασκευή ἑνός διανυσματικοῦ διαγράμματος μεταβολῆς τῆς ταχύτητας δείχνει ὅτι ἡ δύναμη στή Γῆ ἔχει διεύθυνση πρὸς τόν “Ἡλιο. Ἀλλά αὐτή εἶναι πρὶν απ' ὅλα μιά πληροφορία πολύ ἀδύνατη. Αὐτό πού θέλουμε εἶναι νά μπορούμε νά εἴμαστε σέ θέση νά προβλέψουμε τή θέση τῆς Γῆς καί τῶν ἄλλων πλανητῶν γιά μιά ὁποιαδήποτε χρονική στιγμή, νά προβλέψουμε ἐπίσης τήν ἡμερομηνία καί τή διάρκεια τῆς ἐπόμενης ἡλιακῆς ἔκλειψης, καί πολλῶν ἄλλων ἀστρονομικῶν συμβάντων. Ὅλα αὐτά μπορούν νά γίνουν ἀλλά ὄχι παίρνοντας σάν βάση τό πρῶτο μας καθοδηγητικό νῆμα, γιατί εἶναι ἀναγκαῖο νά ξέρουμε τώρα ὄχι μόνο τή διεύθυνση τῆς δυνάμης, ἀλλά

επίσης την απόλυτη αξία της, τό μέγεθός της. Ήταν ο Νεύτωνας πού σ' αυτό τό σημείο έκανε μιά πολύ επιβοηθητική υπόθεση. Σύμφωνα μέ τό νόμο του γιά τή κεντρομόλο τάση τών σωμάτων, ή δύναμη τής έλξης ανάμεσα σέ δύο σώματα, εξαρτάται, κατά τρόπο άπλό άπό τήν απόσταση πού χωρίζει τό ένα άπό τ' άλλο σώμα. Ή δύναμη τής έλξης γίνεται πιά μικρή όταν ή απόσταση αυτή αυξάνει. Πιά συγκεκριμένα, γιά νά χρησιμοποιήσουμε άκριβείς όρους, γίνεται  $2 \times 2 = 4$  φορές πιά μικρή όταν ή απόσταση διπλασιάζεται,  $3 \times 3 = 9$  φορές πιά μικρή όταν ή απόσταση τριπλασιάζεται.

Βλέπουμε έτσι ότι στη περίπτωση τής κεντρομόλου δύναμης κατορθώσαμε νά εκφράσουμε μέ άπλό τρόπο τήν εξάρτηση τής δύναμης άπ' τήν απόσταση πού χωρίζει δύο σώματα πού βρίσκονται σέ κίνηση. Μέ τόν ίδιο άνάλογο τρόπο προχωρήσαμε καί στην άλλες περιπτώσεις, όπου εξασκοϋνται δυνάμεις διαφόρων ειδών, ήλιακές, μαγνητικές καί άλλες παρόμοιες. Προσπαθοϋμε νά χρησιμοποιήσουμε άπλές εκφράσεις γιά τή κίνηση καί μιά τέτοια άπλή έκφραση, δικαιολογείται μόνο άν τά συμπεράσματα πού βγάζουμε επαληθεϋονται άπό τήν έμπειρία μας.

Ήλλά αυτή ή γνώση μόνο τής βαρύτητας δέν φθάνει γιά νά περιγράψουμε τήν κίνηση τών πλανητών. Διαβάσαμε ήδη πιά πάνω ότι τά διανύσματα πού παριστοϋν τή δύναμη καί τήν αλλαγή τής ταχύτητας γιά ένα μικρό χρονικό διάστημα έχουν τήν ίδια διεύθυνση, αλλά οφείλουμε νά ακολουθήσουμε τόν Νεύτονα ένα βήμα παραπάνω, καί νά υποθέσουμε μιά άπλή σχέση ανάμεσα στά μήκη τους. Οντας όλες οι άλλες συνθήκες ίδιες, δηλαδή, θεωρώντας τό ίδιο κινούμενο σώμα καί τις ίδιες μετακινήσεις σέ ίσα διαστήματα χρόνου, ή αλλαγή τής ταχύτητας, σύμφωνα μέ τόν Νεύτονα, είναι άνάλογη μέ τήν δύναμη.

Αυτά συμπληρωματικές εικασίες είναι λοιπόν άπαραίτητες, γιά νά μπορέσουμε νά άντλήσουμε ποσοτικά συμπεράσματα πού άφοροϋν στην κίνηση τών πλανητών. Ή μιά έχει γενικό χαρακτήρα, καί θεμελιώνει μιά σχέση ανάμεσα στην δύναμη

καί τή μεταβολή τής ταχύτητας. Ή άλλη είναι μερική καί θεμελιώνει μιά άκριβή εξάρτηση ανάμεσα σ' ένα ειδικό είδος δύναμης καί τής απόστασης μεταξύ δύο σημείων. Ή πρώτη είναι ο γενικός νόμος τής κίνησης του Νεύτονα, ή δεύτερη είναι ο νόμος τής βαρύτητας: Προσδιορίζουν κι' οι δύο μαζί τήν κίνηση. Αυτό μπορεί νά καταστή σαφές παρακολουθώντας ένα συλλογισμό πού μαιάζει λίγο άδέξιος. Ας υποθέσουμε ότι σέ μιά δεδομένη στιγμή ή θέση καί ή ταχύτητα ενός πλανήτη μποροϋν νά καθορισθοϋν, καί ότι ή δύναμη είναι γνωστή. Τότε, σύμφωνα μέ τό νόμο του Νεύτονα γνωρίζουμε τή μεταβολή τής ταχύτητας κατά τή διάρκεια ενός μικροϋ χρονικοϋ διαστήματος. Γνωρίζοντας τήν αρχική ταχύτητα καί τή μεταβολή της, μποροϋμε νά προσδιορίσουμε τήν ταχύτητα καί τή θέση του πλανήτη στο τέλος αυτοϋ του χρονικοϋ διαστήματος. Επαναλαμβάνοντας πολλές φορές αυτή τή μέθοδο μποροϋμε νά χαράξουμε τήν τροχιά του κινουμένου πλανήτη χωρίς νά προστρέξουμε σ' άλλες παρατηρήσεις. Αυτός είναι ο τρόπος πού κατά κανόνα, ή μηχανική προκαθορίζει τήν τροχιά ενός κινουμένου σώματος, αλλά ή μέθοδος πού χρησιμοποιήθηκε εδώ δέν είναι πρακτική.

Αυτή ή μέθοδος πού συνίσταται στο νά προχωρεί κανείς βήμα βήμα θά ήταν πρακτικά υπερβολικά κουραστική καί άνακριβής. Είναι εϋτυχώς τελείως άχρηστη, μιά καί τά μαθηματικά προσφέρουν ένα δρόμο πιά βραχύ καί δίνουν τήν ευχέρεια τής περιγραφής τής κίνησης μέ πολύ λιγότερο μελάνι άπ' ότι θά χρειαζόταν γιά τήν άναγραφή μιās καί μόνο φράσης. Τά συμπεράσματα πού φθάνει κανείς μ' αυτό τό τρόπο μποροϋν νά επαληθευθοϋν καί πιστοποιηθοϋν άπ' τήν παρατήρηση.

Είναι τό ίδιο είδος έξωτερικής δύναμης πού εκδηλώνεται στο πέσιμο μιās πέτρας καί στην κίνηση τής Σελήνης στην τροχιά της, δηλαδή ή έλξη πού εξασκεί ή γή στα υλικά σώματα. Ο Νεύτωνας άναγνωρίζει ότι οι κινήσεις τών λίθων πού πέφτουν, καθώς καί οι κινήσεις τής Σελήνης καί τών πλανητών δέν είναι παρά μόνον ειδικές εκδηλώσεις τής παγκόσμιας βαρύτητας, πού εξασκοϋνται ανάμεσα σέ δύο σώματα. Σέ

άπλές περιπτώσεις, ή κίνηση μπορεί νά περιγραφεί και νά προβλεφθεί μέ τήν βοήθεια τών μαθηματικών. Σέ άπομακρυσμένες και σύνθετες περιπτώσεις, πού έπισείρουν τήν επίδραση πολλών σωμάτων τοῦ ενός πάνω στα άλλα, ή μαθηματική περιγραφή, δέν είναι τόσο άπλή, αλλά οι βασικές αρχές είναι οι ίδιες.

Τά συμπεράσματα πού φθάσαμε ακόλουθόντας τις πρώτες μας αυτές σκέψεις επαληθεύονται στην κίνηση τής πέτρας πού πετάμε, στην κίνηση τής Σελήνης, τής Γῆς, τών πλανητῶν.

Στήν πραγματικότητα ὅλο τό σύστημα τών είκασιῶν μας, πρέπει ή νά αποδειχθεῖ ή νά ανατραπεί από τήν έμπειρία. Καμιά άπ' αυτές τις ύποθέσεις δέν μπορεί νά διαχωρισθεῖ από τήν άλλη για νά εξετασθεῖ χωριστά. Στην περίπτωση τών πλανητῶν πού κινούνται γύρω άπ' τόν ήλιο, βρίσκουμε ὅτι τό σύστημα τής μηχανικῆς είναι σημαντικά αποτελεσματικό. Μπορούμε ὅμως νά φαντασθοῦμε ένα άλλο σύστημα, βασισμένο σέ διαφορετικές ύποθέσεις, και νά είναι τοῦ ἴδιου βαθμοῦ αποτελεσματικότητας.

Οι ιδέες τής φυσικῆς είναι ελεύθερα δημιουργήματα τοῦ ανθρώπινου πνεύματος, και δέν είναι ὅπως θά μπορούσαμε νά τό νομίσουμε, μονοσήμαντα καθορισμένες από τόν έξωτερικό κόσμο. Στην προσπάθεια πού κάνουμε νά καταλάβουμε τόν κόσμο, μοιάζουμε λίγο στόν άνθρωπο πού προσπαθεῖ νά καταλάβει τόν μηχανισμό ενός κλειστοῦ ρολογιοῦ. Βλέπει τήν πλάκα και τις βελόνες σέ κίνηση άκούει τό τίκ-τάκ, αλλά δέν έχει κανένα μέσο ν' ανοίξει τό κιβώτιο τοῦ μηχανισμοῦ. "Αν είναι μηχανικός θά μπορούσε νά σχηματίσει κάποια εικόνα τοῦ μηχανισμοῦ, πού θά είναι κάποια ἠκλύθνη έκφραση ὅλων του τών παρατηρήσεων, αλλά δέν θά είναι ποτέ σίγουρος ὅτι ή εικόνα του είναι ή μόνη ικανή νά εξηγήσει τις παρατηρήσεις του. Δέν θά είναι ποτέ σέ θέση νά συγκρίνει τήν εικόνα του μέ τόν πραγματικό μηχανισμό, και δέν μπορεί άκόμη και νά φαντασθεῖ τή δυνατότητα ή τή σημασία μιᾶς τέτοιας σύγκρισης. "Ο έρευνητής ὅμως σίγουρα πιστεύει ὅτι ὅσο οι γνώσεις του αυξάνουν, τόσο ή εικόνα τής πραγματικότητάς του θά

γίνεται πιο άπλή και θά εξηγεί τομείς τών έξωτερικῶν του έντυπώσεων ὅλο και πιο έκτεταμένους. Θά μπορούσε επίσης νά πιστέψει στην ύπαρξη ενός ιδανικοῦ ὅριου τής γνώσης πού μπορεί νά φθάσει τό ανθρώπινο πνεῦμα. Θά ὀνόμαζε τότε αυτό τό ιδανικό ὄριο αντικειμενική ἀλήθεια.

## ΑΙΟΜΕΝΕΙ ΕΝΑΣ ΔΡΟΜΟΣ

"Όταν αρχίζουμε τή μελέτη τής μηχανικῆς ἔχουμε τήν έντύπωση ὅτι ὅλα μέσα σ' αυτόν τόν τομέα τής επιστήμης είναι άπλά, βασικά και θεμελιώμενα για πάντα. Θά ύποπτευοῦμε κατ' ελάχιστο τήν ύπαρξη ενός σημαντικοῦ δρόμου πού ἔδω και τρεις αἰῶνες κανείς δέν παρατήρησε. Αὐτός ὁ παραμελημένος δρόμος είναι συνδεδεμένος μέ μιᾶ από τις βασικές ιδέες τής μηχανικῆς, μ' αυτήν τής μάζας.

"Ας ξανασκεφτοῦμε τό άπλό έξιδανικευμένο πείραμα τοῦ ὄχηματος σέ ὀμαλή τροχιά. "Αν είναι σταματημένο και ὀποστει μιᾶ κρούση θά κινηθεῖ στή συνέχεια μέ μιᾶ ὀρισμένη ταχύτητα. "Ας ὀποθέσουμε ὅτι αὐτή ή ἔφαρμογή τής δύναμης μπορεί νά ἐπαναληφθεῖ ὄσες φορές τά θέλουμε, διατηρώντας τόν μηχανισμό τής κρούσης τόν ἴδιο και ἐξασκῶντας τήν ἴδια δύναμη πάνω στό ἴδιο ὄχημα. "Όσο συχνά κι' αν ἐπαναληφθεῖ τό πείραμα, ή τελική ταχύτητα είναι πάντα ή ἴδια. "Αλλά τί θά συμβεῖ αν τό πείραμα τροποποιηθεῖ, και για παράδειγμα, αν τό ὄχημα πρίν ἦταν κενό και τώρα είναι φορτωμένο; Η τελική του ταχύτητα εἴλογα θά είναι μικρότερη. "Από πού αὐτό τό συμπέρασμα: αν ή ἴδια δύναμη ἐνεργεῖ σέ δύο διαφορετικά σώματα πού και τά δύο είναι σέ στάση, οι τελικές ταχύτητες δέν θά είναι οι ίδιες. Λέμε ὅτι ή ταχύτητα ἐξαρτᾶται από τή μάζα τοῦ σώματος, και είναι μικρότερη ὄταν ή μάζα είναι μεγαλύτερη.

Ξέρουμε επίσης, λιγώτερο θεωρητικά, πώς μπορούμε νά καθορίσουμε τή μάζα ενός σώματος ή για νά μιλάμε ἀκριβέστερα, πόσες φορές μιᾶ μάζα είναι μεγαλύτερη από μιᾶ άλλη. "Έχουμε ἴδιες δυνάμεις πού ἐνεργοῦν πάνω σέ σταματημένες

μάζες. Θεωρώντας ότι ή ταχύτητα τής πρώτης μάζας, είναι τρεις φορές μεγαλύτερη από αυτήν τής δεύτερης, συμπεραίνουμε ότι ή πρώτη μάζα είναι τρεις φορές μικρότερη από τήν δεύτερη. Αυτό σίγουρα δέν είναι ένας πρακτικός τρόπος καθορισμού τής σχέσης τών δύο μαζών. Μπορούμε έν τούτοις νά φαντασθούμε ότι τό κάναμε μ' αυτόν τόν τρόπο ή μέ κάποιον άλλο παρεμφερή, βασισμένο στην εφαρμογή του νόμου τής αδράνειας.

Πώς όμως καθορίζουμε αληθινά τήν μάζα στην πράξη; Όχι βεβαιότατα μέ τόν τρόπο που περιγράψαμε πιο πάνω. Ό καθένας μας ξέρει τήν σωστή απάντηση: Τήν καθορίζουμε ζυγίζοντας σ' ένα ζυγό.

Άς εξετάσουμε από πιο κοντά, τούς δύο διαφορετικούς τρόπους καθαρισμού τής μάζας.

Τό πρώτο πείραμα δέν είχε καμιά σχέση μέ τό βάρος ή μέ τήν έλξη τής Γής. Τό όχημα αφού δεχθεί τήν κρούση, κινείται κατά μήκος μιάς επίπεδης, οριζόντιας και τέλεια ομαλής επιφάνειας. Η δύναμη τής βαρύτητας, που είναι ή αιτία που τό όχημα παραμένει πάνω στην επιφάνεια δέν αλλάζει και δέν παίζει κανένα ρόλο στον προσδιορισμό τής μάζας. Είναι κάτι τέλεια διαφορετικό από τή ζύγιση. Δέν θα μπορούσαμε ποτέ νά μεταχειριστούμε ένα ζυγό, αν ή Γή δέν εξασκούσε έλξη πάνω στα σώματα, αν δέν ύφίστατο ή βαρύτητα. Η διαφορά μεταξύ τών δύο προσδιορισμών τής μάζας είναι ότι ο πρώτος δέν έχει καμιά σχέση μέ τή δύναμη τής βαρύτητας, ένω ο δεύτερος είναι αίσθητά βασισμένος στην ύπαρξή της.

Ρωτάμε: αν προσδιορίσουμε μέ τούς δύο πιο πάνω αναπτυχθέντες τρόπους τή σχέση τών δύο μαζών, θα πάρουμε τό ίδιο αποτέλεσμα; Η απάντηση που μας δίνεται από τό πείραμα είναι τέλεια ξεκάθαρη: τά αποτελέσματα είναι ακριβώς τά ίδια. Αυτό τό συμπέρασμα δέν θα μπορούσε νά είχε προβλεφθεί, γιατί βασίζεται στην παρατήρηση κι' όχι στό συλλογισμό.

Άς ονομάσουμε για λόγους απλότητας, τή μάζα που

προσδιορίζεται μέ τόν πρώτο τρόπο μάζα αδράνειας και μέ τόν δεύτερο μάζα βαρύτητας. Στόν κόσμο μας προκύπτει ότι είναι ίσες, αλλά μπορούμε νά φαντασθούμε πολύ καλά ότι αυτό θα ήταν δυνατόν νά μήν συμβαίνει. Μιά άλλη έρώτηση παρουσιάζεται άμεσα: αυτή ή ισότητα τών δύο ειδών μάζας είναι συμπτωματική, και δέν πρέπει νά τής αποδοθεί κάποια βαθύτερη εξήγηση; Η απάντηση από τήν άποψη τής κλασσικής φυσικής είναι: ή ισότητα τών δύο μαζών είναι συμπτωματική και καμιά βαθύτερη εξήγηση δέν οφείλει νά αποδοθεί. Αλλά ή εξήγηση τής σύγχρονης φυσικής είναι τέλεια ένάντια: ή ισότητα τών δύο μαζών είναι θεμελιώδης και συνιστά ένα μέσο για νά εισχωρήσει κανείς βαθύτερα στην αλήθεια. Αυτό κύρια αποτέλεσε τό σημαντικότερο σημείο ξεκινήματος τής ανάπτυξης τής θεωρίας τής γενικής σχετικότητας.

Μιά μυστηριώδης ρομαντική ιστορία θα παρουσιάζόταν κατώτερη αν τά παράξενα περιστατικά θεωρούνται συμπτώσεις. Βρίσκουμε μεγαλύτερη ίκανοποίηση αν ακολουθούν ένα θεμελιωμένο σχέδιο. Όμοια μία θεωρία που δίνει μία εξήγηση για τήν ισότητα τής μάζας αδράνειας και τής μάζας βαρύτητας είναι ανώτερη από εκείνη που αποδέχεται τήν ισότητα συμπτωματική, μέ τόν όρο ότι και οι δύο θεωρίες είναι έξ ίσου σύμφωνες μέ τίς παρατηρήσεις.

Έφ' όσον αυτή ή ισότητα τής μάζας αδράνειας μέ τή μάζα βαρύτητας έπαιξε ένα θεμελιώδη ρόλο στην κατασκευή τής θεωρίας τής σχετικότητας, θα μας συγχωρούσαν αν έδώ εξετάζαμε τό θέμα από κοντά. Ποιά είναι τά πειράματα που αποδεικνύουν μέ τόν πειστικότερο τρόπο ότι οι δύο αυτές μάζες είναι ίδιες; Η απάντηση βρίσκεται στό παλιό πείραμα του Γαλιλαίου, που άφηνε νά πέσει από τήν κορυφή ενός πύργου διαφορετικές μάζες. Παρατηρούσε ότι ο χρόνος πτώσης ήταν πάντα ο ίδιος και ότι ή κίνηση του σώματος που έπεφτε ήταν ανεξάρτητος από τή μάζα του. Για νά θεμελιωθεί μία σχέση μεταξύ αυτού του πειραματικά άπλου αλλά σημαντικού αποτελέσματος και τής ισότητας τών δύο μαζών είναι αναγκαίο νά γίνει ένας λίγο πολύπλοκος συλλογισμός.

“Ένα σώμα σε στάση υφίσταται την εξωτερική δύναμη που δρα πάνω του, τίθεται σε κίνηση και φθάνει μία όρισμένη ταχύτητα. Υποχωρεί λιγότερο ή περισσότερο εύκολα, ανάλογα με τη μάζα αδράνειας του, κι’ ή αντίστασή του στην κίνηση είναι μεγαλύτερη, όσο σημαντικότερη είναι ή μάζα του. Μπορούμε νά ποῦμε χωρίς νά αναφερθούμε σε καμμιά σκληρή αλήθεια ότι ή προθυμία με την όποία ένα σώμα ανταποκρίνεται στην εφαρμογή μιᾶς εξωτερικής δύναμης εξαρτάται από τη μάζα αδράνειάς του.” Αν ήταν αλήθεια ότι ή Γῆ ἔλκει όλα τά σώματα με την ίδια δύναμη τό σώμα που διαθέτει τη μεγαλύτερη μάζα αδράνειας θάπρεπε, πέφτοντας, νά κινείται ἀργότερα από τά άλλα. Μά αυτό δέν είναι ή περίπτωση γιατί όλα τά σώματα πέφτουν με την ίδια κίνηση. Αυτό σημαίνει ότι ή δύναμη με την όποία ή Γῆ ἔλκει διαφορετικές μάζες όφείλει νά είναι διαφορετική.” Αρα ή Γῆ ἔλκει μία πέτρα με τη δύναμη του βάρους της και δέν γνωρίζει τίποτα για τη μάζα αδράνειας της. «Τό σῆμα» της δύναμης της Γῆς εξαρτάται από την μάζα βαρύτητας. «Ή απόκριση» της κίνησης της πέτρας εξαρτάται από τη μάζα αδράνειας.

Ήφ’ όσον ή κίνηση «της απόκρισης» είναι πάντα ή ίδια — όλα τά σώματα πέφτοντας ἐλεύθερα από τό ίδιο ύψος πέφτουν με την ίδια κίνηση — πρέπει νά συμπεράνουμε ότι ή μάζα βαρύτητας και ή μάζα αδράνειας είναι ίδιες.

Ή φυσικός δίνει στο ίδιο συμπέρασμα την εξής σχολική φόρμα: ή επιτάχυνση ενός σώματος σε ἐλεύθερη πτώση αυξάνει ανάλογα με την μάζα βαρύτητας του και μειώνεται αναλογικά με τη μάζα αδράνειας του. Ήπειδή όμως όλα τά σώματα που πέφτουν εμφανίζουν την ίδια σταθερή επιτάχυνση οι δύο μάζες όφείλουν νά είναι ίσες.

Στη δικιά μας μεγάλη μυστηριώδη ρομαντική ιστορία δέν υπάρχει πρόβλημα ολοκληρωτικά λυμένο και φωτισμένο για πάντα. Μετά τρεις αιώνες αντιληφθήκαμε ότι είμαστε υποχρεωμένοι νά ξαναγυρίσουμε στο αρχικό σημείο του προβλήματος της κίνησης, νά αναθεωρήσουμε τη μέθοδο διερεύνησης και νά

ξεσκεπάσουμε έννοιες που ἀπαλοίφθηκαν παίρνοντας έτσι μία διαφορετική εικόνα του σύμπαντος.

## Η ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΕΙΝΑΙ ΥΛΗ;

Ήδῶ αρχίζουμε ν’ ακολουθοῦμε μία νέα γραμμή, που έχει την αρχή της στον τομέα των φαινομένων της θερμότητας. Είναι ἐν τούτοις αδύνατο νά διαιρεθεί ή επιστήμη σε τμήματα που δέν σχετίζονται μεταξύ τους. “Όμως θά δοῦμε σύντομα ότι οι νεοεισαγόμενες ἔδῶ ιδέες είναι ἐνωμένες μ’ αυτές που ἤδη γνωρίζουμε και μ’ αυτές που θά συναντήσουμε ἀργότερα.” Ένας τύπος ἀναπτυγμένης σκέψης σ’ ένα κλάδο της επιστήμης μπορεί νά χρησιμοποιηθεί για νά περιγράψει περιστατικά που, ἐκ των προτέρων, έχουν τέλεια διαφορετικό χαρακτήρα. Σ’ αυτή τη μεθοδολογία οι αρχικές ιδέες συχνά τροποποιούνται σε τρόπο ὥστε νά προοδεύει ή γνώση των φαινομένων τόσο καλά ὥστε νά μή υπάρχει διαφορά ανάμεσα σ’ αυτούς που καλοῦνται νά τά εφαρμόσουν και σ’ αυτούς που τά πρωτοπαρουσίασαν.

Οι βασικότερες ιδέες στην περιγραφή των φαινομένων της θερμότητας είναι ή *θερμοκρασία* και ή *θερμότητα*. Χρειάστηκε ένα ἀπίστευτα μεγάλο χρονικό διάστημα στην ιστορία της επιστήμης, για νά θεμελιωθεί μία διαφοροποίηση μεταξύ αυτών των δύο ιδεῶν, αλλά όταν έγινε αυτή ή διαφοροποίηση, είχε σαν ἀποτέλεσμα καταπληκτικές προόδους. “Αν και σήμερα αυτές οι ιδέες είναι προσιτές στον καθένα μας, θέλουμε νά τις εξετάσουμε από πιο κοντά ἐκμαιώντας τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ τους.

Ή αἴσθηση της αφής μας φανερώνει μ’ ένα τρόπο καθοριστικό ότι αυτό τό σώμα είναι κρύο κι’ αυτό ζεστό. Αλλά αυτό είναι ένα κριτήριο καθαρά ποιοτικό, ἀνεπαρκές για μία ποσοτική περιγραφή και καμμιά φορά ακόμη και διφορούμενο. Μπορούμε νά τό δείξουμε μ’ ένα πολύ γνωστό πείραμα. “Ας υποθέσουμε τρία δοχεία με κρύο, χλιαρό και ζεστό νερό.” Αν

βυθίσουμε τό ένα χέρι στό κρύο νερό καί τό άλλο στό ζεστό παίρνουμε άπ' τό πρώτο, τό μόνημα ότι τό νερό είναι κρύο καί άπό τό δεύτερο ότι είναι ζεστό.

Άν στή συνέχεια βυθίσουμε καί τά δύο χέρια στό χλιυρό νερό τά μνήματα πού παίρνουμε άπό κάθε χέρι συγκρούονται. Για τήν ίδια αίτία άν ένας 'Εσκιμώος κι' ένας γεννημένος σέ κάποια χώρα του Ισημερινού συναντηθούν στήν Ν. Υόρκη μιά φθινοπωρινή μέρα θά έκφράσουν διαφορετικές ιδέες για τό κλίμα. 'Ο ένας θά πεί ότι είναι κρύο κι' ο άλλος ζεστό. Ρυθμίζουμε όλες αυτές τις έρωτήσεις με τή χρήση ενός θερμομέτρου, ένα όργανο, πού σέ πρωτόγονη μορφή κατασκευάσθηκε άπό τόν Γαλιλαίο. Η χρήση του θερμομέτρου βασίζεται σέ όρισμένες προφανείς υποθέσεις της φυσικής. Θά τις ξαναθυμίσουμε αναφέροντας λίγες γραμμές άπό μιά διάλεξη του Black έδώ καί περίπου έκατόν πενήντα χρόνια πού συνείσφερε πολύ νά διαλευκανθούν οι δυσκολίες οι συνδεδεμένες με τις δύο ιδέες της θερμότητας καί της θερμοκρασίας.

Μεταχειριζόμενοι αυτό τό όργανο μάθαμε ότι άν πάρουμε χιλιάδες διαφορετικά είδη πρυγμάτων ή καί περισσότερα άκόμη, όπως μέταλλα, πέτρες, άλατα, ξύλα, φτερά, μαλλί, νερό καί διάφορα άλλα ρευστά πού κατέχουν διαφορετικές «θερμότητες» καί άν τά τοποθετήσουμε σ' ένα χώρο πού δέν θερμαίνεται καί πού ο ήλιος δέν εισχωρεί, τά θερμομέτρα σώματα θά μεταδώσουν τή θερμότητά τους στα ψυχρότερα μετά άπό μερικές ώρες ή μπορεί μετά άπό μιά μέρα. Άν στό τέλος αυτού του χρονικού διαστήματος έγγίσουμε τό θερμομετρο διαδοχικά σέ καθένα άπ' αυτά, θά παρατηρήσουμε ότι θά έχει πάντα τήν ίδια ένδειξη.

Η λέξη «θερμότητες» πρέπει σύμφωνα με τήν σημερινή ονοματολογία νά αντικατασταθεί άπό τήν θερμοκρασία.

Ένας γιατρός πού βγάξει τό θερμομετρο άπό τό στόμα κάποιου άρρωστου θά μπορούσε νά συλλογισθεί ως εξής: « Τό θερμομετρο δείχνει τή θερμοκρασία του άπό τό ύψος της στήλης του υδράργυρου. Υποθέτουμε ότι τό ύψος της στήλης του υδράργυρου αύξάνει άναλογικά με τήν αύξηση της θερμοκρασίας. Άλλά τό θερμομετρο ήταν για μερικά λεπτά σέ έπαφή με τόν άσθενή μου, σέ τρόπο ώστε καί τό θερμομετρο καί ο

άσθενής νάχουν τήν ίδια θερμοκρασία. Συμπεραίνω λοιπόν ότι ή θερμοκρασία του άσθενή μου είναι αυτή πού μου δείχνει τό θερμομετρο». Είναι φανερό ότι ο γιατρός ενεργεί μηχανικά, αλλά εφαρμόζει τις άρχές της φυσικής χωρίς νά τις σκέπτεται.

Μά τό θερμομετρο περιέχει τήν ίδια ποσότητα θερμότητας με τό σώμα του άσθενή; Σίγουρα όχι. Άν υποθέσουμε ότι δύο σώματα διαθέτουν ίσες ποσότητες θερμότητας, επειδή οι θερμοκρασίες τους είναι ίσες θά ήταν, παρατηρεί ο Black, μιά πολύ πρόχειρη αντιμετώπιση του θέματος. Μ' αυτό τόν τρόπο συγχέει τήν ποσότητα της θερμότητας πού βρίσκεται σέ διαφορετικά σώματα, με τή δύναμή της ή τήν γενική της ένταση, ενώ είναι πρόδηλο ότι μιλάμε για δύο διαφορετικά πράγματα, πού θά έπρεπε πάντα νά διακρίνονται όταν σκεφτόμαστε τις μεθόδους της θερμότητας.

Καταλαβαίνει κανείς τή διαφοροποίηση αυτή κάνοντας ένα πολύ άπλό πείραμα. Ένα λίτρο νερού πού θερμαίνεται μ' ένα καυστήρα άερίου χρειάζεται όρισμένο χρονικό διάστημα για νά περάσει άπ' τή θερμοκρασία περιβάλλοντος στό σημείο βρασμού του. Ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα είναι άπαραίτητο για νά θερμάνουμε δώδεκα λίτρα νερού στό ίδιο δοχείο με τόν ίδιο καυστήρα. Ερμηνεύουμε αυτό τό γεγονός λέγοντας ότι τώρα είναι άπαραίτητο «κάτι τι» περισσότερο καί ονομάζουμε αυτό τό «κάτι τι» θερμότητα.

Μιά άλλη σημαντική ιδέα, ή ειδική θερμότητα, λαμβάνεται παρακολουθώντας τό παρακάτω πείραμα: χύνουμε μέσα σ' ένα δοχείο ένα λίτρο νερού καί σ' ένα άλλο ένα λίτρο υδράργυρο καί τά θερμαίνουμε με τόν ίδιο τρόπο. Ο υδράργυρος θερμαίνεται πολύ πιο γρήγορα άπό τό νερό, κάτι πού δείχνει ότι χρειάζεται πολύ λιγότερη θερμότητα για νά αύξηθεί ή θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό. Γενικά, είναι άπαραίτητες διαφορετικές ποσότητες «θερμότητας» για νά αύξηθεί κατά ένα βαθμό ή θερμοκρασία διαφορετικών υλικών, όπως τό νερό, ο υδράργυρος, ο σίδηρος, ο χαλκός, τό ξύλο κ.λ.π., με τήν προϋπόθεση όμως ότι όλα έχουν τήν ίδια μάζα. Λέμε ότι κάθε

όλικό έχει μία δική του *θερμική ικανότητα* ή μία ειδική θερμότητα.

"Έχοντας πιά συλλάβει την ιδέα της θερμότητας μπορούμε τώρα να μελετήσουμε τη φύση της από κοντινότερα." Ας πάρουμε δύο σώματα τό ένα θερμό και τό άλλο ψυχρό ή για να μιλάμε ακριβέστερα τό ένα να είναι σέ ύψηλότερη θερμοκρασία άπ' τό άλλο." Ας τά θέσουμε σέ έπαφή και έλευθερώσουμε όλες τις έξωτερικές επιδράσεις. Γνωρίζουμε ότι τελικά θά φθάσουν να έχουν την ίδια θερμοκρασία. Αλλά πώς γίνεται αυτό; Τι συμβαίνει ανάμεσα στη στιγμή πού θέτονται σέ έπαφή ως αυτή πού έχουν την ίδια θερμοκρασία. Η εικόνα της «ρέουσας» θερμότητας από τό ένα σώμα στό άλλο έμφανίζεται μόνη της, ίδια μέ τό νερό πού ρέει από ένα άνωτερο προς ένα κατώτερο επίπεδο. Η εικόνα, άν και πρωτόγονη μοιάζει να ανταποκρίνεται σε πολλά φαινόμενα, όπως έμφανίζεται στην παρακάτω αναλογία:

Νερό — Θερμότητα

Άνωτερο επίπεδο — Υψηλή θερμοκρασία

Κατώτερο επίπεδο — Χαμηλή θερμοκρασία

Η ροή συνεχίζεται μέχρις ότου τά δύο επίπεδα, δηλαδή οι δύο θερμοκρασίες, εξισωθούν. Αύτή ή άπλοϊκή άποψη μπορεί να φανεί χρησιμότερη από τις ποσοτικές θεωρήσεις του φαινομένου." Αν καθορισμένες μάζες νερού και άλκοόλης, πού ή κάθε μία βρίσκεται σέ όρισμένη θερμοκρασία, αναμιγνύονται, ή γνώση των ειδικών θερμοτήτων τους έπιτρέπει να προβλέψουμε την τελική θερμοκρασία του μίγματος. Αντίστροφα ό καθορισμός της τελικής θερμοκρασίας και λίγη άλγεβρα μās έπιτρέπει να βρούμε τη σχέση μεταξύ των δύο ειδικών θερμοτήτων.

Η έννοια της θερμότητας πού παρουσιάζεται έδω έχει μία όμοιότητα μ' άλλες φυσικές έννοιες. Η θερμότητα σύμφωνα μέ την δική μας σύλληψη, είναι μία ύλη, όπως ή μάζα στη μηχανική. Η ποσότητά της μπορεί να μεταβάλλεται ή να μή μεταβάλλεται, όπως τά χρήματα πού βάζουμε κατά μέρος σ'

ένα χρηματοκιβώτιο ή πού ξοδεύουμε. Τό σύνολο των χρημάτων ενός χρηματοκιβωτίου μένει άθικτο, όσο καιρό μένει κλειστό, και θά συμβεί τό ίδιο μέ την ποσότητα της μάζας και μέ την θερμότητα ενός μονομένου σώματος. Μία ιδανική μονωμένη φιάλη μοιάζει μ' ένα τέτοιο χρηματοκιβώτιο. Έξ άλλου, όμοια όπως ή μάζα ενός μονωμένου συστήματος μένει άμετάβλητη, άκόμη κι' άν συμβαίνει μία χημική αντίδραση, έτσι και ή θερμότητα διατηρείται άκόμη κι' άν ρέει από τό ένα στό άλλο σώμα. Κι' άκόμη άν ή θερμότητα δέν χρησιμοποιηθεί για να ανεβάσει την θερμοκρασία ενός σώματος, αλλά για να τήξει πάγο ή για να μετατρέψει νερό σέ άτμό, μπορούμε και τότε να την θεωρήσουμε σαν ύλη και να την ανακτήσουμε έξ ολοκλήρου αναστρέφοντας τις διαδικασίες μετατρέποντας τό νερό σέ πάγο και τόν άτμό στην κατάσταση νερού. Οι παλιοί όροι της λανθάνουσας θερμότητας τήξης ή εξάτμισης φανερώνουν ότι αυτές οι έννοιες πρόκυψαν από θεώρηση της θερμότητας σαν ύλης. Η λανθάνουσα θερμότητα είναι χρονικά κρυμένη, όπως τά χρήματα στό χρηματοκιβώτιο, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν άν κάποιος γνωρίζει τό μηχανισμό της κλειδαριάς.

Αλλά βέβαια ή θερμότητα δέν είναι ύλη μέ την έννοια της μάζας. Η μάζα γίνεται προφανής μέ τη χρήση της ζυγαριάς αλλά συμβαίνει τό ίδιο πράγμα και μέ την θερμότητα: "Ένα καλά πυρωμένο κομμάτι σίδερο ζυγίζει περισσότερο από τό ίδιο κομμάτι παγωμένο;" Η έμπειρία δείχνει ότι δέν είναι έτσι." Αν ή θερμότητα είναι ύλη, είναι χωρίς βάρος. Η «θερμότητα-ύλη» όνομαζόταν συνήθως θερμίδα, και είναι ή πρώτη γνωριμία μας μ' ένα μέλος της οικογένειας της ύλης χωρίς βάρος. Αργότερα θάχουμε την εύκαιρία να παρακολουθήσουμε την ιστορία αυτής της οικογένειας τό μέγεθος της και την παρακμή της. Προς τό παρόν άρκούμαστε να σημειώσουμε τη γέννεση αυτού του ξεχωριστού μέλους.

Ο σκοπός κάποιας θεωρίας της φυσικής είναι να εξηγήσει ένα όσο τό δυνατόν ευρύτερο φάσμα φαινομένων. Δικαιώνεται εκεί πού παρουσιάζει κατανοητά περιστατικά.

Είδαμε ότι η θεωρία της «θερμότητας-ύλης» εξηγεί πολλά φαινόμενα της θερμότητας. Θα γίνει φανερό σε λίγο ότι αυτός είναι ένας λαθεμένος δρόμος, γιατί η θερμότητα δεν μπορεί να θεωρηθεί σά μιά ύλη άκόμη και χωρίς βάρος. Αυτό γίνεται σαφές αν σκεφτούμε όρισμένα άπλά πειράματα, πού σημάδεψαν την άρχή του πολιτισμοῦ.

Θεωρούμε την ύλη σαν ένα είδος πού οὔτε μπορεί να δημιουργηθεί οὔτε να καταστραφεί. Άλλά ο πρωτόγονος άνθρωπος δημιούργησε με τριβή θερμότητα ίκανή να ανάψει ξύλα. Τά παραδείγματα θέρμασης με τριβή είναι γενικά πολυάριθμα και συνηθισμένα και αξίζει τον κόπο να τά αναφέρουμε. Σ' όλες αυτές τίς περιπτώσεις δημιουργείται μιá όρισμένη ποσότητα θερμότητας, ένα γεγονός πού δύσκολα εξηγείται με τή θεωρία της «θερμότητας-ύλης». Είναι άλήθεια ότι αυτός πού ύποστηρίζει αυτή τή θεωρία θά μπορούσε να βρει έρίσματα για να την εξηγήσει. Ο συλλογισμός του θά ήταν περίπου ο παρακάτω:

« Η θεωρία της «θερμότητας-ύλης» μπορεί να εξηγήσει τή φανερή δημιουργία της θερμότητας. Άς πάρουμε τό άπλό παράδειγμα των δύο κομματιών ξύλου πού τρίβονται τό ένα με τό άλλο. Η τριβή εξασκεί επίδραση πάνω στό ξύλο και και αλλάζει τίς ιδιότητές του. Είναι άληθοφανές ότι οί ιδιότητες μετατρέπονται με τέτοιο τρόπο ώστε μιá άμετάβλητη ποσότητα θερμότητας μπορεί να δημιουργήσει μιá αύξηση θερμοκρασίας μεγαλύτερη από πριν. Μετά άπ' όλα αυτά τό μόνο πράγμα πού διαπιστώνουμε είναι ή αύξηση της θερμοκρασίας. Είναι δυνατόν ή τριβή των κομματιών του ξύλου μεταξύ τους να αλλάξει τήν ειδική θερμότητα του ξύλου και όχι τήν συνολική ποσότητα θερμότητας.

Σ' αυτή τή φάση της συζήτησης θάταν άχρηστο να χρησιμοποιήσει κανείς τεκμήρια ενάντια στον ύποστηρικτή της θεωρίας «θερμότητα-ύλη» γιατί αυτό άκριβώς είναι τό θέμα πού θά διαλευκανθεί μόνο με τό πείραμα. Άς φαντασθοῦμε δύο ίδια κομμάτια ξύλο και άς ύποθέσουμε ότι δημιουργούνται σ' αυτά ίσες αύξήσεις θερμοκρασίας με δύο διαφορετικούς τρό-

πους θέρμανσης, στη μιá περίπτωση με τριβή και στην άλλη δι' έπαφής μ' ένα θερμαντικό σώμα. Αν τά δύο κομμάτια έχουν τήν ίδια ειδική θερμότητα στην νέα θερμοκρασία, ή θεωρία της «θερμότητας - ύλης» καταρίπτεται άμεσα. Υπάρχουν μέθοδες πολύ άπλές για τον προσδιορισμό της ειδικής θερμότητας και τό είδος της θεωρίας εξαρτάται άκριβώς από τά άποτελέσματα αυτών των προσδιορισμών. Οί δοκιμές οί ίκανές να άποφασίζουν για τήν ζωή ή τό θάνατο μιás θεωρίας συναντώνται συχνά στην ιστορία της φυσικής και όνομάζονται κρίσιμα πειράματα. Η κρίσιμη τιμή ενός πειράματος προκύπτει μόνον από τον τρόπο με τον όποιον τέθηκε τό έρώτημα και είναι ή μόνη θεωρία των φαινομένων πού αυτοελέγχεται. Ο καθαρισμός των ειδικών θερμοτήτων δύο σωμάτων του ίδιου είδους στην ίδια θερμοκρασία πού λαμβάνεται προσεκτικά με τριβή και με ροή θερμότητας είναι ένα τυπικό παράδειγμα ενός κρίσιμου πειράματος. Αυτό τό πείραμα έγινε πριν περίπου εκατόν πενήντα χρόνια άπ' τον Ράμφορτ και κατάφερε θανάσιμο πλήγμα στην θεωρία «θερμότητα - ύλη».

Άπό ένα άπόσπασμα μιás ανακοίνωσής του οά καταλάβουμε τήν άποψη του:

*Συχνά συμβαίνει στις συνηθισμένες δουλειές κι' άπασχολήσεις της ζωής να μῦς παρουσιάζονται εύνοϊκές εύκαιρίες για να θαυμάσουμε τίς πιο περίεργες διαδικασίες της φύσης. Μποροῦν επίσης συχνά, να εκτελεσθοῦν πολύ ενδιαφέροντα φυσικά πειράματα με ειδικές μηχανές σχεδόν χωρίς καμμιά δυσκολία και κανένα έξοδο, άπλά και μόνο για να ίκανοποιηθοῦν βιομηχανικές ανάγκες.*

*Είχα επανηλλειμένα αυτή τήν εύκαιρία της παρατήρησης, και πείσθηκα ότι ή συνήθεια του να παρατηρεῖ κάποιος με προσοχή αυτά πού συμβαίνουν στην συνηθισμένη ροή της ζωής, οδήγησαν συχνά, είτε από τύχη είτε από τρελλή περιπλάνηση γνωστών φαινομένων, σε χρήσιμες άμφιβολίες και σε μυαλωμένα σχέδια διερεύνησης και τελειοποίησης πού δεν κατάφεραν να οδηγήσουν οὔτε οί πιο βαθιές σκέψεις των φιλοσόφων πού άφιέρωναν τίς ώρες τους ειδικά στη μελέτη.*

"Οντας απασχολημένος τελευταία με την επίβλεψη της διατήρησης των κανονιών στα εργαστήρια του στρατιωτικού όπλοστασίου του Μονάχου, έντυπωσιάσθηκα από την σημαντική ποσότητα της θερμότητας που ελευθερώθηκε σ' ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα, από ένα χάλκινο κυνόνι που τρυπούσαν καθώς επίσης και της πιο έντονης θερμότητας (πιο έντονης και αυτής του νερού που βράζει, όπως κατάλαβα εμπειρικά), που είχαν τα μεταλλικά κομμάτια που ξεχώριζαν με το τρυπάνι.

"Από που λοιπόν προέρχεται πραγματικά αυτή η θερμότητα που παράχθηκε από την πιο πάνω μηχανική διαδικασία; Μήπως προσδίδεται από τα κομμάτια που διαχωρίζονται με το τρυπάνι από την στερεή μάζα του μετάλλου;

"Αν ήταν έτσι, η δυνατότητα της λανθάνουσας θερμότητας και του θερμογόνου, σύμφωνα με τις σύγχρονες θεωρίες, θα έπρεπε όχι μόνον να αλλάξει, αλλά και η αλλαγή που υπέστησαν θα έπρεπε να ήταν αρκετά μεγάλη για να δικαιολογηθεί ύλη ή παραχθείσα θερμότητα. Αλλά δεν προέκυψε καμιά αλλαγή αυτής της μορφής, γιατί παίρνοντας ίσες ποσότητες αυτών των κομμιτιών και λεπτών λωρίδων του ίδιου μεταλλικού σώματος, που κόπηκαν με λεπτό πριόνι, και βάζοντάς τες μαζί με ίδια θερμοκρασία (του ζέοντος νερού) μέσα σε ίδιες ποσότητες ψυχρού - νερού (δηλ. θερμοκρασίας  $59 \frac{1}{2}^{\circ} F$ ) η ποσότητα του νερού που εκτόξευσαν τα κομμάτια δεν ήταν καθώς φάνηκε θερμότερη από την ποσότητα που εκτόξευσαν οι μεταλλικές λωρίδες.

"Ίδού τελικά το συμπέρασμά του:

Και συλλογιζόμενοι πάνω σ' αυτό το θέμα δεν πρέπει να ξεχνάμε να πάρουμε υπ' όψη μας την παρακάτω σημαντικά αξιοσημείωτη περίπτωση: ότι η πηγή της παραχθείσης θερμότητας σ' αυτά τα πειράματα της τριβής έμοιαζε φανερά ανεξάντλητη.

Είναι σχεδόν άχρηστο να προσθέσουμε ότι αν κάποιο μονωμένο σώμα, ή ένα σύστημα σωμάτων, μπορεί συνεχώς να προσδίδει θερμότητα χωρίς όριο, αυτή η θερμότητα δεν μπορεί να είναι μια υλική ουσία. Και εκτός από την κίνηση, μου φαίνεται πολύ δύσκολο, για να μην πω έντελώς αδύνατο, να σχηματίσει κανείς μιά

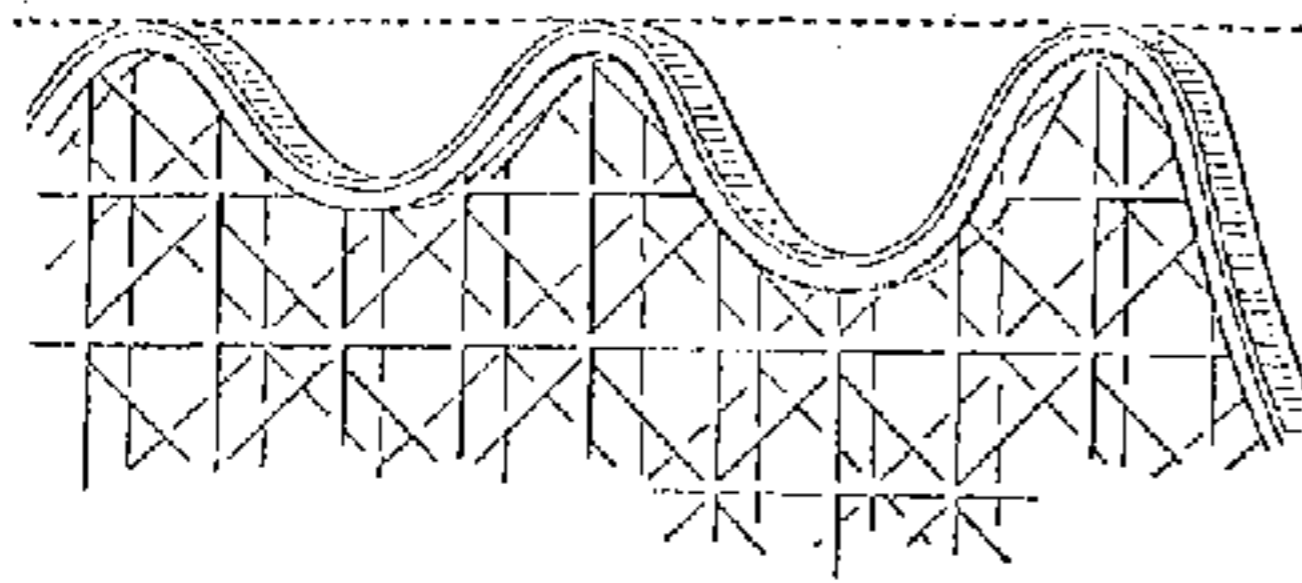
συγκεκριμένη ιδέα για κάποιο πράγμα που είναι ικανό να προξενείται και να μεταδίδεται με τον τρόπο που, σύμφωνα με τις εμπειρίες του, προξενείται και μεταδίδεται η θερμότητα.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η παλιά θεωρία καταπίπτει ή για να είμαστε πιο ακριβείς, ότι η θεωρία της «θερμότητας-ύλης» δεν καλύπτει τα προβλήματα της ροής της θερμότητας. Ξανά λοιπόν όπως και ο Rumford τό άφησε να έννοηθεί, οφείλουμε να ψάξουμε ένα άλλο δρόμο. Για να τό κάνουμε όμως ως αφήσουμε λίγο τα προβλήματα της θερμότητας και ως ξαναγυρίσουμε στη μηχανική.

## ΤΑ ΡΩΣΣΙΚΑ ΒΟΥΝΑ

"Ας παρατηρήσουμε την κίνηση που εκτελείται στο λαϊκό παιχνίδι που προκαλεί την ανατριχίλα και που ονομάζεται ρωσικά βουνά." Ένα μικρό άμαξάκι σηκώνεται ή σπρώχνεται στο πιο ψηλό σημείο της διαδρομής. Όταν ελευθερώνεται αρχίζει να κυλιέται προς τα κάτω με την επίδραση της βαρύτητας, να ανεβαίνει και να κατεβαίνει κατά μήκος μιας φανταστικά καμπύλης γραμμής και προξενεί στους επιβάτες του ρίγος καθώς αλλάζει απότομα ταχύτητα. Τα ρωσικά βουνά έχουν τό σημείο εκκίνησης της διαδρομής στο υψηλότερο μέρος και καθ' όλη τη διάρκεια της πορείας τό άμαξάκι δεν θα φθάσει στο ίδιο ύψος. Μιά πλήρη περιγραφή της κίνησης θα ήταν πολύ μπλεγμένη. Υπάρχει απ' τή μιά μεριά ή μηχανική άποψη του προβλήματος κι' απ' την άλλη ή τριβή και στη συνέχεια ή παραγωγή θερμότητας στις σιδηροτροχιές και στους τροχούς των άμαξιών. Η μόνη αξιόλογη αίτια που διαχωρίζουμε τό φυσικό αυτό φαινόμενο σε δύο όψεις είναι για να καταστεί δυνατή ή χρησιμοποίηση των έννοιών που συζητήσαμε πιο πάνω.

"Ο διαχωρισμός οδηγεί σ' ένα εξειδανικευμένο πείραμα γιατί ένα φυσικό φαινόμενο στο οποίο παρουσιάζεται μόνο ή μηχανική του όψη είναι δυνατό μόνο στην φαντασία μας και ποτέ στην πράξη.



Γιά τό ἐξιδανικευμένο πείραμα μπορούμε νά φαντασθοῦμε ὅτι κάποιος κατόρθωσε νά ἐξαλείψει πλήρως τήν τριβή πού συνοδεύει πάντοτε τήν κίνηση. Ἐτσι παίρνει τήν ἀπόφαση νά ἐφαρμόσει τήν ἀνακάλυψή του στήν κατασκευή τῶν ρωσικῶν βουνῶν καί ὀφείλει νά βρεῖ τά μέσα γιά νά τήν πραγματοποιήσει. Τό ἀμάξι πού γιά παράδειγμα ὑψώνεται σ' ἓνα ὕψος 30 μέτρων πάνω ἀπ' τό ἔδαφος ὀφείλει νά ἀνεβοκατεβαίνει. Μετά ἀπό πολλές δοκιμές καταλήγει ὅτι πρέπει νά ἀκολουθήσει τόν ἐξῆς ἀπλό κανόνα: εἶναι ἐλεύθερος νά τοποθετήσει τίς σιδηροτροχιές μέ ὅποιονδήποτε τρόπο μέ τή συνθήκη ὅμως ὅτι κανένα σημεῖο δέν θά εἶναι ὑψηλότερο ἀπό τό σημεῖο ἀναχώρησης. Ἄν τά ἀμάξια ἔχουν τήν δυνατότητα νά κινοῦνται ἀπεριόριστα θά μπορέσουν νά φθάσουν ὅσες φορές θέλει ὁ ὑποθετικός μας μηχανικός τό ὕψος τῶν 30 μέτρων, ἀλλά ποτέ δέν θά μπορέσουν νά τό ξεπεράσουν. Τό ἀρχικό ὕψος σέ μιά πραγματική σιδηροτροχιά δέν θά ἐπιτευχθεῖ ποτέ, ἐξ αἰτίας τῆς τριβῆς, ἀλλά ὁ ὑποθετικός μας μηχανικός δέν ἀσχολήθηκε καθόλου μ' αὐτό τό πρόβλημα.

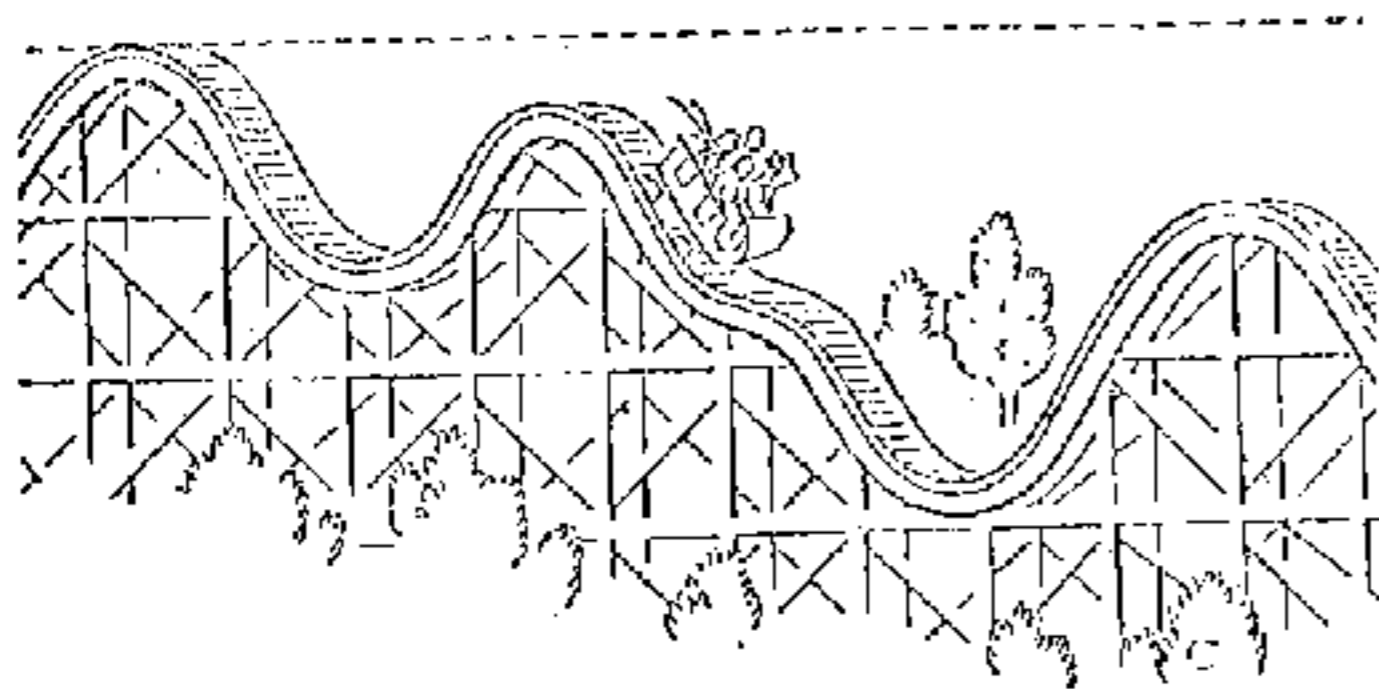
Ἄς παρακολουθήσουμε τήν κίνηση τοῦ ἰδανικοῦ ἀμαξιοῦ πάνω σ' ἰδανικές σιδηροτροχιές ἀπ' τή στιγμή πού ἀρχίζει νά κατεβαίνει. Στό μέτρο πού κινεῖται ἡ ἀπόστασή του ἀπό τό ἔδαφος μειώνεται καί ἡ ταχύτητά του αὐξάνεται. Αὐτή ἡ φράση

μπορεῖ νά μᾶς θυμίσει μιά ἄσκηση μετάφρασης «Δέν ἔχω μολύβι, ἀλλά ἔχετε ἕξη πορτοκάλια». Ἐν τούτοις δέν εἶναι τόσο ἀνόητη.

Δέν ὑπάρχει καμμιά σχέση μεταξύ τοῦ γεγονότος ὅτι δέν ἔχω μολύβι καί ἔχετε ἕξη πορτοκάλια ἐνῶ ὑπάρχει μιά πολύ πραγματική σχέση μεταξύ τῆς ἀπόστασης τοῦ ἀμαξιοῦ ἀπό τό ἔδαφος καί τῆς ταχύτητάς του. Ἄν ξέρουμε τό ὕψος τοῦ ἀμαξιοῦ ἀπό τό ἔδαφος κάποια στιγμή μπορούμε νά ὑπολογίσουμε τήν ταχύτητά του, ἀλλά δέν θά ἀσχοληθοῦμε ἐδῶ μ' αὐτό τό σημεῖο, γιατί εἶναι θέμα ποσοτικό, πού μπορεῖ νά ἐκφρασθεῖ καλύτερα μέ μαθηματικά.

Στό ὑψηλότερο σημεῖο ἡ ταχύτητα τοῦ ἀμαξιοῦ εἶναι μηδενική καί βρίσκεται σέ ὕψος 30 μέτρα. Ὄταν βρίσκεται στό χαμηλότερο σημεῖο δέν τό χωρίζει καμμιά ἀπόσταση ἀπό τό ἔδαφος καί ἡ ταχύτητά του εἶναι ἡ μέγιστη δυνατή. Αὐτό τό γεγονός μπορεῖ νά ἐκφρασθεῖ καί μέ διαφορετικούς ὄρους. Στό ψηλότερό του σημεῖο τό ἀμάξι κατέχει *δυναμική ἐνέργεια* ἀλλά ὄχι *κινητική ἐνέργεια* ἢ ἐνέργεια κίνησης. Στό χαμηλότερό του σημεῖο κατέχει τήν μέγιστη δυνατή *κινητική ἐνέργεια* ἀλλά καθόλου *δυναμική*. Σ' ὅλες τίς ἐνδιάμεσες θέσεις ἔχει ταυτόχρονα καί *κινητική* καί *δυναμική ἐνέργεια*. Ἡ *δυναμική ἐνέργεια* αὐξάνει μέ τό ὕψος, ἐνῶ ἡ *κινητική* μεγαλώνει ὅσο αὐξάνεται ἡ ταχύτητά του. Οἱ ἀρχές τῆς μηχανικῆς ἐπαρκοῦν γιά νά ἐξηγηθεῖ ἡ κίνηση. Στή μαθηματική περιγραφή ἐμφανίζονται δύο ἐκφράσεις ἐνέργειας, πού ἡ καθεμιά ἀλλάζει ἀλλά τό ἄθροισμά τους δέν μεταβάλλεται. Ἐτσι εἶναι δυνατό νά εἰσαχθεῖ μαθηματικά καί σίγουρα ἡ ἔννοια τῆς *δυναμικῆς ἐνέργειας* πού ἐξαρτᾶται ἀπό τήν θέση καί αὐτῆς τῆς *κινητικῆς ἐνέργειας* πού ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ταχύτητα. Ἡ εἰσαγωγή αὐτῶν τῶν δύο ὄρων εἶναι γενικά ἀθάίρετη καί δικαιολογεῖται μόνο γιά λόγους εὐκολίας. Τό ἄθροισμα τῶν δύο ποσοτήτων μένει ἀναλοῖωτο καί ὀνομάζεται σταθερά τῆς κίνησης. Ἡ συνολική ἐνέργεια, *κινητική* καί *δυναμική*, μπορεῖ νά συγκριθεῖ μέ μιά ὄλη, ἄς ποῦμε τά χρήματα, πού μένουν ἀναλοῖωτα ὅσο ἀφορᾶ στό ἄθροισμά τους, ἀλλά μποροῦν συνεχῶς νά μετατρέπονται

από νόμισμα σε νόμισμα, παραδείγματος χάρη από δολλάρια σε λίρες και αντίστροφως, σύμφωνα όμως με μία σχέση καθορισμένη καλά.



Στά πραγματικά ρωσικά βουνά όπου η τριβή εμποδίζει τό άμάξι νά φθάσει σέ τόσο ύψηλό σημείο όσο αυτό πού ξεκίνησε ύπάρχει συνεχής έναλλαγή τής κινητικής και τής δυναμικής ενέργειας. Έδώ όμως τό άθροισμα σέ μένει σταθερό αλλά μειώνεται. Τώρα είναι άπαραίτητο νά κάνουμε ένα σημαντικό και θαρραλέο βήμα για νά συνδέσουμε μεταξύ τους τήν μηχανική και τή θερμική όψη τής κίνησης. Τό μέγεθος τών επιπτώσεων και τών γενικεύσεων πού θά προκύψουν άπ' τό βήμα αυτό θά φανοϋν άργότερα.

Κάτι παραπάνω εκτός άπ' τήν κινητική και τή δυναμική ενέργεια εμπλέκεται τώρα στήν κίνηση, πού είναι ή θερμότητα τής τριβής. Αύτή ή θερμότητα αντίστοιχεί άραγε στή μείωση τής μηχανικής ενέργειας, δηλαδή στή μείωση τής μηχανικής ενέργειας, δηλαδή στή μείωση τής κινητικής και τής δυναμικής ενέργειας; Έπίκειται μία καινούρια είκασία. "Αν ή θερμότητα μπορεί νά θεωρηθεί σά μία μορφή ενέργειας, μπορεί τό άθροισμα τής κινητικής, τής δυναμικής και τής θερμικής ενέργειας νά παραμείνει σταθερό. Δέν είναι μόνη της ή

θερμότητα, αλλά αύτή, και οι άλλες μορφές ενέργειας όταν ληφθοϋν μαζί, είναι άφθαρτες όπως ή ύλη.

Είναι σάν κάποιος νά παραχωροϋσε στόν έαυτό του προμήθεια σέ φράγκα για τήν μετατροπή λιρών σέ δολλάρια κι' έβαζε κατά μέρος αύτά τά χρήματα, σέ τρόπο ώστε δολλάρια, λίρες και φράγκα νά έχουν σταθερό άθροισμα σύμφωνα με μία δεδομένη ισοτιμία μεταξύ τους.

Η ανάπτυξη τής επιστήμης κατέστρεψε τήν παλιά έννοια τής «θερμότητας-ύλης». Θα προσπαθήσουμε νά δημιουργήσουμε μία καινούρια ύλη, τήν ενέργεια, όπου ή θερμότητα παριστά μία μορφή της.

### Η ΣΧΕΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ

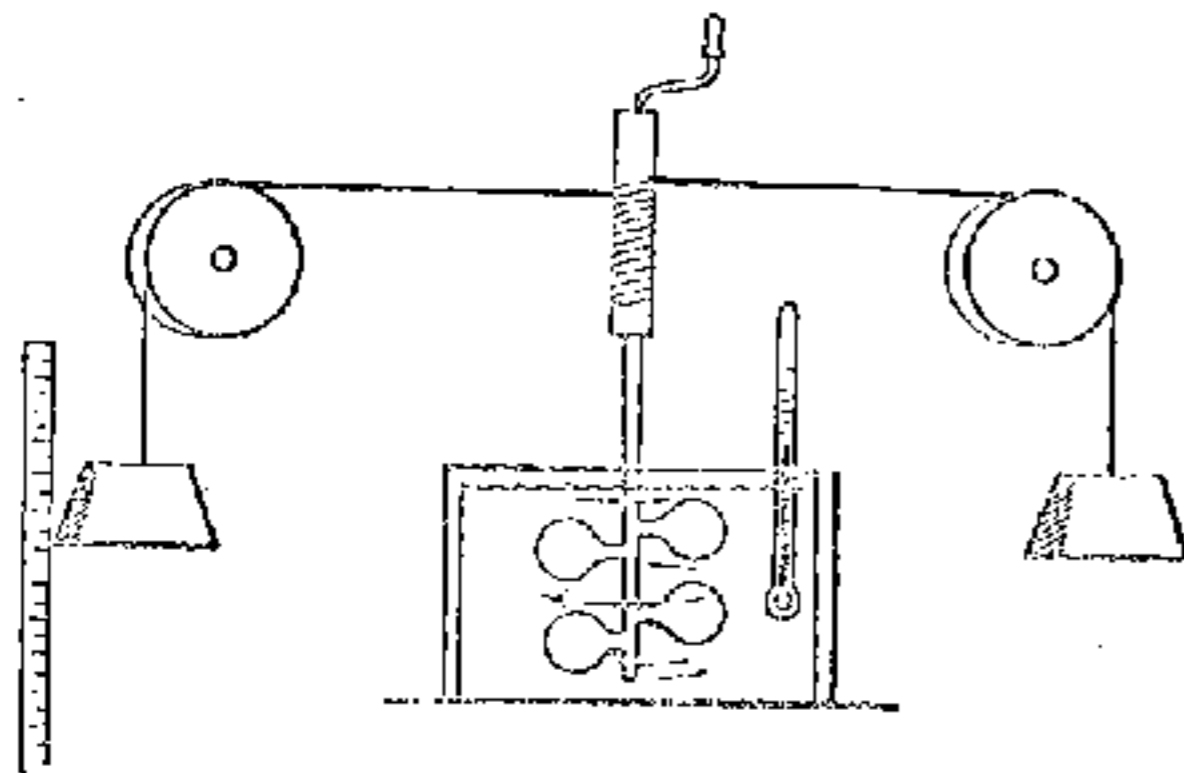
Πρώτος ό Mayer, πρίν περίπου έκατό χρόνια έκανε μία είκασία πού όδηγοϋσε στήν έννοια τής θερμότητας σά μία μορφή ενέργειας και πού πειραματικά επιβεβαιώθηκε από τόν Joule. Είναι μία παράξενη σύμπτωση ότι σχεδόν όλη ή βασική δουλειά ή σχετική με τή φύση τής θερμότητας εκτελέσθηκε από έρασιτέχνες φυσικούς, πού είχαν τή φυσική άπλως σάν τή μεγάλη τους εύχαρίστηση. Αύτοί ήταν ό εύστροφος σκωτσέζος Black, ό γερμανός γιατρός Mayer και ό κόμης Rumford αύτός ό μεγάλος άμερικανός τυχοδιώκτης πού ζοϋσε στήν Εϋρώπη και άνάμεσα στίς άλλες τους άσχολίες, ήταν και ύπουργός πολέμου στή Βαυαρία. Ήταν επίσης και ό Άγγλος ζυθοποιός Joule πού σέ μερικές σπάνιες στιγμές του άνάπαυσης, έκανε μερικά από τά πιο σημαντικά πειράματα για τήν διατήρηση τής ενέργειας.

Ό Joule άπόδειξε πειραματικά τήν ύπόθεση ότι ή θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας και καθόρισε τή σχέση τών τιμών. Αξίζει τόν κόπο νά δοϋμε πιά ήταν άκριβώς αύτά του τά άποτελέσματα.

Η δυναμική και ή κινητική ενέργεια ενός συστήματος αποτελοϋν μαζί τήν μηχανική του ενέργεια. Στήν περίπτωση τών ρωσικών βουνών κάναμε τήν ύπόθεση ότι ένα μέρος

μηχανικής ενέργειας μετατράπηκε σε θερμότητα.

“Αν ισχύει αυτό, πρέπει και εδώ και σ’ όλα τα παρεμφερή φυσικά φαινόμενα να υφίσταται μία κάποια σχέση μεταξύ αυτών των δύο μορφών ενέργειας. Αυτό βασικά είναι μία ποσοτική έρώτηση, αλλά το γεγονός ότι μία δοσμένη ποσότητα μηχανικής ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε μία καθορισμένη ποσότητα θερμότητας, έχει ύψιστη σημασία. Θα θέλαμε να ξέρουμε ποιός αριθμός εκφράζει αυτή τη σχέση, δηλαδή πόση θερμότητα παίρνουμε από μία δοσμένη ποσότητα μηχανικής ενέργειας.



“Ο καθορισμός αυτού του αριθμού ήταν το αντικείμενο των ερευνών του Joule. Ο μηχανισμός ενός από τα πειράματά του μοιάζει πολύ με τον μηχανισμό του ρολογιού που λειτουργεί με βάρος. Το κούρδισμα ενός τέτοιου ρολογιού συνίσταται στο να σηκώσουμε δύο βάρη, πράξη που δίνει στο σύστημα δυναμική ενέργεια. Αν δεν υπάρξει καμιά εξωτερική άλλη επίδραση, το ρολόι μπορεί να θεωρηθεί σαν κλειστό σύστημα. Βαθμιαία το βάρος κατεβαίνει και το ρολόι λειτουργεί. Μετά από κάποιο

χρονικό διάστημα τα βάρη θα φθάσουν στο χαμηλότερό τους σημείο και το ρολόι θα σταματήσει. Τι συνέβηκε με την ενέργεια; Η δυναμική ενέργεια των βαρών μετατράπηκε σε κινητική ενέργεια του μηχανισμού και βαθμιαία διασκορπίσθηκε υπό μορφή θερμότητας.

Μία κατάλληλη μεταρρύθμιση αυτού του μηχανισμού επέτρεψε στον Joule να μετρήσει τη θερμότητα και στη συνέχεια τη σχέση των τιμών. Στο μηχανήμα του δύο βάρη που κατέβαιναν κατά μήκος ενός χάρακα με υποδιαίρεσεις, παράσερναν σε κυκλική κίνηση πτερύγια βουτηγμένα μέσα στο νερό.

“Η δυναμική ενέργεια των βαρών μετατρέποταν σε κινητική ενέργεια των πτερυγίων και από εκεί σε θερμότητα, που προσδιόριζε από την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού με το θερμόμετρο. Ο Joule μετρήσε αυτή τη διαφορά θερμοκρασίας και χρησιμοποιώντας την ήδη γνωστή ειδική θερμότητα του νερού, υπολόγισε την απορροφηθείσα ποσότητα θερμότητας. Ανακεφαλαίωσε τα αποτελέσματα των πολλαπλών του πειραμάτων με τον εξής τρόπο:

1ον “Η παραγομένη κατά την τριβή δύο σωμάτων, στερεών ή υγρών, ποσότητα θερμότητας, είναι πάντα ανάλογη με την ποσότητα της καταναλισκόμενης δύναμης [μέ δύναμη ο Joule εννοούσε ενέργεια].

2ον “Η ποσότητα θερμότητας που έπαιρκε για να αυξηθεί η θερμοκρασία μιας λίβρας νερού (ζυγισμένο υπό κενό και σε θερμοκρασία 50° ως 60° F) κατά ένα βαθμό φarenhίτ, απαιτεί για την παραγωγή της την κατανάλωση μηχανικής δύναμης [ενέργειας] που ισοδυναμεί με την πτώση 722 λιβρών νερού από ύψος ενός ποδιού.

Μ’ άλλους όρους η δυναμική ενέργεια των 722 λιβρών νερού σε ύψος ενός ποδιού πάνω από το έδαφος είναι ισοδύναμη με τη ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για να υψωθεί η θερμοκρασία μιας λίβρας νερού από 55° σε 56° F. Μεταγενέστερα πειράματα επέτρεψαν να ληφθεί μία μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας είναι όπωσδήποτε έργο του Joule.

Μέ τὸ πού ἐκτελέσθηκε αὐτή ἡ σημαντικὴ δουλειά ἡ μετέπειτα πρόοδος ἦταν ταχύτατη. Αναγνωρίσθηκε σέ λίγο ὅτι αὐτά τὰ εἶδη ἐνέργειας, ἡ μηχανικὴ καί ἡ θερμικὴ, δέν εἶναι παρά δύο μορφές ἀπὸ μιὰ πλειάδα ἄλλων. Κάθε τι πού μπορεῖ νά μετατραπῆ στή μιὰ ἢ στήν ἄλλη μορφή εἶναι μορφή ἐνέργειας. Ἡ ἐκπεμπόμενὴ ἀπὸ τὸν ἥλιο ἀκτινοβολία εἶναι ἐνέργεια, γιατί ἕνα μέρος τῆς μετατρέπεται πάνω στή γῆ σέ θερμότητα. Ἐνα ἠλεκτρικὸ ρεῦμα διαθέτει ἐνέργεια, γιατί θερμαίνει ἕνα μεταλλικὸ σύρμα ἢ κινεῖ τῖς ρόδες μιᾶς μηχανῆς. Τὸ κάρβουνο παριστάνει χημικὴ ἐνέργεια πού ἐλευθερώνεται ὅταν καίεται. Σέ κάθε γεγονός τῆς φύσης μιὰ κάποια μορφή ἐνέργειας μετατρέπεται σέ κάποια ἄλλη μορφή, πάντα σύμφωνα μέ μιὰ καλὰ καθορισμένη σχέση. Σ' ἕνα κλειστὸ σύστημα, δηλαδή μονωμένο ἀπ' τῖς ἐξωτερικὲς ἀντιδράσεις ἡ ἐνέργεια διατηρεῖται καί ἔτσι συμπεριφέρεται σάν μιὰ ὕλη. Τὸ ἄθροισμα ὅλων τῶν δυνατῶν μορφῶν ἐνέργειας εἶναι σ' ἕνα τέτοιο σύστημα σταθερό, ἐφ' ὅσον ὁμοῦς ἡ τιμὴ καθεμιᾶς μπορεῖ νά μεταβάλλεται. Ἄν θεωρήσουμε ἄλλο τὸ σύμπαν σάν ἕνα κλειστὸ σύστημα, μπορούμε θαρραλέα νά ἀνακοινώσουμε μαζί μέ τοὺς φυσικοὺς τοῦ 19ου αἰῶνα ὅτι ἡ ἐνέργεια τοῦ σύμπαντος εἶναι ἀμετάβλητη καί ὅτι κανένα τμῆμα τῆς δέν μπορεῖ ποτέ νά δημιουργηθεῖ ἢ νά καταστραφεῖ.

Οἱ δύο ἔννοιες λοιπὸν πού ἀναφέραμε εἶναι ἡ ὕλη καί ἡ ἐνέργεια. Καί οἱ δύο ὑπακούουν σὸ νόμο τῆς διατήρησης. Ἐνα μονωμένο σύστημα δέν μπορεῖ ν' ἀλλάξει οὔτε τὴ μᾶζα του οὔτε τὴν συνολικὴ του ἐνέργεια. Ἡ ὕλη ἔχει βᾶρος, ἐνῶ ἡ ἐνέργεια ἔχει κάτι ἰδιαίτερο. Ἐχουμε λοιπὸν σάν ἀποτέλεσμα δύο διαφορετικὲς ἔννοιες καί δύο νόμους διατήρησης. Πρέπει νά παίρνομε ἀκόμη στὰ σοβαρά αὐτὲς τῖς ιδέες; Ἡ μήπως αὐτὴ ἡ εἰκόνα πού στήν ἐμφάνισή τῆς ἦταν καλὰ θεμελιωμένη, ἀλλάξε σὸ φῶς τῆς σύγχρονης προόδου; Πράγματι αὐτὸ συνέβηκε. Οἱ μεταγενέστερες μεταβολές πού ἔγιναν στίς δύο αὐτὲς ἔννοιες, συνδεόονται μέ τὴ θεωρία τῆς σχετικότητας. Ἀλλά θά ἐπανέλθουμε ἀργότερα σ' αὐτὸ τὸ σημεῖο.

Πολύ συχνά τὰ ἀποτελέσματα τῆς ἐπιστημονικῆς ἔρευνας χρειάζονται μιὰ διαφοροποίηση στή φιλοσοφικὴ σύλληψη τῶν προβλημάτων πού ἀπλώνονται πέρα ἀπὸ τὸ περιορισμένο τμῆμα τῆς ἐπιστήμης. Ποιὸς εἶναι ὁ σκοπὸς τῆς ἐπιστήμης; Τί ζητᾶμε ἀπὸ μιὰ θεωρία πού προσπαθεῖ νά περιγράψει τὴ φύση; Αὐτὲς οἱ ἐρωτήσεις ἂν καί ξεπερνοῦν τὰ ὄρια τῆς φυσικῆς, εἶναι σφιχτά δεμένους μ' αὐτὴν ἀφοῦ ἡ ἐπιστήμη δημιουργεῖ τὸ ἔδαφος ἀπ' τὸ ὁποῖο γεννιοῦνται. Οἱ φιλοσοφικὲς γενικεύσεις πρέπει νά εἶναι βασισμένες στὰ ἐπιστημονικὰ ἀποτελέσματα. Ἄπαξ καί δημιουργηθοῦν καί γίνουν γενικά ἀποδεκτὲς, ἐπιδροῦν πολὺ συχνά στή μεταγενέστερη ἀνάπτυξη τῆς ἐπιστημονικῆς σκέψης ὑποδεικνύοντας, μεταξύ τῶν διαφορῶν δυνατῶν μεθόδων, αὐτὴ πού πρέπει νά ἀκολουθηθεῖ. Μιὰ καινοτομία πετυχημένη παρά τῖς ὑπάρχουσες ὑποθέσεις ἔχει σάν ἀποτέλεσμα ἀναπάντεχες καί τέλεια διαφορετικὲς ἀναπτύξεις, πού γίνονται πηγὴ καινούριων φιλοσοφικῶν ἀπόψεων. Αὐτὲς οἱ παρατηρήσεις εἶναι ὑποχρεωτικὰ ἀνούσιες καί ἀσαφεῖς ὅσο δέν τεκμηριώνονται μέ παραδείγματα βγαλμένα ἀπ' τὴν ἱστορία τῆς φυσικῆς.

Θά προσπαθήσουμε νά περιγράψουμε τῖς πρώτες φιλοσοφικὲς ιδέες γιὰ τὸ σκοπὸ τῆς ἐπιστήμης. Αὐτὲς οἱ ιδέες ἐπέδρασαν σημαντικὰ στήν ἀνάπτυξη τῆς φυσικῆς μέχρι πρὶν ἀπὸ ἕνα περίπου αἰῶνα, ὅταν καταρρίφθηκαν ἀπὸ καινούριες ἀποδείξεις, καινούρια γεγονότα καί καινούριες θεωρίες, πού μέ τὴ σειρά τους σχημάτισαν ἕνα καινούριο, ἐπιστημονικὸ ὑπόβαθρο.

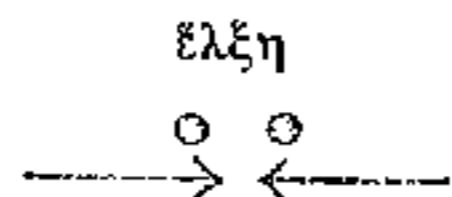
Σ' ὅλη τὴν ἱστορία τῆς ἐπιστήμης, ἀπὸ τὴν ἐλληνικὴ φιλοσοφία μέχρι τὴ σύγχρονη φυσικὴ, ἔκαναν σταθερὰ προσπάθειες γιὰ νά μειωθεῖ ἡ φαινομενικὴ πολυπλοκότητα τῶν φυσικῶν φαινομένων, σέ μερικὲς ιδέες καί σέ μερικὲς βασικὲς σχέσεις. Αὐτὴ ἡ ἀρχὴ βρίσκεται στή βάση κάθε φυσικῆς φιλοσοφίας, μέχρι πού ἀναφέρεται καί στὰ ἔργα τῶν ἀτομιστῶν.

Ἐδῶ καὶ εἴκοσι τρεῖς αἰῶνες περίπου ὁ Δημόκριτος ἔγραφε:

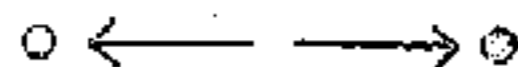
*Κατὰ συνθήκη τὸ γλυκὸ εἶναι γλυκόν, τὸ πικρὸ εἶναι πικρόν, τὸ θερμὸ εἶναι θερμόν, τὸ ψυχρὸ εἶναι ψυχρόν, τὸ χροῶμα εἶναι χροῶμα. Ἀλλὰ στήν πραγματικότητα δέν υπάρχουν παρά ἄτομα καὶ κενόν. Δηλαδή τὰ ἀντικείμενα τῶν αἰσθήσεων ἰσοτίθεται ὅτι εἶναι πραγματικά καὶ ἔχουμε τὴ συνήθεια νά τὰ βλέπουμε σάν τέτοια, ἀλλά δέν εἶναι. Στήν πραγματικότητα τὰ ἀληθινά εἶναι τὰ ἄτομα καὶ τὸ κενόν.*

Αὕτη ἡ ἰδέα δέν εἶναι παρά ἓνα ἐπινόημα τῆς φαντασίας, γιὰ τὴν ἀρχαία φιλοσοφία. Οἱ νόμοι τῆς φύσης πού συνδέουν τὴν ἀλληλουχία τῶν γεγονότων πού ἀκολουθήσαν ἦταν ἀγνωστοὶ στοὺς Ἕλληνας. Ἡ ἐπιστήμη πού θεμελίωσε μιά σχέση ἀνάμεσα στή θεωρία καὶ στήν ἐμπειρία ἀρχισε μέ τὸ ἔργο τοῦ Γαλιλαίου. Ἀκουλουθήσαμε τίς κατευθυντήριες ἀρχικὲς ἰδέες πού ὀδηγοῦν στοὺς νόμους τῆς κίνησης. Στίς ἐπιστημονικὲς ἔρευνες δύο αἰῶνων ἡ δύναμη καὶ ἡ ὕλη ἦταν οἱ ἔννοιες ἐκεῖνες μέ τίς ὁποῖες ἔγιναν ὅλες οἱ προσπάθειες γιὰ τὴν κατανόηση τῆς φύσης. Εἶναι ἀδύνατο νά φαντασθοῦμε τὴ μιά χωρὶς τὴν ἄλλη γιατί ἡ ὕλη φανερώνει τὴν ὑπαρξή της σά μιά πηγὴ ἐνέργειας μέ τὴ δράση της πάνω σέ μιά ἄλλη ὕλη.

Ἄς θεωρήσουμε τὸ πῶς ἀπλό παράδειγμα: δύο μόρια μεταξύ τῶν ὁποίων ἐξασκοῦνται δυνάμεις. Οἱ ἀπλούστερες δυνάμεις πού θά μπορούσαμε νά φαντασθοῦμε εἶναι ἡ ἔλξη καὶ ἡ ἀπωση.



ἀπωση



Καὶ στίς δύο περιπτώσεις τὰ διανύσματα δυνάμεων βρίσκονται σέ μιά γραμμὴ πού συνδέει μεταξύ τους τὰ δύο ὕλικά σημεῖα. Ἡ ἀνάγκη ἀπλότητας ὀδηγεῖ σέ εἰκόνα δύο μορίων πού ἀμοιβαῖα ἔλκονται ἢ ἀπωθοῦνται. Κάθε ἄλλη ὑπόθεση ἀναφορικά μέ τὴν διεύθυνση τῶν δρώντων δυνάμεων θά ἔδινε μιά πολὺ πῶς σύνθετη εἰκόνα. Μποροῦμε ὁμως νά κάνουμε μιά ἐξ ἴσου ἀπλή ὑπόθεση πού νά ἀναφέρεται στοῦ μήκος τοῦ διανύσματος τῆς δύναμης; Ἀκόμη κι' ἂν θελήσουμε νά ἀποφύγουμε πολὺ εἰδικὲς ὑποθέσεις μποροῦμε νά ποῦμε τὸ παρακάτω: Ἡ δύναμη πού ἐνεργεῖ μεταξύ δύο δοσμένων μορίων ἐξαρτᾶται μόνον ἀπὸ τὴν ἀπόσταση πού τὰ διαχωρίζει, ὅπως στήν περίπτωση τῆς δύναμης τῆς βαρύτητας. Αὐτὸ μοιάζει ἀρκετὰ ἀπλό. Θάταν δυνατόν νά φαντασθοῦμε δυνάμεις πολὺ πῶς σύνθετες πού θά μπορούσαν νά ἐξαρτῶνται ὄχι μόνον ἀπὸ τίς ἀποστάσεις ἀλλὰ καὶ ἀπὸ τίς ταχύτητες τῶν δύο μορίων. Μέ τὴ δύναμη καὶ τὴν ὕλη σά βασικὲς ἔννοιες μέ δυσκολία μποροῦμε νά κάνουμε ὑποθέσεις πῶς ἀπλὲς ἀπ' τὴν παρακάτω: οἱ δυνάμεις ἐνεργοῦν κατὰ μήκος μιᾶς γραμμῆς πού συνδέει τὰ δύο μόρια καὶ ἐξαρτῶνται μόνον ἀπ' τὴν ἀπόστασή τους. Ἀλλὰ εἶναι δυνατόν νά περιγράψουμε ὅλα τὰ φυσικὰ φαινόμενα μέ αὐτοῦ τοῦ εἴδους τίς δυνάμεις;

Οἱ μεγάλες κατακτήσεις τῆς φυσικῆς σ' ὅλους τοὺς κλάδους της, ἡ λαμπερὴ ἐπιτυχία της στήν ἀνάπτυξη τῆς μηχανικῆς, ἡ ἐφαρμογὴ τῶν ιδεῶν της σέ προβλήματα ὀλοκληρωτικὰ διαφορετικὰ καὶ πού δέν εἶχαν μηχανικὸ χαρακτήρα, ὅλα αὐτὰ τὰ πράγματα συντέλεσαν νά γεννηθεῖ ἡ ἐντύπωση ὅτι εἶναι δυνατόν νά περιγραφοῦν ὅλα τὰ φαινόμενα τῆς φύσης μέ τὴ βοήθεια ἀπλῶν δυνάμεων πού ἐξασκοῦνται πάνω σέ ἀμετάβλητα ἀντικείμενα. Στούς δύο αἰῶνες πού ἀκολουθήσαν τὴν ἐποχὴ τοῦ Γαλιλαίου, αὕτη ἡ τάση, ἐνσυνείδητη ἢ ἀσυνείδητη, ἐκδηλώθηκε σ' ὅλη τὴν ἐπιστημονικὴ παραγωγή. Αὕτη ἡ τάση τυποποιήθηκε ἀπὸ τὸν Helmholtz περί τὰ μέσα XIX αἰῶνα:

Ἀνακαλύπτουμε τελικὰ ὅτι τὸ πρόβλημα τῆς φυσικῆς ἐπιστήμης συνίσταται στοῦ νά ἀχθῶν τὰ φυσικὰ φαινόμενα σέ ἀμετάβλητες δυνάμεις ἔλξης καὶ ἀπόωσης τῶν ὁποίων ἡ ἐνταση ἐξαρτᾶται ἀποκλειστικά ἀπ' τὴν ἀπόστασή τους. Ἡ λύση αὐτοῦ τοῦ προβλή-

ματος είναι ή συνθήκη μιᾶς πλήρους σοφίας τῆς φύσης.

Ἔτσι σύμφωνα μέ τόν Helmholtz ή αναπτυξιακή γραμμή τῆς ἐπιστήμης καθορίζεται καί ἀκολουθεῖ μιᾶ σταθερῆ ροή:

*Ἡ ἀποστολή της θά ολοκληρωθεῖ τή στιγμή πού ή ἀπλοποίηση τῶν φυσικῶν φαινομένων σέ ἀπλές δυνάμεις θά ολοκληρωθεῖ καί ή ἀπόδειξη φανερώνει ὅτι αὐτή ή ἀπλοποίηση εἶναι ή μόνη κατάλληλη γιάτά φαινόμενα.*

Αὐτή ή ἐννοια φαίνεται ἀνίκανη καί ἀπλοϊκή στόν φυσικό τοῦ ΧΧ αἰῶνα. Θά ξαφνιαζόταν μέ τή σκέψη ὅτι ή μεγάλη περιπέτεια τῆς ἔρευνας κατάφερε νά τελειώσει τόσο γρήγορα κι' ὅτι στάθηκε δυνατό νά θεμελιωθεῖ μέ μελλοντικές προεκτάσεις μιᾶ εἰκόνα τοῦ σύμπαντος, πού ἀκόμα κι' ὅταν θά ήταν ὀριστική, δέν θάχε κανένα ἐνδιαφέρον.

Ἄν καί αὐτές οἱ δοξασίες θάθελαν νά ἀπλοποιήσουν τήν περιγραφή ὄλων τῶν φαινομένων μέ ἀπλές φόρμες, ἀφήνουν ἐλεύθερη μιᾶ ἐρώτηση τοῦ πῶς ἐξαρτῶνται αὐτές οἱ δυνάμεις ἀπ' τήν ἀπόσταση. Εἶναι δυνατό αὐτή ή ἐξάρτηση νά εἶναι διαφορετική γιά τά διαφορετικά φαινόμενα. Ἡ ἀνάγκη εἰσαγωγῆς διαφορετικῶν εἰδῶν δυνάμεων γιά διαφορετικά φαινόμενα δέν εἶναι ὅπωςδήποτε ἱκανοποιητική ἀπό φιλοσοφική ἄποψη. Παρόλα αὐτά ή *μηχανική ἀντίληψη* πού τυποποιήθηκε μέ τόν πιό καθάριο τρόπο ἀπ' τόν Helmholtz, ἔπαιξε σημαντικό ρόλο στήν ἐποχή του. Ἡ ἀνάπτυξη τῆς κινητικῆς θεωρίας τῆς ὕλης εἶναι ἀπ' τίς πιό μεγάλες κατακτήσεις πού δέχθηκαν τήν ἀπ' εὐθείας ἐπίδραση τῆς μηχανικῆς ἀντίληψης.

Πρίν παραδεχθοῦμε τήν παρακμή της, ἄς δεχθοῦμε προκαταβολικά τήν ἄποψη τῶν φυσικῶν τοῦ περασμένου αἰῶνα καί ἄς δοῦμε τί συμπεράσματα μποροῦμε νά ἀντλήσουμε ἀπό τή δική τους εἰκόνα τοῦ ἐξωτερικοῦ κόσμου.

## Ἡ ΚΙΝΗΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ὙΛΗΣ

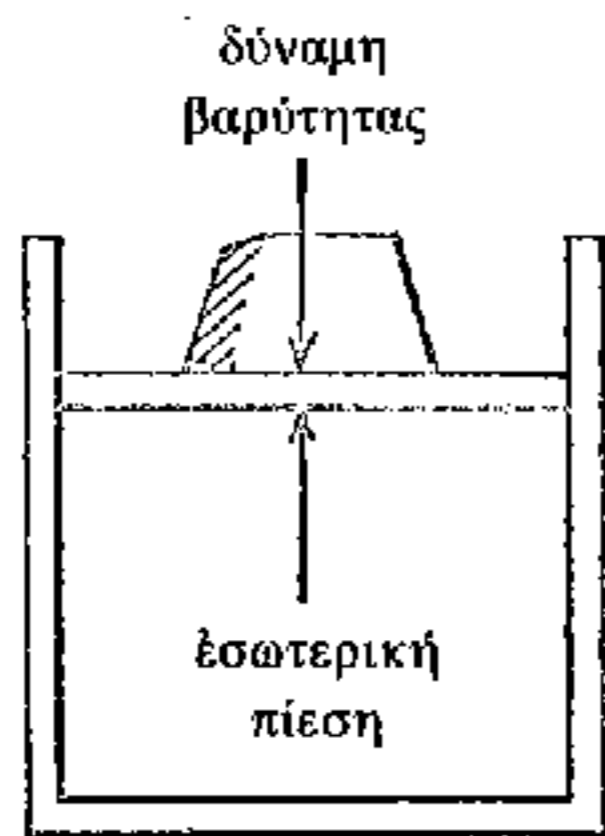
Εἶναι ἄραγε δυνατό νά ἐξηγήσουμε τά φαινόμενα τῆς θερμότητας μέ τήν κίνηση τῶν μορίων πού τό ἕνα ἐπιδρᾶ πάνω

στό ἄλλο μέ τή βοήθεια, τῶν ἀπλῶν δυνάμεων; Ἐνα κλειστό δοχεῖο περιέχει μιᾶ συγκεκριμένη μάζα ἐνός ἀερίου, ἀέρα γιά παράδειγμα, σέ μιᾶ συγκεκριμένη θερμοκρασία. Θερμαίνοντας αὐξάνουμε τήν θερμοκρασία καί τήν ἐνέργεια. Ἀλλά μέ πιό τρόπο εἶναι συνδεδεμένη αὐτή ή ἐνέργεια μέ τήν κίνηση; Ἡ δυνατότητα μιᾶς τέτοιας σχέσης ὑποβάλλεται τόσο καλά ἀπ' τήν δικιά μας φιλοσοφική ἄποψη, πού ἔγινε πιό πάνω ἀποδεκτή, ὅσο καί ἀπό τόν τρόπο μέ τόν ὁποῖο, ή θερμότητα παράγεται ἀπ' τήν κίνηση. Ἡ θερμότητα πρέπει νά εἶναι μηχανική ἐνέργεια, ἀφοῦ κάθε πρόβλημα εἶναι μηχανικό πρόβλημα. Τό ἀντικείμενο τῆς *κινητικῆς θεωρίας* εἶναι νά παρουσιάσει τήν ἐννοια τῆς ὕλης μ' αὐτόν ἀκριβῶς τόν τρόπο. Ἐνα ἀέριο σύμφωνα μ' αὐτή τή θεωρία εἶναι ἕνας τεράστιος ἀριθμός σωματιδίων ή μορίων, πού κινοῦνται πρὸς ὅλες τίς κατευθύνσεις, συγκρούονται τό ἕνα μέ τό ἄλλο, καί ἀλλάζουν διεύθυνση μετά κάθε σύγκρουση. Πρέπει νά ὑπάρχει μιᾶ μέση ταχύτητα αὐτῶν τῶν μορίων, ὅπως ἀκριβῶς σέ μιᾶ μεγάλη κοινότητα ὑπάρχει μέση ἡλικία ή μέση οἰκονομική κατάσταση. Θά ὑπάρχει ἀντίστοιχα μιᾶ μέση κινητική ἐνέργεια, ἀνά μόριο. Περισσότερη θερμότητα μέσα στό δοχεῖο σημαίνει μεγαλύτερη μέση κινητική ἐνέργεια. Ἡ θερμότητα, σύμφωνα μ' αὐτή τήν εἰκόνα, δέν εἶναι μιᾶ εἰδική μορφή ἐνέργειας, διαφορετική ἀπ' τήν μηχανική ἐνέργεια· εἶναι ἀκριβῶς ή κινητική ἐνέργεια τῆς μοριακῆς κίνησης. Σέ μιᾶ καθορισμένη θερμοκρασία ἀντιστοιχεῖ, ἀνά μόριο, μιᾶ καθορισμένη μέση κινητική ἐνέργεια. Αὐτό δέν εἶναι μιᾶ αὐθαίρετη ὑπόθεση. Εἴμαστε ὑποχρεωμένοι νά δοῦμε τήν κινητική ἐνέργεια ἐνός μορίου σά μέτρο τῆς θερμοκρασίας ἐνός ἀερίου, ἂν θέλουμε νά φτιάξουμε μιᾶ αὐθεντική μηχανική εἰκόνα τῆς ὕλης.

Αὐτή ή θεωρία εἶναι κάτι παραπάνω ἀπό ἕνα παιγνίδι τῆς φαντασίας. Μποροῦμε ν' ἀποδείξουμε ὅτι ή κινητική θεωρία τῶν ἀερίων δέν εἶναι μόνο σύμφωνη μέ τήν ἐμπειρία, ἀλλά πραγματικά ὁδηγεῖ σέ μιᾶ τόσο βαθειά κατανόηση τῶν γεγονότων. Αὐτό μπορεῖ νά παρουσιασθεῖ μέ μερικά παραδείγματα.

Ἔχουμε ἕνα δοχεῖο πού κλείεται μ' ἕνα ἔμβολο πού μπορεῖ

νά κινείται ελεύθερα. Τό δοχείο περιέχει μιά όρισμένη ποσότητα αερίου πού πρέπει νά έχει μιά σταθερή θερμοκρασία. Αν αρχικά τό έμβολο είναι ακίνητο σέ κάποια θέση, θά κινηθεί πρós τά πάνω αν ελαττώσουμε τό βάρος του και πρós τό κάτω αν τό αύξήσουμε. Για νά σπρώξουμε τό έμβολο πρós τά κάτω πρέπει νά εφαρμόσουμε μιά δύναμη πού δρᾷ ενάντια στήν έσωτερική πίεση του αερίου. Ποιάς είναι, σύμφωνα μέ τήν κινητική θεωρία, ό μηχανισμός αύτῆς τῆς έσωτερικῆς πίεσης; Ένας τεράστιος αριθμός μορίων πού αποτελεί τό αέριο κινείται πρós όλες τίς κατευθύνσεις. Βομβαρδίζουν τά τοιχώματα και τό έμβολο και αναπηδοῦν ὅπως μιά μπάλα πού πετᾷ πάνω στον τοίχο. Ο συνεχής βομβαρδισμός από ένα μεγάλο αριθμό μορίων κρατᾷ τό έμβολο σ' ένα όρισμένο ὕψος, αντισταθμίζοντας τή δύναμη τῆς βαρύτητας, πού ενεργεῖ πρós τά κάτω πάνω στα βάρη και τό έμβολο. Πρós τή μιά κατεύθυνση δρᾷ σταθερά, ή δύναμη τῆς βαρύτητας, πρós τήν αντίθετη ένας μεγάλος αριθμός ακανόνιστων κτυπημάτων πού προέρχεται από τά μόρια. Για νά υπάρχει ισορροπία πρέπει τό καθαρό αποτέλεσμα πάνω στό έμβολο ὄλων αύτῶν τῶν ακανόνιστων μικρῶν δυνάμεων νά είναι ἴσο μέ τό αποτέλεσμα τῆς δυνάμεως τῆς βαρύτητας.



Ας υποθέσουμε ότι τό έμβολο σπρώχνεται πρós τά κάτω σέ τρόπο ὥστε νά συμπιεσθεῖ τό αέριο κατά ένα τμήμα του ὄγκου του, ἄς πούμε κατά τό μισό, ενώ ή θερμοκρασία του παραμένει σταθερή. Τί θά συμβεῖ σύμφωνα μέ τήν κινητική θεωρία; Η δύναμη πού οφείλεται στον βομβαρδισμό θά είναι τώρα μεγαλύτερη ή μικρότερη από πρὶν; Τά μόρια τώρα είναι πῶς πιεσμένα. Αν και ή μέση κινητική ενέργεια είναι πάντα ή ἴδια τά κτυπήματα τῶν μορίων πάνω στό έμβολο θά είναι τώρα πῶς συχνά, κι' ἔτσι ή συνολική δύναμη πῶς μεγάλη. Απ' αύτή τήν εικόνα πού παρουσιάζει ή κινητική θεωρία προκύπτει καθαρά ὅτι, για νά διατηρήσουμε τό έμβολο σ' αύτή τή χαμηλότερη θέση, πρέπει νά χρησιμοποιήσουμε μεγαλύτερο βάρος. Αυτό τό ἀπλό πειραματικό δεδομένο είναι πασίγνωστο, ἀλλά ή πρόβλεψη του λογικά ἀκολουθεῖ τήν κινητική αντίληψη τῆς ὕλης.

Ας θεωρήσουμε μιά ἄλλη πειραματική διάταξη. Παίρνουμε δύο δοχεῖα μέ ἴσους ὄγκους διαφορετικῶν αερίων σέ ἴδιες θερμοκρασίες και για παράδειγμα ἄς πάρουμε ἄζωτο και ὕδραγόνο. Ας υποθέσουμε ὅτι τά δύο δοχεῖα είναι κλειστά μέ δύο ἴδια έμβολα πού φέρουν τό ἴδιο βάρος. Αὐτά σέ γενικές γραμμές σημαίνει ὅτι τά αέρια έχουν τόν ἴδιο ὄγκο, βρίσκονται στήν ἴδια θερμοκρασία και στήν ἴδια πίεση. Αφοῦ ή θερμοκρασία είναι ή ἴδια ή μέση κινητική ενέργεια ανά μόριο σύμφωνα μέ τή θεωρία είναι ή ἴδια. Και αφοῦ ή πίεση είναι ή ἴδια τά έμβολα βομβαρδίζονται μέ τήν ἴδια συνολική δύναμη. Κατά μέσο ὄρο κάθε μόριο φέρει τήν ἴδια ενέργεια και τά δύο δοχεῖα έχουν τόν ἴδιο ὄγκο. Συνεπῶς ὁ αριθμός τῶν μορίων σέ κάθε δοχείο πρέπει νά είναι ὁ ἴδιος, ἄσχετα αν τά αέρια είναι χημικά διαφορετικά. Αυτό τό πολύ σημαντικό αποτέλεσμα επιτρέπει νά καταλάβουμε πολλά χημικά φαινόμενα. Σημαίνει ὅτι ὁ αριθμός τῶν μορίων μέσα σ' ένα δοσμένο ὄγκο σέ μιά καθορισμένη πίεση και θερμοκρασία, δέν είναι ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ενός αερίου, ἀλλά ὄλων τῶν αερίων. Είναι πολύ περιεργο τό γεγονός ὅτι ή κινητική θεωρία ὄχι μόνο προβλέπει τήν ὕπαρξη ενός τέτοιου γενικοῦ αριθμοῦ, ἀλλά είναι σέ θέση νά τόν προσδιορίσει. Θά επανέλθουμε ξανά σ' αυτό τό σημείο.

Ἡ κινητική θεωρία τῆς ὕλης ἐξηγεῖ τόσο ποσοτικά ὅσο καὶ ποιοτικά τοὺς νόμους τῶν ἀερίων πού καθορίσθηκαν πειραματικά. Ἐξ ἄλλου ἡ θεωρία δέν περιορίζεται μόνο στὰ ἀέρια, ἀν καὶ σ' αὐτὴ τὴν περιοχὴ εἶχε τίς μεγαλύτερες τῆς ἐπιτυχίες.

Ἐνα ἀέριο μπορεῖ νὰ ὑγροποιηθεῖ, ἀν μειωθεῖ ἡ θερμοκρασία του. Ἡ πτώση τῆς θερμοκρασίας πού ὑφίσταται μιά ὕλη σημαίνει ὅτι τὰ μόριά της ὑφίστανται μιά μείωση τῆς μέσης κινητικῆς τους ἐνέργειας. Εἶναι φανερό λοιπόν ὅτι ἡ μέση κινητικὴ ἐνέργεια ἐνός μορίου σέ ὑγρὴ φάση εἶναι μικρότερη ἀπὸ αὐτὴν τοῦ ἴδιου μορίου στὴν ἀέρια φάση.

Ἡ κίνηση τῶν μορίων μέσα σέ ὑγρὸ ἐγινε γνωστὴ γιὰ πρώτη φορά μέ τὴν κίνηση Μπράουν, εἶναι ἀξιοσημείωτο φαινόμενο πού θάμνε μυστηριώδες χωρὶς τὴν ὑπαρξὴ τῆς κινητικῆς θεωρίας τῆς ὕλης. Παρατηρήθηκε ἀπὸ τὸν βοτανολόγο Brown καὶ ἐξηγήθηκε μετὰ χρόνια στὶς ἀρχές τοῦ αἰῶνα μας. Τὸ μόνο ἀπαραίτητο ἐργαλεῖο γιὰ τὴν παρατήρηση αὐτῆς τῆς κίνησης εἶναι τὸ μικροσκόπιο, πού δέν χρειάζεται κιόλας νάναί ἰδιαίτερα ἰσχυρό.

Ὁ Brown δούλεψε μέ τὴ γύρη ὀρισμένων φυτῶν δηλαδή μέ σωματίδια καὶ κόκκους ἀσήμαντου μεγέθους, πού τὸ μήκος τους κυμαίνονταν ἀπὸ ἓνα τέταρτο ὠς ἓνα πέμπτο τοῦ χιλιοστοῦ τῆς ἴντσας.

Λέει ἐξ ἄλλου:

*Ὅσο ἐξέταζα τὸ σχῆμα αὐτῶν τῶν βυθισμένων στό νερό σωματιδίων, παρατήρησα ὅτι πολλά ἀπ' αὐτὰ βρίσκονται σέ φανερὴ κίνηση. Αὐτὲς οἱ κινήσεις ἦταν τέτοιες πού μετὰ ἀπὸ ἐπανελημμένες παρατηρήσεις βεβαιώθηκα ὅτι δέν προέρχονταν ἀπὸ ρεύματα τοῦ ὑγροῦ, οὔτε ἀπὸ τὴ βαθμιαία του ἐξάτμιση, ἀλλὰ ἀνήκαν στό σωματίδιο.*

Αὐτὸ πού παρατηροῦσε ὁ Brown ἦταν ἡ ἀκυτάπαυστη κίνηση τῶν σέ αἰώρηση μέσα στό νερό κόκκων, πού ἦταν ὀρατοὶ στό μικροσκόπιο. Εἶναι ἓνα ἐντυπωσιακὸ θέαμα.

Γιὰ νὰ παρατηρήσουμε αὐτὸ τὸ φαινόμενο μήπως εἶναι οὐσιαστικὸ νὰ διαλέξουμε εἰδικὰ φυτὰ; Ὁ Brown ἀπάντησε σ'

αὐτὴ τὴν ἐρώτηση ἐπαναλαμβάνοντας τὸ πείραμα μέ διαφορετικὰ φυτὰ. Βρῆκε ὅτι ὅλα τὰ σωματίδια ἀν ἦταν ἀρκετὰ μικρά, ἐκδήλωναν μιά τέτοια κίνηση ὅταν βρίσκονταν σέ αἰώρηση μέσα σέ νερό. Τὴν ἴδια κίνηση τὴν παρατήρησε εἴτε τὰ σωματίδια ἦταν ὀργανικά εἴτε ἀνόργανα. Ἐπίσης παρατήρησε τὸ ἴδιο φαινόμενο καὶ ἀπὸ κονιοποιημένα κομμάτια σφίγγης.

