

6. ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Όλοι εμείς που με την εμπειρία των χρόνων εξοικειωθήκαμε βαθιά με τις έννοιες και τα φαινόμενα του ηλεκτρισμού¹ και του μαγνητισμού, είναι πολύ εύκολο να χάσουμε τη συναίσθηση του πόσο πολύ αφηρημένο είναι το εν λόγω πεδίο φυσικής και πόσο απογοητευτικά δύσκολο για πολλούς μαθητές. Οι παραστάσεις τους προέρχονται μόνο από παρατήρηση αλληλεπιδράσεων από απόσταση, οι οποίες περιλαμβάνουν μεταφορά ενέργειας λόγω επιτάχυνσης σωμάτων, εκτροπής κινήσεων (εξαιτίας της δράσης αντίθετων δυνάμεων) και θερμικών διεργασιών. Με βάση τις παραστάσεις αυτές, ο καθηγητής διατυπώνει αφηρημένες έννοιες και πρότυπα που ερμηνεύουν τα παρατηρούμενα γεγονότα. Επειδή προσθέτουμε νέο «στρώμα» εννοιών (λόγου χάρη, τις έννοιες «ηλεκτρικό φορτίο», «ομόσημα φορτία», «ετερόσημα φορτία», «ηλεκτρικό ρεύμα», «διαφορά δυναμικού», «δύναμη Lorentz», «ένταση ηλεκτρικού πεδίου», κ.ά.), η παρούσα εννοιολογική δομή είναι περισσότερο αφηρημένη από την αντίστοιχη της μηχανικής.

Δεν πρέπει να μας εκπλήσσει το ότι οι μαθητές έχουν σοβαρή δυσκολία με τα βαθύτερα ζητήματα του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού: τους ζητάμε να αφομοιώσουν ένα νέο σύνολο ιδιαίτερα εκλεπτυσμένων αφηρημένων εννοιών, πριν καλά καλά αφομοιώσουν την αντίστοιχη δομή της μηχανικής. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να αναγνωρίσουμε την ύπαρξη της δυσκολίας αυτής, για να αφιερώσουμε χρόνο στην αφομοίωση των νέων λειτουργικών ορισμών, στη μελέτη ερωτημάτων του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί δεχόμαστε ότι...;» και στην εγκαθίδρυση σταθερής σύνδεσης μεταξύ των εννοιών και των φαινομένων. Επίσης, είναι σημαντικό να επικαλούμαστε και να εφαρμόζουμε τις θεμελιώδεις έννοιες της μηχανικής (ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, μάζα, ορμή, ενέργεια) σε κάθε ευκαιρία.

1. Προέταξα τη μελέτη του στατικού ηλεκτρισμού από τη μελέτη των ηλεκτρικών ρευμάτων όχι επειδή θεωρώ ουσιώδη τη σειρά αυτή, αλλά επειδή πρόκειται για τη σειρά που συνιθίστετα ακολουθείται στα μαθήματα. Είναι απολύτως ισοδύναμο να αρχίσουμε με το ηλεκτρικό ρεύμα, ακολουθώντας την επιλογή πολλών καθηγητών και εγχειριδίων, και, κατόπιν, να προχωρήσουμε στα ηλεκτροστατικά φαινόμενα. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, πρέπει να εξετάσουμε τα ίδια ζητήματα λογικής.

Οι περισσότεροι μαθητές έχουν ακούσει τη γλώσσα του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού ήδη από πολύ μικρή ηλικία. Γι' αυτό, πολλοί καθηγητές και πολλά εγχειρίδια (ιδιαίτερα του λυκείου) έχουν την τάση να θεωρούν ότι οι μαθητές έχουν αφομοιώσει και κατανοήσει τις θεμελιώδεις ιδέες. Δυστυχώς, αυτό δεν συμβαίνει: πολλοί μαθητές ουδέποτε παρατήρησαν άμεσα ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις· ουδέποτε είδαν το κοινότοπο πείραμα όπου ένα αντικείμενο που προηγουμένως το έχουμε τριψέ, έλκει κομματάκια χαρτιού· άλλοι δεν έχουν παίξει με απλούς μαγνήτες. Υπάρχουν, επίσης, μαθητές, ιδιαίτερα κορίτσια, που φοβούνται να αγγίξουν μικρές μπαταρίες, επειδή ποτέ δεν είχαν την ευκαιρία να παίξουν με τέτοια αντικείμενα και, ταυτόχρονα, έμαθαν να φοβούνται τον ηλεκτρισμό.

Αρκετοί μαθητές, λοιπόν, έρχονται στο γυμνάσιο και στο λύκειο έχοντας ακούσει το λεξιλόγιο του ηλεκτρισμού, χωρίς να έχουν δει αντίστοιχα φαινόμενα· ελάχιστοι, επίσης, έχουν εξετάσει το λειτουργικό νόημα των όρων με τους οποίους έχουν εξοικειωθεί. Τόσο στο γυμνάσιο όσο και στο λύκειο, λοιπόν, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επανεξετάσουμε το νόημα των βασικών όρων που χρησιμοποιούμε σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής. Η συγκεκριμένη αμέλεια, το ότι, δηλαδή, εκκινούμε με την παραδοχή ότι οι μαθητές «γνωρίζουν» τα φαινόμενα και την ορολογία, είναι υπεύθυνη για πολλές μελλοντικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι μαθητές σ' αυτό το πεδίο.

6.2 Η διάκριση μεταξύ της ηλεκτρικής, της μαγνητικής και της βαρυτικής αλληλεπίδρασης

Επειδή η μελέτη των ηλεκτρικών, των μαγνητικών και των βαρυτικών φαινομένων συνήθως παρουσιάζεται ξεχωριστά και σε διαφορετικό χρόνο στο δημοτικό, στο γυμνάσιο ή στο λύκειο, ελάχιστοι μαθητές έχουν την ευκαιρία να συγκρίνουν και να αντιδιαστέλλουν με λειτουργικό τρόπο τα αντίστοιχα φαινόμενα. Αποτέλεσμα: πολλοί από εκείνους που παρακολουθούν μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής, σε οποιαδήποτε εκπαιδευτική βαθμίδα, συγχέουν σοβαρά τους όρους και τα φαινόμενα. Με τις συνεντεύξεις και με τις ερωτήσεις των τεστ, αναδεικνύεται ότι δεν αντιλαμβάνονται σαφώς τη διάκριση μεταξύ των ηλεκτρικών και των μαγνητικών φαινομένων: συχνά χρησιμοποιούν με τυχαίο τρόπο τους όρους ως συνώνυμους· πολλοί θεωρούν ότι οι βόρειοι μαγνητικοί πόλοι απωθούν τα θετικά ηλεκτρικά φορτία· άλλοι θεωρούν ότι συμβαίνουν παράλογα και μη πραγματοποιήσιμα φαινόμενα· ορισμένοι έχουν την εντύπωση ότι η βαρύτητα είναι είδος ηλεκτρικού ή μαγνητικού φαινομένου. Δυστυχώς, ελάχιστοι μαθητές είχαν κάποτε άμεση, απτή εμπειρία φαινομένων στα οποία μελέτησαν, ταυτόχρονα, τις διαφορετικές αλληλεπιδράσεις και μπόρεσαν να προσδιο-

ρίσουν τις ομοιότητες και τις διαφορές τους.

Επισημαίνουμε, στο παρόν στάδιο, το συγκεκριμένο ζήτημα της μάθησης και της κατανόησης, όχι για να υποστηρίξουμε ότι η παρουσίασή του πρέπει να προηγηθεί της εμπειρίας που περιγράφουμε στα επόμενα εδάφια, αλλά για να ενταθεί η προσοχή του καθηγητή στη σημασία του. Πρέπει, δηλαδή, ο καθηγητής να επανέρχεται περιοδικά σ' αυτό, καθώς ο κατάλογος των λειτουργικών διαφορών θα συμπληρώνεται συνεχώς. Είναι σημαντικό να συνειδητοποιούν άμεσα οι μαθητές τις διαφορές, καθώς, παρατηρώντας τα ηλεκτρικά και τα μαγνητικά φαινόμενα, τα συγκρίνουν με τα βαρυτικά. (Παραεμπιπτόντως, είναι απαραίτητο να έχουμε συνεχώς κατά νουν ότι οι μόνες συνηθισμένες εκδηλώσεις της βαρύτητας είναι το βάρος και η ελεύθερη πτώση των σωμάτων. Η ασθενέστατη βαρυτική αλληλεπίδραση μεταξύ συνηθισμένων σωμάτων και η βαρυτική αλληλεπίδραση σε κοσμική κλίμακα προϋποθέτουν την αφηρημένη επέκταση της έννοιας της βαρύτητας σε περιπτώσεις εκτός της περιοχής της άμεσης εμπειρίας.) Αν οι μαθητές λάβουν υπόψη τους, ταυτόχρονα, τα διάφορα φαινόμενα, η αντίληψή τους εμπλουτίζεται, κατανοούν καλύτερα τους όρους και συγκρατούν στη μνήμη τους τα φαινόμενα.

6.3 *Ηλεκτρισμός με τριβή: ηλεκτρική αλληλεπίδραση και ηλεκτρικά φορτία*

Πολλοί μαθητές ουδέποτε έχουν παρατηρήσει κατ' ιδίαν τα φαινόμενα και τις αλληλεπιδράσεις που οδήγησαν στη διαμόρφωση της έννοιας του «ηλεκτρικού φορτίου». Απλώς, ακούνε από την παιδική τους ηλικία τον όρο αυτό μέσα και έξω από το σχολείο. Τον χρησιμοποιούν, λοιπόν, χωρίς να γνωρίζουν τι σημαίνει και τι δεν σημαίνει. Για πολλούς μαθητές, το φορτίο είναι αόρατη ουσία που είναι δυνατό να «απλώνεται» πάνω στα αντικείμενα ή να «στάζει» από τις πρίζες του σπιτιού².

Σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής, πρέπει να κατευθύνουμε τους μαθητές να ξαναθυμηθούν, τουλάχιστον, ορισμένες από τις παρατηρήσεις που οδήγησαν στη διαμόρφωση της έννοιας «ηλεκτρική αλληλεπίδραση», την οποία προκαλεί η τριβή. Πρέπει, επίσης, να ξαναθυμηθούν τις παρατηρήσεις που οδήγησαν στη διαμόρφωση της έννοιας «ηλεκτρικό φορτίο», στη διαπίστωση της ευκινήσιμής του και, τελικά, στην αντίληψη της ύπαρξης δύο ειδών φορτίου (ή δύο «καταστάσεων φορτίου») και στον λειτουργικό ορισμό των όρων «ομόσημος» και «ετερόσημος». Οι καθηγητές οι

2. Οι αναγνώστες που γνωρίζουν τα χιουμοριστικά κείμενα του James Thurber, ίσως αναγνωρίσουν ότι αυτή η αντίληψη μοιάζει αρκετά μ' εκείνη που αποδίδει ο Thurber στη μητέρα του, στο βιβλίο του «My Life and Hard Times». Η αντίληψη, ωστόσο, είναι γενικότερη.

οποίοι δεν γνωρίζουν την ιστορική σειρά των γεγονότων του 18ου αιώνα, θα διαπιστώσουν ότι η ιστορία είναι πολύ διδακτική και διαφωτιστική, ακόμα κι αν δεν θελήσουν να παρουσιάσουν στην τάξη όλες τις λεπτομέρειες. [Το κείμενο του Whittaker (1951) και των Roller και Roller (1941) είναι ιδιαίτερα χρήσιμες σχετικές αναφορές. Σύνομη παρουσίαση υπάρχει στο άρθρο του Arons (1965).]

Πρέπει να κατευθύνουμε όσους μαθητές ουδέποτε παρατήρησαν την έλξη μικρών κομματιών χαρτιού ή φτερών από φορτισμένη πλαστική ράβδο ή χτένα, να εκτελέσουν την παρατήρηση αυτή. Επίσης, πρέπει να τους κατευθύνουμε να έχουν, ταυτόχρονα, κατά νουν και τη βαρύτητα. Είναι απαραίτητο να αντιληφθούν ότι η ηλεκτρική αλληλεπίδραση είναι διαφορετική από τη βαρυτική: η βαρύτητα δεν έχει σχέση με την τριβή των αντικειμένων και δεν επηρεάζεται απ' αυτή. Επίσης, πρέπει οι μαθητές να συνειδητοποιήσουν ότι η ηλεκτρική αλληλεπίδραση είναι εξαιρετικά ισχυρότερη από τη βαρυτική: τα κομματάκια χαρτιού αποκτούν μεγαλύτερη επιτάχυνση προς τα πάνω παρά την προς τα κάτω έλξη ολόκληρης της Γης. Οι διαφορές αυτές δικαιολογούν την εισαγωγή ενός νέου όρου, του «ηλεκτρικού φορτίου».

Ο όρος «φορτίο» αφορά μια ιδιότητα που αποκτούν τα αλληλεπιδρώντα σώματα. Η ιδιότητα αυτή «διαρρέει», αποθηκεύεται με την τριβή, μεταφέρεται με την επαφή από το ένα σώμα στο άλλο, είναι ιδιαίτερα ευκίνητη μέσα στα μεταλλικά αντικείμενα κτλ. Πρέπει να επισημάνουμε σαφώς ότι το φορτίο είναι αφηρημένη επινόηση και όχι ουσία. Πρόκειται για μια ιδιότητα που προσδιορίσαμε από τις παρατηρούμενες αλληλεπιδράσεις: ουδέποτε θα μάθουμε τι «είναι» και πώς «λειτουργεί», όπως ακριβώς συμβαίνει με τη «βαρύτητα». (Πολλοί μαθητές που μαζί με τον ηλεκτρισμό και το ηλεκτρικό φορτίο έχουν πληροφορηθεί για την ύπαρξη των ηλεκτρονίων, χωρίς, ωστόσο, να γνωρίζουν τη σημασία και την προέλευσή τους, πέφτουν θύματα παρανόησης. Πιστεύουν, δηλαδή, ότι αν μάθουν αρκετά στοιχεία για τα ηλεκτρόνια, θα κατανοήσουν τη φύση του ηλεκτρικού φορτίου. Πρέπει, τελικά, να διαλύσουμε αυτήν την παρανόηση. Μια προσέγγιση που προξενεί κατάπληξη στους περισσότερους μαθητές είναι να τους κατευθύνουμε να συνειδητοποιήσουν το εξής: αποδίδουμε στα ηλεκτρόνια αρνητικό φορτίο, επειδή, σε τελική ανάλυση, παρατηρούμε ότι η δέσμη ηλεκτρονίων απωθείται από τις λαστιχένιες ράβδους που έχουμε τρώψει με γούνα γάτας.)

Πρέπει, επίσης να ορίσουμε λειτουργικά και με σαφήνεια τους όρους «αγωγός» και «κακός αγωγός» (ή «μονωτής»), στο πλαίσιο των παρατηρήσεων και των πειραμάτων που αφορούν την ευκίνησία και την ικανότητα μεταφοράς του φορτίου. Στις περισσότερες παρουσιάσεις αυτό γίνεται λίγο-πολύ επαρκώς: δεν είναι απαραίτητο, λοιπόν, να επιμείνουμε περισσότερο σ' αυτό το θέμα.

6.4 Ηλεκτροστατικά πειράματα στο σπίτι

Επειδή ελάχιστοι μαθητές έχουν παρατηρήσει άμεσα ηλεκτροστατικές επιδράσεις, ωφελούνται σημαντικά αν τους παροτρύνουμε να εκτελέσουν μόνοι τους πειράματα, εκτός από το να παρατηρούν παθητικά τις επιδείξεις που εκτελούμε στο μάθημα. (Δεν θέλουμε να μειώσουμε τη σημασία των επιδείξεων: είναι πολύτιμες και πρέπει να εκτελούνται · δεν αντικαθιστούν, ωστόσο, την άμεση ενασχόληση.)

Είναι, ευτυχώς, εφικτό να εκτελεστεί στο σπίτι αποτελεσματική και χρήσιμη μελέτη των φαινομένων της ηλεκτροστατικής. Αποδεικνύεται, μάλιστα, ότι αν αναθέσουμε στους μαθητές την εργασία αυτή, την εκτελούν προσεκτικά (σε αντίθεση με τη συμβατική εργασία που εκτελείται με «μολύβι και χαρτί»), ιδιαίτερα αν έχουν κατάλληλη καθοδήγηση.

«Εργαλείο» για τα πειράματα της ηλεκτροστατικής είναι η συνηθισμένη λευκή ταινία της εταιρείας Scotch (η ταινία «Magic»). Πάνω σε μια πρακτικά λεία και στεγνή επιφάνεια κολλάμε μια λωρίδα ταινίας, μήκους περίπου πέντε εκατοστών. Κατόπιν, την ξεκολλάμε απότομα. Αποτέλεσμα: η ταινία ηλεκτριζείται ισχυρότερα με ορισμένα υλικά και ασθενέστερα με άλλα. (Βεβαίως, είναι απαραίτητο να διπλώσουμε το άκρο της λωρίδας από το οποίο την κρατάμε, για να μην κολλήσει στην επιφάνεια και για να πιάνουμε τη λωρίδα χωρίς να κολλάει στα δάχτυλά μας.)

Κολλάμε μια λωρίδα ταινίας στο πίσω μέρος κάποιας άλλης. Κατόπιν, κολλάμε τη διπλή λωρίδα πάνω σε μια λεία επιφάνεια και την ξεκολλάμε απότομα. Αν αποχωρίσουμε τις δύο λωρίδες, φορτίζονται με αντίθετο φορτίο.

Κολλάμε το ένα άκρο μιας φορτισμένης λωρίδας σε κάποιο αντικείμενο καθημερινής χρήσης (λόγου χάρι, στο χείλος του τραπεζιού, στη βάση του καλύμματος της λάμπας, στο πηγάκι της πλάτης της καρέκλας κτλ.), το οποίο, πλέον, χρησιμεύει ως στήριγμα. Η αιωρούμενη λωρίδα γίνεται φύλλο ηλεκτροσκοπίου: αντιδρά στην παρουσία άλλων φορτισμένων αντικειμένων. Κρεμάμε τις δύο αντίθετα φορτισμένες λωρίδες όχι πολύ μακριά τη μια από την άλλη. Διαθέτουμε, έτσι, δύο λωρίδες αναφοράς: αλληλεπιδρώντας μαζί τους, ελέγχουμε το φορτίο άλλων αντικειμένων.

Οι μαθητές παρακολουθούν στην αίθουσα διδασκαλίας πώς να κατασκευάσουν παρόμοια ηλεκτροσκόπια και πώς να μελετούν τη συμπεριφορά φορτισμένων αντικειμένων. Αρχικά, η μελέτη τους περιλαμβάνει τη φόρτιση με παρόμοια διαδικασία άλλων λωρίδων και την παρατήρηση της αλληλεπίδρασής τους με τις λωρίδες του ηλεκτροσκοπίου· είναι, ωστόσο, απαραίτητο να επισημάνουμε ότι η μελέτη δεν πρέπει να περιοριστεί σε πειράματα με λωρίδες. Μπορούμε να φορτίσουμε πολλά αντικείμενα οικιακής χρήσης (πιάτα, ποτήρια, δοχεία, χτένες, τη χειρολαβή της οδοντόβουρτσας κ.ά.), τρίβοντάς τα με διάφορα υλικά (μετάξι, μαλλί, γούνα, ρούχα κατα-

σκευασμένα από συνθετικές ίνες, πλαστικές σακούλες, μεμβράνη περιτυλίγματος), και να ελέγξουμε την αλληλεπίδρασή τους με τις λωρίδες του ηλεκτροσκοπίου. Ελέγχουμε, επίσης, το ίδιο το σώμα μας: κάποια μέρα που ο καιρός είναι ξηρός σύρουμε τα πόδια μας πάνω στο χαλί· κατόπιν, πησιάζουμε διαδοχικά το δάχτυλό μας στις δύο αντίθετα φορτισμένες λωρίδες του ηλεκτροσκοπίου.

Στα επόμενα εδάφια περιγράφονται ορισμένες από τις συστηματικές μελέτες που μπορούν να εκτελέσουν οι μαθητές. Παρατίθενται, επίσης, ορισμένες ερωτήσεις που πρέπει να απαντήσουν.

6.5 Όμοια και ανάμοια φορτία

Ελάχιστοι μαθητές — ακόμη και από εκείνους οι οποίοι στις προηγούμενες τάξεις έχουν όντως αφομοιώσει σωστά τον ηλεκτρισμό — μπορούν να δώσουν κατάλληλο λειτουργικό ορισμό της έννοιας των «όμοιων» φορτίων. Αν τους ζητήσουμε το νόημα του όρου «όμοιος», ουσιαστικά όλοι απαντούν: «τα όμοια φορτία απωθούνται μεταξύ τους»· θεωρούν, μάλιστα, αυτή τη φράση ορισμό. Ελάχιστα εγχειρίδια δίνουν κάποια προσοχή στο εν λόγω μη τετριμμένο γλωσσολογικό πρόβλημα. Πολλά συγχέουν το θέμα, θεωρώντας ότι όλοι γνωρίζουν πως υπάρχουν δύο είδη φορτίου και πως τα όμοια φορτία απωθούνται, ενώ τα ανάμοια έλκονται. Παραλείπουν να συμπεριλάβουν τον ορισμό των τεχνικών όρων «όμοιος» και «ανάμοιος». Επίσης, δεν διερευνούν τα ερωτήματα: «Γιατί πιστεύουμε ότι υπάρχουν περισσότερα από ένα είδη (ή καταστάσεις) φορτίου και γιατί πιστεύουμε ότι δεν υπάρχουν περισσότερα από δύο;» Μόνον ελάχιστα εγχειρίδια διαπραγματεύονται με σαφήνεια και ορθότητα τα ερωτήματα αυτά.

Λίγοι μαθητές θεωρούν επίσης (ασαφώς) ότι υπάρχει τελικά ένα είδος φορτίου. Αν τους «ανακρίνουμε», εκδηλώνουν την πεποίθηση ότι η άπωση μεταξύ δύο σωμάτων δείχνει ότι και τα δύο σώματα είναι φορτισμένα· θεωρούν, επίσης, ότι αν ένα από τα δύο σώματα έλξει κάποιο άλλο, το άλλο σώμα είναι αφόρτιστο. Πρόκειται, βέβαια, για πολύπλοκο ζήτημα, επειδή τα φορτισμένα σώματα έλκουν πάντοτε τα αφόρτιστα. (Ερμηνεύουμε αυτό το φαινόμενο επινοώντας την έννοια της «πόλωσης».) Οι περισσότεροι μαθητές δεν εκφράζουν ανοιχτά αυτήν την παρανόηση: η απομνημόνευση του «ρητού» ότι υπάρχουν δύο είδη φορτίου είναι τόσο αποδοτική, ώστε δεν τους προβληματίζει ιδιαίτερα. Ελάχιστοι, ωστόσο, μπορούν να περιγράψουν κάποια πειραματική διαδικασία που να αποδεικνύει ότι υπάρχουν τουλάχιστον δύο «καταστάσεις φορτίου» και όχι μία.

Αυτά τα στοιχειώδη ερωτήματα — σημαντικότερα από εννοιολογική άποψη — είναι δυνατόν να απαντηθούν, αν τεθούν με σαφήνεια, καθώς καθοδηγούμε τους μαθητές μέσω πειραμάτων, όπως εκείνα που περιγράψαμε στο εδάφιο 6.4. Η καθοδήγηση είναι αποτελεσματικότερη αν χρησιμοποιή-

σουμε σωκρατική μέθοδο ερωτήσεων προσαρμοσμένων κατάλληλα στην προπαιδεία και στο επίπεδο αντίληψης των συγκεκριμένων μαθητών. Αν οι μαθητές καταπιαστούν «χαλαρά» με την έρευνα των ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων, το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό με εξαίρεση ελάχιστα προικισμένα άτομα. Πρέπει να καθοδηγήσουμε τη μελέτη με μια ακολουθία ερωτήσεων ⁽⁵⁰⁾ που κατευθύνουν τους μαθητές να εκτελέσουν παρατηρήσεις σχετικά με το θέμα που ερευνούν, και να εξαγάγουν τα συμπεράσματά τους. Είναι, ωστόσο, απαραίτητο να επινοήσουμε με προσοχή τις ερωτήσεις, για να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιληφθούν βαθμιαία τα ζητήματα και όχι για να υπερτηθήσουν τα ενδιάμεσα βήματα, καταλήγοντας κατευθείαν στα τελικά συμπεράσματα.

Σε πρώτο στάδιο, κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιληφθούν ότι οι δύο λωρίδες που ξεκολλήσαμε από την ίδια επιφάνεια πάντοτε απωθούνται αμοιβαία μεταξύ τους. Πρέπει, επίσης, να αντιληφθούν ότι η διαπίστωση αυτή αφορά οποιαδήποτε όμοια σώματα: αν τα φορτίσουμε με ταυτόσημο τρόπο (τρίβοντάς τα με το ίδιο υλικό), πάντοτε απωθούνται αμοιβαία μεταξύ τους. Αυτό αποτελεί μια πρώτη τομή στον λειτουργικό ορισμό της «ομοιότητας» των φορτίων. [Η επέκταση ή ο επαναορισμός της έννοιας, με τη βοήθεια της παρατήρησης ότι «τα όμοια φορτία απωθούνται», ακολουθεί αργότερα, όταν αρχίζουμε να αντιλαμβανόμαστε πως υπάρχουν μόνο δύο είδη φορτίου.] Διαπιστώνουμε την ύπαρξη δύο διαφορετικών καταστάσεων φορτίου από τις επόμενες παρατηρήσεις: (1) οι λαστιχένιες ράβδοι τις οποίες έχουμε τριύψει με γούνα γάτας πάντοτε απωθούνται αμοιβαία· (2) οι γυάλινες ράβδοι τις οποίες έχουμε τριύψει με μεταξένιο ύφασμα πάντοτε απωθούνται αμοιβαία· (3) οι συγκεκριμένες λαστιχένιες ράβδοι έλκουν τις γυάλινες· (4) αν δεν φορτίσουμε τις ράβδους, δεν αλληλεπιδρούν.

Ένας τρόπος προσέγγισης αυτών των ζητημάτων, στο πλαίσιο πειραμάτων που εκτελούνται στο σπίτι, είναι μέσω του ηλεκτροσκοπίου με τις δύο λωρίδες, οι οποίες, αρχικά, ήταν κολλημένες μεταξύ τους, και κατόπιν τις ξεκολλήσαμε. Προηγουμένως, είχαμε ξεκολλήσει τις λωρίδες από κάποια λεία επιφάνεια. (Όπως επισημάναμε στο εδάφιο 6.4, διαπιστώνουμε ότι οι δύο λωρίδες απωθούνται αμοιβαία, ισχυρά.) Καθοδηγούμε, λοιπόν, τους μαθητές να προσεγγίσουν το θέμα μέσω της ακολουθίας των συλλογισμών που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, χρησιμοποιώντας ένα δεύτερο σύνολο λωρίδων κατασκευασμένο με παρόμοιο προς το πρώτο σύνολο τρόπο.

Κατά τη διερεύνηση των φαινομένων που παραθέτουμε στη συνέχεια, οι μαθητές μπορούν, πλέον, να πλησιάσουν σε κάθε λωρίδα άλλα φορτισμένα αντικείμενα και να ελέγξουν αν η αλληλεπίδραση είναι ελκτική ή απωστική. Ελάχιστοι διακρίνουν και αντιλαμβάνονται μόνοι τους το κοινό στοιχείο-«κλειδί» των παρατηρήσεών τους. Πρέπει να τους κατευθύνουμε να διαμορφώσουν την αντίληψη ότι αν ένα φορτισμένο αντικείμενο έλκει

ΕΛΚΟΥΝΤΑΙ

τη μια λωρίδα, απωθεί την άλλη, και αντιστρόφως. Κατόπιν, πρέπει να τους κατευθύνουμε να αντιληφθούν τη σημασία όσων *δεν* παρατηρούν, αλλά είναι δυνατό να φανταστούν: ένα σώμα που το τρώγαμε σε κάποιο υλικό ουδέποτε θα παρατηρήσουμε να απωθεί ή να έλκει και τις δύο λωρίδες του ηλεκτροσκοπίου, αν αυτές έλκονται αμοιβαία. Ωστόσο, σε τούτο το σημείο απαιτείται μεγάλη προσοχή: πρέπει να είμαστε βέβαιοι ότι το δοκιμαστικό σώμα είναι όντως φορτισμένο, επειδή κάθε μεγάλο αφόρτιστο σώμα έλκει και τις δύο λωρίδες. (Στη συνέχεια, υπάρχει εκτενέστερη μελέτη.)

Επειδή δεν έχουμε ανακαλύψει φορτισμένο σώμα που να απωθεί ή να έλκει και τις δύο λωρίδες που έλκονται αμοιβαία, υποθέτουμε, τελικά, ότι υπάρχουν μόνο δύο «καταστάσεις φορτίου». Είναι, όμως, αδύνατο να «αποδείξουμε» ότι υπάρχουν μόνο δύο, όπως ακριβώς είναι αδύνατο να «αποδείξουμε» το Νόμο Διατήρησης της Ενέργειας: δεχόμαστε την ισχύ του, επειδή, απλώς, ουδέποτε έχουμε παρατηρήσει ότι παραβιάζεται.

Περιοριζόμενοι, λοιπόν, σε δύο «καταστάσεις» ηλεκτρικού φορτίου, είναι δυνατό να επεκτείνουμε το νόημα του όρου «όμοιος», για να περιλάβουμε κάθε απωστική αλληλεπίδραση. Μπορούμε, παράλληλα, να επικαλεστούμε τους όρους «ανόμοιος» ή «αντίθετος», για να περιλάβουμε τις έλξεις (με εξαίρεση την περίπτωση που περιγράψαμε προηγουμένως). Είναι, λοιπόν, εύλογο να εισαγάγουμε με κάποιο συνήθη τρόπο τους όρους «θετικός» και «αρνητικός»³.

Καθώς οι μαθητές εκτελούν τις παρατηρήσεις τους, πρέπει να τους κατευθύνουμε να αντιληφθούν ποιοτικά την ένταση των δυνάμεων που παρατηρούν. Προσδιορίζουμε διαισθητικά την ισχύ της αλληλεπίδρασης από τη

3. Από λογική άποψη, είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι υπάρχει λεπτή διαφορά μεταξύ της αποδοχής πως υπάρχουν δύο διαφορετικές «καταστάσεις φορτίου» και της διακήρυξης πως υπάρχουν δύο «είδη» ηλεκτρικού φορτίου. Στο βαθμό που μελετάμε μακροσκοπικά αντικείμενα, μπορούμε να ερμηνεύσουμε τα φυσικά φαινόμενα ακολουθώντας έναν από τους δύο επόμενους τρόπους: (1) Είναι δυνατό (όπως ο Φραγκλίνος) να φανταστούμε ότι ένα μοναδικό, διατηρούμενο, αβαρές ρευστό μετατοπίζεται. Προκύπτει, έτσι, μια κατάσταση φορτίου όπου η ποσότητα του ρευστού υπερβαίνει τη συνηθισμένη και μια άλλη όπου υπάρχει έλλειμμα, ή (2) είναι δυνατό να φανταστούμε ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές ποικιλίες ή είδη φορτίου, όπως είμαστε συνηθισμένοι να θεωρούμε. Πρέπει να θυμόμαστε ότι είναι αδύνατο μακροσκοπικά να προκρίνουμε ένα από τα δύο παραπάνω ισοδύναμα πρότυπα. Η επιλογή του προτύπου των «δύο ειδών φορτίου» μάς επιβάλλεται μάλλον από *μικροσκοπικά* παρά από μακροσκοπικά φαινόμενα. Η έκταση που θα δώσει ο καθηγητής σ' αυτές τις λεπτομέρειες, σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων, εξαρτάται από τον ίδιο, αφού λάβει υπόψη του τους περιορισμούς του χρόνου και της διδακτέας ύλης. Δεν πρέπει, ωστόσο, να αποθαρρύνει τους μαθητές οι οποίοι, αρχικά, προσπαθούν να ακολουθήσουν το πρότυπο του «ενός ρευστού». Δεν κάνουν λάθος ακολουθούν, μάλιστα, την προτίμηση μιας εκλεκτής ομάδας διανοουμένων, αν λάβουμε υπόψη μας την ιστορία της εν λόγω ιδέας. Πρέπει, ωστόσο, να τους καθοδηγήσουμε να αντιληφθούν πώς, τελικά, δεχθήκαμε τη σύγχρονη εικόνα των «δύο ειδών» και όχι την εικόνα της «περίσσειας» και του «ελλείμματος».

δύναμη που ασκείται στο ένα από τα αλληλεπιδρώντα αντικείμενα (δηλαδή, από την απόκλιση της λωρίδας). Υπάρχει, βεβαίως (στο πλαίσιο του 3ου Νόμου του Νεύτωνα), ίση και αντίθετη δύναμη στο άλλο αντικείμενο· επειδή, ωστόσο, το αποτέλεσμά της είναι, συνήθως, μικρό δεν παρατηρούμε άμεσα επιτάχυνση ή απόκλιση. (Αν στην αιωρούμενη λωρίδα πλησιάσουμε μια άλλη, την οποία κρατάμε με το χέρι μας, τότε παρατηρούμε, όντως, ότι και οι δύο λωρίδες αποκλίνουν.) Αν μειώσουμε την απόσταση μεταξύ των αλληλεπιδρώντων αντικειμένων, η δύναμη αυξάνεται καταφανώς. Αν πλησιάσουμε στη φορτισμένη λωρίδα ξεχωριστά δύο φορτισμένα αντικείμενα, η δύναμη που ασκεί κάθε σώμα στη λωρίδα, από την ίδια απόσταση, είναι, συνήθως, απολύτως διαφορετική: ισχυρότερη δύναμη ασκεί το ένα σώμα και ασθενέστερη το άλλο. Οι μαθητές, λοιπόν, αρχίζουν να αντιλαμβάνονται έμμεσα ότι μπορούμε, τελικά, να μετρήσουμε την κατάσταση φορτίου ενός αντικειμένου μέσω της δύναμης που ασκείται σε κάποιο φορτισμένο σώμα «αναφοράς».

Στη σειρά πειραμάτων ηλεκτροστατικής με αντιθέτως φορτισμένες ταινίες Scotch, πρέπει να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιληφθούν μια λεπτομέρεια: κάθε σχετικά μεγάλο αντικείμενο που δεν το έχουμε τρίψει με άλλο (οπότε, καταρχάς, είναι αφόρτιστο) έλκει και τις δύο φορτισμένες λωρίδες. Λόγου χάρη, το χέρι μας έλκει και τις δύο λωρίδες, αν το πλησιάσουμε σ' αυτές. Οι μαθητές, λοιπόν, πρέπει να κατανοήσουν ότι αν και η απωστική αλληλεπίδραση αποτελεί σαφή ετυμγορία, η ελκτική πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Στη δεύτερη περίπτωση, πρέπει να ελέγξουμε αν πρόκειται, όντως, για αλληλεπίδραση μεταξύ ανόμοιων φορτίων ή για την έλξη που πάντοτε εμφανίζεται μεταξύ ενός φορτισμένου και ενός αφόρτιστου αντικειμένου.

Στα πειράματα που εκτελούνται στο σπίτι, είναι κατάλληλη ευκαιρία να δείξουμε ότι, αν ένα αντικείμενο αποκτήσει με την τριβή ένα είδος ηλεκτρικού φορτίου, το αντικείμενο πάνω στο οποίο το τρίψαμε αποκτά αντίθετο φορτίο. Συνήθως (όπως συμβαίνει με το μετάξι και τη γούνα που χρησιμοποιούμε παραδοσιακά στις επιδείξεις στην αίθουσα διδασκαλίας), επειδή το φορτίο διαρρέει πολύ γρήγορα από τα υλικά που τρίβουμε, είναι σχεδόν αδύνατο να δείξουμε ότι αυτά φορτίζονται. Αν, ωστόσο, βάλουμε το χέρι μας μέσα σε μια μικρή πλαστική σακούλα και φορτίσουμε κάποιο αντικείμενο τρίβοντάς το, η πλαστική σακούλα συγκρατεί περισσότερο χρόνο το φορτίο της απ' ό,τι το μετάξι και η γούνα. Αν ελέγξουμε το φορτίο της σακούλας με τη βοήθεια του ηλεκτροσκοπίου με τις λωρίδες, παρατηρούμε ότι η σακούλα φορτίζεται αντιθέτως από το αντικείμενο που τρίψαμε πάνω της. Είναι, όμως, απαραίτητο να βγάλουμε το χέρι μας από τη σακούλα· αλλιώς, η έλξη ενός μεγάλου αφόρτιστου αντικειμένου (του χεριού μας) υπερνικά την αλληλεπίδραση που προσπαθούμε να παρατηρήσουμε.

Στα προφανώς απλά πειράματα που εκτελούνται στο σπίτι, υπάρχουν

πολλές ευκαιρίες για προσεκτική και επιδέξια πειραματική εργασία και για οξυδερκείς παρατηρήσεις. Ο καθηγητής, ανακαλύπτοντας εξ υπαρχής τα διάφορα ζητήματα και επινοώντας τρόπους για να κατευθύνει μαθητές διαφόρων επιπέδων αντίληψης και προπαιδείας, μέσω μιας γόνιμης ακολουθίας συλλογισμών, έρχεται φανερά αντιμέτωπος με την τεράστια δυσκολία που αντιμετώπισαν οι ερευνητές του 18ου αιώνα στην προσπάθειά τους να ξεδιαλύνουν αυτά τα ζητήματα. Συνειδητοποιεί, επίσης, το λόγο για τον οποίο χρειάστηκε τόσο πολύς χρόνος, για να αντιληφθούν σαφώς ότι υπάρχουν δύο διαχωρίσιμες καταστάσεις φορτίου και όχι μόνο μία.

6.6 Θετικό και αρνητικό φορτίο – Βόρειος και νότιος μαγνητικός πόλος

Πολλοί μαθητές ταλαιπωρούνται με την παρανόηση ότι οι όροι «θετικό» και «αρνητικό» ηλεκτρικό φορτίο είναι, κατά κάποιο τρόπο, απαραίτητοι ή αναπόφευκτοι και ότι αναφέρονται άμεσα σε κάποια ποσότητα που βρίσκεται σε περίσσεια ή σε έλλειψη. Αν ο καθηγητής το επιθυμεί, είναι σημαντικό να εξηγήσει πώς άρχισαν ιστορικά να χρησιμοποιούνται οι όροι, μέσω του εύλογου προτύπου του Φραγκλίνου (το οποίο, ωστόσο, από τη σύγχρονη άποψη είναι λανθασμένο). [Λεπτομέρειες υπάρχουν στο άρθρο του Cohen (1941) και των Roller και Roller (1957).] Σε κάθε περίπτωση, ωστόσο, είναι απαραίτητο να αποσαφηνίσουμε στους μαθητές ότι η ονομασία είναι απολύτως αυθαίρετη: είναι δυνατό να επιλέξουμε εξίσου τα ονόματα «κόκκινο και μπλε», «Γιώργος και Δημήτρης», «γοητευτικό και αποκρουστικό» (παρωδώντας, έτσι, τους διαφορούμενους όρους που έχουν επιλέξει τα τελευταία χρόνια οι φυσικοί των υψηλών ενεργειών.) Η λαστιχένια ράβδος την οποία τρώγαμε πάνω σε γούνα γάτας μπορεί να αποτελέσει το πρωταρχικό, κλασικό αρνητικά φορτισμένο σώμα αναφοράς, στην επίδειξη που εκτελείται στην αίθουσα διδασκαλίας: είναι, επίσης, δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τη «βαθμονόμηση» του ηλεκτροσκοπίου με την ταινία Scotch, που χρησιμοποιούν οι μαθητές στο σπίτι.

Από τη στιγμή που εισάγουμε τους όρους «θετικός-αρνητικός», αξίζει τον κόπο να κάνουμε μια παρέκβαση και να μελετήσουμε τη συμπεριφορά συνηθισμένων μαγνητών. Σε νεαρή ηλικία, ορισμένοι μαθητές παίζουν με μαγνήτες: είναι, ωστόσο, εκπληκτικός ο αριθμός εκείνων που δεν έχουν αυτού του είδους την εμπειρία. Επίσης, ακόμα κι όσοι παίζουν με μαγνήτες, σπάνια εκτελούν συστηματικές και σκόπιμες παρατηρήσεις: τις περισσότερες φορές εκτελούν τυχαίους χειρισμούς: ουδέποτε τους κατατάσσουν ή τους οργανώνουν από εννοιολογική άποψη. Λόγου χάρη, πολλοί μαθητές, παίζοντας με μαγνήτες, σηκώνουν απλώς με τη βοήθειά τους πινέξες, πρόκες ή συνδετήρες και ουδέποτε διερευνούν την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο μαγνητών. Εκπληκτίζονται, λοιπόν, όταν για πρώτη φορά παρατηρούν άπω-

ση. Ορισμένοι μαθητές έχουν, όντως, παρατηρήσει την επίδειξη παρόμοιων φαινομένων⁴ η συγκεκριμένη εμπειρία τους, όμως, υπήρξε απολύτως έμμεση: ουδέποτε προκάλεσαν μόνοι τους τις αλληλεπιδράσεις, ούτε αισθάνθηκαν με τους δικούς τους μυς τις δυνάμεις. Είναι σημαντικό, λοιπόν, οι εν λόγω μαθητές να αισθανθούν την έλξη μεταξύ δύο μαγνητών, όταν, έχοντάς τους διευθετήσει καταλλήλως, έλκονται αμοιβαία. Είναι σημαντικό, επίσης, να αισθανθούν την άπωση, ωθώντας τον έναν προς τον άλλο.

Στο παρόν στάδιο, μπορούμε να κατευθύνουμε τους μαθητές να εκτελέσουν συστηματικά πειράματα στο σπίτι, αφού προηγουμένως παρουσιάσουμε λίγες επιδείξεις στην αίθουσα διδασκαλίας και τους εφοδιάσουμε με ένα «σωκρατικό» ερωτηματολόγιο. Είναι δυνατό να τους ενθαρρύνουμε να αγοράσουν τους δικούς τους μαγνήτες για τα πειράματα που θα εκτελέσουν ή να πάρουν από την τάξη τα απαραίτητα υλικά.

Ο όρος «μαγνητικός πόλος» αναπτύσσεται με λειτουργικό τρόπο, παρατηρώντας τη διαφορά μεταξύ της δράσης των άκρων και του μέσου ενός ραβδόμορφου μαγνήτη. Πρέπει να αποσαφηνίσουμε, κατά προτίμηση με άμεση επίδειξη, ότι είναι αδύνατο να διαχωρίσουμε τους μαγνητικούς πόλους μεταξύ τους σπάζοντας το μαγνήτη και ότι κάθε απλός μαγνήτης, μεγάλος ή μικρός, είναι πάντοτε διπολικός. Τίθεται, λοιπόν, το ερώτημα: οι όροι «όμοιος» και «ανόμοιος» ισχύουν στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπως συμβαίνει με το ηλεκτρικό φορτίο; Για την ανάπτυξη του λειτουργικού ορισμού, το καταλληλότερο σώμα αναφοράς είναι εκείνο το οποίο χρησιμοποιήθηκε ιστορικά, η Γη.

Πολλοί μαθητές γνωρίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνήτη και της μαγνητικής πυξίδας⁵: είναι ωστόσο προτιμότερο, αρχικά, να μην αναφερθούμε στην πυξίδα, επειδή είναι επίσης συνηθισμένος μαγνήτης. Πολλοί μαθητές δεν αντιλαμβάνονται το γεγονός αυτό: άλλοι δεν κατανοούν ότι στο πλαίσιο της ορολογίας του μαγνητισμού, το πρωταρχικό σώμα αναφοράς είναι η Γη και όχι η πυξίδα⁴.

Πρέπει αρχικά να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να προσδιορίσουν τη διεύθυνση βορρά-νότου σε κάθε τόπο. Κατόπιν, κρεμάμε δύο ραβδόμορφους μαγνήτες με τη βοήθεια νημάτων (αφού πρώτα οι μαθητές ελέγξουν ότι πρόκειται όντως για δύο μαγνήτες και όχι ότι ένας από τους δύο είναι μη μαγνητισμένο σώμα) και τους ισορροπούμε κατάλληλα οριζοντίως. Οι

4. Οι καθηγητές πρέπει να έχουν συνεχώς κατά νουν ότι πολλοί μαθητές δεν γνωρίζουν πώς ορίζεται η «βόρεια» και η «νότια» κατεύθυνση στην επιφάνεια της Γης (βλ. εδάφιο 1.14). Πολλοί μαθητές ταλαιπωρούνται, επίσης, από την παρανόηση ότι ορίζουμε με την πυξίδα τις εν λόγω κατευθύνσεις. Πρέπει, λοιπόν, να αποσαφηνίσουμε ότι οι κατευθύνσεις ορίζονται με τη βοήθεια *αστρονομικών παρατηρήσεων*. Η πυξίδα είναι απλώς βολικό (δευτερεύον) όργανο, επειδή έχουμε ανακαλύψει ότι η βελόνα της στρέφεται προσεγγιστικά προς βορρά και νότο⁵: η διεύθυνση, αυτή, ωστόσο, προσδιορίζεται με αστρονομικές παρατηρήσεις.

μαθητές παρατηρούν άμεσα ότι κάθε μαγνήτης ισορροπεί με κατεύθυνση βορράς-νότος. Σημειώνουν, λοιπόν, τον πόλο που «αναζητεί» το βορρά και ελέγχουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ όλων των συνδυασμών των μαγνητικών πόλων. Από τις παρατηρήσεις αυτές οδηγούνται στη διατύπωση του λειτουργικού ορισμού της έννοιας «όμοιος» και «ανόμοιος» πόλος και αντιλαμβάνονται ότι οι όμοιοι πόλοι πάντοτε απωθούνται αμοιβαία, ενώ οι ανόμοιοι έλκονται. Αντιλαμβάνονται, επίσης, την προέλευση των όρων «βόρειος» και «νότιος» που αποδίδουμε στα αντίστοιχα άκρα του μαγνήτη, από τον τρόπο που κάθε άκρο «αναζητεί» τον αντίθετο πόλο της Γης.

Ακολουθώντας την προηγούμενη σειρά συλλογισμών, οι περισσότεροι μαθητές συμπεραίνουν ότι η πυξίδα είναι απλώς μια περιστρεφόμενη μαγνητισμένη βελόνα και η Γη ένας τεράστιος μαγνήτης. Οι περισσότεροι καθηγητές γνωρίζουν τη σύγχυση των μαθητών σχετικά με την ορολογία που αφορά τους πόλους της Γης. Η σύγχυση οφείλεται κυρίως στο ότι οι μαθητές ουδέποτε έχουν την ευκαιρία να εκτελέσουν τις παρατηρήσεις και τους συλλογισμούς που προαναφέραμε και να επινοήσουν τις κατάλληλες ονομασίες. Περιορίζονται σε παθητική ανάγνωση ή ακρόαση και προσπαθούν, απλώς, να απομνημονεύσουν την ορολογία, χωρίς να αποκτήσουν την εμπειρία στην οποία στηρίζεται. Εκτελώντας οι ίδιοι τα πειράματα, παρατηρούν τον τρόπο με τον οποίο προκύπτει η αντίστοιχη ορολογία· αντιλαμβάνονται επίσης ότι ο βόρειος πόλος της Γης είναι νότιος μαγνητικός πόλος, αν θεωρήσουμε τη Γη ως μαγνήτη.

Στο παιχνίδι με τους μαγνήτες μάς δίνεται η ευκαιρία να συμπληρώσουμε τον κατάλογο των λειτουργικών διαφορών μεταξύ της ηλεκτροστατικής, της μαγνητικής και της βαρυτικής δύναμης. Πρέπει να κατευθύνουμε τους μαθητές να ελέγξουν την επίδραση των μαγνητών στα ηλεκτροσκόπια της ταινίας Scotch. Έτσι, βεβαιώνονται ότι δεν υπάρχει άλλη αλληλεπίδραση, εκτός από εκείνη που παρατήρησαν προηγουμένως, η οποία εμφανίζεται με κάθε μεγάλο σώμα. Με αυτόν τον τρόπο προετοιμάζουμε το έδαφος για να εξαλειφθούν ορισμένες παρανοήσεις: λόγου χάρη, το ότι υπάρχει άπωση μεταξύ ενός βόρειου μαγνητικού πόλου και ενός θετικού ηλεκτρικού φορτίου κτλ.

Οι μαθητές πρέπει να συντάξουν, με την καθοδήγησή μας, λεπτομερή κατάλογο των ομοιοτήτων και των διαφορών των επιδράσεων· λόγου χάρη, αν και υπάρχουν δύο είδη μαγνητικών πόλων και δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου, στη βαρύτητα δεν εμφανίζεται διπολικότητα· αν και τα δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου μπορούν να υπάρξουν ξεχωριστά το ένα από το άλλο, αυτό δεν συμβαίνει με τους μαγνητικούς πόλους· ο μαγνητισμός (όπως είναι δυνατό να ελέγξουμε με κοινούς μαγνήτες) εγκλωβίζεται σε ορισμένα μέταλλα και δεν σχετίζεται με την τριβή, όπως συμβαίνει με το ηλεκτρικό φορτίο· ο μαγνητισμός δεν διαρρέει από τον μαγνητισμένο σίδηρο, όταν τον πιάνουμε (το φορτίο, ωστόσο, διαρρέει αμέσως μόλις αγγίξουμε ένα

μονωμένο φορτισμένο αγωγό)· η βαρυτική αλληλεπίδραση είναι πάντοτε παρούσα σε κάθε υλικό και δεν σχετίζεται με την τριβή και το μαγνητισμό κτλ. Ακόμα και οι καλά πληροφορημένοι μαθητές ουδέποτε σκέφτηκαν να συντάξουν τον κατάλογο αυτό· όταν, λοιπόν, εμφανιστούν συγκεκριμένα ερωτήματα για τις λειτουργικές διαφορές μεταξύ των αλληλεπιδράσεων, δυσκολεύονται να δώσουν παραδείγματα και να προσδιορίσουν τις διαφορές αυτές.

6.7 Πόλωση

Στο παρόν στάδιο, βοηθά να επιστήσουμε την προσοχή των μαθητών στο ότι η αποκτηθείσα εμπειρία από τα φαινόμενα του ηλεκτρισμού μάς παρακινεί να αναγνωρίσουμε τον θεμελιώδη ρόλο του ηλεκτρικού φορτίου στη δομή της ύλης. Και τούτο, παρά το γεγονός ότι έως αυτό το σημείο τα πειράματα δεν αναδεικνύουν σαφώς αυτόν το ρόλο: (1) αν αποδεχθούμε την άποψη ότι η ύλη έχει ασυνεχή δομή (περιέχει δηλαδή άτομα και μόρια) και όχι συνεχή, η παρουσία και των δύο ειδών φορτίου σε κάθε υλικό υποδηλώνει ότι, ίσως, η έλξη μεταξύ του θετικού και του αρνητικού φορτίου συγκρατεί τις διακριτές οντότητες μεταξύ τους· (2) οι σπινθήρες που εμφανίζονται στον αέρα (κατά την εκφόρτιση των σωμάτων) υποδηλώνουν ότι καταστρέφεται, κατά κάποιον τρόπο, η δομή της ύλης, η οποία είναι, συνήθως, ουδέτερη και περιέχει και τα δύο είδη φορτίου· από την καταστροφή της δομής προκύπτει αγωγιμότητα, η οποία αρχικώς απουσίαζε· (3) η αγωγιμότητα καθώς και η ηλεκτροση με τριβή και με επαγωγή καταδεικνύουν την ύπαρξη δύο διαφορετικών βαθμών ευκινησίας του ηλεκτρικού φορτίου μέσα στα υλικά.

Αφού παρουσιάσουμε στους μαθητές τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παρατηρήσεις, είναι χρήσιμο να επανέλθουμε στην παρατήρηση ότι πάντοτε υπάρχει έλξη μεταξύ φορτισμένων και αφόρτιστων σωμάτων. Θέτουμε, λοιπόν, το ερώτημα: Στηριζόμενοι στη γνώση μας για την πανταχού παρουσία και την κινητικότητα του ηλεκτρικού φορτίου, είναι δυνατό να περιγράψουμε με εύλογο τρόπο πώς εκδηλώνεται η αλληλεπίδραση αυτή;

Η λογική ερμηνεία του φαινομένου προκύπτει, βεβαίως, αν αντιληφθούμε πως όταν το ουδέτερο σώμα πλησιάσει το φορτισμένο, το φορτίο μέσα του μετατοπίζεται. Αποτέλεσμα: το αντίθετο φορτίο μέσα στο ουδέτερο σώμα βρίσκεται πλησιέστερα στο φορτισμένο σώμα απ' ό,τι το όμοιο φορτίο, οπότε η έλξη μεταξύ των δύο σωμάτων υπερνικά την άπωση. Στην περιγραφή χρησιμοποιούμε σχεδόν όλα όσα μάθαμε μέχρι τώρα για τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα. Τη μετατόπιση του φορτίου, η οποία επάγεται στο ουδέτερο σώμα, την ονομάζουμε «πόλωση».

Συνοψίζουμε τις γνωστές ιδέες στο παρόν εδάφιο, όχι επειδή είναι ασαφείς ή δυσνόητες, αλλά επειδή ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται στα περισσότερα εγχειρίδια είναι ατυχής. Συνήθης προσέγγιση είναι η εξής: ισχυριζόμαστε ότι η αιτία έλξης μεταξύ των φορτισμένων και των αφόρτιστων σωμάτων είναι το φαινόμενο της πόλωσης. Τις περισσότερες φορές, μάλιστα, αυτή η άποψη διατυπώνεται χωρίς προηγουμένως να επαναλάβουμε και να συνοψίσουμε την απαραίτητη γνώση, όπως κάναμε στην πρώτη παράγραφο του παρόντος εδαφίου. Στο παρόν στάδιο, ωστόσο, λίγοι μαθητές είναι προετοιμασμένοι να ανακαλύψουν μόνοι τους τη λογική ακολουθία. Δέχονται, λοιπόν, κατά γράμμα τους ισχυρισμούς που περιέχουν τη λέξη «επειδή»: όταν οι επιστήμονες αναφέρουν «αυτό συμβαίνει επειδή συμβαίνει εκείνο», πολλοί μαθητές θεωρούν ότι πρόκειται για απάντηση στο «γιατί συμβαίνει το φαινόμενο». Οι μαθητές θεωρούν ότι ο επιστήμονας γνωρίζει το αίτιο αν και αυτοί δεν μπορούν να αντιληφθούν. Αποστηθίζουν, λοιπόν, υπάκουα την «εξ αποκαλύψεως» αλήθεια, χωρίς να κατανοούν την προέλευσή της.

Σε διάφορες περιπτώσεις, έχω χαρακτηρίσει την παρουσίαση που προανέφερα ως «οπισθοδρομική επιστήμη»: προσπερνά την ευκαιρία να δώσει τους μαθητές ρεαλιστικότερη εικόνα της λειτουργίας της επιστήμης και συσκοτίζει το λογικό περιεχόμενο και τα κίνητρα μιας θεωρίας.

Κατάλληλο σημείο εκκίνησης δεν είναι η θεωρία, αλλά το παρατηρούμενο γεγονός, η ελκτική αλληλεπίδραση μεταξύ των φορτισμένων και των αφόρτιστων σωμάτων. Αναζητούμε την ερμηνεία της αλληλεπίδρασης στο πλαίσιο όσων γνωρίζουμε. Επιπλέον, *επινοούμε* σκόπιμα εκ των υστέρων και όχι εκ των προτέρων την έννοια της πόλωσης, για να περιγράψουμε με εύλογο τρόπο το φαινόμενο. Πρόκειται, δηλαδή, για «προώθηση» και όχι για «οπισθοδρομηση».

Η μελέτη εμπλουτίζεται αν κατευθύνουμε τους μαθητές να διερευνήσουν το ανάλογο φαινόμενο στην περίπτωση μόνιμων μαγνητών: ο μαγνήτης σηκώνει μια σειρά από καρφίτσες ή συνδετήρες· γενικότερα, υπάρχει ελκτική αλληλεπίδραση μεταξύ του μαγνήτη και κάθε αμαγνήτιστου κομματιού σιδήρου. Η σειρά των συλλογισμών είναι κατ' ουσίαν παρόμοια μ' εκείνη στην ηλεκτρική πόλωση: είναι, ωστόσο, απαραίτητο να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιληφθούν τόσο τις διαφορές όσο και τις ομοιότητες μεταξύ των παρατηρούμενων φαινομένων.

Αν δεν βοηθήσουμε άμεσα τους μαθητές, πολλοί δυσκολεύονται να αντιληφθούν και να κατανοήσουν τη διαδικασία που οδηγεί στην ηλεκτρική πόλωση. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η βοήθειά μας, για να αντιληφθούν τις διαδικασίες που συμβαίνουν τόσο στους αγωγούς όσο και στους μονωτές. Επειδή γνωρίζουμε ότι στους μονωτές το φορτίο παραμένει ακίνητο, θεωρούμε ότι σ' αυτούς επάγονται ηλεκτρικά δίπολα. (Πολλά εγχειρίδια παρουσιάζουν αυτή την ιδέα, συνήθως, όμως, συγκεχυμένα. Οι μαθητές, λοι-

πόν, σαστίζουν και έχουν την τάση να αποστηθίζουν το αντίστοιχο ζήτημα παρά να το κατανοούν.) Έπειδή πιστεύουμε ότι το φορτίο είναι ευκίνητο μέσα στους αγωγούς, θεωρούμε ότι σ' αυτούς η πόλωση είναι αποτέλεσμα πραγματικής μετατόπισης ή διαχωρισμού του φορτίου.

Στην τελευταία περίπτωση, είναι σημαντικό να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιληφθούν ότι το πρότυπο εφαρμόζεται στην έλξη ενός φορτισμένου σώματος, ανεξάρτητα από το αν φανταζόμαστε ότι κινείται το θετικό ή το αρνητικό φορτίο ή και τα δύο ταυτόχρονα. Πολλοί μαθητές μπερδεύονται μ' αυτή την απροσδιοριστία και διστάζουν πολύ να την αποδεχτούν. Αναμένουν ότι θα λάβουν σαφή «οριστική απάντηση»: έτσι, δυσκολεύονται να πιστέψουν ότι από τα πειράματα και από τις απαντήσεις είναι αδύνατο να προκύψει μονοσήμαντη απάντηση. (Αυτή η περίπτωση μοιάζει μ' εκείνη όπου οι μαθητές, αρχίζοντας να εκτελούν αστρονομικές παρατηρήσεις με γυμνό μάτι και να παρατηρούν τη συμπεριφορά του Ηλίου, της Σελήνης και των άστρων, αναμένουν ότι θα «δουν» τη Γη και τους πλανήτες να στρέφονται γύρω από τον Ήλιο και τη Γη γύρω από τον άξονά της. Αναστατώνονται, λοιπόν, όταν διαπιστώνουν ότι τόσο το ηλιοκεντρικό σύστημα όσο και το γεωκεντρικό ερμηνεύουν εξίσου τις παρατηρήσεις και ότι, στο συγκεκριμένο επίπεδο, είναι αδύνατο να προκρίνουν το ένα από τα δύο.)

Η περίπτωση του ηλεκτρισμού περιπλέκεται ακόμα περισσότερο από μια παρανόηση: πολλοί μαθητές έχουν ακούσει για την ύπαρξη των «ηλεκτρονίων» (χωρίς, ωστόσο, να καταλαβαίνουν την προέλευση και το νόημα του όρου), και ερμηνεύουν με τη βοήθεια της κίνησής τους ουσιαστικά κάθε ηλεκτρικό φαινόμενο, ανεξαρτήτως του αν, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ιδέα αυτή εφαρμόζεται ή όχι. Πρέπει, λοιπόν, να αντιληφθούν ότι είναι αδύνατο, μέσω πειραμάτων και παρατηρήσεων, να ξεδιαλύνουν ποιο είδος φορτίου μετακινείται μέσα στους αγωγούς. Πρέπει, επίσης, να αντιληφθούν ότι, κάθε φορά, οποιοδήποτε από τα τρία πρότυπα εφαρμόζεται εξίσου. Εξάλλου, πολλοί μαθητές ταιλαιπωρούνται από την έμμονη λανθασμένη ιδέα ότι η αγωγιμότητα είναι πάντοτε αποτέλεσμα της κίνησης των ηλεκτρονίων. Πρέπει, λοιπόν, να τους πληροφορήσουμε ότι επειδή στα ιονισμένα αέρια και στους ηλεκτρολύτες υπάρχουν αρνητικά ιόντα (τα οποία δεν είναι ηλεκτρόνια) και θετικά ιόντα, στα εν λόγω συστήματα η αγωγιμότητα είναι αποτέλεσμα της «μετανάστευσης» και των δύο ειδών ιόντος.

6.8 Φόρτιση με επαγωγή

Στα εισαγωγικά μαθήματα φυσικής, πολλοί μαθητές αντιμετωπίζουν δυσκολίες με το φαινόμενο της φόρτισης με επαγωγή: θεωρούν ότι η διαδικασία είναι μυστηριώδης και δυσκολεύονται να την αντιληφθούν σωστά, ώστε να διατυπώσουν ακριβείς προβλέψεις. Οι περισσότερες δυσκολίες

οφείλονται στην ανεπαρκή αφομοίωση της έννοιας της πόλωσης, που μελετήσαμε στο προηγούμενο εδάφιο. Αν αναπτύξουμε με σαφήνεια την ιδέα της πόλωσης και παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο οδηγούμαστε σ' αυτή, το μεγαλύτερο μέρος της δυσκολίας της φόρτισης με επαγωγή εξαλείφεται (με την προϋπόθεση ότι θα αποσαφηνίσουμε πως *ολόκληρο* το σύστημα, δηλαδή και τα δύο σώματα που βρίσκονται σε επαφή, πολώνεται, λόγω της παρουσίας του φορτισμένου αντικειμένου που προκαλεί την επαγωγή).

Στη λύση των ασκήσεων φόρτισης με επαγωγή, οι μαθητές είναι απαραίτητο να ερμηνεύουν το φαινόμενο, θεωρώντας ότι κινείται οποιοδήποτε είδος φορτίου ή ακόμα ότι κινούνται και τα δύο. Οι μαθητές εξασκούνται, αν αναφέρεται σαφώς στις ασκήσεις ότι μπορούν να διαλέξουν τυχαία οποιοδήποτε πρότυπο.

Για να αναλύσουν καταστάσεις φόρτισης με επαγωγή, οι μαθητές είναι απαραίτητο να σχεδιάσουν εικόνες κατανομής του φορτίου σε κάθε στάδιο της διαδικασίας. Πρέπει, επίσης, να περιγράψουν με δικά τους λόγια τι συμβαίνει κάθε φορά. Μόνο αν απαιτούμε να περιγράψουν κάθε στάδιο, κατανοούν αποτελεσματικότερα το θέμα.

6.9 Ο νόμος του Coulomb και η μέτρηση του ηλεκτρικού φορτίου

Το φορτίο είναι αβαρής ουσία και έως αυτό το σημείο της ανάπτυξης το θεωρήσαμε, απλώς, ορισμένη κατάσταση στην οποία, όταν βρίσκονται τα σώματα, έλκονται ή απωθούνται αμοιβαία. Είναι, λοιπόν, ελάχιστα προφανές στους μαθητές ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι, όντως, μετρήσιμη «ποσότητα». Οι ερευνητές του 18ου αιώνα (πριν από τον Coulomb) δεν διέθεταν τρόπο μέτρησης του φορτίου, αν και αντιλαμβάνονταν ποιοτικά ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, το φορτίο ήταν περισσότερο ή λιγότερο, λόγω της σφοδρότητας των επιδράσεων που προκαλούσε, λόγου χάρη από το μέγεθος των σπινθήρων και των τιναγμάτων. Συνέκριναν, απλώς, τις καταστάσεις φορτίου μεταξύ τους από τον αριθμό των περιστροφών της ηλεκτροστατικής γεννήτριας, με την προϋπόθεση ότι η γεννήτρια ήταν σε επαφή με φιάλη του Leyden ή με άλλο σώμα, το οποίο προσελάμβανε το φορτίο.

Πρώτος ο Coulomb απέδειξε πειστικά ότι είναι δυνατό να ποσοτικοποιήσουμε το φορτίο, μέσω της μέτρησης της δύναμης αλληλεπίδρασης. Στο διάσημο πείραμά του με το ζυγό στρέψης, όπου απέδειξε το νόμο του αντιστρόφου του τετραγώνου, διερεύνησε, επίσης, την αλληλεπίδραση μεταξύ φορτισμένων αγωγικών σφαιρών που απέχουν σταθερή απόσταση μεταξύ τους. Για να το επιτύχει αυτό, μετέβαλε με συστηματικό τρόπο την κατάσταση του φορτίου: αφού δημιουργήσε την κατάσταση όπου οι δύο φορτισμένες σφαίρες του ζυγού στρέψης, λόγου χάρη, απωθούνταν αμοιβαία, έφερε σε επαφή με τη μια σφαίρα μια άλλη αφόρτιστη παρόμοια σφαίρα. Παρα-

τήρησε, λοιπόν, ότι η δύναμη μεταξύ των δύο φορτισμένων σφαιρών υποδιπλασιάστηκε. Κατόπιν, φέροντας σε επαφή μια νέα αφόρτιστη σφαίρα με τη δεύτερη σφαίρα, παρατήρησε ότι αυτή τη φορά η δύναμη της αλληλεπίδρασης υποτετραπλασιάστηκε.

Αν επικαλεστούμε τη συμμετρία (δηλαδή, ότι, αν το φορτίο είναι όντως μέγεθος μετρήσιμο με συστηματικό τρόπο, τότε δύο ταυτόσημες σφαίρες μοιράζονται εξίσου το φορτίο), υποθέτουμε ότι, στην προηγούμενη διαδικασία, η ποσότητα του φορτίου πάνω σε κάθε αλληλεπιδρώσα σφαίρα υποδιπλασιάζεται διαδοχικά. Επειδή, λοιπόν, σε κάθε στάδιο της διαδικασίας η δύναμη της αλληλεπίδρασης επίσης υποδιπλασιάζεται, είναι εύλογο να συμπεράνουμε ότι η παρατηρούμενη δύναμη είναι ευθέως ανάλογη του γινομένου των δύο αλληλεπιδρωσών ποσοτήτων φορτίου. Αποδεικνύεται, λοιπόν, ότι είναι, όντως, δυνατό να μετρήσουμε το φορτίο, όχι μέσω ποιοτικών παρατηρήσεων (λόγου χάρι, μέσω της έντασης των σπινθήρων, των τιναγμάτων ή του αριθμού των περιστροφών της ηλεκτροστατικής μηχανής), αλλά μέσω μιας κλίμακας που ήδη έχουμε επινοήσει, δηλαδή της κλίμακας της δύναμης. Από τα πειράματα *οδηγούμαστε* κατευθείαν στη συνήθη διατύπωση του Νόμου του Coulomb: η δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο σημειακών φορτίων είναι ευθέως ανάλογη του γινομένου των δύο ποσοτήτων φορτίου (και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης). Στο πλαίσιο του παλαιού συστήματος μονάδων c.g.s., αν η δύναμη μεταξύ των σφαιρών που αλληλεπιδρούν ήταν μια dyn και η διάκεντρος ένα cm, θεωρούσαμε ότι κάθε σφαίρα μεταφέρει μια μονάδα φορτίου.

Στην ηλεκτροστατική — πριν από τη σύνδεση του ηλεκτρικού ρεύματος με τα χημικά αποτελέσματά του —, η παρατήρηση ότι το ηλεκτρικό φορτίο είναι μετρήσιμο μέγεθος προκύπτει από τον υποδιπλασιασμό της δύναμης στα πειράματα του Coulomb. Το φιλμ «Ο νόμος του Coulomb» του PSSC (το οποίο δημιούργησε ο Eric Roger) παρουσιάζει σε μεγάλη κλίμακα μια άριστη επίδειξη των φαινομένων όπου η δύναμη μεταξύ φορτισμένων σφαιρών μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης: όταν η απόσταση παραμένει σταθερή, η δύναμη υποδιπλασιάζεται, κάθε φορά που μια από τις σφαίρες έρχεται σε επαφή με μια άλλη ταυτόσημη αφόρτιστη σφαίρα.

Μπορούμε να παρουσιάσουμε με ποσοτικό και αποτελεσματικό τρόπο αυτά τα φαινόμενα, εκτελώντας το πείραμα του νόμου του Coulomb πάνω στην πλάκα του περισκοπικού προβολέα. (Η θερμότητα του προβολέα βοηθά να διατηρείται ξηρός ο αέρας και ελαχιστοποιεί τη διαρροή του φορτίου κατά τη διάρκεια της επίδειξης.) Ως κλίμακα χρησιμοποιούμε ένα διαφανές τετραγωνισμένο χαρτί. Το σύστημα αποτελείται από μια μπαλίτσα ψίχας προσαρμοσμένη στο άκρο μιας αιωρούμενης ράβδου. Η ράβδος είναι δυνατό να ταλαντώνεται γύρω από τη θέση ισορροπίας της: το πλάτος της ταλάντωσης αποτελεί τρόπο μέτρησης της δύναμης που ασκείται στην ψίχα.

Μια δεύτερη ψίχα είναι προσαρμοσμένη στην άκρη μιας κοντής μονωτικής ράβδου. Η ράβδος βρίσκεται τοποθετημένη σε ένα μικρό στήριγμα από διαφανές υλικό, το οποίο μπορούμε να μετακινούμε πάνω στην πλάκα του προβολέα. Μετακινώντας το στήριγμα, μεταβάλλουμε την απόσταση μεταξύ της ψίχας που βρίσκεται πάνω του και της αιωρούμενης. Τοποθετούμε τις δύο σφαίρες κοντά στην πλάκα του προβολέα, ώστε να εμφανίζεται καθαρά στην οθόνη τόσο η εικόνα των σφαιρών όσο και του βαθμολογημένου χαρτιού. Έως τη στιγμή που η απόσταση μεταξύ των σφαιρών είναι τόσο μικρή, ώστε, μέσω επαγωγής, αλλοιώνεται η κατανομή του φορτίου, μπορούμε να παρατηρήσουμε θαυμάσια στην οθόνη το φαινόμενο του αντιστροφού του τετραγώνου. Είναι, επίσης, δυνατό να παρατηρήσουμε τον υποδιπλασιασμό της δύναμης, φέρνοντας σε επαφή τη μια σφαίρα με μια άλλη ταυτόσημη, αλλά αφόρτιστη.

Παρουσιάζοντας αυτή τη διαδικασία στους μαθητές, είναι σημαντικό να δώσουμε έμφαση στο ότι ο νόμος του Coulomb δεν προκύπτει «μαθηματικά» ούτε αποδεικνύεται «φυσικά». Η θεμελίωση του νόμου στη βάση του περιορισμένου αριθμού παρατηρήσεων που περιγράψαμε, προκύπτει με επαγωγικό συλλογισμό και όχι με αναγωγικό. Αποδεχόμαστε το νόμο και πιστεύουμε στην ισχύ του, επειδή έχει ελεγχθεί σε πλήθος καταστάσεις και εφαρμογές και έχει αποδειχθεί ότι «δουλεύει»: ουδέποτε αποδείχθηκε ότι ο νόμος δεν ισχύει. Επίσης, η μέτρηση του φορτίου μέσω του νόμου του Coulomb αποδεικνύεται συνεπής με τη μέτρησή του μέσω του ορισμού του ηλεκτρικού ρεύματος και μέσω της παρατήρησης των χημικών αποτελεσμάτων του (κατά την απόθεση ύλης στην ηλεκτρόλυση). Στο πλαίσιο αυτό, είναι ευκαιρία να δείξουμε στους μαθητές γιατί, λόγω χάρη, προσεκτικοί ερευνητές κοπίασαν και προσπάθησαν τόσο πολύ για να ελέγξουν την ακρίβεια της σχέσης του αντιστροφού του τετραγώνου. Οι Williams, Faller και Hills (εργαζόμενοι το 1971 στο Πανεπιστήμιο Wesleyan) απέδειξαν ότι, αν ο εκθέτης αποκλίνει από την τιμή 2, αποκλίνει κατά μια ποσότητα μικρότερη από 2×10^{-16} .

Τέλος, μας δίνεται η ευκαιρία να υπενθυμίσουμε στους μαθητές το εξής: όπως ακριβώς ο νόμος του Coulomb αποτελεί, απλώς, ανθρώπινη σύλληψη που ούτε προκύπτει από προηγούμενες γνώσεις ούτε αποδεικνύεται η ορθότητά της, το ίδιο συμβαίνει με τους νόμους του Νεύτωνα για την κίνηση, με το νόμο της βαρύτητας και με τους νόμους διατήρησης. Όταν για πρώτη φορά παρακολουθούμε αυτή την ανάπτυξη, είναι πολύ εύκολο να μας διαφύγει αυτό το λεπτό νοηματικό περιεχόμενο. Είναι, ωστόσο, σημαντικό να το πληροφορηθούν οι μαθητές, για να κατανοήσουν τα χαρακτηριστικά και τα όρια της επιστημονικής γνώσης, καθώς επίσης την ουσιαστική διαφορά μεταξύ των θετικών επιστημών και των μαθηματικών.

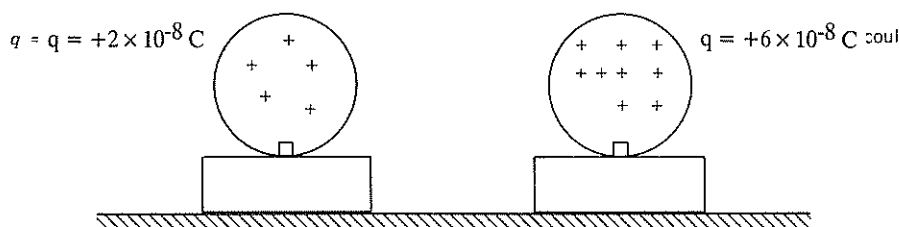
Αξίζει επίσης να παρατηρήσουμε πως όταν η επιστήμη του ηλεκτρισμού βρισκόταν στην «παιδική ηλικία της», ο Coulomb δεν χρησιμοποιούσε

τον όρο ηλεκτρικό «φορτίο», αλλά ηλεκτρική «μάζα» των φορτισμένων σφαιρών του. Είναι σαφές ότι η ηλεκτρική «μάζα» δεν έχει καμιά σχέση με την αδρανειακή. Αν επισημάνουμε το γεγονός αυτό, βοηθάμε τους μαθητές να αντιληφθούν κατ' αναλογία τη λειτουργική διαφορά μεταξύ της αδρανειακής και της βαρυτικής μάζας, αν μάλιστα χρησιμοποιούμε από καιρό σε καιρό για την τελευταία τον όρο «βαρυτικό φορτίο» (βλ. εδάφιο 3.9).

6.10 Η ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση και ο 3ος νόμος του Νεύτωνα

Στη μελέτη των ηλεκτροστατικών και μαγνητοστατικών δυνάμεων, μας δίνεται η ευκαιρία να επανέλθουμε στον 3ο νόμο του Νεύτωνα. Έχει περάσει ήδη κάποιος χρόνος από τότε που τον χρησιμοποιούσαμε στη μηχανική. Οι καθηγητές, λοιπόν, που πιστεύουν ότι οι μαθητές έχουν αφομοιώσει το νόμο — μέσω της προσεκτικής παρουσίασης και των πολλών ασκήσεων που παρακολούθησαν στην πρώτη επαφή τους μ' αυτόν — είναι χρήσιμο να ζητήσουν απ' αυτούς που άρχισαν να μελετούν ηλεκτροστατική, να προσπαθήσουν να λύσουν το επόμενο πρόβλημα:

Στο σχήμα (Σχ. 6.10.1) φαίνονται δύο σφαίρες με ομόσημο ηλεκτρικό φορτίο. Κάθε σφαίρα είναι στερεωμένη σε ένα βαγονάκι. Μεταξύ της σφαίρας και του βαγονιού υπάρχει ηλεκτρική μόνωση. Το βαγονάκι κινείται χωρίς τριβές πάνω σε στρώμα αέρα. Η μια σφαίρα έχει φορτίο $+2,0 \times 10^{-8} \text{ C}$ και η άλλη $+6,0 \times 10^{-8} \text{ C}$. Τα βαγονάκια με τις σφαίρες επιταχύνονται ελεύθερα πάνω στο στρώμα αέρα. Σχεδιάστε σε ξεχωριστά σχήματα τις δυνάμεις που ασκούνται σε καθένα από τα τέσσερα σώματα, δηλαδή στις σφαίρες και στα βαγονία. Σχεδιάστε τις ίσες δυνάμεις με βέλη ίσου μήκους και τις μεγαλύτερες δυνάμεις με βέλη μεγαλύτερου μήκους.



Σχήμα 6.10.1 Κάθε φορτισμένη σφαίρα είναι στερεωμένη σε βαγονάκι. Μεταξύ της σφαίρας και του βαγονιού υπάρχει ηλεκτρική μόνωση. Τα βαγονάκια κινούνται χωρίς τριβή πάνω σε στρώμα αέρα και μπορούν να επιταχύνονται ελεύθερα.

Στο πλαίσιο δοκιμαστικού τεστ, έθεσα το πρόβλημα σε σαράντα δευτεροετείς φοιτητές, οι οποίοι είχαν παρακολουθήσει για ένα έτος εισαγωγικά μαθήματα φυσικής όπου χρησιμοποιούνταν απειροστικός λογισμός, και ήδη παρακολουθούσαν εισαγωγικά μαθήματα σύγχρονης φυσικής. Το 65% της ομάδας σχεδίασε την ηλεκτρική δύναμη που ασκείται στη μια σφαίρα τρεις φορές μεγαλύτερη από εκείνη που ασκείται στην άλλη. Το 85% δεν σχεδίασε τις οριζόντιες δυνάμεις μεταξύ των σφαιρών και των βαγονιών. (Επίσης, το 65% είχε, τουλάχιστον, ένα λάθος στη σχεδίαση των κατακόρυφων δυνάμεων.) Το αποτέλεσμα καταδεικνύει, με δραματικό τρόπο, τη σημασία του να δίνουμε περιοδικώς στους μαθητές ποιοτικές ερωτήσεις αυτού του είδους. Μόνον ύστερα από αρκετές περιοδικές «επαφές» η πλειονότητα των μαθητών, που δεν ασχολούνται ιδιαίτερα με τη φυσική, κατανοεί τις έννοιες.

Εκτός του ότι οι μαθητές πρέπει να αναγνωρίσουν ότι οι δυνάμεις είναι ίσες και αντίθετες, ακόμα κι αν τα φορτία είναι διαφορετικά, πρέπει επίσης να αντιληφθούν το εξής: όταν μια φορτισμένη ράβδος την οποία κρατάμε έλκει χαρτάκια ή απωθεί μια φορτισμένη μπαλίτσα από ψίχα, ασκείται δύναμη και πάνω στη ράβδο, ακόμα κι αν δεν την αισθανόμαστε άμεσα. Συνήθως υποτιμάμε αυτό το γεγονός: δεν συνδέουμε τη συγκεκριμένη κατάσταση μ' εκείνη όπου αντιλαμβανόμαστε σαφώς τις δυνάμεις και τις επιταχύνσεις μόνο των μικρών αλληλεπιδρώντων αντικειμένων.

Μπορούμε να θέσουμε ένα επιπλέον γόνιμο ερώτημα που συνδέεται με τον 3ο νόμο του Νεύτωνα: Υποθέστε ότι διαθέτουμε δύο φορτισμένες σφαίρες που έλκονται ή απωθούνται μεταξύ τους. Σύμφωνα με τον 3ο νόμο, οι δυνάμεις είναι ίσες και αντίθετες. Υποθέστε ότι ξαφνικά μετακινούμε τη μια σφαίρα. Η δύναμη που ασκείται στην άλλη σφαίρα μεταβάλλεται ακαριαία; (Δηλαδή, η ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση εκδηλώνεται ως «δράση από απόσταση», όπως ακριβώς ο Νεύτων θεωρούσε ότι συμβαίνει με τη βαρύτητα;) Αν η δύναμη δεν μεταβάλλεται ακαριαία και μεσολαβεί κάποιο χρονικό διάστημα πριν πραγματοποιηθεί η αλλαγή, σ' αυτό το χρονικό διάστημα ο 3ος νόμος του Νεύτωνα δεν ισχύει· τι συνεπάγεται αυτός ο συλλογισμός; (Στο εδάφιο 3.13 υπάρχει το ιστορικό αυτού του ζητήματος.) Πρέπει να επισημάνουμε ότι η «ισορροπία» των δυνάμεων δεν είναι απαραίτητο να αποκαθίσταται ακαριαία. Πολλοί μαθητές έχουν συνηθίσει να περιμένουν απάντηση την ίδια στιγμή που θα τεθεί οποιαδήποτε ερώτηση, όσο περίπλοκη και εκλεπτυσμένη κι αν είναι. Στις προηγούμενες ερωτήσεις, όμως, η απάντηση δεν είναι δυνατό να δοθεί από την πρώτη στιγμή. Ο Faraday ξόδεψε μάταια τα τελευταία χρόνια της ζωής του, προσπαθώντας να παρατηρήσει κάποια χρονική καθυστέρηση διάδοσης της αλληλεπίδρασης. Η απάντηση, ωστόσο, δόθηκε στο πλαίσιο της θεωρίας πεδίου του Maxwell και με την αποδοχή της πρωτοκαθεδρίας του νόμου διατήρησης της ορμής έναντι του 3ου νόμου του Νεύτωνα.

6.11 Κατανομή φορτίου μεταξύ δύο σφαιρών

Μελετήσαμε ήδη πώς κατανέμεται το φορτίο σε δύο ταυτόσημες αγωγικές σφαίρες κατά τη διερεύνηση του νόμου του Coulomb και κατά τη μέτρηση του φορτίου (εδάφιο 6.9). Συνήθως, μελετάμε την κατανομή του φορτίου μεταξύ δύο σφαιρών διαφορετικής ακτίνας σε σύνδεση με την έννοια της χωρητικότητας. Σε τούτη την περίπτωση, το εξωτερικό τμήμα της μιας σφαίρας εφάπτεται με το εξωτερικό τμήμα της άλλης. Αποδεικνύουμε, λοιπόν, ότι ο λόγος των φορτίων που αποκτούν οι σφαίρες ισούται με το λόγο των ακτίνων τους.

Αφού αποδείξουμε ότι δεν υπάρχει φορτίο στο εσωτερικό ενός κοίλου αγωγού και αφού οι μαθητές αφομοιώσουν αυτή την ιδέα, η επόμενη ερώτησή τους βοηθά να αποσαφηνίσουν ορισμένα ζητήματα: Φορτίζουμε μια μεγάλη κοίλη σφαίρα και μέσα από κάποιο άνοιγμά της εισάγουμε μια μικρή αφόρτιστη σφαίρα. Κατόπιν, συνδέουμε με σύρμα τη μικρή σφαίρα με το εσωτερικό της μεγάλης. Πώς κατανέμεται, τελικά, το φορτίο μεταξύ των δύο σφαιρών;

Έχω διαπιστώσει από την εμπειρία μου ότι οι μαθητές επιστρέφουν «τυφλά» στη σχέση της κατανομής του φορτίου μεταξύ δύο σφαιρών που εφάπτονται εξωτερικά. Αν και η μικρή σφαίρα έρχεται σε επαφή με το εσωτερικό της μεγάλης, εφαρμόζουν τον ίδιο μαθηματικό τύπο. Δεν αντιλαμβάνονται πως είναι απαραίτητο να εφαρμόσουν ό,τι έμαθαν για το εσωτερικό του κοίλου αγωγού, ακόμα κι αν έχουν παρακολουθήσει με τα ίδια τους τα μάτια σχετικά πειράματα. Αυτό συμβαίνει, κυρίως, αν έχει παρέλθει λίγος χρόνος από τότε που διδάχτηκαν ότι στο εσωτερικό κάθε κοίλου αγωγού, το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενικό. Συγκρατούν, λοιπόν, καλύτερα αυτή την ιδέα, αφού κάνουν το λάθος που περιγράψαμε. Πρόκειται, επίσης, για παράδειγμα της αξίας ανακύκλησης των ιδεών σε ευρύτερο πλαίσιο.

6.12 Η διατήρηση του φορτίου

Αν θέλουμε να καλλιεργήσουμε και να αναπτύξουμε την κριτική σκέψη των μαθητών είναι χρήσιμο να τους κατευθύνουμε να μελετήσουν τα ερωτήματα: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...; Πώς αποδεικνύεται ότι...;» Τα ερωτήματα αναφύονται από την πρώτη στιγμή που διαμορφώνονται οι έννοιες και οι μαθητές αρχίζουν να κατανοούν τη σχέση μεταξύ των φυσικών φαινομένων. Τα ερωτήματα των προηγούμενων εδαφίων προϋποθέτουν, λοιπόν, βαθιά κατανόηση και κριτική σκέψη για τα ηλεκτρικά φαινόμενα. Στο πλαίσιο αυτό, η ιδέα της διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα της δομής της θεωρίας: Ποιες ενδείξεις υπάρχουν ότι όντως ισχύει αυτή η αρχή; Κατά την εκτέλεση των μακροσκο-

πικών ηλεκτροστατικών πειραμάτων, η ιδέα της διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου δεν προκύπτει αυτόματα. Δεν πρέπει, λοιπόν, να μας εκπλήσσει το ότι ιστορικά ανακαλύφθηκε με καθυστέρηση.

Το 1747 ο Βενιαμίν Φραγκλίνος εκτέλεσε σειρά απλών και ιδιοφυών πειραμάτων με φιάλες του Leyden. Φόρτιζε με παρόμοιο τρόπο δύο ταυτόσημες φιάλες, ακουμπώντας, ταυτόχρονα, τα «άγκιστρα» (που βρίσκονται σε επαφή με το εσωτερικό φύλλο) στον γυάλινο κύλινδρο μιας ηλεκτροστατικής γεννήτριας. Το εξωτερικό φύλλο ήταν γειωμένο. Ο Φραγκλίνος παρατήρησε πως όταν συνέδεε τα εξωτερικά καλύμματα μεταξύ τους (κρατώντας τις φιάλες με τα δάκτυλά του, οπότε το κορμί του ήταν ο αγωγός), αν τα άγκιστρα βρίσκονταν σε επαφή, δεν συνέβαινε τίποτα. Ωστόσο, όταν κρατούσε τη μια φιάλη από το άγκιστρο και την άλλη από το εξωτερικό κάλυμμα της και, κατόπιν, έφερνε σε επαφή το κάλυμμα της πρώτης με το άγκιστρο της δεύτερης, εμφανιζόταν σπινθήρας και οι φιάλες εκφορτιζόνταν εντελώς.

Το πείραμα που περιγράψαμε, μαζί με ορισμένες παραλλαγές του, οδήγησε τον Φραγκλίνο στην υπόθεση ότι, αν τρίψουμε δύο σώματα μεταξύ τους, το «ηλεκτρικό ρευστό»⁵ ολισθαίνει, απλώς, από το ένα σώμα στο άλλο και ότι το συνολικό φορτίο διατηρείται σταθερό. Αν και τα πειράματα του Φραγκλίνου ήταν, όντως, «χονδροειδή» και μη ποσοτικά, η διαίσθησή του ήταν σωστή. Η υπόθεσή του επηρέασε τους ερευνητές και σε επόμενες ανακαλύψεις αποδείχθηκε πολύ χρήσιμη.

Επιδείξεις με φιάλες του Leyden είναι εύκολο να εκτελεστούν στην αίθουσα διδασκαλίας. Ερωτήσεις σχετικά με τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα πειράματα, αποτελούν άριστη εργασία για το σπίτι. Οι μαθητές έχουν την ευκαιρία να ασχοληθούν με την ερμηνεία πραγματικών φυσικών φαινομένων, με όλες τις δυσκολίες και τις ασάφειες που υπάρχουν σ' αυτά, και όχι μόνο με συμβατικά αριθμητικά προβλήματα που περιέχουν επιλεγμένες τιμές των παραμέτρων.

6.13 Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Η έννοια της «έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου σε ορισμένο σημείο του χώρου» ορίζεται μέσω της σχέσης:

5. Ο Φραγκλίνος είχε υιοθετήσει το πρότυπο του ενός ρευστού στη διαδικασία της φόρτισης και θεωρούσε (λανθασμένα) ότι το γυαλί αποκτά πλεόνασμα φορτίου, ενώ το υλικό στο οποίο τριβόταν το γυαλί παρέμενε με έλλειμμα. Απ' αυτό το αμφιλεγόμενο πρότυπο προέκυψαν οι όροι «θετικός» και «αρνητικός».

$$E = \frac{F}{q_{\text{δοκ}}} \quad (6.13.1)$$

Η έννοια αυτή είναι γνωστό ότι δημιουργεί προβλήματα σε πολλούς μαθητές. Τα περισσότερα οφείλονται σε ορισμένα χαρακτηριστικά του ίδιου του ορισμού· επειδή, ωστόσο, υπάρχουν πολλά τέτοια χαρακτηριστικά, το ζήτημα περιπλέκεται.

Επειδή τα περισσότερα εγχειρίδια χρησιμοποιούν το σύμβολο της ισότητας (=) και όχι της ταυτότητας ή του ορισμού ($\equiv$), οι μαθητές δεν αντιλαμβάνονται σαφώς ότι η ιδέα περιέχεται στο δεξιό μέλος της εξίσωσης 6.13.1, ενώ το αριστερό μέλος είναι απλώς το *όνομα* της ιδέας. (Στο εδάφιο 3.23 μελετάμε τα διάφορα είδη «ισότητας».) Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να επισημάνουμε αρκετές φορές αυτό το γεγονός, πριν χρησιμοποιήσουμε εκτενώς το μέγεθος· η χρήση του συμβόλου της ταυτότητας βοηθά στην επισημάνση.

Στον ορισμό υπεισέρχεται επίσης το «μυστηριώδες» νόημα του λόγου που ταλαιπωρεί πολλούς μαθητές. Δεν αναζητούν, ωστόσο, το νόημα του συγκεκριμένου λόγου ούτε προσπαθούν να το αποδώσουν με δικά τους λόγια. Ελπίζουν, δηλαδή, ότι μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον μαθηματικό τύπο, παρακάμπτοντας την περιφραστική ερμηνεία του. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να τους κατευθύνουμε να αντιληφθούν ότι αναφερόμαστε σε δύναμη ανά μονάδα φορτίου και όχι απλώς σε δύναμη. Όσο προφανές κι αν φαίνεται το συγκεκριμένο γεγονός, συχνά το παραγνωρίζουμε. Είναι χρήσιμο να επαναλάβουμε τη συγκεκριμένη πορεία συλλογισμών σε περισσότερες από μία περιπτώσεις, και να ξεκινήσουμε από κάποια περισσότερο οικεία κατάσταση. Αρκετά σύγχρονα εγχειρίδια αναπτύσσουν, παράλληλα, την έννοια της «έντασης του βαρυτικού πεδίου» (δηλαδή, της βαρυτικής δύναμης ανά μονάδα μάζας) και κατευθύνουν τους μαθητές να αντιληφθούν ότι πρόκειται για έναν άλλον τρόπο παρουσίασης μιας οικείας σ' αυτούς έννοιας, την οποία συμβολίζουμε με g . Η παράλληλη παρουσίαση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη. Τίθεται, επίσης, το ερώτημα: *γιατί* επινοήσαμε αυτόν τον ορισμό; Επιθυμούμε, βεβαίως, να δημιουργήσουμε έναν αριθμό ο οποίος να αποτελεί ενδογενές μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου που περιγράφουμε· πρέπει, λοιπόν, να είναι ανεξάρτητος από τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της «συσκευής» μέτρησης. Αν και η αιτιολόγηση είναι σαφής σε πολλές παρουσιάσεις, συχνά, σε σύντομο χρονικό διάστημα, περνά στο περιθώριο, και δεν της δίνουμε πλέον ιδιαίτερη προσοχή· έτσι, στους περισσότερους μαθητές δημιουργείται λογικό κενό. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να οδηγήσουμε τους μαθητές να συμμετάσχουν στην επινοήση αυτής της έννοιας και να περιγράψουν με δικά τους λόγια το σκοπό και το νόημα της ιδέας. Μόνο μέσω της περιγραφής αρχίζουν να συνειδητοποιούν ότι *δημιουργήσαμε* την έν-

νοια για ειδικό σκοπό: έτσι, παύουν να θεωρούν την εξίσωση 6.13.1 «εξ αποκαλύψεως» μαθηματικό τύπο.

Είναι, επίσης, απαραίτητο οι μαθητές να συνοψίσουν με σαφήνεια και να περιγράψουν κάθε βήμα της διαδικασίας που περιέχεται στην εξίσωση 6.13.1. Πρέπει, δηλαδή, να περιγράψουν βήμα βήμα τι πρέπει να *κάνουν* για να προσδιορίσουν το μέγεθος που συμβολίζεται με E . Μόνο στο πλαίσιο αυτής της περιγραφής, οι μαθητές αντιλαμβάνονται ότι, για να προσδιορίσουμε την ένταση, πρέπει να μετρήσουμε τη δύναμη σε ορισμένο σημείο του χώρου και ότι είναι αδύνατο να παρατηρήσουμε ηλεκτρική δύναμη χωρίς να τοποθετήσουμε φορτισμένο σωματίδιο σ' εκείνο το σημείο. Αυτή η περιγραφή είναι η καλύτερη ευκαιρία για να επισημάνουμε ότι το δοκιμαστικό φορτίο πρέπει, καταρχάς, να είναι τόσο μικρό, ώστε να μη διαταράσσει ή αναδιατάσσει τα φορτία τα οποία δημιουργούν το πεδίο που μελετάμε. Είναι, επίσης, η κατάλληλη ευκαιρία για να επισημάνουμε ότι το E εκφράζει δύναμη ανά μονάδα φορτίου και όχι δύναμη που μετρήθηκε πάνω σε ένα «ολόκληρο» φορτίο ενός C .

Έχοντας διατρέξει τα προηγούμενα ζητήματα, μπορούμε να ελπίζουμε ότι όλοι οι μαθητές κατανοούν την έννοια της «έντασης του ηλεκτρικού πεδίου» και μπορούν να ασχοληθούν, χωρίς δυσκολία, με τη λύση συμβατικών αριθμητικών προβλημάτων. Οι περισσότεροι καθηγητές γνωρίζουν, ωστόσο, πως όταν οι μαθητές αρχίζουν να λύνουν κάποιο πρόβλημα (ιδιαίτερα από εκείνα που περιέχουν υπολογισμό της έντασης ηλεκτρικού πεδίου, μέσω της σύνθεσης της δράσης δύο ή περισσότερων σημειακών φορτίων), ελάχιστοι επανέρχονται μόνοι τους στο νόημα του E . Οι περισσότεροι ατενίζουν το πρόβλημα και προσπαθούν να διακρίνουν με τι πρέπει να αντικαταστήσουν τα σύμβολα που περιέχονται στον μαθηματικό τύπο, ενώ θα έπρεπε να αναρωτηθούν: «Τι συμβολίζει το F ; Τι συμβολίζει το $q_{\text{δοκ}}$; Τι πρέπει να κάνουμε για να προσδιορίσουμε τις αντίστοιχες τιμές;» Μόνον έτσι θα προχωρήσουν στον προσδιορισμό, λόγου χάρη, του διανυσματικού αθροίσματος των δυνάμεων που ασκούνται στο δοκιμαστικό φορτίο, από άλλα σημειακά φορτία ευρισκόμενα πλησίον του. Είναι, λοιπόν, απαραίτητη η βοήθειά μας για να αποκτήσουν οι μαθητές τη συνήθεια να σταματούν και να θέτουν στον εαυτό τους παρόμοιες ερωτήσεις, κάθε φορά που δυσκολεύονται με ορισμούς συμβολικά διατυπωμένους.

6.14 Υπόθεση

«Κάθε σημειακό φορτίο που ανήκει σε κατανομή φορτίων συνεισφέρει στην ολική τιμή του E σαν να ήταν μόνο του». Αυτή η πρόταση φαίνεται απλή και λογική και όντως είναι. Οι μαθητές, ωστόσο, συγχέουν ορισμένα ζητήματα που δεν αποσαφηνίζονται σ' αυτήν.

Αν μελετάμε μια απομονωμένη, ιδανική κατανομή φορτίου σε κενό χώρο (λόγου χάρη, ένα σύνολο σημειακών φορτίων, μια κατανομή φορτίου σε ευθεία γραμμή, μια επίπεδη κατανομή κ.ά.), δεν είναι απαραίτητο να αναφέρουμε τίποτα περισσότερο από την πρόταση αυτή. Η μόνη δυσκολία εμφανίζεται κατά τον υπολογισμό του ολοκληρώματος από το οποίο προκύπτει η συνολική επίδραση συνεχούς κατανομής. Συνήθως, η δυσκολία οφείλεται στο ότι, στο παρόν στάδιο, πολλοί σπουδαστές δεν αντιλαμβάνονται ακόμα σαφώς τη σύνδεση της ολοκλήρωσης με τη διαδικασία της πρόσθεσης. Έχουν όντως ήδη *διδασθεί* τον υπολογισμό του ορίου ενός αθροίσματος· σπάνια, ωστόσο, αν όχι ποτέ, χρησιμοποιούν αυτή τη γλώσσα για να περιγράψουν τη διαδικασία μιας συγκεκριμένης ολοκλήρωσης. Εκτελούν αλγόριθμους ολοκλήρωσης, χωρίς να περιγράψουν ή να ερμηνεύουν τη διαδικασία, ιδιαίτερα σε φυσικές εφαρμογές. Πολλοί δεν αντιλαμβάνονται ότι ο υπολογισμός μιας επιφάνειας είναι διαδικασία άθροισης. Αλλά ακόμα κι αν συμβαίνει το αντίθετο, δεν χρησιμοποιούν την έννοια της άθροισης για να προσδιορίσουν τη συνολική ένταση του πεδίου. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να τους κατευθύνουμε να περιγράψουν με δικά τους λόγια τι συμβαίνει. Το ότι οι μαθητές εκτελούν «επιτυχώς» έναν υπολογισμό, που τον έχουν, ωστόσο, αποστηθίσει από κάποιο εγχειρίδιο, δεν αποδεικνύει ότι κατανοούν το περιεχόμενό του.

Σημαντικά εννοιολογικά προβλήματα σχετικά με την έννοια της υπέρθεσης εγείρονται όταν υπολογίζουμε την επίδραση μιας πιο σύνθετης κατανομής φορτίου. Πρώτον, είναι απαραίτητο να βοηθήσουμε τους μαθητές να αφομοιώσουν τη λεπτή ιδέα ότι, αν σε μια περιοχή όπου ήδη υπάρχουν ευκίνητα φορτία (κυρίως, φορτία πάνω σε αγωγούς) εισαγάγουμε ένα άλλο σύνολο φορτίων, τότε τα φορτία αναδιατάσσονται. Πρέπει, επίσης, να κατανοήσουν ότι η αρχή της υπέρθεσης εφαρμόζεται μόνο στην τελική κατανομή. (Δεν αναφέρομαι σε φαινόμενα με διηλεκτρικά ή άλλες πολύπλοκες περιπτώσεις πόλωσης· αναφέρομαι σε απλές καταστάσεις που εμφανίζονται σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων.) Λόγου χάρη, όταν μελετάμε το πεδίο που δημιουργούν δύο ή περισσότερες φορτισμένες αγωγίμες σφαίρες τις θεωρούμε σημειακά φορτία στο κέντρο κάθε σφαίρας. Οι μαθητές λοιπόν πρέπει να γνωρίζουν, σαφώς, το εξής: αυτή η παραδοχή ισχύει στο βαθμό κατά τον οποίο οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σφαιρών δεν είναι αρκετά ισχυρές, ώστε να τροποποιήσουν την κατανομή του φορτίου που, αρχικώς, υπάρχει στην επιφάνεια των σφαιρών. Επίσης, είναι απαραίτητο να γνωρίζουν ότι το σωστό συνολικό πεδίο προκύπτει αν λάβουμε υπόψη μας την τελική κατάσταση ισορροπίας του φορτίου.

Δεύτερη δυσκολία που εμφανίζεται στην υπέρθεση είναι ότι πολλοί μαθητές περδεύονται όταν οι καταστάσεις που μελετούν αναφέρονται σε φυσικά αντικείμενα και όχι απλώς σε κατανομές φορτίου οι οποίες δεν συνδέονται με συγκεκριμένα αντικείμενα. Λόγου χάρη, μελετώντας το πεδίο το

οποίο δημιουργούν οι φορτισμένες σφαίρες που προαναφέραμε, δυσκολεύονται να πιστέψουν ότι μπορούν να μελετήσουν το σύστημα σαν να απουσίαζαν οι μεταλλικές σφαίρες. Πιστεύουν ότι «κάθε σφαίρα δεν επιτρέπει στο πεδίο της άλλης να περάσει μέσα απ' αυτή». Λόγου χάρη, θεωρήστε το πεδίο στο εξωτερικό των πλακών ενός πυκνωτή: το πεδίο εκατέρωθεν μιας άπειρης επίπεδης φορτισμένης επιφάνειας είναι ομογενές. Οι μαθητές, ωστόσο, είναι απρόθυμοι να δεχτούν ότι με την υπέρθεση του πεδίου που δημιουργούν οι δύο πλάκες του πυκνωτή, προκύπτει περίπου μηδενικό πεδίο στο εξωτερικό των πλακών. Η απροθυμία δεν οφείλεται τόσο στις εξιδανικεύσεις και τις προσεγγίσεις που υπαισέρονται, όσο στην ισχυρή προκατάληψη ότι το πεδίο της μιας πλάκας είναι αδύνατο να «διαπεράσει» την άλλη.

Σε πολλούς μαθητές υπάρχει αυτή η παρανόηση εκ των προτέρων, χωρίς να έχουν ακούσει ποτέ για την ηλεκτροστατική θωράκιση. Αν, λοιπόν, ακούσουν γι' αυτή, η παρανόηση ενισχύεται. Συνδέουν το φαινόμενο της θωράκισης μάλλον με την αδυναμία κάθε εξωτερικού πεδίου να διαπερνά τη θωράκιση παρά με την εξαφάνιση του πεδίου, που οφείλεται στην αναδιάταξη των ίδιων των φορτίων.

Οι μαθητές κατανοούν την αρχή της υπέρθεσης μόνον αν εντοπίσουμε και μελετήσουμε προσεκτικά τις εννοιολογικές δυσκολίες που προαναφέραμε και τους βοηθήσουμε να αντιληφθούν ότι η αρχή προκύπτει με επαγωγικό συλλογισμό: δηλαδή, τη δεχόμαστε επειδή «δουλεύει»: είναι φυσικό γεγονός ότι, από τη στιγμή που τα φορτία ισορροπήσουν, οι σφαίρες και οι πλάκες των πυκνωτών δεν παίζουν, πλέον, κάποιο ρόλο: το ηλεκτρικό πεδίο δεν «εμποδίζεται» από τα υλικά αντικείμενα ούτε τα «διαπερνά».

7. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ

7.1 Εισαγωγή

Η έρευνα έχει δείξει ότι οι μαθητές δυσκολεύονται να κατανοήσουν τις θεμελιώδεις έννοιες που υπεισέρχονται σε απλά κυκλώματα συνεχούς ρεύματος (d.c.). Έχει δείξει, επίσης, ότι ορισμένες παρανοήσεις κυριαρχούν ευρέως [Arons (1982)· Cohen, Eylon και Ganiel (1983)· Fredette και Clement (1981).] Όπως συμβαίνει και στην περίπτωση του στατικού ηλεκτρισμού, τα μαθησιακά προβλήματα επιτείνονται από την απόσταση που υπάρχει μεταξύ των βαθύτερων φαινομένων και της άμεσης αντίληψης. Τα παρατηρούμενα φαινόμενα δεν συνδέονται εύκολα με την αφηρημένη έννοια του «ηλεκτρικού φορτίου», του «ρεύματος» και της «ενέργειας». Επειδή οι μαθητές γνωρίζουν ότι οι μπαταρίες «αδειάζουν» και ότι «καταναλώνουμε» οικιακό ρεύμα, πιστεύουν ότι όντως «κάτι καταναλώνεται». Στους περισσότερους, λοιπόν, φαίνεται λογικό ότι καταναλώνεται ο ίδιος ο «ηλεκτρισμός». Επίσης, για τους μαθητές η έννοια της «διαφοράς δυναμικού» είναι δύσκολη όταν εφαρμόζεται σε ηλεκτροστατικό πεδίο. Είναι δε ακόμα πιο συγκεχυμένη όταν συνδέεται και εφαρμόζεται σε ηλεκτρικά κυκλώματα.

Η δομή των εννοιών και οι λειτουργικοί ορισμοί που υπεισέρχονται στο νόμο του Ohm είναι, σχεδόν, εξίσου περίπλοκοι με εκείνους στον 2ο νόμο του Νεύτωνα.¹ Έχουμε μελετήσει, ωστόσο, λιγότερο την περίπτωση του ηλεκτρισμού. Στα εγχειρίδια υπάρχουν πολλές διαφορές στην ακολουθία και στον τρόπο παρουσίασης. Η έρευνα των μαθησιακών δυσκολιών των εκπαιδευομένων βρίσκεται ακόμα σε νεαρή ηλικία. Προς το παρόν, ουδείς τρόπος ή ακολουθία παρουσίασης υπερτερεί από παιδαγωγική άποψη έναντι των υπολοίπων. Οι καθηγητές, λοιπόν, «πατούν σε στέρεο έδαφος» αν επιλέξουν έναν εύλογο τρόπο που τους ταιριάζει περισσότερο και με τον οποίο αισθάνονται μεγαλύτερη ασφάλεια.

1. Δεν εννοώ ότι υπάρχει ισχυρή αναλογία μεταξύ του νόμου του Ohm και του 2ου νόμου της κίνησης, αν και ορισμένοι συγγραφείς προσπαθούν να εκμεταλλευτούν μια τέτοια αναλογία. Από την άποψη της εννοιολογικής δομής και της εμβέλειάς του, ο νόμος του Ohm μοιάζει μάλλον με το νόμο του Hooke (ο οποίος αναφέρεται σε ιδανικά ελατήρια) παρά με τον 2ο νόμο του Νεύτωνα.

Ανεξάρτητα, ωστόσο, από τη λογική δομή της παρουσίασης, οι μαθησιακές δυσκολίες που εμφανίζονται στη μελέτη του ηλεκτρικού ρεύματος, τείνουν να συγκαλυφθούν πολύ γρήγορα και επιπόλαια σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων, σε κάθε επίπεδο. Αποτέλεσμα: ελάχιστοι μαθητές (ακόμα και όσοι ακολουθούν θετική κατεύθυνση) κατανοούν τη φαινομενολογία απλών κυκλωμάτων. Συνήθως, οι καθηγητές ελέγχουν, απλώς, αν οι μαθητές εκτελούν σωστά αριθμητικούς υπολογισμούς που περιέχουν το νόμο του Ohm· ωστόσο, η ικανότητα των μαθητών να επιλύουν συμβατικά προβλήματα έχει μικρή σχέση με την κατανόηση των φυσικών φαινομένων [Arons (1982)]. Αυτή η κατάσταση θεραπεύεται μόνον αν κατευθύνουμε τους μαθητές να μελετούν προσεκτικότερα και συχνότερα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φαινομένων κι αν εντείνουμε το ενδιαφέρον τους για τις πανταχού παρούσες ερωτήσεις: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;»

Αν υιοθετήσουμε αυτόν το στόχο, δεν είναι συνετό να αναγκάσουμε τους μαθητές να χρησιμοποιήσουν από την πρώτη στιγμή αυστηρό φορμαλισμό. Στην κινηματική και τη δυναμική, παρουσιάζουμε τις έννοιες εκκινώντας από σχεδόν πρωταρχικές και διαισθητικές ιδέες και κατόπιν τις εκλεπτύνουμε και τις επαναορίζουμε, καθώς διεισδύουμε βαθύτερα στην εννοιολογική δομή. Είναι, λοιπόν, συνετό να ακολουθούμε παρόμοια διαδικασία στην παρουσίαση απλών κυκλωμάτων με αντιστάσεις. Αρχικώς, παρατηρώντας φαινόμενα που συμβαίνουν σε απλά κυκλώματα με αντιστάσεις, αναπτύσσουμε με ποιοτικό τρόπο τις προκαταρκτικές έννοιες «κύκλωμα», «ρεύμα», «αγωγός», «μονωτής» «αντίσταση» κ.ά. Κατόπιν, στο πλαίσιο αυστηρότερης μελέτης, επαναορίζουμε, ποσοτικοποιούμε και συνδέουμε τις ιδέες με την έννοια της διαφοράς δυναμικού. Έτσι, η εν λόγω έννοια εμφανίζεται πιο λογική απ' ό,τι θα ήταν αν τη μελετούσαμε αυστηρά από την πρώτη στιγμή.

7.2 Τι πρέπει να διδάξουμε πρώτα: τον στατικό ηλεκτρισμό ή το ηλεκτρικό ρεύμα;

Για το εν λόγω ζήτημα υπάρχει διαμάχη μεταξύ των καθηγητών. Ορισμένοι παρουσιάζουν πρώτα τον στατικό ηλεκτρισμό (όπως, επίσης, συμβαίνει με τα περισσότερα εγχειρίδια)· άλλοι εισάγουν το ηλεκτρικό ρεύμα και προχωρούν στον στατικό ηλεκτρισμό, θεωρώντας ότι πρόκειται για ειδική περίπτωση. Στο παρόν βιβλίο, μελετήσαμε πρώτα τον στατικό ηλεκτρισμό, επειδή πρόκειται για τη συνθηθέστερη προσέγγιση. Προσωπικά, θεωρώ ότι η μοναδική ευσταθής δικαιολογία για το είδος της προσέγγισης που ακολουθεί ο καθηγητής, είναι απλώς η ιδιαίτερη προτίμησή του: και οι δύο τρόποι ανάπτυξης των εννοιών είναι εξίσου ορθοί και λογικοί. Το θέμα,

ωστόσο, το οποίο συχνά αποκρύπτουμε και δεν το προσέχουμε όσο πρέπει, είναι η *σύνδεση* μεταξύ των δύο συνόλων των φαινομένων: Γιατί δεχόμαστε ότι η βολταϊκή στήλη ή η ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια συντηρούν μέσα στους αγωγούς την κίνηση του «ηλεκτρικού φορτίου», το οποίο εκδηλώνεται στα φαινόμενα ηλεκτρισμού με τριβή που τα μελετάμε στην ηλεκτροστατική; (Εξετάζουμε λεπτομερώς την ερώτηση στο επόμενο εδάφιο.)

Το ότι οι έννοιες του ηλεκτρισμού προέκυψαν ιστορικά από τα φαινόμενα του στατικού ηλεκτρισμού δεν αποτελεί περιορισμό από παιδαγωγική άποψη· εκτός κι αν ο καθηγητής προτιμά να ακολουθήσει την ιστορική σειρά των γεγονότων. Επιλεγμένα θέματα από την ιστορική σειρά βοηθούν στη μάθηση και την αποσαφήνιση των εννοιών [όπως, λόγου χάρη, υπάρχουν στο κεφάλαιο «Harvard Case Histories» του βιβλίου των Roller και Roller (1957)]· λεπτομερέστερη μελέτη, ωστόσο, της ακριβούς ιστορικής ακμής, παρακμής και αναθεώρησης των ιδεών [όπως, λόγου χάρη, την παρουσιάζει ο Heilborn (1979)], στο πλαίσιο μιας εισαγωγικής σειράς μαθημάτων, περιπλέκει τους μαθητές και δεν αναπτύσσει τη μάθηση και την κατανόηση των περισσοτέρων. (Η συγκεκριμένη μελέτη, ωστόσο, αναπτύσσει πολύ τις γνώσεις του ίδιου του καθηγητή.)

Οι καθηγητές που ενδιαφέρονται για ακριβείς παρουσιάσεις, οι οποίες αρχίζουν με το ηλεκτρικό ρεύμα και όχι με τον στατικό ηλεκτρισμό, είναι ωφέλιμο να εξετάσουν τη μελέτη του Rogers (1960) και το άριστο σχολικό εγχειρίδιο του δημοτικού «Batteries and Bulbs», στη σειρά «Elementary Science Study» (ESS) (1988). Μια απολύτως ποιοτική μελέτη για μαθητές λυκείου (η οποία, σε μεγάλο βαθμό, οφείλεται στο ESS) υπάρχει στο βιβλίο του Arons (1977)· η συνέχεια, από ποσοτική άποψη, των δραστηριοτήτων που περιγράφονται στο «Batteries and Bulbs» παρατίθεται από τον Evans (1978).

7.3 Γιατί δεχόμαστε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι κίνηση φορτίου;

Πολλά εγχειρίδια, αφού σχηματίσουν την έννοια του φορτίου και εξετάσουν, στο πλαίσιο του ηλεκτρισμού που παράγεται με τριβή, τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα, μεταπηδούν στο ηλεκτρικό ρεύμα, διακηρύσσοντας, απλώς, ότι στα κυκλώματα τα οποία περιέχουν μπαταρίες υπάρχει «κίνηση φορτίου». Σε πρωταρχικό στάδιο, ωστόσο, στους περισσότερους μαθητές δεν είναι καθόλου προφανές ότι οι μπαταρίες και οι πρίζες του σπιτιού έχουν οποιαδήποτε σχέση με φαινόμενα τριβής. Αν τους ρωτήσουμε ευθέως «Γιατί δεχόμαστε ότι...», μένουν άναυδοι. Στις δύο περιπτώσεις, τα παρατηρούμενα φαινόμενα είναι απολύτως διαφορετικά. Επίσης, οι μαθητές δεν έχουν το πλεονέκτημα της εκτέλεσης της μακράς σειράς των εξονυχιστικών ερευνών του Galvani, του Volta και των συγχρόνων τους. Στο πλάι-

σιο αυτών των ερευνών, η βολταϊκή στήλη προέκυψε βαθμιαία: δεν συνδέθηκε από την πρώτη στιγμή με τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα.

Επίσης, ήδη από την παιδική ηλικία τους, οι μαθητές ακούνε τους όρους «φορτίο» και «ηλεκτρισμός» να χρησιμοποιούνται χωρίς διάκριση όταν αναφερόμαστε στις μπαταρίες, στις πρίζες του σπιτιού και στα ηλεκτροστατικά φαινόμενα. Ουδέποτε ρώτησαν, ωστόσο, γιατί δεχόμαστε ότι υπάρχει σύνδεση μεταξύ αυτών των φαινομενικά διαφορετικών συστημάτων. Η χρήση της ίδιας ονομασίας από πολύ νωρίς εξαφάνισε την ερώτηση που θα έπρεπε να είχε τεθεί. Αρχίζοντας από τον στατικό ηλεκτρισμό ή το ηλεκτρικό ρεύμα, είναι σημαντικό να σταθούμε, καθώς περνάμε από το ένα θέμα στο άλλο, και να εξετάσουμε την αιτία που μας οδηγεί να χρησιμοποιήσουμε κοινούς όρους.

Δεν πρόκειται για τετριμμένο ζήτημα από διανοητική άποψη. Μάλιστα, το ότι, ακόμα και έως το 1830, υπήρχαν σοβαρά ερωτήματα για το θέμα αυτό επιβεβαιώνεται από την προσοχή που έδειξε ο ίδιος ο Faraday. Στο βιβλίο του «Electrical Researches» [Faraday 1965a] βρίσκουμε ένα άρθρο του 1833 με τίτλο «Ταυτόσημοι ηλεκτρισμοί προερχόμενοι από διαφορετικές πηγές». Ο Faraday περιγράφει τα φαινόμενα που συνοψίζονται στον Πίνακα 7.3.1. Οι «διαφορετικοί ηλεκτρισμοί» που αναφέρει είναι ο βολταϊκός, ο συνηθισμένος (δηλαδή της τριβής), ο μαγνητικός (της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής), ο θερμικός (από θερμοστοιχείο) και ο ζωικός από τα ψάρια torpedo και gymnotus (το ηλεκτροφόρο σαλάχι και χέλι, αντίστοιχα).

Πίνακας 7.3.1 Πίνακας πειραματικών αποτελεσμάτων του Faraday, όπου φαίνεται η ομοιότητα μεταξύ «ηλεκτρισμών» διαφορετικής προέλευσης. Το σύμβολο × αντιστοιχεί σε θετικό αποτέλεσμα που επιβεβαίωσε ο ίδιος ο Faraday· το + αντιστοιχεί σε θετικό αποτέλεσμα που επιβεβαίωσαν αργότερα άλλοι ερευνητές.

	Βιολογικά αποτελέσματα	Μαγνητική απόλωση	Δημιουργία μαγνητών	Σπινθήρας	Θερμική ισχύς	Χημική δράση	Έλεξη και άπωση	Εκφόρτιση με θερμό αέρα
1. Βολταϊκός ηλεκτρισμός	×	×	×	×	×	×	×	×
2. Συνήθης ηλεκτρισμός	×	×	×	×	×	×	×	×
3. Μαγνητο- ηλεκτρισμός	×	×	×	×	×	×	×	
4. Θερμο- ηλεκτρισμός	×	×	+	+	+	+		
5. Ζωικός ηλεκτρισμός	×	×	×	+	+	×		

Έδειξε ότι κάθε πηγή παράγει μια σειρά από παρόμοια φαινόμενα: βιολογικά φαινόμενα (τινάγματα), μαγνητική απόκλιση (μιας πυξίδας, όπως στο πείραμα του Oersted), μαγνήτιση μιας βελόνας, σπινθήρα, θερμικά φαινόμενα (σε αγωγίμο σύρμα), χημικά φαινόμενα (ηλεκτρόλυση), έλξη και άπωση, και εκφόρτιση με ζεστό αέρα.

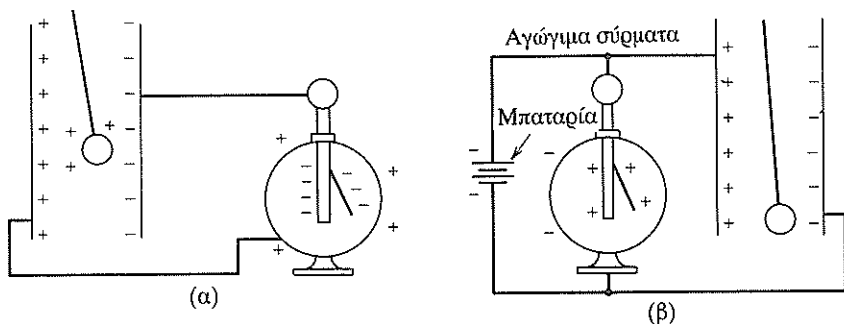
Στο άρθρο που συνοδεύει τον πίνακα, ο Faraday περιγράφει ακριβώς πώς εκτέλεσε κάθε παρατήρηση. Ορισμένες φορές ήταν απαραίτητο να εξαντλήσει την επιδεξιότητά του στην εκτέλεση πειραμάτων για την οποία είναι, βεβαίως, διάσημος. Αν οι μαθητές, αρχικά, δεν μπορέσουν να αντιληφθούν την ταυτότητα των φαινομένων ούτε να παραθέσουν κάποιες ενδείξεις για τις αλληλοσυσχετίσεις τους, τότε βρίσκονται σε περιβάλλον από το οποίο έχουν πολλά να ωφεληθούν.

«Το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται, κατά τη γνώμη μου, από αυτή τη συλλογή γεγονότων», γράφει ο Faraday, «είναι ότι η φύση του ηλεκτρισμού, οποιαδήποτε κι αν είναι η προέλευσή του, είναι μία και μοναδική. Τα πέντε είδη ή κατηγορίες φαινομένων που παραθέτουμε δεν διαφέρουν ως προς το χαρακτήρα τους, αλλά ως προς την έντασή τους. Μεταβάλλονται, λοιπόν, αναλόγως της ποσότητας και της έντασης.»

Δεν είναι, βέβαια, απαραίτητο να προσπαθήσουμε να επαναλάβουμε όλα τα στάδια των πειραμάτων του Faraday. Είναι, ωστόσο, ιδιαίτερα χρήσιμο να κατευθύνουμε τους μαθητές να εκτελέσουν λίγα από τα πειράματα (ή, τουλάχιστον, να παρακολουθήσουν να εκτελούνται με πειστικό τρόπο) και να μελετήσουν τα φαινόμενα που εμφανίζονται σ' αυτά. Η σημαντικότερη σύνδεση, που πρέπει να γίνει από νωρίς, είναι αυτή μεταξύ των ηλεκτροστατικών φαινομένων, της βολταϊκής στήλης και της οικιακής πρίζας. Σε αυτή την περίπτωση, η σύνδεση με τις υπόλοιπες πηγές γίνεται με εύλογο τρόπο και χωρίς περιπλοκές. Παρουσιάζοντας τον πίνακα του Faraday και διηγούμενοι τα γεγονότα που σχετίζονται μ' αυτόν, βοηθάμε τους μαθητές να αντιληφθούν τη σύνδεση που προαναφέραμε.

Ας θεωρήσουμε ότι έχουμε διερευνήσει τα φαινόμενα της ηλεκτροστατικής και ότι έχουμε αναπτύξει τις έννοιες «φορτίο», «αγωγός», «μονωτής», «διαρροή φορτίου», «ηλεκτροστατική επαγωγή» και «πόλωση». Ας θεωρήσουμε, επίσης, ότι οι μαθητές είναι εξοικειωμένοι με τη χρήση του ηλεκτροσκοπίου και μπορούν με τη βοήθειά του να εξάγουν ποιοτικά συμπεράσματα. Μπορούμε, λοιπόν, να επικαλεστούμε την επόμενη σειρά πειραμάτων που εκτελούνται με τις συσκευές του Σχ. 7.3.1 (βλ. επόμενη σελίδα).

Φορτίζουμε τις πλάκες του πυκνωτή με έναν από τους εξής τέσσερις τρόπους: 1) στη μια πλάκα ακουμπάμε μια πλαστική ή γυάλινη ράβδο την οποία έχουμε τρώψει με γούνα ή μετάξι, αγγίζοντας ή γειώνοντας, ταυτόχρονα, την άλλη πλάκα (η πλάκα αυτή φορτίζεται με επαγωγή)· 2) συνδέουμε τις πλάκες στα δύο άκρα της μηχανής Wimshurst ή οποιασδήποτε ηλεκτροστατικής γεννήτριας· 3) συνδέουμε τις πλάκες με τα άκρα μιας βολταϊ-



Σχήμα 7.3.1 (α) Ο πυκνωτής και το ηλεκτροσκόπιο έχουν φορτιστεί με τη βοήθεια φορτισμένης ράβδου ή μηχανής Wimshurst. Μια ελαφριά σφαίρα, καλυμμένη με αγώγιμο υλικό, ταλαντώνεται δεξιά-αριστερά μεταφέροντας φορτίο από τη μια πλάκα του πυκνωτή στην άλλη. Αν οι πλάκες δεν τροφοδοτούνται συνεχώς με φορτίο, το φαινόμενο εξασθενεί. (β) Ο πυκνωτής και το ηλεκτροσκόπιο συνδέονται με μια βολταϊκή μπαταρία ή με μια πηγή υψηλής τάσης (120 V) ή με μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια. Με το ηλεκτροσκόπιο διαπιστώνεται η παρουσία φορτίου. Το σύστημα συμπεριφέρεται ακριβώς όπως η συσκευή της περίπτωσης (α).

κής μπαταρίας αρκετά υψηλής τάσης (τρεις-τέσσερις μπαταρίες των 90V είναι, συνήθως, αρκετές)· 4) συνδέουμε τις πλάκες με τα άκρα ενός ανορθωτή υψηλής τάσης (120 V) ή κατευθείαν με την ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια.

Συνδέουμε ένα ηλεκτροσκόπιο με τις πλάκες, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η απόκλιση των φύλλων του ηλεκτροσκοπίου παρακολουθεί τις μεταβολές του φορτίου των πλακών. Μεταξύ των πλακών αιωρείται μια ελαφριά σφαίρα, καλυμμένη με αγώγιμο υλικό, η οποία ταλαντώνεται ελεύθερα. Όταν οι πλάκες είναι φορτισμένες, η σφαίρα ταλαντώνεται δεξιά-αριστερά, μεταφέροντας φορτίο μεταξύ των πλακών. (Στο πλαίσιο της ηλεκτροστατικής, οι μαθητές έχουν ήδη παρακολουθήσει την επίδειξη με την ταλαντούμενη σφαίρα· ζητάμε, λοιπόν, να περιγράψουν και να αναλύσουν τη διαδικασία μεταφοράς φορτίου, πριν επιχειρήσουμε την παρούσα διερεύνηση.)

Παρατηρούμε ότι κατασκευάσαμε έναν μικρό «κινητήρα»: είναι, καταρχάς, δυνατό να λάβουμε μηχανικό έργο από την κίνηση της σφαίρας. Όταν ο κινητήρας λειτουργεί, μεταφέρεται φορτίο μεταξύ των πλακών. Στον 1ο τρόπο φόρτισης, παρατηρούμε ότι, καθώς η σφαίρα συνεχίζει να ταλαντώνεται, η απόκλιση του ηλεκτροσκοπίου μειώνεται: οι πλάκες εκφορτίζονται και η ταλάντωση εξασθενεί. Η ίδια τελική κατάσταση προκύπτει αν συνδέσουμε τις δύο πλάκες με σύρμα (ή υγρό νήμα)· ωστόσο, σε τούτη την περίπτωση, επειδή η εκφόρτιση συμβαίνει πολύ γρήγορα, είναι αδύνατο να αντιληφθούμε πόσο διαρκεί το φαινόμενο· στην περίπτωση της ταλαντούμενης σφαίρας αυτό δεν συμβαίνει.

Με τον 2ο τρόπο φόρτισης, προκαλούμε παρόμοια ταλάντωση της

σφαίρας· ωστόσο, όσο χρόνο περιστρέφουμε τη μηχανή Wimshurst, η ταλάντωση διατηρείται και στο ηλεκτροσκόπιο εμφανίζεται απόκλιση. Αν σταματήσουμε την περιστροφή της μηχανής, η εκφόρτιση ακολουθεί τον 1ο τρόπο. Με άλλα λόγια, στο σύστημα η μεταφορά φορτίου διατηρείται υπό τον όρο ότι τροφοδοτούμε συνεχώς τις πλάκες με ηλεκτροστατικό φορτίο, το οποίο παράγεται με τριβή.

Με τον 3ο και τον 4ο τρόπο φόρτισης, στο ηλεκτροσκόπιο εμφανίζεται απόκλιση και η σφαίρα ταλαντώνεται συνεχώς. Επειδή η μπαταρία και ο ανορθωτής παράγουν παρόμοια φαινόμενα (απόκλιση του ηλεκτροσκοπίου και ταλάντωση της σφαίρας) με τα φαινόμενα που προκαλούν οι φορτισμένες ράβδοι και η μηχανή του Wimshurst, συμπεραίνουμε ότι τα ηλεκτρικά φαινόμενα που υπεισέρχονται στις τέσσερις περιπτώσεις είναι κοινά. (Βέβαια, η συγγένεια αποδεικνύεται περαιτέρω με τις υπόλοιπες παρατηρήσεις του Faraday, λόγου χάρη με τους σπινθήρες, τα τινάγματα, τα χημικά και μαγνητικά αποτελέσματα κ.ά.). Αν συνδέσουμε τις πλάκες μεταξύ τους με σύρμα (μεγάλης αντίστασης, βέβαια) ή με βρεγμένο νήμα, η σφαίρα συνεχίζει να ταλαντώνεται και η απόκλιση του ηλεκτροσκοπίου διατηρείται. Στις συγκεκριμένες συνθήκες, το φορτίο μεταφέρεται συνεχώς μέσω του σύρματος, ανεξαρτήτως της παρουσίας της σφαίρας. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι οι δύο πηγές έχουν εξίσου τη δυνατότητα να τροφοδοτούν συνεχώς τις πλάκες με φορτίο όπως ακριβώς, περιστρέφοντας αδιάκοπα τη μηχανή Wimshurst, τροφοδοτούμε συνεχώς τις πλάκες με φορτίο το οποίο παράγεται με τριβή.

Τα φαινόμενα που προκαλεί η μπαταρία (αλλά και οι ηλεκτρομαγνητικές πηγές) είναι συνεχή: η ηλεκτρόλυση και η παραγωγή θερμότητας σε σύρματα (φαινόμενο Joule) είναι συνεχή φαινόμενα· στο πείραμα του Oersted, η πυξίδα αποκλίνει συνεχώς. Τα φαινόμενα αυτά, μάλιστα, έχουν δυναμικό (όχι στατικό) χαρακτήρα: μόλις διακόψουμε το ρεύμα, εξαφανίζονται.

Συσχετίζοντας τα φαινόμενα που προαναφέραμε, μπορούμε δικαιολογημένα, πλέον, να χρησιμοποιούμε τον όρο «ηλεκτρικό φορτίο» (και «μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου»), για να περιγράψουμε τις φαινομενικά διαφορετικές περιπτώσεις. Στηριζόμενοι σ' αυτή την κοινή βάση και στο ότι η μεταφορά του φορτίου είναι συνεχής (αν «ο βρόχος παραμένει κλειστός»), νομιμοποιούμαστε, επίσης, να εισαγάγουμε τους όρους «κύκλωμα» και «ηλεκτρικό ρεύμα».

Τα περισσότερα εγχειρίδια εισάγουν, χωρίς ιδιαίτερη προσοχή και σαφήνεια, τους τεχνικούς όρους· είναι, λοιπόν, ωφέλιμο να αναφέρουμε πώς αισθανόταν ο ίδιος ο Faraday για την ορολογία: «Δεν γνωρίζω αν υπάρχουν δύο ρευστά ή ένα ρευστό», γράφει, «ή αν υπάρχει καν ρευστό ηλεκτρισμού ή κάτι το οποίο αποκαλούμε δικαιολογημένα ρεύμα· υπάρχουν, ωστόσο, ηλεκτρικές καταστάσεις τις οποίες γνωρίζουμε με ακρίβεια και φαινόμενα

όπου για να τα περιγράψουμε χρησιμοποιούμε γενικά τους όρους "στατικός", "δυναμικός" και "ρεύμα". Αυτοί οι όροι περιγράφουν, με την επιφύλαξη που προανέφερα, εξίσου σωστά τις καταστάσεις και τα φαινόμενα».

Είναι ωφέλιμο να αντιλαμβανόμαστε και να σεβόμαστε τις «επιφυλάξεις» των μαθητών απέναντι στο συγκεκριμένο θέμα και να παρουσιάζουμε με σαφήνεια τις παρατηρήσεις που οδήγησαν στην έννοια της μεταφοράς του ηλεκτρικού φορτίου. Η κατανόηση της φυσικής προκύπτει τόσο από την επίλυση των προβλημάτων που ακολουθούν όσο και από την κατανόηση της σύνδεσης μεταξύ των φαινομένων και των εννοιών.

7.4 Μπαταρίες και λάμπες (I): διαμόρφωση των βασικών εννοιών που υπεισέρχονται στα κυκλώματα.

Για να καταδείξω τη σημασία της απτής εμπειρίας στη διαμόρφωση των αφηρημένων εννοιών και των προτύπων που μελετάμε στο παρόν Κεφάλαιο, παραθέτω την εμπειρία μου με σπουδαστές οι οποίοι μελετούσαν θέματα ηλεκτρισμού και απλά κυκλώματα. Το δείγμα μου αποτελούνταν από φοιτητές Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης, από φοιτητές Τμημάτων θεωρητικών επιστημών που παρακολουθούσαν ένα γενικό μάθημα φυσικής και από δασκάλους δημοτικού που παρακολουθούσαν θερινά επιμορφωτικά σεμινάρια. Κατά τη διάρκεια της σχολικής εμπειρίας τους ή σε άλλες συνθήκες, όλοι είχαν ακούσει για «ηλεκτρικά κυκλώματα» και είχαν «εκτεθεί» σε προφορικές διακηρύξεις για τα γεγονότα και τις έννοιες που αφορούν το ηλεκτρικό ρεύμα. Οι περισσότεροι, μάλιστα είχαν δει σχέδια ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε βιβλία ή στον πίνακα. Ουδείς, ωστόσο, είχε παρακολουθήσει μια πλήρη σειρά μαθημάτων φυσικής.

Έδωσα στους σπουδαστές ένα ξηρό ηλεκτρικό στοιχείο, ένα κομμάτι σύρμα και ένα λαμπάκι φακού και τους ζήτησα να ανάψουν το λαμπάκι. Οι περισσότεροι τοποθέτησαν τη μια άκρη του σύρματος στη μια άκρη της μπαταρίας και το άλλο άκρο του σύρματος στη βάση της λάμπας ή συνέδεσαν τα δύο άκρα της μπαταρίας με το σύρμα (οπότε βραχυκύκλωναν την μπαταρία) και ακούμπησαν το λαμπάκι στο ένα άκρο. Αποδείχθηκε, λοιπόν, ότι δεν αντιλαμβάνονταν τον λειτουργικό ρόλο των δύο άκρων της μπαταρίας και της λάμπας. Ελάχιστοι, επίσης, παρατήρησαν πως όταν συνέδεαν το σύρμα με τα άκρα της μπαταρίας, το σύρμα ζεσταινόταν· ωστόσο, ακόμα και όσοι το παρατήρησαν δεν συμπεράναν κάτι ιδιαίτερο. Χρειάστηκε να περάσουν είκοσι με τριάντα λεπτά μέχρι τα πρώτα μέλη της ομάδας να ανακαλύψουν, μέσω της δοκιμής και του λάθους, έναν τρόπο συνδεσμολογίας με τον οποίο άναψε το λαμπάκι. Κατόπιν, βέβαια, η πληροφορία διαδόθηκε. Όταν σε παιδιά επτά χρόνων δόθηκε το ίδιο πρόβλημα, ακολούθησαν, συμπτωματικά, ακριβώς την ίδια διαδικασία και σχεδόν με τον

ίδιο ρυθμό.

Αν η έννοια του «ηλεκτρικού κυκλώματος» δεν έχει συνδεθεί με απτή εμπειρία, οι ενήλικοι (ανεξαρτήτως των τεχνικών όρων που γνωρίζουν, των σχημάτων και των εικόνων που, ενδεχομένως, έχουν δει και των αναλύσεων και των περιγραφών που, ενδεχομένως, έχουν διαβάσει ή ακούσει), δεν δείχνουν ότι έχουν κατανοήσει τις ιδέες περισσότερο από ένα παιδί επτά χρόνων το οποίο για *πρώτη φορά* παρατηρεί τα αντίστοιχα φαινόμενα. Η αποκλειστικά προφορική διδασκαλία και η παθητική συμμετοχή δεν αφήνουν ουσιαστικά ίχνος γνώσης και κατανόησης. Στις ομάδες που προαναφέραμε, μόνον τα άτομα που είχαν άμεση εμπειρία με ηλεκτρικά κυκλώματα άναψαν γρήγορα το λαμπάκι· λόγου χάρη, κάποιος απ' αυτούς ήταν ηλεκτρονικός εν ενεργεία.

Άριστος τρόπος να κατευθύνουμε τους μαθητές να οικοδομήσουν το αφηρημένο πρότυπο και τις έννοιες που συνδέονται με απλά κυκλώματα είναι να τους ζητήσουμε να συνεχίσουν τη μελέτη τους, η οποία άρχισε με τον τρόπο που προαναφέραμε. Είναι απαραίτητο να τους κατευθύνουμε να σχεδιάσουν όλες τις συνδεσμολογίες που δοκίμασαν στην πράξη: τόσο εκείνες με τις οποίες το λαμπάκι δεν άναψε, όσο κι εκείνες με τις οποίες άναψε. Είναι, επίσης, απαραίτητο να τους κατευθύνουμε να συγκρίνουν τις δύο ομάδες και να περιγράψουν με λόγια τα κοινά χαρακτηριστικά των πετυχημένων συνδεσμολογιών και τις διαφορές τους με τις συνδεσμολογίες της άλλης ομάδας. Από τη στιγμή που οι μαθητές έχουν αντιληφθεί σαφώς τον βαθύτερο λόγο ύπαρξης δύο άκρων σε κάθε στοιχείο του κυκλώματος και την αναγκαιότητα κατασκευής συνεχούς βρόχου, έχουν, πλέον, καταλήξει σε μια ουσιώδη λειτουργική περιγραφή. Μπορούμε, λοιπόν, να εισαγάγουμε τον τεχνικό όρο «κύκλωμα». (Παρατηρήστε ότι παραμένουμε προσηλωμένοι στον κανόνα «η ιδέα προηγείται και η ονομασία ακολουθεί».)

Παρεμβάλλοντας στο βρόχο διαφορετικά αντικείμενα αποτελούμενα από διαφορετικό υλικό (νομίσματα, μολύβια, κλειδιά, κομμάτια γυαλί, ελαστικές λωρίδες, νήματα, χαρτιά κ.ά.), οι μαθητές οδηγούνται να κατατάξουν τα υλικά σ' εκείνα με τα οποία το λαμπάκι ανάβει και σ' εκείνα με τα οποία δεν ανάβει· απαραίτητη προϋπόθεση, βέβαια, είναι να έχουν εκτελέσει την κατάλληλη συνδεσμολογία. Διαμορφώνουμε, λοιπόν, τον λειτουργικό ορισμό των εννοιών «αγωγός» και «κακός αγωγός» ή «μονωτής» και εισάγουμε τους αντίστοιχους τεχνικούς όρους. Σ' αυτό το στάδιο, είναι πλέον δυνατό να κατατάξουν οι μαθητές τον αέρα στους κακούς αγωγούς.

Αφού οι μαθητές εξοικειωθούν με συνεχείς επαναλήψεις αυτής της κατάστασης, αντιλαμβάνονται ότι εκδηλώνεται ένα δυναμικό και όχι στατικό φαινόμενο: τα αποτελέσματα (η θέρμανση του σύρματος και η φωτοβολία της λάμπας) σταματούν όταν ο βρόχος διακοπεί ή δεν συμπληρωθεί με την παρεμβολή αγωγικών αντικειμένων. Η ύπαρξη δύο άκρων σε κάθε αντικείμενο και η απαίτηση να είναι ο βρόχος συμπληρωμένος οδηγούν στο συμ-

πέρασμα ότι εκδηλώνεται μια συνεχής δυναμική διαδικασία. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει, επίσης, από το ότι η μπαταρία «αδειάζει». Το γεγονός ότι η φωτοβολία της λάμπας παραμένει σταθερή, ανεξαρτήτως της θέσης της στο βρόχο (είτε βρίσκεται κοντά στην μπαταρία είτε στο μέσο του βρόχου, αν χρησιμοποιήσουμε δύο σύρματα) και το ότι, αν συνδέσουμε ένα σύρμα μεταξύ των άκρων της μπαταρίας θερμαίνεται ομοιόμορφα σε όλο το μήκος του, καταδεικνύουν ότι ο συνεχής και δυναμικός χαρακτήρας του φαινομένου εκδηλώνεται σε όλη την έκταση του συστήματος. Η ομοιομορφία της θέρμανσης της θερμάστρας και της ψηστιέρας αποτελεί συμπληρωματική απόδειξη της ομοιομορφίας της θέρμανσης των συρμάτων (οι περισσότεροι μαθητές, ωστόσο, αν και γνωρίζουν το γεγονός, δεν το επικαλούνται μόνοι τους). Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να επισημάνουμε με *σαφήνεια* το εξής: ανεξαρτήτως της φύσης του φαινομένου που συμβαίνει στο εσωτερικό του βρόχου και που δεν μπορούμε να το παρατηρήσουμε, η έντασή του δεν είναι μεγαλύτερη πλησίον του ενός άκρου από όσο είναι πλησίον του άλλου· είναι αδύνατο να διακρίνουμε ορισμένη κατευθυντικότητα.

Η εκδήλωση ενός δυναμικού φαινομένου σταθερής έντασης, κατά μήκος όλου του βρόχου, μας παρακινεί να δημιουργήσουμε ένα ιδεατό πρότυπο γι' αυτό το αόρατο φαινόμενο: υπάρχει συνεχής ροή κατά μήκος του συστήματος. (Είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι τα στοιχεία που προσδιορίσαμε και παραθέσαμε δεν «αποδεικνύουν» ότι υπάρχει, όντως, «ροή» ούτε μας «λένε» κάτι για το είδος του «ρευστού». Δημιουργούμε, απλώς, ένα εύλογο πρότυπο στηριζόμενοι σε ποιοτικές παρατηρήσεις. Πρέπει, μάλιστα, σε διαφορετικές συνθήκες να ελέγξουμε και να επαληθεύσουμε την ισχύ του προτύπου.) Τη συνεχή ροή (την οποία, προς το παρόν, φανταζόμαστε) ονομάζουμε «ηλεκτρικό ρεύμα» ή, απλώς, «ρεύμα».

Αν από προηγούμενη μελέτη οι μαθητές δεν γνωρίζουν τις έννοιες «ηλεκτρικό φορτίο» και «ενέργεια», δυσκολεύονται, βέβαια, να διακρίνουν τι «καταναλώνεται» και τι δεν «καταναλώνεται» στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Σε αυτή την περίπτωση, δεν έχουμε πολλές επιλογές: καταφεύγουμε στη διατύπωση κατάλληλων υποθέσεων που τις επαληθεύουμε στη συνέχεια των μαθημάτων. Αν οι μαθητές γνωρίζουν τις εν λόγω έννοιες, επικαλούμαστε την προηγούμενη εμπειρία τους: από το νόμο διατήρησης του φορτίου και από την απουσία ένδειξης για δημιουργία φορτίου σε κάποιο σημείο του κυκλώματος, συμπεραίνουμε ότι το φορτίο δεν «χάνεται», δεν «αναβλύζει» ούτε «μετατρέπεται» απλώς μεταφέρεται. Ωστόσο, η παραγωγή φωτός και θερμότητας, η οποία συνδέεται με το «άδειασμα» της μπαταρίας και τις χημικές μεταβολές που συμβαίνουν σ' αυτή ή με το μηχανικό έργο της γεννήτριας, υποδηλώνει ότι η συνεχής μεταφορά του (διατηρούμενου) φορτίου συνδέεται με ενεργειακές μετατροπές.

Στο παρόν στάδιο, είναι, πλέον, δυνατό να χρησιμοποιήσουμε τις έννοιες «κύκλωμα», «αγωγός», «κακός αγωγός» και «ρεύμα», για να ερευνήσουμε

τον τρόπο κατασκευής της λάμπας, του ντουί και του διακόπτη. Χρησιμοποιώντας το άναμμα και το σβήσιμο της λάμπας ως ένδειξη, μπορούμε να κατευθύνουμε τους μαθητές να εξετάσουν τον τρόπο κατασκευής κάθε συσκευής, προσδιορίζοντας το ρόλο των αγωγίων και μονωτικών τμημάτων της.

Οι περισσότεροι αρχάριοι γνωρίζουν ελάχιστα ή καθόλου τον τρόπο κατασκευής ακόμα και μιας απλής λάμπας. Σε αυτή την περίπτωση, βοηθά να σπάσουμε το γυάλινο κάλυμμα και να τους αφήσουμε να εξετάσουν προσεκτικά τον τρόπο κατασκευής. Αρχικά, ελάχιστοι μαθητές γνωρίζουν σαφώς ότι στη λάμπα υπάρχουν δύο άκρα. Δεν διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ του μεταλλικού άκρου στη βάση της λάμπας και του μεταλλικού καλύμματος με τις σπείρες. Δεν προσέχουν, επίσης, την παρουσία του μονωτικού υλικού ούτε αντιλαμβάνονται το σκοπό και τη λειτουργία του. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να εντοπίσουν αυτά τα χαρακτηριστικά με τη βοήθεια του ανάμματος ή του σβήσιματος μιας ενδεικτικής λάμπας. Βεβαιώνονται, έτσι, ποια στοιχεία του κυκλώματος είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και ποια δεν είναι. Τέλος, συνδέουμε τη λάμπα με το σπασμένο κάλυμμα με την μπαταρία. Οι μαθητές εκπλήσσονται παρατηρώντας τη σύντομη αναλαμπή με την οποία καίγεται το λεπτό νήμα της λάμπας. Αυτή η παρατήρηση είναι δυνατό να αποτελέσει αφορμή για νέο κύκλο μελέτης.

Οι μαθητές είναι απαραίτητο να μελετήσουν, επίσης, τη λειτουργία του διακόπτη (ακόμα κι αν πρόκειται για απλό μαχαιρωτό διακόπτη) και του ντουί. Για τους αρχάριους, όπως εκείνοι που ποτέ πριν δεν αφομοίωσαν τις απαραίτητες έννοιες και δεν κατόρθωσαν να ανάψουν τη λάμπα στη δοκιμασία που προαναφέραμε, η συγκεκριμένη μελέτη δεν είναι καθόλου τετριμμένη. Είναι αναγκαίο να τους κατευθύνουμε να περιγράψουν με δικά τους λόγια τα χαρακτηριστικά και το σκοπό κάθε τμήματος της κατασκευής (αφού προσδιορίσουν τη θέση των αγωγίων και των μη αγωγίων τμημάτων): είναι, επίσης, αναγκαίο να αναρωτηθούν τι θα συνέβαινε ή τι δεν θα συνέβαινε, αν τα αντικείμενα ήταν εξ ολοκλήρου κατασκευασμένα από αγωγία ή μονωτικά υλικά.

Αν και οι τελευταίες ερωτήσεις φαίνονται γελοιωδώς απλές, εντούτοις δεν είναι. Οι περισσότεροι μαθητές εκπλήσσονται απ' αυτή τη μελέτη και τη θεωρούν, τελικά, χρήσιμη. Είναι τετριμμένη μόνο για όσους μαθητές διαθέτουν ήδη την αντίστοιχη εμπειρία. Αυτοί, λοιπόν, δεν χρειάζεται να ασχοληθούν με όλες τις λεπτομέρειες. Οι καθηγητές, ωστόσο, κατά τη διδασκαλία των βασικών εννοιών του ηλεκτρισμού, κάνουν συνήθως το εξής λάθος: θεωρούν ότι όλοι γνωρίζουν αυτές τις έννοιες και δεν συνειδητοποιούν ότι για πολλούς μαθητές αυτό δεν ισχύει. Σε ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής για μαθητές θετικής κατεύθυνσης, ένα μεγάλο ποσοστό (περίπου 30%, και σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμα μεγαλύτερο) δεν είναι εξοικειωμένο με τις βασικές ιδέες: σε τμήματα θεωρητικής κατεύθυνσης, το ποσοστό αυξάνεται και φτάνει το 90%. Η εμπειρία της χρήσης στο δημοτικό του

βιβλίου «Batteries and Bulbs» δείχνει ότι η απαραίτητη κατανόηση είναι δυνατό να επιτευχθεί ήδη από το δημοτικό, μέσω της απτής εμπειρίας που περιγράψαμε. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει επειδή ελάχιστοι δάσκαλοι του δημοτικού έχουν οι ίδιοι κατανοήσει τα ζητήματα στον απαιτούμενο βαθμό. Η ανάγκη διδασκαλίας των εν λόγω βασικών εννοιών στο γυμνάσιο και το λύκειο δεν θα πάψει να υφίσταται, παρά μόνο αν εφοδιάσουμε τους δασκάλους του δημοτικού με την αυτοπεποίθηση που γεννά η κατανόηση αυτών των ζητημάτων.

Ερευνώντας τους παράγοντες που επηρεάζουν τη λάμψη της λάμπας, δηλαδή την *ένταση* του φαινομένου, πραγματοποιούμε ένα λογικό βήμα στην ανάπτυξη των εννοιών και την εκλέπτυνση του προτύπου. Συνδέοντας σε σειρά μια δεύτερη λάμπα ή παρεμβάλλοντας στο κύκλωμα σύρμα χρωμονικελίνης μεγαλύτερου μήκους από του αρχικού και χρησιμοποιώντας την ίδια μπαταρία, η λάμψη της λάμπας και στις δύο περιπτώσεις μειώνεται. Προκύπτει, λοιπόν, ότι μπορούμε να ελαττώσουμε την «ένταση» ή το «σθένος» του ηλεκτρικού ρεύματος, παρεμβάλλοντας σε σειρά στο βρόχο περισσότερο υλικό. Διαφορετικά υλικά ή διαφορετικές ποσότητες προκαλούν διαφορετικό αποτέλεσμα: «εμποδίζουν» σε διαφορετικό βαθμό τη ροή. Από την παρατήρηση αυτή διαμορφώνουμε την έννοια της «ηλεκτρικής αντίστασης».

Παρατηρήστε ότι η έννοια αναδύεται με φυσιολογικό και εύλογο τρόπο από την ακολουθία των λειτουργιών που περιγράψαμε: *επινοήσαμε* την έννοια, για να προσαρμόσουμε το πρότυπό μας στις νέες παρατηρήσεις. Σε ορισμένες παρουσιάσεις, η έννοια εισάγεται μέσω της διακήρυξης ότι το ρεύμα μειώνεται «*λόγω* της αντίστασης του παρεμβαλλόμενου υλικού»: θεωρούμε δηλαδή ότι η έννοια της «αντίστασης» είναι εξ υπαρχής αναγκαία και ο συγκεκριμένος όρος ερμηνεύει το αίτιο του φαινομένου. Στους μαθητές, λοιπόν, δημιουργείται η εντύπωση ότι ανέκαθεν οι επιστήμονες γνώριζαν την έννοια, η οποία τους φανερώθηκε εξ αποκαλύψεως. Δεν αντιλαμβάνονται ότι πρόκειται για έννοια την οποία επινοήσαμε, για να περιγράψουμε φαινόμενα που οι ίδιοι οι μαθητές μπορούν να αναπαραγάγουν με αντικείμενα της καθημερινής ζωής. Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτής της παρατήρησης, οι μαθητές δεν αντιλαμβάνονται σαφώς την προέλευση των επιστημονικών εννοιών. Την εν λόγω μέθοδο παρουσίασης αποκαλώ «οπισθοδρομική επιστήμη» και θεωρώ ότι εμποδίζει τη μάθηση και την κατανόηση.

Σε σύνδεση με την έννοια της αντίστασης (ή με την αντίστροφη έννοιά της, την αγωγιμότητα), είναι ενδιαφέρον και διδακτικό να σημειώσουμε πώς ο Cavendish συνέκρινε την αγωγιμότητα διαφορετικών υλικών. Φόρτιζε με τριβή μια γεννήτρια, περιστρέφοντάς την συγκεκριμένες φορές, και χρησιμοποιούσε σύρματα της ίδιας διαμέτρου, αλλά διαφορετικού υλικού. Καθώς η γεννήτρια εκφορτιζόταν, μέσω του σύρματος και του σώματός του, ο Cavendish αισθανόταν το τίναγμα. Συγκρίνοντας μεταξύ τους τα μή-

κη των συρμάτων που του προκαλούσαν τίναγμα παρόμοιας έντασης, κατέληξε σε μια σωστή, από ποιοτική άποψη, κατάταξη των αγωγιμοτήτων. (Είναι διδακτικό να σημειώσουμε ότι ο Cavendish εκτέλεσε την έρευνά του τριάντα χρόνια πριν από τη δημοσίευση του νόμου του Ohm.) Τότε οι επιστήμονες δεν είχαν ακόμα ποσοτικοποιήσει τις έννοιες του ρεύματος και της διαφοράς δυναμικού, τις είχαν ωστόσο διαχωρίσει. Ακόμα και ο ίδιος ο Ohm στο πρώτο άρθρο του μετρούσε την αντίσταση μέσω του μήκους του σύρματος (βλ. εδάφιο 7.6). Στο πλαίσιο της σειράς «Batteries and Bulbs» οι μαθητές είναι δυνατό να διακρίνουν άμεσα τη σύνδεση μεταξύ της ιστορίας αυτής και της διαδικασίας με την οποία επινοήθηκε η έννοια της αντίστασης.

7.5 Μπαταρίες και λάμπες (II): φαινομενολογία απλών κυκλωμάτων

Η έρευνα του τρόπου με τον οποίο οι μαθητές μαθαίνουν και αντιλαμβάνονται τις έννοιες δείχνει ότι, στο πλαίσιο των συμβατικών παρουσιάσεων των εγχειριδίων που περιλαμβάνουν τη διατύπωση και εφαρμογή του νόμου του Ohm και των νόμων του Kirchhoff, ελάχιστοι μαθητές, ακόμα και θετικής κατεύθυνσης, κατανοούν σαφώς τη λειτουργία ενός κυκλώματος συνεχούς ρεύματος [βλ. π.χ. Arons (1982)]. Μπορούν, βέβαια, να επιλύσουν τα συμβατικά προβλήματα που υπάρχουν στο τέλος του αντίστοιχου κεφαλαίου. Ωστόσο, πολλοί δεν μπορούν να προβλέψουν ποιοτικά τι θα συμβεί στο ρεύμα σε διάφορα σημεία του κυκλώματος ή στη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων, αν τροποποιήσουμε το κύκλωμα, λόγου χάρη προσθέτοντας ή αφαιρώντας κάποια αντίσταση ή βραχυκυκλώνοντας δύο σημεία του. Η συγκεκριμένη αδυναμία φανερώνει ότι οι μαθητές έχουν κατανοήσει ελλιπώς τις έννοιες· μπορούμε ωστόσο να τους βοηθήσουμε, δίνοντάς τους την ευκαιρία να εξασκηθούν στην εκτέλεση ποιοτικών συλλογισμών.

Απλές συνδεσμολογίες με μπαταρίες και λάμπες αποτελούν κατάλληλη ευκαιρία για εξάσκηση. Στο Παράρτημα 7Α υπάρχουν ορισμένα αποτελεσματικά παραδείγματα εργασίας για το σπίτι και ερωτήσεων για τεστ. Μπορούμε, βέβαια, να αλλάξουμε τη μορφή των παραδειγμάτων. Σε συνδυασμό με ερωτήσεις, όπως εκείνες του Παραρτήματος 7Α, είναι σκόπιμο οι μαθητές να εκτελούν τα πραγματικά πειράματα· πρέπει, λοιπόν, να τους προτρέψουμε να τα συμπεριλάβουν στην εργασία τους για το σπίτι. Ο απαραίτητος εξοπλισμός (λάμπες για φακούς, μπαταρίες, ντουί και σύρμα) διατίθεται στα καταστήματα ηλεκτρονικού εξοπλισμού, και οι μαθητές μπορούν να τα προμηθευτούν εύκολα. Όταν είχα την απαραίτητη υποστήριξη, διατηρούσα μια σειρά από παρόμοια εξαρτήματα και τη δάνειζα στους μαθητές. Χρησιμοποιούσαν τα εξαρτήματα για εργασία στο σπίτι για ένα ή δύο βράδια.

Στα πρώτα πειράματα, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούμε έναν τύπο λά-

μπας, για να διατηρούμε σταθερή την αντίσταση των στοιχείων των απλών κυκλωμάτων που εξετάζουμε. Διαφορετικοί τύποι λάμπας διαφέρουν σημαντικά ως προς την εσωτερική αντίστασή τους· έτσι, αν κάθε φορά χρησιμοποιούμε διαφορετικό τύπο λάμπας, ήδη από το πρώτο στάδιο περιπλέκουμε ακόμα περισσότερο τα παρατηρούμενα φαινόμενα. (Το ότι, αν μεταβληθεί η θερμοκρασία της λάμπας — συνεπώς, και η φωτοβολία της — μεταβάλλεται και η αντίστασή της, δεν επηρεάζει σημαντικά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των παρατηρήσεων ούτε την ερμηνεία τους.)

Στο πλαίσιο της εργασίας για το σπίτι, είναι σκόπιμο να παροτρύνουμε τους μαθητές να εργαστούν κατά ζεύγη, αν, βέβαια, αυτό είναι εύκολο: ^{600V} ~~αυ~~ ^{600V} φέρει σημαντικά στη μάθησή τους, αν έχουν την ευκαιρία να συζητήσουν για τις παρατηρήσεις και τα πειράματά τους, να υποστηρίξουν τις απόψεις τους και να ερμηνεύσουν τα συμπεράσματά τους. Σημαντική παρατήρηση που αφορά την εργασία στο σπίτι είναι η εξής: αν η εργασία που τους αναθέτουμε δεν είναι συγκεκριμένη, με αρχή και τέλος, αλλά τους δίνουμε τα εξαρτήματα ζητώντας τους αόριστα να εκτελέσουν «κάποια» έρευνα και «κάποιες» παρατηρήσεις, τότε η προσπάθεια αποδεικνύεται όντως περιττή· οι μαθητές «χαζεύουν δεξιά και αριστερά» με τις συσκευές, δοκιμάζουν άσκοπα διάφορες διατάξεις και ελάχιστοι εκτελούν συγκεκριμένες παρατηρήσεις ή πειράματα. Δεν κατορθώνουν να εντοπίσουν συστηματικά τις μεταβολές που εμφανίζονται· δεν επιβάλλουν σκόπιμες αλλαγές στο κύκλωμα, για να προβλέψουν ή να ερμηνεύσουν το αποτέλεσμα· δεν κατορθώνουν να επινοήσουν ενδιαφέρουσες και γόνιμες συνδεσμολογίες, τουλάχιστον σε αρχικό στάδιο. Είναι, λοιπόν, αναγκαίο να κατευθύνουμε τους περισσότερους μαθητές να διεξαγάγουν συγκεκριμένη σειρά ερευνών, παρέχοντάς τους αρχικές υποδείξεις και κατευθυντήριες ερωτήσεις (δεν πρέπει, όμως, να είναι «συνταγές», οι οποίες καταστρέφουν το ενδιαφέρον της αναζήτησης). Έτσι, ορισμένοι προχωρούν στην επινοήση δικών τους γόνιμων διατάξεων· άλλοι, ωστόσο, ουδέποτε φτάνουν σ' αυτό το επίπεδο αναζήτησης. [Στο 9ο Κεφάλαιο του βιβλίου «The Various Language» (Arons 1977), υπάρχει παράδειγμα του τρόπου καθοδήγησης και της σειράς των ερωτήσεων που είναι αναγκαίες για τους μαθητές.]

Σε αρχικό στάδιο των ερευνών τους, οι μαθητές είναι αναγκαίο να γνωρίσουν άμεσα τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά απλών κυκλωμάτων που περιλαμβάνουν αντιστάσεις, για να μελετήσουν ορισμένες πρωταρχικές ιδέες και έννοιες:

1. Ουσιαστικά, όλοι οι μαθητές θεωρούν λογικό ότι αν στο κύκλωμα παρεμβάλουμε σε σειρά διάφορα «υλικά» (ή λάμπες), η συνολική ενεργός αντίσταση του κυκλώματος αυξάνεται. Πολλοί, ωστόσο, δεν θεωρούν λογικό ότι αν στο κύκλωμα προσθέσουμε παράλληλα ορισμένες αντιστάσεις, η ενεργός ολική αντίσταση της συνδεσμολογίας μειώνεται. Έχουν την αφελέη

εντύπωση ότι επειδή «προσθέτουμε αντίσταση, η συνολική αντίσταση αυξάνεται». Αυτή η εντύπωση αντιστέκεται σθεναρά: ακόμα κι αν οι μαθητές μελετήσουν το νόμο του Ohm και αναπτύξουν τους τύπους για τη συνδεσμολογία αντιστάσεων σε σειρά και παράλληλα, δεν αποβάλλουν αυτή την εντύπωση· μόνον οι πιο εύστροφοι το κατορθώνουν. Είναι χρήσιμο, λοιπόν, να τους κατευθύνουμε να εκτελέσουν πειράματα με μπαταρίες και λάμπες, όπου στην παράλληλη σύνδεση φαίνεται σαφώς η μείωση της ενεργού αντίστασης: αν συνδέσουμε παράλληλα μερικές λάμπες, η μπαταρία «αδειάζει» σε συντομότερο χρονικό διάστημα απ' όσο «αδειάζει» μόνο με μια λάμπα. Αν, αρχικά, χρησιμοποιήσουμε δύο λάμπες σε σειρά η φωτοβολία της πρώτης λάμπας αυξάνεται, μόλις συνδέσουμε άλλες λάμπες παράλληλα με τη δεύτερη. Αν συνδέσουμε μια τρίχα ατσάλωμαλλου μικρού μήκους σε σειρά με μία λάμπα και κατόπιν προσθέσουμε άλλες λάμπες παράλληλα με τη λάμπα που ήδη υπάρχει στο κύκλωμα, κάποια στιγμή το σύρμα καίγεται. (Συνήθως, το πείραμα αυτό διασκεδάζει τους μαθητές· αποτελεί, επίσης, αφορμή για να μελετήσουν το ρόλο και το σκοπό της ασφάλειας και του αυτόματου διακόπτη.)

2. Αν, αφού συνδέσουμε σε σειρά δύο λάμπες, ενώσουμε τα άκρα της μιας με σύρμα (βραχυκύκλωμα), πολλοί μαθητές (ακόμα και από εκείνους που παρακολουθούν τμήματα θετικής κατεύθυνσης) εκπλήσσονται από το ότι η βραχυκυκλωμένη λάμπα σβήνει, ενώ η άλλη ανάβει περισσότερο. Όλοι έχουν ακούσει για το «βραχυκύκλωμα»: ελάχιστοι, ωστόσο, αντιλαμβάνονται με λειτουργικό και συγκεκριμένο τρόπο το νόημά του και τα φαινόμενα που συνδέονται μ' αυτό. Γνωρίζουν, απλώς, ότι το βραχυκύκλωμα είναι «κακό πράγμα». Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να τους κατευθύνουμε να σχηματίσουν «πρώτα την ιδέα και μετά το όνομά της».

3. Ο αναγνώστης θα έχει παρατηρήσει ότι, στα πειράματα που προτείνουμε, περιοριζόμαστε τελικά (ή, τουλάχιστον, αυτό αφήνουμε να εννοηθεί) στη χρήση μόνο μίας μπαταρίας και στη διερεύνηση των αποτελεσμάτων στο ρεύμα του κυκλώματος αν συνδέσουμε αντιστάσεις. Αυτό είναι, ωστόσο, το πρώτο βήμα της εφαρμογής του προτύπου του ρεύματος. Σε επόμενο στάδιο, συμπεριλαμβάνουμε την αντίληψη ότι ένας πρόσθετος παράγοντας υπεισέρχεται στον καθορισμό του ρεύματος σε οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος· ο παράγοντας αυτός προσδιορίζεται από την μπαταρία. Μπορούμε, δηλαδή, να εισαγάγουμε με ποιοτικό τρόπο την έννοια του σθένους της μπαταρίας, χρησιμοποιώντας συνδυασμούς μπαταριών σε σειρά («προσθέτοντας» ή «αφαιρώντας» τη δράση τους). Πρόκειται, βέβαια, για το πρώτο βήμα στη διαμόρφωση της έννοιας της «διαφοράς δυναμικού»: δεν είναι, ωστόσο, σκόπιμο να υπεισέλθουμε απότομα σ' αυτή την έννοια. Αρχικά, δείχνουμε ότι το ρεύμα προσδιορίζεται αφ' ενός από μια εσωτερι-

κή ιδιότητα της μπαταρίας, αφ' ετέρου από την κατανομή των αντιστάσεων στο εξωτερικό κύκλωμα. Η διαμόρφωση της έννοιας «διαφορά δυναμικού» είναι δύσκολη και αυτόνομη προσπάθεια.

7.6 Η ιστορική ανάπτυξη του νόμου του Ohm

Θεωρώ ότι είναι χρήσιμο να γνωρίζουμε πώς διατυπώθηκε και εξελίχθηκε ο νόμος του Ohm, αν και δεν συνηγορώ υπέρ της ιστορικής προσέγγισης έναντι των υπολοίπων. Τα στάδια της εξέλιξης του νόμου αναδεικνύουν πώς για πρώτη φορά συλλάβαμε τις λεπτομέρειες της αντίστοιχης κατάστασης. Η συγκεκριμένη γνώση, λοιπόν, βοηθά τον καθηγητή να αντιληφθεί τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι μαθητές, όταν η παρουσίαση περιέχει συντομεύσεις.

Η εργασία του Ohm, η οποία δημοσιεύθηκε το 1826 [μεταφρασμένο απόσπασμα υπάρχει στο βιβλίο του Magie (1935)], δεν οδήγησε άμεσα στη σχέση που σήμερα αποκαλούμε νόμο του Ohm. Η έρευνά του ήταν μια ποσοτική περιγραφή ενός πειράματος του Cavendish. Στο πείραμα αυτό συγκρίνουμε ποιοτικά τα τινάγματα που αισθανόμαστε στο σώμα μας, κατά την εκφόρτιση μιας ηλεκτροστατικής γεννήτριας, μέσω μεταλλικών συρμάτων διαφόρων μηκών (βλ. εδάφιο 7.4).

Αρχικά, ο Ohm προσπάθησε να μετρήσει ακριβώς το ρεύμα με το οποίο βολταϊκές μπαταρίες με μεταβαλλόμενο αριθμό πλακών τροφοδοτούν μεταλλικά σύρματα διαφόρων μηκών και υλικών. Χρησιμοποίησε ένα προσεκτικά σχεδιασμένο γαλβανόμετρο εφαπτομένης (επιινόση του 1820 — άμεσο αποτέλεσμα των ανακαλύψεων του Oersted και του Ampère στον ηλεκτρομαγνητισμό). Δεν μπόρεσε, ωστόσο, να εκτελέσει αναπαραγωγίσιμες μετρήσεις, λόγω των ακανόνιστων διακυμάνσεων που εκδηλώνονταν στις βολταϊκές στήλες. (Αυτό συνέβη πολύ πριν μπορέσουμε να ελέγξουμε την επίδραση της θερμοκρασίας, της πίεσης, της καθαρότητας των επιφανειών, της ομογένειας των ηλεκτρολυτών, της πόλωσης των ηλεκτροδίων κτλ., ώστε να μπορέσουμε να κατασκευάσουμε σχετικά σταθερές βολταϊκές μπαταρίες.) Παρακινούμενος, λοιπόν, από τον Poggendorf, στράφηκε στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο που είχε ανακαλύψει ο Seebeck το 1822.

Ο Ohm κατασκεύασε ένα θερμοζεύγος επαφής βισμούθιου-χαλκού, διατηρώντας τις άκρες του σε διαφορετική θερμοκρασία. Συνέδεσε κάθε άκρο του θερμοζεύγους με μια κούπα γεμάτη υδράργυρο. Το ένα άκρο του σύρματος που μελετούσε ήταν βυθισμένο στη μια κούπα και το άλλο στην άλλη. Το στέλεχος στρέψης του γαλβανομέτρου αποτελούνταν από μια ταινία φύλλου χρυσού (επειδή αυτή η ταινία είναι πολύ ελαστική, το γαλβανόμετρο επανερχόταν ακριβώς στο μηδέν). Η ατσάλινη μαγνητική βελόνα που ήταν στερεωμένη στο άκρο της χρυσής ταινίας διατηρούνταν προσεκτικά σε σταθερή απόσταση πάνω από τον στερεό αγωγό, ο οποίος συνέδεε το

ένα άκρο του θερμοστοιχείου με τη μια κούπα του υδραργύρου.

Ο Ohm κατέγραψε τη ροπή που ασκούνταν στο γαλβανόμετρο εφαπτομένης ως συνάρτηση του μήκους του παρεμβαλλόμενου σύρματος (διατηρώντας σταθερή τη διατομή του σύρματος). Προσδιόρισε, λοιπόν, την εμπειρική σχέση:

$$\tau = \frac{a}{b + x} \quad (7.6.1)$$

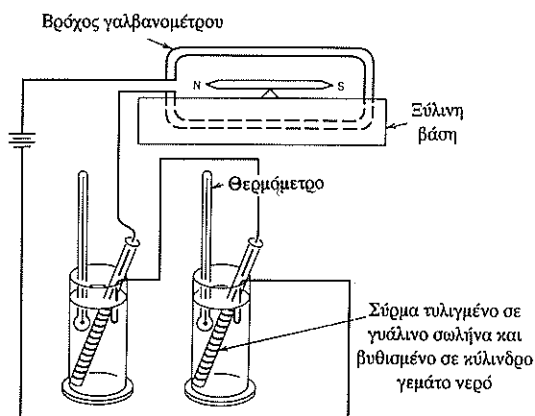
όπου τ είναι η παρατηρούμενη ροπή· a είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των άκρων του θερμοστοιχείου· b είναι μια σταθερά η οποία εξαρτάται από τα «περιφερειακά» στοιχεία του πειράματος (από το είδος του θερμοστοιχείου και των συνδέσεων, συμπεριλαμβανομένων των δοχείων με τον υδράργυρο)· x είναι το μήκος του παρεμβαλλόμενου σύρματος.

Ο Ohm ερμήνευσε την παράμετρο a ως τη «δύναμη διέγερσης», η οποία προκαλεί το ηλεκτρικό ρεύμα και απέδειξε ότι η εν λόγω σταθερά είναι ευθέως ανάλογη της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ των δύο άκρων του θερμοστοιχείου (παρατηρήστε ότι ουδεμία σύνδεση υπάρχει με την έννοια της «διαφοράς δυναμικού» η οποία υπεισέρχεται στην ηλεκτροστατική). Επίσης, όπως αναμενόταν, ερμήνευσε την ποσότητα $b + x$ ως την αντίσταση όλου του κυκλώματος· η συνεισφορά του «πλαισίου» στην αντίσταση όλου του κυκλώματος εκφράζεται μέσω του b (μετροйμένη σε μονάδες μήκους του σύρματος). Απέδειξε, επίσης, ότι η αντίσταση ενός σύρματος ορισμένου υλικού, αν η διάμετρός του παραμένει σταθερή, είναι γραμμική συνάρτηση του μήκους. Τέλος, απέδειξε ότι αν αυξηθεί η θερμοκρασία του σύρματος, αυξάνεται και η αντίσταση.

Στη συνέχεια, ο Ohm προσδιόρισε ότι «μια ίντσα σύρματος από ορείχαλκο ισοδυναμεί με 20,5 ίντσες χάλκινου σύρματος». Χρησιμοποιώντας δε πολύ μακρύ σύρμα, στο οποίο πολύ δύσκολα μετρούσε κάποιο ρεύμα, σημειώνει: «παρατηρούμε ότι... η εν λόγω εξίσωση βρίσκεται σε εξαιρετική αρμονία με τα πειράματα, ακόμα και μέχρι η δύναμη να εξασθενήσει εντελώς εξαιτίας της αντίστασης των αγωγών».

Είναι, ωστόσο, απαραίτητο να επισημάνουμε ότι η εξίσωση 7.6.1 δεν έχει ακόμα τη μορφή του νόμου του Ohm, με την οποία εμφανίζεται, συνήθως, στα δικά μας κείμενα. Όπως σημειώσαμε προηγουμένως, πρόκειται μάλλον για ποσοτική περιγραφή της διερεύνησης του Cavendish.

Το επόμενο βήμα στην κατεύθυνση της σύγχρονης διατύπωσης του νόμου του Ohm πραγματοποιήθηκε το 1841 από τον Joule με το πείραμα που παριστάνεται σχηματικά στο Σχ. 7.6.1 (βλ. επόμενη σελίδα). Ο Joule τύλιξε σύρματα διαφορετικού μήκους (συνεπώς, ο λόγος μεταξύ των αντιστάσεων ήταν γνωστός) γύρω από γυάλινους σωλήνες. Κατόπιν, βύθισε τους σωλή-



Σχήμα 7.6.1 Απεικόνιση της συσκευής του Joule για τον προσδιορισμό της παραγωγής θερμότητας σε ρευματοφόρα σύρματα.

νες σε νερό και τους συνέδεσε σε σειρά με μια βολταϊκή μπαταρία. Απέδειξε, λοιπόν, ότι ο λόγος της παραγωγής θερμότητας σε κάθε κύλινδρο ήταν ανάλογος του λόγου του τετραγώνου των ρευμάτων, τα οποία μετρούσε με γαλβανόμετρο εφαπτομένης. Απέδειξε, επίσης, ότι ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας σε ένα σύρμα που διαρρέεται από ρεύμα είναι ανάλογος του γινομένου I^2R . Από αυτά ακριβώς τα πειράματα και τα συμπεράσματα προέκυψαν οι όροι «νόμος του Joule» και «θερμότητα Joule». (Είναι ενδιαφέρον να επισημάνουμε ότι ο Joule αντιλήφθηκε σαφώς το ρόλο του ρεύματος: «Θεωρώ ότι το αποτέλεσμα της αύξησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ανάλογο του τετραγώνου του ρεύματος..., επειδή αυξάνεται αφ' ενός η ποσότητα του ηλεκτρισμού που διέρχεται σε ορισμένο χρόνο, αφ' ετέρου η ταχύτητά του».)

Στα επόμενα 20 χρόνια μετά τα πειράματα του Ohm (τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο διάστημα 1826-27), τα αποτελέσματα του Ohm επαναλήφθηκαν και επαληθεύθηκαν με αυξανόμενη ακρίβεια από πολλούς ερευνητές. Η σύνδεση, ωστόσο, μεταξύ του νόμου της αγωγιμότητας και των υπόλοιπων εννοιών του ηλεκτρισμού παρέμενε ασαφής· και τούτο, μέχρις ότου οι επιστήμονες συνέλαβαν τη βαθύτερη ενότητα των φαινομένων, στο πλαίσιο του νόμου διατήρησης της ενέργειας, και καθώς η εκτίμησή τους απέναντι στον συγκεκριμένο νόμο αυξανόταν συνεχώς.

Ήδη από το 1832 ο Roget και από το 1840 ο Faraday είχαν επισημάνει ότι οι χημικές μεταβολές που συμβαίνουν μέσα στις βολταϊκές μπαταρίες, αποτελούν ένδειξη ότι «κάτι καταναλώνεται» στο σύστημα, ενόσω το ηλεκτρικό φορτίο μετατοπίζεται. Ο Roget αναφέρει: «Γνωρίζουμε ότι τα αποτελέσματα κάθε συνηθισμένης κινητήριας δύναμης και αιτίας είναι ανάλογα της δράσης που τα προκαλεί. Προκύπτει, λοιπόν, ότι είναι αδύνατο να εμφανιστεί κίνηση από το μηδέν ή, με άλλα λόγια, είναι αδύνατο να κατασκευα-

στεί αεικίνητο». Ο Faraday επισημαίνει, επίσης, ότι είναι αδύνατο να ανακαλύψουμε στη φύση «αυθόρμητη παραγωγή δύναμης ή παραγωγή ισχύος, χωρίς οποιαδήποτε κατανάλωση η οποία θα τροφοδοτεί την ισχύ». (Είναι ενδιαφέρον ότι οι αναφορές αυτές προηγούνται των άρθρων του Mayer και του Joule της δεκαετίας του 1840. Η ιδέα της διατήρησης της ενέργειας «πλανιόταν στον αέρα» ως ποιοτικός «νόμος του ανέφικτου», αν και δεν είχε διατυπωθεί σαφώς ούτε είχε επιβεβαιωθεί ποσοτικά.)

Το 1849, καθώς στην επιστημονική κοινότητα εντεινόταν ο αντίκτυπος της έννοιας της διατήρησης της ενέργειας που είχαν διακηρύξει ο Mayer, ο Joule και ο Helmholtz, ο Γερμανός φυσικός Kirchhoff επεσήμανε το εξής: η υπάρχουσα γνώση για τον ηλεκτρισμό ενοποιείται αρμονικά και με συνέπεια, αν στην εμπειρική σχέση του Ohm (εξίσωση 7.6.1) η ποσότητα a ταυτιστεί με τη διαφορά δυναμικού που επιβάλλεται στα άκρα ενός αγωγού αντίστασης $R = b + x$. Με την παρατήρηση αυτή, η σχέση λαμβάνει τη μορφή με την οποία είμαστε εξοικειωμένοι:

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (7.6.2)$$

Η ταύτιση του a με το ΔV ερμήνευε την παρατήρηση ότι η διαφορά της ηλεκτρικής «τάσης» μεταξύ των άκρων της βολταϊκής μπαταρίας (όπως μετρείται με το ηλεκτρόμετρο) είναι ανάλογη της ποσότητας a του Ohm. Επίσης, επειδή ο ρυθμός του έργου που εκτελείται κατά τη μετακίνηση του φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$P = I\Delta V \quad (7.6.3)$$

από την εξίσωση 7.6.2 προκύπτει:

$$P = I^2 R \quad (7.6.4)$$

Η συγκεκριμένη σχέση αναφέρεται σε μια αντίσταση.

Οι λεπτομέρειες, από λογική άποψη, αυτής της εικόνας είναι απαραίτητο να επισημανθούν προσεκτικά: ουδείς λόγος υπάρχει εκ των προτέρων για τον οποίο όλο το έργο που εκτελείται κατά τη μετακίνηση του φορτίου να μετατρέπεται απαραίτητα σε θερμική εσωτερική ενέργεια. Αυτή η άποψη επαληθεύεται από το νόμο του Joule: δεν προκύπτει εκ των προτέρων. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να αντιληφθούμε ότι ο νόμος του Joule έχει ανεξάρτητη δομή και παίζει επικυρωτικό ρόλο στη διατύπωση και την αξιολόγηση των εννοιών που υπεισέρχονται στα βασικά κυκλώματα.

Εξαιτίας του τρόπου με τον οποίο τα περισσότερα εγχειρίδια παρου-

σιάζουν τα κυκλώματα στα οποία υπάρχουν αντιστάσεις και επειδή περιορίζονται σε ασκήσεις και προβλήματα εφαρμογής του νόμου του Ohm και των συνεπειών του, ελάχιστοι μαθητές κατανοούν ότι το ρεύμα ενός συστήματος δεν προσδιορίζεται πάντοτε από την εξίσωση 7.6.2. Είναι δυνατό να προσδιοριστεί από τη συνθήκη της ισχύος (εξίσωση 7.6.3). Στην περίπτωση αυτή η εξίσωση 7.6.4 δεν ισχύει. (Στο εδάφιο 7.11 μελετάμε ολοκληρωμένα από εννοιολογική άποψη αυτή την παρατήρηση. Εξετάζοντας γιατί η μεταφορά ισχύος με υψηλή τάση είναι σημαντικά αποτελεσματικότερη από τη μεταφορά με χαμηλή, βοηθάμε τους μαθητές να κατανοήσουν βαθύτερα πότε ισχύουν οι σχέσεις που προαναφέραμε.)

7.7 Η διδασκαλία της έννοιας της αντίστασης και του νόμου του Ohm

Ο τρόπος παρουσίασης του νόμου του Ohm ποικίλλει ευρέως στα εγχειρίδια φυσικής που υπάρχουν μέχρι σήμερα. Τα περισσότερα δίνουν κάποια, έστω ελάχιστη, προσοχή στο να δείξουν ότι η συγκεκριμένη εννοιολογική δομή προκύπτει με φυσιολογικό και λογικό τρόπο. Ακολουθούν δε έναν τρόπο παρουσίασης προσαρμοσμένο στο επίπεδο των μαθητών στους οποίους απευθύνονται. Πολλά εγχειρίδια, ωστόσο, παραθέτουν τις έννοιες «ρεύμα» και «αντίσταση», θεωρώντας ότι πρόκειται για απλές αρχετυπικές έννοιες που δεν είναι απαραίτητο να τις αναπτύξουν ή να τις εξηγήσουν. Ελάχιστα δικαιολογούν την εφαρμογή στα κυκλώματα της έννοιας «διαφορά δυναμικού»,² την οποία, συνήθως, αναπτύσσουν σε σύνδεση με τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα. Διακηρύσσουν, απλώς, ότι είναι δυνατό να εφαρμόσουμε τη συγκεκριμένη έννοια, θεωρώντας ότι ο ισχυρισμός τους είναι προφανής. (Μάρτυρα του αντιθέτου αποτελεί το χρονικό διάστημα που χρειάστηκαν οι φυσικοί του 19ου αιώνα για να αντιληφθούν αυτή την αλληλοσύνδεση.)

Θεωρώ ότι, προς το παρόν, ουδείς προσεκτικός τρόπος παρουσίασης υπερέρχει από παιδαγωγική άποψη· ο καθηγητής, λοιπόν, είναι απαραίτητο να προσαρμοστεί στον τρόπο προσέγγισης που περιέχεται στο εγχειρίδιο

2. Είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι ο όρος «τάση» μάλλον προκαλεί σύγχυση παρά δια φωτίζει την κατάσταση. Οι συγγραφείς χρησιμοποιούν με ποικίλους τρόπους αυτόν τον όρο στα κείμενά τους· έτσι, η σημασία του δεν έχει αποκρυσταλλωθεί με σαφή, συστηματικό και λειτουργικό τρόπο. Αποτέλεσμα της ποικιλίας είναι πολλοί μαθητές να μην αντιλαμβάνονται σαφώς τη διάκριση μεταξύ της ηλεκτρεγερτικής δύναμης και της διαφοράς δυναμικού. Επίσης, λόγω της χρήσης του όρου, οι αρχάριοι μαθητές τείνουν να σχηματίσουν την εντύπωση ότι η τάση είναι ιδιότητα ενός συγκεκριμένου σημείου του κυκλώματος. Πρέπει, λοιπόν, να ζητάμε από τους μαθητές να χρησιμοποιούν τον όρο «διαφορά δυναμικού», για να συνειδητοποιήσουν ότι υπεισέρχονται πάντοτε δύο σημεία. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιώ το σύμβολο ΔV αντί του συμβόλου V .

το οποίο έχει επιλέξει. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ωστόσο, οι καθηγητές εισάγουν λίγο-πολύ αυθαίρετα τις έννοιες και τις σχέσεις, οι οποίες νομιμοποιούνται ουσιαστικά από το ότι «δουλεύουν», δηλαδή από το ότι τα συμπεράσματα συμφωνούν με τις παρατηρήσεις. Η παρουσίαση των εννοιών και των σχέσεων πριν από τα γεγονότα δεν ικανοποιεί τους περισσότερους καλούς μαθητές. Επειδή ο καθηγητής δεν περιγράφει άμεσα τη λογική δομή, οι μαθητές δεν τη διακρίνουν σαφώς. Αν, λοιπόν, τους δοθεί η ευκαιρία, προτιμούν να μάθουν πώς φτάνουμε στη γνώση αντί να παρακολουθήσουν ορισμένες από καθέδρας διακηρύξεις, η ισχύς των οποίων αποδεικνύεται εκ των υστέρων. Στην πρώτη περίπτωση αισθάνονται ότι αν είχαν χρόνο και κατάλληλες ευκαιρίες, θα είχαν επινοήσει και μόνοι τους τις ιδέες. Στην περίπτωση της από καθέδρας παρουσίας, αισθάνονται ότι ουδέποτε θα συνελάμβαναν μόνοι τους αυτές τις ιδέες. Βέβαια, στην τελευταία περίπτωση, η αίσθησή τους είναι απολύτως δικαιολογημένη: ουδέποτε οι ιδέες εμφανίζονται μ' αυτόν τον τρόπο.

Ο Ιονα (1979) παραθέτει μια άριστη επισκόπηση και έναν άριστο σχολιασμό της κατάστασης των εγχειριδίων. Η μελέτη αυτή έχει αυτόνομη αξία και δεν τη συμπεριλαμβάνω στο παρόν βιβλίο· επισημαίνω απλώς ορισμένα σημεία της. Ο Ιονα ανακάλυψε ότι στα βιβλία που εξέτασε η επικρατούσα προσέγγιση είναι η εξής: ορίζουν την αντίσταση ως το λόγο μεταξύ της διαφοράς δυναμικού και του ρεύματος

$$R \equiv \frac{\Delta V}{I} \quad (7.7.1)$$

Πρόκειται για «νόμιμη» προσέγγιση, ιδιαίτερα αν έχουμε ήδη βοηθήσει τους μαθητές να κατανοήσουν το πρωταρχικό, ποιοτικό και λιγότερο αυστηρό νόημα της «αντίστασης», υπέρ του οποίου συνηγορήσαμε στα εδάφια 7.4 και 7.5. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση 7.7.1 αποτελεί επαναορισμό και ποσοτικοποίηση της έννοιας.

Διερευνώντας τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εξίσωση 7.7.1 για διαφορετικά αγωγίμα υλικά και συστήματα, προκύπτει ότι, σε απλούς μεταλλικούς αγωγούς, η R είναι σταθερή, ανεξάρτητη του ΔV και του I , αν και εξαρτάται γενικά από την κατάσταση (θερμοκρασία και πίεση) του υλικού. Θεωρούμε, λοιπόν, ότι εκείνα τα συστήματα στα οποία το R είναι σταθερό, τότε η σχέση μεταξύ του ΔV και του I είναι γραμμική, ικανοποιούν το νόμο του Ohm. Αντίστοιχα, εκείνα τα συστήματα στα οποία η εν λόγω σχέση δεν είναι γραμμική, ονομάζονται «μη ωμικά» ή συστήματα τα οποία δεν ικανοποιούν το νόμο του Ohm· ο ορισμός της R , ωστόσο, ισχύει, αν και η R μεταβάλλεται.

Εναλλακτική προσέγγιση που εμφανίζεται σε ορισμένα εγχειρίδια εί-

ναι η εξής: εκκινούμε από το νόμο του Joule και ορίζουμε την αντίσταση ως το λόγο της προσφερόμενης ισχύος προς το τετράγωνο του ρεύματος. Αυτή η προσέγγιση, βέβαια, προϋποθέτει την κατανόηση της έννοιας της ενέργειας και είναι περισσότερο αφηρημένη από την προσέγγιση μέσω του νόμου του Ohm. Η σύνδεση αυτής της σχέσης με το νόμο του Ohm προϋποθέτει, επίσης, την αυθαίρετη παραδοχή ότι όλο το προσφερόμενο από την πηγή έργο μετατρέπεται σε θερμική εσωτερική ενέργεια. Αυτό, όμως, δεν επιτρέπει στους μαθητές να διακρίνουν σαφώς τα στοιχεία της λογικής δομής.

Υπάρχει ένα θεμελιώδες και απλό πόρισμα που προκύπτει από το νόμο του Ohm (αν τον εφαρμόσουμε σε μεταλλικούς αγωγούς) και το οποίο σπάνια το αναφέρουμε σαφώς στους μαθητές. Το πόρισμα καταδεικνύει πόσο βαθιά συμπεράσματα είναι δυνατό να προκύψουν ορισμένες φορές αν, εκτός από το να μελετήσουμε τι συμβαίνει σε μια κατάσταση, μελετήσουμε και τι δεν συμβαίνει. Το πόρισμα είναι το εξής: επειδή η ευθεία* εκτείνεται μέχρι το μηδέν, δεν υπάρχει ένδειξη για την ύπαρξη κάποιας μετρήσιμης τιμής κατωφλίου της τάσης για την εκδήλωση του ρεύματος· οπότε οι φορείς του φορτίου, όποιοι κι αν είναι, είναι ελεύθεροι και δεν συνδέονται με τη δομή του μετάλλου. Πρόκειται για το είδος της φυσικής αντίληψης την οποία είναι επίσης απαραίτητο να αποκτήσουν οι μαθητές, εκτός από το να εξασκηθούν στην εφαρμογή του νόμου.

7.8 Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι εσωτερικό ή επιφανειακό φαινόμενο;

Αν και στο ερώτημα του τίτλου υπεισέρχονται σημαντικά ζητήματα φυσικής και φαινομενολογίας, ελάχιστα εγχειρίδια δίνουν προσοχή σ' αυτά. Η μελέτη τους, ωστόσο, βοηθά τους μαθητές να αναπτύξουν την αντίληψή τους. Γνωρίζουμε ότι, σε συνηθισμένες περιπτώσεις, ηλεκτρικό φορτίο μετακινείται όντως στο εσωτερικό των μεταλλικών κυκλωμάτων και όχι στην επιφάνειά τους· πώς όμως καταλήξαμε στο συμπέρασμα αυτό; (Δεν πρόκειται για τετριμμένη ερώτηση: σε υψηλές συχνότητες εμφανίζονται «επιδερμικά» φαινόμενα· σ' αυτές τις συνθήκες η αγωγιμότητα περιορίζεται όντως στα επιφανειακά στρώματα.)

Τα περισσότερα εγχειρίδια υποθέτουν ότι η αγωγιμότητα είναι εσωτερικό φαινόμενο, χωρίς να πληροφορούν το μαθητή ότι υπεισέρχεται αυτή η υπόθεση. Τα πιο προχωρημένα θεωρούν ότι η πυκνότητα ρεύματος J είναι ομοιόμορφη σε όλη τη διατομή του αγωγού και διακηρύσσουν τη σχέση:

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (7.8.1)$$

* Ο συγγραφέας αναφέρεται στη γραφική παράσταση του νόμου του Ohm. (Σ.τ.μ.)

όπου E είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο εσωτερικό του αγωγού και ρ η ειδική αντίσταση του υλικού. Κατόπιν, αποδεικνύουν, επικαλούμενα το νόμο του Ohm, ότι η ολική αντίσταση R δίνεται από τη σχέση:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (7.8.2)$$

όπου l και S είναι, αντίστοιχα, το μήκος του αγωγού και το εμβαδόν της διατομής του.

Γιατί θεωρούμε ότι η ροή εμφανίζεται στο εσωτερικό του αγωγού; Είναι απαραίτητο να βοηθήσουμε τους μαθητές να θέσουν αυτό το ερώτημα και να προσπαθήσουν να το απαντήσουν. Η ισχυρότερη, πρώτη, μαρτυρία του ότι πρόκειται για εσωτερικό και όχι επιφανειακό φαινόμενο στηρίζεται, βέβαια, στο ακόλουθο εμπειρικό δεδομένο: η συνολική αντίσταση R είναι ευθέως ανάλογη του μήκους του σύρματος και αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού της διατομής, δηλαδή του *τετραγώνου* των διαστάσεων της διατομής:

$$R \sim \frac{l}{S} \quad (7.8.3)$$

Η εξάρτηση από το αντίστροφο της επιφάνειας της διατομής υποδηλώνει ότι η αγωγιμότητα είναι εσωτερικό φαινόμενο. Αν η αντίσταση ήταν αντιστρόφως ανάλογη της *διαμέτρου* του σύρματος, θα σήμαινε ότι η αγωγιμότητα είναι επιφανειακό φαινόμενο. Σε αυτή την περίπτωση, είναι απαραίτητο να μελετήσουν οι μαθητές την κατάσταση που *εμφανίζεται*, αλλά και την κατάσταση που *δεν* εμφανίζεται. Ο συγκεκριμένος τρόπος μελέτης οδηγεί σε βαθιά κατανόηση και βοηθά στην ανάπτυξη της αντίληψης. Επίσης, σ' αυτό το σημείο εκδηλώνεται η ισχύς των συλλογισμών με *λόγους*: χωρίς να χρησιμοποιήσουμε αριθμητικές τιμές, είναι δυνατό να καταλήξουμε σε ποιοτικά συμπεράσματα.

7.9 Η οικοδόμηση του προτύπου ρεύματος-κυκλώματος

Η εικόνα μας για το ηλεκτρικό ρεύμα, ακόμα και σε «απλά» κυκλώματα με αντιστάσεις, είναι πολύ αφηρημένη, περίπλοκη και εξεζητημένη. Τα εγχειρίδια, τα οποία ελάχιστα μελετούν τα παρατηρούμενα φαινόμενα, παρουνισιάζουν τό πρότυπο του ηλεκτρικού ρεύματος με απόκρυφο τρόπο (όσο στοιχειωδέστερο είναι το επίπεδο του βιβλίου τόσο περισσότερο ισχύει η παρατήρηση αυτή). Ύστερα, λοιπόν, οι καθηγητές αναρωτιούνται γιατί οι

μαθητές έχουν εξωφρενικά λανθασμένες ιδέες για το τι συμβαίνει.

Μια προκαταρκτική, μη αυστηρή προσέγγιση, η οποία στη συνέχεια χρειάζεται επεξεργασία και επαναορισμό, περιγράφεται στα εδάφια 7.4. και 7.5. Η απάντηση σε ένα ερώτημα που παραμένει ανοιχτό δίνεται στο εδάφιο 7.8. Παραμένουν, ωστόσο, ορισμένα ερωτήματα: Ένα είδος φορτίου μετακινείται ή δύο; Η πηγή τροφοδοτεί το κύκλωμα με φορτίο ή ο ίδιος ο αγωγός περιέχει ευκίνητα φορτία; Ποιος είναι ο ρόλος της διαφοράς δυναμικού και της αντίστασης στην εμφάνιση του ρεύματος σε διάφορες συνδεσμολογίες; Είναι δυνατό να αντιληφθούμε τι συμβαίνει σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, επικαλούμενοι κάποιο περισσότερο διαισθητικά κατανοητό μηχανικό σύστημα (λόγου χάρη, το πρότυπο του ρευστού);

Ορισμένα από τα ερωτήματα αυτά παραγνωρίζονται ευρέως ή μελετώνται απλώς με διακηρύξεις, χωρίς να εξετάζεται το βαθύτερο ερώτημα «Πώς γνωρίζουμε ότι...;» Άλλα ερωτήματα τα μελετάμε επιπόλαια. Λόγου χάρη, οι Cohen, Eylon και Ganiel (1983) έδειξαν ότι πολλοί μαθητές μένουν με την εντύπωση ότι η διαφορά δυναμικού είναι *αποτέλεσμα* της μετατόπισης του φορτίου και όχι αίτιό της.

Αρκετές προσπάθειες-πilotοί έχουν εκδοθεί [π.χ. Evans (1978), Steinberg (1983)], οι οποίες περιέχουν προσεκτικότερες από λογική άποψη και περισσότερο κατανοητές παρουσιάσεις· είναι, ωστόσο, απαραίτητο περισσότερο «λουστράρισμα» και περισσότερη δουλειά με μαθητές. Ιδιαίτερα ο Steinberg χρησιμοποιεί ένα σύστημα με μπαταρίες και λάμπες τις οποίες συνδυάζει με φτηνούς πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας, που άρχισαν να διατίθενται πρόσφατα. Με τους πυκνωτές στο κύκλωμα, παρατηρούμε το προσωρινό άναμμα των λαμπτήρων κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης των πυκνωτών. Αυτό το πρόσθετο στοιχείο πολλαπλασιάζει τα ερωτήματα που είναι δυνατό να τεθούν και να απαντηθούν για το πού βρίσκονται τα φορτία και για το πώς μετατοπίζονται. Επίσης, ενισχύει σημαντικά την ορθότητα και την πληρότητα του προτύπου του ρεύματος. Ο Steinberg περιγράφει μια σειρά ερευνών όπου ελέγχονται ορισμένα πρότυπα ρευστού (συμπεριλαμβανομένου ενός προτύπου συμπιεστού ρευστού), χωρίς, ωστόσο, από μια άποψη, να θεμελιώνει τα συμπεράσματά του, και καταλήγει σε μια απολύτως αυτοσυνεπή περιγραφή της αγωγιμότητας.

Χρησιμοποιώντας την προσέγγιση του Steinberg, μπορούμε να αντιμετωπίσουμε μια συνήθη παρανόηση των μαθητών, ότι, δηλαδή, τα στοιχεία του κυκλώματος προκαλούν εξασθένηση της ροής του φορτίου. Η σταθερότητα του συνεχούς ρεύματος, ωστόσο, αποκρύπτει τα μεταβατικά φαινόμενα που είναι σημαντικά για την κατανόηση της δομής του προτύπου του ηλεκτρικού ρεύματος. Στα κυκλώματα συνεχούς ρεύματος δεν αναδεικνύεται με σαφήνεια η μετατόπιση του φορτίου η οποία συνδέεται με τη διαφορά δυναμικού.

Οι καθηγητές είναι χρήσιμο να μελετήσουν ορισμένες από τις αναπτύξεις αυτές, με σκοπό να ενσωματώσουν στη διδασκαλία τους τα στοιχεία που θεωρούν ότι ταιριάζουν στους μαθητές τους και τους βοηθούν.

7.10 Συμβατική και πραγματική φορά του ρεύματος

Πολλά εγχειρίδια, ιδιαίτερα προλυκειακού (αλλά και λυκειακού) επιπέδου, διακηρύσσουν ότι το ηλεκτρικό ρεύμα συνίσταται σε ροή ηλεκτρονίων. Ορισμένα δεν ενδιαφέρονται καν να διευκρινίσουν ότι αναφέρονται στην αγωγιμότητα των μετάλλων. Παράλληλα χρησιμοποιούν την έννοια του ηλεκτρονίου χωρίς να παρουσιάζουν κάποιο στοιχείο ή βάση για την αποδοχή της. Οι μαθητές, λοιπόν, μένουν χωρίς πλαίσιο για την ένταξη του όρου: δεν έχουν αίσθηση των ιδιοτήτων αυτής της οντότητας, συγκριτικά με τις υπόλοιπες οντότητες του μικρόκοσμου· δεν γνωρίζουν, επίσης, πώς προσδιορίσαμε για πρώτη φορά την ύπαρξή της ούτε το ρόλο της γενικά στη δομή της ύλης.³ Γνωρίζοντας, λοιπόν, απλώς έναν τεχνικό όρο, η ικανότητά τους να διακρίνουν την ορολογία από την αληθινή γνώση υπονομεύεται.

Η συνήθης δικαιολογία είναι ότι η εικόνα του ηλεκτρονίου είναι «σωστή» και οι μαθητές οφείλουν να δίνουν σωστές απαντήσεις, όπως οι επισημίμονες. Αποτέλεσμα: οι μαθητές αποπροσανατολίζονται· τους αφαιρείται η δυνατότητα να σκεφτούν με φαινομενολογικό τρόπο, εκτελώντας συλλογισμούς που τους βοηθούν όχι μόνο να κατανοήσουν και να εμβαθύνουν στο νόημα αυτής της μεμονωμένης έννοιας, αλλά και να αντιληφθούν τον τρόπο λειτουργίας γενικά των θετικών επιστημών.

Περιγράφοντας με τον τρόπο που προαναφέραμε το ηλεκτρικό ρεύμα, οι περισσότεροι μαθητές μένουν με την απολύτως λανθασμένη εντύπωση ότι η αγωγιμότητα συνίσταται πάντοτε σε κίνηση ηλεκτρονίων, δηλαδή σε κίνηση αρνητικού φορτίου, αν και εφαρμόζουν αυτή την εικόνα μόνο στα μέταλλα. (Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι τους δίνεται η ευκαιρία να μελετήσουν μόνο την αγωγιμότητα των μετάλλων· αν κάποτε αντιληφθούν ότι υπάρχει ο περιορισμός αυτός, στη συνέχεια τον χάνουν από το «οπτικό πεδίο τους» και τον ξεχνούν.) Η αγωγιμότητα των μετάλλων είναι, βέβαια, ειδική περίπτωση, η οποία συνοδεύεται μόνον από τις περιπτώσεις φωτοηλεκτρικής ή θερμικής εκπομπής. Τις περισσότερες φορές στην ηλεκτροδύση και στα ιονισμένα αέρια, η αγωγιμότητα οφείλεται στην ταυτόχρονη μετα-

3. Λίγα εγχειρίδια (π.χ. το «PSSC Physics») προσπαθούν να παρουσιάσουν μια στέρεη βάση για την αποδοχή της έννοιας του ηλεκτρονίου, πριν περιγράψουν το ρόλο του στην αγωγιμότητα· αποτελούν, ωστόσο, εξαίρεση: οι αναπόδεικτες διακηρύξεις είναι ο κανόνας.

νάστευση θετικών και αρνητικών ιόντων. Σε ορισμένες περιπτώσεις (λόγου χάρη, στο γαλβανισμό του χαλκού ή του αργύρου), η αγωγιμότητα οφείλεται στη μετανάστευση μόνο θετικών ιόντων. Σε ορισμένες συνθήκες στους ημιαγωγούς, είναι απλούστερο να αντιληφθούμε τη μετακίνηση θετικών «οπών» παρά ηλεκτρονίων. Διακηρύσσοντας, λοιπόν, πρόωρα ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι κίνηση ηλεκτρονίων, μάλλον περιορίζουμε την αντίληψη των μαθητών παρά την απελευθερώνουμε, δίνοντας μια «σωστή» απάντηση.

Προτείνω [αποδεχόμενος το ισχυρότατο επιχείρημα του Iona (1982)] ότι, από παιδαγωγική άποψη, είναι συνετότερο και γονιμότερο να διδάξουμε στους μαθητές τη σύμβαση του θετικού ρεύματος. Εκτός από το ότι μόνο στην αγωγιμότητα των μετάλλων και στη φωτοηλεκτρική και θερμική εκπομπή έχουμε αμιγώς κίνηση ηλεκτρονίων, υπάρχουν πρόσθετοι λόγοι για τους οποίους υπερτερεί η υιοθέτηση της συμβατικής φοράς του ρεύματος θετικού φορτίου.

Οι μαθητές, όταν για πρώτη φορά παρακολουθούν την παρουσίαση της έννοιας του ηλεκτρικού κυκλώματος, διστάζουν ιδιαίτερα να δεχτούν ότι είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε μέσω συμβατικών μακροσκοπικών παρατηρήσεων (είτε ηλεκτρικών είτε ηλεκτρομαγνητικών) αν η αγωγιμότητα των μετάλλων οφείλεται σε μετατόπιση αρνητικού, θετικού ή και των δύο ειδών φορτίου. Τα παρατηρούμενα φαινόμενα ταιριάζουν εξίσου σε κάθε πρότυπο και προκύπτουν στο πλαίσιο καθενός απ' αυτά. Μόνον από το φαινόμενο Hall [βλ. π.χ. Magie (1935) και Resnick και Haliday (1985)] αντιλαμβανόμαστε ότι μεταφέρεται αρνητικό φορτίο, χωρίς, ωστόσο, να μπορούμε να πούμε κάτι για το φορέα του. Στο πλαίσιο της ηλεκτροστατικής, όπως προαναφέραμε, οι μαθητές πρέπει να αντιληφθούν ότι είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε αν μετατοπίζεται θετικό, αρνητικό ή και τα δύο είδη φορτίου. Όμοιας, είναι απαραίτητο να καταλάβουν ότι η απροσδιοριστία αυτή εμφανίζεται, επίσης, στην αγωγιμότητα των μετάλλων και ότι, μ' αυτή την έννοια, η σύμβαση του ρεύματος θετικού φορτίου εξυπηρετεί εξίσου. Μόνο μέσω αυτής της εμπειρίας οι μαθητές εμπεδώνουν ότι πρόκειται για *σύμβαση* και όχι για γεγονός. Μ' αυτόν τον τρόπο, τους βοηθάμε να εκτιμήσουν βαθύτερα την εικόνα του ηλεκτρονίου, όταν, τελικά, τη θεμελιώσουμε, και να γίνουν πιο ευαίσθητοι σε ερωτήσεις του είδους «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;» Επίσης, παρακολουθούν πλέον πιο προσεκτικά τον τρόπο με τον οποίο τίθενται και αναπτύσσονται τα ερωτήματα: δεν περιορίζονται απλώς στο τελικό «αποστειρωμένο» συμπέρασμα.

Ο κυριότερος λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητο να διατηρήσουμε τη σύμβαση του ρεύματος θετικού φορτίου, είναι ότι έτσι λαμβάνουμε υπόψη μας: 1) τον ορισμό του ηλεκτρικού πεδίου και της διαφοράς δυναμικού· 2) τις ιδιότητες των κυκλωμάτων με πυκνωτές και πηνία· 3) τους μνημονικούς κανόνες του ηλεκτρομαγνητισμού και των εξισώσεων του Maxwell·

4) τον συνηθισμένο συμβολισμό στις απεικονίσεις των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Η σύμβαση δεν άλλαξε λόγω της αποδοχής του ρεύματος των ηλεκτρονίων ούτε πρόκειται να αλλάξει. Οι μαθητές, λοιπόν, που παρακολουθούν ηλεκτρομαγνητισμό, χωρίς την εμπειρία της σύμβασης του ρεύματος θετικού φορτίου, υποφέρουν από σοβαρή και περιττή σύγχυση, ανώφελη από παιδαγωγική άποψη.

7.11 Ο νόμος του Ohm δεν ισχύει για κάθε καταναλωτή του κυκλώματος

Αν λάβουμε υπόψη μας τις συνήθειες παρουσιάσεις του ηλεκτρικού ρεύματος, ελάχιστοι μαθητές, ακόμα και θετικής κατεύθυνσης, αντιλαμβάνονται ότι ο νόμος του Ohm δεν εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση όπου πηγή διαφοράς δυναμικού προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα. Βέβαια, αναφέροντας, απλώς, αυτή τη διαπίστωση στους μαθητές, δεν οδηγούμεστε πουθενά. (Δεν αναφέρομαι στη μη γραμμικότητα της αντίστασης, αλλά σε καταναλωτές που δεν παρουσιάζουν μόνον αντίσταση, λόγω χάρη κατά τη λειτουργία ενός κινητήρα ή κατά τη φόρτιση μιας μπαταρίας.) Αποτελεσματικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος είναι να αναρωτηθούν οι μαθητές γιατί η ισχύς μεταφέρεται αποδοτικότερα με υψηλή τάση παρά με χαμηλή. Με αυτόν τον τρόπο, η ιδέα εντάσσεται σε πλουσιότερο και ευκολότερα απομνημονεύσιμο πλαίσιο· συνδέεται, επίσης, με μηχανολογικά ζητήματα και εφαρμογές της καθημερινής ζωής των πολιτών.

Αν και η ισχύς μεταφέρεται μέσω εναλλασσόμενου και όχι συνεχούς ρεύματος, δεν κάνουμε σοβαρό λάθος αν, σε στοιχειώδες επίπεδο, θεωρήσουμε ότι πρόκειται για πρόβλημα συνεχούς ρεύματος. Υποθέστε ότι θέλουμε να μεταφέρουμε ισχύ P_{π} χρησιμοποιώντας ορισμένη διαφορά δυναμικού ΔV_{π} σε δεδομένο καταναλωτή. Με R_{α} συμβολίζουμε την αντίσταση των γραμμών μεταφοράς της ισχύος από την απομακρυσμένη πηγή. Είναι απαραίτητο να υπογραμμίσουμε ότι το είδος του καταναλωτή είναι άγνωστο και ότι επιλέγουμε το ύψος της τάσης προσδιορίζοντας τις ιδανικότερες συνθήκες.

Το «κλειδί» του προβλήματος είναι ότι η αντίσταση του καταναλωτή δεν έχει σημασία, ακόμα κι αν είναι γνωστή. Το ρεύμα που διαρρέει τις γραμμές μεταφοράς προσδιορίζεται από την επιθυμητή ισχύ:

$$I = \frac{P_{\pi}}{\Delta V_{\pi}} \quad (7.11.1)$$

ανεξαρτήτως του αν ο καταναλωτής εμφανίζει ή όχι αντίσταση. Επειδή οι μαθητές είναι συνηθισμένοι να εφαρμόζουν το νόμο του Ohm, δυσκολεύο-

νται σημαντικά να αντιληφθούν αυτό το ζήτημα· είναι, λοιπόν, απαραίτητο να τους βοηθήσουμε.

Επειδή το ρεύμα προσδιορίζεται από την επιθυμητή ισχύ, η απώλεια θερμότητας Joule στις γραμμές μεταφοράς είναι συγκεκριμένη:

$$\text{Απώλεια ενέργειας στις αντιστάσεις} = I^2 R_{ολ} \quad (7.11.2)$$

Ο συντελεστής απόδοσης δίνεται από τη σχέση:

$$\eta = \frac{P_{\kappa}}{P_{\kappa} + I^2 R_{ολ}} \quad (7.11.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 7.11.3 και 7.11.1, λαμβάνουμε:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_{\kappa} R_{ολ}}{\Delta V_{\kappa}^2}} \quad (7.11.4)$$

Διερευνώντας την εξίσωση 7.11.4, παρατηρούμε ότι αν αυξήσουμε τη διαφορά δυναμικού, ο συντελεστής απόδοσης αυξάνεται σημαντικά. Πρέπει, λοιπόν, να κατευθύνουμε τους μαθητές να διερευνήσουν και να ερμηνεύσουν την εξίσωση γραφικά και αριθμητικά. Στο βιβλίο του Rogers (1960) (ένα από τα ελάχιστα εγχειρίδια που ασχολούνται σε στοιχειώδες επίπεδο με αυτό το ζήτημα), οι μαθητές καθοδηγούνται συγκρίνοντας δύο κατάλληλα σύνολα αριθμητικών τιμών, χωρίς να εκτελούν αλγεβρικές πράξεις.

Εξετάζοντας είτε αλγεβρικά είτε αριθμητικά το πρόβλημα, είναι σημαντικό να κατευθύνουμε τους μαθητές, με συλλογισμούς σωκρατικού τύπου, να αναγκαστούν να συμπληρώσουν και να επεξηγήσουν τα βήματα και τα συμπεράσματά τους. Προσφέροντάς τους απλώς τα συμπεράσματα και ζητώντας τους να εκτελέσουν κάποια αλγεβρική ανάλυση ή αριθμητική αντικατάσταση, δεν κατανοούν τα κρίσιμα στοιχεία του συλλογισμού.