Πῶς ὅμως πρέπει νὰ ἐξηγήσουμε αὐτὴ τὴν κίνηση; Ἡ παρατήρηση τῆς θέσης ἐνός τέτοιου σέ αἰώρηση σωματιδίου ἐπὶ τριάντα δευτερόλεπτα γιὰ παράδειγμα φανερῶνει μιά διαδρομὴ φανταστικοῦ σχήματος. Ἡ ἀνατρεψιμότητα εἶναι ὁ χαρακτήρας τῆς κατὰ τὰ φαινόμενα ἀτέλειωτης αὐτῆς κίνησης. Ἐνα ἐκκρεμὲς πού αἰωρεῖται ἅμα βυθισθεῖ σέ νερό σέ λίγο θά σταματήσει, ἀν δέν τοῦ προσδοθεῖ κίνηση ἀπὸ ἐξωτερικὴ δύναμη. Ἡ ὑπαρξὴ μιᾶς κίνησης πού δέν σταματᾷ ποτέ φαίνεται ἀντίθετη σέ κάθε ἐμπειρία. Αὐτὴ ἡ δυσκολία ὅμως ξεπεράσθηκε μ' ἐντυπωσιακὸ τρόπο μέ τὴν κινητικὴ θεωρία τῆς ὕλης. Ὅταν κοιτάζουμε τὸ νερό μ' ἓνα ἀπὸ τὰ πιὸ ἰσχυρὰ μικροσκόπια δέν βλέπουμε μόρια σέ κίνηση, σάν αὐτὴ πού περιγράφει ἡ κινητικὴ θεωρία τῆς ὕλης. Πρέπει νὰ συμπεράνουμε ὅτι, ἐφ' ὅσον ἡ θεωρία πού παραδέχεται ὅτι τὸ νερό ἀποτελεῖται ἀπὸ ἓνα πλῆθος μορίων εἶναι σωστὴ, αὐτὰ τὰ μόρια εἶναι μικρότερα ἀπὸ τὴ διακριτικὴ ἱκανότητα τῶν μικροσκοπίων. Ἄς μείνουμε ὅμως πιστοὶ στὴ θεωρία κι' ἄς δεχθοῦμε ὅτι παριστάνει μιά εἰκόνα πού ἀνταποκρίνεται στὴν πραγματικότητι. Τὰ ὀρατὰ στό μικροσκόπιο σωματίδια τοῦ Brown βομβαρδίζονται ἀπὸ μικρότερα σωματίδια πού ἀποτελοῦν τὸ νερό. Ἡ κίνηση Brown ὑφίσταται ἐφ' ὅσον τὰ βομβαρδιζόμενα σωματίδια εἶναι ἀρκετὰ μικρά. Ὑφίσταται γιὰ αὐτὸς ὁ βομβαρδισμὸς δέν γίνεται μέ τρόπο ὁμαλὸ ἀπὸ ὅλες τίς πλευρὲς καὶ δέν εἶναι δυνατό, ἐξ αἰτίας τοῦ ἀκανόνιστου καὶ τυχαίου χαρακτήρα νὰ καθορισθεῖ μιά μέση τιμὴ. Ἡ παρατηρούμενη λοιπόν κίνηση εἶναι τὸ ἀποτέλεσμα μιᾶς ἄλλης ἀόρατης κίνησης. Ἡ συμπεριφορὰ τῶν μεγάλων σωματιδίων ἀντανακλᾷ μέχρις ἓνα ὀρισμένο σημεῖο τὴν κίνηση τῶν μορίων καὶ θά μπορούσαμε νὰ ποῦμε ὅτι ἀποτελεῖ μιά τόσο ἱκανοποιη-

τική μεγέθυνση ώστε να καθίσταται όρατη στο μικροσκόπιο. Ο ακανόνιστος και τυχαίος χαρακτήρας της διαδρομής που διανύουν τα σωματίδια Brown αντανακλά μία ανάλογη μη κανονικότητα των διαδρομών που διανύουν τα πιο μικρά σωματίδια (μόρια) που αποτελούν την ύλη. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι μία ποσοτική μελέτη της κίνησης Brown θα μας επιτρέψει να εισχωρήσουμε βαθύτερα στην κινητική θεωρία της ύλης. Είναι προφανές ότι η όρατη κίνηση Brown εξαρτάται από το μέγεθος των μορίων που βομβαρδίζουν. Δεν θα υπήρχε κίνηση Brown αν τα βομβαρδίζοντα μόρια δεν κατείχαν μία όρισμένη ποσότητα ενέργειας ή μ' άλλους όρους αν δεν είχαν μάζα και ταχύτητα. Συνεπώς δεν θάταν παράλογο ή μελέτη της κίνησης Brown να μπορούσε να μας οδηγήσει στον προσδιορισμό της μάζας ενός μορίου.

Από εργαστηριακές θεωρητικές και πειραματικές έρευνες καθορίστηκαν τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της κινητικής θεωρίας. Ο δρόμος που άνοιξε τό φαινόμενο της κίνησης Brown ήταν ένα απ' αυτά που οδήγησαν σε ποσοτικά δεδομένα. Τα ίδια δεδομένα μπορούν να προκύψουν και με διαφορετικούς τρόπους, ξεκινώντας από τελείως διαφορετικούς δρόμους. Τό γεγονός ότι όλες αυτές οι μέθοδοι πιστοποιούν αυτή την έννοια είναι πάρα πολύ σημαντικό, γιατί αποδεικνύει την έσωτερική άντοχή της κινητικής θεωρίας της ύλης.

Θελούμε εδώ να αναφέρουμε ένα από τα πολυπληθή αποτελέσματα που προέκυψε και από την έμπειρία και από την θεωρία. Ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα γραμμάριο υδρογόνου, το πιο έλαφρο απ' όλα τα στοιχεία, και διερωτόμεθα από πόσα μόρια αποτελείται. Η απάντηση θα χαρακτηρίζει όχι μόνο τό υδρογόνο, αλλά όλα τα άλλα αέρια, μία και ξέρουμε ήδη σε ποιές συνθήκες δύο αέρια έχουν τόν ίδιο αριθμό μορίων.

Η θεωρία μας επιτρέπει να απαντήσουμε σ' αυτή την ερώτηση χρησιμοποιώντας μερικές μετρήσεις της κίνησης Brown ενός σωματιδίου σε αιώρηση. Τό αποτέλεσμα είναι ένας

πελώριος αριθμός: 3 που ακολουθείται από 23 άλλα ψηφία! Ο αριθμός των μορίων ενός γραμμαρίου είναι  
303.000.000.000.000.000.000.

Ας φαντασθούμε ότι τα μόρια ενός γραμμαρίου υδρογόνου μεγεθύνονται σε σημείο που να γίνονται όρατά σε μικροσκόπιο δηλαδή για παράδειγμα ή διάμετρός τους φθάνει τά πέντε χιλιοστά της ίντσας, πράγμα που είναι ή συνηθισμένη περίπτωση της κίνησης Brown. Για να γίνουν ένα σφιχτοδεμένο πακέτο, θα χρειαζόμασταν ένα κουτί τοῦ οποίου κάθε πλευρά έπρεπε να είναι περίπου τετρακόσια μέτρα.

Μπορούμε εύκολα να υπολογίσουμε τή μάζα ενός μορίου υδρογόνου διαιρώντας τόν αριθμό 1 με τόν πιο πάνω αριθμό. Ο αριθμός που παίρνεται μ' αυτό τό τρόπο και που είναι ενός αφάνταστα μικρού μεγέθους είναι:

0,000,000,000,000,000,000,000,0033

Νά λοιπόν τί παριστάνει ή μάζα ενός μορίου υδρογόνου.

Τά πειράματα πάνω στην κίνηση Brown είναι ένα μόνο μέρος των πολυαρίθμων ανεξαρτήτων πειραμάτων που οδηγούν στον καθορισμό αυτού τοῦ αριθμοῦ που παίζει ένα τόσο σημαντικό ρόλο στη φυσική.

Στήν κινητική θεωρία της ύλης και σ' όλα της τά σημαντικά έπιτεύγματα παρατηρούμε τήν πραγμάτωση τοῦ γενικοῦ φιλοσοφικοῦ προβλήματος: άναγωγή της εξήγησης όλων των φαινομένων με τήν άλληλεπίδραση των μορίων της ύλης.

Περίληπτικά:

Στή μηχανική ή μέλλουσα έφαπτομένη ενός κινουμένου σώματος μπορεί να προβλεφθεῖ, καθώς επίσης μπορεί να καθορισθεῖ και ή έφαπτομένη σε προηγούμενη θέση, αν φυσικά είναι γνωστές οι παρούσες συνθήκες και οι δυνάμεις που επενεργούν πάνω σ' αυτό τό σώμα. Έτσι λοιπόν για παράδειγμα μπορούν να προβλεφθούν οι μέλλουσες έφαπτόμενες όλων των πλανητών. Οι δυνάμεις που επιδρούν είναι οι δυνάμεις της βαρύτητας κατά Newton που

έξαρτώνται αποκλειστικά από την απόσταση. Τα μεγάλα αποτελέσματα της κλασσικής μηχανικής υπενθυμίζουν ότι η μηχανική αντίληψη μπορεί να εφαρμοστεί με τον ίδιο τρόπο σ' άλλους τους κλάδους της φυσικής, στους οποίους όλα τα φαινόμενα μπορούν να εξηγηθούν με την εφαρμογή των δυνάμεων έλξης και άπωσης, που εξαρτώνται αποκλειστικά από την απόσταση και που εξασκοούνται μεταξύ άμεταβλήτων μορίων.

Στήν κινητική θεωρία της ύλης βλέπουμε πώς αυτή η αντίληψη, που γεννήθηκε από προβλήματα της μηχανικής, άγκαλιάζει τα φαινόμενα της θερμότητας και οδηγεί σε μιά γόνιμη εικόνα της δομής της ύλης.

## 2. Η ΠΑΡΑΚΜΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΑΛΗΨΗΣ

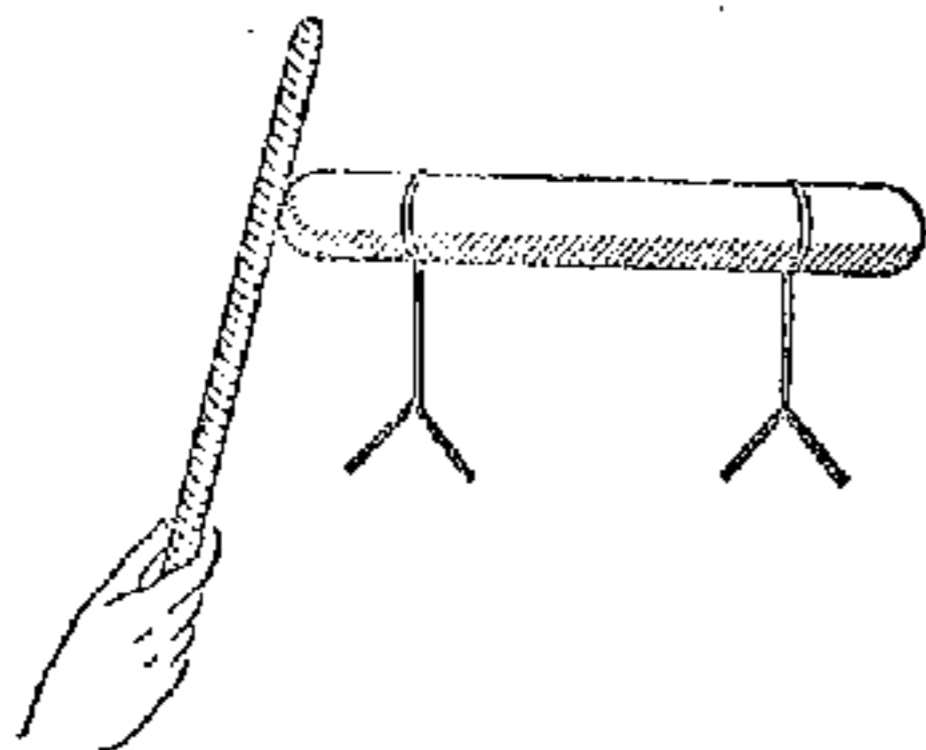
### ΤΑ ΔΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΡΕΥΣΤΑ

Οι παρακάτω σελίδες περιέχουν μία όχι και πολύ ένδιαφέρουσα περιγραφή μερικῶν ἀπλῶν πειραμάτων. Θάναί ἐνοχλητικό ὄχι μόνο γιατί ἡ περιγραφή τῶν πειραμάτων εἶναι ἀνιαρή σέ σχέση μέ τήν πραγματική τους ἐφαρμογή, ἀλλά καί γιατί ἡ σημασία τους δέν προκύπτει παρά μόνο ἀπό τή θεωρία. Ὁ σκοπός μας εἶναι νά δώσουμε ἕνα χτυπητό παράδειγμα τοῦ ρόλου πού παίζει ἡ θεωρία στή φυσική.

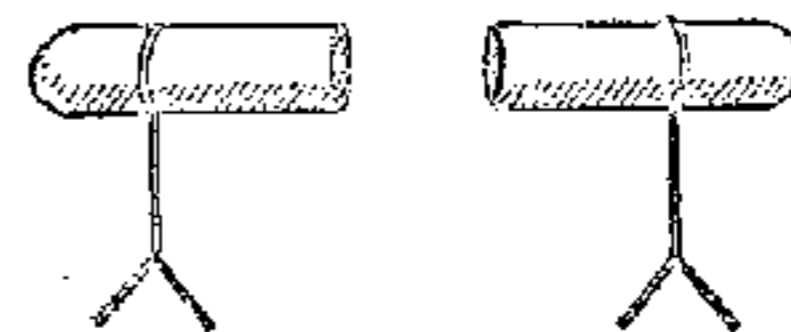
1. Κάθε ἄκρη μιᾶς μεταλλικῆς ράβδου, στερεωμένης πάνω σέ γυάλινο ὑποστήριγμα, εἶναι ἐνωμένη μ' ἕνα μεταλλικό σύρμα σ' ἕνα ἠλεκτροσκόπιο. Τί εἶναι ὅμως ἕνα ἠλεκτροσκόπιο; Εἶναι ἕνα ἀπλό ὄργανο πού ἀποτελεῖται μόνο ἀπό δύο χρυσά φύλλα πού κρέμονται πάνω σ' ἕνα μικρό μεταλλικό κομμάτι.

Εἶναι κλεισμένο σ' ἕνα γυάλινο δοχεῖο καί τό μέταλλο εἶναι σ' ἐπαφή μόνο μέ μή μεταλλικά σώματα. Ἐκτός ἀπ' τό ἠλεκτροσκόπιο καί τή μεταλλική ράβδο, ἔχουμε ἕνα σκληρό λαστιχένιο ραβδάκι καί ἕνα κομμάτι φανέλλα.

Τό πείραμα γίνεται μέ τόν ακόλουθο τρόπο: Κυττάζουμε πρώτα άν τά δύο φύλλα τοῦ χρυσοῦ εἶναι ἀπομακρυσμένα τό ένα ἀπό τό ἄλλο γιατί αὐτή εἶναι ἡ κανονική τους θέση.\* Αν κατά τύχη δέν συμβαίνει ἔτσι ἀρκεῖ νά ἀκουμπήσουμε μέ τό δάκτυλο μας τή μεταλλική ράβδο ὁπότε ξανάρχονται στήν κατακόρυφή τους θέση.\* Αφοῦ γίνουν αὐτές οἱ προκαταρκτικές κινήσεις, τρίβουμε πολύ καλά τήν ἐλαστική ράβδο μέ τή φανέλλα καί τήν ἀκουμπάμε στή μεταλλική ράβδο. Τά φύλλα τοῦ χρυσοῦ ἀπομακρύνονται ἀμέσως καί μένουν ἔτσι ἀκόμα κι όταν ἀπομακρύνουμε τήν ἐλαστική ράβδο.



2. Κάνουμε ένα ἄλλο πείραμα χρησιμοποιώντας τήν ἴδια συσκευή, καί μέ τά φύλλα τοῦ χρυσοῦ νάβαι στήν κατακόρυφη θέση. Αὐτή τή φορά δέν ἀκουμπάμε κατ' εὐθείαν τήν ἐλαστική ράβδο μέ τήν μεταλλική ἀλλά μόνο τήν πλησιάζουμε. Ξανά τά φύλλα ἀπομακρύνονται, ἀλλά τώρα ἵπάρχει μιᾶ διαφορά. Μόλις ἀπομακρύνουμε τήν ἐλαστική ράβδο χωρίς αὐτή νάχει ἔρθει σ' ἐπαφή μέ τήν μεταλλική, ἀντί νά μένουν ἀπομακρυσμένα τά φύλλα ἔρχονται ἀμέσως στήν κανονική κατακόρυφη τους θέση.



3. Μετατρέπουμε ἐλαφρά τή συσκευή γιά νά κάνουμε ένα τρίτο πείραμα.\* Ὑποθέτουμε ὅτι ἡ μεταλλική ράβδος ἀποτελεῖται ἀπό δύο κολλημένα κομμάτια. Τρίβουμε τήν ἐλαστική ράβδο μέ τή φανέλλα καί τήν πλησιάζουμε στήν μεταλλική ράβδο. Παρατηρεῖται τό ἴδιο φαινόμενο, τά φύλλα ἀπομακρύνονται.\* Ἀλλά άν χωρίσουμε τήν μεταλλική ράβδο στά δύο της κομμάτια καί στή συνέχεια ἀπομακρύνουμε τήν ἐλαστική ράβδο, διαπιστώνουμε στήν περίπτωση αὐτή, ὅτι τά φύλλα παραμένουν ἀπομακρυσμένα ἀντί νά ἐπανέλθουν στήν κανονική τους θέση, ὅπως συνέβει στό δεύτερο πιά πάνω πείραμα.

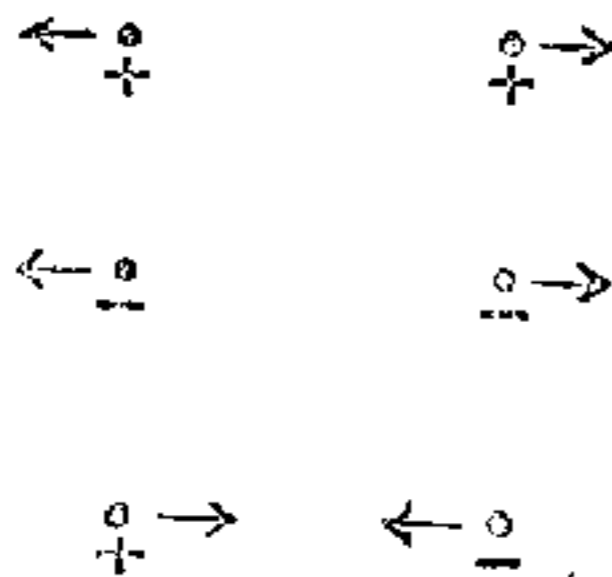
Εἶναι δύσκολο νά ἐνδιαφερθεῖ κανείς μέ πάθος μ' αὐτά τά ἀπλά καί ἀπλοϊκά πειράματα.\* Ἐκεῖνος πού τό ἔκανε τό μεσαιώνα προφανῶς θά εἶχε ἀποδοκιμασθεῖ σέ μᾶς φαίνονται ἐνοχλητικά καί παράλογα. Θάταν δύσκολο ἀφοῦ κάποιος διαβάσει τόν τρόπο πραγματοποίησής τους, νά τά ἐπαναλάβει χωρίς νά μπερδευτεῖ. Μιά κάποια θεωρητική ἐννοια τά κάνει εὐνόητα. Θά μπορούσαμε νά ἐπεκταθοῦμε: εἶναι ἐλάχιστα δυνατό νά φαντασθοῦμε ὅτι τέτοια πειράματα μποροῦν νά γίνουν μέ μορφή τυχαίου παιγνιδιοῦ, χωρίς νά προϋπάρχουν ἰδέες περισσότερο ἢ λιγώτερο καθορισμένες σχετικές μέ τή σημασία τους.

Θά παρουσιάσουμε τώρα τίς ἰδέες πού βρίσκονται στή βάση μιᾶς πολύ ἀπλῆς θεωρίας πού ἐξηγεῖ ὅλα αὐτά τά γεγονότα.

\* Ὑπάρχουν δύο εἶδη ἠλεκτρικά φορτία, τό ένα ὀνομάζεται θετικό (+) καί τό ἄλλο ἀρνητικό (-).\* Ἐχουν σέ κάποιο εἶδος τόν χαρακτήρα μιᾶς οὐσίας, μέ τήν ἐννοια πού ἔχουμε ἤδη ἐξηγή-

σει, δηλαδή ότι ή ποσότητά τους μπορεί νά αυξηθεί ή νά ελαττωθεί, αλλά τό συνολικό τους άθροισμα μέσα σ' ένα κλειστό σύστημα παραμένει σταθερό. Καμιά φορά όμως υπάρχουν ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα σ' αυτή τήν περίπτωση και στην περίπτωση τής θερμότητας, τής ύλης ή τής ενέργειας. Έχουμε δύο ηλεκτρικές ούσιες. Είναι αδύνατο εδώ νά χρησιμοποιήσουμε τήν αναλογία μέ τά χρήματα πού χρησιμοποιήσαμε πιο πάνω μέ λιγότερο ή περισσότερο γενικευμένο τρόπο. Ένα σώμα είναι ηλεκτρικά ουδέτερο αν τά ηλεκτρικά φορτία θετικά και άρνητικά μηδενίζονται άμοιβαία. Ένας άνθρωπος δέν διαθέτει τίποτα ή, αν πραγματικά δέν διαθέτει τίποτα ή, αν τά χρήματα πού έχει κατά μέρος είναι άκριβώς ίσα μέ τά χρήματα πού όφείλει. Μπορούμε νά συγκρίνουμε τίς καταγραφές τών πιστώσεών του και τών χρεώσεών του στό βιβλίο του μέ δύο είδη ηλεκτρικῶν φορτίων.

Μιά άλλη υπόθεση τής θεωρίας είναι ότι δύο ηλεκτρικά φορτία όμώνυμα άπωθοῦνται ενώ δύο ηλεκτρικά φορτία έτερόνυμα αντίθετα έλκονται. Αυτό μπορεί νά παρασταθεί γραφικά ως εξής:



Τελικά πρέπει νά κάνουμε και τήν παρακάτω θεωρητική υπόθεση: 'Υπάρχουν δύο ειδῶν σώματα, εκείνα στά όποια τά ηλεκτρικά φορτία μπορούν νά κινουῦνται ελεύθερα, και όνομάζονται άγωγοί, και εκείνα στά όποια δέν είναι αυτό δυνατό, κι' όνομάζονται μονωτάι. Όπως συμβαίνει συχνά σέ παρόμοιες περιπτώσεις, αυτή ή υπόδιαίρεση τών σωμάτων δέν πρέπει νά λαμβάνεται σάν τέλεια άπόλυτη. Ο ιδανικός άγωγός και μονωτής είναι μία ιδέα πού δέν μπορεί νά υπάρξει στην πραγματικότητα. Τά μέταλλα, ή γή, τά ανθρώπινα σώματα είναι παραδείγματα άγωγῶν, άκόμη κι' αν όλα δέν είναι τό ίδιο καλά. Το γυαλί, τό ελαστικό, ή πορσελάνη και άλλα παρόμοια σώματα είναι μονωτάι. Ο άέρας είναι άτελής μονωτής, πράγμα πού ο καθέννας μας, πού παρακολούθησε τά παραπάνω περιγραφέντα πειράματα, τό ξέρει. Πάντα είναι μία καλή δικαιολογία νά δικαιολογούμε τήν άποτυχία τών ηλεκτροστατικῶν πειραμάτων μέ τήν ύπαρξη ύγρασίας, πού αυξάνει τήν άγωγιμότητα τοῦ άέρα.

Αυτές οι θεωρητικές υποθέσεις είναι άρκετές για νά εξηγήσουμε τά τρία περιγραφέντα πειράματα. Θα τά συζητήσουμε άλλη μία φορά μέ τήν ίδια σειρά αλλά υπό τό φῶς τής θεωρίας τών ηλεκτρικῶν φορτίων.

1. Η ελαστική ράβδος, όπως όλα τά άλλα σώματα υπό κανονικές συνθήκες είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Περιέχει και τά δύο είδη φορτίων, θετικά και άρνητικά, σέ ίσες ποσότητες. Τρίβοντάς την μέ τή φανέλλα τά ξεχωρίζουμε. Αυτή ή παραδοχή είναι μία καθαρή συμφωνία, γιατί είναι ή εφαρμογή τής όρολογίας, πού δημιουργήθηκε απ' τή θεωρία κατά τή διαδικασία τής τριβής. Το είδος τοῦ ηλεκτρισμοῦ πού διαθέτει σέ περίσσεια ή ράβδος όνομάζεται άρνητικό, όνομα πού όπωσδήποτε είναι μία συμβατική όνομασία. Αν τά πειράματα είχαν γίνει μέ μία γυάλινη ράβδο πού τήν είχαμε τρίψει μέ δέρμα από γάτα, τότε θα όνομάζαμε τήν περίσσεια τοῦ φορτίου, για νά είμαστε σύμφωνοι μέ τήν εφαρμοσθεΐσα συμφωνία, θετική. Συνεχίζουμε λοιπόν τό πείραμα φέρνοντας ηλεκτρικά φορτία στόν μεταλλικό άγωγό άκουμπώντας τον μέ τό ελαστικό. Μετακινουῦνται ελεύθερα και κατανέμονται σ' όλη του τήν

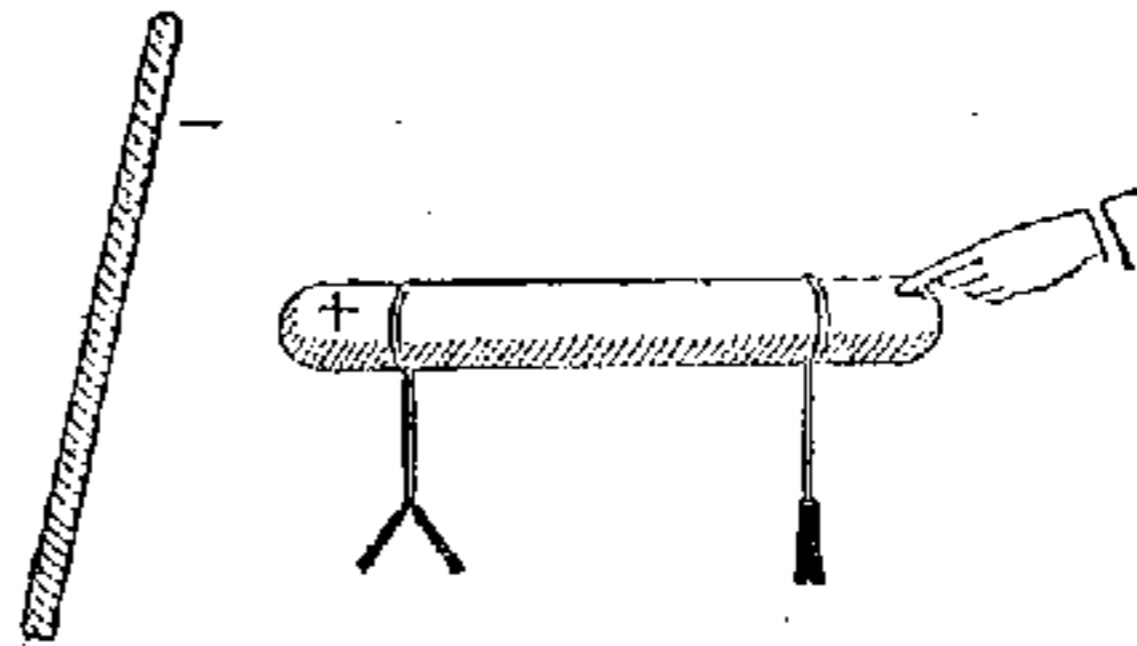
ἐπιφάνεια συμπεριλαμβανομένων καὶ τῶν φύλλων τοῦ χρυσοῦ. Ἐφ' ὅσον ὅμως τὰ ἀρνητικά φορτία ἀπωθοῦν τὰ ἀρνητικά φορτία, τὰ δύο φύλλα τοῦ χρυσοῦ ἀπωθοῦνται ὅσο περισσότερο εἶναι δυνατό μέ ἀποτέλεσμα τήν παρατηρούμενη ἀπομάκρυνση. Τό μέταλλο στηρίζεται σ' ἓνα ὑποστήριγμα γυάλινο ἢ ἀπό ἄλλο μονωτή, σέ τρόπο ὥστε τὰ ἠλεκτρικά φορτία νά παραμένουν στόν ἀγωγό τόσο, ὅσο ἐπιτρέπει ἡ ἀγωγιμότητα τοῦ ἀέρα. Καταλαβαίνουμε τώρα γιατί πρὶν ἀρχίσουμε τό πείραμα πρέπει νά πιάσουμε τό μέταλλο. Στήν περίπτωση αὐτή τό μέταλλο, τό ἀνθρώπινο σῶμα καί ἡ γῆ σχηματίζουν ἓνα ἀγωγό ἀπό τόν ὁποῖο περνοῦν τὰ ἠλεκτρικά φορτία καί πρακτικά δέν παραμένει τίποτα πάνω στό ἠλεκτροσκόπιο.

2. Ἀρχίζουμε τό πείραμα μέ τόν ἴδιο τρόπο πού ἀρχίσαμε καί τό προηγούμενο. Ἀλλά ἀντί ν' ἀκουμπήσουμε τό ἐλαστικό πάνω στό μέταλλο, τό πλησιάζουμε σέ μιά μικρή ἀπόσταση. Τά δύο εἶδη φορτίων πού ὑπάρχουν μέσα στόν ἀγωγό διαχωρίζονται. Τό ἓνα εἶδος ἔλκεται καί τό ἄλλο ἀπωθεῖται. Ανακατεύονται ξανά ὅταν ἀπομακρύνουμε τήν ἐλαστική ράβδο δεδομένου ὅτι τὰ ἑτερόνυμα φορτία ἔλκονται ἀμοιβαία.

3. Τώρα διαιροῦμε τήν μεταλλική ράβδο σέ δύο κομμάτια καί ἀποσύρουμε τήν ἐλαστική ράβδο. Σ' αὐτή τήν περίπτωση τά δύο εἶδη φορτίων δέν μποροῦν νά ἀναμιχθοῦν μέ ἀποτέλεσμα τὰ φύλλα χρυσοῦ νά κρατοῦν μία περίσσεια τοῦ ἑνός ἀπό τὰ δύο εἶδη φορτίων καί νά παραμένουν ἀπομακρυσμένα.

Στό φῶς αὐτῆς τῆς ἀπλῆς θεωρίας ὅλα τὰ γεγονότα πού ἀναφέραμε γίνονται καταληπτά. Ἡ ἴδια θεωρία μᾶς ἐπιτρέπει νά καταλάβουμε πολλά φαινόμενα τοῦ τομέα τῆς «ἠλεκτροστατικής». Ὁ σκοπός κάθε θεωρίας εἶναι νά μᾶς προσανατολίσει πρὸς καινούρια γεγονότα, νά ὑποθέσουμε καινούρια πειράματα καί νά μᾶς ὀδηγήσει στήν ἀνακάλυψη καινούριων φαινομένων καί νόμων. Αὐτό μπορεῖ νά γίνει φανερό ἀπό τό παρακάτω παράδειγμα. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι στό δεύτερο πείραμα κάνουμε μιά διαφοροποίηση καί μέ τό ἓνα χέρι πλησιάζω τήν ἐλαστική ράβδο ἐνῶ μέ τό ἄλλο ἀκουμπᾶω πάνω στήν μεταλλική ράβδο. Τί θά συμβεῖ τώρα; Ἡ θεωρία ἀπαντᾷ: Τά φορτία πού ἀπωθοῦν-

ται μποροῦν τώρα νά κινηθοῦν μέσω τοῦ σώματός μου, πράγμα πού ἔχει σάν ἀποτέλεσμα νά μείνει στή μεταλλική ράβδο ἓνα εἶδος φορτίο, τό θετικό. Μόνον τὰ φύλλα τοῦ ἠλεκτροσκόπιου κοντά στήν ἐλαστική ράβδο θά μείνουν ἀπομακρυσμένα. Τό πείραμα ἀποδεικνύει αὐτή τήν πρόβλεψη.



Ἡ θεωρία πού μᾶς ἀπασχολεῖ τώρα εἶναι ἀλήθεια ὅτι, ἀπό τήν ἀποψη τῆς σύγχρονης φυσικῆς, εἶναι ἀπλοϊκή καί ἀνεπαρκῆς. Μποροῦμε ὅμως νά τήν χρησιμοποιήσουμε γιά παράδειγμα γιά νά ἀποδείξουμε τί ἀκριβῶς εἶναι οἱ χαρακτηριστικές κατευθύνσεις κάθε φυσικῆς θεωρίας.

Δέν ὑπάρχουν αἰώνιες θεωρίες στήν ἐπιστήμη. Συμβαίνει πάντα μερικά γεγονότα πού προβλέφθηκαν ἀπ' τήν θεωρία νά ἀπορρίπτονται ἀπ' τό πείραμα. Κάθε θεωρία ἔχει μιά περίοδο βαθμιαίας ἀνάπτυξης καί θριάμβου, ἐνῶ μετά μπορεῖ νά ἀκολουθήσει μιά ταχύτατη παρακμή. Ἡ ἀνοδος καί ἡ πτώση τῆς θεωρίας «θερμότητα-οὐσία» πού συζητήσαμε ἐδῶ, εἶναι ἓνα καλό παράδειγμα. Ἄλλες θεωρίες βαθύτερες καί σημαντικότερες θά συζητηθοῦν ἀργότερα. Σχεδόν κάθε μεγάλη πρόοδος

της επιστήμης γεννήθηκε από κάποια κρίση μιας παλιᾶς θεωρίας κατά την προσπάθεια να βρεθούν διεξοδοί στις δυσκολίες που παρουσιαζόντουσαν. Οφείλουμε να εξετάσουμε τις παλιές ιδέες και θεωρίες, ἄσχετα ἂν ἀνήκουν στο παρελθόν, γιατί είναι τό μόνο μέσο γιά να καταλάβουμε τή σημασία και τήν ἔκταση τῆς ἰσχύος τῶν νέων θεωριῶν.

Στις πρώτες σελίδες τοῦ βιβλίου μας, συγγρίναμε τό ρόλο τοῦ ἔρευνητοῦ μέ αὐτόν ἑνός ντεντέκτιβ, ὁ ὁποῖος ἀφοῦ ἔχει συγκεντρώσει τά ἀπαραίτητα γεγονότα βρίσκει τή σωστή λύση μέ μόνο τή σκέψη. Οὐσιαστικά αὐτή ἡ σύγκριση πρέπει νά θεωρηθεῖ πολύ ἐπιφανειακή. Τόσο στή ζωή ὅσο και στά ἄστυνομικά ρομάντζα τό ἔγκλημα εἶναι ἕνα δεδομένο γεγονός. Ὁ ντεντέκτιβ πρέπει νά ψάξει τά γράμματα, τά δακτυλικά ἀποτυπώματα, τίς σφαῖρες, τά ὄπλα, ἀλλά ξέρεي πολύ λίγα γιά τά αἷτια τοῦ ἐγκλήματος. Δέν συμβαίνει τό ἴδιο και μέ τόν ἔρευνητή. Δέν εἶναι δύσκολο νά φαντασθοῦμε ἕναν ἄνθρωπο πού δέν ξέρει ἀπολύτως τίποτα γιά ἠλεκτρισμό, ἀφοῦ οἱ

ἀρχαῖοι ἔζησαν ἀρκετά εὐτυχισμένοι χωρίς νά ἔχουν καμμιά ιδέα αὐτοῦ τοῦ πράγματος. Ἄς δώσουμε στόν ἄνθρωπό μας, μέταλλο, φύλλα χρυσοῦ, μικρά δοχεῖα, μιά ράβδο ἀπό σκληρό ἐλαστικό, ἕνα κομμάτι φανέλλα, δηλαδή ὅλα τά ἀπαραίτητα ὕλικά γιά νά κάνει τά τρία μας πειράματα. Θά ἦταν δυνατό νά εἶναι πολύ καλλιεργημένος, ἀλλά εἶναι πιθανό νά βάλει στά μικρά δοχεῖα κρασί, νά χρησιμοποιήσει τή φανέλλα γιά νά τᾶ σκουπίσει και νά μή συλλάβει τήν ιδέα νά κάνει τά πειράματα πού ἔχουμε περιγράψει. Γιά τόν ντεντέκτιβ τό ἔγκλημα εἶναι ἕνα δεδομένο γεγονός και τό πρόβλημα τίθεται ὡς ἐξῆς: ποιός σκότωσε τόν Cock Robin; Ὁ ἔρευνητής ὀφείλει ἔστω και μερικά, νά διαπράξει ὁ ἴδιος τό ἔγκλημα και σύγχρονα νά κάνει και τήν ἀνάκριση. Ἐπί πλέον, ἡ προσπάθειά του δέν εἶναι νά ἐξηγήσει μιά εἰδική περίπτωση ἀλλά ὅλα τά φαινόμενα πού προκύπτουν ἢ πού θά μπορούσαν νά προκύψουν.

Ἡ εἰσαγωγή τῆς ἀντίληψης τῶν ρευστῶν μᾶς δείχνει τήν ἐπίδραση τῶν ιδεῶν τῆς μηχανικῆς, πού προσπαθοῦν νά

ἐξηγήσουν ὅλα τά πράγματα μέ οὐσίες και μέ δυνάμεις πού ἐξασκοῦνται μεταξύ τους. Γιά νά δοῦμε ἂν αὐτή ἡ μηχανική ἄποψη μπορεί νά ἐφαρμοσθεῖ στήν περιγραφή τῶν ἠλεκτρικῶν φαινομένων, πρέπει νά θεωρήσουμε τό ἀκόλουθο πρόβλημα.

Ἐστω δοσμένες δύο μικρές σφαῖρες ἠλεκτρικά φορτισμένες, δηλαδή ὅτι περιέχουν μιά περίσσεια ἠλεκτρικοῦ φορτίου. Ξέρουμε ὅτι οἱ σφαῖρες ἢ θά ἀπωθηθοῦν ἢ θά τραβηχθοῦν μεταξύ τους. Ἀλλά ἡ δύναμη ἐξαρτᾶται μόνο ἀπό τήν ἀπόστασή τους; Κι' ἂν εἶναι ἔτσι, πῶς ἐξαρτᾶται. Ἡ πιό ἀπλή ὑπόθεση θάταν ὅτι ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ἀπόσταση μέ τόν ἴδιο τρόπο πού ἐξαρτᾶται ἡ δύναμη τῆς βαρύτητας, πού μειώνεται γιά παράδειγμα στό ἕνα ἔνατο τῆς ἔντασης της ἂν ἡ ἀπόσταση γίνει τρεῖς φορές μεγαλύτερη. Τά πειράματα πού ἔγιναν ἀπό τόν Coulomb ἔδειξαν ὅτι ὁ νόμος αὐτός πραγματικά ἰσχύει. Ἐνα αἰῶνα μετά τήν ἀνακάλυψη τοῦ νόμου τῆς βαρύτητας ἀπό τόν Newton, ὁ Coulomb βρῆκε μιά ὅμοια ἐξάρτηση τῆς ἠλεκτρικῆς δυνάμεις ἀπό τήν ἀπόσταση.

Οἱ βασικές διαφορές μεταξύ τῶν νόμων τοῦ Newton και τοῦ Coulomb εἶναι οἱ ἀκόλουθες: ἡ ἔλξη τῆς βαρύτητας παρουσιάζεται παντοῦ, ἐνῶ οἱ ἠλεκτρικές δυνάμεις ὑπάρχουν μόνο, ὅταν τά σώματα εἶναι ἠλεκτρικά φορτισμένα. Στήν βαρύτητα ὑπάρχει μόνο ἡ ἔλξη ἐνῶ στίς ἠλεκτρικές δυνάμεις ὑπάρχει ἡ ἔλξη και ἡ ἀποση.

Ἐδῶ ἀναφέεται τό ἴδιο ἐρώτημα πού ἐξετάσαμε μέ τήν εὐκαιρία τῆς θερμότητας. Τά ἠλεκτρικά φορτία εἶναι οὐσίες μέ βάρος ἢ χωρίς βάρος; Μ' ἄλλα λόγια τό βάρος ἑνός κομματιοῦ ἀπό μέταλλο μένει τό ἴδιο ὅταν εἶναι φορτισμένο σέ σύγκριση μέ τό βάρος του ὅταν εἶναι οὐδέτερο; Βάζοντάς το σέ μιά ζυγαριά παρατηροῦμε ὅτι δέν ἐμφανίζεται καμμιά διαφορά. Μ' αὐτά συμπεραίνουμε ὅτι τά ἠλεκτρικά φορτία εἶναι κι' αὐτά μέλη τῆς οἰκογένειας τῶν οὐσιῶν χωρίς βάρος.

Προχωρώντας, ἡ θεωρία τοῦ ἠλεκτρισμοῦ ἀπαιτεῖ τήν εἰσαγωγή δύο καινούριων ἐννοιῶν. Θέλουμε ξανά νά ἀποφύγουμε δύσκολους ὀρισμούς και νά χρησιμοποιήσουμε τίς ἐννοιες πού ἐμφανίζον μιά ἀναλογία μέ τίς ἐννοιες πού ἔχουμε

ἤδη συνηθίσει. Ἄς θυμηθοῦμε πόσο ἦταν οὐσιαστικό τὸ δι-  
καταλάβουμε τὰ φαινόμενα τῆς θερμότητος καὶ διακρίναμε τὴν  
θερμότητα ἀπὸ τὴν θερμοκρασία. Εἶναι κι' ἐδῶ ἐξ ἴσου  
σημαντικὸ νὰ διακρίνουμε τὸ ἠλεκτρικὸ δυναμικὸ ἀπὸ τὸ  
ἠλεκτρικὸ φορτίο. Ἡ διαφορὰ ἀνάμεσα στὶς δύο ἔννοιες γίνεται  
πιὸ ξεκάθαρη ἀπὸ τὴν παρακάτω ἀναλογία:

Ἡλεκτρικὸ δυναμικὸ — Θερμοκρασία

Ἡλεκτρικὸ φορτίο — Θερμότης

Δύο ἀγωγοί, γιὰ παράδειγμα δύο σφαῖρες ἀνίσου μεγέθους,  
μποροῦν νὰ ἔχουν τὸ ἴδιο ἠλεκτρικὸ φορτίο, δηλαδή τὸ ἴδιο  
πλεόνασμα ἐνὸς ἠλεκτρικοῦ ρεύματος, ἀλλὰ τὸ δυναμικὸ τους  
θὰ εἶναι διαφορετικὸ στὶς δύο περιπτώσεις, πιὸ μεγάλο γιὰ τὴν  
πιὸ μικρὴ σφαῖρα καὶ ἀντίστροφα γιὰ τὴν πιὸ μεγάλη σφαῖρα.  
Ἡ ἠλεκτρικὴ ροή θὰ ἔχει μεγαλύτερη πυκνότητα καὶ θὰ εἶναι  
γι' αὐτὸ πιὸ σφιγμένη στὸν μικρὸ ἀγωγό.

Ἀφοῦ οἱ ἀπωστικὲς δυνάμεις πρέπει νὰ ἀδξάνουν μὲ τὴν  
πυκνότητα, ἡ τάση τοῦ φορτίου νὰ ξεφύγει θὰ εἶναι πιὸ μεγάλη  
στὴν περίπτωση τῆς μικρῆς σφαίρας παρά στὴν μεγάλη. Αὕτη  
ἡ τάση διαφυγῆς τοῦ φορτίου ἀπὸ ἕνα ἀγωγὸ εἶναι ἕνα ἄμεσα-  
μέτρο τοῦ δυναμικοῦ του. Γιὰ νὰ δείξουμε ξεκάθαρα τὴ διαφορὰ  
ἀνάμεσα στὸ φορτίο καὶ στὸ δυναμικὸ θὰ σχηματίσουμε ἕνα  
μικρὸ ἀριθμὸ προτάσεων πού περιγράφουν τὴν συμπεριφορὰ  
τῶν θερμῶν σωμάτων καὶ ἀντίστοιχες προτάσεις ἀναφερόμενες  
σὲ φορτισμένους ἀγωγούς.

### ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

Δύο σώματα διαφορετικῆς θερ-  
μοκρασίας, ἐξισορροποῦν τὶς θερ-  
μοκρασίας τους μετὰ ἕνα ὁρισμένο  
χρονικὸ διάστημα ἐπαφῆς τους.

Δύο ἴσες ποσότητες θερμότητος  
προκαλοῦν διαφορετικὲς μεταβολές  
θερμοκρασίας σὲ δύο σώματα ἂν ἡ

### ἩΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Δύο μονωμένοι ἀγωγοί, πού βρί-  
σκονται ἀρχικὰ σὲ διαφορετικὸ ἡ-  
λεκτρικὸ δυναμικὸ, φθάνουν ταχύ-  
τατα στὸ ἴδιο δυναμικὸ ἂν ἔρθουν  
σ' ἐπαφή.

Δύο ἴσες ποσότητες ἐνὸς ἠλεκτρι-  
κοῦ φορτίου προκαλοῦν διαφορετι-

θερμοχωρητικότητά τους εἶναι δια-  
φορετικὴ.

Ἐνα θερμόμετρο σὲ ἐπαφή μὲ κά-  
ποιο σῶμα δείχνει μὲ τὸ ὕψος τῆς  
στήλης τοῦ υδράργυρου τὴν θερμο-  
κρασία του καὶ κατ' ἐπέκταση τὴ  
θερμοκρασία τοῦ σώματος.

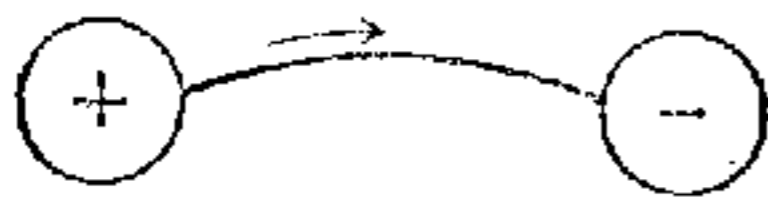
κὲς μεταβολές στὸ ἠλεκτρικὸ δυνα-  
μικὸ δύο σωμάτων ἂν ἡ ἠλεκτρικὴ  
χωρητικότητά τους εἶναι διαφορε-  
τικὴ.

Ἐνα ἠλεκτροσκόπιο σὲ ἐπαφή μ'  
ἕνα ἀγωγὸ δείχνει μὲ τὴν ἀπόκλιση  
τῶν φύλλων τοῦ χρυσοῦ τὸ ἠλεκτρι-  
κὸ του δυναμικὸ καὶ κατ' ἐπέκταση  
τὸ ἠλεκτρικὸ δυναμικὸ τοῦ ἀγωγοῦ.

Αὕτη ἡ ἀναλογία ὅμως δὲν πρέπει νὰ προχωρήσει πολὺ  
μακρυνά. Ἐνα παράδειγμα θὰ ἐμφανίσει τόσο τίς διαφορὰς ὅσο  
καὶ τίς ὁμοιότητες. Ἄν ἕνα θερμὸ σῶμα ἔλθει σ' ἐπαφή μ' ἕνα  
ψυχρὸ, ἡ θερμότητα ρέει ἀπὸ τὸ πρῶτο στὸ δεῦτερο. Ἄς  
ὑποθέσουμε ἐξ ἄλλου ὅτι ἔχουμε δύο μονωμένους ἀγωγούς πού  
ἔχουν ἴσα ἠλεκτρικὰ φορτία ἀλλὰ ἀντιθέτου σημείου. Οἱ δύο  
ἀγωγοί βρίσκονται σὲ διαφορετικὸ ἠλεκτρικὸ δυναμικὸ. Κατὰ  
συνθήκη θεωροῦμε ὅτι τὸ δυναμικὸ πού ἀντιστοιχεῖ στὸ  
ἀρνητικὸ φορτίο εἶναι χαμηλότερο ἀπὸ ἐκεῖνο πού ἀντιστοιχεῖ  
στὸ θετικὸ φορτίο. Ἄν οἱ δύο ἀγωγοί ἔρθουν σ' ἐπαφή ἢ  
συνδεθοῦν μ' ἕνα σύρμα, προκύπτει ἀπὸ τὴν θεωρία τῶν  
ἠλεκτρικῶν ρευμάτων ὅτι δὲν θὰ ἐμφανίσουν κανένα ἠλεκτρικὸ  
φορτίο καὶ στή συνέχεια καμμιά διαφορὰ δυναμικοῦ. Ὀφεί-  
λουμε νὰ φαντασθοῦμε μιὰ «ροή» τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου ἀπὸ  
τὸν ἕνα ἀγωγὸ στὸν ἄλλο κατὰ τὴ διάρκεια μικροῦ χρονικοῦ  
διαστήματος ὅποτε ἐξισορροπεῖται ἡ διαφορὰ δυναμικοῦ. Ἀλλὰ  
πῶς; Τὸ θετικὸ φορτίο ρέει πρὸς τὸ ἀρνητικὸ, ἢ ἀντιστρόφως;

Ὁ τρόπος μὲ τὸν ὁποῖο παρουσιάσαμε τὰ πιὸ πάνω θέματα  
δὲν μᾶς δίνει καμμιά βάση γιὰ νὰ διαλέξουμε τὴν πορεία  
ἀνάμεσα στὶς δύο αὐτὲς ἀντίθετες πορεῖες. Μποροῦμε νὰ  
ὑποθέσουμε μιὰ ἀπ' τίς δύο δυνατότητες ἢ ἀκόμη ὅτι ἡ ροή  
πραγματοποιεῖται ταυτόχρονα καὶ πρὸς τίς δύο κατευθύνσεις.  
Αὐτὸ εἶναι ἀκριβῶς ἕνα θέμα συνθήκης καὶ δὲν ἔχει καμμιά  
σημασία ἢ ἐκλογή, γιατί δὲν ξέρουμε καμμιά μέθοδο πού μὲ τὴ  
βοήθειά της θὰ ἀπαντήσουμε στὴν ἐρώτηση μὲ κάποιο πείραμα.

Ἡ μετέπειτα ἀνάπτυξη πού ὀδήγησε σέ μιά θεωρία τοῦ ἠλεκτρισμοῦ πολύ πιά βαθειά, ἀπάντησε στό πρόβλημα, πού ἔχει τέλεια διαφορετική σημασία ἀπό αὐτή πού δημιουργήθηκε ἀπό τήν ἀπλή καί πρωτόγονη θεωρία τῶν ἠλεκτρικῶν φορτίων. Ἐδῶ θέλουμε ἀπλῶς νά προσαρμόσουμε τόν ἀκόλουθο τρόπο ἔκφρασης. Τά ἠλεκτρικά φορτία κινοῦνται ἀπό τόν ἀγωγό μέ ὑψηλό δυναμικό πρὸς τόν ἀγωγό μέ χαμηλό δυναμικό. Στήν περίπτωση τῶν δικῶν μας δύο ἀγωγῶν ὁ ἠλεκτρισμός ρέει ἀπό τόν θετικό πρὸς τόν ἀρνητικό. Αὕτη ἡ ἔκφραση εἶναι θέμα συμ-



φωνίας καί εἶναι ἐδῶ τελείως ἀθαίρετη. Ὁλη αὕτη ἡ δυσκολία μᾶς φανερώνει ὅτι ἡ ἀναλογία ἀνάμεσα στήν θερμότητα καί στόν ἠλεκτρισμό δέν εἶναι διόλου τέλεια.

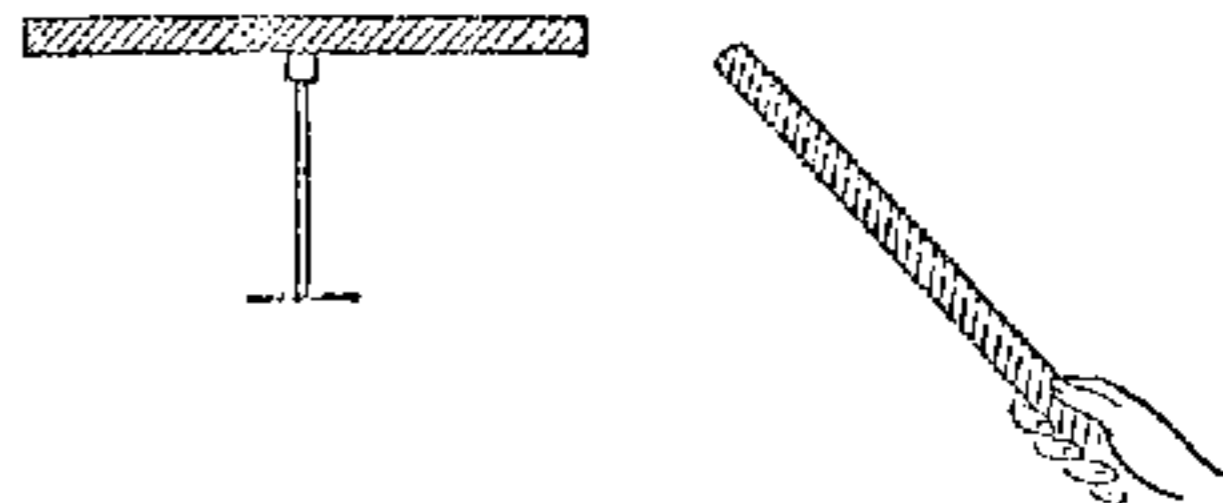
Εἶδαμε ὅτι εἶναι δυνατό νά προσαρμόσουμε τή μηχανική ἀποψη στή περιγραφή τῶν στοιχειωδῶν γεγονότων τῆς ἠλεκτροστατικής. Τό ἴδιο πρᾶγμα εἶναι δυνατό νά γίνει καί στήν περίπτωση τῶν μαγνητικῶν φαινομένων.

## ΤΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

Θά ἀκολουθήσουμε τή μεθοδολογία πού ἀκολουθήσαμε ὡς τώρα, ξεκινώντας ἀπό πολύ ἀπλᾶ γεγονότα καί ψάχνοντας στή συνέχεια νά δώσουμε μιά θεωρητική ἐξήγηση.

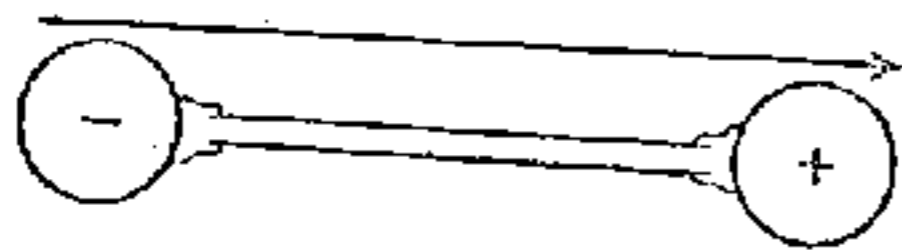
1. Ἐχουμε δύο μαγνητισμένες ράβδους, ἡ μία εἶναι κρεμασμένη ἀπό τό κέντρο βάρους της καί τήν ἄλλη τήν κρατᾶμε στό χέρι μας. Τά ἄκρα τῶν δύο ράβδων πλησιάζονται μέ τέτοιο τρόπο ὥστε νά παρατηρήσουμε μιά ἑλκτική δύναμη. Αὐτό μπορεῖ νά γίνει πάντοτε. Ἄν δέν παρατηρήσουμε καμμιά ἑλξη

πρέπει νά γυρίσουμε τόν μαγνήτη καί νά δοκιμάσουμε ἀπ' τήν ἄλλη πλευρά. Θά παρατηρήσουμε λοιπόν κάτι ἂν οἱ ράβδοι εἶναι μαγνητισμένες. Τά ἄκρα τῶν ράβδων ὀνομάζονται πόλοι. Συνεχίζοντας τό πείραμα διατρέχουμε τόν πόλο τοῦ μαγνήτη πού κρατᾶμε στό χέρι μας κατά μήκος τοῦ ἄλλου μαγνήτη. Παρατηροῦμε ὅτι ἡ ἑλξη μειώνεται καί ὅταν φθάσουμε στή μέση τοῦ κρεμασμένου μαγνήτη δέν παρατηρεῖται καμμιά δύναμη. Ἄν συνεχίσουμε τή διαδρομή τοῦ πόλου στήν ἴδια φορά, παρατηροῦμε μιά ἄπωση πού φθάνει στή μεγαλύτερή του ἔνταση στόν ἄλλο πόλο τοῦ κρεμασμένου μαγνήτη.



2. Τό πιά πάνω πείραμα μᾶς ὑπενθυμίζει ἕνα ἄλλο. Κάθε μαγνήτης ἔχει δύο πόλους: δέν θά ἦταν δυνατόν νά ἀπομονώσουμε τόν ἕνα; Ἡ ἰδέα εἶναι πολύ ἀπλή, πρέπει νά κόψουμε τόν μαγνήτη στή μέση. Εἶδαμε ὅτι δέν ἐξασκεῖται καμμιά δύναμη μεταξύ τοῦ πόλου ἑνός μαγνήτη καί τοῦ μέσου κάποιου ἄλλου ραβδόμορφου μαγνήτη. Ἀλλά ὅταν πραγματικά σπάσουμε ἕνα μαγνήτη τό ἀποτέλεσμα εἶναι ἐκπληκτικό κι' ἀναπάντεχο. Ἄς ἐπαναλάβουμε τό πείραμα (1) μέ τό μισό τοῦ κρεμασμένου μαγνήτη, τά ἀποτελέσματα θά εἶναι ἀκριβῶς τά ἴδια μέ τό προηγούμενο πείραμα. Ἐκεῖ πού προηγουμένως δέν ἐμφανιζότανε καμμιά μαγνητική δύναμη τώρα βρίσκεται ἕνας ἰσχυρός μαγνητικός πόλος.

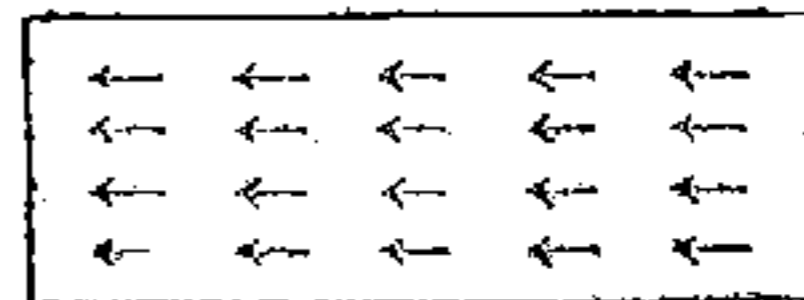
Πώς πρέπει να εξηγήσουμε τό γεγονός; Μπορούμε να προσπαθήσουμε να κατασκευάσουμε μιά θεωρία μαγνητισμοῦ στό σχῆμα τῆς θεωρίας τῶν ἠλεκτρικῶν ρευμάτων. Αυτό προκύπτει ἀπό τό γεγονός ὅτι κι' ἐδῶ παρατητοῦμε, ὅπως καί στά ἠλεκτροστατικά φαινόμενα, μιά ἔλξη καί μιά ἄπωση." Ἄς φαντασθοῦμε ὅτι ἔχουμε δύο σφαιρικούς ἀγωγούς πού ἔχουν ἴσα φορτία τό ἕνα θετικό τό ἄλλο ἀρνητικό. Ἐδῶ «ἴσα» σημαίνει ὅτι ἔχουν τίς ἴδιες ἀπόλυτες τιμές. +5 καί -5 ἔχουν τήν ἴδια ἀπόλυτη τιμή." Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι αὐτές οἱ δύο σφαῖρες ἐνώνονται μεταξύ τους μ' ἕνα μονωτή π.χ. μιά γυάλινη ράβδος. Σχηματικά αὐτό τό κατασκεύασμα μπορεῖ νά παρασταθεῖ ἀπό ἕνα βέλος μέ φορά ἀπό τόν ἀρνητικό πρὸς τόν θετικό ἀγωγό.



Ὀνομάζουμε αὐτό τό σύνολο ἕνα ἠλεκτρικό δίπολο. Εἶναι φανερό ὅτι δύο δίπολα αὐτοῦ τοῦ τύπου θά συμπεριφέρονται ἀκριβῶς ὅπως οἱ μαγνητισμένες ράβδοι τοῦ πειράματος (1)." Ἄν θεωρήσουμε τήν ἐφεύρεσή μας ὡς ἄν μοντέλα πραγματικοῦ μαγνήτη, μποροῦμε νά ποῦμε, ὑποθέτοντας τήν ὑπαρξή τῶν μαγνητικῶν ρευμάτων, ὅτι ἕνας μαγνήτης δέν εἶναι τίποτα ἄλλο παρά ἕνα μαγνητικό δίπολο, πού ὅμως ἔχει στά ἄκρα του δύο ρεύματα (φορτία) διαφορετικοῦ εἴδους. Αὐτή ἡ ἀπλή θεωρία, πού εἶναι ἀπομίμηση τῆς θεωρίας τοῦ ἠλεκτρισμοῦ, ἐπαρκεῖ γιά νά ἐξηγήσει τό πρῶτο πείραμα. Θά ὑπάρχει ἔλξη στή μιά ἄκρη καί ἄπωση στήν ἄλλη καί στή μέση μιά ἰσορροπία μεταξύ ἴσων καί ἀντιθέτων δυνάμεων." Ἄλλά ὅσο ἀφορᾷ στό δεύτερο πείρα-

μα; Σπάζοντας τήν γυάλινη ράβδο στήν περίπτωση τοῦ ἠλεκτρικοῦ διπόλου, παίρνουμε δύο μονωμένους πόλους. Αὐτό θά ἔπρεπε νά γίνει καί μέ τήν σιδερένια ράβδο τοῦ μαγνητικοῦ διπόλου, πρᾶγμα ὅμως πού δέν συμβαίνει στό δεύτερο πείραμά μας. Αὐτή ἡ ἀντίθεση μᾶς ἀναγκάζει νά εἰσάγουμε μιά ἄλλη θεωρία λίγο πιά λεπτή. Στή θέση τοῦ προηγουμένου μας μοντέλου μποροῦμε νά φαντασθοῦμε ὅτι ὁ μαγνήτης ἀποτελεῖται ἀπό πολύ μικρά στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα, πού δέν μποροῦν νά σπάσουν σέ χωριστούς πόλους. Στόν μαγνήτη πού θεωρεῖται σά σύνολο ἐπικρατεῖ τάξη γιατί ὅλα τά στοιχειώδη δίπολα εἶναι προσανατολισμένα στήν ἴδια φορά. Ἄμέσως λοιπόν βλέπουμε γιατί, ὅταν κόβουμε ἕνα μαγνήτη, δύο καινούριοι πόλοι ἐμφανίζονται στά καινούρια ἄκρα καί γιατί αὐτή ἡ πιά ἐκλεπτισμένη θεωρία ἐξηγεῖ τά γεγονότα τοῦ πειράματος 1 καθώς ἐπίσης κι' αὐτά τοῦ πειράματος 2.

Ἡ ἀπλή θεωρία μᾶς δίνει ἐξήγηση γιά πολλά γεγονότα καί εἶναι δέ χρειάζεται νά χρησιμοποιήσουμε μιά πιά ἐξειδικευμένη θεωρία." Ἄς πάρουμε ἕνα παράδειγμα. Ξέρουμε ὅτι ὁ μαγνήτης ἔλκει κομμάτια ἀπό σίδηρο. Γιατί; Σ' ἕνα συνηθισμένο κομμάτι σίδηρο, τά δύο μαγνητικά ρεύματα εἶναι ἀνακατεμένα, εἶναι ὥστε νά μή παρατηρεῖται τίποτα τό ἰδιαίτερο." Ἄν προσεγγίσουμε ἕνα θετικό πόλο αὐτός ἐνεργεῖ σά μιά «ἐντολή λόχου» πού ἀπευθύνεται στά μαγνητικά φορτία' ἔλκει τά ἀρνητικά μαγνητικά φορτία καί ἄπωθει τά θετικά μαγνητικά φορτία.



Προκαλείται μιά έλξη ανάμεσα στο σίδηρο και στο μαγνήτη. Αν απομακρύνουμε τό μαγνήτη τά μαγνητικά φορτία ξανάρχονται λίγο ως πολύ στις άρχικές τους θέσεις, κάτι πού εξαρτάται από τήν ικανότητά τους νά θυμούνται τήν έντολή πού τούς δόθηκε άπ' τήν έξωτερική δύναμη.

Μένουν πολύ λίγα πράγματα πού αναφέρονται στη ποσοτική πλευρά του προβλήματος. Μέ δύο μαγνητισμένες ράβδους μεγάλου μήκους μπορούμε πλησιάζοντάς τες νά εξετάσουμε τήν έλξη (ή τήν άπωση) των πόλων τους. Η επίδραση των άλλων άκρων των ράβδων είναι άμελητέα, άφοϋ είναι άρκετά μακριές. Τώρα όμως μέ τί τρόπο εξαρτάται ή έλξη ή ή άπωση από τήν άπόσταση των πόλων; Η άπάντηση πού δόθηκε άπό τά πειράματα του Coulomb είναι ότι ή εξάρτηση από τήν άπόσταση είναι ή ίδια όπως στην περίπτωση της βαρύτητας του Newton και της ηλεκτροστατικής δύναμης του Coulomb.

Ξανά βλέπουμε λοιπόν σ' αυτή τή θεωρία τήν εφαρμογή μιās γενικής άποψης, της τάσης δηλαδή νά περιγράψουμε όλα τά φαινόμενα μέ τή βοήθεια έλκτικων ή άπωστικων δυνάμεων πού εξαρτώνται αποκλειστικά από τήν άπόσταση και πού επενεργοϋν πάνω σε άμετάβλητα σωματίδια.

Πρέπει νά αναφερθεί έδω ένα πολύ γνωστό γεγονός, γιατί θά μάς δοθεί ή εύκαιρία νά τό χρησιμοποιήσουμε άργότερα. Η γή είναι ένα μεγάλο μαγνητικό δίπολο. Δέν υπάρχει ίχνος εξήγησης πού νά μάς λέει γιατί αυτό είναι άληθινό. Ο βόρειος πόλος είναι περίπου ό άρνητικός μαγνητικός πόλος (—) και ό νότιος πόλος είναι περίπου ό θετικός πόλος (+) της Γής. Οι όροι θετικός και άρνητικός είναι ύπόθεση συμφωνίας αλλά όταν καθορισθούν δέν είναι δυνατό νά τούς αλλάξουμε σημείο σε κάποια άλλη περίπτωση. Μιά μαγνητική βελόνα κινητή περί κατακόρυφο άξονα ύπακούει στη μαγνητική δύναμη της Γής. Κατευθύνει τό θετικό της πόλο προς τό βόρειο πόλο δηλαδή προς τόν άρνητικό πόλο της γής.

Αν και μπορούσαμε νά εφαρμόσουμε μέ σταθερό τρόπο τή μηχανική άποψη στον τομέα των ηλεκτρικων και μαγνητικων φαινομένων πού εξετάσαμε ως έδω, δέν ύπάρχει λόγος νά

είμαστε ιδιαίτερα περήφανοι και χαρούμενοι. Μερικές πτυχές της θεωρίας είναι στά σίγουρα λίγο ικανοποιητικές για νά μή πούμε άποθαρρυντικές. Ανακαλύψαμε καινούρια είδη ούσίας: ηλεκτρικά φορτία και στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα. Η πληθώρα των ούσιων άρχισε νά γίνεται επιβλητική.

Οι δυνάμεις είναι άπλές: Οι δυνάμεις της βαρύτητας οι ηλεκτρικές και μαγνητικές δυνάμεις, όλες μπορούν νά παρασταθούν μέ τόν ίδιο τρόπο. Αλλά τό τίμημα για τήν εφαρμογή αυτής της άπλότητας είναι μεγάλο. Είναι ή εισαγωγή νέων ούσιων χωρίς βάρος. Είναι μάλλον τεχνική έννοια, χωρίς καμιά σχέση μέ τήν θεμελιώδη ούσία, τή μάζα.

## Η ΠΡΩΤΗ ΣΟΒΑΡΗ ΔΥΣΚΟΛΙΑ

Τώρα είμαστε έτοιμοι νά ύπογραμμίσουμε τήν πρώτη σοβαρή δυσκολία πού παρουσιάζει ή γενική φιλοσοφική μας άποψη. Θά δοϋμε πιο κάτω ότι αυτή ή δυσκολία, μαζί μέ μιá άλλη άκόμη σοβαρότερη κατάστρεψαν τήν πίστη ότι όλα τά φαινόμενα μπορούν νά έρμηνευθούν μέ τή μηχανική μέθοδο.

Η καταπληκτική ανάπτυξη του ηλεκτρισμού, τόσο από θεωρητική όσο και από τεχνική άποψη, άρχισε μέ τήν ανακάλυψη του ηλεκτρικού ρεύματος. Έδω συναντάμε στην ιστορία της επιστήμης ένα από τά σπάνια παραδείγματα όπου ή τύχη μοιάζει νά παίζει ούσιαστικό ρόλο. Η ιστορία των σπασμών του ποδιού ενός βιατράχου έχει διηγηθεί μέ διαφορετικές παραλλαγές. Χωρίς νά σκοτιζόμαστε για τήν αλήθεια των λεπτομερειων, δέν ύπάρχει άμφιβολία ότι ή τυχαία ανακάλυψη του Galvani όδήγησε τόν Volta, στο τέλος του XVIII αιώνα, στην κατασκευή του βολταμέτρου. Αυτό σήμερα δέν έχει καμιά πρακτική εφαρμογή, αλλά πάντα δίνει ένα πολύ άπλό παράδειγμα μιās πηγής ρεύματος στα τρέχοντα πειράματα και στις περιγραφές των έγχειριδίων.

Η άρχή της κατασκευής του είναι άπλη. Παίρνουμε άρκετα δοχεία μέ νερό και προσθέτουμε λίγο θεϊκό όξύ. Σε κάθε δοχείο βυθίζουμε δύο λάμες μεταλλικές, μία από χαλκό και μία από ψευδάργυρο. Η χάλκινη λάμα του ενός δοχείου συνδέεται

μέ την λάμα από ψευδάργυρο του επόμενου δοχείου, σέ τρόπο ὥστε ἡ λάμα από ψευδάργυρο του πρώτου δοχείου καί ἡ χάλκινη λάμα του τελευταίου δοχείου νά μένουν ἐλεύθερες. Μποροῦμε τώρα νά διαπιστώσουμε μέ τή βοήθεια ἑνός εὐπαθοῦς ἠλεκτροσκόπιου ὅτι ὑπάρχει διαφορά δυναμικοῦ ἀνάμεσα στή λάμα του ψευδάργυρου του πρώτου δοχείου καί στή χάλκινη λάμα του τελευταίου δοχείου. Αὐτό θά παρατηρηθεῖ ἂν ὁ ἀριθμός τῶν «στοιχείων» δηλαδή τῶν δοχείων πού ἀποτελοῦν τήν στήλη εἶναι ἀρκετά μεγάλος.

Γιά νά λαμβάνονται ἀποτελέσματα μετρήσιμα διαλέξαμε τή συσκευή πού ἤδη περιγράψαμε πού εἶναι μιά μπαταρία πού ἀποτελεῖται ἀπό πολλά στοιχεῖα. Γιά τή συζήτηση πού θά ἀκολουθήσει ἕνα μόνο στοιχεῖο μᾶς εἶναι ἀρκετό. Βρίσκεται ὅτι τό δυναμικό του χαλκοῦ εἶναι μεγαλύτερο ἀπό αὐτό του ψευδάργυρου. Μεγαλύτερο ἐδῶ χρησιμοποιεῖται μέ τήν ἴδια ἔννοια πού λέμε ὅτι τό +2 εἶναι μεγαλύτερο ἀπό τό -2." Ἄν ἕνας ἀγωγός συνδεθεῖ στήν ἐλεύθερη λάμα του χαλκοῦ καί ἕνας ἄλλος στήν ἐλεύθερη λάμα του ψευδάργυρου οἱ δύο ἀγωγοί θά φορτισθοῦν ὁ πρῶτος θετικά κι ὁ ἄλλος ἀρνητικά." Ὡς ἐδῶ δέν παρουσιάσθηκε τίποτα τό ἰδιαίτερα νέο ἢ κτυπητό καί μποροῦμε νά προσπαθήσουμε νά ἐφαρμόσουμε τίς προηγούμενες μας ἰδέες στή διαφορά του δυναμικοῦ. Εἶδαμε ὅτι μιά διαφορά δυναμικοῦ ἀνάμεσα σέ δύο ἀγωγούς μηδενίζεται ταχύτατα ἂν αὐτοί συνδεθοῦν μ' ἕνα μεταλλικό σύρμα. Δημιουργεῖται μιά ροή ἠλεκτρικῶν φορτίων ἀπό τόν ἕνα ἀγωγό στόν ἄλλο. Αὕτη ἡ μέθοδος μοιάζει μέ τήν ἐξίσωση τῶν θερμοκρασιῶν μέ τή ροή θερμότητας. Ἀλλά συμβαίνει τό ἴδιο καί στήν περίπτωση του βολταμέτρου; Ὁ Volta ἔγραψε στήν ἐκθεσή του ὅτι οἱ λάμες συμπεριφέροντας σάν ἀγωγοί ἐλαφρά φορτισμένοι, καί δροῦν μ' ἕνα συνεχῆ τρόπο ἢ μέ τέτοιο τρόπο πού μετά ἀπό κάθε ἐκφόρτιση τους τό φορτίο τους ἀποκαθίσταται αὐτόματα πρᾶγμα πού μέ μιά λέξη, δίνει μιά ἀπεριόριστη φόρτιση ἢ καθορίζει μιά δράση ἢ μιά ἀδιάκοπη κίνηση τῶν ἠλεκτρικῶν φορτίων.

Τό ἐκπληκτικό ἀποτέλεσμα αὐτῶν τῶν πειραμάτων εἶναι ὅτι ἡ διαφορά δυναμικοῦ ἀνάμεσα στή λάμα του χαλκοῦ καί

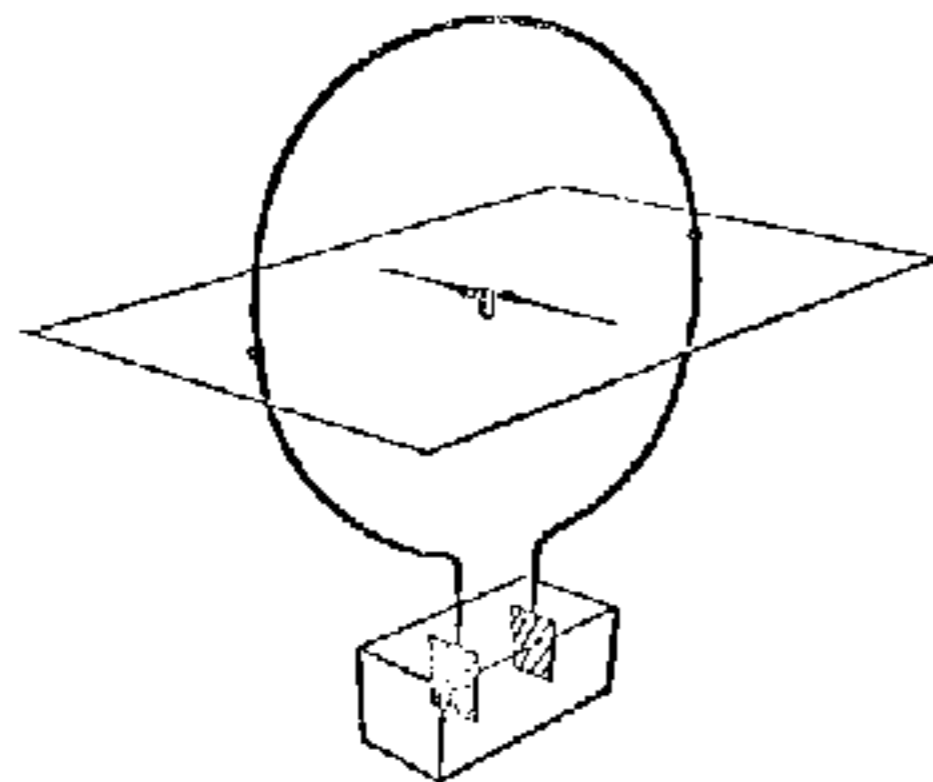
στή λάμα του ψευδαργύρου δέν εξαφανίζεται ὅπως στήν περίπτωση τῶν δύο φορτισμένων ἀγωγῶν πού συνδέονται μ' ἕνα μεταλλικό σύρμα. Ἡ διαφορά παραμένει καί σύμφωνα μέ τή θεωρία τῶν ρευστῶν ὀφείλει νά καθορίζει μιά σταθερή ροή ἀπό τό ὑψηλοῦ ἐπιπέδου δυναμικό (λάμα ψευδαργύρου). Προσπαθώντας νά διασώσουμε τή θεωρία τῶν ρευστῶν μποροῦμε νά ὑποθέσουμε ὅτι κάποια σταθερή δύναμη ἐπενεργεῖ γιά νά ἀποκαταστήσει τή διαφορά δυναμικοῦ καί νά δημιουργήσει μιά ροή ἠλεκτρικῶν φορτίων. Ἀλλά ἀπό ἐνεργειακή ἀποψη τό φαινόμενο στό σύνολό του εἶναι καταπληκτικό. Μιά ἀξιοσημείωτη ποσότητα θερμότητας παράγεται στό σύρμα πού μεταφέρει τό ρεῦμα, ἱκανή γιά νά τό λειώσει ἂν εἶναι λεπτό. Προκύπτει ὅτι ἡ θερμική ἐνέργεια παράγεται μέσα στό σύρμα. Ἀλλά ὁλόκληρο τό βολτάμετρο σχηματίζει ἕνα μονωμένο σύστημα, ἀφοῦ καμιά ἐξωτερική ἐνέργεια δέν του προσδίδεται. Ἄν θελήσουμε νά διασώσουμε τό νόμο διατήρησης τῆς ἐνέργειας πρέπει νά βροῦμε σέ πῶς σημείο ἔλαβε χώρα ἡ μετατροπή καί τί καταναλώθηκε γιά νά παραχθεῖ ἡ θερμότητα. Δέν εἶναι δύσκολο νά φαντασθοῦμε ὅτι ἐπισυμβαίνουν μέσα στήν μπαταρία πολύ σύνθετες χημικές δράσεις, δράσεις μέ τίς ὁποῖες οἱ βυθισμένες λάμες του χαλκοῦ καί του ψευδάργυρου καθῶς ἐπίσης καί τό ὑγρό παίζουν ἕνα ἐνεργό ρόλο. Ἀπό ἐνεργειακή ἀποψη αὐτό παρουσιάζει μιά ἀλυσίδα μετατροπῶν: χημική ἐνέργεια — ἐνέργεια ἠλεκτρικῶν φορτίων πού ρέουν, δηλαδή ρεῦμα — θερμότητα. Ἐνα βολτάμετρο δέν διαρκεῖ αἰώνια. Οἱ χημικές μετατροπές σέ συνάρτηση μέ τήν ἠλεκτρική ροή καταστρέφουν τήν μπαταρία μετά χρήση ὀρισμένου χρόνου.

Τό πείραμα πού καθιστᾶ ἐμφανεῖς τίς μεγάλες δυσκολίες πού παρουσιάζει ἡ ἐφαρμογή τῶν μηχανικῶν ἰδεῶν θά φανεῖ πολύ παράδοξο σ' αὐτόν πού ἀκούει νά μιᾶνε γι' αὐτό γιά πρώτη φορά. Ἐγινε ἀπό τόν  $\text{Oersted}$  ἐδῶ κι' ἑκατόν εἴκοσι χρόνια. Λέει λοιπόν ὁ  $\text{Oersted}$ :

*Ἀπό τά πειράματα αὐτά φαίνεται ὅτι μιά μαγνητική βελόνα ἀποκλίνει ἀπό τή θέση ἰσορροπίας της μέ τήν ἐπίδραση ἑνός γαλβανικοῦ στοιχείου, καί μάλιστα τό φαινόμενο παρατηρεῖται ὅταν*

τό κύκλωμα είναι κλειστό και ποτέ όταν είναι ανοικτό. Έπειδή δέ άφιναν τό κύκλωμα άνοιχτό πολλοί άρκετά γνωστοί φυσικοί δέν κατάφρασαν, έδω και μερικά χρόνια, νά δώσουν άπυτελεσματική εξήγηση.

"Ας υποθέσουμε ότι έχουμε μιά βολταϊκή μπαταρία και άγώγιμο σύρμα." Αν συνδέσουμε τό σύρμα στη χάλκινη λάμα χωρίς τήν άλλη του άκρη νά τή συνδέσουμε στη λάμα του ψευδαργύρου θα ύπάρξει μιά διαφορά δυναμικού αλλά δέν θα διατρέξει ρεύμα τόν άγωγό." Ας υποθέσουμε τώρα ότι τό σύρμα κάμπτεται σέ τρόπο ώστε νά σχηματίσει ένα δακτύλιο και στο κέντρο του νά τοποθετηθεί μιά μαγνητική βελόνα. Τό επίπεδο πού όρίζει ό δακτύλιος συμπίπτει μέ τό επίπεδο πού όρίζει ή μαγνητική βελόνα. Δέν συμβαίνει τίποτα όσο τό σύρμα δέν άκουμπάει τή λάμα του ψευδάργυρου. Δέν έπενεργεί καμμιά δύναμη, άφού ή διαφορά δυναμικού δέν έχει καμμιά επίδραση πάνω στη θέση τής βελόνας. Είναι δύσκολο νά καταλάβει κανείς γιατί «οί πολύ γνωστοί φυσικοί» όπως τούς όνόμαζε ό Oersted, περίμεναν νά δούν κάποια επίδραση.

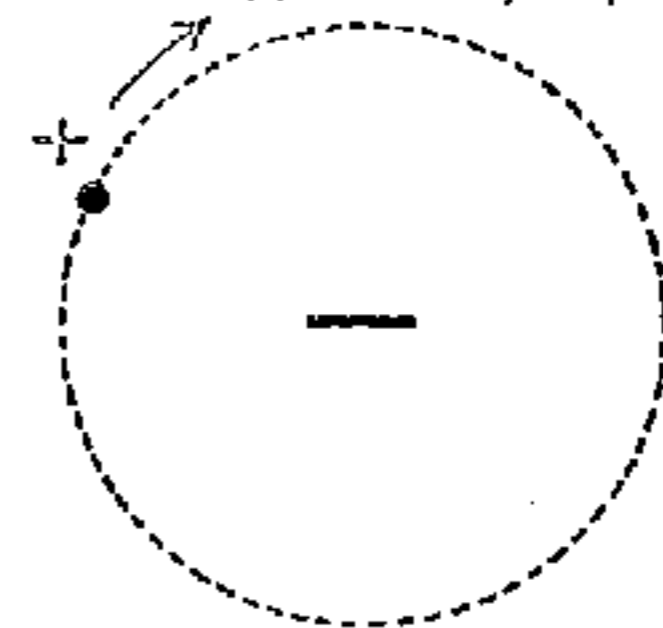


"Ας συνδέσουμε τώρα τό σύρμα μέ τή λάμα του ψευδάργυρου." Αμέσως δημιουργείται ένα παράξενο φαινόμενο, ή μαγνητική βελόνα άποκλίνει άπό τή θέση της." Ένας άπό τούς πόλους της πρυσανατολίζεται πρός τόν αναγνώστη, αν τό φύλλο του βιβλίου παριστάνει τό επίπεδο του δακτύλιου. Παρατηρηται τό φαινόμενο μιά δύναμη νά ενεργεί πάνω στο μαγνητικό πόλο

κάθετα στο επίπεδο. Μέ αυτά τά πειραματικά άποτελέσματα δέν μπορούμε ν' άποφύγουμε ένα συμέρασμα σχετικό μέ τήν διεύθυνση τής έπενεργούσας δύναμης.

Αυτό τό πείραμα είναι ενδιαφέρον πρώτα γιατί θεμελιώνει μιά σχέση ανάμεσα σέ δυό φαινόμενα πού έμοιαζαν νά είναι τέλεια διαφορετικά, τό μαγνητισμό και τό ήλεκτρικό ρεύμα. Αλλά παρουσιάζει και μιά άλλη όψη, πού είναι πολύ πιο σημαντική. Η δύναμη μεταξύ του μαγνητικού πόλου και των μικρών κομματιών του σύρματος, κατά μήκος του όποιου διέρχεται τό ρεύμα δέν μπορεί νά τοποθετηθεί πάνω σέ γραμμές πού συνδέουν τό σύρμα και κατά τή βελόνα, ή πάνω σέ φορτισμένα ήλεκτρικά σωματίδια και σέ στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα. Η δύναμη είναι κάθετη πάνω σ' αυτές τις γραμμές. Για πρώτη φορά παρουσιάζεται μιά δύναμη πού είναι ολοκληρωτικά διαφορετική άπό αυτήν στην όποία, σύμφωνα μέ τήν μηχανική μας άποψη, θέλαμε νά άνάγουμε όλες τις δράσεις του έξωτερικού κόσμου." Ας θυμηθοΰμε ότι οι δυνάμεις τής βαρύτητας, του ήλεκτρισμού και του μαγνητισμού, πού ύπακούουν στους νόμους του Newton και Coulomb, έπενεργούν κατά μήκος μίας γραμμής πού συνδέει τά δυό σώματα πού ή έλκονται ή άπωθοΰνται.

Στη συνέχεια αυτή ή δυσκολία επιδεινώθηκε μ' ένα πείραμα πού έκανε μέ μεγάλη προσοχή ό Rowland έδω και περίπου εξήντα χρόνια. Αφίνοντας κατά μέρος τις τεχνικές λεπτομέρειες, αυτό τό πείραμα μπορεί νά περιγραφεί μέ τόν άκόλουθο τρόπο." Ας φαντασθοΰμε μιά μικρή φορτισμένη σφαίρα πού κινείται ταχύτατα στην περιφέρεια ενός κύκλου, στο κέντρο του όποιου βρίσκεται μιά μαγνητική βελόνα. Ως



πρός την αρχή του είναι το ίδιο πείραμα με του Ørsted, με μία μόνο διαφορά, ότι αντί ένα συνηθισμένο ρεύμα έχουμε ένα ηλεκτρικό φορτίο που κινείται μηχανικά. Ο Rowland βρήκε ότι το αποτέλεσμα είναι όμοιο με αυτό που παρατηρεί κανείς όταν το κυκλικό σύρμα διατρέχεται από ρεύμα. Ο μαγνήτης αποκλίνει λόγω μιας κάθετης δύναμης.

Ας επιβάλουμε τώρα στο φορτίο μία ακόμη πιο γρήγορη κίνηση. Το αποτέλεσμα είναι ότι η δύναμη που επενεργεί πάνω στο μαγνητικό πόλο αυξήθηκε. Η απόκλιση του από την αρχική του θέση παρατηρείται περισσότερο. Αυτή όμως η παρατήρηση μας εμφανίζει μία έντονότερη περιπλοκή. Όχι μόνο η δύναμη δεν βρίσκεται πάνω στη γραμμή που συνδέει το φορτίο με το μαγνήτη, αλλά η έντασή της εξαρτάται από την ταχύτητα του φορτίου. Η μηχανική άποψη ήταν βασισμένη εξ ολοκλήρου στην υπόθεση ότι όλα τα φαινόμενα μπορούν να ερμηνευθούν με τη βοήθεια των δυνάμεων που εξαρτώνται μόνο από την απόσταση και όχι από την ταχύτητα. Το αποτέλεσμα του πειράματος του Rowland κλονίζει αυτή την υπόθεση. Αλλά μας επιτρέπεται να κρατήσουμε μία συγκρατημένη θέση και να ψάξουμε μία λύση στο φάσμα των παλιών ιδεών.

Δυσκολίες αυτού του είδους που δημιουργούν φαινόμενα ξαφνικά κι' αναπάντεχα κατά την θριαμβευτική ανάπτυξη μιας θεωρίας, συναντιώνται συχνά στην επιστήμη. Καμιά φορά μία απλή γενίκευση των παλιών ιδεών μοιάζει, έστω και προσωρινά, να μας δίνει μία διέξοδο. Θα μας άρκοῦσε στην περίπτωση που μας απασχολεί να διευρύνουμε την παλιά άποψη εισάγοντας πιο γενικευμένες δυνάμεις μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων. Πολύ συχνά όμως είναι αδύνατο να μπαλώσουμε μία παλιά θεωρία, και οι δυσκολίες οδηγούν στην καταστροφή της και στην δημιουργία μιας καινούργιας θεωρίας. Εδώ δεν είναι μόνο η συμπεριφορά της μικρής μαγνητικής βελόνας που κατέστρεψε τις μηχανικές θεωρίες, που ήταν πριν καλά βασισμένες και είχαν σιεφθεί από επιτυχίες. Ένα άλλο κτύπημα, πολύ πιο γερό, κατευθύνθηκε πάνω σ' αυτές από ένα τελείως διαφορετικό σημείο. Αλλά αυτό είναι μία άλλη ιστορία που θα συναντήσουμε πιο κάτω.

## Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Στις δύο καινούργιες επιστήμες του Γαλιλαίου παρακολουθούμε τη συζήτηση του δάσκαλου και των δαδών του πάνω στην ταχύτητα του φωτός:

Sagredo: Αυτή η ταχύτητα του φωτός τί είδους είναι και ποιό τό μέγεθός της; Είναι στιγμιαία ή έχει όπως η κίνηση των άλλων σωμάτων, ανάγκη κάποιου χρόνου. Δεν μπορούμε ν' απαντήσουμε σ' αυτή την ερώτηση πειραματικά;

Simplicio: Η καθημερινή εμπειρία δείχνει ότι η διάδοση του φωτός είναι στιγμιαία. Γιατί όταν βλέπουμε μία ριπή κανονιού από μακριά, η λάμψη φθάνει στα μάτια μας χωρίς τό παραμικρό χρονικό διάστημα ενώ ο ήχος φθάνει σ' αὐτί μας μετά ένα εμφανές χρονικό διάστημα.

Sagredo: Ωραία, Simplicio, τό μόνο πράγμα που μπορώ να συμπεράνω απ' αυτό τό αδύναμο πείραμα είναι ότι ο ήχος που φθάνει σ' αὐτιά μας μετακινείται πιο άργά απ' τό φῶς. Δεν μέ πληροφορεῖ αν η διάδοση του φωτός είναι στιγμιαία, ή αν όλα γίνονται πάρα πολύ γρήγορα, όμως χρειάζεται χρόνο.

Salviati: Τό ἀμφίβολο συμπέρασμα που αναφέρεται σέ τέτοιες παρατηρήσεις και σ' άλλες παρόμοιες μέ οδηγήσαν να φαντασθῶ μία μέθοδο που καθορίζει μέ βεβαιότητα αν η λάμψη, δηλαδή η διάδοση του φωτός, είναι πραγματικά στιγμιαία.

Ο Salviati συνεχίζει εξηγώντας τη μέθοδο του πειράματός του. Για να καταλάβουμε την ιδέα του ας υποθέσουμε ότι η ταχύτητα του φωτός δεν είναι μόνον πεπερασμένη αλλά και μικρή δηλαδή μετακινείται σέ πολύ βραδύ ρυθμό όπως συμβαίνει και μέ ένα επιβραδυνόμενο φιλμ. Δυό άνθρωποι ο Α και ο Β που κρατούν δυό φῶτα μέ θαμπό φῶς βρίσκονται σέ μία απόσταση ενός χιλιομέτρου ο ένας από τόν άλλο. Ήταν συμφωνημένο μεταξύ τους ότι πρώτος ο Α θά ξεθάμπωνε τό φῶς του (θά ξβγαζε από πάνω του ένα λεπτό ύφασμα) και μόλις ο Β έβλεπε τό φῶς του Α τότε θά ξεθάμπωνε κι' αὐτός τό δικό του. Ας υποθέσουμε ότι στην «βραδεία κίνησή μας», τό φῶς

διατρέχει ένα χιλιόμετρο ανά δευτερόλεπτο. Ο Α στέλνει ένα σήμα ξεθαμπώνοντας το φανάρι του. Ο Β τό αντιλαμβάνεται μετά ένα δευτερόλεπτο και στέλνει τό δικό του σῶμα σάν απάντηση. Αυτό τό σῶμα συλλαμβάνεται από τόν Α δύο δευτερόλεπτα από τή στιγμή πού έστειλε τό δικό του σήμα. Αυτό σημαίνει ότι αν τό φῶς διαδίδεται μέ ταχύτητα ένα χιλιόμετρο στό δευτερόλεπτο, θά περάσουν δύο δευτερόλεπτα μεταξύ τῆς αποστολῆς και τῆς λήψης τοῦ σήματος από τόν Α, ἐφ' ὅσον ἡ απόσταση από τόν Β είναι ένα χιλιόμετρο. Αντίστροφα αν ὁ Α δέν γνωρίζει τήν ταχύτητα τοῦ φωτός και αν, ὑποθέτοντας ότι ὁ συνάδελφός τους ανταποκρίνεται στή συνθήκη, βλέπει τό ξεθαμπωμένο φανάρι δύο δευτερόλεπτα μετά τό δικό του ξεθάμπωμα, ὁπότε ἔχει τό δικαίωμα νά συμπεράνει ότι τό φῶς τρέχει μέ ταχύτητα ένα χιλιόμετρο στό δευτερόλεπτο.

Μέ τήν πειραματική τεχνική πού διέθεταν ἐκεῖνο τόν καιρό, ἦταν ἀρκετά δύσκολο στό Γαλιλαῖο νά μπορέσει νά προσδιορίσει τήν ταχύτητα τοῦ φωτός. "Αν ἡ απόσταση ἦταν ένα χιλιόμετρο ἔπρεπε νά μετρήσει χρονικά διαστήματα τῆς τάξης τοῦ ἑνός τριακοστοῦ χιλιοστοῦ τοῦ δευτερολέπτου.

$$\left(\frac{1}{300.000} \text{ sec}\right)$$

Ο Γαλιλαῖος τοποθέτησε τό πρόβλημα τοῦ καθορισμοῦ τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός, ἀλλά δέν μπόρεσε νά τό λύσει. Νά τοποθετήσει κανείς ένα πρόβλημα είναι συχνά πολύ πύ ουσιαστικό ἀπό τοῦ νά δώσει μιά λύση, πού αὐτή μπορεῖ νά είναι μιά ὑπόθεση μαθηματικῆς ἰκανότητας ἢ πειράματος. Νά γεννιῶνται καινούργιες ἐρωτήσεις και καινούργιες δυνατότητες, νά ἀντιμετωπίζονται τά παλιά προβλήματα κάτω από μιά καινούργια σκοπιά, αὐτά ὅλα ἀπαιτοῦν μιά δημιουργική φαντασία πού σημαδεύει μιά πραγματική πρόοδο στήν ἐπιστήμη. Ἡ ἀρχή τῆς ἀδράνειας, ὁ νόμος τῆς διατήρησης τῆς ἐνέργειας προέκυψαν μόνο ἀπό καινούργιους και ἀθθεντικούς προβληματισμούς πάνω σέ πειράματα και φαινόμενα πού ἦταν ἤδη

γνωστά. Θά βροῦμε πολλά παραδείγματα αὐτοῦ τοῦ εἶδους στίς ἐπόμενες σελίδες αὐτοῦ τοῦ βιβλίου, ἀπό ὅπου θά προκύψει πόσο είναι σημαντικό νά ἀντιμετωπίζονται τά γνωστά σημερινά γεγονότα μέ καινούργιες θεωρίες.

Ἐπανερχόμενοι στό σχετικό ἀπλό πρόβλημα τοῦ καθορισμοῦ τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός, δέν μᾶς ἐμποδίζει τίποτα νά μὴν ἐκπλαγοῦμε γιατί ὁ Γαλιλαῖος δέν σκέφθηκε νά κάνει τό πείραμά του μ' ένα πύ ἀπλό και ἀκριβῆ τρόπο και μ' ένα μόνο ἄνθρωπο. Ἀντί νά τοποθετήσει τό συνάδελφό του σέ μιά κάποια απόσταση δέν εἶχε παρά νά τοποθετήσει ένα καθρέπτη ὁ ὁποῖος αὐτόματα θά τοῦ ξανάστελνε τό σήμα τή στιγμή πού θά τό λάμβανε.

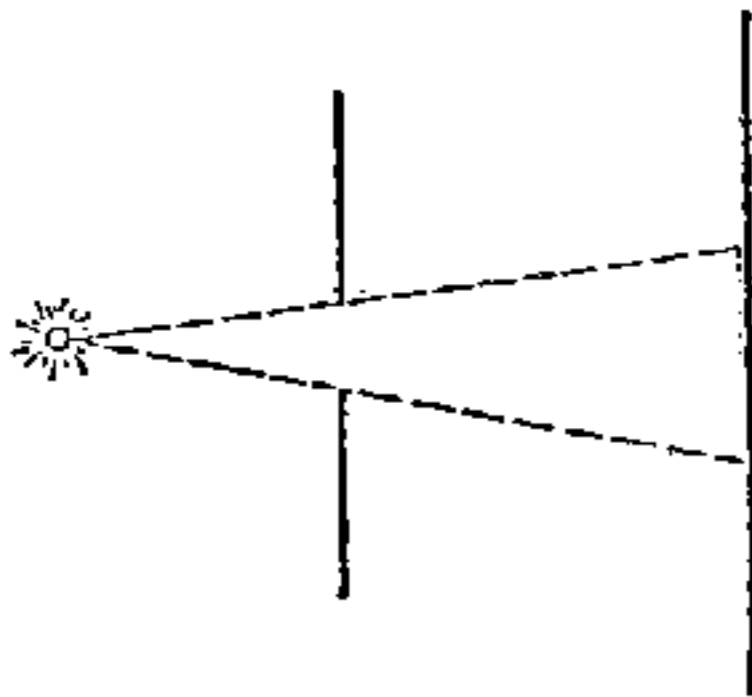
Αὐτή ἡ ἀρχή χρησιμοποιήθηκε διακόσια πενήντα χρόνια περίπου μετά ἀπό τόν Fizeau, τόν πρῶτο πού καθόρισε τήν ταχύτητα τοῦ φωτός μέ ἐπίγεια πειράματα. Ἀλλά και ὁ Roemer ἀρκετά πρῖν ἀπ' αὐτόν, εἶχε ἤδη προσδιορίσει τήν ταχύτητα τοῦ φωτός μέ ἀστρονομικές παρατηρήσεις, ἄσχετα αν ὁ τρόπος ἦταν λιγότερο ἀκριβῆς.

Εἶναι τελείως ξεκάθαρο ότι, δεδομένης τῆς τεράστιας τιμῆς τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός, δέν μπορούσε νά μετρηθεῖ παρά μόνο αν λαμβάνονταν ἀποστάσεις ἀνάλογες μ' αὐτές πού χωρίζουν τή Γῆ ἀπό ένα ἄλλο πλανῆτη τοῦ ἡλιακοῦ μας συστήματος ἢ, χρησιμοποιώντας μιά πολύ λεπτή πειραματική τεχνική. Ἡ πρώτη μέθοδος ἦταν τοῦ Roemer και ἡ δεύτερη τοῦ Fizeau. Ἀπό τίς μέρες πού ἔγιναν αὐτά τά δύο πειράματα, ὁ σημαντικός ἀριθμός πού παριστάνει τήν ταχύτητα τοῦ φωτός προσδιορίσθηκε μέ πολυάριθμες ἐπαναλήψεις πού εἶχαν μιά ἀξάνομενη ἀκρίβεια. Ἐξ ἄλλου στήν Ἀμερική ὁ Michelson καθιέρωσε μιά πολύ λεπτή τεχνική πού ἐξυπηρετοῦσε αὐτό τό σκοπό. Τά ἀποτελέσματα αὐτῶν τῶν πειραμάτων μποροῦν νά περιγραφοῦν μέ ἀπλό τρόπο. Ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός στό κενό είναι περίπου 300.000 χιλιόμετρα στό δευτερόλεπτο.

## ΤΟ ΦΩΣ ΣΑΝ ΟΥΣΙΑ

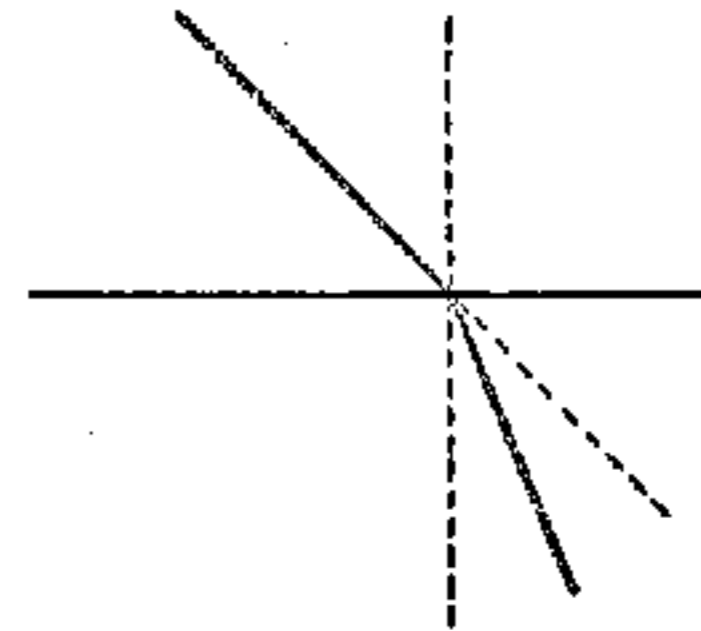
Ξανά θά ξεκινήσουμε από μερικά πειραματικά δεδομένα. Ο αριθμός πού αναφέραμε πίο πάνω ανταποκρίνεται στην ταχύτητα του φωτός στο κενό. Αν δέν διαταράζεται στην πορεία του τό φῶς διαδίδεται μ' αυτή τήν ταχύτητα σέ κενό χῶρο. Μποροῦμε νά δοῦμε μέσα από ένα γυάλινο δοχείο εἴτε αὐτό ἔχει ἀέρα μέσα εἴτε ὄχι. Βλέπουμε τούς πλανήτες, τά ἄστρα, τά νεφελώματα ἐνῶ τό φῶς πού μᾶς ἔρχεται πορεύεται μέσω κενοῦ διαστήματος. Τό ἀπλό γεγονός ὅτι μποροῦμε νά δοῦμε καί διά μέσου τοῦ γυάλινου δοχείου καλά, εἴτε αὐτό περιέχει ἀέρα εἴτε ὄχι, ἀποδεικνύει ὅτι ἡ παρουσία τοῦ ἀέρα ἔχει μικρή σημασία. Μποροῦμε λοιπόν γι' αὐτό νά κάνουμε ὀπτικά πειράματα σ' ένα συνηθισμένο χῶρο καί νά πάρουμε τό ἴδιο ἀποτέλεσμα πού θά παίρναμε ἂν ὁ χῶρος ἦταν χωρίς ἀέρα.

Τό πίο ἀπλό ὀπτικό φαινόμενο εἶναι ἡ εὐθύγραμμη διάδοση του φωτός. Θά περιγράψουμε ένα πρωτόγονο καί ἀπλό πείραμα ἀπό τό ὁποῖο θά προκύψει ἡ παραπάνω διαπίστωση. Μπροστά σ' ένα φωτεινό σημεῖο τοποθετοῦμε μιά ὀθόνη μέ μιά ὀπή.



“Ένα φωτεινό σημεῖο εἶναι μιά φωτεινή πηγή πολύ μικρή, γιά παράδειγμα, ένα μικρό ἀνοιγμα πάνω σ' ένα κλειστό φανάρι. Πάνω σ' ένα ἀπομακρυσμένο τοῖχο ἡ ὀπή τῆς ὀθόνης θά φανεῖ σά φωτεινός λεκές πάνω σ' ένα σκοτεινό φόντο. Τό παραπάνω σχῆμα δείχνει πῶς συνδέεται αὐτό τό φαινόμενο μέ τήν εὐθύγραμμη διάδοση τοῦ φωτός. Όλα τά φαινόμενα αὐτοῦ τοῦ εἴδους κι' ἀκόμη οἱ πίο πολύπλοκες περιπτώσεις πού ἐμφανίζονται τό φῶς, ἡ σκιά καί ἡμισκίαση, μποροῦν νά ἐξηγηθοῦν ὑποθέτοντας ὅτι τό φῶς διαδίδεται στο κενό ἢ στόν ἀέρα ἀκολουθώντας εὐθύγραμμη διάδοση.

“Ας πάρουμε ένα ἄλλο παράδειγμα, τήν περίπτωση πού τό φῶς περνᾷ μέσω μῆς ὕλης. Έχουμε μιά ἀκτίνα πού ὀδεύει μέσω τοῦ κενοῦ καί πέφτει πάνω σέ μιά γυάλινη πλάκα. Τί συμβαίνει;

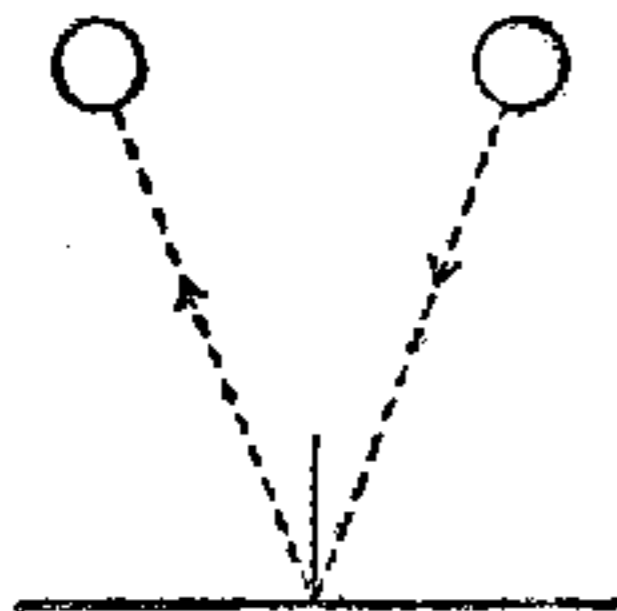


“Αν ὁ νόμος τῆς εὐθύγραμμης κίνησης ἴσχυε πάντα ὁ δρόμος θάταν αὐτός πού σημειώνεται μέ τή διακεκομμένη γραμμή. Ἀλλά στην πραγματικότητα δέν εἶναι ἔτσι. Ἡ εὐθεῖα ὅπως φαίνεται καί στο σχῆμα διαθλάται. Αὐτό πού παρατηροῦμε ἐδῶ εἶναι τό γνωστό φαινόμενο τῆς διάθλασης. Ἡ ράβδος πού, βυθιζόμενη

κατά ένα μέρος της στο νερό, φαίνεται σπασμένη στο σημείο που εισχωρεί στο ύγρο, είναι μιά απ' τις πολυάριθμες εκδηλώσεις της διάθλασης.

Αυτά τὰ φαινόμενα ἄρκοῦν γιὰ νὰ δείξουν πῶς κατάφεραν νὰ φαντασθοῦν μιά ἀπλή μηχανική θεωρία γιὰ τὸ φῶς. Ὁ σκοπὸς μας ἐδῶ εἶναι νὰ δείξουμε μὲ πιά τρόπο οἱ ἰδέες τῆς οὐσίας, τῶν σωματιδίων καὶ τῶν δυνάμεων διείσδυσαν στὴν περιοχὴ τῆς ὀπτικῆς καὶ πῶς τελικά, ἡ παλιά φιλοσοφικὴ ἄποψη διαλύθηκε.

Ἡ θεωρία παρουσιάζεται ἐδῶ μὲ τὴν πιὸ ἀπλή καὶ πρωτόγονη μορφή της. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι ὅλα τὰ φωτεινὰ σώματα ἐκπέμπουν σωματίδια ἢ μέρια φωτός πού χτυπώντας τὰ μάτια μας, μᾶς προκαλοῦν τὴν αἴσθησι τοῦ φωτός. Εἴμαστε ἤδη τόσο συνηθισμένοι νὰ εἰσάγουμε καινούργιες οὐσίες ἂν μᾶς εἶναι ἀπαραίτητο νὰ τὸ κάνουμε γιὰ νὰ δώσουμε μιά μηχανικὴ ἐξήγηση, πού τώρα μπορούμε νὰ τὸ ξανακάνουμε ἄλλη μιά φορά χωρὶς νὰ τὸ πολυσκεφθοῦμε. Αὐτά τὰ μέρια ὀφείλουν νὰ μετακινοῦνται στὸν κενὸ χῶρο μὲ μιά γνωστὴ ταχύτητα κατὰ μῆκος εὐθειῶν φέρνοντας στὰ μάτια μας μηνύματα ἀπὸ τὰ σώματα πού ἐκπέμπουν φῶς. Ὅλα τὰ φαινόμενα πού παρουσιάζουν ὅτι ἡ διάδοσι τοῦ φωτός εἶναι εὐθύγραμμη ὑποβοηθοῦν τὴν θεωρία τῶν μορίων, γιατί ἀκριβῶς περιγράφηκε αὐτοῦ τοῦ εἴδους ἡ κίνηση στὰ μέρια. Ἡ θεωρία ἐξηγεῖ ἐπίσης μ' ἓνα πολὺ ἀπλό τρόπο τὴν ἀντανάκλαση τοῦ φωτός πάνω στὸν καθρέπτη ὅπως ἀκριβῶς τὰ λαστιχένια μπαλλάκια πού ἐκτοξεύονται πάνω σ' ἓνα τοῖχο, ὅπως δείχνει καὶ τὸ παρακάτω σχῆμα.



Ἡ ἐξήγηση τῆς διάθλασης εἶναι λίγο δύσκολη. Χωρὶς νὰ μποῦμε σὲ λεπτομέρειες, μπορούμε νὰ δοῦμε ὅτι ὑπάρχει δυνατότητα νὰ δώσουμε μιά μηχανικὴ ἐξήγηση. Ὅταν τὰ μέρια κτυποῦν μιά γυάλινη ἐπιφάνεια εἶναι δυνατόν νὰ ἐξασκεῖται μιά δύναμη πάνω τους ἀπὸ τὰ μέρια τῆς ὕλης, μιά δύναμη πού κατὰ παράξενο τρόπο, ἐπιδρᾷ μόνο στὴν περιοχὴ πού βρίσκεται σὲ ἄμεση ἐπαφὴ μὲ τὴν ὕλη. Μιά δύναμη πού ἐπενεργεῖ πάνω σ' ἓνα κινούμενο μέρος ὅπως ἔχουμε ἤδη δεῖ ἀλλάζει τὴν ταχύτητά του. Ἄν ἡ ἐπιδρῶσα πάνω στὰ μέρια τοῦ φωτός δύναμη εἶναι μιά κατακόρυφη πάνω στὴν ἐπιφάνεια τοῦ γυαλιοῦ ἄπωση, ἡ καινούργια γραμμὴ τῆς κίνησης θὰ βρίσκεται κάπου ἀνάμεσα στὴν κατακόρυφη καὶ στὴν προέκτασι τῆς ἀρχικῆς γραμμῆς κίνησης. Αὐτὴ ἡ ἀπλή ἐξήγηση μοιάζει νὰ ὑπόσχεται ἐπιτυχία τῆς μοριακῆς (σωματιδιακῆς) θεωρίας τοῦ φωτός. Ἐν τούτοις γιὰ νὰ δείξουμε τὴ χρήση τῆς θεωρίας καὶ τὴν ἔκτασι τῆς ἀξίας της πρέπει νὰ διερευνήσουμε καινούργια καὶ πιὸ σύνθετα γεγονότα.