7.12 Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων: το πείραμα Tolman-Stewart

Πολλά εγχειρίδια του γυμνασίου και του λυκείου, μελετώντας την αγωγιμότητα των μετάλλων, διακηρύσσουν ότι στα μέταλλα υπάρχουν ηλεκτρόνια που μπορούν να κινούνται ελεύθερα. Για να δικαιολογήσουν τον ισχυ-

ρισμό τους, επικαλούνται απλώς ότι «οι επιστήμονες γνωρίζουν ότι...» Αν συσσωρευθεί μεγάλος όγκος τελικών συμπερασμάτων, πολλοί μαθητές (ιδιαιτέρως όσοι δεν έχουν αναπτύξει ακόμα την ικανότητα για αφηρημένους συλλογισμούς) δεν μπορούν να διακρίνουν ποιο τμήμα της «γνώσης που κατέχουν» βασίζεται σε αποδείξεις και ερμηνείες και ποιο περιλαμβάνει απλώς απομνημονευμένες και αστήρικτες διακηρύξεις. Αυτή η διανοητική κατάσταση δεν είναι υγιής. Για μαθητές, μάλιστα, οι οποίοι δεν πρόκειται να ασχοληθούν με θετικές επιστήμες (συνεπώς, το εν λόγω μάθημα αποτελεί γι' αυτούς συστατικό της γενικής μόρφωσής τους), η συγκεκριμένη κατάσταση καταστρέφει κάθε προσπάθεια κατανόησης της φύσης, καθώς και την πίστη στην ισχύ και τις δυνατότητες των θετικών επιστημών. Μ' αυτό το υπόβαθρο δεν γίνονται πολίτες οι οποίοι κατανοούν το χαρακτήρα και το ρόλο των θετικών επιστημών στην ιστορία του πνεύματος και στην κοινωνία μας. Από παλιά έχω εκφράσει την αντίθεσή μου στον συγκεκριμένο τρόπο παρουσίασης της φυσικής και θα συνεχίσω να το κάνω.

Αν σκοπεύουμε να μελετήσουμε το ρόλο των ηλεκτρονίων στην αγωγιμότητα των μετάλλων (κάτι που μπορεί να γίνει άριστα ενώ ακόμα διδάσκουμε τη σύμβαση του ρεύματος θετικού φορτίου), πρέπει, αρχικά, να δημιουργήσουμε τη βάση για να κατανοήσουν οι μαθητές τα εξής: Γιατί δεχόμαστε την ύπαρξη των ηλεκτρονίων; Πότε και πώς αυτά ανιχνεύθηκαν; Σε τι διαφέρουν οι ιδιότητές τους από τις ιδιότητες άλλων οντοτήτων της μακροσκοπικής και της μικροσκοπικής κλίμακας; Ορισμένα εγχειρίδια που ασχολούνται με τα ηλεκτρόνια δημιουργούν, όντως, αυτή τη βάση με πειστικό και εύλογο τρόπο, αν και όχι τόσο αυστηρό· θεωρώ, ωστόσο, ότι πρόκειται για συνεπή χειρισμό του ζητήματος: μόνον οι «στεγνές» αστήρικτες διακηρύξεις είναι καταστροφικές.

Αφού παραθέσουμε μια πειστική εξήγηση της αποδοχής της ύπαρξης του ηλεκτρονίου, η επόμενη ερώτηση του τύπου: «Πώς γνωρίζουμε ότι...;» αφορά την επιβεβαίωση της πεποίθησής μας ότι τα ηλεκτρόνια είναι οι ελεύθεροι φορείς του φορτίου μέσα στα μέταλλα. Η ελευθερία των φορέων του φορτίου συμπεραίνεται από την παρατήρηση ότι δεν υπάρχει κατώφλι διαφοράς δυναμικού για την εκδήλωση ρεύματος μέσα στα μέταλλα: η ευθεία γραμμή στη γραφική παράσταση του νόμου του Ohm εκτείνεται έως το μηδέν (βλ. εδάφιο 7.7). Όπως συμβαίνει συχνά, τα ιστορικά γεγονότα που συνδέονται μ' αυτό το θέμα είναι πολύ κατατοπιστικά και επιτρέπουν την ανακύκληση των ιδεών σε πλουσιότερο πλαίσιο. (Υπέρ της ανακύκλησης συνηγορούμε επανειλημμένα στο παρόν βιβλίο.)

Ο Thomson, μετά την αρχική εργασία του (το 1897) στη σωματιδιακή φύση των καθοδικών ακτίνων (βλ. εδάφια 10.4 και 10.5), προσπάθησε να δείξει ότι σωματίδια με τον ίδιο λόγο φορτίου προς μάζα εμφανίζονται έξω από τα μέταλλα τόσο στη φωτοηλεκτρική εκπομπή όσο και στη θερμική. (Η καθοδική δέσμη που μελετούσε προέκυπτε από εκπομπή την οποία προκα-

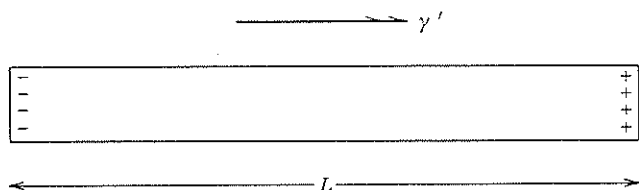
λούσε πεδίο.) Οι παρατηρήσεις του οδήγησαν φυσιολογικά στην κοινώς αποδεκτή υπόθεση ότι στα μέταλλα υπάρχουν ηλεκτρόνια και ότι πρόκειται, ενδεχομένως, για τους ελεύθερους φορείς του φορτίου. Αν και πρόκειται για εύλογη υπόθεση, δεν αποτελεί, ωστόσο, απόδειξη. Απέμενε να αποδειχθεί ότι μέσα στα μέταλλα υπάρχουν αδέσμευτα ηλεκτρόνια. Το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε με ευθύ και απλό τρόπο από τους Tolman και Stewart (1916, 1917).

Οι Tolman και Stewart υιοθέτησαν την εξής μέθοδο: αρχικά, σε ένα κομμάτι μέταλλο προσέδιδαν μεγάλη επιτάχυνση· κατόπιν, παρατηρούσαν τη διαφορά δυναμικού που εκδηλώνεται μεταξύ των άκρων του μετάλλου λόγω της αδρανειακής μάζας των ελεύθερων φορέων φορτίου οι οποίοι υπάρχουν μέσα του. Εξαιτίας της παρουσίας των φορέων, το φαινόμενο είναι ανάλογο μ' εκείνο που εμφανίζεται σε έναν κλειστό σωλήνα που περιέχει κάποιο ρευστό, αν επιταχύνουμε το σωλήνα. Στο ρευστό εμφανίζεται βαθμίδα πίεσης, η υδροστατική πίεση γίνεται μεγαλύτερη στο ένα άκρο απ' όσο στο άλλο, μέχρις ότου το ρευστό αποκτήσει παντού την ίδια επιτάχυνση. Στο μέταλλο οι φορείς του φορτίου ολισθαίνουν μέσα στο πλέγμα και συσσωρεύονται περισσότερο στο ένα άκρο απ' όσο στο άλλο, μέχρις ότου το ηλεκτρικό πεδίο που εκδηλώνεται στο εσωτερικό του σώματος είναι αρκετό για να επιταχύνει μαζί με το πλέγμα και όλους τους ελεύθερους φορείς φορτίου.

Στο πραγματικό πείραμα ο Tolman και ο Stewart χρησιμοποίησαν μια μπουκιά (διαμέτρου περίπου 24 cm) την οποία περιστρέφαν γρήγορα. Γύρω της ήταν τυλιγμένο σύρμα μήκους 450 m, το οποίο κατέληγε σε ένα πολύ ευαίσθητο βαλλιστικό γαλβανόμετρο. Η περιστροφή διακοπτόταν απότομα και η απόκλιση του γαλβανομέτρου φανέρωνε τη διέλευση ενός παλμού ρεύματος. Από τη μέτρηση αυτή προσδιόρισαν το λόγο του φορτίου προς τη μάζα των ελεύθερων φορέων μέσα στο μέταλλο. Προέκυψε, λοιπόν (με σχετικά μεγάλη πειραματική απροσδιοριστία), ότι ο λόγος ήταν ίσος με το λόγο του ηλεκτρονίου εκτός των μετάλλων, τον οποίο είχαν παρατηρήσει ο Thomson και οι άλλοι ερευνητές. Σε εισαγωγικό επίπεδο, ωστόσο, η πλήρης ανάλυση αυτής της διαδικασίας, συμπεριλαμβανομένης της ερμηνείας της συμπεριφοράς του βαλλιστικού γαλβανομέτρου, συσκοτίζει το κύριο συμπέρασμα· είναι, λοιπόν, περιττή. (Για πιο προχωρημένους μαθητές, λόγω χάρη ενός τμήματος θετικής κατεύθυνσης, η πλήρης ανάλυση είναι δυνατό να αποδειχθεί πολύ διδακτική λόγω του πλούτου των φυσικών ιδεών που συναντώνται σε ουσιαστικό πλαίσιο.)

Θεωρώντας ότι είναι δυνατό να μετρήσουμε άμεσα την προσδοθείσα επιτάχυνση και τη διαφορά δυναμικού που εκδηλώνεται μεταξύ των άκρων του επιταχυνθέντος αγωγού, η ανάλυση γίνεται εξαιρετικά απλή. Παρατηρήστε το Σχ. 7.12.1.

Εφαρμόζοντας τον 2ο νόμο του Νεύτωνα σε κάθε φορέα ξεχωριστά,



Σχήμα 7.12.1 Απεικόνιση του πειράματος Tolman-Stewart: Μεταλλικός αγωγός μήκους L κινείται προς τα δεξιά με γνωστή επιτάχυνση γ . Αν στο εσωτερικό του αγωγού υπάρχουν ελεύθεροι φορείς φορτίου μάζας m και φορτίου e , ολισθαίνουν και τείνουν να συγκεντρωθούν στο αριστερό άκρο του αγωγού. Αποτέλεσμα: μεταξύ των άκρων εμφανίζεται διαφορά δυναμικού ΔV και μέσα στον αγωγό ηλεκτρικό πεδίο $E = \Delta V/L$.

έχουμε:

$$eE = m\gamma \quad (7.12.1)$$

και

$$\frac{e}{m} = \frac{\gamma L}{\Delta V} \quad (7.12.2)$$

Ο άγνωστος λόγος του φορτίου προς τη μάζα εκφράζεται μέσω μετρήσιμων μεγεθών. Στο πραγματικό πείραμα, διαφορά δυναμικού αναπτύσσεται, όντως, μεταξύ των άκρων του αγωγού· επίσης, ο λόγος του φορτίου προς τη μάζα, που προκύπτει από τον υπολογισμό, συμφωνεί μ' εκείνον που προκύπτει για τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από μέταλλα. Αρχικά, ο Tolman και ο Stewart εκτέλεσαν το πείραμα με σύρμα χαλκού και κατόπιν απέδειξαν ότι παρόμοια αποτελέσματα προκύπτουν με ασήμι και αλουμίνιο. Η απλουστευμένη ανάλυση που περιγράψαμε είναι ιδιαίτερα διδακτική για όλους τους μαθητές· τους δίνει την ευκαιρία να επανέλθουν στη χρήση προηγούμενων εννοιών οι οποίες εμφανίστηκαν στο πρόβλημα του ρεύματος. Επιπλέον, το θέμα δεν είναι μια τεχνητή άσκηση στο τέλος του κεφαλαίου, αλλά ένα πραγματικό πείραμα με μια ουσιώδη ερμηνεία.

Ο συνεργάτης μου Philip Peters με πληροφόρησε ότι πρόσφατα, σε ένα προχωρημένο μάθημα ηλεκτρομαγνητισμού για πτυχιούχους, δοκίμασε στην πράξη αυτό το πρόβλημα· διαπίστωσε δε ότι οι σπουδαστές δυσκολεύονταν πολύ να αντιληφθούν την κατάσταση και να αντιμετωπίσουν το φυσικό πρόβλημα. Η αντίδρασή τους δεν προέρχεται, βέβαια, από κάποια ενδογενή δυσκολία του προβλήματος· οφείλεται στο ότι ουδέποτε σε προπτυχιακό επίπεδο οι σπουδαστές είχαν την ευκαιρία να μελετήσουν και να αποσαφηνίσουν τι συμβαίνει σε παρόμοιες καταστάσεις.

Είναι απαραίτητο να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να αντιληφθούν τη σύνδεση μεταξύ αυτού του προβλήματος του ηλεκτρισμού και ορισμένων μηχανικών αναλόγων του, λόγου χάρη ενός εκκρεμούς που αιωρείται μέσα

σε ένα επιταχυνόμενο αυτοκίνητο ή μιας μπάλας που επιταχύνεται από το πίσω τοίχωμα ενός επιταχυνόμενου αυτοκινήτου. Συγγενέστερο μηχανικό ανάλογο είναι το ρευστό που επιταχύνεται μέσα σε σωλήνα.

Στην περίπτωση ενός ουσιαστικά ασυμπίεστου υγρού που βρίσκεται μέσα σε έναν επιταχυνόμενο σωλήνα μήκους L , το αντίστοιχο αποτέλεσμα για τον ειδικό όγκο v^* είναι:

$$v = \frac{\gamma L}{\Delta P} \quad (7.12.3)$$

όπου ΔP είναι η διαφορά της πίεσης μεταξύ των άκρων του σωλήνα και γ η προσδιδόμενη επιτάχυνση.

Η εξαγωγή του συγκεκριμένου αποτελέσματος είναι πολύ καλή άσκηση για τους αριστούχους μαθητές: όχι μόνο καταδεικνύει τη βαθιά συγγένεια μεταξύ δύο φαινομενικά άσχετων φυσικών καταστάσεων, αλλά, επίσης, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για να κατανοήσουν οι μαθητές ότι, εξαιτίας της βαθμίδας πίεσης που αναπτύσσεται, ένας φελλός (με πυκνότητα μικρότερη από του ρευστού που τον περιβάλλει) μετατοπίζεται προς την κατεύθυνση της επιτάχυνσης και όχι προς την αντίθετη.

Πολυπλοκότερο είναι το πρόβλημα ενός σωλήνα με κλειστά άκρα που περιέχει ιδανικό αέριο του οποίου, αρχικά, η πίεση P_0 είναι ομοιόμορφη. Όταν ο σωλήνας επιταχύνεται, αναπτύσσεται βαθμίδα πίεσης παρόμοια μ' εκείνη ενός αερίου ομοιόμορφης θερμοκρασίας το οποίο βρίσκεται σε βαρυτικό πεδίο. Ολοκληρώνοντας τη διαφορική εξίσωση της πίεσης, προκύπτει μια εκθετική συνάρτηση παρόμοια μ' εκείνη στην περίπτωση της ατμόσφαιρας ομοιόμορφης θερμοκρασίας. Κατόπιν, είναι απαραίτητο να διατυπώσουμε και να εφαρμόσουμε τη συνθήκη διατήρησης της μάζας μέσα στο σωλήνα. Στην περίπτωση που μελετάμε, είναι καταρχάς δυνατό να προσδιορίσουμε τη μοριακή μάζα μ του αερίου από μετρήσιμα μεγέθη, μέσω της εξίσωσης:

$$\mu = \frac{RT}{\gamma L} \frac{\Delta P}{P_0} \quad (7.12.4)$$

όπου ΔP είναι η διαφορά της πίεσης μεταξύ των άκρων του σωλήνα. Αν και δεν πρόκειται, βέβαια, για κατάλληλο τρόπο μέτρησης της μοριακής μάζας, οι άριστοι μαθητές θεωρούν ότι η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά διδακτική άσκηση μαθηματικής φυσικής.

* Ο λόγος του όγκου ενός σώματος προς τη μάζα του σώματος ονομάζεται ειδικός όγκος. Πρόκειται για το αντίστροφο της πυκνότητας. (Σ.τ.μ.)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 7Α

Ενδεικτικά προβλήματα για το σπίτι και ερωτήσεις για τεστ

Εισαγωγή

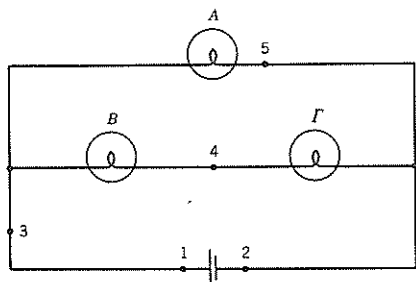
Παραθέτουμε ενδεικτικά προβλήματα ποιοτικού και φαινομενολογικού χαρακτήρα σε απλά κυκλώματα συνεχούς ρεύματος. Συνήθως, στα περισσότερα εγχειρίδια αυτή η πλευρά παραλείπεται σε σημαντικό βαθμό. Τέτοια προβλήματα μπορεί να δοθούν ως εργασία για το σπίτι ή σε τεστ με ανοιχτά βιβλία. Πρόκειται, βεβαίως, για πρότυπα προβλήματα: είναι δυνατό (και επιθυμητό) να γίνουν πολλές παραλλαγές.

1. Στο κύκλωμα του Σχ. 7Α.1, η μπαταρία δημιουργεί σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της στα σημεία 1 και 2 (θεωρήστε, δηλαδή, ότι η εσωτερική αντίστασή της είναι αμελητέα).

Βιδώνουμε στα ντουί τις τρεις παρόμοιες λάμπες φακού A , B και Γ . Όταν κλείνει το κύκλωμα, οι λάμπες ανάβουν. Ύστερα από κάθε μεταβολή που περιγράφεται στις ερωτήσεις και πριν γίνει η επόμενη μεταβολή, το σύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση, η οποία φαίνεται στο σχήμα.

Το ερώτημα «Πώς μεταβάλλεται...» σημαίνει αν το μέγεθος που μελετάμε αυξάνεται, μειώνεται ή παραμένει αμετάβλητο. Σε κάθε απάντησή σας, περιγράψτε σύντομα το συλλογισμό σας.

α) Στην αρχική κατάσταση, πόσο διαφέρει η φωτοβολία κάθε λάμπας από εκείνη των υπολοίπων;



Σχήμα 7Α.1 Ταυτόσημες λάμπες, συνδεδεμένες με μπαταρία που δημιουργεί σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της.

β) Αν ξεβιδώσουμε και αφαιρέσουμε τη λάμπα A από το ντουί της, πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία *καθεμιάς* από τις τρεις λάμπες;

γ) Αν ξεβιδώσουμε και αφαιρέσουμε τη λάμπα Γ , πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία *καθεμιάς* από τις τρεις λάμπες; Ταυτόχρονα, πώς μεταβάλλεται το ρεύμα που διέρχεται από τα σημεία 3, 4 και 5;

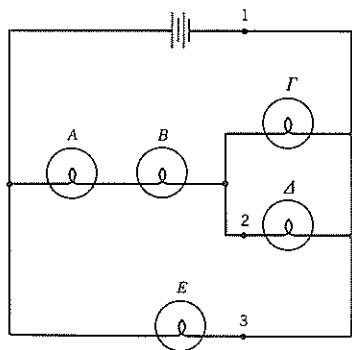
δ) Αν συνδέσουμε με σύρμα το άκρο 1 της μπαταρίας με το σημείο 4, πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία *καθεμιάς* από τις τρεις λάμπες; Ταυτόχρονα, πώς μεταβάλλονται: το ρεύμα που διέρχεται από το σημείο 3, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της λάμπας B , η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της λάμπας Γ και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων 1 και 5;

ε) Αν συνδέσουμε με σύρμα το άκρο 2 της μπαταρίας με το άκρο 5 του ντουί, πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία *κάθε* λάμπας και πώς το ρεύμα που διέρχεται από το σημείο 2;

στ) Αν συνδέσουμε μια τέταρτη λάμπα (Δ) παράλληλα μόνο με τη B (δηλαδή *όχι* και με τη Γ), πώς μεταβάλλονται η φωτοβολία *κάθε* λάμπας, το ρεύμα που διέρχεται από το σημείο 3, η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων 3 και 4 και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων 4 και 2;

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Η επόμενη άσκηση είναι παραλλαγή της 1ης άσκησης. Η εισαγωγική παρατήρηση της 1ης άσκησης ισχύει και στην παρούσα. Ασκήσεις αυτού του είδους είναι απαραίτητες για να αφομοιώσουν οι μαθητές τον τρόπο σκέψης.

2. Στο κύκλωμα του Σχ. 7Α.2 η μπαταρία είναι αρκετά ισχυρή, ώστε όλες οι ταυτόσημες λάμπες ανάβουν εμφανώς. Η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας είναι αμελητέα· η μπαταρία, λοιπόν, δημιουργεί σταθερή διαφο-



Σχήμα 7Α.2 Το κύκλωμα αποτελείται από ταυτόσημες λάμπες που συνδέονται με πηγή σταθερής διαφοράς δυναμικού.

ρά δυναμικού μεταξύ των άκρων της.

α) Υποθέστε ότι αφαιρούμε τη λάμπα Γ από το ντιού της. Πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία κάθε λάμπας; Πόσο διαφέρει η φωτοβολία κάθε λάμπας από εκείνη των υπολοίπων; Πώς μεταβάλλεται το ρεύμα που διέρχεται από το σημείο 1;

β) Αποκαταστήστε την αρχική κατάσταση του σχήματος. Υποθέστε ότι συνδέουμε με σύρμα τα σημεία 2 και 3. Πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία κάθε λάμπας; Πόσο διαφέρουν οι τελικές φωτοβολίες των λαμπτήρων μεταξύ τους; Πώς μεταβάλλεται το ρεύμα που διέρχεται από το σημείο 1; Πώς μεταβάλλεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των άκρων της λάμπας Γ και πώς μεταξύ των άκρων της B ;

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Το επόμενο πρόβλημα είναι μια εκδοχή του προηγούμενου τύπου προβλημάτων με μορφή απαντήσεων πολλαπλής επιλογής. Επειδή η διόρθωσή του γίνεται γρήγορα, είναι χρήσιμο να δοθεί ως τεστ, αφού έχουν μελετηθεί τα προηγούμενα προβλήματα.

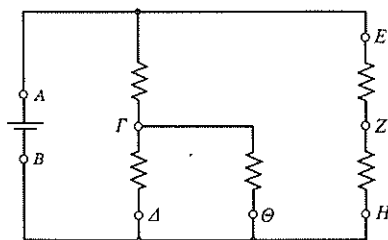
3. Θεωρήστε το κύκλωμα του Σχ. 7Α.3, το οποίο περιέχει αντιστάσεις. Η μπαταρία έχει αμελητέα εσωτερική αντίσταση και οι αντιστάσεις είναι ταυτόσημες.

Για κάθε προτεινόμενη μεταβολή του κυκλώματος, βάλτε σε κύκλο τη σωστή ή τις σωστές λέξεις της απάντησης:

α) Μεταξύ των σημείων E και H συνδέουμε μια άλλη ταυτόσημη αντίσταση:

1. Το ρεύμα στο σημείο A (αυξάνεται, μειώνεται, παραμένει αμετάβλητο).
2. Το ρεύμα στο σημείο Z (αυξάνεται, μειώνεται, παραμένει αμετάβλητο).
3. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων E και Z (αυξάνεται, μειώνεται, παραμένει αμετάβλητη).

β) Επιστρέψτε στην αρχική κατάσταση του σχήματος. Μεταξύ των σημείων Γ και B συνδέουμε μια ταυτόσημη αντίσταση:



Σχήμα 7Α.3 Ταυτόσημες αντιστάσεις συνδεδεμένες με μπαταρία που δημιουργεί σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ των ακροδεκτών της.

1. Το ρεύμα στο σημείο A (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητο).
2. Το ρεύμα στο σημείο Δ (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητο).
3. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και Γ (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητη).
4. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων Z και H (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητη).

γ) Επιστρέψτε στην αρχική κατάσταση του σχήματος. Μεταξύ των σημείων E και Γ συνδέουμε ένα σύρμα:

1. Το ρεύμα στο σημείο Z (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητο).
2. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων Γ και Δ (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητη).
3. Το ρεύμα στο σημείο Θ (αυξάνεται, ελαττώνεται, παραμένει αμετάβλητο).

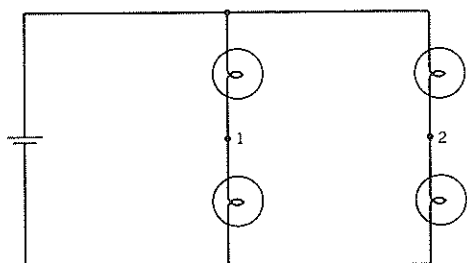
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Όπως αναφέρουμε στο εδάφιο 7.9, πολλοί μαθητές (συμπεριλαμβανομένων όσων παρακολουθούν μαθήματα φυσικής, προετοιμαζόμενοι για μηχανικοί ή φυσικοί) πιστεύουν ότι το ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί φαινόμενα επειδή εξασθενεί καθώς κινείται από το ένα άκρο στο άλλο. Το επόμενο πρόβλημα είναι ένας τρόπος για να αντιμετωπίσουμε αυτήν τη λανθασμένη πεποίθηση. Κατευθύνουμε τους μαθητές να τη διορθώσουν, αφήνοντάς τους, αρχικά, να κάνουν λάθος και, κατόπιν, βοηθώντας τους να αναθεωρήσουν τον τρόπο σκέψης τους.

4. Θεωρήστε το κύκλωμα του Σχ. 7Α.1. Υποθέστε ότι στο σημείο 4 διακόπτουμε τη σύνδεση και παρεμβάλλουμε μια αντίσταση σε σειρά με τις λάμπες B και Γ . Πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία των λαμπτήρων B και Γ ; Περιγράψτε εν συντομία το συλλογισμό σας.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Η επόμενη άσκηση δεν είναι τόσο τετριμμένη όσο φαίνεται. Οι περισσότεροι μαθητές έχουν ουσιαστική δυσκολία μ' αυτήν. Αποτελεί, ωστόσο, άριστη προπαρασκευή για τη μελέτη της γέφυρας Wheatstone. Μπορούμε, επίσης, να την επεκτείνουμε στην περίπτωση κατά την οποία οι αντιστάσεις δεν είναι ταυτόσημες.

5. Το κύκλωμα του Σχ. 7Α.4 αποτελείται από ταυτόσημες λάμπες και μπαταρία αμελητέας εσωτερικής αντίστασης.

Υποθέστε ότι συνδέουμε με σύρμα τα σημεία 1 και 2 του κυκλώματος. Τι συμβαίνει στο σύρμα; Πώς μεταβάλλεται η φωτοβολία κάθε λάμπας, το ρεύμα που διαρρέει από την μπαταρία και η διαφορά δυναμικού στα άκρα



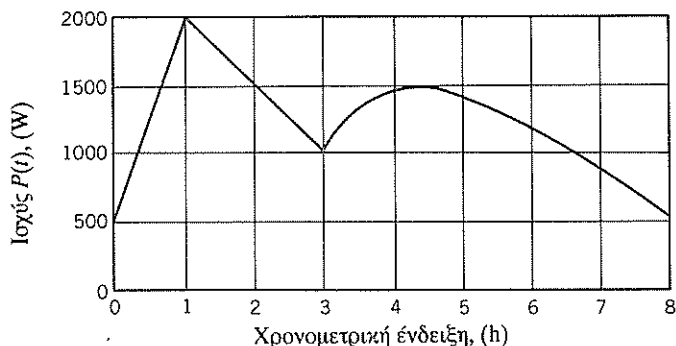
Σχήμα 7Α.4 Ταυτόσημες λάμπες συνδεδεμένες με μπαταρία που δημιουργεί σταθερή διαφορά δυναμικού.

κάθε λάμπας; Σε κάθε περίπτωση, περιγράψτε εν συντομία το συλλογισμό σας.

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ: Με την επόμενη άσκηση, μας δίνεται η ευκαιρία να επανέλθουμε σε προηγούμενους τρόπους σκέψης, συλλογισμού και διαμόρφωσης των εννοιών. Η άσκηση δεν είναι τόσο τετριμμένη όσο, ίσως, φαίνεται στο διδάσκοντα: πολλοί μαθητές, ακόμα κι εκείνοι που προετοιμάζονται για μηχανικοί ή φυσικοί, εκπλήσσονται συνειδητοποιώντας ότι είναι δυνατό να χρησιμοποιήσουν το ρολόι της ΔΕΗ για να μετρήσουν «το εμβαδόν που βρίσκεται κάτω από μια καμπύλη»: εκπλήσσονται, επίσης, συνειδητοποιώντας τη σύνδεση μεταξύ φαινομενικά άσχετων ασκήσεων, τις οποίες μελέτησαν προηγουμένως.

6. Το ρολόι της ΔΕΗ είναι, όντως, συσκευή η οποία εκτελεί ολοκλήρωση: υπολογίζει το εμβαδόν της επιφάνειας που βρίσκεται κάτω από μια καμπύλη· μετρά τη στιγμιαία ισχύ $P(t) = \Delta V \cdot I(t)$ με την οποία τροφοδοτείται το κύκλωμα του σπιτιού και, σε ορισμένο χρονικό διάστημα, υπολογίζει την ολική ενέργεια με την οποία τροφοδοτήθηκε το κύκλωμα.

Στο Σχ. 7Α.5, υπάρχει μια υποθετική γραφική παράσταση του $P(t)$ ως



Σχήμα 7Α.5 Γραφική παράσταση της στιγμιαίας ισχύος $P(t)$ ως προς τη χρονομετρική ένδειξη.

προς τη χρονομετρική ένδειξη t . Η διαφορά δυναμικού ΔV διατηρείται σταθερά στα 120 V:

- α) Ποια μορφή έχει η γραφική παράσταση του $I(t)$ ως προς το t ;
- β) Από το Σχ. 7Α.5, προσδιορίστε την τιμή της συνολικής ενέργειας που προσφέρθηκε στο κύκλωμα του σπιτιού (υπολογίστε, δηλαδή, την ποσότητα των κιλοβαττωρών που γράφει το ρολόι) σε διάστημα οκτώ ωρών.
- γ) Συγκρίνετε τη διαδικασία που ακολουθήσατε στο παρόν πρόβλημα (συμπεριλαμβανομένων των συλλογισμών σας) με την άσκηση υπολογισμού της μετατόπισης ενός σώματος το οποίο εκτελεί ευθύγραμμη κίνηση, όταν σας έχει δοθεί η ταχύτητα ως προς τη χρονομετρική ένδειξη.

8. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

8.1 Εισαγωγή

Στο εδάφιο 6.2 επισημάναμε ότι οι περισσότεροι μαθητές δεν έχουν εξοικειωθεί αρκετά — μέσω προηγούμενης εμπειρίας τους — με ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα· δεν μπορούν, συνεπώς, να αντιληφθούν τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ αυτών των φαινομένων. Αν, ωστόσο (όπως συμβουλευσαμε στο 6ο Κεφάλαιο), προσέξουμε ώστε σε εισαγωγικό στάδιο να αντιληφθούν αυτή τη διάκριση, τους διευκολύνουμε σημαντικά να κατανοήσουν τα θέματα του ηλεκτρομαγνητισμού. Αν οι μαθητές δεν αντιληφθούν σαφώς τη λειτουργική διάκριση, τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα τους προκαλούν μεγάλη σύγχυση. Καταφεύγουν, λοιπόν, απεγνωσμένα στην απομνημόνευση, χωρίς να κατανοούν το θέμα. Ορισμένοι μαθητές που βρίσκονται σ' αυτήν τη σύγχυση θεωρούν ότι τα θετικά φορτία απωθούνται από τους βόρειους μαγνητικούς πόλους, ότι ακίνητα φορτία έλκονται ή απωθούνται από το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει γύρω από ρευματοφόρο αγωγό και ότι συμβαίνουν διάφορα φαινόμενα τα οποία, ωστόσο, δεν εκδηλώνονται στην πραγματικότητα.

Οι γνώσεις μας για τα φαινόμενα δεν προέρχονται από αφηρημένες αρχές, αλλά από την παρατήρηση πραγματικών γεγονότων: διακρίνουμε, δηλαδή, την τάξη και τη συστηματικότητα που εκδηλώνεται σ' αυτά και τις καταγράφουμε. Για να βοηθήσουμε τους μαθητές να αποκτήσουν αυτό το είδος γνώσης, ο μοναδικός τρόπος είναι να τους προσφέρουμε αρκετές ευκαιρίες οπτικής και κιναισθητικής εμπειρίας, που τους διευκολύνουν να συγκρατήσουν στη μνήμη τους τις απαραίτητες παραστάσεις. Μεταξύ των σημαντικότερων λόγων αποτυχίας της διδασκαλίας των θεμάτων του ηλεκτρομαγνητισμού, είναι η έλλειψη προσοχής στις βασικές λειτουργικές προαπαιτούμενες γνώσεις και η έλλειψη διαθέσιμου χρόνου που είναι απαραίτητος για να αποκτήσουν οι μαθητές αρκετή εμπειρία, ώστε τα φαινόμενα να εντυπωθούν στη μνήμη τους.

Στο παρόν Κεφάλαιο, δίνω έμφαση στον τρόπο με τον οποίο είναι δυνατό να καλλιεργήσουμε την εμπειρία και τον τρόπο σκέψης που συνδέεται μ' αυτή. Δημιουργούμε, έτσι, τις προϋποθέσεις για να συλλάβουν οι μαθητές τη φαινομενολογία, η οποία σε ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής τους διαφεύγει. Υποστηρίζω, επίσης, ότι μπορούμε να βοηθήσουμε τους μαθη-

τές να κατανοήσουν τους λόγους οι οποίοι παρακίνησαν τον 19ο αιώνα τους φυσικούς να επινοήσουν τη θεωρία πεδίου και να εγκαταλείψουν τη νευτώνεια δράση από απόσταση.

8.2 Το πείραμα του Oersted

Αν και οι φυσικές προϋποθέσεις εκτέλεσης του πειράματος του Oersted είναι πολύ απλές, τα βασικά φαινόμενα είναι εντελώς άγνωστα στους αρχάριους μαθητές. Αν, λοιπόν, επιδειχθούν βιαστικά στην τάξη, εντυπώνονται ελάχιστα στη σκέψη τους. Τα μαγνητικά φαινόμενα τα οποία εμφανίζονται γύρω από ρευματοφόρο αγωγό είναι, ευτυχώς, εύκολο να μελετηθούν σε απλά πειράματα που εκτελούνται στο σπίτι. Χρειαζόμαστε, απλώς, μια μικρή πυξίδα και ένα κύκλωμα αποτελούμενο από μπαταρία φακού, λάμπες και σύρμα. Αυτή η εργασία για το σπίτι είναι δυνατό να συνδυαστεί άμεσα με την εργασία με τις μπαταρίες και τις λάμπες που προτείναμε στο εδάφιο 7.5. Με τον τρόπο αυτό, η μελέτη εμπλουτίζεται· αλλιώς, συνίσταται αποκλειστικά στην εισαγωγή αριθμητικών δεδομένων σε προβλήματα που υπάρχουν στο τέλος του αντίστοιχου κεφαλαίου. Δεν υπάρχουν πολλές ευκαιρίες για να μελετήσουν οι μαθητές πραγματικά φαινόμενα ως συστατικό της εργασίας τους για το σπίτι· επενδύοντας, λοιπόν, σ' αυτό, κάθε φορά που μας δίνεται η ευκαιρία, το διδακτικό όφελος είναι σημαντικό.

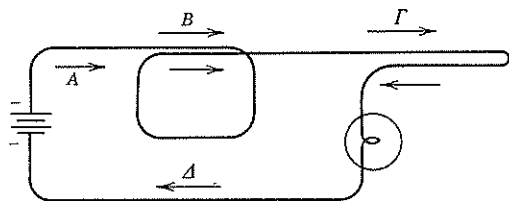
Ελάχιστοι μαθητές ερευνούν συστηματικά ένα φαινόμενο χωρίς να τους καθοδηγήσουμε. Στο πλαίσιο της εργασίας που τους αναθέτουμε για το σπίτι, είναι απαραίτητο, λοιπόν, να τους κατευθύνουμε με σωκρατικό τρόπο: 1) για να διαπιστώσουν την απόκλιση της πυξίδας πάνω και κάτω από τον ρευματοφόρο αγωγό· 2) για να διαπιστώσουν το αποτέλεσμα της αντιστροφής της σύνδεσης των άκρων της μπαταρίας· 3) για να εξακριβώσουν τα χαρακτηριστικά του φαινομένου γύρω γύρω από το σύρμα — όχι μόνο πάνω και κάτω απ' αυτό· 4) για να παρατηρήσουν ποιοτικά το αποτέλεσμα της μεταβολής της απόστασης μεταξύ του σύρματος και της βελόνας της πυξίδας· 5) για να μελετήσουν ποιοτικά τη μεταβολή της επίδρασης πάνω στη βελόνα της πυξίδας, αν στο κύκλωμα εισαγάγουμε σε σειρά ή παράλληλα με την αρχική λάμπα άλλες λάμπες· 6) για να μελετήσουν το αποτέλεσμα αν εισαγάγουμε μια δεύτερη μπαταρία σε σειρά με την αρχική· 7) για να διατυπώσουν, συνθέτοντας τις παρατηρήσεις τους, τον μνημονικό κανόνα του δεξιού χεριού για το μαγνητικό πεδίο γύρω από ρευματοφόρο αγωγό.

Απ' αυτήν την απλή εμπειρία οι μαθητές είναι εύκολο να κατανοήσουν τη λειτουργία του γαλβανομέτρου εφαπτομένης, που υπήρξε, ιστορικά, το πρώτο όργανο με το οποίο συγκρίναμε τις εντάσεις ηλεκτρικών ρευμάτων μεταξύ τους.

Τέλος, μπορούμε να κατευθύνουμε τους μαθητές να μελετήσουν (και να αφομοιώσουν) την αρχή της υπέρθεσης των μαγνητικών αποτελεσμάτων γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς. Σπάνια οι συγγραφείς των εγχειριδίων μελετούν ρητά την υπέρθεση· τη διακηρύσσουν απλώς ή τη θεωρούν δεδομένη· δεν θεωρούν ότι είναι απαραίτητο να υποδείξουν κάποια πειραματική διερεύνηση ή να παραθέσουν κάποιο επιχείρημα για να την υποστηρίξουν. Στο Σχ. 8.2.1, φαίνεται πόσο απλή είναι η διερεύνηση, αν σε σταθερή απόσταση από το σύρμα χρησιμοποιήσουμε μια πυξίδα ως απλό γαλβανόμετρο εφαπτομένης.

Η παρατήρηση ότι στα σημεία A και Δ η επίδραση πάνω στην πυξίδα έχει παρόμοια ένταση ενισχύει την έννοια της συνέχειας του ηλεκτρικού ρεύματος κατά μήκος όλου του κυκλώματος (πρόκειται για το πρότυπο το οποίο, αρχικά, διαμορφώθηκε στο πλαίσιο των παρατηρήσεων με μπαταρίες και λάμπες, που περιγράψαμε στο 7ο Κεφάλαιο). Η άσκηση της υπέρθεσης (δηλαδή, η σύγκριση του αποτελέσματος στα σημεία A , B και Γ) είναι απολύτως απαραίτητη· σπάνια, ωστόσο, παρουσιάζεται στους μαθητές. Είναι, βέβαια, δυνατό να υποθέσουμε ότι η υπέρθεση ισχύει και να ελπίσουμε ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η Φύση είναι απλή και γραμμική· η υπόθεση, ωστόσο, διαφέρει από το πραγματικό γεγονός: είναι απαραίτητο να επικαλεστούμε το πείραμα, για να δεχτούμε, τελικά, την ισχύ της υπόθεσής μας. Δεχόμενοι την υπέρθεση σε απλές περιπτώσεις και χρησιμοποιώντας τον κανόνα του δεξιού χεριού, προσδιορίζουμε το μαγνητικό πεδίο γύρω από ρευματοφόρους αγωγούς ποικίλων σχημάτων (λόγου χάρη, γύρω από πηνία).

Είναι πολύ συνηθισμένο να αναφέρουμε την ιστορία του φαινομένου που ο Oersted ανακάλυψε απροσδόκητα κατά την εκτέλεση ενός πειράματος στις παραδόσεις του (και από τότε το φαινόμενο φέρει το όνομά του). Έχουμε, λοιπόν, την τάση να παραβλέπουμε την εσκεμμένη, αν και αποτυχημένη προσπάθεια ανακάλυψης της σύνδεσης μεταξύ του ηλεκτρισμού και



Σχήμα 8.2.1 Κύκλωμα με μπαταρία και λάμπα. Το μόνιμα λυγισμένο σύρμα έχει τη μορφή του σχήματος. Στα σημεία A και Δ το σύρμα είναι μονό και διαρρέεται από το ίδιο ρεύμα. Στο B εκδηλώνεται το αποτέλεσμα δύο συρμάτων που διαρρέονται από ομόροπο ρεύμα. Στο Γ τα δύο σύρματα διαρρέονται από αντίροπο ρεύμα. Στα σημεία A και Δ ασκείται ορισμένη ροπή στο γαλβανόμετρο εφαπτομένης, στο σημείο B ασκείται διπλάσια και στο σημείο Γ μηδενική.

του μαγνητισμού τα προηγούμενα χρόνια. Ο Φραγκλίνος είχε προσπαθήσει να μαγνητίσει, μέσω ηλεκτρικής εκκένωσης, μια βελόνα. Ο Whittaker, στο βιβλίο του «History of the Theories of Aether and Electricity», αναφέρει: «Το 1774 η Ακαδημία Ηλεκτρισμού της Βαυαρίας ανακοίνωσε διαγωνισμό με θέμα: Υπάρχει πραγματική και φυσική αναλογία μεταξύ των ηλεκτρικών και των μαγνητικών δυνάμεων;» Το 1805 δύο Γάλλοι ερευνητές προσπάθησαν να προσδιορίσουν αν μια αιωρούμενη βολταϊκή στήλη προσανατολίζεται σε συγκεκριμένη κατεύθυνση ως προς τη Γη. Στις αρχές του 19ου αιώνα, υποστηρικτές της Φυσικής Φιλοσοφίας ήλπιζαν ότι θα ανακαλύψουν την αλληλοσύνδεση όλων των «δυνάμεων» της Φύσης. Ο ίδιος ο Oersted, πριν από την ανακάλυψή του, είχε εκτελέσει συστηματικές έρευνες για να προσδιορίσει την αλληλοσύνδεση. Αν, πριν από την «απότομη» εισαγωγή του ηλεκτρομαγνητισμού, ζητήσουμε από τους μαθητές να διαλογιστούν στα ζητήματα που προαναφέραμε, συμβάλλουμε στην κατανόηση και στη μάθηση. Σε λίγους μαθητές δίνεται η ευκαιρία να ασχοληθούν μεθοδικά με τον προσδιορισμό της διάκρισης μεταξύ μιας υπόθεσης και κάποιου παρατηρήσιμου γεγονότος.

Είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι στο πείραμα του Oersted εμφανίζεται μια αλληλεπίδραση απολύτως διαφορετική από εκείνες που έχουν συναντήσει έως αυτήν τη στιγμή οι μαθητές. Στις αλληλεπιδράσεις που έχουν μελετήσει προηγουμένως (επαφής, βαρυτική, ηλεκτρική, ακόμα και της τριβής), οι δύο δυνάμεις της αλληλεπίδρασης είναι συγγραμμικές και κείνται στην ευθεία που ενώνει τα αλληλεπιδρώντα σωματίδια. Στο πείραμα του Oersted, η δύναμη η οποία ασκείται σε κάθε πόλο της πυξίδας είναι κάθετη στην ακτινική ευθεία που ξεκινά από τον ρευματοφόρο αγωγό και καταλήγει στο σημείο όπου παρατηρούμε τη δύναμη. Ελάχιστα εγχειρίδια ή παραδόσεις ζητούν από τους μαθητές να προσέξουν αυτό το γεγονός, αν και αποτελεί επέκταση της προηγούμενης εμπειρίας τους.

Τέλος, είναι απαραίτητο να κατευθύνουμε τους μαθητές να αναρωτηθούν αν κινούμενα ηλεκτροστατικά φορτία προκαλούν παρόμοια φαινόμενα με το ρεύμα ενός αγωγού. Το ότι δεν πρόκειται για τετριμμένο ζήτημα αποδεικνύεται από την έκταση που έλαβε η μελέτη του κατά τον 19ο αιώνα. Οι περισσότεροι φυσικοί θεωρούσαν ότι η απάντηση στο ερώτημα είναι καταφατική και το 1838 ο Faraday διεκήρυξε σθεναρά ότι «αν στο κέντρο του δωματίου ηλεκτρίσουμε θετικά μια σφαίρα και, κατόπιν, τη μετακινήσουμε προς οποιαδήποτε κατεύθυνση, εμφανίζονται φαινόμενα σαν να υπάρχει ρεύμα προς την ίδια κατεύθυνση». Η άποψη αυτή, ωστόσο, ήταν απαραίτητο να επαληθευτεί πειραματικά. Ο έλεγχος, βεβαίως, δεν ήταν εύκολος. (Η δυσκολία αποτελεί εύγλωττη μαρτυρία για την τεράστια ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου το οποίο μεταφέρεται με το ηλεκτρικό ρεύμα.) Τελικά το 1875 ελέγχθηκε άμεσα από τον H. A. Rowland, όταν βρισκόταν για ένα χρόνο στο Βερολίνο, στο εργαστήριο του Helmholtz, πριν επιστρέψει

στις Ηνωμένες Πολιτείες, για να αναλάβει την έδρα της φυσικής στο νεοϊδρυμένο Πανεπιστήμιο John Hopkins. Ο Rowland φόρτισε περιφερειακά έναν μονωτικό δίσκο τον οποίο περιέστρεψε γρήγορα· παρατήρησε, λοιπόν, ότι το μαγνητικό πεδίο γύρω από το χείλος του δίσκου είναι ουσιαστικά παρόμοιο μ' εκείνο ενός ρευματοφόρου αγωγού.

Από την περιγραφή ενός από τα αρχικά πειράματα του Oersted προκύπτει μια αποτελεσματική άσκηση για το σπίτι:

Μεταξύ των πολλών πειραμάτων και παρατηρήσεών του, ο Oersted αναφέρει το εξής: α) «Το είδος του μετάλλου από το οποίο αποτελείται ο αγωγός δεν μεταβάλλει τα αποτελέσματα, εκτός, ίσως, από την έντασή τους. Χρησιμοποιήσαμε με την ίδια επιτυχία σύρμα πλατίνας, χρυσού, αργύρου, χαλκού, σιδήρου, λωρίδες μολύβδου και ψευδαργύρου και μια ποσότητα υδραργύρου.» β) «Αν παρεμβάλλουμε μεταξύ του σύρματος και της βελόνας πέτρα, ξύλο ή γυαλί ή αν τοποθετήσουμε τη βελόνα μέσα σε χάλκινο δοχείο γεμάτο νερό, τα αποτελέσματα πάνω στη βελόνα της πυξίδας παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητα.» γ) «Βελόνες από χαλκό, γυαλί ή ρετσίνι δεν επηρεάζονται από τον ρευματοφόρο αγωγό, αν τις κρεμάσουμε όπως τη μαγνητική βελόνα.»

Ερμηνεύστε τα πειράματα του Oersted. Γιατί τα εκτέλεσε; Ποια συμπεράσματα εξάγετε από τις παρατηρήσεις που αναφέρει;

Σπάνια οι μαθητές έχουν την ευκαιρία να αντιμετωπίσουν ερωτήματα για τη σκοπιμότητα και την ερμηνεία ποιοτικών παρατηρήσεων, παρόμοιων με του Oersted. Ιδού, λοιπόν, μια πολύτιμη εμπειρία που είναι δυνατό να συνοδεύει τα συμβατικά προβλήματα.

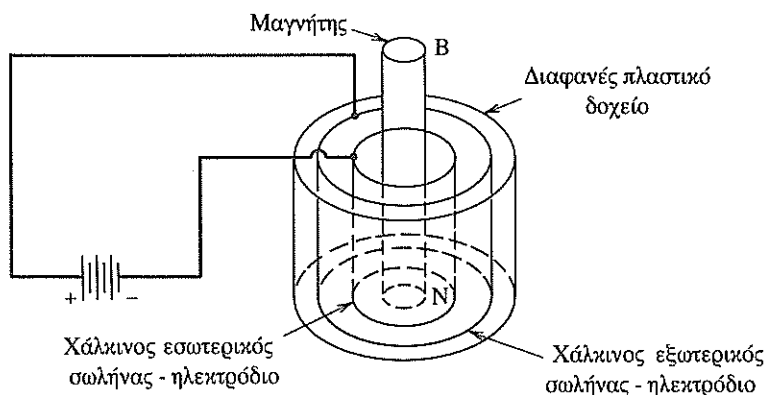
8.3 Δύναμη μεταξύ μαγνήτη και ρευματοφόρου αγωγού

Όταν εκτελούμε τα πειράματα του Oersted, όπου, συνήθως, χρησιμοποιούμε δύσκαμπτα ή χοντρά σύρματα και μια μικρή, ευαίσθητη πυξίδα, η προσοχή μας εστιάζεται στην πυξίδα· συχνά, λοιπόν, παραγνωρίζουμε το ότι οι δυνάμεις που ασκούνται στην πυξίδα συνοδεύονται από δυνάμεις που ασκούνται στον αγωγό. Πρώτος ο ίδιος ο Oersted επισήμανε ότι: «Όπως ακριβώς ένα σώμα είναι αδύνατο να θέσει κάποιο άλλο σε κίνηση, χωρίς το ίδιο να κινηθεί — αν διαθέτει την απαιτούμενη ευκίνησία —, αντιλαμβανόμαστε εύκολα ότι ο μαγνήτης κινεί τον ρευματοφόρο αγωγό.» Αν και ο Oersted ήταν «εύκολο» να αντιληφθεί αυτό το γεγονός, οι μαθητές δύσκολα το αντιλαμβάνονται χωρίς υπόδειξη. (Μόνον ερευνητές φυσικοί στα πρώτα βήματά τους το κατορθώνουν.)

Υποδείξεις σωκρατικού τύπου είναι, λοιπόν, πολύ αποτελεσματικές,

ιδιαίτερα αν η έκτασή τους είναι περιορισμένη. Οι μαθητές αισθάνονται μεγάλη ικανοποίηση καλύπτοντας το — έστω και μικρό — ενδιαμέσο κενό, και δεν πρέπει να υποτιμάμε αυτήν την ικανοποίηση. Ορισμένοι κατορθώνουν να προβλέψουν, εκκινώντας από το πείραμα του Oersted, ακόμα και την κατεύθυνση της ασκούμενης στο σύρμα δύναμης.

Η επίδειξη της δύναμης που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό, ο οποίος βρίσκεται στο πεδίο ενός μαγνήτη, εκτελείται σχεδόν παντού. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, η αποτελεσματικότητά της περιορίζεται ή εξασθενεί για μια σειρά από λόγους. Ορισμένες φορές η σύνδεση με το πείραμα του Oersted δεν εμφανίζεται σαφώς. Σε άλλες περιπτώσεις, επειδή η επίδειξη εκτελείται πολύ γρήγορα, οι μαθητές δεν έχουν χρόνο να συνειδητοποιήσουν την πολλαπλότητα των κατευθύνσεων που υπεισέρχονται. Η μεγαλύτερη απώλεια, ωστόσο, είναι ότι οι μαθητές δεν έχουν την ευκαιρία να αισθανθούν άμεσα το τίναγμα του σύρματος. Όταν, λοιπόν, κρατώντας το σύρμα, αισθανθούν την έλξη, εκπλήσσονται και, σχεδόν, αμφισβητούν το αίσθημά τους, ακόμα κι αν έχουν ήδη παρατηρήσει ότι το σύρμα τινάζεται και επιταχύνεται μόλις κλείσουμε το διακόπτη. Η συγκεκριμένη εμπειρία είναι πολύ χρήσιμη για τους μαθητές και εύκολα μπορούν να την αποκτήσουν. Οι συνήθεις μνημονικοί κανόνες (του εξωτερικού γινομένου ή του δεξιού χειρού) τους εντυπώνονται καλύτερα, αν τους εξάγουν από τις άμεσες παρατηρήσεις και τα αισθήματά τους, παρά αν παρακολουθούν από



Σχήμα 8.3.1 Αλληλεπίδραση μεταξύ ενός μαγνήτη και ενός ηλεκτρολύτη διαρρεόμενου από ρεύμα: Σε πλαστικό δοχείο μεταξύ δύο κυλινδρικών χάλκινων ηλεκτροδίων τοποθετούμε διάλυμα θειικού χαλκού. Τα ηλεκτροδία συνδέονται με μπαταρία ή άλλον τροφοδότη ισχύος. Όταν το άκρο μαγνητισμένης βέργας ή ράβδου εισέλθει στο κέντρο του συστήματος (μέσα στο εσωτερικό ηλεκτροδίο), παρατηρούμε ότι το υγρό περιστρέφεται στον δακτυλιοειδή χώρο μεταξύ των ηλεκτροδίων. Σκορπίζοντας ροκανίδια ή σκόνη που επιπλέει στο υγρό, η περιστροφή του υγρού γίνεται ορατή. Η κατεύθυνση της περιστροφής συμφωνεί με τον κανόνα του δεξιού χειρού που επινοήσαμε με βάση τη δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρα σύρματα.

απόσταση επιδειξείς κατά τη διάρκεια της παράδοσης.

Η επίδειξη της αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός μαγνήτη και ενός ηλεκτρολύτη είναι, επίσης, χρήσιμη και εντυπωσιακή. Δυστυχώς, δεν εκτελείται ευρέως. Σε αυτή την περίπτωση, το ρεύμα δεν βρίσκεται περιορισμένο σε μεταλλικό αγωγό. Το πείραμα, ωστόσο, είναι εξαιρετικά απλό. (Η βασική διάταξη απεικονίζεται στο Σχ. 8.3.1.)

8.4 Το πείραμα του Ampère

Από την ανακάλυψη του Oersted προκύπτει, επίσης, ότι μεταξύ δύο ρευματοφόρων αγωγών ασκούνται δυνάμεις: ο μαγνητισμός που δημιουργεί το ένα ρεύμα επιδρά στο άλλο και αντιστρόφως. Είναι, ωστόσο, απαραίτητο να υπογραμμίσουμε ότι η προηγούμενη πρόταση είναι, απλώς, εύλογο επιχείρημα και όχι πειστικό συμπέρασμα. Όπως επισήμανε ο Arago, ένας μαγνήτης ασκεί δύναμη σε δύο μη μαγνητισμένα κομμάτια σιδήρου, αλλά, αν απομακρύνουμε τα κομμάτια από το μαγνήτη, δεν ασκούνται δυνάμεις μεταξύ τους. Ενδεχομένως, η κατάσταση με τους ρευματοφόρους αγωγούς να είναι ανάλογη: η παρουσία μαγνήτη είναι, ίσως, ουσιώδης, και χωρίς αυτόν οι ρευματοφόροι αγωγοί είναι ουδέτεροι, όπως τα κομμάτια σιδήρου. Ο πειραματικός έλεγχος ήταν, λοιπόν, απαραίτητος. Ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε από τον Ampère, μια εβδομάδα αφότου τα νέα για την ανακάλυψη του Oersted έφτασαν στη Γαλλία.

Ο Ampère ανακοίνωσε στη Γαλλική Ακαδημία τα αποτελέσματά του. Σήμερα το πείραμά του αναπαράγεται σε όλο τον κόσμο κατά τη διάρκεια των παραδόσεων: όταν δύο παράλληλα σύρματα διαρρέονται από ρεύμα της ίδιας φοράς, έλκονται· όταν διαρρέονται από ρεύμα αντίθετης φοράς, απωθούνται. Υπάρχει, ωστόσο, βασική διαφορά μεταξύ του σημείου που επισήμανε ο Ampère και εκείνου που τονίζουν τα περισσότερα εγχειρίδια και οι παραδόσεις. Επειδή ο Ampère ανακοίνωσε την ανακάλυψη ενός νέου φαινομένου, στο οποίο υπεισέρχονταν μπαταρίες και ηλεκτρισμός, ήταν απαραίτητο να παράσχει πειστικές ενδείξεις ότι η αλληλεπίδραση δεν ήταν ηλεκτροστατική, αλλά «ηλεκτρομαγνητική», σύμφωνα με τον όρο που ο ίδιος εισήγαγε. Στις σύγχρονες παρουσιάσεις, η συγκεκριμένη πλευρά της φαινομενολογίας συνήθως παραγνωρίζεται: από την πρώτη στιγμή διακηρύσσουμε ότι πρόκειται για «ηλεκτρομαγνητικό» φαινόμενο, χωρίς πρόσθετη διερεύνηση. Αποτελέσματα: οι μαθητές χάνουν ακόμα μια ευκαιρία να μάθουν να σκέφτονται και να κατακτούν τη γνώση.

Από παιδαγωγική άποψη, είναι προτιμότερο πρώτα να παρουσιάσουμε την αλληλεπίδραση και, κατόπιν, να κατευθύνουμε τους μαθητές να αναρωτηθούν: πρόκειται για νέο και διαφορετικό φαινόμενο ή απλώς για ηλεκτροστατικό; Από τη στιγμή που εγείρεται το ερώτημα, οι μαθητές είναι

απαραίτητο να εκτελέσουν λεπτομερείς παρατηρήσεις, να προτείνουν συμπληρωματικά πειράματα και να περιγράψουν με λειτουργικό τρόπο τη διαφορά μεταξύ των φαινομένων που όντως παρατηρούν και εκείνων που αναμένουν να συμβούν στο πλαίσιο της συνηθισμένης ηλεκτροστατικής αλληλεπίδρασης. Αναγκάζονται, λοιπόν, να εκτελέσουν αμιγώς φαινομενολογικούς συλλογισμούς, χωρίς να χρησιμοποιούν μαθηματικούς τύπους και χωρίς να «αλέθουν» αριθμούς. Αναγκάζονται, επίσης, να επαναφέρουν στη σκέψη τους και να επανεξετάσουν την προηγούμενη εμπειρία τους. Όπως επανειλημμένα έχουμε υποστηρίξει, η εν λόγω ανακύκληση, σε πλουσιότερο και πιο εκλεπτυσμένο πλαίσιο, είναι κύρια προϋπόθεση για γνήσια μάθηση και κατανόηση. Μπορούμε να εμπλουτίσουμε την εργασία για το σπίτι με τη μελέτη παρόμοιων ερωτημάτων. Ερωτήματα αυτού του είδους δεν αφορούν, απλώς, περιορισμένα τελικά συμπεράσματα· προκαλούν το μαθητή να σκεφτεί για κάθε πλευρά των φαινομένων που εκδηλώνονται, αλλά και εκείνων που δεν εκδηλώνονται.

Ο Ampère θεωρούσε ότι το ερώτημα δεν ήταν καθόλου τετριμμένο· υποστήριξε δε την άποψή του ως εξής:

Οι έλξεις και οι απώσεις μεταξύ των ηλεκτρικών ρευμάτων διαφέρουν θεμελιωδώς από τα φαινόμενα τα οποία προκαλεί ο ηλεκτρισμός που εναποτίθεται. Πρώτον, σταματούν μόλις διακόψουμε το ρεύμα, όπως, επίσης, συμβαίνει με τη χημική αποσύνθεση. [Υποστηρίζει, δηλαδή, ότι πρόκειται για δυναμικό και όχι για στατικό φαινόμενο.] Δεύτερον, στις συνήθεις ηλεκτρικές έλξεις και απώσεις, τα αντίθετα φορτία έλκονται και τα όμοια απωθούνται· στις έλξεις και στις απώσεις μεταξύ ηλεκτρικών ρευμάτων, συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο: Έλξη εμφανίζεται όταν τα αγωγία σύρματα τοποθετούνται παράλληλα, ώστε τα άκρα τους με το ίδιο σημείο να βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, και άπωση όταν τα άκρα με το ίδιο σημείο βρίσκονται όσο το δυνατό μακρύτερα μεταξύ τους. Τρίτον, στην περίπτωση της έλξης, αν φέρουμε τον κινούμενο αγωγό σε επαφή με τον ακίνητο, οι αγωγοί παραμένουν σε επαφή, όπως συμβαίνει με δύο μαγνήτες· δεν αποχωρίζονται ύστερα από λίγο, όπως συμβαίνει όταν δύο αγωγία σώματα φορτισμένα αντιθέτως έρθουν σε επαφή μεταξύ τους. [Συνήθως, εκτελούμε τις επιδείξεις με μονωμένα σύρματα· ο Ampère, ωστόσο, χρησιμοποιούσε γυμνά σύρματα, οπότε μεταφερόταν μεταξύ τους φορτίο.]

Στον κατάλογο των παρατηρήσεων είναι δυνατό να προσθέσουμε ότι τρία παράλληλα σύρματα, διαρρεόμενα από ρεύμα της ίδιας φοράς, έλκονται αμοιβαία μεταξύ τους. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι δυνατό να οφείλεται σε ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση. (Είναι ενδιαφέρον ότι, αν και ο Ampère το γνώριζε, δεν το συμπεριέλαβε στα υπόλοιπα τρία φαινόμενα

που παρατίθενται στην προηγούμενη παράγραφο.)

Τα φαινομενολογικά επιχειρήματα για το ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ παράλληλων ρευματοφόρων συρμάτων δεν είναι ηλεκτροστατικής φύσης προσφέρονται για τη διατύπωση ενός πολύ αποτελεσματικού προβλήματος για το σπίτι, ιδιαίτερα αν συνοδεύεται από οδηγίες σωκρατικού τύπου, χωρίς, ωστόσο, να παρέχονται πολλές λεπτομέρειες.

8.5 Μνημονικοί κανόνες και υπολογιστές

Ουσιαστικά, όλες οι προφορικές παρουσιάσεις και τα εγχειρίδια εισάγουν απλούς μνημονικούς κανόνες που βοηθούν στη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων: πρόκειται για τον κανόνα του δεξιού χεριού στο πείραμα του Oersted, για τη δύναμη Lorentz, η οποία ασκείται σε κινούμενα φορτία (και σε ρευματοφόρο αγωγό που βρίσκεται μέσα στο πεδίο ενός μαγνήτη), και για την παραλλαγή του κανόνα του δεξιού χεριού στο νόμο του Faraday στην ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Πολλοί μαθητές, ωστόσο, δεν κατορθώνουν να αφομοιώσουν αυτούς τους κανόνες, ούτε να τους εφαρμόσουν σωστά σε πραγματικές καταστάσεις ή σε ασκήσεις «επί χάρτου».

Η συγκεκριμένη αδυναμία δεν συνδέεται με τη λογική δομή των εννοιών ή με τον τρόπο διαμόρφωσής τους· πρόκειται, απλώς, για ζήτημα εξάσκησης και μνήμης. Τα εγχειρίδια, ωστόσο, δεν παρέχουν ικανοποιητικό αριθμό ασκήσεων εφαρμογής των κανόνων. Επίσης, συνήθως δεν εξετάζουμε τους μαθητές σε αυτό το είδος γνώσης. Από την άλλη, οι μαθητές δεν επινοούν δικές τους ασκήσεις και γυμνάσματα, αν και είναι απολύτως ικανοί να το πετύχουν, αρκεί βέβαια να τους καθοδηγήσουμε και να γνωρίζουν ότι θα εξεταστούν σ' αυτό το ζήτημα.

Χρειάζεται, λοιπόν, εκγύμναση. Δεν χρησιμοποιώ αυτόν τον όρο υποτιμητικά: μόνο μέσω της εκγύμνασης το συγκεκριμένο είδος γνώσης εντυπώνεται στη μνήμη. Στις ασκήσεις εφαρμόζουμε τους κανόνες σε περιπτώσεις όπου η κίνηση και το πεδίο έχουν ποικίλους προσανατολισμούς στο χώρο. Οι μαθητές είναι απαραίτητο να αντιμετωπίσουν κάθε παραλλαγή: Αν δοθεί η φορά του ρεύματος που διαρρέει ένα ευθύγραμμο σύρμα (ή πηνίο), ποια είναι η κατεύθυνση του πεδίου σε διάφορα σημεία; Αν δοθεί η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου σε ορισμένο σημείο κοντά σε ευθύγραμμο σύρμα (ή πηνίο), ποια είναι η φορά του συμβατικού ρεύματος στον αγωγό; Αν δοθεί η κατεύθυνση της κίνησης ενός φορτισμένου σωματιδίου και η κατεύθυνση της δύναμης Lorentz, ποια είναι η κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου; (Πρέπει, επίσης, να μελετήσουν τους υπόλοιπους δύο συνδυασμούς μεταξύ γνωστών και άγνωστων μεγεθών.)

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να δοθεί η ευκαιρία στους μαθητές να σχε-

διάσουν την τροχιά φορτισμένων σωματιδίων μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Αν και συχνά νομίζουμε ότι περιγράφουν σωστά την κίνηση, σχεδιάζουν τροχιές μη πραγματοποιήσιμες από φυσική άποψη και δεν αντιλαμβάνονται τα λάθη στο σχεδιασμό τους.

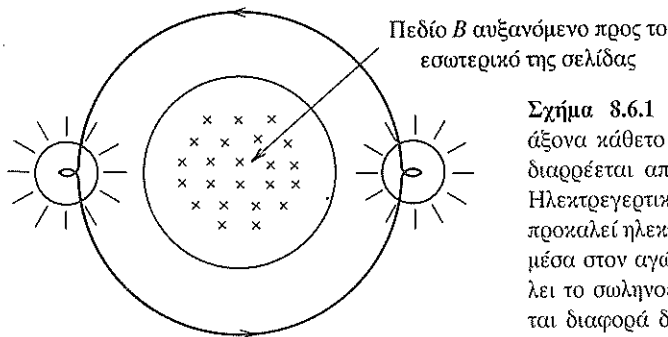
Στην εκγύμναση ο υπολογιστής βοηθά αποτελεσματικά. Η «αλληλεπίδραση» με σχετικά απλές εικόνες παρέχει στους μαθητές τόσες ασκήσεις όσες είναι απαραίτητες για την αφομοίωση των κανόνων. Παράλληλα, εξοικονομείται χρόνος. Έως τη στιγμή που γράφονταν αυτές οι γραμμές, ασκήσεις αυτού του είδους δεν ήταν άμεσα διαθέσιμες. Ελπίζω γρήγορα να καλυφθεί το κενό. Πρόκειται για περιοχή διδασκαλίας μέσω υπολογιστή με μικρό κόστος και μεγάλη αποτελεσματικότητα.

8.6 Ο νόμος του Faraday σε πολλαπλά συνεκτική περιοχή

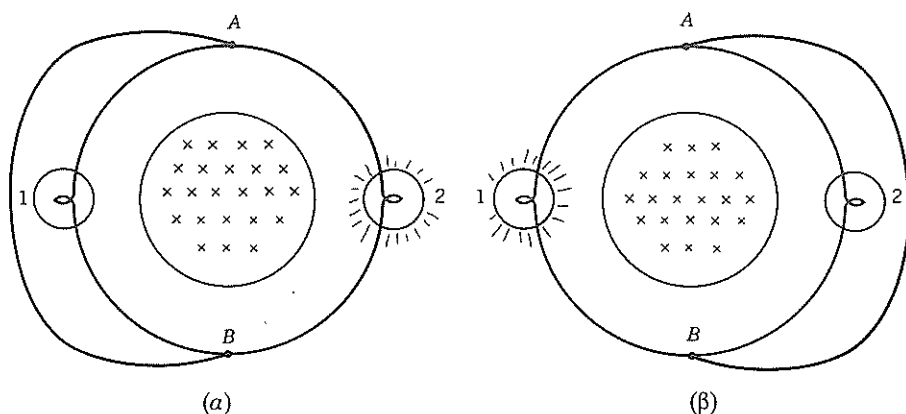
Τα Σχ. 8.6.1 και 8.6.2 απεικονίζουν μια απλή και θεμελιώδη φυσική κατάσταση την οποία σπάνια, αν όχι ποτέ, μελετάμε σε ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής. Τα φαινόμενα, ωστόσο, που εκδηλώνονται σ' αυτό το σύστημα είναι σημαντικά και βοηθούν το μαθητή να κατανοήσει ακόμα περισσότερο ουσιώδεις πλευρές του ηλεκτρομαγνητισμού.

Μακρύ σωληνοειδές (Σχ. 8.6.1), του οποίου ο άξονας είναι κάθετος στο επίπεδο της σελίδας, διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα. Σε κάθε αγωγίμο βρόχο που περιβάλλει το σωληνοειδές, η μαγνητική ροή μεταβάλλεται με το χρόνο. Στο βρόχο, λοιπόν, εμφανίζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή, σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Αν στο βρόχο υπάρχουν λάμπες φακού, ανάβουν: στα άκρα των αντιστάσεων αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού.

Υποθέστε ότι βραχυκυκλώνουμε με σύρμα τα σημεία A και B του κυκλώματος (Σχ. 8.6.2). Λόγω της προηγούμενης εμπειρίας τους με απλά κυ-



Σχήμα 8.6.1 Μακρύ σωληνοειδές με άξονα κάθετο στο επίπεδο της σελίδας διαρρέεται από μεταβαλλόμενο ρεύμα. Ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή προκαλεί ηλεκτρικό ρεύμα από επαγωγή μέσα στον αγωγίμο βρόχο που περιβάλλει το σωληνοειδές. Επειδή αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού στα άκρα αντιστάσεων που υπάρχουν στο βρόχο, αν παρεμβάλουμε λάμπες, αυτές φωτοβολούν.



Σχήμα 8.6.2 Αν βραχυκυκλώσουμε με πρόσθετο σύρμα τα σημεία A και B , όπως στο (α), τότε η λάμπα 1 σβήνει, ενώ η 2 συνεχίζει να φωτοβολεί και, μάλιστα, εντονότερα από πριν. Αν βραχυκυκλώσουμε τα ίδια σημεία, όπως στο (β), η λάμπα 2 σβήνει, ενώ η 1 συνεχίζει να φωτοβολεί και, μάλιστα, εντονότερα από πριν.

κλώματα τα οποία περιέχουν μπαταρίες και λάμπες, οι μαθητές θεωρούν ότι, επειδή βραχυκυκλώσαμε τα άκρα της λάμπας, η λάμπα σβήνει. Η κατάσταση, ωστόσο, που μελετάμε είναι πολύ διαφορετική: η περιοχή γύρω από το σωληνοειδές είναι πολλαπλά και όχι απλά συνεκτική. Μόνο η μία λάμπα σβήνει· η άλλη ανάβει περισσότερο. Το αποτέλεσμα εξαρτάται από τον τρόπο που πραγματοποιείται το βραχυκύκλωμα: Το σύρμα συνδέεται όπως στο Σχ. 8.6.2α ή όπως στο Σχ. 8.6.2β; Σε αυτή την περίπτωση, λοιπόν, επειδή η απλοϊκή υπόθεση διαψεύδεται, είναι απαραίτητο να μελετήσουμε πώς μεταβάλλεται η ροή μέσα από κάθε αγωγίμο βρόχο του συστήματος.

Ο Romer (1982) αναλύει πλήρως και λεπτομερώς το πρόβλημα: εφαρμόζει τις εξισώσεις του Maxwell σε περιοχές του συστήματος και ερμηνεύει τις ενδείξεις των βολτομέτρων που είναι συνδεδεμένα μεταξύ των σημείων A και B . Ο αναγνώστης που ενδιαφέρεται να μάθει περισσότερες λεπτομέρειες για το παρόν ζήτημα είναι χρήσιμο να συμβουλευτεί τη διανυγή παρουσίαση του Romer. Η δική μου παρουσίαση είναι απλώς ποιοτική προκαταρκτική εισαγωγή σε ένα σημαντικό πρόβλημα: χωρίς να είναι απολύτως αυστηρή, βοηθά το μαθητή να κατανοήσει το θέμα, διευρύνοντας και εμπλουτίζοντάς το.

8.7 Η κριτική του Faraday για την έννοια της δράσης από απόσταση

Μεταξύ των πειραματικών επιτευγμάτων του Faraday υπήρξε η ανακάλυψη νέων χημικών ενώσεων, η εργασία του στην υδροποίηση των αερίων,

η ανακάλυψη των νόμων της ηλεκτρόλυσης, του φαινομένου της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής, του διαμαγνητισμού και της στροφής του επιπέδου πόλωσης μιας δέσμης φωτός υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Η μεγάλη επιρροή του στην επιστημονική σκέψη δεν οφείλεται, ωστόσο, μόνο στις πειραματικές ανακαλύψεις του, αλλά και στις θεωρητικές απόψεις του. Οι μελέτες του τον οδήγησαν να απορρίψει τη νευτώνεια δράση από απόσταση, στην περίπτωση των ηλεκτρικών και των μαγνητικών φαινομένων, και να «αναθέσει ορισμένο ρόλο» στις δυναμικές γραμμές που παρεμβάλλονται στον ενδιάμεσο χώρο. Έθεσε, λοιπόν, τη βάση της σύγχρονης έννοιας του «πεδίου». Η έννοια αυτή, την οποία ο Maxwell επεξεργάστηκε μαθηματικά, αποδείχθηκε αναλλοίωτο συστατικό όλης της θεωρητικής φυσικής.

Πριν από την επιτυχία και την αποδοχή της νευτώνειας θεωρίας για τη βαρύτητα, η ιδέα της δράσης από απόσταση ήταν ανάθεμα για τους περισσότερους φυσικούς φιλοσόφους. Λόγω της αποστροφής τους απέναντι στις προλήψεις και στην απόδοση απόκρυφων ικανοτήτων και ιδιοτήτων σε άβυσσους ουσίες, οι φυσικοί φιλόσοφοι απέρριπταν την άποψη ότι υλικό αντικείμενο προκαλεί φαινόμενα σε τόπο στον οποίο δεν βρίσκεται. Προσπαθούσαν να αντιληφθούν την ύπαρξη ευδιάκριτων μηχανισμών για κάθε αλληλεπίδραση: όπου το παρεμβαλλόμενο μέσο δεν γινόταν άμεσα αντιληπτό από τις αισθήσεις, επινοούσαν ρευστά και συνεχείς ή σωματιδιακούς αιθέρες. Πίστευαν ότι η αλληλεπίδραση διαδίδεται, μέσω του αιθέρα, από στρώμα σε στρώμα ή από σωματίδιο σε σωματίδιο. Λόγου χάρη, επειδή σε ορισμένες περιπτώσεις ο όρος «έλξη» υποδήλωνε δράση από απόσταση και οδηγούσε έτοι στον αποκρυφισμό, τον απέρριπταν. Λέγεται πως όταν ο Huygens πληροφορήθηκε την επικείμενη δημοσίευση των «Principia» του Νεύτωνα, εξέφρασε την ευχή η θεωρία που θα περιέχεται σε τούτο το βιβλίο να μη στηρίζεται στην ιδέα της «έλξης». Ο Huygens και ο Leibniz ουδέποτε αποδέχθηκαν αυτό το στοιχείο της νευτώνειας θεωρίας. Η αντίθεση τους, ωστόσο, αμβλύθηκε, λόγω των επανειλημμένων επιτυχιών της θεωρίας. Έτσι, η δράση από απόσταση (δηλαδή, η ισχύς του 3ου νόμου του Νεύτωνα κάθε χρονική στιγμή στην περίπτωση της βαρυτικής αλληλεπίδρασης) έγινε άκριτα αποδεκτή. Ο Max Born επισημαίνει σχετικά: «...Μετά τη διατύπωση της νευτώνειας θεωρίας, η ιδέα της δράσης από απόσταση εξελίχθηκε σε συνήθεια του τρόπου σκέψης. Πρόκειται, όντως, απλώς για συνήθεια: μια ιδέα εντυπώνεται τόσο πολύ στο μυαλό, ώστε χρησιμοποιείται ως βαθύτερη ερμηνευτική αρχή.»

Ο ίδιος ο Νεύτων απέφυγε προσεκτικά να δεσμευτεί ως προς οποιοδήποτε πρότυπο της βαρυτικής αλληλεπίδρασης: «Hypotheses non fingo»*, έγγραφε. Γνώριζε, σαφώς, ότι είχε ανακαλύψει έναν μαθηματικό τύπο, ο

* Hypotheses non fingo: Δεν επινοώ υποθέσεις. (Σ.τ.μ.)

οποίος αναπαριστούσε σωστά τα φυσικά φαινόμενα, αλλά επιδεχόταν ποικίλες ερμηνείες¹. Ο ίδιος, ίσως, δεν πίστευε άμεσα στη δράση από απόσταση. Ασχολήθηκε πολύ με τη μελέτη των αιθέρων, μέσω των οποίων η βαρυτική και οι υπόλοιπες δράσεις είναι δυνατό να διαδοθούν. Στα χειρόγραφα του υπάρχουν σχετικά κεφάλαια που, ενώ προορίζονταν για τα «Principia», δεν τα δημοσίευσε. Ίσως, επειδή αισθανόταν ότι ο απολύτως θεωρητικός χαρακτήρας τους δεν εναρμονιζόταν με το ευκλείδειο ύφος του έργου.

Ο Ampère δημιούργησε τη μαθηματική θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης μεταξύ ρευματοφόρων συρμάτων στο πλαίσιο της δράσης από απόσταση. Αν και ο Faraday στο βιβλίο του «Electrical Researches» επανειλημμένα εκφράζει το θαυμασμό του για την «όμορφη δουλειά» του Ampère και των άλλων εκπροσώπων της Γαλλικής σχολής, η δική του θεμελιώδης προσέγγιση είναι απολύτως διαφορετική. Στερούμενος της τυποποιημένης γνώσης, ιδιαίτερα στα μαθηματικά, ουδέποτε υπήρξε ικανός στην αφηρημένη γλώσσα της ανάλυσης (στη γλώσσα του λογισμού). Προσπαθούσε να ερμηνεύσει τις παρατηρήσεις του και να διατυπώσει τις έννοιες σχεδόν απολύτως με γεωμετρικούς και φυσικούς όρους. Αυτή η τάση του οφειλόταν, ίσως, στο ότι είχε εντυπωσιαστεί βαθιά από τους γεωμετρικούς σχηματισμούς των προσανατολισμένων ρινισμάτων σιδήρου. Ο Faraday, λοιπόν, χρησιμοποίησε τις γραμμές ή καμπύλες της μαγνητικής δύναμης (τουλάχιστον από τις αρχές του 17ου αιώνα, ο συγκεκριμένος όρος είχε χρησιμοποιηθεί σε σύνδεση με το μαγνητισμό): «Με τον όρο μαγνητικές καμπύλες, εννοώ τις γραμμές των δυνάμεων, όσο κι αν αντιπαρατιθέμενοι πόλοι τις τροποποιούν, οι οποίες απεικονίζονται με ρινίσματα σιδήρου» εννοώ, επίσης, τις καμπύλες πάνω στις οποίες μια μικρή μαγνητική βελόνη εφάπτεται.» Αργότερα, επεξέτεινε την ιδέα για να συμπεριλάβει τις γραμμές της ηλεκτρικής δύναμης.

Από τις παρατηρήσεις και τα πειράματά του, ο Faraday πείστηκε ότι είναι αδύνατο να ερμηνεύσουμε μέσω της δράσης από απόσταση το σύνολο των ηλεκτρικών φαινομένων· δέχτηκε, επίσης, ότι ήταν απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας τον παρεμβαλλόμενο χώρο. Μεταξύ των αποδεικτικών στοιχείων τα οποία φαίνεται ότι τον επηρέασαν σημαντικά είναι τα εξής:

1. Οι δυναμικές γραμμές είναι καμπύλες στο χώρο· δεν είναι ευθείες

1. Κατά καιρούς στην ιστορία της επιστήμης εμφανίζονται παρόμοιες καταστάσεις. Λόγου χάρι, το 1822 ο Fourier δημοσίευσε μια πλήρως επεξεργασμένη μαθηματική θεωρία για τη θερμική αγωγιμότητα των στερεών (σε αυτή την εργασία παρουσιάστηκαν οι σειρές Fourier). Ο Fourier χρησιμοποίησε τη θεωρία του φλογιστού. Η εν λόγω θεωρία γρήγορα απορρίφθηκε· οι διαφορικές εξισώσεις του Fourier, ωστόσο, περιγράφουν σωστά τη ροή της θερμότητας, ανεξάρτητα από το πρότυπο που χρησιμοποιούμε για τη φύση της ίδιας της θερμότητας. Η θεωρία του Fourier συμφωνούσε απόλυτα με την παρατηρούμενη κατανομή της θερμοκρασίας.

που απλώς συνδέουν αλληλεπιδρώντες μαγνητικούς πόλους ή φορτισμένα σωματίδια. Ο Faraday δεν μπορούσε να συλλάβει την καμπυλότητα των γραμμών στο πλαίσιο της δράσης από απόσταση, ιδιαίτερα στην περίπτωση των γραμμών γύρω από ρευματοφόρο σύρμα. Η καμπυλότητα υποδήλωνε τη φυσική υπόσταση των γραμμών ή οφειλόταν σε ορισμένη κατάσταση ή συνθήκη του παρεμβαλλόμενου αιθέριου μέσου.

2. Όταν μια φέτα διηλεκτρικού υλικού (ο Faraday χρησιμοποιούσε δίσκους θείου και γομαλάκας) παρεμβάλλεται μεταξύ των πλακών ενός φορτισμένου πυκνωτή, η ποσότητα του φορτίου στις πλάκες είναι διαφορετική από εκείνη που υπάρχει αν μεταξύ των πλακών παρεμβάλλεται απλώς αέρας. Για τον Faraday αυτό το πείραμα σήμαινε ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρικών φορτίων των πλακών δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας· το παρεμβαλλόμενο μέσο παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο. Γνώριζε, επίσης, ότι παρόμοια φαινόμενα εκδηλώνονται στο μαγνητισμό.

3. Σχετικά με το επαγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μέσα σε συρμάτινο βρόχο, όταν τμήμα του σύρματος μετακινείται κόβοντας μαγνητικές δυναμικές γραμμές (οπότε αναπτύσσεται κινητική ΗΕΔ), αναφέρει: «Η κίνηση από μόνη της είναι αδύνατο να παράγει ρεύμα: γύρω από το μαγνήτη είναι απαραίτητο να υπάρχει μια κατάσταση ή συνθήκη, η οποία συντηρείται απ' αυτόν· το σύρμα κινείται σε αυτό το χώρο.»

Δεν έχει σημασία αν κάποιοι διαφωνούν με ορισμένες από αυτές τις απόψεις ή ερμηνεύουν τις παρατηρήσεις με διαφορετικό τρόπο. Αυτές, απλώς, αποτελούν τους παράγοντες που επηρέασαν τη σκέψη του Faraday.

Τα κρίσιμότερα ερωτήματα στα οποία ο Faraday επανερχόταν επανειλημμένα ήταν: Το χρονικό διάστημα που είναι απαραίτητο για να διαδοθεί η μεταβολή της ηλεκτρικής ή της μαγνητικής δράσης είναι πεπερασμένο ή όχι; Αν μεταβάλουμε απότομα το ρεύμα που διαρρέει ένα σύρμα, μεσολαβεί ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρις ότου, σε κάποια απόσταση μακρύτερα, μεταβληθούν οι δυναμικές γραμμές; Αν σε ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σώμα μεταβάλουμε απότομα την ποσότητα του φορτίου, μεσολαβεί ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρις ότου μεταβληθεί η δύναμη που ασκείται σε ένα δοκιμαστικό σωματίδιο ευρισκόμενο μακρύτερα; Αν μετακινήσουμε απότομα ένα φορτισμένο σωματίδιο, μεσολαβεί ορισμένο χρονικό διάστημα μέχρις ότου μεταβληθεί η δύναμη που ασκείται σε σταθερό δοκιμαστικό σωματίδιο ευρισκόμενο λίγο μακρύτερα;

Καταφατική απάντηση στις συγκεκριμένες ερωτήσεις θα προσέδιδε στις απόψεις του Faraday, για την αμφιλεγόμενη δράση από απόσταση, ισχυρότατο έρεισμα: θα σήμαινε ότι η δράση διαδίδεται, ίσως, κυματικά, διαμέσου του παρεμβαλλόμενου χώρου. (Αν και στο πλαίσιο της θεωρίας του Maxwell, η οποία αναπτύχθηκε στη δεκαετία 1856-65, δόθηκε, όντως, καταφατική απάντηση, η θεωρία δεν επαληθεύτηκε άμεσα πειραματικά παρά μόνο το 1887 στο διάσημο πείραμα του Hertz, 20 χρόνια μετά το θά-

νατο του Faraday.)

Την εποχή που ο Faraday ερευνούσε αυτά τα ζητήματα, ο Young, ο Fresnel και άλλοι απέδειξαν ότι το φως συμπεριφέρεται σαν εγκάρσιο κύμα. Αν και δεν ήταν καθόλου σαφές τι είναι εκείνο το οποίο πάλλεται κατά τη διάδοση του κύματος, πολλοί φυσικοί υποψιάστηκαν ότι κάτι συμβαίνει· άρχισαν, λοιπόν, να αναζητούν τη σχέση μεταξύ του φωτός από τη μια και του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού από την άλλη. Ο ίδιος ο Faraday ανακάλυψε την πρώτη άμεση αλληλεπίδραση: τη στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός, όταν το φως διαδίδεται παράλληλα με μαγνητικές δυναμικές γραμμές. Αναρωτήθηκε, λοιπόν, μήπως το φως είναι, επίσης, εγκάρσια ταλάντωση των δυναμικών γραμμών και η ταχύτητα διάδοσης της μαγνητικής δράσης έχει την ίδια τάξη μεγέθους με την ταχύτητα του φωτός. Οι σκέψεις του τον παρακίνησαν ακόμα περισσότερο να απορρίψει τη δράση από απόσταση και να αποδώσει, δοκιμαστικά, βασικό ρόλο στις δυναμικές γραμμές ή σε κάποιο αιθέριο μέσο για την περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων.

Ο Tyndall, στη βιογραφία του Faraday, αναφέρει:

Στη δύση του βίου του συλλογιζόταν για τα μαγνητικά μέσα και για τις δυναμικές γραμμές. Στο τελευταίο στάδιο των ερευνών του, ανέλαβε το μεγαλύτερο εγχείρημα που είχε αναλάβει ποτέ: να απαντήσει στο ερώτημα, αν για τη διάδοση της μαγνητικής δύναμης μεσολαβεί ορισμένος χρόνος. Δεν θα μάθουμε ποτέ πώς σκόπευε να επιτύχει αυτό το στόχο· πίσω του, ωστόσο, άφησε όμορφες συσκευές: λεπτεπίλεπτους τροχούς και γρανάξια τα οποία συνδέονταν με καθρέφτες. Όλα τούτα τα χρησιμοποίησε, μάλλον, στην έρευνά του.

Εκ των υστέρων γνωρίζουμε ότι η τεχνολογία εκείνης της εποχής δεν επαρκούσε γι' αυτό το πείραμα.

Ο αναγνώστης θα παρατήρησε ότι σε προηγούμενα Κεφάλαια επανειλημμένα υποστηρίξα ότι είναι απαραίτητο να στρέψουμε την προσοχή των μαθητών σε ερωτήματα που αφορούν τον 3ο νόμο του Νεύτωνα, τη δράση από απόσταση και το χρονικό διάστημα το οποίο συνδέεται με τις αλληλεπιδράσεις. Ο σκοπός, βεβαίως, είναι να προετοιμάσουμε τους μαθητές να κατανοήσουν και να εκτιμήσουν αυτό το πολύ μικρό τμήμα της ιστορίας του πνεύματος· να κατανοήσουν, επίσης, τα ερωτήματα του Faraday και το λόγο επινόησης της πεδιακής θεωρίας.

8.8 Η αρχική μορφή της έννοιας του πεδίου

Στα γραπτά του ο Faraday διαχωρίζει προσεκτικά τις υποθέσεις για τον αιθέρα και για τις δυναμικές γραμμές από τα τεκμηριωμένα αποτελέ-

σματα των πειραμάτων του. Παραθέτει, μάλιστα, τις υποθέσεις σχεδόν απολογητικά:

Ούτε στιγμή δεν πρέπει να θεωρήσουμε ότι αυτές οι υποθέσεις είναι άχρηστες ή απαραίτητως επιβλαβείς στη φυσική φιλοσοφία. Κάποτε, ίσως, θα θεωρηθούν αμφίβολης ισχύος, λανθασμένες και υποκείμενες σε αλλαγές· είναι, ωστόσο, θαυμάσια εργαλεία στα χέρια των πειραματικών και των μαθηματικών. Είναι χρήσιμες, όχι μόνο επειδή προς το παρόν καθιστούν σαφέστερη μια αφηρημένη ιδέα προσδίδοντάς της συγκεκριμένο περιγράμμα αλλά, επίσης, επειδή μπορούμε να τις χρησιμοποιήσουμε σε πειράματα και υπολογισμούς. Μας παρασύρουν, λοιπόν, μέσω της αφαιρετικής μεθόδου και της διόρθωσης των λαθών, στην ανακάλυψη νέων φαινομένων. Έτσι, προωθούν και ενισχύουν την πραγματική φυσική αλήθεια, η οποία αποδεικνύεται (αντίθετα από τις υποθέσεις που οδήγησαν σ' αυτήν) θεμελιώδης γνώση που δεν επιδέχεται μεταβολή.²

Παρ' όλ' αυτά, οι δυναμικές γραμμές, όπως φαίνεται μέσα από τις εργασίες του Faraday που ακολούθησαν, είχαν, όντως, μεγαλύτερη σημασία γι' αυτόν απ' ό,τι μια αμφιλεγόμενη επινόηση. Χρησιμοποίησε τόσο πολύ και με τόση επιτυχία αυτήν την ιδέα, ώστε έφτασε, σαφώς, να πιστεύει στην ύπαρξη «φυσικών» δυναμικών γραμμών. Μ' αυτήν την έννοια, οι γραμμές γέμιζαν όλο το χώρο και είχαν ξεχωριστές ιδιότητες και κανόνες συμπεριφοράς. Δρούσαν σαν τεντωμένοι ελαστικοί ιμάντες οι οποίοι εγκαρσώς απωθούνταν αμοιβαία. Ο William Thomson (Λόρδος του Kelvin), σε άρ-

2. Αυτή η παράγραφος είναι ιδιαίτερα πολύτιμη: οι μαθητές είναι απαραίτητο να τη διαβάσουν, να σκεφτούν το νόημά της και να το συζητήσουν. Δύσκολα μπορούμε να βρούμε πειστικότερη και διανυγότερη περιγραφή της δύναμης και της χρησιμότητας μιας αμφιλεγόμενης επινόησης στην επιστημονική σκέψη. Επιπλέον, στο τέλος της παραγράφου χρησιμοποιούνται εκφράσεις τις οποίες σήμερα ελάχιστοι επιστήμονες θα χρησιμοποιούσαν. Ο Faraday δεν υπήρξε, με κανένα τρόπο, ο μοναδικός επιστήμονας της εποχής του που πίστευε ότι η επιστήμη παράγει «πραγματική φυσική αλήθεια» και «γνώση η οποία δεν επιδέχεται μεταβολή». Εκτός από λίγους διαφωνούντες, οι οποίοι είχαν επηρεαστεί από το θετικιστικό κίνημα της φιλοσοφίας (λόγου χάρι, ο Mach, ο Ostwald και ο Duhem), πολλοί επιστήμονες θα είχαν δείξει παρόμοια στάση. Η πεποίθησή τους είναι απολύτως κατανοητή. Τόσο ευρύ ήταν το πεδίο και τόσο μεγάλη η πειστικότητα των επιτυχημένων εφαρμογών της νευτώνειας μηχανικής και των νέων θεωριών της θερμοδυναμικής και του ηλεκτρομαγνητισμού, ώστε φαινόταν να οδηγούν, όντως, σε «γνώση η οποία δεν επιδέχεται μεταβολή». Οι προειδοποιήσεις των σκεπτικιστών παραγνωρίζονταν. Όταν θα συζητήσουμε την «επανάσταση» της σχετικότητας και της ατομικής και κβαντικής φυσικής των αρχών του 20ού αιώνα, είναι πολύ αποτελεσματικό να οδηγήσουμε τους μαθητές πίσω στη συγκεκριμένη παράγραφο. Έτσι, θα μπορούν να αντιδιαστείλουν τη σύγχρονη άποψη για την προσωρινότητα της γνώσης μας με τη γεμάτη αυτοπεποίθηση διακήρυξη του Faraday.

θρα του δημοσιευμένα το 1847 και το 1854, εφιστά την προσοχή στις μαθηματικές αναλογίες των θεωριών για τη ροή των ρευστών και για την ελαστικότητα από τη μια πλευρά και της ηλεκτροστατικής και του μαγνητισμού (όπως περιγράφονται με τις δυναμικές γραμμές) από την άλλη. Ο Faraday, δεχόμενος σε άλλα φυσικά φαινόμενα τη μαθηματική αναλογία ως ένδειξη φυσικής πραγματικότητας, αισθανόταν ότι η άποψή του για τις δυναμικές γραμμές είχε στέρεη βάση.

Ο James Clerk Maxwell, ο οποίος τότε ήταν νεαρός υφηγητής στο Κολέγιο Trinity του Καίμπριτζ, εντυπωσιάστηκε βαθιά τόσο από την ιδέα του Faraday για τις δυναμικές γραμμές όσο και από τις μαθηματικές αναλογίες του Thomson. Προικισμένος με μεγάλο μαθηματικό ταλέντο και με φυσική διαίσθηση ισότιμη με του Faraday, προσπάθησε να συνθέσει σε ενιαία θεωρία όλα τα γνωστά φαινόμενα του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού. Στα δύο πρώτα άρθρα του με αυτό το θέμα (δημοσιευμένα το 1856 και το 1861), ανέπτυξε ένα πολύπλοκο πρότυπο ρευστού για τις δυναμικές γραμμές του Faraday:

Ανάγοντας το καθετί στην καθαρά γεωμετρική ιδέα της κίνησης ενός φανταστικού ρευστού, ελπίζω ότι θα πετύχω ευρύτητα και ακρίβεια· ελπίζω, επίσης, ότι θα αποφύγω τον κίνδυνο που προέρχεται από μια πρώιμη θεωρία η οποία θα διακήρυττε ότι εξηγεί την αιτία των φαινομένων. Αν τα συμπεράσματα που συνέλεξα, τα οποία προκύπτουν, απλώς, από εικασία, αποδειχθούν χρήσιμα στους πειραματικούς φιλοσόφους για την κατάταξη και ερμηνεία των αποτελεσμάτων τους, τότε έχουν εξυπηρετήσει το σκοπό τους. Μια ώριμη θεωρία, στο πλαίσιο της οποίας τα φυσικά γεγονότα θα εξηγούνται με φυσικό τρόπο, θα διατυπωθεί από εκείνους οι οποίοι, ανακρίνοντας την ίδια τη Φύση, είναι δυνατό να λάβουν τη μόνη αληθινή απάντηση στα ερωτήματα που υποβάλλει η μαθηματική θεωρία.

Προσέξτε την ομοιότητα αυτής της παρατήρησης με το πρώτο τμήμα της δήλωσης του Faraday που παραθέσαμε προηγουμένως. Στο πρώτο άρθρο του, ο Maxwell χρησιμοποίησε ένα πολύπλοκο, λεπτομερές πρότυπο, το οποίο περιελάμβανε κυψέλες ρευστού, στροβίλους και τροχούς. (Διάγραμμα του συστήματος υπάρχει στο άρθρο.) Επίσης, για πρώτη φορά χρησιμοποιεί τους όρους «πεδίο» και «μαγνητικό πεδίο», ουσιαστικά με τη σύγχρονη έννοια. Το 1865 δημοσίευσε την τελική εκδοχή της θεωρίας του, απέχοντας ρητά από τη χρήση της έννοιας της δράσης από απόσταση:

Προτίμησα να αναζητήσω μια ερμηνεία [των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων], υποθέτοντας ότι δημιουργούνται από δράσεις οι οποίες εκδηλώνονται τόσο στο περιβάλλον μέσο όσο και στα διεγερμέ-

να σώματα. Προσπάθησα να ερμηνεύσω τη δράση μεταξύ απομακρυσμένων σωμάτων, χωρίς να θεωρήσω ότι υπάρχουν δυνάμεις ικανές να δράσουν άμεσα από απόσταση.

Η θεωρία που προτείνω είναι δυνατό να ονομαστεί θεωρία του «Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου», επειδή αναφέρεται στο χώρο πλησίον των ηλεκτρικών και μαγνητικών σωμάτων· επίσης, είναι δυνατό να ονομαστεί «Δυναμική», επειδή θεωρούμε ότι στο χώρο υπάρχει ύλη σε κίνηση που προκαλεί τα παρατηρούμενα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα... [Ο χώρος] είναι δυνατό να πληρούται με κάθε είδους ύλη. Είναι δυνατόν, επίσης, να δεχτούμε ότι δεν περιέχει πυκνή ύλη, όπως στην περίπτωση των σωλήνων του Geissler [στην ηλεκτρική εκκένωση] και σε άλλα αποκαλούμενα κενά.

Σε αυτό το άρθρο του Maxwell (καθώς επίσης και στο αμέσως επόμενο βιβλίο του «Treatise on Electricity and Magnetism» που δημοσιεύτηκε το 1873), το πολύπλοκο πρότυπο ρευστού με τις κυψέλες και τους στροβίλους εξαφανίστηκε. Παρέμειναν, απλώς, οι μαθηματικές εξισώσεις και η έννοια του «πεδίου» ως συνθήκη ή κατάσταση του αιθέριου μέσου. Η γενική αποδοχή της θεωρίας του Maxwell στο τέλος του 19ου αιώνα σήμανε τη μετάβαση από την εποχή στην οποία κυριαρχούσε η φιλοσοφία της δράσης από απόσταση στη σύγχρονη εποχή των θεωριών πεδίου. Στο πλαίσιο αυτών των θεωριών, η ορμή, η ενέργεια και άλλες διατηρούμενες ποσότητες διαδίδονται μέσω του πεδίου.

Οι μαθητές που θα προχωρήσουν τις σπουδές τους στη φυσική και την τεχνολογία, αν αποκτήσουν φαινομενολογικό υπόβαθρο, βοηθούνται να κατανοήσουν και να εκτιμήσουν την πραγματική σημασία και το σκοπό εισαγωγής της έννοιας του «πεδίου». Αποτέλεσμα: κατανοούν καλύτερα την εισαγωγή και τις συνέπειες των εξισώσεων του Maxwell. Ωστόσο, ακόμα και οι μαθητές που δεν θα ακολουθήσουν προχωρημένες σπουδές ούτε θα δουν ή θα χρησιμοποιήσουν τις εξισώσεις του Maxwell, είναι δυνατό να ωφεληθούν από αυτή την ποιοτική παρουσίαση. Αν τους παρουσιάσουμε τις θεμελιώδεις ιδέες που συζητήσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια, είναι δυνατό να αποκτήσουν, τουλάχιστον, ποιοτική εικόνα της επαναστατικής μεταβολής της «οπτικής γωνίας» που οδήγησε στην επινόηση της θεωρίας του πεδίου. Μπορούν, επίσης, να κατανοήσουν, σε ορισμένο βαθμό, ποια ερωτήματα και ποιες απόψεις προκαλούν τη σύγχρονη αναζήτηση της ύπαρξης βαρυτικών κυμάτων.

8.9 Εργαστηριακή μέτρηση της τιμής του B

Μια από τις λίγες μετρήσεις, η οποία αξίζει να γίνει απλώς για την ίδια τη μέτρηση, είναι της έντασης ενός πεδίου B . Ο λόγος είναι ότι ελάχιστοι μα-

θητές πείθονται άμεσα για το νόημα του B από τις παρουσιάσεις των εγχειριδίων ή τις προφορικές. Αν τους ρωτήσουμε, πολλοί αποκαλύπτουν, όντως, την αμφιβολία τους για την ύπαρξη αυτού του μεγέθους. Οι αμφιβολίες και οι επιφυλάξεις τους μειώνονται σημαντικά με την άμεση εμπειρία εκτέλεσης της μέτρησης της δύναμης η οποία ασκείται σε ρευματοφόρο σύρμα ευρισκόμενο μέσα σε μαγνητικό πεδίο και με την εμπειρία υπολογισμού του B από το F/Il . (Οι συσκευές με πηνίο αναστροφής ή αυτές που στηρίζονται στο φαινόμενο Hall δεν έχουν την ίδια επίδραση: η σύνδεση με το B είναι πιο αφηρημένη και απόμακρη.)

Οι περισσότερες εταιρείες οργάνων διαθέτουν συσκευή προσδιορισμού του B μέσω της «ζύγισης» της δύναμης που ασκείται σε ρευματοφόρο σύρμα γνωστού μήκους. Το PSSC εκμεταλλεύεται μια απλή, πολύ αποτελεσματική συσκευή, που μπορούμε να την κατασκευάσουμε στο σπίτι. Μια απλή και ευέλικτη συσκευή έχει το προτέρημα ότι επιτρέπει στους μαθητές να ερευνήσουν τη μεταβολή της δύναμης ως προς τη γωνία μεταξύ της διεύθυνσης του πεδίου και του σύρματος. Η συγκεκριμένη διερεύνηση αξίζει να γίνει παράλληλα με τη μέτρηση της δύναμης στην περίπτωση που οι δύο διευθύνσεις είναι κάθετες μεταξύ τους.

Αφού εκτελέσουν τις παρατηρήσεις, οι μαθητές κρατούν, σαφώς, διαφορετική στάση απέναντι στο νόημα του B από εκείνη που κρατούν όταν δεν διαθέτουν τη συγκεκριμένη εμπειρία.

9. ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΦΩΣ

9.1 Εισαγωγή

Σε ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής, η διδασκαλία των κυματικών φαινομένων ορθά περιορίζεται στα κινηματικά χαρακτηριστικά τους, αφήνοντας τα δυναμικά για αργότερα, στο πλαίσιο πιο προχωρημένης μελέτης. Από παιδαγωγική άποψη μια από τις καλύτερες και αριότερες μελέτες παραμένει αυτή του εγχειριδίου φυσικής του PSSC, σε οποιαδήποτε από τις έξι εκδόσεις του. Ευτυχώς, πολλά εγχειρίδια έχουν δανειστεί σημαντικά στοιχεία από τη μελέτη του PSSC, ιδιαίτερα τις όμορφες φωτογραφίες, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς. Αν το υλικό του εγχειριδίου συνδυαστεί με επιδείξεις, με εργαστηριακή εμπειρία σε δεξαμενές κυματισμών και με τις άριστες ατέρμονες ταινίες που δείχνουν την ανάκλαση, τη διάθλαση και τη συμβολή των κυματισμών, τότε το υλικό είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό: βοηθά τους μαθητές να κατανοήσουν τη συμπεριφορά των κυμάτων και να διακρίνουν την κυματική κίνηση από τη σωματιδιακή. Αν, ωστόσο, «καλύψουμε» την ύλη υπερβολικά γρήγορα, συχνά αναιρείται η ενδεχόμενη αποτελεσματικότητα. Τούτο συμβαίνει, κυρίως, αν δεν προσφέρουμε εργαστηριακή εμπειρία με χορδές, ελατήρια και δεξαμενές κυματισμών και αν δεν συνοδευτεί η εμπειρία αυτή με ερωτήσεις σωκρατικού τύπου.

Η απτή εμπειρία παραμένει ουσιώδης παράγοντας για την καλλιέργεια της κατανόησης των φαινομένων και για τη σύλληψη του εκτενούς λεξιλογίου που υπεισέρχεται. Επίσης, αυτή η εμπειρία είναι απαραίτητο να καθοδηγείται με ερωτήματα φαινομενολογικού τύπου, τα οποία απουσιάζουν σε πολλά εγχειρίδια και παρουσιάσεις. Τα επόμενα εδάφια περιέχουν παραδείγματα για το τι μπορούμε να κάνουμε, ώστε να καλύψουμε λίγα από τα σοβαρότερα παραμένοντα κενά. Στα εδάφια αυτά υπάρχουν, επίσης, ορισμένες ιδέες που εμπλουτίζουν το θέμα και οδηγούν τους μαθητές να αντιληφθούν βαθιές συσχετίσεις μεταξύ άσχετων φαινομενικών γεγονότων.

9.2 Η διαφορά μεταξύ ταχύτητας σωματιδίου και ταχύτητας διάδοσης

Στην περίπτωση του εγκάρσιου κύματος σε μια χορδή, η διάκριση με-

ταξύ της ταχύτητας των σωματιδίων του μέσου και της ταχύτητας διάδοσης της διαταραχής είναι απολύτως εμφανής. Ορισμένοι μαθητές, ωστόσο, συνεχίζουν να βρίσκονται σε σύγχυση, παρά τις επιδείξεις που, ίσως, έχουν παρακολουθήσει. Αν και αντιλαμβάνονται αμέσως ότι οι ταχύτητες αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους, δεν κατορθώνουν να διακρίνουν ότι το μέγεθός τους είναι απολύτως διαφορετικό. Μέρος της σύγχυσης συνδέεται με το ότι αδυνατούν να αντιληφθούν πως η ταχύτητα του σωματιδίου μεταβάλλεται ως προς το μέγεθός της και ως προς την κατεύθυνσή της· δεν παραμένει σταθερή, όπως η ταχύτητα διάδοσης. Σύγχυση προκαλείται επίσης από το ότι, καθώς η τάση της χορδής μεταβάλλεται, η ταχύτητα του σωματιδίου αυξάνεται ή ελαττώνεται μαζί με την αύξηση ή ελάττωση της ταχύτητας της διάδοσης.

Η παρουσίαση αυτού του θέματος φαίνεται ότι προχωρά πολύ γρήγορα για τους λιγότερο εύστροφους μαθητές· είναι, λοιπόν, απαραίτητο να τους βοηθήσουμε να αντιμετωπίσουν το θέμα, εκτελώντας παρατηρήσεις, κατά προτίμηση ως τμήμα πειραμάτων που γίνονται στο σπίτι με χορδές ή σκοινιά. Αυτή η εργασία, ωστόσο, είναι απαραίτητο να έχει δομή. Έτσι, οι μαθητές καθοδηγούνται να εκτελούν ουσιαστικές παρατηρήσεις και όχι να «χαζεύουν παίζοντας». Λόγου χάρι, πρέπει να καθοδηγηθούν να παρατηρήσουν ότι το μέτρο της ταχύτητας του σωματιδίου διαφέρει από το μέτρο της ταχύτητας της διάδοσης: η ταχύτητα του σωματιδίου μηδενίζεται στη μέγιστη απόκλιση του. Είναι χρήσιμο να σχεδιάσουν οι μαθητές τη μεταβολή της ταχύτητας του σωματιδίου σε θετικούς και αρνητικούς παλμούς, οι οποίοι ταξιδεύουν και προς τις δύο κατευθύνσεις. Αρχικά, είναι αρκετό τα σχεδιαγράμματα να είναι ποιοτικά, και όχι ακριβή.

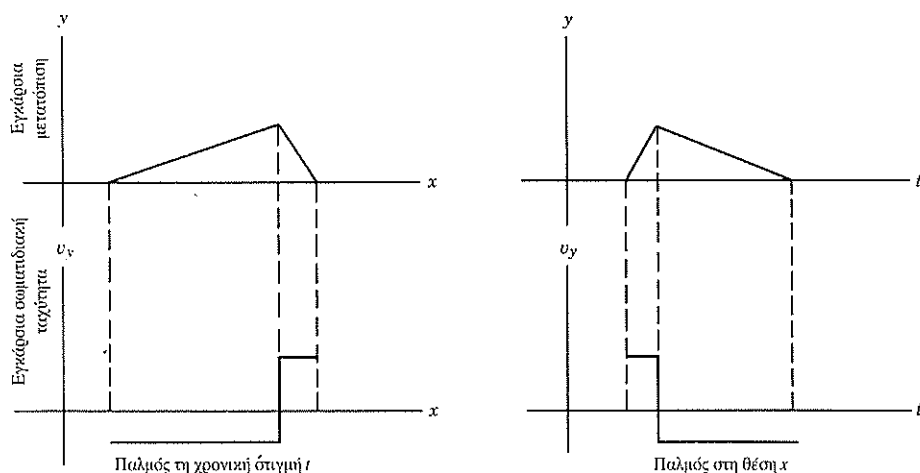
Στην περίπτωση των διαμήκων κυμάτων, ακόμα περισσότεροι μαθητές δεν κατορθώνουν να διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ της ταχύτητας των σωματιδίων και της ταχύτητας της διάδοσης, λόγω της συγγραμμικότητας των δύο ταχυτήτων. Ο γοργός ρυθμός με τον οποίο καλύπτεται το θέμα αποτελεί, επίσης, εμπόδιο. Οι περισσότεροι καθηγητές γνωρίζουν πόσο βοηθά στην παρουσίαση του θέματος αυτού το μαλακό ελατήριο. Οι μαθητές κατανοούν τέλεια τούτες τις ιδέες, αν τους δοθεί χρόνος για να χειριστούν και να παρατηρήσουν το ελατήριο και αν τους ζητηθεί να σχεδιάσουν τη μεταβολή της ταχύτητας ενός σωματιδίου σε πύκνωμα και αραιώμα. Η αντίληψή τους, ωστόσο, αναπτύσσεται μόνον αν τους δοθούν κατάλληλες ποιοτικές ερωτήσεις και προβλήματα και αν τα εγχειρίδια τους εφοδιάσουν με τις απαραίτητες οδηγίες. Κατόπιν, αναλαμβάνει «δράση» ο καθηγητής.

9.3 Γραφικές παραστάσεις

Όπως στην περίπτωση της ευθύγραμμης κίνησης (βλ. εδάφια 2.6 και

2.10), η σχεδίαση και η ερμηνεία γραφικών παραστάσεων βοηθά αποτελεσματικά να κατανοήσουν οι μαθητές την κινηματική των κυμάτων. Συμβάλλει, επίσης, στην κατανόηση πολλών παρουσιάσεων των εγχειριδίων, οι οποίες διαφορετικά δεν είναι αφομοιώσιμες.

Τα περισσότερα εγχειρίδια εστιάζουν την προσοχή τους, σχεδόν εξ ολοκλήρου, σε κύματα ημιτονοειδούς μορφής (τα οποία, βεβαίως, συμβαίνει να έχουν απλή αναλυτική περιγραφή): τείνουν, επίσης, να αγνοούν τυχαίες μορφές παλμών (οι οποίες δεν περιγράφονται με απλό τρόπο). Πολλοί μαθητές, λοιπόν, δεν κατορθώνουν να αντιληφθούν σαφώς τη διάκριση μεταξύ των γραφικών παραστάσεων στις οποίες ο οριζόντιος άξονας παριστάνει χρονομετρικές ενδείξεις (δηλαδή, την παρέλευση του χρόνου σε συγκεκριμένο σημείο του μέσου) και των γραφικών παραστάσεων στις οποίες ο οριζόντιος άξονας παριστάνει θέσεις κατά μήκος του άξονα x σε συγκεκριμένη χρονομετρική ένδειξη. Απλός τρόπος να αντιμετωπίσουμε αυτό το ζήτημα είναι να προσθέσουμε προβλήματα για το σπίτι και ερωτήσεις για τεστ, όπως τα επόμενα: 1) Δίδεται η «φωτογραφία» (το y ως προς το x) ενός ασύμμετρου παλμού σε μια χορδή· σχεδιάστε την αντίστοιχη γραφική παράσταση του y ως προς το t · 2) δίδεται η γραφική παράσταση του y ως προς το t · σχεδιάστε τη γραφική παράσταση του y ως προς το x . (Είναι σημαντικό η μορφή να είναι ασύμμετρη· αλλιώς, η διάκριση μεταξύ των δύο παραστάσεων χάνεται.) Σχεδιάστε, επίσης, τη γραφική παράσταση της ταχύτητας των σωματιδίων. (Στο Σχ. 9.3.1 υπάρχει παράδειγμα αυτής της περιγραφής.)



Σχήμα 9.3.1 (α) Γραφική παράσταση της απομάκρυνσης και της ταχύτητας των σημείων μιας χορδής σε ορισμένη χρονική στιγμή· (β) γραφική παράσταση της απομάκρυνσης και της ταχύτητας ενός σημείου της χορδής σε κάθε χρονική στιγμή. Και στις δύο περιπτώσεις στη χορδή διαδίδεται ο ίδιος ασύμμετρος παλμός.

Στην περίπτωση εγκάρσιων κυμάτων πάνω σε χορδή, οι γραφικές παραστάσεις είναι σχετικά απλές: η μετατόπιση των σωματιδίων παριστάνεται άμεσα με τον άξονα των τετμημένων (η μορφή της γραφικής παράστασης του y ως προς το x είναι ίδια με τη μορφή της χορδής, εκτός από μια αλλαγή κλίμακας). Ακόμα και σ' αυτήν την περίπτωση, ωστόσο, πολλοί μαθητές δυσκολεύονται να μετασχηματίσουν τη γραφική παράσταση του y ως προς το x σε γραφική παράσταση του y ως προς το t . Δυσκολεύονται, επίσης, να σχεδιάσουν τη γραφική παράσταση της ταχύτητας. Και τούτο συμβαίνει, κυρίως, αν νωρίτερα δεν έχουν επαρκώς εξασκηθεί με τις γραφικές παραστάσεις της κινηματικής.

Στην περίπτωση των διαμήκων κυμάτων η δυσκολία αυτή είναι σοβαρότερη και επηρεάζει πολύ περισσότερους μαθητές. Αιτία αυτής της κατάστασης είναι ότι ο άξονας των τετμημένων της αρχικής γραφικής παράστασης (πριν σχεδιάσουμε τη γραφική παράσταση της ταχύτητας του σωματιδίου) αντιστοιχεί σε ορισμένη μεταβλητή (λόγου χάρι, στην πίεση ή την πυκνότητα) ή στην απομάκρυνση του σωματιδίου από τη θέση ισορροπίας· η «μορφή» του παλμού, λοιπόν, δεν είναι πλέον άμεσα ορατή, όπως στη χορδή.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι μαθητές κατανοούν βαθύτερα την έννοια του διαμήκους κύματος, αν τους θέσουμε ποιοτικές ερωτήσεις στις οποίες εμφανίζονται ασύμμετρες μορφές παλμών. Σ' αυτές τις ερωτήσεις ζητάμε: 1) να ερμηνεύσουν τη γραφική παράσταση με απεικονίσεις στις οποίες θα φαίνονται οι αντίστοιχες μεταβολές του μέσου (δηλαδή, η συσπίρωση ή η απομάκρυνση των σπειρών του ελατηρίου, η αύξηση ή η ελάττωση της πίεσης που θα απεικονίζεται με πυκνότερες ή αραιότερες κουκίδες, οι οποίες παριστάνουν μόρια του αερίου)· 2) να μετασχηματίσουν τη γραφική παράσταση ως προς το x σε γραφική παράσταση ως προς το t και αντιστρόφως.

Όταν σχεδιάζουμε την αντίστοιχη γραφική παράσταση της ταχύτητας του σωματιδίου βοηθούμε να καταγραφεί μια από τις σημαντικότερες, από φυσική άποψη, διαφορές μεταξύ των διαμήκων και των εγκάρσιων κυμάτων: σε εγκάρσιο παλμό, τη στιγμή της μέγιστης απόκλισης η ταχύτητα του σωματιδίου είναι μηδενική· σε διαμήκη παλμό, τη στιγμή της μέγιστης συμπίεσης η ταχύτητα του σωματιδίου είναι μέγιστη.

Αφού εκτελέσουμε αυτές τις ασκήσεις με ασύμμετρους παλμούς, στη συνέχεια μπορούμε να τις εκτελέσουμε με ημιτονοειδείς κυματικούς συρμούς. Το δεύτερο ζήτημα αποτελεί το κύριο θέμα επόμενης μελέτης. Η μελέτη των παλμών, ωστόσο, είναι σημαντικότερη, επειδή τονίζεται το φυσικό περιεχόμενο του φαινομένου· στην περίπτωση των ημιτονοειδών συρμών, το φυσικό περιεχόμενο δεν αναδεικνύεται. Οι παλμοί, επίσης, βοηθούν να καλλιεργηθεί καλύτερα η αντίληψη της ανάκλασης εγκάρσιων ή διαμήκων κυμάτων πάνω σε ελεύθερα ή αδιαπέραστα σύνορα. Με αυτό το θέμα

ασχολούμαστε στο εδάφιο 9.5.

9.4 Μορφές εγκάρσιων και διαμήκων παλμών

Στο εδάφιο 9.3 επισημάναμε την αξία της μελέτης ασύμμετρων παλμών, εκτός από τη μελέτη ημιτονοειδών κυματικών συρμών. Η μελέτη αυτή βοηθά τους μαθητές να αντιληφθούν σημαντικές φυσικές λεπτομέρειες των κυματικών φαινομένων, μέσω ασκήσεων με γραφικές παραστάσεις. Η ποιοτική μελέτη του τρόπου με τον οποίο παράγονται πραγματικοί παλμοί απλής μορφής αποκαλύπτει ορισμένα πρόσθετα φυσικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά αυτά σπάνια αποσαφηνίζονται σε ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής· συμβάλλουν, ωστόσο, σημαντικά στην κατανόηση των φαινομένων.

Στην περίπτωση εγκάρσιου κύματος σε χορδή, είναι δυνατό να δημιουργήσουμε αμιγώς θετικό ή αρνητικό παλμό, εκτρέποντας την άκρη της χορδής προς τη θετική ή προς την αρνητική κατεύθυνση και επαναφέροντάς τη στη μηδενική θέση. Για να δημιουργήσουμε παλμό με θετική και αρνητική φάση, είναι απαραίτητο να κινήσουμε το άκρο της χορδής προς τη θετική και αρνητική κατεύθυνση, πριν το επαναφέρουμε στο μηδέν.

Η κατάσταση με τους διαμήκεις παλμούς είναι απολύτως διαφορετική. Για να δημιουργήσουμε μόνο ένα πύκνωμα, λόγου χάρη, στο ελατήριο, πρέπει να συμπίεσουμε το άκρο του ελατηρίου και να το αφήσουμε μετατοπισμένο προς την κατεύθυνση της συμπίεσης· αν το επαναφέρουμε στη μηδενική θέση, το πύκνωμα ακολουθείται, αναπόφευκτα, από αραιώμα. Ομοίως, αν θέλουμε να δημιουργήσουμε μόνο ένα αραιώμα, πρέπει να αφήσουμε το άκρο μετατοπισμένο προς την κατεύθυνση όπου τεντώσαμε το ελατήριο· αν επαναφέρουμε το άκρο στη μηδενική θέση, το αραιώμα ακολουθείται από πύκνωμα.¹

Παρακολουθώντας μαθητές να δουλεύουν στο εργαστήριο με κυματικά φαινόμενα, διαπίστωσα ότι, αν κατανοήσουν τα χαρακτηριστικά της δημιουργίας παλμού, το κέρδος είναι ουσιαστικό και βέβαιο.

Αξίζει, ωστόσο, να προσεξουμε ιδιαίτερα μια πλευρά της κατανόησης των ακουστικών παλμών πυκνώματος και αραιώματος. Αν ζητήσουμε από τους μαθητές να περιγράψουν με δικά τους λόγια τι συμβαίνει στο ρευστό

1. Αυτές οι ποιοτικές παρατηρήσεις, βεβαίως, σχετίζονται άμεσα με ένα βασικό θεώρημα της διάδοσης των κυμάτων: η συνολική *ώθηση* που μεταφέρει το κύμα είναι μηδενική, αν η τελική απομάκρυνση του σημείου της αρχής είναι μηδενική. Δεν'συνηγορώ υπέρ της ακριβούς παρουσίασης του θεωρήματος στο πλαίσιο μιας σειράς εισαγωγικών μαθημάτων· η ποιοτική πλευρά του θέματος που παρουσιάζεται εδώ δημιουργεί σταθερή βάση για βαθύτερη κατανόησή του αργότερα, σε πιο προχωρημένο επίπεδο.

μέσο, όταν παλμοί δημιουργούνται και διαδίδονται, πολλοί χρησιμοποιούν μικροσκοπική περιγραφή (με άτομα και μόρια) και όχι μακροσκοπική. Κατά βάθος, η περιγραφή αυτή δεν είναι λανθασμένη (εκτός από το ότι οι μαθητές σπάνια αντιλαμβάνονται τη χαοτική θερμοκή κίνηση των μορίων παράλληλα με την οργανωμένη κίνησή τους η οποία παράγει το κύμα). Η προσφυγή σ' αυτήν, όμως, αποκαλύπτει συνήθως μια βαθιά διστακτικότητα των μαθητών στο να χρησιμοποιούν τα μακροσκοπικά μεγέθη πίεση και πυκνότητα: στις πρώτες τάξεις του σχολείου συλλαμβάνουν την ορολογία για τα άτομα και τα μόρια, που συχνά παρουσιάζεται με στρεβλό και αποπροσανατολιστικό τρόπο, ενώ δεν κατανοούν σαφώς τα μακροσκοπικά μεγέθη — ιδιαίτερα την πίεση.

Η υδροστατική πίεση είναι όντως λεπτή και δύσκολη έννοια. Η κατανόηση του φυσικού περιεχομένου των φαινομένων που περιλαμβάνουν την πίεση και τις μεταβολές της εξαρτάται από την κατανόηση του νόμου του Πασκάλ: η πίεση σε κάθε σημείο ενός υγρού είναι ομοιόμορφη προς κάθε κατεύθυνση. Αν οι μαθητές δεν συλλάβουν αυτή την έννοια, κατανοούν και αντιλαμβάνονται ατελώς το τι συμβαίνει σε ένα ρευστό μέσο. Λόγω της σύγχρονης τάσης να παραλείπεται ή να συντομεύεται η μελέτη των ρευστών σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής, πολλοί μαθητές κατανοούν ανεπαρκώς τη φύση της πίεσης ενός ρευστού. (Η αλήθεια του προηγούμενου ισχυρισμού αποδεικνύεται από την αδυναμία πολλών ασκούμενων *φυσικών* να αντιληφθούν το εξής: σε ένα μείγμα λάδι-νερό οι δύο ουσίες βρίσκονται μόνιμα διαχωρισμένες· αν μεταβάλλουμε την κλίση των πλευρών του δοχείου, η πίεση στον πυθμένα μεταβάλλεται.) Το ζήτημα της κατανόησης της πίεσης ενός ρευστού μελετάται λεπτομερέστερα στο εδάφιο 11.3.

9.5 Ανάκλαση των παλμών

Η ανάκλαση ενός παλμού σε συνοριακό σημείο είναι πολύ διαφορετικό πρόβλημα από την αναπήδηση ενός σωματιδίου σε τοίχο. Στην πρώτη περίπτωση, πραγματευόμαστε πρόβλημα συνοριακών τιμών ενός δυναμικού συστήματος. Το πρόβλημα αυτό, λοιπόν, περιλαμβάνει τη *μερική* ανάκλαση, τη *μερική* διάδοση και την απορρόφηση του παλμού· η ολική ανάκλαση είναι, απλώς, ιδανική οριακή περίπτωση. Η ταυτόχρονη συνύπαρξη του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος είναι μια από τις θεμελιώδεις διαφορές μεταξύ της κυματικής και της σωματιδιακής συμπεριφοράς στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής.

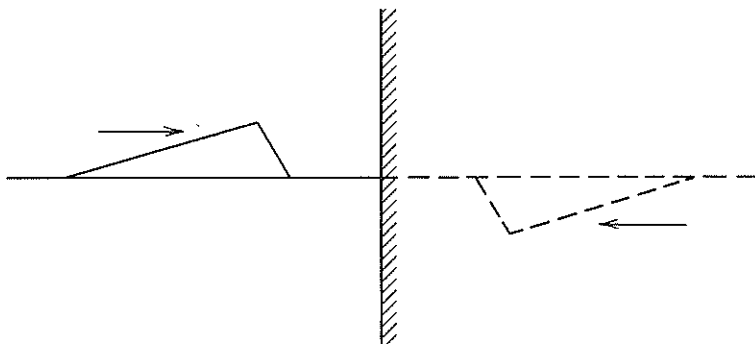
Σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων, είναι αδύνατο να προχωρήσουμε αναπτύσσοντας την τυπική μαθηματική λύση της κυματικής εξίσωσης σε συνοριακά σημεία, έστω και σε ιδανικές καταστάσεις. Για να φανταστούμε

σαφώς το ανακλώμενο κύμα, είναι απαραίτητο να δεχτούμε ένα *ad hoc* επιχείρημα, το οποίο πολλές παρουσιάσεις εγχειριδίων έχουν την τάση να το αποκρύπτουν. Πολλοί μαθητές, λοιπόν, περιπίπτουν σε σύγχυση με την προσέγγιση: δεν μπορούν να αντιληφθούν πώς ένα ανακλώμενο κύμα διαδίδεται από την άλλη πλευρά του συνόρου, όπου δεν υπάρχει «μέσο διάδοσης», με την απαραίτητη μορφή για να ικανοποιείται η συνοριακή συνθήκη. Αισθάνονται ότι υπεισέρχεται «μαύρη μαγεία» και ότι ουδέποτε μόνοι τους θα κατόρθωναν να συλλάβουν την τεχνική.

Είναι ίσως αδύνατο να αναιρέσουμε απολύτως τις αμφιβολίες· βοηθά, ωστόσο, να αναφέρουμε ρητά ορισμένα στοιχεία και να αιτιολογήσουμε την προσέγγιση. Το σημείο εκκίνησης της αιτιολόγησης είναι απλώς το *παρατηρούμενο γεγονός* ότι ανακλάσεις *συμβαίνουν όντως*, και ότι η κατεύθυνση της διάδοσης του ανακλώμενου κύματος είναι αντίθετη από την κατεύθυνση του προσπίπτοντος κύματος. Στην ιδανική περίπτωση του μονοδιάστατου κύματος, το κύμα διαδίδεται χωρίς να μεταβάλλεται η μορφή του. Φανταζόμαστε, λοιπόν, ότι το προσπίπτον κύμα ξεκίνησε ή ότι έρχεται από *οποιοδήποτε* σημείο της χορδής, του ελατηρίου ή της επιφάνειας του νερού, ακόμα και από σημεία στα οποία μέσο διάδοσης δεν υπάρχει. Με παρόμοιο ακριβώς τρόπο, μπορούμε να φανταστούμε ότι το ανακλώμενο κύμα διαδίδεται από οποιοδήποτε σημείο, χωρίς να αλλάζει η μορφή του. Φανταζόμαστε, λοιπόν, ότι το ανακλώμενο κύμα διαδίδεται, επίσης, στην περιοχή πέραν του ανακλώντος συνοριακού σημείου (είτε υπάρχει μέσο διάδοσης σ' αυτήν είτε όχι) και ότι φτάνει στο συνοριακό σημείο μ' εκείνη τη φάση, ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη του σταθερού ή ελεύθερου συννοριακού σημείου.

Είναι απαραίτητο να εξομολογηθούμε ρητά ότι πρόκειται για αμιγώς *κινηματική* προσέγγιση η οποία βοηθά να «διατηρήσουμε τα προσχήματα»: δέχεται την ύπαρξη της ανάκλασης ως παρατηρούμενου γεγονότος και χρησιμεύει στο να ικανοποιείται η συνοριακή συνθήκη. Δεν είναι δυναμική προσέγγιση· δεν αποτελεί, δηλαδή, περιγραφή του «μηχανισμού» με τον οποίο δημιουργείται η ανάκλαση στη συνοριακή περιοχή. (Οι περισσότερες προσπάθειες να εξηγηθεί μηχανιστικά η μορφή του ανακλώμενου κύματος είναι αποπροσανατολιστικές και απατηλές· καλύτερα λοιπόν να αποφεύγονται.) Οι περισσότεροι μαθητές είναι πρόθυμοι να αποδεχτούν τη διαδικασία που υιοθετούμε, αν είμαστε ειλικρινείς για το βάθος της ερμηνείας και τους περιορισμούς.

Πολλά εγχειρίδια, ιδιαίτερα εκείνα που χρησιμοποιούν τις άριστες εικόνες του PSSC, περιέχουν όντως ικανοποιητικές και σαφείς παρουσιάσεις της παρατηρούμενης μορφής του κύματος, όταν αυτό ανακλάται απολύτως από ένα ελεύθερο ή σταθερό συνοριακό σημείο. (Περιέχουν, επίσης, σαφείς παρουσιάσεις της μερικής ανάκλασης και της διείσδυσης του κύματος.) Σπάνια, ωστόσο, δίνεται η κατάλληλη ευκαιρία στους μαθητές να σχε-



Σχήμα 9.5.1 Εγκάρσιος παλμός σε μια χορδή προσπίπτει από αριστερά σε ακλόνητο τοίχωμα. Για να ικανοποιείται η συνοριακή συνθήκη — η σωματιδιακή ταχύτητα στο τοίχωμα να είναι μηδενική — ο ανακλώμενος παλμός, που φανταζόμαστε ότι προέρχεται από τη φανταστική περιοχή δεξιά του τοιχώματος, πρέπει να έχει αντίθετη φάση από του προσπίπτοντος και να είναι το *κατοπτρικό είδωλό* του.

διάσουν, σε ποικίλες συνθήκες, μορφές κυμάτων που ανακλώνται και διεισδύουν. Χωρίς αυτή την ευκαιρία πολλοί δεν κατορθώνουν να κατανοήσουν βαθιά το φαινόμενο.²

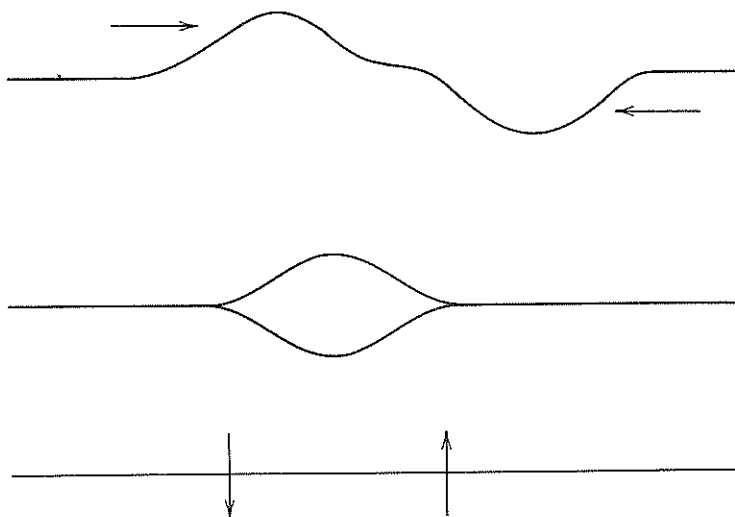
Σ' αυτήν την περίπτωση, οι παλμοί ασύμμετρης μορφής παίζουν σημαντικό ρόλο: οι μαθητές αναγκάζονται να μελετήσουν και τη διαδοχή των γεγονότων, η οποία εν μέρει συσκοτίζεται λόγω της συμμετρίας των ημιτονοειδών κυματικών συρμών. Στα Σχ. 9.5.1, 9.5.2 και 9.5.3, διευκρινίζονται ορισμένα σημεία του θέματος. Στην περίπτωση εγκάρσιου κύματος χορδής που προσπίπτει σε ακλόνητο τοίχωμα (Σχ. 9.5.1), η συνοριακή συνθήκη — η σωματιδιακή ταχύτητα στο τοίχωμα να είναι μηδενική — απαιτεί ο ανακλώμενος παλμός να έχει αντίθετη φάση από του προσπίπτοντος. Αυτό είναι σχετικά σαφές στους μαθητές· πολύ λιγότερο σαφές, ωστόσο, είναι ότι ο ανακλώμενος παλμός είναι το *κατοπτρικό είδωλο* ως προς τη φάση. Αυτή η πλευρά του θέματος αποσαφηνίζεται μόνο αν χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα ασύμμετρο παλμό. Οι ασκήσεις με γραφικές παραστάσεις του εδαφίου 9.3 προετοιμάζουν το έδαφος για το είδος των συλλογισμών και της αντίληψης που απαιτείται στο παρόν ζήτημα.

Άλλο φυσικό χαρακτηριστικό αυτής της κατάστασης είναι ότι η σωματιδιακή ταχύτητα στη χορδή διατηρείται μηδενική μόνο πάνω στο ακλόνητο τοίχωμα. Οπουδήποτε αλλού στη χορδή, η σωματιδιακή ταχύτητα δεν είναι μηδενική, καθώς ο ανακλώμενος παλμός διαπερνά τον προσπίπτοντα. Πολ-

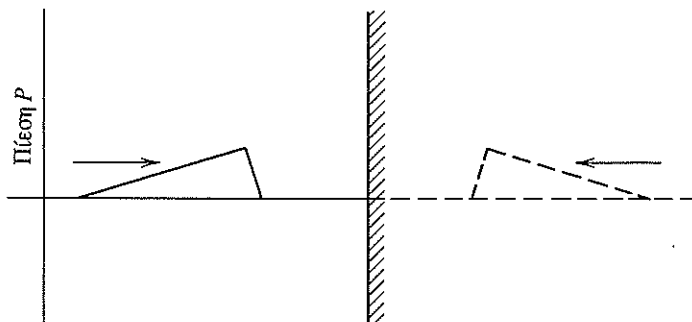
2. Στο παρόν στάδιο, θεωρούμε ότι η μελέτη της ανάκλασης έπεται της κατάλληλης επίδειξης και μελέτης της υπέρθεσης κυματικών συρμών και παλμών. Αν δεν προηγηθεί η μελέτη της υπέρθεσης, η μελέτη της ανάκλασης δεν έχει νόημα. Από τις καλύτερες μελέτες με άριστες φωτογραφίες είναι, επίσης, το εγχειρίδιο φυσικής του PSSC.

λοιί μαθητές δεν προσέχουν αυτό το σημείο, εκτός κι αν τους καθοδηγήσουμε να σχεδιάσουν δύο ή τρία διαδοχικά στάδια της διαδικασίας αλληλοκάλυψης του προσπίπτοντος με τον ανακλώμενο παλμό και να μελετήσουν τη σωματιδιακή ταχύτητα σε διάφορες θέσεις. Η αντίληψη που αποκτούν οι μαθητές σ' αυτό το πλαίσιο εμπλουτίζεται, αν τους καθοδηγήσουμε να επιστρέψουν στην περίπτωση της υπέρθεσης δύο συμμετρικών παλμών οι οποίοι διαπερνούν ο ένας τον άλλο με αντίθετη φάση και προς αντίθετες κατευθύνσεις, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 9.5.2. Τη στιγμή που οι παλμοί «αλληλοεξουδετερώνονται», η συνολική απόκλιση κατά μήκος όλης της χορδής είναι μηδενική· η σωματιδιακή ταχύτητα, ωστόσο, δεν είναι παντού μηδενική. Στην κεντρική περιοχή, όπου οι μέγιστες αποκλίσεις αλληλοεξουδετερώνονται, η σωματιδιακή ταχύτητα είναι μηδενική· πλευρικά, ωστόσο, υπάρχουν δύο περιοχές μέγιστης σωματιδιακής ταχύτητας: στη μία περιοχή η ταχύτητα έχει κατεύθυνση προς τα πάνω και στην άλλη προς τα κάτω, όπως παριστάνεται στο σχήμα.

Με αυτή την έκθεση οι μαθητές προετοιμάζονται να κατανοήσουν τις κινήσεις των στάσιμων κυμάτων, που προκύπτουν από την ανάκλαση ημιτονοειδών κυματικών συρμών.



Σχήμα 9.5.2 Υπέρθεση δύο συμμετρικών παλμών ταυτόσημης μορφής, που κινούνται σε μια χορδή προς αντίθετες κατευθύνσεις. Τη στιγμή της σύμπτωσης των κορυφών, η στιγμιαία απόκλιση είναι παντού μηδενική· η σωματιδιακή ταχύτητα, ωστόσο, είναι μηδενική μόνο στο κέντρο: εκατέρωθεν του κέντρου είναι μέγιστη με φορά προς τα πάνω και προς τα κάτω αντίστοιχα.



Σχήμα 9.5.3 Παλμός συμπίεσης σε ρευστό (ή ελατήριο) προσπίπτει από αριστερά σε ακλόνητο τοίχωμα. Για να ικανοποιείται η συνοριακή συνθήκη — η σωματιδιακή ταχύτητα στο τοίχωμα να είναι μηδενική — πρέπει ο ανακλώμενος παλμός, που φανταζόμαστε ότι προέρχεται από τη φανταστική περιοχή δεξιά του τοιχώματος, να είναι το κατοπτρικό είδωλο του προσπίπτοντος.

Στο Σχ. 9.5.3 μελετάμε την ανάκλαση πάνω σε σταθερό τοίχωμα ενός παλμού συμπίεσης (διάμηκες κύμα). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η συνοριακή συνθήκη του μηδενισμού της σωματιδιακής ταχύτητας στο τοίχωμα απαιτεί ο ανακλώμενος παλμός να είναι το κατοπτρικό είδωλο του προσπίπτοντος, χωρίς αντιστροφή της φάσης. Αν οι μαθητές έχουν ασχοληθεί με τις ασκήσεις του εδαφίου 9.3, είναι πολύ καλύτερα προετοιμασμένοι να κατανοήσουν την εν λόγω μελέτη της ανάκλασης.

Στο πλαίσιο της εργασίας για το σπίτι και των ερωτήσεων των τεστ, είναι δυνατό να ακολουθήσουν ορισμένες παραλλαγές των προηγούμενων παραδειγμάτων: αρνητικοί προσπίπτοντες εγκάρσιοι παλμοί και παλμοί αραιωμάτων· προσπίπτον κύμα ερχόμενο από δεξιά και όχι από αριστερά· ελεύθερο άκρο αντί σταθερό· ημιτονοειδείς κυματικοί συρμοί αντί παλμοί· *αντίστροφη* πορεία συλλογισμών, όπου δίνεται η μορφή του ανακλώμενου παλμού και ζητείται η μορφή του προσπίπτοντος. (Όπως έχουμε επισημάνει σε προηγούμενα Κεφάλαια, το να κατευθύνουμε τους μαθητές να ακολουθήσουν αντίστροφη πορεία συλλογισμών και προς τις δύο δυνατές κατευθύνσεις, συντελεί σημαντικά στη μάθηση και την κατανόηση. Η αντιστροφή της πορείας των συλλογισμών φαίνεται, ίσως, τετριμμένο ζήτημα στον ειδικό· δεν είναι, ωστόσο, καθόλου τετριμμένο για το μαθητή.)

9.6 Προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης

Ο έγκυρος, κομψός και αυστηρός τρόπος απόδειξης του ότι σε δεδομένες συνθήκες μια διαταραχή διαδίδεται με ταχύτητα εξαρτώμενη από τις ιδιότητες του συστήματος περιλαμβάνει: πρώτον, την εφαρμογή των βασικών νόμων (της μηχανικής ή του ηλεκτρομαγνητισμού) που διέπουν το σύ-

στημα και, δεύτερον, την απόδειξη ότι ικανοποιείται ορισμένος τύπος κυματικής εξίσωσης. Στο πλαίσιο ενός εισαγωγικού μαθήματος αυτή η προχωρημένη αντιμετώπιση είναι σαφώς ακατάλληλη και δυσνόητη· εξαίρεση, ίσως, αποτελεί μια σειρά μαθημάτων στο δεύτερο έτος του πανεπιστημίου, όπου χρησιμοποιείται απειροστικός λογισμός. Είναι, ωστόσο, απολύτως δυνατό να προσδιορίσουμε την κυματική ταχύτητα σε λίγες ενδιαφέρουσες μηχανικές καταστάσεις: εφαρμόζουμε, απλώς, την απαίτηση διατήρησης της μάζας και το θεώρημα ώθησης-ορμής σε έναν παλμό λίγο-πολύ σταθερής μορφής που θεωρούμε ότι διαδίδεται σε μία διάσταση. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι, βεβαίως, τόσο ανστηρή όσο η παραγωγή της κυματικής εξίσωσης· είναι, ωστόσο, μια πρώτη τομή στο πρόβλημα, απολύτως εύλογη και αποδεκτή.

Σημαντικό προτέρημα αυτού του είδους προσέγγισης είναι ότι δίνεται η ευκαιρία στους μαθητές να παρακολουθήσουν πώς χρησιμοποιούμε στην πράξη, με έγκυρο τρόπο, τους βασικούς νόμους που συνάντησαν προηγουμένως, για να πάρουμε, σε νέες καταστάσεις, σημαντικά αποτελέσματα. Μέχρι τώρα, οι μαθητές έχουν παρακολουθήσει να εφαρμόζονται οι βασικοί νόμοι (η διατήρηση της μάζας και οι εξισώσεις κίνησης του Νεύτωνα) σε περιορισμένα παραδείγματα που υπάρχουν στο τέλος των κεφαλαίων των εγχειριδίων, τα οποία δίνονται για εργασία στο σπίτι. Δεν έχουν, ωστόσο, παρακολουθήσει πώς εξαγάγουμε συμπεράσματα, χρησιμοποιώντας τους βασικούς νόμους· έχουν παρακολουθήσει, απλώς, παραδείγματα άμεσης εφαρμογής των νόμων σε ειδικές καταστάσεις, οι οποίες χρησιμοποιούνται ως μεμονωμένες ασκήσεις για το σπίτι.

Τρόποι προσδιορισμού της κυματικής ταχύτητας υπάρχουν στα επόμενα τρία εδάφια. Δεν συνιστώ, ωστόσο, την παρουσίαση κάποιου από τους συγκεκριμένους τρόπους σε κάθε σειρά εισαγωγικών μαθημάτων· ο καθηγητής θα κρίνει πώς θα τους παρουσιάσει. Είναι δυνατό, λόγω χάρη, να ζητήσουμε μόνο από τους προχωρημένους μαθητές να μελετήσουν έναν τρόπο προσδιορισμού της κυματικής ταχύτητας· αυτοί οι μαθητές ωφελούνται από τη βαθιά αναλυτική μελέτη. Μπορούμε, επίσης, να δώσουμε την ευκαιρία στους μαθητές να βελτιώσουν τη βαθμολογία τους, μελετώντας έναν από τους τρόπους αυτούς. Τέλος, η συγκεκριμένη μελέτη είναι δυνατό να αποτελέσει συστατικό της ελεύθερης ενασχόλησης των μαθητών. Σε ανώτερο κύκλο σπουδών, ωστόσο, μπορούμε ορισμένες φορές να διδάξουμε πλήρως πώς προσδιορίζεται η κυματική ταχύτητα. Μέσω της ανακύκλησης των ιδεών, μας δίνεται η ευκαιρία για σύνθεση και ανασκόπηση των εννοιών.

Οι τρόποι προσδιορισμού της κυματικής ταχύτητας που παρουσιάζονται στα επόμενα τρία εδάφια δεν είναι, βεβαίως, νέοι. Τους παρουσιάζουμε για να δείξουμε ότι, ουσιαστικά, η ίδια προσέγγιση είναι δυνατό να ακολουθηθεί σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις· αναδεικνύουμε, έτσι, την ενότητα των φαινομένων. Η ενότητα των φαινομένων και η ανακύκληση των

ιδίων θεμελιωδών ιδεών εντυπωσιάζουν τους μαθητές, και η αντίστοιχη πνευματική εμπειρία εντυπώνεται καλύτερα στη μνήμη τους.

9.7 Ταχύτητα διάδοσης προεξοχής σε χορδή

Θεωρήστε μια οριζόντια χορδή τεντωμένη υπό την επίδραση τάσης T , όπως φαίνεται στο Σχ. 9.7.1. Μετακινώντας απότομα σε νέα θέση το ένα άκρο της χορδής, η γωνία ή η προεξοχή διαδίδονται κατά μήκος της χορδής ως το άλλο άκρο. Θεωρούμε πως όταν εκτελούμε την ενέργεια αυτή, η τάση δεν μεταβάλλεται. Θεωρούμε, επίσης, ότι η γωνία θ μεταξύ της αρχικής διεύθυνσης της χορδής και της διεύθυνσης του τμήματος της χορδής που εκτρέπεται, είναι μικρή.

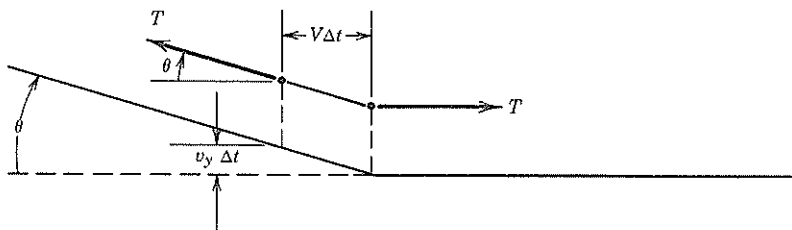
Βασική (αναπόδεικτη) υπόθεση είναι ότι η ταχύτητα V με την οποία διαδίδεται η προεξοχή προσδιορίζεται από τις ιδιότητες της χορδής. Με δεδομένη την υπόθεση αυτή, σε μια μικρή φέτα χορδής, που μόλις κάλυψε το μέτωπο του κύματος στο μικρό χρονικό διάστημα Δt , εφαρμόζουμε τον περιορισμό της διατήρησης της μάζας και το θεώρημα ώθησης-ορμής.

Το μήκος της χορδής που καλύφθηκε είναι $\Delta x = V\Delta t$. Επίσης, αν συμβολίσουμε με μ τη μάζα ανά μονάδα μήκους, η μάζα Δm της χορδής που καλύπτεται σε χρόνο Δt από το κύμα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta m = \mu V \Delta t \quad (9.7.1)$$

Πρόκειται, ουσιαστικά, για την εξίσωση συνέχειας (ή διατήρησης της μάζας). Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να την αναγνωρίσουμε, σαφώς, ως τέτοια.

Αν συμβολίσουμε με v_y την ταχύτητα που προσδίδεται στα στοιχειώδη τμήματα της χορδής, η μεταβολή της ορμής που προσδίδεται κατά το χρονικό διάστημα Δt στη φέτα Δm είναι $\mu v_y \Delta t$ και η ώθηση, κατά τη διεύθυνση y , που προσδίδεται στη φέτα είναι $T \sin \theta \Delta t$. Από το θεώρημα ώθησης-ορμής, λοιπόν, προκύπτει:



Σχήμα 9.7.1 Μετακινούμε απότομα το άκρο μιας χορδής. Η προεξοχή που δημιουργείται διαδίδεται προς τα δεξιά.

$$T\eta\mu\theta\Delta t = \mu v_y V \Delta t$$

και

$$T\eta\mu\theta = \mu v_y V \quad (9.7.2)$$

Είναι σαφές ότι στο παρόν στάδιο είναι απαραίτητο να πούμε κάτι για τη γεωμετρική σχέση μεταξύ των θ , v_y και του V . Από το Σχ. 9.7.1, είναι φανερό ότι:

$$\frac{v_y}{V} = \varepsilon\phi\theta \quad (9.7.3)$$

[Οι εξοικειωμένοι με το φορμαλισμό παρατηρούν ότι για κύμα της μορφής $y = f(x - Vt)$, το οποίο διαδίδεται στη θετική κατεύθυνση x και ικανοποιεί την εξίσωση κύματος μικρού πλάτους, η σωματιδιακή ταχύτητα v_y δίνεται από τον τύπο:

$$v_y = \frac{\partial y}{\partial t} = -Vf'(x - Vt) = -V \frac{\partial y}{\partial x} \quad (9.7.3a)$$

ο οποίος είναι πανομοιότυπος με την Εξ. 9.7.3.]

Συνδυάζοντας τις Εξ. 9.7.2 και 9.7.3, προκύπτει:

$$V^2 = \frac{T}{\mu} \text{ συν}\theta \quad (9.7.4)$$

και για μικρό θ , με $\text{συν}\theta$ πλησίον της μονάδας:

$$V = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (9.7.5)$$

Αυτή η εξίσωση είναι η συνήθης έκφραση της ταχύτητας διάδοσης ενός κύματος μικρού πλάτους σε μια χορδή.

Πρέπει να υπογραμμίσουμε ότι, στο πλαίσιο της προσέγγισης μικρού πλάτους, δεν θεωρούμε, απλώς, το θ μικρό· παραβλέπουμε, επίσης, τη συστολή και τη συμπίεση της χορδής και κάθε επακόλουθη μικρή κίνηση προς τα εμπρός ή προς τα πίσω κατά μήκος του άξονα x .

9.8 Ταχύτητα διάδοσης παλμού σε ρευστό

Το Σχ. 9.8.1 παριστάνει ένα ρευστό στο οποίο δημιουργείται (με απότομη μετατόπιση κάποιου διαφράγματος που βρίσκεται αριστερά) παλμός συμπίεσης. Θεωρούμε ότι ο παλμός ταξιδεύει προς τα δεξιά με ταχύτητα V , εξαρτώμενη από τις ιδιότητες του ρευστού. Αρχικά, όταν το υγρό είναι αδιατάρακτο, έχει πίεση P_0 , πυκνότητα ρ_0 και μηδενική σωματιδιακή ταχύτητα ($u_0 = 0$). Το διαταραγμένο υγρό, πίσω από την προπορευόμενη επιφάνεια του παλμού, έχει πίεση P , πυκνότητα ρ και μη μηδενική σωματιδιακή ταχύτητα u προς τα δεξιά. Το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα είναι A .

Σε μικρό χρονικό διάστημα Δt , η προπορευόμενη επιφάνεια εγκολπώνεται μάζα $\rho_0 A V \Delta t$ του αδιατάρακτου υγρού. Στην περιοχή πίσω από την προπορευόμενη επιφάνεια, η εν λόγω μάζα συμπιέζεται σε όγκο $A(V - u)\Delta t$. Λόγω της διατήρησης της μάζας, προκύπτει:

$$\rho A(V - u)\Delta t = \rho_0 A V \Delta t$$

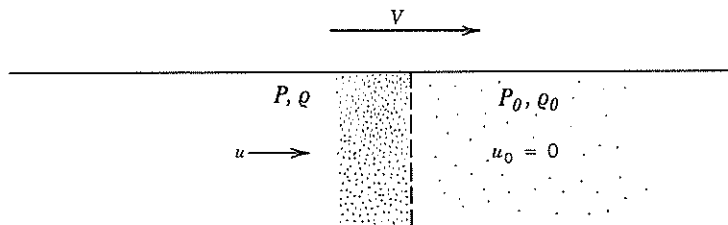
Από την εξίσωση αυτή παίρνουμε:

$$\rho(V - u) = \rho_0 V \quad (9.8.1)$$

Η ολική ώθηση που προσδόθηκε στη φέτα του υγρού την οποία εγκολπώθηκε ο παλμός σε χρονικό διάστημα Δt είναι $(P - P_0)A\Delta t$. Ταυτόχρονα η μεταβολή της ορμής της φέτας είναι $\rho_0 V u A \Delta t$. Σύμφωνα με το θεώρημα ώθησης-ορμής, οι δύο ποσότητες είναι ίσες μεταξύ τους. Προκύπτει, λοιπόν, η εξίσωση:

$$P - P_0 = \rho_0 V u \quad (9.8.2)$$

Απαλείφοντας το u από τις Εξ. 9.8.1 και 9.8.2, προκύπτει:



Σχήμα 9.8.1 Στο αριστερό άκρο του σωλήνα δημιουργούμε παλμό συμπίεσης στο υγρό που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα. Ο παλμός διαδίδεται προς τα δεξιά. Το εμβαδόν της διατομής του σωλήνα είναι A .

$$V^2 = \frac{P - P_0}{\varrho - \varrho_0} \frac{\varrho}{\varrho_0}$$

ή

$$V = \sqrt{\frac{\Delta P}{\Delta \varrho} \frac{\varrho}{\varrho_0}} \quad (9.8.3)$$

Με βάση την Εξ. 9.8.2, η σωματιδιακή ταχύτητα δίνεται από τη σχέση:

$$u = \frac{\Delta P}{\varrho_0 V} \quad (9.8.4)$$

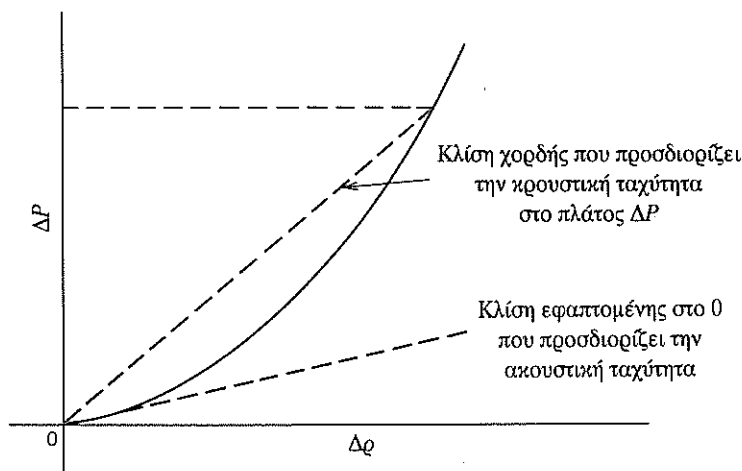
Είναι απαραίτητο να επισημάνουμε ότι καμιά εξίσωση από όσες γράψαμε μέχρι τώρα δεν περιέχει οποιαδήποτε προσέγγιση μικρού πλάτους. Οι εξισώσεις ισχύουν για μεγάλο πλάτος· υπόκεινται, απλώς, στον περιορισμό της σταθερότητας της μορφής κατά τη διάδοση. Αν και η μεταβολή είναι αδιαβατική, είναι ουσιαστικά μη αντιστρεπτή: η συμπίεση δεν είναι τελείως ελαστική· στη διαδικασία σημειώνεται απώλεια ενέργειας. Το μέσο μετά τη διέλευση του παλμού, επιστρέφοντας στο αρχικό επίπεδο πίεσης, έχει υψηλότερη θερμική ενέργεια από προηγουμένως. Κατά τη διάδοση παλμού πεπερασμένου πλάτους υπάρχει καθαρή αύξηση της εντροπίας και όταν η πίεση αποκτά πάλι την τιμή της πίεσης του περιβάλλοντος, η τελική θερμοκρασία είναι υψηλότερη από την αρχική.

Στην οριακή περίπτωση μικρού πλάτους, η Εξ. 9.8.3 ανάγεται στη συνήθη έκφραση της ταχύτητας του ήχου:

$$V = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \varrho}\right)_s} \quad (9.8.5)$$

Η σταθερότητα της εντροπίας S υποδηλώνει ότι, στην οριακή περίπτωση εξαιρετικά μικρού πλάτους, η συμπίεση είναι αδιαβατική.

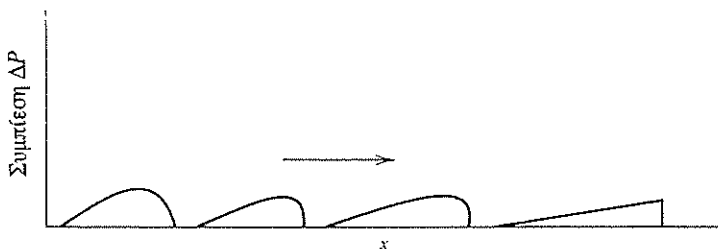
Από την Εξ. 9.8.3 προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα· αξίζει, λοιπόν, να τη μελετήσουμε περισσότερο. Η γραφική παράσταση του ΔP ως προς το $\Delta \varrho$ για ένα ρευστό έχει την ποιοτική μορφή που εμφανίζεται στο Σχ. 9.8.2. Η καμπύλη είναι κοίλη προς τα πάνω· υποδηλώνεται, έτσι, πως



Σχήμα 9.8.2 Η γραφική παράσταση του ΔP ως προς το $\Delta \rho$ για κάθε ρευστό που υπόκειται σε μεγάλη αδιαβατική συμπίεση και η πυκνότητά του μεταβάλλεται ανάλογα.

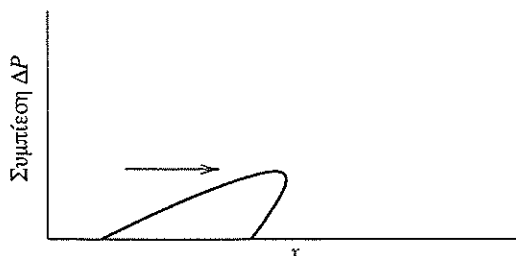
όταν η πίεση αυξάνεται, η συμπιεστότητα του υγρού ελαττώνεται. Η ταχύτητα διάδοσης V είναι η τετραγωνική ρίζα της κλίσης της χορδής που έχουμε σχεδιάσει στο Σχ. 9.8.2 από την αρχή ως την τιμή ΔP που έχουμε επιλέξει. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι σε υψηλότερη πίεση αντιστοιχεί μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης.

Σε παλμό με αρχικά στρογγυλεμένο μέτωπο, παρόμοιο με το μέτωπο του παλμού στο Σχ. 9.8.3, οι περιοχές υψηλότερης πίεσης προφταίνουν τις περιοχές χαμηλότερης πίεσης, οι οποίες προηγούνται. Αυτό συμβαίνει μέχρις ότου στην προπορευόμενη επιφάνεια δημιουργηθεί ασυνέχεια στην πίεση και στην πυκνότητα, η οποία ονομάζεται «κρουστικό μέτωπο».³ Η Εξ. 9.8.4 ισχύει, λοιπόν, για τη σωματιδιακή ταχύτητα πίσω από το κρουστικό μέτωπο.



Σχήμα 9.8.3 Σχηματισμός κρουστικού μετώπου και επιμήκυνση παλμού. Αρχικά στο μέσο διαδίδεται ένας καμπύλος παλμός πεπερασμένου πλάτους.

3. Δεν πρόκειται, βεβαίως, για *μαθηματική ασυνέχεια*. Η περιοχή μεταβολής της πίεσης και της πυκνότητας έχει πλάτος της τάξης μεγέθους της μέσης ελεύθερης διαδρομής της μοριακής κίνησης.



Σχήμα 9.8.4 Γραφική παράσταση χωρίς νόημα του ΔP ως προς την πίεση του παλμού.

Είναι σημαντικό να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιμετωπίσουν, μαζί με καταστάσεις που όντως συμβαίνουν, καταστάσεις που δεν συμβαίνουν. Λόγου χάρη, θεωρήστε την πλαστική μορφή παλμού που εμφανίζεται στο Σχ. 9.8.4. Ελάχιστοι μαθητές, ακόμα και από εκείνους που παρακολουθούν προχωρημένα τμήματα, έχουν το σθένος την πρώτη φορά που τους παρουσιάζουμε το διάγραμμα, να δηλώσουν ότι, από φυσική άποψη, αυτό δεν έχει νόημα και ότι η αντίστοιχη κατάσταση είναι αδύνατο να συμβεί.

Πιο προχωρημένη παρατήρηση για όποιον ενδιαφέρεται να συνεχίσει τη μελέτη είναι η εξής: εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της ενέργειας για την προπορευόμενη επιφάνεια, προκύπτει ένα σύνολο τριών εξισώσεων, οι «Σχέσεις Rankine-Hugoniot». Με την τρίτη εξίσωση είναι δυνατό να απαλείψουμε [στην περίπτωση ιδανικού αερίου, αναλυτικά, και στην περίπτωση τυχαίας ουσίας, για την οποία διαθέτουμε τον πίνακα δεδομένων (P , v , T και c_p) της εξίσωσης κατάστασης, αριθμητικά] το $\Delta\theta$ μέσω της ανεξάρτητης μεταβλητής ΔP . Προκύπτει, λοιπόν, άμεσα η ταχύτητα διάδοσης μέσω του πλάτους της πίεσης. Η συγκεκριμένη ανάλυση, ωστόσο, περιλαμβάνει τη χρήση θερμοδυναμικών σχέσεων, οι οποίες ξεπερνούν το επίπεδο ενός εισαγωγικού μαθήματος φυσικής.

9.9 Ταχύτητα διάδοσης επιφανειακών κυμάτων σε ρηχό νερό

Στο παρόν εδάφιο, ο όρος «ρηχός» σημαίνει ότι το βάθος D του νερού είναι μικρό σχετικά με το μήκος κύματος των επιφανειακών βαρυτικών κυμάτων.⁴ Στις συνθήκες αυτές, για κύματα μικρού πλάτους η ταχύτητα διάδοσης προκύπτει από τη γνωστή απλή σχέση $V = \sqrt{gD}$. Στις επόμενες παραγράφους αποδεικνύουμε τη σχέση αυτή. Η απόδειξη είναι παρόμοια μ' εκείνη που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα εδάφια.

4. Όταν το βάθος είναι μεγάλο σχετικά με το μήκος κύματος, η κατάσταση είναι απολύτως διαφορετική και σημαντικά πολυπλοκότερη. Σ' αυτές τις συνθήκες, οι μεταβολές της πίεσης πλησίον της επιφάνειας δεν διαπερνούν όλη τη στήλη του νερού ως τον πυθμένα. Η μαθηματική ανάλυση είναι πολυπλοκότερη και η ταχύτητα περιέχεται σε σχέση διασποράς. Στο παρόν βιβλίο, δεν θα μελετήσουμε την κατάσταση αυτή.

Η εξίσωση 9.9.1 ανάγεται στην εξίσωση:

$$hV = u(D + h) \quad (9.9.2)$$

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε την εξίσωση ώθησης-ορμής. Η αρχική κατανομή της υδροστατικής πίεσης σε όλο το βάθος του ρευστού δεν παίζει ρόλο στην επιτάχυνση των σωματιδίων του: οι αντίστοιχες δυνάμεις εξισορροπούνται. Στα σωματίδια προσδίδεται ταχύτητα u από δυνάμεις που δεν εξισορροπούνται στην επιφάνεια YD του ρευστού (που αρχικά είναι ήρεμη), λόγω της περίσσειας ρgh της πίεσης η οποία διαπερνά τη στήλη του νερού σε όλο το βάθος της. (Σε αυτό, ακριβώς, το σημείο, η απόδειξη περιορίζεται σε κύματα μεγάλου μήκους που δημιουργούνται σε ρηχό νερό.) Στη μάζα του νερού, λοιπόν, η οποία περνά μέσα από το μέτωπο, προσδίδεται ώθηση $\rho ghYD\Delta t$. Ταυτόχρονα, η μεταβολή της ορμής αυτής της ποσότητας νερού είναι $\rho YDVu\Delta t$. Εξισώνοντας την ώθηση και την αντίστοιχη μεταβολή της ορμής, προκύπτει:

$$gh = Vu \quad (9.9.3)$$

Απαλείφοντας το u από τις Εξ. 9.9.2 και 9.9.3, προκύπτει:

$$V^2 = g(D + h) \quad (9.9.4)$$

Από την εξίσωση αυτή, στην οριακή περίπτωση όπου το πλάτος είναι μικρό, προκύπτει:

$$V = \sqrt{gD} \quad (9.9.5)$$

Στον παρόν στάδιο, αρχίζουμε να αντιλαμβανόμαστε γιατί σε ρηχότερο νερό το κύμα ταξιδεύει γρηγορότερα. Αρχικά, ας αναδιατάξουμε την Εξ. 9.9.2 ως εξής:

$$uD = h(V - u) \quad (9.9.6)$$

Οι δύο όγκοι της Εξ. 9.9.6 ερμηνεύονται στο Σχ. 9.9.1: Το αριστερό μέλος αφορά τον όγκο του νερού στο τμήμα $AKSE$ (χωρίς τους όρους Y και Δt): το δεξιό μέλος αφορά τον όγκο στο τμήμα $HABK$ (χωρίς, επίσης, τους όρους Y και Δt).

Η Εξ. 9.9.6 δείχνει ότι, σε χρονικό διάστημα Δt , όγκος $uDY\Delta t$ νερού, ο οποίος, αρχικά, βρίσκεται μπροστά από το μέτωπο του κύματος, μεταφέρεται στην περιοχή $h(V - u)Y\Delta t$, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. (Αυτό δεν σημαίνει ότι ο πρώτος όγκος εισχωρεί όντως στο δεύτερο. Οι πραγματικές

τροχιές των σωματιδίων του νερού δεν απεικονίζονται λεπτομερώς σ' αυτήν την εξαιρετικά περιορισμένη ανάλυση.) Από το Σχ. 9.9.1 είναι φανερό, ωστόσο, ότι η εξίσωση συνέχειας απαιτεί σε κάθε χρονικό διάστημα Δt το μέτωπο του κύματος να προηγείται αρκετά, ώστε να «φιλοξενήσει» τον όγκο $\mu DY\Delta t$. Αυτό σημαίνει ότι σε βαθύτερο νερό το μέτωπο προηγείται περισσότερο.

Από την ανάλυση αυτή προκύπτει η ασυνήθιστη ιδέα ότι, στην περίπτωση του επιφανειακού κύματος σε ρηχό νερό, η κίνηση του νερού υπαγορεύεται μάλλον από την απαίτηση της συνέχειας παρά από κάποια δύναμη. Η δύναμη που προκύπτει από τη διαφορά πίεσης, λόγω της ανύψωσης του κύματος, είναι, βεβαίως, απαραίτητη για τη δημιουργία και της παραμικρής διαταραχής: από εκείνη τη στιγμή, ωστόσο, η ταχύτητα προσδιορίζεται από την απαίτηση της συνέχειας: σε δεδομένο χρονικό διάστημα, είναι απαραίτητο το μέτωπο σε ρηχότερο νερό να προχωρήσει περισσότερο, για να διατηρηθεί η μετατοπισμένη μάζα.

Επιστρέφοντας στην Εξ. 9.9.4, παρατηρούμε: αν δεχτούμε ότι το ύψος h του κύματος είναι αισθητά μεγαλύτερο από το βάθος D , οι περιοχές του παλμού που έχουν μεγαλύτερο πλάτος διαδίδονται με μεγαλύτερη ταχύτητα από τις περιοχές μικρότερου πλάτους. Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι ο παλμός τείνει να εξελιχθεί σε «κρουστικό μέτωπο», όπως στην περίπτωση παλμού συμπίεσης πεπερασμένου πλάτους σε αέριο. Στην περίπτωση του κύματος νερού, ωστόσο, το κύμα «σπάει»: συνηθέστερο παράδειγμα είναι τα κύματα που «σπάνε» κοντά στην ακτή. Λόγω της αναλογίας μεταξύ των επιφανειακών κυμάτων πεπερασμένου πλάτους σε νερό και των κυμάτων πίεσης πεπερασμένου πλάτους σε αέριο, ορισμένοι πειραματικοί χρησιμοποιούν κύματα νερού για να αναπαραστήσουν και να μελετήσουν τα μη γραμμικά φαινόμενα που συνδέονται με τη διασταύρωση και την ανάκλαση των κρουστικών κυμάτων.

Τελευταίες επισημάνσεις: Οι τρεις περιπτώσεις προσδιορισμού της ταχύτητας διάδοσης ενός κύματος επιλέχθηκαν σκόπιμα, για να υπογραμμιστεί η αξία μιας ταυτόσημης προσέγγισης που εφαρμόζεται σε φαινομενικά διαφορετικές φυσικές καταστάσεις. Αποκαλύπτεται, έτσι, η βαθύτερη ενότητα μεταξύ διαφορετικών φαινομένων. Οι μαθητές, λοιπόν, που προηγουμένως δεν είχαν ισότιμη εμπειρία εντυπωσιάζονται βαθιά. Η επανειλημμένη εφαρμογή των φυσικών νόμων παίζει, επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο στο να βοηθηθούν οι μαθητές να κατακτήσουν τον τρόπο σκέψης και όχι να απομνημονεύσουν, απλώς, τη διαδικασία σε ένα μεμονωμένο παράδειγμα.

Άλλο προτέρημα των συγκεκριμένων αποδείξεων είναι ότι έχουν πλούσιο φυσικό περιεχόμενο: απαιτούν φαινομενολογικό τρόπο σκέψης και μόνο απλά μαθηματικά. Οι καλοί σπουδαστές, ιδιαίτερα όσοι προσορίζονται για φυσικοί ή τεχνολόγοι, είναι απολύτως απαραίτητο να παρακολουθήσουν από νωρίς παρόμοιους συλλογισμούς. Πολλοί απ' αυτούς έρχονται σε

προχωρημένα (ή ακόμα και σε μεταπτυχιακά) τμήματα χωρίς αυτή την εμπειρία· αυτό φαίνεται σαφέστατα στον τρόπο συμπεριφοράς τους. Ταυτόχρονα, το καθηγητικό προσωπικό διαμαρτύρεται έντονα για την ανεπάρκεια των σπουδαστών, χωρίς, ωστόσο, να προσδιορίζει την αιτία.

9.10 Μεταβατικά κυματικά φαινόμενα

Αφού μελετήσουν και εξετάσουν για λίγο τα κύματα και τους κυματικούς παλμούς, οι μαθητές διευρύνουν την αντίληψή τους, αν τους κατευθύνουμε να επανεξετάσουν, με αμιγώς ποιοτικό τρόπο, ποικίλες καθημερινές εμπειρίες τους και φυσικές καταστάσεις που αφορούν προβλήματα τα οποία συνάντησαν σε προηγούμενα μαθήματα. Πολλές από τις καταστάσεις αυτές περιλαμβάνουν μεταβατικά κυματικά φαινόμενα. Ελάχιστοι μαθητές, όμως, τα διακρίνουν αυθόρμητα: είναι απαραίτητο να φανταστούν πολλά από αυτά, χωρίς να τα παρατηρήσουν άμεσα. Αρχίζουν, ωστόσο, να κατανοούν όντως τη σύνδεση μεταξύ των φαινομένων, αν τους κατευθύνουμε να τα εξετάσουν και να σχηματίσουν σαφή εικόνα τους. Αυτό με τη σειρά του τους ωθεί σε πιο προσεκτική προσέγγιση των φαινομένων, η οποία υπερβαίνει την άμεση απτή εμπειρία.

Ιδού ορισμένα παραδείγματα:

Αποθέτουμε μια μακριά ράβδο πάνω στο τραπέζι και, σπρώχνοντας το ένα άκρο της, μετακινούμε ένα κουτί που βρίσκεται στο άλλο άκρο της. Τι συμβαίνει την πρώτη πρώτη στιγμή της διαδικασίας; Η δύναμη που ασκούμε στο άκρο της ράβδου ισούται με τη δύναμη που ασκεί η ράβδος στο κουτί; Η μετατόπιση του κουτιού αρχίζει την ίδια στιγμή που σπρώχνουμε το άκρο της ράβδου; Τι συμβαίνει στη ράβδο και στο κουτί, πριν σταθεροποιηθεί η κατάσταση;

Αρχικά, κρατάμε ακίνητη μια μηχανή Atwood (ή οποιοδήποτε σύστημα αντικειμένων και νημάτων με το οποίο ασχοληθήκαμε στα πρώτα προβλήματα της μηχανικής). Κατόπιν, την αφήνουμε ελεύθερη να επιταχυνθεί. Τι συμβαίνει από τη στιγμή που την αφήνουμε ελεύθερη ως τη στιγμή που αποκτά σταθερή επιτάχυνση; Στο φως αυτών των παραδειγμάτων, τι νομίζετε ότι συμβαίνει στα σύρματα του ασανσέρ;

Θεωρήστε την αναπήδηση μιας μπάλας στο πάτωμα ή στον τοίχο. Τι συμβαίνει κατά τη διάρκεια της κρούσης σε καθένα από τα αλληλεπιδρώντα αντικείμενα; Τι συμβαίνει όταν δύο μπάλες συγκρούονται μεταξύ τους; Πώς παράγεται ο ήχος που ακούμε κατά τη σύγκρουση;

Τι συμβαίνει όταν σκάει ένα μπαλόνι; Πώς παράγεται η βροντή;

Τι συμβαίνει στη μανιβέλα μιας μηχανής μόλις ασκήσουμε απότομα ροπή στο ένα άκρο της;

Σπρώχνουμε οριζοντίως ένα κιβώτιο και το τσουλάμε πάνω στο πάτωμα, υπερνικώντας τις αντιτιθέμενες δυνάμεις τριβής. Τι συμβαίνει από τη στιγμή που εφαρμόζουμε την ώθηση ώσπου το κιβώτιο να αρχίσει να ολισθαίνει;

Δεν είναι απαραίτητο να παραθέσουμε μακρύ κατάλογο: από τη στιγμή που θα υποδείξουμε στους μαθητές ορισμένες ερωτήσεις, πολλοί αρχίζουν μόνοι τους να επινοούν παρόμοιες. Πολλές, μάλιστα, αποδεικνύονται ενδιαφέρουσες και έξυπνες. Σκοπός μας είναι να διακρίνουν την παρουσία διαμήκων, εγκάρσιων και στροφικών κυμάτων, ουσιαστικά, σε κάθε δυναμική αλληλεπίδραση, ανεξαρτήτως από το ότι δεν την αντιλαμβανόμαστε άμεσα με τις αισθήσεις μας.

9.11 Σχεδιασμός του μετώπου και των ακτίνων ενός κύματος δύο διαστάσεων

Στα περισσότερα εγχειρίδια υπάρχουν γραφικές παραστάσεις διάδοσης, ανάκλασης και περίθλασης κυμάτων δύο διαστάσεων. Διατίθενται, επίσης, άριστες ατέρμονες ταινίες που δείχνουν αυτά τα φαινόμενα σε δεξαμενές ελαφρών κυματισμών. Εντούτοις, σπάνια οι μαθητές συναντούν, έστω, λίγα απ' αυτά σε προβλήματα για το σπίτι τα οποία τους κατευθύνουν να σχεδιάσουν μόνοι τους μέτωπα κυμάτων. Αποτέλεσμα: πολλοί δεν μπορούν να σχεδιάσουν σωστά παρόμοια διαγράμματα, ιδιαίτερα αν ο προσανατολισμός της διαχωριστικής επιφάνειας διαφέρει από εκείνον που παρουσιάζεται στο εγχειρίδιο.

Δεν πρόκειται για δύσκολο εννοιολογικό πρόβλημα: οι περισσότεροι μαθητές συλλαμβάνουν τις ιδέες αρκετά γρήγορα. Κατά τη διδασκαλία παραγνωρίζουμε, ωστόσο, ότι η εξάσκηση είναι απαραίτητη, ανεξαρτήτως της σαφήνειας των εικόνων και της μελέτης του εγχειριδίου. Δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε αριθμητικές τιμές· αμιγώς ποιοτικές ερωτήσεις αποτελούν το καλύτερο μέσο.

Οι ερωτήσεις πρέπει να περιλαμβάνουν όψεις του ζητήματος, όπως οι επόμενες: αν δοθεί η διαχωριστική επιφάνεια (στην οποία η ταχύτητα διάδοσης αλλάζει) και η προσπίπτουσα ακτίνα, να σχεδιαστούν η ανακλώμενη ακτίνα και η ακτίνα που διεισδύει· κατόπιν, στην ίδια περίπτωση, να σχεδιαστεί το αντίστοιχο μέτωπο του κύματος αντί οι ακτίνες. Στη σχεδίαση του μετώπου του κύματος, είναι απαραίτητο να σημειώνεται η μεταβολή του μήκους κύματος. Στη συνέχεια, πρέπει να κατευθύνουμε τους μαθητές

να επινοήσουν δικές τους παραλλαγές σε τούτο το θέμα: μεταβάλλοντας τον προσανατολισμό της διαχωριστικής επιφάνειας στη σελίδα, αντιστρέφοντας τη μεταβολή της ταχύτητας (αν στην αρχική ερώτηση το προσπίπτον κύμα κινείται στο «γρηγορότερο» μέσο, στην επόμενη ερώτηση κινείται στο «βραδύτερο» μέσο), αρχίζοντας με τη σχεδίαση του μετώπου του κύματος και προχωρώντας στη σχεδίαση του αντίστοιχου διαγράμματος των ακτίνων, αρχίζοντας με δεδομένη την ακτίνα ή το μέτωπο του κύματος που διεισδύει (ή ανακλάται) και προχωρώντας στη σχεδίαση του υπόλοιπου διαγράμματος. (Παρατηρήστε ότι οι μαθητές είναι απαραίτητο να ακολουθήσουν την πορεία συλλογισμού προς κάθε δυνατή κατεύθυνση.)

Για πρώτη φορά συναντάμε αυτές τις καταστάσεις σε ελαφρούς κυματισμούς. Στην περίπτωση του φωτός, είναι απαραίτητο να επαναλάβουμε τη σχεδίαση. Όπως επανειλημμένα έχουμε επισημάνει, μόνο αν έχουμε την ευκαιρία σε μεταλλαγμένο πλαίσιο να χρησιμοποιήσουμε μια ιδέα, αφού έχει περάσει κάποιος χρόνος, την κατανοούμε και τη συγκρατούμε στη μνήμη μας.

Πρέπει να ζητάμε από τους μαθητές να σχεδιάζουν παρόμοια διαγράμματα τόσο σε τεστ όσο και στο πλαίσιο της εργασίας για το σπίτι. Η φαινομενολογία είναι απαραίτητη. Επειδή οι συγκεκριμένες ιδέες αφομοιώνονται άμεσα με λίγη εξάσκηση, οι μαθητές που έχουν εκτελέσει την εργασία για το σπίτι τα καταφέρνουν, επίσης, στις ερωτήσεις των τεστ. Έτσι, λοιπόν, αποκτούν αυτοπεποίθηση, κάτι που δεν συμβαίνει συχνά με τα τεστ που τους δίνουμε.

9.12 Περιοδικοί και ημιτονοειδείς κυματικοί συρμοί

Στα περισσότερα εγχειρίδια υπάρχει επαρκώς λογική ανάπτυξη της βασικής σχέσης:

$$V = \nu \lambda \quad (9.12.1)$$

η οποία συνδέει μεταξύ τους την ταχύτητα διάδοσης, τη συχνότητα και το μήκος κύματος ενός περιοδικού κυματικού συρμού. Πολλοί, μαθητές ωστόσο, τη χρησιμοποιούν «τυφλά», ως τύπο που τον έχουν απομνημονεύσει, χωρίς να κατανοούν την προέλευσή της και τον τρόπο με τον οποίο δικαιολογείται. Το ότι μπορούν να κάνουν αντικαταστάσεις στον τύπο και ότι παίρνουν σωστά αριθμητικά αποτελέσματα δεν αποτελεί ένδειξη ότι κατανοούν το περιεχόμενό του.

Στο συγκεκριμένο θέμα το μαθησιακό πρόβλημα είναι κρισιμότερο: πολλοί μαθητές διστάζουν να επιστρέψουν, με δική τους πρωτοβουλία, στον λειτουργικό ορισμό που βασίζεται σε κάποιο τρόπο συλλογισμού, να αρ-

θρώσουν τον συγκεκριμένο ορισμό και να τον χρησιμοποιήσουν για να λάβουν ορισμένο αποτέλεσμα ή να εξαγάγουν ορισμένο συμπέρασμα. Ξεχνούν την αντίστοιχη παρουσίαση των εγχειριδίων και αποφεύγουν την ακολουθία των ορισμών και των συλλογισμών, εκτός κι αν τους αναγκάσουμε ρητά να τις αναζητήσουν.

Επειδή στο παρόν στάδιο οι ορισμοί είναι απλοί και οι συλλογισμοί αμιγώς αριθμητικοί, δίνεται στους μαθητές η ευκαιρία για εξάσκηση. Μειώνεται έτσι η διστακτικότητά τους απέναντι στον συγκεκριμένο τρόπο αντιμετώπισης των προβλημάτων. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να τους κατευθύνουμε: 1) να διατυπώσουν με δικά τους λόγια τους ορισμούς των μεγεθών που παριστάνονται με τα σύμβολα: V , v και λ . 2) να εξηγήσουν με δικά τους λόγια και σχετικά διαγράμματα πώς οι ορισμοί οδηγούν στις σχέσεις $V = v\lambda$ ή $v = V/\lambda$ ή $\lambda = V/v$.

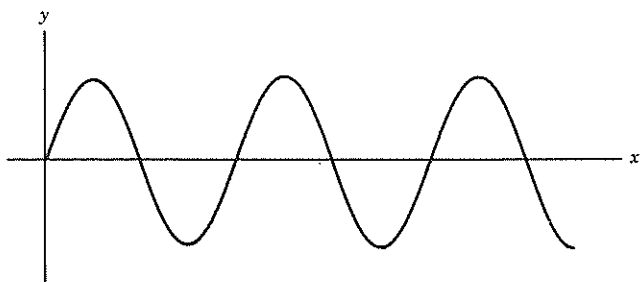
Η παρουσίαση των ημιτονοειδών κυματικών συρμών αποτελεί όχι μόνο ευκαιρία διερεύνησης των ποικίλων μορφών της Εξ. 9.12.1, αλλά, επίσης, ευκαιρία για να επανέλθουμε στη μέτρηση με ακτίνα και στο λόγο που οδήγησε στην επινόηση του συγκεκριμένου τρόπου μέτρησης (βλ. εδάφια 1.13 και 4.6). Οι περισσότεροι μαθητές ακόμα κι εκείνοι που παρακολουθούν τμήματα για φυσικούς και μηχανολόγους, δυσκολεύονται ιδιαίτερα να συλλάβουν την αναγκαιότητα ύπαρξης του παράγοντα $2\pi/\lambda$ στη σχέση:

$$y = A\eta\mu\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x \pm Vt)\right] \quad (9.12.2)$$

Πρέπει, λοιπόν, να κατευθύνουμε τους μαθητές να δικαιολογήσουν με δικά τους λόγια την αναγκαιότητά του.

Τέλος, τα επόμενα παραδείγματα αποτελούν είδος ερωτήσεων για εργασία στο σπίτι και για τεστ, που απουσιάζει από τα περισσότερα εγχειρίδια (παρατηρήστε ότι ζητείται, απλώς, *ποιοτική* σχεδίαση — όχι αριθμητικό διάγραμμα):

Αν δοθεί η «φωτογραφία» (δηλαδή, η μορφή σε ορισμένη χρονική στιγμή) ενός ημιτονοειδούς κυματικού συρμού, που φαίνεται στο Σχ. 9.12.1, σχεδιάστε τη «φωτογραφία» που προκύπτει αν:



Σχήμα 9.12.1 Γραφική παράσταση του y ως προς το x ημιτονοειδούς κυματικού συρμού σε δεδομένη στιγμή.

α) το πλάτος και η συχνότητα διπλασιαστούν, ενώ η ταχύτητα παραμένει αμετάβλητη·

β) η συχνότητα και η ταχύτητα διπλασιαστούν, ενώ το πλάτος παραμένει αμετάβλητο·

γ) το μήκος κύματος και το πλάτος μειωθούν κατά έναν παράγοντα τρία, ενώ η ταχύτητα διπλασιάζεται·

δ) κ.ο.κ.

Στο παρόν στάδιο, είναι δυνατό να ζητήσουμε από τους μαθητές να επινοήσουν μόνοι τους παρόμοια σειρά ερωτήσεων στις οποίες εκκινούμε από τη γραφική παράσταση του y ως προς το t σε ορισμένο σημείο του χώρου, αντί από τη γραφική παράσταση του Σχ. 9.12.1. Σπάνια, ωστόσο, ζητάμε από τους μαθητές να επινοήσουν μόνοι τους ερωτήσεις και προβλήματα. Επειδή, λοιπόν, τους λείπει η εξάσκηση, οι περισσότεροι είναι εξαιρετικά απρόθυμοι να το κάνουν. Έτσι, απλές περιπτώσεις αυτού του είδους συνιστούν πολύτιμη ευκαιρία εξάσκησης που βοηθά να μειωθεί η αντίσταση.

Άλλη πλευρά του θέματος που δυσκολεύει πολλούς μαθητές, είναι ότι, κατά τη διέισδυση και ανάκλαση των ημιτονοειδών κυμάτων σε μια επιφάνεια διαχωρισμού, μεταβάλλεται η *συχνότητα*, ενώ το μήκος κύματος διατηρείται σταθερό. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να βοηθήσουμε τους μαθητές να αντιληφθούν τον τρόπο με τον οποίο οι κορυφές και οι κοιλότητες φτάνουν στη συνοριακή επιφάνεια και ποια είναι η επίδραση της επιφάνειας στη διαταραχή που τη διαπερνά. Οι συγκεκριμένες ασκήσεις συζεύγνυνται εύκολα μ' εκείνες που περιγράψαμε προηγουμένως και μ' εκείνες που προτείνουμε στο εδάφιο 9.11.

9.13 Η μορφή της συμβολής κυμάτων που προέρχονται από δύο πηγές

Οι μαθητές δεν κατανοούν τα χαρακτηριστικά της συμβολής κυμάτων που προέρχονται από δύο πηγές, αν, απλώς, παρακολουθούν παθητικά τις σχετικές επιδείξεις, χωρίς να εκτελούν αριθμητικές ασκήσεις με τύπους που συνδέουν το μήκος κύματος, την απόσταση μεταξύ των πηγών και τη γωνία μεταξύ των θέσεων της ενισχυτικής ή της καταστροφικής συμβολής και του κύριου άξονα. Δεν ισχυρίζομαι ότι οι επιδείξεις και τα αριθμητικά προβλήματα είναι περιττά: είναι ουσιώδη στη μάθηση και την κατανόηση. Άλλες προσεγγίσεις, ωστόσο, είναι εξίσου απαραίτητες. Η κατανόηση επάγεται από τη συνολική «ανάμειξη».

Πρόσθετα στοιχεία, τα οποία, αν και βοηθούν, σπάνια περιλαμβάνονται στις ασκήσεις που υπάρχουν στα εγχειρίδια, είναι οι περιφραστικοί ποιοτικοί συλλογισμοί. Λόγου χάρη, είναι χρήσιμο οι μαθητές, παρατηρώντας τη μορφή των κυματισμών σε μια πραγματική δεξαμενή κυματισμών (ή μια ευδιάκριτη φωτογραφία τους), να αντιμετωπίσουν την ερώτηση: Τι συμ-

βαίνει σε τούτο το ιδιαίτερο σημείο του στιγμιότυπου; Είναι απαραίτητο να αποφασίσουν, παρατηρώντας το στιγμιότυπο, αν το σημείο, που έχει επιλεγεί τυχαία, βρίσκεται σε δεσμό ή κοιλία ή μεταξύ αυτών και να διακρίνουν την τάξη των μεγίστων και των ελαχίστων. Αν και πρόκειται για εξαιρετικά απλή ερώτηση, δεν είναι, ωστόσο, τετριμμένη: αρχικά, πολλοί μαθητές δυσκολεύονται, επειδή ουδέποτε τους καθοδήγησαν να εξετάσουν τα στιγμιότυπα μ' αυτόν τον τρόπο. Η αντίστροφη ερώτηση είναι εξίσου σημαντική: Δείξτε ένα σημείο που βρίσκεται μεταξύ ενός σημείου ενισχυτικής συμβολής δεύτερης τάξης και ενός σημείου καταστροφικής συμβολής δεύτερης τάξης. Παρόμοιες ερωτήσεις είναι χρήσιμες και αποτελεσματικές· επιπλέον, βαθμολογούνται εύκολα σε τεστ (σήμερα μάλιστα είναι εύκολο να αναπαραχθούν εικόνες αυτού του είδους).

Σε επόμενο στάδιο, οι μαθητές είναι απαραίτητο να συνδέσουν άμεσα τα χαρακτηριστικά των κυματισμών (συνήθως, εκείνα που συναντούν για πρώτη φορά) με ανάλογα χαρακτηριστικά ακουστικών και οπτικών κυμάτων. Τα εγχειρίδια έχουν την τάση να θεωρούν ότι η σύνδεση είναι προφανής. Αυτό, ωστόσο, δεν συμβαίνει σε πολλούς μαθητές. Είναι σημαντικό, λοιπόν, να τους οδηγήσουμε να διατυπώσουν με σαφήνεια τις ομοιότητες και τις διαφορές. Λόγου χάρη, καθώς ένας μαθητής παρατηρεί τα χαρακτηριστικά των κυματισμών, τον ρωτάμε τι πρέπει να κάνει για να διακρίνει αντίστοιχα χαρακτηριστικά σε ακουστικά κύματα: Πού πρέπει να πάει; Τι θα ακούσει σε θέσεις που αντιστοιχούν στα τάδε σημεία της μορφής του κυματισμού; Πώς θα απεικονίσει τις θέσεις της ενισχυτικής και της καταστροφικής συμβολής;

Παρόμοια ερωτήματα είναι δυνατό να τεθούν για τα χαρακτηριστικά των φωτεινών κυμάτων. Πολλοί μαθητές δεν κατορθώνουν να συνδέσουν τα χαρακτηριστικά των κυμάτων που δημιουργούνται στη δεξαμενή κυματισμών (τα οποία πάντοτε παρατηρούν από πάνω) με τις φωτεινές και σκοτεινές περιοχές που δημιουργούνται από δύο σχισμές και εμφανίζονται σε μια οθόνη. Πρέπει να τους υποδείξουμε πού πρέπει να σταθούν και τι να παρατηρήσουν στην περίπτωση των φωτεινών κυμάτων. Στην περίπτωση αυτή τα χαρακτηριστικά της συμβολής δεν είναι ορατά αν τα παρατηρήσουμε από πάνω.

Τα χαρακτηριστικά της συμβολής των φωτεινών κυμάτων είναι δυνατό να συνδεθούν με τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά των κυματισμών στη δεξαμενή. Σήμερα, παρουσιάζουμε, εύκολα πια (χρησιμοποιώντας λέιζερ) την επίδραση της διπλής σχισμής σε μια φωτεινή δέσμη. Είναι, επίσης, εύκολο να παρουσιάσουμε σε δύο διαστάσεις όλα τα χαρακτηριστικά της ενισχυτικής και της καταστροφικής συμβολής, σκορπίζοντας σκόνη κιμωλίας μεταξύ των σχισμών και της οθόνης. Έτσι, μπορούμε να παρατηρήσουμε τα χαρακτηριστικά αυτά και από το πλάι. [Ορισμένοι καθηγητές εκτελούν την επίδειξη χρησιμοποιώντας φράγμα. Αφήνουν δε να εννοηθεί ότι η μορφή

του αποτελέσματος αντιστοιχεί στα χαρακτηριστικά των κυματισμών που προκαλούν οι δύο πηγές στη δεξαμενή κυματισμών. Στις επιδείξεις με λείζερ, το αποτέλεσμα από διπλή σχισμή και από φράγμα είναι, όντως, από ποιοτική άποψη, ταυτόσημο. Όμως, αυτό το γεγονός είναι, δυστυχώς, ιδιαίτερα παραπλανητικό. Η επίδραση του φράγματος διαφέρει σημαντικά από τη συμβολή που προκαλεί η διπλή σχισμή. Στη δεξαμενή, επίσης, η μορφή των κυματισμών που προέρχονται από το φράγμα δεν μοιάζει καθόλου με τους κυματισμούς που προέρχονται από τη διπλή σχισμή (βλ. την ανάλυση του επόμενου εδαφίου.)

9.14 Σύγκριση των μορφών συμβολής που δημιουργούν μια διπλή σχισμή και ένα φράγμα

Με τη βοήθεια της μαθηματικής ανάλυσης, αποδεικνύεται ότι, στην περίπτωση του φράγματος, οι περιοχές ενισχυτικής συμβολής έχουν σαφέστατα όρια. Δικαιολογημένα, λοιπόν, χρησιμοποιούμε φασματογράφο φράγματος αντί διπλής σχισμής. Πολλοί μαθητές, ωστόσο, αν επικαλεστούμε τη μαθηματική ανάλυση, δεν κατορθώνουν να συλλάβουν πλήρως την ισχύ της. Σε πολλά τμήματα η μαθηματική ανάλυση είναι ακατάλληλη, επειδή οι μαθητές δεν είναι έτοιμοι να τη δεχτούν. Είναι σημαντικό, λοιπόν, να προσπαθήσουμε να παρουσιάσουμε με φαινομενολογικό τρόπο τη διαφορά μεταξύ των δύο καταστάσεων. Δυστυχώς, με τις σύγχρονες επιδείξεις των λείζερ υπάρχει η τάση να αποκρουφθεί η φυσική διαφορά· ενδείκνυται, λοιπόν, να καταφύγουμε σε παλαιότερες προσεγγίσεις.

Σε παλαιότερα εγχειρίδια δίνονται ασκήσεις στους μαθητές που, συνήθως, περιλαμβάνουν τη σχεδίαση των κυματιδίων του Huygens, τα οποία εξέρχονται από κάθε άνοιγμα, όταν ένα επίπεδο κύμα προσπίπτει σε κάποιο φράγμα. Επίσης, περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των μετώπων του κύματος τα οποία ξανασυνθέτουν την εξερχόμενη δέσμη. Οι εν λόγω ασκήσεις ήταν πολύτιμες· εξαίρεση αποτελεί το ότι σπάνια τα εγχειρίδια αποσαφήνιζαν τη διαφορά μεταξύ των χαρακτηριστικών που προκύπτουν από την επικάλυψη των κύκλων στην περίπτωση των δύο πηγών και των μετώπων των επίπεδων κυμάτων που διαφεύγουν προς απολύτως συγκεκριμένες κατευθύνσεις μετά τη διεύδυση (ή την ανάκλαση) του αρχικού κύματος σε κάποιο φράγμα. Ελάχιστα εγχειρίδια καθοδηγούν τους μαθητές να σχεδιάσουν και να ερμηνεύσουν τέτοιες καταστάσεις. Αποτελέσματα: το φυσικό περιεχόμενο της επίδρασης του φράγματος διαφεύγει από τους μαθητές. Πρόκειται, βέβαια, για δυστύχημα, επειδή η έννοια που υπεισέρχεται είναι λεπτή και σημαντική.

Είναι χρήσιμο, λοιπόν, να κατευθύνουμε τους μαθητές να σχεδιάσουν τα χαρακτηριστικά με κανόνα και διαβήτη και να περιγράψουν με δικά

τους λόγια τις ουσιώδεις διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών της διπλής πηγής και του φράγματος. Επίσης, είναι χρήσιμο να δημιουργήσουμε στη δεξαμενή κυματισμούς που προέρχονται από φράγμα. Αν και η συγκεκριμένη επίδειξη πραγματοποιείται δύσκολα, είναι, ωστόσο, πραγματοποιήσιμη: χρειαζόμαστε χαμηλή συχνότητα (μήκος κύματος περίπου 2cm) και ένα υδατοφράκτη με έξι ή οκτώ ανοίγματα παρόμοιου πλάτους.

Είναι απαραίτητο να προετοιμαστούμε για ό,τι περιμένουμε να παρατηρήσουμε στη δεξαμενή κυματισμών. Και τούτο, επειδή τα χαρακτηριστικά των κυματισμών από το φράγμα είναι απολύτως διαφορετικά από τα χαρακτηριστικά των κυματισμών από τη διπλή σχισμή. Όταν η μορφή των κυματισμών που προέρχονται από το φράγμα σταθεροποιείται, παρατηρούμε ένα δίκτυο διασταυρούμενων ευθύγραμμων κυμάτων που δεν μοιάζουν καθόλου με τις «πτέρυγες του ανεμιστήρα» που προκαλούν οι δύο πηγές. Αν με το βλέμμα μας ακολουθήσουμε τα ευθύγραμμα κύματα του φράγματος, διακρίνουμε τρία σύνολα ευθύγραμμων κυμάτων (είναι δύσκολο να προχωρήσουμε πέρα από την πρώτη τάξη): ένα σύνολο διαδίδεται προς την αρχική διεύθυνση κατά μήκος του κύριου άξονα και δύο σύνολα διαφεύγουν προς κάθε πλευρά του κύριου άξονα προς την κατεύθυνση της ενισχυτικής συμβολής πρώτης τάξης. Το ότι η ενισχυτική συμβολή δημιουργεί ευθύγραμμα κύματα (και όχι καμπυλόγραμμα) κινούμενα προς απολύτως συγκεκριμένη κατεύθυνση αποτελεί ποιοτική ένδειξη της σαφήνειας των ορίων των κυματισμών που προέρχονται από το φράγμα. Από οποιαδήποτε κατεύθυνση ελάχιστα διαφορετική από την κατεύθυνση διάδοσης των ευθύγραμμων κυμάτων δεν λαμβάνουμε κανένα σήμα. Με συνηθισμένο φως, για να σχηματιστεί το είδωλο στην οθόνη, είναι, βεβαίως, απαραίτητο να εστιάσουμε με ένα φακό τα επίπεδα κύματα που εξέρχονται από το φράγμα. (Όταν κοιτάμε μέσα από το πλέγμα, η εστίαση γίνεται από το φακό του ματιού μας.)

Ιδού, λοιπόν, ορισμένες πλευρές του θέματος που παραγνωρίζονται σε αρκετές σύγχρονες επιδείξεις με λείζερ. Αυτό δεν το λέμε για να κατακρίνουμε τη χρήση των λείζερ σε οπτικές επιδείξεις: με τη συγκεκριμένη επινόηση, σημαντικές επιδείξεις έγιναν περισσότερο ορατές και ευκολότερα εκτελέσιμες. Είναι εξαιρετικά πολύτιμη επινόηση· απλώς, είναι απαραίτητο να είμαστε προσεκτικοί μ' εκείνα τα στοιχεία που είναι ενδεχόμενο να αποκρυφθούν ή να παρερμηνευθούν.

9.15 Η ερμηνεία του σκοτεινού κέντρου των δακτυλίων του Νεύτωνα από τον Young

Η μελέτη της τροποποίησης του διάσημου πειράματος των δακτυλίων του Νεύτωνα από τον Thomas Young αποτελεί παράδειγμα του πώς με την

παρουσίαση ιστορικών γεγονότων εμπλουτίζεται η διδασκαλία της φυσικής. Η εν λόγω τροποποίηση προσέδωσε ισχυρό έρεισμα στο πρότυπο της κυματικής φύσης του φωτός, την εποχή της σφοδρής διαμάχης μεταξύ του κυματικού και του σωματιδιακού προτύπου. Ταυτόχρονα, η τροποποίηση αποτελεί για τους μαθητές παράδειγμα «κρίσιμου» πειράματος.

Στην ερμηνεία, με τη βοήθεια του κυματικού προτύπου, των δακτυλίων του Νεύτωνα υπήρχε ένα ενοχλητικό ζήτημα: η κεντρική περιοχή της εικόνας που δημιουργείται λόγω της ανάκλασης του φωτός από το λεπτό στρώμα αέρα που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο γυαλιών είναι *σκοτεινή*. Το πάχος του στρώματος αέρα είναι, ουσιαστικά, μηδενικό· συνεπώς, περιμένουμε ότι, αν στην κεντρική περιοχή η διαφορά φάσης μεταξύ του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος είναι μηδενική, τα δύο κύματα θα συμβάλλουν ενισχυτικά και όχι καταστροφικά. Εκ των υστέρων είναι εύκολο να ισχυριστούμε ότι στη μια επιφάνεια διαχωρισμού η φάση αντιστρέφεται· εκείνη την εποχή, ωστόσο, κάτι τέτοιο ήταν γρίφος. Για μαθητές που διδάσκονται φυσική για πρώτη φορά, το πρόβλημα είναι, λοιπόν, δύσκολο. Πρώτον, χρειάζονται χρόνο και σκέψη, για να αρχίσουν να αντιλαμβάνονται ότι υπάρχει όντως ένα μη τετριμμένο πρόβλημα που ζητά απάντηση. Επιπλέον, έχουν ακόμα ακαθόριστη εντύπωση για το τι είναι αυτό που «πάλλεται» στην περίπτωση του φωτός. Επειδή, λοιπόν, η περίπτωση αυτή συνδέεται κατ' αναλογία και όχι από απτή εμπειρία με παρόμοιες καταστάσεις της μηχανικής, η πορεία συλλογισμών είναι πολύπλοκη. Για να επιτευχθεί γνήσια κατανόηση, χρειάζεται σκέψη και συζήτηση.

Ο Young, ο οποίος επίσης δεν γνώριζε τι είναι αυτό που «πάλλεται», ακολούθησε την αναλογία της μηχανικής συμπεριφοράς. Θεώρησε ότι το να παραμένει η φάση των κυματισμών (ανεξαρτήτως από τη φύση τους) σταθερή ή το να αντιστρέφεται, εξαρτάται από το αν οι κυματισμοί ανακλώνται από «λιγότερο ή περισσότερο πυκνό» διαχωριστικό μέσο (όπως συμβαίνει με τα κύματα σε χορδές τα οποία ανακλώνται σε ελεύθερα ή σταθερά άκρα).

Για να ελέγξει την υπόθεση, ο Young χρησιμοποίησε φακό από γυαλί crown με δείκτη διάθλασης περίπου 1,5 και πλάκα από γυαλί flint με δείκτη διάθλασης περίπου 1,7. Μεταξύ των γυαλιών, τοποθέτησε, αντί για αέρα, λεπτό στρώμα λαδιού σασσάφρας*, επειδή έχει δείκτη διάθλασης μεταξύ των δεικτών των δύο γυαλιών. Προέβλεψε, λοιπόν, ότι αν το κυματικό πρότυπο είναι σωστό, ο δακτύλιος ανάκλασης αυτή τη φορά θα είχε φωτεινό και όχι σκοτεινό κέντρο. Σκέφτηκε ότι, στην περίπτωση αυτή, η φάση και των δύο ανακλώμενων κυμάτων διατηρείται η ίδια ή και των δύο αντι-

* Αιθέριο έλαιο που λαμβάνεται με απόσταξη από τη ρίζα του φυτού *Sassafras Albidum* (Nuttall) Nees· έχει δείκτη διάθλασης 1,525-1,55. (Σ.τ.μ.)

στρέφεται (ως προς τη φάση του προσπίπτοντος κύματος). Και τούτο, επειδή και οι δύο ανακλάσεις συμβαίνουν σε διαχωριστικές επιφάνειες όπου το ανακλών μέσο ήταν, από οπτική άποψη, περισσότερο πυκνό από το μέσο στο οποίο κινούνταν το προσπίπτον κύμα. Ο Young έδειξε ότι, σ' αυτές τις συνθήκες, το κέντρο του δακτυλίου είναι όντως φωτεινό, και αυτό ενίσχυσε σημαντικά το κυματικό πρότυπο.

Με το εν λόγω ιστορικό γεγονός, δίνεται η ευκαιρία στους μαθητές να εκτελέσουν χρήσιμους ποιοτικούς φυσικούς συλλογισμούς σε πλούσιο πλαίσιο που συνδέεται με την ασαφή ακόμα αντίληψή τους για την ανάκλαση των μηχανικών κυμάτων. Ταυτόχρονα, εμπλουτίζεται η αντίληψή τους για τη φύση του φωτός. Το γεγονός αυτό αποτελεί, επίσης, άριστο παράδειγμα σχεδίασης ενός πειράματος για τον έλεγχο κάποιας υπόθεσης. Αν και ορισμένοι συγγραφείς αρνούνται ότι υπάρχουν όντως «κρίσιμα» πειράματα, θεωρώ ότι το εν λόγω πείραμα ικανοποιεί σε μεγάλο βαθμό τα κλασικά κριτήρια ενός «κρίσιμου» πειράματος.

9.16 Σύγκριση μεταξύ κατοπτρικής και διάχυτης ανάκλασης

Σε ορισμένα εγχειρίδια, υπάρχουν λεπτομερή σχήματα και οι συγγραφείς δίνουν έμφαση στη διαφορά μεταξύ της κατοπτρικής και της διάχυτης ανάκλασης. Οι περισσότεροι, ωστόσο, αρκετά γρήγορα, αποσιωπούν απερίσκεπτα τις έννοιες αυτές και το φυσικό αποτέλεσμα τους. Επειδή θεωρούν, προφανώς, ότι αυτές οι ιδέες είναι πολύ απλές, δεν τους αφιερώνουν χρόνο και χώρο. Επίσης, πολλοί μαθητές, ακόμα κι αν δεν χρησιμοποιούν εγχειρίδια με συντομεύσεις των εννοιών, δεν αφομοιώνουν τελικά τη σημασία τους. Αυτό οφείλεται, ενδεχομένως, στο ότι, ακόμα κι όταν περιγράφονται τα φαινόμενα, σπάνια υπάρχουν σχετικές ποιοτικές ερωτήσεις στη δουλειά για το σπίτι ή στα τεστ. Τα προβλήματα που δίνονται περιορίζονται, συνήθως, σε αριθμητικό και γεωμετρικό προσδιορισμό της θέσης του ειδώλου το οποίο παράγουν καθρέφτες και φακοί: σπάνια οι μαθητές παρακινούνται να αντιληφθούν συνολικά τα φυσικά φαινόμενα και ιδιαίτερα αυτά που συνδέονται με το φως που ακτινοβολούν ή ανακλούν τα αντικείμενα.

Σε αυτό το πλαίσιο, ίσως το μεγαλύτερο κενό που εμφανίζεται είναι η αδυναμία των μαθητών να συνειδητοποιήσουν σαφώς ότι παρατηρούμε *κάθε* μη αυτόφωτο αντικείμενο μέσω της διάχυτης ανάκλασης του φυσικού φωτός, και ότι *κάθε* σημείο του αντικειμένου δρα σαν σημειακή πηγή, ανακλώντας φως προς *κάθε* κατεύθυνση. Αποτέλεσμα: ελάχιστοι αντιλαμβάνονται οποιαδήποτε σύνδεση μεταξύ του καθρέφτη και ενός συνηθισμένου αντικειμένου.

Ομοίως, πολλοί μαθητές δεν κατορθώνουν να αντιληφθούν ότι *κάθε*

σημείο μιας φωτεινής πηγής ακτινοβολεί φως, επίσης προς *κάθε* κατεύθυνση. Πολλά σχήματα των εγχειριδίων (ιδιαίτερα αυτών του προγυμνασιακού επιπέδου) είναι λανθασμένα ή, στην καλύτερη περίπτωση, παραπλανητικά: σχεδόν πάντα, παριστάνουν μόνον ορισμένες ακτίνες στην επιθυμητή κατεύθυνση, χωρίς να αναφέρουν ότι οι συγκεκριμένες ακτίνες επιλέχθηκαν από μια δέσμη άπειρου πλήθους ακτίνων. Σπάνια, λοιπόν, αν όχι ποτέ, ζητάμε από τους μαθητές να σχεδιάσουν διαγράμματα στα οποία μόνοι τους θα παραστήσουν το πλήθος των ακτίνων που αναδύονται από κάθε σημείο ενός αντικειμένου και, κατόπιν, να επιλέξουν την ακτίνα που θέλουν, για να παρακολουθήσουν την πορεία της. Έτσι δεν αφομοιώνουν βαθιά την αντίστοιχη ιδέα.

Αποτέλεσμα αυτής της ευρέως διαδεδομένης παράλειψης είναι ότι λίγοι μαθητές σχεδιάζουν διαγράμματα ακτίνων που να περιλαμβάνουν το σχηματισμό ειδώλου μέσω κατόπτρων και φακών, αντιλαμβανόμενοι σαφώς ότι κάθε σημείο του αντικειμένου είναι ανεξάρτητη σημειακή πηγή κύματος σφαιρικού μετώπου και δέσμης άπειρου αριθμού ακτίνων. Επιπλέον, αυτή η παράλειψη είναι δυνατό να θεωρηθεί ως η αιτία, ή τουλάχιστον μια από τις βασικότερες αιτίες, για πολλές από τις παρανοήσεις που αφορούν τα είδωλα και το σχηματισμό τους.

Σε αρχικό στάδιο μελέτης των διαγραμμάτων των ακτίνων, ενδείκνυται να κατευθύνουμε τους μαθητές να σχεδιάσουν τη δέσμη των ακτίνων που αποκλίνουν σφαιρικά από ορισμένο σημείο του αντικειμένου· κατόπιν, να επιλέξουν την ειδική ακτίνα της οποίας θα παρακολουθήσουν άμεσα την πορεία μέσα στο σύστημα. Μόνο αφού η ιδέα αποκρυσταλλωθεί, μπορούμε να καταργήσουμε το «δεμάτι» των περιττών ακτίνων.

9.17 Είδωλα και σχηματισμός ειδώλων σε επίπεδα κάτοπτρα

Οι Goldberg και McDermott (1986) μελέτησαν τις παρανοήσεις των μαθητών σχετικά με τα είδωλα και το σχηματισμό τους από επίπεδα κάτοπτρα. Έδειξαν ότι ορισμένες απ' αυτές είναι ευρέως διαδεδομένες. Οι παρανοήσεις μάλιστα ανθίστανται αν ο καθηγητής περιορίζει το μάθημα στα ποσοτικά χαρακτηριστικά των φαινομένων και δεν κατευθύνει τους μαθητές να ερμηνεύσουν ποιοτικά τις παρατηρήσεις και τα φαινόμενα.

Οι Goldberg και McDermott περιγράφουν τη συμπεριφορά μαθητών που τους υπέβαλαν σε τέσσερις δοκιμασίες: στο πλαίσιο της 1ης Δοκιμασίας, τους ζήτησαν να θέσουν το δάκτυλό τους στη θέση του ειδώλου μιας κατακόρυφης ράβδου το οποίο παρετηρούσαν σε επίπεδο κάτοπτρο. Η πλειονότητα των μαθητών (65% έως 75%) που δεν είχαν ακόμα διδαχθεί το σχετικό μάθημα αντέδρασε σωστά, τοποθετώντας το είδωλο πίσω από το κάτοπτρο· το 20% έως 30% το τοποθέτησε πάνω στο κάτοπτρο. (Η τελευ-

ταία απάντηση χαρακτηρίζει αυτούς που αντιμετωπίζουν την ερώτηση για πρώτη φορά.) Οι περισσότεροι (95%) απ' όσους είχαν διδαχθεί το θέμα τοποθέτησαν το είδωλο πίσω από τον καθρέφτη. Προφανώς, είχαν αφομοιώσει ικανοποιητικά το ζήτημα.