## ΤΟ ΑΙΝΙΓΜΑ ΤΟΥ ΧΡΩΜΑΤΟΣ

Πάλι ἡ μεγαλοφυΐα τοῦ Newton ἐξήγησε γιὰ πρώτη φορά τὸν πλοῦτο τῶν χρωμάτων στὸν κόσμος. Νὰ μιά περιγραφή ἑνὸς πειράματος τοῦ Newton πού ἐπαναλήφθηκε μὲ τοὺς δικούς του ὁρους:

Τὸ ἔτος 1666 κάποια στιγμή βάλθηκα νὰ γυαλίσω ὀπτικά γυαλικά διαφορετικῶν σχημάτων ἐκτὸς ἀπὸ σφαιρικά. Τότε προμηθεύθηκα κι' ἓνα τριγωνικὸ γυάλινο πρίσμα γιὰ νὰ κάνω πειράματα στὸ περίφημο φαινόμενο τῶν χρωμάτων. Ἀφοῦ σκοτεινίασα τὸ δωμάτιό μου καὶ ἄνοιξα μιά μόνο ὀπή στὸ παράθυρο γιὰ νὰ εἰσχωρεῖ μιά ποσότητα ἡλιακοῦ φωτός ἀρκετὴ γιὰ τὰ πειράματά μου τοποθέτησα τὸ πρίσμα μου μπροστὴ στὸ ἄνοιγμα, ἔτσι ὥστε τὸ φῶς πού εἶχε ὑποστῆ διάθλαση νὰ πέφτει στὸν ἀπέναντι τοῖχο. Στὴν ἀρχὴ ἦταν μιά πολὺ εὐχάριστη διασκέδασι νὰ θανατᾶζει κανεὶς τὰ ζωηρὰ καὶ ἔντονα χρώματα πού παράγονταν ἔτσι.

Τό φῶς τοῦ ἡλίου εἶναι «λευκό». Ἀφοῦ ὁμοῦ διασχίσει ἕνα πρίσμα φανερώνει τά χρώματα πού ὑπάρχουν στόν ὁρατό κόσμο. Ἡ φύση ἀναπαράγει τό ἴδιο ἀποτέλεσμα στήν ὠραία ποικιλία τῶν χρωμάτων τοῦ οὐράνιου τόξου. Ὁ τάσεις νά ἐξηγηθεῖ αὐτό τό φαινόμενο εἶναι πολύ παλιές. Ἡ ἱστορία πού περιγράφεται στή Βίβλο ὅτι τό οὐράνιο τόξο εἶναι ἕνα σημάδι συμμαχίας τοῦ Θεοῦ μέ τόν ἄνθρωπο, μέ κάποια ὀρισμένη ἔννοια εἶναι «θεωρία». Ἀλλά δέν ἐξηγεῖ μέ ἱκανοποιητικό τρόπο γιατί τό οὐράνιο τόξο ἐμφανίζεται ἀπό καιρό σέ καιρό καί πάντα σέ συνάρτηση μέ τή βροχή. Γιά πρώτη φορά παρουσιάσθηκε τό αἶνιγμα τοῦ χρώματος στό μεγάλο σύγγραμμα τοῦ Newton ὅπου ἐπιστημονικά ἀντιμετωπίσθηκε καί ἡ λύση του ἐκφράσθηκε.

Ἡ μιᾶ πλευρά τοῦ οὐράνιου τόξου εἶναι πάντα κόκκινη καί ἡ ἄλλη ἰώδης. Ἀνάμεσα σ' αὐτές τῆς ἄκρες εἶναι ταξινομημένα τά ἄλλα χρώματα. Ἡ ἐξήγηση πού δίνει ὁ Newton σ' αὐτό τό φαινόμενο εἶναι ἡ ἀκόλουθη: Κάθε χρώμα περιέχεται ἤδη μέσα στό λευκό φῶς. Διασχίζουν ὅλα μαζί τό διαπλανητικό διάστημα καί τήν ἀτμόσφαιρα καί δημιουργοῦν τό ἀποτέλεσμα τοῦ λευκοῦ φωτός. Τό λευκό λοιπόν φῶς εἶναι ἕνα μίγμα μορίων διαφορετικοῦ εἶδους πού ἀνήκουν σέ διαφορετικά σώματα. Στήν περίπτωση τοῦ πειράματος τοῦ Newton τό πρίσμα τά διαχωρίζει στό χῶρο. Σύμφωνα μέ τή μηχανική θεωρία ἡ διάθλαση ὀφείλεται σέ δυνάμεις πού ἐνεργοῦν πάνω στά μόρια τοῦ φωτός καί πού προέρχονται ἀπό τά σωματίδια τοῦ γυαλιοῦ. Αὐτές οἱ δυνάμεις εἶναι διαφορετικές γιά τά σωματίδια διαφορετικοῦ χρώματος, ὄντας πιά ἔντονες γιά τό ἰώδες χρώμα καί ἀσθενέστερες γιά τό κόκκινο. Κατά συνέπεια κάθε χρώμα θά διαθλαθεῖ κατά μήκος ἑνός διαφορετικοῦ δρόμου καί θά διαχωρισθεῖ ἀπό τά ἄλλα χρώματα ὅταν τό φῶς ἐγκαταλείπει τό πρίσμα. Στήν περίπτωση τοῦ οὐράνιου τόξου οἱ σταγόνες τοῦ νεροῦ παίζουν τό ρόλο τοῦ πρίσματος.

Ἡ θεωρία σύμφωνα μέ τήν ὁποία τό φῶς εἶναι μιᾶ οὐσία περιπλέκεται τώρα περισσότερο ἀπό πρὶν. Δέν ἔχουμε μιᾶ μοναδική οὐσία, ἀλλά περισσότερες, πού ἡ κάθε μιᾶ ἀνήκει σ'

ἕνα διαφορετικό χρώμα. Ἐν τούτοις ἂν ἡ θεωρία περιέχει κι' ἕνα μέρος ἀλήθειας αὐτά τά συμπεράσματα πρέπει νά βρίσκονται σέ ἄρμονία μέ τήν ἐμπειρία.

Ἡ σειρά τῶν χρωμάτων στό λευκό ἡλιακό φῶς πού προέκυψε ἀπό τά πειράματα τοῦ Newton, ὀνομάσθηκε τό *φάσμα* τοῦ ἡλίου ἢ ἀκριβέστερα τό *ὁρατό φάσμα*. Ἡ ἀποσύνθεση τοῦ λευκοῦ φωτός στά συστατικά του, ὅπως τά περιγράψαμε, ὀνομάσθηκε *ἀνάλυση* τοῦ φωτός. Ἄν ἡ ἐξήγηση πού δόθηκε δέν εἶναι σφαιερῆ θά ἔπρεπε νά μπορούσαμε, μ' ἕνα δεύτερο πρίσμα κατάλληλα τοποθετημένο, νά ἀναμίξουμε τά διαχωρισμένα χρώματα τοῦ φάσματος. Ὁ τρόπος θά ἦταν ἀκριβῶς ὁ ἀντίθετος τοῦ προηγούμενου ἂν μπορούσαμε νά πάρουμε ἀπό τά διαχωρισμένα χρώματα λευκό φῶς. Ὁ Newton ἀπόδειξε πειραματικά ὅτι εἶναι πραγματικά δυνατό νά πάρουμε ἀπό τά διαχωρισμένα μ' αὐτό τόν ἀπλό τρόπο, καί ὅσο συχνά θέλουμε, λευκό φῶς ἀπ' τό φάσμα του καί τό φάσμα τοῦ λευκοῦ φωτός. Αὐτά τά πειράματα σχημάτισαν ἕνα ἰσχυρό ἔρεισμα γιά τή θεωρία, σύμφωνα μέ τήν ὁποία τά μόρια τά ἀνήκοντα σέ κάθε χρώμα συμπεριφέρονται σάν ἀμετάβλητες οὐσίες. Ἐτσι ὁ Newton ἔγραψε:

*...τά ὁποία χρώματα δέν δημιουργήθηκαν πρόσφατα, ἀλλά μόνον ἔγιναν ὁρατά διά τοῦ διαχωρισμοῦ τους. Γιατί ἂν ἀναμιχθοῦν πλήρως ἐκ νέου θά σχηματίσουν τό χρώμα πού εἶχαν πρὶν τόν διαχωρισμό τους. Καί γιά τόν ἴδιο λόγο οἱ δημιουργούμενες μετατροπές ἀπό τή σύνθεση τῶν διαφόρων χρωμάτων δέν εἶναι πραγματικές, γιατί οἱ διαφορετικές αὐτές ἀκτίνες ὅταν διαχωρισθοῦν ξανά θά ἐμφανίσουν τά ἴδια χρώματα πού εἶχαν πρὶν δημιουργήσουν τήν σύνθεση αὐτή. Ὅταν ἀναμιχθεῖ προσεκτικά μιᾶ πολύ λεπτή μπλέ σκόνη μέ μιᾶ ἐξ ἴσου λεπτή κίτρινη, τότε τό μίγμα φαίνεται μέ γυμνό μάτι πράσινο, ἂν καί τά χρώματα τῶν σωματιδίων πού σχηματίζουν τήν σύνθεση δέν μεταβάλλονται πραγματικά, ἀλλά μόνον ἀναμιγνύονται. Γιατί ἂν παρατηρήσουμε τό μίγμα μ' ἕνα καλό μικροσκόπιο θά διακρίνουμε μπλέ καί κίτρινους κόκκους ἀνυκατεμένους μέ ἀταξία.*

Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι ἡπομονώνουμε μιᾶ πολύ στενή λωρίδα

τοῦ φάσματος. Αὐτό σημαίνει ὅτι μόνο ἓνα χρώμα ἐπιτρέπουμε νά περάσει ἀπό τή σχισμὴ τῆς θόνης μας, ἢ ὁποία συγκρατεῖ τὰ ὑπόλοιπα χρώματα. Ἡ ἀκτῖνα πού περνάει ἀποτελεῖται ἀπὸ ἓνα ὁμογενές φῶς δηλαδή ἓνα φῶς πού δέν μπορεῖ νά διαχωρισθεῖ σέ συστατικά. Αὐτό εἶναι μιὰ συνέπεια τῆς θεωρίας καὶ μπορεῖ εὐκολά νά πιστοποιηθεῖ ἀπὸ τὸ πείραμα. Μιὰ τέτοια ἀκτῖνα ἀποτελούμενη ἀπὸ ἓνα μόνο χρώμα δέν μπορεῖ νά διαχωρισθεῖ μέ κανένα τρόπο. Ὑπάρχουν πολὺ ἀπλᾶ μέσα γιὰ νά ἔχουμε πηγές ὁμογενοῦς φωτός. Διάλυρα νάτριο γιὰ παράδειγμα ἐκπέμπει κίτρινο ὁμογενές φῶς. Ἐνδείκνυται συχνά νά ἐκτελοῦμε πειράματα στήν ὀπτική μέ ὁμογενές φῶς γιατί τὰ ἀποτελέσματα ὅπως εὐκολά γίνεται κατανοητό θά εἶναι ἀπλούστερα.

\* Ἄς φαντασθοῦμε ὅτι ξαφνικά συμβαίνει κάτι πολὺ παράξενο: ὁ ἥλιος μας ἀρχίζει νά ἐκπέμπει ὁμογενές φῶς κάποιου χρώματος, ἄς ποῦμε κίτρινου. Ἡ μεγάλη ποικιλία τῶν χρωμάτων πού ὑπάρχει στή γῆ θά εξαφανισθεῖ ἀμέσως. Κάθε πράγμα θά εἶναι κίτρινο ἢ μαῦρο.

Αὐτή ἡ πρόβλεψη εἶναι μιὰ συνέπεια τῆς θεωρίας πού θεωρεῖ τὸ φῶς σάν οὐσία, γιατί δέν μποροῦν νά δημιουργηθοῦν κανούργια χρώματα. Ἡ ἰσχὺ τῆς μπορεῖ νά πιστοποιηθεῖ πειραματικά: σ' ἓνα δωμάτιο πού ἡ μόνη πηγὴ φωτός εἶναι διάλυρο νάτριο κάθε ἀντικείμενο φαίνεται κίτρινο ἢ μαῦρο. Ὁ πλοῦτος τῶν χρωμάτων τῆς φύσης ἀποδεικνύει τὴν ποικιλία τῶν χρωμάτων πού συνθέτουν τὸ λευκὸ φῶς.

Ἡ θεωρία πού θεωρεῖ τὸ φῶς σάν οὐσία φαίνεται νά εἶναι σημαντικὰ ἀποτελεσματικὴ σ' ὅλες τὶς περιπτώσεις ἀκόμη κι' ἂν ἡ ὑποχρέωσή μας νά εἰσάγουμε τόσες οὐσίες ὅσες καὶ χρώματα μᾶς δημιουργεῖ κάποια δυσαρέσκεια. Ἡ ὑπόθεση ὅτι ὅλα τὰ σωματίδια τοῦ φωτός ἔχουν στὸν κενὸ χῶρο τὴν ἴδια ταχύτητα φαίνεται νά εἶναι πολὺ τεχνική.

Μποροῦμε νά φαντασθοῦμε ὅτι μιὰ σειρά ὑποθέσεων, μιὰ θεωρία μέ τελείως διαφορετικὸ χαρακτήρα θά ἦταν ἐξ ἴσου ἀποτελεσματικὴ καὶ θά ἔδινε ὅλες τὶς ἀπαραίτητες ἐξηγήσεις.

Πρακτικά θά παρακολουθήσουμε σέ λίγο τὴ γέννηση μιᾶς ἄλλης θεωρίας, βασισμένης σέ τελείως διαφορετικὲς ἔννοιες, πού ὁμως, παρ' ὅλα αὐτὰ ἐξηγεῖ τὰ ἴδια ὀπτικά φαινόμενα. Πρὶν σχηματίσουμε τὶς ὑποθέσεις πού βρίσκονται στή βάση τῆς θεωρίας αὐτῆς πρέπει νά ἀπαντήσουμε σέ μιὰ ἐρώτηση πού δέ συνδέεται καθόλου μ' αὐτὲς τὶς ὀπτικὲς παρατηρήσεις. Πρέπει νά ξαναγυρίσουμε στή μηχανικὴ καὶ νά διερωτηθοῦμε:

## ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΚΥΜΑ;

Μία εἶδηση φεύγει ἀπὸ τὴν Οὐάσιγκτων καὶ φθάνει πολὺ γρήγορα στή Νέα Ὑόρκη, ἂν καὶ κανένας κάτοικος πού λαβαίνει μέρος στή διάδοση τῆς εἶδησης δέν κάνει ταξίδι ἀπὸ τὴ μιὰ πόλη στήν ἄλλη. Στὴν περίπτωση αὐτὴ ὑπάρχουν δύο κινήσεις, ἢ μιὰ τῆς εἶδησης πού φεύγει ἀπὸ τὴν Οὐάσιγκτων γιὰ τὴ Νέα Ὑόρκη καὶ μιὰ τῶν προσώπων πού τὴν ἐξάπλωσαν. Ὁ ἀέρας πάνω ἀπὸ ἓνα ἀγρὸ μέ σιτάρι γεννάει ἓνα κύμα πού διαδίδεται κατὰ μῆκος ὄλου τοῦ ἀγροῦ. Κι' ἐδῶ μέ τὸν ἴδιο τρόπο μποροῦμε νά κάνουμε διάκριση στήν κίνηση τοῦ κύματος καὶ στήν κίνηση τοῦ καθενὸς σταχυοῦ πού δέν κάνει παρά μικρὲς μετακινήσεις. Ἐχουμε δεῖ ὅλα ὅσα ἀναφέρονται στὰ κύματα πού διαδίδονται μέ τὴ μορφή κύκλων πού ἡ διάμετρος τους μεγαλώνει ὅταν ρίξουμε μιὰ πέτρα σέ μιὰ λίμνη. Ἡ κίνηση τοῦ κύματος εἶναι πολὺ διαφορετικὴ ἀπὸ αὐτὴ τῶν μορίων τοῦ νεροῦ. Τὰ μόρια τοῦ νεροῦ ἀνηψάνονται καὶ βυθίζονται. Ἡ κίνηση τοῦ κύματος εἶναι μιὰ κίνηση τῆς κατάστασης τῆς ὕλης καὶ ὄχι αὐτῆς καθ' ἑαυτῆς τῆς ὕλης. Ἐνα πῶμα φελλοῦ πού ἐπιπλέει πάνω σ' ἓνα κύμα δεῖχνει φανερά τὸ εἶδος αὐτῆς τῆς κίνησης γιατί ἀνεβακατεβαίνει ἀκολουθώντας τὴν πραγματικὴ κίνηση τοῦ νεροῦ, ἀντὶ νά μεταφέρεται ἀπὸ τὸ κύμα.

Γιὰ νά καταλάβουμε καλύτερα τὸν μηχανισμό τοῦ κύματος ἄς ἐξετάσουμε ξανά ἓνα ἐξιδανικευμένο πείραμα. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι ἔχουμε στή διάθεσή μας ἓνα μεγάλο χῶρο πού εἶναι ὁμοιόμορφα γεμάτος μέ νερό ἢ ἀέρα, ἢ κάποιο ἄλλο «μέσο».

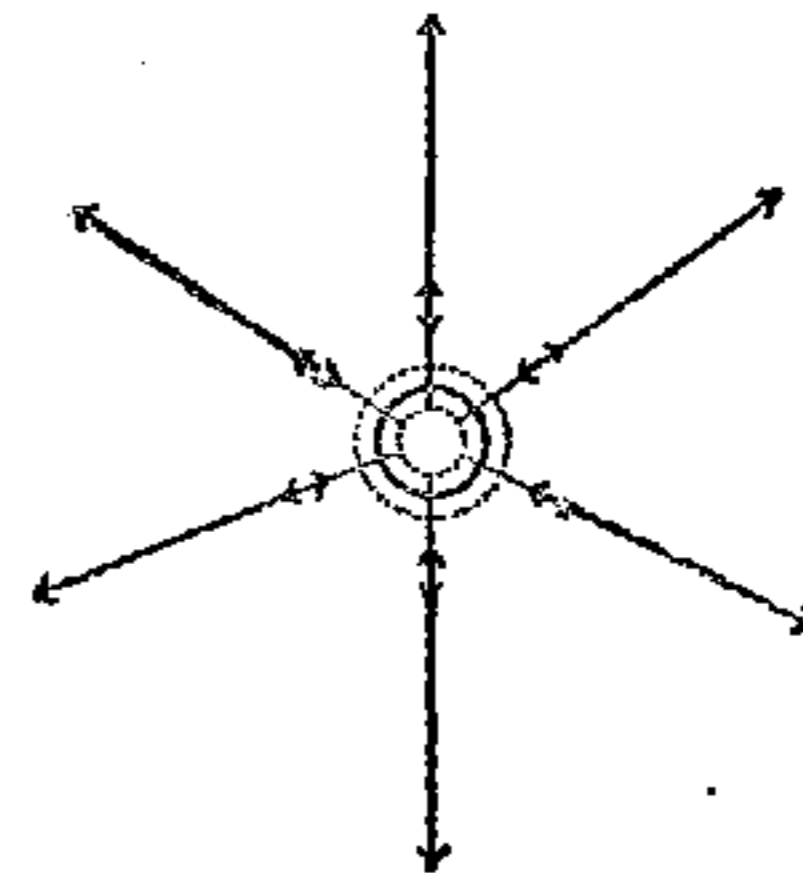
Κάπου στο κέντρο αὐτοῦ τοῦ χώρου βρίσκεται μιὰ σφαῖρα. Στὴν ἐναρξὴ τοῦ πειράματος δὲν ἐπισυμβαίνει καμμιά κίνηση. Ξαφνικά ἡ σφαῖρα ἀρχίζει νὰ «ἀναπνέει» ρυθμικά, διαστέλλεται καὶ συστέλλεται διατηρώντας τὸ σφαιρικό της σχῆμα. Ἄλλὰ τί θὰ συμβεῖ στοῦ μέσο; Ἄς ἀρχίσουμε τὴν παρατήρηση τῆ στιγμῆ πού ἡ σφαῖρα ἀρχίζει νὰ διαστέλλεται. Τὰ μόρια τοῦ μέσου πού βρίσκονται σ' ἄμεση ἐπαφή μὲ τὴ σφαῖρα ἀποθροῦνται πρὸς τὰ ἔξω, σὲ τρόπο ὡστε μιὰ σφαιρική ἐπιφάνεια νεροῦ ἢ ἀέρα, ἀνάλογα μὲ τὴν περίπτωση, ἀξάνει πάνω ἀπ' τὸ κανονικό της μέγεθος. Ὅμοια ὅταν ἡ σφαῖρα συστέλλεται ἡ πυκνότητα αὐτοῦ τῆς περιοχῆς τοῦ μέσου πού βρίσκεται σὲ ἄμεση ἐπαφή μ' αὐτὴν μειώνεται. Αὐτές οἱ ἀλλαγές τῆς πυκνότητας διαδίδονται μέσω ὅλης τῆς ποσότητος τοῦ μέσου. Τὰ μόρια πού ἀποτελοῦν τὸ μέσο δὲν πραγματοποιοῦν παρά μόνο μικρές ταλαντεύσεις, ἀλλὰ ἡ κίνηση στοῦ σύνολο τῆς εἶναι μιὰ κίνηση ἑνός διαδιδομένου κύματος. Αὐτὸ πού εἶναι οὐσιαστικά νέο ἐδῶ εἶναι ὅτι γιὰ πρώτη φορά διαπιστώνουμε τὴν κίνηση κάποιου πράγματος πού δὲν εἶναι ὕλη, ἀλλὰ ἐνέργεια, πού διαδίδεται διὰ μέσου τῆς ὕλης.

Χρησιμοποιώντας τὸ παράδειγμα τῆς παλλόμενης σφαίρας μποροῦμε νὰ εἰσάγουμε δύο γενικές φυσικές ἐννοιες, πού εἶναι σημαντικές γιὰ νὰ χαρακτηρίσουμε τὰ κύματα. Ἡ πρώτη εἶναι ἡ ταχύτητα μὲ τὴν ὁποία διαδίδεται ἓνα κύμα. Αὐτὴ θὰ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὸ μέσο καὶ θὰ εἶναι διαφορετικὴ ἀνάλογα ἂν ἔχει σχηματισθεῖ μὲ νερό ἢ μὲ ἀέρα. Ἡ δευτέρα ἐννοια εἶναι αὐτὴ τοῦ μήκους κύματος. Στὴν περίπτωση τῶν κυμάτων τῆς θάλασσας ἢ ἑνός ποταμοῦ τὸ μήκος κύματος εἶναι ἡ ἀπόσταση πού διαχωρίζει τὴν κοιλότητα τοῦ ἑνός κύματος ἀπὸ τὴν κοιλότητα τοῦ ἐπόμενου ἢ τὴν κορυφὴ τοῦ ἑνός ἀπὸ τὴν κορυφὴ τοῦ ἐπόμενου. Μ' αὐτὸ τὸ κριτήριον μποροῦμε νὰ ποῦμε ὅτι τὸ μήκος κύματος τῶν θαλασσινῶν κυμάτων εἶναι μεγαλύτερο ἀπὸ αὐτὸ τῶν ποταμῶν. Στὴν περίπτωση τῶν δικῶν μας κυμάτων πού παράγονται ἀπὸ τὴν παλλόμενη σφαῖρα τὸ μήκος κύματος εἶναι, σὲ μιὰ καθορισμένη στιγμῆ, ἡ ἀπόσταση ἀνάμεσα σὲ δύο γειτονικές σφαιρικές ἐπιφάνειες πού ἐμφανίζονται μέγιστη ἢ

ἐλάχιστη πυκνότητα. Εἶναι προφανές ὅτι αὐτὴ ἡ ἀπόσταση δὲν θὰ ἐξαρτᾶται ἀποκλειστικά ἀπὸ τὸ μέσο. Θὰ ἔχει σίγουρα μεγάλη ἐπίδραση καὶ ὁ ρυθμὸς τῆς παλμικῆς κίνησης τῆς σφαίρας. Ἄν ἡ παλμικὴ κίνηση εἶναι γρήγορη τὸ μήκος κύματος γίνεται μικρότερο ἐνῶ ἂν εἶναι πὸ ἀργή τὸ μήκος κύματος εἶναι μεγαλύτερο.

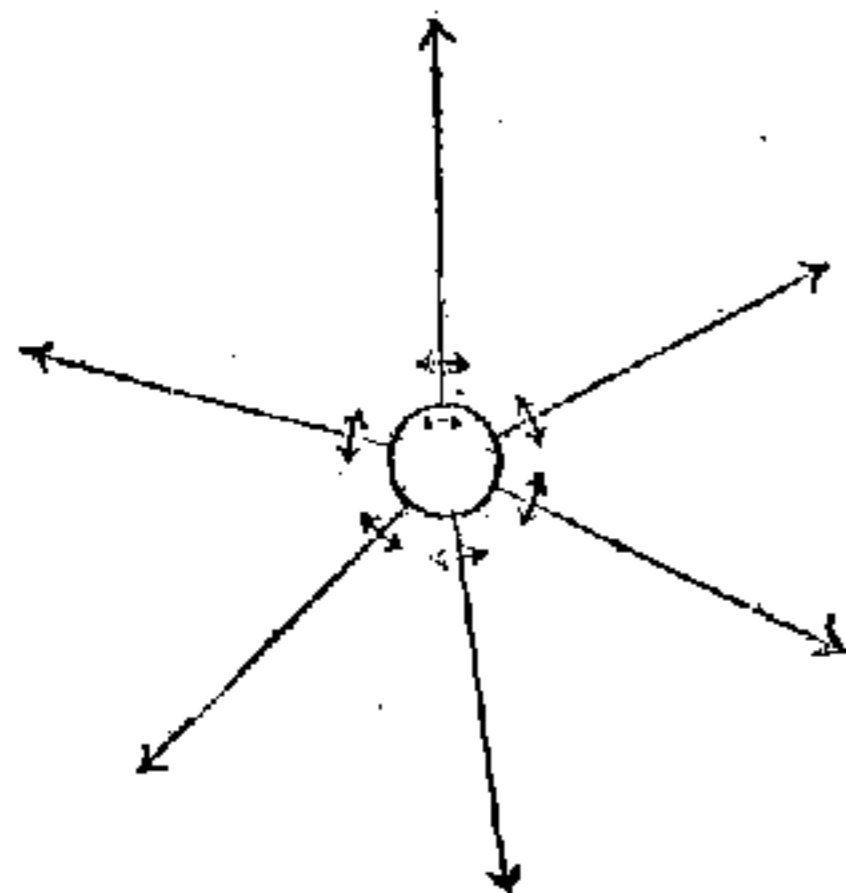
Αὐτὴ ἡ ἐννοια τοῦ κύματος φάνηκε πολὺ γόνιμη στὴ φυσική. Τὸ φαινόμενο ἀνάγεται στὴν κίνηση τῶν μορίων πού, σύμφωνα μὲ τὴν κινητικὴ θεωρία, εἶναι τὰ συστατικά τῆς ὅλης. Ἔτσι κάθε θεωρία πού μεταχειρίζεται τὴν ἐννοια τοῦ κύματος μπορεῖ γενικά νὰ θεωρηθεῖ σὰν μιὰ μηχανικὴ θεωρία. Ἡ ἐξήγηση τῶν φαινομένων τῆς ἀκουστικῆς γιὰ παράδειγμα βασίζεται οὐσιαστικά σ' αὐτὴ τὴν ἐννοια. Τὰ παλλόμενα σώματα ὅπως οἱ φωνητικὲς χορδές καὶ οἱ χορδές ἑνός βιολιού εἶναι οἱ πηγές τῶν ἠχητικῶν κυμάτων πού διαδίδονται μέσω τοῦ ἀέρα μὲ τὸν τρόπο πού παρουσιάσαμε μὲ τὴν εὐκαιρία τῆς παλλόμενης σφαίρας. Εἶναι ἔτσι δυνατό νὰ μεταφέρουμε ὅλα τὰ φαινόμενα τῆς ἀκουστικῆς μὲ τὴ βοήθεια τῆς ἐννοιας τοῦ κύματος στὴ μηχανική.

Ἐπιμείναμε στοῦ διαχωρισμὸ πού πρέπει νὰ κάνουμε ἀνά-



μεσα στην κίνηση τῶν μορίων καί σ' αὐτήν τῶν κυμάτων αὐτῶν καθ' ἑαυτῶν, πού εἶναι μιά κατάσταση τοῦ μέσου. Αὐτές οἱ δύο κινήσεις εἶναι πολύ διαφορετικές, ἀλλά εἶναι προφανές ὅτι στό παράδειγμα τῆς παλλόμενης σφαίρας μας οἱ δύο κινήσεις πραγματοποιοῦνται πάνω στήν ἴδια εὐθεία γραμμή. Τά μόρια τοῦ μέσου ταλαντεύονται κατά μήκος βραχέων τμημάτων καί ἡ πυκνότητα ἀξομειώνεται περιοδικά ἀνάλογα μέ τήν κίνηση. Ἡ διεύθυνση πρὸς τήν ὁποία διαδίδεται τό κύμα καί ἡ γραμμή πάνω στήν ὁποία πραγματοποιοῦνται οἱ ταλαντεύσεις δέν σχηματίζουν παρά μόνο μία γραμμή. Αὐτό τό εἶδος κύματος ὀνομάζεται *διαμήκες*. Ἀλλά μόνο αὐτό τό εἶδος κύματος ἵπάρχει; Εἶναι σημαντικό γιά τοὺς ἐπόμενους συλλογισμούς μας νά ἐξετάσουμε τή δυνατότητα ἑνός διαφορετικοῦ εἴδους κύματος πού ὀνομάζεται *ἐγκάρσιο*.

"Ἄς μετατρέψουμε τό προηγούμενο παράδειγμά μας." Ἐχοῦμε πάντα τή σφαῖρα, ἀλλά εἶναι βυθισμένη σ' ἕνα διαφορετικό μέσο, ἕνα εἶδος ζελατίνης ἀντί νά βρίσκεται σέ ἀέρα ἢ σέ νερό. Ἐξ ἄλλου ἡ σφαῖρα δέν πραγματοποιεῖ τώρα παλμικές κινήσεις, ἀλλά γυρίζει καλά μιά μικρή γωνία καί στή συνέχεια ἐπανέρχεται πάντα μέ τόν ἴδιο ρυθμικό τρόπο, καί γύρω ἀπό ἕνα καθορισμένο ἄξονα. Ἡ ζελατίνη κολλᾷ στή σφαῖρα. Ἐτσι οἱ κολλημένες ποσότητες εἶναι ὑποχρεωμένες νά παρακολουθήσουν τήν



κίνησή της. Αὐτές οἱ ποσότητες ἀναγκάζουν ἄλλες πού εἶναι λίγο πιά μακρῶς νά παρακολουθήσουν τήν ἴδια κίνηση, καί οὕτω καθ' ἑξῆς, σέ τρόπο ὥστε νά δημιουργεῖται ἕνα κύμα μέσα στό μέσο. Ἄν ὑπενθυμίσουμε τό διαχωρισμό μεταξύ τῆς κίνησης τοῦ μέσου καί τῆς κίνησης τοῦ κύματος, βλέπουμε ὅτι ἐδῶ δέν βρίσκονται πάνω στήν ἴδια γραμμή. Τό κύμα διαδίδεται πρὸς τή διεύθυνση τῆς ἀκτίνας τῆς σφαίρας, ἐνῶ τά μόρια τοῦ μέσου κινοῦνται κάθετα σ' αὐτή τή διεύθυνση. Ἐτσι δημιουργήθηκε ἕνα ἐγκάρσιο κύμα.

Τά κύματα πού διαδίδονται στήν ἐπιφάνεια τοῦ νεροῦ εἶναι ἐγκάρσια. Ἐνας φελλός πού ἐπιπλέει ἀνεβοκατεβαίνει μόνο, ἀλλά τό κύμα διαδίδεται κατά μήκος μιᾶς ἐπίπεδης ἐπιφάνειας. Τά ἡχητικά κύματα, ἐξ ἄλλου, δίδουν τό πιά πετυχημένο παράδειγμα ἐπιμήκων κυμάτων.

Μιά ἐπί πλέον παρατήρηση: κύμα πού παράγεται σ' ἕνα μέσο ὁμογενές ἀπό μιά σφαῖρα παλλόμενη ἢ ταλαντευόμενη εἶναι *σφαιρικό* κύμα. Ὄνομάζεται ἔτσι γιὰτί σέ οποιαδήποτε στιγμή ὅλα τά σημεῖα μιᾶς σφαιρικής ἐπιφάνειας πού περικλείει τό κέντρο συμπεριφέρονται μέ τόν ἴδιο τρόπο. Ἄς θεωρήσουμε ἕνα τμήμα μιᾶς τέτοιας σφαίρας, πού βρίσκεται σέ μεγάλη ἀπόσταση ἀπό τό κέντρο της. Ὅσο πιά μακρῶς βρίσκεται αὐτό τό τμήμα τόσο μικρότερο τό διαλέγουμε καί τόσο περισσότερο μοιάζει μέ ἐπίπεδο.

Μποροῦμε νά ποῦμε, χωρίς νά θέλουμε νά εἶμαστε πολύ



ἀκριβείς, ότι δέν υπάρχει ούσιαστική διαφορά μεταξύ ενός τμήματος επιπέδου και ενός τμήματος μιᾶς σφαίρας τῆς ὁποίας ἡ ἀκτίνα εἶναι ἀρκετά μεγάλη. Μιλᾶμε πολύ συχνά γιά μικρά τμήματα σφαιρικοῦ κύματος πού εἶναι πολύ ἀπομακρυσμένα ἀπ' τό κέντρο σάν νά εἶναι *ἐπίπεδα κύματα*. Ὅσο μακρύτερα ἀπό τό κέντρο τῆς σφαίρας τοποθετοῦμε τό σκιασμένο τμήμα τοῦ πύ πάνω σχέδιου, τόσο ἡ γωνία πού σχηματίζεται ἀπό τίς δύο ἀκτίνες εἶναι μικρότερη καί τόσο ἡ ἀναπαράσταση ἑνός ἐπίπεδου κύματος εἶναι ὀρθότερη. Ἡ ἔννοια ἑνός ἐπίπεδου κύματος, ὅπως πολλές ἄλλες φυσικές ἔννοιες, δέν εἶναι παρά ἓνα ἐπινόημα, πού δέν μπορεῖ νά πραγματοποιηθεῖ παρά μόνο μέ κάποιο βαθμό ἀκρίβειας. Εἶναι ὁμως μιά χρήσιμη ἔννοια πού θά μᾶς χρειαστεῖ ἀργότερα.

## Η ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ἄς θυμηθοῦμε τώρα γιατί εἴχαμε διακόψει τήν περιγραφή τῶν ὀπτικῶν φαινομένων. Ὁ σκοπός μας ἦταν ἡ εἰσαγωγή μιᾶς ἄλλης θεωρίας γιά τό φῶς, διαφορετικῆς ἀπό τήν σωματιδιακή θεωρία, ἡ ὁποία ὁμως προσπαθεῖ νά ἐξηγήσει τά φαινόμενα τῆς ἴδιας περιοχῆς. Γι' αὐτό τό λόγο ἔπρεπε νά διακόψουμε τήν ἱστορία μας καί νά εἰσαγάγουμε τήν ἔννοια τοῦ κύματος. Τώρα πιά μποροῦμε νά ξαναγυρίσουμε στό θέμα μας.

Ἦταν ὁ Huygens, σύγχρονος τοῦ Νεύτονα, πού προώθησε μιά θεωρία ὀλοκληρωτικά καινούρια. Στό «Δοκίμιό του γιά τό Φῶς» γράφει:

*Ὅτι ἂν τό φῶς καταναλίσκει χρόνο γιά τό πέρασμά του, κάτι πού θά ἐξετάσουμε τώρα, θά προκύψει ὅτι αὐτή ἡ συνδεδεμένη μέ τήν ὕλη κίνηση εἶναι ἀλλεπάλληλη καί ὅτι, γιά τό λόγο αὐτό, διαδίδεται, ὅπως καί ὁ ἦχος, διά μέσου ἐπιφανειῶν καί σφαιρικῶν κυμάτων. Καί τά ὀνομάζω κύματα ἐξ αἰτίας τῆς ὁμοιότητος αὐτῶν πού βλέπουμε νά σχηματίζονται στό νερό ὅταν πετᾶμε μιά πέτρα, καί πού παρουσιάζουν μιά τέτοια ἀλλεπάλληλη κυκλική διάδοση, ἂν καί προερχόμενα ἀπό ἄλλη αἰτία καί μόνο σέ μιά ἐπίπεδη ἐπιφάνεια.*

Κατά τόν Huygens, τό φῶς εἶναι κῦμα, μιά μεταφορά ἐνέργειας καί ὄχι ὕλης. Εἶδαμε ὁμως ὅτι ἡ σωματιδιακή θεωρία ἐξηγεῖ πολλά ἀπό τά γεγονότα πού παρατηροῦμε. Εἶναι ἄραγε καί ἡ κυματική θεωρία ἱκανή νά κάνει κάτι τέτοιο; Πρέπει νά ξαναθέσουμε τά ἐρωτήματα στά ὁποῖα ἤδη ἡ σωματιδιακή θεωρία ἔχει δώσει ἀπάντηση, γιά νά δοῦμε ἂν ἡ κυματική θεωρία μπορεῖ νά ἀπαντήσει τό ἴδιο καλά. Θά τό κάνουμε μέ τή μορφή ἑνός διαλόγου ἀνάμεσα στόν Ν καί στόν Η, ὅπου Ν εἶναι ὑπερασπιστής τῆς σωματιδιακῆς θεωρίας τοῦ Νεύτονα καί Η εἶναι ὑπερασπιστής τῆς θεωρίας τοῦ Huygens. Οὔτε ὁ ἓνας οὔτε ὁ ἄλλος ἐπιτρέπεται νά χρησιμοποιήσουν ἐπιχειρήματα πού προκύπτουν ἀπό τό συμπληρωμένο ἔργο αὐτῶν τῶν δύο μεγάλων δασκάλων.

Ν.: Στή σωματιδιακή θεωρία ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός ἔχει μιά καλά καθορισμένη σημασία. Εἶναι ἡ ταχύτητα μέ τήν ὁποία μετατοπίζονται τά σωματίδια μέσα στόν κενό χῶρο. Ποιά ἡ σημασία τῆς στήν κυματική θεωρία;

Η: Σημαίνει φυσικά τήν ταχύτητα τοῦ φωτεινοῦ κύματος. Κάθε γνωστό κῦμα διαδίδεται μέ μιά καθορισμένη ταχύτητα, καί τό ἴδιο πρέπει νά συμβαίνει μέ τά φωτεινά κύματα.

Ν: Αὐτό ὁμως δέν εἶναι τόσο ἀπλό ὅσο φαίνεται. Τά ἠχητικά κύματα διαδίδονται στόν ἀέρα, τά ναυτικά κύματα στό νερό. Κάθε κῦμα πρέπει νά διαθέτει ἓνα ὕλικό μέσο γιά νά μετακινεῖται. Τό φῶς διαδίδεται στό κενό, κάτι πού δέ συμβαίνει μέ τά ἠχητικά κύματα. Νά ὑποθέσει κανεῖς ἓνα κῦμα σέ κενό χῶρο, σημαίνει πραγματικά σά νά μὴν ὑποθέτει τήν ὑπαρξη κανενός κύματος.

Η: Naί, ἀναγνωρίζω τή δυσκολία, ἂν καί δέν εἶναι καινούρια γιά μένα. Ὁ δάσκαλός μου σκέφθηκε πολύ πάνω σ' αὐτό τό θέμα, καί βρῆκε ὅτι ἡ μόνη διέξοδος εἶναι νά ὑποθέσουμε τήν ὑπαρξη μιᾶς ὑποθετικῆς ὕλης, τοῦ *αιθέρα*, ἓνα διαφανές μέσο πού εἰσχωρεῖ σ' ὄλο τό σύμπαν. Ἔτσι μποροῦμε νά ποῦμε ὅτι τό σύμπαν εἶναι βυθισμένο στόν αἰθέρα. Ἄν ἔχουμε τό θάρρος νά εἰσαγάγουμε αὐτή τήν ἔννοια ὅλα τά ὑπόλοιπα γίνονται φανερά καί πειστικά.

N: Δέν ἀποδέχομαι αὐτή τήν ὑπόθεση. Γιά πρῶτο λόγο γιατί εἰσάγει μιά καινούρια ὑποθετική ὕλη καί ἔχουμε ἤδη στή φυσική ἀρκετές ὕλες. Ὑπάρχει ὅμως κι' ἄλλη αἰτία πού μιλάει ἐνάντια σ' αὐτή τήν ὑπόθεση. Νομίζετε χωρίς καμμιά ἀμφιβολία ὅτι ὅλα πρέπει νά ἐξηγοῦνται μέ ὄρους τῆς μηχανικῆς. Καί τότε τί σκέπτεστε γιά τόν αἰθέρα; Εἶστε ἰκανός νά πῆτε μέ πῶς τὸ ἀποτελεῖται ἀπὸ τὰ στοιχειώδη σωματίδιά του καί πῶς ἐμφανίζεται σ' ἄλλα φαινόμενα;

H: Ἡ πρώτη σας παρατήρηση εἶναι σίγουρα λογική. Ἀλλά εἰσάγοντας τήν ἔννοια τοῦ αἰθέρα χωρίς βάρος, πού εἶναι λίγο τεχνητός, ἀπαλλασσόμαστε μέ μιᾶς τῶν σωματιδίων τοῦ φωτός πού εἶναι πολύ περισσότερο τεχνητά. Ἐχουμε μιά μόνο «μυστηριώδη» ὕλη ἀντὶ νάχουμε ἓνα μεγάλο ἀριθμὸ πού ἀντιστοιχεῖ στό μεγάλο ἀριθμὸ τῶν χρωμάτων τοῦ φάσματος. Δέν νομίζετε ὅτι αὐτό εἶναι μιά πραγματική πρόοδος; Τό λιγότερο ὅλες οἱ δυσκολίες συγκεντρώνονται σ' ἓνα μόνο σημεῖο. Δέν χρειαζόμαστε πιά τήν λαθεμένη ὑπόθεση ὅτι τὰ σωματίδια τῶν διαφορετικῶν χρωμάτων μετακινοῦνται μέ τήν ἴδια ταχύτητα στόν κενό χῶρο. Τό δεύτερό σας ἐπιχείρημα εἶναι τό ἴδιο ἀληθινό. Δέν μποροῦμε νά δώσουμε μιά μηχανική ἐξήγηση στόν αἰθέρα. Ἀλλά δέν ὑπάρχει ἀμφιβολία ὅτι ἡ μελλοντική μελέτη τῶν ὀπτικῶν φαινομένων καί διαφόρων ἄλλων θά ἀποκαλύψει τή δομὴ του. Γιά τήν ὥρα πρέπει νά περιμένουμε καινούριες ἐμπειρίες καί συμπεράσματα, ἀλλά ἐλπίζω ὅτι τελικά, θά εἶμαστε ἰκανοί νά διαλευκάνουμε τό πρόβλημα τῆς μηχανικῆς δομῆς τοῦ αἰθέρα.

N: Ἄς ἀφήσουμε τήν ἐρώτηση γιά τήν ὥρα, μιά καί δέν μποροῦμε νά ἀποφασίσουμε. Θά ἤθελα νά δῶ πῶς ἡ θεωρία σας, ἀκόμα κι' ἂν ἀπαλοῖψουμε τίς δυσκολίες, ἐξηγεῖ αὐτά τὰ φαινόμενα πού εἶναι τόσο διαυγῆ καί κατανοητά στό φῶς τῆς σωματιδιακῆς θεωρίας. Ἄς πάρουμε γιά παράδειγμα τό γεγονός ὅτι οἱ φωτεινές ἀκτίνες διαδίδονται στό κενό κατ' εὐθείαν. Ἐνα κομμάτι λευκό χαρτί τοποθετημένο μπροστά σ' ἓνα κερί, προβάλλει στόν τοῖχο μιά καθορισμένη σκιά μέ καθαρό περίγραμμα. Σκιές μέ καθαρά περιγράμματα δέν θά ἦταν ἐφικτές ἂν

ἡ κυματική θεωρία τοῦ φωτός ἦταν ἀληθινή, γιατί τὰ κύματα θά ὑφίσταντο παράθλαση γύρω ἀπ' τίς ἄκρες τοῦ χαρτιοῦ καί ἡ σκιά θά ἦταν κακοσχηματισμένη. Ἐνα μικρὸ καράβι δέν εἶναι ὅπως τό ξέρουμε ἓνα ἐμπόδιο γιά τὰ ναυτικά κύματα, τό περιβάλλουν ἀπλᾶ χωρίς νά προβάλλουν τήν σκιά.

H: Αὐτό δέν εἶναι ἓνα πειστικὸ ἐπιχείρημα. Παρατηρήστε τὰ βραχέα κύματα ἐνός ποταμοῦ πού κτυποῦν στά πλευρά ἐνός μεγάλου καραβιοῦ. Τὰ κύματα πού δημιουργοῦνται ἀπ' τὴ μιά μεριά τοῦ καραβιοῦ δέν εἶναι ὁρατά ἀπ' τήν ἄλλη. Ἄν τὰ κύματα εἶναι ἀρκετά μικρά καί τό πλοῖο ἀρκετά μεγάλο διαπιστώνουμε τόν σχηματισμὸ μιᾶς ξεκάθαρης σκιάς. Εἶναι πολύ πιθανό ὅτι τό φῶς φαίνεται νά διαδίδεται μόνο εὐθύγραμμα γιατί τό μήκος κύματός του εἶναι πολύ μικρὸ σέ σύγκριση μέ τό μέγεθος τῶν συνηθισμένων ἐμποδίων καί τῶν διακένων πού χρησιμοποιοῦμε στά πειράματα. Εἶναι δυνατὸ ὅμως ἂν μπόρῃσουμε νά κατασκευάσουμε ἓνα ἐμπόδιο ἀρκετά μικρὸ δέν θά παρουσιαζόταν καμμιά σκιά. Θά μπορούσαμε νά συναντήσουμε πολλές δυσκολίες κατὰ τήν ἐκτέλεση πειραμάτων θέλοντας νά κατασκευάσουμε μιά συσκευή μέ τήν ὁποία θά ἀποδείχναμε ἂν τό φῶς εἶναι ἰκανὸ νά παραθλαθεῖ. Παρ' ὅλα αὐτά ἂν ἓνα παρόμοιο πείραμα ἦταν δυνατό νά ἐκτελεστεῖ θά ἦταν κρίσιμο νά διαλέξουμε μιά θεωρία ἀνάμεσα στήν κυματική θεωρία τοῦ φωτός καί στήν σωματιδιακή.

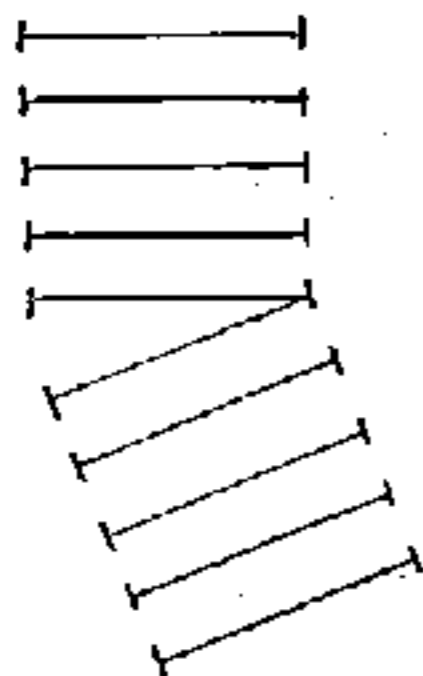
N: Εἶναι δυνατό στό μέλλον ἡ κυματική θεωρία νά ὀδηγήσει σέ καινούρια δεδομένα, ἀλλά δέν γνωρίζω πειραματικά δεδομένα πού νά τήν ἐπικυρώνουν μέ πειστικὸ τρόπο. Ὅσο τό πείραμα δέν θά ἀποδείξει μέ ὀριστικὸ τρόπο ὅτι τό φῶς περιθλάται δέν βλέπω τό λόγο νά μὴ πιστεύω στή σωματιδιακὴ θεωρία πού μοῦ φαίνεται πῶς ἀπλῆ καί συνεπῶς προτιμότερη ἀπὸ τήν κυματική θεωρία.

Ἄφοῦ φτάσαμε σ' αὐτό τό σημεῖο μποροῦμε νά διακόψουμε τό διάλογο ἂν καί τό θέμα μας δέν ἐξαντλήθηκε καθόλου.

Μένει ἀκόμα ν' ἀποδείξουμε πῶς ἡ κυματική θεωρία ἐξηγεῖ τὴ διάθλαση τοῦ φωτός καί τήν ποικιλία τῶν χρωμάτων. Ἡ σωματιδιακὴ θεωρία, καθὼς τό γνωρίζουμε, ἔχει τὴ δυνατό-

τητα να εξηγήσει το φαινόμενο. Θα αρχίσουμε απ' τη διάθλαση, αλλά θάταν χρήσιμο να ασχοληθούμε πρώτα μ' ένα παράδειγμα που δεν έχει καμιά σχέση με την οπτική.

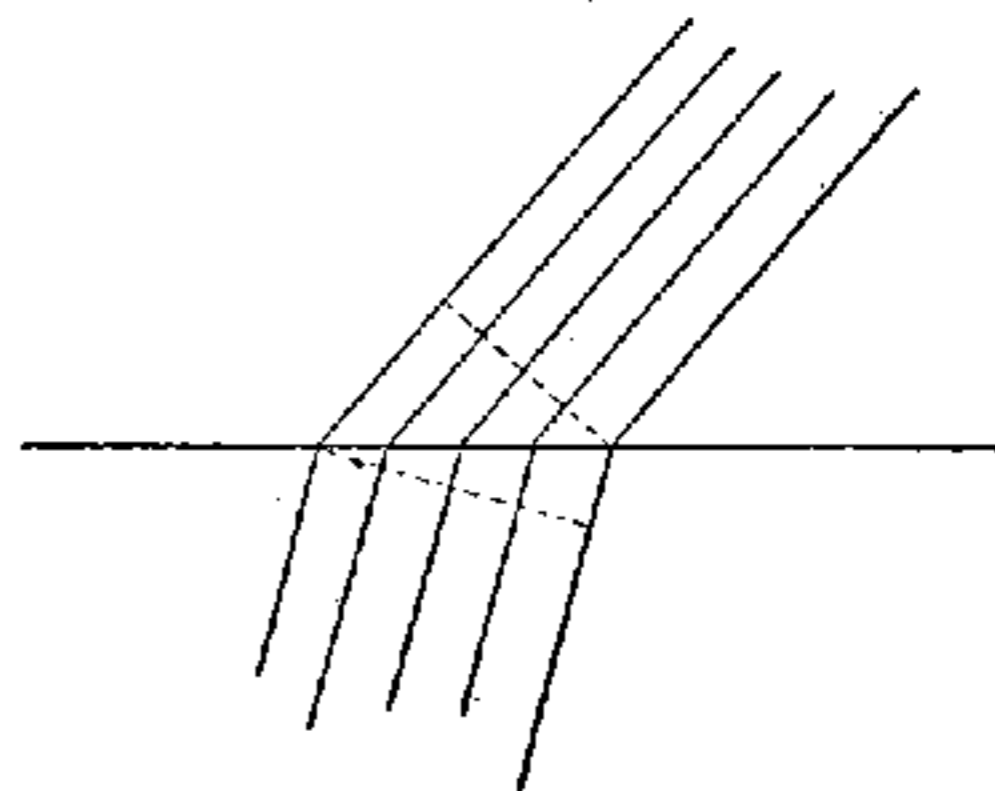
Έχουμε ένα έκτεταμένο χώρο ελεύθερο όπου δύο άνθρωποι περπατούν και χωρίζονται ό ένας από τον άλλον μ' ένα άκαμπτο κοντάρι και το κρατάνε από την κάθε του άκρη. Στην αρχή προχωρούν προς τα μπροστά με την ίδια ταχύτητα. Όσο οι ταχύτητές τους μεγάλες ή μικρές παραμένουν ίδιες το κοντάρι υφίσταται παράλληλες μετατοπίσεις, δηλαδή, δεν στρίβει ή δεν



αλλάζει διεύθυνση. Όλες οι διαδοχικές θέσεις του είναι παράλληλες μεταξύ τους. Αλλά ας υποθέσουμε ότι σε κάποια χρονική στιγμή, που θα μπορούσε να ήταν και μετά από κλάσμα του δευτερολέπτου οι ταχύτητες των δύο ανθρώπων δεν είναι οι ίδιες. Τι θα συμβεί τότε; Είναι φανερό ότι το κοντάρι τη στιγμή εκείνη θα στρίψει, σε τρόπο ώστε δεν θα μετατοπίζεται πια παράλληλα με την αρχική του θέση. Όταν οι ταχύτητες ξαναγίνουν ίσες, ή διεύθυνσή τους θα είναι διαφορετική από την αρχική τους διεύθυνση, πράγμα που φαίνεται ξεκάθαρα στο παραπάνω σχήμα. Η μεταβολή της διεύθυνσης έλαβε χώρα στο διάστημα του χρόνου που οι ταχύτητες των δύο περιπατητών ήταν διαφορετικές.

Αυτό το παράδειγμα θα μας επιτρέψει να καταλάβουμε τη

διάθλαση ενός κύματος. Ένα επίπεδο κύμα διαδιδόμενο μέσα στον αέρα προσκρούει πάνω σε μια επίπεδη γυάλινη επιφάνεια. Στο παρακάτω σχέδιο βλέπουμε ένα κύμα που προχωρώντας παρουσιάζει ένα σχετικά ευρύ μέτωπο. Το μέτωπο του κύματος είναι επίπεδο εκεί όπου σε μια δοσμένη στιγμή, όλα τα τμήματα του αέρα συμπεριφέρονται με τον ίδιο τρόπο. Εφόσον η ταχύτητα εξαρτάται από το μέσο μέσα στο οποίο διαδίδεται το φως, θα είναι διαφορετική από την ταχύτητα στον κενό χώρο μέσα στο γυαλί.



Κατά την διάρκεια ενός πολύ μικρού χρονικού διαστήματος κατά το οποίο το μέτωπο του κύματος εισχωρεί στο γυαλί, τα διαφορετικά του τμήματα θα έχουν και διαφορετικές ταχύτητες. Είναι ξεκάθαρο ότι το τμήμα που φθάνει το γυαλί θα διαδοθεί με την ταχύτητα του φωτός μέσα στο γυαλί ενώ το άλλο τμήμα θα συνεχίσει να κινείται με την ταχύτητα του φωτός στον αέρα. Εξ ατίας αυτής της διαφορής της ταχύτητας των διαφόρων τμημάτων του μετώπου του κύματος, κατά τη διάρκεια της «είσχωρησης» του στο γυαλί η διεύθυνση ολόκληρου του κύματος θα αλλάξει.

Βλέπουμε λοιπόν ότι δεν είναι μόνο η σωματιδιακή θεωρία που εξηγεί τη διάθλαση αλλά και η κυματική θεωρία. Άλλες

παρατηρήσεις που συνοδεύτηκαν και με λίγα μαθηματικά δείχνουν ότι η εξήγηση που δόθηκε από την κυματική θεωρία είναι απλούστερη και καλύτερη, και ότι τα συμπεράσματα είναι σε τέλεια συμφωνία με την παρατήρηση. Γενικά ποσοτικές μέθοδοι συλλογισμού μας επιτρέπουν να υπολογίσουμε την ταχύτητα του φωτός σ' ένα διαθλαστικό μέσο αν ξέρουμε πώς διαθλάται ή ακτίνα όταν τό διασχίζει. "Άμεσες μετρήσεις επικυρώνουν με λαμπρό τρόπο αυτές τις προβλέψεις και στη συνέχεια την κυματική θεωρία του φωτός. Μένει ακόμα τό ερώτημα για τό χρώμα.

Πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τό κύμα χαρακτηρίζεται από δύο αριθμούς, την ταχύτητα και τό μήκος του. "Η οδσιαστική υπόθεση της κυματικής θεωρίας του φωτός είναι ότι διαφορετικά μήκη κύματος αντιστοιχούν σε διαφορετικά χρώματα. Τό μήκος κύματος του όμογενοϋς κίτρινου φωτός διαφέρει από αυτό του έρυθρου και του ίώδους. "Αντί του τεχνητοϋ διαχωρισμοϋ τών σωματιδίων σε διαφορετικά χρώματα. "Έχουμε τή φυσική διαφορά του μήκους κύματος.

Συνάγεται λοιπόν ότι τά πειράματα του Νεύτονα πάνω στη διάχυση του φωτός μπορούν να περιγραφούν με δύο διαφορετικές γλώσσες, ή μία της σωματιδιακής θεωρίας και ή άλλη της κυματικής. Για παράδειγμα.

#### ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗ ΓΛΩΣΣΑ

Τά σωματίδια που ανήκουν σε διαφορετικά σώματα έχουν την ίδια ταχύτητα στο κενό αλλά διαφορετικές ταχύτητες στο γυαλί.

Τό λευκό φως είναι μία σύνθεση σωματιδίων που ανήκουν σε διαφορετικά χρώματα, ενώ διαχωρίζονται στο φάσμα.

Θά φαινόταν λογικό να αποφύγουμε την άμφιβολία που προκαλείται από την ύπαρξη τών δύο ξεχωριστών θεωριών για

#### ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΓΛΩΣΣΑ

Οί ακτίνες μήκους κύματος που ανήκουν σε διαφορετικά χρώματα έχουν την ίδια ταχύτητα στον αέρα και διαφορετικές ταχύτητες στο γυαλί.

Τό λευκό φως είναι μία σύνθεση κυμάτων όλων τών μηκών κύματος, ενώ διαχωρίζονται στο φάσμα.

τά ίδια φαινόμενα, και να αποφασίσουμε τή χρησιμοποίηση της μίας ή της άλλης άφοϋ εξετάσουμε προσεκτικά τά έλαττώματα και τά πλεονεκτήματα κάθε μίας. "Ο διάλογος μεταξύ του Ν και του Η δείχνει ότι αυτό δεν είναι μία εύκολη άπόφαση. "Η άπόφαση αυτή τή στιγμή θάταν περισσότερο μία υπόθεση γούστου παρά μία επιστημονική πεποίθηση. Τήν εποχή του Νεύτονα και κατά τή διάρκεια περισσοτέρων από εκατό χρόνων οί περισσότεροι φυσικοί υποστήριζαν τή σωματιδιακή θεωρία. Πολύ πιο άργά κατά τά μέσα του 19ου αιώνα ή ιστορία αποφάνθηκε θετικά για τήν κυματική θεωρία και άρνητικά για τήν σωματιδιακή. Στη συνομιλία του με τόν Η ο Ν διατύπωσε ότι ήταν κατ' άρχή πειραματικά δυνατό να άποφανθεί κανείς για τή μία ή τήν άλλη θεωρία. "Η σωματιδιακή θεωρία δεν δέχεται ότι τό φως μπορεί να καμφθεί και άπαιτεί ότι οί σκιές είναι σαφείς. Σύμφωνα με τήν κυματική θεωρία έξ άλλου, ένα έμπόδιο άρκετά μικρό δεν θά προβάλλει καμιά σκιά. Στο έργο του Young και του Fresnel αυτό τό άποτέλεσμα πραγματοποιήθηκε πειραματικά και προκώψαν θεωρητικά συμπεράσματα.

Συζητήσαμε ήδη τό πολύ άπλό πείραμα όπου μία τρυπημένη όθόνη και τοποθετημένη μπροστά σε μία σημειακή φωτεινή πηγή πρόβαλε πάνω στον τοίχο μία σκιά. Θά άπλοποιήσουμε άκόμη περισσότερο τό πείραμα υποθέτοντας ότι ή φωτεινή πηγή εκπέμπει όμογενές φως. Για να πάρουμε τά καλύτερα άποτελέσματα ή πηγή πρέπει να είναι έντονη. "Ας φαντασθούμε ότι ή όπή στην όθόνη γίνεται όλο και πιο μικρή. "Αν χρησιμοποιήσουμε μία έντονη πηγή και επιτύχουμε να κάνουμε τήν όπή της όθόνης άρκετά μικρή, ένα καινούριο και έκπληκτικό φαινόμενο θά παρουσιασθεί που είναι τελείως άκατάλυπτο με τήν άποψη της σωματιδιακής θεωρίας. Δεν ύπάρχει πιά φανερή διάκριση μεταξύ του φωτεινοϋ και του σκοτεινοϋ. Τό φως έξασθενεί προοδευτικά, περνώντας από μία σειρά δακτυλίων που είναι έναλλάξ φωτεινοί και σκιεροί και τελικά αναμιγνύεται με τό μαύρο φόντο. "Η εξήγηση τών έναλλάξ φωτισμένων και μαύρων περιοχών θά ξεκαθαρίσει αν διατάξουμε με κάποιο διαφορετικό τρόπο τό πείραμα. "Ας

υποθέσουμε ότι έχουμε ένα μαύρο φύλλο χαρτί με δύο όπες μεγέθους καρφίτσας διά μέσου των οποίων περνά το φως. Αν οι όπες είναι πολύ κοντά ή μία στην άλλη και αν η φωτεινή πηγή εκπέμπει όμογενές και έντονο φως, βλέπουμε να εμφανίζονται πάνω στον τοίχο φωτεινές και σκιερές λωρίδες που εξασθενούν προοδευτικά και αναμιγνύονται στα πλάγια με το μαύρο φόντο. Η εξήγηση αυτού του φαινομένου είναι απλή. Μία μαύρη λωρίδα βρίσκεται στο σημείο όπου τα κοίλα ενός κύματος που πέρασε από την όπή συναντούν τα κυρτά ενός κύματος που πέρασε από την άλλη όπή σε τρόπο ώστε να μηδενίζονται. Μία φωτισμένη λωρίδα βρίσκεται στο σημείο όπου δύο κοίλα ή δύο κυρτά κυμάτων που περνούν από διαφορετικές όπες συναντώνται και ενισχύονται αμοιβαία. Η εξήγηση είναι πολύπλοκότερη στην περίπτωση των μαύρων και φωτεινών δακτυλίων του προηγούμενου μας παραδείγματος, όπου χρησιμοποιήσαμε μία τρυπημένη όθνη με μία μόνο όπή, αλλά η αρχή του φαινομένου είναι η ίδια. Αυτή η εμφάνιση των σκιερών και φωτεινών λωρίδων στην περίπτωση των δύο όπων και των φωτεινών και σκιερών δακτυλίων στην περίπτωση μίας μόνης όπης πρέπει να συγκρατηθεί γιατί αργότερα θα ξαναγυρίσουμε στη συζήτηση των δύο διαφορετικών εικόνων. Τα πειράματα που θα περιγράψουμε τώρα φανερώνουν την *περίθλαση* του φωτός δηλαδή την παράκαμψη της εθύγραμμης διάδοσης του φωτός όταν μικρές όπες ή εμπόδια παρεμβάλλονται στο δρόμο ενός φωτεινού κύματος.

Με τη βοήθεια λίγων μαθηματικών είμαστε ικανοί να πάμε πολύ πιο μακριά. Είναι δυνατό να βρούμε πόσο μεγάλο ή καλύτερα πόσο μικρό πρέπει να είναι το μήκος κύματος για να παραχθεί ένα ιδιαίτερο πρότυπο. Μ' αυτό τον τρόπο τα πειράματα που θα περιγράψουμε μ'ς επιτρέπουν να μετρήσουμε το μήκος κύματος του όμογενούς φωτός που χρησιμοποιήθηκε σ'αφωτεινή πηγή. Για να δόσουμε μία ιδέα της μικρότητας του αριθμού που το εκφράζει θα παραθέσουμε δύο μήκη κύματος, αυτά που εκφράζουν τα όρια του ορατού φάσματος, δηλαδή το έρυθρο και το ιώδες.

Το μήκος κύματος του έρυθρου φωτός είναι 0,00008 cm.

Το μήκος κύματος του ιώδους φωτός είναι 0,00004 cm.

Δέν πρέπει να εκπλαγώμαστε που οι αριθμοί είναι τόσο μικροί. Το φαινόμενο της σαφούς σκιάς, δηλαδή το φαινόμενο της εθύγραμμης διάδοσης του φωτός, παρατηρείται μόνο στη φύση γιατί όλα τα διάκενα και όλα τα εμπόδια που συνήθως συναντά το φως είναι σημαντικά σε σύγκριση με τα μήκη κύματος του φωτός. Μόνο όταν χρησιμοποιούμε μικρά εμπόδια και μικρά διάκενα το φως εμφανίζει την κυματική του φύση.

Αλλά η ιστορία των δοκιμών για την εύρεση μίας θεωρίας του φωτός δέν έχει τελειώσει ακόμη. Η απόφαση που πάρθηκε τό 19ο αιώνα δέν ήταν τελεσίδικη. Γιατί για τόν σύγχρονο φυσικό ξανατίθεται τό πρόβλημα αν θέλει να αποφασίσει για τά σωματίδια ή για τά κύματα και παροπιάζεται ξανά με μία πιο βαθιά και πιο πολύπλοκη μορφή. Ας αποδεχτούμε την ήττα της σωματιδιακής θεωρίας του φωτός ώσπου να αναγνωρίσουμε την προβληματική φύση της νίκης της κυματικής θεωρίας.

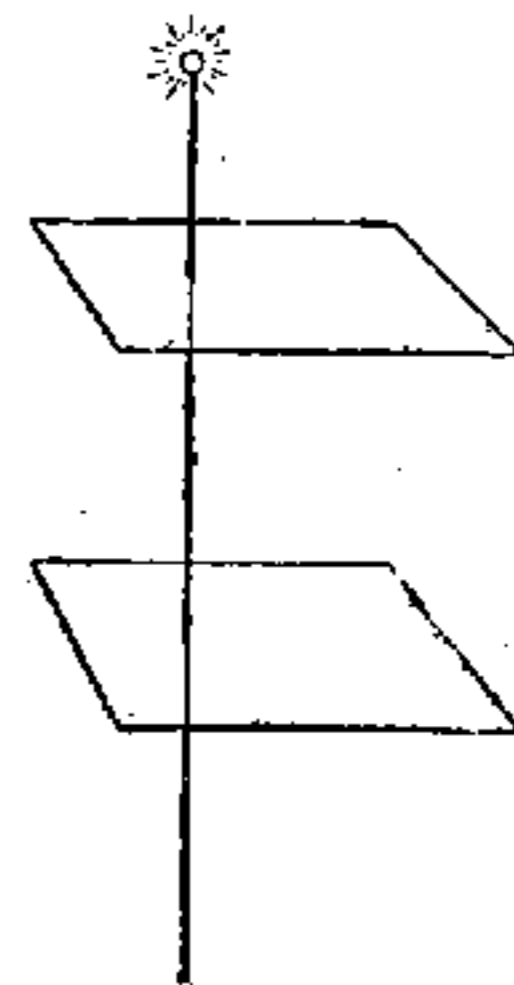
#### ΤΑ ΦΩΤΕΙΝΑ ΚΥΜΑΤΑ ΕΙΝΑΙ ΕΠΙΜΗΚΗ Η ΕΓΚΑΡΣΙΑ;

Όλα τά όπτικά φαινόμενα που εξέτάσαμε εξαίρουν την κυματική θεωρία. Η κάμψη του φωτός γύρω από μικρά εμπόδια και η εξήγηση της διάθλασης είναι τά ισχυρότερα όπερ αυτής επιχειρήματα. Μ'ε την καθοδήγηση της μηχανικής άποψης αντιλαμβανόμαστε ότι πρέπει ακόμα ν' απαντήσουμε σ' ένα ζήτημα: πρόκειται για τόν προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του αίθέρα. Για τή λύση του προβλήματος είναι ουσιασδες να γνωρίζουμε αν τά φωτεινά κύματα μέσα στον αίθερα είναι επιμήκη ή εγκάρσια. Μ' άλλα λόγια: τό φως διαδίδεται όπως ο ήχος; Τό κύμα όφείλεται σε μεταβολές της πυκνότητας του μέσου σε τρόπο που οι ταλαντώσεις των μορίων είναι προς τή διεύθυνση της διάδοσης; Η ο αίθερας μοιάζει με έλαστική πηκτή, ένα μέσο όπου μόνο τά εγκάρσια κύματα μπορούν να παραχθούν που τά μόριά τους κινούνται σε

διεύθυνση κάθετη πρὸς ἐκείνη πού διαδίδεται τὸ ἴδιο τὸ κύμα;

Πρὶν λύσουμε τὸ πρόβλημα ἄς προσπαθήσουμε νὰ προσδιορίσουμε ποιά ἀπάντηση θὰ ἔπρεπε νὰ προτιμηθεῖ. Εἶναι φανερό ὅτι θὰ πρεπε νὰ εἴμαστε εὐτυχεῖς ἂν τὰ φωτεινά κύματα ἦταν ἐπιμήκη. Ὁ δυσκολίες πού συναντοῦμε γιὰ νὰ περιγράψουμε ἕνα μηχανικό αἰθέρα, θάταν στήν περίπτωση αὐτή πολύ ἀπλοποιημένες. Ἡ εἰκόνα μας τοῦ αἰθέρα θάταν πιθανώτατα κάτι πού θὰ ἔμοιαζε μέ τή μηχανική εἰκόνα ἑνός ἀερίου πού ἐξηγεῖ τή διάδοση τῶν ἠχητικῶν κυμάτων. Θάταν πολύ πιό δύσκολο νὰ σχηματίσουμε τήν εἰκόνα ἑνός αἰθέρα πού μεταφέρει ἐγκάρσια κύματα. Νὰ φαντασθοῦμε μιά πηκτὴ σάν ἕνα μέσο ἀποτελούμενο ἀπὸ μόρια μέ τέτοιο τρόπο ὥστε νὰ μποροῦν μέσα του νὰ διαδοθοῦν ἐγκάρσια κύματα, δέν εἶναι ἔργο εὐκόλο. Ὁ Huygens πίστευε πὼς ὁ αἰθέρας θάταν μᾶλλον «ὁμοιος μέ ἀέρα», παρά «ὁμοιος μέ πηκτὴ». Ἀλλά ἡ φύση πολύ λίγο ἐνδιαφέρεται γιὰ τοὺς περιορισμοὺς μας. Ἦταν εὐσπλαχνη πρὸς τοὺς φυσικοὺς πού ἐπιχειροῦν νὰ κατανοήσουν ὅλα τὰ γεγονότα ἀπ' τή μηχανική ἄποψη; Γιὰ νὰ ἀπαντήσουμε σ' αὐτὸ τὸ ἐρώτημα πρέπει νὰ διερευνήσουμε μερικά νέα πειράματα.

Θὰ ἐξετάσουμε μέ λεπτομέρειες μόνο ἕνα ἀπὸ τὰ πολυάριθμα πειράματα πού εἶναι ἱκανά νὰ μᾶς δώσουν μιά ἀπάντηση. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι ἔχουμε ἕνα λεπτότατο ἔλασμα ἀπὸ τουρμαλίνη, κομμένο μέ ἰδιαίτερο τρόπο, πού δέν εἶναι ἀνάγκη νὰ περιγράψουμε ἐδῶ. Τὸ ἔλασμα πρέπει νὰ εἶναι λεπτό, γιὰ νὰ μποροῦμε νὰ δοῦμε ἀνάμεσά του μιά φωτεινὴ πηγὴ. Ἄς πάρουμε τῶρα δύο ἔλασματα τοῦ ἴδιου εἴδους κι ἄς τὰ τοποθετήσουμε ἀνάμεσα στὰ μάτια μας καί στὸ φῶς. Τί θὰ δοῦμε; Ἐνα φωτεινὸ σημεῖο, ἂν τὰ ἔλασματα εἶναι ἀρκετὰ λεπτά. Ὑπάρχει μεγάλη πιθανότητα τὸ πείραμα νὰ βεβαιώσει τήν προσδοκία μας. Χωρὶς νὰ μᾶς ταραξοῖ ὅτι ἡ βεβαίωση θάταν σύμπτωση, ἄς ὑποθέσουμε ὅτι βλέπουμε τὸ φωτεινὸ σημεῖο μέσα ἀπ' τὰ δύο ἔλασματα. Τῶρα, ἄς ἀλλάξουμε σιγά-σιγά τή θέση τοῦ ἑνός ἀπ' τὰ ἔλασματα ὥστε νύ κάνει μιά περιστροφή. Ἡ βεβαίωση αὐτὴ δέν ἔχει νόημα παρά ἂν στερεώσουμε τή θέση τοῦ ἄξονα γύρω



ἀπ' τὸν ὁποῖο γίνεται ἡ περιστροφή. Θὰ πάρουμε σάν ἄξονα τή γραμμὴ πού προσδιορίζεται ἀπ' τήν προσπίπτουσα ἀκτίνα. Αὐτὸ σημαίνει ὅτι μετατοπίζουμε ὅλα τὰ σημεῖα τοῦ ἑνός ἐλάσματος, ἐκτός ἀπὸ τὰ σημεῖα ἐπὶ τοῦ ἄξονος. Συμβαίνει ἕνα παράξενο πρᾶγμα. Τὸ φῶς λίγο-λίγο ἀδυνατίζει καί ἐξαφανίζεται τελείως. Ξαναφαίνεται ἂν συνεχίσουμε τήν περιστροφή καί ξαναβρίσκουμε τήν ἀρχικὴ ὄψη ὅταν φθάσουμε στήν ἀρχικὴ θέση.

Χωρὶς νὰ μποῦμε στίς λεπτομέρειες αὐτοῦ τοῦ πειράματος καί ἄλλων παρομοίων, μποροῦμε νὰ ρωτήσουμε: εἶναι δυνατόν νὰ ἐξηγηθοῦν τὰ φαινόμενα αὐτά ἂν τὰ φωτεινά κύματα εἶναι ἐπιμήκη; Στήν περίπτωση τῶν ἐπιμήκων κυμάτων, τὰ μόρια τοῦ αἰθέρα θὰ κινοῦντο κατὰ μῆκος τοῦ ἄξονα, ὅπως κάνει ἡ ἀκτίνα. Ἄν τὸ ἔλασμα περιστρέφεται, τίποτε δέν μεταβάλλεται κατὰ μῆκος τοῦ ἄξονα. Τὰ σημεῖα ἐπὶ τοῦ ἄξονα δέν κινοῦνται καί δέν εἶναι παρά μιά πολύ μικρὴ μετατόπιση πού γίνεται γύρω ἀπ' αὐτὸ. Καμιά ἀλλαγὴ τόσο καθαρὴ ὅπως ἡ ἐξαφάνιση καί ἡ ἐμφάνιση μιᾶς νέας εἰκόνας δέ θὰ μποροῦσε νὰ γίνε γιὰ

ένα επίμηκες κύμα. Το φαινόμενο αυτό και άλλα παρόμοια δεν μπορούν να εξηγηθούν παρά με την υπόθεση ότι τα φωτεινά κύματα είναι εγκάρσια και όχι επιμήκη. Μ' άλλα λόγια πρέπει να υποθέσουμε ότι ο αέρας έχει χαρακτήρα «πηκτής».

Αυτό είναι λυπηρότατο. Πρέπει να ετοιμασθούμε για να αντιμετωπίσουμε τρομερές δυσκολίες, αν επιχειρήσουμε να περιγράψουμε τον αέρα με όρολογία της μηχανικής.

## Ο ΑΙΘΕΡΑΣ ΚΑΙ Η ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΠΟΨΗ

Η διερεύνηση όλων των ποικίλων δοκιμών να συλλάβουμε τη μηχανική φύση του αέρα σαν ένα μέσο που χρησιμεύει για τη μετάδοση του φωτός, θα μᾶς οδηγήσει πολύ μακριά. Μια μηχανική κατασκευή σημαίνει, όπως ήδη τό γνωρίζουμε, ότι η ουσία συνίσταται από μόρια, ανάμεσα στα όποια ασκούνται δυνάμεις κατά μήκος εύθειας γραμμής και εξαρτώνται αποκλειστικά απ' την απόσταση. Για να συλλάβουν τον αέρα σα μηχανική ουσία που μοιάζει με πηκτή, οι φυσικοί ήταν αναγκασμένοι να κάνουν μερικές πολύ τεχνητές και βεβιασμένες υποθέσεις. Δέ θα τις αναφέρουμε εδώ ανήκουν σε παρελθόν έντελως ξεχασμένο. Αλλά τό αποτέλεσμα ήταν σημαντικό και σπουδαίο. Ο τεχνητός χαρακτήρας όλων αυτών των υποθέσεων, ή ανάγκη να χρησιμοποιηθεί τόσο μεγάλος αριθμός από αυτές, και όλες ανεξάρτητες μεταξύ τους, θά έφθανε για να συγκλονίσει την πίστη στη μηχανική άποψη.

Αλλά, εκτός απ' τη δυσκολία να τόν συλλάβουμε, άλλες πιο απλές αντιρρήσεις εμφανίζονται κατά του αέρα. Είναι ανάγκη να υποθέσουμε ότι ο αέρας υπάρχει παντού, αν θέλουμε να εξηγήσουμε τά όπτικά φαινόμενα διά της μηχανικής όδοϋ. Δεν μπορεί να υπάρχει κενός χώρος, αν τό φῶς διαδίδεται αποκλειστικά μέσα σ' ένα μέσο.

Λοιπόν ή μηχανική μᾶς διδάσκει ότι τό έναστρο διάστημα δεν προβάλλει αντίσταση στην κίνηση των υλικών σωμάτων. Οί πλανήται, π.χ. κινούνται μέσα στον αέρα που μοιάζει με

την πηκτή χωρίς να συναντήσουν την αντίσταση που ένα υλικό μέσο του είδους αυτού έπρεπε να προβάλλει. Αν ο αέρας δεν ένοχλεί την ύλη κατά την κίνησή του, δεν μπορεί να υπάρξει επενέργεια των σωματιδίων του αέρα και των σωματιδίων της ύλης. Τό φῶς διαδίδεται μέσα απ' τόν αέρα και επίσης μέσα απ' τό γυαλί και τό νερό, αλλά ή ταχύτητά του αλλάζει μέσα στις τελευταίες αυτές ουσίες. Πῶς να εξηγήσουμε τό γεγονός αυτό με τη μηχανική όδο; Υποθέτοντας φαινομενικά κάποια επενέργεια των σωματιδίων του αέρα και των σωματιδίων της ύλης. Είδουμε ότι στην περίπτωση σωμάτων που κινούνται ελεύθερα, τέτοιες επενέργειες δεν υπάρχουν. Μ' άλλα λόγια, υπάρχει επενέργεια του αέρα και της ύλης στα όπτικά φαινόμενα, αλλά δεν υπάρχει στα μηχανικά φαινόμενα. Ασφαλώς είναι ένα πολύ παράδοξο συμπέρασμα.

Φαίνεται ότι δεν υπάρχει παρά μία διέξοδος σ' όλες αυτές τις δυσκολίες. Σ' όλη την ανάπτυξη της επιστήμης μέχρι του 20ού αιώνα, στην προσπάθεια να εξηγήσουν τά φυσικά φαινόμενα με τη μηχανική άποψη, ήταν αναγκασμένοι να χρησιμοποιούν τεχνητές ουσίες όπως τά ηλεκτρικά και μαγνητικά ρευστά, τά σωματίδια του φωτός και τόν αέρα. Τό αποτέλεσμα ήταν απλούστατα να συγκεντρώσουν όλες τις δυσκολίες σε μερικά οδοιῶδη σημεία, όπως είναι ή περίπτωση του αέρα στα όπτικά φαινόμενα. Έδώ όλες οι άκαρπες προσπάθειες να συλλάβουν ένα αέρα με απλό τρόπο, όπως και οι λοιπές αντιρρήσεις, φαίνεται να δείχνουν ότι τό λάθος βρίσκεται στη θεμελιακή υπόθεση ότι είναι δυνατό να εξηγηθούν όλα τά φυσικά φαινόμενα με τη μηχανική άποψη. Η επιστήμη δεν πέτυχε την εκτέλεση του μηχανικού προγράμματος με πειστικό τρόπο, και σήμερα κανείς φυσικός δεν πιστεύει στη δυνατότητα της πραγματοποίησής του.

Στη σύντομη ανάλυσή μας των κυριωτέρων φυσικών ιδεών, συναντήσαμε μερικά όλυτα προβλήματα και σκοντάψαμε σε δυσκολίες και εμπόδια που αποθάρρυναν τις προσπάθειές μας να διαμορφώσουμε μία ομοιόμορφη και λογική αντίληψη που να περιλαμβάνει όλα τά φαινόμενα του έξωτερικού κόσμου.

Υπήρχε στην κλασική μηχανική τό απαρατήρητο γεγονός της ισότητας της μάζας βάρους και της μάζας αδρανείας. Υπήρχε ο τεχνητός χαρακτήρας των ηλεκτρικών και μαγνητικών ρευστών. Υπήρχε στην επενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος και της μαγνητικής βελόνας μία άλυτη δυσκολία. Θυμόμαστε ότι η δύναμη αυτή δεν ενεργούσε κατά μήκος της γραμμής που συνδέει τό σύρμα και τό μαγνητικό πόλο και ότι εξαρτόταν απ' την ταχύτητα του κινουμένου φορτίου. Ο νόμος που καθόριζε τή διεύθυνση και τό μέγεθος ήταν εξαιρετικά πολύπλοκος. Και, τελικά, υπήρχε η μεγάλη δυσκολία του αιθέρα.

Η νεώτερη φυσική καταπιάστηκε με όλα αυτά τά προβλήματα και τά έλυσε. Αλλά στον αγώνα της για νά φθάσει στις λύσεις αυτές, παρουσιάστηκαν νέα και βαθύτερα προβλήματα. Η γνώση μας είναι τώρα πλατύτερη και βαθύτερη από εκείνη του φυσικού του 19ου αιώνα, αλλά και οι δυσκολίες και άμφιβολίες μας είναι επίσης μεγαλύτερες.

Συνοπτικά:

Στις παλιές θεωρίες των ηλεκτρικών ρευστών, στις θεωρίες σωματιδιακή και κυματική του φωτός, βλέπουμε προσπάθειες για τήν εφαρμογή της μηχανικής αντίληψης. Αλλά στην περιοχή των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων η εφαρμογή αυτή συναντά σοβαρές δυσκολίες.

Ένα φορτίο σε κίνηση επιδρά επί μιας μαγνητικής βελόνας. Αλλά η δύναμη αντί νά εξαρτάται μόνο απ' τήν απόσταση, εξαρτάται άκόμη κι απ' τήν ταχύτητα του φορτίου. Η δύναμη ούτε άπωθει ούτε έλκει, αλλά ενεργεί κάθετα στη γραμμή που συνδέει τή βελόνα και τό φορτίο.

Στήν όπτική όφειλουμε νά ταχθοῦμε υπέρ της κυματικής θεωρίας και εναντίον της σωματιδιακής θεωρίας του φωτός. Κύματα που διαδίδονται μέσα σε μέσο που αποτελείται από σωματίδια, και μηχανικές δυνάμεις που ενεργοῦν ανάμεσά τους, αντιπροσωπεύουν άσφαλώς μία μηχανική έννοια. Αλλά ποιά είναι η φύση του μέσου διά του οποίου τό φως διαδίδεται και ποιές είναι οι μηχανικές ιδιότητές του; Δεν έχουμε καμιά έλπίδα νά μπορέσουμε νά μεταφράσουμε τά όπτικά φαινόμενα

σε μηχανικά φαινόμενα πριν δοθεί άπάντηση στο έρώτημα αυτό. Αλλά οι δυσκολίες που παρουσιάζει η λύση αυτού του προβλήματος είναι τόσο μεγάλες που όφειλουμε νά τό εγκαταλείψουμε και συνεπώς νά εγκαταλείψουμε και τή μηχανική άποψη.

### 3. ΤΟ ΠΕΔΙΟ, Η ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

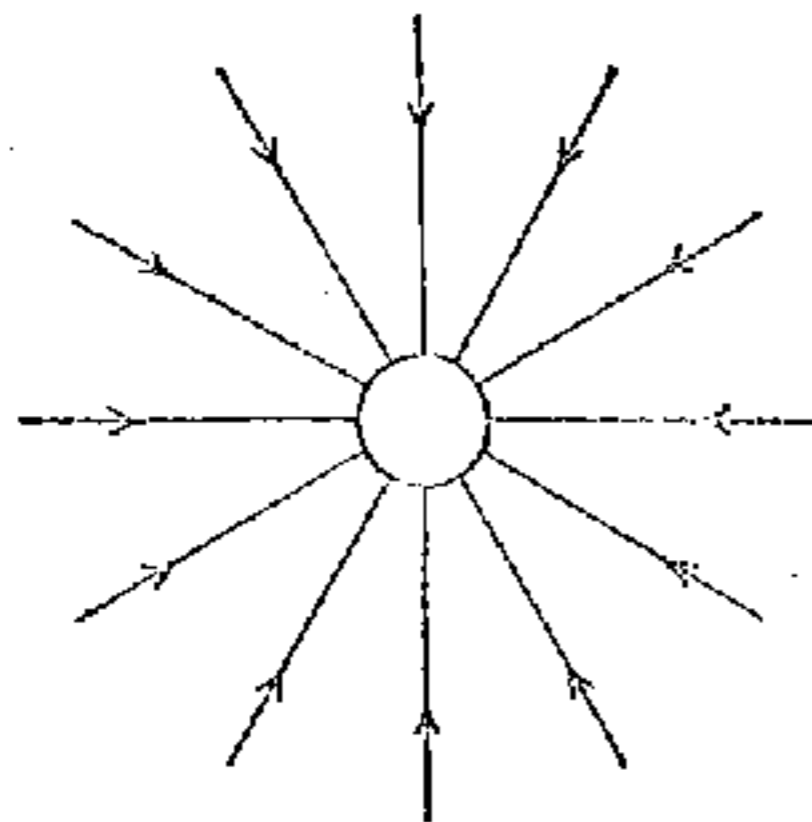
#### ΤΟ ΠΕΔΙΟ ΣΑΝ ΠΑΡΑΣΤΑΣΗ

Κατά τό δεύτερο ήμισυ τοῦ 19ου αἰῶνα νέες ἰδέες ἐπαναστατικοῦ χαρακτήρα εἰσήχθησαν στή φυσική, πού ἀνοιξαν τό δρόμο σέ μιά νέα φιλοσοφική διάφορη ἀπό τή μηχανική ἀποψη. Τά ἀποτελέσματα τοῦ ἔργου τοῦ Faraday τοῦ Maxwell καί τοῦ Hertz ὁδήγησαν στήν ἀνάπτυξη τῆς νεώτερης φυσικῆς καί στή δημιουργία νέων ἐννοιῶν πού διαμορφώνουν μιά νέα εἰκόνα τῆς πραγματικότητας.

Θά προσπαθήσουμε τώρα νά περιγράψουμε τό ρήγμα πού δημιουργήθηκε ἀπό τίς νέες αὐτές ἐννοιες στήν ἐπιστήμη καί νά δείξουμε, πῶς σιγά-σιγά οἱ ἐννοιες αὐτές κέρδισαν σέ σαφήνεια καί σέ δύναμη. Θά δοκιμάσουμε νά ξαναχτίσουμε λογικά τή γραμμή τῆς προόδου χωρίς πολύ νά μᾶς ἀπασχολήσῃ ἡ χρονολογική σειρά.

Οἱ νέες ἐννοιες γεννήθηκαν σέ συνάρτηση μέ τά φαινόμενα τοῦ ἠλεκτρισμοῦ, ἀλλά εἶναι πιά ἀπλό νά τίς ἐξετάσουμε στήν ἀρχή ἀπ' τή σκοπιά τῆς μηχανικῆς ὁδοῦ. Γνωρίζουμε πῶς δύο μῦρια ἔλκονται ἀμοιβαῖα καί πῶς ἡ ἑλκτική αὐτή δύναμη ἐλαττώνεται μέ τό τετράγωνο τῆς ἀπόστασης. Μποροῦμε νά παρουσιάσουμε τό πρῶγμα μ' ἕνα νέο τρόπο καί θά τό

κάνουμε ακόμη κι αν είναι δύσκολο νά καταλάβουμε τό πλεονέκτημα πού παρουσιάζει τοῦτο. Ὁ μικρός κύκλος τοῦ σχεδιαγράμματός μας παριστάνει ἕνα ἑλκτικό σῶμα, ἄς ποῦμε



τόν ἥλιο. Στήν πραγματικότητα θά ἔπρεπε νά φαντασθοῦμε τό σχεδιάγραμμά μας σάν ἕνα πρότυπο μέσα στό διάστημα καί ὄχι σάν σχέδιο πάνω σέ ἐπίπεδο. Ἐτσι ὁ μικρός μας κύκλος παριστάνει μιὰ σφαῖρα στό διάστημα, ἄς τήν ποῦμε ἥλιο. Ἐνα σῶμα τό ὑποτιθέμενο σῶμα δοκιμῆς κάπου στή γειτονική περιοχή τοῦ ἥλιου θά ὑποστῆ ἕλξη κατά μήκος τῆς γραμμῆς πού συνδέει τά κέντρα τῶν δύο σωμάτων. Στό σχεδιάγραμμά μας οἱ γραμμές δείχνουν τήν κατεύθυνση τῆς ἑλκτικῆς δύναμης τοῦ ἥλιου γιά τίς διάφορες θέσεις πού παίρνει τό σῶμα δοκιμῆς. Τό τόξο σέ κάθε γραμμή δείχνει πῶς ἡ δύναμη κατευθύνεται πρὸς τόν ἥλιο, πράγμα πού σημαίνει πῶς ἡ δύναμη εἶναι ἑλκτική. Πρόκειται γιά τίς γραμμές ἐπενέργειας τῆς δύναμης τοῦ πεδίου ἕλξης. Γιά τήν ὥρα εἶναι ἕνα ἀπλό ὄνομα καί δέν ὑπάρχει λόγος νά ἐπιμείνουμε περισσότερο. Τό σχεδιάγραμμά μας

παρουσιάζει ἕνα χαρακτηριστικό στοιχεῖο πού θά δείξουμε ἀργότερα. Οἱ γραμμές δύναμης διαγράφονται σ' ἕνα χῶρο ὅπου δέν ὑπάρχει καμμιὰ ὕλη. Γιά τήν ὥρα ὅλες οἱ γραμμές ἐπενέργειας τῆς δύναμης ἢ πῶς σύντομα τό πεδίο δείχνουν μόνο πῶς θά συμπεριφερόταν ἕνα σῶμα δοκιμῆς ἂν βρισκόταν στή γειτονική περιοχή τῆς σφαίρας γιά τήν ὁποία ἔχει διαγραφῆ τό πεδίο.

Οἱ γραμμές τοῦ προτύπου μας στό διάστημα εἶναι πάντα κάθετες στήν ἐπιφάνεια τῆς σφαίρας καί ἐφ' ὅσον ἀποκλίνουν ἀπό ἕνα σημεῖο γίνονται πῶς πυκνές ὅσο πλησιάζουν τή σφαῖρα καί λιγώτερο πυκνές ὅσο ἀπομακρύνονται. Ἄν ἡ ἀπόσταση τῆς σφαίρας γίνει δύο ἢ τρεῖς φορές μεγαλύτερη, ἡ πυκνότητα τῶν γραμμῶν στό διάστημα, ὄχι ὅμως καί στό σχεδιάγραμμά μας, θά ἐλαττωθεῖ, κατά τέσσερις ἢ ἑννέα φορές. Οἱ γραμμές παίζουν διπλό ρόλο. Ἀπό τή μιὰ δείχνουν τήν κατεύθυνση τῆς ἰσχύος πού ἐνεργεῖ σ' ἕνα σῶμα πού βρίσκεται στή γειτονική περιοχή τῆς ἡλιακῆς σφαίρας. Ἀπό τήν ἄλλη ἡ πυκνότητα τῶν δυναμικῶν γραμμῶν μέσα στό διάστημα δείχνει πῶς ἡ ἰσχύς ποικίλλει ἀνάλογα μέ τήν ἀπόσταση. Τό σχέδιον τοῦ πεδίου ὀρθῶς ἐρμηνευόμενον παρουσιάζει τήν κατεύθυνση τῆς ἑλκτικῆς δύναμης καί τήν ἐξάρτησή της ἀπό τήν ἀπόσταση. Μποροῦμε ἐξ ἴσου καλά νά μάθουμε τό νόμο τῆς ἕλξης ἀπό ἕνα τέτοιο σχεδιάγραμμα ὅσο καί ἀπό τήν περιγραφή τῆς ἐνέργειάς του μέ λέξεις ἢ μέ ὄρους τῆς ἀκριβοῦς καί οἰκονομικῆς γλώσσας τῶν μαθηματικῶν. Ἡ παράσταση τοῦ πεδίου, ὅπως θά τό ὀνομάζουμε, μπορεῖ νά φαίνεται σαφῆς καί ἐνδιαφέρουσα, ἀλλά δέν ὑπάρχει λόγος νά πιστεύουμε τήν ὠφελιμότητά της στήν περίπτωση τῆς ἕλξης. Μερικοί θά νόμιζαν ἴσως πῶς εἶναι χρήσιμο νά θεωροῦμε τίς γραμμές αὐτές σάν κάτι περισσότερο ἀπό σχέδιον καί πῶς πρέπει νά φαντασθοῦμε τίς ἐνέργειες τῆς δύναμης σά νά διέρχονται πραγματικά ἀπό αὐτές. Θά μπορούσαμε νά τό κάνουμε τοῦτο, ἀλλά τότε ἡ ταχύτητα τῶν ἐνεργειῶν κατά μήκος τῶν δυναμικῶν γραμμῶν πρέπει νά ὑποθεθεῖ ἀπεριόριστα μεγάλη. Ἡ μεταξύ δύο σωμάτων ἐνεργουσα δύναμη ἐξαρτᾶται σύμφωνα μέ τό νόμο τοῦ Νεύτωνα μόνο

από την απόσταση, ο χρόνος δέν παρίσταται στον πίνακα. Η δύναμη πρέπει νά περάσει από τό ένα σώμα στό άλλο στιγμιαία. Αλλά επειδή μιιά κίνηση μέ ταχύτητα άπεριόριστα μεγάλη δέν μπορεί νά έχει νόημα για ένα λογικό άνθρωπο, ή προσπάθεια νά δοϋμε στό σχέδιό μας κάτι άλλο από ένα πρότυπο δέν οδηγεί πουθενά.

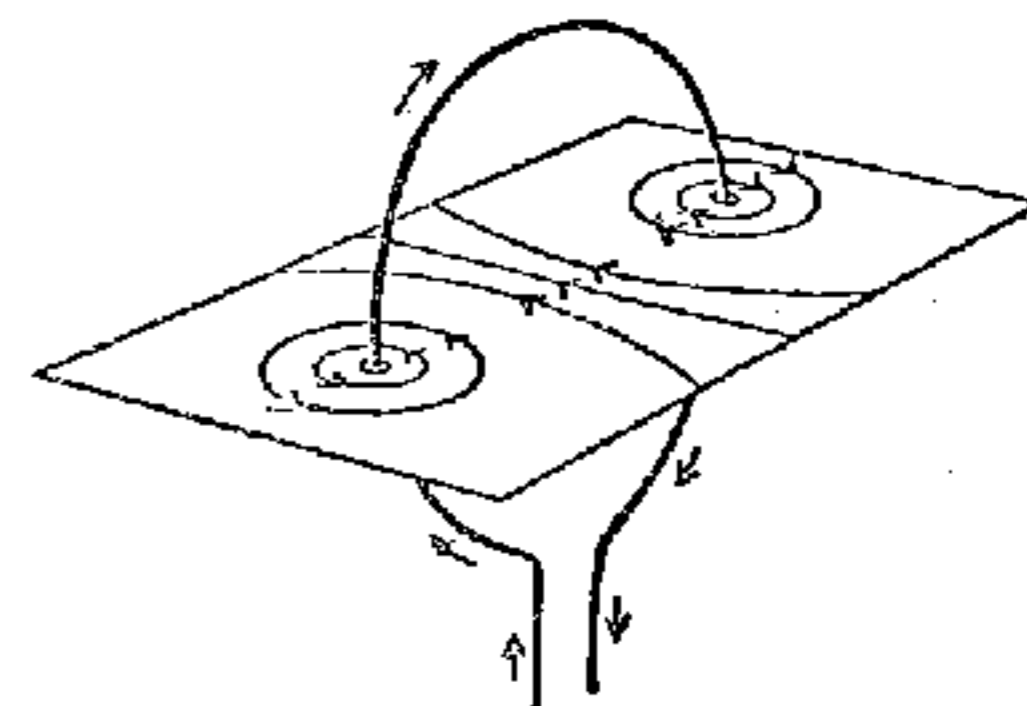
Ωστόσο δέν έχουμε την πρόθεση νά συζητήσουμε έδω τό πρόβλημα τής έλξης. Μας χρησίμευσε άπλως σαν εισαγωγή για την άπλούστευση των παρομοίων μεθόδων συλλογισμού στη θεωρία του ήλεκτρισμού.

Θά αρχίσουμε από τή διερεύνηση του πειράματος, που δημιούργησε σοβαρές δυσκολίες στη μηχανική έρμηνεία μας. Έχουμε ήδη μελετήσει τό ρεύμα κατά τή διαδρομή του σε σύρμα που σχηματίζει κυκλικό κύκλωμα. Στο μέσο του κυκλώματος βρισκόταν μιιά μαγνητική βελόνα. Τή στιγμή που τό ρεύμα άρχισε νά κυκλοφορεί, έμφανιζόταν μιιά νέα δύναμη που ενεργοϋσε πάνω στό μαγνητικό πόλο κάθετα στις γραμμές που συνδέουν τό σύρμα και τόν πόλο. Έάν ή δύναμη αυτή είχε γεννηθεί από ένα κινούμενο φορτίο, θά έξαρτόταν, όπως τό απέδειξε τό πείραμα του Rowland, από τήν ταχύτητα του φορτίου. Τα έμπειρικά αυτά γεγονότα αντίφασκουν στη φιλοσοφική αντίληψη κατά τήν όποία όλες οι δυνάμεις ενεργοϋν στη γραμμή που συνδέει τά μόρια και δέν έξαρτώνται παρά από τήν απόσταση.

Η άκριβής έκφραση για τή δύναμη ρεύματος που ενεργεί επί μαγνητικού πόλου είναι πολύ πολύπλοκη, πολύ περισσότερο και από τήν έκφραση για τις έλκτικές δυνάμεις. Μπορούμε ώστόσο νά δοκιμάσουμε νά κάνουμε τις ενέργειες αντιληπτές στό μάτι μέ τόν ίδιο τρόπο που κάναμε για τήν έλκτική δύναμη. Ρωτάμε: Μέ ποιιά δύναμη τό ρεύμα ενεργεί επί μαγνητικού πόλου τοποθετημένου κάπου στη γειτονική περιοχή του; Θά ήταν κάπως δύσκολο νά περιγράψουμε μέ λόγια τή δύναμη αυτή. Ακόμη και ένας τύπος θεραπευτικός θά ήταν πολύπλοκος και βαρύς. Τό καλύτερο είναι νά παραστήσουμε μ' ένα σχέδιο ή μ' άλλον μέ ένα πρότυπο στό διάστημα μέ δυναμικές γραμμές

ό,τι γνωρίζουμε για τις δρώσες δυνάμεις. Υπάρχει κάποια δυσκολία που όφείλεται στό ότι ο μαγνητικός πόλος ύφίσταται μόνο σε συνάρτηση μέ ένα άλλο μαγνητικό πόλο, σχηματίζοντας δίπολο. Ωστόσο μπορούμε πάντα νά φαντασθούμε μιιά μαγνητική βελόνα μέ τέτοιο μήκος ώστε μόνο ή δύναμη που ενεργεί επί του πόλου που βρίσκεται πιο κοντά στό ρεύμα νά λαμβάνεται όπ' όψη. Επειδή ο άλλος πόλος είναι άρκετά άπομακρυσμένος ή δύναμη που ενεργεί επ' αυτού είναι άμελητέα. Για ν' αποφύγουμε κάθε άμφιβολία θά ποϋμε πως ο μαγνητικός πόλος που βρίσκεται πλησιάστερα στό σύρμα είναι **θετικός**.

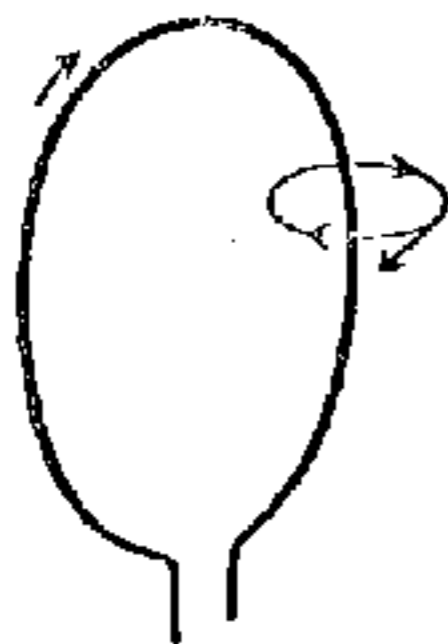
Ο χαρακτήρας τής δύναμης που ενεργεί επί του θετικού μαγνητικού πόλου φαίνεται στό σχέδιό μας.



Αρχικά παρατηρούμε κοντά στό σύρμα ένα τόξο που δείχνει τήν κατεύθυνση του ρεύματος από ένα άνωτερο σ' ένα κατώτερο δυναμικό. Όλες οι άλλες γραμμές είναι δυναμικές γραμμές, που ανήκουν σ' αυτό τό ρεύμα και κείνται σε κάποιο επίπεδο. Αν τις σύρουμε κατάλληλα μας φανερώνουν τήν

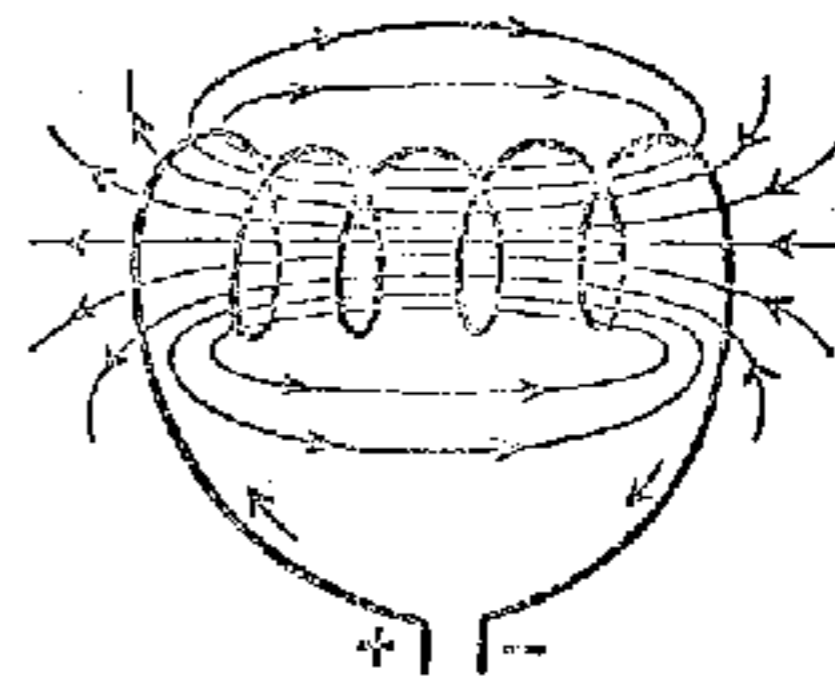
κατεύθυνση τῆς δύναμης φορέας πού ἀντιπροσωπεύει τὴν ἐνέργεια τοῦ ρεύματος ἐπὶ δοσμένου μαγνητικοῦ πόλου καὶ ἀκόμα μᾶς μαθαίνουν κάτι σχετικά μὲ τὸ μήκος τῆς διαδρομῆς αὐτῆς. Ἡ δύναμη ὅπως ξέρουμε εἶναι ἓνα διάνυσμα καὶ γιὰ νὰ τὴν καθορίσουμε πρέπει νὰ γνωρίζουμε τόσο τὴν φορά τῆς ὁδοῦ καὶ τὸ μήκος τῆς. Ἐδῶ ἀσχολούμαστε κυρίως μὲ τὸ πρόβλημα τῆς κατεύθυνσης τῆς δύναμης πού δρᾷ ἐπὶ ἐνός πόλου. Καὶ ρωτᾶμε: πῶς μπορούμε νὰ βροῦμε σύμφωνα μὲ τὸ σχέδιο τὴν κατεύθυνση τῆς δύναμης σ' ἓνα κάποιο σημεῖο τοῦ διαστήματος;

Ὁ κανόνας γιὰ νὰ βροῦμε πάνω σ' ἓνα πρότυπο τὴν κατεύθυνση μᾶς δύναμης δὲν εἶναι τόσο ἀπλὸς ὅσο στὸ προηγούμενο παράδειγμά μας ὅπου οἱ γραμμὲς δυνάμεως ἦταν εὐθεῖες. Γιὰ ν' ἀπλουστεύσουμε τὴν μέθοδο σύραμε στὸ διάγραμμα μιά μόνη δυναμικὴ γραμμὴ. Ἡ δύναμη φορέας κεῖται ἐπὶ τῆς ἐφαπτομένης τῆς δυναμικῆς γραμμῆς. Τὸ τόξο τῆς δύναμης φορέας καὶ τὰ τόξα ἐπὶ τῆς δυναμικῆς γραμμῆς κατευθύνονται πρὸς τὴν αὐτὴν φορά. Καὶ συνεπῶς πρὸς αὐτὴν τὴν φοράν ἐνεργεῖ ἡ δύναμη ἐπὶ τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου στὸ σημεῖο αὐτό. Ἐνὰ καλὸ σχέδιο ἢ μᾶλλον ἓνα καλὸ πρότυπο μᾶς μαθαίνει ἀκόμα κάτι σχετικά μὲ τὸ μήκος τοῦ φορέα δύναμης σ' ἓνα ὁποιοδήποτε σημεῖο. Ὁ φορέας αὐτός πρέπει νὰ εἶναι μακρότερος ἐκεῖ ὅπου οἱ γραμμὲς εἶναι πιὸ πυκνές, δηλαδὴ κοντὰ στὸ σύρμα καὶ βραχύτερος ὅπου οἱ γραμμὲς εἶναι λιγότερο πυκνές, δηλαδὴ μακριὰ ἀπὸ τὸ σύρμα.