Στο πλαίσιο της 2ης Δοκιμασίας, ζήτησαν από τους μαθητές, κρατώντας το δάκτυλό τους στη θέση του ειδώλου να μελετήσουν το ερώτημα: «Υποθέστε ότι κάθεστε εδώ όπου βρίσκομαι εγώ, που παίρνω τη συνέντευξη (περίπου μισό μέτρο αριστερά σας). Σας ζητώ, λοιπόν, να θέσετε το δάκτυλό σας πάνω από το είδωλο. Θα το θέσετε εκεί όπου βρίσκεται τώρα ή σε διαφορετική θέση;» Περίπου το 45% από τους μαθητές που δεν είχαν ακόμα διδαχθεί το σχετικό μάθημα, απάντησαν σωστά: το είδωλο θα παραμείνει στη θέση του. Η πλειονότητα (περίπου 55%), ωστόσο, απάντησε ότι η θέση του ειδώλου θα μεταβληθεί. Οι περισσότερες λανθασμένες απαντήσεις στηρίζονταν στην υπόθεση ότι το είδωλο βρίσκεται στην οπτική ευθεία που ενώνει τον παρατηρητή με το αντικείμενο (στις εν λόγω συνεντεύξεις το αντικείμενο βρισκόταν τοποθετημένο πλησιέστερα στο κάτοπτρο παρά σε οποιονδήποτε από τους δύο παρατηρητές). Από τους μαθητές που είχαν ήδη παρακολουθήσει το σχετικό μάθημα, το 70% απάντησε σωστά, ενώ το 30% συνέχιζε να υποστηρίζει ότι η θέση του ειδώλου θα μεταβληθεί. Οι περισσότεροι από τους τελευταίους, ωστόσο, άλλαξαν άποψη, μόλις ο ερωτών τους ζήτησε να σχεδιάσουν τις ακτίνες. Όσοι τις σχεδίασαν σωστά, αναθεώρησαν την πρόβλεψή τους.

Στην 3η Δοκιμασία, κατά τη διάρκεια της συνέντευξης, το κάτοπτρο παρέμενε καλυμμένο. Ο μαθητής καθόταν αρκετά πέρα από τη δεξιά ακμή του κατόπτρου· η κατακόρυφη ράβδος ήταν, επίσης, τοποθετημένη πέρα από τη δεξιά ακμή, έτσι ώστε η οπτική ευθεία από το μαθητή προς το αντικείμενο να τέμνει το κάτοπτρο. (Στο μάτι του μαθητή, ωστόσο, δεν έφτανε ανακλώμενο φως από το αντικείμενο.) Ρωτούσαν, λοιπόν, τους μαθητές: «Αν ξεσκεπάσουμε το κάτοπτρο, θα δείτε το είδωλο της ράβδου;» Αφού οι μαθητές απαντούσαν στην ερώτηση αυτή, ο εξεταστής ρωτούσε: «Εγώ θα δω το είδωλο στο κάτοπτρο;» (Ο εξεταστής καθόταν αριστερά από το μαθητή· έτσι, φως από το αντικείμενο ανακλώνταν στο μάτι του). Από τους αρχάριους μαθητές το 70% απάντησε σωστά στις δύο ερωτήσεις: «όχι, ναι»· το 5% απάντησε «ναι, όχι» και το 25% απάντησε «ναι, ναι». Όλοι οι μαθητές που έδωσαν την τελευταία απάντηση χρησιμοποίησαν διαφορετικό συλλογισμό, για να προβλέψουν τι θα παρατηρήσουν οι ίδιοι και τι θα παρατηρήσει ο εξεταστής. Αποφάνθηκαν λανθασμένα ότι θα δουν το είδωλο επειδή βρίσκεται στην οπτική ευθεία προς τη ράβδο. Από την άλλη πλευρά, εφαρμόζοντας σωστά το νόμο της ανάκλασης, συμπέραναν ότι ο ερωτών θα μπορέσει να παρατηρήσει το είδωλο.

Αυτές οι έρευνες δείχνουν ότι, στο πλαίσιο ενός συμβατικού μαθήματος σε μια τάξη με πολλούς μαθητές, οι λανθασμένες απόψεις και ερμηνεί-

ες διατηρούνται ακόμα κι όταν μελετάμε απλές καταστάσεις με επίπεδα κάτοπτρα. Οι Goldberg και McDermott συμπέραναν, επίσης, ότι η διδασκαλία στην οποία τίθενται σαφώς φαινομενολογικές ερωτήσεις (όπως εκείνες που χρησιμοποίησαν στις συνεντεύξεις) είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στη βελτίωση και την ενίσχυση της κατανόησης.

Η προσωπική εμπειρία μου συμφωνεί με τις παρατηρήσεις των Goldberg και McDermott. Παρατήρησα, επίσης, ότι αν εξαιρέσουμε τις βιαστικές απαντήσεις, η δυσκολία οφείλεται εν μέρει στην παραλείψη που επισημάναμε στο εδάφιο 9.16: λίγοι μαθητές, μελετώντας τα ζητήματα που υπεισέρχονται στα φαινόμενα, επικαλούνται άμεσα την ιδέα ότι κάθε σημείο του αντικειμένου στέλνει ακτίνες φωτός προς κάθε κατεύθυνση. Επίσης, ελάχιστοι κατανοούν ότι το είδωλο στο επίπεδο κάτοπτρο δημιουργείται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο από καθεμιά από τις ακτίνες που προέρχονται από το αντικείμενο και προσπίπτουν στο κάτοπτρο. Παρακολουθώντας, λοιπόν, ένα συμβατικό μάθημα για τα επίπεδα κάτοπτρα, δεν αντιλαμβάνονται σαφώς τι σημαίνει «φανταστικό είδωλο». Αυτή η έννοια δυσκολεύει περισσότερο τους μαθητές στο πολυπλοκότερο πλαίσιο των φακών και των καμπύλων κατόπτρων. Αν στην περίπτωση των επίπεδων κατόπτρων δοθεί μεγαλύτερη έμφαση, απ' ό,τι συνήθως, στην έννοια του «φανταστικού ειδώλου», διευκολύνεται σημαντικά η μάθηση σε επόμενο στάδιο. Δεν είναι, ωστόσο, αρκετό να επικαλεστούμε απλώς τον όρο. Είναι απαραίτητο να βοηθήσουμε τους μαθητές να διατυπώσουν με δικά τους λόγια τις ιδέες, αφού κοιτάξουν μέσα σε πραγματικούς καθρέφτες και αφού σχεδιάσουν μόνοι τους διαγράμματα. Πρέπει, επίσης, να τους κατευθύνουμε να σχεδιάσουν όλη τη *δέσμη* των ακτίνων, και όχι απλώς μεμονωμένες ακτίνες.

9.18 *Είδωλα και σχηματισμός ειδώλων σε λεπτούς συγκλίνοντες φακούς*

Οι Goldberg και McDermott (1987) περιγράφουν μια ερευνητική εργασία παρόμοια με του εδαφίου 9.17, η οποία αφορά το πώς οι μαθητές αντιλαμβάνονται το σχηματισμό ειδώλου σε συγκλίνοντα φακό. Στις δοκιμασίες περιλαμβάνονταν ερωτήσεις για φαινόμενα στην οπτική τράπεζα, στην οποία υπήρχαν: 1) ένα «αντικείμενο που ήταν το φωτοβολούν πεταλοειδές σύρμα μιας λάμπας διαφανούς γυάλινου καλύμματος· 2) συγκλίνων φακός (διαμέτρου 7,5 cm και εστιακής απόστασης 17 cm)· 3) ημιδιαφανής οθόνη. Το αντεστραμμένο είδωλο του σύρματος εστιαζόταν στην οθόνη. Ο μαθητής παρατηρούσε την οθόνη από την πλευρά που βρισκόταν απέναντι από το φακό.

Στο πλαίσιο της 1ης Δοκιμασίας οι Goldberg και McDermott διατύπωσαν την ερώτηση: «Αν αφαιρέσουμε το φακό, αφήνοντας το αντικείμενο

και την οθόνη στη θέση τους, αλλάζει τίποτε;» Η πλειονότητα (60%) των αρχάριων μαθητών απάντησε ότι το είδωλο στην οθόνη θα έρθει στην όρθια θέση του. Περίπου 40% έως 45% των προχωρημένων μαθητών (που είχαν παρακολουθήσει ένα συμβατικό μάθημα γεωμετρικής οπτικής) απάντησαν με παρόμοιο τρόπο. Με περαιτέρω έρευνα, οι Goldberg και McDermott ανακάλυψαν ότι η απάντηση στη δοκιμασία αυτή περιπλεκόταν από το ότι το αντικείμενο (δηλαδή, το φωτοβολούν σύρμα) είχε σαφέστατο περίγραμμα: όταν χρησιμοποιήθηκε μια εμφανώς θαμπή πηγή (λάμπα γαλακτόχρουου γυάλινου καλύμματος), λιγότεροι μαθητές απάντησαν λανθασμένα. Τα συνολικά αποτελέσματα δείχνουν, ωστόσο, ότι μεγάλος αριθμός μαθητών, ακόμα και μετά τη διδασκαλία των σχετικών θεμάτων, δεν αντιλαμβάνεται ότι ο φακός είναι απολύτως απαραίτητος για το σχηματισμό ειδώλου. Αν και οι μαθητές γνωρίζουν σαφώς ότι στους τοίχους του δωματίου δεν σχηματίζεται το είδωλο των αντικειμένων, όταν παρατηρούν τα όργανα στην οπτική τράπεζα, δεν επικαλούνται την καθημερινή εμπειρία τους.

Στη 2η Δοκιμασία, ο εξεταστής κρατούσε ένα κομμάτι αδιαφανούς χαρτονιού πάνω από το φακό, χωρίς να τον καλύπτει. Έθεσε, λοιπόν, την ερώτηση: «Υποθέστε ότι, κατεβάζοντας το χαρτόνι, καλύπτω το πάνω μισό τμήμα του φακού, αφήνοντας ακάλυπτο το κάτω μισό· μεταβάλλεται κάτι στην οθόνη;» Το 90% έως 95% των αρχάριων μαθητών προέβλεψε ότι το μισό είδωλο θα εξαφανιστεί· την ίδια πρόβλεψη έκανε και το 55% έως 75% των προχωρημένων μαθητών. Μόνο ελάχιστοι από τους τελευταίους αντελήφθησαν ότι η συνολική εικόνα θα μείνει η ίδια, αλλά θα γίνει απλώς λιγότερο φωτεινή. Με άλλα λόγια, μόνο μια μειονότητα, ακόμα και μετά τη διδασκαλία του συγκεκριμένου θέματος, αντιλαμβάνεται ότι *κάθε* τμήμα του φακού δημιουργεί είδωλο.

Η παρανόηση οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στον μηχανικό τρόπο με τον οποίο οι μαθητές μαθαίνουν να σχεδιάζουν τα διαγράμματα των ακτίνων. Στα εγχειρίδια, για να μη «φορτώνονται» τα διαγράμματα, φαίνονται απλώς οι κύριες ακτίνες. Οι μαθητές, λοιπόν, σχεδιάζουν μόνο τις κύριες ακτίνες και ουδέποτε την αποκλίνουσα, από κάθε σημείο του αντικειμένου, δέσμη (βλ. εδάφιο 9.16). Δεν καθοδηγούνται, επίσης, να αντιληφθούν τι συμβαίνει σε μια δέσμη, όταν περνά μέσα από τμήμα του φακού, ανεξάρτητα από την πορεία της κύριας ακτίνας. Παρατηρώντας το διάγραμμα στο οποίο εμφανίζεται απλώς η κύρια ακτίνα, αντιλαμβάνονται ότι το χαρτόνι την τέμνει στο πάνω μισό του διαγράμματος. Συμπεραίνουν, λοιπόν, ότι το υπόλοιπο μισό τμήμα εξαφανίζεται.

Θέτουμε στους μαθητές το πρόβλημα στο οποίο το βέλος που παριστάνει το αντικείμενο είναι ψηλότερο από τον συγκλίνοντα φακό. Στην περίπτωση αυτή, πολλοί θεωρούν ότι είναι αδύνατο να σχεδιάσουμε την κύρια ακτίνα, που είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα, επειδή αυτή δεν τέμνει

το φακό που φαίνεται στο διάγραμμα. Δεν αντιλαμβάνονται ότι από τη στιγμή που δίνεται το επίπεδο του φακού, μπορούμε να σχεδιάσουμε κάθε κύρια ακτίνα, ανεξάρτητα από το αν αυτή περνά όντως μέσα από το φακό. Το γεγονός φανερώνει ότι οι μαθητές δεν κατανοούν τα ζητήματα που σχετίζονται στενά με τη δοκιμασία που προαναφέραμε.

Στο πλαίσιο της 3ης Δοκιμασίας, οι Goldberg και McDermott, αρχίζοντας από το είδωλο που εστιάζοταν στην οθόνη, έθεσαν το ερώτημα: «Υποθέστε ότι μετακινώ την οθόνη προς το φακό. Μεταβάλλεται κάτι στην οθόνη;» Το 35% έως 40% των προχωρημένων μαθητών αντελήφθη ότι το είδωλο γίνεται συγκεχυμένο και εξαφανίζεται. Οι υπόλοιποι απάντησαν ότι το είδωλο παραμένει· μεταβάλλεται, απλώς, το μέγεθός του και, ίσως, γίνεται λίγο ασαφές. Οι Goldberg και McDermott αναφέρουν:

Πολλές παρατηρήσεις των μαθητών κατέδειξαν ότι η λειτουργία της οθόνης δεν είναι ευρέως κατανοητή. Συνήθως, οι μαθητές δεν θεωρούν την οθόνη ως φράγμα διάχυσης ή ως «αναμεταδότη», ο οποίος, αν τοποθετηθεί σε ορισμένη απόσταση από το αντικείμενο, επιτρέπει στον παρατηρητή να παρατηρήσει το είδωλο, χωρίς να βλέπει κατά μήκος του άξονα του φακού. Αντίθετα, πιστεύουν ότι μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα είδωλο στην οθόνη, ανεξάρτητα από τη θέση της οθόνης στον άξονα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο ισχυρισμός αυτός στηρίζεται σε λανθασμένη ερμηνεία της εμπειρίας που αποκτούν οι μαθητές, παρατηρώντας κάποιον να χρησιμοποιεί μηχανή προβολής διαφανειών. Θυμούνται ότι, για να μεγαλώσει το είδωλο, είναι απαραίτητο να απομακρύνουμε την οθόνη από τον προβολέα. Δεν θυμούνται, ωστόσο, ότι είναι απαραίτητο, ταυτόχρονα, να εστιάσουμε την εικόνα, μεταβάλλοντας την απόσταση του φακού από το αντικείμενο.

Πολλοί μαθητές δεν αντιλαμβάνονται τη σημασία του διαγράμματος των ακτίνων: η τομή της κύριας ακτίνας προσδιορίζει μοναδικά τη θέση του ειδώλου· το είδωλο σχηματίζεται μόνο στο επίπεδό του. Επίσης, ουδέποτε κατευθύνουμε τους μαθητές να ερμηνεύσουν το ρόλο της οθόνης μέσω της διάχυσης [δηλαδή, το ότι κάθε σημείο του ειδώλου εμφανίζεται στην οθόνη ως πηγή αποκλίνουσας δέσμης ακτίνων (βλ. το εδάφιο 9.16)].

Στο πλαίσιο της 4ης Δοκιμασίας, ενώ ο μαθητής παρατηρεί το είδωλο στην οθόνη, αρχικά, ερωτάται αν από τη θέση του (από την πλευρά της οθόνης που βρίσκεται απέναντι από το φακό) θα συνεχίσει να βλέπει το είδωλο, στην περίπτωση που αφαιρέσουμε την οθόνη. Ουσιαστικά, όλοι οι μαθητές αντιλαμβάνονται ότι η οθόνη είναι απαραίτητη: το είδωλο ανακλάται σ' αυτήν κι έτσι μπορούμε να το παρατηρούμε. Ωστόσο, αρκετοί αρχάριοι διατυπώνουν αυθόρμητα την άποψη ότι μπορούμε, επίσης, να παρατηρήσουμε το είδωλο στον τοίχο που βρίσκεται αρκετά μέτρα πίσω από την οθόνη.

Ερωτώνται, λοιπόν, οι μαθητές αν, αφαιρώντας την οθόνη, είναι δυνατό να παρατηρήσουμε το είδωλο, διαλέγοντας ελεύθερα οποιαδήποτε θέση. Οι Goldberg και McDermott αναφέρουν:

Πολλοί μαθητές, ιδιαίτερα οι αρχάριοι, δυσκολεύονταν να κατανοήσουν το ερώτημα. Οι παρατηρήσεις τους υποδήλωναν την αδυναμία τους να αντιληφθούν ότι το είδωλο υπάρχει στον κενό χώρο, ανεξάρτητα από την ύπαρξη κάποιας επιφάνειας. Οι περισσότεροι από τους αρχάριους, αλλά και από τους προχωρημένους μαθητές, ισχυρίζονταν ή ότι είναι αδύνατο να παρατηρήσουμε το είδωλο ή ότι είναι δυνατό, αν τοποθετήσουμε το μάτι μας στη θέση της οθόνης. Αρκετοί από τους μαθητές που έδωσαν την τελευταία απάντηση θεωρούσαν ότι το μάτι τους αντικαθιστά, απλώς, την οθόνη.

Σ' αυτό το σημείο της συνέντευξης, ο εξεταστής αφαιρούσε όντως, την οθόνη. Κατόπιν, ζητούσε από το μαθητή, αφού μετακινηθεί περίπου δύο μέτρα πίσω από την αρχική θέση της οθόνης, να κοιτάξει, κατά μήκος του άξονα του φακού, προς το φακό. Μ' αυτήν την καθοδήγηση, σχεδόν όλοι οι μαθητές μπόρεσαν να παρατηρήσουν το «αέρινο» είδωλο. Πολλοί, ωστόσο, φάνηκε να εκπλήσσονται από το ότι μπόρεσαν να παρατηρήσουν κάτι.

Όταν ο εξεταστής ζήτησε να του υποδείξουν τη θέση του ειδώλου, μόνο ελάχιστοι μαθητές ανέφεραν σωστά ότι το είδωλο βρισκόταν στη θέση όπου προηγουμένως ήταν η οθόνη. Οι υπόλοιποι έδωσαν ποικίλες απαντήσεις. Ειδικότερα, οι αρχάριοι θεωρούσαν ότι το είδωλο ήταν πάνω ή μέσα στο φακό.

Από την προσωπική μου εμπειρία, πιστεύω ότι αν ζητήσουμε από τους μαθητές να περιγράψουν με δικά τους λόγια τι παθαίνει συνολικά το φως από τη στιγμή που εξέρχεται από το αντικείμενο, κατόπιν διακόπτεται από το φακό και, τελικά, δημιουργεί το είδωλο στην οθόνη, πολλοί διηγούνται μια ιστορία που συνοψίζεται ως εξής: «Το είδωλο ταξιδεύει από το αντικείμενο στο φακό· εκεί αναποδογυρίζεται και φτάνει στην οθόνη.»

Από προσωπική εμπειρία έχω διαπιστώσει ότι είναι χρήσιμο να ζητάμε από τους μαθητές, όταν, σε ασκήσεις για το σπίτι ή σε τεστ, σχεδιάζουν διαγράμματα ακτίνων, να περιγράφουν αναλυτικά τη διαδικασία σχεδιασμού κάθε κύριας ακτίνας (τόσο στους συγκλίνοντες όσο και στους αποκλίνοντες φακούς). Πολλές από τις αρχικές ερμηνείες εξελίσσονται σε ασυναρτησίες. Το γεγονός δηλώνει ότι οι μαθητές δεν έχουν απομνημόνευσει τις ιδέες που υπεισέρχονται· ακολουθούν, απλώς, διαγράμματα ή διαδικασίες που απομνημόνευσαν, χωρίς να τα συνδέουν άμεσα με τους ορισμούς της κύριας

εστίας και της κύριας ακτίνας. Μόνο αφού οι μαθητές περιγράψουν με πληρότητα και σαφήνεια τουλάχιστον μία φορά τη διαδικασία σχηματισμού του ειδώλου (κατά προτίμηση στο πρόβλημα που περιλαμβάνει δύο φακούς σε σειρά), μπορούμε να μετριάσουμε την απαίτηση αυτή.

Άλλη πολύ χρήσιμη τεχνική για τεστ και για ασκήσεις στο σπίτι είναι να βοηθήσουμε τους μαθητές να αντιστρέψουν την πορεία των συλλογισμών τους. Αντί να τους ζητήσουμε τη θέση του ειδώλου (αφού τους δώσουμε τη θέση του αντικειμένου), είναι δυνατό να τους δώσουμε τις θέσεις του ειδώλου και των φακών και να τους ζητήσουμε τη θέση του αντικειμένου. (Γνωρίζω ελάχιστα εγχειρίδια που ζητούν διαγράμματα σ' αυτές τις συνθήκες.) Άλλη παραλλαγή είναι να ζητήσουμε τη θέση του φακού, αν δοθεί η θέση του αντικειμένου και του ειδώλου.

Γενικά, οι μαθητές ελάχιστα κατανοούν όντως τα είδωλα και το σχηματισμό τους μέσω ασκήσεων για το σπίτι. Οι ασκήσεις αυτές συνίστανται, κυρίως, σε αριθμητικούς υπολογισμούς με τη χρήση των εξισώσεων του Gauss ή του Νεύτωνα για τους φακούς. Η παρατήρησή μας δεν σημαίνει ότι υποστηρίζουμε την κατάργηση των ασκήσεων αυτών· αντιθέτως, είναι αναγκαίες και σημαντικές. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να συζευχθούν άμεσα, κατά προτίμηση στα ίδια προβλήματα, με τα φαινομενολογικά στοιχεία των προβλημάτων τα οποία φαίνεται ότι οι μαθητές δυσκολεύονται περισσότερο να τα αφομοιώσουν απ' ό,τι τη μηχανική επίλυση αριθμητικών προβλημάτων.

Είναι σαφές ότι στην εργασία για το σπίτι, στα τεστ και στην εργασία στο εργαστήριο πρέπει να περιέχονται ερωτήματα και προβλήματα παρόμοια με τις δοκιμασίες που περιγράφουν οι Goldberg και McDermott. Πολλές παραλλαγές τους είναι δυνατό και απαραίτητο να επινοηθούν. Αναπόφευκτα, λοιπόν, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι οι περισσότεροι συμβατικοί τρόποι διδασκαλίας δεν κατορθώνουν να οδηγήσουν τους μαθητές στο είδος της κατανόησης που επιδιώκουμε.

9.19 Πρωτογενής αντίληψη της φύσης του φωτός

Οι μαθητές αρχίζουν να μελετούν την έννοια του φωτός διαθέτοντας ποικίλες, βαθιά ριζωμένες πρωτογενείς αντιλήψεις, όπως ακριβώς συμβαίνει με την έννοια της κίνησης. Πολλές απ' αυτές διαφεύγουν από την προσοχή των καθηγητών και των συγγραφέων και εμποδίζουν τους μαθητές να κατανοήσουν το θέμα. Ο Watt (1985) συνοψίζει ορισμένες από τις εντυπώσεις των αρχάριων μαθητών. (Κάθε άτομο, βέβαια, δεν έχει ταυτόχρονα όλες τις απόψεις που περιγράφει ο Watt· το ποσοστό μεταβάλλεται ανάλογα με την ομάδα και την ηλικία.)

Σχετικά λίγοι μαθητές αντιλαμβάνονται το φως ως φυσικό φαινόμενο

που υπάρχει ανεξάρτητα από την πηγή του και τις επιδράσεις του: βλέπουμε τα αντικείμενα, επειδή φωτίζονται· η λειτουργία της όρασης, όμως, δεν συνδέεται άμεσα με την πρόσπτωση του φωτός στο μάτι του παρατηρητή. (Έχω παρατηρήσει ότι μερικοί μαθητές φτάνουν ακόμα και να αναστήσουν την αρχαία ιδέα του Παρμενίδη, δηλαδή, ότι για να δούμε ένα αντικείμενο, πρέπει να εκπνεμφθεί «κάτι» από τα μάτια μας προς αυτό.) Θεωρούν, επίσης, ότι, αν και «βλέπουμε», όντως, πηγές φωτός (λόγου χάρη, λάμπες ή κεριά) από απόσταση, αυτά τα αντικείμενα δεν εκπέμπουν φως.

Πιστεύουν ότι η ανάκλαση συμβαίνει μόνο στα κάτοπτρα και όχι σε ένα φύλλο χαρτί, στους τοίχους του δωματίου και σε άλλα αντικείμενα. (Βλ. εδάφιο 9.16.) Τέλος, θεωρούν ότι τα έγχρωμα φίλτρα προσθέτουν χρώμα στο λευκό φως.

Ο καθηγητής είναι σημαντικό να γνωρίζει για την ευρεία επίδραση των πρωτογενών αντιλήψεων, ώστε να βοηθήσει τους μαθητές να απαλλαγούν απ' αυτές, μέσω ερωτημάτων που τους οδηγούν σε αντιφάσεις και ασυνέπειες. Σύντομες διακηρύξεις για τη «σωστή» άποψη ωφελούν ελάχιστα.

9.20 Φαινομενολογικές ερωτήσεις και προβλήματα

Τα προηγούμενα εδάφια κατέδειξαν πόσο σημαντικό είναι να δίνονται στους μαθητές ποιοτικές φαινομενολογικές ερωτήσεις τόσο για τα μηχανικά κύματα όσο και για τα οπτικά φαινόμενα: ενισχύεται η διαίσθησή τους και κατανοούν βαθύτερα τα φαινόμενα και τις έννοιες που επινοούμε. Ένα είδος πολύ αποτελεσματικής ερώτησης είναι: «Τι θα συνέβαινε αν...;» που προκαλεί υποθετικο-επαγωγικούς συλλογισμούς. Σε πολλές από τις έρευνες που παραθέσαμε χρησιμοποιήθηκαν τέτοιες ερωτήσεις. Οι περισσότερες «επιζητούν» την ενσωμάτωσή τους στην καθημερινή διδασκαλία.

Εκτός από τις εικόνες της γεωμετρικής οπτικής, είναι σκόπιμο να προσθέσουμε παρόμοιες ερωτήσεις για εικόνες της φυσικής οπτικής. Λόγου χάρη, εκτός από τον υπολογισμό του μήκους κύματος από τη μορφή της συμβολής, είναι δυνατό να ζητήσουμε από τους μαθητές να σχεδιάσουν πώς θα μεταβληθεί η εικόνα των παράλληλων κροσσών που δημιουργούνται από σφηνοειδή υμένα μεταξύ δύο γυάλινων πλακών, αν μετακινήσουμε παράλληλα προς τον εαυτό της τη μία από τις δύο πλάκες που δημιουργούν τη συμβολή, αυξάνοντας ή μειώνοντας το εύρος της σχισμής μεταξύ των πλακών: «Σχεδιάστε πώς μεταβάλλεται η εικόνα, αν οι δύο πλάκες δεν έχουν τον ίδιο δείκτη διάθλασης.» «Σχεδιάστε πώς μεταβάλλεται η εικόνα, αν το προσπίπτον φως από κόκκινο γίνει πράσινο.» Σπάνια εκτελούνται παρόμοιες επιδείξεις σε σύνδεση με τη μελέτη των εικόνων που δημιουργεί λεπτό στρώμα διαφανούς υλικού. Αλλά, ακόμα και όταν εκτελούνται, οι μαθητές δεν αφομοιώνουν τις ιδέες, εκτός κι αν τους ζητήσουμε να σχεδιά-

σουν μόνοι τους τις εικόνες. (Η παρατήρηση ισχύει, επίσης, στις μεταβολές των εικόνων που δημιουργούν οι σχισμές και τα φράγματα. Αν και, συνήθως, αυτές οι εικόνες επιδεικνύονται, οι μαθητές δεν κατορθώνουν να τις σχεδιάσουν σωστά, εκτός κι αν τους έχουμε κατευθύνει να εξασκηθούν. Έχουν την τάση να προσπαθούν να απομνημονεύσουν ό,τι τους επιδεικνύουμε παρά να το δικαιολογήσουν επικαλούμενοι θεμελιώδεις αρχές.)

Η φωτεινότητα του ειδώλου που δημιουργεί ένας φακός μάς επαναφέρει σε συλλογισμούς με λόγους και κλίμακες, χωρίς να αντικαθιστούμε αριθμητικές τιμές σε μαθηματικούς τύπους (βλ. 1ο Κεφάλαιο). Η συνδυασμένη δράση της εστιακής απόστασης και του ανοίγματος του φακού δυσκολεύει πολλούς μαθητές, ακόμα κι εκείνους που παρακολουθούν τμήματα για μηχανικούς και φυσικούς. Πασχίζουν, λοιπόν, να αποφύγουν τους συλλογισμούς με λόγους (ιδιαίτερα εκείνους που συνδέονται με την έννοια της επιφάνειας). Αντικαθιστούν αριθμητικές τιμές στους τύπους χωρίς να εκτελούν ποιοτικούς συλλογισμούς όπως θα ήταν για παράδειγμα η ποιοτική εκτίμηση των παραγόντων που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν ένα αποτέλεσμα καθώς και του λόγου υπό τον οποίο συμμετέχουν.

10. ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΧΡΟΝΙΑ ΤΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

10.1 Εισαγωγή

Οι φυσικοί δικαιολογημένα επιθυμούν να εισάγουμε από νωρίς τους μαθητές σε θέματα σύγχρονης φυσικής. Σε ορισμένους κύκλους φυσικών, το όραμα της επιταχυνόμενης μάθησης φτάνει μάλιστα μέχρι το να «ενσταλάξουμε» τα συμπεράσματα της «βαντικής μηχανικής, της πυρηνικής φυσικής και της φυσικής υψηλών ενεργειών στους μαθητές του δημοτικού ή, τουλάχιστον, του γυμνασίου. Στο φως των όσων μάθαμε τα τελευταία χρόνια για την ανάπτυξη της αντίληψης και της ικανότητας σχηματισμού των εννοιών στον ανθρώπινο νου, αμφιβάλλω αν σ' αυτό το πρώιμο στάδιο ο μαθητής είναι εφικτό να μάθει και να κατανοήσει όντως τη συγκεκριμένη ύλη. Αν επιχειρούσαμε κάτι τέτοιο, θα καλλιεργούσαμε, απλώς, την τυφλή απομνημόνευση των τελικών συμπερασμάτων που οι μαθητές θα τα χρησιμοποιούσαν σε τεχνητές ασκήσεις για το σπίτι· θα ελέγχαμε, έτσι, αυτό που ο Eric Rogers ονομάζει «ηλεκτρονική μνήμη»¹. Αμφιβάλλω αν είναι συνετό να υποκύνουμε στην πίεση για κάλυψη περισσότερης ύλης, όπως έκαναν οι χημικοί, και να αναγκάζουμε τους μαθητές μας να αποστηθίζουν τελικά συμπεράσματα, χωρίς να τα κατανοούν.

Θεωρώ, ωστόσο, εφικτό και ιδιαίτερα σκόπιμο, στο πλαίσιο ενός εισαγωγικού μαθήματος, να προσφερθεί στους μαθητές η γνώση της φυσικής που αποκτήθηκε τα πρώτα χρόνια του 20ού αιώνα: να μάθουν για τα ηλεκτρόνια, για τα πρωτόνια, για τους πυρήνες, για την ατομική δομή και, ίσως, για ορισμένα ποιοτικά στοιχεία της σχετικότητας. Είναι αδύνατο, βεβαίως, να παρουσιάσουμε κάθε πλευρά ενός θέματος σύμφωνα με την τα-

1. Σε πρόσφατη συνάντηση, άκουσα έναν καθηγητή γυμνασίου, ο οποίος είχε κερδίσει σημαντική τιμητική διάκριση, να περιγράφει πώς δίδασκε στους μαθητές σύγχρονη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων. Χωρίς να εξετάζει ερωτήματα, όπως «Πώς γνωρίζουμε ότι...;», «Γιατί πιστεύουμε ότι...;» (που απείχαν, βεβαίως, πολύ από το επίπεδο των μαθητών) και διακηρύσσοντας, απλώς, τελικά συμπεράσματα, «μάθαινε» στους μαθητές τι είναι τα κουάρκ, τα γκλόουον, τα αδρόνια, τα μεσόνια, τα λεπτόνια, το χρώμα, η γοητεία, το κουάρκ 1, το κουάρκ b κτλ. Φαινόταν πεπεισμένος ότι έκανε κάτι σύγχρονο, συναρπαστικό και προκλητικό. Μου φαίνεται, ωστόσο, ότι η προσπάθεια απομνημόνευσης των πρωτευουσών των πενήντα πολιτειών των ΗΠΑ που τώρα έχει δυσφημιστεί και περιφρονηθεί, θα ήταν, ίσως, πιο πρακτική και χρήσιμη γνώση για τα θύματά του!

κτική που ακολουθούμε σε ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής. Πρέπει να αφήσουμε κενά, όσο κι αν ακούγεται οδυνηρό. Πώς, λοιπόν, θα αποφασίσουμε τι θα παραλείψουμε; Από τη δική μου εμπειρία θεωρώ ότι αποτελεσματικός τρόπος είναι να ορίσουμε «το σκελετό της ιστορίας» μας. Αν θέλουμε να καταλήξουμε, λόγου χάρη, στο άτομο του Bohr, είναι απαραίτητο να προσδιορίσουμε τις βασικές έννοιες και τα θέματα της μηχανικής που θα βοηθήσουν στην κατανόηση των πειραμάτων και των συλλογισμών οι οποίοι οδήγησαν στην ανακάλυψη του ηλεκτρονίου, του ατομικού πυρήνα και του φωτονίου. Ο «σκελετός της ιστορίας» βοηθά να αναπτύξουμε τις προαπαιτούμενες γνώσεις, παραλείποντας θέματα που είναι άχρηστα για την επίτευξη του σκοπού μας. Για τους μαθητές που θα συνεχίσουν να μελετούν φυσική, οι καθηγητές είναι απαραίτητο να αντιληφθούν την ύπαρξη των θεμάτων που παραλείφθηκαν, να τα αποδεχθούν, να τα έχουν κατά νουν και να τα καλύψουν σε επόμενη σειρά μαθημάτων. (Αν οι μαθητές έχουν την ευκαιρία να μάθουν, να κατανοήσουν και να αφομοιώσουν όντως τις πιο θεμελιώδεις έννοιες, στο μέλλον είναι δυνατό να καλύψουν μόνοι τους ορισμένα από τα *φαινομενικά* κενά τους.) Μπορούμε να κερδίσουμε σε αποτελεσματικότητα αν μεταφέρουμε τη μελέτη ορισμένων θεμάτων (λόγου χάρη, των στοιχειωδών κυκλωμάτων του συνεχούς ρεύματος, της γεωμετρικής οπτικής κ.ά.) εξ ολοκλήρου στο εργαστήριο, αντί να αφιερώσουμε γι' αυτά αρκετό χρόνο στην τάξη. Αυτά τα θέματα αναπτύσσονται αποτελεσματικότερα αν οι μαθητές «θέσουν τα χέρια τους επί τον τύπον των ήλων» (βλ. εδάφια 7.4.-7.9 και 9.17-9.18).

Αν έχουμε μελετήσει προσεχτικά το «σκελετό της ιστορίας», είναι δυνατό, στη διάρκεια της ανάπτυξης άλλων θεμάτων, να «ενσταλάξουμε» πολλές ερωτήσεις και ασκήσεις οι οποίες να προετοιμάζουν τους μαθητές να εκτελέσουν σχέσεις και συλλογισμούς που θα συναντήσουν στο μέλλον. Προς το παρόν, ελάχιστα εγχειρίδια προσπαθούν να το πετύχουν. Τα περισσότερα περιέχουν τόσο πολλά θέματα, ώστε οι προπαρασκευαστικές ασκήσεις χάνονται «στο σωρό». Τα περισσότερα εγχειρίδια που ασχολούνται με την ανάπτυξη της επιστήμης στις αρχές του 20ού αιώνα, έχουν την τάση να καλύπτουν πολύ γρήγορα τα θέματα. Αποτελέσματα: δεν δίνεται η ευκαιρία στους μαθητές να κατανοήσουν το φυσικό περιεχόμενο και τους συλλογισμούς: παραμένουν, απλώς, τα τελικά συμπεράσματα και όχι η πορεία των συλλογισμών που οδήγησε σ' αυτά.

Είναι απαραίτητο να έχουμε κατά νουν ότι η «σύγχρονη φυσική» περιλαμβάνει φαινόμενα που δεν τα αντιλαμβανόμαστε άμεσα με τις αισθήσεις μας. Οι μαθητές χρειάζονται χρόνο για να αφομοιώσουν και να κατανοήσουν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από κλασικά πειράματα και οδήγησαν στη βαθιά γνώση που διακηρύσσουμε ανέμελα σε τόσο σύντομο χρόνο. Επιπλέον, τα κλασικά πειράματα και οι συλλογισμοί που προκύπτουν απ' αυτά αποτελούν πλούσια και πολύτιμη ευκαιρία για ανακύκληση των

ιδεών — κάτι που το έχουμε επανειλημμένα υποστηρίξει σε τούτο το βιβλίο. Πολλοί μαθητές αρχίζουν να δείχνουν ότι για πρώτη φορά κατανοούν, βαθιά, βασικές έννοιες (λόγου χάρη, την ταχύτητα, την επιτάχυνση, τη δύναμη, τη μάζα, την ορμή, την ενέργεια, την κεντρομόλο δύναμη, το ηλεκτρικό φορτίο και την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου), όταν τις συνθέτουν μεταξύ τους σε πλούσιο πλαίσιο (λόγου χάρη, στο πείραμα του Thomson και στο άτομο του Bohr).

Στο φως αυτών των επισημάνσεων, το παρόν Κεφάλαιο περιορίζεται στην ανάπτυξη της γνώσης που οι μαθητές είναι δυνατό να κατανοήσουν όντως, μέσω της μελέτης της φυσικής των αρχών του 20ού αιώνα. Το γεγονός αυτό είναι ένα παράδειγμα όπου, τουλάχιστον, ορισμένες πλευρές της ιστορικής εξέλιξης (και όχι κάθε λεπτομέρειά της) οδηγούν στην εμβάθυνση και την κατανόηση. Αν αγνοήσουμε αυτές τις πλευρές της ιστορικής εξέλιξης, η αποτελεσματικότητα της μελέτης, δυστυχώς, ελαττώνεται.

10.2 Ιστορικές προκαταρκτικές γνώσεις

Μια σειρά μαθημάτων «σύγχρονης φυσικής» αρχίζει από την ποιοτική μελέτη του φαινομένου της εκκένωσης των αερίων και του φαινομένου των καθοδικών ακτίνων, που για πρώτη φορά παρατηρήθηκαν τη δεκαετία 1870-1880. Φτάνει δε στο αποκορύφωμά της με την παρουσίαση της ανακάλυψης από τον Roentgen των ακτίνων x το Δεκέμβριο του 1895, της ανακάλυψης της ραδιενέργειας από τον Becquerel στις αρχές του 1896 και του πειράματος του Thomson το 1896-97.

Αντίγραφα των σωλήνων που χρησιμοποίησε ο Crooke στη μελέτη των καθοδικών ακτίνων είναι διαθέσιμα στις περισσότερες αίθουσες προπαρασκευής του μαθήματος φυσικής. Η επίδειξή τους έχει μοναδικό ενδιαφέρον για τους μαθητές. Οι καθηγητές, ωστόσο, έχουν, δυστυχώς, την τάση να εκτελούν εσπευσμένα τις επιδείξεις και να διακηρύσσουν σύντομα τα συμπεράσματα που αφορούν τις καθοδικές ακτίνες. Η αποτελεσματικότητα των επιδείξεων είναι δυνατό να αυξηθεί σημαντικά αν διατεθεί χρόνος για εξέταση, συζήτηση και εξαγωγή συμπερασμάτων²· λόγου χάρη, αν ρωτάμε τους μαθητές τι συμπεραίνουν από τις παρατηρήσεις τους, καθώς εκτελούμε το πείραμα. Έτσι, πρώτον, βοηθούνται οι μαθητές που δεν έχουν πλήρως εξασκήσει την ικανότητά τους να διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ της παρατήρησης και του συμπεράσματος²· δεύτερον, δίνεται η ευκαιρία στους

2. Πολλοί μαθητές διακρίνουν ελάχιστα αυτήν τη διαφορά. Δεν αντιλαμβάνονται ότι τα δεδομένα και οι ενδείξεις που οδήγησαν σε ορισμένα συμπεράσματα διαφέρουν από τα ίδια τα συμπεράσματα. Και σε άλλους επιστημονικούς κλάδους (λόγου χάρη στην ιστορία) δεν κατορθώνουν να εντοπίσουν αυτή τη διαφορά. Τέλος, η ικανότητα αυτής της διάκρισης χαρακτηρίζει, μαζί με άλλες, τη διανοητική συμπεριφορά του ατόμου που διαθέτει «κριτική σκέψη». (Για περισσότερες λεπτομέρειες βλ. 13ο Κεφάλαιο.)

μαθητές να διατυπώσουν εναλλακτικές ερμηνείες και συμπεράσματα που πρέπει να τα ανεχθούμε και να τα συζητήσουμε παρά να τα απορρίψουμε με «δικτατορικό» τρόπο. Η συζήτηση είναι σημαντική προϋπόθεση για τη μελέτη του πειράματος του Thomson: ο ίδιος ο Thomson παρακινήθηκε από τη διαμάχη μεταξύ του Crooke, που υποστήριζε ότι οι καθοδικές ακτίνες αποτελούνται από σωματίδια, και του Lenard, που υποστήριζε ότι αποτελούνται από άγνωστη, μέχρι τότε, ακτινοβολία (βλ. εδάφιο 10.3). Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να ενθαρρύνουμε τους μαθητές που συμμερίζονται το πρότυπο της ακτινοβολίας, ώστε να αισθάνονται άνετα ανάμεσα στους υπόλοιπους.

Σε πολλά εγχειρίδια υπάρχουν κατάλληλες και ικανοποιητικές (αν και σύντομες) αναλύσεις της ανακάλυψης των ακτίνων x και της ραδιενέργειας. Μελετώντας λεπτομερέστερα το ιστορικό των ανακαλύψεων, διαπιστώνουμε ότι υπάρχουν καινούργια θέματα φυσικής για να διδάξουμε· ο χρόνος διδασκαλίας, ωστόσο, είναι περιορισμένος. Εντούτοις, ορισμένα θέματα κρίσιμα για τη μελέτη στο μέλλον δεν επισημαίνονται· οι μαθητές, λοιπόν, δεν αντιλαμβάνονται τη σπουδαιότητά τους. Ένα από αυτά τα θέματα είναι η πρόωγη ανακάλυψη ότι τόσο οι ακτίνες x όσο και η ραδιενεργός ακτινοβολία ιονίζουν τον αέρα: οι ερευνητές είχαν παρατηρήσει και είχαν αναγνωρίσει την εκδήλωση αγωγιμότητας λόγω της εκφόρτισης του ηλεκτροσκοπίου. Αρχικά, ο Becquerel υπέθεσε, όντως, ότι οι ακτίνες από το ουράνιο είναι ασθενικές ακτίνες x . Ο Thomson, επίσης, μελέτησε την αγωγιμότητα που προκαλούν οι ακτίνες x , λίγο πριν επιχειρήσει την κλασική ανάλυσή του για τις ακτίνες αυτές. Το γεγονός, μάλιστα, ότι γνώριζε την εκδήλωση ιονισμού έπαιξε σημαντικό ρόλο στα πειράματα καθοδικών ακτίνων.

Η εννοιολογική σημασία της ανακάλυψης του ιονισμού των αερίων υπογραμμίστηκε από τον Millikan (1917):

... μέχρι τότε ο μόνος τύπος ιονισμού που γνωρίζαμε ήταν ο ιονισμός που παρατηρούσαμε στα διαλύματα, όπου πάντα ένα σύνθετο μόριο, λόγω χάρη χλωριούχου νατρίου, διασπάται αυτόματα σε ένα θετικά φορτισμένο ιόν νατρίου και σε ένα αρνητικά φορτισμένο ιόν χλωρίου. Ο ιονισμός των αερίων, ωστόσο, ήταν απολύτως διαφορετικός: παρατηρούνταν σε καθαρά αέρια, λόγω χάρη στο άζωτο και στο οξυγόνο, ακόμα και σε μονοατομικά, λόγω χάρη στο αργό και στο ήλιο³. Είναι σαφές, λοιπόν, ότι τα ουδέτερα άτομα, ακόμα και μονοατομικής ου-

3. Ήταν ευρύτατα γνωστό, βεβαίως, ότι η φλόγα προκαλεί αγωγιμότητα στα αέρια. Η φλόγα, ωστόσο, συνδέεται με χημικές αντιδράσεις από τις οποίες παράγονται νέα προϊόντα από αέριο που αρχικά ήταν καθαρό. Προκαλεί, επίσης, ρεύματα μεταφοράς και άσχετα φαινόμενα που οφείλονται στη διαφορά θερμοκρασίας. Στις συνθήκες αυτές είναι αδύνατο να δημιουργήσουμε σταθερά ελεγχόμενα αναπαράγωσιμα φαινόμενα.

σίας, έχουν ως συστατικό κάποιο ελάχιστο ηλεκτρικό φορτίο. Πρόκειται για την πρώτη άμεση ένδειξη ότι: 1) το άτομο έχει σύνθετη δομή, και 2) το ηλεκτρικό φορτίο υπεισέρχεται στην κατασκευή του. Με τούτη την ανακάλυψη, που οφειλόταν άμεσα στη χρήση ενός νέου μέσου, των ακτίνων x , το άτομο ως απώτερο, αδιαίρετο αντικείμενο έπαυε να υπάρχει και άρχισε η εποχή των συστατικών του...

Άλλο θέμα, το οποίο δεν αναφέρεται καθόλου ή «καταχωνιάζεται» πολύ γρήγορα, είναι η ανακάλυψη από τους Curie ότι η θερμοκρασία ενός φιαλιδίου με ενώσεις ραδίου παραμένει συνεχώς υψηλότερη από του δωματίου. Αν, μάλιστα, τοποθετήσουμε το φιαλίδιο σε θερμοδόμετρο, «σε μια ώρα κάθε γραμμάριο αποδίδει ογδόντα θερμίδες... αρκετή θερμότητα... για την τήξη ισοβαρούς ποσότητας πάγου». Από την πρώτη στιγμή, λοιπόν, εγείρεται σημαντικό ερώτημα για την προέλευση αυτής της ενέργειας και την ισχύ του νόμου διατήρησής της.

Αποδείχθηκε, επίσης, ότι οι ακτινοβολίες α και β έχουν μάζα. Πώς εξηγείται η συνεχής εκπομπή υλικών σωματιδίων, ενώ απουσιάζει εμφανώς κάθε χημική μεταβολή ή αλλαγή της κατάστασης του ραδιενεργού υλικού; (Η εργασία του Rutherford και του Soddy για τη μετατροπή των στοιχείων δεν είχε ακόμα δημοσιευθεί.) Πώς εξηγείται η εκπομπή ύλης από στοιχεία (καθαρό ουράνιο ή ράδιο), χωρίς τα άτομα να αλληλεπιδρούν με άλλες ουσίες; Ο νόμος διατήρησης της μάζας, επίσης, ετέθη σε αμφισβήτηση.⁴

Οι μαθητές είναι σκόπιμο, στο πλαίσιο της ενημέρωσής τους για την ιστορία του πνεύματος, να αντιμετωπίσουν και να εκτιμήσουν τα πρωταρχικά ερωτήματα: η ιστορική εξέλιξη δείχνει άμεσα πώς απαντήθηκαν. Η επιστημονική καλλιέργεια αυξάνεται μέσω αυτής της εμπειρίας κι όχι όταν «καταχωνιάζουμε» τα ερωτήματα και διακηρύσσουμε εσπευσμένα ονόματα και τελικά συμπεράσματα.

Ένα ερώτημα που εγείρεται συχνά, όταν ο καθηγητής επιλέξει να χρησιμοποιήσει στοιχεία από την ιστορική ακολουθία των γεγονότων για να διδάξει την εισαγωγή στη σύγχρονη φυσική, είναι: «Πριν ο Millikan προσδιορίσει το κβάντο του ηλεκτρικού φορτίου και πριν ανακαλυφθεί η διάθλαση των ακτίνων x , τι γνωρίζαμε για τον αριθμό N_0 του Avogadro και για το μέγεθος των ατόμων και των μορίων;» (Από καιρό σε καιρό, οι συνεργάτες μου μου θέτουν, όντως, αυτό το ερώτημα.) Τα γεγονότα έχουν ως εξής:

Η τάξη μεγέθους των εν λόγω ποσοτήτων είχε προσδιοριστεί με ακρίβεια πολύ πριν από το τέλος του 19ου αιώνα. Η συγκεκριμένη γνώση καθοδηγούσε τόσο την πειραματική εργασία όσο και τη θεωρητική ανάλυση: οι

4. Είναι απαραίτητο να σημειώσουμε ότι, σ' εκείνη την περίοδο αναταραχής στις φυσικές επιστήμες, ο Henry Adams έκανε (στο βιβλίο του «Education») την παρατήρηση που συχνά παρατίθεται: «Το χάος είναι ο νόμος της Φύσης: η τάξη είναι το όνειρο του Ανθρώπου».

τιμές, ωστόσο, δεν ήταν ακριβείς. Πηγή πληροφοριών ήταν από τη μια πλευρά η κινητική θεωρία των αερίων και από την άλλη τα πειραματικά δεδομένα σε φαινόμενα μεταφοράς (ιξώδες, θερμική αγωγιμότητα, διάχυση) και στην απόκλιση της συμπεριφοράς των πραγματικών αερίων από τη συμπεριφορά των ιδανικών. Η ιστορία άρχισε με τη θεωρητική θεμελίωση του Clausius στα 1857-1858 και του Maxwell το 1860. [Στο βιβλίο του Brush (1965) υπάρχουν μεταφράσεις και ανατυπώσεις των άρθρων τους]. Στις εργασίες αυτές ορίστηκε η μέση ελεύθερη διαδρομή και συνδέθηκε με το συντελεστή μεταφοράς. Χρησιμοποιώντας σύγχρονο συμβολισμό έχουμε:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma^2} \quad (10.2.1)$$

και

$$\eta = \frac{1}{3} nm\lambda\bar{v} \quad (10.2.2)$$

όπου λ είναι η μέση ελεύθερη διαδρομή, n ο αριθμός των ατόμων ή των μορίων ανά μονάδα όγκου, σ η ατομική ή μοριακή διάμετρος (θεωρώντας ότι το άτομο και το μόριο έχουν σφαιρικό σχήμα), η ο συντελεστής ιξώδους, m η μάζα ενός ατόμου ή μορίου και $\bar{v}$ η μέση ατομική ή μοριακή ταχύτητα. Λόγω της κατανομής Maxwell η $\bar{v}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (10.2.3)$$

όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T η απόλυτη θερμοκρασία και M η σχετική ατομική ή μοριακή μάζα. Με τούτο το συμβολισμό έχουμε:

$$m = \frac{M}{N_o} \quad (10.2.4)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 10.2.1 και 10.2.2, προκύπτει:

$$\eta = \frac{m\bar{v}}{3\sqrt{2}\sigma^2} \quad (10.2.5)$$

Η εξίσωση 10.2.5 συσχετίζει άμεσα την ποσότητα η , που είναι δυνατό να τη

μετρήσουμε πειραματικά, με τις δύο άγνωστες ποσότητες N_0 και σ . Επίσης, επειδή δεν υπεισέρχεται πλέον το n , η εν λόγω εξίσωση περιέχει την πρόβλεψη ότι ο συντελεστής εξώδους ιδανικού αερίου είναι ανεξάρτητος από την πίεση. Αυτή η συμπεριφορά ήταν απρόβλεπτη διαισθητικά· ενίσχυσε σημαντικά, λοιπόν, τη «νεογέννητη» θεωρία.

Ο Loschmidt υπήρξε, μάλλον, ο πρώτος που υπολόγισε (το 1867) το μέγεθος του μορίου. Θεώρησε ότι ο όγκος των μορίων ενός αερίου ισούται με τον όγκο που καταλαμβάνει η ουσία σε στερεή ή υγρή φάση: η μικρή συμπίεστότητα των υγρών και των στερεών δικαιολογεί την υπόθεση ότι στις συγκεκριμένες καταστάσεις τα άτομα ή τα μόρια βρίσκονται πάρα πολύ κοντά μεταξύ τους. Αν με ϱ συμβολίσουμε την πυκνότητα του στερεού ή του υγρού, ο όγκος ενός γραμμομορίου, M/ϱ , δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{M}{\varrho} = \frac{1}{6} N_0 \pi \sigma^3 \quad (10.2.6)$$

Ο Loschmidt, συνδυάζοντας τις εξισώσεις 10.2.5 και 10.2.6, προσδιόρισε την τιμή της μοριακής διαμέτρου. Θα μπορούσε να είχε προσδιορίσει την τιμή του n , που ονομάστηκε «αριθμός του Loschmidt»· στην πραγματικότητα, ωστόσο, δεν το έκανε. Είναι επίσης δυνατό να υπολογίσουμε τον αριθμό του Avogadro, N_0 .

Το 1873 ο van der Waals διατύπωσε την τροποποιημένη εξίσωση των αερίων, που μας απομάκρυνε από τη συμπεριφορά των ιδανικών αερίων:

$$\left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT$$

Η αναγνώριση ότι η σταθερά b ισούται προσεγγιστικά με τέσσερις φορές τον όγκο που καταλαμβάνει ένα γραμμομόριο σε αέρια φάση οδήγησε σε βελτιωμένο υπολογισμό, ο οποίος στηρίχτηκε στην τροποποίηση της εξίσωσης 10.2.6:

$$\frac{b}{4} = \frac{1}{6} N_0 \pi \sigma^3 \quad (10.2.7)$$

Αν χρησιμοποιήσουμε τις σύγχρονες τιμές για το άζωτο, λόγω χάρη, $\eta = 178 \mu\text{Poise}$ στους 27°C και $b = 0,03913$ λίτρα ανά γραμμομόριο (l/mol), από την προσέγγιση του van der Waals, σε συνδυασμό με τις εξισώσεις

10.2.5 και 10.2.7, προκύπτει: $\sigma = 3,1\text{\AA}$ και $N_0 = 5,1 \cdot 10^{23}$.

Τον 19ο αιώνα, οι πειραματικές τιμές ήταν λιγότερο ακριβείς· ο προηγούμενος υπολογισμός, ωστόσο, δείχνει ότι η τάξη μεγέθους ήταν σωστή. Αποτελούσε, λοιπόν, ασφαλή οδηγό. Η σπουδαιότητα των υπολογισμών για την εποχή εκείνη αποδεικνύεται από το ότι μορφές όπως ο Stoney, ο Lothar, ο Meyer και ο Kelvin πήραν μέρος στην ανάπτυξή τους. Ακριβέστεροι υπολογισμοί δεν εκτελέστηκαν παρά μόνο το 1908 από τον Perrin. Ο Perrin στηρίχθηκε στο άρθρο που δημοσίευσε ο Αϊνστάιν το 1905 για την κίνηση Brown, και το συνδύασε με την πειραματική παρατήρηση της βαρυτικής διαστρωμάτωσης και της κίνησης Brown των μορίων κολλοειδούς διαλύματος. Πιο εκλεπτυσμένοι υπολογισμοί του N_0 στηρίχθηκαν στον προσδιορισμό από τον Millikan (1909, 1911) της σωματιδιακής φύσης του ηλεκτρικού φορτίου και στη διάθλαση των ακτίνων x.

Αυτή η ιστορία δεν προσφέρεται, δυστυχώς, για ένα εισαγωγικό μάθημα φυσικής: η κινητική θεωρία, στην οποία στηρίζεται, απέχει από τους εφικτούς στόχους που θέτουμε στο επίπεδο αυτό. Την περιέλαβα, ωστόσο, όχι για να υποστηρίξω ότι είναι απαραίτητο να τη χρησιμοποιήσουμε στη διδασκαλία μας, αλλά επειδή είναι δυνατό να βοηθήσει στην εμβάθυνση άλλων θεμάτων, όπως συνέβη σ' εμένα, όταν για πρώτη φορά τη διερευνήσα. Αν θέλουμε, μπορούμε να την παρουσιάσουμε ποιοτικά και να ζητήσουμε από τους μαθητές να αποδεχτούν τους ισχυρισμούς μας. (Αντιλαμβάνομαι ότι υπάρχουν έντονες αντιρρήσεις για το ότι από την πρώτη στιγμή της παρουσίασης των θεμάτων ζητάμε από τους μαθητές να δεχτούν άκριτα τους ισχυρισμούς μας, ενώ — λόγω ελλείψεως εμπειρίας — διακρίνουν ελάχιστα τι όντως αποδεικνύουμε. Εντούτοις, θεωρώ ότι δεν υπάρχει αντίρρηση να κάνουμε κάτι τέτοιο σε ορισμένες περιπτώσεις, όταν έχει ενισχυθεί η απαραίτητη ικανότητα των μαθητών.)

10.3 Το πρελούδιο της έρευνας του Thomson

Πριν ο Thomson ερευνήσει την καθοδική δέσμη, είχαν αναπτυχθεί δύο αποκλίνουσες απόψεις για τη φύση της: οι Βρετανοί επιστήμονες ήταν προσκολλημένοι στο σωματιδιακό πρότυπο που υποστήριζε ο Crooke· αντίθετα, οι επιστήμονες της ηπειρωτικής Ευρώπης, καθοδηγούμενοι από τον Philipp Lenard (ο οποίος τότε βρισκόταν στη Βόννη και αργότερα πήγε στη Χαϊδελβέργη), προτιμούσαν το πρότυπο του κύματος ή της ακτινοβολίας.

Η τελευταία άποψη δεν ήταν καθόλου αφελής. Ο Lenard είχε εκτελέσει πολλά προσεκτικά πειράματα, ερευνώντας τη διάδοση των καθοδικών ακτίνων μέσα από «παράθυρα» λεπτών μεταλλικών φύλλων που βρισκόταν στο τέλος του καθοδικού σωλήνα. Ερευνήσε, επίσης, τη διεύθυνση των

ακτίνων σε αέρια διαφόρων τύπων, αφού προηγουμένως οι ακτίνες περνούσαν μέσα από τα φύλλα. Παρατήρησε, τότε, ότι οι ακτίνες διαπερνούν τα φύλλα και συνεχίζουν να διαδίδονται σε ευθεία γραμμή για ένα ή δύο εκατοστά. Πείστηκε, λοιπόν, ότι οι καθοδικές ακτίνες δεν έχουν σωματιδιακό ή υλικό χαρακτήρα, αλλά πρόκειται για κυματική διαταραχή του αιθέρα. Δεν δεχόταν ότι φορτισμένα υλικά σωματίδια εισχωρούν χωρίς απόκλιση σε πυκνές ουσίες, όπως στα φύλλα. Η κινητική θεωρία τότε, βέβαια, δεν ήταν ακόμα αρκετά επεξεργασμένη ποσοτικά. Είχε, ωστόσο, προχωρήσει αρκετά: οι επιστήμονες πείθονταν ότι μια ατομική ή μοριακή δέσμη ήταν αδύνατο να διεισδύσει τόσο πολύ μέσα στον αέρα, σε συνηθισμένη ατμοσφαιρική πίεση.

Οι αντίθετες απόψεις του Lenard και του Crooke αποτελούν δείγμα της σαφούς διάκρισης μεταξύ των σωματιδιακών και των κυματικών φαινομένων, η οποία αναδύθηκε τον 19ο αιώνα στην επιστημονική σκέψη. Οι δύο εκδηλώσεις θεωρούνταν ότι αποκλείονται αμοιβαία και απολύτως μεταξύ τους: ένα φαινόμενο ανήκει στη μια ή την άλλη κατηγορία· δεν υπάρχουν ταυτόχρονες εκδηλώσεις σωματιδιακών και κυματικών χαρακτηριστικών. Αυτή η σαφής διχογνωμία αποτελεί το προελόντιο για να προβληματιστούν και να εξετάσουν οι μαθητές τη σύγχρονη άποψη της δυαδικότητας σωματιδίου-κύματος. Μέσω αυτής της παρουσίασης, ενημερώνονται για ένα σημαντικό γεγονός της ιστορίας του πνεύματος.

Υπήρχε ένα επιπλέον πειραματικό δεδομένο που εκείνη την εποχή εμποδίζει την καθιέρωση της σωματιδιακής υπόθεσης: οι ερευνητές δεν είχαν κατορθώσει να παρατηρήσουν απόκλιση της καθοδικής δέσμης, όταν αυτή περνούσε μεταξύ των πλακών ενός πυκνωτή τοποθετημένου στο εσωτερικό του καθοδικού σωλήνα. Ήταν απολύτως γνωστό ότι το μαγνητικό πεδίο προκαλούσε απόκλιση της δέσμης προς την κατεύθυνση που απέκλιναν αρνητικά φορτισμένα κινούμενα σωματίδια. Κάθε προσπάθεια, ωστόσο, να προκληθεί ηλεκτροστατική απόκλιση κατέληγε σε αρνητικό αποτέλεσμα. (Ήταν το πρώτο εμπόδιο που προσπάθησε να ξεπεράσει ο Thomson.)

Η συγκεκριμένη δυσκολία οδήγησε στη μελέτη ενός αποτελέσματος που είχε προκύψει από την έρευνα του Perrin. Στο άκρο του σωλήνα που βρίσκεται απέναντι από την κάθοδο, ο Perrin τοποθέτησε μια ηλεκτρομετρική κάψα και συνέλεξε αρνητικό φορτίο, όπως φάνηκε στο ηλεκτροσκόπιο με το οποίο ήταν συνδεδεμένη η κάψα. Τέθηκε, λοιπόν, το ερώτημα: το φορτίο που συλλέχτηκε με τον τρόπο αυτό συνδέεται άρρηκτα με την καθοδική δέσμη ή εμφανίστηκε ανεξάρτητα απ' αυτή;

Σ' αυτή την κρίσιμη στιγμή, στο τέλος του 1896, ο Thomson επιχείρησε τα διάσημα πειράματά του, τα οποία οδήγησαν στον προσδιορισμό του λόγου «φορτίο προς μάζα» της καθοδικής δέσμης.

10.4 Τα πειράματα του Thomson

Ο Thomson (1897) ξεκίνησε μια προσπάθεια να επιλύσει τη διαμάχη για τη φύση των καθοδικών ακτίνων. Αναφερόμενος στη σωματιδιακή και την κυματική υπόθεση (που αντικρούονται αμοιβαία), αποκαλύπτει ορισμένους παράγοντες που διαμόρφωσαν τη σκέψη του:

Η θεωρία των ηλεκτρισμένων σωματιδίων, για ερευνητικούς σκοπούς, έχει μεγάλο προτέρημα έναντι της θεωρίας του αιθέρα: είναι συγκεκριμένη και τα συμπεράσματά της ελέγχιμα. Στο πλαίσιο της θεωρίας του αιθέρα, είναι αδύνατο να προβλέψουμε τι θα συμβεί σε δεδομένες συνθήκες, επειδή ασχολούμαστε με φαινόμενα του αιθέρα, που μέχρι τώρα δεν τα έχουμε παρατηρήσει και αγνοούμε τους νόμους που τα διέπουν. Τα επόμενα πειράματα επινοήθηκαν για να ελεγχθούν ορισμένες συνέπειες της θεωρίας των φορτισμένων σωματιδίων.

Αρχικά, ο Thomson επανέλαβε το πείραμα του Perrin με την ηλεκτρομετρική κάψα (βλ. εδάφιο 10.3). Δεν την τοποθέτησε, ωστόσο, στο τέλος του σωλήνα απέναντι από την κάθοδο· την έκρυψε στην πλευρά του σωλήνα στην οποία δεν κατέληγε άμεσα η καθοδική δέσμη, όταν δεν απέκλινε. Όταν λειτουργούσε ο σωλήνας, στο ηλεκτρόμετρο δεν εμφανιζόταν φορτίο. Όταν, ωστόσο, η δέσμη απέκλινε μαγνητικά και εισερχόταν στην κάψα, το ηλεκτρόμετρο συνέλεγε αρνητικό φορτίο. Ο Thomson γράφει:

Αυτό το πείραμα δείχνει ότι, όσο κι αν στρέψουμε και αποκλίνουμε τη δέσμη, ασκώντας μαγνητικές δυνάμεις, οι ακτίνες ακολουθούν παρόμοια διαδρομή με τον αρνητικό ηλεκτρισμό. Ο αρνητικός ηλεκτρισμός, λοιπόν, συνδέεται άρρηκτα με τις καθοδικές ακτίνες.

Αν και σ' εμάς φαίνεται εύλογη η προσπάθεια του Thomson, πολλοί μαθητές δυσκολεύονται να αντιληφθούν γιατί ο Thomson μπήκε στον κόπο να εκτελέσει αυτό το συγκεκριμένο πείραμα, αν και γνώριζε τα αποτελέσματα του Perrin. Δυσκολεύονται, επίσης, να αντιληφθούν την αξία της προσπάθειας. Στις προηγούμενες σπουδές τους, ελάχιστοι είχαν την ευκαιρία να παρακολουθήσουν αυτό το είδος σκέψης. Άλλωστε, είναι κάτι που απουσιάζει από τις συμβατικές ασκήσεις που υπάρχουν στο τέλος κάθε κεφαλαίου.

Κατόπιν, ο Thomson ασχολήθηκε με το πρόβλημα της ηλεκτροστατικής απόκλισης:

Αντίρρηση που συχνά προβάλλεται ενάντια στην άποψη ότι οι καθοδικές ακτίνες αποτελούνται από αρνητικά φορτισμένα σωματίδια είναι

ότι μέχρι τώρα δεν έχουμε παρατηρήσει απόκλιση των ακτίνων υπό την επίδραση μικρής ηλεκτροστατικής δύναμης... Ο Hertz σε πείραμά του κατάφερε να ταξιδέψουν οι ακτίνες μεταξύ δύο παραλλήλων μεταλλικών πλακών που βρισκόνταν τοποθετημένες στο εσωτερικό ενός σωλήνα εκκένωσης. Βρήκε, ωστόσο, πως όταν οι πλάκες συνδέονταν με μια μπαταρία, οι ακτίνες δεν απέκλιναν. Επαναλαμβάνοντας το πείραμα, αρχικά πήρα το ίδιο αποτέλεσμα. Επόμενα πειράματα, ωστόσο, έδειξαν ότι η απουσία απόκλισης οφειλόταν στην αγωγιμότητα που προκαλούν οι καθοδικές ακτίνες σε αραιά αέρια. Μετρώντας την αγωγιμότητα, ανακάλυψα ότι, καθώς το αέριο γίνεται αραιότερο, η αγωγιμότητα μειώνεται. Φάνηκε, λοιπόν, ότι αν εκτελούσαμε το πείραμα του Hertz σε πολύ αραιά αέρια, υπήρχε πιθανότητα να ανιχνεύσουμε απόκλιση των καθοδικών ακτίνων από την ηλεκτροστατική δύναμη.

Επειδή τον προηγούμενο ενάμιση χρόνο ο Thomson είχε μελετήσει την αγωγιμότητα των αερίων που προκαλούν οι ακτίνες x και είχε πειραματιστεί πάνω σ' αυτήν, διαισθανόταν τον πιθανό ρόλο του φαινομένου. Αντελήφθη ότι οι καθοδικές ακτίνες, όπως ακριβώς οι ακτίνες x , προκαλούν αγωγιμότητα και είχε προετοιμαστεί να παρατηρήσει τις συνέπειες. Κατά τύχη, οι τεχνικές που πρόσφατα είχαν αναπτυχθεί τον βοήθησαν να ελέγξει τις ιδέες του, επιτυγχάνοντας αρκετά υψηλό κενό για να ελαττώσει την αγωγιμότητα:

Σε πολύ αραιά αέρια, όταν οι πλάκες αλουμινίου συνδέονταν με μπαταρία, οι ακτίνες απέκλιναν. Όταν η πάνω πλάκα συνδεόταν με τον αρνητικό πόλο της μπαταρίας και η κάτω πλάκα με τον θετικό, οι ακτίνες πιέζονταν προς τα κάτω· όταν η σύνδεση αντιστρεφόταν, οι ακτίνες ανέρχονταν. Η απόκλιση ήταν ανάλογη με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών. Μπορούσα δε να την προσδιορίσω ακόμα κι όταν η διαφορά δυναμικού ήταν μόλις δύο βολτ.

Η απόκλιση εκδηλώνόταν μόνον όταν το κενό ήταν αρκετά υψηλό. Το ότι η απουσία απόκλισης οφειλόταν στην αγωγιμότητα του μέσου, αποδεικνυόταν από τον τρόπο με τον οποίο άρχιζε να εκδηλώνεται η απόκλιση τη στιγμή που το κενό ήταν ικανοποιητικό. Εκείνη τη στιγμή, μόλις συνδέαμε τις πλάκες με τα άκρα της μπαταρίας, οι ακτίνες απέκλιναν. Διατηρώντας, ωστόσο, τη σύνδεση, η φθορίζουσα κηλίδα γλιστρούσε πάλι στη θέση που είχε όταν δεν υπήρχε απόκλιση. Το ίδιο ακριβώς συνέβαινε όταν ο χώρος μεταξύ των πλακών ήταν αγωγίμος. Η συγκεκριμένη αγωγιμότητα, ωστόσο, ήταν κακής ποιότητας: τα θετικά και τα αρνητικά ιόντα που υπάρχουν μεταξύ των πλακών διαχέ-

ονται σιγά σιγά ώσπου η θετική πλάκα να καλυφθεί με αρνητικά ιόντα και η αρνητική πλάκα με θετικά. Αποτέλεσμα: η ηλεκτρική ένταση μεταξύ των πλακών εξαφανίζεται και στις καθοδικές ακτίνες δεν ασκείται πλέον ηλεκτροστατική δύναμη...

Επειδή οι καθοδικές ακτίνες μεταφέρουν αρνητικό ηλεκτρισμό, αποκλίνουν από την ηλεκτροστατική δύναμη σαν να ήταν ηλεκτρισμένες αρνητικά. Επίσης, η μαγνητική δύναμη επιδρά πάνω τους, όπως ακριβώς επιδρά πάνω σε σώματα ηλεκτρισμένα αρνητικά, αν ακολουθήσουν την ίδια πορεία με τις ακτίνες. Συμπεραίνω αναπόφευκτα, λοιπόν, ότι οι ακτίνες είναι φορτία ηλεκτρισμού που μεταφέρονται από σωματίδια ύλης.

Σήμερα, οι σωλήνες κενού είναι παρελθόν: οι μαθητές δεν συναντούν πλέον την έννοια «φορτίο χώρου» ούτε έχουν την ευκαιρία να παρακολουθήσουν τη συμπεριφορά των ιόντων σε αραιό αέριο. Σε τελικές εξετάσεις μεταπτυχιακού κύκλου, έδωσα στους φοιτητές κάθε πληροφορία για την αποτυχία των επιστημόνων να πετύχουν ηλεκτροστατική απόκλιση της καθοδικής δέσμης. Τους είπα, επίσης, ότι ο Thomson κατόρθωσε να προκαλέσει απόκλιση βελτιώνοντας τις συνθήκες κενού. Απέκρουσα, ωστόσο, ότι η δυσκολία οφειλόταν στον ιονισμό του αερίου που απέμενε στο σωλήνα. Τέλος, τους ζήτησα να εξηγήσουν το φαινόμενο περιγράφοντας γενικά τι συνέβαινε. Ελάχιστοι μεταπτυχιακοί φοιτητές μπόρεσαν να δώσουν ικανοποιητικά λογική απάντηση. Θεωρώ ότι ο συγκεκριμένος ποιοτικός φυσικός τρόπος σκέψης δεν θά 'πρεπε να απουσιάζει από μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής. Ένα πλούσιο πλαίσιο, παρόμοιο με την ερευνητική προσπάθεια που περιγράψαμε, είναι ανεκτίμητη ευκαιρία για το μαθητή να σκεφτεί και να αντιληφθεί ουσιώδεις καταστάσεις και έννοιες.

Κατόπιν, ο Thomson διεξήγαγε τις μετρήσεις οι οποίες στα περισσότερα εγχειρίδια περιγράφονται επιπόλαια. Αρχικά, εφαρμόζοντας μόνον ένα πεδίο, προσδιόρισε την απόκλιση. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας ηλεκτρικό πεδίο διασταυρούμενο με μαγνητικό, για να επαναφέρει τη δέσμη στην αρχική θέση της, εξάλειψε την άγνωστη ταχύτητα των σωματιδίων. Υπολόγισε, έτσι, το λόγο του φορτίου των υποθετικών σωματιδίων προς τη μάζα τους.

Στα περισσότερα εγχειρίδια, πολλά θέματα φυσικής παραλείπονται. Λόγου χάρη, δεν ζητείται από τους μαθητές να μελετήσουν γιατί, όταν η δέσμη αποκλίνει ηλεκτρικά ή μαγνητικά από την αρχική θέση της, το εύρος της δεν μεταβάλλεται (η κηλίδα, δηλαδή, δεν απλώνεται στην οθόνη). Δεν περνά από το μυαλό των μαθητών ότι προκύπτουν φυσικά συμπεράσματα από το τι δεν συμβαίνει, όπως ακριβώς από το τι συμβαίνει. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να τους καθοδηγήσουμε να εξετάσουν και τέτοια θέματα. Το

ότι το εύρος της δέσμης δεν μεγαλώνει ενισχύει την υπόθεση ότι οι οντότητες που υπάρχουν στη δέσμη έχουν ταυτόσημες ιδιότητες και ταχύτητες: η τροχιά τους περιγράφεται από την ίδια εξίσωση.⁵

Στην παρουσίαση των περισσότερων εγχειριδίων, η ταχύτητα των σωματιδίων απαλείφεται από τις εξισώσεις που προκύπτουν σαν να μην παρουσιάζει ενδιαφέρον. Από τη λύση των εξισώσεων προσδιορίζεται ο λόγος του φορτίου προς τη μάζα. Ο Thomson, ωστόσο, δεν ακολούθησε αυτή την πορεία. Υπολόγισε την αριθμητική τιμή της ταχύτητας και έδειξε ότι είναι της τάξης του ενός δεκάτου της ταχύτητας του φωτός. Υποστήριξε ότι αυτό το δεδομένο αποτελεί ισχυρή ένδειξη κατά της υπόθεσης του Lenard για την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής στον αέρα. Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιμετωπίσουν και τέτοια θέματα.

Υπάρχει ένα θέμα στο οποίο ο Thomson δεν επέμεινε, επειδή είναι τετριμμένο για κάθε φυσικό: δεν είναι, ωστόσο, τετριμμένο για τους μαθητές. Κατά την παρουσίαση των πειραμάτων του Thomson, επισημαίνω στους μαθητές ότι, αν και υπάρχει σημαντική ηλεκτρική και μαγνητική απόκλιση της καθοδικής δέσμης, δεν υπάρχει παρατηρήσιμη βαρυτική απόκλιση. Κατόπιν, τους ρωτώ πώς εξηγούν αυτό το γεγονός. Πολλοί μαθητές (ακόμα και μεταπτυχιακοί φοιτητές σε τελικές εξετάσεις αξιολόγησης) απαντούν ότι η βαρυτική απόκλιση είναι ελάχιστη, επειδή η μάζα των σωματιδίων είναι ελάχιστη. Δεν επικαλούνται αμέσως όσα υποτίθεται ότι έμαθαν, ότι, δηλαδή, το y δεν εξαρτάται από τη μάζα, ούτε συνδέουν το μικρό μέγεθος της απόκλισης με την τεράστια τιμή της ταχύτητας. Η ευκαιρία που δίνεται στους μαθητές να εφαρμόσουν μακροσκοπικές έννοιες που τις έχουν ήδη συναντήσει σε απολύτως νέα γι' αυτούς φαινόμενα του μικρόκοσμου, τους βοηθά σημαντικά να αφομοιώνουν τις έννοιες.

Τέλος, σε σωλήνες με ηλεκτρόδια διαφόρων μετάλλων (αλουμινίου, λευκοχρύσου και σιδήρου), ο Thomson προσδιόρισε το λόγο του φορτίου προς τη μάζα (στην πραγματικότητα, προσδιόρισε το λόγο της μάζας προς το φορτίο στις παλιές ηλεκτροστατικές μονάδες του συστήματος cgs). Τα αποτελέσματά του (απολύτως ανακριβή με σύγχρονα κριτήρια) καλύπτουν μια σχετικά στενή περιοχή τιμών, αν λάβουμε υπόψη μας το μεγάλο εύρος σφαλμάτων και την απροσδιοριστία που υπήρχε σ' αυτή την πρώτη προσπάθεια.

5. Αξίζει να επισημάνουμε ότι δέσμη θετικών ιόντων, που σχηματίζεται (αφού τα ιόντα επιταχυνθούν μεταξύ κατάλληλων ηλεκτροδίων) μακριά από την περιοχή του ιονισμένου αερίου, «απλώνεται», *όντως*, όταν αποκλίνει μαγνητικά, επειδή δεν είναι ομογενής ως προς την ταχύτητα των ιόντων. Ακριβώς γι' αυτό, στο φασματογράφο μάζας είναι απαραίτητος ο επιλογέας ταχύτητας. Πολλοί μεταπτυχιακοί φοιτητές, ωστόσο, έχουν ξεχάσει απολύτως αυτά τα θέματα, επειδή δεν τους δόθηκε η ευκαιρία να εξετάσουν τα αντίστοιχα φαινόμενα. Το υπόβαθρο, λοιπόν, πρέπει να δημιουργείται σε μια εισαγωγική σειρά μαθημάτων.

10.5 Τα συμπεράσματα του Thomson

Στο άρθρο που δημοσίευσε, ο Thomson επισημαίνει ορισμένα συστηματικά σφάλματα που θεωρούσε ότι μειώνουν την τιμή του λόγου του φορτίου προς τη μάζα. Στις συνθήκες αυτές, ωστόσο, δεν πάσχιζε να πετύχει υψηλή ακρίβεια. Ενδιαφέρθηκε περισσότερο για την τάξη μεγέθους του λόγου. Προσπάθησε, επίσης, να ελέγξει αν ο λόγος αυτός, ο οποίος συνδέεται με τις καθοδικές ακτίνες, έχει μεγάλο εύρος μεταβολής· κάτι που, ως γνωστόν, συμβαίνει στην ηλεκτροδύση και στην αγωγιμότητα των αερίων (λόγω της ποικιλίας των ιόντων που υπεισέρχονται σε τούτα τα φαινόμενα).

Το αποτέλεσμα όλων των μετρήσεών του βρίσκεται στο διάστημα μεταξύ των τιμών $0,67 - 0,9 \cdot 10^{11}$ C/Kg (αν τις μετατρέψουμε στο σύγχρονο σύστημα μονάδων). Το συγκεκριμένο εύρος τιμών είναι πολύ μικρότερο από το εύρος των αντίστοιχων τιμών που είχαν παρατηρηθεί για διαφορετικά ιόντα στην ηλεκτροδύση. Παρόμοιο, επίσης, ήταν το εύρος του πειραματικού σφάλματος. Ο Thomson, λοιπόν, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι σε όλα τα είδη καθοδικών ακτίνων (ανεξάρτητα από το υλικό του ηλεκτροδίου και το είδος του αραιού αερίου), η τιμή του λόγου του φορτίου προς τη μάζα των αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων είναι μοναδική. Υπέθεσε, επίσης, ότι αν μπορούσαμε να προσδιορίσουμε ξεχωριστά την τιμή της μάζας και του φορτίου, είναι πολύ πιθανό να βρούμε την ίδια τιμή για όλα τα σωματίδια. Στη μελέτη του, με το γράμμα m συμβόλισε τη μάζα των σωματιδίων και με το ειδικό σύμβολο e συμβόλισε το φορτίο (δηλαδή, δεν χρησιμοποίησε το σύνηθες σύμβολο του φορτίου). Το σύμβολο e/m χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα.

Από την ομοιομορφία της δέσμης που αντανακλάται στο ότι 1) κατά την ηλεκτροστατική απόκλιση η κηλίδα δεν απλώνεται (που σημαίνει ότι, επειδή για όλα τα σωματίδια της δέσμης η ποσότητα e/mv_x^2 είναι η ίδια, όταν τα σωματίδια επιταχύνονται από ορισμένη διαφορά δυναμικού, «πέφτουν» με τον ίδιο τρόπο), και 2) στο ότι οι ταχύτητες των σωματιδίων είναι ίδιες μεταξύ τους (όπως προκύπτει με τη βοήθεια διασταυρούμενων πεδίων), προκύπτει ότι τα σωματίδια προέρχονται από την περιοχή που γειτονεύει άμεσα με την κάθοδο: ή τα αποβάλλει η ίδια η κάθοδος ή δημιουργούνται λόγω ιονισμού του αερίου κοντά στην κάθοδο. (Σήμερα γνωρίζουμε, βέβαια, ότι τα σωματίδια αποβάλλονται από την κάθοδο λόγω του πεδίου.)

Για να αναδειχθεί η φυσική σημασία του λόγου του φορτίου προς τη μάζα, ο Thomson πρότεινε να συγκριθεί άμεσα η τιμή του λόγου με ικανοποιητικά προσδιορισμένες τιμές που προκύπτουν στην ηλεκτροδύση. Λόγου χάρη, για τα ιόντα του υδρογόνου ισχύει:

$$\frac{q_{\text{H}}}{m_{\text{H}}} = \frac{96.500}{0,0010} = 9,6 \cdot 10^7 \text{ C/Kg}$$

Για το οξυγόνο, ωστόσο, η αντίστοιχη τιμή είναι: $1,2 \cdot 10^7 \text{ C/Kg}$. Εκείνη την εποχή, ο λόγος του φορτίου των ιόντων που δημιουργούνται με ακτινοβολία των αερίων προς τη μάζα τους είχε προσδιοριστεί με μικρότερη ακρίβεια. Ήταν γνωστό, ωστόσο, ότι η τάξη μεγέθους ήταν παρόμοια.

Ορισμένοι καθηγητές θεωρούν προφανές το ότι οι αριθμητικές τιμές δεν παρέχουν από μόνες τους πληροφορίες και το ότι οι πληροφορίες και τα συμπεράσματα προκύπτουν, κυρίως, μέσω της σύγκρισης των μεγεθών. Πολλοί μαθητές, όμως, δεν έχουν μάθει στη διάρκεια των σπουδών τους να εκτιμούν αυτήν τη διαπίστωση. Η παρούσα ανάλυση αποτελεί ζωντανό και πολύτιμο παράδειγμα. Για το λόγο του φορτίου προς τη μάζα ο Thomson παρατηρεί:

Η τιμή του λόγου e/m των φορέων ηλεκτρισμού στις καθοδικές ακτίνες είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή που προκύπτει στην ηλεκτρολύση. Τούτη η διαφορά είναι δυνατό να οφείλεται ή στο ότι το m είναι πολύ μικρό ή στο ότι το e είναι πολύ μεγάλο ή σε κάποιο συνδυασμό τους. Στις καθοδικές ακτίνες οι φορείς του φορτίου έχουν μικρότερο μέγεθος από το μέγεθος των μορίων. Τούτο νομίζω ότι αποδεικνύεται από το αποτέλεσμα του Lenard· δηλαδή, από το ρυθμό μείωσης της [φθορίζουσας] ακτινοβολίας που παράγεται από τις ακτίνες, όταν μειώνεται το διάστημα που διανύει η ακτίνα.

Στο εδάφιο 10.2, επισημάναμε ότι εκείνη την εποχή η τάξη μεγέθους της μέσης ελεύθερης διαδρομής και της ατομικής-μοριακής διάστασης είχε προσδιοριστεί. Ο Thomson, λοιπόν, χρησιμοποίησε την πληροφορία αυτή για να ερμηνεύσει τα δεδομένα. Η τάξη μεγέθους της μέσης ελεύθερης διαδρομής ήταν γνωστό ότι, σε συνθήκες κανονικής ατμοσφαιρικής πίεσης, είναι $1.000 \text{ \AA}$. Από αυτό το δεδομένο είχε προσδιοριστεί ότι η ατομική δέσμη σκεδάζεται και είναι αδύνατο πλέον να ανιχνευτεί, αφού διανύσει δεκαπλάσια απόσταση. Ο Thomson, λοιπόν, θεώρησε πως το δεδομένο του Lenard, ότι, δηλαδή, η δέσμη εισχωρεί περίπου ένα ή δύο εκατοστά, δείχνει ότι η μάζα των σωματιδίων της καθοδικής δέσμης είναι μικρή. Αυτό με τη σειρά του σημαίνει, βέβαια, ότι υπάρχουν υποατομικές οντότητες.

Είναι απαραίτητο να κατευθύνουμε τους μαθητές να σκεφτούν γιατί έχουμε την τάση τη διαφορά μεταξύ της τιμής του e/m στις καθοδικές ακτίνες και της τιμής του ίδιου μεγέθους στην ηλεκτρολύση να την αποδίδουμε στη διαφορά του e και όχι στη διαφορά του m ή στη διαφορά και των δύο

μεγεθών. (Στο απόσπασμα που παραθέσαμε, ο Thomson, αν και μνημονεύει κάθε ενδεχόμενο, απορρίπτει τα δύο τελευταία χωρίς πολλή συζήτηση.) Πρόκειται, επίσης, για είδος σκέψης με το οποίο σπάνια οι μαθητές έχουν την ευκαιρία να ασχοληθούν. Τους παρουσιάζουμε καθετί με εξευγενισμένο τρόπο και ως αναπόφευκτο φαινομενικά συμπέρασμα. Το να αντιληφθούν οι μαθητές τη σημασία της πίστης στην απλότητα και στην τάξη που υπάρχει στη φύση, χρησιμοποιώντας κατάλληλη μέθοδο συλλογισμού και επαγωγικών υποθέσεων που βασίζονται σε αυτή την πίστη, είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό: τους βοηθά να συλλάβουν με απτό τρόπο τα χαρακτηριστικά της επιστημονικής σκέψης· κάτι που δεν συμβαίνει αν απουσιάζει αυτή η διανοητική εμπειρία. Ιδού, λοιπόν, ένα συστατικό της επιστημονικής καλλιέργειας.

Η ιστορία ολοκληρώθηκε σύντομα σε λίγα επεισόδια. Την εποχή που ο Thomson εκτελούσε τα πειράματα που προαναφέραμε, ο Zeeman, εργαζόμενος υπό την επίβλεψη του H. A. Lorentz, ανακάλυψε τη διαίρεση των φασματικών γραμμών υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου. Ο Lorentz, έχοντας συλλάβει βαθιά την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell, καθοδήγησε τον Zeeman να διατυπώσει την κλασική ερμηνεία του. Ο Zeeman προσδιόρισε, επίσης, ότι η τιμή του e/m , που συνδέεται με τη διαίρεση των γραμμών, είναι της τάξης του 10^{11} C/Kg. Αυτό το αποτέλεσμα έδειχνε ότι οντότητες με τον συγκεκριμένο λόγο φορτίου προς μάζα δεν εμφανίζονται μόνο σε ελεύθερη κατάσταση στις καθοδικές ακτίνες, αλλά υπάρχουν, επίσης, δέσμιες στη δομή του ατόμου.

Το 1899, ο Thomson δημοσίευσε ένα άρθρο στο οποίο έδειχνε ότι το ηλεκτρικό φορτίο που αποβάλλεται από τα μέταλλα, όταν πέσει πάνω τους υπερώδης ακτινοβολία (φωτοηλεκτρικό φαινόμενο), συνδέεται με οντότητες που έχουν το ίδιο e/m με των καθοδικών ακτίνων. Ο γιος του, G. P. Thomson, σε μια διάλεξη, το 1956, παρατήρησε:

Στο ίδιο άρθρο έδειξε ότι τα αρνητικά σωματίδια που αποβάλλονται από θερμό σύρμα έχουν περίπου το ίδιο e/m . Έτσι, η απόδειξη ολοκληρώθηκε. Αντιρρήσεις στην ιδέα της ύπαρξης μικρότερων σωματιδίων από το άτομο συνέχισαν να υπάρχουν. Ήταν, ωστόσο, οι «σπαρμοί» της παλιάς φυσικής που πέθαινε — «μυϊκή» λειτουργία, παρά διανοητική.

(Στη δημοσίευση της ομιλίας [Thomson, G. P. (1956)] υπάρχουν περισσότερες λεπτομέρειες και χρησιμοποιούνται διαφορετικοί όροι.)

10.6 Το πείραμα του Thomson: γραπτή εργασία για το σπίτι

Πριν αρχίσουμε τη μελέτη του πειράματος του Thomson, είναι αποκαλυπτικό το να ζητήσουμε από τους μαθητές να γράψουν σε μια σελίδα πώς αντιλαμβάνονται το νόημα της λέξης «ηλεκτρόνιο» και πώς μάθαμε για την ύπαρξη αυτής της οντότητας. Τα ντοκουμέντα που προκύπτουν αποτελούν αυτόνομο αντικείμενο σοβαρής μελέτης. Οι περισσότεροι μαθητές γράφουν ασυναρτησίες. Από τις πρώτες τάξεις του σχολείου έχουν ακούσει τον όρο· ουδέποτε, ωστόσο, συνέλαβαν το επιστημονικό νόημά του. Μισοθυμούνται, απλώς, χωρίς λεπτομέρειες την ορολογία. Στη σκέψη τους έχουν εμφυτευθεί ατελείς όροι και ακατανόητες τελικές διακηρύξεις. Ελάχιστοι μαθητές, ωστόσο, διαθέτουν την απαραίτητη αυτογνωσία για να αναφέρουν ότι ουδέποτε κατανόησαν την ορολογία: ότι, δηλαδή, δεν έχουν ιδέα τι σημαίνει ο όρος ούτε πώς μάθαμε για την ύπαρξη αυτής της οντότητας.

Στο παράρτημα που υπάρχει στο τέλος του παρόντος Κεφαλαίου, περιγράφεται λεπτομερώς μια γραπτή εργασία για το σπίτι. Η άσκηση στηρίζεται σε ερωτήσεις σωκρατικού τύπου. Την έχω χρησιμοποιήσει επί πολλά χρόνια σε συνδυασμό με τη μελέτη του πειράματος του Thomson, που περιγράψαμε προηγουμένως. Οδηγεί τους μαθητές να ασχοληθούν με ερωτήσεις του τύπου: «Πώς γνωρίζουμε ότι...;», «Γιατί πιστεύουμε ότι...;» σχετικά με τα ηλεκτρόνια. Εκμεταλλευόμαστε, επίσης, την ευκαιρία της ανακύκλησης των φυσικών εννοιών που αναπτύξαμε σε προηγούμενα μαθήματα. Όπως επανειλημμένα έχουμε επισημάνει, μόνο μέσω της ανακύκλησης των εννοιών σε πλουσιότερο πλαίσιο οι μαθητές αφομοιώνουν τη βασική ύλη. Την πρώτη φορά που συναντούν τις έννοιες, ελάχιστοι αφομοιώνουν το νόημά τους.

Η άσκηση ακολουθεί αρκετά πιστά την πορεία της σκέψης του Thomson και τον τρόπο που περιέγραψε το πείραμά του. Σε ορισμένα σημεία, ωστόσο, ξεφεύγει από το άρθρο του. Ο Thomson δεν επεκτάθηκε στη μελέτη της αμελητέας επίδρασης της βαρύτητας πάνω στην καθοδική δέσμη. Συντόμευσε την απόδειξη της σχέσης που εκφράζει την απόκλιση της δέσμης, λαμβάνοντας υπόψη του την επίδραση μόνον ενός πεδίου. Οι μαθητές, ωστόσο, δυσκολεύονται να παρακολουθήσουν τις εξιδανικεύσεις και τις προσεγγίσεις του. Επινοήσαμε, λοιπόν, μια ακολουθία ερωτήσεων σωκρατικού τύπου. Έτσι οι μαθητές μπορούν να μελετήσουν άμεσα ορισμένα σημεία που ο Thomson θεώρησε δικαιολογημένα ότι για αναγνώστη επαγγελματία ερευνητή είναι περιττά.

Η εμπειρία μου από την άσκηση αυτή είναι απολύτως θετική. Αρχικά, ορισμένοι μαθητές τη θεωρούν πρόσθετο φορτίο (έχουν συνηθίσει να λύνουν τα προβλήματα που υπάρχουν στο τέλος των κεφαλαίων, χωρίς να αναπτύσσουν περιφραστικά οποιαδήποτε σκέψη τους). Οι περισσότεροι, ωστόσο, προχωρώντας και αφομοιώνοντας τη σύνθεση, αντιλαμβάνονται

ότι πρόκειται για πολύτιμη εμπειρία που τους βοηθά. Πολλοί εκπλήσσονται ιδιαίτερα από τη σύνδεση που ανακαλύπτουν, χωρίς να το περιμένουν, μεταξύ εννοιών που έχουν μελετήσει σε προηγούμενα μαθήματα. Η έκπληξη τους αφορά έννοιες που μελέτησαν πριν από πολύ καιρό και έκτοτε παρέμειναν στον περιθώριο. Σε αυτή την περίπτωση, η αθωότητα των μαθητών δείχνει τη σημασία της ανακύκλησης των εννοιών, ιδιαίτερα αν συντελείται σε αρκετά απλό και κατανοητό πλαίσιο που, από εννοιολογική άποψη, δεν στερείται, ωστόσο, δύναμης και σημασίας.

10.7 Η στοιχειώδης ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου

Πολλοί επιστήμονες του 19ου αιώνα θεωρούσαν ότι ο νόμος της ηλεκτρολύσεως του Faraday αποτελεί ένδειξη της ατομικότητας του ηλεκτρικού φορτίου. Η αναφορά του Helmholtz το 1881 σε μια διάλεξη του Faraday στο Βασιλικό Ίδρυμα είναι τυπικό δείγμα:

Ίσως το εκπληκτικότερο αποτέλεσμα του νόμου του Faraday [για την ηλεκτρολύση] είναι το εξής: αν δεχτούμε την υπόθεση ότι οι στοιχειώδεις ουσίες αποτελούνται από άτομα, συμπεραίνουμε αναπόφευκτα ότι τόσο ο θετικός όσο και ο αρνητικός ηλεκτρισμός διαιρούνται σε στοιχειώδεις ποσότητες που συμπεριφέρονται ως άτομα ηλεκτρισμού.

Επειδή η τάξη μεγέθους του αριθμού του Avogadro ήταν γνωστή (εδάφιο 10.2), ήταν σαφές ότι η τάξη μεγέθους του στοιχειώδους φορτίου είναι 10^{-19} C. Η εν λόγω τιμή προκύπτει αν διαιρέσουμε τη σταθερά του Faraday (10^5 C) με τον αριθμό του Avogadro (10^{24}). Ο Townsend προσπάθησε να μετρήσει άμεσα αυτή την τιμή, μελετώντας το συνολικό φορτίο που μεταφέρει ένα νέφος σταγόνων νερού μέσα σε αέριο που έχει ακτινοβοληθεί με ακτίνες x. Ο Thomson βελτίωσε την τεχνική του Townsend και κατέγραψε τιμές μεταξύ $1,8 \cdot 10^{-19}$ και $2,8 \cdot 10^{-19}$ C. Όπως είναι γνωστό, ακριβής μέτρηση επιτεύχθηκε από τον Millikan με το πείραμα της σταγόνας λαδιού. Για πρώτη φορά το αποτέλεσμα του πειράματος δημοσιεύθηκε το 1911. Από τότε για πολλά χρόνια το πείραμα βελτιωνόταν συνεχώς.

Πολλά εγχειρίδια μελετούν ικανοποιητικά το πείραμα του Millikan. Είναι περιττό, λοιπόν, να το αναλύσουμε λεπτομερώς. Σημαντικό στοιχείο, που απουσιάζει, ωστόσο, από πολλές παρουσιάσεις, είναι ότι ο μαθητής έχει την ευκαιρία να παρακολουθήσει πώς γίνεται η διαλογή των πραγματικών πειραματικών δεδομένων. [Ο Holton (1978) παρουσιάζει μια χρήσιμη παιδαγωγική ανάλυση του τρόπου με τον οποίο ο Millikan επεξεργάστηκε τα δεδομένα του.]

Υπάρχει μια διατύπωση που αξίζει να την προσέξουμε. Σε πολλά εγ-

χειρίδια και προφορικές παρουσιάσεις, παραδοσιακά, πλέον, αναφέρεται ότι «ο Millikan μέτρησε το φορτίο του ηλεκτρονίου». Η ιστορία του όρου «ηλεκτρόνιο» είναι μακρά και σύνθετη. Σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής, αν ασχοληθούμε μ' αυτή, το κέρδος είναι μικρό. Στις πρώτες αναφορές ο όρος «ηλεκτρόνιο» χρησιμοποιείται για να περιγραφεί η στοιχειώδης ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου ανεξάρτητα από το φορέα της. Στη σύγχρονη ορολογία, ωστόσο (που αποκρυσταλλώθηκε στην αρχή της δεκαετίας του 1900), ο όρος «ηλεκτρόνιο» σημαίνει το σωματίδιο που περιέχεται στις καθοδικές ακτίνες και στη δομή των ατόμων. Μ' αυτόν τον τρόπο, επίσης, οι μαθητές αντιλαμβάνονται τον όρο. Στο πλαίσιο της σύγχρονης ορολογίας, λοιπόν, είναι απολύτως παραπλανητική η διατύπωση: «ο Millikan μέτρησε το φορτίο του ηλεκτρονίου», διότι δημιουργείται η εντύπωση ότι ο Millikan ασχολήθηκε άμεσα με τα ηλεκτρόνια.

Ο Millikan μέτρησε απλώς το μέγεθος του παρατηρούμενου στοιχειώδους φορτίου το οποίο ήταν συγκεντρωμένο σε μια σταγόνα λαδιού που βρισκόταν σε ιονισμένο αέριο. Αν και ορισμένα ιόντα ήταν ηλεκτρόνια, αυτό δεν συνέβαινε, ενδεχομένως, με τα περισσότερα. Η σύνδεση με τα σωματίδια των καθοδικών ακτίνων ήταν, βεβαίως, άμεση. Είναι, ωστόσο, απαραίτητο να θυμόμαστε ότι επρόκειτο για εύλογη υπόθεση που στηριζόταν στην πίστη ότι η φύση είναι απλή (πώς είναι δυνατό να υπάρχει παντού απόλυτη ηλεκτρική ουδετερότητα, αν τα στοιχειώδη φορτία δεν είναι ταυτόσημα μεταξύ τους;) και όχι στην άμεση μελέτη των ηλεκτρονίων. Η ιστορία αυτή είναι περίφημο παράδειγμα του τρόπου εργασίας και προόδου της επιστημονικής σκέψης. Είναι, επίσης, ευκαιρία για να διευρυνθεί η επιστημονική καλλιέργεια των μαθητών. Αν χρησιμοποιήσουμε, ωστόσο, τη λανθασμένη διατύπωση: «ο Millikan μέτρησε το φορτίο του ηλεκτρονίου», η ευκαιρία χάνεται.

10.8 Από το ηλεκτρόνιο του Thomson στο άτομο του Bohr

Για να γνωρίσουν οι μαθητές την ιστορία της σύγχρονης φυσικής (τουλάχιστον ως τη διαμόρφωση της εικόνας για τη δομή του ατόμου), εκτός από τα δύο θέματα που προαναφέραμε, πρέπει να μελετήσουν ορισμένα θέματα που είναι απαραίτητα για να παρουσιαστούν τα γεγονότα με συνεκτικό, εύλογο και κατανοητό τρόπο. Ειδικά, περιοριζόμαστε στην αποσπασματική διακήρυξη τελικών συμπερασμάτων. Στο παρόν βιβλίο είναι αδύνατο να παρακολουθήσουμε λεπτομερώς την ακολουθία των ιστορικών γεγονότων. Απαιτείται περισσότερος χρόνος: τα εννοιολογικά και μαθηματικά θέματα που υπεισέρχονται ξεφεύγουν από το επίπεδο ενός εισαγωγικού μαθήματος. Είναι απολύτως εφικτό, ωστόσο, να δημιουργήσουμε μια σειρά ερωτήσεων του είδους «Πώς γνωρίζουμε ότι...;», «Γιατί πιστεύουμε

ότι...;» παρουσιάζοντας τα κατάλληλα ιστορικά γεγονότα. Διατηρείται, έτσι, η λογική συνέχεια της παρουσίασης. Εκμεταλλευόμαστε, επίσης, την ευκαιρία να επανέλθουμε σε παλαιότερες έννοιες. Τέλος, δικαιολογείται η εγκατάλειψη της κλασικής θεωρίας. [Στο βιβλίο μου «Developments of Concepts of Physics» (1965) υπάρχει μια παρουσίαση που βασίζεται, κυρίως, στα ιστορικά δεδομένα. Υπάρχουν, ωστόσο, παρουσιάσεις που, αν και ξεφεύγουν από τα ιστορικά δεδομένα, έχουν συνοχή και λογική· λόγου χάρη, η παρουσίαση που υπάρχει στο βιβλίο «PSSC Physics».]

Για την παρουσίαση των ιστορικών γεγονότων ουσιαστικά θέματα είναι: 1) το γραμμικό φάσμα των αερίων, η σύνδεσή του με την απορρόφηση και την εκπομπή του φωτός από επιταχυνόμενα φορτισμένα σωματίδια και ο εμπειρικός προσδιορισμός της σχέσης Balmer-Rydberg στη σειρά των φασματικών γραμμών του ατόμου του υδρογόνου· 2) η φύση και οι ιδιότητες της ραδιενεργού εκπομπής· 3) ο προσδιορισμός των ατομικών διαστάσεων και η επινόηση του πυρηνικού προτύπου, και 4) το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η έννοια του φωτονίου. (Είναι, βεβαίως, δυνατό να εμβαθύνουμε σε τούτα τα θέματα και να ανακαλύψουμε τις μεταξύ τους σχέσεις αν συμπεριλάβουμε θέματα όπως ο ρόλος της ραδιενεργού διάσπασης στη μεταστοιχείωση, οι ακτίνες θετικού φορτίου και τα ισότοπα, οι ιδιότητες των ακτίνων x κ.ά. Σε ένα εισαγωγικό μάθημα, ίσως, δεν υπάρχει χρόνος για την παρουσίαση αυτών των θεμάτων. Η παράλειψή τους δεν καταστρέφει, ωστόσο, τη συνοχή των ιστορικών γεγονότων που επιλέξαμε.)

Στο επόμενο εδάφιο (10.9) μελετάμε αναλυτικά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Τα υπόλοιπα ουσιαστικά θέματα παρουσιάζονται ικανοποιητικά σε αρκετές πηγές. Δεν θα τα μελετήσουμε, λοιπόν, λεπτομερώς παρά μόνο θα τα σχολιάσουμε γενικά.

1. *Το φωτεινό γραμμικό φάσμα*: Είναι αποτελεσματικό να επισημάνουμε τον παραλληλισμό μεταξύ του ρόλου των εμπειρικών νόμων του Kepler, στην ανάπτυξη της θεωρίας για τη βαρύτητα, και του ρόλου του εμπειρικού τύπου των Balmer και Rydberg, στην ανάπτυξη της θεωρίας για την ατομική δομή. Πολλοί μαθητές δεν αντιλαμβάνονται ακόμα σαφώς τι σημαίνει ο όρος «εμπειρικός». Παρακολουθώντας, λοιπόν, την περιγραφή των δύο επεισοδίων, αντιδιαστέλλουν αυτό τον όρο από τον όρο «θεωρητικός». Τα εν λόγω επεισόδια δείχνουν, επίσης, πώς η σύγχρονη επιστήμη προχωρά μέσω της σύνθεσης του εμπειρισμού του Bacon με τη διαμόρφωση νέων εννοιών και θεωριών. Δείχνουν, τέλος, πώς οι δύο διαδικασίες αλληλεπιδρούν γόνιμα. Ιδού, λοιπόν, ένα επιπλέον βήμα στην καλλιέργεια της επιστημονικής σκέψης.

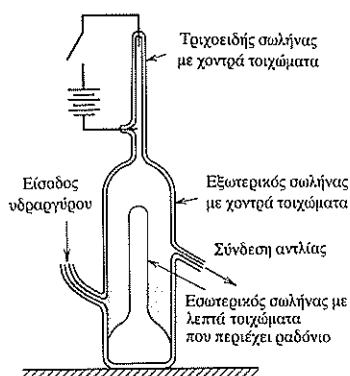
2. *Η φύση και οι ιδιότητες της ραδιενεργού εκπομπής*. Επειδή τα σωματίδια α έπαιξαν κρίσιμο ρόλο στην ανάπτυξη του πυρηνικού προτύπου της ατομικής δομής, είναι σημαντικό να τα παρουσιάσουμε με κατανοητό τρόπο. Ο Rutherford (και άλλοι επιστήμονες), μετρώντας την ηλεκτρική και

μαγνητική απόκλιση, έδειξαν ότι οι ακτίνες β έχουν τον ίδιο λόγο e/m με τα σωματίδια των καθοδικών ακτίνων. Αρχικά, ωστόσο, ο Rutherford θεωρούσε ότι οι ακτίνες α και γ δεν αποκλίνουν. Κατόπιν, υποψιάστηκε ότι το συμπέρασμά του για τα σωματίδια α είναι λανθασμένο. Απευθύνθηκε, λοιπόν, σε μια μεγάλη εταιρεία, για να χρησιμοποιήσει πολύ ισχυρότερο μαγνήτη απ' αυτόν που διέθετε. Έτσι, κατόρθωσε να προκαλέσει απόκλιση των ακτίνων α . Αφού χρησιμοποίησε ισχυρότερο μαγνήτη, μέτρηση (μέσω της μαγνητικής και ηλεκτρικής απόκλισης) το q/m και την ταχύτητα των σωματιδίων α που προέρχονται από το ράδιο και από την ουσία που προκύπτει απ' αυτό, το ραδόνιο. Αργότερα, οι μετρήσεις του επαναλήφθηκαν με μεγαλύτερη ακρίβεια [Rutherford (1903) και (1906)]. Η ταχύτητα των σωματιδίων κυμαινόταν μεταξύ $2 \cdot 10^7$ και $3 \cdot 10^7$ m/s. Επειδή η τιμή q/m συμφωνούσε με την τιμή του μορίου του υδρογόνου, αν αυτό ιονιστεί μία φορά, αλλά και με την τιμή του διπλά ιονισμένου ατόμου του ηλίου, ο Rutherford δίστασε να αποφανθεί για την ταυτότητα των σωματιδίων.

Οι Curie είχαν παρατηρήσει ότι από κάθε γραμμάριο ραδίου παράγονται ανά ώρα 80 θερμίδες θερμότητας (80 cal/g/h). Ο Rutherford (παρατηρώντας τους σπινθηρισμούς στη φθορίζουσα οθόνη) προσδιόρισε τον αριθμό των σωματιδίων α που εξέρχονται ανά μονάδα χρόνου από κάθε μονάδα μάζας ραδίου. Από την ηλεκτρική και μαγνητική απόκλιση γνώριζε, επίσης, την ταχύτητά τους. Ήταν δυνατό, λοιπόν, να προσδιορίσει την κινητική ενέργειά τους υποθέτοντας ότι τα σωματίδια α είναι άτομα ηλίου ή μόρια υδρογόνου. Στην πρώτη περίπτωση, η κινητική ενέργεια είναι δύο φορές μεγαλύτερη. Παρότι τα δεδομένα δεν ήταν ακριβή, συμφωνούσαν καλύτερα με την τιμή των Curie, αν θεωρούσε ότι πρόκειται για ήλιο.

Προηγουμένως, οι Ramsey και Soddy είχαν παρατηρήσει ότι, καθώς αέριο ραδόνιο διασπάται μέσα σε σωλήνες, στο φάσμα των αερίων που απομένουν, οι φωτεινές γραμμές που οφείλονται στην παρουσία ηλίου γίνονται εντονότερες. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε τον Rutherford στην εκτέλεση ενός αποφασιστικού πειράματος [Rutherford και Roys (1909)]. Σχηματικά το διάγραμμα της συσκευής φαίνεται στο Σχ. 10.8.1 (βλ. επόμενη σελίδα).

Αντλούμε το αέριο ραδόνιο, που παράγεται από μια ένωση ραδίου, και το διοχετεύουμε στο εσωτερικό ενός γυάλινου σωλήνα με εξαιρετικά λεπτό τοίχωμα (0,001 cm). Ο σωλήνας βρίσκεται κλεισμένος μέσα σε μεγαλύτερο αερόκενο σωλήνα με παχιά τοιχώματα. Τα σωματίδια α που προκύπτουν από τη διάσπαση του ραδονίου έχουν αρκετή ενέργεια για να διαπεράσουν το σωλήνα με το λεπτό τοίχωμα. Παγιδεύονται, ωστόσο, στο εξωτερικό δοχείο με τα παχιά τοιχώματα πάνω από ένα «πώμα» υδραργύρου. Ύστερα από αρκετό χρόνο (περίπου μία εβδομάδα), η ποσότητα του αερίου που έχει συγκεντρωθεί στο εξωτερικό δοχείο είναι αρκετή για να την εξετάσουμε φασματοσκοπικά. Προσθέτοντας, επιπλέον, υδράργυρο, το αέριο συμ-



Σχήμα 10.8.1 Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής των Rutherford και Roys, με την οποία αποδεικνύεται φασματοσκοπικά ότι το αέριο ήλιο αποτελείται από σωματίδια α .

πιέζεται στον τριχοειδή σωλήνα, στον οποίο βρίσκονται προσαρμοσμένα δύο ηλεκτρόδια. Η ηλεκτρική εκκένωση μεταξύ των ηλεκτροδίων προκαλεί εκπομπή γραμμικού φάσματος από το παγιδευμένο αέριο. Οι Rutherford και Roys κατέγραψαν με βεβαιότητα ότι εμφανίζεται το γραμμικό φάσμα του ηλίου και αποφάνθηκαν οριστικά για την ταυτότητα των σωματιδίων α .

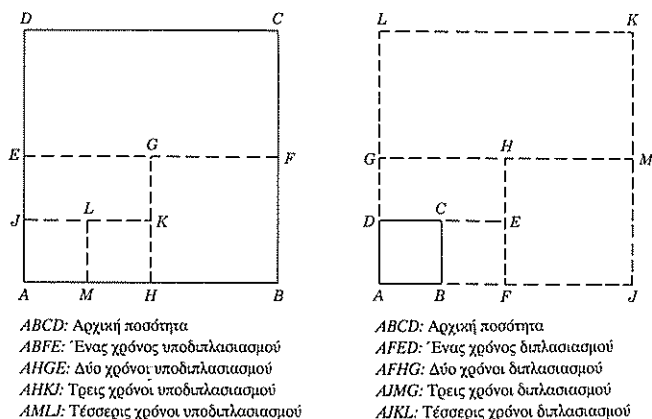
(Συμπεριλάβαμε αυτήν τη συνοπτική περιγραφή, επειδή, συνήθως, το εν λόγω εξαιρετικό πείραμα δεν περιγράφεται στα εισαγωγικά εγχειρίδια. Η συγκεκριμένη περιγραφή απαντά, επίσης, στο βασικό ερώτημα: «Πώς γνωρίζουμε ότι...;» και περιέχει την έκθεση μιας λεπτής, άμεσα κατανοητής πειραματικής τεχνικής. Τέλος, δίνεται η ευκαιρία στους μαθητές να εκτελέσουν απλούς ποιοτικούς συλλογισμούς φυσικής — μια ευκαιρία που σπάνια τους δίνεται.)

Δεύτερος σημαντικός λόγος για να ασχοληθούν οι μαθητές με τη ραδιενέργεια είναι ότι τους δίνεται η ευκαιρία να μελετήσουν την εκθετική μείωση ενός μεγέθους. Οι υπολογισμοί που υπεισέρχονται μοιάζουν με τους υπολογισμούς της εκθετικής αύξησης. Έτσι, στο παρόν στάδιο παρουσιάζεται μοναδική ευκαιρία για να συνδεθούν μεταξύ τους οι δύο διαδικασίες.

Αν απευθυνόμαστε σε μαθητές που γνωρίζουν να χρησιμοποιούν απειροστικό λογισμό στη φυσική και γνωρίζουν ήδη την εκθετική συνάρτηση, εκμεταλλευόμαστε αυτό το γεγονός. Είναι χρήσιμο να αναφερθούμε στη βασική διαφορική εξίσωση και να επισημάνουμε άμεσα φυσικές καταστάσεις που οι μαθητές έχουν συναντήσει (ή πρόκειται να συναντήσουν) στις οποίες ισχύει η ίδια διαφορική εξίσωση: λόγου χάρι, σε κύκλωμα με πυκνωτή ή πηνίο, στην εξασθένηση της πίεσης ενός αερίου που διαφεύγει από μια τρύπα ενός δοχείου, στη μεταβολή της πίεσης με το ύψος μέσα σε ισόθερμη ατμόσφαιρα, σε μια μονομοριακή χημική αντίδραση κτλ.

Δεν είναι ουσιώδες, ωστόσο, να μπορούν οι μαθητές να χειρίζονται τις διαφορικές εξισώσεις και την εκθετική συνάρτηση. Την ίδια πληροφορία λαμβάνουν με αριθμητικούς υπολογισμούς χρησιμοποιώντας την έννοια του χρόνου υποδιπλασιασμού ή διπλασιασμού. (Στην πραγματικότητα, στο χειρισμό των εν λόγω αριθμητικών προβλημάτων, οι μαθητές που γνωρίζουν να χρησιμοποιούν απειροστικό λογισμό στη φυσική, χρειάζονται τόση εξάσκηση όσο και οι μαθητές που δεν γνωρίζουν.) Επειδή, ωστόσο, είναι απαραίτητο να εκτελέσουν συλλογισμούς με λόγους, πολλοί αντιμετωπίζουν σοβαρή δυσκολία. Η δυσκολία μειώνεται σημαντικά (ενώ αυξάνεται η αυτοπεποίθηση των μαθητών στην εκτέλεση συλλογισμών με λόγους), αν δείξουμε στους μαθητές πώς να χρησιμοποιούν το απλό, συγκεκριμένο, βοηθητικό διάγραμμα του Σχ. 10.8.2. Σε τούτο το διάγραμμα παρακολουθούμε την ελάττωση και την αύξηση ενός μεγέθους κατά την παρέλευση ακέραιου αριθμού χρόνων υποδιπλασιασμού και διπλασιασμού αντίστοιχα. Ασχολούμενοι οι μαθητές με τον υπολογισμό της αύξησης ή της ελάττωσης ενός μεγέθους, έχουν μοναδική ευκαιρία να εξοικειωθούν με τη σειρά των σημαντικών άρθρων του Bartlett (1976-1979) που αναφέρονται στον κίνδυνο της ανεξέλεγκτης εκθετικής αύξησης.

3. *Οι διαστάσεις του ατόμου και το πυρηνικό πρότυπο.* Διαθέτοντας τη στοιχειώδη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου e από το πείραμα του Millikan, μπορούμε να κατευθύνουμε τους μαθητές να υπολογίσουν τον αριθμό N_0 του Avogadro από την ποσότητα ηλεκτρισμού του Faraday: $N_0 = 96.500/e$. Από τον αριθμό του Avogadro είναι δυνατό να υπολογίσουν τις διαστάσεις του ατόμου ή του μορίου, χρησιμοποιώντας τη βασική υπόθεση που για πρώτη φορά χρησιμοποίησε ο Loschmidt (βλ. εδάφιο 10.2): τα στερεά και



Σχήμα 10.8.2 Παρακολούθηση της ελάττωσης και της αύξησης ενός μεγέθους για ακέραιο αριθμό χρόνων υποδιπλασιασμού και διπλασιασμού αντίστοιχα.

τα υγρά αποτελούνται από σωματίδια που βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο. Πράγματι, τα στερεά και τα υγρά έχουν (συγκριτικά με τα αέρια) πολύ μικρή συμπιεστότητα.

Αν υπολογίσουμε τον όγκο ενός μορίου νερού ($18/N_0$), όταν το νερό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, και θεωρήσουμε ότι η ενεργός διάμετρος του μορίου ισούται με την ακμή ενός κύβου που έχει αυτόν τον όγκο, λαμβάνουμε μια αρκετά εύλογη τιμή της διαμέτρου (περίπου $3\text{\AA}$). (Συνήθως, οι μαθητές βρίσκουν έτοιμο το τελικό αποτέλεσμα αυτού του απλού υπολογισμού. Σπάνια τον εκτελούν μόνοι τους. Σπάνια, επίσης, ασχολούνται με τη «στρογγύλευση» του αποτελέσματος σε ένα σημαντικό ψηφίο: συνήθως, καταγράφουν και τα οκτώ ή δέκα ψηφία που εμφανίζονται στην οθόνη του υπολογιστή χειρός.)

Είναι σημαντικό να υπογραμμίζουμε στους μαθητές ότι οι αριθμητικές τιμές από μόνες τους έχουν ελάχιστο ή και καθόλου νόημα. Πολύτιμη άσκηση για το σπίτι (που σπάνια τη βρίσκουμε σε εγχειρίδια) είναι η εξής: ο μαθητής, αφού ολοκληρώσει τον υπολογισμό, συγκρίνει το μέγεθος του ατόμου-μορίου με το μήκος κύματος των υπερήχων, του ορατού φωτός και των ακτίνων x . Το συγκρίνει, επίσης, με το μικρότερο μέγεθος που μπορεί να διακρίνει ένα καλό μικροσκόπιο και με το μέγεθος των ανωμαλιών μιας επιφάνειας η οποία με γυμνό μάτι φαίνεται λεία. Το συγκρίνει, τέλος, με τη μέση απόσταση των μορίων ενός αερίου που βρίσκεται σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση.

Η τελευταία σύγκριση είναι άριστη ευκαιρία για να ξαναθυμηθεί ο μαθητής τη γεωμετρική αλλαγή κλίμακας σε σοβαρό πλαίσιο από διανοητική άποψη: η πυκνότητα των αερίων είναι προσεγγιστικά αρκετές χιλιάδες φορές μικρότερη από εκείνη των υγρών ή των στερεών. Συνεπώς, η μέση απόσταση μεταξύ των ατόμων-μορίων ενός αερίου είναι ανάλογη της κυβικής ρίζας αυτού του λόγου, δέκα ή εκατό φορές μεγαλύτερη από τη διάσταση του ατόμου-μορίου. Οι προσεγγιστικές, αλλά σημαντικές, εκτιμήσεις της τάξης μεγέθους είναι ισχυρό αντίδοτο στους μαθητές που έχουν «εμποτιστεί» με την (ουσιαστικά «δηλητηριώδη») άποψη ότι «η επιστήμη είναι ακριβής». Η συγκεκριμένη εμπειρία τους διδάσκει, επίσης, ότι στην επιστήμη η εκτίμηση ενός μεγέθους δεν στηρίζεται σε στρουφνές, αβάσιμες εικασίες (όπως νομίζουν οι περισσότεροι): στηρίζεται σε προσεκτικούς συλλογισμούς και επινοήσεις, όσο κι αν τα αριθμητικά δεδομένα είναι προσεγγιστικά.

Το επόμενο, εξίσου σημαντικό, βήμα περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του πυρηνικού προτύπου και τον προσδιορισμό του μεγέθους του πυρήνα. Σε πολλά εγχειρίδια περιγράφεται λεπτομερώς, με τον έναν ή τον άλλον τρόπο, η ιστορία του φαινομένου της οπισθοσκέδασης των σωματιδίων α . Ο Geiger και ο Marsden παρατήρησαν για πρώτη φορά το φαινόμενο. Ο Rutherford ερμήνευσε το αποτέλεσμα με το ότι υπάρχουν μικρότατα αλλά συμπαγή κέντρα σκέδασης. Ελάχιστα εγχειρίδια ωστόσο δίνουν στους μα-

θητές την ευκαιρία να μελετήσουν την πλούσια φαινομενολογία που υπεισέρχεται σε τούτο το θέμα και να εκτελέσουν απλούς υπολογισμούς που θέτουν ανώτερο όριο στις διαστάσεις του πυρήνα.

Για τη μελέτη του θέματος είναι απαραίτητο να επικαλεστούμε την εμπειρία που απέκτησαν οι μαθητές στο εργαστήριο ή στη διάρκεια της πειραματικής επίδειξης της κρούσης μακροσκοπικών σωμάτων. Μ' αυτόν τον τρόπο, οι μαθητές ξαναθυμούνται ότι: 1) όταν αντικείμενο μεγάλης μάζας συγκρούεται με ακίνητο αντικείμενο μικρότερης μάζας, συμβαίνει πάντα «εμπροσθοσκέδαση», και 2) αναπήδηση («σκέδαση σε μεγάλη γωνία») συμβαίνει μόνον όταν το προσπίπτον σώμα έχει μικρότερη μάζα από το στόχο. Αυτά τα φαινόμενα, ίσως φαίνονται τετριμμένα στον καθηγητή. Πολλοί μαθητές, ωστόσο, ή δεν τα αντιλαμβάνονται αμέσως την πρώτη φορά που τα συναντούν ή προσωρινά τα έχουν ξεχάσει. Στο παρόν στάδιο, λοιπόν, μελετώντας τα μικροσκοπικά φαινόμενα, δεν επικαλούνται αυτόματα αυτές τις ιδέες.

Για να εξηγηθεί η αναπήδηση του σωματιδίου α , αν υιοθετήσουμε δοκιμαστικά το πυρηνικό πρότυπο, είναι απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας ότι το θετικά φορτισμένο βλήμα, για να πλησιάσει τον πυρήνα, περνά από «νέφος» αρνητικού φορτίου. Ο Rutherford στο πρώτο άρθρο του (που αφορά την ερμηνεία της οπισθοσκέδασης των σωματιδίων α), στους υπολογισμούς του θεωρεί ότι το αρνητικό φορτίο κατανέμεται σφαιρικά. Η παρατήρηση αυτή, ωστόσο, δεν είναι ουσιώδης για τους μαθητές. Είναι αρκετό να επικαλεστούμε την ιδέα (που πρέπει να έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του νόμου του αντιστρόφου του τετραγώνου, τόσο της βαρύτητας όσο και της ηλεκτροστατικής) ότι μέσα σε ομοιόμορφο σφαιρικό κέλυφος το πεδίο είναι παντού μηδενικό. Η επίδραση του αρνητικά φορτισμένου νέφους, λοιπόν, μειώνεται πολύ γρήγορα, καθώς το σωματίδιο α εισχωρεί μέσα του.

Τελικά, εκτελούμε τον απλό αριθμητικό υπολογισμό, όταν το σωματίδιο α έχει πλησιάσει αρκετά στο κέντρο του στόχου. Γνωρίζοντας τη μάζα του σωματιδίου και την ταχύτητά του ($2 \cdot 10^7$ m/s), υπολογίζουμε την κινητική ενέργειά του. Η ελάχιστη απόσταση στην οποία φτάνει το σωματίδιο προσδιορίζεται από την ακτινική απόσταση μεταξύ του σωματιδίου και του στόχου, στην οποία η κινητική ενέργεια του σωματιδίου έχει αποθηκευτεί ως δυναμική στο σύστημα στόχος-βλήμα. (Στο πείραμα Geiger-Marsden, ο στόχος ήταν φύλλο χρυσού. Ο Rutherford θεώρησε ότι ο αριθμός των στοιχειωδών θετικών φορτίων του πυρήνα χρυσού είναι περίπου $100e$ ή περίπου η μισή σχετική ατομική μάζα του χρυσού. Εκείνη την εποχή δεν είχαν συλλάβει ακόμα τη σημασία του ατομικού αριθμού στον περιοδικό πίνακα.) Προκύπτει, λοιπόν, ότι η ελάχιστη απόσταση προσέγγισης είναι περίπου $3 \cdot 10^{-4} \text{ \AA}$ (περίπου το $1/10.000$ του μεγέθους του ατόμου-μορίου). (Είναι σημαντικό να κατευθύνουμε τους μαθητές να αντιληφθούν ότι από τον υπολογισμό αυτό προκύπτει ένα ανώτατο όριο των διαστάσεων του πυρήνα και όχι

ακριβώς οι διαστάσεις του. Πρόκειται, επίσης, για παράδειγμα μιας σημαντικής *εκτίμησης* ενός μεγέθους και όχι ενός «ακριβούς» αποτελέσματος.)

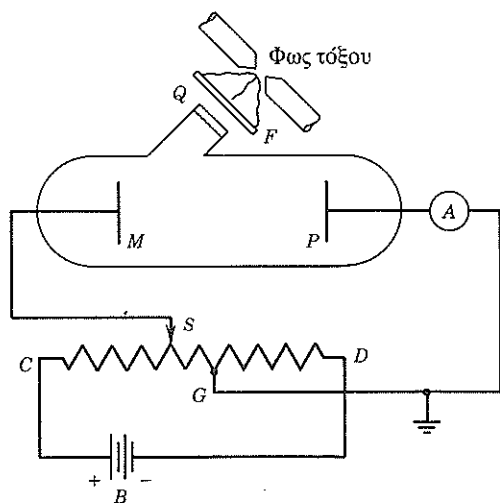
Στο πλαίσιο του εν λόγω υπολογισμού, οι μαθητές ξαναθυμούνται άμεσα τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους στο οποίο φτάνει μια πέτρα που βάλλεται κατακόρυφα (αν γνωρίζουμε την αρχική κινητική ενέργειά της). Ξαναθυμούνται, επίσης, τον υπολογισμό της ταχύτητας διαφυγής από την έλξη της Γης (ή της Σελήνης ή κάποιου πλανήτη), αν, βεβαίως, έχουμε προηγουμένως αναφερθεί σ' αυτήν την έννοια. Κατά τη διάρκεια του υπολογισμού, οι μαθητές είναι απαραίτητο να περιγράφουν με δικά τους λόγια τη μετατροπή της ενέργειας που συμβαίνει κάθε φορά (στο εδάφιο 5.3 έχουμε αναλύσει αυτήν την άποψη). Αν επανερχόμαστε σε προβλήματα που τα έχουμε ήδη μελετήσει και συνδέουμε φαινομενικά απολύτως άσχετες μεταξύ τους καταστάσεις, βοηθάμε τους μαθητές να αφομοιώσουν τις έννοιες και τον τρόπο εκτέλεσης συλλογισμών. Αυτό το αποτέλεσμα δεν επιτυγχάνεται απλώς με μια διδακτική παρουσίαση του θέματος, όσο διαυγής κι αν είναι.

10.9 Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η έννοια του φωτονίου

Σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων φυσικής, είναι αδύνατο να παρουσιάσουμε την «ιστορία» της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με συνεπή, από λογική άποψη, και ουσιαστικό τρόπο. Αν τη διηγηθούμε, απλώς, «κουνώντας τα χέρια», οι μαθητές μένουν σατισμένοι. Η σαφής και κατανοητή παρουσίαση της έννοιας του κβάντου περνά από τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η συγκεκριμένη πορεία έχει υιοθετηθεί σχεδόν καθολικά από τα σύγχρονα εγχειρίδια. Σε ορισμένα υπάρχουν παρουσιάσεις στις οποίες με συνεπή τρόπο τίθεται το ερώτημα: «Πώς γνωρίζουμε ότι...;» Σε πολλά, ωστόσο, η ιστορία έχει περικοπεί: στους μαθητές παρουσιάζονται, απλώς, τα τελικά συμπεράσματα, που πρέπει να τα απομνημονεύσουν χωρίς να τα κατανοούν.

Τα πειράματα του Philipp Lenard (1902) ήταν το υπόβαθρο για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Για να καταλάβουμε πώς ανακαλύφθηκε το φαινόμενο, πρέπει να μάθουμε πώς εκτελέστηκαν τα πειράματα. Είναι ουσιώδες, λοιπόν, να αρχίσουμε, τουλάχιστον, με τη σχηματική αναπαράσταση της συσκευής (Σχ. 10.9.1) και να εξετάσουμε τι μετράμε μ' αυτήν. (Ελάχιστα εγχειρίδια περιγράφουν ικανοποιητικά την εργασία του Lenard. Στο παρόν εδάφιο, την παρουσιάζουμε συνοπτικά, για να βοηθήσουμε την παιδαγωγική μελέτη.)

Στο Σχ. 10.9.1, το ηλεκτρόδιο P συνδέεται μέσω του ευαίσθητου γαλβανόμετρου (ή μικροαμπερομέτρου) A με το μέσο G της μεταβλητής αντίστασης CD . (Στην πραγματικότητα, ο Lenard εκτέλεσε τις μετρήσεις του με δύο



Σχήμα 10.9.1 Σχηματικό διάγραμμα της συσκευής του Lenard για τη μέτρηση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος.

ξεχωριστά ηλεκτρόδια που τα συνέδεσε, αντίστοιχα, στα ηλεκτρόδια M και P .) Όταν η επαφή S είναι στο σημείο G , η διαφορά δυναμικού μεταξύ των M και P είναι μηδενική. Αν το S βρίσκεται αριστερά από το G , η πλάκα M είναι θετική ως προς την P και τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από τη M έλκονται πίσω σ' αυτήν και, καθώς κινούνται προς την P , επιβραδύνονται. Τη συγκεκριμένη διαφορά δυναμικού, λοιπόν, την ονομάζουμε συμβατικά «επιβραδύνουσα» ή αρνητική. Αντιστοίχως, όταν το S βρίσκεται δεξιά από το G , τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια απωθούνται από το M και επιταχύνονται προς το P . Αναφερόμαστε, λοιπόν, σε «επιταχύνουσα» ή θετική διαφορά δυναμικού. Φως από ένα τόξο μέσω του παραθύρου Q πέφτει στη μεταλλική πλάκα M . Με το φίλτρο F παίρνουμε μονοχρωματικό φως.

Επειδή οι μαθητές σε μια σειρά εισαγωγικών μαθημάτων αποκτούν ελάχιστη εμπειρία στο να εξηγούν τη λειτουργία απλών ηλεκτρικών κυκλωμάτων, η συσκευή του Σχ. 10.9.1 προσφέρει πολύτιμη ευκαιρία από παιδαγωγική άποψη. Μ' αυτό το πλούσιο θέμα συμπληρώνονται οι συμβατικές ασκήσεις αριθμητικών υπολογισμών στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Οι μαθητές έχουν την ευκαιρία να εξετάσουν πώς λειτουργεί η συσκευή και πώς επηρεάζονται τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια λόγω της μεταβολής της θέσης της επαφής S . Οι καθηγητές που δεν εκμεταλλεύονται τέτοιες ευκαιρίες εκπλήσσονται από την αδυναμία πολλών μαθητών (ακόμα και όσων προορίζονται για φυσικοί ή μηχανικοί) να ερμηνεύσουν πώς μεταβάλλεται η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών M και P , καθώς η επαφή S κινείται κατά μήκος του σύρματος. (Η αδυναμία δεν οφείλεται στην πολυπλοκότητα των ιδεών· απλώς, οι μαθητές δεν έχουν εξασκηθεί κατάλληλα.)

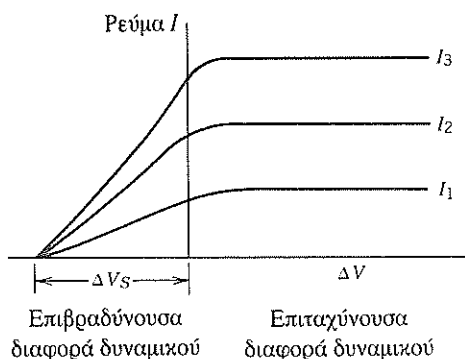
Ο Lenard, χρησιμοποιώντας τρεις διαφορετικές πηγές φωτός (ένα βολταϊκό τόξο παραγόμενο από ηλεκτρόδια άνθρακα, ένα άλλο παραγόμενο

από ηλεκτρόδια ψευδαργύρου και ένα σπινθήρα παραγόμενο μεταξύ δύο σφαιρών ψευδαργύρου που εκφορτίζονται), μελέτησε συστηματικά την επίδραση της έντασης του φωτός και της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των πλακών M και P , στο ρεύμα που προκαλεί το φως. Οι σημαντικότερες παρατηρήσεις του ήταν οι εξής:

1. Όταν η φωτεινή πηγή ακτινοβολεί σταθερά και η διαφορά δυναμικού παραμένει σταθερή και θετική (επιταχύνουσα), μετακινώντας το P προς το M , παρατηρούμε ότι το ρεύμα αυξάνεται. Όταν το P απέχει 5 mm από το M , το ρεύμα σταθεροποιείται σε ορισμένη τελική μέγιστη τιμή. Οι υπόλοιπες παρατηρήσεις εκτελέστηκαν σ' αυτήν την τελική απόσταση μεταξύ των πλακών. (Πρέπει να κατευθύνουμε τους μαθητές να ερμηνεύσουν τη σημασία και το σκοπό αυτής της παρατήρησης και του συμπεράσματος που προκύπτει: Το πείραμα δείχνει ότι τα ηλεκτρόνια εξέρχονται προς κάθε κατεύθυνση ως προς το M . Όταν, λοιπόν, η απόσταση μεταξύ των πλακών είναι αρκετά μικρή, ουσιαστικά, κάθε ηλεκτρόνιο καταλήγει στο P .)

2. Κατόπιν, ο Lenard μετέβαλε την ένταση του φωτός με δύο τρόπους: 1) μεταβάλλοντας την ισχύ του τόξου και 2) μετακινώντας την πηγή σε μεγαλύτερη απόσταση από το παράθυρο Q . (Στην τελευταία περίπτωση, χρησιμοποίησε το νόμο του αντιστρόφου του τετραγώνου που αφορά τη μεταβολή της έντασης ως προς την απόσταση από σημειακή πηγή.) Ανακάλυψε ότι η μέγιστη ένταση του ρεύματος (ρεύμα κόρου) που προκαλεί το φως (όταν υπάρχει επιταχύνουσα διαφορά δυναμικού) είναι ευθέως ανάλογη προς την ένταση του προσπίπτοντος φωτός [δηλαδή, προς την ενέργεια που προσπίπτει κάθε δευτερόλεπτο στη μοναδιαία επιφάνεια (Σχ. 10.9.2)].

3. Ο Lenard εντυπωσιάστηκε ιδιαίτερα από το ότι η ευθεία αναλογία με την ένταση του προσπίπτοντος φωτός επεκτείνεται έως εξαιρετικά χαμηλές τιμές της έντασης (τρία χιλιοστά της μέγιστης έντασης που διέθετε), χω-



Σχήμα 10.9.2 Εξιδανικευμένες καμπύλες των αποτελεσμάτων του Lenard για το φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Τα αποτελέσματα προέκυψαν με τη βοήθεια της συσκευής του Σχ. 10.9.1. Οι καμπύλες αντιστοιχούν σε τρεις διαφορετικές εντάσεις μονοχρωματικού φωτός. Και στις τρεις περιπτώσεις το μήκος κύματος ήταν το ίδιο. Η τιμή του ρεύματος κόρου (I_1 , I_2 και I_3) είναι ευθέως ανάλογη προς την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Η τάση ΔV_s μηδενισμού του ρεύματος είναι ανεξάρτητη από την ένταση του φωτός· εξαρτάται μόνο από το μήκος κύματος του προσπίπτοντος φωτός και από το υλικό της πλάκας M .

ρίς να εμφανίζεται κατώφλι. Η ύπαρξη κατωφλίου στηριζόταν στην υπόθεση ότι, για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο, είναι απαραίτητο να υπάρξει ελάχιστη ροή ενέργειας, για να υπερνικηθεί η δύναμη που συγκρατεί τα ηλεκτρόνια μέσα στα μέταλλα. Ουδέποτε παρατηρήθηκε, ωστόσο, κατώφλι στην ένταση: αν το προσπίπτον φως μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο, πάντα εξέρχονται ηλεκτρόνια, όσο ασθενικό κι αν είναι.

4. Όταν η επαφή S μετακινείται αριστερά από το G (Σχ. 10.9.1), η διαφορά δυναμικού είναι επιβραδύνουσα. Ωστόσο, το παρατηρούμενο ρεύμα που το φως προκαλεί δεν μηδενίζεται απότομα. Καθώς αυξάνεται η επιβραδύνουσα διαφορά δυναμικού, το ρεύμα μειώνεται σχεδόν γραμμικά (Σχ. 10.9.2) και πλησιάζει το μηδέν όταν η διαφορά δυναμικού είναι περίπου δύο βολτ. Η τιμή ΔV_s , στην οποία διακόπτεται το ρεύμα που προκαλείται από το φως, ονομάζεται «διαφορά δυναμικού αποκοπής». Ο Lenard παρατήρησε ότι η ένταση του προσπίπτοντος φωτός δεν επηρέαζε τη ΔV_s . (Μετέβαλε την ένταση του προσπίπτοντος φωτός κατά έναν παράγοντα μεγαλύτερο από το 1.000, διατηρώντας τα υπόλοιπα στοιχεία του πειράματος σταθερά, χωρίς να ανιχνεύσει σημαντική μεταβολή στη ΔV_s .) Μεταβλήθηκε μόνον όταν χρησιμοποίησε διαφορετική πηγή φωτός ή όταν άλλαξε τη μεταλλική πλάκα M . (Αυτή η παρατήρηση ήταν, αναμφίβολα, το εντυπωσιακότερο χαρακτηριστικό του φαινομένου. Αναμενόταν, βεβαίως, ότι τα ηλεκτρόνια θα εξέρχονταν από το μέταλλο με ποικίλες τιμές της κινητικής ενέργειάς τους, αλλά όχι ότι η κατανομή των κινητικών ενεργειών δεν θα επηρεαζόταν από την ένταση του φωτός.)

Στην τελευταία παρατήρηση συναντάμε πάλι την έννοια της αποθήκευσης κινητικής ενέργειας με τη μορφή δυναμικής, όταν μεταξύ των πλακών του πυκνωτή εφαρμόζεται επιβραδύνον πεδίο. Αν και για τον ευσυνείδητο καθηγητή είναι αναπόφευκτα απογοητευτικό, πρέπει, εντούτοις, να βρει το κουράγιο να αναγνωρίσει ότι πολλοί μαθητές δυσκολεύονται ακόμα με τις έννοιες αυτές (επειδή εμφανίζονται σε διαφορετικό πλαίσιο), ανεξάρτητα από κάθε προηγούμενη προσπάθειά του. Πολλοί μαθητές είναι απαραίτητο να συναντήσουν σε διαφορετικό πλαίσιο αρκετές φορές —όχι μία ή δύο— τις αφηρημένες έννοιες, για να τις αφομοιώσουν. Κάθε ευκαιρία, λοιπόν, είναι πολύτιμη.

Αφού παρουσιάσουμε συνοπτικά τις παρατηρήσεις του Lenard, κατευθύνουμε τους μαθητές να εξετάσουν τα ερωτήματα:

1. Σχεδιάστε αρκετές πιθανές τροχιές των ηλεκτρονίων που εκτινάσσονται από την πλάκα M : α) όταν η πλάκα P απέχει ένα ή δύο εκατοστά και β) όταν απέχει λιγότερο από 5 mm. Η σχεδίαση να γίνει για επιταχύνουσα αλλά και για επιβραδύνουσα διαφορά δυναμικού. Περιγράψτε την κίνηση ενός βλήματος που αντιστοιχεί στην τροχιά των ηλεκτρονίων που σχεδιάσατε.

2. Είναι γνωστό ότι η ποσότητα $e\Delta V_s$ ισούται με τη μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εκτοξεύονται από την πλάκα M . Εξηγήστε με δικά σας λόγια αυτό τον ισχυρισμό. Ποια είναι η αντίστοιχη έκφραση στην περίπτωση που πετάμε κατακόρυφα προς τα πάνω μια πέτρα; Γιατί η μάζα του σωματιδίου απουσιάζει από την έκφραση που προκύπτει για την κίνηση σε βαρυτικό πεδίο, ενώ εμφανίζεται στην έκφραση για την κίνηση σε ηλεκτρικό πεδίο;

3. Γιατί είναι εντυπωσιακό το ότι η μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εκτοξεύονται δεν επηρεάζεται από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός; Σχεδιάστε πάλι ένα σύνολο τριών ευθειών, όπως στο Σχ. 10.9.2, που, ωστόσο, δεν θα εντυπωσίαζε τον Lenard. [Παρατηρήστε ότι αυτή η άσκηση οδηγεί τους μαθητές να εξετάσουν άμεσα μια κατάσταση σε αντιδιαστολή με την αντίθετή της.]

4. Είναι σαφές ότι, αν και η ένταση του προσπίπτοντος φωτός δεν επηρεάζει την κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου ξεχωριστά, επηρεάζει, ωστόσο, το ρεύμα κόρου: η τιμή του είναι ευθέως ανάλογη προς την ένταση, χωρίς να υπάρχει κατώφλι. Από τη μεταβολή του ρεύματος κόρου, τι συμπεραίνετε, αναπόφευκτα, για το ρόλο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός; Με τις γνώσεις που έχετε αποκτήσει μέχρι σήμερα στη φυσική, μπορείτε να εξηγήσετε το παρατηρούμενο γεγονός, ότι, δηλαδή, η ένταση του προσπίπτοντος φωτός προσδιορίζει μόνο το ρυθμό των ηλεκτρονίων που εκτοξεύονται και δεν επηρεάζει καθόλου την ιδιαίτερη ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου; [Ο Lenard αναφέρει σαφώς ότι είναι πολύ δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να εξηγήσουμε με τη βοήθεια της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell τα παρατηρούμενα φωτοηλεκτρικά φαινόμενα.]

Το 1905, ο Αϊνστάιν στο διάσημο άρθρο του, προτείνοντας την έννοια του φωτονίου [βλ. τη μετάφραση των Arons και Peppard (1965)], ασχολείται δευτερευόντως με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο κύριος σκοπός του είναι να υπολογίσει πάλι το φάσμα του μέλανος σώματος, όχι κβαντώνοντας την ενέργεια των ατομικών ή μοριακών ταλαντωτών του τοιχώματος της κοιλότητας (όπως έκανε ο Plank), αλλά χρησιμοποιώντας στατιστική θερμοδυναμική και κβαντώνοντας την ίδια την ακτινοβολία. (Το συγκεκριμένο θέμα ξεφεύγει πολύ από το επίπεδο μιας εισαγωγικής σειράς μαθημάτων.) Αφού ο Αϊνστάιν επινόησε την έννοια του φωτονίου και προσδιό-

ρισε επιτυχώς την κατανομή του μέλανος σώματος, στράφηκε προς το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, για να υποστηρίξει καλύτερα την άποψή του. Έδειξε, λοιπόν, ότι με την έννοια του φωτονίου επιλύονται με απλό τρόπο τα παράδοξα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Στα περισσότερα εισαγωγικά εγχειρίδια παρουσιάζονται με σαφήνεια τα επιχειρήματά του. (Ουσιώδες στοιχείο της παρουσίασης είναι, επίσης, το να δοθεί η ευκαιρία στους μαθητές να αναπτύξουν με δικά τους λόγια τα επιχειρήματα, αντί να προσπαθούν απεγνωσμένα να θυμηθούν τις διακηρύξεις των εγχειριδίων.)

Το σημαντικότερο θέμα που θα χρησιμοποιηθεί στο μέλλον είναι, βεβαίως, η γραμμική σχέση μεταξύ της διαφοράς δυναμικού αποκοπής και της συχνότητας του προσπίπτοντος μονοχρωματικού φωτός. Στην εν λόγω σχέση για κάθε είδος μετάλλου εμφανίζεται διαφορετικό κατώφλι. Είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε, ότι, αρχικά, στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο η σχέση αυτή δεν είχε παρατηρηθεί, αν και ορισμένα εγχειρίδια υποστηρίζουν το αντίθετο. Πρώτος ο Αϊνστάιν προέβλεψε την ύπαρξη γραμμικής σχέσης (παράλληλα με τη διάσημη πλέον ερμηνεία του). Η συγκεκριμένη πρόβλεψη, ωστόσο, δεν επαληθεύτηκε αμέσως. Προκαταρκτικά, επαληθεύτηκε από τους Richardson και Compton (1912) και από τον Hughes (1913). Η οριστική και αποφασιστικότερη επιβεβαίωση έγινε από τον Millikan με ένα θαυμάσιο πείραμα που περιελάμβανε την προετοιμασία μιας καθαρής, χωρίς προσμείξεις, επιφάνειας [Millikan (1916)].

Αργότερα, ο Millikan έλεγε για την εργασία του [Millikan (1949)]:

[Η ερμηνεία του Αϊνστάιν το 1905] αγνοούσε τα πολυάριθμα δεδομένα της συμβολής και φαινόταν, όντως, να αντιφάσκει. Φαινόταν να επιστρέφει άμεσα στη σωματιδιακή θεωρία του φωτός που είχε εγκαταλειφθεί από την εποχή του Young και του Fresnel... Πέρασα δέκα χρόνια της ζωής μου ελέγχοντας την εξίσωση του 1905 του Αϊνστάιν. Το 1915 υποχρεώθηκα, αντίθετα με τις προβλέψεις μου, να διακηρύξω ότι επαληθεύεται αναμφισβήτητα πειραματικά, αν και, επειδή παραβιάζει καθετί που γνωρίζουμε για τη συμβολή του φωτός, φαίνεται παράλογη.

Για την ανάπτυξη της επιστημονικής καλλιέργειας, πρέπει να επισημάνουμε με τούτη την ευκαιρία ότι στην ιστορία των θετικών επιστημών υπάρχουν παρόμοιες περιπτώσεις όπου προηγήθηκε η θεωρητική πρόβλεψη και ακολούθησε η πειραματική επαλήθευση. Λόγου χάρι, ο Dalton προέβλεψε το Νόμο των Απλών Πολλαπλασίων, πριν ανακαλύψει την κανονικότητα που ανέκαθεν υπήρχε στα δεδομένα των χημικών ενώσεων. [Μέχρι τότε, ωστόσο, τα δεδομένα δεν είχαν μετατραπεί από την ποσοστιαία μορφή τους στη μορφή των απλών πολλαπλασίων, όπως απαιτεί το ατομικό πρότυ-

πο. (Για περισσότερες λεπτομέρειες, βλ. 12ο Κεφάλαιο).]

10.10 Αποσπάσματα από το άρθρο του Αϊνστάιν (του 1905) για την έννοια του φωτονίου

Λόγω της σαφήνειας της διατύπωσής της, είναι πολύ χρήσιμο να μπορούμε εύκολα να επικαλούμαστε την περιγραφή της έννοιας του φωτονίου με τα λόγια του ίδιου του Αϊνστάιν. Παραθέτω, λοιπόν, λίγα ιδιαιτέρως χρήσιμα αποσπάσματα από το άρθρο του Αϊνστάιν (1905α) [μετάφραση: Arons και Peppard (1965)].

Αρχικά, πρέπει να επισημάνουμε ότι ο τίτλος του άρθρου είναι: «Εμπειρική ερμηνεία της εκπομπής και της μετατροπής του φωτός». Δηλαδή, ο Αϊνστάιν επισημαίνει τον εμπειρικό χαρακτήρα της ερμηνείας του. Το άρθρο αρχίζει με χαρακτηριστικό τρόπο: όπως συμβαίνει, επίσης, στο άρθρο για τη σχετικότητα, ο Αϊνστάιν επισημαίνει ορισμένη ασυμμετρία και έλλειψη εννοιολογικής συνέπειας των υπαρχουσών θεωριών. Στην πρώτη παράγραφο του επόμενου αποσπάσματος, αναφέρει ότι στη θεωρία του Plank για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, αν και η ενέργεια των υλικών σωματιδίων του τοιχώματος της κοιλότητας είναι κβαντισμένη, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται ή απορροφάται θεωρείται συνεχής:

... η ολική ενέργεια ενός σώματος, σύμφωνα με τη σύγχρονη αντίληψη των φυσικών, είναι το άθροισμα των ενεργειών των ατόμων και των ηλεκτρονίων [από τα οποία αποτελείται το σώμα]. Η ενέργεια ενός σώματος είναι αδύνατο να διαιρεθεί σε οσοδήποτε μικρές ποσότητες [θεωρία του Plank], ενώ η ενέργεια μιας δέσμης φωτός [σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell για το φως ή, γενικότερα, σύμφωνα με κάθε κυματική θεωρία] κατανέμεται με συνεχή τρόπο σε οσοδήποτε μεγάλο όγκο.

Η κυματική θεωρία, που χρησιμοποιεί συνεχείς χωρικές συναρτήσεις, εφαρμόστηκε με επιτυχία στην αναπαράσταση αμιγώς οπτικών φαινομένων. Ενδεχομένως, ονδέποτε θα αντικατασταθεί από άλλη θεωρία. Πρέπει, ωστόσο, να έχουμε κατά νουν ότι οι οπτικές παρατηρήσεις αφορούν μέσες τιμές ως προς το χρόνο και όχι στιγμιαίες. Η θεωρία αυτή επιβεβαιώνεται απολύτως πειραματικά, όταν εφαρμόζεται στην περίθλαση, στην ανάκλαση, στη διάθλαση, στη διάχυση κτλ. Ωστόσο, αντιλαμβανόμαστε ότι η θεωρία του φωτός που χρησιμοποιεί συνεχείς χωρικές συναρτήσεις οδηγεί πιθανόν σε αποτελέσματα που αντιφάσκουν με την εμπειρία, όταν εφαρμόζεται στο φαινόμενο της εκπομπής και της μετατροπής του φωτός [δηλαδή, σε αλληλεπιδρά-

σεις μικροσκοπικής κλίμακας].

Θεωρώ, λοιπόν, ότι κατανοούμε καλύτερα τις παρατηρήσεις που συνδέονται με την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, με το φθορισμό, με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και με άλλα σχετικά φαινόμενα,... αν υποθέσουμε ότι η ενέργεια του φωτός κατανέμεται ασυνεχώς στο χώρο. Σύμφωνα με την υπόθεση που εξετάζουμε στο παρόν άρθρο, η ενέργεια μιας ακτίνας φωτός, που ξεκινά από κάποιο σημείο, δεν κατανέμεται συνεχώς σε όλο και μεγαλύτερο χώρο· συνίσταται από πεπερασμένο πλήθος κβάντων ενέργειας με συγκεκριμένη θέση στο χώρο που κινούνται χωρίς να διαιρούνται και παράγονται και απορροφούνται σε ακέραιες ποσότητες. [Ο όρος φωτόνιο προβλήθηκε αργότερα.]

Στην προηγούμενη παράγραφο, ο Αϊνστάιν επισημαίνει ότι ο φθορισμός είναι φαινόμενο το οποίο η θεωρία του Maxwell δεν ερμηνεύει ικανοποιητικά. Αναφέρεται στον «Κανόνα του Stoke», δηλαδή, στο βεβαιωμένο γεγονός πως όταν μια ουσία φθορίζει υπό την επίδραση προσπίπτοντος φωτός, λόγω χάρη υπεριώδους, η «μεταλλαγμένη» ακτινοβολία (το εξερχόμενο φως) έχει πάντοτε μεγαλύτερο μήκος κύματος (μικρότερη συχνότητα) από την ακτινοβολία διέγερσης. Για τον «Κανόνα του Stoke», λοιπόν, ο Αϊνστάιν πρότεινε ότι, ίσως, κάθε προσπίπτον φωτόνιο, αφού απορροφηθεί από το φθορίζον υλικό, προκαλεί την εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων και την επανεκπομπή της απορροφημένης ενέργειας. Αν κάθε απορρόφηση και η αντίστοιχη επανεκπομπή είναι στοιχειώδης διαδικασία, ανεξάρτητη από άλλα προσπίπτοντα φωτόνια, τότε, λόγω της διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου (και, συνεπώς, η συχνότητά του) είναι ίση ή μικρότερη από του προσπίπτοντος.

Κατόπιν, ο Αϊνστάιν αναφέρεται στις παρατηρήσεις του Lenard για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:

Η συνήθης αντίληψη ότι η ενέργεια του φωτός κατανέμεται συνεχώς στο χώρο όπου διαδίδεται, συναντά σοβαρή δυσκολία, όταν προσπαθούμε να εξηγήσουμε τα φωτοηλεκτρικά φαινόμενα που περιέγραψε ο Lenard στο πρώτο άρθρο του. Αν δεχτούμε, ωστόσο, ότι το προσπίπτον φως αποτελείται από κβάντα ενέργειας $h\nu$, μπορούμε να φανταστούμε την εκπομπή των ηλεκτρονίων, λόγω της επίδρασης του φωτός, ως εξής: Κβάντα ενέργειας εισχωρούν στο επιφανειακό στρώμα του σώματος και η ενέργειά τους μετατρέπεται, τουλάχιστον εν μέρει, σε κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Ο απλούστερος τρόπος να φανταστούμε τη διαδικασία είναι αν θεωρήσουμε ότι ένα κβάντο φωτός αποθέτει όλη την ενέργειά του σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο. Θα θεωρήσου-

με, λοιπόν, ότι αυτό συμβαίνει όντως... Το ηλεκτρόνιο στο οποίο, ενώ βρισκόταν μέσα στο σώμα, μεταδόθηκε κινητική ενέργεια, τη στιγμή που πλησιάζει την επιφάνεια έχει χάσει μέρος αυτής της ενέργειας. Θα θεωρήσουμε, επίσης, ότι κάθε ηλεκτρόνιο, καθώς εγκαταλείπει την επιφάνεια του σώματος, εκτελεί ορισμένο έργο W_0 που χαρακτηρίζει το υλικό του σώματος. Τα ηλεκτρόνια της επιφάνειας αποβάλλονται από το σώμα με τη μέγιστη κάθετη ταχύτητα. Η κινητική ενέργειά τους είναι⁶:

$$E_{\kappa, \mu\epsilon\gamma} = h\nu - W_0 \quad (10.10.1)$$

Αν φορτίσουμε το σώμα που εκπέμπει τα ηλεκτρόνια ώστε να αποκτήσει θετική διαφορά δυναμικού ως προς έναν αγωγό που βρίσκεται εκεί κοντά, και αν το ΔV_s παριστάνει την ελάχιστη διαφορά δυναμικού που διακόπτει το φωτοηλεκτρικό ρεύμα [επειδή το ΔV_s ισούται με τη μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται], ισχύει:

$$e\Delta V_s = h\nu - W_0$$

Με e συμβολίζουμε το φορτίο του ηλεκτρονίου.

Αν η σχέση που προέκυψε είναι σωστή, η γραφική παράσταση του ΔV_s ως προς τη συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός είναι ευθεία γραμμή. Η κλίση της ευθείας είναι ανεξάρτητη από τη φύση του υλικού που εκπέμπει. [Αυτή η πρόβλεψη περιεχόταν στη διάσημη πλέον εξίσωση του Αϊνστάιν για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.]

Όσο μπορώ να αντιληφθώ, τα συμπεράσματα αυτά δεν αντιφάσκουν με τις ιδιότητες του φωτοηλεκτρικού φαινομένου που παρατήρησε ο Lenard. Αν κάθε κβάντο ενέργειας του προσπίπτοντος φωτός αποθέτει, ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, όλη την ενέργειά του μόνο σε ένα ηλεκτρόνιο, η κατανομή της ταχύτητας των ηλεκτρονίων που αποβάλλονται θα είναι ανεξάρτητη από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Από την άλλη πλευρά, αν οι υπόλοιπες συνθήκες μένουν σταθερές, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εξέρχονται από το σώμα θα είναι ανάλογος προς την ένταση του προσπίπτοντος φωτός... [Καλύπτονται, έτσι, οι ανωμαλίες που παρατήρησε ο Lenard.]

6. Έχουμε τροποποιήσει το συμβολισμό του Αϊνστάιν, για να συμφωνεί με του παρόντος βιβλίου.

10.11 Η πρώτη κβαντική εικόνα του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Όπως η έρευνα της καθοδικής δέσμης από τον Thomson και η μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Lenard, έτσι και το πρώτο απλό πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου (με το οποίο ο Bohr απέδειξε τη σχέση των Balmer και Rydberg για τις φασματικές γραμμές του ατομικού υδρογόνου, αποκλίνοντας αισθητά από τη θεωρία του Νεύτωνα και του Maxwell) περιέχει συλλογισμούς που οι μαθητές μπορούν να τους παρακολουθήσουν σε μια εισαγωγική σειρά μαθημάτων. Αν παρουσιάσουμε και εξηγήσουμε τους συλλογισμούς προσεκτικά και με βραδύ ρυθμό, για να μπορέσουν οι μαθητές να τους κατανοήσουν, το πνευματικό όφελος που αποκομίζουν είναι καταπληκτικό. Αντιλαμβάνονται ότι στο ίδιο πλαίσιο τοποθετείται ένας τεράστιος όγκος θεμελιωδών θεμάτων που προηγουμένως τα συνάντησαν σε «κομμάτια και θρύψαλα». Συνυπάρχουν η κυκλική κίνηση, η κεντρομόλος δύναμη, ο νόμος του Coulomb, η κινητική και η δυναμική ενέργεια, η απορρόφηση και η εκπομπή του φωτός, η διατήρηση της ενέργειας, το φωτεινό γραμμικό φάσμα, το πυρηνικό πρότυπο, η έννοια του φωτονίου κτλ. Η σύνθεση αυτή αποκαλύπτει στους μαθητές την «αλληλοσύνδεση» των εννοιών. Ενισχύει, επίσης, την ικανότητά τους να συνδυάζουν τις έννοιες. Αισθάνονται, έτσι, πως όταν επανέρχονται σε βασικές γνώσεις που απέκτησαν προηγουμένως, τις κατανοούν βαθύτερα. Ταυτόχρονα, για πρώτη φορά έρχονται σε επαφή με νέες ιδέες, λόγου χάρη με την αρχή της αντιστοιχίας, με τις διακριτές ενεργειακές στάθμες, με τις θεμελιώδεις και τις διεγερμένες καταστάσεις κτλ. Αυτές οι ιδέες είναι βασικές, ακόμα και στην τελική, ολοκληρωμένη κβαντική θεωρία.

Έχει μεγάλη παιδαγωγική αξία να μελετήσουμε το άτομο του υδρογόνου στο επίπεδο που το μελέτησε ο Bohr το 1913 στο πρώτο άρθρο του. Δυστυχώς, πολλοί συγγραφείς εγχειριδίων, για να συντομεύσουν τη μελέτη, αφαιρούν ουσιαστικά σημεία του άρθρου, όπως συμβαίνει με το πείραμα του Thomson. Έτσι, μειώνεται το φυσικό περιεχόμενο, η αποτελεσματικότητα και η καταληπτικότητα του θέματος. Σε επόμενες σελίδες παρουσιάζουμε συνοπτικά τον τρόπο με τον οποίο ο Bohr χειρίζεται το πρόβλημα στο πρώτο άρθρο του.

Η ανάλυση περιορίζεται σε κυκλικές τροχιές. Ο απαραίτητος κανόνας κβάντωσης προκύπτει, όχι κβαντώνοντας αυθαίρετα τη στροφορμή (η προσέγγιση αυτή δεν είναι παρά «μαύρη μαγεία» για τους μαθητές), αλλά εφαρμόζοντας την αρχή της αντιστοιχίας. Στο παρόν στάδιο, η συγκεκριμένη προσέγγιση φαίνεται πιο εύλογη και κατανοητή στους μαθητές, αν και είναι πολυπλοκότερη αλγεβρικά. (Το παράρτημα του παρόντος Κεφαλαίου περιέχει ένα παράδειγμα άσκησης για το σπίτι, σωκρατικού τύπου, που καθοδηγεί τους μαθητές να συνθέσουν την ιστορική αλληλουχία των γεγονότων.)

Αρχικά, ο Bohr αναγνωρίζει άμεσα ότι το πυρηνικό πρότυπο του Rutherford «φαίνεται απαραίτητο για την ερμηνεία της σκέδασης των ακτίνων α σε μεγάλη γωνία, που παρατηρούμε στο πείραμα». Κατόπιν, επισημαίνει την αντίφαση που προκύπτει στο πλαίσιο της κλασικής θεωρίας: ένα ηλεκτρόνιο κινούμενο κυκλικά πρέπει να ακτινοβολεί συνεχώς.

... το ηλεκτρόνιο θα πλησιάζει τον πυρήνα, διαγράφοντας συνεχώς μικρότερη τροχιά, ενώ η συχνότητά του θα αυξάνεται. Κατά μέσο όρο, το ηλεκτρόνιο θα κερδίζει κινητική ενέργεια, ενώ το σύστημα θα χάνει συνολικά.⁷ Το φαινόμενο θα συνεχιστεί μέχρι η διάσταση της τροχιάς να αποκτήσει την ίδια τάξη μεγέθους μ' εκείνη του ηλεκτρονίου ή του πυρήνα. Απλός υπολογισμός δείχνει ότι η ενέργεια που ακτινοβολείται με τούτη τη διαδικασία είναι σημαντικά μεγαλύτερη από εκείνη που ακτινοβολείται στις συνηθισμένες μοριακές διαδικασίες.

Είναι σαφές ότι η συμπεριφορά του εν λόγω συστήματος είναι πολύ διαφορετική από τη συμπεριφορά ενός ατομικού συστήματος που υπάρχει στη φύση. Πρώτον, τα πραγματικά άτομα στη μόνιμη κατάσταση τους φαίνεται ότι έχουν απολύτως συγκεκριμένες διαστάσεις και συχνότητες. Αν μελετήσουμε, επίσης, κάθε μοριακή διαδικασία, φαίνεται ότι το αποτέλεσμα είναι πάντοτε το ίδιο: αφού εκπεμφθεί ορισμένη ποσότητα ενέργειας —χαρακτηριστική για το σύστημα που εξετάζουμε—, το σύστημα ηρεμεί πάλι σε μια σταθερή κατάσταση ισορροπίας. Στην κατάσταση αυτή, η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων έχει την ίδια τάξη μεγέθους μ' εκείνη που είχε πριν συμβεί η διαδικασία.

7. Σε προηγούμενα μαθήματα, στην κίνηση του δορυφόρου υπό την επίδραση της βαρύτητας και, ενδεχομένως, στην κυκλική κίνηση φορτισμένου σωματιδίου (χωρίς το σωματίδιο να ακτινοβολεί) υπό την επίδραση δύναμης Coulomb, οι μαθητές έχουν αναλύσει πώς μεταβάλλεται η κινητική και η δυναμική ενέργεια. Η ανάλυση προηγείται από οποιαδήποτε αναφορά στο άτομο του υδρογόνου. Ξανασυναντούν, λοιπόν, σε νέο πλαίσιο, τις ιδέες που είχαν γνωρίσει πριν. Πρέπει να ανατρέξουν στη μελέτη τους και να σκεφτούν γιατί είναι αδύνατο να θεωρήσουμε σημείο μηδενικής ενέργειας το $r = 0$ και γιατί το συνηθέστερο σημείο μηδενικής ενέργειας βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από το $r = 0$. (Όταν $r \rightarrow \infty$, η κινητική ενέργεια της κυκλικής κίνησης τείνει στην τιμή μηδέν· σε αυτό το όριο η δυναμική ενέργεια λαμβάνεται συμβατικά ως μηδενική.) Κατόπιν, πρέπει να τους καθοδηγήσουμε να αντιληφθούν πως όταν η ακτίνα μειώνεται, το σύστημα χάνει ενέργεια στο περιβάλλον, ενώ όταν η ακτίνα αυξάνεται, κερδίζει ενέργεια. Πρέπει, επίσης, να τους κατευθύνουμε να αντιληφθούν ότι, επειδή για ορισμένη ακτίνα η συνολική ενέργεια είναι μικρότερη από την ενέργεια στο άπειρο, είναι αρνητική ως προς το σημείο αναφοράς. Αν αυτές οι ιδέες δεν έχουν αναπτυχθεί αργά και προσεκτικά σε προηγούμενα μαθήματα, το αρνητικό σημείο που εμφανίζεται στην ολική ενέργεια του συστήματος αποτελεί σοβαρό εμπόδιο: προστά του οι μαθητές πανικοβάζονται, αισθάνονται ότι δεν καταλαβαίνουν τα μαθηματικά και αποφασίζουν να απομνημονεύσουν το σχετικό ζήτημα, χωρίς να το κατανοούν.

Τα τελευταία χρόνια, ωστόσο, ο τρόπος μελέτης αυτού του προβλήματος έχει μεταβληθεί. Αυτό οφείλεται στην ανάπτυξη της [κβαντικής] θεωρίας για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και στην άμεση επιβεβαίωση των νέων υποθέσεων της θεωρίας σε διαφορετικά μεταξύ τους πειράματα που αφορούν τις ειδικές θερμοότητες, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τις ακτίνες Roentgen κτλ. [Ο Bohr αναφέρεται στην επιτυχία με την οποία ο Αϊνστάιν και οι άλλοι ερευνητές εφάρμοσαν την έννοια του φωτονίου σε διάφορες περιοχές, στα χρόνια ως το 1905.]

Το αποτέλεσμα της μελέτης φαινόταν να είναι η γενική αποδοχή της ανεπάρκειας της κλασικής ηλεκτροδυναμικής να περιγράψει τη συμπεριφορά συστημάτων ατομικού μεγέθους. Οποιαδήποτε μετατροπή κι αν επιφέρουμε στους νόμους της κίνησης του ηλεκτρονίου, φαίνεται απαραίτητο να εισαγάγουμε μια ποσότητα που δεν περιέχεται στην κλασική ηλεκτροδυναμική, τη σταθερά του Plank ή, όπως συνήθως ονομάζεται, «το στοιχειώδες κβάντο δράσης». Εισάγοντας αυτήν την ποσότητα, το ζήτημα της σταθερότητας της κατανομής των ηλεκτρονίων στα άτομα αλλάζει ουσιαστικά: η συγκεκριμένη σταθερά έχει τέτοιες διαστάσεις και μέγεθος, ώστε μαζί με τη μάζα και το φορτίο των σωματιδίων είναι δυνατό να προσδιορίσουμε ένα μήκος της τάξης μεγέθους που χρειαζόμαστε.

Με την τελευταία φράση του, ο Bohr αναφέρεται σε επιχειρήματα της διαστατικής ανάλυσης που επικρατούσαν ευρέως εκείνη την εποχή. (Συνήθως, επισημαίνουμε στους μαθητές τη σημασία τού να ελέγχουν την ορθότητα από διαστατική άποψη των λύσεών τους. Σπάνια, ωστόσο, σε μια εισαγωγική σειρά μαθημάτων υπογραμμίζουμε τον σημαντικό ρόλο που έπαιξε αυτός ο προσεγγιστικός τρόπος εκτίμησης σε ορισμένα άλματα που πραγματοποιήσε ο επαγωγικός τρόπος σκέψης στην έρευνα των θετικών επιστημών. Το απόσπασμα που προαναφέραμε αποτελεί πολύτιμη ευκαιρία για μια τέτοια παρουσίαση.) Το ένα επιχείρημα περιελάμβανε τη στροφορμή: όταν ο Bohr έγραφε το κείμενο, ήταν σαφές από όλους ότι το h έχει διαστάσεις στροφορμής. Είχαν γίνει, επίσης, ανεπιτυχείς προσπάθειες να δημιουργηθούν πυρηνικά πρότυπα όπου, όταν μεμονωμένα ηλεκτρόνια εισέρχονται ή εγκαταλείπουν έναν τροχιακό δακτύλιο που τον καταλαμβάνουν άλλα ηλεκτρόνια, η ολική στροφορμή να μεταβάλλεται κατά ακέραιες ποσότητες. Ένα επιχείρημα διαστατικής ανάλυσης (που αναφέρεται στην τελευταία φράση του αποσπάσματος) συνίστατο στην απόδειξη ότι ο συνδυασμός h^2/mke^2 έχει διαστάσεις μήκους και τάξη μεγέθους που αντιστοιχεί στο μέγεθος του ατόμου. (Αυτή η έκφραση είναι στο σύστημα SI· m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου και k η σταθερά του νόμου του Coulomb.)

Ο Bohr, παρακινούμενος από τα δεδομένα αυτά, πρότεινε να εφαρμοστεί η υπόθεση για το φωτόνιο του Αϊνστάιν ως εξής:

1. Για συστήματα με ακτίνα τάξης μεγέθους ίση με του ατόμου πρέπει να εγκαταλείψουμε την κλασική ηλεκτροδυναμική: τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται σε σταθερές κυκλικές τροχιές («στάσιμες καταστάσεις»), χωρίς να ακτινοβολούν συνεχώς. Για να παραμείνει σε ισχύ ο νόμος διατήρησης της ενέργειας, θεωρούμε ότι το σύστημα ηλεκτρονίου-πυρήνα κερδίζει ή χάνει ενέργεια μόνον όταν τα ηλεκτρόνια μετακινούνται από μια στάσιμη κατάσταση σε άλλη. Όταν το ηλεκτρόνιο μετακινείται από την τροχιά ακτίνας r_1 στην τροχιά ακτίνας r_2 , η ενέργεια του συστήματος μεταβάλλεται κατά $E(r_2) - E(r_1)$. Το αν θα συμβεί απορρόφηση ή εκπομπή ενέργειας εξαρτάται από το αν η r_2 είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την r_1 .

2. Επικαλούμενοι την έννοια του φωτονίου του Αϊνστάιν, θεωρούμε ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία απορροφάται ή εκπέμπεται μόνο κατά τη μετακίνηση των ηλεκτρονίων από μια τροχιά σε άλλη. Θεωρούμε, επίσης, ότι η απορρόφηση ή η εκπομπή ενέργειας από μεμονωμένα ηλεκτρόνια συνδέεται με την απορρόφηση ή την εκπομπή μεμονωμένων κβάντων ενέργειας $h\nu$, σύμφωνα με την εμπειρική ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου που πρότεινε ο Αϊνστάιν. Προκύπτει, λοιπόν, η σχέση:

$$h\nu = |E(r_2) - E(r_1)| \quad (10.11.1)$$

3. Επιστρέφοντας στον εμπειρικό τύπο των Balmer-Rydberg για το υδρογόνο και μετατρέποντάς τον σε έκφραση για τις συχνότητες που αντιστοιχούν στις παρατηρούμενες φωτεινές γραμμές (και όχι σε έκφραση για την ποσότητα $1/\lambda$), παίρνουμε:

$$\nu = cR_H \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_a^2} \right) \quad (10.11.2)$$

Η εξίσωση 10.11.2, αν συγκριθεί με την 10.11.1, μας υποβάλλει έντονα την ιδέα ότι κάθε όρος του δεξιού μέλους του τύπου των Balmer-Rydberg αντιστοιχεί σε στάσιμη κατάσταση ορισμένης ακτίνας. Ο Bohr, λοιπόν, προσδιόρισε την αντιστοιχία:

$$h\nu = |E(r_2) - E(r_1)| = hcR_H \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_a^2} \right| \quad (10.11.3)$$

4. Επειδή στο φάσμα του υδρογόνου εμφανίζονται μόνον ορισμένες διακριτές μεταξύ τους συχνότητες, η Εξ. 10.11.3 σημαίνει ότι μόνον ορισμένες διακριτές μεταξύ τους στάσιμες καταστάσεις ή ενεργειακές «στάθμες» (δηλαδή, μόνον ορισμένες διακριτές τιμές της τροχιακής ακτίνας r) εμφανίζονται στη δομή του ατόμου. Αυτή η παρατήρηση θέτει το ζήτημα να ανακαλύψουμε, με κάποιο τρόπο, μια πρόσθετη συνθήκη περιορισμού του αριθμού των επιτρεπόμενων ενεργειακών σταθμών ή —χρησιμοποιώντας σύγχρονη ορολογία— έναν κανόνα κβάντωσης.

5. Τέλος, υπάρχει το ζήτημα πώς φανταζόμαστε στις νέες συνθήκες το ιδιαίτερο άτομο που εξετάζουμε, δηλαδή το άτομο του υδρογόνου. Ο Bohr γράφει:

Υπάρχουν γενικές ενδείξεις ότι το άτομο του υδρογόνου αποτελείται, απλώς, από ένα μοναδικό ηλεκτρόνιο που στρέφεται γύρω από έναν πυρήνα θετικού φορτίου e . [Αυτό το συμπέρασμα] ενισχύεται σημαντικά από το ότι το υδρογόνο στα πειράματα των καθοδικών ακτίνων, που εκτέλεσε ο Sir J. J. Thomson, είναι το μοναδικό στοιχείο που ουδέποτε εμφανίζεται με θετικό φορτίο το οποίο αντιστοιχεί σε απώλεια περισσότερων από ένα ηλεκτρονίων.

Σε τούτο το σημείο, ο Bohr παραθέτει σε υποσημείωση ένα απόσπασμα από άρθρο του Thomson (1912). Στο άρθρο του ο Thomson περιγράφει τα πειράματα που εκτέλεσε με μια «χοντροκομμένη, πρωτόγονη» συσκευή φασματογράφου μάζας. Στα πειράματα αυτά, μια δέσμη θετικών ιόντων διαχωριζόταν υπό την επίδραση *παράλληλων* ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Κάθε είδος ιόντος που εμφανιζόταν, ακολουθώντας παραβολική τροχιά, έπεφτε σε μια οθόνη στο τέλος του σωλήνα. Ο Thomson παρατηρεί:

Κάθε στοιχείο που εξέτασα έδινε πολλαπλά φορτισμένα άτομα, με εξαίρεση το υδρογόνο το οποίο ουδέποτε παρατήρησα να έχει περισσότερα από ένα φορτία.

(Αν δώσουμε στους μαθητές να «γευτούν» τις στοιχειώδεις ιδέες που προαναφέραμε, η ιστορία γίνεται πιο ενδιαφέρουσα και αποτελεσματικότερη παρὰ αν διακηρύξουμε, απλώς, ότι το υδρογόνο αποτελείται από ένα

ηλεκτρόνιο κι ένα πρωτόνιο, επειδή είναι το ελαφρύτερο γνωστό στοιχείο. Ο Bohr παρέθεσε ορισμένα δεδομένα, για να υποστηρίξει με πιο εκλεπτυσμένο τρόπο το πρότυπό του. Δεν περιορίστηκε στην εν λόγω διακήρυξη.)

6. Σε τούτο το σημείο, πρέπει να πούμε κάτι για την ενέργεια της στάσιμης κατάστασης. Για την ολική ενέργεια του συστήματος ηλεκτρονίου-πρωτονίου ο Bohr χρησιμοποίησε την κλασική σχέση:

$$E(r) = -\frac{ke^2}{2r} \quad (10.11.4)$$

Θεώρησε, ωστόσο, ότι έπρεπε να δώσει ορισμένες εξηγήσεις για το ότι αναμειγνύει διαφορετικές υποθέσεις:

[Θεωρούμε] ότι στις στάσιμες καταστάσεις μπορούμε να μελετήσουμε τη δυναμική ισορροπία των συστημάτων με τη βοήθεια της παραδοσιακής μηχανικής. Δεν μπορούμε, ωστόσο, σε τούτο το πλαίσιο να μελετήσουμε τη μετάβαση των συστημάτων από τη μια στάσιμη κατάσταση στην άλλη.

(Στο στάδιο αυτό, βεβαίως, η κβαντική μηχανική με την αρχική μορφή της παρουσιάστηκε ατελής: δεν μπόρεσε να «πει» κάτι για την πιθανότητα μετάβασης μεταξύ των καταστάσεων. Παράλληλα, έπρεπε να διακόψει κάθε σύνδεση με τη νευτώνεια μηχανική. Ο Bohr, ωστόσο, είχε επίγνωση για τον δοκιμαστικό χαρακτήρα της έρευνάς του και εξέφρασε ανοιχτά τις αμφιβολίες του.) Αν «επιτρέπονται» μόνον ορισμένες διακριτές ενεργειακές στάθμες, το ηλεκτρόνιο είναι δυνατό να καταλάβει μόνον ορισμένες διακριτές τροχιές ακτίνας r και καταστάσεις ενέργειας. Οι ενεργειακές στάθμες προκύπτουν από τη σχέση:

$$E_n = -\frac{ke^2}{2r_n} \quad (10.11.5)$$

Επειδή κάθε όρος στο δεξιό μέλος της Εξ. 10.11.3 πρέπει να είναι ενέργεια, κάθε ιδιαίτερη ενεργειακή στάθμη E_n πρέπει να συνδέεται με τη σταθερά του Rydberg ως εξής:

$$E_n = -\frac{hcR_H}{n^2} \quad (10.11.6)$$

Το n συμβολίζει έναν ακέραιο αριθμό διαφορετικό από το μηδέν.

7. Απαλείφοντας το E_n από τις Εξ. 10.11.5 και 10.11.6, προκύπτει:

$$r_n = n^2 \frac{ke^2}{2hcR_H} \quad (10.11.7)$$

Παραμένει, λοιπόν, το πρόβλημα, όπως επισημάναμε στην 4η παράγραφο, να βρούμε έναν κανόνα κβάντωσης, με τον οποίο θα προσδιορίζουμε τις επιτρεπόμενες ακτίνες και θα μπορούμε να υπολογίζουμε τη σταθερά του Rydberg με τη βοήθεια θεμελιωδέστερων παγκόσμιων σταθερών.

Σε επόμενα άρθρα του, ο Bohr χρησιμοποίησε την ποσότητα $h/2\pi$ για την κβάντωση της στροφορμής, όπως περιγράφεται στα περισσότερα εγχειρίδια. Προχώρησε, ωστόσο, αφού στο πρώτο άρθρο του έδειξε ότι η κβάντωση, μέσω της εφαρμογής της αρχής της αντιστοιχίας, οδηγεί στην κβάντωση της στροφορμής.

Επικαλούμαστε την αρχή της αντιστοιχίας, αφού εισαγάγουμε την εξής απαίτηση: όταν το n και η ακτίνα της τροχιάς μεγαλώσουν (δηλαδή, όταν η ακτίνα πλησιάσει τις μακροσκοπικές διαστάσεις), η συχνότητα του φωτονίου που εκπέμπεται κατά τη μετάβαση μεταξύ δύο διαδοχικών τροχιών, γίνεται ίση με τη συχνότητα της τροχιακής κίνησης, δηλαδή με τη συχνότητα της ακτινοβολίας που προβλέπει η θεωρία του Maxwell.

Αν εξετάσουμε τη συμπεριφορά του ν ως συνάρτηση του n για άλμα μεταξύ διαδοχικών τροχιών, η Εξ. 10.11.3 γίνεται:

$$\nu = \frac{E_{n+1} - E_n}{h} = cR_H \left[\frac{2n+1}{(n+1)^2 n^2} \right] \quad (10.11.8)$$

Όταν, λοιπόν, το n αυξηθεί, έχουμε:

$$\nu \rightarrow cR_H \frac{2}{n^3} \quad (10.11.9)$$

Εφαρμόζοντας τη νευτώνεια δυναμική στην τροχιακή κίνηση του ηλεκτρονίου (αμελούμε την κίνηση του πυρήνα, εξετάζοντας το πρόβλημα της κίνησης ενός και όχι δύο σωμάτων· αργότερα, ωστόσο, θα κάνουμε την απαραίτητη διόρθωση), η συχνότητα της τροχιακής κίνησης δίνεται από τη σχέση:

$$f_n^2 = \frac{ke^2}{4\pi^2 m r_n^3} \quad (10.11.10)$$

Επειδή η αρχή της αντιστοιχίας απαιτεί το ν να προσεγγίζει το f_n , όταν μεγαλώνει το n , λαμβάνοντας υπόψη μας την Εξ. 10.11.9, θέτουμε:

$$f_n = \frac{2cR_H}{n^3} \quad (10.11.11)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. 10.11.7, 10.11.10 και 10.11.11, καταλήγουμε στα γνωστά αποτελέσματα:

$$R_H = \frac{2\pi^2 m (ke^2)^2}{ch^3} \quad (10.11.12)$$

$$E_n = - \frac{2\pi^2 m (ke^2)^2}{n^2 h^2} \quad (10.11.13)$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m ke^2} \quad (10.11.14)$$

που για τη στροφορμή $L_n = 2\pi m r_n^2 f_n$ ανάγονται στη σχέση:

$$L_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (10.11.15)$$

Από αυτή τη στιγμή, ο Bohr υιοθέτησε την Εξ. 10.11.15 ως κανόνα κβάντωσης.

Είναι σαφές ότι αν εφαρμόσουμε απευθείας την αρχή της αντιστοιχίας, οι αλγεβρικές πράξεις είναι ευκολότερες από εκείνες που μεσολάβησαν μέχρι να καταλήξουμε στην Εξ. 10.11.15. Από την άποψη της φυσικής, ωστόσο, η πρώτη διαδικασία φαίνεται πιο λογική στους μαθητές. Είναι σαφές, επίσης, ότι αρχικά ο ίδιος ο Bohr ακολούθησε ψηλαφητά αυτήν την πορεία. Αλλιώς, είναι απίθανο να είχε μπει στον κόπο να δημοσιεύσει την προσέγγιση της αρχής της αντιστοιχίας, πριν οδηγηθεί στην κβάντωση της στροφορμής.

Αξίζει να παραθέσουμε την άποψη του Rutherford για τις ιδέες αυτές. Σε επιστολή του προς τον Bohr, με ημερομηνία 20 Μαρτίου 1913, αναφέρει [Birks (1962)]:

Έλαβα το άρθρο σου και το διάβασα με μεγάλο ενδιαφέρον· θέλω, ωστόσο, να το ξαναδώ προσεκτικά, όταν θα έχω μεγαλύτερη άνεση. Οι ιδέες σου για την προέλευση του φάσματος του υδρογόνου είναι πολύ έξυπνες και μου φαίνεται ότι θα εξελιχθούν ικανοποιητικά. Είναι δύσκολο, ωστόσο, να αντιληφθώ από φυσική άποψη πού βασίζεται η ανάμιξη των ιδεών του Plank με την παλιά μηχανική. Μου φαίνεται ότι στις υποθέσεις σου υπάρχει μια σοβαρή δυσκολία που, χωρίς αμφιβολία, την αντιλαμβάνεσαι απολύτως κι εσύ: πώς ένα ηλεκτρόνιο, περνώντας από τη μια στάσιμη κατάσταση στην άλλη, αποφασίζει με ποια συχνότητα θα ταλαντωθεί; Μου φαίνεται ότι πρέπει να θεωρήσεις πως το ηλεκτρόνιο γνωρίζει εκ των προτέρων πού θα σταματήσει.

Οι μαθητές αρχίζουν να απορούν μ' αυτού του είδους τα θέματα, αν δεν καταπνιγούν οι απορίες τους από την ενοχή ότι είναι ανόητες. Αν τελικά αναρωτηθούν, βρίσκονται όντως σε καλό δρόμο: προετοιμάζονται να κατανοήσουν γιατί η νέα κβαντική μηχανική πρέπει να αντικαταστήσει την παλιά.

Υπάρχουν, επίσης, αρκετές ερωτήσεις εκτός από τους συνήθεις αριθμητικούς υπολογισμούς, που αφορούν το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών. Οι ερωτήσεις αυτές βοηθούν τους μαθητές να εμβαθύνουν στο κβαντικό πρότυπο:

1. Πριν από μερικά χρόνια σε τελικές εξετάσεις μεταπτυχιακών σπουδών, παρουσιάζοντας μια απεικόνιση φασματικών γραμμών απορρόφησης και εκπομπής, με τη μια γραμμή πάνω από την άλλη, ρώτησα: «Εξηγήστε *ΠΟΙΟΤΙΚΑ* με λίγα λόγια πώς το κβαντικό πρότυπο του ατόμου ερμηνεύει τη διαφορά μεταξύ των δύο φασμάτων: γιατί το φάσμα εκπομπής έχει τις ίδιες γραμμές με το φάσμα απορρόφησης, αλλά και γραμμές που το φάσμα απορρόφησης δεν τις περιέχει;»

Στις εξετάσεις συμμετείχαν δεκατέσσερις σπουδαστές. Ένας απ' αυτούς απάντησε σαφώς ότι επειδή κατά την απορρόφηση τα ηλεκτρόνια ανέρχονται από τη θεμελιώδη κατάσταση σε υψηλότερη, παρατηρούμε μόνον αυτές τις μεταβάσεις. Κατά την εκπομπή, ωστόσο, το ηλεκτρόνιο, εκτός από το να πέσει κατευθείαν στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι δυνατό να «κατρακυλήσει» περνώντας από ενδιάμεσες καταστάσεις· έτσι, παράγονται πρόσθετες γραμμές. Πέντε σπουδαστές, παρά την έμφαση που έδωσα στη λέξη «ποιοτικά», «εκτοξεύθηκαν» σε άσχετους κβαντομηχανικούς υπολογισμούς χρησιμοποιώντας κανόνες επιλογής, χωρίς να καταλήξουν που-

θενά. Οι υπόλοιποι δεν απάντησαν καθόλου. Δεν επρόκειτο, ωστόσο, για ανίκανους σπουδαστές: δεν είχαν, απλώς, την ευκαιρία να αντιμετωπίσουν βασικές ερωτήσεις αυτού του είδους και να αναφερθούν σ' αυτές με δικά τους λόγια. Η εν λόγω εμπειρία υπογραμμίζει την ανάγκη να αντιμετωπίζουν οι μαθητές από την πρώτη στιγμή ποιοτικές ερωτήσεις.

2. Την εποχή που ο Bohr πρότεινε το κβαντικό πρότυπο, είχε επισημανθεί το εξής: αν και σε εργαστηριακούς σωλήνες εκκένωσης είναι δυνατό να παρατηρήσουμε 10 ή 12 γραμμές της σειράς Balmer, στο φάσμα των άστρων και στο στέμμα του Ηλίου είχαν εντοπιστεί έως και 33 γραμμές αυτής της σειράς. Ο Bohr επωφεληθήκε από την παρατήρηση αυτή:

Ακριβώς αυτό περιμέναμε από τη θεωρία που προανέφερα. Σύμφωνα με αυτήν, η διάμετρος της τροχιάς του ηλεκτρονίου σε διάφορες καταστάσεις είναι ανάλογη με το n^2 . Για $n = 12$, η διάμετρος ισούται με $160 \text{ \AA}$ ή ισούται με τη μέση απόσταση των μορίων, όταν βρίσκονται υπό πίεση 7 mm υδραργύρου. Για $n = 33$, η διάμετρος ισούται με $1.200 \text{ \AA}$, που αντιστοιχεί στη μέση απόσταση των μορίων υπό πίεση $0,02 \text{ mm}$ υδραργύρου. Σύμφωνα με τη θεωρία, λοιπόν, για να εμφανιστούν πολλές γραμμές, πρέπει η πυκνότητα του αερίου να είναι μικρή. Ταυτόχρονα, για να λάβουμε παρατηρήσιμη ένταση, ο χώρος που καταλαμβάνει το αέριο πρέπει να είναι πολύ μεγάλος.

Πίεση περίπου 7 mm επικρατεί σε εργαστηριακό σωλήνα εκκένωσης. Είναι δύσκολο να λάβουμε ικανοποιητικές εντάσεις σε χαμηλότερες πιέσεις. Έχουμε, λοιπόν, την ευκαιρία χρησιμοποιώντας αριθμητικές τιμές της ακτίνας, να εμβαθύνουμε από φυσική άποψη σε σημαντικά φαινόμενα. Στο σωλήνα εκκένωσης τα άτομα αρχίζουν να αλληλεπιδρούν όταν το n ισούται περίπου με δώδεκα. Στην ατμόσφαιρα των άστρων, δεν εκδηλώνεται η αλληλεπίδραση, παρά μόνον όταν το n ισούται περίπου με 33. Στην τελευταία περίπτωση, ωστόσο, επωφελούμαστε από το ότι παρατηρούμε τεράστιους όγκους αερίου. Προκύπτει, λοιπόν, παρατηρήσιμη ένταση παρά την πολύ χαμηλή πυκνότητα του αερίου. Οι συγκεκριμένοι συλλογισμοί έχουν πλούσιο φυσικό περιεχόμενο. Εντούτοις, οι μαθητές δεν ασχολούνται με συλλογισμούς αυτού του είδους, παρά μόνον αν τους δοθεί άμεσα η ευκαιρία.

3. Μια από τις σοβαρότερες αδυναμίες του προτύπου του Bohr προσφέρεται ως ευκαιρία για να επαναλάβουμε τις βασικές έννοιες του ηλεκτρισμού. Το πρότυπο προβλέπει ότι η θεμελιώδης κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου έχει μη μηδενική μαγνητική ροπή. Είναι γνωστό ωστόσο ότι έχει μηδενική μαγνητική ροπή. Στην παρούσα φάση του «παιχνιδιού», πολλοί μαθητές έχουν ξεχάσει όσα έμαθαν για τους βρόχους που διαρρέονται από

ρεύμα και για τη μαγνητική συμπεριφορά τους. Αν, λοιπόν, επαναλάβουμε αυτές τις έννοιες και συνδέσουμε τα μακροσκοπικά φαινόμενα με τα μικροσκοπικά, οι ιδέες αποτυπώνονται καλύτερα στους μαθητές. Ταυτόχρονα, η διασταύρωση προετοιμάζει το έδαφος για να εκτιμήσουν βαθύτερα έναν από τους πρώτους θριάμβους της σύγχρονης κβαντικής θεωρίας (τουλάχιστον, όσοι μαθητές θα συνεχίσουν έως εκείνο το επίπεδο).

Τελευταίες παρατηρήσεις: Το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου δεν είναι αποτέλεσμα ισχυρής θεωρητικής σύνθεσης, αλλά ουσιαστικά ένα *ad hoc* πρότυπο. Η θεωρία, δηλαδή η «κβαντική μηχανική», αναπτύχθηκε αργότερα. Αυτό δεν καθιστά άχρηστη από παιδαγωγική άποψη την «ιστορία» του Bohr. Πολλοί όροι από το λεξιλόγιό του και πολλές φυσικές ιδέες του διατηρούνται μέχρι σήμερα. Με το χρόνο εξελίχθηκε, επίσης, η έννοια του φωτονίου: η άποψη του Αϊνστάιν για τον απόλυτα σωματιδιακό χαρακτήρα της συγκεκριμένης οντότητας εγκαταλείφθηκε. Αυτό δεν σημαίνει ότι πρέπει να ξεχάσουμε αυτή την ιστορία (τελικά το βραβείο Νόμπελ δεν απονεμήθηκε στον Αϊνστάιν για τη θεωρία της σχετικότητας, αλλά γι' αυτήν τη συνεισφορά του). Δεν είναι, λοιπόν, απαραίτητο να κρύψουμε από τους μαθητές ότι «η ιστορία συνεχίζεται». [Οι Kidd, Ardini και Anton (1989) μελετούν την εξέλιξη της έννοιας του φωτονίου από τον Αϊνστάιν μέχρι σήμερα και παραθέτουν εκτενή βιβλιογραφία.]

10.12 Η εισαγωγή της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας

Οι επαναστατικές απόψεις του Αϊνστάιν «κατέστρεφαν» την κλασική αντίληψη για την απολυτότητα του χώρου και του χρόνου. Χρειάστηκε, λοιπόν, πολύς καιρός για να διαδοθούν ευρέως στην επιστημονική κοινότητα. Μόνο λίγοι, ήδη προετοιμασμένοι γι' αυτό, επιστήμονες κατανόησαν γρήγορα και αποδέχθηκαν αυτές τις απόψεις. Οι ιδέες που υπεισέρχονται όταν μεταβαίνουμε στην ειδική σχετικότητα είναι εξαιρετικά λεπτές και αντίθετες με τη διαίσθηση. Είναι πιο λεπτές και αφηρημένες από το νόμο της αδράνειας ή από τις ιδέες που συνδέονται με την ενέργεια, την ορμή και τον ηλεκτρισμό. Η δυσκολία παραμένει ακόμα κι αν χρησιμοποιήσουμε πειράματα που βοηθούν στην εκτέλεση λειτουργικών συλλογισμών. Οι μαθητές, λοιπόν (ακόμα και οι υποψήφιοι φυσικοί), την πρώτη φορά που θα παρακολουθήσουν την έκθεση των ιδεών της ειδικής σχετικότητας, δικαιολογημένα, δεν κατανοούν το νόημα όσων «συμβαίνουν γύρω τους». Και τούτο ασχέτως με το αν λύνουν τα προβλήματα που υπάρχουν στο τέλος του αντίστοιχου κεφαλαίου, χρησιμοποιώντας τους μετασχηματισμούς του Lorentz.

Επειδή οι ιδέες είναι λεπτές, δεν υπάρχει σύντομος, εύκολος και αποτελεσματικός τρόπος κατάλληλος για κάθε αρχάριο. Είναι, ωστόσο, απολύ-

τως εφικτό να παρουσιάσουμε μια ποιοτική φαινομενολογική εισαγωγή. Μια τέτοια εισαγωγή θέτει τα θεμέλια για να αντιληφθούν, αργότερα, οι μαθητές θετικής κατεύθυνσης το φορμαλισμό και οι υπόλοιποι τη σχετικότητα του χώρου και του χρόνου. Στη συνέχεια, παραθέτουμε ένα πολύ σύντομο περίγραμμα μιας παρουσίασης αυτού του είδους. Περισσότερες λεπτομέρειες υπάρχουν σε άλλα κείμενα, λόγου χάρη στα βιβλία του Arons (1965) και του Huggins (1968).

Πριν ασχοληθούμε με διαφορετικά συστήματα αναφοράς, είναι απαραίτητο να επανεξετάσουμε τον τρόπο που μετράμε το χώρο και το χρόνο σε ένα μοναδικό σύστημα — στο συνηθέστερο για μας. Επειδή πολλά εγχειρίδια περιέχουν κατάλληλες λειτουργικές περιγραφές μέτρησης του χώρου, δεν θα ασχοληθούμε εδώ με αυτό το θέμα. Οι μαθητές δυσκολεύονται να αντιληφθούν κυρίως την έννοια που ο Bridgman (1962) αποκαλεί «κατανομή του χρόνου στο χώρο», δηλαδή την έννοια του συγχρονισμού ρολογιών που κατανέμονται στο χώρο και την έννοια του «ταυτόχρονου». Αν και σε πολλά εγχειρίδια αναφέρεται ο συγχρονισμός (με τη χρήση σήματος κτλ.), συνήθως δεν δίνεται μεγάλη έμφαση στο ότι η κατανομή του χρόνου στο χώρο είναι αποτέλεσμα ορισμού, σύμβασης και προσωπικής επινόησης· δεν πρόκειται για αλήθεια ανεξάρτητη από μας. Αυτή η παρατήρηση ίσως φαίνεται τετριμμένη στους φυσικούς που είναι εξοικειωμένοι με τις ιδέες. Οι αρχάριοι, ωστόσο — νέοι ή ενήλικοι —, αντιστέκονται σθεναρά στο να αποδεχθούν αυτήν την άποψη. Δεν πιστεύουν ότι ο συγχρονισμός των ρολογιών και το ταυτόχρονο πρέπει να οριστούν κατά σύμβαση. (Το ότι ο ίδιος ο Αϊνστάιν θεωρούσε κρίσιμη την έννοια του ταυτόχρονου για την κατανόηση της θεωρίας του φαίνεται από τον προεξάρχοντα ρόλο που έδωσε σε τούτην την έννοια στη δική του εκλαΐκευση της σχετικότητας [Αϊνστάιν, (1961)].)

Είναι απαραίτητο να διακρίνουμε δύο είδη ταυτόχρονου: το τοπικό και το «από απόσταση». Όταν αναφερόμαστε στο ταυτόχρονο, αμέσως το μυαλό των περισσότερων μαθητών «πηγαίνει» μόνο στο πρώτο είδος: στην αίσθηση που έχουμε όταν δύο γεγονότα συμβαίνουν ακριβώς μπροστά μας, εδώ και τώρα. Δεν μπορούν να αντιληφθούν ότι υπάρχει όντως ζήτημα προσδιορισμού του ταυτόχρονου (ή του μη ταυτόχρονου) μεταξύ ενός γεγονότος που συμβαίνει μπροστά μας και ενός άλλου που συμβαίνει μακριά μας ή ακόμα μεταξύ δύο γεγονότων που συμβαίνουν μακριά μας. Ο Bridgman (1962) επισημαίνει ότι δεχόμαστε διαισθητικά το «τοπικό ταυτόχρονο» ως πρωταρχική έννοια, όπως ακριβώς οι μαθηματικοί δέχονται την έννοια του «σημείου» και του «κέντρου», χωρίς να προσπαθούν μάταια να την ορίσουν καταλήγοντας σε κυκλικούς ορισμούς. «Το ταυτόχρονο γεγονός των απέχουν μεταξύ τους», ωστόσο, πρέπει να οριστεί προσεκτικά με λειτουργικό τρόπο. Εδώ ακριβώς υπεισέρχεται η διαδικασία του συγχρονισμού ρολογιών που απέχουν μεταξύ τους. Οι αρχάριοι δυσκολεύονται

να αποδεχθούν την ιδέα ότι η διαισθητική αντίληψη που έχουμε για το «τοπικό ταυτόχρονο» δεν μπορεί να επεκταθεί αυτόματα στο ταυτόχρονο δύο γεγονότων που απέχουν μεταξύ τους. Οι περισσότεροι αντιστέκονται σθεναρά στην ιδέα ότι η διαδικασία με τα ρολόγια δεν είναι η ποσοτικοποίηση μιας προϋπάρχουσας πραγματικότητας, αλλά ορισμός. (Η αντίσταση είναι δυνατό να καμφθεί, κάπως, αν ρωτήσουμε το μαθητή πώς μπορεί να προσδιορίσει τι συμβαίνει ακριβώς *τώρα* στο *α* του Κενταύρου, τέσσερα έτη φωτός μακριά.)

Πρέπει να ενημερώσουμε σαφώς τους μαθητές ότι ακόμα και σε ένα μοναδικό σύστημα αναφοράς, ο συγχρονισμός είναι ζήτημα ορισμού. Ειδάλλως βρίσκονται απροετοίμαστοι να αντιληφθούν τι συμβαίνει, όταν αρχίσουμε να συγκρίνουμε τις παρατηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από δύο διαφορετικά συστήματα. Από την άλλη, αν τους έχουμε ενημερώσει, είναι καλύτερα προετοιμασμένοι να κατανοήσουν την ύπαρξη ασυμφωνίας μεταξύ διαφορετικών παρατηρητών. Η εισαγωγή, λοιπόν, της ειδικής σχετικότητας είναι αποτελεσματικότερη αν αρχίσουμε με μια αργή, προσεκτική εξέταση της έννοιας της «κατανομής του χρόνου στο χώρο» σε ένα μοναδικό σύστημα αναφοράς και δώσουμε ιδιαίτερη έμφαση στο ότι το ταυτόχρονο δύο γεγονότων που απέχουν μεταξύ τους πρέπει να *οριστεί* με λειτουργικό τρόπο — δεν είναι κάτι που «υπάρχει» αυτοτελώς.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν ποικίλες αξιόλογες μελέτες και ιδεατά πειράματα για το συγχρονισμό των ρολογιών και για το ταυτόχρονο. Καθένα έχει τα προτερήματά του. Για τη σύγκριση, ωστόσο, ταυτόχρονων γεγονότων, που θα μας χρειαστεί μελλοντικά, θεωρώ ότι το απλούστερο και αμεσότερο πείραμα είναι το εξής: κατανέμουμε το χρόνο στο χώρο (κατά μήκος του άξονα x), συγχρονίζοντας ρολόγια που βρίσκονται τοποθετημένα σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους δεξιά και αριστερά από ορισμένο κεντρικό σημείο από το οποίο εκπέμπεται ένας παλμός. Μόλις φτάσει το σφαιρικό κύμα που εκπέμπεται από το κεντρικό σημείο, θεωρούμε ότι τα ρολόγια αρχίζουν να δουλεύουν συγχρονισμένα. (Αργότερα, είναι εύκολο να αντιληφθούμε ότι από την άποψη του παρατηρητή που κινείται κατά μήκος του άξονα x , τα δύο ρολόγια δεν άρχισαν να δουλεύουν ταυτόχρονα.)

Ενώ ακόμα αναφερόμαστε μόνο σε ένα σύστημα, είναι σημαντικό να υπογραμμίσουμε στους μαθητές ότι η χρήση φωτός (στην πραγματικότητα, ραδιοκυμάτων) είναι μάλλον ζήτημα σύμβασης και ακρίβειας παρά λογική αναγκαιότητα: λιγότερο ακριβείς διαδικασίες συγχρονισμού (λόγου χάρη, με ηχητικά σήματα σε ακίνητο αέρα, με αργή μεταφορά χρονομέτρων ακριβείας κτλ.) συμφωνούν τόσο μεταξύ τους όσο και με το συγχρονισμό με ηλεκτρομαγνητικό σήμα. Ο λόγος που περιοριζόμαστε στο ηλεκτρομαγνητικό σήμα (εκτός του ότι επιτυγχάνουμε υψηλή ακρίβεια και του ότι, στην πραγματικότητα, σε όλο τον κόσμο τα ρολόγια συγχρονίζονται με αυτόν τον τρόπο) είναι ότι, σε τελική ανάλυση, όπως θα δούμε, μόνο του συγκε-

κριμένου σήματος η ταχύτητα είναι κοινή ως προς δύο διαφορετικά συστήματα αναφοράς (δηλαδή, ως προς συστήματα που κινούνται το ένα ως προς το άλλο). Άρα, ο μόνος τρόπος να συνδέσουμε τις παρατηρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί από διαφορετικά συστήματα αναφοράς είναι να χρησιμοποιήσουμε αυτήν την ταχύτητα.

Άλλο θέμα που αξίζει να το παρουσιάσουμε με βραδύτερο ρυθμό από το ρυθμό των περισσότερων εγχειριδίων, είναι η παθιασμένη αναζήτηση, τον 19ο αιώνα, του «απόλυτου» συστήματος αναφοράς, που ταυτίστηκε τελικά, με τον ηλεκτρομαγνητικό αιθέρα. Πολλοί μαθητές δεν αντιλαμβάνονται το κίνητρο αυτής της έρευνας. Ακόμα δεν έχουν αφομοιώσει πλήρως το ρόλο του συστήματος αναφοράς σε μια θεωρία φυσικής. Δεν αισθάνονται βέβαιοι για το νόημα του «αδρανειακού συστήματος». Τέλος, δεν αντιλαμβάνονται γιατί οι φυσικοί του 19ου αιώνα ήλπιζαν ότι ο αιθέρας θα αποδεικνυόταν το πρωτεύον σύστημα αναφοράς, τόσο για τη μηχανική όσο και για την ηλεκτροδυναμική. Η εξέταση των βασικών εννοιών και η ευκαιρία που προσφέρεται για επανάληψη της έννοιας του συστήματος αναφοράς βοηθά σημαντικά τους μαθητές να αφομοιώσουν αυτά τα θεμελιώδη θέματα φυσικής.

Πολλοί μαθητές, αν έχουν την ευκαιρία να μιλήσουν ελεύθερα, εκφράζουν τις αντιρρήσεις τους για τον τρόπο που σε τούτο το πλαίσιο χρησιμοποιούμε τη λέξη «απόλυτος». Τις περισσότερες φορές, ωστόσο, δεν είναι βέβαιοι για το νόημά της. Στο παρόν στάδιο, λοιπόν, όπως αναφέρει ο Bridgman, τους δίνεται η ευκαιρία να εξετάσουν αυτά τα ζητήματα:

Η λανθάνουσα αντίληψη που διαθέτουμε πριν χρησιμοποιήσουμε τη λέξη «απόλυτος», δεν είναι από μόνη της πολύ συγκεκριμένη: το νόημά της αφορά το θεολόγο και το φιλόσοφο, αλλά και τον φυσικό. Νομίζω ότι οι περισσότεροι φυσικοί, όταν χρησιμοποιούν τη λέξη «απόλυτος», στο βάθος του μυαλού τους δεν έχουν κάτι που δεν μπορούν να το προσδιορίσουν με φυσική λειτουργία, όπως συμβαίνει με τους θεολόγους και με τους φιλοσόφους. Αντιλαμβάνονται ότι αυτό το κάτι είναι δυνατό να προσδιοριστεί με συγκεκριμένη διαδικασία, που δεν υπόκειται σε τυχαίους, προσωρινούς τοπικούς παράγοντες... Αν, λοιπόν, επιβεβαιωνόταν με κάποιο τρόπο η ύπαρξη ενός αιθέρα που διαποτίζει τα πάντα, τότε η ταχύτητα ως προς τον αιθέρα θα ήταν ένα μέγεθος που οι φυσικοί θά 'θελαν να το ονομάσουν «απόλυτο». Είναι παράξενο το ότι υπάρχει μια μοναδικά ορισμένη ταχύτητα, η ταχύτητα ως προς τα σταθερά άστρα, που δεν θεωρούμε ότι έχει την ιδιότητα της απολυτότητας που, κατά βάθος, θα θέλαμε...

(Είναι ενδιαφέρον να υποθέσουμε τι θα μπορούσε να πει ο Bridgman για την ανακάλυψη της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου των

3°K^* και για την κίνησή μας ως προς αυτήν.)

Αφού κάπως εξασφαλίσουμε το ότι οι μαθητές κατανόησαν τι παρακίνησε τους φυσικούς να αναζητήσουν την κίνηση της Γης μέσα στον αιθέρα, περνάμε, φυσιολογικά, στις σχετικές μ' αυτήν την αναζήτηση πειραματικές προσπάθειες και στο αρνητικό αποτέλεσμά τους. Αυτό το θέμα, και ιδιαίτερα το πείραμα των Michelson και Morley, εξετάζεται ικανοποιητικά σε πολλά εγχειρίδια. Η διατύπωση του ίδιου του Αϊνστάιν στη δεύτερη παράγραφο του άρθρου του το 1905 παραμένει ένα από τα καλύτερα και σαφέστερα αφετηριακά σημεία της ειδικής σχετικότητας. Αφού στην πρώτη παράγραφο επισημαίνει ορισμένες δυσάρεστες ασυμμετρίες στην επικρατούσα άποψη για τα φαινόμενα της ηλεκτροδυναμικής, συνεχίζει:

Παραδείγματα αυτού του είδους και οι αποτυχημένες προσπάθειες ανακάλυψης πιθανής κίνησης της Γης ως προς το «ελαφρύ μέσο»⁸ δείχνουν ότι τα φαινόμενα της ηλεκτροδυναμικής, ~~αλλά και της μηχανικής~~, δεν έχουν χαρακτηριστικά που να αντιστοιχούν στην ιδέα της απόλυτης ηρεμίας. Δείχνουν, μάλλον, ότι... οι ίδιοι νόμοι της ηλεκτροδυναμικής και της οπτικής ισχύουν σε κάθε σύστημα αναφοράς όπου αληθεύουν οι νόμοι της μηχανικής. Θα αναβαθμίσουμε αυτή την εικασία σε αξίωμα. (Από τώρα και στο εξής, την ουσία του αξιώματος θα την περιλάβουμε στον όρο «Αρχή της Σχετικότητας».) Θα εισαγάγουμε, επίσης, ένα δεύτερο αξίωμα που μόνο φαινομενικά είναι ασυμβίβαστο με το πρώτο: σε κενό χώρο το φως διαδίδεται με συγκεκριμένη ταχύτητα c , άσχετα από την κατάσταση κίνησης του σώματος που το εκπέμπει. Τα δύο αξιώματα αρκούν για να δημιουργήσουμε μια απλή και συνεπή θεωρία ηλεκτροδυναμικής των κινούμενων σωμάτων που να στηρίζεται στη θεωρία του Maxwell για τα ακίνητα σώματα. Η εισαγωγή του «φωτοβολούντος αιθέρος» αποδεικνύεται περιττή: σύμφωνα

όπως

* Η ακτινοβολία αυτή εκπέμφθηκε κατά τη Μεγάλη Έκρηξη (Big Bang), τη στιγμή της δημιουργίας του Σύμπαντος. Από τότε πλημμυρίζει όλο το Σύμπαν και η θερμοκρασία της μειώνεται συνεχώς. Για πρώτη φορά ανιχνεύθηκε το 1965 από τους Αμερικανούς φυσικούς A. Penzias και R. Wilson. (Σ.τ.μ.).

8. Τα τελευταία χρόνια, μεταξύ των ιστοριών της επιστήμης έχει γίνει πολλή συζήτηση για το αν ο Αϊνστάιν γνώριζε τα αποτελέσματα των Michelson και Morley, όταν το 1905 έγραφε αυτό το άρθρο. Έχουν αναφερθεί πολλές ελαχιστότατες λεπτομέρειες υπέρ και κατά (περισσότερες κατά) αυτής της άποψης. Αργότερα, ο ίδιος ο Αϊνστάιν σε συνεντεύξεις με τον Shankland (1963) κάνει αλληλοσυγκρουόμενες δηλώσεις. Στο βαθμό, ωστόσο, που μας αφορά η εισαγωγή στη σκέψη του Αϊνστάιν, δεν έχει σημασία αν γνώριζε άμεσα το πείραμα των Michelson και Morley. Από την εισαγωγική παράγραφο που παραθέτουμε, πάντως, είναι σαφές ότι γνώριζε τα αρνητικά αποτελέσματα ορισμένων τουλάχιστον προσπαθειών προσδιορισμού της κίνησης ως προς τον αιθέρα.

με την άποψη που αναπτύσσουμε εδώ, δεν απαιτούμε την ύπαρξη ενός «απόλυτα στάσιμου χώρου», εφοδιασμένου με ξεχωριστές ιδιότητες, ούτε τον καθορισμό ενός διανύσματος ταχύτητας στο σημείο του κενού χώρου όπου συμβαίνει η ηλεκτρομαγνητική διαδικασία.