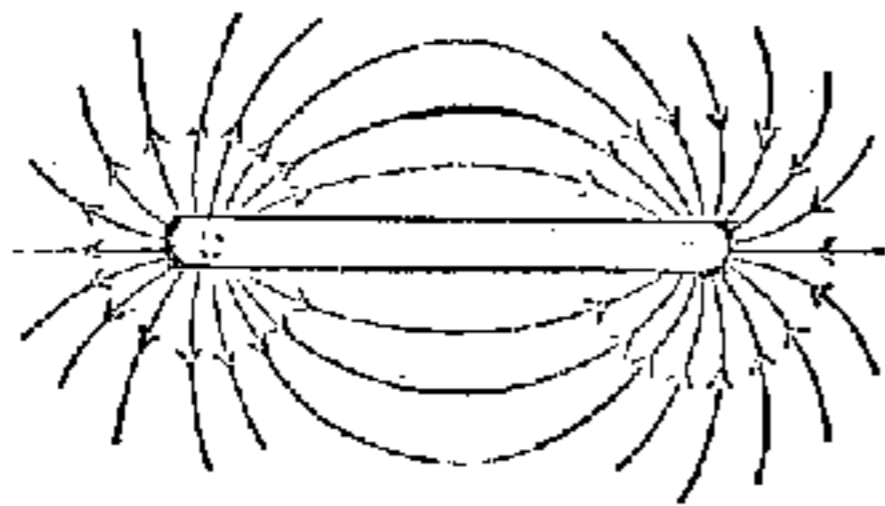
Ἔτσι οἱ δυναμικὲς γραμμὲς ἢ μ' ἄλλα λόγια τὸ πεδίο μᾶς ἐπιτρέπει νὰ καθορίσουμε τίς δυνάμεις πού δρᾶν σ' ἓνα μαγνητικὸ πόλο σ' ἓνα κάποιο σημεῖο τοῦ διαστήματος. Εἶναι γιὰ τὴν ὥρα ἡ μόνη δικαίωση τῆς φροντισμένης κατασκευῆς τοῦ πεδίου. Γνωρίζοντας τί ἐκφράζει τὸ πεδίο θὰ ἐξετάσουμε μὲ βαθύτερο ἐνδιαφέρον τίς δυναμικὲς γραμμὲς πού ἀντιστοιχοῦν στὸ ρεῦμα. Οἱ γραμμὲς αὐτὲς εἶναι κύκλοι πού περιβάλλουν τὸ σύρμα καὶ κεῖνται ἐπὶ ἐπιπέδου καθέτου στὸ ἐπίπεδο τοῦ σύρματος. Διαβάζοντας στὸ σχέδιο τὸ χαρακτήρα τῆς δύναμης φθάνουμε ἄλλῃ μιά φορά στὸ συμπέρασμα ὅτι ἡ δύναμη ἐνεργεῖ κάθετα στὴ γραμμὴ πού συνδέει τὸ σύρμα καὶ τὸν πόλο, γιατί ἡ ἐφαπτομένη σὲ κύκλο εἶναι πάντα κάθετη στὴν ἀκτῖνα του. Ὅτι γνωρίζουμε γιὰ τίς δρῶσες δυνάμεις μπορεῖ νὰ συναψισθεῖ στὴν κατασκευὴ τοῦ πεδίου. Τοποθετοῦμε τὴν ἔννοια τοῦ πεδίου μεταξύ ἐκείνης τοῦ ρεύματος καὶ ἐκείνης τοῦ μαγνητικοῦ πόλου γιὰ νὰ παραστήσουμε τίς δρῶσες δυνάμεις μὲ ἀπλὸ τρόπο.

Κάθε ρεῦμα συνοδεύεται ἀπὸ μαγνητικὸ πεδίο, δηλαδὴ μιά δύναμη ἐνεργεῖ πάντα ἐπὶ μαγνητικοῦ πόλου τοποθετημένου κοντὰ σὲ σύρμα πού τὸ διατρέχει ἓνα ρεῦμα. Μὲ τὴν εὐκαιρίαν σημειώσουμε ὅτι αὐτὴ ἡ ιδιότητα μᾶς ἐπιτρέπει νὰ κατασκευάσουμε ὄργανα εὐαίσθητα γιὰ νὰ ἀποκαλύπτουμε τὴν ὑπαρξὴ ρεύματος. Μιά καὶ μάθαμε νὰ διακρίνουμε τὸ χαρακτήρα τῶν μαγνητικῶν δυνάμεων πάνω στὸ πρότυπο τοῦ πεδίου



ένος ρεύματος, θά σχεδιάσουμε τό πεδίο πού περιβάλλει ένα σύρμα πού τό διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα, γιά νά παραστήσουμε τήν ενέργεια τών μαγνητικῶν δυνάμεων σ' ένα οποιοδήποτε σημείο τοῦ διαστήματος. Σάν πρῶτο παράδειγμα θά πάρουμε αὐτό πού ὀνομάζεται σωληνοειδές· εἶναι, ὅπως δείχνει τό σχέδιο, ένα πηνίο. Σκοπός μας εἶναι νά μάθουμε ἀπ' τό πείραμα ὅ,τι εἶναι δυνατόν νά γνωρίσουμε σχετικά μέ τό μαγνητικό πεδίο σέ συνάρτηση μέ τό ρεύμα πού διέρχεται ἀπό ένα σωληνοειδές καί νά χρησιμοποιήσουμε τή γνώση αὐτή στήν κατασκευή ἑνός πεδίου. Τό σχέδιο παρουσιάζει τό ἀποτέλεσμά μας. Οἱ δυναμικές γραμμές εἶναι καμπύλες κλειστές καί περιβάλλουν τό σωληνοειδές μέ τρόπο πού χαρακτηρίζει τό μαγνητικό πεδίο ἑνός ρεύματος.

Τό πεδίο μιᾶς μαγνητισμένης ράβδου μπορεῖ νά παρασταθεῖ μέ τόν ἴδιο τρόπο ὅπως καί ἐκεῖνο ἑνός ρεύματος, ὅπως δείχνει τό ἀκόλουθο σχῆμα. Οἱ δυναμικές γραμμές διευθύνονται ἀπό τόν θετικό πρὸς τόν ἀρνητικό πόλο. Ὁ φορέας δύναμη καίται πάντοτε ἐπὶ τῆς ἐφαπτομένης στή δυναμική



γραμμῇ καί εἶναι ὁ μακρότερος κοντά στοὺς πόλους, γιὰτί στά σημεία αὐτά ὑπάρχει ἡ πιό μεγάλη πυκνότητα τῶν γραμμῶν. Ὁ φορέας δύναμη ἀντιπροσωπεύει τήν ενέργεια τοῦ μαγνήτου σ' ένα μαγνητικό πόλο θετικό. Στήν περίπτωσή μας εἶναι ὁ μαγνήτης πού εἶναι ἡ «πηγή» τοῦ πεδίου καί ὄχι τό ρεύμα. Τά

δύο τελευταῖα μας σχέδια πρέπει νά συγκριθοῦν προσεκτικά. Στό πρῶτο ἔχουμε τό μαγνητικό πεδίο ἑνός ρεύματος πού διέρχεται ἀπό ένα σωληνοειδές· στό δεύτερο τό πεδίο μαγνητισμένης ράβδου. Ἄς ἀγνοήσουμε τό σωληνοειδές καί τή ράβδο καί ἄς παρατηρήσουμε μόνο τά δύο ἐξωτερικά πεδία. Ἀμέσως διαπιστώνουμε ὅτι παρουσιάζουν ἀκριβῶς τόν αὐτό χαρακτήρα· καί στή μιά καί στήν ἄλλη περίπτωση οἱ δυναμικές γραμμές πᾶνε ἀπό τή μιά ἄκρη τοῦ σωληνοειδοῦς ἢ τῆς ράβδου πρὸς τήν ἄλλη ἄκρη.

Ἡ παράσταση τοῦ πεδίου φέρνει τοὺς πρώτους καρπούς της. Θά ἦταν μᾶλλον δύσκολο νά διαπιστώσουμε μιά ἰσχυρή ὁμοιότητα μεταξύ τοῦ ρεύματος πού διέρχεται ἀπό ένα σωληνοειδές καί μιᾶς μαγνητισμένης ράβδου, ἂν δέν μᾶς φανερωνόταν τοῦτο ἀπ' τήν κατασκευή τοῦ πεδίου.

Ἡ ἔννοια τοῦ πεδίου μπορεῖ τώρα νά ὑποβληθεῖ σέ μιά πιό αὐστηρή δοκιμασία. Θά δοῦμε σέ λίγο ἂν εἶναι κάτι παραπάνω ἀπό μιά νέα παρουσίαση τῶν δυνάμεων πού ἐνεργοῦν. Θά μπορούσαμε νά συλλογισθοῦμε ὡς ἐξῆς: ἄς ὑποθέσουμε γιά μιά στιγμή ὅτι τό πεδίο χαρακτηρίζεται μ' ένα μονοσήμαντο τρόπο ὅλες τίς ἐνέργειες τίς προσδιοριζόμενες ἀπ' τήν πηγὴ του. Αὐτό δέν εἶναι παρά μιά ὑπόθεση. Ἀλλά αὐτό θά σήμαινε ὅτι ἂν ένα σωληνοειδές καί μιά μαγνητισμένη ράβδος ἔχουν τό ἴδιο πεδίο, πρέπει τότε ὅλες οἱ ἐπιδράσεις τους νά εἶναι ἐπίσης οἱ ἴδιες: ὅτι δύο σωληνοειδῆ διαπερόμενα ἀπό ηλεκτρικά ρεύματα συμπεριφέρονται ὅπως δύο μαγνητισμένες ράβδοι, ὅτι ἔλκονται ἢ ἀπωθοῦνται ἀμοιβαῖα ἀνάλογα μέ τή θέση τους, ἀκριβῶς ὅπως κάνουν δύο ράβδοι. Αὐτό θά σήμαινε ἀκόμα ὅτι ένα σωληνοειδές καί μίᾳ ράβδος ἔλκονται ἢ ἀπωθοῦνται μεταξύ τους μέ τόν ἴδιο τρόπο ὅπως δύο ράβδοι. Κοντολογίς, ὅλες οἱ ἐνέργειες ἑνός σωληνοειδοῦς πού τό διαπερνά ένα ρεύμα καί ἐκεῖνες μιᾶς ἀντιστοίχου μαγνητισμένης ράβδου εἶναι οἱ ἴδιες, ἀφοῦ μόνο τό πεδίο εὐθύνεται γι' αὐτές, τό ὅποιο παρουσιάζει καί στίς δύο περιπτώσεις τόν ἴδιο χαρακτήρα. Τό πείραμα βεβαιώνει πλέρια τήν ὑπόθεσή μας.

Πόσο δύσκολο θάταν νά βροῦμε τά γεγονότα αὐτά χωρίς

τήν έννοια του πεδίου! Η έκφραση για τή δύναμη που ενεργεί ανάμεσα σ' ένα σύρμα που τό διαπερνά ένα ρεύμα και σ' ένα μαγνητικό πόλο είναι πολύ πολύπλοκη. Στην περίπτωση τών δύο σωληνοειδών θά έπρεπε νά εξετάσουμε τις δυνάμεις με τις οποίες δύο ρεύματα ενεργούν τό ένα επί του άλλου. Αλλά αν κάνουμε τούτο με τή βοήθεια του πεδίου, διαπιστώνουμε άμέσως τό χαρακτηήρα όλων αυτών τών ενεργειών κατά τή στιγμή που διαπιστώνουμε τήν όμοιότητα ανάμεσα στο πεδίο ενός σωληνοειδούς και εκείνου μιās μαγνητισμένης ράβδου.

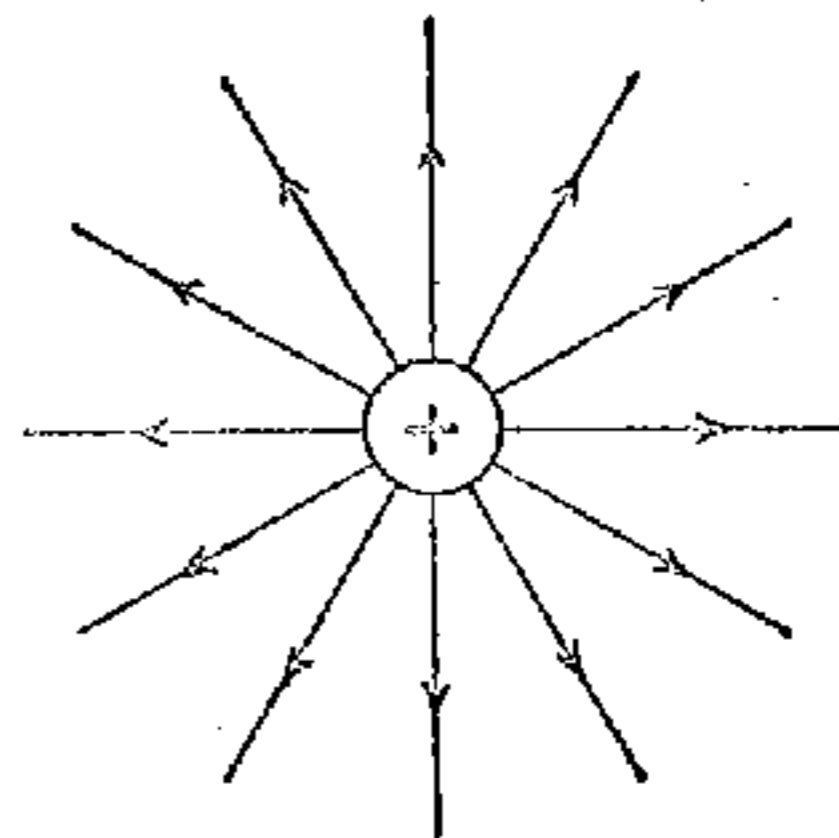
Έχουμε τό δικαίωμα νά θεωρήσουμε τό πεδίο σαν πιο σημαντικό άπ' ό,τι φαινόταν στην άρχή. Μόνες οι ιδιότητες του πεδίου φαίνονται ούσιαστικές για τήν περιγραφή τών φαινομένων' ή διαφορά τών πηγών δέν έχει σημασία. Η έννοια του πεδίου άποδείχτηκε πολύ χρήσιμη άπ' τό γεγονός ότι μās όδήγησε σε νέα πειραματικά γεγονότα.

Άρχισε νά είναι κάτι ανάμεσα στην πηγή και στη μαγνητική βελόνα, για νά χρησιμεύσει στην περιγραφή τής δρώσας δύναμης. Τό θεωρούσαν σαν ένα «όργανο» του ρεύματος, με τό όποίο εκτελείτο όλη ή ενέργεια του ρεύματος. Αλλά τώρα τό όργανο χρησιμεύει ακόμα και σαν διερμηνέας που μεταφράζει τούς νόμους σε μιá γλώσσα άπλή και σαφή και εύκολα κατανοητή.

Η πρώτη επιτυχία τής περιγραφής του πεδίου μās κάνει νά σκεφτούμε ότι θά ήταν βολικό νά θεωρήσουμε όλες τις ενέργειες τών ρευμάτων, τών μαγνητών και τών φορτίων μ' ένα έμμεσο τρόπο, δηλαδή με τή βοήθειά του πεδίου σαν έρμηνευτικού. Ένα πεδίο μπορεί νά θεωρηθεί σαν κάτι που είναι πάντα ένωμένο μ' ένα ρεύμα. Είναι εκεί, άκόμη κι αν λείπει ό μαγνητικός πόλος που φανερώνει τήν ύπαρξή του. Ας επιχειρήσουμε νά ακολουθήσουμε τά νέα αυτά άγνάρια.

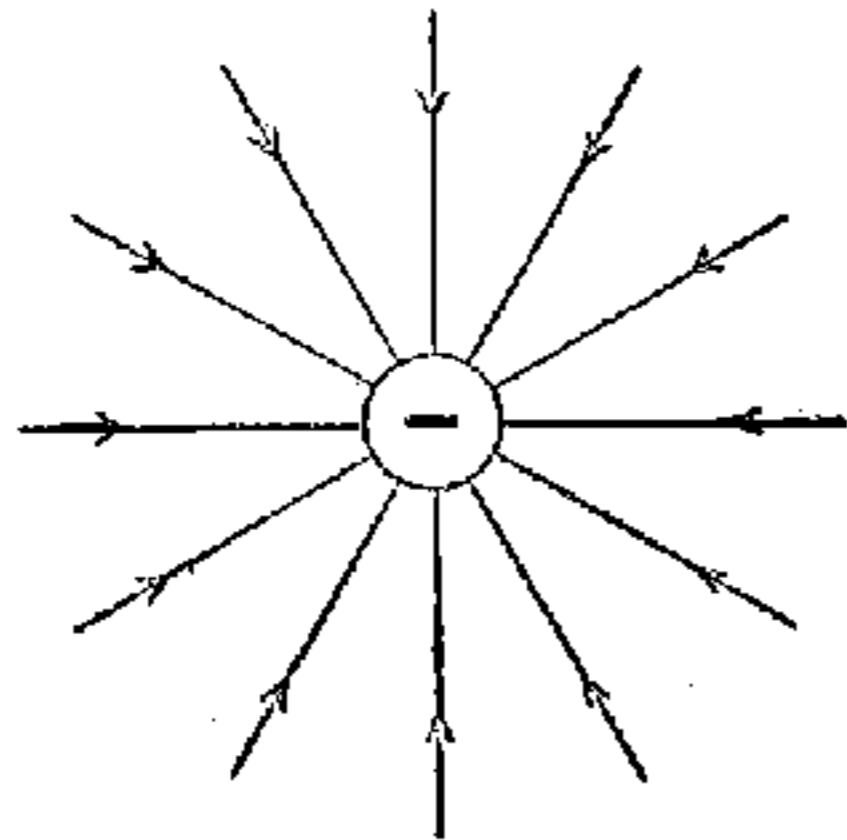
Τό πεδίο ενός άγωγού φορτισμένου μπορεί νά εισαχθεί με τόν ίδιο τρόπο όπως τό πεδίο έλξης, τό πεδίο ενός ρεύματος ή τό μαγνητικό πεδίο. Θα πάρουμε τό πιο άπλό παράδειγμα. Για νά περιγράψουμε τό πεδίο μιās σφαίρας θετικά ήλεκτρισμένης

πρέπει νά διερωτηθοΰμε τί είδους δυνάμεις ενεργούν πάνω σ' ένα μικρό δοκιμαστικό σώμα ήλεκτρισμένο θετικά που τό πλησιάζουμε στην πηγή του πεδίου, δηλαδή στην ήλεκτρισμέ-



νη σφαίρα. Τό γεγονός ότι τό δοκιμαστικό σώμα που χρησιμοποιούμε είναι θετικά και όχι άρνητικά ήλεκτρισμένο είναι μιá καθαρή σύμβαση, που δείχνει προς ποιά διεύθυνση πρέπει νά προσανατολισθοΰν τά τόξα τών δυναμικών γραμμών. Τό πρότυπο είναι άνάλογο με εκείνο του έλκτικού πεδίου (σ. 130), εξ αίτίας τής όμοιότητας που ύπάρχει ανάμεσα στους νόμους του Coulomb και του Νεύτωνος. Η μόνη διαφορά ανάμεσα στα δύο πρότυπα είναι ότι τά τόξα είναι προσανατολισμένα σε διευθύνσεις αντίθετες. Πράγματι, από τή μιá έχουμε τήν άπόθεση ανάμεσα σε δύο φορτία θετικά και από τήν άλλη τήν έλξη ανάμεσα σε δύο μάζες. Ωστόσο τό πεδίο μιās ήλεκτρισμένης άρνητικά σφαίρας θά είναι παρόμοιο με τό έλκτικό πεδίο έφ' όσον τό μικρό δοκιμαστικό σώμα τό ήλεκτρισμένο θετικά θά ύποστεί έλξη από τήν πηγή του πεδίου.

Αν οι δύο ηλεκτρικοί και μαγνητικοί πόλοι είναι σε ήρεμία, δεν υπάρχει καμιά ενέργεια ανάμεσά τους, ούτε έλξη ούτε άπωση. Εκφράζοντας τό ίδιο πράγμα στη γλώσσα του πεδίου, μπορούμε νά ποῦμε: ένα ηλεκτροστατικό πεδίο δεν



έπηρεάζει ένα πεδίο μαγνητοστατικό, καί αντίστροφα. Οι λέξεις «πεδίο στατικό» σημαίνουν ένα πεδίο πού δέ μεταβάλλεται μέ τό χρόνο. Οι μαγνήτες καί τά φορτία θά μπορούσαν αιώνια νά μείνουν τό ένα δίπλα στό άλλο, αν καμιά έξωτερική δύναμη δεν έρχόταν νά τά ταραξεί. Τά ηλεκτροστατικό, μαγνητοστατικό καί έλκτικό πεδία παρουσιάζουν διαφορετικούς χαρακτήρες. Δεν αναμιγνύονται τό καθένα κρατεί την ιδιομορφία του ανεξάρτητα από τά άλλα.

Ας ξαναγυρίσουμε στην ηλεκτρική σφαίρα πού έμεινε ως τώρα σε ήρεμία καί ας υποθέσουμε ότι αρχίζει νά κινείται ύστερα απ' την επενέργεια κάποιας έξωτερικής δύναμης. Η ηλεκτρισμένη σφαίρα κινείται, σημαίνει στη γλώσσα του πεδίου, τό εξής: τό πεδίο του ηλεκτρικού φορτίου μεταβάλλεται μέ τό χρόνο. Αλλά ή κίνηση της ηλεκτρισμένης αυτής σφαίρας ισοδυναμεί, όπως ξέρουμε απ' τό πείραμα του Rowland, μέ ένα ρεύμα. Έξ άλλου κάθε ρεύμα συνοδεύεται από ένα μαγνητικό πεδίο. Η άλυσίδα των συλλογισμών μας παρουσιάζεται ως εξής:

κίνηση του φορτίου → μεταβολή ενός ηλεκτρικού πεδίου  
↓  
ρεύμα → σύνδρομο μαγνητικόν πεδίου

Συνεπώς συμπεραίνουμε: ή μεταβολή ενός ηλεκτρικού πεδίου, πού προκαλεί ή κίνηση ενός φορτίου συνοδεύεται πάντοτε από ένα μαγνητικό πεδίο.

Τό συμπέρασμά μας θεμελιώνεται στό πείραμα του Oersted, αλλά άγκαλιάζει μιά πιά πλατειά περιοχή. Μας μαθαίνει πώς ή ένωση ενός ηλεκτρικού πεδίου, πού μεταβάλλεται μέσα στό χρόνο, μέ ένα μαγνητικό πεδίο, είναι ουσιαστική για τους μετέπειτα αποδεικτικούς συλλογισμούς μας.

Όσο ένα φορτίο βρίσκεται σε ήρεμία, υπάρχει μόνο ένα πεδίο ηλεκτροστατικό· μόλις αρχίσει νά κινείται, εμφανίζεται ένα μαγνητικό πεδίο. Μπορούμε νά ποῦμε κάτι περισσότερο. Τό μαγνητικό πεδίο πού δημιουργεί ή κίνηση του φορτίου θά είναι πιά έντονο, αν τό φορτίο είναι μεγαλύτερο, καί αν κινείται πιά γρήγορα. Αυτό είναι επίσης μιά συνέπεια του πειράματος του Rowland. Χρησιμοποιώντας άλλη μιά φορά τή γλώσσα του πεδίου, μπορούμε νά ποῦμε: όσο πιά γρήγορα μεταβάλλεται τό ηλεκτρικό πεδίο, τόσο μεγαλύτερη είναι ή ένταση του μαγνητικού πεδίου πού τό συνοδεύει.

Έδώ επιχειρήσαμε νά έρμηνεύσουμε γνωστά γεγονότα μεταφράζοντας από τή γλωσσική όρολογία των ρευστών, της παλιός μηχανικής αντίληψης στη νέα γλωσσική όρολογία των πεδίων. Θα δοῦμε άργότερα πόσο σαφής καί διδακτική καί πόσο μεγάλης σημασίας είναι ή νέα μας γλώσσα.

## ΟΙ ΔΥΟ ΒΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

«Η μεταβολή ενός ηλεκτρικού πεδίου συνοδεύεται από ένα μαγνητικό πεδίο». Εάν ανταλλάξουμε τους όρους «μαγνητικό» καί «ηλεκτρικό», ή πρότασή μας άκούγεται έτσι: «Η μεταβολή ενός μαγνητικού πεδίου συνοδεύεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο». Μόνο τό πείραμα μπορεί νά αποφασίσει αν, ή

πρόταση αυτή είναι αληθινή ή όχι. Αλλά η ιδέα να διατυπώσουμε το πρόβλημα αυτό προκύπτει από τη χρήση της γλωσσικής ορολογίας του πεδίου.

Ο Faraday, έδω και πάνω από αιώνα, εκτέλεσε ένα πείραμα που οδήγησε στη μεγάλη ανακάλυψη των επαγωγικών ρευμάτων.

Η απόδειξή της είναι απλούστατη. Μας χρειάζονται μόνο ένα σωληνοειδές ή κάποιο άλλο κύκλωμα, μία μαγνητισμένη ράβδος και ένα όργανο για να φανερωθεί ή ύπαρξη ηλεκτρικού

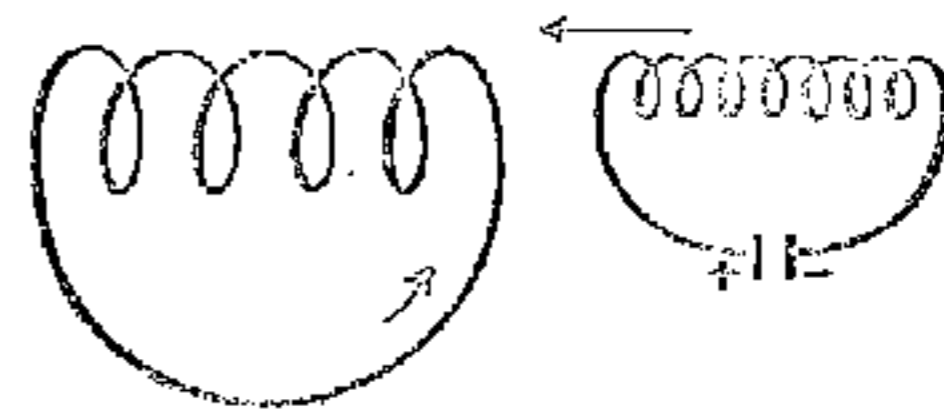


ρεύματος. Για να αρχίσουμε, υποθέτουμε πως μία ήρεμοσα μαγνητισμένη ράβδος βρίσκεται κοντά σε ένα σωληνοειδές που σχηματίζει ένα κλειστό κύκλωμα. Επειδή καμιά πηγή δεν είναι παρούσα, κανένα ρεύμα δεν διαπερνά το σύρμα. Υπάρχει μόνο το μαγνητικό πεδίο της μαγνητισμένης ράβδου, που δεν μεταβάλλεται με το χρόνο. Τώρα αν αλλάξουμε με ταχύτητα τη θέση του μαγνήτου, είτε απομακρύνοντάς τον είτε πλησιάζον-

τάς τον στο σωληνοειδές, ένα ρεύμα θα κάνει την εμφάνισή του για πολύ σύντομο χρόνο και έπειτα θα εξαφανισθεί. Κάθε φορά που η θέση του μαγνήτου αλλάζει, το ρεύμα ξαναφαίνεται, πράγμα που διαπιστώνεται από ένα όργανο αρκετά ευαίσθητο.

Αλλά ένα ρεύμα — από την άποψη της θεωρίας του πεδίου — σημαίνει την ύπαρξη ενός ηλεκτρικού πεδίου που αναγκάζει το ρεύμα να μετατοπισθεί διά μέσου του σύρματος. Το ρεύμα και, κατά συνέπεια και το ηλεκτρικό πεδίο επίσης εξαφανίζονται όταν ο μαγνήτης είναι και πάλι σε ήρεμία.

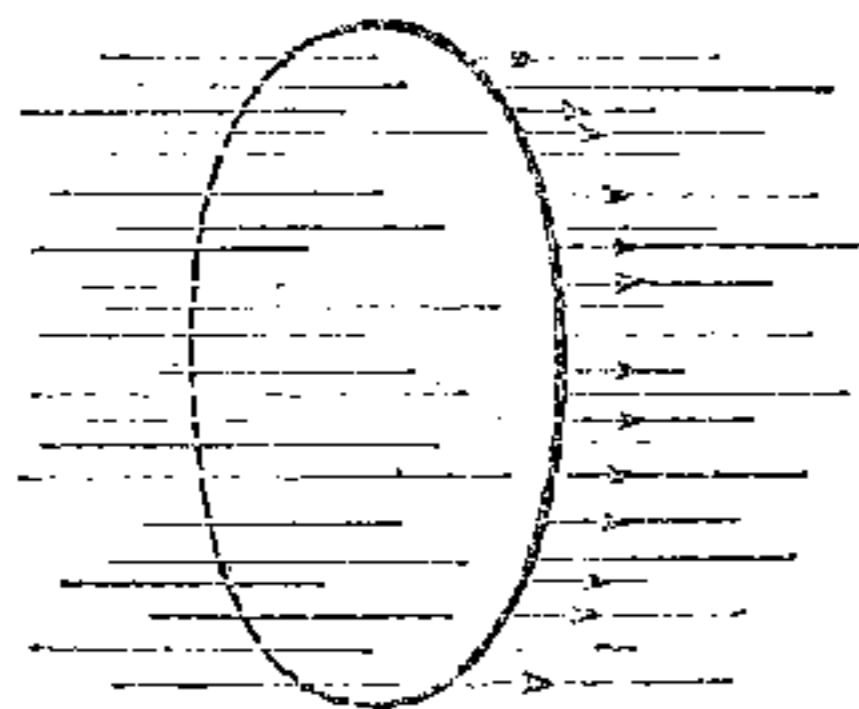
Ας υποθέσουμε προς στιγμήν ότι η γλώσσα του πεδίου δεν είναι γνωστή και ότι οφείλουμε να περιγράψουμε τα αποτελέσματα του πειράματος αυτού ποιοτικά και ποσοτικά με τη γλώσσα των παλαιών μηχανικών έννοιων. Το πείραμά μας διατυπώνεται: με την κίνηση ενός μαγνητικού δίπολου δημιουργήθηκε μία νέα δύναμη, που κινεί τα ηλεκτρικά φορτία μέσα στο σύρμα. Ένα άλλο ζήτημα τίθεται: από τί εξαρτάται η δύναμη αυτή; Θα ήταν δύσκολο να δοθεί απάντηση. Θα έπρεπε να εξετάσουμε την εξάρτηση της δύναμης από την ταχύτητα του μαγνήτου, από το σχήμα του και από το σχήμα του κυκλώματος. Επί πλέον αν το πείραμα αυτό ερμηνευθεί με την παλιά γλώσσα δεν μας δίνει καμιά ένδειξη για να ξέρουμε αν ένα επαγωγικό ρεύμα αντί να διεγερθεί από την κίνηση μιας μαγνητισμένης ράβδου, είναι δυνατό να διεγερθεί από την κίνηση ενός κυκλώματος που το διατρέχει ένα ρεύμα.



Είναι ολότελα διάφορο αν χρησιμοποιήσουμε τη γλώσσα του πεδίου και βασιστούμε στην αρχή μας ότι η ενέργεια

καθορίζεται από το πεδίο. Βλέπουμε άμεσα ότι ένα σωληνοειδές που το διατρέχει ένα ρεύμα θα αποδώσει την ίδια υπηρεσία με μία μαγνητισμένη ράβδο. Το σχέδιο δείχνει δύο σωληνοειδή· ένα μικρό που το διαπερνά ένα ρεύμα και ένα μεγαλύτερο όπου έχει εμφανισθεί το επαγωγικό ρεύμα. Θα μπορούσαμε να μετακινήσουμε το μικρό σωληνοειδές όπως κάναμε με τη μαγνητισμένη ράβδο και να παραγάγουμε ένα επαγωγικό ρεύμα στο μεγάλο σωληνοειδές. Επί πλέον αντί να μετατοπίσουμε το μικρό σωληνοειδές, θα μπορούσαμε να παραγάγουμε και να εξαλείψουμε ένα μαγνητικό πεδίο παράγοντας και εξαλείφοντας το ρεύμα, δηλαδή ανοίγοντας και κλείνοντας το κύκλωμα. Άλλη μία φορά διαπιστώνονται με το πείραμα νέα επιτεύγματα με τη θεωρία του πεδίου.

“Ας πάρουμε ένα παράδειγμα πιο απλό.” Έχουμε ένα κλειστό σύρμα χωρίς καμιά πηγή ρεύματος. Κάπου σε γειτονική περιοχή βρίσκεται ένα μαγνητικό πεδίο. Λίγο μάς ενδιαφέρει αν η πηγή του πεδίου αυτού είναι ένα άλλο κύκλωμα που το διατρέχει ρεύμα ή μία μαγνητισμένη ράβδος. Το σχέδιό μας δείχνει το κλειστό κύκλωμα και τις μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Η ποιοτική και ποσοτική περιγραφή των φαινομένων επαγωγής είναι πολύ απλή με γλωσσική όρολογία του πεδίου.



“Όπως δείχνει το σχέδιο, μερικές δυναμικές γραμμές περνούν ανάμεσα απ’ την επιφάνεια που όρίζει το σύρμα. Θα πάρουμε απ’ όψη τις δυναμικές γραμμές που κόβουν το μέρος του επιπέδου που όρίζει το σύρμα. Δεν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα όσο το πεδίο δεν μεταβάλλεται, όσο μεγάλη κι αν είναι η έντασή του. Άλλά ένα ρεύμα αρχίζει να διέρχεται από το κλειστό περίγραμμα μόλις μεταβάλλεται ο αριθμός των γραμμών που διέρχονται απ’ την επιφάνεια που όρίζει το περίγραμμα. Το ρεύμα καθορίζεται από τη μεταβολή — οποιαδήποτε κι αν είναι η αιτία — του αριθμού των γραμμών που περνούν ανάμεσα απ’ την επιφάνεια. Η μεταβολή αυτή του αριθμού των δυναμικών γραμμών είναι η μόνη ουσιαστική έννοια για την ποιοτική και ποσοτική περιγραφή του επαγωγικού ρεύματος. «Ο αριθμός των γραμμών μεταβάλλεται» σημαίνει ότι μεταβάλλεται ή πυκνότητα των γραμμών, πράγμα που θέλει να πει ότι μεταβάλλεται η ένταση του πεδίου.

Νά λοιπόν τα ουσιαστικά σημεία του συλλογισμού μας: μεταβολή του μαγνητικού πεδίου → επαγωγικό ρεύμα → κίνηση του φορτίου → ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου. Λοιπόν: ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται συνοδεύεται από ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Βρήκαμε έτσι τις δύο πιο σημαντικές βάσεις της θεωρίας των πεδίων ηλεκτρικού και μαγνητικού. Η πρώτη είναι η συνάρτηση ανάμεσα στη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου και στο μαγνητικό πεδίο. Έχει την αρχή της στο πείραμα του Ørsted σχετικά με την παρέκκλιση μιας μαγνητικής βελόνας και οδήγησε στο εξής συμπέρασμα: ένα ηλεκτρικό πεδίο που μεταβάλλεται συνοδεύεται από ένα μαγνητικό πεδίο.

Η άλλη συνδέει την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου με το επαγωγικό ρεύμα και έχει την αρχή της στο πείραμα του Faraday. Οι δύο μαζί απαρτίζουν το θεμέλιο για την ποσοτική περιγραφή.

Πάλι το ηλεκτρικό πεδίο συνοδεύοντας τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου φαίνεται σαν κάτι το πραγματικό. Πιο

πάνω ήμαστων υποχρεωμένοι να φαντασθούμε, χωρίς πόλο δοκιμής, το μαγνητικό πεδίο σαν ύπαρχον. Όμοια και έδω όφείλουμε να παραδεχτούμε ότι το ήλεκτρικό πεδίο ύπάρχει χωρίς την παρουσία του σύρματος που δείχνει την παρουσία ενός έπαγωγικού ρεύματος.

Οι δύο βάσεις μας θά μπορούσαν πράγματι να αναγθούν σε μια σ' αυτήν κυρίως που θεμελιώνεται στο πείραμα Ørsted. Το αποτέλεσμα του πειράματος του Faraday θά μπορούσε να συναχθεί από αυτό το τελευταίο και από το νόμο της διατήρησης της ενέργειας. Χρησιμοποιήσαμε τη δομή με δύο βάσεις αποκλειστικά για λόγους σαφήνειας και οικονομίας.

Μιά επί πλέον συνέπεια της περιγραφής του πεδίου πρέπει να μνημονευθεί. Έχουμε ένα κύκλωμα που το διατρέχει ρεύμα, του όποιου ή πηγή είναι, για παράδειγμα, μία βολταϊκή στήλη. Διακόπτουμε άπτομα τη σύνδεση ανάμεσα στο σύρμα και στην πηγή του ρεύματος. Τώρα δεν ύπάρχει πιά ρεύμα. Άλλά κατά τη σύντομη αυτή διακοπή συμβαίνει μία περίπλοκη πορεία, που ή θεωρία του πεδίου θά μπορούσε άκόμη να προβλέψει. Προτού διακοπεί το ρεύμα, ύπήρχε ένα μαγνητικό πεδίο γύρω άπ' το σύρμα, που έπαυσε να ύπάρχει τη στιγμή που διακόπηκε το ρεύμα. Λοιπόν ή διακοπή του ρεύματος κάνει να εξαφανισθεί ένα μαγνητικό πεδίο. Ο άριθμός των δυναμικών γραμμών, που περνούν ανάμεσα από την έπιφάνεια την όριζόμενη από το σύρμα, έχει μεταβληθεί με μεγάλη ταχύτητα. Άλλά μία γρήγορη μεταβολή μ' όποιονδήποτε τρόπο κι αν παραχθεί, πρέπει να δημιουργήσει ένα έπαγωγικό ρεύμα. Αυτό που πραγματικά ενδιαφέρει είναι ή μεταβολή του μαγνητικού πεδίου, που καθιστά το έπαγωγικό ρεύμα έντονότερο, αν είναι πιο μεγάλη. Το έπικόλουθο αυτό είναι μία άλλη άπόδειξη υπέρ της θεωρίας. Η διακοπή ενός ρεύματος όφείλει να συνοδεύεται από μία στιγμιαία εμφάνιση ίσχυρού έπαγωγικού ρεύματος. Το πείραμα έπικυρώνει έπίσης την πρόβλεψη. Όποιος έχει ποτέ διακόψει ένα ρεύμα, πρέπει να έχει παρατηρήσει την εμφάνιση ενός σπινθήρος. Ο σπινθήρας αυτός φανερώνει τις μεγάλες

διαφορές δυναμικού που προκάλεσε ή ταχεία μεταβολή του μαγνητικού πεδίου.

Η ίδια πορεία είναι δυνατό να εξετασθεί από μία διαφορετική άποψη, από την άποψη της ενέργειας. Ένα μαγνητικό πεδίο έχει εξαφανισθεί και έχει προκληθεί ένας σπινθήρας. Ο σπινθήρας αντιπροσωπεύει ενέργεια, έπομένως και το μαγνητικό πεδίο. Μένοντας με άυστηρότητα στην έννοια του πεδίου και στη γλώσσα του, πρέπει να θεωρήσουμε το μαγνητικό πεδίο σαν άποθήκη ενέργειας. Μόνο έτσι θά έχουμε την ικανότητα να περιγράψουμε τά ήλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα σε συμφωνία με τον νόμο της διατήρησης της ενέργειας.

Παριστάνοντας εικονικά στην άρχή ένα χρήσιμο πρότυπο, το πεδίο σιγά-σιγά απέβη πραγματικό. Μας βοηθεί να κατανοήσουμε γνωστά γεγονότα και μας όδηγεί σε καινούρια. Η άπόδοση ενέργειας στο πεδίο σημειώνει ένα άκόμη βήμα στην ανάπτυξη εκείνη όπου ή έννοια του πεδίου έχει προσλάβει όλο και μεγαλύτερη σημασία και όπου ή έννοια της ύλης, που παίζει κεφαλαιώδη ρόλο στη μηχανική αντίληψη, έχει όλο και περισσότερο εξαλειφθεί.

## Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

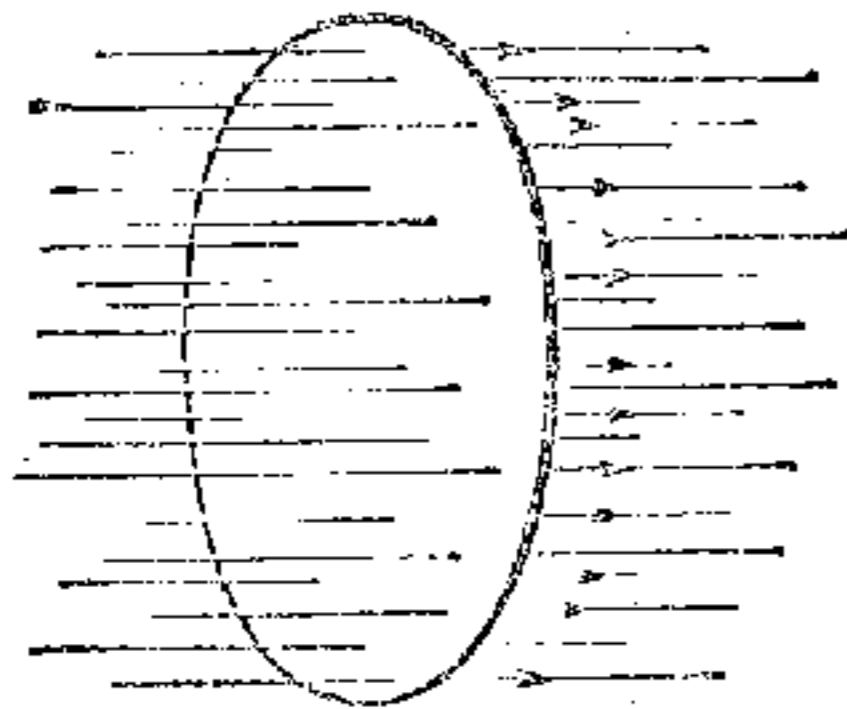
Η ποσοτική ή μαθηματική περιγραφή των νόμων του πεδίου βρίσκεται περιληπτικά σ' αυτό που όνομάζουν εξισώσεις του Maxwell. Τά μέχρι τώρα άναφερθέντα γεγονότα όδήγησαν στη διατύπωση των εξισώσεων αυτών, αλλά το περιεχόμενό τους είναι πολύ πλουσιότερο άπ' αυτό που μπορέσαμε να παρουσιάσουμε. Η άπλή μορφή τους κρύβει ένα βάθος που μόνο μία προσεκτική μελέτη μπορεί να άποκαλύψει. Διατυπώνουν το πιο σημαντικό γεγονός άπό την εποχή του Νεύτωνα, όχι μόνο έξ αίτίας του πλούτου του περιεχομένου τους, αλλά άκόμη γιατί διαμορφώνουν το πρότυπο ενός νόμου νέου τύπου.

Τά χαρακτηριστικά γνωρίσματα των εξισώσεων του Maxw-

ell, που ξαναφαινόνται σ' όλες τις άλλες εξισώσεις της νεώτερης φυσικής, συνοψίζονται σε μία μόνη πρόταση. Οι εξισώσεις του Maxwell είναι νόμοι που παριστάνουν τη δομή του πεδίου.

Για ποιό λόγο οι εξισώσεις αυτές διαφέρουν ως προς τη μορφή και τόν χαρακτήρα απ' τις εξισώσεις της κλασσικής μηχανικής; Τι σημαίνει η βεβαίωση ότι περιγράφουν τη δομή του πεδίου; Πώς είναι δυνατό να διατυπώσουμε, στηριζόμενοι στα αποτελέσματα των πειραμάτων του Oersted και του Faraday ένα είδος νόμου, που αποδείχεται τόσο σημαντικός για την πάρα πέρα ανάπτυξη της φυσικής;

Με τό πείραμα του Oersted είδαμε κιόλας πώς ένα μαγνητικό πεδίο περιελίσσεται από μόνο του γύρω από ένα ηλεκτρικό πεδίο που μεταβάλλεται. Με τό πείραμα του Faraday είδαμε πώς ένα ηλεκτρικό πεδίο περιελίσσεται από μόνο του γύρω από ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται. Για να δώσουμε μία συνοπτική άποψη μερικῶν από τά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της θεωρίας του Maxwell, θά συγκεντρώσουμε για τήν ὥρα ὅλη τήν προσοχή μας σ' ένα απ' αὐτά τά πειράματα, στό πείραμα του Faraday. Ξαναφτιάχνουμε τό σχέδιο ὅπου ένα ηλεκτρικό



ρεύμα παράγεται ἐξ ἑνὸς γωγῆς ἀπὸ μαγνητικό πεδίο πού μεταβάλλεται. Ξέρουμε κιόλας ὅτι ἐμφανίζεται ἑπαγωγικό ρεύμα ἂν ὁ ἀριθμός τῶν δυναμικῶν γραμμῶν πού περνοῦν ἀνάμεσα ἀπὸ

μιά περιορισμένη ἐπιφάνεια μεταβάλλεται. Συνεπῶς τό ρεύμα θά ἐμφανισθεῖ ἂν μεταβάλλεται τό μαγνητικό πεδίο, ἢ ἂν παραμορφθεῖ τό κύκλωμα ἢ τεθεῖ σέ κίνηση, δηλαδή ἂν ὁ ἀριθμός τῶν μαγνητικῶν γραμμῶν πού περνοῦν διὰ μέσου τῆς ἐπιφάνειας μεταβληθεῖ, ὅποιαδῆποτε κι ἂν εἶναι ἡ αἰτία τῆς μεταβολῆς αὐτῆς. Ἄν θέλαμε νά πάρουμε ὑπ' ὄψη ὅλες αὐτές τις ποικίλες δυνατότητες καί νά διερευνήσουμε τις ἰδιαιτερες ἐπιδράσεις τους, θά καταλήγαμε ἀναγκαστικά σέ μιά πολύ περίπλοκη θεωρία. Ἄλλά δέν μπορούμε νά ἀπλουστεύσουμε τό πρόβλημά μας; Ἄς ἐπιχειρήσουμε νά ἐξαλείψουμε ἀπ' τή σκέψη μας ὅ,τι ἀναφέρεται στή μορφή τοῦ κυκλώματος, στό μήκος του καί στήν ἐπιφάνεια πού περιβάλλεται ἀπ' τό σύρμα. Ἄς φαντασθοῦμε ὅτι τό κύκλωμα στό τελευταῖο μας σχέδιο γίνεται ὄλο καί μικρότερο, ὅτι στενεύει βαθμιαία ὅσο νά ἀποβεῖ ἕνα πολύ μικρό κύκλωμα, πού περικλείει ἕνα κάποιο σημεῖο μέσα στό διάστημα. Ὅ,τι ἀφορᾷ στό σχῆμα καί στό μέγεθος ἀποβαίνει τότε χωρίς καμιά σημασία. Στήν ὀριακή αὐτή περίπτωση, ὅπου ἡ κλειστή καμπύλη ἀνάγεται σέ σημεῖο, τό μέγεθος καί τό σχῆμα ἐξαφανίζονται ἀπό τήν σκέψη μας, καί πετυχαίνουμε νόμους πού συνδέουν τις μεταβολές τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου καί τοῦ ηλεκτρικοῦ πεδίου σ' ἕνα σημεῖο τοῦ διαστήματος καί σέ μιά κάποια στιγμή.

Πρόκειται γιά ἕνα απ' τά κυριώτερα βήματα πού ὀδηγοῦν στίς εξισώσεις τοῦ Maxwell. Εἶναι ἀκόμα ἕνα ἐξιδανικευμένο πείραμα, δημιούργημα τῆς φαντασίας, τό πείραμα τοῦ Faraday ὅταν ἐκτελεσθεῖ μέ ἕνα κύκλωμα πού ἔχει ἀναχθεῖ σέ σημεῖο.

Θά ἔπρεπε στήν πραγματικότητα νά τό ὀνομάσουμε μισοβήμα καί ὄχι βήμα. Ὡς τώρα ἡ προσοχή μας συγκεντρώθηκε στό πείραμα τοῦ Faraday. Ἄλλά ἡ ἄλλη βάση τῆς θεωρίας τοῦ πεδίου, πού ἠμελιώνεται στό πείραμα τοῦ Oersted πρέπει νά ἐξετασθεῖ μέ ἴδια φροντίδα καί ὁμοιο τρόπο. Στό πείραμα τοῦτο οἱ μαγνητικές δυναμικές γραμμές περιελίσσονται ἀπό μόνες τους γύρω ἀπό τό ρεύμα. Ἀνάγοντας τις μαγνητικές αὐτές δυναμικές γραμμές κυκλικοῦ σχήματος σέ σημεῖο, πραγματο-

ποιείται τό δεύτερο μισο-βήμα, καί τό άκέραιο βήμα μās δίνει τή σύνδεση ανάμεσα στίς μεταβολές τών πεδίων μαγνητικού καί ήλεκτρικού σ' ένα σημείο του διαστήματος καί σέ μιά κάποια στιγμή. Άλλά είναι ανάγκη νά κάνουμε άλλο ένα βήμα. Σύμφωνα μέ τό πείραμα του Faraday χρειάζεται ένα σύρμα γιά νά φανερωθεί ή ύπαρξη του ήλεκτρικού πεδίου, όπως χρειάζεται μαγνητικός πόλος ή βελόνα γιά νά γίνει φανερή ή ύπαρξη ενός μαγνητικού πεδίου στό πείραμα του Oersted. Άλλά ή καινούρια αυτή θεωρητική ιδέα του Maxwell, ξεπερνά τά πειραματικά αυτά γεγονότα. Τό ήλεκτρικό καί μαγνητικό πεδίο, ή ηλεκτρομαγνητικό, είναι στή θεωρία του Maxwell κάτι τό πραγματικό. Τό ήλεκτρικό πεδίο παράγεται από ένα μαγνητικό πεδίο πού μεταβάλλεται, είτε ύπάρχει είτε δέν ύπάρχει σύρμα γιά νά αποκαλύψει τήν ύπαρξή του· τό μαγνητικό πεδίο παράγεται από ένα ήλεκτρικό πεδίο πού μεταβάλλεται, είτε ύπάρχει είτε δέν ύπάρχει μαγνητικός πόλος γιά νά φανερώσει τήν ύπαρξή του.

Δύο ουσιώδη βήματα οδήγησαν έτσι στίς εξισώσεις του Maxwell. Τό πρώτο: έχοντας ύπ' όψη τά πειράματα του Oersted καί του Rowland έπρεπε νά αναγάγουμε σ' ένα σημείο τήν κυκλική γραμμή του μαγνητικού πεδίου περιελισσομένη από μόνη της γύρω από τό ρεύμα καί από τό ήλεκτρικό πεδίο πού μεταβάλλεται· έχοντας ύπ' όψη τό πείραμα του Faraday, έπρεπε ν' αναγάγουμε σ' ένα σημείο τήν κυκλική γραμμή του ήλεκτρικού πεδίου αυτοπεριελισσομένου γύρω από τό μαγνητικό πεδίο πού μεταβάλλεται. Τό δεύτερο βήμα συνίσταται στό ότι τό πεδίο λαμβάνεται σαν κάτι τό πραγματικό· μιά καί δημιουργήθηκε, τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ύπάρχει, ενεργεί καί μεταβάλλεται σύμφωνα μέ τούς νόμους του Maxwell.

Οί εξισώσεις του Maxwell περιγράφουν τή δομή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Όλο τό διάστημα είναι ή σκηνή τών νόμων αυτών καί όχι, όπως γιά τούς μηχανικούς νόμους, μόνο τά σημεία, όπου είναι παρούσα ύλη καί φορτία.

“Ας θυμηθοΰμε πώς συνέβαιναν τά πράγματα στή μηχανική.

Γνωρίζοντας τή θέση καί τήν ταχύτητα ενός σωματίδιου σέ μιά δοσμένη στιγμή καί τίς ενεργοΰσες δυνάμεις, μπορούσε κανείς νά προβλέψει τή μέλλουσα τροχιά του. Στή θεωρία του Maxwell, αν γνωρίζουμε τό πεδίο σέ μιά δοσμένη στιγμή, μπορούμε, κατά τίς εξισώσεις τής θεωρίας, νά συμπεράνουμε όλες τίς μεταβολές του πεδίου μέσα στό διάστημα καί τό χρόνο. Οί εξισώσεις του Maxwell μās παρέχουν τήν ικανότητα νά παρακολουθήσουμε τήν ιστορία του πεδίου, όπως ακριβώς οί μηχανικές εξισώσεις μās επέτρεψαν νά παρακολουθήσουμε τήν ιστορία τών υλικών σωματιδίων.

Άλλά ύπάρχει άλλη μιά ουσιώδης διαφορά ανάμεσα στους μηχανικούς νόμους κι' εκείνους του Maxwell. Μιά σύγκριση τών νόμων τής βαρύτητας του Νεύτωνα μέ τούς νόμους του πεδίου του Maxwell θά δια φωτίσει μερικά απ' τά χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτών τών εξισώσεων.

Μέ τή βοήθεια τών νόμων του Νεύτωνα μπορούμε, απ' τή δύναμη πού ενεργεί ανάμεσα στον “Ηλιο καί στή Γη, νά συμπεράνουμε τήν κίνηση τής Γης. Οί Νόμοι αυτοί συνδέουν τήν κίνηση τής Γης από τήν επενέργεια του μακρυνού “Ηλιου. Η Γη καί ο “Ηλιος, αν καί απέχουν τόσο ο ένας απ' τήν άλλη συμμετέχουν καί οί δυό στό παιχνίδι τών δυνάμεων.

Στή θεωρία του Maxwell δέν ύπάρχουν δρώντα υλικά. Οί μαθηματικές εξισώσεις τής θεωρίας αυτής εκφράζουν τούς νόμους πού διέπουν τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Δέν συνδέουν, όπως συμβαίνει μέ τούς νόμους του Νεύτωνα, δύο φαινόμενα πολύ απομακρυσμένα τό ένα απ' τό άλλο· δέν συνδέουν τά έδω γεγονότα μέ τίς εκεί συνθήκες. Τό πεδίο έδω καί τώρα εξαρτάται από άμεσα γειτονικό πεδίο σέ μιά στιγμή άμεσα προγενέστερη. Οί εξισώσεις μās επιτρέπουν νά προβλέψουμε αυτό πού θά συμβεί λίγο μακρύτερα μέσα στό διάστημα καί λίγο αργότερα μέσα στό χρόνο, αν γνωρίζουμε τί συμβαίνει έδω καί τώρα. Μās επιτρέπουν ν' αυξήσουμε τή γνώση μας γιά τό πεδίο μέ βήματα μικρά. Μπορούμε νά συμπεράνουμε αυτό πού συμβαίνει έδω απ' αυτό πού συνέβηκε μακριά, μέ τήν άθροιση

αὐτῶν τῶν πολὺ μικρῶν βημάτων. Ἀντίθετα στή θεωρία τοῦ Νεύτωνα ἐπιτρέπονται μόνο μεγάλα βήματα πού συνδέουν ἀνάμεσα τους τὰ ἀπομακρυσμένα γεγονότα. Ἡ θεωρία τοῦ Maxwell ἐπιτρέπει νά ξαναβροῦμε τὰ πειράματα τοῦ Oersted καί τοῦ Faraday, ἀλλά μόνο μέ τήν ἄθροιση μικρῶν βημάτων, τό καθένα τῶν ὁποίων ὑπακούει στίς ἐξισώσεις τοῦ Maxwell.

Μιά βαθύτερη μαθηματική μελέτη τῶν ἐξισώσεων τοῦ Maxwell δείχνει πῶς μπορούμε νά βγάλουμε νέα καί ἀναπάντεχα συμπεράσματα καί πῶς ὅλη ἡ θεωρία μπορεῖ νά ὑποβληθεῖ σέ μιὰ δοκιμασία ἀνώτερου βαθμοῦ, γιατί τὰ θεωρητικά ἐπακόλουθα ἔχουν τώρα ἕνα ποσοτικό χαρακτήρα καί ἀποκαλύπτονται ἀπό μιὰ ὁλόκληρη σειρά λογικῶν ἐπιχειρημάτων.

Ἄς φαντασθοῦμε ἀκόμη ἕνα ἐξιδανικευμένο πείραμα. Μιά μικρή σφαῖρα ἠλεκτρικά φορτισμένη ἀναγκάζεται ἀπό ἐξωτερική ἐπίδραση νά ταλαντευθεῖ ρυθμικά καί μέ μεγάλη ταχύτητα, ὅπως τό ἐκκρεμές. Ὄντας κάτοχοι τῆς γνώσης τῶν μεταβολῶν τοῦ πεδίου, πῶς πρέπει νά περιγράψουμε στή γλῶσσα τοῦ πεδίου αὐτό πού συμβαίνει ἐδῶ;

Ἡ ταλάντευση τοῦ φορτίου παράγει ἕνα μεταβλητό ἠλεκτρικό πεδίο, πού συνοδεύεται πάντοτε ἀπό ἕνα μαγνητικό μεταβλητό πεδίο. Ἄν τοποθετήσουμε κάπου κοντά ἕνα σύρμα πού σχηματίζει κλειστό κύκλωμα, τό μαγνητικό πεδίο πού μεταβάλλεται θά συνοδευτεῖ τότε ἀπό ἠλεκτρικό ρεῦμα μέσα στό κύκλωμα. Ὅλα αὐτά δέν εἶναι παρά ἐπανάληψη γνωστῶν γεγονότων, ἀλλά ἡ μελέτη τῶν ἐξισώσεων τοῦ Maxwell μᾶς ἐπιτρέπει νά διευσθενώσουμε βαθύτερα στό πρόβλημα τοῦ ταλαντευομένου ἠλεκτρικοῦ φορτίου. Ἀπό ἕνα μαθηματικό συμπέρασμα τῶν ἐξισώσεων τοῦ Maxwell μπορούμε νά βροῦμε τό χαρακτήρα τοῦ πεδίου πού περιβάλλει ἕνα ταλαντευόμενο φορτίο, τή δομή του κοντά καί μακριά ἀπ' τή πηγή καί τή μεταβολή του μέσα στό χρόνο. Ὅ,τι προκύπτει ἀπό ἕνα τέτοιο συμπέρασμα εἶναι τό *ἠλεκτρομαγνητικό κύμα*. Τό ταλαντευόμενο φορτίο ἐκπέμπει ἀκτινοβόλο ἐνέργεια, πού ξαπλώνεται στό διάστημα μέ μιὰ ὀρισμένη ταχύτητα. Ἀλλά ἡ μεταφορά ἐνέργειας, ἡ κίνηση μιᾶς κατάστασης, εἶναι τὰ χαρακτηριστικά ὄλων τῶν κυματοειδῶν φαινομένων.

Ἐχομε ἤδη δεῖ ὅτι ὑπάρχουν διάφορα εἶδη κυμάτων. Ὑπάρχει τό ἐπίμηκες κύμα, πού παράγεται ἀπό μιὰ ὀστική σφαῖρα, ὅπου οἱ μεταβολές τῆς πυκνότητας διαδίδονται διά μέσου τοῦ περιβάλλοντος. Ὑπάρχει τό περιβάλλον, πού μοιάζει μέ παγετό, ὅπου διαδίδονται τὰ ἐγκάρσια κύματα. Μιά παραμόρφωση τοῦ παγετοῦ, προξενουμένη ἀπό τήν περιστροφή τῆς σφαίρας, διαδίδεται διά μέσου τοῦ περιβάλλοντος. Τί εἶδους εἶναι οἱ μεταβολές πού διαδίδονται στήν περίπτωση ἑνός ἠλεκτρομαγνητικοῦ κύματος; Εἶναι ἀκριβῶς οἱ μεταβολές ἑνός ἠλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου. Κάθε μεταβολή ἑνός ἠλεκτρικοῦ πεδίου δημιουργεῖ ἕνα μαγνητικό πεδίο· κάθε μεταβολή αὐτοῦ τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου δημιουργεῖ ἕνα ἠλεκτρικό πεδίο· κάθε μεταβολή..., καί οὕτω καθ' ἑξῆς. Ἐπειδή τό πεδίο ἀντιπροσωπεύει ἐνέργεια, ὅλες αὐτές οἱ μεταβολές πού διαδίδονται στό διάστημα μέ μιὰ ὀρισμένη ταχύτητα, παράγουν ἕνα κύμα. Οἱ δυναμικές ἠλεκτρικές καί μαγνητικές γραμμές κεῖνται πάντοτε, ὅπως μᾶς δείχνει τό συμπέρασμα τῆς θεωρίας, σέ ἐπίπεδα κάθετα στή διεύθυνση τῆς διάδοσης. Τό κύμα πού γεννᾶται εἶναι συνεπῶς ἐγκάρσιο. Τά ἀρχικά γνωρίσματα τῆς εἰκόνας τοῦ πεδίου, πού σχηματίσαμε χρησιμοποιώντας τὰ πειράματα τοῦ Oersted καί τοῦ Faraday, διατηροῦνται πάντα, ἀλλά διαπιστώνουμε ὅτι ἔχει μιὰ βαθύτερη σημασία.

Τό ἠλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται μέσα στό κενό διάστημα· κι αὐτό εἶναι ἐπίσης μιὰ συνέπεια τῆς θεωρίας. Ἄν τό ταλαντευόμενο φορτίο σταματήσει ἀπότομα, τό πεδίο του ἀποβαίνει τότε ἠλεκτροστατικό. Ἀλλά ἡ σειρά τῶν κυμάτων πού γεννήθηκαν ἀπ' τήν ταλάντευση ἐξακολουθεῖ νά διαδίδεται. Τά κύματα διάγουν μιὰ ἀνεξάρτητη ὑπαρξη καί μπορεῖ κανεῖς νά παρακολουθήσει τήν ἱστορία τῶν μεταβολῶν τους ὅπως παρακολουθεῖ τήν ἱστορία ἑνός ὁποιοῦδήποτε ὄλικου ἀντικειμένου.

Ἀντιλαμβανόμεστε ὅτι ἡ εἰκόνα ἑνός ἠλεκτρομαγνητικοῦ κύματος, πού διαδίδεται μέ μιὰ κάποια ταχύτητα στό διάστημα καί μεταβάλλεται μέ τό χρόνο, ἀκολουθεῖ τίς ἐξισώσεις τοῦ Maxwell ἀποκλειστικά γιατί περιγράφουν τή δομή τοῦ ἠλεκ-

τρομαγνητικού πεδίου για οποιοδήποτε σημείο στο διάστημα και για οποιαδήποτε στιγμή.

Ένα άλλο πολύ σπουδαίο ζήτημα τίθεται τώρα. Μέ ποιά ταχύτητα το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο κενό διάστημα; Η θεωρία με τη βοήθεια μερικών απλών πειραματικών δεδομένων, που δεν έχουν καμιά σχέση με την πραγματική διάδοση των κυμάτων, δίνει μιά σαφή απάντηση: *ή ταχύτητα ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός.*

Τά πειράματα του *Cersted* και του *Faraday* αποτελούν τό θεμέλιο των νόμων του *Maxwell*. Όλα τά αποτελέσματα που πετύχαμε ως τώρα οφείλονται σε μιά προσεκτική μελέτη των νόμων αυτών, έκφρασμένων στη γλώσσα του πεδίου. Η θεωρητική ανακάλυψη ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος διαδιδόμενου με την ταχύτητα του φωτός είναι μιά από τις μεγαλύτερες κατακτήσεις στην ιστορία της επιστήμης.

Τό πείραμα επικύρωσε την πρόβλεψη της θεωρίας. Εδώ και πενήντα χρόνια ο *Herz* απέδειξε, για πρώτη φορά, την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και επικύρωσε με τό πείραμα ότι ή ταχύτητά τους είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός. Σήμερα χιλιάδες ανθρώπων μαρτυρούν ότι στέλνουν και δέχονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τά όργανα που χρησιμοποιούν είναι πολύ πιο πολύπλοκα από εκείνα που χρησιμοποίησε ο *Herz* και φανερώνουν την παρουσία κυμάτων απομακρυσμένων από τις πηγές τους χιλιάδες χιλιόμετρα, κι όχι μόνο μερικά μέτρα.

### ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΑΙΘΕΡΑΣ

Τό ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι κύμα εγκάρσιο και διαδίδεται με την ταχύτητα του φωτός στο κενό διάστημα. Τό γεγονός ότι οι ταχύτητές τους είναι ίδιες υποβάλλει την ιδέα μιάς στενής συγγένειας ανάμεσα στα όπτικά και στα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα.

Όταν είχαμε να διαλέξουμε ανάμεσα στη μοριακή θεωρία και στη θεωρία των κυμάτων, προτιμήσαμε την τελευταία. Η

διάθλαση του φωτός ήταν τό πιο ισχυρό επιχείρημα για να μās κάνει να πάρουμε αυτή την απόφαση. Αλλά δε θάρθουμε σε αντίθεση με καμιά απ' τις εξηγήσεις των όπτικών γεγονότων υποθέτοντας έπίσης ότι τό κύμα του φωτός είναι κύμα ηλεκτρομαγνητικό. Αντίθετα μπορούμε να βγάλουμε άκόμενη και άλλα συμπεράσματα. Αν πραγματικά είναι έτσι, πρέπει τότε να υπάρχει κάποια συνάρτηση ανάμεσα στις όπτικές και στις ηλεκτρικές ιδιότητες της ύλης, που μπορεί να συναχθεί από τη θεωρία. Τό γεγονός ότι είναι δυνατόν να προκύψουν απ' αλήθεια συμπεράσματα αυτού του είδους, που άντέχουν στη δοκιμασία ενός πειράματος είναι τό ουσιαστικό επιχείρημα υπέρ της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του φωτός.

Τό μεγάλο αυτό επίτευγμα οφείλεται στη θεωρία του πεδίου. Δύο κλάδοι της επιστήμης, που φαινομενικά δεν έχουν καμιά σχέση μεταξύ τους, άγκαλιάζονται απ' την ίδια θεωρία. Οι ίδιες εξισώσεις του *Maxwell* περιγράφουν τόσο την ηλεκτρική έπαγωγή όσο και την όπτική διάθλαση. Αν σκοπός μας είναι να περιγράψουμε με μιά θεωρία ό,τι έχει ποτέ συμβεί ή θά μπορούσε να συμβεί τότε ή ένωση της όπτικής και του ηλεκτρισμού σημειώνει αναμφισβήτητα ένα μεγάλο βήμα προς τά εμπρός. Η μόνη διαφορά από φυσική άποψη ανάμεσα σ' ένα συνηθισμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα και σ' ένα κύμα φωτός είναι τό μήκος του κύματος· είναι πολύ μικρό για τά κύματα φωτός που μπορεί να δει τό ανθρώπινο μάτι, και μεγάλο για τά συνηθισμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που δέχεται ένας ραδιοφωνικός δέκτης.

Η παλιά μηχανική αντίληψη επιχειρούσε ν' αναγάγει όλα τά φυσικά γεγονότα σε δυνάμεις ενεργοῦσες ανάμεσα σε όλικά μόρια. Σ' αυτή την αντίληψη ήταν θεμελιωμένη ή άπλοϊκή θεωρία των ηλεκτρικών ρευμάτων. Τό πεδίο δεν ήταν γνωστό στο φυσικό των αρχών του 19ου αιώνα. Γι' αυτόν μόνο ή οὐσία και οι μεταβολές της είχαν πραγματικότητα. Προσπαθοῦσε να περιγράψει την ενέργεια δύο ηλεκτρικών φορτίων αποκλειστικά και μόνο με έννοιες που αναφερόταν απ' ευθείας στα δύο φορτία.

Στήν ἀρχή ἡ ἔννοια τοῦ πεδίου δέν ἦταν τίποτε ἄλλο ἀπό ἓνα μέσο γιά νά διεκκολύνει τήν κατανόηση τῶν φαινομένων ἀπό μηχανική ἀποψη. Στή νέα γλωσσική ὀρολογία τοῦ πεδίου, εἶναι ἡ περιγραφή τοῦ πεδίου ἀνάμεσα στά δύο φορτία, καί ὄχι τά ἴδια τά φορτία, πού εἶναι οὐσιώδης γιά νά κατανοήσουμε τήν ἐνέργειά τους. Ἡ ἀναγνώριση τῶν νέων ἐννοιῶν ὄλο καί κερδίζει ἔδαφος καί τό πεδίο στό τέλος παραμερίζει τήν οὐσία. Ἐγινε ἀντιληπτό ὅτι κάτι μεγάλης σημασίας ἔλαβε χώρα στή φυσική. Δημιουργήθηκε μιᾶ νέα πραγματικότητα, μιᾶ νέα ἔννοια, γιά τήν ὁποία δέν ὑπῆρχε θέση στή μηχανική περιγραφή. Σιγά-σιγά καί μέ σταθερό ἀγῶνα, ἡ ἔννοια τοῦ πεδίου κατόρθωσε νά καταλάβει τήν πρώτη θέση στή φυσική καί καταλέγεται ἀνάμεσα στίς θεμελιακές ἐννοιες τῆς ἐπιστήμης αὐτῆς. Τό ἠλεκτρομαγνητικό πεδίο εἶναι γιά τό νεώτερο φυσικό πραγματικό ὅσο καί τό κάθισμα στό ὁποῖο κάθεται.

Ἄλλά θά ἦταν σφαλερό νά πιστεῦουμε πῶς ἡ νέα ἀντίληψη τοῦ πεδίου λύτρωσε τήν ἐπιστήμη ἀπ' τά σφάλματα τῆς παλιᾶς θεωρίας τῶν ἠλεκτρικῶν ρευμάτων, ἢ ὅτι ἡ νέα θεωρία ἐκμηδενίζει τίς κατακτήσεις τῆς παλιᾶς. Ἡ νέα θεωρία παρουσιάζει τόσο τίς ἀξίες ὅσο καί τούς περιορισμούς τῆς παλιᾶς καί μᾶς ἐπιτρέπει νά ξαναβροῦμε τίς παλιές μας ἐννοιες ἀπό μιᾶ πιό ἀνώτερη ἀποψη. Αὐτό ἀληθεύει ὄχι μόνο γιά τίς θεωρίες τῶν ἠλεκτρικῶν ρευμάτων καί τοῦ πεδίου, ἀλλά ἀκόμη καί γιά ὄλες τίς ἀλλαγές στίς φυσικές θεωρίες ὅσο ἐπαναστατικές κι ἂν φαίνονται. Στήν περίπτωσή μας βρίσκουμε πάντοτε τήν ἔννοια τοῦ ἠλεκτρικοῦ φορτίου στή θεωρία τοῦ Maxwell, ἂν καί τό φορτίο θεωρεῖται μόνο σάν πηγή τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου. Ὁ νόμος τοῦ Coulomb ἰσχύει πάντοτε καί περιλαμβάνεται στίς ἐξισώσεις τοῦ Maxwell, ἀπ' τίς ὁποῖες μπορεῖ νά βγεῖ σά μιᾶ ἀπ' τίς πολυάριθμες συνέπειές τους. Μποροῦμε πάντοτε νά ἐφαρμόζουμε τήν παλιά θεωρία, κάθε φορά πού ἡ ἐρευνά μας βρίσκεται στήν περιοχὴ ὅπου αὐτή ἰσχύει. Ἀλλά μποροῦμε ἐξ ἴσου καλά νά ἐφαρμόζουμε τή νέα θεωρία, ἐφ' ὅσον ὄλα τά γνωστά γεγονότα βρίσκονται στήν περιοχὴ ὅπου αὐτή ἰσχύει.

Χρησιμοποιώντας μιᾶ σύγκριση μποροῦμε νά ποῦμε ὅτι ἡ

δημιουργία μιᾶς νέας θεωρίας δέ μοιάζει μέ τήν κατεδάφιση μιᾶς ἀποθήκης καί τήν ἀνοικοδόμηση στή θέση τῆς ἐνός οὐρανοξύστη. Μοιάζει μᾶλλον μέ τήν ἀνάβαση βουνοῦ, ὅπου φθάνουμε ὄλο καί σέ νεώτερες καί πιό ἐκτεταμένες ἀπόψεις, ὅπου ἀνακαλύπτουμε ἀναπάντεχες σχέσεις ἀνάμεσα στό σημεῖο (ἀφετηρία) τῆς ἀναχώρησης καί στά πολυάριθμα μέρη πού τό περιβάλλουν. Ἀλλά τό σημεῖο τῆς ἀναχώρησης ὑφίσταται πάντοτε καί μποροῦμε νά τό βλέπουμε, ἂν καί φαίνεται μικρότερο καί πιάνει ἓνα ἀσήμαντο μέρος μέσα στήν πλατεία μας θεῶ, τήν ὁποία κερδίσαμε νικώντας τά ἐμπόδια στήν περιπετειώδη ἀνάβασή μας.

Πέρασε πράγματι ἀρκετός χρόνος γιά ν' ἀναγνωρισθεῖ τό πλούσιο περιεχόμενο τῆς θεωρίας τοῦ Maxwell. Τό πεδίο εἶχε θεωρηθεῖ στήν ἀρχή σάν κάτι πού ὑπῆρχε ἐλπίδα νά ἐρμηνευθεῖ ἀργότερα μηχανικά μέ τή βοήθεια τοῦ αἰθέρα. Τῆ στιγμή πού ἔγινε ἀντιληπτό ὅτι τό πρόγραμμα τοῦτο δέν ἦταν δυνατό νά ἐκτελεσθεῖ, οἱ κατακτήσεις τῆς θεωρίας τοῦ πεδίου εἶχαν γίνει τόσο ἐντονα ἀντιληπτές καί σπουδαῖες, πού δέν μποροῦσαν νά τίς θυσιάσουν στό μηχανικό δόγμα. Ἐξ ἄλλου, τό πρόβλημα τῆς ἐπινόησης ἐνός μηχανικοῦ προτύπου γιά τόν αἰθέρα γινότανε ὄλο καί λιγώτερο ἐνδιαφέρον, καί τό ἀποτέλεσμα, δεδομένου τοῦ βεβιασμένου καί τεχνητοῦ χαρακτήρα τῶν ὑποθέσεων, ὄλο καί πιό ἀποθαρρυντικό.

Ἡ μόνη διέξοδος πού ὑπάρχει εἶναι νά παραδεχθοῦμε ὅτι τό διάστημα ἔχει τή φυσική ιδιότητα νά μεταφέρει τά ἠλεκτρομαγνητικά κύματα, χωρίς πολὺ νά μᾶς ἀπασχολήσει ἡ σημασία αὐτῆς τῆς βεβαίωσης. Μποροῦμε πάντα νά χρησιμοποιοῦμε τή λέξη «αἰθέρας», ἀλλά μόνο γιά νά ἐκφράσουμε μιᾶ κάποια φυσική ιδιότητα τοῦ διαστήματος. Ἡ λέξη αὐτή ἔχει ἀλλάξει πολλές φορές σημασία κατά τήν ἀνάπτυξη τῆς ἐπιστήμης. Σήμερα δέν ἀντιπροσωπεύει πιά ἓνα (μέσον) ἀποτελούμενο ἀπό μόρια. Ἡ ἱστορία τῆς, ὄχι μόνο δέν ἔφθασε στό τέλος τῆς, ἀλλά συνεχίζεται μέ τή θεωρία τῆς σχετικότητας.

## ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Σ' αυτό τό σημείο τής ιστορίας μας, οφείλουμε νά επιστρέψουμε στην άφετηρία, δηλαδή στό νόμο τής αδράνειας του Γαλιλαίου. Τόν παραθέτουμε άλλη μιά φορά:

Κάθε σώμα παραμένει στην κατάσταση ήρεμίας του ή ομοιόμορφης ευθύγραμμης κίνησης, εκτός αν καθορισθεί νά μεταβάλλει κατάσταση από δυνάμεις πού ενεργοῦν πάνω του.

Μιά και έχει κατανοηθεί ή ιδέα τής αδράνειας, άπορεί κανείς πώς μπορεί νά εἰπωθεῖ ακόμα κάτι πάνω στό ζήτημα. Άλλά αν και τό πρόβλημα έχει συζητηθεῖ σέ βάθος, δέν έχει καθόλου εξαντληθεῖ.

Άς φαντασθοῦμε ένα φυσικό, πού πιστεύει ότι ό νόμος τής αδράνειας είναι δυνατό νά αποδειχθεῖ ή νά αναιρεθεῖ μέ πραγματικά πειράματα. Σπρώχνει μικρές σφαῖρες κατά μήκος ενός οριζόντιου τραπέζιου, προσπαθώντας όσο είναι δυνατό νά εξαλείψει τήν τριβή. Παρατηρεῖ ότι όσο πιο λεῖες είναι οι σφαῖρες και τό τραπέζι, τόσο πιο ομοιόμορφη γίνεται ή κίνηση. Άκριβώς τή στιγμή πού επρόκειτο νά διατυπώσει τήν αρχή τής αδράνειας, κάποιος σκαρφίζεται νά τοῦ παίξει ένα παιχνίδι. Ο φυσικός μας ἐργάζεται σέ δωμάτιο χωρίς παράθυρα και δέν έχει καμιά ἐπικοινωνία μέ τόν ἐξωτερικό κόσμο. Ο φαρσέρ ἐγκαθιστᾷ ένα μηχανισμό πού τοῦ ἐπιτρέπει νά προσδώσει σ' ὄλο τό δωμάτιο μιά ταχεῖα περιστροφική κίνηση γύρω από ἄξονα πού περνᾷ ἀπ' τό κέντρο του. Μόλις αρχίζει ή περιστροφή, ὁ φυσικός κάνει νέες και ἀναπάντεχες διαπιστώσεις. Η σφαῖρα πού ἐκινεῖτο ομοιόμορφα, προσπαθεῖ ν' ἀπομακρυνθεῖ ἀπ' τό κέντρο και νά πλησιάσει ὅσο είναι δυνατό τοῦς τοίχους τοῦ δωματίου. Ο ἴδιος αἰσθάνεται πώς μιά παράξενη δύναμη τόν σπρώχνει πρὸς τόν τοῖχο. Δοκιμάζει τό ἴδιο αἶσθημα μέ τόν ταξιδιώτη τοῦ τραίνου ή τής ἄμαξας πού διατρέχουν μέ ταχύτητα μιά καμπύλη, ή καλύτερα, μέ ἄνθρωπο πού βρίσκεται σέ περιστροφική κούνια. Ὅλα τά κεκτημένα του ἀποτελέσματα καταρρέουν.

Ο φυσικός μας θά ἦταν ὑποχρεωμένος νά ἐγκαταλείψει, μαζί μέ τόν νόμο τής αδράνειας, και ὅλους τοῦς μηχανικούς νόμους. Ο νόμος τής αδράνειας ἦταν ή άφετηρία του. Ἐάν

ἀλλάξει αὐτός, ὅλα τά συμπεράσματα πού ἔβγαλε ἀπ' αὐτόν ἀλλάζουν ἐπίσης. Ένας παρατηρητής ἀναγκασμένος νά περνᾷ ὄλη του τή ζωή μέσα σ' ένα περιστρεφόμενο δωμάτιο και νά κάνει ἐκεῖ ὄλα τά πειράματα, θά κατέληγε σέ μηχανικούς νόμους διαφορετικούς ἀπ' τοῦς δικούς μας. Άλλά αν μπεῖ στό δωμάτιο ἐφοδιασμένος μέ βαθειές γνώσεις και μέ πίστη ἀσάλευτη στις ἀρχές τής φυσικῆς, θά ἐξηγοῦσε τή φαινομενική κατάρρευση τής μηχανικῆς, μέ τήν προϋπόθεση ότι τό δωμάτιο περιστρέφεται. Θά μπορούσε μάλιστα μέ μηχανικά πειράματα νά γνωρίσει πώς περιστρέφεται.

Γιά ποιό λόγο οφείλουμε νά δείξουμε τόσο ἐνδιαφέρον γιά τόν παρατηρητή τοῦ περιστρεφόμενου δωματίου; Γιά τόν ἀπλό λόγο ότι κι ἐμεῖς πάνω στή Γῆ μας βρισκόμαστε ὡς ένα σημείο, στην ἴδια κατάσταση. Από τόν καιρό τοῦ Κοπερνίκου ξέρουμε ότι ή Γῆ στρέφεται γύρω ἀπό τόν ἄξονά της και ότι κινεῖται γύρω ἀπό τόν ἥλιο. Ἀκόμη και ή ἀπλή αὐτή ιδέα, τόσο σαφής γιά ὄλο τόν κόσμο, δέν διέφυγε ἀπό τήν πρόοδο τής ἐπιστήμης. Γιά τήν ὄρα ἄς ἀφήσουμε τό θέμα αὐτό και ἄς παραδεχτοῦμε τήν ἄποψη τοῦ Κοπερνίκου. Αν βρισκόμενος σέ κίνηση ὁ παρατηρητής μας δέν εἶχε τή δυνατότητα νά βεβαιώσει τοῦς νόμους τής μηχανικῆς, ἔπρεπε κι' ἐμεῖς πάνω στή Γῆ μας νά ἦμασταν ἀνίκανοι νά τό κάνουμε. Άλλά ή περιστροφή τής Γῆς είναι σχετικά βραδεία, ἔτσι πού τό ἀποτέλεσμα δέν είναι ἄμεσα ἀντιληπτό. Ὡστόσο υπάρχουν πολλά πειράματα πού δείχνουν μιά ἐλαφρά παρέκκλιση τῶν μηχανικῶν νόμων, και ή συμφωνία τους μπορεί νά θεωρηθεῖ σά μιά ἀπόδειξη τής περιστροφῆς τής Γῆς.

Δυστυχῶς δέν μπορούμε νά τοποθετηθοῦμε ἀνάμεσα στόν ἥλιο και στή Γῆ, γιά ν' ἀποδείξουμε τήν αὐστηρή ἰσχύ τοῦ νόμου τής αδράνειας και νά παρατηρήσουμε τήν κίνηση τής Γῆς. Δέν μπορούμε νά τό κάνουμε παρά νοερά. Ὅλα τά πειράματά μας πρέπει νά τά κάνουμε πάνω στή Γῆ, ὅπου κατ' ἀνάγκη ζοῦμε. Τοῦτο συχνά ἐκφράζεται μέ τόν ἐξῆς πιο ἐπιστημονικό τρόπο: *ή Γῆ είναι τό σύστημα τῶν συντεταγμένων μας*. Γιά νά ξεκαθαρίσουμε τή σημασία τῶν λέξεων αὐτῶν θά

πάρουμε ένα απλό παράδειγμα. Μπορούμε να προβλέψουμε τη θέση που θα καταλάβει σε μιὰ κάποια στιγμή μιὰ πέτρα που ρίχτηκε από ένα πύργο και να βεβαιώσουμε τήν πρόβλεψή μας με τήν παρατήρηση. Αν τοποθετηθεί κοντά στον πύργο ένας βαθμολογημένος χάρακας, μπορούμε να προβλέψουμε μέ ποιό σημείο του χάρακα θα συμπέσει τό σώμα σε πτώση σε μιὰ δοσμένη στιγμή. Είναι προφανές ότι ο πύργος και ο χάρακας δέν πρέπει να είναι από ουσία που θα μπορούσε να υποστεί αλλοίωση κατά τό πείραμα. Τέλος, ο αναλοίωτος χάρακας στερεά συνδεδεμένος μέ τή Γή και ένα ρολοί είναι κατ' αρχήν ότι χρειάζεται για να γίνει τό πείραμα. Εάν διαθέτουμε τά όργανα αυτά, μπορούμε να άγνοήσουμε όχι μόνο τό σχήμα του πύργου αλλά και τήν παρουσία του. Οί υποθέσεις που κάναμε έδω είναι όλες πρόχειρες, συνήθως δέν καθορίζονται στις περιγραφές τέτοιων πειραμάτων. Αλλά ή ανάλυση αυτή δείχνει πόσες κρυφές υποθέσεις βρίσκονται σε κάθε μιὰ από τις βεβαιώσεις μας. Στην περίπτωση μας υποθέσαμε τήν ύπαρξη ενός άκαμπτου χάρακα ενός ιδανικού ρολογιού, χωρίς τά όποια δέ θάταν δυνατό να επαληθευθεί ο νόμος τής πτώσης των σωμάτων του Γαλιλαίου. Μ' αυτή τήν απλή αλλά θεμελιώδη φυσική συσκευή, μπορούμε να βεβαιώσουμε τό μηχανικό αυτό νόμο μέ κάποιο βαθμό άκριβείας. Αν εκτελεσθεί μ' επιμέλεια τό πείραμα αυτό φανερώνει μιὰ άσυμφωνία ανάμεσα στη θεωρία και στο πείραμα, που όφείλεται στην περιστροφή τής Γής, ή μ' άλλα λόγια, στο γεγονός ότι οί νόμοι τής μηχανικής, όπως έχουν διατυπωθεί έδω, δέν ισχύουν μέ αυστηρότητα σ' ένα σύστημα συντεταγμένων στερεά συνδεδεμένο με τή Γή.

Σέ όλα τά μηχανικά πειράματα όποιουδήποτε είδους κι αν είναι, όφείλουμε να καθορίζουμε τις θέσεις των υλικών σημείων σε μιὰ όρισμένη στιγμή του χρόνου, άκριβώς όπως στο παραπάνω πείραμα τής πτώσης των σωμάτων. Αλλά ή θέση πρέπει πάντα να περιγράφεται σχετικά μέ κάποιο πράγμα, όπως π.χ. σχετικά μέ τόν πύργο και μέ τό χάρακα στην προηγούμενη περίπτωση.

Γιά να έχουμε τή δυνατότητα να καθορίζουμε τις θέσεις

των σωμάτων, πρέπει να έχουμε αυτό που λέγεται σύστημα αναφοράς. Περιγράφοντας τις θέσεις των αντικειμένων και των ανθρώπων σε μιὰ πολιτεία, οί δρόμοι και οί λεωφόροι αποτελούν τό σύστημα στο όποιο αναφερόμαστε. Ως τώρα, όταν μιλούσαμε για τους νόμους τής μηχανικής, δέν φροντίσαμε να υποδείξουμε τό σύστημα αναφοράς, γιατί ζώντας πάνω στη Γή, δέν υπάρχει δυσκολία να όρίσουμε, σε κάποια ιδιαίτερη περίπτωση, ένα σύστημα αναφοράς στερεά συνδεδεμένο μέ τή Γή. Τό σύστημα τουτο που είναι κατασκευασμένο από άμετάβλητες άκαμπτες ράβδους και στο όποιο αναφέρουμε όλες μας τις παρατηρήσεις, ονομάζεται **σ ύ σ τ η μ α σ υ ν τ ε τ α γ μ έ ν ω ν**. Και επειδή θά χρησιμοποιείται συχνά ή έκφραση αυτή, θά γράψουμε απλώς ΣΣ.

Ως τώρα όλες οί βεβαιώσεις μας που άφορούν στα φυσικά φαινόμενα παρουσίαζαν κάποιο χάσμα. Δέν πήραμε ύπ' όψη μας ότι όλες οί παρατηρήσεις πρέπει να γίνονται σε ένα κάποιο ΣΣ. Αντί να περιγράψουμε τή δομή αυτού του ΣΣ, άγνοούσαμε τήν ύπαρξή του. Π.χ., όταν γράφαμε «ένα σώμα κινείται όμοιόμορφα...» όφείλουμε πραγματικά να γράψουμε «ένα σώμα κινείται όμοιόμορφα σχετικά μέ ένα ΣΣ καθορισμένο...» Τό πείραμα που κάναμε μέ τό περιστρεφόμενο δωμάτιο μās έμαθε ότι τά αποτελέσματα των μηχανικών πειραμάτων μπορούν να έξαρτώνται από τό ΣΣ τής έκλογής μας.

Αν δύο ΣΣ πραγματοποιούν περιστροφική κίνηση τό ένα σε σχέση μέ τό άλλο, τότε οί νόμοι τής μηχανικής δέν είναι δυνατό να ισχύουν και στα δύο. Αν είναι όριζόντια ή έπιφάνεια του νερού μιās δεξαμενής, που άποτελεί τό ένα άπ' τά δύο συστήματα των συντεταγμένων, ή έπιφάνεια παρόμοιας δεξαμενής στο άλλο σύστημα παίρνει τό σχήμα καμπύλης πολύ γνωστής σ' όποιον ανακατώνει τόν καφέ του μ' ένα κουτάλι.

Διατυπώνοντας τους κυριότερους νόμους τής μηχανικής, παραμελήσαμε ένα σημαντικό σημείο. Δέν καθορίσαμε για ποιό ΣΣ ισχύουν. Όλη ή κλασσική μηχανική για τό λόγο αυτό μένει μεταίωρη, άφοϋ δέ ξέρουμε σε ποιό σύστημα αναφέρεται. Για τήν όρα όμως θά παρακάμψουμε τή δυσκολία αυτή. Θά

κάνουμε την ελαφρώς σφαλερή υπόθεση ότι οί νόμοι της μηχανικής ισχύουν για κάθε ΣΣ αυστηρά συνδεδεμένο με τη Γῆ. Τοδο γίνεται για να προσδιορίσουμε τό ΣΣ και να δώσουμε στίς προτάσεις μας ακριβή μορφή. Καί μολονότι ἡ βεβαίωσή μας, πώς ἡ Γῆ εἶναι ἓνα σύστημα ἀναφορᾶς κατάλληλο, δέν εἶναι πλέρια ὀρθή, γιά τήν ὥρα θά τήν δεχτοῦμε.

Υποθέτουμε λοιπόν πώς ὑπάρχει ἓνα ΣΣ γιά τό ὁποῖο ισχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς. Εἶναι τό μόνο; Ἄς υποθέσουμε ἓνα ΣΣ ὅπως ἓνα τραῖνο, ἓνα πλοῖο ἢ ἓνα ἀεροπλάνο πού κινουῦνται σχετικά μέ τή Γῆ. Οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς θά ισχύουν γι' αὐτά ΣΣ; Γνωρίζουμε θετικά ὅτι δέν ισχύουν πάντοτε, π.χ. ὅταν τό τραῖνο διατρέχει μέ ταχύτητα μιά καμπύλη, ὅταν τό πλοῖο δέρνεται ἀπ' τή θύελλα, ἢ ὅταν τό ἀεροπλάνο κατέρχεται ἑλικοειδῶς. Ἄς ἀρχίσουμε ἀπό ἓνα ἀπλό παράδειγμα. Ἐνα ΣΣ κινεῖται ὁμοίομορφα ἀναφορικά μέ τό «καλό» μας ΣΣ, δηλαδή μέ ἓνα ΣΣ ὅπου ισχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς, ὅπως εἶναι π.χ. ἓνα ἰδανικό τραῖνο ἢ ἓνα πλοῖο πού πλέει σέ εὐθεῖα γραμμή μέ ἐξαιρετική ἡρεμία χωρίς ποτέ ν' ἀλλάξει ταχύτητα. Ἀπ' τήν καθημερινή μας πείρα ξέρουμε ὅτι τά δύο συστήματα θά εἶναι «καλά», δηλαδή ὅτι τά πειράματα πού θά γίνουν μέσα στό τραῖνο ἢ στό πλοῖο πού κινουῦνται ὁμοίομορφα θά δώσουν τά ἴδια ἀκριβῶς ἀποτελέσματα ὅπως καί στή Γῆ. Ἀλλά ἐάν τό τραῖνο σταματήσῃ ἀπότομα ἢ ἄν ἐπιταχύνῃ ἀπότομα τήν πορεία του, ἢ ἄν ἡ θάλασσα ἀγριέψῃ, συμβαίνουν παράξενα πράγματα. Μέσα στό τραῖνο οἱ ἀποσκευές πέφτουν ἀπ' τά δίκτυα, μέσα στό πλοῖο τά τραπέζια καί οἱ καρέκλες ἀναποδογυρίζουν καί οἱ ἐπιβάτες παθαίνουν ναυτία. Ἀπό φυσική ἀποψη, αὐτό σημαίνει ἀπλῶς ὅτι οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς δέν μποροῦν νά εφαρμοσθοῦν σ' αὐτά τά ΣΣ δηλαδή ὅτι εἶναι «κάκά» ΣΣ.

Τό ἀποτέλεσμα τοῦτο μπορεῖ νά ἐκφρασθεῖ μέ τήν δῆθεν ἀρχή τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου: ἄν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς ισχύουν γιά ἓνα ΣΣ, τότε ισχύουν καί γιά ὁποιοδήποτε ΣΣ πού κινεῖται ὁμοίομορφα ἀναφορικά μέ τό πρῶτο.

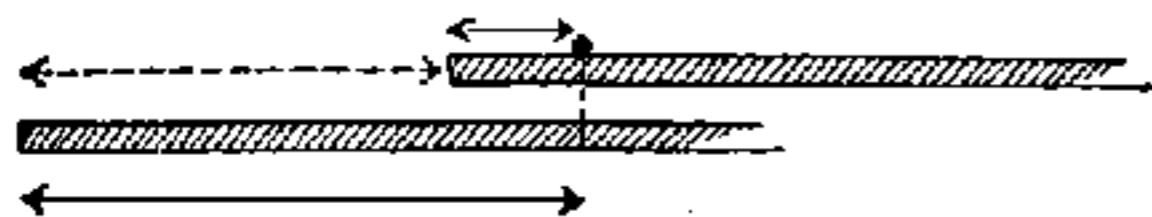
Ἐάν ἔχουμε δύο ΣΣ πού δέν κινουῦνται ὁμοίομορφα, τό ἓνα

σχετικά μέ τό ἄλλο, τότε οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς δέν εἶναι δυνατό νά ισχύουν καί γιά τά δύο. Τά «καλά» συστήματα συντεταγμένων δηλαδή ἐκεῖνα γιά τά ὁποῖα ισχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς, τά ὀνομάζουμε συστήματα ἀδράνειας. Τό ζήτημα ἄν ὑπάρχει ἓνα σύστημα ἀδράνειας δέν ἔχει ἀκόμη ἀποφασισθεῖ. Ἀλλά ἄν ὑπάρχει ἓνα τέτοιο σύστημα, ὑπάρχει ἄπειρος ἀριθμός ἀπό αὐτά. Κάθε ΣΣ πού κινεῖται ὁμοίομορφα ἀναφορικά μέ ἓνα ΣΣ ἀδράνειας, εἶναι ἓνα ΣΣ ἀδράνειας.

Ἄς θεωρήσουμε τήν περίπτωση δύο ΣΣ πού ἀναχωροῦν ἀπό ἓνα γνωστό σημείο καί κινουῦνται ὁμοίομορφα τό ἓνα ἀναφορικά μέ τό ἄλλο μέ ταχύτητα γνωστή. Ὅποιος προτιμᾷ συγκεκριμένες εἰκόνες ἄς σκεφθεῖ ἓνα πλοῖο ἢ ἓνα τραῖνο πού κινουῦνται σχετικά μέ τή Γῆ. Οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς εἶναι δυνατό νά βεβαιωθοῦν πειραματικά μέ τόν ἴδιο βαθμό ἀκρίβειας πάνω στή Γῆ, ἢ μέσα στό τραῖνο ἢ μέσα σ' ἓνα πλοῖο πού κινεῖται ὁμοίομορφα. Ἀλλά παρουσιάζεται κάποια δυσκολία ἄν οἱ παρατηρητές στά δύο συστήματα ἀρχίσουν νά ἐρευνῶν ἀπό τήν ἀποψη τῶν διαφορετικῶν τῶν ΣΣ, τίς παρατηρήσεις τοῦ αὐτοῦ γεγονότος. Ὁ καθένας θά ἤθελε νά μεταφράσῃ στή δική του ὀρολογία τίς παρατηρήσεις τοῦ ἄλλου. Ἄς πάρουμε ἓνα ἀπλό παράδειγμα: ἡ αὐτή κίνηση ἑνός μορίου ἐρευνᾶται σέ δύο ΣΣ πάνω στή Γῆ καί μέσα σ' ἓνα τραῖνο πού κινεῖται μέ ὁμοίομορφη κίνηση. Καί τά δύο εἶναι ΣΣ ἀδράνειας. Εἶναι ἀρκετό, νά γνωρίζουμε τί ἔχει παρατηρηθεῖ στό ἓνα ΣΣ γιά νά βροῦμε αὐτό πού ἔχει παρατηρηθεῖ στό ἄλλο, ἄν οἱ σχετικές ταχύτητες καί οἱ θέσεις τῶν δύο ΣΣ εἶναι γνωστές σέ μιά κάποια στιγμή; Γιά τήν περιγραφή τῶν γεγονότων εἶναι ἐξαιρετικά σημαντικό νά ξέρουμε πώς περνοῦν ἀπό ἓνα ΣΣ στό ἄλλο, ἀφοῦ τά δύο ΣΣ εἶναι ἰσότιμα καί ἐξ ἴσου προσδιορισμένα γιά τήν περιγραφή τῶν γεγονότων μέσα στή φύση. Πράγματι ἀρκεῖ νά γνωρίζουμε τά ἀποτελέσματα ἑνός παρατηρητοῦ σ' ἓνα ΣΣ γιά νά γνωρίζουμε καί τά ἀποτελέσματα ἑνός παρατηρητοῦ σ' ἓνα ἄλλο.

Ἄς θεωρήσουμε τό πρόβλημα μέ πῶς ἀφηρημένο τρόπο, χωρίς νά χρησιμοποιήσουμε τραῖνο ἢ πλοῖο. Γιά νά ἀπλου-

στεύσουμε τό ζήτημα θά μελετήσουμε μόνο τήν εὐθύγραμμη κίνηση. Ἐχομε μιά ἀκαμπτη ράβδου βαθμολογημένη καί ἕνα καλό ρολοῖ. Ἡ ράβδος ἀντιπροσωπεύει στήν ἀπλή περίπτωση τῆς εὐθύγραμμης κίνησης ἕνα ΣΣ, ἀκριβῶς ὅπως ὁ χάρακας κοντά στόν πύργου στό πείραμα τοῦ Γαλιλαίου. Στήν περίπτωση τῆς εὐθύγραμμης κίνησης εἶναι πάντα πιό ἀπλό καί πιό ἐνδεδειγμένο νά φανταζόμαστε ἕνα ΣΣ μέ τή μορφή ἀκαμπτης ράβδου στήν περίπτωση τῆς εὐθύγραμμης κίνησης, καί μέ τή μορφή δομῆς ἀκάμπτων ράβδων παράλληλων καί ὁμαλῶν μεταξύ τους στήν περίπτωση τῆς ἀθαιρέτης κίνησης στό διάστημα, ἀφίνοντας κατά μέρος τούς πύργους, τούς τοίχους, τούς δρόμους καί ἄλλα παρόμοια πράγματα. Γιά νά πάρουμε τήν πιό ἀπλή περίπτωση ἄς ὑποθέσουμε ὅτι ἔχομε δύο ΣΣ, δηλαδή δύο ἀκαμπτες ράβδους. Χαράσσουμε τή μιά πάνω ἀπό τήν ἄλλη καί τίς ὀνομάζουμε ἀντιστοιχῶς τό «ἀνώτερο» ΣΣ καί τό «κατώτερο» ΣΣ. Ὑποθέτουμε ὅτι τά δύο ΣΣ κινοῦνται μέ καθορισμένη ταχύτητα τό ἕνα σχετικά μέ τό ἄλλο, σέ τρόπο πού γλιστροῦν τό ἕνα ἀντίθετα στό ἄλλο. Καλό εἶναι ἀκόμη νά ὑποθέσουμε ὅτι τό μήκος τῶν δύο ράβδων εἶναι ἄπειρο, ὅτι κάθε μιά ἔχει ἀρχή καί ὄχι τέλος. Ἐνα μόνο ρολοῖ ἀρκεῖ καί γιά τά δύο ΣΣ, διότι ἡ ροή τοῦ χρόνου εἶναι ἡ ἴδια καί γιά τά δύο. Ὄταν ἀρχίζουμε τίς παρατηρήσεις μας, οἱ ἀρχές τῶν δύο ράβδων συμπίπτουν. Ἡ θέση ἑνός ὑλικοῦ σημείου τή στιγμή αὐτή χαρακτηρίζεται ἀπό τόν ἴδιο ἀριθμό στά δύο ΣΣ. Τό ὑλικό σημείο συμπίπτει μέ μιά γραμμή τῆς βαθμολογημένης ράβδου



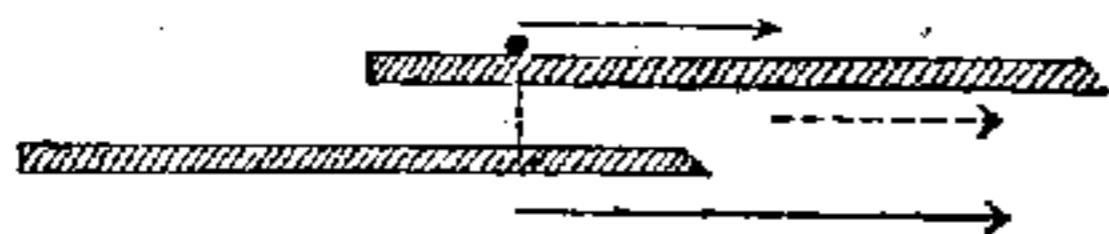
ἔτσι ἔχομε ἕνα ἀριθμό πού καθορίζει τή θέση τοῦ ὑλικοῦ σημείου. Ἀλλά ἐάν οἱ ράβδοι κινοῦνται ὁμοιόμορφα ἢ μιά σέ σχέση μέ τήν ἄλλη, οἱ ἀριθμοί πού ἀντιστοιχοῦν στίς θέσεις

τους ὕστερα ἀπό ἕνα χρονικό διάστημα, ἕνα δευτερόλεπτο π.χ., θά εἶναι διαφορετικοί. Στήν πάνω ράβδου ἄς θεωρήσουμε ἕνα ὑλικό σημεῖο σέ ἡρεμία. Ὁ ἀριθμός πού καθορίζει τή θέση του στό ἀνώτερο ΣΣ δέ μεταβάλλεται μέ τό χρόνο. Ἀλλά ὁ ἀντίστοιχος ἀριθμός τῆς κάτω ράβδου δέ θά μείνει ὁ ἴδιος. Ἀντί τοῦ «ὁ ἀριθμός πού ἀντιστοιχεῖ σέ μιά θέση τοῦ σημείου», θά λέμε μέ συντομία ἢ συντεταγμένη ἑνός σημείου. Ἄν καί ἡ πρόταση πού θ' ἀκολουθήσει εἶναι κάπως περιπλεγμένη, τό σχέδιό μας ὅστοςο μᾶς δείχνει πῶς εἶναι ὀρθή καί ἐκφράζει κάτι πολύ ἀπλό. Ἡ συντεταγμένη σημείου στό κατώτερο ΣΣ ἰσοῦται μέ τήν συντεταγμένη αὐτοῦ στό ἀνώτερο ΣΣ πλέον τήν συντεταγμένη τοῦ σημείου ἀρχῆς τοῦ ἀνώτερου ΣΣ σχετικά μέ τό κατώτερο ΣΣ. Τό σπουδαῖο εἶναι ὅτι μποροῦμε νά ὑπολογίσουμε πάντοτε τή θέση ἑνός μορίου σέ ἕνα ΣΣ, ἄν γνωρίζουμε τή θέση του στό ἄλλο. Γι' αὐτό πρέπει νά γνωρίζουμε κάθε στιγμή τίς σχετικές θέσεις τῶν δύο πιό πάνω συστημάτων συντεταγμένων. Αὐτά ὅλα φαίνονται σοφά, στήν πραγματικότητα πρόκειται γιά κάτι ἀπλό, πού δέ θ' ἀξίζε μιά τόσο λεπτομερῆ ἔρευνα, ἄν δέν ἐπρόκειτο ἀργότερα νά ἀφεληθοῦμε ἀπ' αὐτό.

Ἀξίζει τόν κόπο νά σημειωθεῖ ὅτι ὑπάρχει διαφορά ἀνάμεσα στόν προσδιορισμό τῆς θέσης ἑνός σημείου καί στόν προσδιορισμό τοῦ χρόνου ἑνός γεγονότος. Κάθε παρατηρητής ἔχει τή δική του ράβδου πού ἀποτελεῖ τό ΣΣ του, ἀλλά ἕνα μόνο ρολοῖ ὑπάρχει γιά ὅλους. Ὁ χρόνος εἶναι κάτι τό «ἀπόλυτο» πού ρεῖ μέ τόν ἴδιο τρόπο γιά ὅλους τούς παρατηρητές σέ ὅλα τά ΣΣ.

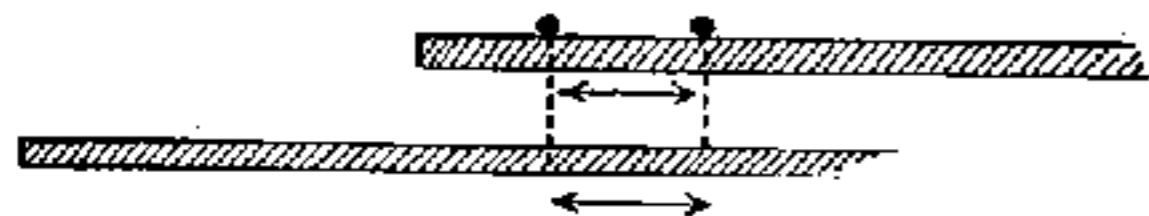
Τώρα ἕνα ἄλλο παράδειγμα. Ἐνας ἄνθρωπος περπατάει μέ ταχύτητα τρία μίλια τήν ὥρα κατά μήκος τῆς γέφυρας ἑνός μεγάλου πλοίου. Αὐτή εἶναι ἡ ταχύτητά του σχετικά μέ τό πλοῖο ἢ, μ' ἄλλα λόγια, σχετικά μ' ἕνα ΣΣ σταθερά συνδεδεμένο μέ τό πλοῖο. Ἐάν ἡ ταχύτητα τοῦ πλοίου εἶναι τριάντα μίλια τήν ὥρα σχετικά μέ τήν ἀκτῆ, καί ἄν οἱ ὁμοιόμορφες ταχύτητες τοῦ ἀνθρώπου καί τοῦ πλοίου ἔχουν τήν ἴδια διεύθυνση, τότε ἡ ταχύτητα τοῦ περιπατητῆ θά εἶναι τριάντα

τρία μίλλια τήν ώρα σχετικά μ' έναν παρατηρητή τῆς ἀκτῆς ἢ τρία μίλλια τήν ώρα σχετικά μέ τό πλοῖο. Μποροῦμε νά διατυπώσουμε μέ πῶ ἀφηρημένο τρόπο τό γεγονός: Ἡ ταχύτητα ἑνός ὑλικοῦ σημείου σχετικά μέ τό κατώτερο ΣΣ ἰσοῦται μέ τήν ταχύτητα τοῦ σημείου σχετικά μέ τό ἀνώτερο ΣΣ σύν ἢ πλὴν τήν ταχύτητα τοῦ ἀνώτερου ΣΣ σχετικά μέ τό κατώτερο ἀνάλογα μέ τό ἂν οἱ ταχύτητες ἔχουν τῖς ἴδιες ἢ ἀντίθετες



διευθύνσεις. Μποροῦμε συνεπῶς πάντοτε νά μεταβάλουμε ὄχι μόνο τῖς θέσεις, ἀλλά καί τῖς ταχύτητες ἀκόμα περνώντας ἀπό ἕνα ΣΣ σ' ἕνα ἄλλο, ἂν γνωρίζουμε τῖς σχετικές ταχύτητες τῶν δύο ΣΣ. Οἱ θέσεις, ἢ συντεταγμένες, καί οἱ ταχύτητες εἶναι παραδείγματα ποσοτήτων πού εἶναι διαφορετικές σέ διαφορετικά ΣΣ καί συνδέονται μεταξύ τους μέ κάποιους νόμους μετασχηματισμοῦ, οἱ ὁποῖοι στήν περίπτωση πού μᾶς ἀπασχολεῖ εἶναι πολύ ἀπλοῖ.

Ἐπὶ τούτων ὡστόσο ποσότητες πού εἶναι οἱ ἴδιες στά δύο ΣΣ καί γιά τῖς ὁποῖες δέ μᾶς χρειάζονται οἱ νόμοι τοῦ μετασχηματισμοῦ. Ἄς πάρουμε γιῦ παράδειγμα ὄχι ἕνα ἀλλά δύο σταθερά σημεῖα ἐπὶ τῆς ἐπάνω ράβδου καί ἄς ἐξετάσουμε τήν ἀπόσταση



πού τά χωρίζει. Ἡ ἀπόσταση αὐτή εἶναι ἡ διαφορά τῶν συντεταγμένων τῶν δύο σημείων. Γιά νά βροῦμε τῖς θέσεις δύο

σημείων σχετικά μέ διαφορετικά ΣΣ πρέπει νά χρησιμοποιήσουμε τοὺς νόμους τοῦ μετασχηματισμοῦ. Ἀλλά κατασκευάζοντας τήν διαφορά τῶν δύο θέσεων, αὐτό πού ὀφείλεται στή διαφορά τῶν ΣΣ ἐξουδετερώνεται ἀμοιβαία, ὅπως δείχνει τό σχέδιο. Πρέπει νά προσθέσουμε καί νά ἀφαιρέσουμε τήν ἀπόσταση πού χωρίζει τῖς ἀρχές τῶν δύο ΣΣ. Συνεπῶς ἡ ἀπόσταση τῶν δύο σημείων εἶναι ἀμετάβλητη δηλαδή ἀνεξάρτητη ἀπό τήν ἐκλογή τοῦ ΣΣ.

Ἐνα ἄλλο παράδειγμα ποσότητας ἀνεξάρτητης ἀπό τό ΣΣ εἶναι ἡ ἀλλαγή τῆς ταχύτητας, ἔννοια πού τήν συναντήσαμε στή μηχανική. Καί πάλι ἕνα ὑλικό σημεῖο πού κινεῖται κατά μήκος μιᾶς εὐθείας παρατηρεῖται ἀπό δύο ΣΣ. Γιά τόν παρατηρητή ἀντιστοίχως σέ κάθε ΣΣ, ἡ ἀλλαγή τῆς ταχύτητάς του εἶναι ἡ διαφορά τῶν δύο ταχυτήτων καί ἡ συμμετοχή πού ὀφείλεται στή σχετική ὁμοιόμορφη κίνηση τῶν δύο ταχυτήτων καί ἡ συμμετοχή πού ὀφείλεται στή σχετική ὁμοιόμορφη κίνηση τῶν δύο ΣΣ ἀκυρώνεται κατά τόν ὑπολογισμό τῆς διαφορᾶς. Γι' αὐτό ἡ ἀλλαγή τῆς ταχύτητας εἶναι μία ἀμετάβλητη, ὑπό τόν ὅρο βέβαια ὅτι ἡ σχετική κίνηση τῶν δύο ΣΣ θά εἶναι ὁμοιόμορφη. Ἀλλοιῶς ἡ ἀλλαγή ταχύτητας θά ἦταν διαφορετική σέ καθένα ἀπ' τά δύο ΣΣ, ἐπειδή ἡ διαφορά θά προέκυπτε ἀπό τήν ἀλλαγή ταχύτητας τῆς σχετικῆς κίνησης τῶν δύο ράβδων πού ἀντιπροσωπεύουν τά συστήματά μας τῶν συντεταγμένων.

Καί τώρα ἕνα τελευταῖο παράδειγμα. Ἐχομε δύο ὑλικά σημεῖα ἀνάμεσα στά ὁποῖα ἐνεργοῦν δυνάμεις πού ἐξαρτῶνται μόνο ἀπό τήν ἀπόσταση. Στήν περίπτωση τῆς εὐθύγραμμης κίνησης ἡ ἀπόσταση καί συνεπῶς καί ἡ δύναμη ἐπίσης εἶναι ἀμετάβλητη. Ὁ νόμος τοῦ Νεύτωνα πού συνδέει τή δύναμη μέ τήν ἀλλαγή ταχύτητας θά ἰσχύει συνεπῶς καί στά δύο ΣΣ. Ἄλλη μιά φορά φθάνουμε σ' ἕνα συμπέρασμα πού βεβαιώνεται ἀπ' τήν καθημερινή ἐμπειρία: ἂν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς ἰσχύουν γιά ἕνα ΣΣ, τότε ἰσχύουν γιά ὅλα τα ΣΣ πού κινεῖται ὁμοιόμορφα ἀναφορικά μέ αὐτό. Τό παράδειγμά μας εἶναι πολύ ἀπλό, πρόκειται γιά τήν εὐθύγραμμη κίνηση ὅπου τό ΣΣ μπορεί

νά παρασταθεί από μία άκαμπτη ράβδο. Αλλά τά συμπεράσματά μας έχουν γενική ισχύ και μπορούν νά συνοψισθούν ως εξής:

1) Δεν γνωρίζουμε κανόνα για τήν εύρεση ενός συστήματος αδράνειας. Αλλά αν δοθεί ένα τέτοιο σύστημα, μπορούμε νά βρούμε μία άπειρία άλλων τέτοιων συστημάτων, έφ' όσον όλα τά ΣΣ πού κινούνται όμοιόμορφα, τό ένα σχετικά μέ τό άλλο, είναι συστήματα αδράνειας, εάν είναι τέτοιο τό ένα άπ' αυτά.

2) Ο χρόνος πού αντιστοιχεί σ' ένα γεγονός είναι ό ίδιος για όλα τά ΣΣ. Αλλά οί συντεταγμένες και οί ταχύτητες είναι διαφορετικές και μεταβάλλονται σύμφωνα μέ τούς νόμους του μετασχηματισμού.

3) Αν και οί συντεταγμένες και οί ταχύτητες αλλάζουν όταν περνούμε από ένα ΣΣ σέ άλλο, ή δύναμη και ή αλλαγή ταχύτητας και κατά συνέπεια οί νόμοι τής μηχανικής είναι άμετάβλητοι σχετικά μέ τούς νόμους του μετασχηματισμού.

Οί νόμοι του μετασχηματισμού πού διατυπώθηκαν ηκαν για τίς συντεταγμένες και τίς ταχύτητες θά όνομασθούν νόμοι του μετασχηματισμού τής κλασσικής μηχανικής, ή πιο σύντομα, *ο κλασσικός μετασχηματισμός.*

## ΑΙΘΕΡΑΣ ΚΑΙ ΚΙΝΗΣΗ

Η άρχή τής σχετικότητας του Γαλιλαίου ισχύει για τά μηχανικά φαινόμενα. Οί ίδιοι μηχανικοί νόμοι εφαρμόζονται σέ όλα τά συστήματα αδράνειας πού κινούνται όμοιόμορφα τό ένα σχετικά μέ τό άλλο. Η άρχή αυτή ισχύει επίσης για τά μη μηχανικά φαινόμενα, ιδιαίτερα για αυτά όπου οί έννοιες του πεδίου παίζουν ένα τόσο σπουδαίο ρόλο; Όλα τά προβλήματα πού συγκεντρώνονται γύρω από αυτό τό ζήτημα μάς οδηγούν κατ' εύθειαν στην άφετηρία τής θεωρίας τής σχετικότητας.

Ας υπενθυμίσουμε ότι ή ταχύτητα του φωτός μέσα στο κενό, ή  $\mu'$  άλλα λόγια, μέσα στον αίθερα, είναι 300.000

χιλιόμετρα στο δευτερόλεπτο, και ότι τό φώς είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα πού διαδίδεται διά μέσου του αιθέρα. Τό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μεταφέρει ενέργεια, πού μία και εκπέμφθηκε άπ' τήν πηγή της, διατηρεί ανεξάρτητη άπ' αυτή τήν ύπαρξή της. Για τήν ώρα θά συνεχίσουμε νά πιστεύουμε ότι ο αίθερας είναι ένα μέσο διά του οποίου διαδίδονται τά ηλεκτρομαγνητικά κύματα και συνεπώς και τά κύματα φωτός, αν και πλέρια αντιλαμβανόμαστε τίς πολυάριθμες δυσκολίες πού συνδέονται μέ τή μηχανική δομή του.

Ας υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε καθισμένοι μέσα σ' ένα δωμάτιο τόσο άπομονωμένο άπ' τόν έξωτερικό κόσμο, ώστε ο άέρας νά μή μπορεί ούτε νά εισχωρήσει σ' αυτό ούτε νά βγει. Αν δεν μετακινούμαστε και μιλούμε, παράγουμε από φυσική άποψη ήχητικά κύματα, πού διαδίδονται από τήν άκίνητη πηγή τους μέ τήν ταχύτητα του ήχου στον άέρα. Αν δεν υπήρχε άέρας ή κανένα άλλο υλικό μέσο μεταξύ των συνόμιλητών, δε θά μπορούσαν νά αντιληφθούν κανένα ήχο. Τό πείραμα άπόδειξε ότι ή ταχύτητα του ήχου στον άέρα, αν δεν υπάρχει άνεμος και αν είναι άκίνητος ο άέρας του ΣΣ πού εκλέξαμε, είναι ή ίδια σέ όλες τίς διευθύνσεις.

Ας φαντασθούμε τώρα ότι τό δωμάτιό μας κινείται όμοιόμορφα μέσα στο διάστημα. Ένας άνθρωπος πού βρίσκεται έξω βλέπει άπ' τούς γυάλινους τοίχους του κινούμενου δωματίου (ή αν προτιμάτε του τραίνου) αυτό πού συμβαίνει μέσα. Από τίς μετρήσεις πού κάνει ο παρατηρητής στο έσωτερικό, μπορεί νά συναγάγει τήν ταχύτητα του ήχου αναφορικά μέ τό ΣΣ του τό συνδεδεμένο μέ τό γύρω περιβάλλον, σχετικά μέ τό όποιο κινείται τό δωμάτιο. Εδώ παρουσιάζεται και πάλι τό πολυσυζητημένο παλιό πρόβλημα - ο καθορισμός τής ταχύτητας σέ ένα ΣΣ, αν είναι ήδη γνωστή σ' ένα άλλο.

Ο έσωτερικός παρατηρητής δηλώνει: για μένα ή ταχύτητα του ήχου είναι ή ίδια σέ όλες τίς διευθύνσεις.

Ο έξωτερικός παρατηρητής δηλώνει: σύμφωνα μέ τίς παρατηρήσεις στο δικό μου ΣΣ, ή ταχύτητα του ήχου πού διαδίδεται μέσα στο κινούμενο δωμάτιο, δεν είναι ή ίδια σέ

όλες τις διευθύνσεις. Είναι ή μεγαλύτερη από τήν όμαλή ταχύτητα του ήχου στην διεύθυνση τής κίνησης του δωματίου και μικρότερη στην αντίθετη διεύθυνση.

Τά συμπεράσματα αυτά βγαίνουν από τόν κλασσικό μετασχηματισμό και μπορούν να επιβεβαιωθούν από τό πείραμα. Το δωμάτιο παρασύρει μαζί του τό υλικό μέσο, δηλαδή τόν άέρα διά μέσου του οποίου διαδίδονται τά ήχητικά κύματα, και γι' αυτό ή ταχύτητα του ήχου θά είναι διαφορετική για ταις δύο παρατηρητές.

Μπορούμε να βγάλουμε μερικά άλλα συμπεράσματα απ' τή θεωρία που βλέπει τόν ήχο σαν ένα κύμα που διαδίδεται δι' ενός υλικού μέσου. Ο καλύτερος τρόπος, αν και δεν είναι ό πιο άπλός, να μήν άκούς αυτό που κάποιος λέει είναι να τρέχεις με ταχύτητα μεγαλύτερη απ' τήν ταχύτητα του ήχου, σχετικά με τόν άέρα που περιβάλλει τόν όμιλητή. Τά ήχητικά κύματα δε θά μπορέσουν τότε να φθάσουν στ' αυτιά μας. Έξ άλλου αν μās διέφευγε από ένα ρήτορα κάποιος σπουδαίος λόγος που δε θά επαναληφθεί ποτέ πιά, θά έπρεπε να τρέξουμε με ταχύτητα μεγαλύτερη απ' τήν ταχύτητα του ήχου για να προκάνουμε τό κύμα που είχε παραχθεί και να άρπάξουμε τό λόγο. Δεν υπάρχει τίποτε τό παράλογο σ' αυτά τά παραδείγματα, μόνο που και στις δυό περιπτώσεις θά έπρεπε να τρέξουμε με ταχύτητα 350 μέτρων περίπου στο δευτερόλεπτο, και μπορούμε πολύ καλά να φαντασθοϋμε ότι ή τεχνική πρόοδος θά κάνει δυνατή μιά τέτοια ταχύτητα. Ένα βλήμα εκτοξευόμενο από τηλεβόλο μετακινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη απ' τήν ταχύτητα του ήχου, συνεπώς ένας άνθρωπος τοποθετημένος πάνω στο βλήμα δε θά άκουε τήν έκρηξη του τηλεβόλου.

Όλα τά παραδείγματα αυτά έχουν καθαρώς μηχανικό χαρακτήρα και μπορούμε τώρα να διατυπώσουμε τά εξής σπουδαία ζητήματα: αυτά που είπαμε για τό ήχητικό κύμα μπορούμε να τά επαναλάβουμε και στην περίπτωση του φωτεινού κύματος; Η άρχή τής σχετικότητας του Γαλιλαίου και ό κλασσικός μετασχηματισμός εφαρμόζονται όχι μόνο στα μηχανικά

νικά φαινόμενα, αλλά επίσης και στα όπτικά και ήλεκτρικά; Θα ήταν επικίνδυνο να άπαντήσουμε με ένα «ναι» ή ένα «όχι» στα ζητήματα αυτά προτού έμβαθύνουμε περισσότερο στην σημασία τους.

Στην περίπτωση του ήχητικού κύματος μέσα στο δωμάτιο που κινείται όμοιόμορφα σχετικά με τόν έξωτερικό παρατηρητή, τά εξής ένδιάμεσα βήματα είναι ούσιώδη για τό συμπέρασμα μας:

Τό κινούμενο δωμάτιο παρασύρει τόν άέρα όπου διαδίδεται τό ήχητικό κύμα.

Οί παρατηρηθείσες ταχύτητες στα δύο ΣΣ, που κινούνται όμοιόμορφα τό ένα σχετικά με τό άλλο, είναι συνδεδεμένες με τόν κλασσικό μετασχηματισμό.

Τό αντίστοιχο πρόβλημα του φωτός πρέπει να διατυπωθεί με τρόπο κάπως διαφορετικό. Οί παρατηρητές του δωματίου τώρα δεν μιλούν, αλλά στέλνουν φωτεινά σήματα ή φωτεινά κύματα προς όλες τις διευθύνσεις. Έξ άλλου υποθέτουμε ότι οι πηγές που εκπέμπουν τά φωτεινά σήματα μένουν διαρκώς μέσα στο δωμάτιο. Τά φωτεινά κύματα διαδίδονται διά μέσου του αιθέρα όπως διά μέσου του άέρα διαδίδονται τά ήχητικά κύματα.

Ο αιθέρας παρασύρεται από τό δωμάτιο όπως συνέβαινε με τόν άέρα; Λεδομένου ότι δεν έχουμε καμιά μηχανική εικόνα του αιθέρα είναι υπερβολικά δύσκολο ν' άπαντήσουμε σ' αυτή τήν έρώτηση. Εάν τό δωμάτιο είναι κλειστό ο άέρας που βρίσκεται μέσα αναγκάζεται να κινείται μαζί του. Είναι φανερό όμως ότι δεν έχει νόημα να φαντασθοϋμε τόν αιθέρα με τόν ίδιο τρόπο, άφοϋ όλη ή ύλη είναι βυθισμένη μέσα του και είσχωρεί παντού. Για τόν αιθέρα κλειστή πόρτα δεν υπάρχει. Τό «κινούμενο δωμάτιο» σημαίνει τώρα ένα ΣΣ σε κίνηση στο όποιο είναι άύστηρά συνδεδεμένη ή φωτεινή πηγή. Ωστόσο δεν είναι πολύ δύσκολο να φαντασθοϋμε ότι τό δωμάτιο που κινείται μαζί με τή φωτεινή πηγή του παρασύρει μαζί του τόν αιθέρα, όπως άκριβώς παρέσυρε τήν ήχητική πηγή και τόν άέρα που ήταν

κλεισμένα μέσα του. Αλλά μπορούμε εξ ίσου καλά να φαντασθούμε και τό αντίθετο: ότι τό δωμάτιο μετατοπίζεται μέσα στον αέρα όπως ένα πλοίο μέσα σε μιά τελείως ήρεμη θάλασσα, χωρίς να παρασύρει κανένα μέρος του περιβάλλοντος, αλλά απλώς κινούμενο διά μέσου αυτού. Στην πρώτη μας εικόνα τό δωμάτιο πού κινείται μαζί με τή φωτεινή του πηγή παρασύρει τόν αέρα. Η αναλογία με ένα ήχητικό κύμα είναι δυνατή και μπορούμε να βγάλουμε τελείως όμοια συμπεράσματα. Στη δεύτερη εικόνα, τό δωμάτιο πού κινείται μαζί με τή φωτεινή πηγή του δέν παρασύρει τόν αέρα. Δέν υπάρχει καμιά αναλογία με τό ήχητικό κύμα και τά σχετικά συμπεράσματα δέν ισχύουν για τό φωτεινό κύμα. Εκτός από τίς δύο αυτές έσχατες δυνατότητες μπορούμε να φαντασθούμε μιά τρίτη πιο περίπλοκη, δηλαδή ότι τό δωμάτιο πού κινείται με τή φωτεινή πηγή του δέν παρασύρει τόν αέρα παρά έν μέρος. Αλλά δέν υπάρχει λόγος να έρευνήσουμε τήν περίπλοκη υπόθεση πριν δοϋμε για όφελος ποιās από τίς δύο αυτές όριακές περιπτώσεις αποβαίνει τό πείραμα.

Θά αρχίσουμε απ' τήν πρώτη εικόνα μας και θά υποθέσουμε για μιά στιγμή ότι ο αέρας παρασύρεται από τό δωμάτιο πού κινείται μαζί με τή φωτεινή πηγή του αϋστηρά συνδεδεμένη με αυτό. Αν είχαμε έμπιστοσύνη στην αρχή του απλού μετασχηματισμού για τίς ταχύτητες των ήχητικών κυμάτων, μπορούμε τώρα εξ ίσου καλά να εφαρμόσουμε τά συμπεράσματά μας και για τά φωτεινά κύματα. Δέν υπάρχει λόγος να θέσουμε σε άμφιβολία τό νόμο του μηχανικού μετασχηματισμού πού βεβαιώνει μόνο ότι σε μερικές περιπτώσεις οι ταχύτητες πρέπει να προστίθενται και σε άλλες να αφαιρούνται. Συνεπώς θά παραδεχτούμε για τήν ώρα ότι και ο αέρας παρασύρεται απ' τό δωμάτιο πού κινείται μαζί με τή φωτεινή πηγή του και τόν κλασσικό μετασχηματισμό.

Αν από τή φωτεινή πηγή τήν αϋστηρά συνδεδεμένη με τό κινούμενο δωμάτιο κάνω να φύγει ένα φωτεινό σήμα, θά διαδοθεί όπως πειραματικά αποδείχτηκε, με ταχύτητα 300.000 χιλιομέτρων στο δευτερόλεπτο. Αλλά ο έξωτερικός παρατη-

ρητής θά παρατηρήσει τήν κίνηση του δωματίου και επομένως και τής πηγής, και εφ' όσον ο αέρας έχει παρασυρθεί, τό συμπέρασμά του θά είναι τό εξής: ή ταχύτητα του φωτός στο έξωτερικό μου ΣΣ είναι διαφορετική προς τίς διαφορετικές διευθύνσεις. Είναι μεγαλύτερη από τήν όμαλή ταχύτητα, προς τήν διεύθυνση τής κίνησης του δωματίου και μικρότερη προς τήν αντίθετη διεύθυνση. Τό συμπέρασμά μας είναι: εάν ο αέρας παρασύρεται από τό δωμάτιο πού κινείται μαζί με τή φωτεινή πηγή του και αν οι νόμοι τής μηχανικής ισχύουν, τότε ή ταχύτητα του φωτός πρέπει να εξαρτάται από τήν ταχύτητα τής φωτεινής πηγής. Τό φως πού φθάνει σε μās από μιά φωτεινή πηγή πού κινείται πρέπει να έχει μεγαλύτερη ταχύτητα αν ή πηγή κινείται προς τό μέρος μας και μικρότερη αν απομακρύνεται από μās.

Αν ή δική μας ταχύτητα ήταν μεγαλύτερη απ' τήν ταχύτητα του φωτός θά ήμασταν σε θέση να αποφύγουμε ένα φωτεινό σήμα. Θά μπορούσαμε να δοϋμε τά περασμένα γεγονότα αν συλλαμβάναμε τά φωτεινά κύματα πού εκτοξεύτηκαν προγενέστερα. Θά τά καταφθάναμε με αντίστροφη σειρά απ' αυτή πού εκτοξεύτηκαν και ή ροή των γεγονότων πάνω στη Γη μας θά έμοιαζε με μιά κινηματογραφική ταινία προβαλλόμενη ανάποδα, δηλαδή απ' τό τέλος. Τά συμπεράσματα αυτά είναι όλα επακόλουθα τής υπόθεσης ότι τό ΣΣ πού κινείται παρασύρει τόν αέρα και ότι οι νόμοι του μηχανικού μετασχηματισμού ισχύουν. Αν έτσι έχει τό πράγμα, ή αναλογία ανάμεσα στον ήχο και στο φως είναι τέλεια.

Αλλά καμιά ένδειξη δέν υπάρχει πού να φανερώσει τήν αλήθεια των συμπερασμάτων αυτών. Αντίθετα όλες οι παρατηρήσεις πού γίνονται για να επαληθευτούν, αντιφάσκουν προς αυτά. Δέν υπάρχει ή παραμικρή άμφιβολία ως προς τή σαφήνεια αυτής τής διατύπωσης, αν και έχουν φθάσει σ' αυτήν με έμμεσα πειράματα, δεδομένου ότι ή πολύ μεγάλη τιμή τής ταχύτητας του φωτός παρουσιάζει μεγάλες τεχνικές δυσκολίες. Η ταχύτητα του φωτός είναι πάντοτε ή ίδια σε όλα τά ΣΣ, είτε ή εκπέμπουσα πηγή είναι σε κίνηση είτε όχι και με όποιοδήποτε

τρόπο και άν κινείται.

Δέν είναι τοῦ παρόντος νά δώσουμε μιά λεπτομερή περιγραφή τῶν πολυαρίθμων πειραμάτων ἀπ' τά ὁποῖα προέκυψε τό σπουδαῖο αὐτό συμπέρασμα. Μποροῦμε ὥστόσο νά χρησιμοποιήσουμε μερικά ἀπλά ἐπιχειρήματα, τά ὁποῖα άν και δέν ἀποδεικνύουν ὅτι ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός είναι ἀνεξάρτητη ἀπό τήν κίνηση τῆς πηγῆς κάνουν ἐν τούτοις τό γεγονός πειστικό και κατανοητό.

Στό πλανητικό μας σύστημα ἡ Γῆ και οἱ ἄλλοι πλανῆτες κινοῦνται γύρω ἀπό τόν "Ἡλιο. Δέν γνωρίζουμε ἄλλα πλανητικά συστήματα ὁμοια μέ τό δικό μας. Ὑπάρχουν ἐν τούτοις πολλά συστήματα διπλῶν ἀστέρων πού κινοῦνται γύρω ἀπό ἕνα σημεῖο πού λέγεται κέντρο βαρύτητάς των. Ἡ παρατήρηση τῆς κίνησης τῶν διπλῶν αὐτῶν ἀστέρων ἐπαληθεύει τήν ἰσχύ τοῦ νόμου τῆς βαρύτητας τοῦ Νεύτωνα. "Ας ὑποθέσουμε τώρα ὅτι ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ταχύτητα τοῦ σώματος πού τό ἐκπέμπει. Τότε ἡ φωτεινή ἀκτίνα πού φεύγει ἀπό ἕνα ἄστρο θά διαδοθεῖ ταχύτερα ἢ βραδύτερα ἀνάλογα μέ τήν ταχύτητα τοῦ ἄστρου τῆ στιγμῆ πού ἡ ἀκτίνα ἐκπέφθηκε. Σ' αὐτή τήν περίπτωση ὅλη ἡ κίνηση θά ταραζόταν και θά ἦταν ἀδύνατο νά βεβαιωθεῖ άν γιά τά μακρυνά διπλά ἀστέρια ἰσχύει ὁ νόμος τῆς ἑλξης πού κυβερνᾶ τό πλανητικό μας σύστημα.

"Ας ἐξετάσουμε ἕνα ἄλλο πείραμα πού βασίζεται σέ μιά πολύ ἀπλή ἰδέα. "Ας ὑποθέσουμε ἕνα τροχό πού στρέφεται μέ μεγάλη ταχύτητα. Σύμφωνα μέ τήν ὑπόθεσή μας ὁ αἰθέρας παρασύρεται ἀπ' τήν κίνηση και παίρνει μέρος σ' αὐτήν. Ἐνα φωτεινό κῆμα πού περνᾶ κοντά στόν τροχό θά ἔπρεπε νά ἔχει διαφορετική ταχύτητα ὅταν ὁ τροχός ἠρεμεῖ ἀπό ἐκείνην πού θά εἶχε άν βρισκόταν σέ κίνηση. Ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός μέσα σέ ἠρεμοῦντα αἰθέρα θά ἔπρεπε νά είναι διαφορετική ἀπ' τήν ταχύτητα μέσα σέ αἰθέρα πού τόν παρασύρει μέ ὀρμή ἡ κίνηση τοῦ τροχοῦ, ἀκριβῶς, ὅπως είναι διαφορετική ἡ ταχύτητα ἑνός ἠχητικοῦ κύματος ἀνάλογα μέ τό άν ὁ ἀέρας είναι ἠρεμος ἢ άν ὑπάρχει ἀνεμος. Ἀλλά καμιά διαφορά τέτοιου εἶδους δέν διαπιστώθηκε. Ἀπ' ὅποια πλευρά κι άν ἐξετάσουμε τό ζήτημα,

ὅσαδήποτε πειράματα κι άν διασταυρώσουμε, ἡ διαπίστωση είναι πάντα ἀντίθετη στήν ὑπόθεση ὅτι ὁ αἰθέρας παρασύρεται ἀπ' τήν κίνηση. Ἐτσι τό ἀποτέλεσμα τῶν παρατηρήσεών μας, πού στηρίζονται σέ μιά πῶ λεπτομερή και πῶ τεχνική ἐπιχειρηματολογία, είναι:

"Ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός δέν ἐξαρτᾶται ἀπό τήν κίνηση τῆς πηγῆς πού τό ἐκπέμπει.

Δέν πρέπει νά ὑποθέσουμε ὅτι τό σῶμα πού κινεῖται παρασύρει τόν αἰθέρα πού τό περιβάλλει.

"Οφείλουμε συνεπῶς νά ἐγκαταλείψουμε τήν ἀναλογία ἀνάμεσα στά ἠχητικά κύματα και στά φωτεινά κύματα και νά ἐπιστρέψουμε στή δεύτερη δυνατότητα: ὅτι ὅλη ἡ ὕλη κινεῖται μέσα στόν αἰθέρα, ὁ ὁποῖος δέν παίρνει καθόλου μέρος στήν κίνηση. Αὐτό σημαίνει ὅτι ὑποθέτουμε τήν ὑπαρξη ἑνός ὠκεανοῦ αἰθέρα ὅπου ὅλα τά ΣΣ βρίσκονται σέ ἠρεμία ἢ κινοῦνται σχετικά μέ αὐτόν. Γιά τήν ὄρα ἄς ἀφήσουμε κατά μέρος τό ζήτημα άν τό πείραμα βεβαιώνει ἢ ἀπορρίπτει τή θεωρία αὐτή. Θά κάνουμε καλύτερα νά ἐξοικιωθοῦμε μέ τή σημασία τῆς νέας αὐτῆς ὑπόθεσης και μέ τά συμπεράσματα πού μποροῦμε νά βγάλουμε ἀπ' αὐτήν.

"Ὑπάρχει ἕνα ΣΣ πού ἠρεμεῖ σχετικά μέ τόν ὠκεανό τοῦ αἰθέρα. Στή μηχανική κανένα ἀπό τά πολυάριθμα ΣΣ πού κινοῦνται ὁμοιόμορφα τό ἕνα σχετικά μέ τό ἄλλο δέν κατέχει ἰδιαίτερο προνόμιο. Ὅλα αὐτά τά ΣΣ είναι ἐξ ἴσου «καλά» ἢ «κακά». "Αν ἔχουμε δύο ΣΣ κινούμενα ὁμοιόμορφα τό ἕνα σχετικά μέ τό ἄλλο δέν ἔχει νόημα στή μηχανική νά ρωτήσουμε ποιό ἀπ' τά δύο είναι σέ ἠρεμία και ποιό σέ κίνηση. Μόνη ἡ σχετική ὁμοιόμορφη κίνηση είναι δυνατόν νά παρατηρηθῆται. Δέν μποροῦμε νά μιλοῦμε γιά ἀπόλυτη ὁμοιόμορφη κίνηση, ἐξ αἰτίας τῆς ἀρχῆς τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου. Τί θέλουν νά ποῦν ὅταν βεβαιώνουν ὅτι ὑπάρχει μιά ἀπόλυτα ὁμοιόμορφη κίνηση και ὄχι μόνο μιά σχετικά ὁμοιόμορφη κίνηση; Ἀπλοῦστατα ὅτι ὑπάρχει ἕνα ΣΣ ὅπου μερικοί ἀπό τούς φυσικούς νόμους είναι διαφορετικοί ἀπό ἐκείνους σέ ὅλα

τά άλλα ΣΣ, και ακόμα ότι κάθε παρατηρητής μπορεί να διαπιστώσει αν το δικό του ΣΣ βρίσκεται σε ηρεμία ή σε κίνηση συγκρίνοντας τους νόμους που ισχύουν για αυτό με τους νόμους που ισχύουν για το μοναδικό ΣΣ που έχει το απόλυτο μονοπάτι να χρησιμεύει για πρότυπο. Έδω ή περίπτωση είναι διαφορετική από κείνη της κλασικής μηχανικής, όπου η απόλυτη ομοιόμορφη κίνηση δεν έχει τελείως κανένα νόημα.

Ποιά είναι τα συμπεράσματα που μπορούμε να βγάλουμε στην περιοχή των φαινομένων του πεδίου, αν υποθέσουμε την κίνηση διά μέσου του αέρα; Αυτό θα σήμαινε ότι υπάρχει ένα ΣΣ ξεχωριστό από όλα τα άλλα, που είναι σε ηρεμία σχετικά με τον ώκεανό του αέρα. Είναι φανερό ότι μερικοί από τους φυσικούς νόμους πρέπει να είναι διαφορετικοί από αυτό το ΣΣ, αλλιώς ή έκφραση «κίνηση διά μέσου του αέρα» δε θα είχε καμιά σημασία. Αν ισχύει η αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου, ή κίνηση διά μέσου του αέρα δεν έχει κανένα νόημα. Είναι αδύνατο να συμβιβασθούν οι δύο αυτές ιδέες. **Ωστόσο αν υπάρχει ένα ιδιαίτερο ΣΣ συνδεδεμένο με τον αέρα, τότε ή «απόλυτη κίνηση» ή ή «απόλυτη ηρεμία» έχει μία ώρισμένη σημασία.**

Είναι αλήθεια ότι δεν έχουμε έκλογή. Προσπαθήσαμε να διασώσουμε την αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου κάνοντας την υπόθεση ότι τα συστήματα που κινούνται παρασύρουν μαζί τους τον αέρα, αλλά με το πείραμα καταλήξαμε σε αντίφαση. Η μόνη διέξοδος είναι να εγκαταλείψουμε την αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου και να δοκιμάσουμε την υπόθεση ότι όλα τα σώματα κινούνται διά μέσου του ακίνητου ώκεανού του αέρα.

Πρέπει πρώτα να εξετάσουμε μερικά συμπεράσματα που αντιφάσκουν στην αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου και υποστηρίζουν την αντίληψη της κίνησης διά μέσου του αέρα και να τα υποβάλουμε στη δοκιμασία του πειράματος. Τέτοια πειράματα με μεγάλη εύκολια μπορεί να τα φαντασθεί κανείς, αλλά παρουσιάζουν μεγάλη δυσκολία στην εκτέλεση. Επειδή

εδώ ασχολούμαστε αποκλειστικά και μόνο με ιδέες, δεν ενοχλούμαστε από τις τεχνικές δυσκολίες.

Επιστρέφουμε και πάλι στο δωμάτιό μας που κινείται και στους δύο παρατηρητές, που βρίσκονται ο ένας στο έσωτερικό του δωματίου κι ο άλλος έξω. Ο έξω παρατηρητής θα παριστά το πρότυπο ΣΣ, που είναι συνδεδεμένο με τον ώκεανό του αέρα. Είναι το προνομιοῦχο ΣΣ, όπου ή ταχύτητα του φωτός έχει πάντα την ίδια ομαλή τιμή. Το φως όλων των φωτεινών πηγών, είτε βρίσκονται σε κίνηση είτε σε ακινησία μέσα στον ακίνητο ώκεανό του αέρα, διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα. Το δωμάτιο και ο παρατηρητής του κινούνται διά μέσου του αέρα. **Ας φαντασθούμε ότι ένα φως αναπηδά κατά διαλείμματα στο κέντρο του δωματίου και ότι τα τοιχώματα του δωματίου είναι διαφανή σε τρόπο που οι παρατηρητές μέσα και έξω να μπορούν να μετρήσουν την ταχύτητα του φωτός.** Αν ρωτήσουμε τους παρατηρητές ποιά είναι τα αποτελέσματα που υπολογίζουν να έχουν, θα μας απαντήσουν περίπου ως εξής:

**Ο έξω παρατηρητής:** Το ΣΣ μου είναι συνδεδεμένο με τον ώκεανό του αέρα. Η ταχύτητα του φωτός στο ΣΣ μου είναι πάντοτε ή ίδια. Αδιαφορώ να γνωρίζω αν ναι ή όχι ή πηγή του φωτός ή άλλα σώματα είναι σε κίνηση, γιατί δεν παρασύρουν ποτέ τον δικό μου ώκεανό του αέρα. Το δικό μου ΣΣ ξεχωρίζει από όλα τα άλλα, και ή ταχύτητα του φωτός πρέπει να έχει την κανονική τιμή της, ανεξάρτητα από την διεύθυνση της φωτεινής ακτίνας ή την κίνηση της πηγής της.

**Ο μέσω παρατηρητής:** Το δωμάτιό μου κινείται διά μέσου του ώκεανού του αέρα. Ο ένας από τους τοίχους απομακρύνεται από το φως και ο αντίθετος το πλησιάζει. Εάν το δωμάτιο μου κινείται σχετικά με τον ώκεανό του αέρα με την ταχύτητα του φωτός, τότε το φως που ξεκινά από το κέντρο του δωματίου δε θα έφθανε ποτέ στον τοίχο που απομακρύνεται με την ταχύτητα του φωτός. Εάν το δωμάτιο κινείται με ταχύτητα κατώτερη της ταχύτητας του φωτός, τότε ένα φωτεινό κύμα εκπεμπόμενο από το κέντρο του δωματίου θα έφθανε στον ένα τοίχο πριν από το άλλο. Θα έφθανε στον τοίχο που κινείται

πρός τό φωτεινό κύμα πρίν από τόν τοίχο πού απομακρύνεται άπ' αυτό. Συνεπώς άν και ή φωτεινή πηγή είναι υδστηρά συνδεδεμένη μέ τό ΣΣ μου, ή ταχύτητά της δέ θα είναι ή ίδια πρós όλες τίς διευθύνσεις. Θα είναι μικρότερη πρós τή διεύθυνση τής κίνησης σχετικά μέ τόν ώκεανό του αϊθέρα, όπου ό τοίχος απομακρύνεται από τό φωτεινό κύμα και μεγαλύτερη πρós τήν αντίθετη διεύθυνση όπου ό τοίχος κινείται πρós τό φωτεινό κύμα.

Έτσι μόνο στό προνομιούχο ΣΣ τό συνδεδεμένο μέ τόν ώκεανό του αϊθέρα ή ταχύτητα του φωτός θα πρέπει νά είναι ή ίδια πρós όλες τίς διευθύνσεις. Για άλλα ΣΣ πού κινούνται σχετικά μέ τόν ώκεανό του αϊθέρα θα εξαρτόταν από τή διεύθυνση όπου εκτελούμε τή μέτρηση.

Τό σταυροειδές πείραμα πού εξέτάσαμε μās επιτρέπει νά θέσουμε σέ δοκιμασία τή θεωρία τής κίνησης διά μέσου του ώκεανού του αϊθέρα. Η φύση βάζει σ' αλήθεια στή διάθεσή μας ένα σύστημα πού κινείται μέ ταχύτητα αρκετά ύψηλή: είναι ή Γή στήν έτήσια κίνησή της γύρω άπ' τόν "Ηλιο." Αν ή υπόθεσή μας είναι όρθή, ή ταχύτητα του φωτός πρós τή διεύθυνση τής κίνησης τής Γής θα έπρεπε νά είναι διαφορετική άπ' τήν ταχύτητα πρós τήν αντίθετη διεύθυνση. Είναι δυνατό νά υπολογισθούν οί διαφορές και νά εκτελεσθεί τό κατάλληλο αποδεικτικό πείραμα. Δεδομένου ότι οί διαφορές του χρόνου πού προκύπτουν άπ' τή θεωρία είναι μικρές, πρέπει ή πειραματική διάταξη νά είναι πολύ έπινοητική. Αυτό ακριβώς έγινε στό περίφημο πείραμα του Michelson-Morley. Τό αποτέλεσμα ήταν μία διαπίστωση «θανάτου» έναντιόν τής θεωρίας του ακίνητου ώκεανού του αϊθέρα διά μέσου του οποίου δη ή βλη θα έκινείτο. Δέ βρήκαν τίποτε πού νά δείχνει ότι ή ταχύτητα του φωτός εξαρτάται από τήν διεύθυνση. Εάν αλήθευε ή θεωρία του ώκεανού του αϊθέρα, όχι μόνο ή ταχύτητα του φωτός αλλά και άλλα φαινόμενα του πεδίου θα έδειχναν μία εξάρτηση από τή διεύθυνση στό κινούμενο ΣΣ. Όλα τά πειράματα έδωσαν τό ίδιο άρνητικό αποτέλεσμα μέ τό πείραμα του Michelson-Morley, κανένα δέν αποκάλυψε μία οποιαδήποτε εξάρτηση από τή διεύθυνση τής κίνησης τής Γής.

“Η κατάσταση αποβαίνει όλο και πιο σοβαρή.” Έγιναν δύο υποθέσεις: ή πρώτη λέει ότι τά σώματα πού κινούνται παρασύρουν τόν αϊθέρα. Τό γεγονός ότι ή ταχύτητα του φωτός δέν εξαρτάται από τήν κίνηση τής πηγής αντιφάσκει στήν υπόθεση αυτή. Η δεύτερη υπόθεση λέει ότι υπάρχει ένα προνομιούχο ΣΣ και ότι τά σώματα πού κινούνται δέν παρασύρουν τόν αϊθέρα, αλλά κινούνται διά μέσου ενός ώκεανού αϊθέρα αιώνια ακίνητου. Αν είναι έτσι, ή άρχή τής σχετικότητας του Γαλιλαίου δέν ισχύει, και ή ταχύτητα του φωτός δέν μπορεί νά είναι ή ίδια σέ κάθε ΣΣ. Πάλι πέφτουμε σέ αντίφαση μέ τό πείραμα.

Θεωρίες πιο έντεχνες έχουν δοκιμασθεί μέ τήν υπόθεση ότι ή αλήθεια πρέπει νά βρίσκεται κάπου ανάμεσα σ' αυτές τίς δύο όριακές περιπτώσεις: ότι ό αϊθέρας δέν παρασύρεται παρά μερικά από τά σώματα πού κινούνται. Αλλά όλες απέτυχαν. Όλες οί προσπάθειες για νά εξηγηθούν τά ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα στή κινούμενα ΣΣ, είτε μέ τήν κίνηση του αϊθέρα, είτε μέ τήν κίνηση διά μέσου του αϊθέρα, είτε σύγχρονα και μέ τίς δύο αυτές κινήσεις, αποδείχτηκαν άκαρπες.

Έτσι βρεθήκαμε σέ μία κατάσταση πού είναι ή πιο δραματική μέσα στήν ιστορία τής επιστήμης. Όλες οί υποθέσεις αναφορικά μέ τόν αϊθέρα δέν κατέληξαν πουθενά. Η διαπίστωση του πειράματος ήταν πάντα άρνητική.

Ρίχνοντας ένα βλέμμα πρós τά πίσω πάνω στήν ανάπτυξη τής φυσικής, βλέπουμε ότι ό αϊθέρας έγινε, άμέσως μετά τή γέννησή του «τό τρομερό παιδί» τής οικογένειας των φυσικών ουσιών. Πρώτα-πρώτα ή κατασκευή μιας άπλής μηχανικής εικόνας του αϊθέρα αποδείχτηκε αδύνατη και παραμερίστηκε. Αυτό ήταν, κατά μεγάλο μέρος, ή αιτία τής κατάρρευσης τής μηχανικής αντίληψης. Ύστερα, αναγκαστήκαμε νά εγκαταλείψουμε τήν έλπίδα ότι χάρη στήν ύπαρξη του ώκεανού του αϊθέρα θα ήπηρεζε ένα προνομιούχο ΣΣ πού θα μās επέτρεπε νά γνωρίσουμε τήν άπόλυτη κίνηση και όχι μόνο τή σχετική κίνηση. Αυτός θα ήταν ό μόνος τρόπος, εκτός από τήν μετάδοση των κυμάτων, μέ τόν όποιο ό αϊθέρας θα μπορούσε νά εκδηλώσει και νά αιτιολογήσει τήν ύπαρξή του. Όλες οί

ἀπόπειρές μας, για να καταστήσουμε τόν αιθέρα πραγματικό, έχουν αποτύχει. Δέν ἀπεκάλυψαν οὔτε τή μηχανική δομή του, οὔτε τήν ἀπόλυτη κίνηση. Δέν ξμεινε τίποτε ἀπό τίς ιδιότητές του ἔκτός ἀπό ἐκείνη γιά τήν ὁποία ἐφευρέθηκε, δηλαδή νά μεταδίδει τά ἠλεκτρομαγνητικά κύματα. Οἱ ἀπόπειρές μας νά ἀνακαλύψουμε τίς ιδιότητες τοῦ αιθέρα ὁδήγησαν σέ δυσκολίες καί ἀντιφάσεις. Ὑστερα ἀπό πειράματα τόσο ἀτυχή ἤρθε ἡ στιγμή νά τόν ξεχάσουμε τελείως καί νά προσπαθοῦμε νά μή προφέρουμε ποτέ τό ὄνομά του. Θά λέμε: τό διάστημά μας ἔχει τή φυσική δυνατότητα νά μεταδίδει τά κύματα, σέ τρόπο πού δέ θά κάνουμε πιά χρήση μιᾶς λέξης πού ἀποφασίσαμε νά ἀποφεύγουμε.

Ἀλλά ἡ παράλειψη μιᾶς λέξης ἀπ' τό λεξιλόγιό μας δέν ἀποτελεῖ φάρμακο. Εἶναι στ' ἀλήθεια πολύ βαθειές οἱ ταραχές μας γιά νά μπορούν νά ἡρεμήσουν μ' αὐτό τόν τρόπο.

Ἄς ἀριθμήσουμε τώρα τά γεγονότα πού βεβαιώθηκαν ἐπαρκῶς ἀπό τό πείραμα χωρίς ποτέ νά ἀσχοληθοῦμε μέ τό πρόβλημα τοῦ «αἰ - ρα».

1. Ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός στό κενό διάστημα εἶναι πάντα ἡ ἴδια, εἶναι ἀνεξάρτητη ἀπό τήν κίνηση τῆς πηγῆς ἢ τοῦ δέκτη τοῦ φωτός.

2. Σέ δύο ΣΣ κινούμενα ὁμοίμορφα τό ἓνα σχετικά μέ τό ἄλλο, ὅλοι οἱ φυσικοί νόμοι εἶναι ὅμοιοι μέ αὐστηρότητα καί δέν ὑπάρχει κανείς τρόπος νά διακρίνουμε μιᾶ ἀπόλυτη ὁμοίμορφη κίνηση.

Ὑπάρχουν πολλά πειράματα πού βεβαιώνουν τίς δύο αὐτές διαπιστώσεις, ἀλλά οὔτε ἓνα πού νά ἀντιφάσκει στή μία ἢ τήν ἄλλη. Ἡ πρώτη διαπίστωση ἐκφράζει τή σταθερότητα τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός, ἡ δεύτερη ἐπεκτείνει τήν ἀρχή τῆς σχετικότητας τοῦ Γαλιλαίου, πού διατυπώθηκε γιά τά μηχανικά φαινόμενα, καί σ' ὅλα τά γεγονότα τῆς φύσης.

Στή μηχανική ἔχουμε διαπιστώσει: Ἄν ἡ ταχύτητα ἑνός ὀλικοῦ σημείου ἔχει τή μία ἢ τήν ἄλλη τιμή σχετικά μέ ἓνα ΣΣ, θά εἶναι διαφορετική σέ ἓνα ἄλλο ΣΣ πού ζωογονεῖται ἀπό

ὁμοίμορφη κίνηση σχετικά μέ τό πρῶτο. Αὐτό προκύπτει ἀπ' τίς ἀπλές ἀρχές τοῦ μηχανικοῦ μετασχηματισμοῦ, πού ἔρχονται ἀπ' εὐθείας ἀπό τήν ἄμεση ἀντίληψή μας (ὁ ἄνθρωπος κινούμενος σχετικά μέ τό πλοῖο καί μέ τήν ἀκτῆ) καί κατά τά φαινόμενα δέν μπορεί νά ὑπάρχει τίποτα τό σφαλερό. Ἀλλ' ὁ νόμος αὐτός τοῦ μετασχηματισμοῦ ἔρχεται σέ ἀντίθεση μέ τήν σταθερότητα τῆς ταχύτητας τοῦ φωτός. Μ' ἄλλα λόγια, προσθέτουμε μιᾶ τρίτη ἀρχή.

3. Οἱ θέσεις μας καί οἱ ταχύτητες μετασχηματίζονται περνώντας ἀπό ἓνα σύστημα ἀδράνειας σ' ἓνα ἄλλο σύμφωνα μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό.

Ἡ ἀντίφασή εἶναι λοιπόν ὀλοφάνερη. Δέν μπορούμε νά συνδυάσουμε (1), (2) καί (3).

Ὁ κλασσικός μετασχηματισμός μοιάζει τόσο ὀλοφάνερος καί ἀπλός ὥστε νά μή μπορεί κανείς νά σκεφθεῖ νά τόν τροποποιήσει. Ἐπιχειρήσαμε ἤδη νά τροποποιήσουμε (1) καί (2) καί διαπιστώσαμε μιᾶ ἀσυμφωνία μέ τό πείραμα. Ὅλες οἱ θεωρίες πού ἀφοροῦσαν στήν κίνηση τοῦ «αἰ-ρα» ἀπαιτοῦσαν μιᾶ τροποποίηση τοῦ (1) καί (2). Αὐτά δέν εἶχε τίποτε τό καλό. Ἀλλή μιᾶ φορά βεβαιώνουμε τό σοβαρό χαρακτήρα τῶν δυσκολιῶν μας. Μιᾶ νέα ἐπινόηση εἶναι ἀναγκαία. Μᾶς προσφέρεται ἀπό τήν ἀποδοχή τῶν θεμελιωδῶν ὑποθέσεων (1) καί (2), καί, ὅσο παράξενο κι ἄν φαίνεται, ἀπ' τήν ἐγκατάλειψη τῆς (3). Ἡ νέα ἐπινόηση ξεκινᾶ ἀπ' τήν ἀνάλυση τῶν πύ ἀρχέγονων θεμελιωδῶν ἐνοιῶν· θά δείξουμε πῶς ἡ ἀνάλυση αὐτή μᾶς ἐπιβάλλει νά μεταβάλουμε τίς παλιές μας ἀντιλήψεις καί πῶς ἀναιρεῖ ὅλες τίς δυσκολίες μας.

## ΧΡΟΝΟΣ, ΑΠΟΣΤΑΣΗ, ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

Οἱ νέες μας ὑποθέσεις εἶναι:

1. Ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός, μέσα στό κενό, εἶναι ἡ ἴδια σέ ὅλα τά ΣΣ, πού κινῶνται ὁμοίμορφα τό ἓνα σχετικά μέ τό ἄλλο.

2. Ὅλοι οἱ νόμοι τῆς φύσης εἶναι οἱ ἴδιοι σέ ὅλα τά ΣΣ πού κινῶνται ὁμοίμορφα τό ἓνα σχετικά μέ τό ἄλλο.

Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας ἀρχίζει ἀπὸ τὶς δύο αὐτὲς ὑποθέσεις. Ἀπὸ τώρα καὶ στὸ ἐξῆς δὲ θὰ χρησιμοποιήσουμε πᾶν τὸν κλασσικό μετασχηματισμό, γιατί ξέρουμε πῶς ἔρχεται σὲ ἀντίφασή μὲ τὶς ὑποθέσεις μας.

Τὸ σπουδαῖο ἐδῶ εἶναι, ὅπως πάντοτε στὴν ἐπιστήμη, νὰ ἀπαλλαγῶμε ἀπὸ τὶς βαθειὰ ριζωμένες προλήψεις, πού ἐπαυλαμβάνονται συχνά χωρὶς νὰ ἐξετασθοῦν. Ἐφ' ὅσον εἶδαμε ὅτι οἱ τροποποιήσεις στὸ (1) καὶ στὸ (2) ὀδηγοῦν σὲ ἀντίφασή μὲ τὸ πείραμα, πρέπει νὰ ἔχουμε τὸ θάρρος νὰ καθορίσουμε καθαρά τὸ κῦρος τους καὶ νὰ προσβάλλουμε τὸ μόνο ἴσως ἀσθενικό σημεῖο, δηλαδή τὸν τρόπο μὲ τὸν ὁποῖο οἱ θέσεις καὶ οἱ ταχύτητες μετασχηματίζονται περνώντας ἀπὸ ἓνα ΣΣ σ' ἓνα ἄλλο. Εἶναι στίς προθέσεις μας νὰ βγάλουμε συμπεράσματα ἀπὸ τὸ (1) καὶ τὸ (2), νὰ δοῦμε πού καὶ πῶς οἱ ὑποθέσεις αὐτὲς ἀντιφάσκουν στὸν κλασσικό μετασχηματισμό καὶ νὰ βροῦμε τὴ φυσική σημασία τῶν ἀποτελεσμάτων πού θὰ ἔχουμε.

Ἄλλη μιά φορά θὰ ἐξυπηρετηθοῦμε ἀπ' τὸ κινούμενο δωμάτιο καὶ ἀπὸ τοὺς παρατηρητὲς στὸ ἐσωτερικό του καὶ ἔξω. Καὶ πάλι ἓνα φωτεινὸ σῆμα ἐκπέμπεται ἀπὸ τὸ κέντρο τοῦ δωματίου καὶ ρωτοῦμε στοὺς δύο παρατηρητὲς τί περιμένουν νὰ παρατηρήσουν, ὑποθέτοντας μόνο τὶς δύο ἀρχές καὶ ξεχνώντας ὅ,τι εἰπώθηκε προγενέστερα ἀναφορικά μὲ τὸ μέσο διὰ τοῦ ὁποίου διαδίδεται τὸ φῶς. Παραθέτουμε τὶς ἀπαντήσεις τους:

*Ἐσωτερικός παρατηρητής:* Τὸ φωτεινὸ σῆμα πού διαδίδεται ἀπὸ τὸ κέντρο τοῦ δωματίου θὰ φθάσει ταυτόχρονα στοὺς τοίχους, ἐφ' ὅσον αὐτοὶ ἀπέχουν ἐξ ἴσου ἀπὸ τὴ φωτεινὴ πηγή καὶ ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός εἶναι ἡ ἴδια πρὸς ὅλες τὶς διευθύνσεις.

*Ἐξωτερικός παρατηρητής:* Στὸ σύστημά μου ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός εἶναι ἀκριβῶς ἴδια μὲ ἐκείνην συστήματος τοῦ παρατηρητοῦ πού κινεῖται μαζί μὲ τὸ δωμάτιο. Γιὰ μένα δὲν ἔχει σημασία νὰ γνωρίζω ἂν, ναὶ ἢ ὄχι, ἡ φωτεινὴ πηγή κινεῖται στὸ ΣΣ μου, ἐφ' ὅσον ἡ κίνησή της δὲν ἐπηρεάζει τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός. Αὐτὸ πού βλέπω εἶναι ἓνα φωτεινὸ σῆμα πού διαδίδεται μὲ ὁμαλὴ ταχύτητα, πού εἶναι ἡ ἴδια πρὸς ὅλες τὶς διευθύνσεις.

Ὁ ἓνας ἀπ' τοὺς τοίχους ἀπομακρύνεται ἀπὸ τὸ φωτεινὸ σῆμα καὶ ὁ ἀντίθετος τοῖχος πλησιάζει πρὸς αὐτό. Γι' αὐτὸ τὸ φωτεινὸ σῆμα θ' ἀνταμώσει τὸν τοῖχο πού ἀπομακρύνεται λίγο ἀργότερα ἀπὸ τὸν τοῖχο πού τὸ πλησιάζει. Ἄν καὶ ἡ διαφορὰ εἶναι πολὺ μικρὴ, ἂν ἡ ταχύτητα τοῦ δωματίου εἶναι μικρὴ συγκριτικά μὲ τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός, τὸ φωτεινὸ σῆμα δὲ θὰ φθάσει ὡστόσο ἐντελῶς ταυτόχρονα τοὺς δύο ἀντίθετους τοίχους, πού εἶναι κάθετοι στὴ διεύθυνση τῆς κίνησης.

Συγκρίνοντας τὶς προβλέψεις τῶν δύο παρατηρητῶν μας, βρίσκουμε ἓνα ἐκπληκτικὸ ἀποτέλεσμα, πού ἀντιφάσκει καθαρὰ, στίς φαινομενικὰ καλοθεμελιωμένες ἐννοιες τῆς κλασσικῆς φυσικῆς. Δύο περιστατικά, δηλαδή οἱ δύο φωτεινὲς ἀχτίνες πού πέφτουν στοὺς δύο τοίχους, εἶναι σύγχρονες γιὰ τὸν παρατηρητὴ στὸ ἐσωτερικὸ τοῦ δωματίου, ἀλλὰ ὄχι γιὰ τὸν ἔξω τοῦ δωματίου παρατηρητὴ. Στὴν κλασσικὴ φυσικὴ εἶχαμε ἓνα μόνο ρολοῖ, μιά μόνη ροή τοῦ χρόνου γιὰ ὅλους τοὺς παρατηρητὲς σὲ ὅλα τὰ ΣΣ. Ὁ χρόνος καὶ κατὰ συνέπεια οἱ ἐκφράσεις ὅπως «ταυτόχρονα», «νωρίτερα», «ἀργότερα», εἶχαν μιά ἀπόλυτη σημασία ἀνεξάρτητη ἀπὸ ὁποιοδήποτε ΣΣ. Δύο περιστατικά πού συνέβησαν τὴν ἴδια στιγμή σὲ ἓνα ΣΣ, κατ' ἀνάγκην συνέβησαν ταυτόχρονα σὲ ὅλα τ' ἄλλα ΣΣ.

Οἱ ὑποθέσεις (1) καὶ (2), δηλαδή ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας, μᾶς ὑποχρεώνουν νὰ ἐγκαταλείψουμε τὴν ἀποψη αὐτὴ. Περιγράψαμε δύο περιστατικά πού γίνονται ταυτόχρονα σὲ ἓνα ΣΣ, ἀλλὰ σὲ διαφορετικὲς στιγμὲς σὲ ἓνα ἄλλο ΣΣ. Τὸ ἔργο μας εἶναι νὰ κατανοήσουμε τὸ πόρισμα αὐτό, νὰ κατανοήσουμε τὴ σημασία τῆς ἀκόλουθης πρότασης: «Δύο περιστατικά πού εἶναι ταυτόχρονα σὲ ἓνα ΣΣ, μποροῦν νὰ μὴ εἶναι ταυτόχρονα σὲ ἓνα ἄλλο ΣΣ». Τί ἐννοοῦμε μὲ «δύο ταυτόχρονα περιστατικά σὲ ἓνα ΣΣ». Ἀπὸ ἄμεση ἀντίληψη ὁ καθένας φαίνεται νὰ γνωρίζει τὴ σημασία τῆς πρότασης αὐτῆς. Ἄλλ' ἄς ἀποφασίσουμε νὰ εἴμαστε προσεκτικοὶ καὶ ἄς προσπαθήσουμε νὰ δώσουμε ἀσθηροῦς ὀρισμούς, ἔχοντας ὅπ' ὄψη πόσο ἐπικίνδονο εἶναι νὰ ἔχουμε πολλὴ πεποίθηση στὴν ἄμεση ἀντίληψη. Ἄς ἀπαντήσουμε πρῶτα σὲ μιά ἀπλὴ ἐρώτηση.

Τί είναι ρολοί;

Τό πρωτόγονο υποκειμενικό αίσθημα τής ροής του χρόνου μᾶς καθιστᾶ ικανούς νά κατατάσσουμε τίς έντυπώσεις μας, νά κρίνουμε ἂν ἓνα γεγονός συμβαίνει πρὶν ἢ ὕστερα ἀπὸ ἓνα ἄλλο. Ἀλλά γιά νά δείξουμε ὅτι τό διάστημα χρόνου ἀνάμεσα σέ δύο γεγονότα εἶναι δέκα δευτερόλεπτα, ἔχουμε ἀνάγκη ἀπὸ ἓνα ρολοῖ. Μὲ τή χρήση τοῦ ρολοιοῦ ἡ ἔννοια τοῦ χρόνου ἀποβαίνει ἀντικειμενική. Ἐνα φυσικό φαινόμενο μπορεί νά χρησιμεύσει γιά ρολοῖ, φθάνει νά ἐπαναλαμβάνεται ἀκριβῶς ὅσες φορές τό ἐπιθυμοῦμε. Παίρνοντας γιά μονάδα χρόνου τό διάστημα μεταξύ τῆς ἀρχῆς καί τοῦ τέλους ἑνός τέτοιου γεγονότος, αὐθαίρετα διαστήματα χρόνου μποροῦν νά μετρηθοῦν μέ τήν ἐπανάληψη τῆς φυσικῆς αὐτῆς πορείας. Ὅλα τά ρολόγια, ἀπὸ τήν ἀπλή κλεψύδρα ὡς τά πιό ἐκλεπτισμένα χρονομετρικά ὄργανα βασίζονται σ' αὐτή τήν ἰδέα. Στήν περίπτωση τῆς κλεψύδρας, ἡ μονάδα χρόνου εἶναι ὁ χρόνος πού χρειάζεται τό νερό γιά νά τρέξει ἀπ' τό ἐπάνω μέρος τῆς συσκευῆς στό κάτω μέρος. Ἡ ἴδια φυσική πορεία μπορεί νά ἐπαναλαμβάνεται μέ τήν ἀναστροφή τῆς συσκευῆς.

Δύο τέλεια ρολόγια, πού δείχνουν τόν ἴδιο ἀκριβῶς χρόνο, εἶναι τοποθετημένα σέ δύο σημεῖα πού ἀπέχουν. Ἡ βεβαίωση αὐτή θά ἔπρεπε νά εἶναι ἀληθινή ἀνεξάρτητα ἀπ' τήν φροντίδα γιά τήν ἐπαλήθευσή της. Ἀλλά τί σημαίνει στήν πραγματικότητα; Πῶς μποροῦμε νά εἴμαστε βέβαιοι ὅτι τά δύο ἀπομακρυσμένα τό ἓνα ἀπ' τό ἄλλο ρολόγια δείχνουν ἀκριβῶς τόν ἴδιο χρόνο; Μιά μέθοδος πού μποροῦμε νά ἐφαρμόσουμε εἶναι ἡ τηλεόραση. Νά ἐξυπακούεται βέβαια ὅτι ἡ τελευταία αὐτή χρησιμεύει ἀποκλειστικά σάν παράδειγμα καί ὅτι δέν εἶναι οὐσιώδης στήν ἀπόδειξή μας. Θά μπορούσῃ νά τοποθετηθῶ κοντά στό ἓνα ἀπ' τά ρολόγια καί νά παρατηρῶ τήν εἰκόνα τοῦ ἄλλου πού μεταδίδεται ἀπ' τήν τηλεόραση. Θά μπορούσα νά κρίνω τότε ἂν, ναι ἢ ὄχι, τά δύο ρολόγια δείχνουν ταυτόχρονα τόν ἴδιο χρόνο. Αὐτό ὅμως δέ θάταν μιά καλή ἀπόδειξη. Ἡ εἰκόνα τῆς τηλεόρασης μεταδίδεται ἀπὸ ἠλεκτρομαγνητικά κύματα καί μετακινεῖται ἔτσι μέ τήν ταχύτητα τοῦ φωτός. Ἀπὸ

τήν τηλεόραση βλέπω μιά εἰκόνα πού ἔχει σταλεῖ πρὸ ἑνός πολύ μικροῦ διαστήματος χρόνου, ἐνῶ τό πραγματικό ρολοῖ μου δείχνει αὐτό πού συμβαίνει τήν παρούσα στιγμή. Ἡ δυσκολία αὐτή μπορεί εὐκολί νά ἀρθεῖ. Ἀρκεῖ νά τοποθετηθῶ σέ σημεῖο ἐξ ἴσου ἀπέχον ἀπ' τά δύο ρολόγια καί νά παρατηρήσω τίς εἰκόνες αὐτῶν πού μεταδίδονται ἀπ' τήν τηλεόραση. Τότε ἂν ἡ ἐκπομπή γίνει ταυτόχρονα, οἱ εἰκόνες θά φθάσουν σέ μένα τήν ἴδια στιγμή. Ἄν δύο καλά ρολόγια παρατηρούμενα ἀπὸ τή μέση τῆς ἀπόστασης πού τά χωρίζει δείχνουν τόν ἴδιο χρόνο, εἶναι κατάλληλα γιά τήν ἐνδειξή τοῦ χρόνου σέ δύο διαφορετικά σημεῖα.

Στή μηχανική ἐξυπηρετηθήκαμε ἀπὸ ἓνα μόνο ρολοῖ. Ἄλλ' αὐτό δέν ἦταν βολικό, γιατί ἤμασταν ὑποχρεωμένοι νά κάνουμε ὅλες τίς μετρήσεις μας στήν περιοχή του. Παρατηρώντας τό ρολοῖ ἀπὸ ἀπόσταση ἄς ποῦμε μέ τή βοήθειαν τῆς τηλεόρασης, πρέπει πάντα νάχοῦμε στό νοῦ μας ὅτι αὐτό πού βλέπουμε τώρα συνέβηκε στήν πραγματικότητα νωρίτερα. Σέ κάθε ἀνάγνωση χρόνου ἤμαστε ὑποχρεωμένοι ἀνάλογα μέ τήν ἀπόσταση πού μᾶς χωρίζει ἀπ' τό ρολοῖ, νά κάμνουμε τίς σχετικές διορθώσεις.

Συνεπῶς δέν εἶναι βολικό νά ἔχουμε ἓνα μόνο ρολοῖ. Ἀλλά, ἐπειδή τώρα ξέρουμε πῶς μποροῦμε νά ἀποφασίσουμε ἂν δύο ἢ περισσότερα ρολόγια δείχνουν ταυτόχρονα τόν ἴδιο χρόνο καί δουλεύουν μέ τόν ἴδιο ρυθμό, μποροῦμε πολύ καλά νά φαντασθοῦμε ὅσα ρολόγια μᾶς ἀρέσει σέ ἓνα δοσμένο ΣΣ. Τό καθένα θά μᾶς βοηθήσει νά καθορίσουμε τό χρόνο τῶν γεγονότων πού συμβαίνουν στήν ἄμεση γειτονία του. Ὅλα τά ρολόγια βρίσκονται σέ ἡρεμία σχετικά μέ τό ΣΣ. Πρόκειται γιά «καλά» ρολόγια καί συγχρονισμένα, δηλαδή ὅτι δείχνουν ταυτόχρονα τόν ἴδιο χρόνο.

Ἡ διάταξη τῶν ρολογιῶν μας δέν παρουσιάζει τίποτε τό ιδιαίτερα ἐκπληκτικό ἢ παράξενο. Χρησιμοποιοῦμε τώρα ἀντί ἓνα πολλά συγχρονισμένα ρολόγια καί μποροῦμε συνεπῶς εὐκόλα νά κρίνουμε ἂν, ναι ἢ ὄχι, δύο ἀπέχοντα γεγονότα εἶναι ταυτόχρονα σέ ἓνα δοσμένο ΣΣ. Θά εἶναι ταυτόχρονα, ἂν τά

συγχρονισμένα ρολόγια που βρίσκονται στην περιοχή τους, δείχνουν τον ίδιο χρόνο τη στιγμή που συμβαίνουν τα γεγονότα. Τό νά ποῦμε ότι ένα από τὰ απέχοντα μεταξύ τους γεγονότα συνέβηκε πρὶν ἀπὸ τὸ ἄλλο, ἔχει τώρα μία ἀκριβή σημασία. Ὅλα αὐτὰ μποροῦν νὰ κριθοῦν μὲ τὰ συγχρονισμένα ρολόγια σὲ ἡμερία στὸ ΣΣ μας.

Αὐτὸ συμφωνεῖ μὲ τὴν κλασσικὴ φυσικὴ καὶ τίποτε ὡς τώρα δὲν ἀντιφάσκει στὸν κλασσικὸ μετασχηματισμό.

Γιὰ τὸν ὀρισμὸ ταυτόχρονων γεγονότων, τὰ ρολόγια συγχρονίζονται μὲ τὰ σήματα. Στὸ μηχανισμό μας εἶναι οὐσιώδεις τὰ σήματα αὐτὰ νὰ μετακινοῦνται μὲ τὴν ταχύτητα τοῦ φωτός, ταχύτητα ποὺ παίζει θεμελιακὸ ρόλο στὴ θεωρία τῆς σχετικότητας.

Μιά καὶ θέλουμε νὰ διαπραγματευτοῦμε τὸ σπουδαῖο πρόβλημα τῶν δύο ΣΣ ποὺ κινοῦνται μὲ ὁμοιόμορφη κίνηση τὸ ένα σχετικὰ μὲ τὸ ἄλλο, πρέπει νὰ ἐξετάσουμε δύο ράβδους ἐφοδιασμένες μὲ ρολόγια. Ὁ παρατηρητὴς στὸ καθένα ἀπ' τὰ δύο ΣΣ, ποὺ κινοῦνται τὸ ένα σχετικὰ μὲ τὸ ἄλλο, ἔχει τώρα τὴ δική του ράβδο καὶ τὴ δική του σειρά ρολογιῶν ἀψιτηρὰ συνδεδεμένων μὲ αἰτήν.

Ὅταν διαπραγματευτήκαμε τὸ ζήτημα τῶν μετρήσεων στὴν κλασσικὴ μηχανικὴ ἐξυπηρετηθήκαμε ἀπὸ ἓνα μόνο ρολοῖ γιὰ ὅλα τὰ ΣΣ. Ἐδῶ ἔχουμε πολλὰ ρολόγια σὲ κάθε ΣΣ. Ἡ διαφορὰ αὐτὴ δὲν ἔχει σημασία. Θὰ ἔφθανε ἓνα μόνο ρολοῖ γιὰ κάθε ΣΣ, ἀλλὰ δὲν μποροῦμε νὰ ἔχουμε ἀντίρρηση γιὰ τὴ χρησιμοποίηση πολλῶν, ἀρκεῖ νὰ συμπεριφέρονται σὰν καλὰ συγχρονισμένα ρολόγια.

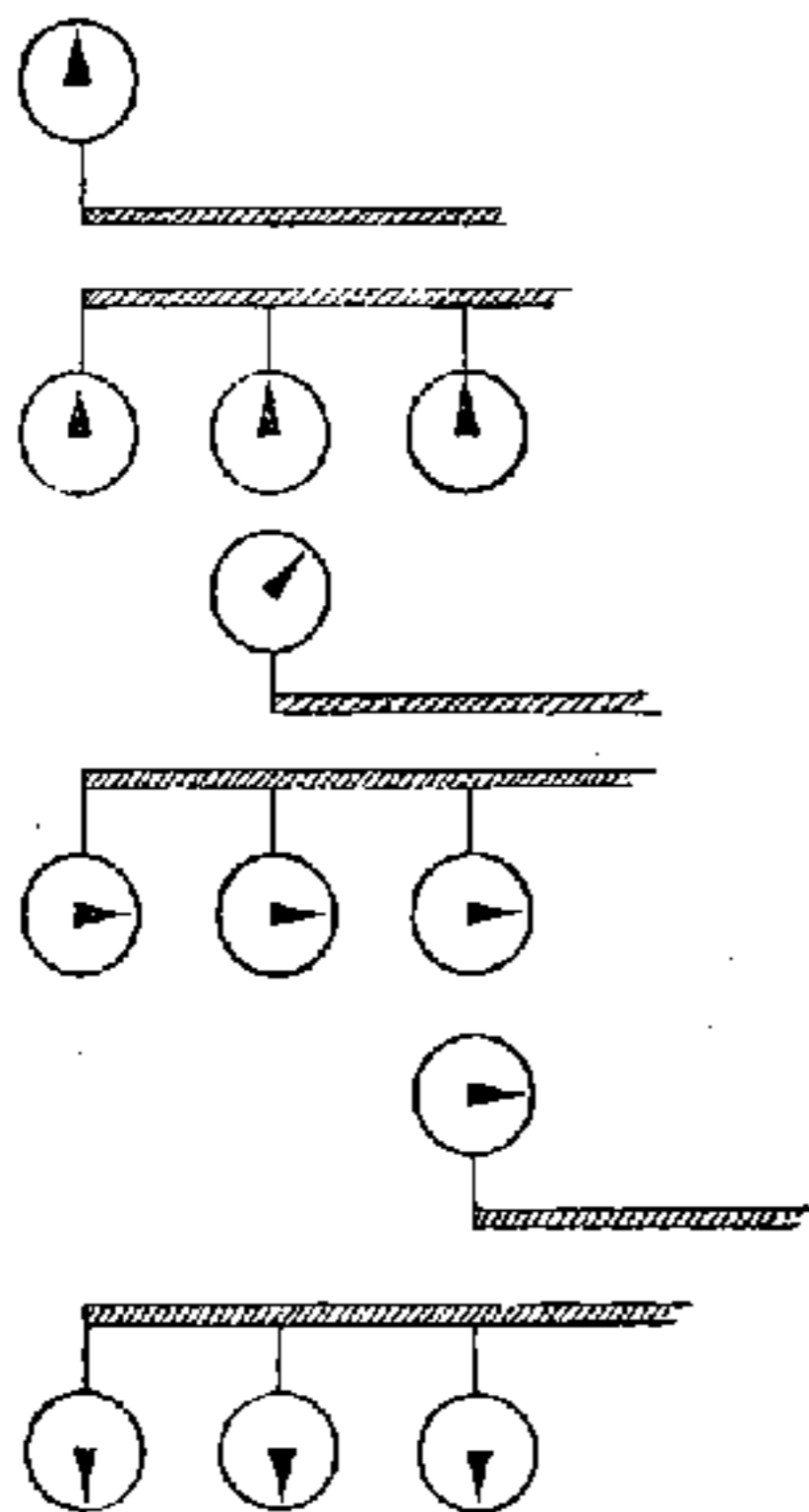
Ἀγγίζουμε τώρα τὸ οὐσιώδες σημεῖο δείχνοντες ποῦ ἀντιφάσκει ὁ κλασσικὸς μετασχηματισμὸς στὴν θεωρία τῆς σχετικότητας. Τί συμβαίνει ὅταν δύο σειρές ρολογιῶν κινοῦνται ὁμοιόμορφα ἢ μιά σχετικὰ μὲ τὴν ἄλλη; Ὁ κλασσικὸς φυσικὸς θὰ ἀπαντοῦσε: τίποτα. ἐργάζονται πάντα μὲ τὸν ἴδιο ρυθμὸ καὶ μποροῦμε νὰ χρησιμοποιοῦμε τόσο ρολόγια ποὺ κινοῦνται ὅσο καὶ ρολόγια ποὺ ἡρεμοῦν γιὰ νὰ δείξουμε τὸ χρόνο. Σύμφωνα

μὲ τὴν κλασσικὴ φυσικὴ δύο ταυτόχρονα γεγονότα σὲ ἓνα ΣΣ θὰ εἶναι ἐπίσης ταυτόχρονα σὲ ὁποιοδήποτε ἄλλο ΣΣ.

Ἄλλ' αὐτὴ δὲν εἶναι ἡ μόνη δυνατὴ ἀπάντηση. Μποροῦμε κάλλιστα νὰ φαντασθοῦμε ὅτι ἓνα ρολοῖ ποὺ κινεῖται ἐργάζεται μὲ διαφορετικὸ ρυθμὸ ἀπὸ ἓνα ρολοῖ ποὺ ἡρεμεῖ. Θὰ ἐρευνήσουμε τὴ δυνατότητα αὐτὴ χωρὶς νὰ ἀποφασίσουμε ἂν, ναί ἢ ὄχι, τὰ ρολόγια πράγματι μεταβάλλουν τὸ ρυθμὸ τους ὅταν βρίσκονται σὲ κίνηση. Τί πρέπει νὰ ἐννοήσουμε μὲ τὴ βεβαίωση ὅτι ἓνα ρολοῖ σὲ κίνηση μεταβάλλει τὸ ρυθμὸ του; Ἄς ὑποθέσουμε γιὰ λόγους ἀπλοποίησης, ὅτι ἔχουμε ἓνα μόνο ρολοῖ στὸ ἀνώτερο ΣΣ καὶ πολλὰ στὸ κατώτερο. Ὅλα τὰ ρολόγια ἔχουν τὸν ἴδιο μηχανισμό καὶ τὰ κατώτερα εἶναι συγχρονισμένα, δηλαδή ὅτι δείχνουν ταυτόχρονα τὸν ἴδιο χρόνο. Χαράξαμε τρεῖς διαδοχικὲς θέσεις τῶν δύο ΣΣ, ποὺ κινοῦνται ὁμοιόμορφα τὸ ένα σχετικὰ μὲ τὸ ἄλλο. Στὸ πρῶτο σχέδιο οἱ βελόνες τοῦ πάνω ρολοιοῦ καὶ οἱ βελόνες τῶν κάτω ρολογιῶν εἶναι κατὰ σύμβαση στὴν ἴδια θέση, ἐπειδὴ τίς τοποθετήσαμε ἔτσι. Ὅλα τὰ ρολόγια δείχνουν τὸν ἴδιο χρόνο. Ὅλα τὰ ρολόγια στὸ κάτω ΣΣ δείχνουν τὸν ἴδιο χρόνο, ἀλλὰ τὸ ρολοῖ στὸ πάνω ΣΣ δὲν ἐργάζεται πιά μὲ τὸν ἴδιο ρυθμὸ. Ὁ ρυθμὸς ἄλλαξε καὶ ὁ χρόνος εἶναι διαφορετικὸς, ἐπειδὴ τὸ ρολοῖ κινεῖται σχετικὰ μὲ τὸ κάτω ΣΣ. Στὸ τρίτο σχέδιο βλέπουμε ὅτι ἡ διαφορὰ στὶς θέσεις τῶν βελονῶν ἀἰξάνει μὲ τὸ χρόνο.

Ἐνας ἀκίνητος παρατηρητὴς στὸ κάτω ΣΣ θὰ εἴρισκε ὅτι ἓνα ρολοῖ ποὺ κινεῖται, μεταβάλλει τὸ ρυθμὸ του. Ἀσφαλῶς θὰ φθάναμε στὸ ἴδιο ἀποτέλεσμα ἂν τὸ ρολοῖ ἐκινεῖτο σχετικὰ μὲ ἓνα ἀκίνητο παρατηρητὴ στὸ πάνω ΣΣ. στὴν περίπτωση αὐτὴ θὰ ἔπρεπε νὰ ἔχουμε πολλὰ ρολόγια στὸ πάνω ΣΣ καὶ ἓνα μόνο στὸ κάτω. Οἱ νόμοι τῆς φύσης πρέπει νὰ εἶναι οἱ ἴδιοι στὰ δύο ΣΣ, ποὺ κινοῦνται τὸ ένα σχετικὰ μὲ τὸ ἄλλο.

Στὴν κλασσικὴ μηχανικὴ ὑπέθεταν σιωπηρὰ ὅτι ἓνα ρολοῖ σὲ κίνηση δὲ μεταβάλλει τὸ ρυθμὸ του, κι αὐτὸ φαινόταν τόσο φανερό ποὺ δὲ θεωροῦσαν κανὴν ἀνάγκη νὰ τὸ μνημονεύσουν. Ἀλλὰ τίποτε δὲν ἔπρεπε νὰ θεωρεῖται σὰν ὀλοφάνερο. ἂν



θέλουμε νά είμαστε πραγματικά ακριβείς, οφείλουμε νά υποβάλλουμε σέ ανάλυση τίς υποθέσεις τῆς φυσικῆς πού τίς θεωροῦσαν ὡς τώρα ἀναμφισβήτητες.

Μιά ὑπόθεση δέν πρέπει νά θεωρεῖται σάν παράλογη, ἐπειδή ἀπλῶς διαφέρει ἀπ' τίς υποθέσεις τῆς κλασσικῆς μηχανικῆς. Μποροῦμε κάλλιστα νά φαντασθοῦμε ὅτι ἕνα ρολόι σέ κίνηση μεταβάλλει τό ρυθμό του, ἄν μόνο ὁ νόμος τῆς μεταβολῆς αὐτῆς εἶναι ὁ ἴδιος γιά ὅλα τά ΣΣ ἀδρανείας.

Ἄκόμη ἕνα παράδειγμα. Ἄς πάρουμε ἕνα ραβδί μήκους ἑνός μέτρου. Αὐτό σημαίνει ὅτι ἔχει μήκος ἕνα μέτρο ὅσο μένει ἀκίνητο σέ ἕνα ΣΣ. Ἄς υποθέσουμε τώρα ὅτι κινεῖται ὁμοί-

μορφα γλιστρώντας στό μακρόν τῆς ράβδου, πού ἀντιπροσωπεύει τό ΣΣ. Τό μακρόν του θά εἶναι πάντα ἕνα μέτρο; Πρῶτα πρέπει νά ξέρομε πῶς καθορίζουμε τό μακρόν του. Ὅσο τό ραβδί ἦταν σέ ἠρεμία, οἱ ἄκρες του συμπίπτανε μέ κάτι σημάδια πού ἀπείχανε τό ἕνα ἀπ' τ' ἄλλο ἕνα μέτρο μέσα στό ΣΣ. Ἀπ' αὐτό συμπεράναμε: τό μακρόν τοῦ ραβδιοῦ σέ ἠρεμία εἶναι ἕνα μέτρο. Πῶς θά κάνουμε γιά νά μετρήσουμε τό ραβδί ὅταν εἶναι σέ κίνηση; Μποροῦμε νά κάνουμε τό ἑξῆς. Σέ μιᾶ δοσμένη στιγμή, δύο παρατηρητές παίρνουν ταυτόχρονα φωτογραφίες, ὁ ἕνας ἀπ' τήν ἀρχή καί ὁ ἄλλος ἀπ' τό τέλος τοῦ ραβδιοῦ. Μιά καί οἱ εἰκόνες πάρθηκαν ταυτόχρονα, μποροῦμε νά σημειώσουμε πάνω στή ράβδο πού παριστάνει τό ΣΣ τά σημάδια μέ τά ὁποῖα συμπίπτουν ἡ ἀρχή καί τό τέλος τοῦ ραβδιοῦ σέ κίνηση. Μ' αὐτό τόν τρόπο καθορίζουμε τό μήκος του. Χρειάζονται δύο παρατηρητές γιά νά σημειώσουν γεγονότα ταυτόχρονα σέ διαφορετικά μέρη ἑνός δοσμένου ΣΣ. Δέν ὑπάρχει λόγος νά πιστεύουμε ὅτι τό ἀποτέλεσμα τέτοιων μετρήσεων θά εἶναι τό ἴδιο ὅπως στήν περίπτωση ἑνός ραβδιοῦ σέ ἠρεμία. Ἐφ' ὅσον οἱ φωτογραφίες θά βγαίνανε ταυτόχρονα, πρᾶγμα πού ὅπως τό ἔχουμε πεί εἶναι μιᾶ σχετική ἔννοια πού ἐξαρτᾶται ἀπό τό ΣΣ, φαίνεται ἐντελῶς δυνατό ὅτι τά ἀποτελέσματα τῶν μετρήσεων αὐτῶν θά εἶναι διαφορετικά σέ διαφορετικά ΣΣ πού κινοῦνται τό ἕνα σχετικά μέ τό ἄλλο.

Μποροῦμε κάλλιστα νά φαντασθοῦμε ὅτι ὄχι μόνο τό κινούμενο ρολόι μεταβάλλει τό ρυθμό του, ἀλλ' ὅτι καί ἕνα ραβδί πού κινεῖται μεταβάλλει τό μήκος του, ἐφ' ὅσον οἱ νόμοι τῶν μεταβολῶν εἶναι οἱ ἴδιοι γιά ὅλα τά ΣΣ ἀδρανείας.

Ἐχομε μόνο ἐρευνήσει μερικές νέες δυνατότητες, χωρίς νά δώσουμε τή δικαιολογία τους.

Ἡ ταχύτητα τοῦ φωτός εἶναι, ὅπως ξέρομε, ἡ ἴδια γιά ὅλα τά ΣΣ ἀδρανείας. Εἶναι ἀδύνατο νά συμβιβασθεῖ αὐτό μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Ὁ κύκλος πρέπει κάπου νά σπάσει. Μήπως πρέπει νά τό κάνουμε ἀκριβῶς ἐδῶ; Δέν μποροῦμε νά υποθέσουμε τέτοιες μεταβολές στό ρυθμό τοῦ ρολοιοῦ πού κινεῖται καί στό μήκος τῆς ράβδου πού κινεῖται ὥστε ἡ

σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός να είναι άμεσο επακόλουθο των υποθέσεων αυτών; Πράγματι, μπορούμε. Έδω παρουσιάζεται το πρώτο παράδειγμα όπου η θεωρία της σχετικότητας και η κλασσική φυσική διαφέρουν ριζικά. Ο συλλογισμός μας μπορεί να αντιστραφεί: αν η ταχύτητα του φωτός είναι ή ίδια σέ όλα τὰ ΣΣ τότε οι ράβδοι σέ κίνηση πρέπει να μεταβάλλουν τὰ μήκη τους, τα ρολόγια σέ κίνηση πρέπει να μεταβάλουν τούς ρυθμούς τους, και οι νόμοι που διέπουν τις μεταβολές αυτές, είναι αυστηρά καθορισμένοι. Δεν υπάρχει τίποτα τό μυστηριώδες ή τό παράλογο σ' όλα αυτά. Στην κλασσική φυσική υπέθεταν πάντοτε ότι τὰ ρολόγια έχουν τόν ίδιο ρυθμό όταν βρίσκονται σέ κίνηση όπως και σέ ήρεμία. Αν η ταχύτητα του φωτός είναι ή ίδια σέ όλα τὰ ΣΣ, αν η θεωρία της σχετικότητας ισχύει, τότε οφείλουμε να θυσιάσουμε τήν υπόθεση αυτή. Είναι δύσκολο να αποβάλουμε βαθειά ριζωμένες προκαταλήψεις, αλλά άλλη διέξοδος δεν υπάρχει. Από τήν άποψη της θεωρίας της σχετικότητας, οι παλιές αντίληψεις φαίνονται αυθαίρετες. Γιατί να παραδεχτούμε, όπως τό κάναμε παραπάνω, τόν απόλυτο χρόνο, που τρέχει μέ τόν ίδιο τρόπο για όλους τούς παρατηρητές σέ όλα τὰ ΣΣ; Γιατί να πιστεύουμε ότι ή απόσταση είναι αμετάβλητη; Ο χρόνος καθορίζεται από ρολόγια, οι συντεταγμένες του διαστήματος από ραβδους και τό αποτέλεσμα του καθορισμού τους θα μπορούσε να εξαρτηθεί απ' τή συμπεριφορά των ρολογιών αυτών και των ραβδών αυτών όταν βρίσκονται σέ κίνηση. Δεν υπάρχει λόγος να πιστεύουμε ότι συμπεριφέρονται όπως έμεις τό επιθυμούμε. Η παρατήρηση δείχνει έμμεσα, απ' τὰ φαινόμενα του ήλεκτρομαγνητικού πεδίου, ότι ένα ρολοί σέ κίνηση μεταβάλλει τό ρυθμό του και μιά ράβδος τό μήκος της, ενώ μένοντας στή βάση των μηχανικών φαινομένων, δεν πίστευαν πως αυτό μπορεί να συμβεί. Οφείλουμε να παραδεχτούμε τήν έννοια του σχετικού χρόνου για κάθε ΣΣ, γιατί είναι ο καλύτερος δρόμος για να βγούμε απ' τις δυσκολίες μας. Η μεταγενέστερη επιστημονική πρόοδος, στην οποία συνετέλεσε ή θεωρία της σχετικότητας, δείχνει ότι ή νέα αυτή άποψη δεν πρέπει να

θεωρείται σαν αναγκαίο κακό, γιατί οι αξίες της θεωρίας είναι ολοφάνερες.

Ός τώρα προσπαθήσαμε να δείξουμε τί είν' αυτό που όδήγησε στις θεμελιακές υποθέσεις της θεωρίας της σχετικότητας, και αυτή μας ανάγκασε να αναθεωρήσουμε και να τροποποιήσουμε τόν κλασσικό μετασχηματισμό πραγματευόμενοι τό διάστημα και τό χρόνο μ' ένα νέο τρόπο. Σκοπός μας είναι να υποδείξουμε τις ιδέες που αποτελούν τό θεμέλιο μιās νέας φυσικής και φιλοσοφικής αντίληψης. Αυτές οι ιδέες είναι άπλές' αλλά μέ τή μορφή που έχουν έδω είναι ανεπαρκείς για να φθάσουμε σέ συμπερίσματα, όχι μόνο ποιοτικά αλλά και ποσοτικά. Και πάλι πρέπει να προστρέξουμε στην παλιά μας μέθοδο που συνίσταται στην εξήγηση των κυριωτέρων ιδεών και στην παράθεση μερικων άλλων χωρίς απόδειξη.

Για να φωτίσουμε τή διαφορά ανάμεσα στην αντίληψη του παλιού φυσικού, που πιστεύει, στον κλασσικό μετασχηματισμό και που θα τόν ονομάζουμε Α, και του νεώτερου φυσικού, που γνωρίζει τή θεωρία της σχετικότητας, και που θα τόν ονομάζουμε Μ, θα φαντασθούμε ανάμεσά τους ένα διάλογο.

Α. — Πιστεύω στην αρχή της σχετικότητας του Γαλιλαίου στη μηχανική, γιατί ξέρω ότι οι νόμοι της είναι οι ίδιοι σέ δύο ΣΣ που κινούνται όμοιόμορφα τό ένα σχετικά μέ τό άλλο, μ' άλλα λόγια, ότι οι νόμοι αυτοί είναι αμετάβλητοι σχετικά μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό.

Μ. — Αλλά ή αρχή της σχετικότητας πρέπει να εφαρμόζεται σέ όλα τὰ γεγονότα του έξωτερικού μας κόσμου. Όχι μόνο οι νόμοι της μηχανικής, μά και όλοι οι νόμοι της φύσης πρέπει να είναι οι ίδιοι για τὰ ΣΣ που κινούνται όμοιόμορφα τό ένα σχετικά μέ τό άλλο.

Α. — Αλλά πως είναι δυνατόν όλοι οι νόμοι της φύσης να είναι οι ίδιοι στα ΣΣ που κινούνται όμοιόμορφα τό ένα σχετικά μέ τό άλλο; Οι εξισώσεις του πεδίου, δηλαδή οι εξισώσεις του Maxwell, δεν είναι αμετάβλητες σχετικά μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Αυτό τό δείχνει ολοκάθαρα τό παράδειγμα

της ταχύτητας του φωτός. Σύμφωνα με τον κλασσικό μετασχηματισμό, η ταχύτητα αυτή δε θα έπρεπε να είναι η ίδια σε δύο ΣΣ που κινούνται ομοιόμορφα το ένα σχετικά με το άλλο.

Μ. — Αυτό δείχνει μόνο ότι ο κλασσικός μετασχηματισμός δεν μπορεί να εφαρμοσθεί, ότι η συνάρτηση ανάμεσα σε δύο ΣΣ πρέπει να είναι διαφορετική, ότι δεν πρέπει να συνδέουμε συντεταγμένες και ταχύτητες με τον τρόπο που γίνεται στους νόμους αυτούς του μετασχηματισμού. Πρέπει να αντικατασταθούν οι τελευταίοι αυτοί από νέους νόμους, που πρέπει να βγούν από τις θεμελιακές υποθέσεις της θεωρίας της σχετικότητας. "Ας μή σκοτιζόμαστε για τη μαθηματική έκφραση του νέου αυτού νόμου του μετασχηματισμού, ας αρκασθούμε να ξέρουμε πώς είναι διαφορετικός απ' τον νόμο του κλασσικού μετασχηματισμού. Με συντομία θα τον ονομάζουμε *ο μετασχηματισμός του Lorentz*. Μπορεί να αποδειχθεί ότι οι εξισώσεις του Maxwell δηλαδή οι νόμοι του πεδίου, είναι αμετάβλητες σχετικά με τον μετασχηματισμό του Lorentz, όπως ακριβώς οι νόμοι της μηχανικής είναι αμετάβλητοι σχετικά με τον κλασσικό μετασχηματισμό." Ας θυμηθούμε πώς παρουσιάζοταν το πράγμα στην κλασσική φυσική. Είχαμε νόμους μετασχηματισμού για το διάστημα, αλλά όχι για το χρόνο, επειδή ο χρόνος ήταν ο ίδιος σε όλα τα ΣΣ. Είναι όμως έντελως διαφορετικά στη θεωρία της σχετικότητας. "Εχουμε νόμους μετασχηματισμού για το διάστημα, για το χρόνο και για την ταχύτητα, που διαφέρουν από τους νόμους της κλασσικής μηχανικής." Άλλη μία φορά οι νόμοι της φύσης πρέπει να είναι οι ίδιοι σε όλα τα ΣΣ που κινούνται ομοιόμορφα τα μόν σχετικά προς τα δέ. Δεν πρέπει, όπως άλλοτε, να είναι αμετάβλητοι σχετικά με τον κλασσικό μετασχηματισμό, αλλά σχετικά με ένα άλλο τύπο μετασχηματισμού, που λέγεται μετασχηματισμός του Lorentz. Σε όλα τα ΣΣ αδράνειας ισχύουν οι ίδιοι νόμοι και το πέρασμα από ένα ΣΣ σ' ένα άλλο δίνεται από τον μετασχηματισμό του Lorentz.

Α. — Σας πιστεύω στο λόγο μου, αλλά θα μ' ενδιέφερε να μάθω ποιά είναι η διαφορά ανάμεσα στον κλασσικό μετασχη-

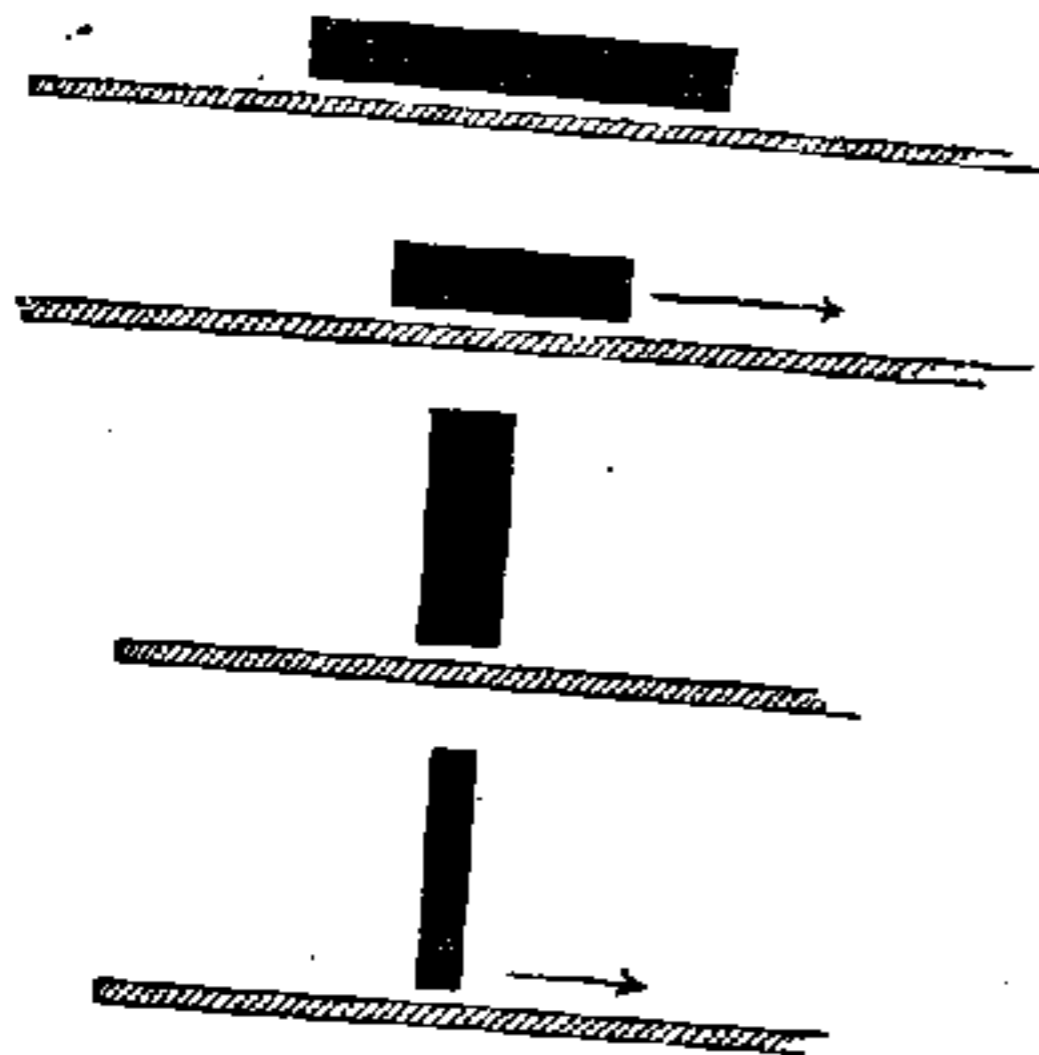
ματισμό και σ' εκείνον του Lorentz.

Μ. — Για να απαντήσω καλύτερα στην ερώτησή σας, παρακαλώ να μου αναφέρετε μερικά από τα χαρακτηριστικά στοιχεία του κλασσικού μετασχηματισμού και θα προσπαθήσω να σας εξηγήσω αν διατηρήθηκαν στο μετασχηματισμό του Lorentz ή όχι, και στην τελευταία αυτή περίπτωση πώς έχουν τροποποιηθεί.

Α. — "Αν συμβεί ένα γεγονός σε κάποιο μέρος και σε κάποια στιγμή μέσα στο ΣΣ μου, ένας παρατηρητής σ' ένα άλλο ΣΣ που κινείται ομοιόμορφα σχετικά με το δικό μου ΣΣ, θα αντιστοιχίσει ένα διαφορετικό αριθμό στο μέρος όπου συμβαίνει το γεγονός, αλλά ο χρόνος φυσικά μένει ο ίδιος. Χρησιμοποιούμε τον ίδιο τύπο ρολογιού σε όλα τα ΣΣ και λίγο ενδιαφέρει αν το ρολόι κινείται ή όχι. Αυτό είναι το ίδιο αληθινό και για σας;

Μ. — "Όχι, αυτό δεν αληθεύει για μένα. Κάθε ΣΣ πρέπει να είναι εφοδιασμένο με τα δικά του ρολόγια σε ήρεμια, εφ' όσον η κίνηση μεταβάλλει το ρυθμό τους. Δύο παρατηρητές σε δύο διαφορετικά ΣΣ θα αντιστοιχίσουν διαφορετικούς αριθμούς, όχι μόνο στο μέρος, αλλά ακόμα στο χρόνο που συμβαίνει το γεγονός.

Α. — Αυτό σημαίνει πώς ο χρόνος δεν είναι πλέον μία αμετάβλητη. Στον κλασσικό μετασχηματισμό ο χρόνος είναι πάντα ο ίδιος σε όλα τα ΣΣ, ενώ στο μετασχηματισμό του Lorentz ποικίλλει και συμπεριφέρεται κάπως σαν τη συντεταγμένη του διαστήματος στον παλιό μετασχηματισμό. Θα ήθελα πολύ να μάθω τι συμβαίνει με την απόσταση. Σύμφωνα με την κλασσική μηχανική, μία άκαμπτη ράβδος είτε κινείται είτε όχι, διατηρεί το ίδιο μήκος. Συμβαίνει το ίδιο και τώρα;



M. — Όχι. Πραγματικά από τον μετασχηματισμό του Lorentz προκύπτει ότι μία ράβδος που κινείται συστέλλεται προς τη διεύθυνση της κίνησης και η συστολή αυτή αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας. Όσο πιο γρήγορα κινείται μία ράβδος τόσο πιο κοντή φαίνεται. Αλλά αυτό συμβαίνει μόνο προς την διεύθυνση της κίνησης. Βλέπετε στο σχέδιό μου μία ράβδο που κινείται, της οποίας το μήκος ελαττώθηκε στο μισό, όταν κινείται με ταχύτητα που πλησιάζει τα 90% περίπου της ταχύτητας του φωτός. Ωστόσο δεν υπάρχει συστολή προς την κάθετο στην κίνηση διεύθυνση, όπως επιχειρήσα να δείξω στο τελευταίο μου σχέδιο.

A. — Αυτό σημαίνει ότι ο ρυθμός του ρολογιού που κινείται και το μήκος της ράβδου που κινείται εξαρτώνται από την ταχύτητα. Αλλά πώς;

M. — Οι μεταβολές αποβαίνουν πιο έντονες, όσο αυξάνει η ταχύτητα. Απ' τον μετασχηματισμό του Lorentz προκύπτει ότι μία ράβδος θα κατανούσε στο τίποτε, αν η ταχύτητά της έφθανε την ταχύτητα του φωτός. Επίσης ο ρυθμός ενός ρολογιού σε κίνηση, συγκρινόμενος με το ρυθμό των ρολογιών

μπρός απ' τα όποια περνά όλο το μήκος της ράβδου, βραδύνεται, και θα σταματούσε εντελώς αν έφτανε να κινείται με την ταχύτητα του φωτός, δηλαδή αν το ρολόι είναι «καλό».

A. — Αυτό φαίνεται να αντιφάσκει σ' όλα μας τα πειράματα. Ξέρουμε ότι μία άμαξα δε συστέλλεται όταν κινείται, και ξέρουμε ακόμα ότι ο οδηγός μπορεί πάντοτε να συγκρίνει το «καλό» του ρολοι με τα ρολόγια του δρόμου μπρός απ' τα όποια περνά αντίθετα με τη βεβαίωσή σας θα βρεί ότι συμφωνούν με το δικό του.

M. — Αυτό είναι άσφαλώς αλήθεια. Αλλά οι μηχανικές ταχύτητες είναι όλες πολύ μικρές συγκρινόμενες με την ταχύτητα του φωτός, και είναι συνεπώς γελοίο να εφαρμόσουμε τη σχετικότητα σ' αυτά τα φαινόμενα. Κάθε οδηγός άμαξας μπορεί με κάθε ασφάλεια να εφαρμόσει την κλασσική φυσική, ακόμη κι αν αυξήσει την ταχύτητά του εκατό χιλιάδες φορές. Η άσυμφωνία ανάμεσα στο πείραμα και στον κλασσικό μετασχηματισμό δε θα γινόταν έκδηλη παρά μόνο με ταχύτητες, που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Είναι μόνο με πολύ μεγάλες ταχύτητες που η ισχύς του μετασχηματισμού του Lorentz μπορεί να αποδειχτεί.

A. — Αλλά υπάρχει άλλη μία δυσκολία. Σύμφωνα με τη μηχανική μπορού να φαντασθώ σώματα κινούμενα με ταχύτητες μεγαλύτερες του φωτός. Ένα σώμα που κινείται με την ταχύτητα του φωτός σχετικά με ένα πλοίο σε πορεία, κινείται με ταχύτητα ανώτερη απ' την ταχύτητα του φωτός σχετικά με την άκτι. Τι θα συμβεί στη ράβδο που ελαττωνόταν το μήκος της στο τίποτε όταν η ταχύτητά της ήταν ίση με του φωτός; Αν η ταχύτητά της ήταν μεγαλύτερη του φωτός θα έπρεπε να περιμένουμε αρνητικό μήκος.

M. — Ο σαρκασμός σας δεν δικαιολογείται καθόλου. Από την άποψη της θεωρίας της σχετικότητας, ένα όλικό σώμα δεν μπορεί να έχει ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός. Η ταχύτητα του φωτός αποτελεί το άνωτατο όριο των ταχυτήτων όλων των όλικων σωμάτων. Αν η ταχύτητα ενός σώματος είναι ίση με την

ταχύτητα του φωτός σχετικά με το πλοίο, θά είναι και πάλι ίση με την ταχύτητα του φωτός σχετικά με την άκρη. Ο άπλος μηχανικός νόμος της πρόσθεσης και της αφαίρεσης των ταχυτήτων δέν ισχύει πλέον, ή, σαφέστερα, ισχύει κατά προσέγγιση για μικρές ταχύτητες και όχι για ταχύτητες που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Ο αριθμός που εκφράζει την ταχύτητα του φωτός παριστάνεται ρητά στο μετασχηματισμό του Lorentz και παίζει τό ρόλο περίπτωσης-όριο όπως ή άπειρη ταχύτητα στην κλασσική μηχανική. Η γενικώτερη αυτή θεωρία δέν αντιφάσκει στον κλασσικό μετασχηματισμό και στην κλασσική μηχανική. Αντίθετα ξαναβρίσκουμε τίς παλιές έννοιες σαν περίπτωση - όριο όταν πρόκειται για μικρές ταχύτητες. Από την άποψη της νέας θεωρίας γίνεται σαφές σε ποιές περιπτώσεις ισχύει ή κλασσική φυσική και πού βρίσκονται τά όριά της. Θα ήταν τόσο γελοίο να εφαρμόζεται ή θεωρία της σχετικότητας στις κινήσεις των άμαξιδών, των πλοίων και των τραίνων όσο και να χρησιμοποιείται ή λογιστική μηχανή εκεί όπου θά ήταν άρκετός ο πίνακας του πολλαπλασιασμού.

### ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Η θεωρία της σχετικότητας γεννήθηκε από την αναγκαιότητα. Υπήρχαν σοβαρές και βαθιές αντιφάσεις που παρουσίαζε ή παλιά θεωρία και τίς όποιες δέ φαινόταν να υπάρχει διέξοδος. Η δύναμη της νέας θεωρίας συνίσταται στη λογική και την απλότητα με τίς όποιες λύνει όλες τίς δυσκολίες χρησιμοποιώντας μόνο ένα μικρό αριθμό πειστικῶν υποθέσεων.

Αν και ή θεωρία γεννήθηκε απ' τό πρόβλημα του πεδίου, πρέπει να περιλαμβάνει όλους τούς φυσικούς νόμους. Εδώ φαίνεται να παρουσιάζεται μία δυσκολία. Οί νόμοι του πεδίου από τή μία κι' οί μηχανικοί νόμοι απ' τήν άλλη δέν μοιάζουν καθόλου στο είδος. Οί εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι άμετάβλητες σε σχέση με τό μετασχηματισμό του Lorentz, και οί μηχανικές εξισώσεις είναι άμετάβλητες σχετικά με τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Αλλά ή θεωρία της σχετικό-

τητας αναφέρει ότι όλοι οί νόμοι της φύσης πρέπει να είναι άμετάβλητοι σχετικά με τόν μετασχηματισμό του Lorentz και όχι σχετικά με τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Ο τελευταίος αυτός είναι μία ειδική περίπτωση, μία περίπτωση — όριο του μετασχηματισμού του Lorentz όταν οί σχετικές ταχύτητες σε δύο ΣΣ είναι πολύ μικρές. Αν είναι έτσι, ή κλασσική μηχανική πρέπει να μετασχηματισθεί για ν' αντιπροκρίνεται στην άπαιτηση της άμεταβλητότητας σε σχέση με τό μετασχηματισμό του Lorentz. Μ' άλλα λόγια ή κλασσική μηχανική δέν μπορεί να ισχύει, αν οί ταχύτητες πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Ένας μόνο μετασχηματισμός μπορεί να υπάρχει για τό πέρασμα από ένα ΣΣ σ' ένα άλλο, είναι ο μετασχηματισμός του Lorentz.

Ήταν άπλό να τροποποιηθεί ή κλασσική μηχανική σε τρόπο που να μή βρίσκεται σε αντίφαση ούτε με τή θεωρία της σχετικότητας, ούτε τήν πληθώρα του ύλικού που προκύπτει απ' τήν παρατήρηση και εξηγείται απ' αυτή. Η παλιά μηχανική ισχύει για μικρές ταχύτητες και άποτελεί τήν περίπτωση — όριο της νέας. Θα ήταν ένδιαφέρον να δώσουμε ένα παράδειγμα της άλλαγής που εισήχθη στην κλασσική μηχανική από τή θεωρία της σχετικότητας. Αυτό θα μπορούσε ίσως να όδηγήσει σε συμπεράσματα επιδεικτικά άπόδειξης ή άπόρριψης από τό πείραμα.

Ας υποθέσουμε σώμα όρισμένου όγκου, που κινείται κατά μήκος μιας εϋθείας γραμμής και που ύφίσταται τήν ενέργεια μιας έξωτερικής δύναμης προς τή διεύθυνση της κίνησης. Η δύναμη, όπως ξέρουμε, είναι ανάλογη με τήν μεταβολή της ταχύτητας. Η, για να μαστε πιο σαφείς, σημαίνει τό ίδιο αν ένα σώμα αύξήσει τήν ταχύτητά του από 100 σε 101 μέτρα στο δευτερόλεπτο, ή από 1000 σε 1001 μέτρα στο δευτερόλεπτο, ή από 290000 χιλιόμετρα σε 290000 χμ και 1 μέτρο στο δευτερόλεπτο. Η δύναμη που ενεργεί πάνω σ' ένα όρισμένο σώμα είναι, για τήν ίδια μεταβολή ταχύτητας και για τόν ίδιο χρόνο πάντα ή ίδιο.

Η πρόταση αυτή άληθεύει από τήν άποψη της θεωρίας της

σχετικότητας; Καθόλου. Ο νόμος αυτός δέν ισχύει παρά μόνο για τις μικρές ταχύτητες. Σύμφωνα με τή θεωρία τής σχετικότητας, ποιός είναι ο νόμος τών μεγάλων ταχυτήτων, πού πλησιάζουν τήν ταχύτητα του φωτός; "Αν ή ταχύτητα είναι μεγάλη, χρειάζονται ισχυρές δυνάμεις για νά τήν αυξήσουν. Δέν είναι διόλου τό ίδιο πράγμα νά αυξηθεί κατά ένα μέτρο ή ταχύτητα τών 100 μέτρων στό δευτερόλεπτο και νά αυξηθεί κατά ένα μέτρο ή ταχύτητα πού πλησιάζει τήν ταχύτητα του φωτός." Οσο περισσότερο μιά ταχύτητα πλησιάζει τήν ταχύτητα του φωτός, τόσο δυσκολώτερο είναι νά αυξηθεί. "Όταν μιά ταχύτητα είναι ίση μέ τήν ταχύτητα του φωτός είναι αδύνατο νά αυξηθεί περισσότερο." Ετσι οι προσδιοριζόμενες μεταβολές από τή θεωρία τής σχετικότητας δέν είναι εκπληκτικές. Η ταχύτητα του φωτός είναι τό ανώτατο όριο όλων τών ταχυτήτων. Στη θέση του παλιού μηχανικού νόμου, πού συνδέει τή δύναμη μέ τή μεταβολή ταχύτητας εμφανίζεται ένας νόμος πύο περίπλοκος. Από τή νέα μας άποψη ή κλασσική μηχανική είναι άπλή, επειδή σχεδόν σ' όλες τις παρατηρήσεις μας έχουμε νά κάνουμε μέ ταχύτητες πολύ κατώτερες άπ' τήν ταχύτητα του φωτός.

"Ένα σώμα πού ήρεμεί έχει όρισμένη μάζα, πού λέγεται *μάζα ήρεμίας*. Η μηχανική μας έμαθε ότι κάθε σώμα αντιστέκεται στη μεταβολή τής κίνησής του' όσο μεγαλύτερη ή μάζα τόσο ισχυρότερη ή αντίσταση, και όσο μικρότερη ή μάζα τόσο ασθενέστερη ή αντίσταση. Αλλά στη θεωρία τής σχετικότητας έχουμε κάτι παραπάνω. "Όχι μόνο ένα σώμα προβάλλει στη μεταβολή ισχυρότερη αντίσταση άν ή μάζα ήρεμίας του είναι μεγαλύτερη, άλλ' ακόμα και άν ή ταχύτητά του είναι μεγαλύτερη. Σώματα πού είναι φορείς ταχυτήτων πού πλησιάζουν τήν ταχύτητα του φωτός θά προβάλλανε μιά πολύ ισχυρή αντίσταση στις έξωτερικές δυνάμεις. Στην κλασσική μηχανική ή αντίσταση ενός δοσμένου σώματος ήταν κάτι τό αμετάβλητο, χαρακτηριζόμενο μόνο από τή μάζα του. Στη θεωρία τής σχετικότητας ή αντίσταση εξαρτάται άπ' τή μάζα και άπ' τήν ταχύτητα, καθίσταται άπειρα μεγάλη, όταν ή ταχύτητα πλησιάζει

ζει τήν ταχύτητα του φωτός.

Τά αποτελέσματα πού αναφέραμε παραπάνω μάς δίνουν τή δυνατότητα νά υποβάλουμε τή θεωρία στη δοκιμασία του πειράματος. Βλήματα φορείς ταχυτήτων πού πλησιάζουν τήν ταχύτητα του φωτός, αντιστέκονται στην ενέργεια έξωτερικών δυνάμεων με τρόπο πού προβλέπει ή θεωρία; Δεδομένου ότι οι διατυπώσεις τής θεωρίας τής σχετικότητας από τήν άποψη αυτή έχουν ποσοτικό χαρακτήρα, θά μπορούσαμε νά τή βεβαιώσουμε ή νά τήν άπορρίψουμε, άν μπορούσαμε νά έχουμε στη διάθεσή μας βλήματα μέ ταχύτητα πού πλησιάζει τήν ταχύτητα του φωτός.