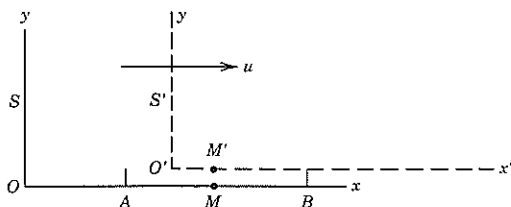
Για το δεύτερο αξίωμα, το αξίωμα της ταχύτητας του φωτός, αξίζει να σημειώσουμε την παρατήρηση του Bridgman (1962): «Το αξίωμα ότι η ταχύτητα του φωτός είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα της πηγής του είναι απαραίτητη προϋπόθεση της θεωρίας της σχετικότητας. Είναι, επίσης, θεμελιωδέστερο αξίωμα από εκείνο της ισότητας της ταχύτητας ως προς κάθε σύστημα αναφοράς...»

Έχοντας συγχρονίσει τα ρολόγια σε ένα σύστημα αναφοράς (με τη βοήθεια φωτεινών σημάτων εκπεμπόμενων από κάποιο κέντρο) και έχοντας δικαιολογήσει τα αξιώματα του Αϊνστάιν, μπορούμε πλέον να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να αντιληφθούν το εξής: οι παρατηρητές σε ένα δεύτερο σύστημα αναφοράς, που κινείται ως προς το πρώτο, δεν συμφωνούν ότι τα ρολόγια του πρώτου συστήματος συγχρονίστηκαν όντως με τη διαδικασία που επιλέξαμε. Είναι εύκολο, επίσης, να αντιληφθούν οι μαθητές ποιο ρολόι θεωρούν οι εν λόγω παρατηρητές ότι άρχισε να δουλεύει πριν από τα υπόλοιπα.

Στο Σχ. 10.12.1, το S παριστάνει το πρώτο σύστημα και το M το μέσο του AB . Μόλις ένας φωτεινός ή ραδιοφωνικός παλμός που ξεκινά από το M φτάσει στα σημεία A και B προκαλούνται (εξ ορισμού) ταυτόχρονα γεγονότα στα σημεία αυτά. Το S' παριστάνει το δεύτερο σύστημα, που κινείται προς τα δεξιά με ταχύτητα u ως προς το S . Τη στιγμή της εκπομπής του φωτεινού παλμού, τα σημεία M και M' συμπίπτουν.⁹ Το πρώτο βήμα (που χρειάζεται χρόνο και προσπάθεια για να είναι τελεσφόρο, σε αντίθεση με τις βιαστικές αναποτελεσματικές διακηρύξεις) είναι να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να κατανοήσουν ότι, σύμφωνα με το αξίωμα για την ταχύτητα του φωτός, για τους παρατηρητές του S το κέντρο του σφαιρικού παλμού παραμένει συνεχώς στο M και ότι οι παρατηρητές του S' κινούνται προς τα δεξιά ως προς το κέντρο της σφαίρας. Πρέπει, επίσης, να αντιληφθούν ότι για τους παρατηρητές του S' το κέντρο του φωτεινού παλμού παραμένει συνεχώς στο M' και ότι οι παρατηρητές του S κινούνται προς τα αριστερά ως προς το κέντρο της σφαίρας. Πρέπει, λοιπόν, να διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων αναφοράς και να κατανοήσουν ότι οι απόψεις

9. Κατά τη συζήτηση μέσα στην τάξη, μπορούμε να παραστήσουμε αποτελεσματικά και συγκεκριμένα κάθε σύστημα αναφοράς με μια σανίδα. Στο σημείο που μας ενδιαφέρει στερεώνουμε μια κατακόρυφη ράβδο. Για να ξεχωρίζουμε τα συστήματα μεταξύ τους, μπορούμε να βάψουμε τις σανίδες με διαφορετικό χρώμα. Μπορούμε, επίσης, να παραστήσουμε τη στιγμιαία θέση του κυματικού παλμού, που ξεκινά από το M και διαδίδεται κυκλικά, με μια κυκλική στεφάνη που έχει κάθε φορά κέντρο το M .

Σχήμα 10.12.1 Φωτεινός παλμός εκπέμπεται από το σημείο M , που βρίσκεται στο μέσο της απόστασης μεταξύ των απομακρυσμένων σημείων A και B . Τα σημεία αυτά βρίσκονται πάνω στον άξονα x του συστήματος S . Στο σύστημα S ο παλμός, μόλις φτάσει στα A και B , εξ ορισμού συγχρονίζει τα ρολόγια που βρίσκονται στα σημεία αυτά ή προκαλεί ταυτόχρονα γεγονότα εκεί. Το σύστημα S' κινείται προς τα δεξιά με ταχύτητα u ως προς το S . Τη στιγμή που εκπέμπεται ο παλμός, τα σημεία M και M' συμπίπτουν.



των παρατηρητών του S παραμένουν ασυμβίβαστες με τις απόψεις των παρατηρητών του S' . Η ανάλυση αυτή χρειάζεται, βεβαίως, χρόνο για να πραγματοποιηθεί.

Έχοντας παρουσιάσει με τον τρόπο που προαναφέραμε τις βασικές έννοιες, μπορούμε να παραθέτουμε περισσότερες λεπτομέρειες:

Από την άποψη των παρατηρητών που βρίσκονται στο S' , το σημείο M' παραμένει συνεχώς στο κέντρο της στεφάνης (αναφερόμαι στη συσκευή επίδειξης που πρότεινα προηγουμένως), ενώ τα σημεία A και B μετακινούνται προς τα αριστερά μέσα στον διαστελλόμενο κύκλο. Το B , λοιπόν, κινείται προς το προπορευόμενο μέτωπο του κύματος, ενώ το A απομακρύνεται απ' αυτό. Συνεπώς, οι παρατηρητές του S' ισχυρίζονται ότι το σήμα φτάνει στο B πριν φτάσει στο A και ότι το ρολόι στο B αρχίζει να λειτουργεί πριν από το ρολόι στο A . (Ο αντίστροφος ισχυρισμός των παρατηρητών στο S , ότι δηλαδή το ρολόι στο A' του συστήματος S' αρχίζει να λειτουργεί πριν από το ρολόι στο B' , προκύπτει από παρόμοια σειρά συλλογισμών. Αποτελεί, λοιπόν, κατάλληλη άσκηση για το σπίτι.)

Η συγκεκριμένη προσέγγιση της σχετικότητας του ταυτόχρονου είναι καλά γνωστή και χρησιμοποιείται ευρέως. Εδώ, λοιπόν, δεν την παραθέτω επειδή αποτελεί πρωτοτυπία, αλλά επειδή είναι η απαραίτητη βάση για την ποιοτική περιγραφή της συστολής του μήκους που παρουσιάσω στη συνέχεια. Αμιγώς ποιοτική περιγραφή της συστολής του μήκους είναι, επίσης, καλά γνωστή· υπάρχει, ωστόσο, σε ελάχιστα εγχειρίδια.

Το επόμενο στάδιο της μελέτης περιλαμβάνει, επίσης, έναν λειτουργικό ορισμό, τον οποίο οι μαθητές ουδέποτε αντιμετώπισαν και με τον οποίο, αρχικά, αντιμετωπίζουν σοβαρή δυσκολία. Πρόκειται για τον τρόπο μέτρησης του μήκους ενός κινούμενου σώματος. Το πρόβλημα είναι ανάλογο μ' εκείνο της διάκρισης μεταξύ του τοπικού ταυτόχρονου και του ταυτόχρονου δύο γεγονότων που απέχουν μεταξύ τους. Από μια άποψη, ωστόσο, είναι

πολυπλοκότερο. Η εμπειρία μας αφορά απλώς αντικείμενα ακίνητα ως προς το δικό μας σύστημα αναφοράς. Στην περίπτωση αυτή, πάνω στο αντικείμενο τοποθετούμε έναν κανόνα ή πάνω στην κλίμακα που διαθέτουμε σημειώνουμε τα άκρα του αντικειμένου. Εκτελούμε, ωστόσο, τη συγκεκριμένη διαδικασία «με την ησυχία μας», χωρίς να αναφερόμαστε καθόλου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Δεν περιμένουμε, λοιπόν, ο χρόνος να συνδέεται αξεδιάλυτα με τη μέτρηση του μήκους. Αυτή η ιδέα είναι νέα και χωρίς στηρίγματα στη σκέψη των μαθητών· έτσι, δεν την αφομοιώνουν γρήγορα.

Πρέπει να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να επαναλάβουν τη λειτουργία της μέτρησης του μήκους μιας ράβδου στο δικό τους σύστημα αναφοράς (δηλαδή, να προσδιορίσουν το «ιδιο-μήκος»* της ράβδου, ενώ βρίσκονται «πάνω» σ' αυτήν) και, κατόπιν, να διατυπώσουν άμεσα το ερώτημα: Ποια λειτουργία είναι απαραίτητη για να μετρηθεί το μήκος μιας ράβδου που «πετά»; Χρειάζεται εκτενής διερεύνηση για να αντιληφθούν οι μαθητές την ασυνήθιστη και απρόβλεπτη παρατήρηση ότι πρέπει στην κλίμακα του δικού τους συστήματος αναφοράς να σημειώσουν ταυτόχρονα τη θέση των άκρων της ράβδου που «πετά».¹⁰

Αφού οι μαθητές αντιληφθούν ότι πρέπει ταυτόχρονα να σημειώσουμε τη θέση των άκρων της κινούμενης ράβδου, η συστολή του μήκους προκύπτει άμεσα από το ότι το ταυτόχρονο, όπως εξετάσαμε προηγουμένως, δεν ισχύει. Στο Σχ. 10.12.1, υποθέστε ότι ένας παρατηρητής του S' κρατά μια ράβδο παράλληλα προς τον άξονα x' . Το ιδιο-μήκος της ράβδου είναι L'_0 . Οι παρατηρητές στο S μετρούν το μήκος της κινούμενης ράβδου, σημειώνοντας ταυτόχρονα τη θέση των άκρων της ράβδου, σύμφωνα με το συγχρονισμό των δικών τους ρολογιών κατά μήκος του άξονα x . Πώς αντιλαμβάνεται τη διαδικασία ο παρατηρητής στο S' ; Επειδή, σύμφωνα με τον παρατηρητή του S' , τα ρολόγια στο S άρχισαν πριν από τα ρολόγια που βρίσκονται αριστερά του, οι παρατηρητές στο S σημείωσαν τη θέση του δεξιού άκρου της ράβδου πριν σημειώσουν τη θέση του αριστερού. Σε τούτο το χρονικό διάστημα, επειδή η ράβδος κινήθηκε προς τα δεξιά, οι σημειούμενες θέσεις βρίσκονται πλησιέστερα. Το μήκος που μετρά ο S , λοιπόν, είναι μικρότερο από το ιδιο-μήκος L'_0 . (Η μελέτη του αντίστροφου φαινομένου — ο παρατη-

* Κατ' αναλογία προς τον όρο «ιδιό-χρονος», ο συγγραφέας χρησιμοποιεί τον όρο «ιδιο-μήκος». (Σ.τ.μ.)

10. Εναλλακτική — εξίσου έγκυρη — διαδικασία είναι, βέβαια, η εξής: μετράμε το χρόνο που χρειάζεται η ράβδος για να περάσει μπροστά από σταθερό σημείο του συστήματός μας· από το χρόνο και την ταχύτητα υπολογίζουμε το μήκος. Ορισμένοι μαθητές εμφανίζονται μ' αυτήν την άποψη και πρέπει όντως να την ενισχύσουμε. Σε αυτή τη διαδικασία, ωστόσο, είναι αδύνατο να αντιληφθούν τη συστολή μήκους χωρίς να προχωρήσουν στο επόμενο βήμα, δηλαδή στη διαστολή του χρόνου. Αποδεικνύεται, βέβαια, ότι οι δύο διαδικασίες συμφωνούν μεταξύ τους.

ρητής στο S κρατά τη ράβδο — είναι παρόμοια. Μπορούμε, λοιπόν, να τη ζητήσουμε ως άσκηση για το σπίτι.)

Στο παρόν στάδιο, οι μαθητές έχουν αποκτήσει ορισμένες βασικές γνώσεις για την ειδική θεωρία της σχετικότητας: 1) Ο συγχρονισμός των ρολογιών και το ταυτόχρονο γεγονότων που απέχουν μεταξύ τους είναι ζητήματα ορισμού σε ένα μοναδικό σύστημα αναφοράς· δεν είναι δεδομένα εκ των προτέρων. 2) Οι παρατηρητές σε ένα δεύτερο σύστημα αναφοράς, που κινείται ως προς το πρώτο, δεν συμφωνούν με το συγχρονισμό ή το ταυτόχρονο των γεγονότων, όπως ορίζονται στο πρώτο σύστημα, και αντιστρόφως. 3) Σε διαφορετικά συστήματα, από τη διαδικασία μέτρησης του μήκους ενός αντικειμένου προκύπτει διαφορετική τιμή. 4) Η μέτρηση του μήκους είναι συνυφασμένη αξεδιάλυτα με τη διαστορά του χρόνου στο χώρο. 5) Ο μόνος λόγος χάρι στον οποίο μπορούμε να συγκρίνουμε τις μετρήσεις που έχουν ληφθεί σε διαφορετικά συστήματα είναι ότι τα συστήματα αυτά έχουν, παρά τις διαφορές τους, κάτι κοινό: την ταχύτητα του φωτός.

Η ποιοτική ανάπτυξη που παρουσιάσαμε συνοπτικά είναι αποτελεσματική για κάθε ομάδα μαθητών που για πρώτη φορά διδάσκονται αυτές τις έννοιες: είτε πρόκειται για μαθητές γυμνασίου είτε για ωριμότερους μαθητές. Είναι ένα σημείο απ' όπου μπορούν να εισαχθούν έγκυρα στην επαναστατική άποψη για το χώρο και το χρόνο και για το νόημα της «σχετικότητας» σε τούτο το πλαίσιο. Αποτελεί, επίσης, κατάλληλη αφετηρία για όσους θα προχωρήσουν στην ανάπτυξη του φορμαλισμού. Ελάχιστοι από τους μαθητές που εισάγονται κατευθείαν στους μετασχηματισμούς Lorentz και στη μαθηματική απόδειξη της διαστολής του χρόνου και της συστολής του μήκους αντιλαμβάνονται άμεσα τη συμπεριφορά των παρατηρητών και τις μεταξύ τους διαφορές, οι οποίες προκύπτουν από την ποιοτική εισαγωγή που περιγράψαμε προηγουμένως. Άρα, κατανοούν βαθύτερα τους μαθηματικούς τύπους, αν παρακολουθήσουν την ποιοτική εισαγωγή (συνοδευόμενη κατάλληλα από προβλήματα για το σπίτι).

Αν ακολουθήσουμε την ποιοτική περιγραφή που περιγράψαμε, μπορούμε να παρουσιάσουμε τις αλγεβρικές εξισώσεις που σχετίζονται μ' αυτή, χωρίς να προχωρήσουμε άμεσα στους μετασχηματισμούς Lorentz. Η εξίσωση της διαστολής του χρόνου προκύπτει άμεσα αν εγκαταστήσουμε ένα «ρολόι φωτός» κατά μήκος του άξονα y και συγκρίνουμε τον ιδιόχρονο μεταξύ δύο γεγονότων (στο σύστημα που βρίσκεται το ρολόι) με το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, όπως υπολογίζεται στο άλλο σύστημα. (Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται η διαστολή του χρόνου σε πολλά εγχειρίδια.) Αν διαθέτουμε την έκφραση για τη διαστολή του χρόνου, μπορούμε να υπολογίσουμε άμεσα την έκφραση για τη συστολή του μήκους. Από τη διαστολή του χρόνου και τη συστολή του μήκους μπορούμε να εξαγάγουμε την έκφραση για την ασυμφωνία του συγχρονισμού. (Ο παρατηρητής στο S' διατείνεται ότι υπάρχει διαφορά μεταξύ των ρολογιών τα οποία στο σύστημα S

απέχουν μεταξύ τους απόσταση x . Αντίθετα, ο παρατηρητής στο S διατείνεται ότι τα ρολόγια αυτά είναι συγχρονισμένα.)

Από το συνδυασμό των αποτελεσμάτων που καταγράψαμε, προκύπτουν οι μετασχηματισμοί του Lorentz. Έτσι, αν λάβουμε υπόψη μας τις διαδικασίες και τους υπολογισμούς που αφορούν ξεχωριστά κάθε σύστημα, οι μετασχηματισμοί προκύπτουν με φυσικά επιχειρήματα. [Αποδείξεις που ακολουθούν αυτή την πορεία υπάρχουν στο βιβλίο των Panofsky και Phillips (1962) και του Arons (1965).] Αποδεικνύεται ότι πολλοί μαθητές κατανοούν καλύτερα αυτήν την πορεία από εκείνη που βασίζεται στην αναζήτηση «του γραμμικού μετασχηματισμού που αφήνει αναλλοίωτη την ταχύτητα του φωτός στα δύο συστήματα». Για τους περισσότερους μαθητές που ακόμα δεν έχουν αναπτύξει τον μαθηματικό τρόπο σκέψης ενός «γεννημένου» θεωρητικού φυσικού, η τελευταία προσέγγιση δεν έχει κανένα νόημα. Απομνημονεύουν, λοιπόν, τα τελικά συμπεράσματα, χωρίς να αφομοιώνουν τα βαθύτερα επιχειρήματα.

Από τη στιγμή που διαθέτουμε τους μετασχηματισμούς Lorentz, μπορούμε να εξαγάγουμε τα συνήθη συμπεράσματα της Ειδικής Σχετικότητας. Στα εγχειρίδια υπάρχουν πολλές έγκυρες αναλύσεις και μελέτες· ωστόσο, δεν έχω εντοπίσει από την πείρα μου μια προσέγγιση ανώτερη των υπολοίπων από παιδαγωγική άποψη. Ο καθηγητής θα χρησιμοποιήσει όποια του ταιριάζει καλύτερα.

Μένει μια τελευταία παρατήρηση για το ζήτημα της μετάβασης από την κινηματική στη δυναμική. Για πολλά χρόνια, η μελέτη της δυναμικής άρχιζε παραδοσιακά από την απόδειξη της σχέσης για τη σχετικιστική μάζα, για τη σχέση, δηλαδή, μεταξύ της μάζας και της ταχύτητας. Ακόμα και σήμερα, τα εγχειρίδια ακολουθούν, κατά κανόνα, αυτόν τον τρόπο. Ωστόσο, όλο και περισσότερο αντιλαμβανόμαστε ότι η σχετικιστική μάζα είναι δύσκολη και ασαφής έννοια. [Λόγου χάρη, βλ. Okun (1989).] Όχι μόνο αναγκαζόμαστε να ασχολούμαστε με δυσάρεστες καταστάσεις που συνδέονται με τη διαμήκη και εγκάρσια μάζα, αλλά παρασυρόμενοι συνδέουμε τη σχετικιστική μάζα (και όχι απλώς τη μάζα ηρεμίας) με βαρυτικά φαινόμενα. Η σύνδεση είναι απολύτως λανθασμένη. Η βαθιά και αυστηρή προσέγγιση της σχετικιστικής δυναμικής περνά από την άμεση παρουσίαση της έκφρασης για την ορμή που εξασφαλίζει τη διατήρηση της ορμής σε κάθε σύστημα:

$$J = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10.12.1)$$

Δυστυχώς, είναι δυσκολότερο το να εξαγάγουμε με απλό τρόπο την έκφραση για την ορμή, από το να εξαγάγουμε τη σχέση της μάζας με την ταχύτη-

τα, χρησιμοποιώντας ιδεατά πειράματα κρούσης που αφθονούν στη βιβλιογραφία. [Μια πρόσφατη προσπάθεια απλοποίησης της διαδικασίας υπάρχει στο άρθρο του Peters (1986).]

Ορισμένα εγχειρίδια συγχέουν την ταχύτητα v ως προς ορισμένο σύστημα αναφοράς (όπως στην Εξ. 10.12.1) με τη σχετική ταχύτητα u ενός συστήματος ως προς άλλο (όπως στους μετασχηματισμούς Lorentz). Οι μαθητές συγχέουν, συνήθως, τις δύο ταχύτητες, ακόμα κι όταν η διαφορά τους παρουσιάζεται με σαφήνεια. Πρέπει, λοιπόν, με αποφασιστικότητα και σαφήνεια να επιστήσουμε την προσοχή τους σε αυτή τη διάκριση, ζητώντας τους να την περιγράψουν με δικά τους λόγια.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10Α

Το πείραμα του Thomson: Γραπτή εργασία για το σπίτι

[Παρατήρηση προς τον καθηγητή: Η ορολογία της άσκησης πρέπει να προσαρμοστεί στις γνώσεις που απέκτησαν οι μαθητές στο μάθημα.]

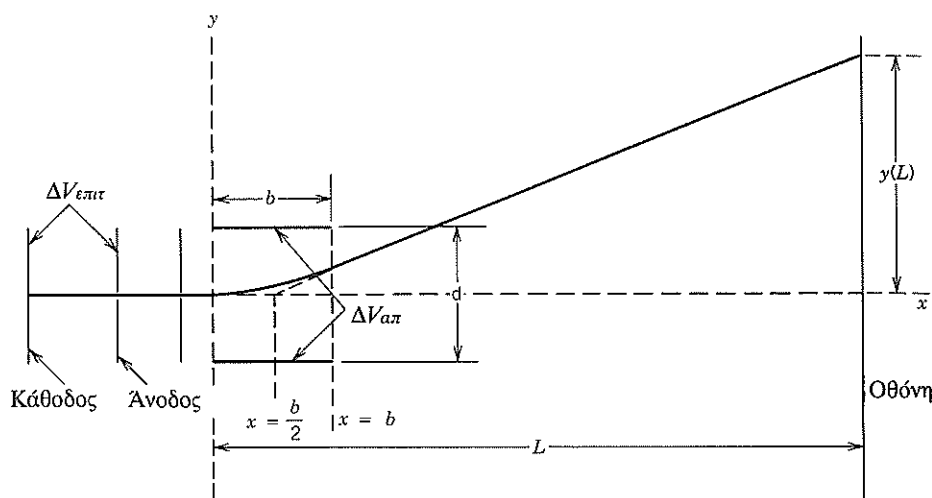
Η εργασία πρέπει να γίνει γραπτώς. Οφείλετε, απλώς, να ακολουθήσετε τη σειρά των ερωτημάτων που παραθέτουμε. Τα ερωτήματα συνιστούν το περίγραμμα της εργασίας. Συνθέστε την εργασία σας, εξηγώντας με δικά σας λόγια κάθε βήμα και ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα.

1. Περιγράψτε εν συντομία με δικά σας λόγια το σκοπό της έρευνας του Thomson με τις καθοδικές ακτίνες.

2. Περιγράψτε εν συντομία τις παρατηρήσεις που είχαν γίνει πριν από τον Thomson και έδειχναν ότι οι καθοδικές ακτίνες πρέπει να συνδέονται κάπως με το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Γιατί στο πείραμά του ο Thomson δεν τοποθέτησε το συλλέκτη του φορτίου απέναντι από την κάθοδο, αλλά στο πλάι του σωλήνα;

[Όπως επισημάναμε στο μάθημα, οι παρατηρήσεις (πριν από τον Thomson) είχαν αποκαλύψει ότι μέσα σε μαγνητικό πεδίο η καθοδική δέσμη αποκλίνει· δεν μπόρεσαν, ωστόσο, να διαπιστώσουν απόκλιση μέσα σε ηλεκτροστατικό πεδίο. Ο Thomson υπέθεσε ότι η παρουσία ιόντων στο σωλήνα (φορτισμένα άτομα ή μόρια που σχηματίζονται από το αέριο που παραμένει στο σωλήνα) δημιουργεί τέτοιες συνθήκες κοντά στις πλάκες του πυκνωτή, ώστε η δέσμη, ακόμη κι αν αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια, δεν επηρεάζεται από τις φορτισμένες πλάκες του πυκνωτή. Βελτιώνοντας σημαντικά το κενό μέσα στο σωλήνα, ο Thomson ανακάλυψε ότι οι φορτισμένες πλάκες προκαλούν απόκλιση της δέσμης.]

3. Εξηγήστε με δικά σας λόγια και με εικόνες ή σχήματα πώς η συμπεριφορά των πολυάριθμων ιόντων του αερίου που παραμένει, δημιουργεί τέτοιες συνθήκες, ώστε οι φορτισμένες πλάκες δεν επηρεάζουν την καθοδική δέσμη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το πεδίο έξω από τις πλάκες του πυκνωτή παραμένει μηδενικό; Εξηγήστε το συλλογισμό σας.



[Οι αλγεβρικές εξισώσεις και σχέσεις των επόμενων ερωτήσεων αναφέρονται στο σχήμα. Χρησιμοποιήστε, λοιπόν, το σχήμα. Για πληρότητα ξανασχεδιάστε το ή, απλώς, χρησιμοποιήστε αυτό το σχήμα που σας δίνεται. Οι υπολογισμοί αφορούν τη συμπεριφορά ενός μοναδικού αρνητικά φορτισμένου σωματιδίου μάζας m , που φέρει φορτίο e . Βεβαιωθείτε ότι στην παρουσίασή σας χρησιμοποιείτε σαφώς αυτό το δεδομένο. Αφού αναλύσετε τη συμπεριφορά ενός μοναδικού σωματιδίου, εξετάστε τι συμβαίνει αν η δέσμη αποτελείται από τεράστιο αριθμό σωματιδίων.]

[Υποθέστε ότι το φορτισμένο σωματίδιο ξεκινά από κάποιο σημείο μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Στη συνέχεια, επιταχύνεται μέχρι η ταχύτητά του να γίνει v_x και, τέλος, εισέρχεται με την ταχύτητα αυτή στην περιοχή απόκλισης μεταξύ των πλακών των πυκνωτή. (Θεωρούμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί την απόκλιση περιορίζεται σαφώς στην περιοχή μεταξύ των πλακών και ότι τα «κρόσια» του πεδίου στα άκρα των πλακών επηρεάζουν ελάχιστα.)]

4. Αγνοώντας, προσωρινά, κάθε βαρυτική επίδραση, αποδείξτε ότι επειδή το σωματίδιο μεταξύ των πλακών αποκτά επιτάχυνση προς τα πάνω, ακολουθεί παραβολική τροχιά από το $x = 0$ στο $x = b$. (Παρατηρήστε ότι η περίπτωση αυτή είναι ακριβώς όμοια μ' εκείνη της βολής που εξετάσαμε στα εισαγωγικά μαθήματα της μηχανικής.) Ποια είναι τα χαρακτηριστικά της τροχιάς του σωματιδίου, αφού το σωματίδιο προσπεράσει τα άκρα των πλακών; Γιατί έχει αυτά τα χαρακτηριστικά; Πώς αυτό το τμήμα της τροχιάς διευθύνεται ως προς το παραβολικό τμήμα της (ή πώς συνδέεται μ' αυτό;)

5. Προσδιορίστε τώρα τις εξισώσεις της τροχιάς που περιγράψατε περιφραστικά στο 4ο ερώτημα: Αρχίστε από τους βασικούς ορισμούς της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της διαφοράς δυναμικού. Βάσει αυτών, απο-

δείξτε ότι αν συμβολίσουμε με $\Delta V_{\alpha\pi}$ τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών του πυκνωτή απόκλισης και με d την απόσταση μεταξύ των πλακών, η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των πλακών δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{\Delta V_{\alpha\pi}}{d} \quad (1)$$

Αν συμβολίσουμε με $y(x)$ την κατακόρυφη απόκλιση σε συνάρτηση με το x , αποδείξτε ότι στην περιοχή μεταξύ των οπλισμών η τροχιά δίνεται από τη σχέση:

$$y(x) = \frac{1}{2} \frac{Ee}{m} \frac{x^2}{v_x^2} \quad (2)$$

Κατόπιν, αποδείξτε ότι η κλίση της παραβολικής τροχιάς στο $x = b$ ισούται με:

$$\frac{Ee}{m} \frac{b}{v_x^2} \quad (3)$$

Ξαναθυμηθείτε τις εξισώσεις της ευθείας που μάθατε στην αναλυτική γεωμετρία. Χρησιμοποιώντας τον τύπο με τον οποίο η ευθεία προσδιορίζεται από ένα σημείο της και από την κλίση της (ή οποιοδήποτε τύπο θέλετε), δείξτε ότι η εξίσωση της τροχιάς στην περιοχή μεταξύ των πλακών απόκλισης και της οθόνης είναι:

$$y(x) = \frac{Ee}{m} \frac{b}{v_x^2} \left(x - \frac{b}{2}\right) \quad (4)$$

Χρησιμοποιώντας αναλυτική γεωμετρία, αποδείξτε ότι αν προεκτείνουμε την ευθεία τροχιά προς τα πίσω, η προέκταση τέμνει τον άξονα x στο $x = b/2$. Αν το $y(L)$ συμβολίζει την κατακόρυφη απόκλιση του σωματιδίου από τη θέση του στην οθόνη, όταν δεν υπάρχει απόκλιση, αποδείξτε ότι:

$$y(L) = \frac{Ee}{m} \frac{b}{v_x^2} \left(L - \frac{b}{2}\right) \quad (5)$$

6. Από παρατήρηση προκύπτει πως όταν συνδέσουμε μια μπαταρία στις πλάκες απόκλισης, με αποτέλεσμα η καθοδική δέσμη να αποκλίνει από

την αρχική θέση της, τότε η κηλίδα που προκαλεί η δέσμη πάνω στην οθόνη δεν «απλώνεται», αλλά παραμένει απολύτως ευκρινής. Αν η δέσμη αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια, τότε πρόκειται για τεράστιο αριθμό σωματιδίων. Υπό το φως των εν λόγω παρατηρήσεων και της Εξ. 5, απαντήστε στην ερώτηση: τι κοινό έχουν τα φορτισμένα σωματίδια από τα οποία αποτελείται αυτή η «στρατιά»; Εξηγήστε το συλλογισμό σας.

7. Προσδιορίστε τα γνωστά (μετρήσιμα και άμεσα παρατηρήσιμα) και τα άγνωστα μεγέθη στην Εξ. 5. Παρατηρήστε ότι υπάρχουν τρία άγνωστα μεγέθη. Παρατηρήστε, επίσης, ότι και τα τρία είναι ιδιότητες των υποθετικών σωματιδίων.

[Ο Thomson προσπάθησε να μειώσει τον αριθμό των άγνωστων μεγεθών. Βρήκε, τυχαία, έναν έξυπνο τρόπο για να μετρήσει την ταχύτητα v_x . Αρχικά, μέτρησε την απόκλιση $y(L)$, γνωρίζοντας την ένταση του πεδίου που την προκαλούσε. Κατόπιν, εισήγαγε ένα μαγνητικό πεδίο B (με κατεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του σχήματος), χρησιμοποιώντας πηνία Helmholtz και αύξησε το ρεύμα στα πηνία, ώσπου η κηλίδα στην οθόνη να επιστρέψει στην αρχική θέση της. Ας συμβολίσουμε με B_0 την ένταση του μαγνητικού πεδίου που επαναφέρει την κηλίδα στη μηδενική θέση. Πρόκειται για μετρήσιμο μέγεθος.]

8. Προσδιορίστε την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου (προς τα μέσα ή προς τα έξω ως προς το επίπεδο της σελίδας), όταν η κηλίδα στην οθόνη επανέρχεται στην αρχική θέση της. Χρησιμοποιώντας τις βασικές εξισώσεις για τη δύναμη σε φορτισμένα σωματίδια που βρίσκονται σε ηλεκτρικό ή μαγνητικό πεδίο, σχεδιάστε τις δυνάμεις που ασκούνται σε φορτισμένα σωματίδια, όταν αυτά βρίσκονται σε διασταυρούμενα πεδία E και B_0 . Από τις βασικές έννοιες που μελετήσατε στον ηλεκτρισμό και στο μαγνητισμό, δείξτε ότι η ταχύτητα του σωματιδίου δίνεται από τη σχέση:

$$v_x = \frac{E}{B_0} \quad (6)$$

Από το γεγονός ότι η συνοχή της κηλίδας διατηρείται (η κηλίδα, δηλαδή, δεν «απλώνεται»), όταν επιδρά το μαγνητικό πεδίο, τι συμπεραίνετε για την ταχύτητα όλων των σωματιδίων; Εξηγήστε το συλλογισμό σας. Ποια είναι η σημασία του ότι δισεκατομμύρια σωματίδια έχουν όλα την ίδια ταχύτητα; Υπόδειξη: θα είχαν όλα την ίδια ταχύτητα, αν προέρχονταν από διαφορετικά σημεία μεταξύ των πλακών που τα επιταχύνουν; Γιατί ναι ή γιατί όχι; Αφού όλα έχουν την ίδια ταχύτητα, ποιο είναι το πιθανότερο σημείο από το οποίο προέρχονται;

9. Ο Thomson υπολόγισε την ταχύτητα των σωματιδίων και βρήκε ότι είναι της τάξης του ενός δεκάτου της ταχύτητας του φωτός. Υποστήριξε, λοιπόν, ότι η καθοδική δέσμη δεν είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως διατεινόταν ο Lenard. Αναπτύξτε με δικά σας λόγια το επιχείρημα.

10. Συνδυάστε εκείνες τις σχέσεις, από όσες έχουμε παρουσιάσει, που είναι απαραίτητες για να αποδείξετε το εξής: αν και δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε τις ποσότητες e και m των σωματιδίων, μπορούμε να προσδιορίσουμε το λόγο του φορτίου προς τη μάζα, επειδή συνδέεται με μετρήσιμα μεγέθη μέσω της σχέσης:

$$\frac{e}{m} = \frac{E}{bB_0^2} \frac{y(L)}{\left(y - \frac{b}{2}\right)} \quad (7)$$

11. Υποθέστε ότι σε δεδομένο σωλήνα τα b και L είναι αντίστοιχα 4,00 cm και 20,00 cm και ότι η απόσταση μεταξύ των πλακών που προκαλούν την απόκλιση είναι 1,50 cm. Όταν μεταξύ αυτών των πλακών υπάρχει διαφορά δυναμικού 150 V, παρατηρούμε ότι η κηλίδα πάνω στην οθόνη αποκλίνει κατά 2,6 cm. Το μαγνητικό πεδίο που επαναφέρει την κηλίδα στο κέντρο της οθόνης έχει ένταση $4,5 \cdot 10^{-4}$ T (ή webers/m²). Υπολογίστε το λόγο του φορτίου προς τη μάζα και την ταχύτητα των σωματιδίων της δέσμης. (Μην αναφέρετε περισσότερα σημαντικά ψηφία απ' όσα επιτρέπεται.)

12. Σημειώστε την ταχύτητα των σωματιδίων που υπολογίσατε στο 11ο ερώτημα. Υπολογίστε την κατακόρυφη απόκλιση των σωματιδίων, λόγω της επίδρασης του βαρυτικού πεδίου, καθώς τα σωματίδια διασχίζουν το σωλήνα. Είναι παρατηρήσιμη η απόκλιση αυτή; (Για να απαντήσετε στην ερώτηση, συγκρίνετε την αναμενόμενη βαρυτική απόκλιση με την τάξη μεγέθους του μήκους κύματος του φωτός και με την τάξη μεγέθους των διαστάσεων του ατόμου ή του μορίου.) Εξηγήστε με δικά σας λόγια γιατί η βαρυτική απόκλιση είναι τόσο μικρή και γιατί ήταν *απαραίτητο* να την αγνοήσουμε στους υπολογισμούς μας στο πλαίσιο του πειράματος. (Βεβαιωθείτε ότι στα αποτελέσματά σας δεν περιλαμβάνετε περισσότερα σημαντικά ψηφία απ' όσα δικαιολογούν τα δεδομένα σας).

13. Ας συμβολίσουμε με $\Delta V_{\text{επιτ}}$ το επιταχύνον δυναμικό μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Αποδείξτε ότι αν ένα αρνητικό σωματίδιο εμφανίζεται στην κάθοδο ουσιαστικά ακίνητο, όταν περνά μέσα από την άνοδο, η ταχύτητά του δίνεται από τη σχέση:

$$v_x^2 = \frac{2e\Delta V_{\text{επιτ}}}{m} \quad (8)$$

[Λόγω των περιπλοκών που προκαλούν τα «κρόσσια» των πεδίων, της μορφής της καθόδου και της ανόδου και της δυσκολίας στη μέτρηση υψηλής επιταχύνουσας διαφοράς δυναμικού (δεκάδες kV), ο Thomson δεν μπορούσε να χρησιμοποιήσει αυτή τη σχέση για να προσδιορίσει την τιμή του v_x , αν και γνώριζε από πού προέρχονται τα σωματίδια (βλ. 8ο ερώτημα). Η Εξ. 8, ωστόσο, δείχνει γενικά τι συμβαίνει στο v_x όταν μεταβάλλεται το επιταχύνον δυναμικό.]

Υποθέστε ότι το επιταχύνον δυναμικό αυξάνεται, ενώ το δυναμικό που προκαλεί την απόκλιση μένει αμετάβλητο. Τι συμβαίνει στο $y(L)$; Η απόκλιση στην οθόνη αυξάνεται, μειώνεται ή μένει αμετάβλητη; Τι συμβαίνει στην τιμή του B_0 που είναι απαραίτητη; Σε κάθε περίπτωση, εξηγήστε σαφώς το συλλογισμό σας.

[Ο Thomson επανέλαβε αρκετές φορές τον προσδιορισμό του e/m , μεταβάλλοντας κάθε φορά τις συνθήκες στο σωλήνα. Χρησιμοποίησε ως κάθοδο αρκετά διαφορετικά μέταλλα (αλουμίνιο, λευκόχρυσο, σίδηρο). Χρησιμοποίησε, επίσης, εκτός από αέρα, και άλλα παραμένοντα αέρια στο σωλήνα (υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα). (Σημειώστε ότι, αν και το κενό ήταν πολύ υψηλό, παρέμενε σημαντική ποσότητα αερίου.)]

14. Γιατί ο Thomson διεξήγαγε αυτά τα πειράματα; Τι συμπεραίνετε από το ότι ελάμβανε συνεχώς (αν και οι συνθήκες του πειράματος διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους) την ίδια τιμή για το λόγο e/m ;

[Κατά τη διάσπαση του νερού με ηλεκτρόλυση, βρίσκουμε πως όταν περάσουν 96.500 C, απελευθερώνονται 1,0 g υδρογόνου στην κάθοδο και 8,0 g οξυγόνου στην άνοδο. Γνωρίζουμε, επίσης, ότι το μόριο του νερού αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και ένα οξυγόνου.]

15. Υπολογίστε το λόγο του φορτίου προς τη μάζα των ιόντων του υδρογόνου και του οξυγόνου στην ηλεκτρόλυση, εξηγώντας το συλλογισμό σας. Συγκρίνετε αυτές τις τιμές μ' εκείνη που βρήκατε για το σωματίδιο της καθοδικής δέσμης.

[Για τις τιμές που εξετάσατε στο 15ο ερώτημα, ο Thomson γράφει: «Άρα η τιμή του λόγου e/m των φορέων του ηλεκτρισμού στις καθοδικές ακτίνες είναι πολύ μεγάλη συγκριτικά μ' εκείνων στην ηλεκτρόλυση. Το μέ-

γεθος του e/m οφείλεται στη μικρή τιμή του m ή στη μεγάλη του e ή στο συνδυασμό αυτών των δύο.»]

16. Διατυπώστε με δικά σας λόγια την ανάλυση από την οποία φαίνεται εύλογο ότι η μικρή τιμή του m εξηγεί καλύτερα τη μεγάλη τιμή του λόγου «φορτίο προς μάζα» του καθοδικού σωματιδίου από τα άλλα δύο ενδεχόμενα που παραθέτει ο Thomson. (Οι σημαντικότερες παρατηρήσεις που υπεισέρχονται είναι η φαινομενικά απόλυτη ουδετερότητα της συνηθισμένης ύλης και η μεγάλη διεισδυτικότητα της καθοδικής δέσμης μέσα στον αέρα, την οποία επισήμανε ο Lenard. Στο μάθημα, συζητήσαμε το τελευταίο δεδομένο.)

17. Διαθέτοντας όλο το «σενάριο» που συνθέσατε μέχρι τώρα, ορίστε τον όρο «ηλεκτρόνιο»: Τι σημαίνει ο όρος και πού χρησιμοποιείται;

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 10B

Το άτομο του Bohr: Γραπτή εργασία για το σπίτι

Η παρούσα εργασία για το σπίτι είναι όμοια μ' εκείνη στο πείραμα του Thomson. Διαβάζοντας προσεκτικά τα ερωτήματα, βεβαιωθείτε ότι τα κατανόησατε βαθιά. Εξηγήστε με δικά σας λόγια τους συλλογισμούς σας. Παρουσιάστε τα ενδιαμέσα βήματα των αλγεβρικών αποδείξεων. Παρουσιάστε όχι μόνο το τελικό αποτέλεσμα των αριθμητικών υπολογισμών, αλλά όλη την αριθμητική επεξεργασία. (Η παρουσίασή σας πρέπει να αρχίζει από την αντικατάσταση των τιμών των μεγεθών σε κάθε αλγεβρική έκφραση.) Προσέξτε ιδιαίτερα τον αριθμό των σημαντικών ψηφίων που επιτρέπεται κάθε φορά.

[Εμβαθύνουμε σημαντικά στα θέματα των θετικών επιστημών με τη διαδικασία της «διαστατικής ανάλυσης»: εξετάζουμε συνδυασμούς φυσικών μεγεθών με τη βοήθεια των *διαστάσεων* των μεγεθών που υπεισέρχονται σ' αυτούς. Πολύπλοκοι συνδυασμοί που καταλήγουν σε εκφράσεις μεταξύ των θεμελιωδών μεγεθών είναι δυνατό να οδηγήσουν (ή να μην οδηγήσουν) σε βαθιές επιστημονικές συσχετίσεις. Το 1913 ο Bohr εγκαίνιασε την εποχή που φέρει το όνομά του, με ένα άρθρο στο οποίο χρησιμοποίησε διαστατική ανάλυση που αποδείχθηκε θεμελιώδης.]

1. Ο Bohr εισάγει το άρθρο του επισημαίνοντας ότι ο συνδυασμός

$$\frac{h^2}{mke^2} \quad (1)$$

έχει διαστάσεις μήκους και ότι η αριθμητική τιμή του είναι περίπου $20 \text{ \AA}$. Επαληθεύστε τις δύο διαπιστώσεις, παρουσιάζοντας λεπτομερώς την ανάλυσή σας.

[Παρατηρήστε, όπως παρατήρησε ο Bohr, ότι αυτή η αριθμητική τιμή του μήκους είναι γενικά της τάξης μεγέθους της διαμέτρου του ατόμου. (Αποδεικνύεται, τελικά, ότι λείπει, απλώς, ο παράγοντας $4\pi^2$ από τον παρονομαστή (βλ. Εξ. 17.) Ο Bohr υποστήριξε ότι αυτό αποτελούσε ένδειξη

του ότι η σταθερά h του Planck έχει βαθιά σχέση με τη δομή του ατόμου. Πρέπει λοιπόν, να εμφανίζεται στις εξισώσεις που περιγράφουν αυτή τη δομή.]

2. Εκτός από τον Bohr, και άλλοι ερευνητές παρατήρησαν ότι το h έχει παρόμοιες διαστάσεις με τη στροφορμή. Επαληθεύστε αυτό το γεγονός. [Ενισχύεται έτσι η άποψη ότι το h συνδέεται μάλλον με κάποια στροφορμή μέσα στο άτομο. Στη συνέχεια της ανάλυσής μας θα επιστρέψουμε σε αυτό το ενδεχόμενο.]

[Ο Bohr «επιτέθηκε» στο πρόβλημα, προσπαθώντας να συνθέσει ένα πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου που να εξηγεί τις παρατηρούμενες διακριτές (φωτεινές) φασματικές γραμμές. Αρχικά, έπρεπε να επιλέξει τι θα θεωρούσε ως συστατικά του ατόμου του υδρογόνου. Δέχτηκε, λοιπόν, ότι το άτομο αυτό αποτελείται από ένα πρωτόνιο (που σχηματίζει τον πυρήνα) και ένα ηλεκτρόνιο (που κινείται κυκλικά γύρω απ' αυτόν). Για να δικαιολογήσει την επιλογή του, παραθέτει πειραματικά δεδομένα του Thomson. Ο Thomson είχε ερευνήσει τα θετικά ιόντα που σχηματίζονται σε διάφορα ιονισμένα αέρια (λόγου χάρι, σε υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα, αμμωνία κ.ά.) και ανέφερε τα άτομα και τα μόρια των ουσιών που είχαν ιονιστεί μία μόνο φορά. Ανέφερε, επίσης, πως όταν αύξανε το δυναμικό που επιτάχυνε την καθοδική δέσμη (η οποία με τη σειρά της μόλις που προκαλούσε ιονισμό του αερίου), άρχιζε να παρατηρεί οντότητες διπλά ιονισμένες. Διαπίστωσε, λοιπόν, ότι μπορούσε να δημιουργήσει διπλά ιονισμένα άτομα, με εξαίρεση τα άτομα του υδρογόνου.]

3. Ερμηνεύστε με δικά σας λόγια την ιστορία αυτή: Πώς εξηγείται το ότι δεν παράγονται διπλά ιονισμένα άτομα και μόρια παρά μόνον αν αυξηθεί το δυναμικό που επιταχύνει την ιονίζουσα δέσμη; Ποιο ήταν το σημαντικότερο υπονοούμενο της παρατήρησης που αφορούσε το υδρογόνο, δηλαδή γιατί η συγκεκριμένη παρατήρηση δικαιολογεί την επιλογή από τον Bohr των συστατικών του ατόμου που προαναφέραμε; Ποιες άλλες πληροφορίες που αφορούν τα άτομα δικαιολογούν αυτήν την επιλογή;

[Κατόπιν, ο Bohr δέχτηκε αξιωματικά πως το ηλεκτρόνιο κινείται κυκλικά γύρω από τον πρωτονιακό πυρήνα και πως όταν η τροχιά του έχει μικροσκοπικές (δηλαδή ατομικές) διαστάσεις, το ηλεκτρόνιο δεν ακτινοβολεί συνεχώς (όπως απαιτεί η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία). Δέχτηκε, επίσης αξιωματικά, ότι το ηλεκτρόνιο κινείται επ' άπειρον σε τροχιά ορισμένης ακτίνας («στάσιμη κατάσταση»). Επιπλέον, δέχθηκε αξιωματικά ότι το ηλεκτρόνιο κερδίζει ή χάνει ενέργεια, απορροφώντας ή εκπέμποντας ένα φωτόνιο συχνότητας ν , και «πηδά» από μια στάσιμη κατάσταση-τροχιά

(ακτίνας r_1) σε άλλη (ακτίνας r_2). Επειδή σε κάθε στάσιμη κατάσταση το σύστημα ηλεκτρονίου-πρωτονίου έχει συγκεκριμένη ολική ενέργεια $E(r)$ [σύντομα θα αποδείξουμε την έκφραση για το $E(r)$], ο Bohr θεώρησε ότι:

$$h\nu = |E(r_2) - E(r_1)| \quad (2)$$

4. Εξηγήστε με δικά σας λόγια τι υποδηλώνει η Εξ. 2: Τι παρακίνησε τον Bohr να την εισαγάγει; (Δηλαδή, πώς συνδέεται με τη γενική άποψη του Αϊνστάιν για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;) Η ενέργεια που εκπέμπεται ή απορροφάται σε κάθε άλμα έχει άμεση σχέση με την τροχιακή συχνότητα f της κίνησης του ηλεκτρονίου; Γιατί στην Εξ. 2 εμφανίζεται το σύμβολο της απόλυτης τιμής; Πότε η διαφορά που περιέχεται στην απόλυτη τιμή είναι θετική και πότε αρνητική;

5. Επανερχόμαστε τώρα στη θεμελιώδη κλασική φυσική για τις ενεργειακές ποσότητες που εμφανίζονται στην κυκλική κίνηση σωματιδίου, όπως σ' αυτήν που εξετάζουμε:

Αποδείξτε πως όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε στάσιμη κατάσταση ακτίνας r , η δυναμική ενέργεια (E_δ) του συστήματος ηλεκτρονίου-πρωτονίου δίνεται από τη σχέση:

$$E_\delta = - \frac{ke^2}{r} \quad (3)$$

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιστρέψουμε στον *ορισμό* της δυναμικής ενέργειας, να καταστρώσουμε το κατάλληλο ολοκλήρωμα, να επιλέξουμε το *επίπεδο μηδενικής δυναμικής ενέργειας*, δικαιολογώντας την επιλογή μας, και να εκτελέσουμε την ολοκλήρωση μεταξύ κατάλληλων ορίων, χειριζόμενοι σωστά και προσεκτικά τα αλγεβρικά πρόσημα. Βεβαιωθείτε: πρώτον, ότι έχετε σχεδιάσει σωστά το διάγραμμα των δυνάμεων· δεύτερον, ότι εξηγήσατε με σαφήνεια το συλλογισμό σας, ιδιαίτερα την επιλογή του επιπέδου μηδενικής ενέργειας, και τρίτον, ότι έχετε δικαιολογήσει σαφώς γιατί δεν μπορούμε να επιλέξουμε το σημείο $r = 0$ ως σημείο αναφοράς.

Κατόπιν, προσδιορίστε την έκφραση της κινητικής ενέργειας (E_κ) ενός ηλεκτρονίου σε στάσιμη κατάσταση ακτίνας r . Στην έκφραση να εμφανίζονται οι ίδιες ποσότητες που εμφανίζονται στο δεξιό μέλος της Εξ. 3.

Τέλος, αποδείξτε ότι η ολική ενέργεια $E(r)$ ενός συστήματος ηλεκτρονίου-πρωτονίου (αν θεωρήσουμε επίπεδο αναφοράς την κατάσταση κατά την οποία η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων είναι άπειρη) δίνεται από τη σχέση:

$$E(r) = -\frac{1}{2} \frac{ke^2}{r} \quad (4)$$

Γιατί το δεξιό μέλος της Εξ. 4 είναι αρνητικό; Η ολική ενέργεια είναι δυνατό να είναι αρνητική; Εξηγήστε την Εξ. 4: η ολική ενέργεια αυξάνεται ή μειώνεται, όταν ένα ηλεκτρόνιο κινείται σε υψηλότερη τροχιά (μεγαλύτερου r); Αν (σύμφωνα με την εικόνα του Bohr) εκπνευθεί ένα φωτόνιο, το ηλεκτρόνιο καταλήγει σε υψηλότερη ή χαμηλότερη τροχιά; Εξηγήστε με σαφήνεια και ακρίβεια το συλλογισμό σας.

[Ας μελετήσουμε τώρα τον τύπο των Balmer και Rydberg που δίνει το μήκος κύματος των πραγματικών γραμμών, οι οποίες παρατηρούνται στις σειρές του φάσματος του ατομικού υδρογόνου:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (5)$$

Το R συμβολίζει τον αριθμό $10.973.731,2 \text{ m}^{-1}$. (Η τιμή του R δεν προκύπτει θεωρητικά, αλλά *εμπειρικά*: υπολογίζεται από *μετρήσιμα* μήκη κύματος. Παρατηρήστε την εξαιρετικά υψηλή ακρίβεια που έχουμε επιτύχει με τις σύγχρονες φασματοσκοπικές μεθόδους!)]

6. Αποδείξτε ότι, μετασχηματίζοντας την Εξ. 5, προκύπτει η σχέση:

$$h\nu = hcR \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (6)$$

[Επειδή το δεξιό μέλος της Εξ. 6 περιέχει δύο ξεχωριστούς όρους, ο Bohr παρατήρησε το εξής: αν υιοθετήσουμε την ιδέα που περιέχεται στην Εξ. 2, μπορούμε να ερμηνεύσουμε κάθε όρο της Εξ. 6 ως την ολική ενέργεια μιας στάσιμης κατάστασης του ηλεκτρονίου.]

Συνδυάζοντας το παρατηρήσιμο γεγονός της ύπαρξης φωτεινού γραμμικού φάσματος και τα αξιώματα του προτύπου που παρουσιάσαμε, συμπεραίνουμε ότι στο σύστημα ηλεκτρονίου-πρωτονίου επιτρέπονται μόνον ορισμένες διακριτές μεταξύ τους καταστάσεις (με ορισμένες ειδικές τροχιακές ακτίνες). Παρουσιάστε με δικά σας λόγια το επιχείρημα που μας οδηγεί σε τούτο το συμπέρασμα. (Πώς θα ήταν το παρατηρήσιμο φάσμα αν *όλες* οι τιμές του r επιτρέπονταν;)

Αποδείξτε ότι, αν μόνον ορισμένες ειδικές τιμές r_n του r επιτρέπονται, τότε μόνο σε ορισμένα ενεργειακά επίπεδα E_n είναι δυνατό να βρεθεί το

σύστημα. Αποδείξτε, επίσης, ότι τα ενεργειακά επίπεδα περιγράφονται με έναν από τους δύο επόμενους τρόπους:

$$E_n = -\frac{ke^2}{2r_n} \quad (7)$$

$$E_n = -\frac{hcR}{n^2} \quad (8)$$

7. Συνδυάζοντας τις Εξ. 7 και 8, δείξτε ότι η ακτίνα r_n της τροχιάς, που συνδέεται με τον ακέραιο n , δίνεται από τη σχέση:

$$r_n = n^2 \frac{ke^2}{2hcR} \quad (9)$$

Αποδείξτε ότι η ακτίνα r_1 , που αντιστοιχεί στον ακέραιο $n = 1$, είναι η ελάχιστη επιτρεπόμενη τιμή της ακτίνας της ηλεκτρονιακής τροχιάς· δηλαδή, είναι η «κανονική», «μη διεγερμένη», κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου. Αποδείξτε, επίσης, ότι οι μεγαλύτερες τιμές του n και του r_n αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες τροχιές και σε «διεγερμένες» καταστάσεις. Στο πλαίσιο αυτό, τι σημαίνει ο όρος «διεγερμένος»; (Σήμερα, η κατάσταση $n = 1$ ονομάζεται «θεμελιώδης κατάσταση» του ατόμου.)

[Αναδεικνύεται, λοιπόν, το κρίσιμο ερώτημα: πώς η Φύση επιλέγει ή προσδιορίζει τις «επιτρεπόμενες» τιμές r_n μεταξύ των άπειρων τιμών του r ; Στο πρώτο άρθρο του, ο Bohr μελέτησε το ζήτημα με τη βοήθεια της «αρχής της αντιστοιχίας», όπως την ονόμασε. Η εν λόγω αρχή απαιτεί το εξής: οι νέες «παράξενες» σχέσεις μεταξύ φυσικών μεγεθών, που εμφανίζονται σε ένα νέο επίπεδο εμπειρίας, πρέπει να εντάσσονται ομαλά σε ό,τι προηγουμένως έχουμε προσδιορίσει ως σωστό σε άλλα, καλά ελεγμένα επίπεδα. (Λόγου χάρη, στη σχετικότητα εφαρμόζουμε την αρχή της αντιστοιχίας, απαιτώντας, όταν η ταχύτητα είναι μικρή, οι μετασχηματισμοί Lorentz της θέσης, του χρόνου και της ταχύτητας να ανάγονται στις συνηθισμένες κλασικές σχέσεις· απαιτούμε, επίσης, οι τύποι της ορμής και της ενέργειας να συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο.) Ο Bohr εφάρμοσε την αρχή της αντιστοιχίας ως εξής:

Γνωρίζουμε ότι σε μακροσκοπική κλίμακα (λόγου χάρη στην κεραία του ραδιοφώνου ή στη μακροσκοπική καμπυλόγραμμη κίνηση μέσα σε μα-

γνητικό πεδίο), όταν τα ηλεκτρόνια πάλλονται, ακτινοβολούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που έχουν ίδια συχνότητα μ' εκείνη της περιοδικής κίνησής τους. Ο Bohr υποστηρίζει, λοιπόν, ότι για μικρές τιμές του r , το ηλεκτρόνιο δεν ακτινοβολεί και παραμένει σε σταθερή τροχιά. (Αυτό είναι το πραγματικό νόημα του όρου «στάσιμη κατάσταση».) Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι συχνότητες των φωτονίων που εκπέμπονται ή απορροφώνται δεν έχουν άμεση σχέση με τη συχνότητα της τροχιακής κίνησης. Όταν, ωστόσο, οι τροχιές γίνονται εξαιρετικά μεγάλες (δηλαδή, όταν προσεγγίζουν τη μακροσκοπική κλίμακα), η συχνότητα του φωτονίου που εκπέμπεται από ένα άλμα μεταξύ διαδοχικών τροχιών προσεγγίζει συνεχώς τη συχνότητα της τροχιακής κίνησης. Έτσι, ικανοποιείται η αρχή της αντιστοιχίας.]

8. Επανερχόμενοι στην κλασική δυναμική της κυκλικής κίνησης, να αποδείξετε ότι η συχνότητα f_n της *κυκλικής* κίνησης ενός ηλεκτρονίου, όταν η ακτίνα της τροχιάς του είναι r_n , δίνεται από τον τύπο:

$$f_n^2 = \frac{ke^2}{4\pi^2 m r_n^3} \quad (10)$$

όπου m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου.

Θέλουμε η συχνότητα ν του φωτονίου που εκπέμπεται μεταξύ διαδοχικών τροχιών, για μεγάλες τιμές του n , να προσεγγίζει τη συχνότητα f_n . Πρέπει, λοιπόν, να εξετάσουμε τη συμπεριφορά της συχνότητας ν , όταν το n αυξάνεται. Αναπτύξτε λεπτομερώς το επόμενο επιχείρημα:

Αποδείξτε ότι η συχνότητα του φωτονίου που εκπέμπεται από ένα άλμα μεταξύ διαδοχικών τροχιών δίνεται από τη σχέση:

$$\nu = \frac{E_{n+1} - E_n}{h} \quad (11)$$

Αποδείξτε επίσης (χρησιμοποιώντας την Εξ. 8) ότι:

$$\nu = cR \left[-\frac{1}{(n+1)^2} + \frac{1}{n^2} \right] = cR \left[\frac{2n+1}{(n+1)^2 n^2} \right] \quad (12)$$

Κατόπιν, αποδείξτε πως όταν αυξάνεται το n , ισχύει:

$$\nu \rightarrow \frac{2cR}{n^3} \quad (13)$$

Το βέλος με κατεύθυνση προς τα δεξιά σημαίνει ότι καθώς το n αυξάνεται, η τιμή του αριστερού μέλους προσεγγίζει συνεχώς την τιμή του δεξιού.

Δικαιολογήστε με δικά σας λόγια ότι η αρχή της αντιστοιχίας ικανοποιείται αν εισαγάγουμε την απαίτηση:

$$f_n = \frac{2cR}{n^3} \quad (14)$$

9. Συγκεντρώστε τα αλγεβρικά αποτελέσματα των σχέσεων (Εξ. 8, 9, 10 και 14) που αποδείξατε μέχρι τώρα. Χρησιμοποιήστε τις εξισώσεις αυτές, για να προσδιορίσετε τα μεγέθη R , E_n και r_n σε συνάρτηση με τις θεμελιώδεις σταθερές. Αποδείξτε, δηλαδή, τις σχέσεις:

$$R = \frac{2\pi^2 m (ke^2)^2}{ch^3} \quad (15)$$

$$E_n = \frac{2\pi^2 m (ke^2)^2}{n^2 h^2} \quad (16)$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2}{4\pi^2 m ke^2} \quad (17)$$

Τέλος, αποδείξτε ότι αν συνδυάσουμε αυτά τα αποτελέσματα, προκύπτει η σχέση των Balmer και Rydberg για τις γραμμές του φάσματος του ατομικού υδρογόνου. Στη σχέση αυτή η σταθερά του Rydberg δεν είναι πλέον απλώς μια εμπειρική τιμή, αλλά προσδιορίζεται απολύτως από τις θεμελιώδεις σταθερές.

Μελετήστε και εξηγήστε τα αποτελέσματα: Πώς προκύπτει ότι οι ενεργειακές στάθμες είναι διακριτές μεταξύ τους; Υπολογίστε το μέγεθος του κανονικού, μη «διεγερμένου» ατόμου του υδρογόνου. Έχει νόημα να θέσουμε το n ίσο με μηδέν; Γιατί έχει ή γιατί δεν έχει νόημα; Υπολογίστε το μήκος κύματος και την ενέργεια ενός φωτονίου, που είναι αρκετή για να ιονίσει ένα κανονικό άτομο υδρογόνου. Εξηγήστε προσεκτικά το συλλογισμό σας.

Με τη βοήθεια της Εξ. 17, σχεδιάστε *υπό κλίμακα* τουλάχιστον πέντε επιτρεπόμενες τροχιές. Εξηγήστε τις φασματικές σειρές (Lyman, Balmer κτλ.), προσδιορίζοντας ποιες μεταπτώσεις αντιστοιχούν σε κάθε σειρά των παρατηρούμενων γραμμών.

10. Ανατρέξτε στο νόημα της «στροφορμής» και γράψτε την έκφραση για την τροχιακή στροφορμή L_n του ηλεκτρονίου σε συνάρτηση με τα r_n και f_n . Κατόπιν, χρησιμοποιώντας τη σχέση που αποδείξατε, δείξτε ότι αυτή ανάγεται στη σχέση:

$$L_n = n \frac{h}{2\pi} \quad (18)$$

Όπως αναφέραμε πριν, ορισμένοι ερευνητές είχαν επισημάνει ότι το h έχει διαστάσεις στροφορμής και υποψιάστηκαν ότι συνδέεται με κάποια στροφορμή στη δομή του ατόμου. Η Εξ. 18 δείχνει ότι σε μικροσκοπική κλίμακα η στροφορμή είναι κβαντισμένη. Τι σημαίνει αυτό;

[Στα επόμενα άρθρα του, ο Bohr δεν χρησιμοποιεί πλέον την αρχή της αντιστοιχίας για να φτάσει στα αποτελέσματα που προσδιορίσατε. Χρησιμοποιεί την προσέγγιση που υπάρχει σε πολλά εγχειρίδια: εισάγει την «κβάντωση της στροφορμής» ως βασικό αξίωμα, αντί για την Εξ. 14. Προκύπτουν, βεβαίως, τα ίδια τελικά συμπεράσματα.]

11. Δείξτε ότι ο προηγούμενος ισχυρισμός είναι σωστός, αποδεικνύοντας πάλι τις Εξ. 15, 16 και 17. Χρησιμοποιήστε την Εξ. 18 ως κανόνα κβάντωσης, χωρίς να επικαλεστείτε την αρχή της αντιστοιχίας.

11. ΔΙΑΦΟΡΑ ΘΕΜΑΤΑ

11.1 Η εισαγωγή της κινητικής θεωρίας

Ορισμένα εγχειρίδια «καταδύονται» κατευθείαν στην απόδειξη της εξίσωσης της πίεσης (στο πλαίσιο της κινητικής θεωρίας), χωρίς να αναφερθούν στις βαθύτερες παραδοχές. Άλλα παραθέτουν απόκρυφες διακηρύξεις για το πρότυπο που υιοθετούν, χωρίς να προσπαθούν, με βάση την εμπειρία του μαθητή, να δικαιολογήσουν τις υποθέσεις που υπεισέρχονται. Τέλος, ελάχιστα αναλύουν και αιτιολογούν τις παραδοχές.

Πολύ λίγοι μαθητές αντιλαμβάνονται μόνοι τους αυτό το κενό: δεν διακρίνουν τις υποθέσεις που υπεισέρχονται στο θέμα, αν δεν γίνει σαφώς λόγος γι' αυτές. Αν οι υποθέσεις παρουσιαστούν γρήγορα και με κρυπτογραφικό τρόπο, ελάχιστοι τις προσέχουν, εκτός κι αν τους ζητηθεί κάτι σχετικό σε τεστ. Αλλά και τότε, απλώς απομνημονεύουν τις υποθέσεις, ενώ ελάχιστα ή καθόλου ασχολούνται με το κίνητρο της επινόησής τους ή με την αιτιολόγησή τους. Αν δεν παρουσιάσουμε στους μαθητές τον τρόπο επιλογής των απαραίτητων υποθέσεων και αν δεν περιγράψουν με δικά τους λόγια το αίτιο που οδήγησε στην εισαγωγή των υποθέσεων, στερούνται μια πολύτιμη διανοητική εμπειρία στη φαινομενολογία: οι υποθέσεις που υπεισέρχονται στην κινητική θεωρία συνδέονται με πολλά δεδομένα της καθημερινής εμπειρίας μας, με τη συμπεριφορά και τις ιδιότητες των υλικών ουσιών. Οι μαθητές, ωστόσο, χρειάζονται βοήθεια για να αντιληφθούν τη σύνδεση και για να κατανοήσουν και να εκτιμήσουν την εννοιολογική δομή της θεωρίας.

Επιπλέον, η κινητική θεωρία των ιδανικών αερίων είναι ουσιώδες βήμα στη διαμόρφωση ενός μικροσκοπικού προτύπου που ερμηνεύει τις μακροσκοπικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά των σωμάτων. Είναι δημιουργία της γαλιλαϊκής παράδοσης: της εξιδανίκευσης και της απλοποίησης. Οι εξιδανικεύσεις είναι ουσιώδες χαρακτηριστικό. Πρέπει λοιπόν να τις κατανοήσουμε απολύτως. Είναι μια αναγκαιότητα που δεν παρακάμπτεται με τους υπολογιστές.

Πρωτεύον χαρακτηριστικό της κινητικής θεωρίας είναι, βεβαίως, η αποδοχή της άποψης ότι η αρχιτεκτονική της ύλης δεν είναι συνεχής, αλλά ασυνεχής. Από τις πρώτες τάξεις του σχολείου οι μαθητές είναι αρκετά συνηθισμένοι να ακούνε τους όρους «άτομα» και «μόρια». Έτσι δεν συνειδη-

τοποιούν ότι δεν έχουν εξετάσει ερωτήματα του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...»;, «Γιατί πιστεύουμε ότι...»; Έχουν παρακολουθήσει απλώς την παρουσίαση μιας σειράς όρων και ανούσιων διακηρύξεων. Αγνοούν πλήρως ότι και άλλες απόψεις είναι δυνατό να είχαν υιοθετηθεί: για πολύ καιρό στη δυτική σκέψη ο ατομισμός θεωρούνταν αθεϊστικός, σατανικός και αιρετικός, και οι λίγοι θαρραλέοι υποστηρικτές του έπρεπε να προβάλλουν σθεναρή αντίσταση. Φαίνεται ότι για να αποκτήσουν οι μαθητές γνήσια επιστημονική καλλιέργεια, χρειάζεται, έστω λίγο, να προσέξουν αυτά τα βασικά ζητήματα. Ελάχιστα εγχειρίδια, ωστόσο, ακόμα και της χημείας, ασχολούνται πλέον μ' αυτά. Ο καθηγητής, λοιπόν, πρέπει μόνος του να αποφασίσει αν θα διαθέσει χρόνο για τη μελέτη αυτών των ζητημάτων.

Αφού οι μαθητές δεχτούν την ασυνέχεια της ύλης (μελετώντας ορισμένες ενδείξεις που οδηγούν σ' αυτή ή αποδεχόμενοι απλώς τις διακηρύξεις του καθηγητή, αν ο χρόνος δεν επαρκεί για να μελετήσουν εναλλακτικά πρότυπα), υπάρχει κάτι που πρέπει να αναφέρουμε: μεγάλες μορφές της επιστήμης υιοθέτησαν άλλα πρότυπα, εκτός από το ατομικό. (Λίγοι μαθητές αντιλαμβάνονται όντως ότι υπάρχουν και άλλα ενδεχόμενα εκτός από το ατομικό πρότυπο· διαστάζουν, όμως, να εκφράσουν τις σκέψεις τους. Φοβούνται ότι θα θεωρηθούν «ανόητοι» επειδή δεν αντιλαμβάνονται αμέσως ότι το παραδοσιακό πρότυπο είναι αναπόφευκτο. Οι εν λόγω μαθητές ενθαρρύνονται σημαντικά, αν αισθάνονται ότι βρίσκονται σε φιλικό περιβάλλον ανταλλαγής ιδεών, ακόμα κι αν, τελικά, οι αρχικές απόψεις τους δεν «επιζήσουν».) Τα σημαντικότερα πρότυπα που ελέγχθηκαν σε διάφορες χρονικές περιόδους είναι τα εξής:

1. *Το στατικό πρότυπο.* Ορισμένοι ατομιστές, συμπεριλαμβανομένου του Νεύτωνα και του Dalton, είχαν την άποψη πως όταν ένα αέριο ηρεμεί και δεν ρέει, τα σωματίδιά του καταλαμβάνουν μόνιμες θέσεις και καλύπτουν όλο το χώρο που τους διατίθεται. Όταν ο όγκος που καταλαμβάνει το αέριο αυξάνεται ή μειώνεται, τα σωματίδια διαστέλλονται ή συστέλλονται, παραμένοντας σε επαφή μεταξύ τους. (Αρχικά, πολλοί μαθητές συμφωνούν με τη συγκεκριμένη άποψη· αν δεν προηγηθεί συζήτηση και μελέτη, δεν αντιλαμβάνονται γιατί θεωρούμε ανώτερο το σύγχρονο πρότυπο της κινητικής θεωρίας.) Στα «Principia», ο Νεύτων αποδεικνύει ότι, αν τα σωματίδια απωθούνται αμοιβαία με δύναμη αντιστρόφως ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ των κέντρων τους, η πίεση του αερίου μεταβάλλεται αντιστρόφως προς τον όγκο· δηλαδή, αυτό ακριβώς που έδειξε πειραματικά ο Boyle. Το συγκεκριμένο πρότυπο, λοιπόν, επειδή είχε την έγκριση μιας μεγάλης αυθεντίας, άντεξε για πολύ χρόνο.

2. *Το πρότυπο του Boscovich.* Το 1758, ο Σέρβος επιστήμονας Roger Boscovich πρότεινε ένα πρότυπο με βάση το οποίο έπρεπε να θεωρήσουμε ότι η ύλη αποτελείται από αδιαίρετα σημειακά κέντρα δύναμης. Τα σημεια-

κά κέντρα έχουν αδράνεια και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, ακόμα κι όταν η μεταξύ τους απόσταση είναι άπειρη, όπως συμβαίνει με τη βαρυτική δύναμη. Όταν δύο σημειακά κέντρα βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο, η αμοιβαία δύναμη είναι απωστική. Καθώς απομακρύνονται μεταξύ τους, η δύναμη εναλλάσσεται από απωστική σε ελκτική. Τελικά, όταν απομακρυνθούν αρκετά, γίνεται αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της μεταξύ τους απόστασης. Κατά μία έννοια, λοιπόν, τα άτομα του Boscovich έχουν άπειρη έκταση. Η ιδέα αποτελεί προσπάθεια περιγραφής των υλικών ουσιών μέσω κέντρων δύναμης. Μ' αυτόν τον τρόπο απομακρυνόμαστε από την απλοϊκή αντίληψη του «σκληρού» και του «υλικού». ¹ Επειδή το πρότυπο του Boscovich δεν αποδείχθηκε εξαιρετικά γόνιμο, δεν έγινε ευρέως αποδεκτό. Επηρέασε, ωστόσο, τη σκέψη σημαντικών επιστημόνων, λόγου χάρι του William Hamilton, του Michael Faraday και του Joseph Henry.

3. Το πρότυπο των στροβίλων. Στις αρχές του 19ου αιώνα, ο Humphrey Davy διατύπωσε μια ποιοτική δυναμική θεωρία για τη θερμότητα: πρότεινε, δηλαδή, ότι στα στερεά, καθώς η ύλη θερμαίνεται, η παλμική κίνηση των ατόμων ή των μορίων αυξάνεται. Αντίθετα, στα αέρια τα άτομα περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους ή διαθέτουν περιστρεφόμενες «ατμόσφαιρες». Για μικρό χρονικό διάστημα, ο Joule και άλλοι ερευνητές υιοθέτησαν αυτό το πρότυπο. Προσπάθησαν να εξηγήσουν την τάση εξάπλωσης των αερίων, θεωρώντας τα άτομα (σύμφωνα με την καρτεσιανή παράδοση) περιστρεφόμενους στροβίλους ρευστού με τάση φυγόκεντρης εξάπλωσης, όταν οι εξωτερικές περιοριστικές δυνάμεις χαλαρώνουν.

4. Το κινητικό πρότυπο. Στη μελέτη του για τη μηχανική των ρευστών, που εκδόθηκε το 1738, ο Daniel Bernoulli πρότεινε ένα ατομικό πρότυπο, με βάση την αντίληψη ότι τα αέρια αποτελούνται από μικροσκοπικά σωματίδια. Τα σωματίδια κινούνται ελεύθερα και συνεχώς, με μεγάλη ταχύτητα, στον όγκο όπου βρίσκονται περιορισμένα. Ασκούν, επίσης, σταθερή μέση πίεση στα περιοριστικά τοιχώματα, επειδή τα βομβαρδίζουν με εξαιρετικά υψηλή συχνότητα. Το εν λόγω πρότυπο αγνοήθηκε για έναν αιώνα περίπου. Από τα σοβαρότερα εμπόδια υπήρξε η απροθυμία της επιστημονικής κοινότητας να δεχτεί ένα πρότυπο που απαιτούσε τέλεια ελαστικότητα των μικροσκοπικών αλληλεπιδράσεων. Το πρότυπο επανήλθε στην επικαιρότητα

1. Τον 19ο αιώνα, δύο αντίθετες φιλοσοφικές θεωρίες επηρέαζαν τις θετικές επιστήμες και καθημιά είχε διάσημους οπαδούς. Οι υποστηρικτές της «Naturphilosophie», που ανάμεσά τους ήταν ο Oersted και ο Faraday, αναζητούσαν την «αλληλοαντιστροφικότητα» όλων των δυνάμεων της Φύσης. Επιπλέον, γι' αυτούς η δύναμη κατείχε πρωτεύοντα ρόλο στο εννοιολογικό οικοδόμημα. Από την άλλη πλευρά, οι θετικιστές προσπαθούσαν να αφαιρέσουν από τη φυσική το μυστήριο και την ασάφεια της έννοιας της «δύναμης».

χάρη στις ανεξάρτητες προσπάθειες των επιστημόνων του 19ου αιώνα (ιδιαίτερα των Waterston², Maxwell και Clausius). Οι επιστήμονες αυτοί, παραινούμενοι από την εμφάνιση της ιδέας διατήρησης της ενέργειας, επιχείρησαν να δημιουργήσουν μια δυναμική θεωρία με τα χαρακτηριστικά του κινητικού προτύπου. Επειδή η κινητική θεωρία υπήρξε απλή και εξαιρετικά επιτυχής σε ευρεία περιοχή εφαρμογών (λόγου χάρι, βλ. εδάφιο 10.2), αποτέλεσε τη βάση της σύγχρονης άποψης για τη Φύση.

11.2 Οι παραδοχές της κινητικής θεωρίας των ιδανικών αερίων

Ο χρόνος που δαπανάμε για να οδηγήσουμε τους μαθητές να κατανοήσουν και να δεχτούν τις βασικές υποθέσεις του κινητικού προτύπου, είναι επιτυχημένη επένδυση: τα φαινόμενα που υπεισέρχονται σ' αυτό το θέμα έχουν ευρύτητα και πλούτο· έτσι, οι μαθητές αποκτούν μοναδικές εμπειρίες. Ο συνδυασμός φαινομενικά ανόμοιων και άσχετων μεταξύ τους φυσικών φαινομένων οδηγεί στην αφομοίωση των εννοιών και στην κατανόηση του χαρακτήρα της επιστημονικής σκέψης. Ο καλύτερος και αποτελεσματικότερος τρόπος για να κατανοήσουν οι μαθητές το θέμα αυτό, δεν είναι να παρακολουθήσουν στα εγχειρίδια ή στην παράδοση κάποιες δασκαλίστικες διακηρύξεις, αλλά να τους κατευθύνουμε με συζητήσεις σωκρατικού τύπου να αρθρώσουν τους συλλογισμούς τους.

1. Αφού οι μαθητές δεχτούν το πρότυπο του ατόμου-μορίου, το επόμενο βήμα είναι να εξετάσουν μόνοι τους τις άμεσες συνέπειές του: Αν όλη η ύλη, συμπεριλαμβανομένης της σάρκας και των οστών μας, αποτελείται από διακριτά μεταξύ τους σωματίδια, τι συγκρατεί τα σωματίδια μεταξύ τους, ώστε να σχηματίζονται τα υγρά και τα στερεά; Το δάκτυλό μας αντιστέκεται όταν το τραβάμε ή το πιέζουμε. Αν η ύλη έχει ασυνεχή δομή, δεν μπορούμε παρά να δεχτούμε ότι μεταξύ των σωματιδίων υπάρχουν δυνάμεις αλληλεπίδρασης. Επιπλέον, στα υγρά και τα στερεά, τα σωματίδια πρέπει να κατανέμονται σε θέσεις «ισορροπίας» (σε «πηγάδια» δυναμικού, όπως θα λέγαμε, αν είχαμε ήδη παρουσιάσει τον όρο): όταν τα απομακρύνουμε από τη θέση τους, έλκονται ισχυρότατα μεταξύ τους· όταν δύο σωματίδια πλησιάσουν μεταξύ τους, απωθούνται ισχυρότατα αμοιβαία.

Η ιδέα ότι η αλληλεπίδραση είναι ίσως ηλεκτρική άρχισε να αναπτύσσεται τον 19ο αιώνα, όταν οι επιστήμονες αποδέχτηκαν την ατομική θεωρία και, ταυτόχρονα, αναγνώρισαν τον κυρίαρχο ρόλο του

2. Βλ. Brush (1961).

ηλεκτρισμού στο μικρόκοσμο (στην ηλεκτρόλυση, στον ιονισμό, στην καταστροφή των διηλεκτρικών κτλ.). Ελάχιστοι μαθητές, ωστόσο, αντιλαμβάνονται μόνοι τους τη σύνδεση. Μόνο με τη συζήτηση αρχίζουν να συνειδητοποιούν ότι υπάρχει όντως αυτή η σύνδεση και να εκτιμούν τη σημασία της. Μετά απ' αυτές τις πρώτες γενικές σκέψεις, πολλοί μαθητές θέλουν δικαιολογημένα να μάθουν περισσότερα για το μηχανισμό και για τις λεπτομέρειες της αλληλεπίδρασης. Θεωρούν, μάλιστα, ότι η απάντηση είναι απλή και προκύπτει αυτόματα. Είναι, λοιπόν, ωφέλιμο να αντιληφθούν ότι το να γνωρίζουν τη σχετική ορολογία δεν σημαίνει ότι κατανοούν το θέμα: τουλάχιστον τέσσερις γενιές ικανότατων επιστημόνων αναζήτησαν την απάντηση, αλλά έζησαν και πέθαναν χωρίς να την ανακαλύψουν. Οι μαθητές, λοιπόν, πρέπει να περιμένουν μέχρι να μάθουν την απαραίτητη φυσική.

2. Αφού οι μαθητές αποκτήσουν τις γενικές γνώσεις που προαναφέραμε, μπορούμε να επιστρέψουμε στα αέρια και στο ερώτημα: Γιατί διαφέρουν τόσο πολύ από τα υγρά και τα στερεά; Κυρίαρχη ιδιότητα-«κλειδί» είναι η συμπιεστότητα: τα αέρια έχουν πολύ μεγάλη συμπιεστότητα, ενώ τα υγρά και τα στερεά έχουν εξαιρετικά μικρή (αν και μη μηδενική).³

Αφού οι μαθητές μελετήσουν άμεσα, με τον τρόπο που προαναφέραμε, τα μακροσκοπικά φαινόμενα, αρχίζουν να αντιλαμβάνονται ότι η διαφορά μεταξύ των υγρών και των στερεών από τη μια και των αερίων από την άλλη, σε μικροσκοπικό επίπεδο, εξηγείται ως εξής: στην πρώτη περίπτωση τα διακριτά μεταξύ τους σωματίδια είναι πολύ κοντά το ένα στο άλλο, συγκριτικά με το μέγεθός τους, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι μακριά. Αντιλαμβάνονται επίσης ότι η εικόνα αυτή είναι συνεπής με την εξαιρετικά μικρότερη πυκνότητα και ρευστό-

3. Αυτό το θέμα χρειάζεται μελέτη και συζήτηση. Πολλοί μαθητές, αν δεν έχουν διδαχθεί το αντίθετο ούτε έχουν εμπειρία απτής ένδειξης της συμπιεστότητας των υγρών και των στερεών, αρχικά πιστεύουν ότι αυτά είναι απολύτως ασυμπίεστα. Πρέπει λοιπόν να επιστρέψουμε σε φαινόμενα που υπερβαίνουν την άμεση απτή εμπειρία μας (βλ. εδάφιο 3.12). Δύο συνηθισμένες επιδείξεις που εκτελούνται στην παράδοση βοηθούν προς αυτή την κατεύθυνση. Στην πρώτη επίδειξη, τα άκρα μιας μεταλλικής ράβδου είναι στερεωμένα σε ένα ογκώδες πλαίσιο. Η ράβδος (που έχει διασταλεί με θέρμανση) θραύεται, λόγω των τάσεων που αναπτύσσονται σ' αυτή καθώς ψύχεται. Στη δεύτερη επίδειξη, ένα κλειστό δοχείο, που περιέχει νερό, θραύεται, καθώς το νερό παγώνει. Πρέπει να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να αντιληφθούν ότι στις συγκεκριμένες περιπτώσεις η θραύση συμβαίνει όχι επειδή τα υλικά είναι ουσιαστικά αδιάστατα ή ασυμπίεστα, αλλά επειδή η δομή που τα περιβάλλει είναι απαραίτητο να ελξει ή να συμπίεσει τα αντικείμενα, ώστε να διατηρήσουν το αρχικό μήκος ή τον όγκο τους. Πρέπει να αντιληφθούν, επίσης, ότι αν και η έκταση ή η συμπίεση δεν είναι αδύνατο να πραγματοποιηθούν, ωστόσο, είναι αποτέλεσμα πολύ μεγάλων δυνάμεων.

τητα των αερίων. (Η τιμή 1.000, που είναι η τάξη μεγέθους του λόγου της πυκνότητας των στερεών ή των υγρών ως προς την πυκνότητα των αερίων, πρέπει να εντυπωθεί στο μυαλό τους.) Οι μαθητές, έχοντας σχηματίσει αυτή την εικόνα, δέχονται ότι είναι λογικό να θεωρήσουν ως πρώτη προσέγγιση ότι στα αέρια η αλληλεπίδραση μεγάλης εμβέλειας μεταξύ των σωματιδίων είναι αμελητέα και ότι εμφανίζεται ισχυρή απωστική αλληλεπίδραση μόνο για σύντομο χρονικό διάστημα τη στιγμή της άμεσης κρούσης. Φαίνεται επίσης λογικό να θεωρήσουν ότι σε επόμενη τάξη προσέγγισης εκδηλώνεται ελκτική αλληλεπίδραση μεγαλύτερης εμβέλειας (δυνάμεις van der Waals). Η αλληλεπίδραση αυτή σε χαμηλότερη θερμοκρασία και υψηλότερη πίεση οδηγεί στη συμπύκνωση του αερίου και στην εμφάνιση υγρού.

Με αυτό το υπόβαθρο, οι μαθητές αρχίζουν να αντιλαμβάνονται ότι ο όγκος των υγρών και των στερεών αντιστοιχεί προσεγγιστικά στον καθαρό όγκο που καταλαμβάνουν τα άτομα ή τα μόρια: μικρή συμπίεστότητα σημαίνει ότι τα σωματίδια κατανέμονται ουσιαστικά με συνεχή τρόπο. (Στο εδάφιο 10.2 αναφέρεται πώς αυτή η ιδέα χρησιμοποιήθηκε αρχικά στον προσδιορισμό του αριθμού του Avogadro.) Μπορούμε, λοιπόν, να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να αντιληφθούν ότι η τιμή 1.000, ή και μεγαλύτερη, του λόγου των ~~μέσων~~ ^{αποστάσεων} σημαίνει ότι στα αέρια η τάξη μεγέθους της απόστασης μεταξύ των σωματιδίων είναι τουλάχιστον ίση με την κυβική ρίζα του 1.000 ή με δέκα φορές το μέγεθος των σωματιδίων. (Έτσι, τους δίνεται η ευκαιρία να επαναλάβουν συλλογισμούς με λόγους και με αλλαγή κλίμακας σε πλούσιο και σημαντικό πλαίσιο. Σε προηγούμενα κεφάλαια, τονίσαμε τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν στο θέμα αυτό.)

3. Μπορούμε τώρα να αναζητήσουμε αποδείξεις για το ότι τα σωματίδια του αερίου εκτελούν μεταφορική κίνηση. Στοιχείο απόδειξης που παρατίθεται συνήθως, είναι η διάχυση των αρωμάτων ή των έγχρωμων αερίων (λόγου χάρη του βρωμίου) στον αέρα. Το φαινόμενο αυτό ωστόσο συνυπάρχει με τα φαινόμενα μεταφοράς των αερίων που προκαλούνται ακόμα και από μικρές διαφορές θερμοκρασίας. Απαιτούνται, λοιπόν, περισσότερες αποδείξεις. Άλλο χαρακτηριστικό των αερίων, το οποίο επίσης παρατίθεται συχνά, είναι η τάση τους να καταλάβουν πλήρως το χώρο που τους διατίθεται. Αν και πρόκειται για σημαντικό αποδεικτικό στοιχείο, πρέπει να ενισχυθεί με κάποιο άλλο το οποίο λίγοι μαθητές αντιλαμβάνονται αυτόματα. Με λίγη καθοδήγηση ωστόσο το κατορθώνουν. (Αναφερόμαστε σε μια κατάσταση που δεν συμβαίνει. Επανειλημμένα έχουμε τονίσει τη σημασία του να ενημερωνόμαστε όχι μόνο για το τι συμβαίνει, αλλά και για το τι δεν συμβαίνει. Ιδού, λοιπόν, τώρα μια νέα ευκαιρία.) Ζητά-

με, λοιπόν, από τους μαθητές να εξετάσουν προσεκτικά την εικόνα που διαμορφώσαμε μέχρι τώρα: στα αέρια υπάρχουν διακριτά σωματίδια που η μεταξύ τους απόσταση είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρό τους. Στη συνέχεια, τους ρωτάμε: τι θα συνέβαινε στο δωμάτιο αν τα μόρια του αερίου ήταν ακίνητα; Οι μαθητές απαντούν ότι τα μόρια θα έπεφταν στο πάτωμα και θα σχημάτιζαν ένα πολύ λεπτό στρώμα. Ελάχιστοι, ωστόσο, αντιλαμβάνονται αυτό το γεγονός χωρίς υπόδειξη. Ο *συνδυασμός* των παρατηρήσεων που καταγράψαμε οδηγεί σχεδόν αναγκαστικά στην παραδοχή της αέναης μεταφορικής κίνησης. Στη συνέχεια, η παραδοχή ενισχύεται — εκ των υστέρων — με την επιτυχία της άποψης ότι η πίεση είναι αποτέλεσμα της σύγκρουσης των σωματιδίων με το τοίχωμα.

4. Επειδή τα σωματίδια κινούνται συνεχώς, προκύπτει άμεσα ότι συγκρούονται μεταξύ τους και με τα τοιχώματα του δοχείου. Σ' αυτό το σημείο ερχόμαστε αντιμέτωποι με το μεγαλύτερο εμπόδιο που συνάντησαν αρχικά εκείνοι που προσπάθησαν να επιβάλουν την κινητική θεωρία. Πρόκειται για το ζήτημα της τέλει ελαστικότητας των κρούσεων και, ως εκ τούτου, της αέναης κίνησης σε μικροσκοπική κλίμακα. Ο προβληματισμός των μαθητών δεν είναι τόσο προχωρημένος όσο ήταν των ώριμων επιστημόνων, τον πρώτο καιρό. Αν, ωστόσο, τους δοθεί η ευκαιρία, εκφράζουν την ανησυχία τους για το αν υπάρχει όντως τέλεια ελαστικότητα. Γνωρίζουν ότι οι μακροσκοπικές κρούσεις είναι μη ελαστικές και ότι σε κάθε μακροσκοπικό σύστημα η κίνηση φθίνει συνεχώς. Επειδή ακούνε συνεχώς ότι «είναι αδύνατο να υπάρξει αέναη κίνηση», δεν μπορούν να αντιληφθούν αμέσως τη διαφορά που εμφανίζεται σε μικροσκοπικό επίπεδο. Πρέπει, λοιπόν, να τους καθοδηγήσουμε να αντιληφθούν ότι αν δεχτούμε την εικόνα που αναπτύξαμε μέχρι τώρα, δεν μπορούμε παρά να δεχτούμε πως υπάρχει απόλυτη ελαστικότητα. Το ότι η πίεση στα τοιχώματα δεν ελαττώνεται και το ότι τα μόρια ουδέποτε καταλήγουν στον πυθμένα του δοχείου σημαίνει ότι η κίνηση διατηρείται. Επίσης, αν σε μικροσκοπικό επίπεδο η αλληλεπίδραση είναι ουσιαστικά ηλεκτρική ή ηλεκτρομαγνητική, είναι εύλογο να είναι ελαστική. (Σε τούτο το σημείο, είναι αποτελεσματικό να θυμίσουμε το πείραμα με τις φορτισμένες σφαίρες ψίχας ή με τους μαγνήτες που συγκρούονται μεταξύ τους, χωρίς να έρχονται σε επαφή. Τα πειράματα αυτά επιδεικνύονται κατά τη μελέτη του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.)

5. Αν δεχτούμε ότι σε μικροσκοπικό επίπεδο υπάρχει αέναη κίνηση, αρχίζουμε να αντιλαμβανόμαστε την εγγενή τυχαιότητα του συστήματος και την έννοια της «διασποράς» των ταχυτήτων και των κα-

τευθύνσεων της κίνησης. Σε προηγούμενο ή στο παρόν στάδιο της παρουσίασης, είναι, βέβαια, εξαιρετικά αποτελεσματικό να αρχίσουμε να χρησιμοποιούμε μικρές χάντρες που κινούνται τυχαία και συνεχώς ή μια αντίστοιχη προσομοίωση σε υπολογιστή. (Από την πείρα μου γνωρίζω ότι η επίδειξη με τις «υλικές» χάντρες εντυπώνεται καλύτερα στους μαθητές απ' ό,τι η προσομοίωση σε υπολογιστή. Αυτό συμβαίνει τουλάχιστον σε αρχικό μη εκλεπτυσμένο στάδιο ανάπτυξης. Η προσομοίωση είναι χρήσιμη και εντυπώνεται καλύτερα στους μαθητές, όταν πλέον εξετάσουμε λεπτομερέστερα τα χαρακτηριστικά της κίνησης.) Στην επίδειξη φαίνεται ζωντανά ότι η ταχύτητα και η κατεύθυνση της κίνησης μεταβάλλονται. Φαίνεται επίσης ότι η κρούση των σωματιδίων με τα τοιχώματα και μεταξύ τους γίνεται με κάθε δυνατή γωνία. Τέλος, φαίνεται ότι η τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας κυμαίνεται από το μηδέν έως πολύ μεγάλες τιμές και ότι δεν μπορούμε να εξετάσουμε μεμονωμένα μία ταχύτητα, αλλά κατανομές και μέσες τιμές.

6. Μπορούμε τώρα να αντιληφθούμε, χωρίς οποιονδήποτε φορμαλισμό και με απολύτως ποιοτικό τρόπο, πώς εμφανίζεται η πίεση στο τοίχωμα του δοχείου. Σε τούτο το σημείο, χρησιμοποιούμε, βέβαια, την περίπτωση που μελετήσαμε στη δυναμική του μεμονωμένου σωματιδίου: τη δύναμη που συνδέεται με τη μεταβολή της ορμής, όταν το σωματίδιο αναπηδά ελαστικά σε κάποιο τοίχωμα. Κατόπιν, την προσαρμόζουμε στην περίπτωση της δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας, όταν έχουμε τρομακτικά υψηλό ρυθμό κρούσεων. Με τη συζήτηση πρέπει να εκμαιεύσουμε την αντίληψη ότι η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας εξαρτάται τόσο από τη συχνότητα των κρούσεων (και, ως εκ τούτου, από την πυκνότητα του αερίου), όσο και από την ταχύτητα των προσπιπτόντων σωματιδίων. (Επειδή είμαστε εξοικειωμένοι με το πρότυπο, ίσως θεωρούμε ότι η εν λόγω ταυτόχρονη εξάρτηση είναι προφανής. Διέφυγε, εντούτοις, της προσοχής πολλών από τους πρώτους ερευνητές· οι μαθητές, λοιπόν, δυσκολεύονται να διεισδύσουν στο συγκεκριμένο θέμα.) Βρίσκουμε, ωστόσο, τελικά ότι η συχνότητα των κρούσεων εξαρτάται από την ταχύτητα. Άρα, η πίεση εξαρτάται από το *τετράγωνο* της ταχύτητας. Αυτό, όμως, πρέπει να το αφήσουμε να αναδυθεί από τις μαθηματικές εξισώσεις.

7. Αξίζει να εκλεπτύνουμε το πρότυπο, εξετάζοντας τι σημαίνουν η ιστροπία του αερίου και η σταθερότητα της πίεσης στο τοίχωμα. Πώς η πίεση παραμένει σταθερή αν και είναι αποτέλεσμα μεμονωμένων κρούσεων; Πώς διατηρείται η ιστροπία; Οι μαθητές απαντούν με σχετικά μικρή δυσκολία σε ερωτήματα που συνδέονται με την υψη-

λή συχνότητα και τους μεγάλους αριθμούς. Αντιλαμβάνονται, δηλαδή, ότι η σταθερότητα της πίεσης οφείλεται στον τεράστιο αριθμό των κρούσεων. Αντιλαμβάνονται επίσης ότι αν μειωθεί αυτός ο αριθμός, εμφανίζονται διακυμάνσεις. Σ' αυτό το πλαίσιο, βοηθά σημαντικά η επίδειξη με τις χάντρες.

Μια σύνθετη έννοια που αντιλαμβάνονται δυσκολότερα οι μαθητές (αξιζει, λοιπόν, η συζήτηση να αποκτήσει βραδύτερο ρυθμό και να τύχει μεγαλύτερης προσοχής) είναι η «αρχή του ακριβούς ισοζυγίου»: η σταθερότητα και η ισοτροπία οφείλονται στο ότι, λόγω του μεγάλου πλήθους, αν κάπου στο αέριο μεταβληθεί η ταχύτητα και η κατεύθυνση της κίνησης ενός σωματιδίου, η μεταβολή εξισορροπείται ακριβώς από τη μεταβολή των χαρακτηριστικών της κίνησης ενός άλλου σωματιδίου. Έτσι, από τη στιγμή που το σύστημα (αφού ξεκινήσει από μια αρχική, μεταβατική κατάσταση όπου, λόγω χάρη, τα σωματίδια συνωστίζονταν στο ένα άκρο του δοχείου) καταλήξει σε μια σταθερή κατάσταση, παραμένει σ' αυτή.

Άλλο χαρακτηριστικό που εξαρτάται από την αρχή του ακριβούς ισοζυγίου είναι ότι δικαιολογημένα θεωρούμε κατά μέσο όρο τις αναπηδήσεις των μορίων στο τοίχωμα «κατοπτρικές» ανακλάσεις. Πρέπει να καθοδηγήσουμε τους μαθητές να σχεδιάσουν το τοίχωμα από τη σκοπιά του μορίου και να αντιληφθούν ότι σε μοριακή κλίμακα το τοίχωμα είναι «τραχύ», γεμάτο προεξοχές, «λόφους» και «κοιλιάδες». Λαμβάνουμε, ωστόσο, υπόψη μας κατά μέσο όρο την απόκλιση από το ότι «η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης», επειδή ο αριθμός των κρούσεων είναι τεράστιος. Δικαιολογημένα, λοιπόν, θεωρούμε ότι η ανάκλαση είναι τέλεια.

8. Έχοντας προχωρήσει τόσο μακριά με την ποιοτική εικόνα, μπορούμε να προβλέψουμε ότι η θερμοκρασία συνδέεται κάπως με τη μοριακή ταχύτητα. Οι περισσότεροι μαθητές γνωρίζουν ότι, αν ο όγκος του αερίου δεν μεταβάλλεται (δηλαδή, αν η πυκνότητά του μένει σταθερή), τότε, όταν η θερμοκρασία του αυξάνεται, αυξάνεται και η πίεσή του. Αν η πυκνότητα μένει σταθερή στο πλαίσιο του προτύπου που αναπτύξαμε, μόνον αν αυξηθεί η ταχύτητα των μορίων αυξάνεται η πίεση. Η θερμοκρασία, λοιπόν, συνδέεται στενά με τη μοριακή ταχύτητα. Οπότε μπορούμε να συνδέσουμε την ομοιομορφία της θερμοκρασίας ενός αερίου, που βρίσκεται σε ισορροπία, με το μεγάλο πλήθος των σωματιδίων και με την αρχή του ακριβούς ισοζυγίου.

9. Τέλος, μπορούμε να επικαλεστούμε την έννοια της ενέργειας και να τη συνδέσουμε με την ποιοτική εικόνα που έχουμε αναπτύξει.

Η παραδοχή ότι οι δυνάμεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μορίων που απέχουν πολύ μεταξύ τους είναι αμελητέες, εκτός από το σύντομο χρονικό διάστημα της κρούσης (σύντομο ως προς το μέσο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο συγκρούσεων), σημαίνει ότι στο ιδανικό αέριο είναι αποθηκευμένη αμελητέα δυναμική ενέργεια. (Δεν πρέπει, ωστόσο, να διαφύγει από την προσοχή των μαθητών ότι η αποθήκευση δυναμικής ενέργειας παίζει όντως σημαντικό ρόλο στα πραγματικά αέρια: μεγάλες ποσότητες δυναμικής ενέργειας συνδέονται με τη λανθάνουσα θερμότητα της συμπίκνωσης και της δημιουργίας της υγρής κατάστασης.) Αντιλαμβανόμαστε, λοιπόν, την υπό σταθερό όγκο μεταφορά θερμότητας σε ένα αέριο ως αύξηση της εσωτερικής θερμικής ενέργειας του αερίου, μέσω της αύξησης της τυχαίας κινητικής ενέργειας των μορίων. Αν τα μόρια δεν έχουν εσωτερικούς βαθμούς ελευθερίας, η κινητική ενέργειά τους οφείλεται εξ ολοκλήρου στη μεταφορική κίνησή τους. Αν, ωστόσο, μπορούν με διέγερση να αποκτήσουν και περιστροφική κίνηση, πρέπει να συμπεριλάβουμε την κινητική ενέργεια λόγω περιστροφής. Αν τα μόρια ταλαντώνονται εσωτερικά, τότε έχουν εσωτερική δυναμική και κινητική ενέργεια, λόγω της ταλάντωσης. Την ενέργεια αυτή μπορούν να την ανταλλάξουν κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων κτλ.

Αυτές οι ποιοτικές παρατηρήσεις προετοιμάζουν το έδαφος για να κατανοήσουν οι μαθητές μια από τις σοβαρότερες αποτυχίες της κλασικής θεωρίας και, αντιστοίχως, μια από τις πρώτες επιτυχίες της κβαντικής (δηλαδή την ερμηνεία των παρατηρούμενων ανωμαλιών στην ειδική θερμότητα των αερίων). Βοηθούν, επίσης, να εκτιμήσουν οι μαθητές τον τρόπο με τον οποίο αρχίζουμε να μελετάμε τη στοιχειώδη κινητική θεωρία, θεωρώντας σωματίδια σημειακής μάζας: τουλάχιστον στην αρχή, αποφεύγουμε την πολυπλοκότητα της ύπαρξης εσωτερικής μοριακής ενέργειας, δεχόμενοι ότι υπάρχει κινητική ενέργεια μόνο λόγω μεταφορικής κίνησης. Χωρίς αυτό το ποιοτικό υπόβαθρο, η παραδοχή σωματιδίων σημειακής μάζας είναι αυθαίρετη και για τους μαθητές δεν έχει νόημα. Αν είναι απαραίτητο, μεταξύ ποικίλων ανεξήγητων υποθέσεων, απομνημονεύουν και αυτή την παραδοχή. Τη θεωρούν, ωστόσο, στοιχείο ακατανόητης «μαύρης μαγείας».

10. Μια τελευταία πολύτιμη εργασία για το σπίτι, η οποία, αν και δεν ανήκει απόλυτα στο «βασιλείο» της κινητικής θεωρίας των ιδανικών αερίων, βοηθά να αφομοιώσουν οι μαθητές πολλές ουσιαστικές ιδέες, είναι η εξής:

α. Με βάση την κίνηση και τη «μετανάστευση» των μορίων, περιγράψτε τι συμβαίνει όταν από ένα ανοιχτό δοχείο εξατμίζεται νερό.

Συμπληρώστε την περιφραστική περιγραφή σας με γενικά σχήματα. Λάβετε υπόψη σας ότι ορισμένα μόρια νερού που διαφεύγουν απ' αυτό επιστρέφουν λόγω της τυχαίας κίνησης και των συγκρούσεων. Με βάση το κινητικό πρότυπο, εξηγήστε πώς εξατμίζεται όλο το υγρό.

β. Περιγράψτε με παρόμοιο τρόπο τι συμβαίνει όταν το νερό βράσκει μέσα σε ερμητικά κλεισμένο δοχείο, ενώ πάνω από την επιφάνεια του νερού υπάρχει αέρας. Με βάση το κινητικό πρότυπο, εξηγήστε γιατί σε αυτές τις συνθήκες ύστερα από λίγο δεν υπάρχει *απόλυτη* εξάτμιση του νερού. Όταν σταματά η απόλυτη εξάτμιση, τα μόρια παύουν να εγκαταλείπουν το νερό; Σε αυτές τις συνθήκες, λέμε ότι ο χώρος πάνω από το νερό είναι «κορεσμένος» με υδρατμούς και ότι η πίεση της αέριας φάσης στα τοιχώματα του δοχείου μένει σταθερή. Πώς η συγκεκριμένη κατανομή παραμένει σταθερή παρά τη συνεχή τυχαία κίνηση των μορίων και παρά το ότι ορισμένα απ' αυτά, κατά τη διάρκεια της περιπλάνησής τους, επιστρέφουν στην υγρή φάση;

γ. Θεωρήστε την περίπτωση όπου μέσα στο νερό τοποθετούμε ποσότητα ζάχαρης. Μολονότι η διαδικασία είναι αργή (εφόσον δεν αναταράξουμε το διάλυμα), αν η ποσότητα του νερού είναι σχετικά μεγάλη, όλη η ποσότητα της ζάχαρης διαλύεται. Αν, ωστόσο, η ποσότητα του νερού είναι σχετικά μικρή, η διάλυση σταματά· λέμε, τότε, ότι το διάλυμα είναι κορεσμένο. Με βάση το κινητικό-μοριακό πρότυπο και με τη βοήθεια σχημάτων, περιγράψτε τι συμβαίνει στις δύο περιπτώσεις και δικαιολογήστε γιατί στη μία περίπτωση επιτυγχάνεται ισορροπία και στην άλλη όχι. Συγκρίνετε αυτή την κατάσταση με την εξάτμιση που εξετάσαμε στις παραγράφους (α) και (β).

11.3 Υδροστατική πίεση

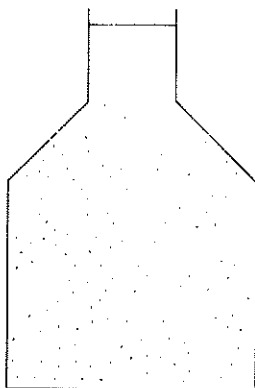
Για να κατανοήσουμε την έννοια της «υδροστατικής πίεσης», δεν αρκεί να αφομοιώσουμε απλώς τον ορισμό της «δύναμης ανά μονάδα επιφάνειας». Πρέπει, επίσης, να αντιληφθούμε πλήρως τη σημασία του νόμου του Pascal: η πίεση σε κάθε σημείο ενός ρευστού είναι ίδια προς *κάθε* κατεύθυνση. Η συνήθης τυπική «απόδειξη» αυτής της ιδέας συνίσταται στη μελέτη της στατικής ισορροπίας ενός ρευστού μικρού όγκου· λόγου χάρη, ενός ρευστού που βρίσκεται σε παραλληλεπίπεδο δοχείο τριγωνικής διατομής. Η συγκεκριμένη μελέτη, ωστόσο, είναι τόσο αφηρημένη, ώστε, ακόμα κι αν την παρουσιάσουμε, ελάχιστοι μαθητές αφομοιώνουν τη φυσική σημασία της. Σήμερα, λοιπόν, πολλά εισαγωγικά εγχειρίδια την παραλείπουν, για να εξοικονομήσουν χρόνο για τη μελέτη άλλων θεμάτων. Η επιλογή τους είναι «νόμιμη». Οι καθηγητές, ωστόσο, πρέπει να θυμούνται ότι παρέλειψαν ένα λεπτό και βασικό θέμα· πρέπει, επίσης, να είναι έτοιμοι να βοηθήσουν

να καλυφθεί το κενό σε επόμενο στάδιο.