Πραγματικά βρίσκουμε στη φύση βλήματα πού είναι φορείς τέτοιων ταχυτήτων. Τά άτομα τών ραδιενεργών ουσιών, τό ράδιο για παράδειγμα, ενεργοούν σά πηγές πού εκπέμπουν βλήματα με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Χωρίς νά μπορούμε σέ λεπτομέρειες, μπορούμε νά αναφέρουμε μιά άπ' τις σπουδαιότατες αντιλήψεις τής νεώτερης φυσικής και χημείας. Στο σύμπαν όλη ή ύλη άποτελείται από ένα μικρό αριθμό σωματιδίων τών στοιχειωδών μορίων. Μπορούμε νά πάρουμε για παράδειγμα μιά πόλη, όπου βλέπουμε κτίρια πού διαφέρουν στό μέγεθος και στην αρχιτεκτονική, αλλά για τήν οικοδόμηση τών όποιων, άπ' τό πιο ταπεινό ως τό πιο έπιβλητικό, χρησιμοποιήθηκε ένας μικρός αριθμός τούβλων διαφόρων ειδών. Επίσης όλα τά γνωστά στοιχεία του υλικού μας κόσμου, άπ' τό υδρογόνο πού είναι τό έλαφρύτερο, ως τό ούράνιο πού είναι τό βαρύτερο, άποτελούνται από τά ίδια είδη στοιχειωδών μορίων. Τά βαρύτερα στοιχεία πού είναι οι πιο περίπλοκες δομές, είναι άσταθή και άποσυντίθενται ή είναι, όπως λένε, *ραδιενεργά*. Μερικά τούβλα, ή στοιχειώδη μόρια, τών όποιων τά ραδιενεργά άτομα είναι σύνθετα, εκπέμπονται κάποτε μέ μιά πολύ μεγάλη ταχύτητα πού πλησιάζει τήν ταχύτητα του φωτός. Ένα άτομο ενός στοιχείου, π.χ. τό ράδιο, είναι σύμφωνα μέ τις τωρινές αντιλήψεις μας, πού βεβαιώθηκαν από πολυάριθμα πειράματα, μιά περίπλοκη δομή και ή ραδιενεργός διάσπαση είναι ένα από αυτά τά φαινόμενα πού δείχνουν ότι τά άτομα είναι σύνθετα από τούβλα ακόμη πιο άπλά, δηλαδή από τά στοιχειώδη μόρια.

Μέ πολύ έξυπνα καί πολυσύνθετα πειράματα μπορούμε νά διαπιστώσουμε πώς τά μόρια αντίστέκονται στην ενέργεια μιᾶς ἔξωτερικῆς δύνωμης. Τά πειράματα δείχνουν ὅτι ἡ ἀντίσταση τῶν μορίων αὐτῶν ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ταχύτητα, μέ τόν τρόπο πού πρόβλεψε ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας. Σέ πολλές ἄλλες περιπτώσεις ὅπου διατυπώθηκε ὅτι ἡ ἀντίσταση ἐξαρτᾶται ἀπ' τήν ταχύτητα, ὑπῆρχε τέλεια συμφωνία ἀνάμεσα στή θεωρία καί στό πείραμα. Ἄλλη μιᾶ φορά μᾶς ἀποκαλύπτονται τά χαρακτηριστικά στοιχεῖα τοῦ δημιουργικοῦ ἔργου τῆς ἐπιστήμης: πρόβλεψη ὀρισμένων γεγονότων ἀπό τή θεωρία καί ἡ βεβαίωσή της ἀπ' τό πείραμα. Τό ἀποτέλεσμα αὐτό μᾶς ὁδηγεῖ σέ μιᾶ ἄλλη σπουδαία γενίκευση. Ἐνα ἡρεμοῦν σῶμα ἔχει μᾶζα, ἀλλά ὄχι κινητική ἐνέργεια, δηλαδή ἐνέργεια κίνησης. Ἐνα σῶμα σέ κίνηση ἔχει μᾶζα καί κινητική ἐνέργεια. Ἀντιστέκεται στή μεταβολή τῆς ταχύτητάς του μέ μεγαλύτερη δύναμη ἀπό τό σῶμα πού ἡρεμεῖ. Θά ἔλεγε κανεῖς ὅτι ἡ κινητική ἐνέργεια τοῦ σώματος πού κινεῖται αὐξάνει τήν ἀντίστασή του. Ἄν δύο σώματα ἔχουν τήν ἴδια μᾶζα, τό σῶμα πού ἔχει μεγαλύτερη κινητική ἐνέργεια, ἀντιστέκεται ἰσχυρότερα στην ἐνέργεια μιᾶς ἔξωτερικῆς δύνωμης.

Ἄς φαντασθοῦμε ἕνα κουτί πού περιέχει σφαῖρες καί πού καί τά δύο μαζί βρίσκονται σέ ἡρεμία στό ΣΣ μας. Γιά νά τό κινήσουμε, γιά νά αὐξήσουμε τήν ταχύτητά του πρέπει νά χρησιμοποιήσουμε μιᾶ κάποια δύναμη. Ἄλλ' αὐτή ἡ ἴδια δύναμη ἀσκούμενη κατά τό ἴδιο διάστημα χρόνου, θά αὐξήσει τήν ταχύτητα κατά τήν ἴδια τιμή ἂν οἱ σφαῖρες, ὅμοιες μέ μόρια ἀερίου, κινοῦνται πρὸς ὅλες τίς διευθύνσεις μέ μιᾶ ταχύτητα πού πλησιάζει τήν ταχύτητα, τοῦ φωτός; Θά χρειασθεῖ τώρα μιᾶ μεγαλύτερη δύναμη ἐξ αἰτίας τῆς αὐξημένης κινητικῆς ἐνέργειας τῶν σφαιρῶν, πού ἐνισχύει τήν ἀντίσταση τοῦ κουτιοῦ. Ἡ ἐνέργεια, ἐν πάσῃ περιπτώσει ἡ κινητική ἐνέργεια, ἀντιστέκεται στην κίνηση μέ τόν ἴδιο τρόπο πού ἀντιστέκονται οἱ μᾶζες βάρους. Ἄλλ' αὐτό ἀληθεύει γιά ὅλα τά εἶδη ἐνέργειας;

Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας βγάζει ἀπό τή θεμελιακή της ἰπόθεση μιᾶ σαφῆ καί πειστική ἀπάντηση στην ἐρώτηση αὐτή,

μιᾶ ἀπάντηση πού ἔχει ποσοτικό χαρακτήρα: κάθε ἐνέργεια ἀντιστέκεται στή μεταβολή τῆς κίνησης· κάθε ἐνέργεια συμπεριφέρεται ὅπως ἡ ὕλη· ἕνα κομάτι σίδηρο ζυγίζει περισσότερο ὅταν εἶναι πυρακτωμένο παρά ὅταν εἶναι κρύο, ἡ ἡλιακή ἀκτινοβολία πού διαδίδεται στό διάστημα ἔχει ἐνέργεια καί συνεπῶς καί μιᾶ κάποια μᾶζα· ὁ Ἥλιος καί ὅλα τά ἄστρα χάνουν ἀπ' τή μᾶζα τους μέ τήν ἀκτινοβολία. Τό συμπέρασμα αὐτό ἐντελῶς γενικοῦ χαρακτήρα εἶναι μιᾶ σπουδαία κατάκτηση τῆς θεωρίας τῆς σχετικότητας καί εἶναι σύμφωνο μέ ὅλα τά γεγονότα μέ τά ὁποῖα ἔχει συγκριθεῖ.

Ἡ κλασσική φυσική εἰσήγαγε δύο οὐσίες: τήν ὕλη καί τήν ἐνέργεια. Ἡ πρώτη ἦταν προικισμένη μέ βάρος ἐνῶ ἡ δεύτερη δέν εἶχε. Στην κλασσική φυσική εἶχαμε δύο νόμους τῆς διατήρησης: ἕνα νόμο γιά τήν ὕλη καί ἕνα γιά τήν ἐνέργεια. Ἀλλά ἡ νεώτερη φυσική δέν διατηρεῖ τήν ἀντίληψη τῶν δύο οὐσιῶν καί τῶν δύο νόμων τῆς διατήρησης. Σύμφωνα μέ τή θεωρία τῆς σχετικότητας δέν ὑπάρχει οὐσιώδης διάκριση ἀνάμεσα στή μᾶζα καί στην ἐνέργεια. Ἡ ἐνέργεια ἔχει μᾶζα καί ἡ μᾶζα ἀντιπροσωπεύει ἐνέργεια. Ἀντί τῶν δύο νόμων τῆς διατήρησης δέν ἔχουμε παρά μόνο ἕνα, τόν νόμο τῆς μᾶζας-ἐνέργειας. Ἡ νέα αὐτή ἀντίληψη ἀποδείχθηκε πολύ γόνιμη γιά τήν μετέπειτα ἀνάπτυξη τῆς φυσικῆς.

Πῶς νά ἐξηγήσουμε ὅτι μπόρεσε νά μείνει τόσο καιρό κρυμμένο τό γεγονός ὅτι ἡ ἐνέργεια ἔχει μᾶζα καί ὅτι ἡ μᾶζα ἀντιπροσωπεύει ἐνέργεια; Ζυγίζει περισσότερο ἕνα κομάτι σίδηρο ὅταν εἶναι θερμό ἢ ὅταν εἶναι κρύο; Ἡ ἀπάντηση στην ἐρώτηση εἶναι τώρα «ναί» ἀλλά στή σ. (51) ἦταν «ὄχι». Οἱ σελίδες πού μεσολαβοῦν ἀνάμεσα στίς δύο ἀπαντήσεις ἀσφαλῶς δέν ἀρκοῦν γιά νά καλύψουν αὐτή τήν ἀντίφαση.

Ἡ δυσκολία πού ὑψώνεται μπροστά μας εἶναι τῆς ἴδιας φύσης μέ κείνη πού συναντήσαμε προγενέστερα. Ἡ μεταβολή τῆς μᾶζας πού προβλέπει ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας εἶναι ἀπείρως μικρή καί δέν εἶναι δυνατό νά φανερωθεῖ με τό ἄμεσο ζύγισμα καί στόν πιό εὐαίσθητο ζυγό. Ἡ ἀπόδειξη ὅτι ἡ

ένεργεια δέ στερεΐται βάρους, μπορεί νά γίνει έμμεσα μέ πολλούς αποδεικτικούς τρόπους.

Ο λόγος πού λείπει άμεσα υπόδειξη είναι ή ύπερβολικά μικρή σχέση ανάμεσα στην ύλη και στην ένεργεια. Η ένεργεια και ή μάζα βρίσκονται στην ίδια σχέση μέ νόμισμα ύποτιμημένο και έμβλημα πολύ εκτιμημένο· ένα παράδειγμα θά τό καταστήσει σαφές. Η ποσότητα θερμότητας ικανής νά μετατρέψει τριάντα χιλιάδες τόννους νερό σέ άτμό θά ζύγιζε περίπου ένα γραμμάριο. Η ένεργεια, επί τόσο χρόνο θεωρήθηκε χωρίς βάρος, άπλούστατα έπειδή ή μάζα πού αντιπροσωπεύει είναι τόσο μικρή.

Η παλιά ένεργεια-ούσία είναι τό δεύτερο θύμα τής θεωρίας τής σχετικότητας. Τό πρώτο ήταν τό μέσο διά τοῦ οποίου διαδίδονται τά φωτεινά κύματα.

Η επίδραση τής θεωρίας τής σχετικότητας εκτείνεται πολύ μακρύτερα από τό πρόβλημα πού τής έδωσε τήν γέννηση. Αΐρει τίς δυσκολίες και τίς αντιφάσεις τής θεωρίας τοῦ πεδίου· διατυλώνει γενικώτερος μηχανικούς νόμους· αντικαθιστά μ' ένα μόνο νόμο τούς δύο νόμους τής διατήρησης· τροποποιεί τήν κλασσική έννοια τοῦ άπόλυτου χρόνου. Η ισχύς της δέν περιορίζεται σέ μία μόνο περιοχή τής φυσικής· σχηματίζει ένα γενικό πλαίσιο πού περιλαμβάνει όλα τα φαινόμενα τής φύσης.

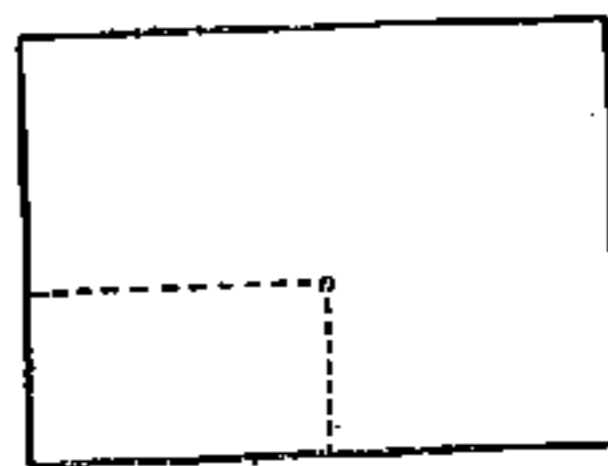
## Η ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΧΩΡΟΥ-ΧΡΟΝΟΥ

«Η γαλλική επανάσταση ξέσπασε στό Παρίσι στις 14 'Ιουλίου 1789». Η φράση αυτή φανερώνει τόν τόπο και τό χρόνο ενός γεγονότος. Κάποιος πού άκούει τή φράση γιά πρώτη φορά και πού δέ ξέρει τί σημαίνει «Παρίσι», θά μπορούσε νά τό πληροφορηθεί μέ τόν έξής τρόπο: είναι μιά πόλη τής γής μας, σέ 2<sup>ο</sup> ανατολικό μήκος και σέ 49<sup>ο</sup> βόρειο γεωγρ. πλάτος. Οί δύο αυτοί άριθμοί θά έδειχναν τόν τόπο και «14 'Ιουλίου 1789» τήν ήμερομηνία κατά τήν όποια συνέβηκε τό γεγονός. Στη φυσική, πολύ περισσότερο άπ' τήν ιστορία, ή σωστή υπόδειξη τοῦ χρόνου και τοῦ τόπου όπου συμβαίνει ένα

γεγονός. Στη φυσική, πολύ περισσότερο άπ' τήν ιστορία, ή αυτά άποτελούν τή βάση τής ποσοτικής περιγραφής.

Γιά λόγους άπλούστευσης εξετάσαμε ως τώρα μόνο τήν ευθύγραμμη κίνηση. Τό ΣΣ μας ήταν μιά άκαμπτη ράβδος, πού είχε άρχή όχι όμως και τέλος. Ας κρατήσουμε αυτό τό περιορισμό. Ας πάρουμε διάφορα σημεία πάνω στη ράβδο· οί θέσεις τους μπορούν νά καθορισθουν μέ ένα μόνο άριθμό, μέ τήν συντεταγμένη τοῦ σημείου. Όταν λέμε ότι ή συντεταγμένη ενός σημείου είναι 2516 μέτρα, έννοοῦμε ότι ή άπόστασή της από τήν άρχή τής ράβδου είναι 2516 μέτρα. Αντίθετα, αν κάποιος μου δώσει ένα κάποιο άριθμό και μιά μονάδα, μπορώ πάντοτε νά βρω πάνω στη ράβδο ένα σημείο πού αντιστοιχεί σ' αυτό τόν άριθμό. Αυτό εκφράζεται από τούς μαθηματικούς μέ τήν ακόλουθη πρόταση: όλα τά σημεία πάνω σέ μιά ράβδο σχηματίζουν ένα continuum unidimensionnel (συνεχές μονοδιάστατο). Γιά κάθε σημείο πάνω στη ράβδο υπάρχει ένα σημείο πού τοῦ είναι όσο κοντινό θέλουμε. Μποροῦμε νά συνδέσουμε δύο απέχοντα σημεία πάνω στη ράβδο, προχωρώντας μέ όσο μικρά βήματα επιθυμοῦμε. Έτσι ή αθάίρετη μικρότητα τῶν βημάτων πού συνδέουν δύο απέχοντα σημεία είναι τό χαρακτηριστικό τοῦ continuum (συνεχοῦς).

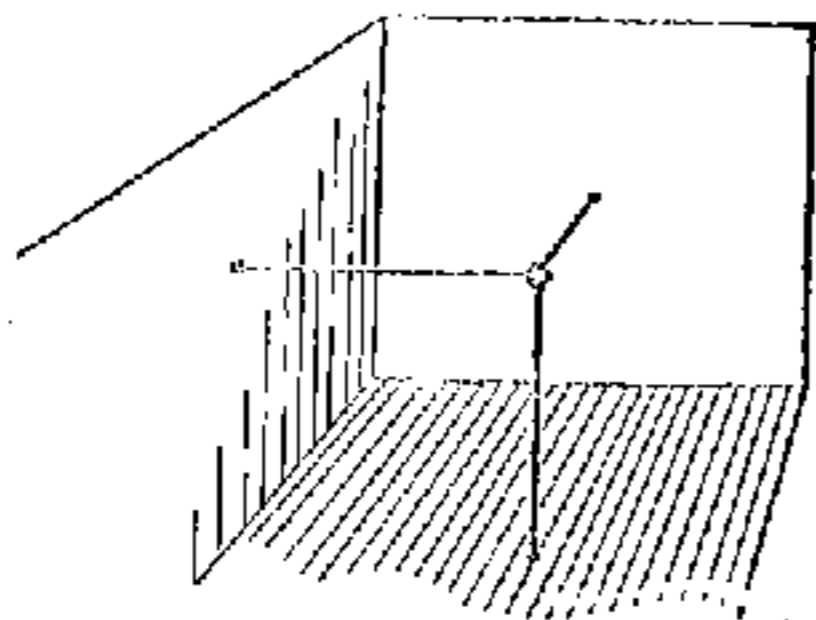
Ας πάρουμε ένα άλλο παράδειγμα. Έχουμε ένα επίπεδο, ή, αν επιθυμοῦτε κάτι πιο συγκεκριμένο, τήν επιφάνεια ενός



όρθογώνιου τραπέζιου. Η θέση ενός σημείου πάνω στο τραπέζι μπορεί νά όρισθελ μέ δύο άριθμούς και όχι, όπως στην προηγούμενη περίπτωση, μόνο μέ ένα. Οί δύο άριθμοί δείχνουν τίς άποστάσεις τοῦ σημείου από τά δύο άκρα τοῦ τραπέ-

ζιού, που είναι κάθετα τό ένα στό άλλο. Δέν είναι ένας μόνο αριθμός, αλλά ζεύγος αριθμών που αντιστοιχεί ένα όρισμένο σημείο του επιπέδου. Μ' άλλα λόγια, τό επίπεδο είναι ένα continuum bidimensionnel (συνεχές διδιάστατο). Για κάθε σημείο του επιπέδου υπάρχουν σημεία που του είναι όσο κοντινά θέλουμε. Δύο απέχοντα σημεία μπορούν νά συνδεθούν μέ καμπύλη, ή όποία είναι δυνατό νά διαιρεθεί σέ όσο μικρά τμήματα θέλουμε. Έτσι ή αυθαίρετη μικρότητα τών βημάτων που συνδέουν δύο απέχοντα σημεία, που τό καθένα μπορεί νά αντιπροσωπευθεί από δύο αριθμούς, είναι τό χαρακτηριστικό ενός διδιάστατου συνεχούς (continuum bidimensionnel).

Τέλος άς πάρουμε ένα τρίτο παράδειγμα. Άς υποθέσουμε ότι θά θέλατε νά θεωρήσετε τό δωμάτιό σας σάν τό ΣΣ σας. Αυτό σημαίνει ότι θά θέλατε νά περιγράψετε όλες τίς θέσεις σχετικά μέ τούς άκάμπτους τοίχους του. Η θέση του έσχατου σημείου τής λάμπας, όταν βρίσκεται σέ ήρεμία, μπορεί νά περιγραφεί μέ τρεις αριθμούς: δύο προσδιορίζουν τήν απόστασή του από δύο καθέτους τοίχους και ό τρίτος τήν απόστασή του άπ' τό δάπεδο ή τήν όροφή. Σέ κάθε σημείο του διαστήματος αντιστοιχούν τρεις αριθμοί, και σέ κάθε ομάδα



τριών αριθμών αντιστοιχεί ένα σημείο του διαστήματος. Αυτό εκφράζεται μέ τήν πρόταση: Τό διάστημά μας είναι ένα τριδιάστατο συνεχές (continuum tridimensionnel). Για κάθε σημείο του διαστήματος υπάρχουν σημεία που του είναι τόσο

κοντινά όσο θέλουμε. Και πάλι ή αυθαίρετη μικρότητα τών βημάτων που συνδέουν τά απέχοντα σημεία, καθένα τών όποιων αντιπροσωπεύεται από τρεις αριθμούς, είναι ένα χαρακτηριστικό του τρισδιαστάτου συνεχούς.

Όλα αυτά όμως είναι μόλις φυσική. Για νά επανέλθουμε σ' αυτήν, πρέπει νά εξετάσουμε τήν κίνηση τών όλικών μορίων. Για νά παρατηρούμε και νά προβλέπουμε τά γεγονότα μέσα στή φύση, όφείλουμε νά παίρνουμε άπ' όψη όχι μόνο τόν τόπο άλλ' άκόμα και τόν χρόνο όπου συμβαίνουν. Θα πάρουμε ένα πολύ άπλό παράδειγμα.

Άφήνουμε νά πέσει από ένα ψηλό πύργο, άς πούμε 80 μέτρα, ένα πετραδάκι που μπορεί νά θεωρηθεί σάν ένα μόριο. Άπ' τόν καιρό του Γαλιλαίου, είμαστε σέ θέση νά όρίζουμε από τά πρίν τήν συντεταγμένη τής πετρίτσας για μία όρισμένη στιγμή άπ' τή στιγμή που άρχισε νά πέφτει. Βλέπε «δρομολόγιο» που περιγράφει τίς θέσεις τής πετρίτσας ύστερα από 0, 1, 2, 3, 4 δευτερόλεπτα (σελίδα...) παρακάτω.

Πέντε περιστατικά σημειώθηκαν στό «δρομολόγιο» μας, τό καθένα άπ' τά όποια αντιπροσωπεύεται από δύο αριθμούς, τήν συντεταγμένη του χρόνου και τήν συντεταγμένη του χώρου. Τό πρώτο περιστατικό είναι ή άρχή τής πτώσης από τό ύψος τών 80 μέτρων σέ μηδέν δευτερόλεπτα. Τό δεύτερο είναι ή σύμπτωση τής πετρίτσας μέ τήν άκαμπτη ράβδο μας (ό πύργος), στό ύψος τών 75 μέτρων, που συμβαίνει μετά ένα δευτερόλεπτο. Τά τελευταία περιστατικό είναι ή έπαφή τής πέτρας μέ τό έδαφος.

Χρόνος σέ δευτερόλεπτα	ύψος σέ μέτρα
0	80
1	75
2	60
3	35
4	0

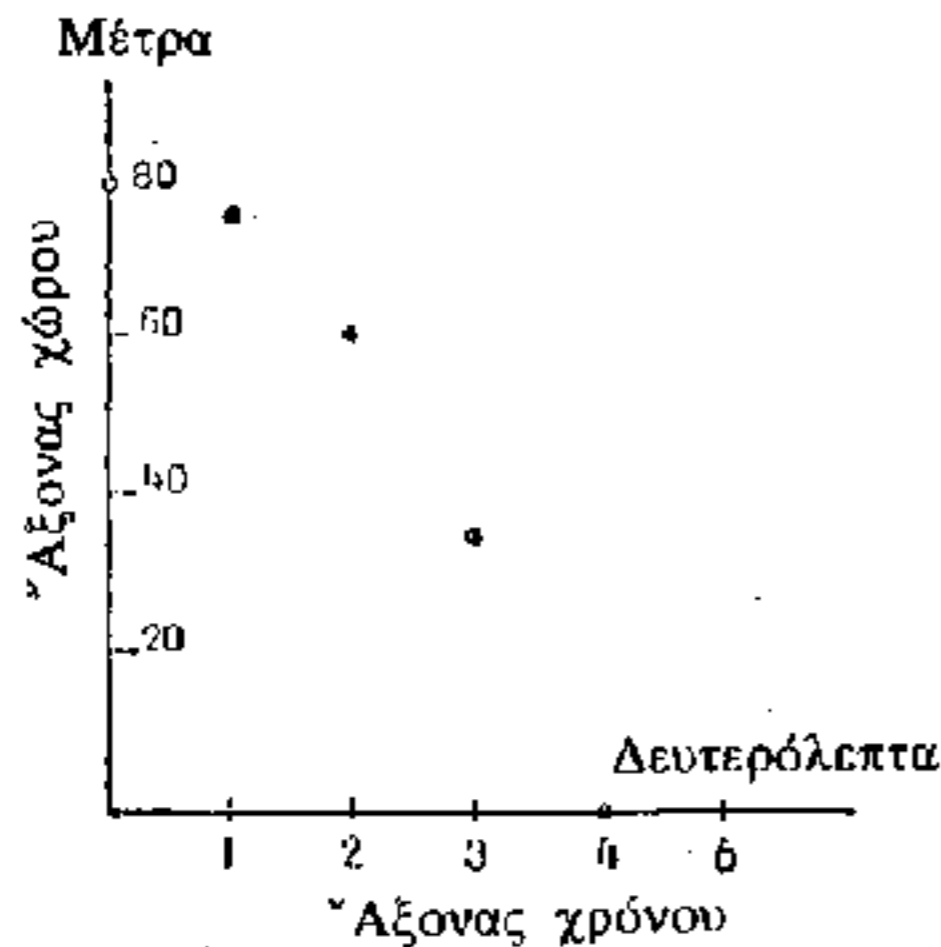
Θά μπορούσαμε νά παρουσιάσουμε μέ διαφορετικό τρόπο τίς πληροφορίες πού μᾶς παρέχει τό «δρομολόγιό» μας μέ πέντε σημεία σ' ἓνα επίπεδο. Ἄς καταστρώσουμε πρώτα μιά κλίμακα τὸ ἓνα ἀπ' τὰ ἀκόλουθα δύο τμήματα θά παριστάνει 20 μέτρα, τὸ ἄλλο ἓνα δευτερόλεπτο.

1 ——— 1  
20 μέτρα

1 ——— 1  
1 δευτερόλεπτο

Μποροῦμε λοιπόν νά σύρουμε δύο γραμμές κάθετες ἢ μία στήν ἄλλη, ὀνομάζοντας τήν ὀριζόντια γραμμή ἄξονα τοῦ χρόνου καί τήν κατακόρυφη ἄξονα τοῦ χώρου. Βλέπουμε ἀμέσως ὅτι τό δρομολόγιό μας μπορεῖ νά παρασταθεῖ μέ πέντε σημεία πάνω στό ἐπίπεδό μας χώρος-χρόνος (βλ. σελ...) παρακάτω.

Οἱ ἀποστάσεις τῶν σημείων ἀπό τόν ἄξονα τοῦ χώρου παριστάνουν τίς συντεταγμένες τοῦ χρόνου, πού εἶναι σημειωμένες στήν πρώτη στήλη τοῦ «δρομολογίου» μας, καί αἱ ἀποστάσεις ἀπό τόν ἄξονα τοῦ χρόνου τίς συντεταγμένες τοῦ χώρου.

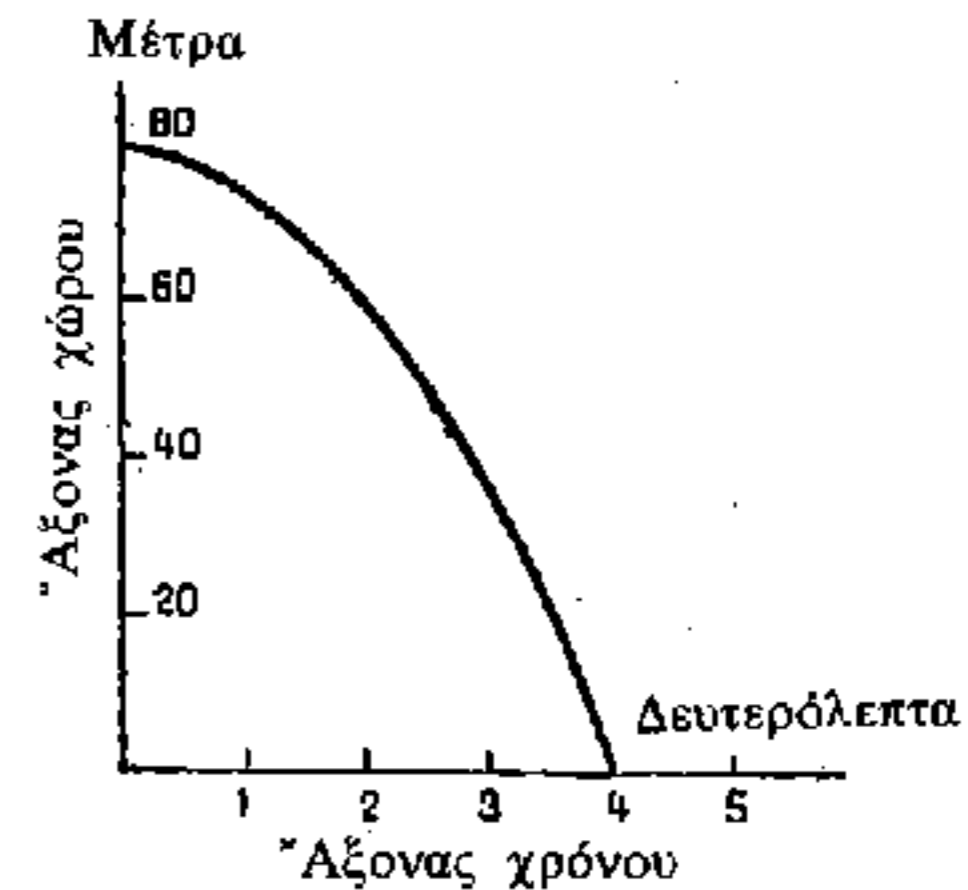


Εἶναι ἀκριβῶς τό ἴδιο πρᾶγμα πού ἐκφράζεται μέ δύο διαφορετικούς τρόπους: μέ «δρομολόγιό» καί μέ σημεία πάνω

στο ἐπίπεδο. Ἄν ἔχουμε τό ἓνα, μποροῦμε νά καθορίσουμε τά ἄλλα καί ἀντίστροφα. Ἡ ἐκλογή ἀνάμεσα στίς δύο παραστάσεις εἶναι ἀπλό ζήτημα γούστου, ἐπειδή πρᾶγματι εἶναι ἰσότιμες.

Ἄς πᾶμε τώρα ἓνα βῆμα μακρύτερα. Ἄς φαντασθοῦμε τώρα ἓνα πιο ἀκριβές «δρομολόγιό», πού δείχνει τίς θέσεις ὄχι γιά κάθε δευτερόλεπτο, ἀλλά γιά κάθε ἑκατοστό ἢ χιλιοστό τοῦ δευτερολέπτου. Τότε θά ἔχουμε ἓνα πολύ μεγάλο ἀριθμό σημείων στό ἐπίπεδό μας χώρος-χρόνος. Τελικά ἂν ἡ θέση σημειώνεται γιά κάθε στιγμή, ἢ, ὅπως λέγουν οἱ μαθηματικοί, ἂν ἡ συντεταγμένη τοῦ χώρου εἶναι μιά συνάρτηση τοῦ χρόνου, ἡ σειρά τῶν σημείων μας ἀποβαίνει συνεχῆς γραμμή. Τό παρακάτω σχέδιο δέν παριστάνει πιά, ὅπως πρίν, μιά ἀποσπασματική γνώση, ἀλλά μιά τέλεια γνώση τῆς κίνησης.

Ἡ κίνηση κατά μήκος τῆς ἄκαμπτης ράβδου (ὁ πύργος) δηλαδή ἡ κίνηση σ' ἓνα μονοδιάστατο χώρο παριστάνεται ἐδῶ ἀπό μιά καμπύλη σ' ἓνα διδιάστατο συνεχές σύστημα χώρου-χρόνου. Σέ κάθε σημείο τοῦ συνεχοῦς αὐτοῦ συστήματος χώρου-χρόνου ἀντιστοιχεῖ ἓνα ζεύγος ἀριθμῶν, ἀπό τοῦς ὁποῖους ὁ ἓνας σημειώνει τήν συντεταγμένη τοῦ χρόνου καί ὁ ἄλλος τήν συντεταγμένη τοῦ χώρου. Ἀντίστροφα, ἓνα ὀρισμέ-



νο σημείο στο χωροχρονικό επίπεδό μας αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος αριθμών που χαρακτηρίζουν ένα γεγονός. Δύο παρακείμενα σημεία παριστάνουν δύο γεγονότα που συμβαίνουν σε τόπους και στιγμές ελαφρά διαφορετικούς.

Θά μπορούσατε νά επιχειρηματολογήσετε ενάντια στην παράστασή μας με τόν ακόλουθο τρόπο: δέν έχει πολύ νόημα νά παριστάνετε μιά μονάδα χρόνου με ένα τμήμα και νά τή συνδυάζετε μηχανικά με τό χώρο, σχηματίζοντας έτσι τό διδιάστατο συνεχές με δύο μονοδιάστατα συνεχή. Σ' αυτό σ'ās απαντούμε ότι θά μπορούσατε έξ ίσου καλά νά διαμαρτυρηθήτε εναντίον όλων τών γραφικών παραστάσεων, όπως, π.χ., αυτών που παριστάνουν τις μεταβολές της θερμοκρασίας στη Νέα Υόρκη τό περασμένο καλοκαίρι, ή αυτές που παριστάνουν τις μεταβολές του κόστους ζωής στα τελευταία αυτά χρόνια, έφ' όσον ή ίδια μέθοδος εφαρμόζεται σε κάθε μιά απ' τις περιπτώσεις αυτές. Στις γραφικές παραστάσεις τών θερμοκρασιών τό μονοδιάστατο συνεχές θερμοκρασία συνδυάζεται με τό μονοδιάστατο συνεχές χρόνος για νά σχηματισθεί τό διδιάστατο συνεχές θερμοκρασία-χρόνος.

Ας επανέλθουμε στο μόριο που αφήσαμε νά πέσει απ' τόν πύργο ύψους 80 μέτρων. Η γραφική μας παράσταση της κίνησης είναι μιά ωφέλιμη σύμβαση, αφού χαρακτηρίζει τή θέση του μορίου σε μιά κάποια στιγμή. Γνωρίζοντας πώς κινείται τό μόριο, θά θέλαμε, άλλη μιά φορά, νά παραστήσουμε τήν κίνησή του. Μπορούμε νά τό κάνουμε με δύο τρόπους.

Θυμόμαστε τήν παράσταση του μορίου, που αλλάζει θέση με τό χρόνο στο μονοδιάστατο χώρο. Παριστάνουμε τήν κίνηση σά μιά συνέχεια γεγονότων στο μονοδιάστατο συνεχές σύστημα του χώρου. Δέν ενώνουμε μαζί τό χώρο και τό χρόνο, χρησιμοποιούμε μιά δυναμική παράσταση όπου οι θέσεις αλλάζουν με τό χρόνο.

Αλλά μπορούμε νά παραστήσουμε τήν ίδια κίνηση με διαφορετικό τρόπο. Μπορούμε νά δώσουμε μιά στατική παράσταση, θεωρώντας τήν καμπύλη σ' ένα διδιάστατο χωρο-

χρονικό συνεχές. Η κίνηση παριστάνεται τώρα σαν κάτι που είναι, που υπάρχει σ' ένα διδιάστατο χωροχρονικό συνεχές και όχι σαν κάτι που αλλάζει στο μονοδιάστατο συνεχές του χώρου.

Αυτές οι δύο παραστάσεις είναι αυστηρά ισοδύναμες και ή προτίμηση της μιās ή της άλλης είναι απλό ζήτημα γούστου και σύμβασης.

Ό,τι είπαμε εδώ για τις δύο παραστάσεις της κίνησης, δέν έχει καμιά σχέση με τή θεωρία της σχετικότητας. Οι δύο παραστάσεις μπορούν έξ ίσου νά χρησιμοποιούνται, αν και ή κλασσική φυσική έχει μάλλον προτιμήσει τή δυναμική παράσταση, περιγράφοντας τήν κίνηση σά γεγονότα στο χώρο και όχι σά νά υπάρχει στο χώρο-χρόνο. Αλλά ή θεωρία της σχετικότητας άλλαξε κι' αυτή τήν άποψη. Έκδηλώθηκε καθαρά υπέρ της στατιστικής εικόνας και βρήκε σ' αυτή τήν παράσταση της κίνησης σαν κάτι που υπάρχει στο χώρο-χρόνο, μιά εικόνα πιο βολική και πιο αντικειμενική της πραγματικότητας. Έχουμε ακόμη νά απαντήσουμε στην έρώτηση αυτή: γιατί οι δύο αυτές παραστάσεις, ισοδύναμες στην κλασσική άποψη, δέν είναι ισοδύναμες και στην άποψη της θεωρίας της σχετικότητας;

Θά καταλάβουμε τήν απάντηση, αν και πάλι θεωρήσουμε δύο ΣΣ που κινούνται ομοιόμορφα τό ένα σχετικά με τό άλλο.

Σύμφωνα με τήν κλασσική φυσική, παρατηρητές σε δύο ΣΣ που κινούνται ομοιόμορφα τό ένα σχετικά με τό άλλο θά κάνουν νά αντιστοιχήσουν σ' ένα όρισμένο γεγονός διαφορετικές συντεταγμένες χώρου, αλλά τήν ίδια συντεταγμένη χρόνου. Έτσι στην περίπτωση που εξέτάσαμε πρό όλίγου, ή σύμπτωση του μορίου με τό έδαφος χαρακτηρίζεται, στο ΣΣ που διαλέξαμε, από τήν συντεταγμένη του χρόνου «4» και από τήν συντεταγμένη του χώρου «μηδέν». Σύμφωνα με τήν κλασσική μηχανική τό χαλίκι θά φθάσει τό έδαφος ύστερα από τέσσερα ακόμα δευτερόλεπτα για ένα παρατηρητή κινούμενο ομοιόμορφα σχετικά με τό ΣΣ που διαλέξαμε. Αλλά ό παρατη-

ρητής αυτός θά αναφέρει τήν απόσταση στό ΣΣ του καί θά συνδέσει, γενικά, διαφορετικές συντεταγμένες χώρου στό γεγονός τής κρούσης, άν καί ή συντεταγμένη του χρόνου είναι ή ίδια γι' αυτόν καί γιά όλους τούς άλλους παρατηρητές πού κινούνται όμοιόμορφα οί μέν σχετικά μέ τούς δέ. Η κλασσική φυσική δέν γνωρίζει παρά μία «απόλυτη» ροή του χρόνου γιά όλους τούς παρατηρητές. Για κάθε ΣΣ τό διδιάστατο συνεχές μπορεί νά αποσυντεθεί σέ δύο μονοδιάστατα συνεχή: χρόνο καί χώρο. Έξ αίτιας του «απόλυτου» χαρακτήρα του χρόνου, ή μετάβαση από τήν «στατική» εικόνα στη «δυναμική» εικόνα τής κίνησης έχει στην κλασσική φυσική μία αντικειμενική σημασία.

Αλλά άφεθήκαμε ήδη νά πεισθοῦμε ότι ό κλασσικός μετασχηματισμός δέν πρέπει νά χρησιμοποιείται έν γένει στη φυσική. Είναι από πρακτική άποψη πάντα καλός γιά μικρές ταχύτητες, όχι όμως γιά νά αποφασίζει γιά θεμελιακά ζητήματα τής φυσικής.

Σύμφωνα μέ τή θεωρία τής σχετικότητας, ό χρόνος πού τό χαλίκι άγγισε τή Γή, δέ θά είναι ό ίδιος γιά όλους τούς παρατηρητές. Η συντεταγμένη του χρόνου καί ή συντεταγμένη του χώρου θά είναι διαφορετικές σέ δύο διαφορετικά ΣΣ, καί ή μεταβολή στη συντεταγμένη του χρόνου θά είναι πολύ έντονη, άν ή σχετική ταχύτητα πλησιάζει τήν ταχύτητα του φωτός. Τό διδιάστατο συνεχές δέν μπορεί νά χωρισθεί, όπως στην κλασσική φυσική, σέ δύο μονοδιάστατα συνεχή. Δέν πρέπει νά θεωρούμε τό χώρο καί χρόνο χωριστά όταν καθορίζουμε τις χωροχρονικές συντεταγμένες σέ ένα άλλο ΣΣ. Η ανάλυση του διδιάστατου συνεχούς σέ δύο μονοδιάστατα συνεχή, είναι από τήν άποψη τής θεωρίας τής σχετικότητας μία αυθαίρετη πορεία, χωρίς αντικειμενική σημασία.

Θά είναι εύκολο νά επεκτείνουμε όλα όσα είπαμε στην περίπτωση πού ή κίνηση δέν εκτελείται σέ εϋθεία γραμμή. Πράγματι όχι δύο, αλλά τέσσερις αριθμούς πρέπει νά χρησιμοποιήσουμε γιά νά περιγράψουμε τά γεγονότα μέσα στη φύση. Ο φυσικός μας χώρος, όπως τόν αντιλαμβανόμαστε διά μέσου

των αντικειμένων καί των κινήσεών τους, έχει τρεις διαστάσεις καί οί θέσεις χαρακτηρίζονται από τρεις αριθμούς. Η στιγμή ενός γεγονότος χαρακτηρίζεται από τόν τέταρτο αριθμό. Τέσσερις όρισμένοι αριθμοί αντιστοιχοῦν σέ κάθε γεγονός, κι' ένα όρισμένο γεγονός αντιστοιχεί σέ τέσσερις αριθμούς. Λοιπόν: ό κόσμος των γεγονότων σχηματίζει ένα τετραδιάστατο συνεχές. Δέν υπάρχει τίποτε τό μυστηριώδες σ' όλο αυτό καί ή τελευταία πρόταση είναι τόσο άληθινή γιά τήν κλασσική φυσική όσο καί γιά τή θεωρία τής σχετικότητας. Καί πάλι ανακύπτει μία διαφορά όταν εξετάζονται δύο ΣΣ σέ κίνηση τό ένα σχετικά μέ τό άλλο. Ας υπενθυμίσουμε τό παράδειγμα πού δώσαμε ήδη. Τό δωμάτιο κινείται καί οί παρατηρητές στό έσωτερικό καθορίζουν τις χωροχρονικές συντεταγμένες των ίδιων γεγονότων. Καί πάλι ό κλασσικός φυσικός αναλύει τό τετραδιάστατο συνεχές στον τριδιάστατο χώρο καί στό μονοδιάστατο συνεχές του χρόνου. Ο παλιός φυσικός δέ φροντίζει παρά μόνο γιά τό μετασχηματισμό του χώρου, ό χρόνος γι' αυτόν είναι απόλυτος. Βρίσκει τήν ανάλυση του τετραδιάστατου κοσμικού συνεχούς σέ χώρο καί χρόνο φυσική καί βολική. Αλλά από τήν άποψη τής θεωρίας τής σχετικότητας, τόσο ό χρόνος όσο καί ό χώρος μεταβάλλονται κατά τή μετάβαση από ένα ΣΣ σ' ένα άλλο, καί ό μετασχηματισμός του Lorentz θεωρεί τις ιδιότητες μετασχηματισμού του τετραδιάστατου συνεχούς συστήματος χώρου-χρόνου του κόσμου μας: τετραδιάστατο των γεγονότων.

Ο κόσμος των γεγονότων μπορεί νά περιγραφεί δυναμικά μέ μία εικόνα πού μεταβάλλει τό χρόνο καί πού προβάλλεται στό πίσω επίπεδο του χώρου μέ τρεις διαστάσεις. Αλλά, μπορεί επίσης νά περιγραφεί μέ μία στατική εικόνα πού προβάλλεται στό πίσω επίπεδο του τετραδιάστατου χωροχρονικού συνεχούς. Από τήν άποψη τής κλασσικής φυσικής, οί δύο εικόνες, ή στατική καί ή δυναμική, είναι ισοδύναμες, αλλά από τήν άποψη τής θεωρίας τής σχετικότητας, ή στατική εικόνα είναι βολικότερη καί αντικειμενικότερη.

Όμως, ακόμη καί στη θεωρία τής σχετικότητας, μπορούμε,

άν προτιμούμε, νά χρησιμοποιήσουμε τή δυναμική εικόνα. Αλλά δέν πρέπει νά ξεχνάμε ότι ή διαίρεση αὐτή σέ χρόνο καί χῶρο δέν ἔχει ἀντικειμενική σημασία, ἀφοῦ ὁ χρόνος δέν εἶναι «ἀπόλυτος». Στίς σελίδες πού ἀκολουθοῦν θά χρησιμοποιοῦμε πάντοτε τήν ὁρολογία «δυναμική» καί ὄχι «στατική», χωρίς νά μᾶς διαφεύγουν οἱ περιορισμοί της.

## Η ΓΕΝΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ἐνα ἀπό τά πιό θεμελιώδη ἐρωτήματα δέν πήρε ἀκόμη ὡς τώρα ἀπάντηση: ὑπάρχει ἕνα σύστημα ἀδρανείας; Μάθαμε κάτι γιά τούς νόμους τῆς φύσης, τό ἀμετάβλητό τους σχετικά μέ τόν μετασχηματισμό τοῦ Lorentz καί τήν ἰσχύ τους γιά ὅλα τά συστήματα ἀδρανείας πού κινοῦνται ὁμοιόμορφα τό ἕνα σχετικά μέ τό ἄλλο. Ἐχομε τούς νόμους, ἀλλά δέ γνωρίζουμε τό πλαίσιο μέ τό ὁποῖο πρέπει νά τοῖς ἀποδώσουμε.

Γιά νά ἀντιληφθοῦμε καλύτερα αὐτή τή δυσκολία, θά πάρουμε συνέντευξη ἀπό τόν κλασσικό φυσικό καί θά τοῦ κάνουμε μερικές ἀπλές ἐρωτήσεις.

— Τι εἶναι ἕνα σύστημα ἀδρανείας;

— Εἶναι ἕνα ΣΣ ὅπου ἰσχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς. Ἐνα σῶμα πάνω στό ὁποῖο δέν ἐνεργεῖ καμιά ἐξωτερική δύναμη, κινεῖται ὁμοιόμορφα σέ ἕνα τέτοιο ΣΣ. Αὐτή ἡ ιδιότητα μᾶς καθιστᾶ ἕται ἱκανούς νά διακρίνουμε ἕνα σύστημα ἀδρανείας ἀπό κάθε ἄλλο.

— Ἀλλά ὅταν λέτε ὅτι καμιά δύναμη δέν ἐνεργεῖ ἐπί ἐνός σώματος, τί σημαίνει ἡ ἔκφραση αὐτή;

— Σημαίνει ἀπλούστατα ὅτι τό σῶμα κινεῖται ὁμοιόμορφα σέ ἕνα ΣΣ ἀδρανείας.

Ἐδῶ γιά ἄλλη μιά φορά θά μπορούσαμε νά θέσουμε τό ἐρώτημα: «Τί εἶναι ἕνα ΣΣ ἀδρανείας;» Ἀλλά ἐπειδή ἔχομε μικρή ἐλπίδα νά πάρουμε διαφορετική ἀπάντηση ἀπ' αὐτήν πού πήραμε πρό ὀλίγου, ἄς ἐπιχειρήσουμε νά πάρουμε κάποια συγκεκριμένη πληροφορία, τροποποιώντας τό ἐρώτημα:

— Ἐνα ΣΣ αὐστηρά συνδεδεμένο μέ τή Γῆ, εἶναι ἕνα ΣΣ ἀδρανείας;

— Ὁχι, γιατί οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς δέν ἰσχύουν αὐστηρά στή Γῆ, ἐξ αἰτίας τῆς περιστροφῆς της. Ἐνα ΣΣ αὐστηρά συνδεδεμένο μέ τόν ἥλιο μπορεῖ, γιά πολλά προβλήματα, νά θεωρηθεῖ σάν ἕνα ΣΣ ἀδρανείας. Ἀλλά ὅταν μιλοῦμε γιά τόν ἥλιο σέ περιστροφή, ἐννοῦμε καί πάλι ὅτι ἕνα ΣΣ πού τοῦ εἶναι συνδεδεμένο δέν μπορεῖ νά θεωρηθεῖ ἐντελῶς σάν ἕνα ΣΣ ἀδρανείας.

— Τι εἶναι λοιπόν, συγκεκριμένα τό δικό σας ΣΣ ἀδρανείας, καί πῶς πρέπει νά ἐκλέξουμε τήν κινητική του κατάσταση;

— Εἶναι, ἀπλούστατα, μιά ὀφέλιμη ἐπινόηση, καί δέν ἔχω ἰδέα πῶς θά μπορούσε κανεῖς νά τήν πραγματοποιήσει. Μόνο ἄν μπορούσα νά ἀπομακρυνθῶ ἀρκετά ἀπό ὅλα τά ὄλικά σώματα καί νά ἐλευθερωθῶ ἀπό ὅλες τίς ἐξωτερικές ἐπιδράσεις, τό ΣΣ μου θά ἦταν τότε ἕνα ΣΣ ἀδρανείας.

— Ἀλλά τί ἐννοεῖτε μέ ἕνα ΣΣ ἐλεύθερο ἀπό ὅλες τίς ἐξωτερικές ἐπιδράσεις;

— Ἐννοῶ ὅτι τό ΣΣ εἶναι ἕνα ΣΣ ἀδρανείας.

Ἄλλη μιά φορά βρισκόμαστε μπρός στό ἀρχικό μας ἐρώτημα.

Ἡ συνέντευξή μας φανερώνει μιά σοβαρή δυσκολία στήν κλασσική φυσική. Ἐχομε νόμους, ἀλλά δέν ξέρουμε σέ ποῖο πλαίσιο πρέπει νά τοῖς ἀναφέρουμε καί ὅλη ἡ φυσική δομή μας φαίνεται κτισμένη στήν ἄμμο.

Μποροῦμε νά πλησιάσουμε τήν ἴδια αὐτή δυσκολία ἀπό διαφορετική ἄποψη. Ἄς φαντασθοῦμε ὅτι δέν ὑπάρχει σ' ὄλο τό σύμπαν παρά μόνο ἕνα σῶμα πού σχηματίζει τό ΣΣ μας. Τό σῶμα αὐτό ἀρχίζει νά ἐκτελεῖ μιά περιστροφική κίνηση. Σύμφωνα μέ τήν κλασσική μηχανική οἱ φυσικοί νόμοι γιά ἕνα σῶμα πού ἐκτελεῖ περιστροφική κίνηση εἶναι διαφορετικοί ἀπό τούς νόμους σώματος πού δέν ἐκτελεῖ περιστροφική κίνηση. Ἄν ἡ ἀρχή τῆς ἀδρανείας ἰσχύει γιά τή μιά περίπτωση δέν ἰσχύει γιά τήν ἄλλη. Ἀλλά ὄλο αὐτό εἶναι πολύ

υποπτο. Επιτρέπεται νά έρευνάται ή κίνηση ενός μό-  
νου σώματος σέ όλο τό σύμπαν; μέ τήν κίνηση ενός σώματος  
έννοοῦμε πάντοτε τήν ἀλλαγή τῆς θέσης του σέ σχέση μέ ἕνα  
ἄλλο σώμα. Είναι συνεπῶς ἀντίθετο στόν κοινό νοῦ νά μιλοῦμε  
γιά κίνηση ενός μόνου σώματος. Ἡ κλασσική μηχανική καί ὁ  
κοινός νοῦς βρίσκονται ἐντελῶς σέ ἀσυμφωνία στό σημεῖο  
αὐτό. Τό παράγγελμα τοῦ Νεύτωνος είναι: ἂν ἰσχύει ἡ ἀρχή τῆς  
ἀδρανείας, τότε τό ΣΣ θά είναι ἡ σέ ἠρεμία ἢ σέ ὁμοιόμορφη  
κίνηση. Ἄν δέν ἰσχύει ἡ ἀρχή τῆς ἀδρανείας, τότε ἡ κίνηση  
τοῦ σώματος δέν είναι ὁμοιόμορφη. Ἐτσι, γιά νά ἀποφανθοῦμε  
ἂν ὑπάρχει κίνηση ἢ ἠρεμία, πρέπει νά γνωρίζουμε προκατα-  
βολικά ἂν, ναι ἢ ὄχι ὅλοι οἱ φυσικοί νόμοι είναι ἐφαρμόσιμοι  
σ' ἕνα δοσμένο ΣΣ.

Ἄς θεωρήσουμε δύο σώματα, π.χ. τόν Ἥλιο καί τή Γῆ. Ἡ  
κίνηση πού παρατηροῦμε είναι ἀκόμη σχετική. Μποροῦμε νά  
τήν περιγράψουμε δένοντας τό ΣΣ εἴτε στή Γῆ, εἴτε στόν  
Ἥλιο. Ἀπό αὐτή τήν ἀποψη, ἡ μεγάλη ἀνακάλυψη τοῦ  
Κοπερνίκου ἔγκειται στό ὅτι μετέφερε τό ΣΣ ἀπό τή Γῆ στόν  
Ἥλιο. Ἀλλά, δεδομένου ὅτι ἡ κίνηση είναι σχετική καί ὅτι  
μποροῦμε νά ἐξυπηρετηθοῦμε ἀπό ὁποιοδήποτε σύστημα ἀνα-  
φορᾶς, δέν ὑπάρχει λόγος νά δώσουμε τήν προτίμηση σ' ἕνα  
ΣΣ μᾶλλον παρά σέ ἄλλο. Καί πάλι ἐπεμβαίνει ἡ φυσική καί  
μεταβάλλει τήν ἀποψη τοῦ κοινού νοῦ. Τό ΣΣ πού είναι δεμένο  
στόν Ἥλιο, μοιάζει περισσότερο μέ ἕνα σύστημα ἀδρανείας  
ἀπό τό ΣΣ πού είναι δεμένο στή Γῆ. Ἡ φυσικοί νόμοι θά  
ἐφαρμόζονταν καλύτερα στό ΣΣ τοῦ Κοπερνίκου παρά στό ΣΣ  
τοῦ Πτολεμαίου. Τό μέγεθος τῆς ἀνακάλυψης τοῦ Κοπερνίκου  
μπορεῖ νά ἐκτιμηθεῖ μόνο ἀπό φυσική ἀποψη. Ἐξηγεῖ τό μεγάλο  
πλεονέκτημα πού παρουσιάζει ἕνα ΣΣ αὐστηρά δεμένο στόν  
Ἥλιο γιά τήν περιγραφή τῆς κίνησης τῶν πλανητῶν.

Καμιά ἀπόλυτη ὁμοιόμορφη κίνηση δέν ὑπάρχει στήν  
κλασσική φυσική. Ἄν δύο ΣΣ κινῶνται μέ ὁμοιόμορφη κίνηση  
τό ἕνα σέ σχέση μέ τό ἄλλο δέν ἔχει νόημα νά ποῦμε: «Αὐτό τό  
ΣΣ είναι σέ ἠρεμία καί τό ἄλλο σέ κίνηση». Ἀλλά ἂν δύο ΣΣ  
ἐκτελοῦν ὄχι ὁμοιόμορφες κινήσεις τό ἕνα σέ σχέση μέ τό

ἄλλο, τότε ὑπάρχει ἰσχυρός λόγος νά ποῦμε «Τό σώμα αὐτό  
κινεῖται καί τό ἄλλο είναι σέ στάση (ἢ κινεῖται ὁμοιόμορφα)».  
Ἡ ἀπόλυτη κίνηση ἔχει ἐδῶ μιά σαφῶς ὀρισμένη σημασία. Ἐδῶ  
χωρίζεται ἄβυσσος τόν κοινό νοῦ ἀπό τήν κλασσική φυσική. Οἱ  
δυσκολίες πού πρίν ἀπό λίγο ἀναφέραμε, δηλαδή ἡ δυσκολία  
τοῦ συστήματος ἀδρανείας καί ἐκείνη τῆς ἀπόλυτης κίνησης,  
είναι στενά συνδεδεμένες ἢ μιά μέ τήν ἄλλη. Ἡ ἀπόλυτη  
κίνηση δέν καθίσταται δυνατή παρά μέ τήν ἰδέα ενός συστήμα-  
τος ἀδρανείας, γιά τό ὁποῖο ἰσχύουν οἱ νόμοι τῆς φύσης.

Θ' ἀποτολμούσαμε νά πιστέψουμε ὅτι σ' αὐτές τίς δυσκο-  
λίες διεξόδος δέν ὑπάρχει καί ὅτι καμιά φυσική θεωρία δέν  
μπορεῖ νά τίς ἀποφύγει. Ἡ ρίζα τους βρίσκεται στό κῦρος τῶν  
φυσικῶν νόμων γιά μιά εἰδική μόνο τάξη ΣΣ, δηλαδή τῶν ΣΣ  
ἀδρανείας. Ἡ δυνατότητα λύσης τῶν δυσκολιῶν αὐτῶν ἐξαρτᾶ-  
ται ἀπ' τήν ἀπάντηση πού δίνεται στό ἀκόλουθο ἐρώτημα.  
Μποροῦμε νά διατυπώσουμε τούς φυσικούς νόμους μέ τέτοιο  
τρόπο ὥστε νά ἰσχύουν γιά ὅλα τά ΣΣ, δηλαδή, ὄχι μόνο γι'  
αὐτά πού κινῶνται ὁμοιόμορφα, ἀλλ' ἔκτοτα γι' αὐτά πού  
κινῶνται μέ ὁποιοδήποτε τρόπο τό ἕνα σέ σχέση μέ τό ἄλλο;  
Ἄν αὐτό μπορεῖ νά γίνει, τότε τελειώνουν οἱ δυσκολίες μας.  
Θά εἴμαστε τότε σέ θέση νά ἐφαρμόζουμε τούς φυσικούς  
νόμους σέ ὁποιοδήποτε ΣΣ. Ἡ μάχη, τόσο σφοδρή στις ἀρχές  
τῆς ἐπιστήμης, ἀνάμεσα στήν ἀντίληψη τοῦ Πτολεμαίου καί  
ἐκείνη τοῦ Κοπερνίκου, θά ἔχανε στήν ἐντέλεια τό νόημά της.  
Θά εἶχε ἐξ ἴσου κανεῖς τό δικαίωμα νά ἐξυπηρετηθεῖ ἀπό τή μιά  
ἢ τήν ἄλλη ἀποψη. Οἱ δύο προτάσεις, «ὁ Ἥλιος είναι  
ἀκίνητος καί ἡ Γῆ περιστρέφεται», ἢ «ὁ Ἥλιος περιστρέφεται  
καί ἡ Γῆ είναι ἀκίνητη», θά σήμαιναν ἀπλούστατα δύο  
διαφορετικές συμβάσεις πού ἀφοροῦσαν δύο διαφορετικά ΣΣ.

Μποροῦμε ἄραγε νά κατασκευάσουμε μιά φυσική πραγμα-  
τικά σχετικότητα, πού νά ἰσχύει γιά ὅλα τά ΣΣ, μιά φυσική  
ὅπου δέ θά ὑπῆρχε πιά θέση γιά τήν ἀπόλυτη κίνηση, ἀλλά  
μόνο γιά τή σχετική κίνηση; Αὐτό είναι σ' ἀλήθεια δυνατό.

Ἐχομε τουλάχιστο μιά ὑπόδειξη, ἂν καί ἀρκετά ἀσθενική,

για τὸ πῶς μπορούμε νὰ κατασκευάσουμε μιὰ νέα φυσική. Ἡ πραγματικὰ φυσική τῆς σχετικότητας πρέπει νὰ ἐφαρμόζεται σὲ ὅλα τὰ ΣΣ καὶ κατὰ συνέπεια καὶ στὴν εἰδική περίπτωση τοῦ ΣΣ ἀδρανείας. Γνωρίζουμε ἤδη τοὺς νόμους γι' αὐτὸ τὸ τελευταῖο. Οἱ νέοι γενικοὶ νόμοι, ποὺ ἰσχύουν γιὰ ὅλα τὰ ΣΣ, πρέπει στὴν εἰδική περίπτωση τοῦ συστήματος ἀδρανείας, νὰ ἀναχθοῦν στοὺς παλιούς γνωστούς νόμους.

Τὸ πρόβλημα τῆς διατύπωσης τῶν φυσικῶν νόμων γιὰ ὁποιοδήποτε ΣΣ λύθηκε ἀπὸ τὴ θεωρία τῆς γενικῆς σχετικότητας ἢ θεωρία ποὺ προηγήθηκε καὶ ποὺ ἐφαρμόζεται μόνο στὰ συστήματα ἀδρανείας ὀνομάζεται *θεωρία τῆς περιορισμένης σχετικότητας*. Οἱ δύο θεωρίες δὲν μπορούν φυσικὰ νὰ ἀντιφάσκουν ἢ μιὰ στὴν ἄλλη, ἐφ' ὅσον ὀφείλομε πάντοτε νὰ ἐγκλείουμε τοὺς παλιούς νόμους τῆς θεωρίας τῆς περιορισμένης σχετικότητας στοὺς γενικοὺς νόμους γιὰ ἓνα σύστημα ἀδρανείας. Ἀλλὰ τὸ ΣΣ ἀδρανείας, γιὰ τὰ ὅποια πρῶτα διατυπώθηκαν οἱ φυσικοὶ νόμοι, δὲν ἀποτελεῖ τώρα παρά μιὰ εἰδική περίπτωση ὁρίου, ἀφοῦ ὅλα τὰ ΣΣ ποὺ κινοῦνται ἀθαιρέτα τὸ ἓνα σὲ σχέση μὲ τὸ ἄλλο εἶναι ἀποδεκτά.

Νὰ λοιπὸν τὸ πρόγραμμα τῆς θεωρίας τῆς γενικῆς σχετικότητας. Ἀλλὰ σχεδιάζοντας τὸ δρόμο ποὺ ἀκολουθήσαμε γιὰ νὰ τὸ χρησιμοποιήσουμε ἀναγκαζόμεστε νὰ εἴμαστε πιὸ ἀόριστοι, ἢ καὶ ὡς τώρα δὲν ὑπῆρξαμε τέτοιοι. Νέες δυσκολίες, ποὺ παρουσιάζονται κατὰ τὴν ἀνάπτυξη τῆς ἐπιστήμης, ἀναγκάζουν τὴ θεωρία νὰ γίνεται ὄλο καὶ πιὸ ἀφηρημένη. Ἀπρόοπτες περιπέτειες μᾶς περιμένουν ἀκόμη. Ἀλλὰ ὁ τελικὸς μας σκοπὸς εἶναι πάντοτε μιὰ καλύτερη κατανόηση τῆς πραγματικότητας. Κρίκοι προσθέτονται στὴ λογικὴ ἀλυσίδα ποὺ συνδέει τὴ θεωρία καὶ τὴν παρατήρηση. Γιὰ νὰ ἀπαλλάξουμε ἀπ' τὴς περιττές καὶ τεχνητές ὑποθέσεις τὸ δρόμο ποὺ ὀδηγεῖ ἀπ' τὴ θεωρία στὸ πείραμα, γιὰ νὰ ἀγκαλιάσουμε μιὰ ὄλο καὶ πιὸ πλατεῖα περιοχὴ γεγονότων, πρέπει ὄλο καὶ περισσότερο νὰ μακραινουμε τὴν ἀλυσίδα. Ὅσο περισσότερο ἀπλές καὶ θεμελιακές γίνονται οἱ ὑποθέσεις μας, τόσο περισσότερο περίπλοκη γίνεται ἡ μαθηματικὴ συσκευή τοῦ συλλογισμοῦ μας. Ὁ δρόμος

ἀπὸ τὴ θεωρία στὴν παρατήρηση γίνεται μακρότερος, λεπτότερος καὶ πιὸ περίπλοκος. Ὅσο κι ἂν μπορεῖ νὰ φανεῖ παράδοξο αὐτό, μπορούμε νὰ ποῦμε: Ἡ νεώτερη φυσική εἶναι πιὸ ἀπλὴ ἀπ' τὴν παλαιότερη καὶ κατὰ συνέπεια φαίνεται πιὸ δύσκολη καὶ πιὸ περίπλοκη. Ὅσο πιὸ ἀπλὴ εἶναι ἡ εἰκόνα τοῦ ἐξωτερικοῦ κόσμου, τόσο περισσότερα γεγονότα ἀγκαλιάζει καὶ τόσο περισσότερο ἀντανακλᾷ στὰ πνεύματά μας τὴν ἁρμονία τοῦ σύμπαντος.

Ἡ νέα μας ἰδέα εἶναι ἀπλὴ: νὰ κατασκευάσουμε μιὰ φυσική ποὺ νὰ ἰσχύει γιὰ ὅλα τὰ ΣΣ. Ἡ πραγματοποίησή της συνεπάγεται ρητὲς περιπλοκές καὶ μᾶς ἀναγκάζει νὰ χρησιμοποιοῦμε μαθηματικὲς συσκευὲς διαφορετικὲς ἀπ' αὐτὲς ποὺ χρησιμοποιοῦσε ὡς τώρα ἡ φυσική. Θέλουμε μόνο νὰ δείξουμε ἐδῶ τὴ συνάρτηση ἀνάμεσα στὴν πραγματοποίηση τοῦ προγράμματος αὐτοῦ καὶ σὲ δύο κύρια προβλήματα: τὴν ἔλξη καὶ τὴ γεωμετρία.

## ΣΤΟ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟ ΚΑΙ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΟΥ ΑΝΕΛΚΥΣΤΗΡΑ

Ὁ νόμος τῆς ἀδρανείας σημειώνει τὴν πρώτη μεγάλη πρόοδο στὴ φυσική, μπορούμε μάλιστα νὰ ποῦμε τὴν πραγματικὴ τῆς ἑναρξῆς. Κατακτῆθηκε μὲ ἓνα ἐξιδανικευμένο πείραμα: ἓνα σῶμα σὲ κίνηση, μὲ ἀπουσία κάθε τριβῆς καὶ κάθε ἐπενέργειας ἐξωτερικῆς δύναμης, θά κινεῖται μὲ ὁμοιόμορφη ἀτέρμονα κίνηση. Αὐτὸ τὸ παράδειγμα καὶ πολλὰ ἄλλα μᾶς ἐπέτρεψαν νὰ ἀναγνωρίσουμε τὴ σπουδαιότητα τοῦ ἐξιδανικευμένου πειράματος, ποὺ συνέλαβε ἡ σκέψη. Ἐδῶ θά ἐρευνήσουμε καὶ πάλι ἐξιδανικευμένα πειράματα. Ἄν καὶ φαίνονται φανταστικά, ὅσῳσο θά μᾶς βοηθήσουν νὰ κατανοήσουμε τὴ θεωρία τῆς σχετικότητας ὅσο τὸ ἐπιτρέπουν οἱ ἀπλές μας μέθοδοι.

Πιὸ πάνω εἶχαμε τὰ ἐξιδανικευμένα πειράματα τοῦ δωματίου σὲ ὁμοιόμορφη κίνηση. Γιὰ ν' ἀλλάξουμε, θά πάρομε ἓνα ἀνελκυστήρα σὲ ἐλεύθερη πτώση.

“Ας φαντασθούμε λοιπόν ένα μεγάλο άνεγκυστήρα στον τελευταίο όροφο ενός ουρανοξύστου, πολύ πιο ψηλού απ’ αυτούς που βλέπουμε στην πραγματικότητα. Απότομα σπάζει τό καλώδιο που βαστάει τόν άνεγκυστήρα κι αυτός πέφτει ελεύθερα. Παρατηρητές που βρίσκονται εκεί, έκτελοῦν κατά τήν πτώση πειράματα. Περιγράφοντάς τα δέν έχουμε νά ασχοληθούμε μέ τήν αντίσταση του αέρα και μέ τήν τριβή, γιατί στίς έξιδανικευμένες συνθήκες μας μπορούμε νά παραμελήσουμε τήν ύπαρξή τους. Ένας απ’ τούς παρατηρητές αφήνει νά πέσει ένα μαντήλι και ένα ρολόι. Τί συμβαίνει σ’ αυτά τά δύο σώματα; Για τόν έξωτερικό παρατηρητή, που κοιτάζει διά μέσου του παραθύρου του άνεγκυστήρα, τό μαντήλι και τό ρολόι πέφτουν και τά δύο ακριβώς μέ τόν ίδιο τρόπο, μέ τήν ίδια επιτάχυνση. Θυμούμαστε ότι ή επιτάχυνση ενός σώματος σέ πτώση είναι έντελώς ανεξάρτητη από τή μάζα του και ότι είναι τό γεγονός που αποκάλυψε τήν ισότητα τής μάζας βάρους και τής αδρανούς μάζας (σ. 46). Θυμούμαστε ακόμα ότι ή ισότητα των δύο μαζών, τής μάζας βάρους και τής αδρανούς, ήταν έντελώς συμπτωματική από τήν άποψη τής κλασσικής μηχανικής και δέν έπαιζε κανένα ρόλο στη δομή της. Έδώ, ώστόσο, ή ισότητα αυτή, που άντινακλά στην ίση επιτάχυνση όλων των σωμάτων σέ πτώση, είναι ουσιαστικής και άποτελεί τό θεμέλιο όλης τής επιχειρηματολογίας μας.

“Ας επανέλθουμε στό μαντήλι μας και στό ρολόι μας σέ πτώση για τόν έξωτερικό παρατηρητή πέφτουν και τά δύο μέ τήν ίδια επιτάχυνση. Αλλά τό ίδιο συμβαίνει για τόν άνεγκυστήρα, τά τοιχώματά του, τό δάπεδό του και τήν όροφή του. Έτσι, ή απόσταση ανάμεσα στα δύο σώματα και στα δάπεδο δέ θά μεταβληθεί. Για τόν έξωτερικό παρατηρητή τά δύο σώματα μένουν ακριβώς όπου ήσαν όταν τά άφησε νά πέσουν. Μπορεί νά άγνοήση τό πεδίο βαρύτητας, έφ’ όσον ή περίπτωσή του βρίσκεται στό έξωτερικό του ΣΣ του. Βρίσκει ότι καμιά δύναμη δέν ενεργεί στό έξωτερικό του άνεγκυστήρα. Αν ό παρατηρητής προσδώσει μιά κίνηση σ’ ένα σώμα προς μιά όποιαδήποτε διεύθυνση, λ.χ. προς τά επάνω ή προς τά κάτω, τό σώμα

κινείται πάντοτε όμοιόμορφα, όσο δέν προσκρούει στην όροφή ή στο πάτωμα του άνεγκυστήρα. Μέ λίγα λόγια, οί νόμοι τής κλασσικής μηχανικής ισχύουν για τόν έξωτερικό παρατηρητή. Όλα τά σώματα συμπεριφέρονται σύμφωνα μέ τόν νόμο τής αδρανείας. Το νέο μας ΣΣ, άνστηρά δεμένο μέ τόν άνεγκυστήρα σέ ελεύθερη πτώση διαφέρει από τό ΣΣ αδρανείας μόνο σ’ ένα σημείο. Σέ ένα ΣΣ αδρανείας, ένα σώμα σέ κίνηση επί του όποιου δέν ενεργεί καμιά έξωτερική δύναμη, θά κινείται μέ όμοιόμορφη άτέρμονα κίνηση. Το ΣΣ αδρανείας όπως παριστάνεται από τήν κλασσική φυσική δέν έχει περιορισμό ούτε στο χώρο ούτε στο χρόνο. Η περίπτωση του παρατηρητή μέσα στον άνεγκυστήρα μας είναι άσπτόσο διαφορετική. Ο χαρακτήρας αδρανείας του ΣΣ του είναι περιορισμένος στο χώρο και στο χρόνο. Αργά ή γρήγορα τό σώμα σέ όμοιόμορφη κίνηση θά προσκρούσει σ’ ένα τοίχωμα του άνεγκυστήρα και ή όμοιόμορφη κίνησή του θά καταστραφεί. Αργά ή γρήγορα, ό άνεγκυστήρας θά προσκρούσει στο έδαφος και οί παρατηρητές και τά πειράματά τους θά καταστραφούν. Το ΣΣ δέν είναι παρά μιά «έκδοση τσέπης» ενός πραγματικού ΣΣ αδρανείας.

“Ο τοπικός αυτός χαρακτήρας του ΣΣ είναι έντελώς ουσιαστικής. Αν ό φανταστικός άνεγκυστήρας μας έκτεινόταν από τόν βόρειο πόλο ως τόν ίσημερινό, και αν άφίναμε νά πέσει τό μαντήλι πάνω απ’ τό βόρειο πόλο και τό ρολόι πάνω απ’ τόν ίσημερινό, τότε τά δύο σώματα δέ θά είχαν για τόν έξωτερικό παρατηρητή τήν ίδια επιτάχυνση, δέ θά ήταν σέ στάση τό ένα σχετικά μέ τό άλλο. Όλος ό συλλογισμός μας θά ήταν σφαλρός. Οί διαστάσεις του άνεγκυστήρα πρέπει νά περιοριστούν μέ τέτοιο τρόπο ώστε νά μπορούμε νά υποθέσουμε ισότητα επιτάχυνσης όλων των σωμάτων, σχετικά μέ τόν έξωτερικό παρατηρητή.

Μέ τόν περιορισμό αυτό τό ΣΣ περιβάλλεται μ’ ένα χαρακτήρα αδρανείας για τόν έξωτερικό παρατηρητή. Μπορούμε τουλάχιστο νά υποδείξουμε ένα ΣΣ όπου ισχύουν όλοι οί φυσικοί νόμοι, αν και είναι περιορισμένο, στο χρόνο και στο χώρο. Αν φαντασθούμε ένα άλλο ΣΣ, ένα άλλο άνεγκυστήρα μέ

ομοιόμορφη κίνηση σχετικά με τόν έξωτερικό παρατηρητή.

Με τόν περιορισμό αυτό τό ΣΣ περιβάλλεται μ' ένα χαρακτηήρα αδράνειας για τόν έσωτερικό παρατηρητή. Μπορούμε τουλάχιστο νά υποδείξουμε ένα ΣΣ όπου ισχύουν όλοι οί φυσικοί νόμοι, αν και είναι περιορισμένο στό χρόνο και στό χώρο." Αν φαντασθούμε ένα άλλο ΣΣ, ένα άλλο άνεγκυστήρα με ομοιόμορφη κίνηση σχετικά με τόν άνεγκυστήρα σέ έλεύθερη πτώση, τότε τά δύο αυτά ΣΣ θά είναι τοπικά συστήματα αδράνειας." Όλοι οί νόμοι είναι ακριβώς οί ίδιοι στό ένα και στό άλλο." Η μετάβαση άπ' τό ένα στό άλλο δίνεται με τό μετασχηματισμό του Lorentz.

Ό έξωτερικός παρατηρητής παρατηρεί τήν κίνηση του άνεγκυστήρα όπως και τών σωμάτων που βρίσκονται στό έσωτερικό του και διαπιστώνει ότι είναι σέ συμφωνία με τό νόμο έλξης του Νεύτωνα. Γι' αυτόν ή κίνηση δέν είναι ομοιόμορφη, αλλά έπιταχυνόμενη, εξ αίτίας τής ένέργειας του πεδίου βαρύτητας τής γής.

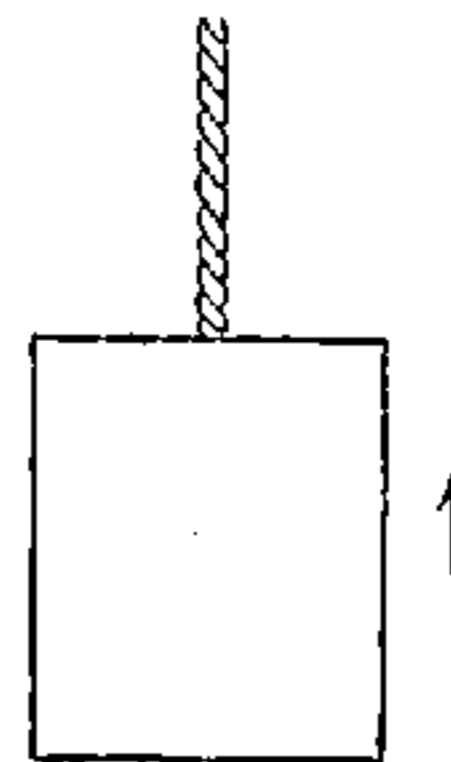
Όστόσο, οί φυσικοί που γεννήθηκαν και ανατράφηκαν μέσα στον άνεγκυστήρα θά σκεπτόταν με τελείως διαφορετικό τρόπο. Θα πίστευαν ότι κατέχουν ένα σύστημα αδράνειας και θά απέδιδαν όλους τους φυσικούς νόμους στον άνεγκυστήρα τους, δικαιολογώντας τήν πορεία τους από τό γεγονός ότι οί φυσικοί νόμοι στό ΣΣ τους περιβάλλονται μιά ιδιαίτερα άπλή μορφή. Θα ήταν έντελώς φυσικό γι' αυτούς νά υποθέσουν ότι ο άνεγκυστήρας τους βρίσκεται σέ στάση και ότι τό ΣΣ τους είναι ένα ΣΣ αδράνειας.

Είναι αδύνατο νά άποφανθοῦμε ανάμεσα στις διαφωνίες άπόψεων τών δύο παρατηρητών. Καθένας τους θά μπορούσε νά διεκδικήσει τό δικαίωμα νά αναφέρει όλα αυτά που έχουν συμβεί στό δικό του ΣΣ. Οί δύο περιγραφές τών γεγονότων θά μπορούσαν νά είναι έξ ίσου συνεκτικές.

Τό παράδειγμα αυτό μάς δείχνει ότι είναι δυνατή μία συνεκτική περιγραφή τών φυσικών φαινομένων σέ δύο διαφορετικά ΣΣ, ακόμη κι αν δέν κινούνται ομοιόμορφα τό ένα σέ

σχέση με τό άλλο." Αλλά για μιά τέτοια περιγραφή οφείλουμε νά έχουμε υπ' όψη μας τήν έλξη, κατασκευάζοντας για νά πούμε έτσι, τή «γέφυρα», που καθιστά δυνατή τή μετάβαση από ένα ΣΣ σ' ένα άλλο. Τό πεδίο έλξης υπάρχει για τόν έξωτερικό παρατηρητή, δέν υπάρχει για τόν έσωτερικό παρατηρητή. Για τόν έξωτερικό παρατηρητή υπάρχει ή έπιταχυνόμενη κίνηση του άνεγκυστήρα στό πεδίο έλξης, ενώ για τόν έσωτερικό παρατηρητή υπάρχει στάση και τό πεδίο έλξης είναι άνύπαρκτο." Αλλά ή «γέφυρα», δηλαδή τό πεδίο έλξης, που καθιστά δυνατή τήν περιγραφή δύο ΣΣ, στηρίζεται σέ μιά πολύ σπουδαία βάση: στην ίσοδυναμία τής μάζας βάρους και τής μάζας αδράνειας. Χωρίς αυτόν τό μίτο τής 'Αριάδνης, που έμεινε άγνωστος στην κλασσική μηχανική, ο παρών συλλογισμός μας θά ήταν τελείως σφαλερός.

"Ας φαντασθούμε τώρα ένα κάπως διαφορετικό έξιδανικευμένο πείραμα." Ας υποθέσουμε ένα ΣΣ όπου νά ισχύει ο νόμος τής αδράνειας." Έχουμε ήδη περιγράψει τί συμβαίνει μέσα σ' ένα άνεγκυστήρα που βρίσκεται σ' ένα τέτοιο ΣΣ." Αλλά ας αλλάξουμε τήν εικόνα μας." Ένα έξωτερικό πρόσωπο δένει ένα σχοινί στη στέγη του άνεγκυστήρα και τραβάει με σταθερή



δύναμη προς τη διεύθυνση που δείχνει το σχέδιό μας. Λίγο μᾶς ενδιαφέρει πῶς μπορεί νά γίνει αυτό. Ἐφ' ὅσον οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς ἰσχύουν σ' αὐτό τό ΣΣ, ὁ ἀνεγκυστήρας κινεῖται μέ μιᾶ σταθερή ἐπιτάχυνση πρὸς τὴ διεύθυνση τῆς κίνησης. Ἄς ἀκούσουμε τώρα τὴν ἐξήγηση πού δίνουν ὁ ἐσωτερικός καὶ ὁ ἐξωτερικός παρατηρητῆς γιὰ τὰ φαινόμενα πού συμβαίνουν μέσα στὸν ἀνεγκυστήρα.

*Ἐξωτερικός παρατηρητῆς:* Τό ΣΣ μου εἶναι ἓνα ΣΣ ἀδρανείας. Ὁ ἀνεγκυστήρας μου κινεῖται μέ μιᾶ σταθερή ἐπιτάχυνση, ἐξ αἰτίας τῆς σταθερῆς δύναμης πού ἐνεργεῖ πάνω του. Ὁ ἐσωτερικός παρατηρητῆς εἶναι σέ ἀπόλυτη κίνηση, γι' αὐτὸν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς δέν ἰσχύουν.

Δέ βρίσκει ὅτι σώματα πού δέν ὑφίστανται τὴν ἐνέργεια καμιάς δύναμης εἶναι σέ στάση. Ἄν ἀφήσουν νά πέσει ἓνα σῶμα, προσκρούει εὐθύς στό δάπεδο τοῦ ἀνεγκυστήρα, δεδομένου ὅτι τό δάπεδο ἀνεβαίνει πρὸς τό σῶμα. Αὐτό συμβαίνει ἀκριβῶς μέ τὸν ἴδιο τρόπο γιὰ ἓνα ρολοῖ καὶ γιὰ ἓνα μαντήλι. Εἶναι παράξενο ἀλλά μοῦ φαίνεται ὅτι ὁ ἐσωτερικός παρατηρητῆς δέν εἶναι σέ θέση νά ἐγκαταλείψει τό «δάπεδο», γιατί ἂν κάνει ἓνα πηδημα, ὁ ἀνεγκυστήρας πού ἀνεβαίνει τὸν φθάνει ἀμέσως.

*Ὁ ἐσωτερικός παρατηρητῆς:* Δέ βλέπω κανένα λόγο νά πιστεύω ὅτι ὁ ἀνεγκυστήρας μου εἶναι σέ ἀνάλογη κίνηση. Παραδέχομαι, ὅτι τό ΣΣ μου, αὐστηρά συνδεδεμένο μέ τὸν ἀνεγκυστήρα, δέν εἶναι πραγματικά ἓνα σύστημα ἀδρανείας, ἀλλά δέν πιστεύω ὅτι αὐτό ἔχει τὴν παραμικρὴ σχέση μέ τὴν ἀπόλυτη κίνηση. Τό ρολοῖ μου, τό μαντήλι μου καὶ ὅλα τὰ ἄλλα σώματα πέφτουν, γιατί ὁ ἀνεγκυστήρας βρίσκεται σ' ἓνα πεδίο ἐλξης. Διαπιστώνω ἀκριβῶς τὰ ἴδια εἶδη κινήσεων μ' ἓνα ἄνθρωπο πούναι πάνω στή Γῆ. Τὰ ἐξηγεῖ ἀπλούστατα μέ τὴν ἐνέργεια ἑνός πεδίου ἐλξης καὶ αὐτό εἶναι ἐξ ἴσου ἀληθινὸ γιὰ μένα.

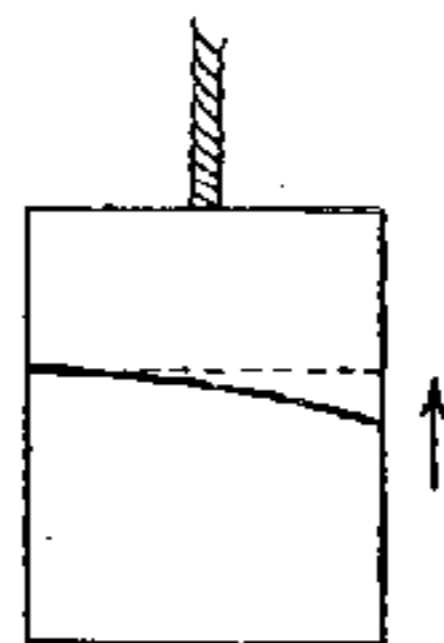
Αὐτές οἱ δύο περιγραφές εἶναι τελείως λογικές καὶ δέν ὑπάρχει δυνατότητα νά ἀποφασίσουμε ποιά εἶναι ἀληθινή.

Μποροῦμε νά ὑποθέσουμε τὴ μιᾶ ἢ τὴν ἄλλη σάν ἐξήγηση τῶν φαινομένων μέσα στὸν ἀνεγκυστήρα: ἢ τὴν μὴ ὁμοιόμορφη κίνηση καὶ τὴν ἀπουσία πεδίου βαρύτητας μέ τὸν ἐξωτερικό παρατηρητῆ, ἢ τὴ στάση καὶ τὴν παρουσία πεδίου βαρύτητας μέ τὸν ἐσωτερικό παρατηρητῆ.

Ὁ ἐξωτερικός παρατηρητῆς θά μπορούσε νά ὑποθέσει ὅτι ὁ ἀνεγκυστήρας εἶναι σέ «ἀπόλυτη» κίνηση μὴ ὁμοιόμορφη. Ἄλλά μιᾶ κίνηση πού μποροῦμε νά ἀπαλείψουμε ὑποθέτοντας τὴν ἐνέργεια ἑνός ἐλκτικῶν πεδίου δέν μπορεῖ νά θεωρηθεῖ σάν ἀπόλυτη.

Ἐπάρχει ἴσως τρόπος νά βγοῦμε ἀπ' τό διαφορούμενο τῶν δύο αὐτῶν διαφορετικῶν περιγραφῶν καὶ νά ἀποφασίσουμε ὑπὲρ τῆς μιᾶς ἀπορρίπτοντας τὴν ἄλλη. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι μιᾶ φωτεινὴ ἀκτίνα εἰσχωρεῖ ὀριζόντια ἀπὸ ἓνα παράθυρο στὸν ἀνεγκυστήρα καὶ πέφτει στό ἀπέναντι τοίχωμα ὑστερα ἀπὸ ἓνα πολὺ βραχὺ διάστημα χρόνου. Ἄς δοῦμε τώρα πῶς θά ὀριστεῖ ἀπὸ τοὺς δύο παρατηρητῆς ἢ τροχιά τῆς φωτεινῆς ἀκτίνας.

Ὁ ἐξωτερικός παρατηρητῆς πού νομίζει ὅτι ὁ ἀνεγκυστήρας ἐκτελεῖ ἐπιταχυνομένη κίνηση, θά συλλογιζόταν ὡς ἐξῆς: Ἡ



φωτεινή ακτίνα εισχωρεί οριζόντια απ' το παράθυρο και κινείται με εὐθύγραμμη κίνηση με σταθερή ταχύτητα πρὸς τὸ ἀντίθετο τοίχωμα. Ἀλλά ὁ ἀνελκυστήρας κινεῖται πρὸς τὰ ἔπάνω καὶ ὅσο τὸ φῶς κινεῖται πρὸς τὸ τοίχωμα ἀλλάζει θέση. Ἡ ἀκτίνα θὰ πέσει συνεπῶς ὄχι στὸ σημεῖο πού εἶναι ἀκριβῶς ἀπέναντι στὸ σημεῖο τῆς εἰσόδου, ἀλλά λίγο πῶ κάτω. Ἡ διαφορά θὰ εἶναι πολὺ μικρὴ, ἀλλά αὐτὸ δὲν τὴν κάνει νὰ μὴν ὑπάρχει καὶ ἡ φωτεινὴ ἀκτίνα διαδίδεται σχετικὰ μὲ τὸν ἀνελκυστήρα ὄχι σὲ εὐθεία γραμμὴ ἀλλά σὲ καμπύλη. Ἡ διαφορά ὀφείλεται στὴν ἀπόσταση πού διέτρεξε ὁ ἀνελκυστήρας στὸ χρόνο πού ἡ ἀκτίνα διέσχισε τὸ ἐσωτερικόν.

Ὁ ἐσωτερικὸς παρατηρητὴς πού πιστεύει πὼς τὸ ἑλκτικὸ πεδίο ἐνεργεῖ σ' ὅλα τὰ ἀντικείμενα τοῦ ἀνελκυστήρα, θὰ ἔλεγε: δὲν ὑπάρχει ἐπιταχυνόμενη κίνηση τοῦ ἀνελκυστήρα, ἀλλά μόνο ἡ ἐνέργεια τοῦ πεδίου ἔλξης. Μιὰ φωτεινὴ ἀκτίνα δὲν ἔχει βάρους καὶ γι' αὐτὸ δὲν ἐπηρεάζεται ἀπ' τὸ πεδίο ἔλξης. Ἄν ἐκπεμφθεῖ σὲ ὀριζόντια διεύθυνση θὰ πέσει στὸ τοίχωμα σὲ σημεῖο ἀκριβῶς ἀπέναντι ἀπὸ τὸ σημεῖο πού μπήκε.

Ἀπὸ τὴ συζήτηση αὐτὴ φαίνεται νὰ προκύπτει ὅτι ὑπάρχει δυνατότητα νὰ ὑποφανθοῦμε ἀνάμεσα στὶς δύο αὐτὲς ἀντίθετες ἀπόψεις ἕφ' ὅσον τὸ φαινόμενο θὰ ἦταν διαφορετικὸ γιὰ τοὺς δύο παρατηρητὲς.

Ἄν δὲν ὑπάρχει τίποτε τὸ παράλογο σὲ κάθε ἐξήγηση πού ἀναφέραμε, ὅλος ὁ προγενέστερος συλλογισμὸς μας εἶναι χωρὶς ἀξία καὶ δὲν μπορούμε νὰ περιγράψουμε ὅλα τὰ φαινόμενα μὲ δύο τρόπους ἐξ ἴσου λογικούς μὲ καὶ χωρὶς πεδίο βαρύτητας.

Εὐτυχῶς ὅμως ὑπάρχει ἓνα σοβαρὸ λάθος στὸ συλλογισμό τοῦ ἐσωτερικοῦ παρατηρητοῦ, πού σώζει τὸ προγενέστερο συμπέρασμα μας. Ἐλεγε: «Μιὰ φωτεινὴ ἀκτίνα δὲν ἔχει βάρους καὶ γι' αὐτὸ δὲ θὰ ἐπηρεαστεῖ ἀπὸ τὸ πεδίο ἔλξης.» Αὐτὸ δὲν μπορεῖ νὰ ἀληθεύει. Μιὰ ἀκτίνα φωτὸς μεταφέρει ἐνέργεια καὶ αὐτὴ ἔχει μάζα. Ἀλλά κάθε ἀδρανῆς μάζα ἔλκεται ἀπὸ τὸ πεδίο βαρύτητας δεδομένου ὅτι ἡ ἀδρανῆς μάζα καὶ ἡ μάζα βάρους

εἶναι ἰσοδύναμες. Μιὰ ἀκτίνα φωτὸς θὰ κυρτωθεῖ μέσα σ' ἓνα πεδίο βαρύτητας ἀκριβῶς ὅπως θὰ ἔκανε ἓνα σῶμα ἐκτοξευμένο ὀριζόντια μὲ ταχύτητα ἴση μὲ τὴν ταχύτητα τοῦ φωτὸς. Ἄν ὁ ἐσωτερικὸς παρατηρητὴς εἶχε συλλογισθεῖ σωστά καὶ εἶχε πάρει ὅπ' ὄψη τὴν κύρτωση τῶν φωτεινῶν ἀκτίνων μέσα σ' ἓνα ἑλκτικὸ πεδίο, τὰ ἀποτελέσματα τοῦ θὰ ἦταν ἀκριβῶς τὰ ἴδια μὲ τοῦ ἐξωτερικοῦ παρατηρητῆ.

Τὸ πεδίο βαρύτητας τῆς Γῆς εἶναι φυσικὰ πολὺ ἀδύνατο γιὰ νὰ μπορεῖ νὰ ἀποδειχθεῖ ἀπ' εὐθείας μὲ τὸ πείραμα τῆς κύρτωσης τῶν φωτεινῶν ἀκτίνων. Ἀλλά οἱ περίφημες παρατηρήσεις πού ἔγιναν κατὰ τὴν ἡλιακὴ ἔκλειψη τοῦ 1918 καὶ οἱ ἀκόλουθες δείχνουν μὲ τρόπο σαφῆ ἂν καὶ ἔμμεσο, τὴν ἐπίδραση τοῦ πεδίου ἔλξης πάνω στὴν πορεία μιᾶς φωτεινῆς ἀκτίνας.

Ἀπ' τὰ παραδείγματα αὐτὰ προκύπτει ὅτι ἡ ἐλπίδα γιὰ τὴ διατύπωση μιᾶς φυσικῆς σχετικότητας εἶναι καλὰ θεμελιωμένη. Ἀλλά γιὰ νὰ γίνει αὐτὸ πρέπει πρῶτα νὰ καταπιαστοῦμε μὲ τὸ πρόβλημα τῆς βαρύτητας.

Τὸ παράδειγμα τοῦ ἀνελκυστήρα μᾶς ἔδειξε τὴ συνεκτικότητα τῶν δύο περιγραφῶν. Ἡ μὴ ὁμοιόμορφη κίνηση μπορεῖ ἢ ὄχι νὰ ὑποτεθεῖ. Μποροῦμε νὰ ἀπαλείψουμε ἀπὸ τὰ παραδείγματα μᾶς τὸν ἀπόλυτο χρόνο μὲ ἓνα πεδίο ἔλξης. Ἀλλά τότε δὲν ὑπάρχει τίποτε τὸ ἀπόλυτο σὲ μιὰ μὴ ὁμοιόμορφη κίνηση· τὸ ἑλκτικὸ πεδίο μπορεῖ νὰ ἀπαλειφθεῖ ἐντελῶς.

Τὰ φαντάσματα τῆς ἀπόλυτης κίνησης καὶ ἐνός ἀπολύτου ΣΣ ἀδρανείας μποροῦν νὰ ἐκδιωχθοῦν ἀπὸ τὴ φυσικὴ, καὶ ἡ οἰκοδόμησις μιᾶς νέας φυσικῆς σχετικότητας ἀποβαίνει δυνατή. Τὰ ἐξιδανικευμένα μᾶς πειράματα δείχνουν πὼς τὸ πρόβλημα τῆς γενικῆς σχετικότητας εἶναι στενὰ συνδεδεμένο μὲ τὸ πρόβλημα τῆς ἔλξης καὶ πὼς ἡ ἰσοδυναμία τῆς μάζας βάρους μὲ τὴν ἀδρανῆ μάζα εἶναι τόσο σημαντικὴ γι' αὐτὴ τὴ συνάρτηση. Εἶναι φανερό ὅτι ἡ λύση τοῦ προβλήματος τῆς ἔλξης μέσα στὴ θεωρία τῆς γενικῆς σχετικότητας πρέπει νὰ διαφέρει ἀπ' τὴ λύση πού ἔδωσε ὁ Νεύτωνας. Οἱ νόμοι τῆς ἔλξης ὅπως ὅλοι

οί νόμοι τῆς φύσης πρέπει νά εἶναι διατυπωμένοι γιά ὅλα τά δυνατά ΣΣ, ἐνῶ οἱ νόμοι τῆς κλασσικῆς μηχανικῆς, ὅπως διατυπώθηκαν ἀπ' τόν Νεύτωνα, ἰσχύουν μόνο γιά τά ΣΣ ἀδρανείας.

## Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ

Τό παράδειγμα πού θά πάρουμε εἶναι ἀκόμη πύο φανταστικό ἀπό ἐκεῖνο τοῦ ἀνεγκυστῆρα σέ ἐλεύθερη πτώση. Ἐχουμε νά ἀντιμετωπίσουμε ἕνα νέο πρόβλημα, τό πρόβλημα τῆς συνάρτησης ἀνάμεσα στή θεωρία τῆς γενικῆς σχετικότητας καί τῆς γεωμετρίας. Ἄς ἀρχίσουμε ἀπ' τήν περιγραφή ἑνός κόσμου ὅπου ζοῦν μόνο ὄντα μέ δύο διαστάσεις. Οἱ κινηματογραφικές ταινίες μᾶς συνήθισαν νά βλέπουμε ὄντα μέ δύο διαστάσεις νά ὀροῦν πάνω σέ μιά ὀθόνη μέ δύο διαστάσεις. Ἄς φαντασθοῦμε τώρα ὅτι αὐτά τά φαντάσματα, δηλαδή οἱ ἠθοποιοί τῆς ὀθόνης, ὑπάρχουν στήν πραγματικότητα, ὅτι ἔχουν τήν ἱκανότητα νά σκέπτονται, ὅτι μποροῦν νά δημιουργήσουν τή δική τους ἐπιστήμη, καί ὅτι γι' αὐτούς ἡ ὀθόνη μέ δύο διαστάσεις ἀντιπροσωπεύει τό γεωμετρικό χῶρο. Τά ὄντα αὐτά εἶναι ἀνίκανα νά φαντασθοῦν κατά τρόπο συγκεκριμένο, ἕνα χῶρο μέ τρεῖς διαστάσεις, ὅπως ἐμεῖς ἀκριβῶς εἴμαστε ἀνίκανοι νά φαντασθοῦμε ἕνα χῶρο μέ τέσσερις διαστάσεις. Μποροῦν νά παρεκκλίνουν ἀπό μιά εὐθεία γραμμή, ξέρουν τί εἶναι κύκλος ἀλλά εἶναι ἀνίκανοι νά κατασκευάσουν μιά σφαῖρα, γιατί, γιά νά τό κάνουν πρέπει νά ἐγκαταλείψουν τήν ὀθόνη τους μέ τίς δύο διαστάσεις. Βρισκόμαστε κι ἐμεῖς σέ παρόμοια θέση. Εἴμαστε ἱκανοί νά παραμορφώσουμε καί νά κυρτώσουμε γραμμές καί ἐπιφάνειες, ἀλλά δύσκολα μποροῦμε νά φαντασθοῦμε ἕνα τριδιάστατο χῶρο παραμορφωμένο καί κυρτωμένο.

Ἄπ' τήν καθημερινή πρακτική, τή σκέψη καί τό πείραμα, θά μποροῦσαν ἐνδεχομένως τά φαντάσματά μας νά πάρουν μιά τέλεια γνώση τῆς διδιάστατης εὐκλείδειου γεωμετρίας. Π.χ. θά μποροῦσαν νά ἀποδείξουν ὅτι τό ἄθροισμά τῶν τριῶν γωνιῶν

ἑνός τριγώνου ἰσοῦται μέ δύο ὀρθές. Θά μποροῦσαν νά κατασκευάσουν δύο ὀμόκεντρος κύκλους, τόν ἕνα πολύ μικρό καί τόν ἄλλο μεγάλο. Θά εὑρισκαν ὅτι ὁ λόγος τῶν δύο περιφερειῶν πού εἶναι ἴσος μέ τό λόγο τῶν δύο ἀκτίνων, ἀποτελεσμα πού εἶναι χαρακτηριστικό γιά τήν εὐκλείδειο γεωμετρία. Ἄν ἡ ὀθόνη ἦταν ἀπεριόριστα μεγάλη, τά φαντάσματά μας θά διαπίστωναν ὅτι πηγαίνοντας κατ' εὐθείαν μπροστά δέ θά ἐπιστρέψουν ποτέ στήν ἀφετηρία τους.

Ἄς φαντασθοῦμε τώρα ὅτι κάποια ἀλλαγή μεσουλαβεῖ στίς συνθηκῆς ζωῆς τῶν διδιάστατων αὐτῶν ὄντων. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι κάποιος ἀπ' ἔξω, ἀπ' τήν «τρίτη διάσταση», τό μεταφέρει ἀπό τήν ὀθόνη πάνω στήν ἐπιφάνεια μιάς πελώριας σφαίρας. Ἄν αὐτά τά φαντάσματα εἶναι πολύ μικρά σέ σχέση μέ τήν ὀλική ἐπιφάνεια, ἄν δέν ἔχουν κανένα μέσο νά ἐπικοινωνήσουν ἀπό ἀπόσταση καί δέν μποροῦν νά πᾶνε πολύ μακριά, δέν θά ἀντιληφθοῦν καν τήν ἀλλαγή πού μεσολάβησε. Τό ἄθροισμα τῶν γωνιῶν τῶν μικρῶν τριγῶνων εἶναι πάντα ἴσο μέ δύο ὀρθές γωνίες. Σέ δύο μικρούς ὀμόκεντρος κύκλους ὁ λόγος τῶν περιφερειῶν εἶναι πάντα ἴσος μέ τόν λόγο τῶν ἀκτίνων. Ταξιδεύοντας σέ εὐθεία γραμμή δέ θά ἐπανέλθουν ποτέ στήν ἀφετηρία τους.

Ἄς ὑποθέσουμε ὅμως ὅτι αὐτά τά φαντάσματα ἀναπτύσσουν μέ τόν καιρό τίς θεωρητικές καί τεχνικές τους γνώσεις, ὅτι ἐφευρίσκουν μέσα συγκοινωνίας πού τοῦς ἐπιτρέπουν νά διατρέχουν μέ ταχύτητα μεγάλες ἀποστάσεις. Θά διαπιστώσουν τότε ὅτι πηγαίνοντας κατ' εὐθείαν ἐμπρός θά ἐπανέλθουν τελικά στήν ἀφετηρία τους. «Κατ' εὐθείαν ἐμπρός» σημαίνει κατὰ μήκος τοῦ μεγάλου κύκλου τῆς σφαίρας. Θά διαπιστώσουν ἀκόμα ὅτι ὁ λόγος τῶν περιφερειῶν δύο ὀμοκέντρων κύκλων δέν εἶναι ἴσος μέ τόν λόγο τῶν ἀκτίνων των, ἐάν ἡ μιά ἀπ' αὐτές εἶναι μικρή καί ἡ ἄλλη μεγάλη.

Ἄν εἶναι συντηρητικοί, ἄν ἡ εὐκλείδειος γεωμετρία διδάχθηκε σ' αὐτούς γιά ὀλόκληρες γενιές τότε πού δέ μποροῦσαν νά κάνουν μακρυνά ταξίδια καί πού ἡ γεωμετρία τους ἦταν σύμφωνη μέ τά παρατηρούμενα γεγονότα, θά κάνουν ἀσφαλῶς

δες τις δυνατές προσπάθειες για να της μείνουν προσκολλημένοι, παρά την αληθοφάνεια των μετρήσεων τους. Θα επιχειρούσαν να καταστήσουν τα φυσικά φαινόμενα υπεύθυνα αυτής της ασυμφωνίας. Θα μπορούσαν π.χ. να πουν ότι οι αλλαγές της θερμοκρασίας καθορίζουν μια παραμόρφωση των γραμμών και κατά συνέπεια μια απόκλιση απ' την εὐκλείδειο γεωμετρία. Αλλά αργά ή γρήγορα θα ανακαλύψουν ότι υπάρχει πολύ πιο λογικός και πειστικός τρόπος να εξηγήσουν αυτά τα γεγονότα. Ενδεχομένως θα φθάσουν στη γνώση ότι ο κόσμος τους είναι πεπερασμένος και ότι διέπεται από γεωμετρικές αρχές διαφορετικές απ' αυτές που μάθανε. Θα κατανοήσουν ότι παρ' όλη την αδυναμία τους να τον φανταστούν έτσι, ο κόσμος τους είναι μια σφαιρική επιφάνεια με δύο διαστάσεις. Θα αρχίσουν να μαθαίνουν νέες αρχές της γεωμετρίας, οι οποίες αν και διαφέρουν απ' τις αρχές του Εὐκλείδη, μπορούν ωστόσο να διατυπωθούν τόσο συνεκτικά και λογικά όσο και εκείνες για τον διδιάστατο κόσμο τους. Για τη νέα γενιά που γνώρισε τη σφαιρική γεωμετρία, η παλιά εὐκλείδειος γεωμετρία θα φαίνεται πιο περίπλοκη και τεχνητή, δεδομένου ότι δεν συμφωνεί με τα παρατηρούμενα γεγονότα.

“Ας επανέλθουμε τώρα στα τριδιάστατα όντα του κόσμου μας.

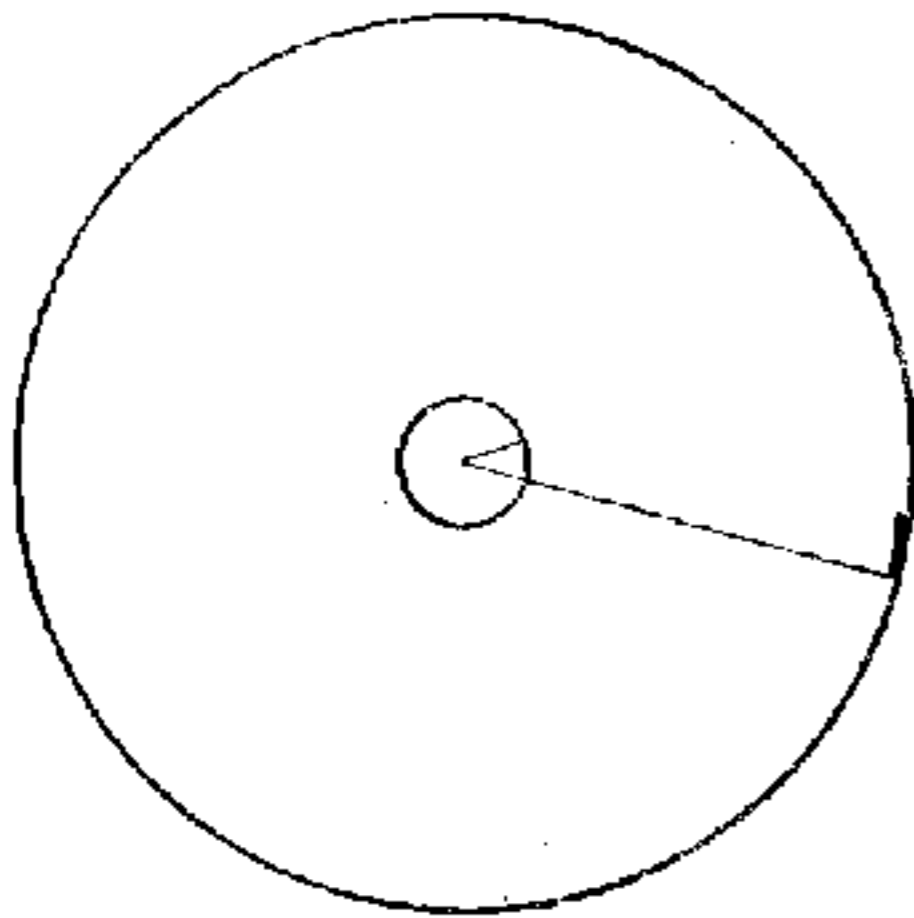
Τι σημαίνει η βεβαίωση ότι ο τριδιάστατος χώρος μας έχει εὐκλείδειο χαρακτήρα; Σημαίνει ότι όλες οι προτάσεις της εὐκλείδειας γεωμετρίας λογικά αποδεδειγμένες, μπορούν επίσης να βεβαιωθούν και απ' το πραγματικό πείραμα. Μπορούμε με σκληρά σώματα ή φωτεινές ακτίνες να κατασκευάσουμε αντικείμενα που αντιστοιχούν στα εξιδανικευμένα αντικείμενα της εὐκλείδειου γεωμετρίας. “Η ακμή ενός χάρακα ή μια φωτεινή ακτίνα αντιστοιχούν στη γραμμή” το άθροισμα των γωνιών ενός τριγώνου κατασκευασμένου με λεπτά άκαμπτα ραβδιά είναι ίσο με δύο ορθές γωνίες” ο λόγος των ακτίνων δύο ομοκέντρων κύκλων κατασκευασμένων με λεπτά άκαμπτα σύρματα είναι ίσος με τον λόγο των περιφερειών τους. Όταν ερμηνεύεται με τέτοιο τρόπο η γεωμετρία του Εὐκλείδη γίνεται

ένα κεφάλαιο της φυσικής, στ' αλήθεια πολύ απλό.

Αλλά μπορούμε να φαντασθούμε ότι διατυπώθηκαν ασυμφωνίες, π.χ. ότι το άθροισμα των γωνιών ενός μεγάλου τριγώνου κατασκευασμένου με ραβδιά, τα όποια είχαμε πολλούς λόγους να θεωρούμε άκαμπτα, δεν είναι ίσο με δύο ορθές γωνίες. Δεδομένου ότι έχουμε ήδη εξοικειωθεί με την ιδέα να παριστάνουμε συγκεκριμένα τα αντικείμενα της εὐκλείδειου γεωμετρίας με άκαμπτα σώματα, θα αποδίδαμε πιθανώς σε κάποια φυσική δύναμη την απρόοπτη και ανώμαλη αυτή συμπεριφορά των ραβδιών μας. Θα επιχειρούσαμε να καθορίσουμε τη φύση της δύναμης αυτής και την επίδρασή της σε άλλα φαινόμενα. Για να σώσουμε την εὐκλείδειο γεωμετρία θα φθάναμε να κατηγορήσουμε τα αντικείμενα ότι δεν είναι πραγματικά άκαμπτα, πράγμα που κάνει να μην ανταποκρίνονται ακριβώς στα αντικείμενα της γεωμετρίας. Θα προσπαθούσαμε να βρούμε καλύτερα σώματα που να συμπεριφέρονται με τον τρόπο που προβλέπει η εὐκλείδειος θεωρία. “Αν ωστόσο δεν πετυχαίναμε να συνδυάσουμε την εὐκλείδειο γεωμετρία και τη φυσική σε τρόπο που να πετύχουμε μια απλή και συνεκτική εικόνα θα έπρεπε να εγκαταλείψουμε την ιδέα ότι ο χώρος μας είναι εὐκλείδειος και να ζητήσουμε μια εικόνα πιο σύμφωνη με την πραγματικότητα, κάνοντας πιο γενικές υποθέσεις πάνω στο γεωμετρικό χαρακτήρα του χώρου μας.

Η ανάγκη να το κάνουμε μπορεί να διαφωτιστεί από ένα εξιδανικευμένο πείραμα που δείχνει πώς μια πραγματικά φυσική σχετικότητας δεν είναι δυνατό να θεμελιώνεται πάνω στην εὐκλείδειο γεωμετρία. Ο συλλογισμός μας θα μεταχειριστεί ωφέλιμα τα ήδη αποκτηθέντα αποτελέσματα, που αφορούν τα ΣΣ αδρανείας και τη θεωρία της περιορισμένης σχετικότητας.

“Ας φαντασθούμε ένα μεγάλο δίσκο που πάνω του είναι σχεδιασμένοι δύο ομόκεντροι κύκλοι, ο ένας πολύ μικρός κι ο άλλος πολύ μεγάλος, και που το κοινό κέντρο συμπίπτει με το κέντρο του δίσκου. Ο δίσκος, όπου βρίσκεται ένας παρατηρητής, κινείται με ταχεία περιστροφική κίνηση σχετικά με ένα εξωτερικό παρατηρητή. Υποθέτουμε εξ άλλου ότι το ΣΣ του



παρατηρητή είναι ένα ΣΣ αδρανείας. Ο εξωτερικός παρατηρητής μπορεί να σχεδιάσει στο ΣΣ του δύο κύκλους ίδιου μεγέθους με τους κύκλους του περιστρεφόμενου δίσκου και συμπίπτοντας μ' αυτούς. Η ευκλείδειος γεωμετρία ισχύει στο ΣΣ του, εφ' όσον είναι ένα ΣΣ αδρανείας· έτσι θα βρει ότι ο λόγος των περιφερειών είναι ίσος με τον λόγο των ακτίνων. Αλλά τί συμβαίνει με τον παρατηρητή επί του δίσκου; Από την άποψη της κλασικής φυσικής και επίσης της θεωρίας της περιορισμένης σχετικότητας, το ΣΣ του είναι απαγορευμένο. Αλλά αν έχουμε την πρόθεση να βρούμε νέες μορφές για τους φυσικούς νόμους, που να ισχύουν σε οποιοδήποτε ΣΣ, οφείλουμε να πάρουμε εξ ίσου στα σοβαρά τον παρατηρητή επί του δίσκου όπως και τον εξωτερικό παρατηρητή. Ο παρατηρητής του δίσκου που επιχειρεί να καθορίσει με τη μέτρηση το μήκος των περιφερειών και των ακτίνων πάνω στον περιστρεφόμενο δίσκο, εξυπηρετείται απ' τον ίδιο χάρακα που χρησιμοποιεί και ο εξωτερικός παρατηρητής. «Τόν ίδιο» σημαίνει ή

πραγματικά τόν ίδιο, που ο εξωτερικός παρατηρητής μεταβιβάζει στον παρατηρητή του δίσκου, ή τόν ένα από τους δύο χάρακες, που έχουν τό ίδιο μήκος όταν ήρεμούν σε ένα ΣΣ.

Ο παρατηρητής του δίσκου αρχίζει απ' τη μέτρηση της ακτίνας της περιφέρειας του μικρού κύκλου. Το αποτέλεσμα του πρέπει να είναι τό ίδιο με του εξωτερικού παρατηρητή. Ο άξονας γύρω απ' τον οποίο στρέφεται ο δίσκος περνά από τό κέντρο του. Τα κοντινά στο κέντρο μέρη του δίσκου έχουν πολύ μικρές ταχύτητες. Εάν ο κύκλος είναι αρκετά μικρός, μπορούμε με κάθε ασφάλεια, να εκφράσουμε την κλασική μηχανική και να αγνοήσουμε τη θεωρία της περιορισμένης σχετικότητας. Αυτό σημαίνει ότι ο χάρακας έχει τό ίδιο μήκος για τόν εξωτερικό παρατηρητή όπως και για κείνον του δίσκου και τό αποτέλεσμα των μετρήσεών τους θά είναι τό ίδιο και για τους δύο. Τώρα ο παρατηρητής του δίσκου μετρά την ακτίνα του μεγάλου κύκλου. Τοποθετημένος πάνω στην ακτίνα, ο χάρακας είναι σε κίνηση για τόν εξωτερικό παρατηρητή. Ωστόσο ένας τέτοιος χάρακας δε θά υποστεί συστολή και θά έχει τό ίδιο μήκος για τους δύο παρατηρητές, εφ' όσον η διεύθυνση της κίνησης είναι κάθετη στο χάρακα. Έτσι τρεις μετρήσεις, δύο των δύο ακτίνων και μία της μικρής περιφέρειας, είναι ίδιες και για τους δύο παρατηρητές. Αλλά δε συμβαίνει τό ίδιο και για την τέταρτη μέτρηση. Το μήκος της περιφέρειας του μεγάλου κύκλου θά είναι διαφορετικό για τους δύο παρατηρητές. Ο χάρακας τοποθετημένος πάνω στην περιφέρεια προς τη διεύθυνση της κίνησης θά φανεί μικρότερος στον εξωτερικό παρατηρητή αν τόν συγκρίνει με τόν δικό του ήρεμοχοντα χάρακα. Η ταχύτητα του μεγάλου κύκλου είναι πολύ μεγαλύτερη από κείνη του μικρού, και ή συστολή αυτή πρέπει να ληφθεί υπ' όψη. Αν, συνεπώς, εφαρμόσουμε τά αποτελέσματα της θεωρίας της περιορισμένης σχετικότητας, τό συμπέρασμα μας θά είναι: τό μήκος της μεγάλης περιφέρειας, που μετρήθηκε απ' τους δύο παρατηρητές, πρέπει να είναι διαφορετικό. Εφ' όσον ένα μόνο από τά τέσσερα μήκη που μετρήθη-

καν από τούς δύο παρατηρητές δέν έχει τήν ίδια αξία και για τούς δύο, ο λόγος τών δύο ακτίνων δέν μπορεί νά είναι ίσος μέ τόν λόγο τών δύο περιφερειών για τόν παρατηρητή του δίσκου όπως είναι για τόν εξωτερικό παρατηρητή. Αυτό σημαίνει ότι ο παρατηρητής του δίσκου δέν μπορεί νά βεβαιώσει τό κύρος τής εὐκλείδειου γεωμετρίας μέσα στό ΣΣ του.

Ύστερα ἀπ' τό ἀποτέλεσμα αυτό, ο παρατηρητής του δίσκου θά μπορούσε νά δηλώσει ότι δέν επιθυμεί νά εξετάζει ΣΣ όπου δέν ισχύει ἡ εὐκλείδειος γεωμετρία. Ἡ κατάρρευση τής τελευταίας αὐτῆς οφείλεται στήν ἀπόλυτη περιστροφή, στό γεγονός ότι τό ΣΣ της είναι κακό και ἀπαγορευμένο. Ἀλλά συλλογιζόμενος ἔτσι, ἀπορρίπτει τήν κυριώτερη ιδέα τής θεωρίας τής γενικῆς σχετικότητας. Ἐξ ἄλλου, ἄν θέλουμε νά ἀπορρίψουμε τήν ἀπόλυτη κίνηση και νά κρατήσουμε τήν ιδέα τής θεωρίας τής γενικῆς σχετικότητας, τότε ἡ φυσική πρέπει νά οικοδομηθεῖ στή βάση μιᾶς πύο γενικῆς γεωμετρίας ἀπό κείνη του Εὐκλείδη. Δέν ὑπάρχει τρόπος, ἄν ὄλα τά ΣΣ είναι παραδεκτά, νά διαφύγουμε αὐτή τή συνέπεια.

Οἱ μεταβολές πού εἰσάγονται ἀπό τή θεωρία τής γενικῆς σχετικότητας δέν περιορίζονται μόνο στό χῶρο. Στή θεωρία τής περιορισμένης σχετικότητας εἶχαμε ρολόγια σέ ἡρεμία σέ κάθε ΣΣ, συγχρονισμένα και μέ τόν ἴδιο ρυθμό, δηλαδή πού ἔδειχναν ταυτόχρονα τόν ἴδιο χρόνο. Τί συμβαίνει σ' ἕνα ρολοῖ μέσα σ' ἕνα ΣΣ πού δέν είναι ΣΣ ἀδρανείας; Τό ἐξιδανικευμένο πείραμα μέ τόν περιστρεφόμενο δίσκο θά μᾶς ἐξυπηρετήσει και πάλι. Ὁ ἐξωτερικός παρατηρητής ἔχει στό ΣΣ του ἀδρανείας τέλεια ρολόγια, πού ἐργάζονται ὄλα μέ τόν ἴδιο ρυθμό και είναι συγχρονισμένα. Ὁ παρατηρητής του δίσκου παίρνει δύο ρολόγια ἴδια μ' αὐτά και τοποθετεῖ τό ἕνα πάνω στή μικρή περιφέρεια και τό ἄλλο πάνω στή μεγάλη. Τό ρολοῖ τής μικρῆς περιφέρειας ἔχει μιᾶ πολύ μικρή ταχύτητα σχετικά μέ τόν ἐξωτερικό παρατηρητή. Μποροῦμε συνεπῶς χωρίς δισταγμό νά συμπεράνουμε ότι ο ρυθμός του θά είναι ἴδιος μέ του ἐξωτερικοῦ ρολοιοῦ. Ἀλλά τό ρολοῖ πού είναι τοποθετημένο στή μεγάλη περιφέρεια ἔχει μεγάλη τάχ-

τητα, πρῶγμα πού μεταβάλλει τό ρυθμό του σχετικά μέ τά ρολόγια του ἐξωτερικοῦ παρατηρητή και κατά συνέπεια και σχετικά μέ τό ρολοῖ τής μικρῆς περιφέρειας. Ἐτσι τά δύο περιστρεφόμενα ρολόγια θά ἔχουν διαφορετικούς ρυθμούς και, ἐφαρμόζοντας τά ἀποτελέσματα τής θεωρίας τής περιορισμένης σχετικότητας, βλέπουμε και πάλι ότι στό περιστρεφόμενο ΣΣ μας δέν μπορούμε νά κάνουμε καμιᾶ τακτοποίηση πού νά είναι ὁμοια μέ κείνες σέ ἕνα ΣΣ ἀδρανείας.

Γιά νά ἀποσαφηνίσουμε ποιά είναι τά συμπεράσματα πού μπορούμε νά βγάλουμε ἀπ' τά παραπάνω ὄπως και ἀπ' τά πειράματα πού περιγράψαμε προηγούμενα, ἄλλη μιᾶ φορά θά ἀφήσουμε νά μιλήσει ο παλιός φυσικός Α, πού πιστεύει στήν κλασσική φυσική και ο νεώτερος φυσικός Μ, πού γνωρίζει τή θεωρία τής γενικῆς σχετικότητας. Α είναι ο ἐξωτερικός παρατηρητής, τοποθετημένος σέ ἕνα ΣΣ ἀδρανείας, ἐνῶ Μ βρίσκεται ἐπί του περιστρεφόμενου δίσκου.

Α. — Στό δικό σας ΣΣ ἡ εὐκλείδειος γεωμετρία δέν ισχύει. Παρακολούθησα τήν πορεία τών μετρήσεών σας και συμφωνῶ ότι ο λόγος τών δύο περιφερειών δέν είναι στό δικό σας ΣΣ ἴσος μέ τόν λόγο τών δύο ακτίνων. Ἀλλ' αὐτό δείχνει ότι τό ΣΣ σας είναι ἕνα ΣΣ ἀπορριπτό. Ἀπ' ἐναντίας τό δικό μου ΣΣ είναι ἕνα ΣΣ ἀδρανείας και μπορῶ ἤσυχα νά ἐφαρμόσω τήν εὐκλείδειο γεωμετρία. Ὁ δίσκος σας είναι σέ ἀπόλυτη κίνηση και ἀποτελεῖ ἀπό τήν ἀποψη τής κλασσικῆς φυσικῆς, ἕνα ΣΣ ἀπαγορευμένο, όπου οἱ νόμοι τής μηχανικῆς δέν ισχύουν.

Μ. — Δέ θέλω νά ἀκούω νά μιλοῦν για ἀπόλυτη κίνηση. Τό ΣΣ μου είναι ὄσο καλό και τό δικό σας. Αὐτό πού παρατήρησα ἦταν ἡ περιστροφή σας σχετικά μέ τό δίσκο μου. Κανείς δέν μπορεί νά μου ἀπαγορεύσει νά ἀναφέρω ὄλες τίς κινήσεις στό δίσκο μου.

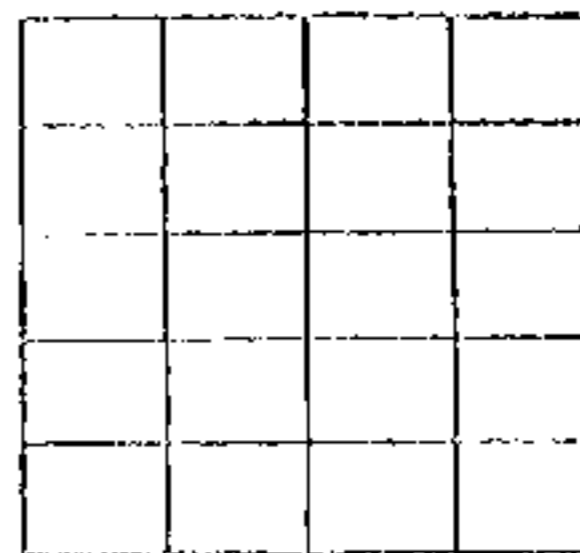
Α. — Ἀλλά δέν αἰσθανθήκατε μιᾶ παράξενη δύναμη νά σᾶς τραβᾷ ἀπ' τό κέντρο πρὸς τήν περιφέρεια; Ἄν ο δίσκος σας δέν περιστρεφόταν μέ μεγάλη ταχύτητα, τά δύο φαινόμενα πού

παρατηρήσατε δέ θά συνέβαιναν ἀσφαλῶς. Δέ θά εἴχατε αἰσθανθεῖ τή δύναμη νά σᾶς σπρώχνει πρὸς τὸ ἐξωτερικὸ καὶ οὔτε θά εἴχατε διαπιστώσει ὅτι ἡ εὐκλείδειος γεωμετρία δέν ἐφαρμόζεται στὸ ΣΣ σας. Δέν εἶναι ἀρκετὰ αὐτὰ τὰ γεγονότα γιὰ νά σᾶς πείσουν ὅτι τὸ ΣΣ σας εἶναι σέ ἀπόλυτη κίνηση;

Μ. — Καθόλου. Βέβαια ἔχω παρατηρήσει τὰ δύο γεγονότα πού ἀναφέρετε ἀλλὰ ἀποδίδω τὴν εὐθύνη σ' ἓνα παράξενο ἑλκτικὸ πεδίο, πού ἐνεργεῖ πάνω στὸ δίσκο μου. Τὸ πεδίο ἑλξης ἐπειδὴ κατευθύνεται πρὸς τὸ ἐξωτερικὸ τοῦ δίσκου, παραμορφώνει τὰ ἄκαμπτα ραβδιά μου καὶ μεταβάλλει τὸν ρυθμὸ τῶν ρολογιῶν μου. Τὸ πεδίο ἑλξης, ἢ μὴ εὐκλείδειος γεωμετρία, τὰ ρολόγια μὲ διαφορετικοὺς ρυθμούς εἶναι γιὰ μένα στενά συνδεδεμένα. Υἱοθετώντας ἓνα ὁποιοδήποτε ΣΣ, ὀφείλω ταυτόχρονα νά ὑποθέσω τὴν ὑπαρξὴ ἑνὸς κατάλληλου ἑλκτικοῦ πεδίου καὶ τὴν ἐπίδρασή του πάνω στὰ ἄκαμπτα ραβδιά καὶ στὰ ρολόγια.

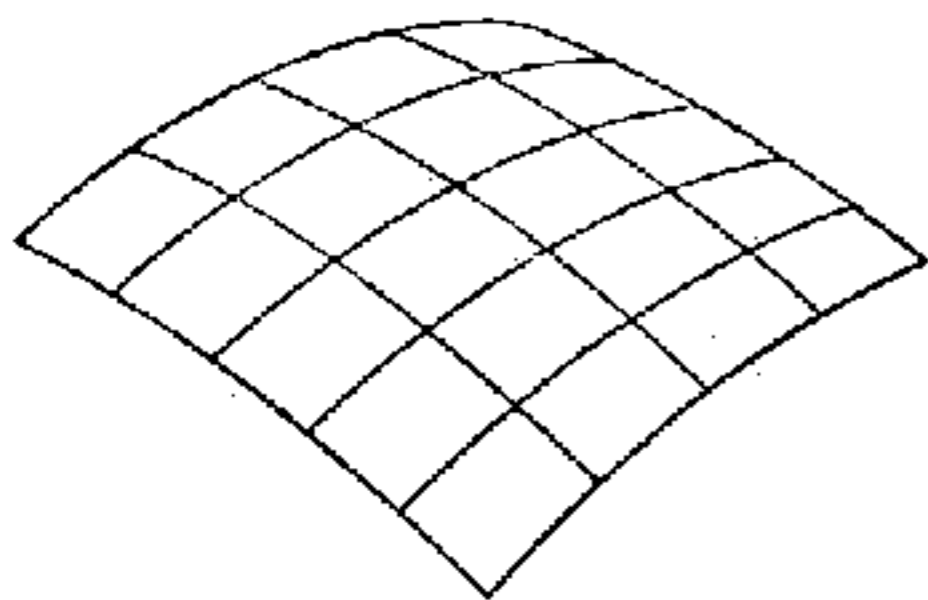
Α. — Ἀλλὰ δέν ἀντιλαμβάνεσθε τίς δυσκολίες πού δημιουργεῖ ἡ θεωρία σας τῆς γενικῆς σχετικότητας; Θά ἤθελα νά ξεκαθαρίσω τὴν ἀποψή μου παίρνοντας ἓνα ἀπλό παράδειγμα πού δέν εἶναι ἀπ' τὴν περιοχὴ τῆς φυσικῆς. Φαντασθῆτε μιὰ ἑξιδανικευμένη ἀμερικάνικη πόλη μὲ δρόμους παράλληλους καὶ λεωφόρους παράλληλους, κάθετους σ' αὐτές τίς τελευταῖες. Ἡ ἀπόστασι ἀνάμεσα στοὺς δρόμους καὶ ἐπίσης ἀνάμεσα στίς λεωφόρους εἶναι πάντοτε ἡ ἴδια. Ἀφοῦ ὀρίσαμε αὐτές τίς συνθήκες, οἱ ὄγκοι τῶν σπιτιῶν εἶναι ἀκριβῶς τοῦ ἴδιου μεγέθους. Μὲ αὐτὸν τὸν τρόπο μπορῶ εὐκόλα νά καθορίσω τὴ θέση ἑνὸς ὁποιοδήποτε ὄγκου σπιτιῶν. Ἀλλὰ μιὰ τέτοια οἰκοδόμησι θά ἦταν ἀδύνατη χωρὶς τὴν εὐκλείδειο γεωμετρία. Δέν μποροῦμε γιὰ παράδειγμα νά καλύψουμε ὅλη τὴ Γῆ μας μὲ μιὰ μεγάλη ἰδανικὴ ἀμερικάνικη πόλη. Ἐνα βλέμμα πού θά ρίξετε στὴν ὑδρόγειο θά σᾶς πείσει. Ἀλλὰ οὔτε καὶ θά μπορούσαμε νά καλύψουμε τὸ δίσκο σας μὲ μιὰ τέτοια «ἀμερικανικὴ πόλη». Λένε ὅτι οἱ ράβδοι σας παραμορφώθηκαν ἀπ' τὸ πεδίο ἑλξης. Τὸ γεγονὸς ὅτι δέν μπορούσατε νά βεβαιώσετε τὸ θεώρημα τοῦ Εὐκλείδη γιὰ τὴν ἰσότητά τοῦ λόγου τῶν ἀκτίνων καὶ τῶν περιφερειῶν δείχνει καθαρά πῶς ἂν χαραῖξετε δρόμους

καὶ λεωφόρους ἀρκετὰ μακροῦς, ἀργά ἢ γρήγορα συναντᾶτε δυσκολίες καὶ θά ἀντιληφθῆτε ὅτι εἶναι ἀδύνατο νά τὸ κάνετε πάνω στὸ δίσκο σας. Ἡ γεωμετρία σας πάνω στὸν περιστρεφόμενο δίσκο μοιάζει μὲ γεωμετρία πάνω σέ κυρτὴ ἐπιφάνεια, ὅπου πραγματικά εἶναι ἀδύνατο νά χαραχτεῖ ἓνα ἀρκετὰ μεγάλο μέρος δρόμων καὶ λεωφόρων μὲ ἀμερικάνικο τρόπο. Γιὰ νά πάρομε ἓνα πιὸ φυσικὸ παράδειγμα, ἄς ὑποθέσουμε μιὰ ἐπιφάνεια θερμαινόμενη ἀκανόνιστα, τῆς ὁποίας τὰ διάφορα



μέρη ἔχουν διαφορετικὲς θερμοκρασίες. Μπορεῖτε ἐφαρμόζοντας πάνω σ' αὐτὴ τὴν ἐπιφάνεια σιδερένια ραβδιά, τὰ ὁποῖα μηκύνονται μὲ τὴ θερμοκρασία, νά πραγματοποιήσετε τὸ ἀνωτέρω παράλληλο-κάθετο σχέδιο; Ἀσφαλῶς ὄχι. Τὸ «πεδίο ἑλξης» ἐπίδρα στὸς χάρακές σας ὅπως ἡ ἀλλαγὴ θερμοκρασίας στὰ σιδερένια ραβδιά.

Μ. — Αὐτὰ δέ μὲ τρομάζουν. Ἡ κατασκευὴ τῶν δρόμων καὶ τῶν λεωφόρων εἶναι ἀναγκαῖα γιὰ νά καθοριστοῦν οἱ θέσεις τῶν σημείων καὶ τὸ ρολοῖ γιὰ νά δείχνεται ἡ διαδοχὴ τῶν γεγονότων. Δέν εἶναι ἀπαραίτητο ἡ πόλη νά εἶναι ἀμερικανικοῦ τύπου, θά μπορούσε ἐξ ἴσου καλὰ νά εἶναι μιὰ παλιὰ πόλη τῆς Εὐρώπης. Φαντασθῆτε ἡ ἰδανικὴ σας πόλη νά ἔχει οἰκοδομηθεῖ μὲ πλαστικὴ οὐσία καὶ ὕστερα νά ἔχει παραμορφωθεῖ. Θά



μπορώ πάντα να μετρήσω τούς όγκους τών σπιτιών και να αναγνωρίσω τούς δρόμους και τις λεωφόρους αν και δέ θα είναι πιά ευθείς και ισοδιάστατες. Μέ τόν ίδιο τρόπο τό γεωγραφικό μήκος και γεωγραφικό πλάτος δείχνουν πάνω στη Γή μας τις θέσεις τών σημείων αν και δέν υπάρχει κατασκευή «αμερικάνικης πόλης».

A. — Όσο βλέπω μία δυσκολία. Είστε υποχρεωμένος να χρησιμοποιήσετε την «δομή μιας πόλης της Ευρώπης». Παραδέχομαι ότι μπορείτε να ταξινομήσετε τά σημεία και τά γεγονότα, αλλά ή δομή αυτή θα ταραξεί τις μετρήσεις τών αποστάσεων. Δέ θα σάς δώση τις μετρικές ιδιότητες του χώρου, όπως τό κάνει ή δική μου κατασκευή. Νά ένα παράδειγμα. Σε μία αμερικανική πόλη, ξέρω ότι για να περπατήσω κατά μήκος σε δέκα σωρούς σπιτιών όφειλω να καλύψω δυό φορές την απόσταση πέντε σωρών σπιτιών. Γνωρίζοντας ότι όλοι οι σωροί τών σπιτιών είναι ίσοι, μπορώ απ' ευθείας να καθορίσω τις αποστάσεις.

M. — Αυτό είναι αλήθεια. Στην «ευρωπαϊκή» μου πόλη, δέν μπορώ να μετρήσω απ' ευθείας τις αποστάσεις μετρώντας τούς παραμορφωμένους σωρούς τών σπιτιών. Πρέπει να γνωρίζω κάτι παραπάνω· πρέπει να γνωρίζω τις γεωμετρικές ιδιότητες της επιφανείας μου. Όλοι γνωρίζουμε ότι τό γεωγρ. μήκος 0° έως 10° στον Ίσημερινό δέν είναι τό ίδιο μέ 0° έως 10° κοντά

στό Βόρειο πόλο. Άλλά κάθε θαλασσοπόρος ξέρει τί θα κάνει για να καθορίσει την απόσταση ανάμεσα σε δυό τέτοια σημεία της Γής μας, γιατί γνωρίζει τις γεωμετρικές ιδιότητές της. Η τό κάνει μέ τόν όπολογισμό τόν βασισμένο στη σφαιρική τριγωνομετρία, ή έμπειρικά, πλέοντας κατά μήκος τών αποστάσεων μέ την ίδια ταχύτητα. Στην περίπτωση σας, όλο τό πρόβλημα είναι κοινό, γιατί όλοι οι δρόμοι και όλες οι λεωφόροι είναι σε ίδια απόσταση μεταξύ τους. Προκειμένου για τή Γή τό πρόβλημα είναι πιά περίπλοκο· οι δυό μεσημβρινοί 0° και 10° συναντώνται στους πόλους της Γής και απέχουν περισσότερο μεταξύ τους στον Ίσημερινό. Έτσι στην «ευρωπαϊκή μου πόλη» για να καθορίσω τις αποστάσεις πρέπει να γνωρίζω κάτι παραπάνω από σάς στην «αμερικανική σας πόλη». Μπορώ να αποκτήσω την συμπληρωματική αυτή γνώση, μελετώντας τις γεωμετρικές ιδιότητες του συνεχούς μου σε κάθε ιδιαίτερη περίπτωση.

A. — Άλλά όλα αυτά δείχνουν σε πόσο στενόχωρη και περίπλοκη κατάσταση βρίσκεται κανείς όταν έγκαταλείψει την απλή δομή της εκκλειδείου γεωμετρίας για τό πολυσύνθετο πλέγμα που είστε αναγκασμένος να χρησιμοποιήσετε. Είναι πράγματι απαραίτητο;

M. — Ασφαλώς, αν θέλουμε να εφαρμόσουμε τή φυσική μας σε όποιοδήποτε ΣΣ, χωρίς να μάς απασχολεί τό μυστηριώδες ΣΣ αδρανείας. Αναγνωρίζω ότι ή μαθηματική συσκευή μου είναι πιά περίπλοκη απ' τή δική σας, αλλά οι φυσικές μου υποθέσεις είναι απλούστερες και φυσικότερες.

Η σιζήτηση περιορίστηκε στο διδιάστατο συνεχές. Στη θεωρία της γενικής σχετικότητας τό άμφισβητούμενο σημείο είναι ακόμη πιά περίπλοκο, γιατί δέν πρόκειται για τό διδιάστατο συνεχές, αλλά για τό τετραδιάστατο. Άλλά οι ιδέες είναι οι ίδιες μ' αυτές που σκιαγραφήθηκαν στην περίπτωση του διδιάστατου. Στη θεωρία της γενικής σχετικότητας δέν μπορούμε να έξυπηρετηθούμε από τή δομή τών παραλλήλων και καθέτων μεταξύ τους ράβδων και απ' τά συγχρονισμένα ρολόγια, όπως κάναμε στη θεωρία της περιορισμένης σχετικότη-

τας. Σέ ένα αθάιρετο ΣΣ, δέν μπορούμε νά καθορίσουμε τό σημείο καί τή στιγμή πού συμβαίνει ένα γεγονός μέ τή βοήθεια τῶν ἀκάμπτων ράβδων καί τῶν ρυθμικῶν καί συγχρονισμένων ρολογιῶν ὅπως στό ΣΣ ἀδρανείας τῆς θεωρίας τῆς περιορισμένης σχετικότητας. Μποροῦμε πάντοτε νά ταξινομοῦμε τά γεγονότα μέ τούς μή εὐκλείδειους χάρακες μας καί μέ τά ροῖγια μας τῶν ὁποίων ὁ ρυθμός μεταβάλλεται. Ἀλλά οἱ πραγματικές μετρήσεις πού ἀπαιτοῦν χάρακες ἀκαμπτους καί ρολόγια τελείως ρυθμικά καί συγχρονισμένα δέν μποροῦν νά ἐκτελεσθοῦν παρά στά τοπικά ΣΣ ἀδρανείας. Γι' αὐτό ὅλη ἡ θεωρία τῆς περιορισμένης σχετικότητας ἰσχύει, ἀλλά τό «καλό» μας ΣΣ εἶναι μόνο τοπικό, ἐπειδή τό ἀδρανές τοῦ χαρακτήρα του εἶναι περιορισμένο στό χῶρο καί στό χρόνο. Ἀκόμη καί στό αθάιρετο ΣΣ μας μποροῦμε νά προβλέψουμε τά ἀποτελέσματα τῶν μετρήσεων σέ ένα τοπικό ΣΣ ἀδρανείας. Γι' αὐτό πρέπει νά γνωρίζουμε τόν γεωμετρικό χαρακτήρα τοῦ χωροχρονικοῦ συνεχοῦς μας.

Τά ἐξιδανικευμένα πειράματά μας δείχνουν μόνο τό γενικό χαρακτήρα τῆς νέας φυσικῆς σχετικότητας. Μᾶς φανερώνουν ὅτι τό βασικό πρόβλημα εἶναι τό πρόβλημα τῆς ἑλξης καί ἀκόμα ὅτι ἡ θεωρία τῆς γενικῆς σχετικότητας ὀδηγεῖ σέ μιά γενίκευση τῶν ἐννοιῶν χῶρου καί χρόνου.

## Ἡ ΓΕΝΙΚΗ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ Ἡ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ

Ἡ θεωρία τῆς γενικῆς σχετικότητας ἐπιχειρεῖ νά διατυπώσει φυσικούς νόμους γιά ὅλα τά ΣΣ καί τό βασικό της πρόβλημα εἶναι τό πρόβλημα τῆς ἑλξης. Γιά πρώτη φορά ἀπό τῆς ἐποχῆς τοῦ Νεύτονα, κάνει μιά σοβαρή προσπάθεια γιά νά διατυπώσει καί πάλι τό νόμο τῆς ἑλξης. Εἶναι πραγματικά ἀπαραίτητο; Γνωρίζουμε ἤδη τίς κατακτήσεις τῆς θεωρίας τοῦ Νεύτονα κι ἀκόμα τί τῆς ὀφείλει ἡ ἀνάπτυξη τῆς ἀστρονομίας, πού εἶναι θεμελιωμένη στό νόμο τῆς ἑλξης. Αὐτός ὁ νόμος ἀποτελεῖ πάντα τό θεμέλιο ὅλων τῶν ἀστρονομικῶν ὑπολογισ-

σμῶν. Ἀλλά γνωρίσαμε ἐπίσης καί μερικές ἀντιρρήσεις πού διατυπώθηκαν ἐναντίον τῆς παλαιᾶς θεωρίας. Ὁ νόμος τοῦ Νεύτονα δέν ἰσχύει παρά στά ΣΣ ἀδρανείας τῆς κλασσικῆς φυσικῆς, στά ὁποῖα ὅπως θυμόμαστε ἐπιβάλλεται ὁ ὅρος ὅτι ὀφείλουν νά ἰσχύουν οἱ νόμοι τῆς μηχανικῆς. Ἡ δύναμη πού ἐνεργεῖ ἀνάμεσα σέ δύο μᾶζες ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ἀπόσταση πού τίς χωρίζει. Ἡ συνάρτηση ἀνάμεσα στή δύναμη καί στήν ἀπόσταση εἶναι, ὅπως ξέρουμε, ἀμετάβλητη σχετικά μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Ὁ νόμος ὅμως αὐτός δέ συμφωνεῖ μέ τήν περιορισμένη σχετικότητα. Ἡ ἀπόσταση δέν εἶναι ἀμετάβλητη σχετικά μέ τόν μετασχηματισμό τοῦ Lorentz. Θά μπορούσαμε νά ἐπιχειρήσουμε, ὅπως τό κάναμε τόσο πετυχημένα γιά τοῖς νόμους τῆς κίνησης, νά γενικεύσουμε τούς νόμους τῆς ἑλξης γιά νά τήν προσαρμόσουμε στή θεωρία τῆς περιορισμένης σχετικότητας, ἢ, μ' ἄλλα λόγια νά τή διατυπώσουμε μέ τέτοιο τρόπο ὥστε νά εἶναι ἀμετάβλητη σχετικά μέ τό μετασχηματισμό τοῦ Lorentz καί ὄχι μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Ἀλλά ὁ νόμος τῆς ἑλξης τοῦ Νεύτονα στεκόταν πεισματικά ἀντίθετος σ' ὅλες τίς προσπάθειές μας γιά τήν ἀπλοποίηση του καί προσαρμογή του στό πλαίσιο τῆς θεωρίας τῆς περιορισμένης σχετικότητας. Ἀκόμη καί ἂν εἶχαμε πετύχει, ένα παραπάνω βῆμα θά ἦταν ἀπαραίτητο: τό βῆμα τοῦ ΣΣ ἀδρανείας τῆς θεωρίας τῆς περιορισμένης σχετικότητας στό αθάιρετο ΣΣ τῆς θεωρίας τῆς γενικῆς σχετικότητας. Ἐξ ἄλλου, τά ἐξιδανικευμένα πειράματα τοῦ ἀνεγκυστήρα σέ ἐλεύθερη πτώση δείχνουν καθαρά ὅτι δέν ὑπάρχει καμιά περίπτωση νά γίνει δυνατή ἡ διάτύπωση τῆς θεωρίας τῆς γενικῆς σχετικότητας πρὶν λυθεῖ τό πρόβλημα τῆς ἑλξης. Ἡ συζήτησή μας δείχνει γιατί ἡ λύση τοῦ προβλήματος τῆς ἑλξης δέν εἶναι ἡ ἴδια στήν κλασσική φυσική καί στή θεωρία τῆς γενικῆς σχετικότητας.

Προσπαθήσαμε νά ὑποδείξουμε τόν δρόμο πού ὀδηγεῖ σ' αὐτή τήν τελευταία καί τούς λόγους πού μᾶς ἀναγκάζουν, ἄλλη μιά φορά, ν' ἀλλάξουμε τίς παλιές μας ἀντιλήψεις. Χωρίς νά ἐπεκταθοῦμε στήν ἀκρίβεια τῆς δομῆς τῆς θεωρίας, θέλουμε νά

δείξουμε, συγκρίνοντάς την μέ τήν παλιά, ποιά είναι τά χαρακτηριστικά στοιχεία τής νέας θεωρίας τής έλξης. Δέ θάπρεπε νά είναι δύσκολο, έχοντας ύπ' όψη αυτά πού είπώθη-καν προγενέστερα, νά συλλάβουμε τή φύση αυτών των δυσκο-λιών.

1. Οί έξισώσεις τής έλξης τής θεωρίας τής γενικής σχετι-κότητας μπορούν νά εφαρμοσθούν σέ όποιοδήποτε ΣΣ. Είναι ζήτημα βολικότητας νά διαλέξουμε σέ κάποια ιδιαίτερη περί-πτωση ένα ιδιαίτερο ΣΣ. Θεωρητικά όλα τά ΣΣ είναι παραδε-κτά. Άγνοώντας τήν έλξη, επιστρέφουμε αυτόματα στό ΣΣ αδρανείας τής θεωρίας τής περιορισμένης σχετικότητας.

2. Ο νόμος τής έλξης του Νεύτονα συνδέει τήν κίνηση ενός σώματος έδω και τώρα μέ τήν επένεργεια ενός σώματος πού εξασκείται τήν ίδια στιγμή από μιά απομακρυσμένη απόσταση. Ο νόμος αυτός πρόσφερε τό πρότυπο γιά όλη τή μηχανική μας αντίληψη. Άλλά ή τελευταία αυτή κατέρρευσε. Στίς έξισώσεις του Maxwell πραγματοποιήσαμε ένα νέο πρό-τυπο γιά τους φυσικούς νόμους. Αυτές οί έξισώσεις είναι έξισώσεις δομής' συνδέουν γεγονότα πού συμβαίνουν τώρα και έδω μέ γεγονότα πού θά συμβοῦν άμέσως ύστερα στην άμεση γειτονία. Περιγράφουν τίς μεταβολές του ήλεκτρομαγνητικού πεδίου. Οί νέοι μας νόμοι τής έλξης είναι επίσης νόμοι δομής, πού περιγράφουν τίς μεταβολές του πεδίου έλξης. Μιλώντας σχηματικά μπορούμε νά ποῦμε: ή μετάβαση από τή θεωρία τής έλξης του Νεύτονα στη θεωρία τής γενικής σχετικότητας μοιάζει κάπως μέ τή μετάβαση από τή θεωρία των ηλεκτρικών ρευστών και του νόμου του Coulomb στη θεωρία του Maxwell.

3. Ο κόσμος μας δέν είναι εύκλειδειος. Η γεωμετρική φύση του κόσμου μας είναι διαμορφωμένη από τίς μάζες και τίς ταχύτητές τους. Οί έξισώσεις τής έλξης τής θεωρίας τής γενικής σχετικότητας προσπαθοῦν νά διευκρινίσουν τίς γεωμε-τρικές ιδιότητες του κόσμου μας.

Άς υποθέσουμε γιά μιά στιγμή ότι πετύχαμε νά πραγμα-τοποιήσουμε κατά γράμμα τό πρόγραμμα τής θεωρίας τής γενικής σχετικότητας. Μήπως διατρέχουμε τόν κίνδυνο μέ τή

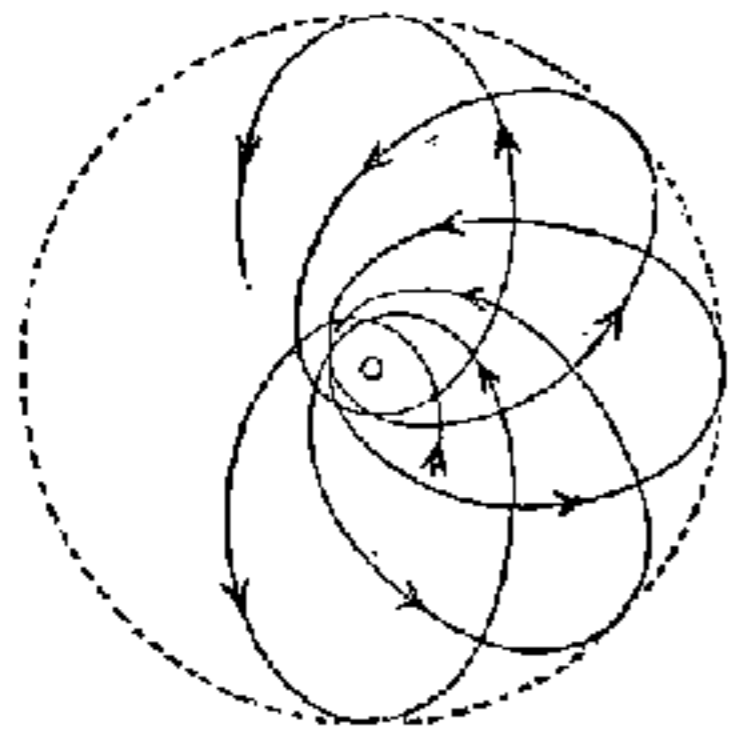
θεωρία νά απομακρυνθοῦμε πολύ μακριά άπ' τήν πραγματι-κότητα; Γνωρίζουμε ότι ή παλιά θεωρία έξηγει πολύ καλά τίς άστρονομικές παρατηρήσεις. Υπάρχει δυνατότητα νά γεφυρώ-σουμε τή νέα θεωρία μέ τήν παρατήρηση; Κάθε θεωρία πρέπει νά υποβάλλεται στη δοκιμασία του πειράματος, και όλα τά αποτελέσματα όσο γοητευτικά κι άν είναι πρέπει νά απορρί-πτονται άν δέν συμφωνοῦν μέ τά γεγονότα. Η νέα θεωρία τής έλξης άντέχει στη δοκιμασία του πειράματος; Στο έρώτημα αυτό μπορούμε νά απαντήσουμε μέ τήν έξής πρόταση: Η παλιά θεωρία είναι μιά ειδική όριακή περίπτωση τής νέας. Άν οί δυνάμεις τής έλξης είναι σχετικά αδύνατες, προκύπτει ότι ο παλιός νόμος του Νεύτονα είναι μιά καλή προσέγγιση των νέων νόμων τής έλξης. Έτσι όλες οί παρατηρήσεις πού στη-ρίζουν τήν κλασσική θεωρία, στηρίζουν έξ ίσου τήν θεωρία τής γενικής σχετικότητας. Ξαναβρίσκουμε τήν παλιά θεωρία από τήν ύψηλότερη άποψη τής νέας.

Άκόμα κι άν δέν μπορούσαμε νά αναφέρουμε καμιά νέα παρατήρηση υπέρ τής νέας θεωρίας, άκόμη κι άν ή έξήγηση πού δίνει είναι απλούστατα όσο καλή κι' εκείνη πού δίνει ή παλιά, θά έπρεπε άν μας άφηναν ελεύθερους νά διαλέξουμε ανάμεσα στις δύο διδασκαλίες, νά προτιμήσουμε τήν νέα. Οί έξισώσεις τής νέας είναι, από τυπική άποψη, πιο περίπλοκες, αλλά οί υποθέσεις πού τους χρησιμεύουν γιά βάση, είναι, από τήν άποψη των θεμελιωδών αρχών, πιο άπλές. Τά δύο τρομα-κτικά φαντάσματα, ο απόλυτος χώρος και τό σύστημα αδρα-νείας, έχουν εξαφανισθεί. Η ιδέα τής ισοδυναμίας τής μάζας βάρους και μάζας αδρανείας δέν έχει παραμεληθεί. Δέν είναι ανάγκη νά κάνουμε μιά κάποια υπόθεση γιά τίς δυνάμεις τής έλξης και τήν εξάρτησή τους από τήν απόσταση. Οί έξισώσεις τής έλξης έχουν τήν μορφή νόμων δομής, πού απαιτείται γιά όλους τους φυσικούς νόμους από τήν εποχή των μεγάλων κατακτήσεων τής θεωρίας του πεδίου.

Μερικά νέα πορίσματα, πού δέν περιλαμβάνονται στό νόμο τής έλξης του Νεύτονα, μπορούν νά βγοῦν από τους νέους νόμους τής έλξης. Ένα από αυτά τά πορίσματα, γιά τό όποιο

έχουμε κιόλας μιλήσει, είναι ή κύρτωση τών φωτεινών ακτίνων σέ ένα έλκτικό πεδίο. Τώρα θά αναφέρουμε άλλες δύο συνέπειες.

"Αν οί παλιοί νόμοι συμφωνούν μέ τούς νέους, όταν οί δυνάμεις τής έλξης είναι αδύνατες, οί απόκλίσεις από τόν νόμο του Νεύτωνα θά προκύψουν μόνο στην περίπτωση που οί δυνάμεις τής έλξης είναι σχετικώς ισχυρές." Ας πάρουμε για παράδειγμα τό ήλιακό μας σύστημα. Οί πλανήτες, συμπεριλαμβανομένης και τής Γης μας, διαγράφουν έλλειπτικές τροχιές γύρω από τόν Ήλιο, πλησιέστερος του οποίου είναι ή πλανήτης Έρμής. Δεδομένου λοιπόν ότι ή μεταξύ τους απόσταση είναι πιο μικρή, ή έλξη ανάμεσά τους είναι ισχυρότερη από τήν έλξη ανάμεσα στον Ήλιο και σέ οποιοδήποτε άλλο πλανήτη. "Αν λοιπόν υπάρχει κάποια έλπίδα νά μπορούμε κάποτε νά διαπιστώσουμε μιά απόκλιση από τό νόμο του Νεύτωνα, τή μεγαλύτερη πιθανότητα γι' αυτό μάς τήν παρέχει ή Έρμής. Από τήν κλασσική θεωρία προκύπτει ότι ή τροχιά που διαγράφει ή Έρμής είναι του ίδιου είδους μέ τίς τροχιές τών άλλων πλανητών, μέ μόνη τή διαφορά ότι ή Έρμής είναι πλησιέστερος στον Ήλιο. Σύμφωνα μέ τή θεωρία τής γενικής σχετικότητας ή κίνησή του πρέπει νά είναι ελαφρά διαφορετική. "Οχι μόνο ή Έρμής πρέπει νά στρέφεται γύρω απ' τόν Ήλιο, αλλά και ή έλλειψη που διαγράφει πρέπει νά στρέφεται πολύ άργά σχετικά μέ τό ΣΣ τό συνδεδεμένο μέ τόν Ήλιο. Αυτή ή



περιστροφή τής έλλειψης εκφράζει τό νέο αποτέλεσμα τής θεωρίας τής γενικής σχετικότητας, του οποίου προβλέπει τό μέγεθος. Η έλλειψη του Έρμής θά εκτελούσε μιά πλήρη περιστροφή μέσα σέ τρία εκατομμύρια χρόνια. Βλέπουμε πόσο μικρό είναι τό αποτέλεσμα και ότι δέν υπάρχει έλπίδα νά τό διαπιστώσουμε στους πλανήτες που είναι πιο απομακρυσμένοι απ' τόν Ήλιο.

Η παραστράτηση του πλανήτη Έρμής απ' τήν έλλειψη ήταν γνωστή πριν διατυπωθεί ή θεωρία τής γενικής σχετικότητας, και δέν μπορούσε τότε νά δοθεί καμιά εξήγηση. Η θεωρία αναπτύχθηκε χωρίς νά δοθεί ή παραμικρή προσοχή στό ιδιαίτερο αυτό πρόβλημα. Δέν είναι παρά άργότερα που από τίς νέες εξισώσεις τής έλξης βγάλαν τό συμπέρασμα σχετικά μέ τήν περιστροφή τής έλλειψης που διαγράφει ένας πλανήτης γύρω απ' τόν Ήλιο. Στην περίπτωση του Έρμής, ή σχετικότητα εξήγησε μέ πλήρη επιτυχία τήν απόκλιση απ' τό νόμο του Νεύτωνα.

Υπάρχει όμως κι άλλο ένα συμπέρασμα που βγήκε απ' τή θεωρία τής γενικής σχετικότητας και δοκιμάστηκε μέ τό πείραμα.

Είδαμε πιο πάνω ότι ένα ρολόι τοποθετημένο στή μεγάλη περιφέρεια ενός περιστρεφόμενου δίσκου έχει διαφορετικό ρυθμό από ένα ρολόι τοποθετημένο στή μικρή περιφέρεια. Από τή θεωρία τής σχετικότητας προκύπτει επίσης ότι ένα ρολόι τοποθετημένο πάνω στον Ήλιο θά έπρεπε νά έχει διαφορετικό ρυθμό από ένα ρολόι ίδιας κατασκευής τοποθετημένο στή Γη, δεδομένου ότι ή επίδραση του πεδίου έλξης είναι ισχυρότερη πάνω στον Ήλιο παρά πάνω στή Γη.

Στή σελίδα (106) επισημάναμε ότι τό νάτριο σέ πυρακτωμένη κατάσταση εκπέμπει ένα όμογενές κίτρινο φώς που έχει καθορισμένο μήκος κύματος. Σ' αυτή τήν ακτινοβολία τό άτομο νά ποδμε έτσι, ένα ρολόι, του οποίου τό μήκος του εκπεμπομένου κύματος είναι ένας από τούς ρυθμούς του. Σύμφωνα μέ τή

θεωρία της γενικής σχετικότητας, τό μήκος κύματος της ακτινοβολίας πού εκπέμπεται από τό άτομο του νατρίου θά ήταν ελαφρά μεγαλύτερο αν ήταν τοποθετημένο πάνω στον "Ηλιο.

"Η υποβολή στη δοκιμασία της παρατήρησης των συνεπειών της θεωρίας της γενικής σχετικότητας είναι περίπλοκο πρόβλημα και δέν έχει λυθεί ακόμα. Επειδή ασχολούμαστε εδώ μέ τις κυριώτερες ιδέες, δέν έχουμε την πρόθεση νά έμβραθύνουμε περισσότερο στό ζήτημα. Άρκούμαστε μόνο νά πούμε ότι τό πείραμα φαίνεται ως τώρα νά βεβαιώνει τά συμπεράσματα πού βγάλαμε απ' τή θεωρία της γενικής σχετικότητας.

### ΠΕΔΙΟ ΚΑΙ ΥΛΗ

Είδαμε πώς και γιατί ή μηχανική άποψη έχει καταρεύσει. Ήταν αδύνατο νά εξηγηθούν όλα τά φαινόμενα υποθέτοντας τήν έπενέργεια άπλών δυνάμεων μεταξύ άμεταβλήτων μορίων. Οί πρώτες μας άπόπειρες νά ξεπεράσουμε τή μηχανική άποψη και νά εισαγάγουμε τις έννοιες του πεδίου στέφθηκαν μέ έπιτυχία στην περιοχή των ήλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Διατυπώθηκαν οί νόμοι δομής για τό ήλεκτρομαγνητικό πεδίο· συνδέουν μεταξύ τους κοντινά γεγονότα στό χώρο και τό χρόνο. Οί νόμοι αυτοί συμφωνούν μέ τή θεωρία της περιορισμένης σχετικότητας, έφ' όσον είναι άμετάβλητοι σχετικά μέ τό μετασχηματισμό του Lorentz. Άργότερα ή θεωρία της γενικής σχετικότητας διατύπωσε τούς νόμους της έλξης. Κι αυτοί είναι νόμοι δομής, πού περιγράφουν τό πεδίο έλξης ανάμεσα σέ υλικά μόρια. Ήταν τό ίδιο εύκολο νά γενικευθούν οί νόμοι του Maxwell μέ τέτοιο τρόπο ώστε νά είναι δυνατό νά εφαρμοσθούν σέ όποιοδήποτε ΣΣ, όπως οί νόμοι της έλξης της θεωρίας της γενικής σχετικότητας.

"Έχουμε δύο πραγματικότητες: τήν ύλη και τό πεδίο. Δέν χωράει άμφιβολία ότι σήμερα δέν μπορούμε νά συλλάβουμε ότι όλη ή φυσική μπορεί νά οικοδομηθεί πάνω στην έννοια της

ύλης, όπως πίστευαν οί φυσικοί στις αρχές του 19ου αιώνα. Μπορούμε νά θεωρήσουμε τήν ύλη και τό πεδίο σά δύο διαφορετικές και διακεκριμένες πραγματικότητες; Αν δοθεί ένα μικρό μόριο ύλης, θά μπορούσαμε νά φαντασθούμε άπλοϊκά ότι υπάρχει μιá όρισμένη επιφάνεια του μόνου πέρα από τήν όποία παύει νά υπάρχει και όπου εμφανίζεται τό πεδίο έλξης της. Στην εικόνα αυτή ή περιοχή όπου ισχύουν οί νόμοι του πεδίου χωρίζεται άπότομα από κείνη όπου βρίσκεται ή ύλη. Άλλά ποιá είναι τά φυσικά κριτήρια πού επιτρέπουν νά διακρίνουμε τήν ύλη από τό πεδίο; Πρίν γνωρίσουμε τή θεωρία της σχετικότητας, θά είχαμε επιχειρήσει νά άπαντήσουμε σ' αυτό τό ερώτημα μέ τόν ακόλουθο τρόπο: ή ύλη έχει μιá μάζα, ενώ τό πεδίο δέν έχει. Τό πεδίο αντιπροσωπεύει ενέργεια, ή ύλη αντιπροσωπεύει μάζα. Άλλά ξέρουμε ήδη ότι μιá τέτοια άπάντηση είναι άνεπαρκής όταν πάρουμε υπ' όψη τις μεταγενέστερές μας γνώσεις. Η θεωρία της σχετικότητας μάς έμαθε ότι ή ύλη αντιπροσωπεύει άπέραντες άποθήκες ενέργειας και ότι ή ενέργεια αντιπροσωπεύει ύλη. Έτσι δέν μπορούμε νά κάνουμε ποιοτική διάκριση ανάμεσα στην ύλη και στό πεδίο, έφ' όσον ή διάκριση ανάμεσα στην μάζα και στην ενέργεια δέν είναι ποιοτικής ύφης. Τό μεγαλύτερο μέρος ενέργειας συγκεντρώνεται στην ύλη, αλλά τό πεδίο πού περιβάλλει τό μόριο αντιπροσωπεύει έξ ίσου ενέργεια, αν και σέ άσύγκριτα μικρότερη ποσότητα. Συνεπώς θά μπορούσαμε νά πούμε: "Η ύλη βρίσκεται εκεί όπου ή συγκέντρωση ενέργειας είναι μεγάλη και τό πεδίο εκεί όπου ή συγκέντρωση ενέργειας είναι μικρή. Άλλά, αν είναι έτσι, ή διαφορά ανάμεσα στην ύλη και στό πεδίο είναι μάλλον ποσοτικής παρά ποιοτικής ύφης. Δέν υπάρχει νόημα νά θεωρούμε τήν ύλη και τό πεδίο σά δύο ποιότητες τελείως διαφορετικές τή μιá απ' τήν άλλη. Δέν μπορούμε νά φαντασθούμε μιá όρισμένη επιφάνεια πού χωρίζει καθαρά τό πεδίο απ' τήν ύλη.

"Η ίδια δυσκολία παρουσιάζεται για τό φορτίο και τό πεδίο του. Φαίνεται ότι είναι αδύνατο νά βρεθεί ένα άσφαλές ποιοτικό κριτήριο, πού νά επιτρέπει τή διάκριση ανάμεσα στην ύλη

καί στό πεδίο, ή ανάμεσα στό φορτίο καί στό πεδίο.

Οί βασιικοί μας νόμοι, δηλαδή οί νόμοι τοῦ Maxwell καί ἐκεῖνοι τῆς ἑλξης δέν ἰσχύουν γιά πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις ἐνέργειας, ἢ, ὅπως θά μπορούσαμε νά ποῦμε, γιά τίς θέσεις ἐκεῖνες ὅπου βρίσκονται πηγές πεδίου, δηλαδή ἠλεκτρικά φορτία ἢ ὕλη. Ἀλλά δέ θά μπορούσαμε νά τροποποιήσουμε ἑλαφρά τίς ἐξισώσεις μας σέ τρόπο πού νά ἰσχύουν παντοῦ, ἀκόμη καί στίς περιοχές ὅπου ἐμφανίζεται ἔντονη συγκέντρωση ἐνέργειας;

Δέν μπορούμε νά οἰκοδομήσουμε τή φυσική βασιζόμενοι μόνο στήν ἔννοια τῆς ὕλης. Ἀλλά ἡ διαίρεση σέ ὕλη καί πεδίο εἶναι, ἐφ' ὅσον ἀναγνωρίσαμε τήν ἰσοδυναμία ὕλης καί ἐνέργειας, τεχνητή καί καθόλου καθορισμένη μέ σαφήνεια. Δέ θά μπορούσαμε νά ἀπορρίψουμε τήν ἔννοια τῆς ὕλης καί νά οἰκοδομήσουμε μιά φυσική θεμελιωμένη ἀποκλειστικά στό πεδίο; Ἡ ὕλη πού παράγει ἐντυπώσεις στίς αἰσθήσεις μας δέν εἶναι στήν πραγματικότητα παρά μιᾶ μεγάλη συγκέντρωση ἐνέργειας σ' ἓνα χῶρο σχετικά μικρό. Θά μπορούσαμε νά θεωρήσουμε τήν ὕλη σάν περιοχές στό χῶρο ὅπου τό πεδίο εἶναι ἐξαιρετικά ἔντονο. Μέ τόν τρόπο αὐτό θά ἦταν δυνατό νά δημιουργηθεῖ ἓνα νέο φιλοσοφικό ὑπόβαθρο. Ὁ τελικός του σκοπός θά ἦταν ἡ ἐξήγηση ὅλων τῶν φυσικῶν γεγονότων μέ δομικούς νόμους πού νά ἰσχύουν παντοῦ καί πάντοτε. Ἐνας ἐκσφενδονιζόμενος λίθος εἶναι, ἀπ' αὐτή τήν ἄποψη, ἓνα πεδίο πού ποικίλλει, ὅπου οἱ θέσεις τῆς μεγαλύτερης ἔντασης τοῦ πεδίου διασχίζουν τό χῶρο μέ τήν ταχύτητα τοῦ λίθου. Δέ θά ὑπῆρχε θέση, στή νέα μας φυσική, ταυτόχρονα γιά τό πεδίο καί γιά τήν ὕλη, ἐπειδή τό πεδίο εἶναι ἡ μόνη πραγματικότητα. Ἡ νέα αὐτή ἀντίληψη ὑπαγορεύεται ἀπό τίς μεγάλες κατακτήσεις τῆς φυσικῆς τοῦ πεδίου, ἀπ' τό γεγονός ὅτι πετυχαίνουμε νά ἐκφράζουμε τούς νόμους τοῦ ἠλεκτρισμοῦ, τοῦ μαγνητισμοῦ καί τῆς ἑλξης μέ τή μορφή δομικῶν νόμων, καί τέλος ἀπ' τήν ἰσοδυναμία μάζας καί ἐνέργειας. Τό τελευταῖο μας πρόβλημα θά ἦταν νά τροποποιήσουμε κατά τέτοιο τρόπο τούς νόμους τοῦ πεδίου ὥστε νά ἔχουν ἰσχὺ ἀκόμη καί στίς περιοχές-ὅπου ἡ

ἐνέργεια ἐμφανίζει ἔντονη συγκέντρωση.

Ἀλλά δέν πετύχαμε ὡς τώρα νά ἐκτελέσουμε τό πρόγραμμα τοῦτο μέ τρόπο πειστικό καί συνεκτικό. Τό μέλλον θά δείξει ἂν ἡ πραγματοποίησή του εἶναι δυνατή. Πρός τό παρόν ὀφείλουμε πάντοτε νά ὑποθέτουμε σέ ὅλες τίς θεωρητικές συσκευές μας, δύο πραγματικότητες: τό πεδίο καί τήν ὕλη.

Μᾶς μένει ἀκόμη νά ἐξετάσουμε μερικά θεμελιώδη προβλήματα. Γνωρίζουμε ὅτι ὅλη ἡ ὕλη σύγκειται ἀπό ἓνα μικρό ἀριθμό εἰδῶν μορίων. Πῶς εἶναι κατασκευασμένες οἱ διάφορες μορφές τῆς ὕλης ἀπό αὐτά τά στοιχειώδη μόρια; Μέ ποιό τρόπο ἐκτυλίσσεται ἡ ἀμοιβαία ἐπενέργεια τῶν μορίων αὐτῶν καί τοῦ πεδίου; Στήν ἀναζήτηση μιᾶς ἀπάντησης στά ἐρωτήματα αὐτά, εἰσήχθησαν νέες ἰδέες στή φυσική, οἱ ἰδέες τῆς θεωρίας τῶν κβάντα.

Συνοψίζοντας:

*Μιά νέα ἔννοια ἐμφανίζεται στή φυσική, ἡ πιό σπουδαία ἐφεύρεση ἀπό τήν ἐποχή τοῦ Νεύτωνα: τό πεδίο. Χρειαζόταν μιᾶ δυνατή ἐπιστημονική φαντασία γιά νά συλλάβει ὅτι δέν εἶναι τά φορτία, οὔτε τά μόρια, ἀλλά τό πεδίο στό χῶρο ἀνάμεσα στά φορτία καί στά μόρια πού εἶναι οὐσιώδεις γιά τήν περιγραφή τῶν φυσικῶν φαινομένων. Ἡ ἔννοια αὐτή τοῦ πεδίου ἀποδείχεται ἐξαιρετικά καρποφόρα καί ὀδηγεῖ στή διατύπωση τῶν ἐξισώσεων τοῦ Maxwell πού περιγράφουν τή δομή τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου καί διέπουν τόσο τά ἠλεκτρικά ὅσο καί τά ὀπτικά φαινόμενα.*

*Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας γεννιέται ἀπ' τά προβλήματα τοῦ πεδίου. Οἱ ἀντιφάσεις καί ἀσυνέπειες τῶν παλιῶν θεωριῶν μᾶς ἀναγκάζουν νά ἀποδώσουμε νέες ἰδιότητες στό χωροχρονικό συνεχές, πού εἶναι ἡ σκηνή ὅλων τῶν γεγονότων τοῦ φυσικοῦ μας κόσμου.*

*Ἡ θεωρία τῆς σχετικότητας ἀναπτύσσεται σέ δύο στάδια. Τό πρῶτο ὀδηγεῖ στή θεωρία τῆς περιορισμένης σχετικότητας, πού ἐφαρμόζεται μόνο σέ συστήματα συντεταγμένων ἀδρανείας, δηλαδή σέ συστήματα ὅπου ἰσχύει ὁ νόμος τῆς ἀδρανείας ὅπως διατυπώ-*

από τον Νεύτωνα. Η θεωρία της περιορισμένης σχετικότητας βασίζεται σε δύο θεμελιακές υποθέσεις: οι φυσικοί νόμοι είναι οι ίδιοι για όλα τα συστήματα συντεταγμένων που έχουν ομοιόμορφη κίνηση τα μέν σχετικά με τα δε ή ταχύτητα του φωτός έχει πάντα την ίδια τιμή. Από τις υποθέσεις αυτές, έντελως βεβαιωμένες από το πείραμα, βγαίνουν οι ιδιότητες των χαρακών και των ρολογιών στην κίνηση, όπου το μήκος των πρώτων και ο ρυθμός των δεύτερων αλλάζουν με την ταχύτητα. Η θεωρία της σχετικότητας τροποποιεί τους νόμους της μηχανικής. Οι παλιοί νόμοι δεν ισχύουν, αν η ταχύτητα ενός μορίου πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός. Οι νέοι νόμοι για ένα σώμα σε κίνηση, όπως διατυπώθηκαν από τη θεωρία της σχετικότητας, βεβαιώθηκαν σωφέστατα απ' το πείραμα. Μια άλλη συνέπεια της θεωρίας της σχετικότητας (περιορισμένης) είναι η συνάρτηση ανάμεσα στη μάζα και στην ενέργεια. Η μάζα είναι ενέργεια και η ενέργεια είναι μάζα. Οι δύο νόμοι της διατήρησης συνδυάστηκαν σ' ένα μόνο, στο νόμο της διατήρησης της μάζας-ενέργειας.

Η θεωρία της γενικής σχετικότητας δίνει ακόμα μια πιο βαθειά ανάλυση του χωροχρονικού συνεχούς. Η ισχύς της θεωρίας δεν περιορίζεται πια στα συστήματα συντεταγμένων αδρανείας. Αγγίζει το πρόβλημα της έλξης και διατυπώνει νέους δομικούς νόμους για το πεδίο έλξης. Μας αναγκάζει να αναλύσουμε το ρόλο της γεωμετρίας στην περιγραφή του φυσικού κόσμου. Θεωρεί σαν φυσική αιτία την ισότητα της μάζας βάρους και της μάζας αδρανείας και ως απλά καθαρά συμπτωματική, πράγμα που έκανε η κλασική μηχανική. Οι πειραματικές συνέπειες της θεωρίας της γενικής σχετικότητας δε διαφέρουν παρά ελάχιστα από εκείνες της κλασικής μηχανικής. Αντέχουν καλά στη δοκιμασία του πειράματος, αν το όποιο ή σύγκριση είναι δυνατή. Αλλά η δύναμη της θεωρίας εκτείνεται στην έσωτερική συνοχή και στην απλότητα των θεμελιακών της υποθέσεων.

Η θεωρία της σχετικότητας επιμένει στη σπουδαιότητα της φυσικής του πεδίου στη φυσική. Αλλά δεν έχουμε ακόμη πετύχει να αναμορφώσουμε μια φυσική θεμελιωμένη υποκλειστικά στο πεδίο. Προς το παρόν είμαστε πάντα υποχρεωμένοι να υποθέτουμε ότι υπάρχουν δύο πραγματικότητες: το πεδίο και η ύλη.

## 4. ΤΑ ΚΒΑΝΤΑ

### ΣΥΝΕΧΕΙΑ - ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ

Ένα σχέδιο της πόλης της Νέας Υόρκης και των περιχώρων της είναι ανοιγμένο μπροστά μας. Ρωτούμε: ποιά είναι τα σημεία αυτού του σχεδίου στα όποια μπορεί να φθάσει κανείς με σιδηρόδρομο; Αφού ψάξαμε τα σημεία αυτά σ' ένα δρομολόγιο σιδηροδρόμου, σημειώνουμε πάνω στο σχέδιό μας τα σημεία που βρήκαμε. Τώρα αλλάζουμε την ερώτησή μας και λέμε: ποιά είναι τα σημεία στα όποια μπορούμε να φθάσουμε με το λεωφορείο; Αν χαράξουμε πάνω στο σχέδιο γραμμές που αντιπροσωπεύουν όλους τους δρόμους που ξεκινούν απ' τη Νέα Υόρκη, σε κάθε σημείο πάνω στους δρόμους αυτούς είναι πραγματικά δυνατό να φθάσει το λεωφορείο. Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε σειρές από σημεία. Στην πρώτη περίπτωση χωρίζονται μεταξύ τους και αντιπροσωπεύουν τους διαφόρους σταθμούς του σιδηροδρόμου· στη δεύτερη βρίσκονται πάνω στις γραμμές που αντιπροσωπεύουν τους δρόμους. Η καινούρια μας ερώτηση αφορά στην απόσταση που χωρίζει καθένα απ' αυτά τα σημεία από την πόλη της Νέας Υόρκης, ή, για να μαστε πιο σαφείς, από ένα ορισμένο σημείο της πόλης. Στην

πρώτη περίπτωση κάποιοι αριθμοί αντιστοιχούν στά σημεία του σχεδίου μας μεταβάλλονται ανώμαλα, με άλματα, αλλά κρατούν πάντοτε μιά πεπερασμένη αξία. Λέμε: οί αποστάσεις μεταξύ Νέας Υόρκης και τών μερών πού μπορούμε νά φθάσουμε με τό σιδηρόδρομο μεταβάλλονται με άσυνεχή τρόπο. Αντίθετα οί αποστάσεις μεταξύ Νέας Υόρκης και τών μερών στά όποία μπορούμε νά φθάσουμε με λεωφορείο μπορούν νά μεταβάλλονται κατά διαστήματα όσο μικρά θέλουμε, δηλαδή με τρόπο συνεχή. Οί μεταβολές τής απόστασης μπορούν νά καταστούν αυθαίρετα μικρές στήν περίπτωση του λεωφορείου, όχι όμως και στήν περίπτωση του σιδηρόδρομου.

Η έξόρυξη του λιθάνθρακα από ένα άνθρακωρυχείο μπορεί νά ποικίλλει με τρόπο συνεχή. Η ποσότητα του άνθρακα πού εξάγεται μπορεί νά μειώνεται ή νά αυξάνεται κατά βαθμούς αυθαίρετα μικρούς. Αλλά ό αριθμός τών χρησιμοποιουμένων άνθρακωρύχων δέν μπορεί νά ποικίλλει παρά κατά τρόπο μή συνεχή. Θα ήταν καθαρός παραλογισμός νά πούμε: « Από χθές ό αριθμός τών άνθρακωρύχων αυξήθηκε κατά 3,783.»

Αν ρωτούσαμε σέ κάποιον πόσα χρήματα έχει στήν τσέπη του θα μπορούσε νά απαντήσει μ' ένα αριθμό πού δέν περιλαμβάνει παρά δύο δεκαδικούς. Ένα χρηματικό ποσό μπορεί νά μεταβάλλεται μόνο με πηδήματα, με τρόπο άσυνεχή. Στήν Αμερική τό μικρότερο νόμισμα, ή, όπως θα τό ονομάζουμε, τό «στοιχειώδες κβάντουμ» (quantum elementaire) είναι τό σέντς. Τό στοιχειώδες κβάντουμ του άγγλικού νομίσματος είναι τό φάρδινγκ, πού αξίζει τό μισό από τό άμερικάνικό στοιχειώδες κβάντουμ. Εδώ έχουμε τό παράδειγμα δύο στοιχειωδών κβάντα, τών όποιών οί αξίες μπορούν νά συγκριθοῦν μεταξύ τους. Ο λόγος τών αξιῶν τους έχει όρισμένο νόημα, έφ' όσον τό ένα αξίζει δύο φορές περισσότερο άπ' τό άλλο.

Μπορούμε νά πούμε: υπάρχουν ποσότητες πού μεταβάλλονται με τρόπο συνεχή και άλλες με τρόπο μόνο άσυνεχή, κατά βαθμούς πού δέν μπορούν πιά νά ελαττωθοῦν. Οί άδιαίρετοι αυτοί βαθμοί ονομάζονται τά στοιχειώδη κβάντα τής ιδιαίτερης ποσότητας πού αποτελοῦν.

Μπορούμε νά ζυγίσουμε μεγάλες ποσότητες άμμου και νά θεωρήσουμε τίς μάζες της σά συνεχείς, αν και είναι όλοφάνερη ή κοκκώδης δομή της. Αλλά αν ή άμμος ήταν πολύ πολύτιμη και οί ζυγοί πολύ ευαίσθητοι, θα έπρεπε νά πάρουμε άπ' όψη τό γεγονός ότι ή μάζα μεταβάλλεται πάντοτε κατά ένα άκέραιο πολλαπλάσιο ενός κόκκου. Η μάζα του κόκκου θα ήταν τό στοιχειώδες κβάντουμ μας. Με τό παράδειγμα αυτό βλέπουμε πώς ό άσυνεχής χαρακτήρας μιās ποσότητας, πού ως τώρα τή θεωρούσαμε συνεχή, μπορεί νά αποκαλυφθεί χάρη στή μεγαλύτερη ακρίβεια τών μετρήσεών μας.

Αν έπρεπε νά χαρακτηρίσουμε τήν κύρια ιδέα τής θεωρίας τών κβάντα με μιά μόνη πρόταση. θα λέγαμε: *είναι ανάγκη νά όποτεθει ότι οί φυσικές ποσότητες θερούμενες ως τώρα σά συνεχείς, αποτελοῦνται από στοιχειώδη κβάντα.*

Η περιοχή τών γεγονότων πού καλύπτει ή θεωρία κβάντα είναι άπεριόριστα μεγάλη. Τα γεγονότα αυτά φωτίστηκαν άπ' τήν τρομερή εξέλιξη τής τεχνικής του σύγχρονου πειράματος. Επειδή ούτε νά δείξουμε ούτε νά περιγράψουμε μπορούμε ακόμα και τά θεμελιώδη πειράματα, θα είμαστε συχνά αναγκασμένοι νά παραθέτουμε τά αποτελέσματα δογματικά. Σκοπός μας είναι νά εξηγήσουμε μόνο τίς κυριότερες ιδέες πού βρίσκονται στή βάση τής θεωρίας αυτής.

## ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΚΒΑΝΤΑ ΤΗΣ ΥΛΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

Στήν εικόνα τής ύλης πού σχεδιάστηκε άπ' τήν κινητική θεωρία, όλα τά στοιχεία αποτελοῦνται από μόρια. Ας πάρουμε τό ελαφρότερο στοιχείο, τό υδρογόνο. Στή σελίδα (73) είδαμε πώς ή μελέτη τής κίνησης του Brown όδήγησε στον καθορισμό τής μάζας ενός μορίου υδρογόνου. Η τιμή της είναι:

0,000 000 000 000 000 000 0033 γραμμάρια

Αυτό σημαίνει ότι ή μάζα είναι άσυνεχής. Η μάζα μέρους υδρογόνου δέν μπορεί νά ποικίλλει παρά κατά ένα άκέραιο

πολλαπλάσιο μικρών βαθμών, ό καθένας τών οποίων αντιστοιχεί στη μάζα ενός μορίου ύδρογόνου. Αλλά οι χημικές μέθοδοι δείχνουν ότι τό μόριο τοῦ ύδρογόνου μπορεί νά αποσυντεθεῖ σέ δύο στοιχεῖα, ή, μ' άλλα λόγια, ότι τό μόριο τοῦ ύδρογόνου αποτελείται από δύο άτομα. Στίς χημικές αντιδράσεις εἶναι τό άτομο καί ὄχι τό μόριο πού παίζει τό ρόλο τοῦ στοιχειώδους κβάντουμ. Διαιρώντας τόν παραπάνω ἀριθμό διά τοῦ 2 βρίσκουμε τή μάζα τοῦ ατόμου τοῦ ύδρογόνου, πού εἶναι περίπου:

0,000 000 000 000 000 000 0017 γραμμάρια

Ἡ μάζα εἶναι ἀσυνεχῆς ποσότητα. Βέβαια αὐτό δέ μᾶς ἀπασχολεῖ ὅταν τή ζυγίζουμε. Ἀκόμη καί οι πῶ εὐαίσθητοι ζυγοί ἀπέχουν πολύ ἀπό τόν ἀπαιτούμενο βαθμό ἀκρίβειας γιά νά ἀποκαλύψουν τήν ἀσυνέχεια τῆς μεταβολῆς τῆς μάζας.

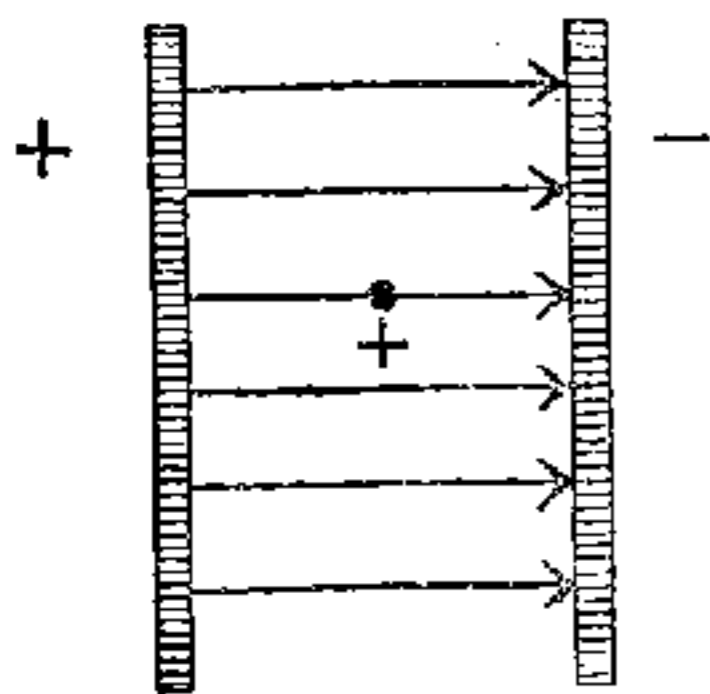
Ἄς ἐπανέλθουμε τώρα σ' ἓνα πολύ γνωστό γεγονός. Ἐνα σύρμα συνδέεται μέ μιά πηγῆ ρεύματος. Τό ρεῦμα διαπερνᾷ τό σύρμα ἀπό ἓνα μεγαλύτερο πρὸς μικρότερο δυναμικό. Θυμόμαστε ὅτι πολλά πειραματικά γεγονότα ἐξηγήθηκαν ἀπό τήν ἀπλή θεωρία τών ἠλεκτρικῶν ρευμάτων πού διαπερνοῦν τό σύρμα. Ἐπίσης θυμόμαστε (σ. 85) ὅτι εἶναι ἀπλή συμβατική ὑπόθεση νά λέμε ὅτι τό θετικό ρεῦμα κινεῖται ἀπό τό μεγαλύτερο πρὸς τό μικρότερο δυναμικό, ἢ ὅτι τό ἀρνητικό ρεῦμα κινεῖται ἀπό τό μικρότερο δυναμικό πρὸς τό μεγαλύτερο δυναμικό. Γιά τήν ὥρα ἀφίνουμε κατά μέρος ὅλη τή μεταγενέστερη πρόοδο πού προκύπτει ἀπό τίς ἐννοιες τοῦ πεδίου. Ἀκόμη κι ἂν σκεπτόμαστε μέ ὄρους τών ἠλεκτρικῶν ρευμάτων, πάντα μένουν μερικά ζητήματα γιά διασαφήνιση. Ὅπως ἀφίνει νά ἐννοηθεῖ ὁ ὄρος «ρεῦμα», ὁ ἠλεκτρισμός θεωρήθηκε στήν ἀρχή σά μιά συνεχῆς ποσότητα. Σύμφωνα μέ τίς παλιές ἀντιλήψεις, μπορούσαν νά κάνουν νά ποικίλλει ἡ ἐνταση τοῦ φορτίου κατά βαθμούς ἀθάίρετα μικρούς. Δέν ἦταν ἀνάγκη νά ὑποθέσουν στοιχειώδη ἠλεκτρικά κβάντα. Ὑστερα ἀπ' τίς κατακτήσεις τῆς κινητικῆς θεωρίας τῆς ὕλης, ἓνα νέο ζήτημα ἐμφανίστηκε: ὑπάρχουν στοιχειώδη κβάντα ἠλεκτρικῶν ρευμάτων; Ἐνα ἄλλο ζήτημα πού πρέπει νά διευκρινισθεῖ εἶναι τό

ἐξῆς: τό ρεῦμα συνίσταται σέ μιά ροή φορτίου θετικοῦ, ἀρνητικοῦ ἢ, ἴσως, περιέχει τά δύο μαζί;

Ἡ ἰδέα ὅλων τών πειραμάτων πού ἔγιναν γιά νά δοθεῖ ἀπάντηση στά ἐρωτήματα αὐτά εἶναι νά ἐλευθερωθεῖ τό ἠλεκτρικό ρευστό ἀπό τό σύρμα νά διοχετευθεῖ διά μέσου τοῦ κενοῦ χώρου, νά τοῦ ἀφαιρεθεῖ κάθε ἐπικοινωνία μέ τήν ὕλη καί κατόπιν νά μελετηθοῦν οι ἰδιότητές του, οι ὁποῖες ὑπ' αὐτούς τούς ὄρους πρέπει νά ἐμφανισθοῦν σέ ὅλη τους τήν καθαρότητα. Πολλά πειράματα τέτοιου εἴδους ἔγιναν στό τέλος τοῦ 19ου αἰῶνα. Πρὶν ἐξηγήσουμε, τουλάχιστο σέ μιά περίπτωση, τήν ἰδέα τών πειραματικῶν αὐτῶν μηχανισμῶν, θά δώσουμε τά ἀποτελέσματα. Τό ἠλεκτρικό ρευστό πού διαπερνᾷ τό σύρμα εἶναι ἀρνητικό καί συνεπῶς κατευθύνεται ἀπ' τό κατώτερο πρὸς τό ἀνώτερο δυναμικό. Ἄν τό ξέραμε αὐτό στήν ἀρχή, τότε πού διαμορφώθηκε ἡ θεωρία τών ἠλεκτρικῶν ρευμάτων, θά εἶχαμε ἀσφαλῶς ἀνταλλάξει τούς ὄρους καί ὀνομάσει τόν ἠλεκτρισμό τῆς ἐλαστικῆς ράβδου θετικό καί ἀρνητικό τόν ἠλεκτρισμό τῆς γυάλινης ράβδου. Τότε θά ἦταν πῶ βολικό νά θεωρεῖται τό ρευστό πού ἐκρέει σά θετικό. Καί ἐφ' ὅσον τό πρῶτο μας συμπέρασμα ἦταν σφαλές, πρέπει τώρα νά βουλευτοῦμε μ' αὐτό τό άτοπο. Τό σπουδαῖο ζήτημα πού τίθεται ὕστερα εἶναι νά ξέρουμε ἂν ἡ δομή τοῦ ἀρνητικοῦ αὐτοῦ ρευστοῦ εἶναι «κοκκώδης», ἂν, ναι ἢ ὄχι, ἀποτελεῖται ἀπό ἠλεκτρικά κβάντα. Πολυάριθμα πειράματα, ἀνεξάρτητα τά μέ ἀπό τά δέ, δείχνουν ὅτι ἡ ὑπαρξή ενός στοιχειώδους κβάντουμ ἀρνητικοῦ ἠλεκτρισμοῦ εἶναι ἔξω ἀπό κάθε ἀμφιβολία. Τό ἀρνητικό ἠλεκτρικό ρευστό συνίσταται ἀπό κόκκους ἀκριβῶς ὅπως ἡ ἀκρογιαλιά ἀποτελεῖται ἀπό κόκκους ἄμμου, ἢ ἓνα σπῆτι εἶναι κτισμένο μέ τοῦβλα. Τό ἀποτέλεσμα αὐτό διατυπώθηκε μέ τόν πῶ σαφεῖ τρόπο, ἐδῶ καί σαράντα χρόνια, ἀπό τόν J.J. Thomson. Τά στοιχειώδη κβάντα τοῦ ἀρνητικοῦ ἠλεκτρισμοῦ ὀνομάζονται ἠλεκτρόνια. Ἐτσι, κάθε ἀρνητικό ἠλεκτρικό φορτίο ἀποτελεῖται ἀπό ἓνα μεγάλο ἀριθμό στοιχειωδῶν φορτίων, πού τά ἀντιπροσωπεύουν τά ἠλεκτρόνια. Τό ἀρνητικό

φορτίο, όπως ή μάζα, δέν μπορεί νά μεταβληθεί παρά κατά τρόπο άσυνεχή. Ωστόσο τό στοιχειώδες ήλεκτρικό φορτίο είναι τόσο μικρό, ώστε σέ πολλές έρευνες είναι έξ ίσου δυνατό και κάπο- τε πιό βολικό νά θεωρηθεί σά συνεχής ποσότητα. Οί άτομικές και ήλεκτρονικές θεωρίες εισάγουν έτσι στην έπιστήμη φυσικές ποσότητες άσυνεχείς, πού δέν μπορούν νά μεταβάλλονται παρά μόνο μέ άλματα.

“Ας φαντασθοϋμε δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες, τοποθετημένες σ’ ένα δοχείο άπ’ όπου έχει αφαιρεθεί ό άέρας. Η μία πλάκα είναι φορτισμένη θετικά και ή άλλη άρνητικά.” Αν βάλουμε ανάμεσα στις δύο πλάκες ένα σώμα δοκιμής, θετικά φορτισμένο, ή πλάκα μέ φορτίο θετικό τό άπωθεί και τό έλκει ή



πλάκα μέ άρνητικό φορτίο. “Έτσι οι δυναμικές γραμμές του ήλεκτρικού πεδίου διευθύνονται άπό την πλάκα πού είναι φορτισμένη θετικά προς την άρνητικά φορτισμένη πλάκα.” Αν βάζαμε ανάμεσα στις πλάκες ένα σώμα δοκιμής ήλεκτρισμένο άρνητικά, ή διεύθυνση των δυναμικών γραμμών θά ήταν αντίθετη. “Αν οι πλάκες είναι άρκετά μεγάλες, οι δυναμικές γραμμές θά είναι παντού τό ίδιο πυκνές· δέν έχει σημασία πού

είναι τοποθετημένο τό σώμα δοκιμής, ή δύναμη και κατά συνέπεια ή πυκνότητα των δυναμικών γραμμών θά είναι ίδιες. “Αν κάπου ανάμεσα στις πλάκες παρεμβάλουμε ήλεκτρόνια, αυτά θά συμπεριφερθούν όπως οι σταγόνες βροχής στό έλκτικό πεδίο της Γης· θά κινηθούν παράλληλα τό ένα προς τό άλλο άπό την άρνητικά φορτισμένη πλάκα προς την φορτισμένη θετικά. Πολλοί πειραματικοί μηχανισμοί είναι γνωστοί πού επιτρέπουν νά εισάγουμε μία βροχή άπό ήλεκτρόνια σ’ ένα τέτοιο πεδίο, πού τά διευθύνει όλα μέ τον ίδιο τρόπο. Τό πιό απλό πείραμα είναι νά φέρουμε ένα θερμό σύρμα ανάμεσα στις φορτισμένες πλάκες. Ένα τέτοιο σύρμα εκπέμπει ήλεκτρόνια πού κατευθύνονται άπ’ τις δυναμικές γραμμές του έξωτερικού πεδίου. Οί λαμπτήρες T.S.F., π.χ., πού όλοι γνωρίζουμε, βασίζονται σ’ αυτή την άρχή.

“Έγιναν πολλά έξυπνα πειράματα σχετικά με τις άκτίνες των ήλεκτρονίων και μελετήθηκαν οι παρεκκλίσεις των τροχών τους σέ διάφορα έξωτερικά ήλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Κατορθώθηκε μάλιστα νά άπομονωθεί ένα ήλεκτρόνιο και νά καθορισθεί τό στοιχειώδες φορτίο του και ή μάζα του, δηλαδή ή αντίσταση άδρανείας του στην επένεργεια μιας έξωτερικής δύναμης. Έδώ θά άρκεσθούμε ν’ αναφέρουμε την τιμή της μάζας ενός ήλεκτρονίου, πού είναι περίπου δύο χιλιάδες φορές μικρότερη άπό κείνη ενός άτόμου υδρογόνου.” Έτσι ή μάζα του υδρογόνου όσο μικρή κι αν είναι, φαίνεται σέ σχέση μέ κείνη του ήλεκτρονίου, πολύ μεγάλη. Από την άποψη μιας άσστηρής θεωρίας του πεδίου, όλη ή μάζα, δηλαδή όλη ή ένέργεια ενός ήλεκτρονίου, είναι ή ένέργεια του πεδίου του· ή μεγαλύτερή του ένταση βρίσκεται στό έσωτερικό μιας πολύ μικρής σφαιρας, μακριά δέ άπ’ τό «κέντρο» του ήλεκτρονίου είναι άδύνατο.

Έίκαμε προηγούμενα ότι τό άτομο όποιουδήποτε στοιχείου είναι τό μικρότερό του στοιχειώδες κβάντουμ. Αυτό βέβαια πιστευαν για πολύ καιρό, αλλά τώρα δέν τό πιστεύουν. Η έπιστήμη θεμελίωσε μία νέα αντίληψη πού δείχνει τους περιορισμούς της παλιάς. Δύσκολα βρίσκουμε στη φυσική μία

βεβαίωση πιά στερεά ἐδραιωμένη στά γεγονότα ἀπό κείνη πού ἀφορᾷ στήν περίπλοκη δομή τοῦ ἀτόμου. Πρῶτα ἀναγνώρισαν ὅτι τό ἠλεκτρόνιο, τό στοιχειῶδες κβάντουμ τοῦ ἀρνητικοῦ ἠλεκτρικοῦ ρεύματος, εἶναι ἐπίσης ἓνα ἀπ' τὰ συνθετικά τοῦ ἀτόμου, ἓνα ἀπ' τὰ στοιχειῶδη κομμάτια ἀπ' τὰ ὁποῖα εἶναι κατασκευασμένη ἡ ὕλη. Τό παράδειγμα πού πρὶν ἀπό λίγο ἀναφέραμε τοῦ θερμοῦ σύρματος πού ἐκπέμπει τὰ ἠλεκτρόνια δέν εἶναι παρά μιᾷ ἀπ' τίς πολυάριθμες περιπτώσεις ὅπου τά μόρια αὐτά ἀποσπῶνται ἀπό τήν ὕλη. Τό ἀποτέλεσμα αὐτό, πού συνδέει στενά τό πρόβλημα τῆς δομῆς τῆς ὕλης μέ ἐκεῖνο τοῦ ἠλεκτρισμοῦ, προκύπτει ἀπό μιᾷ σειρά πειραματικῶν γεγονότων πού εἶναι ἀνεξάρτητα τά μὲν ἀπό τά δέ.

Εἶναι σχετικά εὐκόλο νά ἀποσπασθοῦν ἀπό ἓνα ἄτομο μερικά ἀπ' τὰ ἠλεκτρόνια ἀπ' τὰ ὁποῖα ἀποτελεῖται. Αὐτό πραγματοποιεῖται μέ τή θερμότητα, ὅπως στό παράδειγμα μας τοῦ θερμοῦ σύρματος, ἢ ἀλλοιῶτικα, μέ τό βομβαρδισμό τῶν ἀτόμων μέ ἄλλα ἠλεκτρόνια.

Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι βάζουμε ἓνα λεπτό μεταλλικό πυρακτωμένο σύρμα μέσα σέ ἀραιωμένο ὕδρογόνο. Τό σύρμα αὐτό θά ἐκπέμπει ἠλεκτρόνια πρὸς ὅλες τίς διευθύνσεις. Μέ τήν ἐνέργεια ἓνος ἐξωτερικοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου προσδίδεται στά ἠλεκτρόνια κάποια ταχύτητα. Τό ἠλεκτρόνιο αὐξάνει τήν ταχύτητά του ἀκριβῶς ὅπως μιᾷ πέτρα πού πέφτει στό πεδίο βαρύτητας. Μέ τή μέθοδο αὐτή μποροῦμε νά πετύχουμε μιᾷ ἀκτίνα ἠλεκτρονίων πού μετατοπίζεται μέ μιᾷ ὀρισμένη ταχύτητα σέ καθορισμένη διεύθυνση. Σήμερα μᾶς εἶναι δυνατό νά πετύχουμε ταχύτητα συγκρινόμενες μέ τοῦ φωτός ὑποβάλλοντας τὰ ἠλεκτρόνια στήν ἐπενέργεια πολύ ἰσχυρῶν πεδίων. Τί συμβαίνει ὅταν μιᾷ ἀκτίνα ἠλεκτρονίων, πού ἐνεργεῖ μέ μιᾷ ὀρισμένη ταχύτητα, προσκρούει πάνω στά μόρια τοῦ ἀραιωμένου ὕδρογόνου; Ἡ κρούση ἓνος ἀρκετά ὀρμητικοῦ ἠλεκτρονίου ὄχι μόνο θά χωρίσει βίαια στά δύο τοῦ ἄτομο τό μόριο τοῦ ὕδρογόνου, ἀλλά θά ἀποσπάσει ἐπίσης ἓνα ἠλεκτρόνιο ἀπό ἓνα ἄτομο.

Ἄς ἀποδεχτοῦμε ὅτι τὰ ἠλεκτρόνια εἶναι τὰ συστατικά τῆς ὕλης. Τότε ἓνα ἄτομο ἀπ' τό ὁποῖο ἀποσπάσθηκε ἓνα ἠλεκτρόνιο δέν μπορεῖ νά εἶναι ἠλεκτρικά οὐδέτερο. Γιατί ἂν ἦταν πρῶτα, τώρα δέν μπορεῖ νά εἶναι, ἐφ' ὅσον στερήθηκε ἓνα στοιχειῶδες φορτίο. Τό ὑπόλειμμα πρέπει νά ἔχει θετικό φορτίο. Δεδομένου ἐξ ἄλλου ὅτι ἡ μάζα ἓνος ἠλεκτρονίου εἶναι πολύ μικρότερη ἀπο κείνη τοῦ ἐλαφρότερου ἀτόμου, μποροῦμε μέ βεβαιότητα νά συμπεράνουμε ὅτι τό μεγαλύτερο μέρος τῆς μάζας τοῦ ἀτόμου δέν ἀντιπροσωπεύεται ἀπό ἠλεκτρόνια, ἀλλά ἀπ' τό ὑπόλειμμα τῶν στοιχειῶδων μορίων, πού εἶναι πολύ βαρύτερα ἀπ' τὰ ἠλεκτρόνια. Τό βαρῦ αὐτό μέρος τοῦ ἀτόμου λέγεται πυρήνας.

Ἡ νεώτερη πειραματική φυσική ἀνέπτυξε τεχνικές πού ἐπιτρέπουν νά διασπασθεῖ ὁ πυρήνας τοῦ ἀτόμου, νά μετατραποῦν τὰ ἄτομα ἓνος στοιχείου στά ἄτομα ἄλλου καί νά ἀποσπασθοῦν ἀπ' τόν πυρήνα τά βαρεῖα στοιχειῶδη συστατικά ἀπ' τὰ ὁποῖα ἀποτελεῖται. Τό κεφάλαιο αὐτό τῆς φυσικῆς, γνωστό μέ τό ὄνομα «πυρηνική φυσική», στό ὁποῖο τόσο συνέβαλε ὁ Rutherford, εἶναι ἀπό πειραματική ἀποψη τό πιά ἐνδιαφέρον. Ἀλλά μᾶς λείπει ἀκόμη μιᾷ ἀπλή θεωρία γιά τίς θεμελιακές τῆς ἰδέες, πού συνδέει τήν πλούσια ποικιλία στήν περιοχὴ τῆς πυρηνικῆς φυσικῆς. Ἀλλά, ἐπειδή στίς σελίδες αὐτές ἀσχολοῦμαστε μόνο μέ τίς γειτονικές ἰδέες τῆς φυσικῆς, ἀφίνουμε κατά μέρος τό κεφάλαιο αὐτό, παρά τή μεγάλη σημασία πού ἔχει στή νεώτερη φυσική.

## ΤΑ ΚΒΑΝΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ἄς πάρουμε ἓνα τεῖχος κτισμένο στήν ἄκρη τῆς θάλασσας. Τά κύματα συνεχῶς τό χτυποῦν, παίρνουν μαζί τους ἓνα μέρος ἀπ' τήν ἐπιφάνειά του ἀποσύρονται καί ἀφίνουν ἐλεύθερο δρόμο σ' ἄλλα κύματα πού προχωροῦν. Ἡ μάζα τοῦ τεύχους ἐλαττώνεται καί μποροῦμε νά διερωτηθοῦμε κατά πόσο ἐλαττώθηκε σ' ἓνα χρόνο π.χ. Τώρα ἂς φαντασθοῦμε μιᾷ δια-

φορετική πορεία. Θέλουμε νά ελαττώσουμε τή μάζα τοῦ τείχους κατά τήν ἴδια ποσότητα μέ τήν προηγούμενη περίπτωση, ἀλλά μέ ἄλλο τρόπο. Τό πυροβολοῦμε μέ σφαῖρες καί ἀποσπῶνται κομμάτια στό μέρος πού τό χτυποῦν οἱ σφαῖρες. Ἡ μάζα τοῦ τείχους θά ελαττωθεῖ καί μπορούμε νά φαντασθοῦμε ὅτι στίς δύο περιπτώσεις προξενήθηκε ἡ ἴδια ἐλάττωση τῆς μάζας. Ἀλλά ἡ ὄψη τοῦ τείχους μᾶς ἐπιτρέπει νά καταλάβουμε ἂν τό συνεχές κύμα τῆς θάλασσας ἢ ἡ ἀσυνεχῆς ριπή τῶν σφαιρῶν προξένησαν τό ἀποτέλεσμα. Θά μᾶς εἶναι χρήσιμο, γιά νά κατανοήσουμε τά φαινόμενα πού περιγράφουμε νά κρατήσουμε στή μνήμη μας τή διαφορά ἀνάμεσα στήν ἐνέργεια τῶν κυμάτων τῆς θάλασσας καί τῆς ριπῆς τῶν σφαιρῶν.

Εἶπαμε προηγούμενα ὅτι ἕνα θερμό σύρμα ἐκπέμπει ἠλεκτρόνια. Ἐδῶ θά χρησιμοποιήσουμε ἄλλο μέσο γιά ν' ἀποσπάσουμε ἀπό ἕνα μέταλλο ἠλεκτρόνια. Ἐνα ὁμογενές φῶς, ἰσῶδες γιά παράδειγμα, πού ἔχει, ὅπως ξέρουμε, ὀρισμένο μήκος κύματος, πέφτει πάνω σέ μιὰ μεταλλική ἐπιφάνεια καί τῆς ἀποσπᾷ ἠλεκτρόνια. Μιά βροχή ἀπ' αὐτά μετατοπίζεται μέ μιὰ κάποια ταχύτητα. Σύμφωνα μέ τήν ἀρχή τῆς ἐνεργείας μπορούμε νά ποῦμε: ἡ ἐνέργεια τοῦ φωτός μετατρέπεται μερικά σέ κινητική ἐνέργεια τῶν ἀποσπασθέντων ἠλεκτρονίων. Χάρη στή νεώτερη πειραματική τεχνική εἴμαστε σέ θέση νά καταγράψουμε τίς ἠλεκτρονικές αὐτές σφαῖρες, νά καθορίσουμε τήν ταχύτητά τους καί κατά συνέπεια τήν ἐνέργειά τους. Αὐτή ἡ ἀπόσπαση ἠλεκτρονίων μέ τήν πίεση τοῦ φωτός πάνω σέ μέταλλο ὀνομάζεται *φωτοηλεκτρικό φαινόμενο*.

Ἡ ἀφετηρία μας ἦταν ἡ ἐνέργεια ἑνός ὁμογενοῦς φωτεινοῦ κύματος, ὀρισμένης ἔντασης. Ὅπως σέ κάθε πείραμα ἔτσι κι' ἐδῶ ὀφείλουμε νά τροποποιήσουμε τήν πορεία μας γιά νά διαπιστώσουμε ἂν προκύπτει κάποια ἐπίδραση στό ἀποτέλεσμα πού παρατηρήθηκε.

Στήν ἀρχή ἄς μεταβάλουμε τήν ἔνταση τοῦ ὁμογενοῦς ἰσῶδους φωτός κι' ἄς δοῦμε κατά πόσο ἡ ἐνέργεια τῶν ἀποσπασθέντων ἠλεκτρονίων ἐξαρτᾶται ἀπό τήν ἔνταση τοῦ

φωτός. Ἀς ἐπιχειρήσουμε νά βροῦμε τήν ἀπάντηση μέ συλλογισμό ἀντί νά προστρέξουμε στό πείραμα. Θά μπορούσαμε νά συλλογισθοῦμε ὡς ἐξῆς: σιό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ἕνα ὀρισμένο μέρος ἀκτινοβόλου ἐνεργείας μετατρέπεται σέ κινητική ἐνέργεια τῶν ἠλεκτρονίων. Ἄν φωτίσουμε καί πάλι τήν πλάκα μέ φῶς ἴδιου μήκους κύματος ἀλλά προερχομένου ἀπό μιὰ ἰσχυρή πηγή ἢ ἐνέργεια τῶν ἀποσπασμένων ἠλεκτρονίων θά ἔπρεπε νά εἶναι μεγαλύτερη, ἐφ' ὅσον ἡ ἀκτινοβολία εἶναι πλουσιώτερη σέ ἐνέργεια. Θά ἔπρεπε συνεπῶς νά περιμένουμε μιὰ αὐξημένη ταχύτητα τῶν ἀποσπασμένων ἠλεκτρονίων ἐφ' ὅσον αὐξάνει ἡ ἔνταση τοῦ φωτός. Τό πείραμα ὁμῶς ἀντιφάσκει στήν πρόβλεψή μας. Ἄλλη μιὰ φορά βλέπουμε ὅτι οἱ νόμοι τῆς φύσης δέν εἶναι τέτοιοι πού θά τοὺς θέλαμε νά εἶναι. Εἴμαστε μπρός σ' ἕνα ἀπ' τὰ πειράματα, τά ὁποῖα ἀντιφάσκοντας στίς προβλέψεις μας, ἀνιτρέπουν τή θεωρία πάνω στήν ὁποία βασιζόνταν αὐτές. Τό πραγματικό πειραματικό ἀποτέλεσμα ἀπό τήν ἀποψη τῆς κυματικῆς θεωρίας, εἶναι καταπληκτικό. Τά παρατηρούμενα ἠλεκτρόνια ἔχουν ὅλα τήν ἴδια ταχύτητα, τήν ἴδια ἐνέργεια, πού δέν ποικίλλει μέ τήν αὐξηση τῆς ἔντασης τοῦ φωτός.

Τό πειραματικό αὐτό ἀποτέλεσμα δέν μπορούσε νά προβλεφθεῖ ἀπό τήν κυματική θεωρία. Ἄλλη μιὰ φορά γεννιέται μιὰ νέα θεωρία ἀπ' τή σύγκρουση ἀνάμεσα στήν παλιά θεωρία καί στό πείραμα.

Τολμοῦμε νά εἴμαστε ἄδικοι ἀπέναντι στήν κυματική θεωρία τοῦ φωτός, νά ξεχάσουμε τίς μεγάλες κατακτήσεις της καί τήν περίφημη ἐξήγησή της σχετικά μέ τήν περίθλαση τοῦ φωτός γύρω ἀπό πολύ μικρά ἐμπόδια. Συγκεντρώνοντας τήν προσοχή μας πάνω στό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, ζητᾶμε ἀπό τή θεωρία νά μᾶς δώσει μιὰ σχετικά ὀλοκληρωμένη ἐξήγηση. Δέν μπορούμε προφανῶς νά συμπεράνουμε ἀπό τήν κυματική θεωρία ὅτι ἡ ἐνέργεια τῶν ἠλεκτρονίων εἶναι ἀνεξάρτητη ἀπό τήν ἔνταση τοῦ φωτός, ἀπό τό ὁποῖο ἀποσπᾶσθηκαν ἀπό τήν μεταλλική πλάκα. Συνεπῶς θά δοκιμάσουμε μιὰ ἄλλη θεωρία. Θυμάμαστε ὅτι ἡ μοριακή θεωρία τοῦ Νεύτονα, ἂν καί ἐξηγεῖ

πολλά φαινόμενα του φωτός δεν πετυχαίνει ωστόσο να δώσει λόγο για την περίθλαση του φωτός, που τολμούμε τώρα να παραμελήσουμε. Στόν καιρό του Νεύτονα δεν υπήρχε ή έννοια της ενέργειας. Τά μόρια του φωτός, σύμφωνα μ' αυτόν, δεν είχαν βάρος, κάθε χρώμα διατηρούσε τόν δικό του ουσιαστικό χαρακτήρα. Αργότερα, όταν δημιουργήθηκε ή έννοια της ενέργειας και αναγνώρισαν ότι τό φώς μεταφέρει ενέργεια, κανείς δέ σκέφθηκε να εφαρμόσει τίς έννοιες αυτές στη μοριακή θεωρία του φωτός. Η θεωρία του Νεύτονα ήταν νεκρή και, πρίν απ' τόν αιώνα μας, ή αναγέννησή της δέν αντιμετώπιστηκε σοβαρά.

Γιά να κρατηθούμε στην κύρια ιδέα της νευτονικής θεωρίας, πρέπει να υποθέσουμε ότι τό όμογενές φώς αποτελείται από κόκκους ενέργειας και να αντικαταστήσουμε τά παλιά μόρια φωτός μέ τά κβάντα φωτός, που θά όνομάζουμε *φωτόνια* είναι μικρά μέρη ενέργειας που μετατοπίζονται διά μέσου του κενού χώρου μέ τήν ταχύτητα του φωτός. Η αναγέννηση της νευτονικής θεωρίας μέ τή νέα αυτή μορφή οδηγεί στη θεωρία των κβάντα του φωτός. "Όχι μόνο ή ύλη και τό ηλεκτρικό φορτίο, άλλ' άκόμα και ή άκτινοβολούσα ενέργεια έχει μία κοκκώδη δομή, δηλαδή αποτελείται από κβάντα φωτός. Εκτός από τά κβάντα ύλης και τά κβάντα ηλεκτρισμού υπάρχουν άκόμη και τά κβάντα ενέργειας.

Η ιδέα των κβάντα ενέργειας παρουσιάσθηκε για πρώτη φορά από τόν Planck στην άρχή του αιώνα μας, για να εξηγηθούν κάποια πολύ πιο περίπλοκα αποτελέσματα απ' τό φωτοηλεκτρικό. Αλλά τό τελευταίο τουτο μάς φανερώνει μέ τό σαφέστερο και απλούστερο τρόπο τήν ανάγκη αλλαγής των παλιών μας έννοιών.

Γίνεται άμέσως σαφές ότι ή θεωρία των κβάντα φωτός εξηγεί τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Μιά βροχή από φωτόνια πέφτει πάνω σέ μία μεταλλική πλάκα. Η ενέργεια άνάμεσα στην άκτινοβολία και στην ύλη συνίσταται έδώ σ' ένα μεγάλο αριθμό ιδιαίτερων διαδικασιών, όπου ένα φωτόνιο κτυπά τό

άτομο και άποσπά ένα ήλεκτρόνιο. Τά ιδιαίτερα αυτά περιστατικά είναι όλα τά ίδια και τό άποσπασθέν άτομο θά έχει σέ κάθε περίπτωση τήν ίδια ενέργεια. Κατανοούμε επίσης ότι αύξηση της έντασης του φωτός σημαίνει στη νέα μας όρολογία, αύξηση του αριθμού των προσπιπτόντων φωτονίων. Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των άποσπωμένων ήλεκτρονίων απ' τή μεταλλική πλάκα θά ήταν μεγαλύτερος, αλλά ή ενέργεια του καθενός δέ θά μεταβαλόταν. Βλέπουμε έδώ ότι ή θεωρία αυτή είναι έντελώς σύμφωνη μέ τήν παρατήρηση.

Τι θά συμβεί αν μία άκτινα όμογενοδς φωτός διαφορετικού χρώματος, έρυθροδ για παράδειγμα αντί ιώδους, προσκρούσει στη μεταλλική επιφάνεια; "Ας αφήσουμε τό πείραμα να άπαντήσει στο έρώτημα. Η ενέργεια των άποσπωμένων ήλεκτρονίων πρέπει να μετρηθεί και συγκριθεί μέ τήν ενέργεια των ήλεκτρονίων που άποσπώνται μέ τό ιώδες φώς. Βρίσκουμε ότι ή ενέργεια των κβάντα φωτός είναι διαφορετική για τά διαφορετικά χρώματα. Τά φωτόνια που ανήκουν στο έρυθρό χρώμα έχουν ενέργεια κατά τό μισό μικρότερη από εκείνη των ήλεκτρονίων του ιώδους χρώματος. "Η άκριβέστερα: ή ενέργεια ενός κβάντουμ φωτός που ανήκει σ' ένα όμογενές χρώμα, έλαττώνεται άνάλογα μέ τήν αύξηση του μήκους κύματος. "Υπάρχει μία ουσιώδης διαφορά άνάμεσα στα κβάντα ενεργείας και στα κβάντα ηλεκτρισμού. Τά κβάντα φωτός διαφέρουν για κάθε μήκος κύματος, ενώ τά κβάντα ηλεκτρισμού είναι πάντα τά ίδια. "Αν μάς επιτρεπόταν να χρησιμοποιήσουμε μία απ' τίς προηγούμενες αναλογίες μας, θά συγκρίναμε τά κβάντα φωτός μέ τά μικρότερα νομισματικά κβάντα, που διαφέρουν σέ κάθε χώρα.

"Ας συνεχίσουμε να παραμελούμε τήν κυματική θεωρία του φωτός και άς παραδεχτούμε ότι ή δομή του φωτός είναι κοκκώδης και αποτελείται από κβάντα φωτός, δηλαδή από φωτόνια που μετατοπίζονται στο χώρο μέ ταχύτητα 300000 χιλιόμετρα στο δευτερόλεπτο. Έτσι τό φώς, είναι στην νέα μας εικόνα, μία βροχή από φωτόνια, και τό φωτόνιο είναι τό

στοιχειώδες κβάντουμ ενέργειας του φωτός. Αλλά αν απομακρύνουμε την κυματική θεωρία, ή έννοια του μήκους κύματος εξαφανίζεται, και την αντικαθιστά ή έννοια της ενέργειας του κβάντα φωτός. Οι διαπιστώσεις που εκφράζονται με όρους της κυματικής θεωρίας μπορούν να μεταφραστούν με όρους της θεωρίας των κβάντα ακτινοβολίας. Παράδειγμα:

#### ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ

Τό ομογενές φῶς έχει μήκος κύματος ορισμένο. Τό μήκος κύματος του έρυθρου του φάσματος είναι δύο φορές μεγαλύτερο από εκείνο του ιώδους.

#### ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΩΝ ΚΒΑΝΤΑ

Τό ομογενές φῶς αποτελείται από φωτόνια ορισμένης ενέργειας. Η ενέργεια του έρυθρου φωτονίου του φάσματος είναι τό μισό της ενέργειας του ιώδους.

Τά πράγματα μπορούν να συνοψισθούν με τόν ακόλουθο τρόπο:

Υπάρχουν φαινόμενα που μπορούν να εξηγηθούν με τη θεωρία των κβάντα όχι όμως και με την κυματική θεωρία. Παράδειγμα μᾶς παρέχει τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αλλά γνωρίζουμε και άλλα του ίδιου είδους. Υπάρχουν εξ άλλου φαινόμενα που εξηγούνται με την κυματική θεωρία, όχι όμως με τη θεωρία των κβάντα. Η περίθλαση του φωτός γύρω από εμπόδια είναι ένα τέτοιο τυπικό παράδειγμα. Υπάρχουν τέλος φαινόμενα, όπως είναι τό φαινόμενο της εὐθύγραμμης διαδόσεως του φωτός που μπορούν εξ ίσου να εξηγηθούν και με την μιά και με ἄλλη θεωρία.

Αλλά τό φῶς τί είναι στην πραγματικότητα; Είναι κύμα ή βροχή φωτονίων; Έχουμε ήδη θέσει ένα τέτοιο ερώτημα: τό φῶς είναι κύμα ή βροχή φωτεινῶν μορίων; Τότε εἴχαμε κάθε λόγο να παραμερίσουμε τη μοριακή θεωρία του φωτός και να υιοθετήσουμε την κυματική θεωρία, που περιλαμβάνει όλα τά φαινόμενα. Τώρα τό πρόβλημα είναι πολύ περιπλοκότερο. Δέ φαίνεται να υπάρχει πιθανότητα ότι είναι δυνατή μιά συνεκτική περιγραφή των φαινομένων του φωτός χρησιμοποιώντας απο-

κλειστικά τη μιά απ' τις δύο δυνατές ορολογίες. Έχει φορές που αναγκαζόμαστε να χρησιμοποιήσουμε τη μιά απ' τις θεωρίες, άλλες φορές πάλι την ἄλλη, και κάποτε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τις δύο μαζί. Βρισκόμαστε απέναντι σε μιά νέα δυσκολία. Έχουμε δύο αντιφατικές εικόνες της πραγματικότητας. Καμιά, χωριστά λαμβανόμενη, δέν εξηγεί πλήρως τά φαινόμενα του φωτός, αλλά μαζί κατορθώνουν να τό κάνουν.

Είναι δυνατό να συνδυάσουμε τις δύο αυτές εικόνες; Πῶς να εξηγήσουμε τις δύο αυτές εξαιρετικά διαφορετικές ὄψεις του φωτός; Δέν είναι εύκολο να λογοδοτήσουμε για τη νέα αυτή δυσκολία. Και πάλι βρισκόμαστε μπρός σ' ένα θεμελιακό πρόβλημα.

Για την ὥρα θά παραδεχτούμε τη θεωρία των φωτονίων του φωτός και με την βοήθειά της θά επιχειρήσουμε να εξηγήσουμε τά γεγονότα που εξηγοῦσαν ὡς τώρα με την κυματική θεωρία. Μ' αυτό τόν τρόπο θά κάνουμε ανάγλυφες τις δυσκολίες, οι οποίες με την πρώτη ματιά, μᾶς δείχνουν ασυμβίβαστες τις δύο θεωρίες.

Υπενθυμίζουμε ότι μιά ἄκτινα ομογενοῦς φωτός όταν διέρχεται από μιά ὀπή βελόνας παράγει κρίκους ἐναλλάξ φωτεινούς και σκοτεινούς (σ. 119). Πῶς να ἐρμηνευθεῖ τό φαινόμενο αυτό με τη βοήθεια της θεωρίας των κβάντα φωτός παραμερίζοντας την κυματική θεωρία; Κάνοντας να περάσει ένα φωτόνιο μέσα από ὀπή βελόνας, ή ὀθόνη πρέπει να φανεῖ φωτεινή αν περάσει τό φωτόνιο και σκοτεινή αν δέν περάσει. Αντίγι' αυτό βρίσκουμε κρίκους φωτεινούς και σκοτεινούς ἐναλλάξ. Θά μπορούσαμε να δώσουμε την ακόλουθη ἐξήγηση: ἴσως υπάρχει κάποια ἐπενέργεια του χείλους της ὀπῆς πάνω στο φωτόνιο, που εὐθύνεται για την ἐμφάνιση των κρίκων από την περίθλαση. Η πρόταση αυτή μόλις μπορεί να θεωρηθεῖ σά μιά ἐξήγηση. Τό πολύ-πολύ να τη θεωρήσουμε σά πρόγραμμα μᾶς ἐξήγησης που δίνει κάποια ἐλπίδα ότι θά φθάσουμε στο μέλλον να ἐξηγήσουμε την περίθλαση με την ἐπενέργεια της ὕλης πάνω στα φωτόνια.

Ἄλλά καί ἡ ἀδύνατη αὐτή ἐλπίδα ἐξαφανίζεται ὅταν θυμόμαστε τή διερεύνησή μας ἐνός ἄλλου πειραματικοῦ μηχανισμοῦ. Ἄς πάρουμε δύο ὀπές βελόνας. Τό ὁμογενές φῶς τοῦ περνᾷ μέσα ἀπ' αὐτές προβάλλει πάνω στήν ὀθόνη ταινίες ἐναλλάξ φωτεινές καί σκοτεινές. Πῶς νά ἐρμηνευθεῖ αὐτό τό ἀποτέλεσμα ἀπό τήν ἀποψη τῆς θεωρίας τῶν κβάντα φωτός; Θά μπορούσαμε νά συλλογισθοῦμε ὡς ἑξῆς: ἕνα φωτόνιο περνᾷ μέσα ἀπ' τή μιᾶ ἢ τήν ἄλλη ὀπή τῆς βελόνας. Ἄν ἕνα φωτόνιο ὁμογενοῦς φωτός ἀντιπροσωπεύει ἕνα στοιχειῶδες μόριο φωτός, σχεδόν δέν μπορούμε νά φαντασθοῦμε ὅτι διαιρεῖται καί περνᾷ μέσα ἀπ' τίς δύο ὀπές. Ἄλλά τότε τό ἀποτέλεσμα ἔπρεπε νά εἶναι ἀκριβῶς τό ἴδιο μέ τήν προηγούμενη περίπτωση: κρίκοι φωτεινοί καί σκοτεινοί καί ὄχι ταινίες φωτεινές καί σκοτεινές. Πῶς εἶναι δυνατό ἡ παρουσία μιᾶς δευτέρας ὀπῆς νά ἀλλάζει τελείως τό ἀποτέλεσμα; Εἶναι ὅπως φαίνεται ἡ ὀπή μέσα ἀπ' τήν ὁποία δέν περνᾷ τό φωτόνιο, ἀκόμη κι ἂν βρίσκεται σέ κατάλληλη ἀπόσταση, πού μεταμορφώνει τοὺς κρίκους σέ ταινίες. Ἄν τό φωτόνιο συμπεριφέρεται ὅπως τό μόριο στήν κλασσική φυσική, πρέπει νά περάσει διά μέσου τῆς μιᾶς ἀπ' τίς δύο ὀπές. Ἄλλά στήν περίπτωση αὐτή τά φαινόμενα τῆς περίθλασης φαίνονται τελείως ἀκατανόητα.

Ἡ ἐπιστήμη μᾶς ἀναγκάζει νά δημιουργοῦμε νέες ἰδέες καί θεωρίες. Σκοπός τους εἶναι νά καταστρέφουν τό σωρό τῶν ἀντιφάσεων πού φράζουν τή διάβαση στήν ἐπιστημονική πρόοδο. Ὅλες οἱ σημαντικές ἰδέες στήν ἐπιστήμη γεννήθηκαν ἀπ' τή δραματική πάλη ἀνάμεσα στήν πραγματικότητα καί στίς προσπάθειες μας νά τήν κατανοήσουμε. Ἐδῶ βρσκόμαστε καί πάλι μπρός σ' ἕνα πρόβλημα γιά τή λύση τοῦ ὁποίου εἶναι ἀναγκαῖες νέες ἀρχές. Πρὶν ἐπιχειρήσουμε νά λογοδοτήσουμε γιά τίς προσπάθειες τῆς νεώτερης φυσικῆς γιά νά ἐξηγήσει τήν ἀντίφαση ἀνάμεσα στήν κβαντική ἀποψη καί στήν κυματική ἀποψη τοῦ φωτός, θά δείξουμε ὅτι ἀκριβῶς ἡ ἴδια δυσκολία παρουσιάζεται ὅταν πραγματευόμαστε τά κβάντα ὕλης ἀντί τά κβάντα φωτός.

## ΦΩΤΕΙΝΑ ΦΑΣΜΑΤΑ

Γνωρίζουμε ἤδη ὅτι ὅλη ἡ ὕλη συνίσταται ἀπό ἕνα μικρό ἀριθμό εἰδῶν σωματιδίων. Τά πρῶτα στοιχειῶδη σωματίδια τῆς ὕλης πού ἀνακάλυψαν ἦταν τά ἠλεκτρόνια. Ἄλλ' αὐτά εἶναι ἐπίσης καί τά στοιχειῶδη κβάντα τοῦ ἀρνητικοῦ ἠλεκτρισμοῦ. Μάθαμε ἀκόμη ὅτι μερικά φαινόμενα μᾶς ἀναγκάζουν νά ὑποθέσουμε ὅτι τό φῶς ἀποτελεῖται ἀπό στοιχειῶδη κβάντα φωτός πού διαφέρουν κατά τά διαφορετικά μήκη κύματος. Πρὶν προχωρήσουμε, πρέπει νά διερευνήσουμε μερικά φυσικά φαινόμενα ὅπου τόσο ἡ ὕλη ὅσο καί ἡ ἀκτινοβολία παίζουν ἕνα σημαντικό ρόλο.

Ὁ ἥλιος ἐκπέμπει ἀκτινοβολία ἡ ὁποία μπορεῖ μ' ἕνα πρίσμα νά ἀναλυθεῖ στά συστατικά της. Εἶναι δυνατό ἔτσι νά πάρουμε τό συνεχές φάσμα τοῦ Ἡλίου. Σ' αὐτό ἀντιπροσωπεύονται ὅλα τά μήκη κύματος πού κλιμακώνονται ἀνάμεσα στά δύο ἄκρα τοῦ ὁρατοῦ φάσματος. Ἄς πάρουμε ἄλλο παράδειγμα. Ἐχομε ἤδη ἀναφέρει ὅτι τό νάτριο σέ πυρακτωμένη κατάσταση ἐκπέμπει ἕνα ὁμογενές φῶς, πού ἔχει ἕνα μόνο χρῶμα ἢ ἕνα μόνο μήκος κύματος. Ἄν τό τοποθετήσουμε μπρός στό πρίσμα, βλέπουμε μιᾶ μόνο κίτρινη γραμμή. Γενικά ὅταν τοποθετοῦμε ἕνα ἀκτινοβόλο σῶμα μπρός σ' ἕνα πρίσμα, τό φῶς πού ἐκπέμπει ἀναλύεται στά συστατικά του, πρῶγμα πού μᾶς φανερώνει τό χαρακτηριστικό φάσμα τοῦ ἐκπέμποντος σώματος.

Ἡ ἠλεκτρική ἐκκένωση μέσα στό σωλῆνα πού περιέχει ἀέριο παράγει μιᾶ φωτεινὴ πηγὴ, ὅπως τό βλέπουμε στοὺς σωλῆνες τοῦ «νέον» πού χρησιμοποιοῦν γιά τίς φωτεινές διαφημίσεις. Ἄς ὑποθέσουμε ὅτι τοποθετοῦμε ἕνα τέτοιο σωλῆνα ἐμπρός σ' ἕνα φασματοσκόπιο, ὄργανο πού συμπεριφέρεται ὅπως τό πρίσμα, ἀλλά πού ἔχει πολὺ μεγαλύτερη ἀκρίβεια καί εὐαισθησία. ἀποσυνθέτει τό φῶς στά συστατικά του, δηλαδή τό ἀναλύει. Τό ἠλιακὸ φῶς, ὅταν τό δοῦμε διά μέσου τοῦ φασματοσκοπίου δίνει ἕνα συνεχές φάσμα, ὅπου ἀντιπροσω-

πεύονται όλα τα μήκη κύματος. Αλλά αν η φωτεινή πηγή είναι αέριο διά μέσου του οποίου περνά ηλεκτρικό ρεύμα, τό φάσμα παρουσιάζει διαφορετικό χαρακτήρα. Αντί του συνεχούς πολύχρωμου ήλιακού φάσματος, βλέπουμε νά εμφανίζονται σ' ένα συνεχές μαύρο φόντο χωριστές φωτεινές ταινίες. Κάθε ταινία, αν είναι πολύ στενή, αντιστοιχεί σ' ένα ώρισμένο χρώμα, ή, μέ την όρολογία της κυματικής θεωρίας, σ' ένα ώρισμένο μήκος κύματος. Αν, γιά παράδειγμα, είκοσι γραμμές είναι όρατές στό φάσμα, κάθε μία άπ' αυτές θά σημειωθεί μ' ένα άπ' τούς είκοσι αριθμούς πού εκφράζουν τό αντίστοιχο μήκος κύματος. Οί εξατμίσεις τών διαφόρων στοιχείων έχουν διάφορα συστήματα γραμμών και συνεπώς διάφορους συνδυασμούς αριθμών, πού παριστάνουν τά μήκη κύματος πού αποτελούν τό εκπεμπόμενο φωτεινό φάσμα. Δέν υπάρχουν δύο στοιχεία πού νά έχουν πανομοιότυπα συστήματα ταινιών στά χαρακτηριστικά τους φάσματα, όπως δέν υπάρχουν δύο πρόσωπα τών όποιων τά δακτυλικά αποτυπώματα νά είναι τελείως όμοια. Όταν καταστρώθηκε άπ' τούς φυσικούς ό κατάλογος τών γραμμών, ή ύπαρξη νόμων έγινε σιγά-σιγά όλοφάνερη και μόρεσαν νά αντικαταστήσουν μερικές σειρές αριθμών πού εκφράζουν τά διάφορα μήκη κύματος και πού φαινομενικά είναι χωρίς συνοχή, μέ ένα άπλό μαθηματικό τύπο.

Όσα πρό όλίγου είπαμε μπορούν τώρα νά μεταφρασθοϋν στην όρολογία τών φωτονίων. Οί ταινίες αντιστοιχούν σέ κάποια όρισμένα μήκη κύματος ή μ' άλλα λόγια, σέ φωτόνια μιās όρισμένης ενέργειας. Τά φωτεινά αέρια δέν εκπέμπουν συνεπώς φωτόνια πού έχουν όλες τίς ενέργειες, αλλά μόνο φωτόνια χαρακτηριστικά της ούσίας. Και πάλι ή πραγματικότητα έρχεται νά περιορίσει τόν πλούτο τών δυνατοτήτων.

Τά άτομα ενός ιδιαίτερου στοιχείου, του ύδρογόνου π.χ. δέν μπορούν νά εκπέμπουν παρά φωτόνια όρισμένων ενεργειών. Μόνο ή έκπομπή τών κβάντα όρισμένης ενέργειας επιτρέπεται, όλες οί άλλες είναι άπαγορευμένες. Ας φαντασθοϋμε γιά λόγους άπλοποίησης ότι κάποιο στοιχείο δέν εκπέμπει παρά μόνο μία γραμμή, δηλαδή φωτόνια έντελώς όρισμένης ενέργειας. Τό

άτομο είναι πλουσιότερο σέ ενέργεια πριν άπ' την έκπομπή και πτωχότερο στην συνέχεια. Από την άρχή της διατήρησης της ενέργειας προκύπτει κατ' ανάγκη ότι τό επίπεδο ενέργειας ενός ατόμου είναι ύψηλότερο πριν από την έκπομπή και πιο χαμηλό μετά την έκπομπή και ότι ή διαφορά ανάμεσα στα δύο επίπεδα πρέπει νά ίσοϋται μέ την ενέργεια του εκπεμφθέντος φωτονίου. Έτσι τό γεγονός ότι τό άτομο ενός προσδιορισμένου στοιχείου εκπέμπει ακτινοβολία μέ ένα μόνο μήκος κύματος, δηλαδή φωτόνια μιās όρισμένης μόνο ενέργειας, θά μπορούσε νά εκφρασθεϊ διαφορετικά: δύο μόνο επίπεδα ενέργειας επιτρέπονται σ' ένα άτομο του στοιχείου αυτού, και ή έκπομπή ενός φωτονίου αντιστοιχεί στην μετάβαση του ατόμου από ένα άνωτερο επίπεδο ενέργειας σ' ένα κατώτερο επίπεδο ενέργειας.

Γενικά όμως περισσότερες από μία γραμμές εμφανίζονται στα φάσματα τών στοιχείων. Τά εκπεμπόμενα φωτόνια αντιστοιχούν σέ περισσότερες ενέργειες και όχι σέ μόνο μία, ή, μ' άλλα λόγια, πρέπει νά ύποθέσουμε ότι πολλά επίπεδα ενέργειας επιτρέπονται σ' ένα άτομο και ότι ή έκπομπή ενός φωτονίου αντιστοιχεί στην μετάβαση του ατόμου από ένα άνωτερο επίπεδο ενέργειας σ' ένα κατώτερο. Τό σημαντικό είναι νά μή παραδεχόμαστε κάθε επίπεδο ενέργειας, δεδομένου ότι στό φάσμα ενός στοιχείου δέν εμφανίζεται κάθε δυνατό μήκος κύματος, κάθε δυνατή ενέργεια φωτονίου. Αντί νά ποϋμε ότι στό φάσμα κάθε ατόμου ανήκουν κάποιες όρισμένες γραμμές, κάποια όρισμένα μήκη κύματος, μπορούμε νά ποϋμε ότι κάθε άτομο έχει κάποια όρισμένα επίπεδα ενέργειας και ότι ή έκπομπή τών κβάντα φωτός συνδέεται μέ τή μετάβαση ενός ατόμου από ένα επίπεδο ενέργειας σ' ένα άλλο. Τα ενεργειακά επίπεδα γενικά δέν είναι συνεχή αλλά άσυνεχη. Και πάλι βλέπουμε ότι οί δυνατότητες περιορίζονται άπ' την πραγματικότητα.

Πρώτος ό Bohr άπόδειξε γιατί είναι άκριβώς αυτές οί γραμμές και όχι άλλες, πού εμφανίζονται στό φάσμα. Η θεωρία του, πού διατυπώθηκε έδω και είκοσι πέντε χρόνια, χαράζει μία εικόνα του ατόμου, πού επιτρέπει στίς άπλές τουλάχιστο περιπτώσεις, νά ύπολογίσουμε τά φάσματα τών στοιχείων και οί αριθμοί

φαινομενικά χωρίς σημασία και συνοχή, αποτελούν, στο φως αυτής της θεωρίας, ένα συνεκτικό σύνολο.

Η θεωρία του Bohr αποτελεί μία ενδιάμεση βαθμίδα προς μία πιο βαθειά και πιο γενική θεωρία, που ονομάζεται κυματική ή κβαντική μηχανική. Έχουμε τη πρόθεση στις τελευταίες αυτές σελίδες να χαρακτηρίσουμε τις κυριότερες ιδέες της θεωρίας αυτής. Αλλά πριν το κάνουμε, οφείλουμε να αναφέρουμε ένα θεωρητικό και πειραματικό αποτέλεσμα μ' ένα πιο ιδιαίτερο χαρακτήρα.

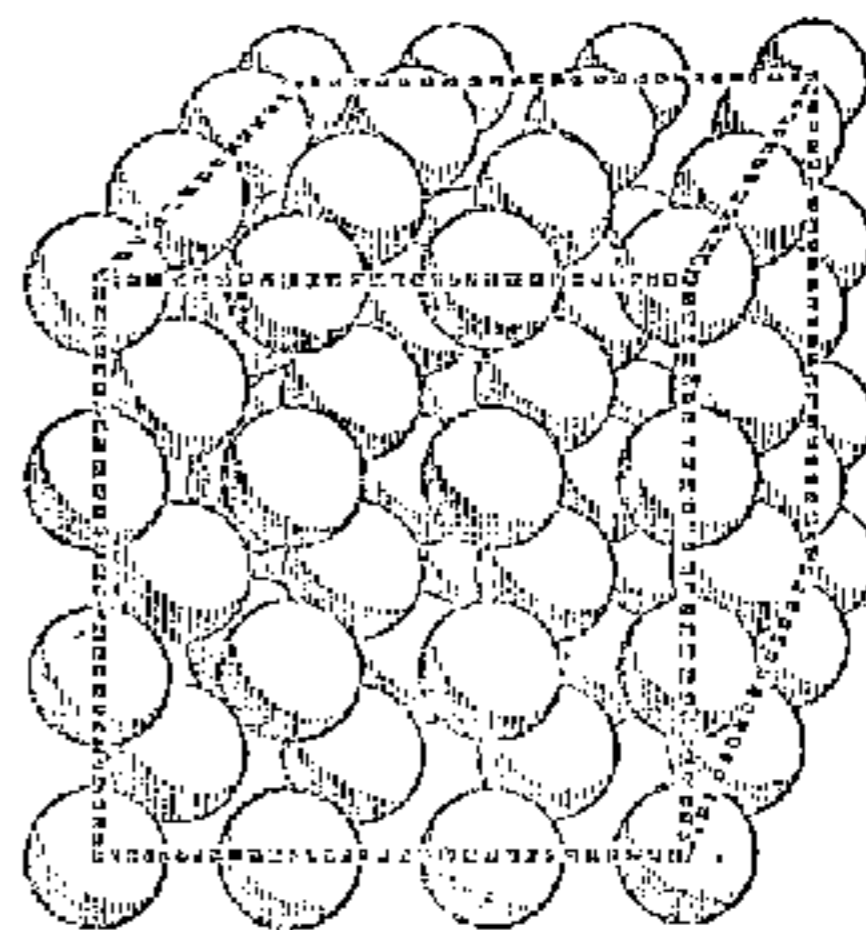
Τό όρατό μας φάσμα αρχίζει από ένα κάποιο μήκος κύματος για τό ιώδες χρώμα και τελειώνει με ένα κάποιο μήκος κύματος για τό έρυθρό χρώμα, ή, μ' άλλα λόγια, οί ενέργειες τών φωτονίων στο όρατό φάσμα περικλείονται πάντοτε μεταξύ τών ορίων που αποτελούν οί ενέργειες τών φωτονίων τών χρωμάτων ιώδους και ερυθρού. Ο περιορισμός αυτός δέν είναι στην πραγματικότητα παρά μία ιδιότητα του ανθρώπινου οφθαλμού. Αν ή διαφορά κάποιων επιπέδων ενέργειας είναι αρκετά μεγάλη, θά εκπεμφθεί τό υπεριώδες φωτόνιο, που μάς δίνει μία γραμμή πέρα του όρατου φάσματος. Η παρουσία της δέν είναι όρατη με γυμνό όφθαλμό. Χρειάζεται φωτογραφική πλάκα.

Οί ακτίνες X αποτελούνται επίσης από φωτόνια, που ή ενέργειά τους είναι πολύ μεγαλύτερη από κείνη του όρατου φωτός, ή, μ' άλλα λόγια, τά μήκη κύματος είναι πολύ μικρότερα, χιλιάδες φορές μικρότερα από κείνα του όρατου φωτός.

Αλλά είναι δυνατό να προσδιορίσουμε πειραματικά τά μήκη κύματος ενός τόσο μικρού μεγέθους; Ήταν ήδη αρκετά δύσκολο αυτό προκειμένου για τό συνηθισμένο φως· χρειάστηκε να χρησιμοποιήσουμε πολύ μικρά εμπόδια ή πολύ μικρά ανοίγματα. Οί δύο όπες βελόνας τοποθετημένες πολύ κοντά ή μία στην άλλη, που φανέρωναν τή περίθλαση του συνηθισμένου φωτός, θά έπρεπε να είναι χιλιάδες φορές μικρότερες και πιο κοντά ή μία στην άλλη για να φανερώσουν τή περίθλαση τών ακτίνων X.

Πώς μπορούμε λοιπόν να μετρήσουμε τά μήκη κύματος τών ακτίνων αυτών; Η ίδια ή φύση έρχεται να μάς βοηθήσει.

Ένας κρύσταλλος είναι ένα άθροισμα ατόμων που βρίσκονται σε αποστάσεις πολύ μικρές τό ένα απ' τ' άλλο και με τελείως κανονικό σχήμα. Τό σχέδιο μάς δείχνει ένα απλό



πρότυπο της δομής του κρυστάλλου. Αντί τών μικρών ανοιγμάτων, υπάρχουν εμπόδια εξαιρετικά μικρά, που αποτελούνται από τά άτομα του στοιχείου και κείνται πολύ κοντά τό ένα με τό άλλο με τάξη απόλυτα κανονική. Σύμφωνα με τή θεωρία της κρυσταλλικής δομής, οί αποστάσεις ανάμεσα στα άτομα είναι τόσο μικρές που μπορούμε να αναμένουμε να φανερώσουν τό αποτέλεσμα της περίθλασης τών ακτίνων X. Πραγματικά τό πείραμα απόδειξε ότι είναι δυνατό να περιθλάσουμε τις ακτίνες X διά μέσου τών εμποδίων αυτών που είναι στενά σφιγμένα σε μία κανονική διάταξη με τρεις διαστάσεις.

"Ας υποθέσουμε τώρα ότι μιά ακτίνα X προσκρούει σ' ένα κρύσταλλο και αφού τον διαπέρασε, καταγράφεται σε μιά φωτογραφική πλάκα, που δείχνει την εικόνα της περίθλισης. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορες μέθοδοι για να μελετήσουν τά φάσματα των ακτίνων X και να βγάλουν απ' την εικόνα της περίθλασης δεδομένα σχετικά με τά μήκη κύματος. Αυτό που είπώθηκε με λίγα λόγια θά γέμιζε δλόκληρους τόμους, αν θέλαμε να εκθέσουμε όλες τις πειραματικές και θεωρητικές λεπτομέρειες.

### ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ

Πώς νά εξηγήσουμε τό γεγονός ότι μόνο κάποια χαρακτηριστικά μήκη κύματος εμφανίζονται στά φάσματα των στοιχείων;

Συμβαίνει συχνά στή φυσική νά πραγματοποιείται σημαντική πρόοδος χάρη στήν αύστηρή αναλογία που θεμελιώνεται ανάμεσα σε φαινόμενα που φαινομενικά δέν έχουν καμιά σχέση μεταξύ τους. Στίς σελίδες αυτές είδαμε συχνά πώς ιδέες που δημιουργήθηκαν και αναπτύχθηκαν σ' ένα κλάδο τής έπιστήμης, εφαρμόσθηκαν ύστερα με έπιτυχία, σ' άλλο κλάδο. Η ανάπτυξη τής μηχανικής αντίληψης και τής έννοιας του πεδίου μᾶς παρέχει πολλά παραδείγματα του είδους. Η προσέγγιση των λυμένων προβλημάτων με τά ἄλυτα μπορεί νά ρίξει νέο φῶς. Είναι εύκολο νά βρούμε μιά επιφανειακή αναλογία, ή οποία στήν πραγματικότητα δέν εκφράζει τίποτα. Αλλά ή ανακάλυψη μερικῶν κοινῶν ούσιωδῶν χαρακτηριστικῶν, κρυμμένων κάτω από φαινομενικές διαφορές, ή διαμόρφωση με βάση αὐτά, μιᾶς νέας καρποφόρας θεωρίας, αὐτά είναι ἀληθινή δημιουργία. Η ανάπτυξη τής κυματικῆς μηχανικῆς, που δημιουργήσαν οί De Broglie και Schödinger ἐδῶ και δεκαπέντε χρόνια, είναι ένα τυπικό παράδειγμα τής εκπόνησης μιᾶς καρποφόρας θεωρίας χάρη σε μιά βαθειά και έπιτυχημένη αναλογία.

Η ἀφετηρία μας είναι ένα κλασσικό παράδειγμα, που δέν έχει καμιά σχέση με τή νεώτερη φυσική. Πιάνουμε με τό χέρι.

τήν ἄκρη ενός πολύ μακροῦ ελαστικοῦ σωλήνα ή ένα πολύ μακρό ελατήριο και τό μετατοπίζουμε ἀνεβάζοντας και κατεβάζοντας το ρυθμικά σε τρόπο που ή ἄκρη εκτελεῖ μιά ταλαντευτική κίνηση. Η ταλάντευση, ὅπως τό είδαμε σε πολλά ἄλλα παραδείγματα παράγει κῶμα που διαδίδεται κατά μήκος του σωλήνα με κάποια ταχύτητα. Αν φαντασθοῦμε ένα σωλήνα

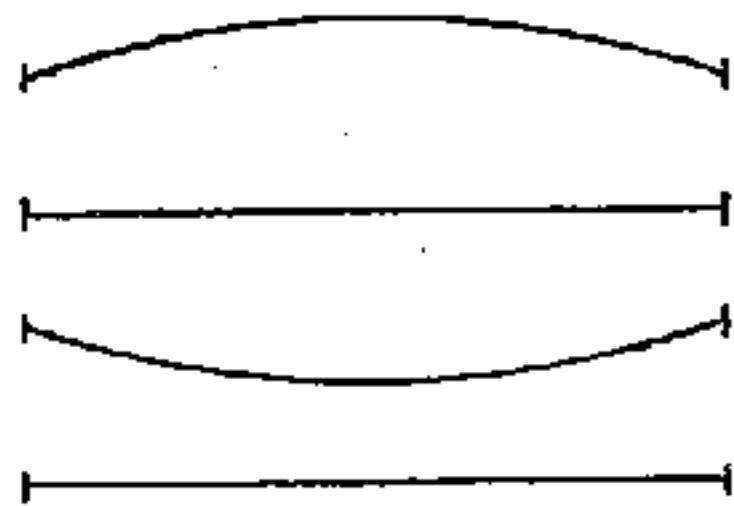


ἀπροσδιορίστου μήκους, τά τμήματα κύματος μιά και παρήχθησαν, θά εξακολουθήσουν τήν ἀπροσδιόριστη διάδοσή τους χωρίς πρόσκομμα.

Ας εξετάσουμε μιά ἄλλη περίπτωση. Ο ἴδιος σωλήνας είναι στερεωμένος στά δύο ἄκρα. Μποροῦμε επίσης, αν θέλουμε, νά χρησιμοποιήσουμε μιά χορδή βιολιοῦ. Τί θά συμβεῖ αν δημιουργηθεῖ ένα κύμα στή μιά ἄκρη του ελαστικοῦ σωλήνα ή τής χορδῆς; Τό κύμα ἀρχίζει νά προχωρεῖ ὅπως στήν προηγούμενη περίπτωση, ἀλλά σε λίγο ἀνακλᾶται στήν ἄλλη ἄκρη του σωλήνα. Έχουμε τώρα δύο κύματα: τό ένα απ' τήν ταλάντευση και τό ἄλλο απ' τήν ἀνάκλαση. Κινουῦνται σε ἀντίθετες διευθύνσεις και συμβάλλουν. Δέ θάταν δύσκολο νά ἀκολουθήσουμε τήν συμβολή των δύο κυμάτων και νά ἀνακαλύψουμε ένα κῶμα που προκύπτει απ' τήν πρόσθεσή τους. Τό ὀνομάζουν *στάσιμο κῶμα*. Οί δύο ὅροι «στάσιμο» και «κῶμα» φαίνονται ἀντιφατικοί. Η σύνθεσή τους είναι ὅσῳσο δικαιολογημένη απ' τό ἀποτέλεσμα τής συμβολῆς των δύο κυμάτων.

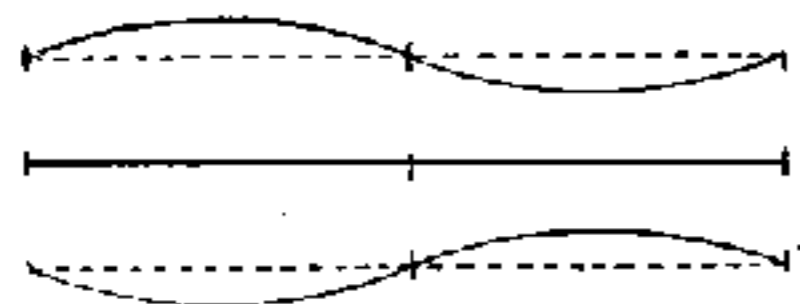
Τό ἀπλούστερο παράδειγμα στάσιμου κύματος είναι ή κίνηση σχοινοῦ στερεωμένου στά δύο του ἄκρα, που είναι,

ὅπως δείχνει τὸ σχέδιό μας μιά ἐναλλασσόμενη κίνηση πρὸς τὰ πάνω καὶ πρὸς τὰ κάτω. Ἡ κίνηση αὐτὴ εἶναι τὸ ἀποτέλεσμα



τῆς συμβολῆς τῶν δύο κυμάτων, πού κινοῦνται σέ ἀντίθετες διευθύνσεις. Τὸ χαρακτηριστικὸ γνώρισμα τῆς κίνησης αὐτῆς εἶναι ὅτι μόνο τὰ δύο περατωτικὰ σημεῖα εἶναι σέ στάση· ὀνομάζονται *κόμβοι*. Τὸ κύμα κρατιέται, γιὰ νὰ ποῦμε ἔτσι, ἀνάμεσα στοὺς δύο κόμβους καὶ ὅλα τὰ ἄλλα σημεῖα τοῦ σχοινοῦ φθάνουν ταυτόχρονα τὸ ἀνώτατο ὄριο τῆς ἀπομάκρυνσής τους.

Ἄλλ' αὐτὴ εἶναι ἡ πιὸ ἀπλὴ περίπτωση ἑνός στάσιμου κύματος· υπάρχουν ἄλλα πού μποροῦν νὰ ἔχουν π.χ. τρεῖς κόμβους, ἕνα σέ κάθε ἄκρη καὶ ἕνα στή μέση. Στὴν περίπτωση αὐτὴ τρία σημεῖα εἶναι πάντα σέ στάση. Ἄν ρίξουμε ἕνα βλέμμα



στό σχέδιο θά δοῦμε ὅτι ἐδῶ τὸ μήκος τοῦ κύματος εἶναι κατὰ τὸ μισό μικρότερο ἀπὸ τὸ μήκος μέ δύο κόμβους. Ὑπάρχουν στάσιμα κύματα πού ἔχουν τέσσερις, πέντε κι ἀκόμη μεγαλύτερο ἀριθμὸ κόμβων. Τὸ μήκος κύματος θά ἐξαρτηθεῖ κάθε φορά



ἀπὸ τὸν ἀριθμὸ τῶν κόμβων, ὁ ὁποῖος δέν μπορεῖ νὰ εἶναι παρά ἀκέραιος ἀριθμὸς καὶ νὰ μεταβάλλεται μέ ἄλματα. Ἡ πρόταση: «ὁ ἀριθμὸς τῶν κόμβων σ' ἕνα στάσιμο κύμα εἶναι 3,576», εἶναι παράλογος. Τὸ μήκος κύματος δέν μπορεῖ λοιπὸν νὰ μεταβάλλεται παρά κατὰ τρόπο ἀσυνεχῆ. Σ' αὐτὸ τὸ ἐντελῶς κλασσικὸ πρόβλημα ἀναγνωρίζουμε τὰ συνήθη χαρακτηριστικὰ τῆς θεωρίας τῶν κβάντα. Τὸ στάσιμο κύμα πού παράγει ἕνα βιολιστῆς εἶναι στὴν πραγματικότητα ἀκόμη πιὸ πολύπλοκο· εἶναι μίγμα μεγάλου ἀριθμοῦ κυμάτων πού ἔχουν δύο, τρεῖς, τέσσερις πέντε καὶ περισσότερους κόμβους καὶ κατὰ συνέπεια, μήκη κύματος ποικίλα. Ἡ φυσικὴ μπορεῖ νὰ ἀναλύσει ἕνα τέτοιο μίγμα καὶ νὰ βρεῖ τὰ ἀπλά στάσιμα κύματα ἀπ' τὰ ὁποῖα ἀποτελεῖται ἡ, χρησιμοποιώντας τὴν πιὸ πάνω ὀρολογία, θά μπορούσαμε νὰ ποῦμε ὅτι ἡ παλλόμενη χορδὴ ἔχει τὸ φάσμα τῆς, ἀκριβῶς ὅπως ἕνα στοιχεῖο πού ἐκπέμπει ἀκτινοβολία. Καὶ ὅπως καὶ στό φάσμα τοῦ στοιχείου, μόνο κάποια μήκη κύματος εἶναι δεκτὰ ἐνῶ τὰ ἄλλα εἶναι ἀπαγορευμένα.

Ἔτσι ἀνακαλύψαμε κάποια ὁμοιότητα ἀνάμεσα στὴν παλλομένη χορδὴ καὶ στό ἄτομο πού ἐκπέμπει ἀκτινοβολία. Ὅσο παράξενη κι ἂν φαίνεται ἡ ἀναλογία αὐτὴ, θέλουμε ὥστόσο νὰ βγάλουμε ἀπ' αὐτὴ ἄλλα συμπεράσματα καὶ, μιά καὶ τὴν διαλέξαμε θά πᾶμε τὴ σύγκριση πολὺ μακρύτερα. Τὰ ἄτομα κάθε στοιχείου ἀποτελοῦνται ἀπὸ στοιχειώδη σωματίδια τῶν ὁποίων τὰ βαρύτερα σχηματίζουν τὸν πυρῆνα καὶ τὰ ἐλαφρό-

τερα τὰ ηλεκτρόνια. Ένα τέτοιο σύστημα σωματιδίων συμπεριφέρεται όπως ένα μικρό ακουστικό όργανο απ' το οποίο παράγονται στάσιμα κύματα.

Αλλά το στάσιμο κύμα είναι το αποτέλεσμα της συμβολής δύο ή, γενικά, περισσοτέρων κινουμένων κυμάτων. Αν ο συσχετισμός μας περικλείει κάποια αλήθεια, δομή ακόμη απλούστερη από κείνη του ατόμου θα έπρεπε να αντιστοιχεί στο κύμα που διαδίδεται. Αλλά στον υλικό μας κόσμο, τίποτα δεν μπορεί να είναι πιο απλό από το ηλεκτρόνιο πάνω στο οποίο δεν επενεργεί καμιά δύναμη, δηλαδή ένα ηλεκτρόνιο σε στάση ή σε ομοιόμορφη κίνηση. Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε άλλο ένα κρίκο στην αλυσίδα του συσχετισμού μας: ηλεκτρόνιο σε ομοιόμορφη κίνηση → κύματα ορισμένου μήκους. Αυτή υπήρξε η νέα και θαρραλέα ιδέα του De Broglie.

Προηγούμενα δείξαμε ότι υπάρχουν φαινόμενα όπου το φως αποκαλύπτει τον κυματικό χαρακτήρα του και άλλα όπου το φως αποκαλύπτει τον μοριακό χαρακτήρα του. Αφού εξοικειωθήκαμε με την ιδέα ότι το φως είναι κύμα, διαπιστώσαμε προς μεγάλη μας έκπληξη ότι σε μερικές περιπτώσεις όπως π.χ. στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, συμπεριφέρεται σ'α μιά βροχή φωτονίων. Τώρα, η κατάσταση, αναφορικά με τὰ ηλεκτρόνια, άλλαξε ολοκληρωτικά. Είχαμε συνηθίσει στην ιδέα ότι τὰ ηλεκτρόνια είναι σωματίδια, κβάντα ηλεκτρισμού, και ύλης. Μελετήθηκαν το φορτίο και η μάζα τους. Αν υπάρχει κάποια αλήθεια στην ιδέα του De Broglie, πρέπει να υπάρχουν φαινόμενα όπου η ύλη αποκαλύπτει τον κυματικό της χαρακτήρα.

Σε πρώτη όψη το συμπέρασμα αυτό στο οποίο φθάνουμε παράκολουθώντας τον ακουστικό συσχετισμό, φαίνεται παράξενο και άκατανόητο. Πώς είναι δυνατό ένα σωματίδιο σε κίνηση να έχει κάποια σχέση μ' ένα κύμα; Αλλά δεν είναι η πρώτη φορά στη φυσική που βρισκόμαστε μπρός σε μιά τέτοια δυσκολία. Το ίδιο πρόβλημα συναντήσαμε και στην περιοχή των φαινομένων του φωτός.

Οι θεμελιακές ιδέες παίζουν ουσιαστικό ρόλο στη διαμόρφωση της φυσικής θεωρίας. Τα έργα της φυσικής είναι γεμάτα

από πολύπλοκους μαθηματικούς τύπους. Αλλά είναι η σκέψη, είναι οι ιδέες που βρίσκονται στην αρχή κάθε φυσικής θεωρίας. Οι ιδέες οφείλουν αργότερα να παρουσιασθούν με τη μαθηματική μορφή μιάς κβαντικής θεωρίας, για να καταστεί δυνατή η σύγκριση με το πείραμα. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί αν πάρουμε σαν παράδειγμα το πρόβλημα που μ'ας απασχολεί τώρα. Το κύριο συμπέρασμα είναι ότι το ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε ομοιόμορφη κίνηση θα συμπεριφερθεί σε κάποια φαινόμενα σαν ένα κύμα. Ας υποθέσουμε ότι ένα ηλεκτρόνιο, ή μιά βροχή ηλεκτρονίων με την προϋπόθεση ότι όλα έχουν την ίδια ταχύτητα — βρίσκονται σε ομοιόμορφη κίνηση. Η μάζα, το φορτίο και η ταχύτητα κάθε ξεχωριστού ηλεκτρονίου είναι γνωστές. Αν θελήσουμε να συνδέσουμε με κάποιο τρόπο μιά έννοια κύματος σ' ένα ηλεκτρόνιο ή σε ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε ομοιόμορφη κίνηση, το πρώτο μας ερώτημα πρέπει να είναι: ποιο είναι το μήκος κύματος; Αυτό είναι ερώτηση κβαντική και για να δοθεί η απάντηση πρέπει να κατασκευαστεί μιά θεωρία λίγο πολύ κβαντική, πράγμα που είναι απλή υπόθεση. Η μαθηματική απλότητα του έργου του De Broglie, που δίνει απάντηση στο ερώτημα αυτό, είναι αλήθεια θαυμαστή. Τη στιγμή που εκδόθηκε το έργο του, η μαθηματική τεχνική άλλων φυσικών θεωριών ήταν συγκριτικά πολύ δυσνόητη και πολύπλοκη. Η μαθηματική τεχνική που πραγματεύεται το πρόβλημα των κυμάτων της ύλης είναι εξαιρετικά απλή και στοιχειώδης, αλλά οι θεμελιακές ιδέες είναι βαθιές και τεράστιας σημασίας.

Με την ευκαιρία των φωτεινών κυμάτων και των φωτονίων δείξαμε ότι κάθε άποψη που διατυπώνεται με κυματική όρολογία μπορεί να μεταφραστεί στην όρολογία των φωτονίων ή σωματιδίων του φωτός. Αυτό αληθεύει το ίδιο και για τὰ ηλεκτρονικά κύματα. Για τὰ ηλεκτρόνια που βρίσκονται σε ομοιόμορφη κίνηση, η σωματιδιακή όρολογία είναι ήδη γνωστή. Αλλά κάθε άποψη διατυπωμένη στην σωματιδιακή όρολογία, μπορεί να μεταφραστεί στην κυματική όρολογία, ακριβώς όπως στην περίπτωση των φωτονίων. Δύο σύρματα-άγωγοι

ἐμπέδωσαν τούς κανόνες τῆς μετάφρασης. Ἡ ἀναλογία ἀνάμεσα στά φωτεινά καί στά ἠλεκτρονικά κύματα, ἢ ἀνάμεσα στά φωτόνια καί στά ἠλεκτρόνια εἶναι τό ἓνα ἀπό αὐτά τά σύρματα ἀγωγοί. Προσπαθοῦμε νά χρησιμοποιήσουμε τήν ἴδια μέθοδο μετάφρασης γιά τήν ὕλη ὅπως καί γιά τό φῶς. Ἡ θεωρία τῆς περιορισμένης σχετικότητας μᾶς παρέχει τό ἄλλο. Οἱ φυσικοί νόμοι πρέπει νά εἶναι ἀμετάβλητοι σχετικά μέ τό μετασχηματισμό τοῦ Lorentz καί ὄχι σχετικά μέ τόν κλασσικό μετασχηματισμό. Τά δύο σύρματα-ἀγωγοί μαζί προσδιορίζουν τό μήκος κύματος πού ἀντιστοιχεῖ σ' ἓνα ἠλεκτρόνιο σέ κίνηση. Ἀπό τή θεωρία προκύπτει ὅτι ἓνα ἠλεκτρόνιο κινούμενο μέ ταχύτητα, ἄς ποῦμε δέκα πέντε χιλιόμετρα στό δευτερόλεπτο, ἔχει μήκος κύματος πού μπορεῖ εὐκολά νά ὑπολογιστεῖ καί βρίσκεται ὅτι ἀνήκει στήν ἴδια τάξη μεγέθους μέ τά μήκη κύματος τῶν ἀκτίνων X.

Ἄς φαντασθοῦμε μιά ἠλεκτρονική ἀκτίνα πού κινεῖται ὁμοιόμορφα μέ δοσμένη ταχύτητα ἢ, χρησιμοποιώντας τήν κυματική ὁρολογία, ἓνα ὁμογενές ἠλεκτρονικό κύμα, κι ἄς ὑποθέσουμε ὅτι πέφτει πάνω σ' ἓνα πολύ λεπτό κρύσταλλο, πού παίζει τό ρόλο δικτύου περίθλασης. Οἱ ἀποστάσεις ἀνάμεσα στά περιθλαστικά ἐμπόδια μέσα στό κρύσταλλο εἶναι τόσο μικρές, πού παράγεται περίθλαση ἀκτίνων X. Θά εἴμασταν διατεθειμένοι νά περιμένουμε ὅμοιο ἀποτέλεσμα γιά τά ἠλεκτρονικά κύματα τῆς αὐτῆς τάξης μήκους κύματος. Μιά φωτογραφική πλάκα θά κατέγραφε τήν περίθλαση τῶν ἠλεκτρονικῶν κυμάτων πού περνοῦν διά μέσου τοῦ λεπτοῦ ἐλάσματος τοῦ κρυστάλλου. Πραγματικά τό πείραμα παράγει τό φαινόμενο τῆς περίθλασης τῶν ἠλεκτρονικῶν κυμάτων, πρᾶγμα πού εἶναι ἀναμφισβήτητα μιά ἀπ' τίς μεγάλες κατακτήσεις τῆς θεωρίας. Ἡ ὁμοιότητα ἀνάμεσα στή περίθλαση τοῦ ἠλεκτρονικοῦ κύματος καί σ' ἐκείνη τῆς ἀκτίνης X ἐπισημαίνεται ἰδιαίτερα. Ξέρουμε ὅτι εἰκόνες μᾶς δίνουν τή δυνατότητα νά προσδιορίσουμε τά μήκη κύματος τῶν ἀκτίνων X. Αὐτό ἀληθεύει τό ἴδιο καί γιά τά ἠλεκτρονικά κύματα. Ἡ εἰκόνα περίθλασης δίνει τό μήκος ἑνός κύματος ὕλης καί ἡ τέλεια

ποσοτική συμφωνία ἀνάμεσα στή θεωρία καί στό πείραμα βεβαιώνει μέ θαυμάσιο τρόπο τή συλλογιστική μας πορεία.

Οἱ προηγούμενες δυσκολίες μας μ' αὐτό τό ἀποτέλεσμα, διευρύνονται καί ἀξάνονται. Μποροῦμε νά τό ἀποσαφηνίσουμε μ' ἓνα παράδειγμα ὅμοιο μ' ἐκεῖνο πού δώσαμε γιά τό φωτεινό κύμα. Ἄν ἐκσφενδονίσουμε ἓνα ἠλεκτρόνιο πάνω σέ μιά πολύ μικρή ὀπή, θά λυγίσει σάν ἓνα φωτεινό κύμα. Κρίκοι ἐναλλάξ φωτεινοί καί σκοτεινοί θά φανοῦν πάνω στή φωτογραφική πλάκα. Θά μπορούσαμε ἴσως νά χούμε κάποια ἐλπίδα νά ἐξηγήσουμε τό φαινόμενο μέ τήν ἐπενέργεια πάνω στό ἠλεκτρόνιο τοῦ χείλους τῆς ὀπῆς, ἄν καί μιά τέτοια ἐξήγηση δέ φαίνεται δυνατή. Ἀλλά τί νά σκεφθοῦμε γιά τίς δύο ὀπές τῆς βελόνας; Ταινίες ἐμφανίζονται ἀντί γιά κρίκους. Πῶς εἶναι δυνατό ἡ παρουσία τῆς ἄλλης ὀπῆς νά ἀλλάζει ἐντελῶς τό ἀποτέλεσμα; Τό ἠλεκτρόνιο εἶναι ἀδιαίρετο καί ἔπρεπε κατά τά φαινόμενα νά περάσει διά μέσου μιάς μόνο ὀπῆς. Πῶς ξέρει ὅτι μιά δεύτερη ὀπή βρίσκεται σέ μικρή ἀπόσταση ἀπ' τήν πρώτη;

Προηγούμενα κάναμε τό ἐρώτημα: τί εἶναι τό φῶς; Εἶναι βροχή σωματιδίων ἢ κύμα; Ἄς ρωτήσουμε τώρα: τί εἶναι ἡ ὕλη; τί εἶναι ἓνα ἠλεκτρόνιο; Εἶναι σωματίδιο ἢ κύμα; Τό ἠλεκτρόνιο συμπεριφέρεται σάν σωματίδιο ὅταν κινεῖται σ' ἓνα ἐξωτερικό ἠλεκτρικό ἢ μαγνητικό πεδίο. Συμπεριφέρεται σάν κύμα ὅταν περιθλάται ἀπ' τό κρύσταλλο. Μέ τά στοιχειώδη κβάντα τῆς ὕλης προσκρούομε πάνω στήν ἴδια δυσκολία πού συναντήσαμε στήν περίπτωση τῶν κβάντα φωτός. Ἐνα ἀπ' τά κεφαλαῖα ζητήματα πού ἀπασχολοῦν τήν πρόσφατη πρόοδο τῆς ἐπιστήμης εἶναι νά βρεῖ πῶς θά μπορούσαν νά συμβιβάσουν τίς δύο ἀντιφατικές ἐννοιες τῆς ὕλης καί τοῦ κύματος. Εἶναι μιά ἀπ' αὐτές τίς θεμελιακές δυσκολίες πού μιά καί διατυπώθηκε πρέπει νά ὀδηγήσει μακριά τήν ἐπιστημονική πρόοδο. Ἡ νεώτερη φυσική ἐπιχείρησε νά λύσει τό πρόβλημα. Τό μέλλον θά δείξει ἄν ἡ λύση πού προτάθηκε εἶναι διαρκῆς ἢ προσωρινή.

## ΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑΣ

“Αν σύμφωνα με την κλασσική μηχανική, γνωρίζουμε τη θέση και την ταχύτητα ενός δοσμένου υλικού σημείου και επίσης τις δυνάμεις που ενεργούν πάνω σ’ αυτό, μπορούμε να προβλέψουμε όλη την μελλοντική τροχιά του. Η πρόταση: «Τό υλικό σημείο έχει τέτοια ή τέτοια θέση και τέτοια ή τέτοια ταχύτητα σέ τέτοια ή τέτοια στιγμή», έχει μιά ορισμένη έννοια στην κλασσική μηχανική. Αν ή βεβαίωση αυτή έχανε τό νόημά της, ό συλλογισμός μας (σ. 40) σχετικά με την ακρίβεια της μελλοντικής τροχιάς θά ήταν χωρίς αξία.

Στήν αρχή του 19ου αιώνα οι επιστήμονες ήθελαν να αναγάγουν όλη τή φυσική σέ απλές δυνάμεις που ενεργούσαν πάνω στά υλικά σωματίδια βρισκόμενα σέ προσδιορισμένες θέσεις και κινούμενα με ορισμένες ταχύτητες σέ μιά δοσμένη στιγμή. “Ας υπενθυμίσουμε πώς περιγράψαμε τήν κίνηση στην αρχή του ταξιδιού μας μέσα από τή χώρα των φυσικών προβλημάτων. Σημειώσαμε σημεία κατά μήκος μιās ορισμένης τροχιάς, που έδειχναν τις ακριβείς θέσεις του σώματος σέ κάποιες στιγμές, και χαραξάμε έφαπτόμενα διανύσματα που έδειχναν τή διεύθυνση και τό μέγεθος των ταχυτήτων. Αυτό ήταν τόσο απλό όσο και πειστικό. Η πορεία όμως αυτή δέν μπορεί να επαναληφτεί για τά στοιχειώδη κβάντα της ύλης, δηλαδή τά ηλεκτρόνια, ή για τά κβάντα ενέργειας, δηλαδή τά φωτόνια. Δέν μπορούμε να παραστήσουμε τήν πορεία ενός φωτονίου ή ενός ηλεκτρονίου με τόν τρόπο που παραστήσαμε τήν κίνηση στην κλασσική μηχανική. Τό παράδειγμα των δύο όπών της βελόνας τό δείχνει καθαρά. Τό ηλεκτρόνιο και τό φωτόνιο φαίνονται να περνούν απ’ τις δύο όπες. “Ετσι είναι αδύνατο να εξηγήσουμε τό αποτέλεσμα παριστάνοντας με τόν παλιό κλασσικό τρόπο τήν τροχιά του ηλεκτρονίου ή του φωτονίου.

“Οφείλουμε φυσικά να υποθέσουμε τήν παρουσία στοιχειωδών ενεργειών, όπως ή διέλευση ηλεκτρονίων και φωτονίων μέσα υπό τις όπες της βελόνας. Η ύπαρξη των στοιχειωδών

κβάντα ύλης και ενέργειας δέν μπορεί να άμφισβητηθεί. “Αλλά οι στοιχειώδεις νόμοι δέν μπορούν άσφαλώς να εφαρμοστούν προσδιορίζοντας με τόν άπλό τρόπο της κλασσικής μηχανικής, τις θέσεις τους και τις ταχύτητές τους σέ μιά δοσμένη στιγμή.

Θά δοκιμάσουμε συνεπώς μιά διαφορετική μέθοδο. “Ας επαναλαμβάνουμε συνεχώς τις ίδιες στοιχειώδεις πορείες. Τό ένα μετά τό άλλο τά ηλεκτρόνια στέλνονται πρós τή διεύθυνση των όπών της βελόνας. “Ο όρος «ηλεκτρόνιο» χρησιμοποιείται εδώ για να έμπεδώσουμε τις ιδέες· ό συλλογισμός μας ισχύει επίσης και για τά φωτόνια.

Τό ίδιο πείραμα επαναλαμβάνεται πολύ συχνά και ακριβώς με τόν ίδιο τρόπο· όλα τά ηλεκτρόνια έχουν τήν ίδια ταχύτητα και κινούνται πρós τή διεύθυνση των δύο όπών της βελόνας. Δέν είναι ανάγκη να αναφέρουμε ότι πρόκειται για ένα εξιδανικευμένο πείραμα, που δέν είναι δυνατό να εκτελεστεί στην πραγματικότητα, αλλά που μπορούμε να τό φαντασθούμε. Δέν μπορούμε να εκσφενδονίσουμε φωτόνια ή ηλεκτρόνια άπομονωμένα και σέ κάποιες στιγμές, όπως θά ρίχναμε σφαίρες μ’ ένα τουφέκι.

Τό αποτέλεσμα των επανειλημμένων πειραμάτων οφείλει και πάλι να είναι κρίκοι σκοτεινοί και φωτεινοί για τή μιά όπή και ταινίες σκοτεινές και φωτεινές για δύο όπες. “Υπάρχει όμως μιά ουσιαστική διαφορά. Στην περίπτωση ενός χωριστού ηλεκτρονίου τό πειραματικό αποτέλεσμα ήταν άκατανόητο. Κατανοείται εύκολότερα αν επαναληφθεί τό πείραμα πολλές φορές. Μπορούμε τώρα να πούμε: φωτεινές ταινίες εμφανίζονται εκεί όπου πέφτουν πολλά ηλεκτρόνια· γίνονται σκοτεινότερες, στο μέρος όπου πέφτουν λιγότερα ηλεκτρόνια και ένα μέρος τελείως σκοτεινό σημαίνει ότι δέν υπάρχει κανένα ηλεκτρόνιο. Φυσικά δέ μās επιτρέπεται να υποθέσουμε ότι όλα τά ηλεκτρόνια περνούν διά μέσου της μιās των δύο όπών. Διότι, αν ήταν έτσι, δέν έπρεπε να παρατηρηθεί ή παραμικρή διαφορά όταν καλύπτεται ή άλλη όπή. Και όμως όταν κλείεται ή μία όπή ή διαφορά διαπιστώνεται. “Εφ’ όσον ένα σωματίδιο είναι

ἀδιαίρετο δέν μπορούμε νά φαντασθοῦμε ὅτι περνᾶ μέσα ἀπ' τῆς δύο ὁπές. Τό γεγονός ὅτι τό πείραμα ἐπαναλήφθηκε πολλές φορές μᾶς ὁδηγεῖ σέ μιά ἄλλη ἀδιέξοδο. Κάποια ἠλεκτρόνια θά μπορούσαν νά περάσουν μέσα ἀπ' τήν πρώτη ὁπή καί ἄλλα ἀπ' τή δεύτερη. Δέν γνωρίζουμε γιά ποιό λόγο τά ἠλεκτρόνια διαλέγουν κατά ἀτομικό τρόπο ἀνάμεσα στίς δύο ὁπές, ἀλλά τό σαφές ἀποτέλεσμα τῶν ἐπανειλημμένων πειραμάτων εἶναι ὅτι οἱ δύο ὁπές τῆς βελόνας χρησιμεύουν γιά τή διέλευση τῶν ἠλεκτρονίων ἀπ' τήν πηγγή πρὸς τήν ὀθόνη. "Αν μπορούμε μόνο νά καθορίσουμε αὐτό πού συμβαίνει στό πλῆθος τῶν ἠλεκτρονίων ὅταν τό πείραμα ἐπαναλαμβάνεται, χωρίς νά ἀσχοληθοῦμε μέ τήν ἀτομική συμπεριφορά τῶν σωματιδίων, ἡ διαφορά ἀνάμεσα στούς κρίκους καί στίς ταινίες ἀποβαίνει κατανοητή. Ἡ διςρεύνηση μιᾶς σειρᾶς πειραμάτων δημιούργησε μιά νέα ἰδέα, τήν ἰδέα τοῦ πλῆθους τοῦ ὁποίου τά ἄτομα συμπεριφέρονται κατά τρόπο ἀπρόβλεπτο. Δέν μπορούμε νά προβλέψουμε ποιό δρόμο θά ἀκολουθήσει ἕνα ξεχωριστό ἠλεκτρόνιο, ἀλλά μπορούμε νά προβλέψουμε ὅτι στό τελικό ἀποτέλεσμα θά ἐμφανισθοῦν πάνω στήν ὀθόνη ταινίες φωτεινές καί σκοτεινές.

"Ἄς ἀφήσουμε γιά μιά στιγμή τήν κβαντική φυσική.

Εἶδαμε στήν κλασσική φυσική ὅτι ἂν γνωρίζουμε τή θέση καί τήν ταχύτητα ἑνός ὑλικοῦ σημείου σέ μιά κάποια στιγμή καί τῆς δυνάμεις πού ἐνεργοῦν πάνω του, μπορούμε νά προβλέψουμε τήν μελλοντική τροχιά του. Εἶδαμε ἐπίσης πῶς ἡ μηχανική ἀντίληψη ἐφαρμοζόταν στήν κινητική θεωρία τῆς ὕλης. Ἀλλά οἱ συλλογισμοί μας σχετικά μέ τή θεωρία αὐτή γέννησαν μιά νέα ἰδέα. Πρέπει ὅμως νά καταλάβουμε καλά τήν ἰδέα αὐτή, γιατί θά μᾶς βοηθήσει στήν κατανόηση τῶν ἐπιχειρημάτων πού θά ἀναπτύξουμε ἀργότερα.

Θεωροῦμε ἕνα δοχεῖο πού περιέχει ἀέριο. Ἐπιχειρώντας νά περιγράψουμε τήν κίνηση κάθε σωματιδίου, θά ἔπρεπε πρῶτα πρῶτα νά γνωρίζουμε τήν ἀρχική τους κατάσταση, δηλαδή τῆς ἀρχικές θέσεις καί ταχύτητες ὅλων τῶν μορίων. Παραδεχόμε-

νοι ὅτι αὐτό θάταν δυνατό, μιά ὁλόκληρη ζωή δέ θά ἦταν ἀρκετή, γιά νά καταγραφῆ τό ἀποτέλεσμα στό χαρτί δεδομένου ὅτι ὁ ἀριθμός τῶν σωματιδίων πού θά ἔπρεπε νά ἐξετασθοῦν εἶναι κολοσσιαῖος. "Αν ὕστερα ἐπιχειρούσαμε νά χρησιμοποιήσουμε τῆς γνωστές μεθόδους τῆς κλασσικῆς μηχανικῆς γιά νά ἰπολογίσουμε τῆς τελικές θέσεις τῶν σωματιδίων, οἱ δυσκολίες θάταν ἀνυπερβλήτες. Κατ' ἀρχή εἶναι δυνατό νά χρησιμοποιήσουμε τή μέθοδο πού χρησιμεύει γιά τήν περιγραφή τῆς κίνησης τῶν πλανητῶν, ἀλλά πρακτικά δέν μπορεί νά χρησιμοποιηθεῖ καί πρέπει νά δώσει τή θέση της στή *στατιστική μέθοδο*, πού μᾶς ἀπαλλάσσει ἀπό τήν ἀνάγκη νά γνωρίζουμε ἀκριβῶς τῆς ἀρχικές καταστάσεις. Γνωρίζουμε λιγώτερα γιά τό σύστημα σέ μιά δοσμένη στιγμή κ' ἔτσι εἴμαστε λιγώτερο σέ θέση νά βεβαιώσουμε ὅ,τιδήποτε γιά τό παρελθόν του καί τό μέλλον του. Γινόμαστε ἀδιάφοροι γιά τήν τύχη τῶν ξεχωριστῶν σωματιδίων τοῦ ἀερίου. Τό πρόβλημά μας εἶναι διαφορετικό. Π.χ. δέν ρωτοῦμε: Ποιά εἶναι ἡ ταχύτητα κάθε σωματιδίου αὐτή τή στιγμή;" Ἀλλά ρωτοῦμε: «Πόσα σωματίδια ἔχουν ταχύτητα ἀνάμεσα στίς 300 καί 400 μέτρα στό δευτερόλεπτο;» Δέ μᾶς ἐνδιαφέρουν καθόλου οἱ μονάδες. Αὐτό πού ζητοῦμε νά προσδιορίσουμε εἶναι οἱ μέσες τιμές πού χαρακτηρίζουν τό σύνολο. Εἶναι φανερό πῶς ὁ συλλογισμός δέν μπορεί νά μεταχειριστεῖ τή στατιστική μέθοδο παρά μόνο ἂν τό σύστημα ἀποτελεῖται ἀπό μεγάλο ἀριθμό χωριστῶν σωματιδίων (μονάδων).

Ἐφαρμόζοντας τή στατιστική μέθοδο δέν μπορούμε νά προβλέψουμε ποιᾶ θά εἶναι ἡ συμπεριφορά τοῦ χωριστοῦ σωματιδίου μέσα σ' ἕνα πλῆθος. Μποροῦμε μόνο νά προβλέψουμε τήν τύχη, τήν *πιθανότητα*, ὅτι θά συμπεριφερθεῖ μέ κάποιο ἰδιαίτερο τρόπο. "Αν οἱ στατιστικοί μας νόμοι μᾶς λέγουν ὅτι ἕνα τρίτο τῶν σωματιδίων ἔχει ταχύτητα ἀνάμεσα στίς 300 καί 400 μέτρα στό δευτερόλεπτο, αὐτό σημαίνει ὅτι ἐπαναλαμβάνοντας τῆς παρατηρήσεις μας πάνω σέ πολλά σωματίδια θά λάβουμε πραγματικά αὐτόν τόν μέσο ὄρο ἢ, μ' ἄλλα

λόγια, ότι ή πιθανότητα νά βρούμε ένα σωματίδιο σ' αυτά τά όρια είναι ίση μέ 1/3.

"Όμοια, τό νά γνωρίζουμε τήν γεννησιμότητα ενός μεγάλου κράτους δέ σημαίνει ότι πρέπει νά ξέρουμε άν ή τάδε ιδιαίτερη οίκογένεια αποκτάει ένα παιδί. Σημαίνει ότι έχουμε γνώση τών στατιστικών αποτελεσμάτων, όπου τά πρόσωπα δέν παίζουν κανένα ρόλο. Παρατηρώντας τούς αριθμούς έγγραφής στό μητρώο ενός μεγάλου αριθμού αυτοκινήτων, αποκαλύπτουμε σέ λίγο ότι τό έν τρίτο τών αριθμών αυτών διαιρείται διά του 3. Δέν μπορούμε όμως νά ποῦμε ότι τό αυτοκίνητο πού περνά έχει τήν ιδιότητα. Οί στατιστικοί νόμοι δέν μπορούν νά εφαρμοστούν παρά σέ μεγάλα σύνολα, όχι όμως καί στά μοναδιαία μέλη πού τά απαρτίζουν.

Μπορούμε τώρα νά επανέλθουμε στό πρόβλημά μας τών κβάντα.

Οί νόμοι τής κβαντικής φυσικής έχουν στατιστικό χαρακτήρα. Αυτό σημαίνει ότι δέν αφορούν σ' ένα μοναδιαίο σύστημα, αλλά σ' ένα σύνολο όμοιων συστημάτων. Δέν μπορούν νά επαληθευθούν από τή μέτρηση μοναδιαίου συστήματος, αλλά από σειρά επανειλημμένων μετρήσεων.

"Η ραδιενεργός διάσπαση είναι ένα απ' τά πολυάριθμα φαινόμενα, γιά τό όποιο ή κβαντική φυσική προσπαθεί νά διατυπώσει νόμους πού διέπουν τήν αυτόματη μετατροπή ενός στοιχείου σ' ένα άλλο. Ξέρουμε π.χ. ότι από ένα γραμμάριο ραδίου τό μισό θά διασπαστεί σέ διάστημα 1600 ετών καί ότι τό άλλο μισό θά διατηρηθεί. Μπορούμε νά ποῦμε κατά προσέγγιση πόσα άτομα θά διασπασθούν στήν προσεχή μισή ώρα, αλλά δέν μπορούμε νά ποῦμε, ακόμη καί στίς θεωρητικές μας αναπτύξεις, γιατί ακριβώς αυτά τά ιδιαίτερα άτομα είναι καταδικασμένα. Σύμφωνα μέ τίς σημερινές μας γνώσεις δέν έχουμε κανένα δικαίωμα νά προσδιορίσουμε τά ξεχωριστά άτομα πού είναι καταδικασμένα σέ διάσπαση. "Η τύχη του ατόμου δέν εξαρτάται απ' τήν ηλικία του. Δέν υπάρχει τό παραμικρό ίχνος νόμου πού νά διέπει τήν ατομική συμπεριφο-

ρά τους. Δέν μπορούμε νά διαμορφώσουμε παρά στατιστικούς νόμους, νόμους πού διέπουν μεγάλα σύνολα ατόμων.

"Ας εξετάσουμε ένα άλλο παράδειγμα. Τό φωτεινό άέριο ενός στοιχείου τοποθετούμενο μπρός στό φασματοσκόπιο δείχνει γραμμές όρισμένου μήκους κύματος. "Η εμφάνιση άσυνεχούς σειράς όρισμένων μηκών κύματος είναι χαρακτηριστική τών ατομικών φαινομένων όπου αποκαλύπτεται ή ύπαρξη στοιχειωδών κβάντα. "Αλλά τό πρόβλημα παρουσιάζει άλλη μιá όψη. Κάποιες απ' τίς φασματικές γραμμές είναι πολύ καθαρές, άλλες είναι συγκεχυμένες. Μιά καθαρή γραμμή σημαίνει ότι εκπέμπεται σχετικά μεγάλος αριθμός φωτονίων πού ανήκουν στό ιδιαίτερο αυτό μήκος κύματος' αντίθετα μιá συγκεχυμένη γραμμή σημαίνει ότι εκπέμπεται σχετικά μικρός αριθμός φωτονίων πού ανήκουν σ' αυτό τό μήκος κύματος. Κι' έδω ακόμη ή θεωρία μās παρέχει διατυπώσεις μόνο στατιστικής φύσης. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σέ μιá μετάβαση από ένα ύψηλότερο σ' ένα χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο. "Η θεωρία μās μιλάει μόνο γιά τήν πιθανότητα πού έχει κάθε μιá απ' τίς δυνατές αυτές μεταβάσεις, αλλά δέ μās λέει τίποτα γιά τή μετάβαση ενός ξεχωριστού ατόμου. "Η θεωρία εργάζεται μέ λαμπρή έπιτυχία, έπειδή όλα αυτά τά φαινόμενα υποθέτουν μεγάλα σύνολα καί όχι άτομα μεμονωμένα.

Μέ πρώτη όψη θά πιστεύαμε ότι ή νέα κβαντική φυσική μοιάζει κάπως μέ τήν κινητική θεωρία τής ύλης, αφού καί ή μιá καί ή άλλη είναι στατιστικής φύσης καί πραγματεύονται συστήματα μεγάλου αριθμού μορίων. Καί όμως δέν συμβαίνει τοῦτο. Σ' αυτή τήν αναλογία δέν είναι μόνο εξαιρετικά σπουδαίο νά γνωρίζουμε τίς όμοιότητες, αλλά καί τίς διαφορές. "Η όμοιότητα ανάμεσα στήν κινητική θεωρία τής ύλης καί στήν κβαντική φυσική συνίσταται κυρίως στό στατιστικό χαρακτήρα του. Καί νά ποιές είναι οί διαφορές.

"Αν επιθυμούμε νά μάθουμε πόσοι άνδρες καί πόσες γυναίκες ηλικίας πάνω από είκοσι χρόνων κατοικούν σέ μιá πόλη,

πρέπει να πετύχουμε από κάθε πολίτη να συμπληρώσει ένα έντυπο που θα έχει τίτλους: «αρσενικού φύλου» «θηλυκού φύλου» και «ήλικία». Με την προϋπόθεση ότι κάθε απάντηση είναι ακριβής, μπορούμε να έχουμε με τη μέτρηση και την ταξινόμησή τους, ένα αποτέλεσμα στατιστικού χαρακτήρα. Τα ατομικά ονόματα και οι διευθύνσεις των ετύπων δεν έχουν καμιά σπουδαιότητα. Πετύχαμε τη στατιστική μας άποψη με τη γνώση των ατομικών περιπτώσεων. Το ίδιο στην κινητική θεωρία της ύλης έχουμε στατιστικούς νόμους που διέπουν το σύνολο και που τους πετύχαμε με βάση ατομικούς νόμους.

Αλλά στην κβαντική φυσική η κατάσταση είναι έντελως διαφορετική. Εδώ οι στατιστικοί νόμοι είναι άμεσα δοσμένοι· οι ατομικοί νόμοι παραμελούνται. Στο παράδειγμα του φωτονίου ή του ηλεκτρονίου και των δύο όπων της βελόνας, είδαμε ότι δεν μπορούμε, όπως τό κάνουμε στην κλασσική φυσική, να περιγράψουμε τη δυνατή κίνηση των στοιχειωδών σωματιδίων μέσα στο χώρο και τό χρόνο. Η κβαντική φυσική εγκαταλείπει τους ατομικούς νόμους των στοιχειωδών σωματιδίων και εγκαθιστά απ' εθέλας τους στατιστικούς νόμους που διέπουν τό σύνολα. Είναι αδύνατο, με βάση την κβαντική φυσική, να περιγράψουμε τίς θέσεις και τίς ταχύτητες ενός στοιχειώδους σωματιδίου ή να προβλέψουμε τη μελλοντική τροχιά του όπως στην κλασσική φυσική. Η κβαντική φυσική ασχολείται αποκλειστικά με σύνολα και οι νόμοι της άφορούν τό σύνολα και όχι τό άτομα.

Είναι ή σκληρή αναγκαιότητα και όχι επίδειξη ή επιθυμία νεωτερισμού που μās αναγκάζει να αλλάξουμε την παλιά κλασσική αντίληψη. Οι δυσκολίες εφαρμογής της τελευταίας αυτής σκιαγραφήθηκαν για μιά μόνο περίπτωση, για τό φαινόμενα της περίθλασης. Αλλά θά μπορούσαμε να αναφέρουμε και πολλές άλλες εξ ίσου πειστικές. Οι μεταβολές άπόψεων συνεχώς μās επιβάλλονται απ' τίς προσπάθειες που κάνουμε να κατανοήσουμε την πραγματικότητα. Αλλά έναπόκινεται πάντοτε στό μέλλον να αποφασίσει, αν διαλέξαμε τη μόνη δυνατή

δρό, και, αν, ναι ή όχι, μιά καλύτερη λύση θά μπορούσε να βρεθεί για τίς δυσκολίες μας.

Αναγκασθήκαμε να εγκαταλείψουμε την περιγραφή των μοναδιαίων περιπτώσεων σά γεγονότα αντικειμενικά στό χώρο και χρόνο και να εισαγάγουμε στατιστικούς νόμους. Τέτοια είναι τό χαρακτηριστικά της νεώτερης κβαντικής φυσικής.

Εισάγοντας νέες φυσικές πραγματικότητες, όπως είναι το ήλεκτρομαγνητικό πεδίου και το έλκτικό πεδίου, προσπαθήσαμε να υποδείξουμε με γενικούς όρους τίς χαρακτηριστικές γραμμές των εξισώσεων με τίς όποιες διατυπώθηκαν μαθηματικά οι ιδέες. Θέλουμε να κάνουμε τό ίδιο για την κβαντική φυσική, αναφερόμενοι πολύ σύντομα στό έργο του Bohr, του De Broglie, του Schrödinger, του Heisenberg, του Dirac και του Born.

Ας εξετάσουμε την περίπτωση ενός ηλεκτρονίου. Μπορεί να είναι ή σε επίδραση ενός ξένου ήλεκτρομαγνητικού πεδίου, ή ελεύθερα από κάθε έξωτερική επίδραση. Μπορεί να κινηται, π.χ., στό πεδίο ενός ατομικού πυρήνος ή να έχει υποστεί περίθλαση από ένα κρύσταλλο. Η κβαντική φυσική μās μαθαίνει πώς μπορούμε να διατυπώσουμε τίς μαθηματικές εξισώσεις για όποιοδήποτε απ' αυτά τό προβλήματα.

Έχουμε ήδη διαπιστώσει την όμοιότητα ανάμεσα σε μιά παλλόμενη χορδή, τό δέρμα ενός τυμπάνου, ένα πνευστό όργανο ή ένα όποιοδήποτε άκουστικό όργανο από τη μιά μεριά, και ένα ραδιενεργό άτομο, από την άλλη. Υπάρχει επίσης, κάποια όμοιότητα ανάμεσα στις μαθηματικές εξισώσεις που διέπουν τό άκουστικό πρόβλημα και εκείνες που διέπουν τό πρόβλημα της κβαντικής φυσικής. Αλλά και πάλι, ή φυσική έρμηνεία των καθορισμένων ποσοτήτων στις δύο αυτές περιπτώσεις είναι τελείως διαφορετική. Οι φυσικές ποσότητες που περιγράφουν την παλλόμενη χορδή και τό ραδιενεργό άτομο έχουν έντελως διαφορετική σημασία, αν και υπάρχει κάποια τυπική όμοιότητα ανάμεσα στις εξισώσεις. Στην περίπτωση της

χορδής θέλουμε νά μάθουμε ποιά είναι ή απόκλιση ενός όποιουδήποτε σημείου από την όμαλή του θέση σέ μία κάποια στιγμή. Γνωρίζοντας τό σχήμα της παλλόμενης χορδής σέ μία δυσμένη στιγμή, ξέρουμε αυτό πού επιθυμούμε. Η απόκλιση άπ' την όμαλή θέση, μπορεί έτσι νά όπολογιστεί για όποιαδήποτε στιγμή, μέ τή βοήθεια των μαθηματικών έξισώσεων της παλλόμενης χορδής. Τό γεγονός ότι μία κάποια όρισμένη απόκλιση άπ' την όμαλή θέση άντιστοιχεί σέ κάθε σημείο της χορδής πού άδστηρά εκφράζεται ως εξής: για μία όποιαδήποτε στιγμή, ή απόκλιση από την κανονική τιμή είναι *συνάρτηση* των συντεταγμένων της χορδής. Όλα τά σημεία της άποτελούν ένα μονοδιάστατο συνεχές και ή απόκλιση είναι μία όρισμένη συνάρτηση σ' αυτό τό μονοδιάστατο συνεχές, πού πρέπει νά όπολογιστεί μέ τή βοήθεια των μαθηματικών έξισώσεων της παλλόμενης χορδής.

Μέ άνάλογο τρόπο προσδιορίζεται, στην περίπτωση ενός ήλεκτρονίου, μία κάποια συνάρτηση για ένα όποιοδήποτε σημείο στό χώρο και σέ μία όποιαδήποτε στιγμή. Τή συνάρτηση αυτή θά την όνομάζουμε *κύμα πιθανότητας*. Στην άναλογία μας τό κύμα πιθανότητας άντιστοιχεί στην απόκλιση από την όμαλή θέση στό άκουστικό πρόβλημα. Τό κύμα πιθανότητας είναι, σέ μία δυσμένη στιγμή, μία συνάρτηση τριδιάστατου συνεχούς, ενώ στην περίπτωση της χορδής ή απόκλιση ήταν, σέ μία δυσμένη στιγμή, μία συνάρτηση του μονοδιάστατου συνεχούς. Τό κύμα πιθανότητας άποτελεί τόν κατάλογο της γνώσης μας για τό κβαντικό σύστημα πού έξετάζουμε και μās καθιστά ίκανούς νά άπαντοΰμε σ' όλα τά λογικά στατιστικά ζητήματα πού άφορούν τό σύστημα αυτό. Δέ μās φανερώνει τή θέση και την ταχύτητα του ήλεκτρονίου σέ μία κάποια στιγμή, επειδή ένα τέτοιο έρώτημα δέν έχει νόημα στην κβαντική φυσική. Άλλά μās φανερώνει την πιθανότητα νά συναντήσουμε ένα ήλεκτρόνιο. Τό άποτέλεσμα δέν άναφέρεται σέ μία μόνη, αλλά σ' ένα μεγάλο άριθμό επανειλημμένων μετρήσεων. Οί έξισώσεις της κβαντικής φυσικής προσδιορίζουν τό κύμα πιθανότητας άκριβώς όπως οί έξισώσεις του Maxwell προσδιορίζουν τό ήλεκτρο-

μαγνητικό πεδίο και οί έξισώσεις της έλξης προσδιορίζουν τό έλκτικό πεδίο. Οί νόμοι της κβαντικής φυσικής είναι επίσης νόμοι δομής. Άλλά ή σημασία των φυσικών έννοιών πού προσδιορίζονται από αυτές τις έξισώσεις της κβαντικής φυσικής είναι πολύ πού άφηρημένη παρά στις περιπτώσεις του ήλεκτρομαγνητικού και έλκτικού πεδίου, παρέχουν μόνο τά μαθηματικά μέσα για άπάντηση σέ ζητήματα στατιστικού χαρακτήρα.

“Ως τώρα έξετάσαμε τό ήλεκτρόνιο σέ έξωτερικό πεδίο.” Αν, άντί του ήλεκτρονίου πού είναι τό μικρότερο δυνατό φορτίο, είχαμε ένα μεγάλο φορτίο πού νά περιέχει δισεκατομμύρια ήλεκτρονίων, θά μπορούσαμε νά άγνοήσουμε όλη την κβαντική θεωρία και νά πραγματευτοΰμε τό πρόβλημα σύμφωνα μέ την παλιά κβαντική φυσική. Όταν πρόκειται για ήλεκτρισμό σέ σύρμα, για φορτισμένους άγωγούς, για ήλεκτρομαγνητικά κύματα, μπορούμε νά εφαρμόζουμε την άπλή παλιά φυσική πού περιλαμβάνεται στις έξισώσεις του Maxwell. Άλλά δέν μπορούμε νά τό κάνουμε όταν πρόκειται για τό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, για την ένταση των φασματικών γραμμών, για την ραδιενέργεια, για τή περίθλαση ήλεκτρονικών κυμάτων και για πολλά άλλα φαινόμενα, όπου άποκαλύπτεται ό κβαντικός χαρακτήρας της ύλης και ενέργειας. Τότε πρέπει ν' άνεβοΰμε, θά λέγαμε ένα όροφο. Ένώ στην κλασσική φυσική μιλούσαμε για θέσεις και ταχύτητες ενός σωματίδιου, τώρα πρέπει νά θεωροΰμε κύματα πιθανότητας σ' ένα τριδιάστατο συνεχές πού άντιστοιχούν στό σωματιδιακό αυτό πρόβλημα.

Η κβαντική φυσική μās δίνει τή δική της άρχή για νά πραγματευτοΰμε ένα πρόβλημα, αν ξέρουμε ήδη νά πραγματευτοΰμε ένα άνάλογο πρόβλημα μέ την άποψη της κλασσικής φυσικής.

Για ένα στοιχειώδες σωματίδιο, ήλεκτρόνιο ή φωτόνιο, έχουμε κύματα πιθανότητας σ' ένα τριδιάστατο συνεχές πού χαρακτηρίζουν τή στατιστική συμπεριφορά του συστήματος, αν επαναλαμβάνονται συχνά τά πειράματα. Άλλά τί συμβαίνει

Όταν πρόκειται όχι για ένα σωματίδιο, αλλά για δύο σωματίδια ενεργοῦντα τό ένα επί του ἄλλου, π.χ. για δύο ἠλεκτρόνια, για ένα ἠλεκτρόνιο καί ένα φωτόνιο, ἢ για ένα ἠλεκτρόνιο καί ένα πυρῆνα; Δέν μποροῦμε νά τά πραγματευτοῦμε χωριστά καί νά περιγράψουμε τό καθένα μέ τή βοήθεια τοῦ κύματος πιθανότητας ἀκριβῶς ἐξ αἰτίας τῆς ἀμοιβαίας τους ἐπενεργείας. Πραγματικά δέν εἶναι καί πολύ δύσκολο νά μαντέψει κανεῖς πῶς πρέπει νά καταστρωθεῖ στή κβαντική φυσική ένα σύστημα ἀπαρτιζόμενο ἀπό δύο σωματίδια πού ἐπενεργοῦν τό ένα πάνω στό ἄλλο. Πρέπει νά κατέβουμε ένα ὄροφο, καί νά ἐπιστρέψουμε γιά μιᾶ στιγμή στήν κλασσική φυσική. Ἡ θέση δύο ὑλικῶν σημείων στό χῶρο, σέ μιᾶ κάποια στιγμή, χαρακτηρίζεται ἀπό ἕξη ἀριθμούς, τρεῖς γιά κάθε σημείο. Ὅλες οἱ δυνατές θέσεις δύο ὑλικῶν σημείων ἀποτελοῦν ένα συνεχές μέ ἕξη διαστάσεις καί ὄχι μέ τρεῖς, ὅπως στήν περίπτωση ἑνός σημείου. Ἄν τώρα ἀνεβοῦμε καί πάλι τόν ὄροφο, δηλαδή ἔρθουμε στή κβαντική φυσική, θά ἔχουμε κύματα πιθανότητας σ' ένα συνεχές μέ ἕξη διαστάσεις καί ὄχι σέ συνεχές μέ τρεῖς διαστάσεις ὅπως στήν περίπτωση τοῦ ἑνός σωματιδίου. Τό ἴδιο, γιά τρία, τέσσερα καί περισσότερα μόρια, τά κύματα πιθανότητας θά εἶναι συναρτήσεις σέ συνεχές μέ ἑννέα, δώδεκα καί περισσότερες διαστάσεις.

Αὐτό δείχνει καθαρά ὅτι τά κύματα πιθανότητας εἶναι πιό ἀφηρημένα ἀπό τά πεδία ἠλεκτρομαγνητικό καί ἑλκτικό, πού ὑπάρχουν καί διαδίδονται στό χῶρο μας μέ τρεῖς διαστάσεις. Τό συνεχές μέ πολλές διαστάσεις ἀποτελεῖ τό ἀπώτερο τμήμα γιά τά κύματα πιθανότητας, καί δέν εἶναι παρά γιά ένα μόνο σωματίδιο πού ὁ ἀριθμός τῶν διαστάσεων ἰσοῦται μέ τόν ἀριθμό τῶν διαστάσεων τοῦ φυσικοῦ χῶρου. Ἡ μόνη φυσική σημασία τοῦ κύματος πιθανότητας εἶναι ὅτι μᾶς ἐπιτρέπει νά ἀπαντοῦμε σέ λογικά στατιστικά ζητήματα καί στήν περίπτωση πολλῶν σωματιδίων καί στήν περίπτωση ἑνός μόνο. Γιά ένα μόνο ἠλεκτρόνιο, π.χ., θά μπορούσαμε νά ρωτήσουμε: ποιᾶ εἶναι ἡ πιθανότητα νά συναντήσουμε ένα ἠλεκτρόνιο σ' ένα ιδιαίτερο μέρος; Στήν περίπτωση δύο σωματιδίων, θά μπορού-

σαμε νά ρωτήσουμε: ποιᾶ εἶναι ἡ πιθανότητα νά συναντήσουμε τά δύο σωματίδια σέ δύο προσδιορισμένα μέρη σέ μιᾶ δοσμένη στιγμή;

Τό πρῶτο βήμα πού κάναμε γιά ν' ἀπομακρυνθοῦμε ἀπ' τήν κλασσική φυσική ἦταν νά ἐγκαταλείψουμε τήν περιγραφή τῶν μοναδιαίων περιπτώσεων σάν ἀντικειμενικά γεγονότα μέσα στό χῶρο καί στό χρόνο. Εἴμασταν ἀναγκασμένοι νά χρησιμοποιήσουμε τή στατιστική μέθοδο πού μᾶς προσφέρουν τά κύματα πιθανότητας. Μιά καί μπήκαμε σ' αὐτό τό δρόμο, εἴμαστε ὑποχρεωμένοι νά προχωρήσουμε πιό μακριά τήν ἐξέταση. Πρέπει νά εἰσαγάγουμε κύματα πιθανότητας μέ πολλές διαστάσεις, πού ἀντιστοιχοῦν στό πρόβλημα πολλῶν σωματιδίων.

Γιά λόγους συντομίας θά ὀνομάζουμε κλασσική φυσική κάθε τι πού δέν εἶναι κβαντική φυσική. Ἡ κλασσική φυσική καί ἡ κβαντική φυσική διαφέρουν ριζικά. Ἡ κλασσική φυσική ἔχει σκοπό νά δώσει μιᾶ περιγραφή τῶν ἀντικειμένων πού ὑπάρχουν μέσα στό χῶρο καί νά διαμορφώσει νόμους πού διέπουν τήν ἀλλαγὴ τους μέσα στό χρόνο. Ἀλλά τά φαινόμενα πού μᾶς ἀποκάλυψαν ὅτι ἡ ὕλη καί ἡ ραδιενέργεια συνίστανται ἀπό σωματίδια καί ἀπό κύματα, ὁ φαινομενικά στατιστικός χαρακτήρας τῶν στοιχειωδῶν γεγονότων ὅπως ἡ ραδιενεργός διάσπαση, ἡ περίθλαση, ἡ ἐκπομπή φασματικῶν γραμμῶν καί πολλά ἄλλα, μᾶς ἀνάγκασαν νά ἐγκαταλείψουμε αὐτή τήν ἀντίληψη. Ἡ κβαντική φυσική δέν ἀποσκοπεῖ στήν περιγραφή μοναδιαίων ἀντικειμένων στό χῶρο καί στήν ἀλλαγὴ τους μέσα στό χρόνο. Δέν ὑπάρχει θέση γιά βεβαιώσεις ὅπως ἡ ἐξῆς: «Τό ἀντικείμενο αὐτό εἶναι τέτοιο καί τέτοιο, ἔχει τέτοια καί τέτοια ἰδιότητα». Στή θέση τους ἔχουμε βεβαιώσεις τοῦ ἐξῆς εἶδους: «Υπάρχει τέτοια καί τέτοια πιθανότητα τό μοναδιαῖο ἀντικείμενο νά εἶναι τέτοιο καί τέτοιο καί νά ἔχει τέτοια καί τέτοια ἰδιότητα». Δέν ὑπάρχει θέση στήν κβαντική φυσική γιά νόμους πού διέπουν τίς ἀλλαγές τοῦ ἀτομικοῦ ἀντικειμένου μέσα στό χρόνο. Στή θέση τους ἔχουμε νόμους πού διέπουν τίς ἀλλαγές τῆς πιθανότητας μέσα στό χρόνο. Μόνο ἡ θεμελιακὴ αὐτὴ ἀλλαγὴ,

πού εισήχθη στη φυσική από την κβαντική θεωρία, έκανε δυνατή μία πλήρη εξήγηση του φαινομενικά στατιστικού και ασυνεχούς χαρακτήρα των γεγονότων στην περιοχή των φαινομένων όπου τα στοιχειώδη κβάντα της ύλης και της ακτινοβολίας φανερώνουν την ύπαρξή τους.

Αλλά νέα προβλήματα εμφανίζονται, ακόμη δυσκολώτερα, τα όποια δεν έχουν ως τώρα όριστικά διευκρινιστεί. Θα αναφέρουμε μόνο λίγα από αυτά. Η επιστήμη δεν είναι και δε θα γίνει ποτέ ένα τελειωμένο βιβλίο. Κάθε σπουδαία πρόοδος κάνει να εμφανίζονται νέα προβλήματα. Κάθε ανάπτυξη φανερώνει στην εξέλιξη της νέες και μεγαλύτερες δυσκολίες.

Γνωρίζουμε ήδη ότι στην άπλη περίπτωση ενός ή περισσότερων σωματιδίων μπορούμε να περάσουμε απ' την κλασική περιγραφή στην κβαντική περιγραφή, από την αντικειμενική περιγραφή των γεγονότων στο χώρο και στο χρόνο στα κύματα πιθανότητας. Αλλά ο αναγνώστης θυμάται την εξαιρετική σπουδαιότητα που έχει η έννοια του πεδίου στην κλασική φυσική. Πώς μπορούμε να περιγράψουμε την αλληλεπίδραση των στοιχειωδών κβάντα της ύλης και του πεδίου; Αν για την κβαντική περιγραφή δέκα σωματιδίων χρειάζεται κύμα πιθανότητας τριάντα διαστάσεων, τότε θα χρειαζόταν ένα κβαντικό πεδίο με άναριθμες διαστάσεις για την κβαντική περιγραφή ενός πεδίου. Η μετάβαση από την έννοια του κλασικού πεδίου στο αντίστοιχο πρόβλημα κυμάτων πιθανότητας στην κβαντική φυσική είναι δύσκολο βήμα. Το ανέβασμα του όρους δεν είναι εδώ εύκολο έργο, και όλες οι προσπάθειες που έγιναν ως τώρα για να λυθεί το πρόβλημα πρέπει να μη θεωρηθούν πολύ ικανοποιητικές. Υπάρχει ακόμη ένα θεμελιακό πρόβλημα. Σε όλους τους συλλογισμούς μας που αφορούν στη μετάβαση από την κλασική φυσική στην κβαντική χρησιμοποιήσαμε την παλιά προσχετικιστική (πριν την εμφάνιση της σχετικότητας) περιγραφή, όπου πραγματευόμαστε διαφορετικά το χώρο και το χρόνο. Αν ωστόσο επιχειρήσουμε ν' αρχίσουμε απ' την κλασική περιγραφή, όπως τό πρότεινε η θεωρία της σχετικότητας, τότε η άνοδος μας προς

το κβαντικό πρόβλημα φαίνεται πολύ πιο πολύπλοκη. Αυτό είναι ένα άλλο πρόβλημα, το οποίο άρχισε να έρευνά η νεώτερη φυσική, αλλά που απέχει πολύ ακόμη από μία πλήρη και ικανοποιητική λύση. Υπάρχει επί πλέον η δυσκολία της διαμόρφωσης μιας συνεκτικής φυσικής των βαρέων σωματιδίων που αποτελούν τους πυρήνες. Παρά τα πολυάριθμα πειραματικά δεδομένα και τις πολλαπλές προσπάθειες να ρίξουμε φως στο πυρηνικό πρόβλημα, βρισκόμαστε ακόμη στο σκοτάδι αναφορικά με τα θεμελιακά προβλήματα στην περιοχή αυτή.

Είναι άναμφισβήτητο ότι η κβαντική φυσική εξήγησε μία πολύ πλούσια ποικιλία γεγονότων και ότι κατέληξε, για το μεγαλύτερο μέρος, σε μία έντυπωσιακή συμφωνία ανάμεσα στη θεωρία και στην παρατήρηση. Η νέα κβαντική φυσική μας απομακρύνει ακόμη περισσότερο από την παλιά μηχανική αντίληψη και μία επιστροφή στην προηγούμενη κατάσταση φαίνεται άπίθανη. Αλλά δεν υπάρχει άμφιβολία ότι η κβαντική φυσική πρέπει πάντα να βασίζεται στις δύο έννοιες της ύλης και του πεδίου. Είναι, μ' αυτή την έννοια, μία δυϊστική θεωρία και δεν μπορεί να προχωρήσει ούτε ένα βήμα τό παλιό μας πρόβλημα χωρίς να επαναφέρουμε τά πάντα στην έννοια του πεδίου.

Άραγε η μελλοντική ανάπτυξη θα συντελεστεί σύμφωνα με τη γραμμή που διάλεξε η κβαντική φυσική, ή είναι πιο πιθανό ότι νέες επαναστατικές ιδέες θα εισαχθούν στη φυσική; Ο δρόμος της προόδου και πάλι θα στραφεί άπτόμα, όπως τόσα συχνά συνέβηκε στο παρελθόν;

Κατά τά τελευταία αυτά χρόνια όλες οι δυσκολίες της κβαντικής φυσικής συγκεντρώθηκαν γύρω από ένα μικρό άριθμό βασικών σημείων. Η φυσική άνυπόμονα περιμένει τη λύση τους. Αλλά δεν υπάρχει τρόπος να προβλέψουμε πότε και πού θα πραγματοποιηθεί η διευκρίνιση των δυσκολιών αυτών.

## Η ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ποιά όμως είναι τὰ γενικά συμπεράσματα πού μπορούμε νά βγάλουμε απ' τήν ανάπτυξη τῆς φυσικῆς πού ἐκθέσαμε ἐδῶ σέ μιά πλατειά περίληψη, πού ἀντιπροσωπεύει μόνο τίς πιό θεμελιακές ιδέες;

Ἡ ἐπιστήμη δέν εἶναι συλλογή νόμων, δέν εἶναι κατάλογος γεγονότων πού δέν συνδέονται μεταξύ τους. Εἶναι δημιουργία τοῦ ἀνθρώπινου πνεύματος διά μέσου ιδεῶν καί ἐννοιῶν πού ἐπινοοῦνται ἐλεύθερα. Οἱ φυσικές θεωρίες προσπαθοῦν νά διαμορφώσουν μιά εἰκόνα τῆς πραγματικότητας καί νά τήν συνδέσουν στόν πλατύ κόσμο τῶν αἰσθητῶν ἐντυπώσεων. Ἐτσι, οἱ νοητές μας κατασκευές δικαιολογοῦνται μόνο ἂν, καί μέ τὸ τρόπο, οἱ θεωρίες μας ἀποτελοῦν ἕνα τέτοιο σύνδεσμο.

Εἶδαμε νέες πραγματικότητες νά δημιουργοῦνται ἀπ' τήν πρόοδο τῆς φυσικῆς. Ἀλλά μπορούμε νά ξαναγυρίσουμε αὐτή τή σειρά τῆς δημιουργικῆς δραστηριότητας πολύ πιό πίσω ἀπ' τήν ἀφειρηρία τῆς φυσικῆς. Μιά ἀπ' τίς πιό πρωτόγονες ἐννοιες εἶναι ἡ ἐννοια τοῦ ἀντικειμένου. Οἱ ἐννοιες τοῦ δένδρου, τοῦ ἀλόγου, ἢ ὁποιοῦδήποτε ὕλικου σώματος, εἶναι δημιουργίες πού βασίζονται στήν ἐμπειρία, ἂν καί οἱ ἐντυπώσεις ἀπ' τίς ὁποῖες προέρχονται εἶναι πρωτόγονες σέ σύγκριση μέ τόν κόσμο τῶν φυσικῶν φαινομένων. Μιά γάτα πού βασανίζει ἕνα ποντικό, δημιουργεῖ ἐπίσης γιά τόν ἑαυτό της, μέ τή σκέψη, μιά πρωτόγονη πραγματικότητα. Τό γεγονός ὅτι ἡ γάτα ἀντιδρᾷ πάντοτε μέ τόν ἴδιο τρόπο ἀπέναντι ὁποιοῦδήποτε ποντικοῦ πού συναντᾷ δείχνει ὅτι μορφώνει ἐννοιες καί θεωρίες πού τήν ὀδηγοῦν διά μέσου τοῦ δικοῦ της κόσμου τῶν αἰσθητῶν ἐντυπώσεων.

«Τρία δένδρα» εἶναι κάτι τό διαφορετικό ἀπό «δύο δένδρα». Ἐξ ἄλλου, «δύο δένδρα» καί «δύο πέτρες» εἶναι πράγματα διαφορετικά. Οἱ ἐννοιες τῶν καθαρῶν ἀριθμῶν 2, 3, 4, ... ἀπαλλαγμένες ἀπ' τὰ ἀντικείμενα πού τοὺς ἔδωσαν γέννηση, εἶναι δημιουργίες τοῦ σκεπτομένου πνεύματος, πού περιγρά-

φουν τήν πραγματικότητα τοῦ κόσμου μας.

Ἡ ὑποκειμενική αἴσθηση τοῦ χρόνου μᾶς ἐπιτρέπει νά ταξινομοῦμε τίς ἐντυπώσεις μας, νά κανονίζουμε ὅτι ἕνα γεγονός προηγείται ἐνός ἄλλου. Ἀλλά ἡ σύνδεση κάθε στιγμῆς τοῦ χρόνου μ' ἕνα ἀριθμό χρησιμοποιώντας ἕνα ρολοῖ, ἢ θεωρησῆ τοῦ χρόνου σάν ἕνα μονοδιάστατο συνεχές, αὐτό εἶναι ἤδη μιά ἐφεύρεση. Τό ἴδιο ἰσχύει καί γιά τίς ἐννοιες τῆς εὐκλείδειου καί μή εὐκλείδειου γεωμετρίας καί γιά τό χῶρο μας, πού τόν θεωροῦμε σάν ἕνα τρισδιάστατο συνεχές.

Ἡ φυσική ἄρχισε πραγματικά μέ τήν ἐπινοήση τῆς μάζας, τῆς δύναμης καί ἐνός συστήματος ἀδρανείας. Ὅλες αὐτές οἱ ἐννοιες εἶναι ἐλεύθερες ἐπινοήσεις ὀδήγησαν στή διαμόρφωση τῆς μηχανικῆς ἀποψῆς. Γιά τό φυσικό τῶν ἀρχῶν τοῦ 19ου αἰῶνα ἡ πραγματικότητα τοῦ ἐξωτερικοῦ μας κόσμου συνίστατο ἀπό σωματίδια καί ἀπλές δυνάμεις πού ἐνεργοῦσαν μεταξύ τους καί ἐξαρτόταν μόνο ἀπό τήν ἀπόσταση. Προσπαθοῦσε νά κρατήσῃ ὅσο περισσότερο καιρό μπορούσε τήν πίστη ὅτι θά πετύχει νά ἐξηγήσῃ ὅλα τὰ γεγονότα τῆς φύσης μ' αὐτές τίς θεμελιακές ἐννοιες τῆς πραγματικότητας. Οἱ δυσκολίες πού συνάπτονται στήν ἀπόκλιση τῆς μαγνητικῆς βελόνας καί ἐκεῖνες πού συνάπτονται στή δομή τοῦ αἰθέρα μᾶς ὀδήγησαν στή δημιουργία μᾶς πῶ λεπτομερειακῆς πραγματικότητας. Ἡ σπουδαία ἐφεύρεση τοῦ ἠλεκτρομαγνητικοῦ πεδίου κάνει τήν ἐμφάνισή της. Χρειαζόταν μιά τολμηρή ἐπιστημονική φαντασία γιά νά θεωρήσῃ ἀληθινῆ πραγματικότητα τό γεγονός ὅτι δέν εἶναι ἡ συμπεριφορά τῶν σωμάτων, ἀλλά κάτι πού βρίσκεται ἀνάμεσα σ' αὐτά, δηλαδή τό πεδίο, πού θά μπορούσε νά εἶναι οὐσιαστικό γιά τήν ταξινόμηση καί κατανόηση τῶν γεγονότων.

Οἱ μετέπειτα ἀναπτύξεις κατάστρεψαν τίς παλιές ἐννοιες καί δημιούργησαν νέες. Ὁ ἀπόλυτος χρόνος καί τό σύστημα τῶν συντεταγμένων ἀδρανείας ἐγκαταλείφθηκαν ἀπό τή θεωρία τῆς σχετικότητας. Τό ἀπώτερο βᾶθος ὅλων τῶν γεγονότων δέν ἦταν πιά ὁ μονοδιάστατος χρόνος κι ὁ τρισδιάστατος χῶρος, ἀλλά τό τετραδιάστατο χωροχρονικό συνεχές, μιά ἄλλη ἐλεύ-

θερη έφεύρεση, μέ νέες ιδιότητες μετασχηματισμοῦ. Τό σύστημα τῶν συντεταγμένων ἀδράνειας έπαψε νά εἶναι ἀναγκαῖο. Κάθε σύστημα συντεταγμένων μπορεί τό ἴδιο καλά νά χρησιμεύει στήν περιγραφή τῶν γεγονότων μέσα στή φύση.

Ἡ θεωρία τῶν κβάντα δημιούργησε κι αὐτή μέ τή σειρά της καί οὐσιαστικές μορφές τῆς πραγματικότητάς μας. Ἡ ἀσυνέχεια ἀντικατέστησε τή συνέχεια. Στή θέση τῶν νόμων τῶν διεπόντων τά στοιχεῖα τῶν συνόλων ἐμφανίσθηκαν νόμοι πιθανότητας.

Ἡ πραγματικότητα πού δημιούργησε ἡ νεώτερη φυσική εἶναι, πραγματικά πολύ μακριά ἀπ' τήν πραγματικότητα τῶν ἀρχῶν τῆς ἐπιστήμης. Ὁ σκοπός ὅμως κάθε φυσικῆς θεωρίας μένει πάντα ὁ ἴδιος.

Μέ τή βοήθεια τῶν φυσικῶν θεωριῶν ζητοῦμε νά βροῦμε τό δρόμο μας μέσα ἀπ' τό λαβύρινθο τῶν παρατηρουμένων γεγονότων, νά κατατάξουμε καί νά κατανοήσουμε τόν κόσμο τῶν αἰσθητῶν μας ἐντυπώσεων. Ἐπιθυμοῦμε τά γεγονότα πού παρατηροῦμε νά ἀκολουθοῦν λογικά τήν ἀντίληψή μας τῆς πραγματικότητας. Χωρίς τήν πίστη ὅτι εἶναι δυνατό νά συλλάβουμε τήν πραγματικότητα μέ τίς θεωρητικές μας κατασκευές, χωρίς τήν πίστη στήν ἐσωτερική ἀρμονία τοῦ κόσμου μας, δέ θάταν δυνατό νά ὑπάρχει ἐπιστήμη. Αὐτή ἡ πίστη εἶναι καί θά μείνει πάντα τό θεμελιακό αἶτιο κάθε ἐπιτημονικῆς δημιουργίας. Διά μέσου ὄλων τῶν προσπαθειῶν μας, σέ κάθε δραματικό ἀγῶνα ἀνάμεσα στίς παλιές καί στίς νέες ἀντιλήψεις, ἀναγνωρίζουμε τόν αἰώνιο πόθο νά κατανοήσουμε, τήν πάντα σταθερή πίστη στήν ἀρμονία τοῦ κόσμου μας, πού συνεχῶς ἐνισχύεται ἀπό τό προσκόμματα πού ἀντιστέκονται στήν κατανοήσή μας.

Συνοπτικά:

Καί πάλι ἡ πλούσια ποικιλία τῶν γεγονότων στήν ἀτομική περιοχὴ μᾶς ἀναγκάζει νά ἐπινοήσουμε νέες φυσικές ἔννοιες. Ἡ ὕλη ἔχει κοκκώδη δομή· ἀποτελεῖται ἀπό στοιχειώδη σωματίδια, τά στοιχειώδη κβάντα τῆς ὕλης. Ἐτσι, τό ἠλεκτρικό φορτίο ἔχει κοκκώδη δομή καί - πρᾶγμα σπουδαιότατο ἀπ' τήν ἀποψη τῆς θεωρίας τῶν κβάντα - τό ἴδιο συμβαίνει καί μέ τήν ἐνέργεια. Τά

φοιτόνια εἶναι τά κβάντα ἐνεργείας ἀπ' τά ὁποῖα ἀποτελεῖται τό φῶς.

Τό φῶς εἶναι κῶμα ἢ βροχή φωτονίων; Μιά ἀκτίνα ἠλεκτρονίων εἶναι βροχή στοιχειωδῶν σωματιδίων ἢ κῶμα; Τά θεμελιακά αὐτά ἐρωτήματα ἐπιβάλλονται στή φυσική ἀπό τό πείραμα. Στήν ἀναζήτηση μιᾶς ἀπάντησης σ' αὐτά, ὀφείλομε νά παραιτηθοῦμε ἀπό τοῦ νά περιγράψουμε τά ἀτομικά γεγονότα σά νά συμβαίνουν μέσα στό χῶρο καί τό χρόνο, ὀφείλομε νά ἀπομακρυνθοῦμε ἀκόμη περισσότερο ἀπ' τήν παλιά μηχανική ἀντίληψη. Ἡ κβαντική φυσική διαμορφώνει νόμους πού διέπουν τά πλήθη καί ὄχι τά άτομα. Δέν περιγράφει ιδιότητες, ἀλλά πιθανότητες· δέ διαμορφώνει νόμους πού ἀποκαλύπτουν τό μέλλον τῶν συστημάτων, ἀλλά νόμους πού διέπουν τίς ἀλλαγές τῶν πιθανοτήτων μέσα στό χρόνο καί πού ἀναφέρονται σέ μεγάλα σύνολα ἀτόμων.

## Π Ε Ρ Ι Ε Χ Ο Μ Ε Ν Α

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	7
1. Η ΓΕΝΕΣΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ .....	9
Τό μεγάλο μυστηριώδες ρομάντζο .....	9
Τό πρώτο κατευθυντήριο νήμα .....	12
Τά διανύσματα .....	20
Τό αίνιγμα τής κίνησης .....	27
*Απομένει ένας δρόμος .....	43
*Η θερμότητα είναι ύλη; .....	47
Τά ρωσικά βουνά .....	55
*Η σχέση τών τιμών .....	59
Τό φιλοσοφικό υπόβαθρο .....	63
*Η κινητική θεωρία τής ύλης .....	66
2. Η ΠΑΡΑΚΜΗ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΑΝΤΙΛΗΨΗΣ .....	75
Τά δύο ηλεκτρικά ρευστά .....	75
Τά μαγνητικά ρεύματα .....	86
*Η πρώτη σοβαρή δυσκολία .....	91
*Η ταχύτητα τοῦ φωτός .....	97

Τό φῶς σάν οὐσία .....	100
Τό αἰνίγμα τοῦ χρώματος .....	103
Τί εἶναι κῶμα .....	107
Ἡ κυματική θεωρία τοῦ φωτός .....	112
Τά φωτεινά κύματα εἶναι ἐπιμήκη ἢ ἐγκάρσια ...	121
Ἐπίπεδος αἰθέρας καί ἡ μηχανική ἄποψη .....	124
<b>3. ΤΟ ΠΕΔΙΟ, Ἡ ΣΧΕΤΙΚΟΤΗΤΑ .....</b>	<b>129</b>
Τό πεδίο σάν παράσταση .....	129
Οἱ δύο βάσεις τῆς θεωρίας τοῦ πεδίου .....	141
Ἡ πραγματικότητα τοῦ πεδίου .....	147
Πεδίο καί αἰθέρας .....	154
Τό σύστημα ἀναφορᾶς .....	158
Αἰθέρας καί κίνηση .....	168
Χρόνος ἀπόσταση σχετικότητα .....	181
Σχετικότητα καί μηχανική .....	196
Ἡ συνέχεια χώρου - χρόνου .....	202
Ἡ γενική σχετικότητα .....	212
Στό ἐξωτερικό καί στό ἐσωτερικό τοῦ ἀνεγκυστήρα	217
Ἡ γεωμετρία καί τό πείραμα .....	226
Ἡ γενική σχετικότητα καί ἡ ἐπαλήθευσή της ...	238
Πεδίο καί ὕλη .....	244
<b>4. ΤΑ ΚΒΑΝΤΑ .....</b>	<b>248</b>
Συνέχεια - ἀσυνέχεια .....	248
Στοιχειώδη κβάντα τῆς ὕλης καί τοῦ ἠλεκτρισμοῦ	251
Τά κβάντα τοῦ φωτός .....	257
Φωτεινά φάσματα .....	265
Τά ὕλικά κύματα .....	270
Τά κύματα πιθανότητας .....	278
Ἡ φυσική καί ἡ πραγματικότητα .....	292