Η λεπτότητα αυτής της ιδέας και η αδυναμία πολλών ατόμων (συμπεριλαμβανομένων εν ενεργεία φυσικών) να την αφομοιώσουν καταδεικνύεται από τις απαντήσεις στο ερώτημα: Ένα δοχείο, όπως εκείνο του Σχ. 11.3.1, αρχικά, περιέχει ομοιόμορφο μείγμα (ή κολλοειδές διάλυμα) δύο υγρών διαφορετικής πυκνότητας που δεν διαλύονται το ένα μέσα στο άλλο (λόγου χάρη, λάδι και νερό, κρέμα και γάλα κτλ.). Καθώς περνά ο χρόνος, το υγρό με τη μικρότερη πυκνότητα ξεχωρίζει και συγκεντρώνεται στο λαιμό του δοχείου. Ποια σχέση υπάρχει μεταξύ της τελικής πίεσης στον πυθμένα του δοχείου (αφού ολοκληρωθεί ο διαχωρισμός) και της αρχικής πίεσης (όταν τα ρευστά ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένα); Είναι ίδια, μεγαλύτερη ή μικρότερη από την αρχική;

Οι αρχάριοι, συνήθως, απαντούν ότι δεν γνωρίζουν. Οι περισσότεροι, ωστόσο, από εκείνους που, αν και έχουν διδαχθεί φυσική, ουδέποτε είχαν μελετήσει την ιδιότητα της υδροστατικής πίεσης, συνήθως απαντούν ότι η πίεση παραμένη σταθερή. Υπάρχουν κι εκείνοι που μαντεύουν διαισθητικά μια απάντηση και προτείνουν ορισμένη ακολουθία συλλογισμών. Αυτοί απαντούν ότι επειδή το βάρος του ρευστού μένει σταθερό, η συνολική δύναμη που ασκείται στον πυθμένα και, ως εκ τούτου, η πίεση σ' αυτόν, μένει σταθερή.

Ο συλλογισμός τους είναι λανθασμένος: η πίεση στον πυθμένα ενός δοχείου (που έχει οποιοδήποτε σχήμα, εκτός από κυλινδρικό) δεν ισούται με το λόγο του βάρους του ρευστού προς το εμβαδόν του πυθμένα. Επειδή σε κάθε σημείο η πίεση του ρευστού είναι προς κάθε κατεύθυνση η ίδια, το ρευστό ασκεί δύναμη στο τοίχωμα και το τοίχωμα με τη σειρά του στο ρευστό. Τα κεκλιμένα τοιχώματα του δοχείου ασκούν δύναμη με συνιστώσα που κατευθύνεται προς τα κάτω. Η συνιστώσα επηρεάζει την πίεση στον πυθμένα του δοχείου. Μετά το διαχωρισμό, επειδή στην κεντρική στήλη η μέση πυκνότητα του ρευστού είναι μικρότερη από την αρχική, η πίεση στον πυθμένα της στήλης αυτής μειώνεται. Στη στάθμη κάθε σημείου, κατά μή-



Σχήμα 11.3.1 Δύο υγρά που δεν διαλύονται το ένα μέσα στο άλλο, ενώ αρχικά σχηματίζουν ομοιόμορφο μείγμα, διαχωρίζονται. Το μικρότερης πυκνότητας υγρό συγκεντρώνεται στο λαιμό του δοχείου. Όταν τα υγρά διαχωριστούν, η πίεση στον πυθμένα του δοχείου μεταβάλλεται;

κος των κεκλιμένων τοιχωμάτων, η πίεση έχει επίσης μειωθεί· το ίδιο συμβαίνει και με τη συνιστώσα της δύναμης με κατεύθυνση προς τα κάτω: συνολικά, στον πυθμένα η πίεση έχει μειωθεί.

Πρέπει να βοηθήσουμε τους μαθητές να κατανοήσουν τη φυσική των φαινομένων, ζητώντας τους να σχεδιάσουν απλά διαγράμματα δυνάμεων, λόγου χάρη, σε μια κεντρική στήλη του ρευστού και σε στήλες κάτω από τα κεκλιμένα τοιχώματα. Η σχεδίαση τους βοηθά να κατανοήσουν το φυσικό περιεχόμενο και την πραγματική σημασία της πίεσης ενός ρευστού. Η σπειροειδής επανάληψη των διαγραμμάτων της δύναμης τους βοηθά να αφομοιώσουν ακόμα περισσότερο την έννοια της δύναμης, της οποίας το περιεχόμενο συνήθως παραμένει ασαφές (βλ. 3ο Κεφάλαιο).

Ιδού ένα παράδειγμα του πώς μια παραλλαγή στο περιεχόμενο μπορεί να βοηθήσει στην εμβάθυνση: Αρχικά, μελετάμε τα φαινόμενα της πίεσης των ρευστών και στρέφουμε την προσοχή των μαθητών στην πίεση που ασκείται στη βάση ενός κατακόρυφου, μεταλλικού κώνου ή κυλίνδρου. Κατόπιν, τους ρωτάμε τι θα συμβεί στην πίεση που ασκείται στη βάση του κυλίνδρου, καθώς αυτός διαστέλλεται, λόγω ομοιόμορφης αύξησης της θερμοκρασίας του. Πολλοί μαθητές (ιδιαίτερα, όσοι έχουν απομνημονεύσει τον τύπο $P = \rho gh$, χωρίς να έχουν κατανοήσει πού και πώς εφαρμόζεται) απαντούν ότι επειδή το ύψος αυξάνεται, η πίεση στη βάση αυξάνεται. Στα στερεά η πίεση στη βάση είναι όντως ίση με το λόγο του βάρους του αντικειμένου προς το εμβαδόν της βάσης. Στη θερμική διαστολή, λοιπόν, η αύξηση του ύψους δεν επηρεάζει την πίεση. Η πίεση στη βάση μειώνεται (ελάχιστα), λόγω της αύξησης της επιφάνειας της βάσης.

Αντίθετα μεταξύ τους φαινόμενα βοηθούν στην κατανόηση. Ελάχιστοι μαθητές, ωστόσο, μπορούν να θέσουν μόνοι τους ερωτήματα αυτού του είδους. Αρχίζουν να αναρωτιούνται μόνον αν τους καθοδηγήσουμε σιγά σιγά με παραδείγματα.

11.4 Αποσαφήνιση της θερμικής διαστολής

Η θερμική διαστολή είναι επίσης ένα θέμα που σήμερα συνήθως παραλείπεται από τα εισαγωγικά μαθήματα φυσικής, για χάρη άλλων θεμάτων. Η παράλειψη είναι εξίσου «νόμιμη» μ' εκείνη των φαινομένων των ρευστών. Οι καθηγητές, ωστόσο, πρέπει να έχουν υπόψη τους ότι υπάρχουν ορισμένα ευρέως διαδεδομένα κυρίαρχα κενά και παρανοήσεις. Το σημαντικότερο απ' αυτά είναι ότι οι μαθητές δεν κατορθώνουν να αντιληφθούν το συνολικό αποτέλεσμα της γραμμικής διαστολής των στερεών.

Πολλοί δεν κατορθώνουν να αντιληφθούν ότι γραμμική διαστολή προς κάθε κατεύθυνση σημαίνει ότι τα μήκη, τα εμβαδά και τα στοιχεία του όγκου ενός αντικειμένου διαστέλλονται ταυτόχρονα. Δεν αντιλαμβάνονται

ότι δεν αυξάνεται μόνο το μήκος της διαμέτρου κάθε κύκλου που μπορούμε να χαράξουμε πάνω στο αντικείμενο, αλλά και το μήκος της *περιμέτρου* του. Αποτέλεσμα: δεν αντιλαμβάνονται ότι κατά τη θερμική διαστολή δεν μειώνεται το μέγεθος της οπής που βρίσκεται πάνω σε μια μεταλλική πλάκα, αλλά αυξάνεται.

Αν θέλουμε να κατανοήσουν οι μαθητές τη θερμική διαστολή, πρέπει να τους κατευθύνουμε να αντιμετωπίσουν ποιοτικά τα φαινόμενα, εκτός από τις καθιερωμένες ασκήσεις αριθμητικών υπολογισμών. Σε τούτο το πλαίσιο, οι μαθητές πρέπει να φανταστούν τις λεπτομέρειες των φαινομένων, τις οποίες δεν μπορούν να παρατηρήσουν άμεσα, επειδή υπερβαίνουν την άμεση αισθητή εμπειρία. Οι ασκήσεις αυτού του είδους είναι ουσιώδεις: τους βοηθούν να αποκτήσουν την ικανότητα να εκτελούν αφηρημένους συλλογισμούς και να στηρίζονται σε έννοιες, για να κατανοήσουν πολύπλοκα φαινόμενα. Απλά φαινόμενα της καθημερινής ζωής, όπως η θερμική διαστολή, αποτελούν πολύτιμο πλαίσιο για τη δημιουργία της συγκεκριμένης ικανότητας. Είναι, λοιπόν, αποδοτικό να τα επικαλούμαστε, τουλάχιστον ως σύντομη παρέμβαση, χωρίς να δαπανάμε υπερβολικό χρόνο σε ασκήσεις αριθμητικών υπολογισμών που, συνήθως, υπάρχουν σε παλαιότερα εγχειρίδια.

11.5 Η εκτίμηση της τάξης ενός μεγέθους

Ένα κυρίαρχο και ευρέως διαδεδομένο παράπονο των καθηγητών αφορά την απροθυμία και την αντίσταση των μαθητών να εκτελέσουν υπολογισμούς που περιλαμβάνουν την εκτίμηση της τάξης ενός μεγέθους. Αν και στους έμπειρους φυσικούς οι συλλογισμοί που υπεισέρχονται σ' αυτούς τους υπολογισμούς φαίνονται απλοί, είναι, ωστόσο, αρκετά εκλεπτυσμένοι. Μόνον αν δώσουμε την ευκαιρία στους μαθητές να εξασκηθούν, αντιμετωπίζοντας ουσιώδη και ενδιαφέροντα προβλήματα, τους βοηθάμε να αναπτύξουν την απαραίτητη ικανότητα. Η αλλαγή κλίμακας και οι συλλογισμοί με χρήση λόγων είναι αξεδιάλυτα συνδεδεμένοι σχεδόν με κάθε εκτίμηση μεγέθους. Όπως έχουμε προαναφέρει, οι μαθητές αντιμετωπίζουν σοβαρή δυσκολία μ' αυτούς τους συλλογισμούς (βλ. εδάφια 1.6-1.12). Συνεπώς, ο καθηγητής πρέπει να αναγνωρίσει τη βαθύτερη δυσκολία που αντιμετωπίζουν οι μαθητές, ώστε να τους καθοδηγήσει κατάλληλα και να τους εφοδιάσει με απλούστερες ασκήσεις, όπου αυτό είναι απαραίτητο. Μόνον τότε αρχίζουν να αναπτύσσουν την απαιτούμενη ικανότητα.

Πολλή σκέψη, προσπάθεια και φαντασία έχει επενδυθεί στην επινόηση αποδοτικών προβλημάτων αυτού του είδους (προβλήματα που είναι δυνατό να ενσωματωθούν άμεσα στην εργασία για το σπίτι και σε τεστ· ελάχιστα τέτοια προβλήματα υπάρχουν στα καθιερωμένα εγχειρίδια). Οι καθη-

γητές που θέλουν να εκμεταλλευτούν αυτές τις προσπάθειες θα βρουν πλούσια συγκομιδή σε ποικίλες βιβλιογραφικές πηγές: Bartlett (1976-1979), Crane (1960, 1969 a, b, 1970), Hobbie (1973), Kunz (1971), Memory και Jenkins (1977) και Morrison (1963).

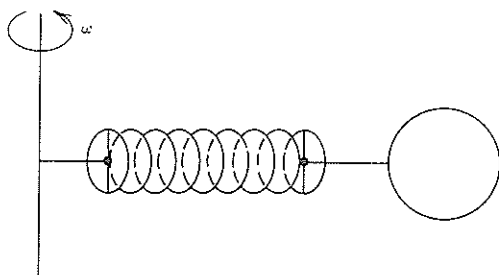
11.6 Παραδείγματα μαθηματικής φυσικής για προικισμένους μαθητές

Σημαντικό στοιχείο της διανοητικής ανάπτυξης των μαθητών που προορίζονται για φυσικοί (ή μηχανικοί) και χρησιμοποιούν ανώτερη φυσική βρίσκεται στην ικανότητά τους να εξάγουν λεπτά φυσικά συμπεράσματα από αναλυτικά αποτελέσματα. Η συγκεκριμένη ικανότητα αναπτύσσεται, επίσης, με την εξάσκηση και την πείρα. Με τα καθιερωμένα προβλήματα, ωστόσο, οι μαθητές εξασκούνται ελάχιστα σ' αυτή την κατεύθυνση. Αργότερα, σε ανώτερο επίπεδο μελέτης, η εξάσκηση εντείνεται. Είναι, ωστόσο, απολύτως σκόπιμο από την πρώτη στιγμή να δίνουμε στους προικισμένους μαθητές την ευκαιρία να εξασκούνται με τον τρόπο που προαναφέραμε. Στο επίπεδο της εισαγωγικής φυσικής είναι, βεβαίως, απαραίτητο να επικαλούμαστε απλές καταστάσεις, ώστε να είναι δυνατό να αναλυθούν με τα εννοιολογικά και μαθηματικά εργαλεία που ως εκείνη τη στιγμή διαθέτουν οι μαθητές.

Οι καταστάσεις πρέπει να έχουν αρκετά πλούσιο φαινομενολογικό περιεχόμενο και να περιλαμβάνουν μη τετριμμένα προβλήματα ερμηνείας: δεν πρέπει να είναι διαισθητικά προφανείς. Επιπλέον, η μαθηματική λύση πρέπει να αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση, για να μπορέσουν οι μαθητές να διεισδύσουν στη φυσική. Δεν είναι εύκολο να βρούμε προβλήματα μ' αυτές τις προδιαγραφές. Στη συνέχεια, παραθέτω ορισμένα αξιολογικά προβλήματα από εκείνα που έχω βρει. Πρέπει να επισημάνω ότι δεν είναι πρωτότυπα, αλλά αρκετά γνωστά. Δεν εμφανίζονται, ωστόσο, γενικά στα εγχειρίδια. Το «κλειδί» της χρησιμότητάς τους δεν βρίσκεται στα ίδια τα προβλήματα, αλλά στον τρόπο που τα παρουσιάζουμε στους μαθητές. Σε κάθε περίπτωση, η στοιχειώδης προσέγγιση είναι η εξής: αφού ο μαθητής οργανώσει τα στοιχεία του προβλήματος και προσδιορίσει την τυπική λύση του, ερμηνεύει τη λύση, εξάγοντας τη φυσική σημασία της. Κατόπιν, «παίζοντας» με πραγματικές συσκευές (όπου είναι δυνατό), συνειδητοποιεί το περιεχόμενο της αφηρημένης μαθηματικής φυσικής. Είναι απολύτως εφικτό να αντιστρέψουμε τη διαδικασία. Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, ο μαθητής δεν συνειδητοποιεί το περιεχόμενο της μαθηματικής φυσικής.

Πρόβλημα Α

Βαρίδι μάζας m προσαρμόζεται σε ελατήριο πεπερασμένου μήκους σταθεράς k . Το σύστημα περιστρέφεται και διαγράφει οριζόντιο κύκλο γω-



Σχήμα 11.6.1 Βαρίδι προσαρμοσμένο σε ελατήριο πεπερασμένου μήκους περιστρέφεται σε οριζόντιο επίπεδο. Ο άξονας περιστροφής είναι κατακόρυφος και διέρχεται από το άκρο του ελατηρίου.

νιακής ταχύτητας ω , όπως φαίνεται στο Σχ. 11.6.1. (Ο άξονας περιστροφής είναι η κατακόρυφη ευθεία που περνά από το άκρο του ελατηρίου.) Αρχικά, όταν το ελατήριο είναι απολύτως χαλαρό, η απόσταση του κέντρου του βαριδιού από τον άξονα περιστροφής είναι r_0 . Όταν το σύστημα περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω , η απόσταση είναι r . Μελετήστε τη δυναμική του συστήματος, για να προσδιορίσετε πώς μεταβάλλεται η τιμή ισορροπίας της r , αν επιβάλλουμε συγκεκριμένη ω . Ερμηνεύστε το μαθηματικό αποτέλεσμα περιγράφοντας τα φυσικά αποτελέσματα που προκύπτουν. Μην προσπαθήσετε να μελετήσετε πώς μεταβάλλεται το r με το χρόνο. Προσδιορίστε, απλώς, πώς οι τιμές του r εξαρτώνται από σταθερές τιμές του ω .

Λύση: Επειδή όταν το r έχει πάρει την τελική τιμή, το ελατήριο είναι εκτεταμένο κατά $r - r_0$, η κεντρομόλος δύναμη που ασκείται στο βαρίδι είναι: $k(r - r_0)$. Η δυναμική εξίσωση, λοιπόν, είναι:

$$k(r - r_0) = m\omega^2 r \quad (11.6.1)$$

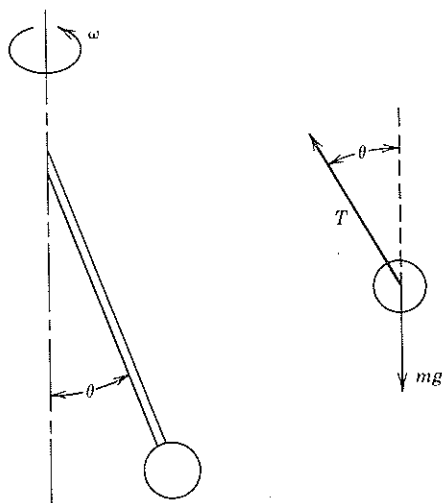
Λύνοντας την εξίσωση ως προς r , προκύπτει:

$$r = \frac{r_0}{1 - \frac{m\omega^2}{k}} \quad (11.6.2)$$

Ερμηνεία: Η Εξ. 11.6.2 δείχνει ότι αρχίζοντας από μηδενική γωνιακή ταχύτητα, καθώς αυξάνεται η ω , αυξάνεται επίσης η r , όπως αναμένουμε. Δεν αναμένουμε, ωστόσο, ότι το σύστημα «εκρήγνυται», όταν το ω πλησιάσει τη γωνιακή ταχύτητα που αντιστοιχεί στην ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσης του συστήματος μάζας-ελατηρίου.

Πρόβλημα Β

Βαρίδι μάζας m είναι στερεωμένο στο άκρο λεπτής, στερεής ράβδου



Σχήμα 11.6.2 Κωνικό εκκρεμές (βαρίδι προσαρμοσμένο σε στερεή ράβδο) στρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το πάνω άκρο της ράβδου. Όταν η γωνιακή ταχύτητα είναι σταθερή, η ράβδος σχηματίζει γωνία θ με την κατακόρυφο.

μήκους L . Η μάζα της ράβδου είναι αμελητέα συγκριτικά με τη μάζα του βαριδιού. Το βαρίδι και η ράβδος σχηματίζουν κωνικό εκκρεμές, το οποίο μπορεί να περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από κατακόρυφο άξονα που περνά από το άκρο της ράβδου (Σχ. 11.6.2). Προσδιορίστε την αναλυτική έκφραση για τη γωνία θ που σχηματίζει η ράβδος, όταν περιστρέφεται με σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Ερμηνεύστε το αποτέλεσμα σας ως προς τη φυσική συμπεριφορά του συστήματος.

Λύση: Από το διάγραμμα της δύναμης (Σχ. 11.6.2) έχουμε:

$$T \sin \theta - mg = 0 \quad (11.6.3)$$

και

$$T \eta \mu \theta = mL \eta \mu \omega^2 \quad (11.6.4)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. 11.6.3 και 11.6.4, παίρνουμε:

$$\sin \theta = \frac{g}{L \omega^2} \quad (11.6.5)$$

Ερμηνεία: Η Εξ. 11.6.5 δείχνει ότι όταν η τιμή του ω είναι μικρότερη από $\sqrt{g/L}$, το $\sin \theta$ είναι μεγαλύτερο από 1. Η θ , λοιπόν, θα είναι φανταστική και, κατά συνέπεια, χωρίς νόημα. Η λύση δείχνει ότι το εκκρεμές δεν αρχίζει να περιστρέφεται μακριά από τη μηδενική θέση του, παρά μόνον όταν η γωνιακή ταχύτητα ω ξεπεράσει τη φυσική γωνιακή ταχύτητα του εκ-

κρεμούς. Αυτή η κατάσταση παρουσιάζεται όντως, όπως μπορούμε να επιβεβαιώσουμε άμεσα στο πείραμα.

Πρόβλημα Γ

Η μορφή λεπτού λυγισμένου σύρματος περιγράφεται από την πολωνυμική συνάρτηση: $y = ax^n$, όπου το n παίρνει ακέραιες τιμές, αρχίζοντας από τη μονάδα (Σχ. 11.6.3). Μια χάντρα μάζας m γλιστρά ελεύθερα κατά μήκος του σύρματος με αμελητέα τριβή και λαμβάνει διάφορες θέσεις ισορροπίας πάνω σ' αυτό. Το σύστημα (χάντρα και σύρμα) περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ω γύρω από κατακόρυφο άξονα y . Προσδιορίστε τον αναλυτικό τύπο της συνάρτησης της συντεταγμένης x της χάντρας (όταν η χάντρα ισορροπεί) ως προς τη σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Ερμηνεύστε, επίσης, με όρους της φυσικής το αποτέλεσμά σας. Παρατηρήστε ότι για τις περιπτώσεις $n = 1$ και $n = 2$, η ερμηνεία του αποτελέσματος είναι διαφορετική. [Παρατηρήστε, επίσης, ότι επειδή το x και το y έχουν διαστάσεις μήκους, η σταθερά a έχει διαστάσεις: (μήκος) $^{-n+1}$.]

Λύση: Στο Σχ. 11.6.3, από το διάγραμμα των δυνάμεων έχουμε:

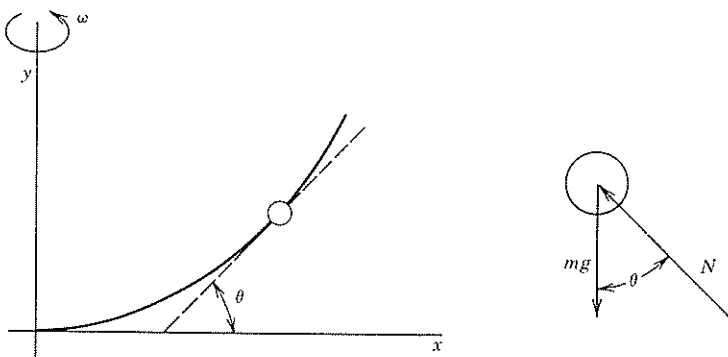
$$N \sin \theta - mg = 0 \quad (11.6.6)$$

και

$$N \eta \mu \theta = m x \omega^2 \quad (11.6.7)$$

Συνδυάζοντας τις Εξ. (11.6.6) και (11.6.7), παίρνουμε:

$$\epsilon \phi \theta = \frac{x \omega^2}{g} \quad (11.6.8)$$



Σχήμα 11.6.3 Σκληρό λυγισμένο σύρμα (με μορφή που περιγράφεται από τη συνάρτηση $y = ax^n$) στρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα. Μια χάντρα μάζας m γλιστρά χωρίς τριβή πάνω στο σύρμα. Για κάθε σταθερή τιμή της γωνιακής ταχύτητας ω , η χάντρα ισορροπεί σε διαφορετική θέση.

Λόγω της μορφής του σύρματος, έχουμε:

$$\varepsilon\varphi\theta = nx^{n-1} \quad (11.6.9)$$

Προκύπτει, λοιπόν, ότι:

$$x^{n-2} = \frac{\omega^2}{nag} \quad (11.6.10)$$

Ερμηνεία: Για τιμές του n μεγαλύτερες από το 2, η τιμή του x που αντιστοιχεί στην ισορροπία είναι σταθερή και (όπως αναμένουμε) αυξάνεται όταν αυξάνεται το ω . Για την περίπτωση του ευθύγραμμου σύρματος ($n = 1$), η θέση ισορροπίας δίνεται από τη σχέση $x = ag/\omega^2$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ισορροπία είναι ασταθής: στη μια πλευρά η χάντρα γλιστρά προς τα μέσα και στην άλλη πλευρά προς τα έξω.

Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι για $n = 2$. Σε αυτή την περίπτωση, όταν η γωνιακή ταχύτητα ισούται με $\sqrt{2ag}$, η χάντρα ισορροπεί οπουδήποτε κι αν την τοποθετήσουμε κατά μήκος του σύρματος. Η συγκεκριμένη κατάσταση αντιστοιχεί, ακριβώς, στην κατάσταση μιας περιστρεφόμενης λεκάνης νερού: όταν η γωνιακή ταχύτητα είναι σταθερή, η επιφάνεια του νερού παίρνει μόνη της κατάλληλη παραβολική μορφή και κάθε σωματίδιο νερού ισορροπεί σε ορισμένη θέση.

11.7 Το Χάος

Μια από τις βαθύτερες γνώσεις που αποκτήσαμε τα τελευταία χρόνια (και που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στις δυνατότητες των υπολογιστών) είναι η εξής: συνειδητοποιήσαμε ότι η κλασική μηχανική είναι, κατά βάθος, μη αιτιοκρατική, λόγω της πανταχού παρουσίας της μη γραμμικότητας. Η έλλειψη αιτιοκρατίας στην κλασική μηχανική είναι απολύτως διαφορετική από την αντίστοιχη ιδιότητα της κβαντικής μηχανικής. Είναι, ωστόσο, εξίσου καθολική και σημαντική ιδιότητα. Μάθαμε, λοιπόν, ότι η άποψη του Laplace είναι λανθασμένη: αν γνωρίζουμε τη θέση και την ταχύτητα κάθε σωματιδίου στο Σύμπαν, είναι αδύνατο (ακόμα κι αν πρόκειται για κλασικό νευτώνειο Σύμπαν) να προβλέψουμε την εξέλιξη του Σύμπαντος. Όταν οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές, άσχετα από το πόσο κοντά μεταξύ τους βρίσκονται οι αρχικές συνθήκες, οι λύσεις αποκλίνουν εκθετικά.

Αυτή τη γνώση θα θέλαμε να την παρουσιάσουμε στους μαθητές, ιδιαίτερα σε όσους προορίζονται για φυσικοί ή μηχανικοί. Η ευρεία διάδοση

των υπολογιστών κάνει το στόχο μας εφικτό. Η απεικόνιση των λύσεων στο χώρο των φάσεων βοηθά τους μαθητές να αντιληφθούν την έννοια του χώρου των φάσεων και τους προετοιμάζει για να εμβαθύνουν περισσότερο σ' αυτή.

Πόσο μπορούμε να προχωρήσουμε σε βαθύτερα θέματα (λόγου χάρη, στους παράξενους ελκυστές, στη «διαστατικότητα», στις κλασματικές δομές κτλ.); Η απάντηση εξαρτάται από τον διαθέσιμο χρόνο και την κρίση του καθηγητή. Νομίζω ότι, σε πρώτο επίπεδο, μπορούμε να αποβλέψουμε στην παρουσίαση του ότι οι λύσεις αποκλίνουν αναπόφευκτα και ανεξάρτητα από την «απόκλιση» των αρχικών συνθηκών.

12. ΠΩΣ ΘΑ ΠΕΤΥΧΟΥΜΕ ΕΥΡΥΤΕΡΗ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑ ΣΤΙΣ ΘΕΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ¹

12.1 Εισαγωγή

Το επίπεδο κατανόησης από το ευρύ κοινό των δεδομένων των φυσικών επιστημών (δηλαδή, η επιστημονική καλλιέργεια του κοινού) είναι παλιά ιστορία και βρίσκεται σε αξιοθρήνητη κατάσταση. Στον αιώνα μας αλλά και στον προηγούμενο, άρθρα σε περιοδικά, διδακτικά βιβλία και διακηρύξεις επιστημονικών ενώσεων επιβεβαιώνουν αυτή τη διαπίστωση. Πριν από αρκετές δεκαετίες, ορισμένοι επιστήμονες, αφού κατά τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο εργάστηκαν στη στρατιωτική έρευνα ή στις στρατιωτικές υπηρεσίες, επιστρέφοντας στην ακαδημαϊκή εργασία τους αποφάσισαν να βοηθήσουν τους μαθητές του λυκείου να αποκτήσουν καλύτερη αίσθηση της φύσης, καθώς και της δύναμης και των ορίων της επιστημονικής σκέψης. Να κατανοήσουν, επίσης, καλύτερα την αλληλεπίδραση μεταξύ της επιστήμης και της κοινωνίας. Από τότε η κλιμακούμενη επίδραση της επιστήμης και της τεχνολογίας στα ηθικά, πολιτικά και κοινωνικά ζητήματα καθιστούσε ολονέν οξύτερο το πρόβλημα της εκπαίδευσης και της παροχής γενικής μόρφωσης.

Επί χρόνια, οι συναντήσεις επιστημονικών ενώσεων αντηχούσαν και οι σελίδες περιοδικών διδακτικής γέμιζαν με περιγραφές μιας νέας, κάθε φορά, σειράς μαθημάτων που είχε σκοπό να οδηγήσει όσους δεν θα ειδικεύονταν στις θετικές επιστήμες να αποκτήσουν ευρεία επιστημονική καλλιέργεια. Παράλληλα, σχεδόν κάθε ανακοίνωση ή άρθρο σχετικά με αυτά τα μαθήματα συνοδευόταν από τις απαντήσεις των μαθητών σε ερωτηματολόγια για την αποτελεσματικότητα των μαθημάτων. Τα ερωτηματολόγια, ωστόσο, ήταν υποβολιμαία: οι απαντήσεις έδειχναν πάντοτε ότι τα μαθήματα άρεσαν στους μαθητές. Έδειχναν επίσης ότι οι μαθητές εκτιμούσαν την αξία της μορφωτικής εμπειρίας που αποκτούσαν και την προσπάθεια του διδάσκοντος. Εκτός από λίγες εξαιρέσεις, αυτές οι σειρές μαθημάτων εξα-

1. Το παρόν Κεφάλαιο βασίζεται σε ένα άρθρο που αρχικά δημοσιεύτηκε στο *Daedalus* [Arons 1983a)].

φρανίστηκαν. Σύντομα, ωστόσο, τις διαδέχτηκαν πιο «σύγχρονες» (αλλά, ουσιαστικά, ταυτόσημες και εξίσου εφήμερες) εκδοχές που συνοδεύονταν επίσης από ενθουσιώδεις μαρτυρίες μαθητών.²

Αυτές οι πολυάριθμες προσπάθειες είχαν πολύ μικρή επίδραση στην επιστημονική καλλιέργεια. Οι μαθητές που παρακολούθησαν τις σειρές μαθημάτων και απάντησαν τόσο ευνοϊκά γι' αυτές στα ερωτηματολόγια εμφανίζονταν να κατανοούν ελάχιστα ή καθόλου τα δεδομένα των θετικών επιστημών και την αλληλεπίδρασή τους με την κοινωνία. Εκ των υστέρων, οι περισσότεροι λένε ότι απολάμβαναν τα μαθήματα· δεν θυμούνται, όμως, τίποτε από εκείνα που υποτίθεται ότι είχαν μάθει. (Το συγκεκριμένο γεγονός δείχνει με ειρωνικό τρόπο ότι το καθολικό αποτέλεσμα ίσως είναι το εξής: προσπαθούμε να επινοήσουμε όλο και πιο ευχάριστες σειρές μαθημάτων, αλλά όλο και ευκολότερα οι μαθητές ξεχνούν το περιεχόμενό τους.) Η απαίτηση, ωστόσο, να γίνουν οι θετικές επιστήμες ουσιαστικό στοιχείο της γενικής μόρφωσης παραμένει — μαζί με την παρατήρηση ότι οι προηγούμενες προσπάθειες απέδωσαν ελάχιστα.

Η κύρια αιτία της αποτυχίας νομίζω πως είναι η λανθασμένη αντίληψη ότι μπορούμε να κατανοήσουμε τα δεδομένα των θετικών επιστημών παρακολουθώντας, απλώς, μια προφορική παρουσίασή τους. Η πείρα αποσαφηνίζει, συνεχώς, ότι η αποκλειστικά προφορική παρουσίαση — διαλέξεις σε μεγάλες ομάδες διανοητικά παθητικών μαθητών που μελετούν, απλώς, την ύλη των εγχειριδίων — δεν αφήνει όντως κάτι μόνιμο και ουσιαστικό στη σκέψη των μαθητών. Η εν λόγω παρουσίαση βοηθά πολύ λίγο να αποκτήσουν οι μαθητές τὰ στοιχεία που, κατά τη γνώμη μου, χαρακτηρίζουν ένα άτομο με καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες. Επειδή στο παρόν Κεφάλαιο αυτά τα χαρακτηριστικά υπεισέρχονται στους ισχυρισμούς και στις προτάσεις που διατυπώνω, είναι χρήσιμο να σταματήσουμε προς το παρόν για να απαριθμήσουμε ορισμένα.

12.2 Χαρακτηριστικά της καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες

Θεωρώ ότι ένα άτομο με κάποιο βαθμό καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες διαθέτει τις εξής ικανότητες:

1. Αναγνωρίζει ότι οι επιστημονικές έννοιες (λόγου χάρι η ταχύτητα, η επιτάχυνση, η δύναμη, η ενέργεια, το ηλεκτρικό φορτίο, η βαρυτική και η

2. Θά 'θελα να αποσαφηνίσω ότι δεν κατακρίνω τη γνώμη των μαθητών. Αντιτίθεται απλώς στην προσχηματική χρησιμοποίησή της από το επιστημονικό προσωπικό, που δεν κατόρθωσε να ελέγξει με κατάλληλο τρόπο τι έχουν μάθει οι μαθητές και τι όχι.

αδρανειακή μάζα κ.ά.) είναι επινοήσεις (δημιουργίες) της ανθρώπινης φαντασίας και ευφυΐας· δεν είναι απτά αντικείμενα ή οντότητες που ανακαλύψαμε τυχαία, όπως ένα απολίθωμα, ένα νέο φυτό ή ορυκτό.

2. Αναγνωρίζει ότι για να κατανοήσει και να χρησιμοποιήσει σωστά αυτούς τους όρους, πρέπει να τους ορίσει προσεκτικά με λειτουργικό τρόπο βασιζόμενος στην εμπειρία του και σε απλούστερους όρους που τους έχει ήδη ορίσει. Με άλλα λόγια, έχει αφομοιώσει ότι μια επιστημονική έννοια περιλαμβάνει πρώτα μια ιδέα και κατόπιν μια ονομασία, και ότι το νόημά της δεν περιέχεται στον τεχνικό όρο.

3. Κατανοεί τη διαφορά μεταξύ της παρατήρησης και της εξαγωγής συμπεράσματος. Διακρίνει, επίσης, τις δύο διαδικασίες σε οποιοδήποτε πλαίσιο.

4. Διακρίνει τη διαφορά μεταξύ του συμπτωματικού ρόλου μιας τυχαίας ανακάλυψης στην επιστημονική έρευνα και της σχεδιασμένης στρατηγικής της διατύπωσης και του ελέγχου υποθέσεων.

5. Κατανοεί το νόημα του όρου «θεωρία» στο πλαίσιο των θετικών επιστημών και έχει κάποια αίσθηση, μέσω συγκεκριμένων παραδειγμάτων, πώς οι θεωρίες διατυπώνονται, ελέγχονται, αξιολογούνται και πώς γίνονται προσωρινά αποδεκτές. Αντιλαμβάνεται δηλαδή ότι ο όρος δεν αφορά οποιαδήποτε προσωπική γνώμη, αβάσιμη άποψη ή ένα γενικώς παραδεκτό «άρθρο πίστης». Αντιλαμβάνεται, επίσης, ότι, λόγω χάρη, ο' απόψεις των γενετιστών είναι «απλώς θεωρία».

6. Διακρίνει τη διαφορά μεταξύ της αποδοχής και της κατανόησης διακηρυγμένων και αναπόδεικτων συμπερασμάτων ή προτύπων. Αντιλαμβάνεται, δηλαδή, αν όντως έχει μελετήσει, απαντήσει και κατανοήσει ερωτήσεις του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...; Πώς αποδεικνύεται ότι...;» ή αν πρέπει απλώς να πιστέψει σε κάτι.

7. Κατανοεί, επίσης, με συγκεκριμένα παραδείγματα τι σημαίνει ότι οι επιστημονικές έννοιες και οι θεωρίες δεν είναι οριστικές και αμετάβλητες, αλλά μεταβλητές και προσωρινές. Παράλληλα, αντιλαμβάνεται τον τρόπο με τον οποίο αυτές οι δομές εκλεπτύνονται και «ακονίζονται» συνεχώς, με τη διαδικασία των διαδοχικών προσεγγίσεων.

8. Κατανοεί τα όρια της επιστημονικής αναζήτησης και γνωρίζει το είδος των ερωτημάτων που δεν τίθενται ούτε απαντώνται. Γνωρίζει, επίσης, ότι τα αναπάντητα ερωτήματα επανέρχονται συνεχώς μετά την απάντηση κάποιου άλλου.

9. Αναπτύσσει τις βασικές γνώσεις σε ορισμένη περιοχή (ή περιοχές) που τον ενδιαφέρει, ώστε να μπορεί να διαβάζει προσεκτικά και να μαθαίνει νέα θέματα, χωρίς να είναι απαραίτητο να παρακολουθήσει μια τυπική διδασκαλία σχετικά μ' αυτά.

10. Γνωρίζει λίγα, τουλάχιστον, παραδείγματα όπου η επιστημονική γνώση είχε άμεση επίδραση στην ιστορία του πνεύματος και στον τρόπο

→ θεωρίων
στη Διηγου-
ργίας για
τη θεωρία
της εξέλιξης
←
σε έναν
«αποψύ-
δωτισμό»

που ο άνθρωπος βλέπει το Σύμπαν και τη θέση του μέσα σ' αυτό.

11. Γνωρίζει λίγα, τουλάχιστον, συγκεκριμένα παραδείγματα της αλληλεπίδρασης μεταξύ της επιστήμης και της κοινωνίας σε ηθικό και κοινωνιο-λογικό επίπεδο.

12. Γνωρίζει ότι υπάρχουν πολύ στενές αναλογίες μεταξύ ορισμένων τρόπων σκέψης στις φυσικές επιστήμες και σε άλλους επιστημονικούς τομείς, λόγω χάρη στην ιστορία, την οικονομία, την κοινωνιολογία και τις πολιτικές επιστήμες. Παράδειγμα τέτοιου τρόπου σκέψης είναι η διαμόρφωση εννοιών, ο έλεγχος υποθέσεων, η διάκριση μεταξύ της παρατήρησης και της εξαγωγής συμπεράσματος (δηλαδή, μεταξύ της πληροφορίας που προκύπτει από πρώτες πηγές και της ερμηνείας που βασίζεται στην πληροφορία), η δημιουργία προτύπων και η εκτέλεση υποθετικο-επαγωγικού συλλογισμού.

Σπεύδω να επισημάνω ότι ο κατάλογος δεν είναι ούτε πλήρης ούτε υποχρεωτικός. Περιέχει απλώς ορισμένα στοιχεία που χαρακτηρίζουν, κατά τη γνώμη μου, την καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες. Έχω διαπιστώσει, μάλιστα, ότι αν οι μαθητές έχουν χρόνο, κατάλληλες ευκαιρίες και θέληση να καταβάλουν πνευματική προσπάθεια, μπορούν να αφομοιώσουν αυτά τα στοιχεία. Ο αναγνώστης θα επιβάλει τις προσωπικές του πολυτιμες μεταβολές, προτιμήσεις και προτεραιότητες στον κατάλογο. Αυτές μπορεί να παρεμβληθούν και να εξεταστούν στο πλαίσιο που αναπτύσσω στα επόμενα εδάφια. Η ανάλυση που ακολουθεί αφορά την προσπάθεια που γίνεται στο γυμνάσιο, στο λύκειο και στα πανεπιστήμια για την αναβάθμιση της καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες.

12.3 Λειτουργική γνώση

Οι ερευνητές του τρόπου ανάπτυξης της αντίληψης κατατάσσουν τα είδη της γνώσης σε δύο κατηγορίες: στην απεικονιστική (figurative) ή δηλωτική (declarative) και στη λειτουργική (operational) ή διαδικαστική (procedural) [Anderson (1980), Lawson (1982)]. Δηλωτική γνώση σημαίνει: γνωρίζω «γεγονότα». Λόγου χάρη, γνωρίζω ότι το φεγγάρι λάμπει επειδή ανακλά το ηλιακό φως, ότι η Γη και οι πλανήτες κινούνται γύρω από τον Ήλιο, ότι η ύλη αποτελείται από διακριτά άτομα και μόρια, ότι τα ζώα εισπνέουν οξυγόνο και αποβάλλουν διοξείδιο του άνθρακα κτλ. Αντίθετα, λειτουργική γνώση σημαίνει: κατανοώ την *προέλευση* της δηλωτικής γνώσης. (Πώς ξέρουμε ότι η Σελήνη λάμπει επειδή ανακλά το φως του Ήλιου; Γιατί πιστεύουμε ότι η Γη και οι πλανήτες κινούνται γύρω από τον Ήλιο, αφού φαίνεται ότι τα πάντα κινούνται γύρω από τη Γη; Ποιες ενδείξεις έχουμε ότι η δομή της ύλης δεν είναι συνεχής, αλλά ασυνεχής; Τι σημαίνουν οι όροι «οξυγόνο» και «διοξείδιο του άνθρακα» και πώς διακρίνουμε τις

δύο ουσίες μεταξύ τους;) Σημαίνει, επίσης, ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, να εφαρμόσουμε, να μετασχηματίσουμε και να αναγνωρίσουμε τη σημασία της δηλωτικής γνώσης σε νέες ή ασυνήθιστες καταστάσεις.

Οι μαθητές του λυκείου, όχι λιγότερο από τους μαθητές του δημοτικού, για να αναπτύξουν τη γνήσια κατανόηση των εννοιών και των θεωριών, στην οποία στηρίζεται η λειτουργική γνώση, πρέπει να ασχοληθούν με την πνευματική δραστηριότητα εκτέλεσης επαγωγικών και αναγωγικών συλλογισμών, σε συνδυασμό με την ερμηνεία των προσωπικών παρατηρήσεών τους και εμπειριών. Οι παθητικοί ακροατές σπάνια, δυστυχώς, αναπτύσσουν τέτοια δραστηριότητα. Μπορούμε, ωστόσο, να την καλλιεργήσουμε, να την αναπτύξουμε και να την ενισχύσουμε στους περισσότερους μαθητές, υπό τον όρο ότι στηριζόμαστε στην εμπειρία των μαθητών, ότι δεν προχωρούμε πολύ γρήγορα και ότι η σκέψη του μαθητή συμμετέχει ενεργά.

Εμφανίζονται όλο και περισσότερες ενδεξιές ότι τα γυμνάσια και τα λύκεια δεν κάνουν καλή δουλειά στον τομέα της καλλιέργειας της λειτουργικής γνώσης σε κανέναν από τους καθιερωμένους επιστημονικούς κλάδους. Απ' αυτή την άποψη, οι θετικές επιστήμες δεν αποτελούν εξαίρεση, αν και οι παραλείψεις στις επιστήμες αυτές είναι περισσότερο άμεσα ορατές [Arons (1976)· Chiappetta (1976)· McKinnon και Renner (1971)]. Ιδού μερικά συγκεκριμένα παραδείγματα:

1. Σχεδόν οποιοσδήποτε (παιδί, σπουδαστής ή ενήλικος) όταν ερωτάται για την προέλευση του φωτός που έρχεται από τη Σελήνη, απαντά με τη δήλωση ότι η Σελήνη λάμπει ανακλώντας το φως του Ήλιου. Αν του ζητήσουμε, ωστόσο, να αποδείξει το συμπέρασμά του, σπάνια παίρνουμε κάποια λογική απάντηση. Η γνώση του είναι αμιγώς δηλωτική και προέρχεται από κάποια αυθεντία, χωρίς να συνοδεύεται με αποδείξεις ή να στηρίζεται κάπου. Είναι ενδιαφέρον να επισημάνουμε μια βαθιά παρανόηση σχετικά μ' αυτό το θέμα: οι περισσότεροι άνθρωποι, συμπεριλαμβανομένων των καθηγητών ανθρωπιστικών επιστημών, αν ερωτηθούν πώς εξηγούν το σκοτεινό τμήμα της Σελήνης, όταν βρίσκεται στη «γέμισή» της, απαντούν ότι το σκοτεινό τμήμα είναι η σκιά της Γης. Ελάχιστοι έχουν παρακολουθήσει πώς αλλάζουν οι φάσεις της Σελήνης και έχουν επιχειρήσει το νοητικό βήμα να εντοπίσουν την αντίστοιχη θέση του Ήλιου. Είναι, όμως, απολύτως εφικτό να οδηγήσουμε τα νεαρά παιδιά να κατανοήσουν πλήρως τι συμβαίνει και γιατί συμπεραίνουμε ότι «το σεληνόφως είναι ηλιακό φως» (βλ. Tennyson: «Locksley Hall Sixty Years After»). Αυτό, ωστόσο, σπάνια γίνεται.

2. Σε ανώτερο, πιο προχωρημένο επίπεδο, ο καθένας θα σας πει ότι η Γη και οι πλανήτες του ηλιακού συστήματος στρέφονται γύρω από τον Ήλιο. Οι περισσότεροι δεν βλέπουν το παραμικρό παράδοξο σε αυτή την άποψη: σήμερα, αντίθετα απ' ό,τι συνέβαινε στο παρελθόν, λίγοι από εμάς έχουν την ευκαιρία να κοιμηθούν στο ύπαιθρο, κάτω από τον ουρανό, και

να παρατηρήσουν την κίνηση των ουράνιων σωμάτων. Αν ζητήσουμε να αποδείξουν τον ισχυρισμό τους, η συντριπτική πλειονότητα, συμπεριλαμβανομένων αποφοίτων λυκείου, αισθάνεται έκπληξη ή αμηχανία. Λίγοι ίσως μουρμουρίζουν δυσνόητες εκφράσεις απ' ό,τι θυμούνται για την «παράλλαξη των άστρων». Ακόμα κι αυτοί, ωστόσο, δεν γνωρίζουν ότι η νευτώνεια εικόνα είχε γίνει απολύτως αποδεκτή πολύ πριν παρατηρηθεί η παράλλαξη των άστρων και ότι η συγκεκριμένη παρατήρηση ήταν μια επιβεβαίωση της γνώσης που ήδη διαθέταμε. Τα περισσότερα άτομα, λοιπόν, έχουν «μάθει» ό,τι ο Whitehead περιγράφει ως αδρανές «τελικό συμπέρασμα». Κατέχουν απλώς δηλωτική γνώση, που προήλθε από κάποια αυθεντία, και δεν έχουν κατανοήσει την πρώτη μεγάλη σύνθεση της σύγχρονης επιστήμης. Είναι ίσως λιγότερο προβληματισμένοι ακόμα και από τους «συναδέλφους» τους του Μεσαίωνα, οι οποίοι, αν και καλλιεργούσαν το γεωκεντρικό πρότυπο, δεν θεωρούσαν ότι αντιπροσωπεύει την τελική Αλήθεια, αλλά ότι απλώς «έσωζε τα προσχήματα». Αυτές οι σύγχρονες απαντήσεις, που φανερώνουν αμιγώς δηλωτική γνώση, είναι τυπικές για πολλά ζητήματα των θετικών επιστημών. Είναι προφανές πως όταν αναφερόμαστε στην «κατανόηση των δεδομένων των θετικών επιστημών», δεν εννοούμε, βεβαίως, αυτό το είδος γνώσης.

3. Παραθέτω ένα παράδειγμα από την πείρα μου με δασκάλους του δημοτικού που υπηρετούσαν ήδη σε σχολεία ή επρόκειτο να υπηρετήσουν σ' αυτά και παρακολουθούσαν προπτυχιακά μαθήματα θετικών επιστημών. (Αποδεικνύεται τελικά ότι, από την άποψη της κατανόησης της διδασκόμενης ύλης, οι δύο ομάδες δεν διακρίνονται μεταξύ τους.) Κάπου, στα γενικά μαθήματα θετικών επιστημών στο σχολείο ή υπό άλλες συνθήκες, ο καθένας τους είχε παρακολουθήσει παρουσιάσεις σχετικά με «ηλεκτρικά κυκλώματα», είχε δει διαγράμματα στα βιβλία ή στον πίνακα και είχε ακούσει διακηρύξεις για τα φαινόμενα και τις έννοιες που σχετίζονται με το ηλεκτρικό ρεύμα. Ωστόσο, όταν τους έδινα ένα ξηρό στοιχείο, ένα κομμάτι σύρμα και ένα λαμπάκι και τους ζητούσα να ανάψουν το λαμπάκι, σχεδόν πάντοτε ενεργούσαν ως εξής: κρατούσαν το ένα άκρο του σύρματος σε επαφή με το ένα άκρο της μπαταρίας και ακουμπούσαν το άλλο άκρο του σύρματος στη βάση της λάμπας ή συνέδεαν το σύρμα μεταξύ των άκρων της μπαταρίας (βραχυκυκλώνοντας την μπαταρία) και ακουμπούσαν το λαμπάκι στο ένα άκρο της μπαταρίας. Δεν αντιλαμβάνονταν ότι τόσο η μπαταρία όσο και το σύρμα είχαν δύο καταλήξεις. Λίγοι επίσης παρατηρούσαν πως όταν συνέδεαν το σύρμα μεταξύ των άκρων της μπαταρίας, το σύρμα θερμαινόταν, και ακόμα λιγότεροι έβγαζαν κάποιο συμπέρασμα από τούτο το φαινόμενο. Μόνον ύστερα από 20 έως 30 λεπτά, κάποιος μέσα στην τάξη ανακάλυπτε με τη μέθοδο της δοκιμής και του λάθους μια συνδεσμολογία με την οποία το λαμπάκι ανάβει. (Παιδιά επτά ετών, όταν αντιμετωπίζουν παρόμοια κατάσταση, εκτελούν ακριβώς τα ίδια βήματα και, ύστερα από

20 έως 30 λεπτά, κάποιο απ' αυτά ανάβει το λαμπάκι.) Οι μετεκπαιδευόμενοι δάσκαλοι, επειδή στο λύκειο ουδέποτε συνέδεσαν την έννοια του «ηλεκτρικού κυκλώματος» με απτή εμπειρία (αν και «γνωρίζουν» τους όρους, τις διακηρύξεις και τις περιγραφές που έχουν προσλάβει ως παθητικοί ακροατές), δεν έχουν κατανοήσει τις ιδέες περισσότερο απ' ό,τι ένα παιδί επτά χρόνων που για πρώτη φορά προσεγγίζει το θέμα. Η αμιγώς προφορική διδασκαλία δεν αφήνει κανένα ίχνος ουσιαστικής γνώσης ή κατανόησης. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των περισσότερων σύγχρονων τρόπων διδασκαλίας των θετικών επιστημών.

12.4 Μαθήματα θετικών επιστημών γενικής μόρφωσης

Τα περισσότερα μαθήματα του λυκείου που σκοπεύουν να καλλιεργήσουν γενικές γνώσεις θετικών επιστημών σε μαθητές που δεν θα ασχοληθούν μ' αυτές τις επιστήμες κατατάσσονται, συνήθως, σε δύο κύριες κατηγορίες: α) σειρές μαθημάτων που σε ένα τρίμηνο, σε ένα εξάμηνο ή ακόμα και σε ένα χρόνο προσπαθούν να δώσουν στους μαθητές μια ιδέα των σημαντικότερων επιτευγμάτων των θετικών επιστημών (λόγου χάρη, στη φυσική, προσπαθούν να παρουσιάσουν καθετί από τον Γαλιλαίο και τον Νεύτωνα, από τη θερμοδυναμική, τη σχετικότητα, την κβαντική μηχανική και τη σύγχρονη φυσική των σωματιδίων)· β) σειρές μαθημάτων που εστιάζονται σε ορισμένο θέμα μικρότερου εύρους, λόγου χάρη στην ενεργειακή κρίση, στην καταστροφή του περιβάλλοντος, στις στρατιωτικές εφαρμογές της επιστήμης, σε ηθικά ζητήματα που βρίσκονται πίσω από τη σύγχρονη πρόοδο της μοριακής βιολογίας, σε φιλοσοφικά ζητήματα που θέτει η σχετικότητα και η κβαντική μηχανική κτλ.)

Σειρές μαθημάτων της πρώτης κατηγορίας επινοήθηκαν αμέτρητες φορές. Η μορφή τους είναι, ουσιαστικά, η ίδια από τότε που, στο πλαίσιο ενός προγράμματος γενικής μόρφωσης, επιχειρούσαμε να απευθυνθούμε σε μαθητές που δεν επρόκειτο να ασχοληθούν με θετικές επιστήμες. Κάθε φορά, φιλοδοξούσαμε τα μαθήματα να έχουν ουσιαστικό περιεχόμενο και να μην είναι απλώς «ανασκόπηση». Όμως, παρά τον ενθουσιασμό με τον οποίο τις υποδέχονταν οι μαθητές, οι εν λόγω σειρές είχαν τόσο σύντομο «χρόνο ημιζωής» και τόσο μικρή επίδραση στις γενιές των μαθητών που «υποβλήθηκαν» σ' αυτές, ώστε είναι απαραίτητο να επινοήσουμε νέες, για να καλύψουμε το κενό που παραμένει. Νέοι επιστήμονες, απολύτως ακατατόπιστοι για την υπάρχουσα εμπειρία, νομίζουν ότι το κενό οφείλεται στο ότι δεν έχει γίνει καμιά προσπάθεια αυτού του είδους. Θεωρούν, λοιπόν, ότι η λύση βρίσκεται στο να παρουσιάσουν τα θέματα με τον δικό τους, ιδιαίτερα ενθουσιώδη και απολύτως διαυγή τρόπο. Η αλήθεια είναι ότι το κενό παραμένει επειδή, από εκπαιδευτική άποψη, ο συγκεκριμένος τρόπος δεν εί-

χε καμιά ελπίδα να πετύχει· κι όμως, οι οπαδοί του συνεχίζουν να υποστηρίζουν ότι δίνει στους μαθητές κάποια «αίσθηση» του περιεχομένου των θετικών επιστημών και της φύσης της σύγχρονης επιστημονικής σκέψης. Υποστηρίζουν επίσης ότι πλέον οι μαθητές «γνωρίζουν» ορισμένα στοιχεία για τη σύγχρονη πρόοδο των θετικών επιστημών. Εν τω μεταξύ, πολλαπλασιάζονται οι διαμαρτυρίες για την έλλειψη καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες.

Οι εν λόγω προσπάθειες «σκοντάφτουν» — και οι νεότερες εκδοχές θα συνεχίσουν να «σκοντάφουν» — επειδή, πρώτον, υποβάλλουν μόνιμα τους μαθητές σε καταιγισμό ακατανόητων τεχνικών όρων που δεν στηρίζονται στην εμπειρία του μαθητή, και δεύτερον, επειδή η ύλη «σερβίρεται» στους μαθητές πολύ γρήγορα και σε πολύ μεγάλη ποσότητα· έτσι, οι μαθητές δεν προλαβαίνουν να κατανοήσουν τις ιδέες και τις έννοιες ούτε να παρακολουθήσουν πώς δημιουργούνται οι θεωρίες και να τις αφομοιώσουν. Λόγω του ρυθμού διδασκαλίας είναι δύσκολο, αν όχι αδύνατο, να αναπτύξουν κάποια αίσθηση του πώς γεννιούνται οι έννοιες και οι θεωρίες, πώς αξιολογούνται και πώς γίνονται αποδεκτές, πώς συνδέονται με την πραγματικότητα και πώς αποκαλύπτεται η σχέση μεταξύ φαινομενικά διαφορετικών γεγονότων. Ο ρυθμός διδασκαλίας και ο όγκος της ύλης αποκλείουν κάθε στοχασμό για το σκοπό και τα όρια της επιστημονικής γνώσης ή για την επίδρασή της στην πνευματική κληρονομιά μας και για το πώς ο άνθρωπος βλέπει τη θέση του μέσα στο Σύμπαν. Τα μαθήματα με τον «καταιγισμό των λέξεων» δεν έλυσαν ούτε θα λύσουν το εκπαιδευτικό πρόβλημα, όσο κι αν τα εγχειρίδια είναι πλούσια εικονογραφημένα και άφθονα «αλατισμένα» με υπαινιγμούς για τη μόλυνση, για την ηθική, για την ενεργειακή κρίση, για τις μαύρες τρύπες και για τον Κάφακ!

Οι σειρές μαθημάτων της δεύτερης κατηγορίας, αν και υποτίθεται ότι έχουν πιο περιορισμένο στόχο, «υποφέρουν» κι αυτές από συγγενή προβλήματα. Νομίζω ότι οι μαθητές που κατανόησαν πραγματικά τις επιστημονικές έννοιες, τις θεωρίες και τις ιδέες που περιέχονται στο σημαντικό μεν, αλλά περιορισμένο, θέμα που μελέτησαν, δεν πρέπει, από την άποψη της επιστημονικής αρτιότητας, να ενθαρρύνονται σε επιπόλαιο διάλογο για θέματα που δεν κατανοούν. Με μαθητές που κατέχουν ήδη το απαιτούμενο εννοιολογικό υπόβαθρο, μπορούμε, βεβαίως, να διαλεχθούμε άμεσα. Με μαθητές, ωστόσο, που δεν έχουν ιδέα τι σημαίνει ο όρος «ενέργεια» (πολλοί τη θεωρούν υλική ουσία!) και δεν έχουν κατανοήσει τους περιορισμούς που μας θέτουν οι νόμοι της θερμοδυναμικής, με μαθητές που η γνώση τους για την ασυνέχεια της δομής της ύλης δεν στηρίζεται πουθενά (γνωρίζουν, απλώς, «συρμούς» όρων, λόγου χάρη «άτομο», «μόριο», «πυρήνας», «ηλεκτρόνιο» κτλ. που «εκτοξεύθηκαν» πάνω τους μέσα από διακηρύξεις, χωρίς να τους δοθεί η ευκαιρία να εξετάσουν τα εμπειρικά δεδομένα και τους συλλογισμούς στα οποία στηρίζονται οι όροι), με μαθητές που δεν έχουν

ιδέα τι σημαίνει (και τι δεν σημαίνει) ο όρος «ηλεκτρικό φορτίο», με μαθητές που δεν γνωρίζουν πού βασιζόμαστε για να δεχτούμε την πρόταση ότι η Γη και οι πλανήτες στρέφονται γύρω από τον Ήλιο και με μαθητές που έχουν ακόμα αριστοτελικές τελεολογικές απόψεις και αγνοούν (όπως αγνοούσε και ο Αριστοτέλης) το νόμο της αδράνειας, μ' αυτούς τους μαθητές, λοιπόν, είναι απατηλό και ανέντιμο να προχωρήσουμε μια συζήτηση χωρίς, προηγουμένως, να τους βοηθήσουμε να σχηματίσουν στο μυαλό τους και να κατανοήσουν τις ουσιώδεις προαπαιτούμενες έννοιες. Πραγματικά, από τη στιγμή που οι μαθητές αντιληφθούν τι σημαίνει επιστημονική αριότητα και τι πρέπει να έχουν κατανοήσει, για να μπορούν να μιλούν με ουσιώδη και κατανοητό τρόπο για το πρόβλημα που αρχικά τους είχε δοθεί, ελάχιστοι αρνούνται την παρέκκλιση που είναι απαραίτητη για να κατανοήσουν τα προαπαιτούμενα θέματα.

Η αναδρομή, ωστόσο, σε επιστημονικά θέματα που απαραίτητα πρέπει να έχουν κατανοήσει οι μαθητές, μειώνει δραστικά στην έκταση της ύλης που καλύπτεται τελικά. Απ' ό,τι γνωρίζω, λοιπόν, ελάχιστες σειρές μαθημάτων κάνουν αυτή τη θυσία. Αποτέλεσμα: οι μαθητές τελειώνοντας, δεν κατανοούν πολύ περισσότερο τις επιστημονικές έννοιες ή τη φύση και τα όρια της επιστημονικής σκέψης απ' ό,τι τα «θύματα» της σειράς μαθημάτων της πρώτης κατηγορίας.

Ποια είναι η εναλλακτική λύση; Είναι ουσιαστικό, νομίζω, να «χαλαρώσουμε», να μειώσουμε το ρυθμό, να καλύψουμε λιγότερη ύλη και να δώσουμε την ευκαιρία στους μαθητές να παρακολουθήσουν και να αφομοιώσουν την ανάπτυξη μικρού αριθμού επιστημονικών ιδεών. Ο όγκος τους και ο ρυθμός παρουσιάσής τους πρέπει να είναι τόσα ώστε η γνώση να είναι μάλλον λειτουργική παρά δηλωτική. Ανάλογα με τον διαθέσιμο χρόνο, λοιπόν, μπορούμε να κατευθύνουμε τους μαθητές σε ένα ή περισσότερα από τα επόμενα ζητήματα:

1. Γιατί πιστεύουμε ότι η Γη και οι πλανήτες στρέφονται γύρω από τον Ήλιο; Στο πλαίσιο ποιων εννοιών και ποιας θεωρίας πιστεύουμε ότι αυτή η εικόνα είναι σωστή;

2. Γιατί πιστεύουμε ότι η δομή της ύλης δεν είναι συνεχής, αλλά ασυνεχής; Ποιες αποδείξεις διαθέτουμε για την ύπαρξη των ατόμων και των μορίων;

3. Τι εννοούμε με τον όρο «ηλεκτρικό φορτίο»; Πώς προκύπτει αυτή η έννοια; Το «φορτίο» είναι είδος ουσίας; Τι σημαίνει ότι δύο φορτία είναι «όμοια»; Με ποια έννοια χρησιμοποιούμε τον όρο «όμοιος» στη συγκεκριμένη περίπτωση; Πού βασίζουμε την άποψη ότι υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου; Ποιο (υποθετικό) γεγονός θα μας ανάγκαζε να συμπεράνουμε ότι ανακαλύψαμε τρίτο είδος; Ποιες αποδείξεις διαθέτουμε ότι το ηλεκτρικό φορτίο παίζει βασικό ρόλο στη δομή της ύλης;

4. Γιατί πιστεύουμε ότι σε υποατομική κλίμακα τα άτομα έχουν ασυνεχή δομή; Ποιες ενδείξεις έχουμε γι' αυτό; (Οι από καθέδρας διακηρύξεις όρων, λόγου χάρη «ηλεκτρόνιο» και «πυρήνας», δεν αποδεικνύουν τον ισχυρισμό· καλλιεργούν, απλώς, τη δηλωτική γνώση. Και όμως, η «επιστήμη» διδάσκεται ακόμα μ' αυτόν τον τρόπο.) Ποια πειράματα και παρατηρήσεις οδήγησαν (και ενθάρρυναν) στη δημιουργία της έννοιας του «ηλεκτρονίου»; Ποιες αποδείξεις διαθέτουμε ότι αυτή η οντότητα είναι καθολικό συστατικό της ύλης; Ποιες αποδείξεις διαθέτουμε ότι πρόκειται για υποατομική οντότητα; Τι ρόλο παίζει το ηλεκτρόνιο στη δομή του ατόμου;

5. Αφού μπορούμε να πάρουμε θερμική ενέργεια από την ατμόσφαιρα ή τους ωκεανούς, χωρίς να παραβιάσουμε την αρχή διατήρησης της ενέργειας, γιατί δεν μπορούμε να λύσουμε το ενεργειακό πρόβλημα, χρησιμοποιώντας την ατμόσφαιρα ή τους ωκεανούς ως ενεργειακές πηγές;

6. Με ποιον τρόπο η ειδική θεωρία της σχετικότητας του Αϊνστάιν μετέβαλε τις θεμελιώδεις αντιλήψεις μας για το χώρο και το χρόνο;

Με οποιοδήποτε από τα ζητήματα μπορούμε να ασχοληθούμε με συνέπεια, περιορίζοντας την έκταση του θέματος. Έτσι, μπορούμε να το χρησιμοποιήσουμε για να αναπτύξουμε και να ενισχύσουμε τα χαρακτηριστικά της καλλιεργείας στις θετικές επιστήμες, τα οποία προσδιορίσαμε στο εδάφιο 12.2.

Για αντιπαραβολή, θεωρώ ότι προσπάθειες όπως οι επόμενες είναι, στην καλύτερη περίπτωση, άχρηστες και, στη χειρότερη, καταστροφικές: δεν υπάρχει αρκετός χρόνος για να εξετάσουμε ερωτήματα του είδους «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;» ή το απαιτούμενο υπόβαθρο είναι πολύ προχωρημένο.

1. Παρουσιάζουμε στους μαθητές τα «συναρπαστικά» σωματίδια της φυσικής υψηλών ενεργειών (χρησιμοποιώντας ακατανόητη ορολογία, που περιλαμβάνει τους όρους αλληλεπίδραση, στροφορμή, εξίσωση μάζας-ενέργειας, κβαντικές μεταβάσεις, κουάρκ, γκλούον, χρώμα, παραδοξότητα, αρχή απροσδιοριστίας κ.ά.). Οι μαθητές, ωστόσο, έχουν ανεπαρκώς κατανόηση τις έννοιες ταχύτητα, επιτάχυνση, δύναμη, μάζα, ενέργεια, ηλεκτρικό φορτίο κ.ά. και ακόμα λιγότερο τις αποδείξεις που διαθέτουμε για τη δομή της ύλης σε κλίμακα που υπερβαίνει την άμεσα αισθητή αντίληψή μας.

2. Μαθητές που ο τρόπος σκέψης τους είναι ακόμα αριστοτελικός και, ουσιαστικά, δεν κατανοούν το νόμο της αδράνειας, παρακολουθούν σειρές μαθημάτων μετεωρολογίας ή ωκεανογραφίας, όπου ακούνε ακατανόητες διακηρύξεις για τη δύναμη Coriolis.

3. Μαθητές που δεν έχουν ιδέα πώς σε έναν τόπο ορίζεται το μεσημέρι ή η διεύθυνση βορρά-νότου, που δεν έχουν ιδέα για την αιτία των διαφο-

ρων εποχών ή των φάσεων της Σελήνης (και πιστεύουν ότι το σκοτεινό τμήμα της ημισελήνου δημιουργείται από τη σκιά της Γης), που δεν γνωρίζουν ότι τα άστρα έχουν ημερήσια κίνηση, και δεν καταλαβαίνουν γιατί πιστεύουμε ότι η Γη και οι πλανήτες στρέφονται γύρω από τον Ήλιο, αυτοί οι μαθητές παρακολουθούν σειρές μαθημάτων γενικών γνώσεων αστρονομίας και ακούνε για την αστρική νουκλεοσύνθεση, για τα πάσσαρ, τα κβάζαρ και τις μαύρες τρύπες.

4. Οι μαθητές που δεν γνωρίζουν πώς ορίζονται και προσδιορίζονται οι ουσίες και δεν έχουν ιδέα τι εννοούμε, από λειτουργική άποψη, με τους όρους «οξυγόνο», «άζωτο» ή «άνθρακας», που δεν καταλαβαίνουν γιατί πιστεύουμε στην ασυνέχεια της δομής της ύλης και δεν έχουν ιδέα τι εννοούμε με τον όρο «ηλεκτρικό φορτίο» ή «διαφορά δυναμικού», αυτοί οι μαθητές παρακολουθούν διαλέξεις για το DNA, για τη μοριακή βιολογία, για τη δομή των γονιδίων ή για τη λειτουργία του νεύρου και του μυός.

Ο καταιγισμός ακατανόητων όρων δεν αναπτύσσει την καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες· περιπλέκει, απλώς, το πρόβλημα που προσπαθούμε να λύσουμε.

12.5 Ανάλυση του τρόπου σκέψης των θετικών επιστημόνων

Όταν εξετάζουμε ιδέες όπως εκείνες που προτείναμε στο προηγούμενο εδάφιο — με ρυθμό που επιτρέπει να διαμορφωθούν και να κατανοηθούν οι βαθύτερες έννοιες, αλλά και να μελετηθούν ερωτήματα του είδους «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;» —, δεν παρουσιάζεται τεχνικά μέσα από διακηρύξεις ο χαρακτήρας και τα όρια της σκέψης στις θετικές επιστήμες, αλλά αναδεικνύεται φυσιολογικά και εκτενώς.

Όταν, στις «Δύο Νέες Επιστήμες», ο Γαλιλαίος αντιμετωπίζει το πρόβλημα που αφορά την περιγραφή της μεταβολής της ταχύτητας ενός κινούμενου σώματος (δηλαδή, την περιγραφή της επιτάχυνσης), επισημαίνει ότι υπάρχουν τουλάχιστον δύο εναλλακτικές λύσεις: 1) Παρατηρούμε πως όταν το αντικείμενο διανύει μια απόσταση ορισμένων κούμπιτ*, η ταχύτητά του μεταβάλλεται από μια τιμή σε άλλη για την περιγραφή της κίνησης, λοιπόν, μπορούμε να διαλέξουμε ένα μέγεθος που να δείχνει πόσο μεταβάλλεται η ταχύτητα σε κάθε διανυόμενο κούμπιτ. 2) Η ίδια μεταβολή ταχύτητας αντιστοιχεί, βεβαίως, και σε ορισμένο χρονικό διάστημα: μπορούμε, λοιπόν, να περιγράψουμε την ίδια διαδικασία με ένα μέγεθος που να δείχνει πόσο μεταβάλλεται η ταχύτητα σε κάθε δευτερόλεπτο. Ποια περι-

* Παλαιά μονάδα μήκους ίση περίπου με μισό μέτρο. (Σ.τ.μ.)

γγραφή πρέπει να υιοθετήσουμε; Η επιλογή δεν είναι προφανής.

Ο Γαλιλαίος διαλέγει το δεύτερο μέγεθος: τη μεταβολή της ταχύτητας ανά μονάδα χρόνου. Σκοπεύει να περιγράψει μια «φυσιολογικά επιταχυνόμενη» κίνηση (την ελεύθερη πτώση) και αντιλαμβάνεται διαισθητικά ότι, χρησιμοποιώντας τη μεταβολή της ταχύτητας ανά μονάδα χρόνου, η ελεύθερη πτώση είναι *ομαλά* επιταχυνόμενη κίνηση· ενώ, χρησιμοποιώντας τη μεταβολή της ταχύτητας ανά μονάδα μήκους, αυτό δεν συμβαίνει. Στηριζόμενος σε μια υπόθεση, δηλαδή σε μια διαισθητική πρόβλεψη, επιλέγει την έννοια που οδηγεί στην απλούστερη και κομψότερη περιγραφή της ελεύθερης πτώσης. Κατόπιν, προχωρά στον έλεγχο της υπόθεσής του, προσδιορίζοντας ορισμένες ελέγξιμες πειραματικά συνέπειές της.

Σε αυτή τη διαδικασία, εμφανίζονται με διαύγεια αρκετές από τις σημαντικές όψεις ενός επιστημονικού εγχειρίματος: 1) ο ρόλος του επαγωγικού και αναγωγικού συλλογισμού· 2) το ότι οι επιστημονικές έννοιες είναι δημιουργίες της ελεύθερης δράσης της ανθρώπινης ευφυΐας και φαντασίας· δεν είναι «αντικείμενα» που τα ανακαλύψαμε τυχαία· 3) το ότι ορισμένες φορές είναι απαραίτητο να υιοθετήσουμε, και σε αυτή την περίπτωση ίσως χρειάζεται να τα λάβουμε υπόψη μας, αισθητικά κριτήρια, λόγου χάρη την κομψότητα και την απλότητα.

Εμφανίζεται, επίσης, η επαναστατική ιδέα της διαμόρφωσης μιας *a priori* υπόθεσης και του πειραματικού ελέγχου των προβλέψεων που βασίζονται σ' αυτή και προκύπτουν με μαθηματικό τρόπο. Οι Έλληνες χρησιμοποιούσαν όντως την παρατήρηση και το πείραμα (λόγου χάρη, επικαλέστηκαν την αντίσταση που παρουσιάζει μια φουσκωμένη κύστη ξύου ως πειραματική απόδειξη της υλικότητας του αέρα). Δεν έλεγχαν, όμως, αν τα πρότυπα και οι υποθέσεις τους εξηγούν τα φυσικά φαινόμενα.

Περιγράψω αυτή τη γνωστή ιστορία όχι για να διεκδικήσω την τιμή μιας νέας, βαθιάς μελέτης στη φιλοσοφία ή στην ιστορία των επιστημών, αλλά για να επισημάνω ένα σύνολο κρίσιμων ιδεών, τις οποίες μαθητές με λίγες γνώσεις στις θετικές επιστήμες μπορούν να τις κατανοήσουν και να εκτιμήσουν. Αν και αυτές οι ιδέες βρίσκονται «λίγο πιο κάτω από την επιφάνεια» ενός εισαγωγικού μαθήματος φυσικών επιστημών, σπάνια οι μαθητές έχουν το χρόνο και την ευκαιρία να τις ανακαλύψουν, να τις περιγράψουν και να τις «γευτούν». Για να πραγματοποιηθεί αυτό, πρέπει να έχουν την ευκαιρία να «τραβηχτούν πίσω» και να εξετάσουν τι συμβαίνει, δηλαδή, να «ξαναζήσουν» κάπως την πνευματική εμπειρία (την επιτυχία της προσπάθειας, αλλά και τις αμφισβητήσεις της), να αναλύσουν και να αξιολογήσουν τη διαδικασία συλλογισμού που υπεισέρχεται σ' αυτή, να αναγνωρίσουν τα στοιχεία της λογικής της, τη δύναμή της και τα όριά της (δηλαδή, να αντιληφθούν ποια ερωτήματα δεν τίθενται και ποια ερωτήματα δεν απαντώνται).

Λίγα, ωστόσο, εγχειρίδια και σειρές μαθημάτων προσφέρουν αυτή την

ευκαιρία στους μαθητές. Συνήθως, σε δύο-τρεις κρυπτογραφημένες σελίδες τους «πετούν» τους καθιερωμένους ορισμούς της ταχύτητας και της επιτάχυνσης (θυμηθείτε πόσο δυσκολεύονται οι μαθητές να αντιληφθούν, για πρώτη φορά, σαφώς και σωστά αυτές τις έννοιες [Trowbridge και McDermott (1980), (1981)]). Οι έννοιες παρουσιάζονται ως αναπόφευκτες και «τόσο παλιές όσο τα βουνά». Παράλληλα, αποδίδουν «σεβασμό» στα ιστορικά γεγονότα, μνημονεύοντας, απλώς, το όνομα του Γαλιλαίου και λίγα μη ουσιώδη κλισέ που αφορούν την επινόηση από τον Γαλιλαίο της «πειραματικής μεθόδου» και το ότι η «σύγχρονη επιστήμη» κατάγεται απ' αυτόν.

Οι μαθητές, μελετώντας τη μέθοδο, τη διαδικασία, τις επιτυχίες και τους περιορισμούς των θετικών επιστημών, μπορούν όντως να αποκτήσουν πνευματική ωριμότητα και να εξασκήσουν την ευφυΐα τους. Αυτά τα στοιχεία, ωστόσο, δεν εμφανίζονται αυτόματα με το να ασκούνται οι μαθητές στον υπολογισμό του ύψους στον οποίο φτάνει μια πέτρα, αν τη ρίξουμε κατακόρυφα, ή στον υπολογισμό της απόκλισης μιας δέσμης ηλεκτρονίων, μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ των πλακών ενός πυκνωτή· αναπτύσσονται, αν συνδέσουμε την κατανόηση του θέματος με τη βαθιά γνώση που αποκτάμε όταν «τραβιόμαστε πίσω» και εξετάζουμε όχι μόνο τα τελικά συμπεράσματα, αλλά και ερωτήματα του είδους «Πώς γνωρίζουμε ότι...;» «Πώς αποδεικνύεται ότι...;» (Βλ. εδάφιο 13.2, για την κριτική σκέψη.)

Σχεδόν σε κάθε βήμα, εμφανίζονται ευκαιρίες για να αναλύσουμε τις θετικές επιστήμες ως φαινόμενο του πολιτισμού. Είναι περιττό, λοιπόν, να επικαλούμαστε απόκρυφες πτυχές των σύγχρονων επιστημών, που οι μαθητές δεν μπορούν ακόμα να τις κατανοήσουν εξαιτίας του επιπέδου σχηματισμού των εννοιών στο οποίο βρίσκεται η σκέψη τους και του βαθμού που έχουν αφομοιώσει την ύλη. Ιδού λίγα συμπληρωματικά παραδείγματα.

Λόγω του γρήγορου ρυθμού και του αποφθεγματικού τρόπου με τον οποίο οι επιστημονικές έννοιες «σπρώχνονται» προς τους μαθητές στα μαθήματα του γυμνασίου αλλά και του λυκείου, είναι ευνόητο ότι οι μαθητές θεωρούν, τελικά, ότι οι επιστημονικοί όροι είναι στέρεες και αμετάβλητες οντότητες με μία και μοναδική σημασία (την οποία από την πρώτη στιγμή γνώριζαν εκείνοι που επινόησαν τους όρους) και ότι πρέπει να τις «καταπιούν μονορούφι». Σε πολλούς μαθητές μοιάζει με μυστηριώδη ανακάλυψη, όταν μαθαίνουν ότι οι επιστημονικοί όροι εξελίσσονται μέσω του επαναορισμού τους, της «λείανσής» τους και της εκλέπτυνσής τους· ότι, δηλαδή, αρχίζουμε από ένα ασαφές, πρωταρχικό, διαισθητικό επίπεδο ορισμού μιας έννοιας και, επωφελούμενοι από τη γνώση που αποκτάμε με τις διαδοχικές εφαρμογές της, την εκλεπτύνουμε συνεχώς.

Λόγου χάρη, η έννοια της δύναμης εισάγεται νόμιμα σε σύνδεση με την «πρωτόγονη», ανθρωπομορφική, διαισθητική, μυϊκή αίσθηση της ώθησης ή της έλξης. Στο πλαίσιο, ωστόσο, του νόμου της αδράνειας, την επαναορί-

ζουμε, για να μπορούμε να την εφαρμόσουμε σε *κάθε* αλληλεπίδραση που προσδίδει επιτάχυνση σε ένα υλικό αντικείμενο [λόγου χάρι, στη δράση μιας γυάλινης ράβδου (που την έχουμε τρώει με μεταξένιο ύφασμα) πάνω σε χαρτάκια, στη δράση του τραπέζιου που ασκεί δύναμη προς τα πάνω σε ένα βιβλίο ακουμπισμένο σ' αυτό, στη δράση της Γης που ασκεί σ' εμάς δύναμη προς τα κάτω — το «βάρος» μας — και στη δράση του εδάφους που ασκεί στα πόδια μας δύναμη προς τα πάνω]. Κατόπιν, δεχόμαστε την άποψη του Νεύτωνα και επεκτείνουμε την έννοια ακόμα περισσότερο. Επινόούμε την ιδέα πως όταν το τραπέζι ασκεί στο βιβλίο δύναμη προς τα πάνω, ταυτόχρονα το βιβλίο ασκεί στο τραπέζι δύναμη προς τα κάτω. Επινόούμε, επίσης, την πιο εκλεπτυσμένη ιδέα πως όταν η Γη ασκεί σ' εμάς βαρυτική δύναμη προς τα κάτω, εμείς, επίσης, ασκούμε στη Γη μια αντίθετη βαρυτική δύναμη. Αυτή τη φορά έχουμε απομακρυνθεί αρκετά από το σημείο όπου, αρχικά, χρησιμοποιούσαμε τον «όρο» δύναμη σε σύνδεση με την ανθρωπίνη, μυϊκή αίσθηση της ώθησης ή της έλξης ενός αντικειμένου. Επειδή, μάλιστα, η έννοια είναι όντως πολύ λεπτή, ακόμα και οι πολύ ικανοί μαθητές δυσκολεύονται σημαντικά να την αφομοιώσουν στο σύντομο χρονικό διάστημα που διατίθεται για την παρουσίασή της σε μια εισαγωγική σειρά μαθημάτων. Ταυτόχρονα, οι λιγότερο ικανοί μαθητές δεν την αφομοιώνουν καθόλου (βλ. συζήτηση αυτού του θέματος στο 3ο Κεφάλαιο).

Ομοίως, αρχίζουμε με τη γενική ιδέα ότι η «ταχύτητα» είναι μέτρο του πόσο γρήγορα (κατά μέσο όρο σε ένα σημαντικό χρονικό διάστημα) ένα αντικείμενο ταξιδεύει κατά μήκος μιας ευθείας. Κατόπιν, εισάγοντας θετικό και αρνητικό πρόσημο, της αποδίδουμε ορισμένη κατεύθυνση. Στη συνέχεια, εκλεπτύνουμε την πρωταρχική αντίληψή μας, εισάγοντας την έννοια της «στιγμιαίας ταχύτητας» (την οποία ακόμα και οι ικανότατοι Έλληνες δεν κατόρθωσαν να επινοήσουν). Κατόπιν, επεκτείνουμε περισσότερο την έννοια, για να μπορέσουμε να καλύψουμε δισδιάστατες και τρισδιάστατες κινήσεις. Τέλος, αναφερόμαστε στο ρυθμό μεταβολής του μέτρου αλλά και της κατεύθυνσης αυτού του μεγέθους.

Σε κάθε στάδιο εξέλιξης και επαναορισμού, ο αρχικός όρος (λόγου χάρι, η «δύναμη» ή η «ταχύτητα») — επειδή το νόημά του έχει αλλάξει σημαντικά και ριζικά — δεν αντιστοιχεί, πλέον, απλώς στη διαισθητική ιδέα στην οποία αρχικά στηριχθήκαμε· αντιστοιχεί σε μια νέα και πιο εκλεπτυσμένη ιδέα. (Για να κυριολεκτήσουμε, αν θέλουμε να υπογραμμίσουμε αυτή την αλλαγή, πρέπει να επινοήσουμε νέο όρο· αυτό, ωστόσο, θα αύξανε απλώς το γλωσσικό χάος.) Αν οι μαθητές έχουν κάποια επίγνωση της διαδικασίας του ορισμού και του επαναορισμού των όρων, ενισχύεται σημαντικά η αυτοπεποίθησή τους στο ότι έχουν όντως συλλάβει το νέο τρόπο σκέψης. Προετοιμάζονται, επίσης, για παρόμοια «ολίσθηση» και επέκταση του νοήματος των εννοιών που θα συμβεί σε επόμενες «γενιές» εννοιών, λόγου χάρι στην «ενέργεια», στο «ηλεκτρικό φορτίο» κτλ. (Σχετικά μ' αυτό το θέμα, βλ.

τη συζήτηση για τη σημασία της διαδικασίας του λειτουργικού ορισμού στο εδάφιο 13.2.)

Τις δεκαετίες του 1830 και του 1840, ο Faraday, παρακινούμενος από την όμορφη και ελκυστική πειραματική έρευνά του στον ηλεκτρισμό και το μαγνητισμό, διατύπωσε ορισμένα πολύ «βαθιά» ερωτήματα γι' αυτά τα φαινόμενα. Οι μαθητές, λοιπόν, καθοδηγούμενοι με σωκρατικό τρόπο σε ομίλους συζητήσεων, μπορούν και μόνοι τους να αρθρώσουν ορισμένα απ' αυτά: Υπάρχει κάποιος μηχανισμός με τον οποίο ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο ασκεί δύναμη σε άλλο; Αν ξαφνικά μετακινηθεί το ένα σωματίδιο, μεσολαβεί ορισμένο χρονικό διάστημα πριν μεταβληθεί η δύναμη που ασκείται στο άλλο; Μεσολαβεί ορισμένο χρονικό διάστημα μεταξύ της στιγμής που συνδέουμε ένα σύρμα σε μια μπαταρία και της στιγμής που μια μαγνητική βελόνα, η οποία βρίσκεται κοντά στο σύρμα, αρχίζει να ταλαντώνεται λόγω της μαγνητικής επίδρασης του ρεύματος που περνά μέσα από το σύρμα; Αν σ' αυτές τις περιπτώσεις μεσολαβεί ορισμένο χρονικό διάστημα, τι συμβαίνει (αν όντως συμβαίνει κάτι) στο χώρο μεταξύ των αλληλεπιδρώντων αντικειμένων; Αν μεταξύ των σωμάτων δεν ασκούνται ίσες και αντίθετες δυνάμεις κατά το χρονικό διάστημα της μεταβολής (όσο μικρό κι αν είναι αυτό), τι συμβαίνει με τον 3ο νόμο του Νεύτωνα και την έννοια της «δράσης και της αντίδρασης»;

Ο Faraday, προσπαθώντας να απαντήσει σ' αυτά τα ερωτήματα, επινόησε ένα πρότυπο (στηριγμένο σε αυθαίρετες υποθέσεις), που υπερέβαινε κάθε άμεσα αισθητή εμπειρία. Πρόκειται για τη διάσημη ιδέα των «δυναμικών γραμμών»: «γραμμές» που τεντώνονται, συστέλλονται, εξαπλώνονται και έλκονται μεταξύ τους, διαδίδοντας στον κενό χώρο τις ηλεκτρικές και τις μαγνητικές επιδράσεις. Αργότερα, ο James Clerk Maxwell, εκλεπτύνοντας αυτή την ιδέα, επινόησε τη σύγχρονη μαθηματική έννοια του «πεδίου». Ο Faraday, σχεδόν απολογούμενος, γράφει γι' αυτό το εξαιρετικά θεωρητικό πρότυπο [Faraday (1965β)]:

Δεν πρέπει να θεωρήσουμε ότι αυτές οι υποθέσεις είναι άχρηστες ή κατ' ανάγκη επιβλαβείς για τη φυσική φιλοσοφία. Κάποτε, ίσως, ανακαλύψουμε ότι έχουν αμφίβολη αξία και ότι οδηγούν σε λάθη και αλλαγές· είναι, ωστόσο, θαυμάσια εργαλεία στα χέρια του πειραματιστή και του μαθηματικού. Είναι χρήσιμες, επειδή καθιστούν προς το παρόν μια αόριστη ιδέα πιο συγκεκριμένη, δίνοντάς της συγκεκριμένη μορφή, ώστε να υποβάλλεται σε πειραματική και μαθηματική επεξεργασία. Είναι, επίσης, χρήσιμες, επειδή οδηγούν, με αναγωγικούς συλλογισμούς και με διόρθωση των λαθών, στην ανακάλυψη νέων φαινομένων. Εμπλουτίζουν, έτσι, και προωθούν την πραγματική φυσική αλήθεια, η οποία, αντίθετα από τις υποθέσεις που μας οδήγησαν σ' αυτή, αποδεικνύεται θεμελιώδης γνώση που δεν υπόκειται σε αλλαγές.

Αυτή η όμορφη περιγραφή του σκοπού και της λειτουργίας ενός αυθαίρετου προτύπου αναδεικνύει, ταυτόχρονα, μια χαρακτηριστική πλευρά της σκέψης πολλών επιστημόνων του 19ου αιώνα. Οι επιστήμονες εκείνης της εποχής ήταν πεπεισμένοι ότι συνέλεξαν «πραγματική φυσική αλήθεια» και «γνώση που δεν υπόκειται σε αλλαγές». Αφού οι μαθητές μάθουν ορισμένα στοιχεία για την επανάσταση που συντελέστηκε στον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε τις έννοιες, παράλληλα με την αποτυχία της κλασικής θεωρίας στην αρχή του 20ου αιώνα, είναι ενδιαφέρον να τους ζητήσουμε να αντιπαραβάλουν τη δήλωση του Faraday με την πιο δυσάρεστη, αλλά σοφότερη, δήλωση του J. Robert Oppenheimer (1963):

Φτάσαμε στα νέα προβλήματα διαθέτοντας παλιές ιδέες και χρησιμοποιώντας παλιές λέξεις· όχι μόνο τις αναπόφευκτες λέξεις της καθημερινής ζωής, αλλά και εκείνες που με τα χρόνια μέσα από την εμπειρία μας αποδείχθηκαν γόνιμες... Αγαπάμε τις παλιές λέξεις, τις παλιές εικόνες, τις παλιές αναλογίες και τις χρησιμοποιούμε για όλο και λιγότερο συνηθισμένα και απτά αντικείμενα.

Στο φως αυτών των απόψεων, οι μαθητές, αυθόρμητα, αρχίζουν να αποκτούν κάποια αίσθηση του γιατί σήμερα οι περισσότεροι επιστήμονες θεωρούν την επιστημονική γνώση μάλλον μεταβλητή και προσωρινή παρά μόνιμη και τελική. Εκτιμούν τα όρια της ισχύος των επιτυχημένων θεωριών και είναι έτοιμοι να ανακαλύψουν την παλινδρόμηση αναπάντητων ερωτημάτων πίσω από τα απαντημένα.

Σε ένα άλλο πλαίσιο το οποίο περιλαμβάνει πρότυπα που υπερβαίνουν την άμεσα αισθητή εμπειρία, μπορούμε να οδηγήσουμε τους μαθητές να παρακολουθήσουν και να εξετάσουν τις αποδείξεις που εδραίωσαν την πίστη μας στην ύπαρξη των ατόμων και των μορίων — στην ασυνέχεια της ύλης — και στην ύπαρξη δομής μέσα στο ίδιο το άτομο. Πρέπει να τους επιτρέψουμε να διατυπώσουν τις αμφιβολίες τους γι' αυτά τα θέματα (αμφιβολίες, εξάλλου, υπήρχαν και μεταξύ εκείνων που πρώτοι ασχολήθηκαν μ' αυτά) και να εκφράσουν τις ανησυχίες τους για τον τρόπο ερμηνείας ορισμένων δεδομένων. Δεν πρέπει να τους «γεμίσουμε» με αποσπασματικά και μη πειστικά επιχειρήματα, ακολουθούμενα από διακηρύξεις τελικών συμπερασμάτων. (Εκείνοι που γνήσια αμφιβάλλουν είναι, τελικά, λιγότερο ανόητοι από τους υπόλοιπους.)

Πολλά χρήσιμα παραδείγματα χαράσσουν το δρόμο προς αυτή την κατεύθυνση. Λόγου χάρη, ο Dalton, στις πρώτες προσπάθειές του να αναπτύξει μια ποσοτική ατομική-μοριακή θεωρία με ένα μοναδικό και αυτοσυνεπές σύνολο σχετικών ατομικών μαζών, αντιμετώπισε τα δεδομένα της χημείας με τη μορφή της ποσοστιαίας σύστασης των ενώσεων, ζυγίζοντας χημικές ενώσεις. Ο νόμος των σταθερών αναλογιών ήταν η μόνη κανονικότη-

τα που διέκρινε σ' αυτά τα δεδομένα (δηλαδή, η σταθερή ποσοστιαία σύσταση κάθε συγκεκριμένης χημικής ουσίας, άσχετα από τη θέση της και την προέλευσή της). Ακόμα κι αυτό το θέμα, ωστόσο, υπήρξε αντικείμενο διαμάχης και αμφιβολιών.

Η πρωταρχική πεποίθηση του Dalton, ότι δηλαδή η ύλη έχει σωματιδιακή υφή, τον οδήγησε να εξετάσει προσεκτικά τις περιπτώσεις όπου ένα ζεύγος στοιχείων (λόγου χάρι ο άνθρακας και το οξυγόνο) σχηματίζουν περισσότερες από μία ενώσεις. Σκέφτηκε ότι, αν σε μια ένωση 1 g άνθρακα ενώνεται με 1,3 g οξυγόνου, τότε σε μια άλλη ένωση 1 g άνθρακα πρέπει να ενώνεται με 2,6 ή 0,65 ή 3,9 g οξυγόνου ή με κάποια άλλη ποσότητα που είναι ακέραιο πολλαπλάσιο ή υποπολλαπλάσιο του 1,3. Αν οι ενώσεις αποτελούνται όντως από μόρια κατασκευασμένα από λίγα άτομα των στοιχείων που βρίσκονται ενωμένα σ' αυτή, τότε θα πρέπει να εμφανίζονται απλές αριθμητικές σχέσεις. Μέχρι τότε, ουδέποτε τα αποτελέσματα είχαν μελετηθεί μ' αυτόν τον τρόπο. Αυτή η ιδιαίτερη τάξη κρυβόταν στην ποσοστιαία σύσταση, χωρίς να έχει αποκαλυφθεί.

Ο Dalton μελέτησε τα δεδομένα και ανακάλυψε ότι υπήρχε όντως κάποια κανονικότητα. Προέβλεψε, δηλαδή, το νόμο που σήμερα αποκαλούμε «νόμο των πολλαπλών αναλογιών». (Σε πολλές σύγχρονες σειρές μαθημάτων, ο νόμος, αν μελετάται καθόλου, παρουσιάζεται λανθασμένα σαν να προέκυψε εμπειρικά μαζί με το «νόμο των σταθερών αναλογιών» και σαν να αποτέλεσε *a priori* ένδειξη για τη διακριτότητα της ύλης.) Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι πολύ συχνά τα γεγονότα δεν μιλούν από μόνα τους. Σε τούτο το παράδειγμα, τα γεγονότα υπήρχαν από πολύ καιρό· δεν τα είχαμε, ωστόσο, παρατηρήσει, παρά μόνο όταν τα εξετάσαμε υπό το πρίσμα μιας θεωρίας. Τότε η ανακάλυψή τους, επειδή επιβεβαίωσε με εντυπωσιακό τρόπο τη θεωρία μέσα από την οποία είχαν αποκαλυφθεί, ανατροφοδότησε την πίστη μας σ' αυτή.

Η ιστορία της διάσημης απάτης με τον «άνθρωπο του Pittdown», που εμφανίστηκε τη δεκαετία του 1950, είναι αντιπαράδειγμα αυτής της ιδέας. Πολλοί παλαιοντολόγοι δέχτηκαν τη γνησιότητα του απολιθώματος (που είχε κρανίο ανθρώπου και σαγόνι πιθήκου), επειδή οι θεωρητικές προκαταλήψεις τους τους οδήγησαν να πιστεύουν ότι, κατά την εξέλιξη του ανθρώπου, η ανάπτυξη του εγκεφάλου καθοδηγούσε τις αλλαγές στα υπόλοιπα μέρη του σώματος. Για σχεδόν σαράντα χρόνια, δέχτηκαν την απάτη, αν και ήταν πασίγνωστο ότι δεν ταίριαζε σε καμιά θέση στη σειρά των ανθρωποειδών απολιθωμάτων. Και σε αυτή την περίπτωση, τα γεγονότα δεν μίλησαν από μόνα τους· τα είδαμε μέσα από το πρίσμα μιας θεωρίας, η οποία μας παραπλάνησε.

Σε μια προσπάθεια παροχής γνήσιας ελεύθερης εκπαίδευσης (δηλαδή, εκπαίδευσης που απελευθερώνει), είναι ουσιαστικό να φωτίσουμε τα πιο γενικά χαρακτηριστικά κάθε επιστημονικού εγχειρήματος. Δεν μπορούμε,

ωστόσο, να πετύχουμε αυτό το αποτέλεσμα με αόριστες γενικεύσεις, αποκομμένες από το μόχθο που συνοδεύει τη διαμόρφωση των εννοιών και την κατανόηση του θέματος. Για να αναπτύξουμε την καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες, πρέπει να αφομοιώσουμε συγκεκριμένα στοιχεία του θέματος. Έτσι, οι γενικεύσεις αποκτούν νόημα.

12.6 Παρουσίαση της συγγένειας μεταξύ γεγονότων της ιστορίας του πνεύματος

Αν μια εισαγωγική σειρά μαθημάτων ακολουθεί λογικό ρυθμό, υπάρχουν πολλοί τρόποι να ενημερώσουμε τους μαθητές για το ρόλο των θετικών επιστημών στην ιστορία του πνεύματος. Λόγου χάρη, εργαζόμενος στον τομέα της διδακτικής των θετικών επιστημών στο δημοτικό, συνάντησα περισσότερο από μία φορά την επόμενη σειρά ερωταποκρίσεων: Ένα παιδί (ή ο δάσκαλος) ρωτά: «Γιατί πέφτουν τα αντικείμενα;» Συνήθως, η «σωστή» απάντηση που δίνει ή εκμαιεύει ο δάσκαλος είναι: «Τα αντικείμενα πέφτουν λόγω της βαρύτητας». Έτσι, ενσταλάζεται στο μαθητή η εντύπωση ότι του *εξηγήθηκε* κάπως και το αίτιο και το αποτέλεσμα. Στην εν λόγω περίπτωση, ο δότης και ο λήπτης της «πληροφορίας» δεν έχουν τη διάθεση να αμφισβητήσουν ότι ο τεχνικός όρος δεν μεταφέρει γνώση ούτε βοηθά στην κατανόηση. Αποκρύπτει, απλώς, τη φύση του φαινομένου. Αν ρωτήσουμε μια τάξη μαθητών λυκείου: «Γιατί πέφτουν τα σώματα;», οι περισσότεροι απαντούν: «Λόγω της βαρύτητας». Λίγοι, αν όχι κανένας, έχουν το σθένος να πουν: «Δεν έχω ιδέα».

Λίγοι μαθητές, δάσκαλοι ή απλοί πολίτες γνωρίζουν το ιστορικό αυτού του όρου. Με τον όρο «βαρύτητα», περιγραφόταν ένα τελεολογικό φαινόμενο, δηλαδή η «εσωτερική παρακίνηση» ή η «επιθυμία» των «βαρέων» στοιχείων, της γης και του νερού (και των μειγμάτων τους), να αναζητούν το κέντρο της Γης. Η αντίθετη «επιθυμία» του αέρα και της φωτιάς ονομαζόταν «ελαφρότητα». Η φυσική φιλοσοφία του 17ου αιώνα απέρριψε τον όρο ελαφρότητα και την αντίστοιχη τελεολογική αντίληψη. Ο Νεύτων, χωρίς να γνωρίζει άμεσα το μηχανισμό ή τη διαδικασία της αλληλεπίδρασης, διατύπωσε τη σημαντική υπόθεση ότι η αιτία που αναγκάζει το μήλο να πέφτει, συγκρατεί, επίσης, τη Σελήνη γύρω από τη Γη και τη Γη και τους πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, άσχετα με το πώς συμβαίνει αυτό. Παρά την ομορφιά και την κομψότητα της Γενικής Θεωρίας της Σχετικότητας, μέχρι σήμερα δεν έχουμε ακόμα ιδέα για το πώς «λειτουργεί» η βαρύτητα. Με αφορμή, λοιπόν, την απάντηση που δίνουν οι περισσότεροι μαθητές στο ερώτημα «Γιατί πέφτουν τα σώματα;», γίνεται ένα μικρό βήμα στην κατεύθυνση της καλλιέργειάς τους στις θετικές επιστήμες, αν τους απελευθερώσουμε από τις λανθασμένες εντυπώσεις τους.

Ελάχιστοι μαθητές γνωρίζουν την επαναστατική ώθηση της επιστήμης του 17ου αιώνα, που ήταν αποτέλεσμα της απαλλαγής από την αντίληψη ότι τα ουράνια σώματα είναι φτιαγμένα από μια «τέλεια» ουσία (την «πεμπουσία»), απολύτως διαφορετική από τα γήινα υλικά. Ήταν αποτέλεσμα, επίσης, της απαλλαγής από την αντίληψη ότι οι νόμοι που κυβερνούν τους ουρανούς είναι απολύτως διαφορετικοί από τους γήινους. Η απαλλαγή απ' αυτές τις αντιλήψεις, παράλληλα με την υπαγωγή όλου του Σύμπαντος σε ένα σύστημα φυσικών νόμων που ο άνθρωπος μπορεί να κατανοήσει, η επέκταση του Σύμπαντος ως το άπειρο και κατ' ακολουθία η «μετακόμιση» του καταφυγίου του Θεού από τα χαμηλά ύψη στα μεγάλα, σημάδεψαν ένα σημείο καμπής στην ιστορία του πνεύματος. Η μελέτη από τον άνθρωπο του ίδιου του εαυτού του και της θέσης του στο Σύμπαν εξαρτάται βαθιά από την κληρονομιά που παρέλαβε από τον Γαλιλαίο, τον Descartes, τον Νεύτωνα και άλλους φυσικούς φιλοσόφους του 17ου αιώνα. Κάθε μορφωμένος άνθρωπος πρέπει να γνωρίζει αυτή την κληρονομιά από εννοιολογική, ιστορική και πνευματική άποψη· δεν αρκεί να γνωρίζει απλώς τα τελικά συμπεράσματα. Ιδού, λοιπόν, ένα επιπλέον βήμα για την κατάκτηση μεγαλύτερης καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες. Ωραίες παρουσιάσεις αυτής της ιστορίας, με το επιστημονικό αλλά και το πνευματικό περιεχόμενό της, υπάρχουν σε εγχειρίδια προπτυχιακού επιπέδου [Holton (1973)· Rutherford, Holton και Watson (1981)]· δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, ωστόσο, σε σειρές μαθημάτων γενικής μόρφωσης και, ουσιαστικά, λείπουν εντελώς από προγράμματα σπουδών για επιστήμονες θετικών επιστημών και για μηχανικούς.

Και όμως, αν σε μια εισαγωγική σειρά μαθημάτων θετικών επιστημών αποκαλύπτονται αυτά τα ιστορικά και πνευματικά ζητήματα, αυξάνουν και εμπλουτίζουν τη μελέτη της περιόδου της Αναγέννησης σε σειρές μαθημάτων για τον Δυτικό Πολιτισμό και προκαλούν ωφέλιμη διάχυση των ιδεών μέσα από τις τεχνητές «μεμβράνες», που σήμερα χωρίζουν τις σειρές μαθημάτων μεταξύ τους. Οι μαθητές εκπλήσσονται, όταν ανακαλύπτουν, λόγου χάρη, πόσες ρητορικές εκφράσεις που χρησιμοποιούσαν οι Πατέρες του Έθνους προέρχονται από κείμενα του Λοκ και του Νεύτωνα [Agrons (1975)].

Ιδού ορισμένα παραδείγματα από τη λογοτεχνία — μια απολύτως διαφορετική περιοχή. Στο έργο του Σαίξπηρ «Ερρίκος ο ΣΤ'», υπάρχει το απόσπασμα:

*Η δόξα είναι σαν κύκλος στο νερό, όπου ποτέ
δε σταματάει ν' απλώνεται, ώσπου με το άπλωμα
διαλύεται στο τίποτα.**

* Μετάφραση Βασίλη Ρώτα και Βούλας Δαμιανάκου, εκδόσεις Επικαιρότητα. (Σ.τ.μ.)

Οι μαθητές εκτιμούν ιδιαίτερα αυτή την εικόνα, όταν τη συναντούν στη μελέτη και την παρατήρηση κοινών κυματικών φαινομένων.

Στο ποίημα του Conrad Aiken (1953) «Morning Song of Senlin», υπάρχουν οι στίχοι:

*Η Γη περιστρέφεται μαζί μου· κι όμως, δε φαίνεται να κινείται
Τ' άστρα τρεμοσβήνουν σιωπηλά στον ουρανό.
Στέκομαι μες στο κενό που σφυρίζει, μπροστά από τον καθρέφτη μου,
κι ανέμελα δένω τη γραβάτα μου.*

Ο πρώτος στίχος επικαλείται το νόμο της αδράνειας και τη γαλιλαική σχετικότητα. Το κενό που σφυρίζει αναφέρεται στη νευτώνεια κοσμολογία. Και, τελικά, ο Aiken γαρνίρει όλ' αυτά με μια δόση ειρωνείας και παραδοξολογίας. Πρόκειται, σαφώς, για σύγχρονη άποψη: τίποτε απ' αυτά δεν ήταν δυνατό να γραφτεί τον 16ο αιώνα. Οι μαθητές, λοιπόν, παρατηρούν μια άμεση επίδραση των θετικών επιστημών στη λογοτεχνία, ένα στιγμιότυπο της ιστορίας του πνεύματος. Δεν χρησιμοποιείται, μάλιστα, δυσνόητη ορολογία, αλλά επιστημονικές έννοιες που είναι δυνατό να αναπτυχθούν και να γίνουν κατανοητές σε εισαγωγικό επίπεδο. (Σε επόμενο στάδιο, όσοι μαθητές ενδιαφέρονται μπορούν να συγκρίνουν την ανεπιφύλακτη αποδοχή από τον Aiken της νευτώνειας άποψης για τον Κόσμο, με το ότι ο Μίλτων, στον «Χαμένο Παράδεισο», διχάζεται μεταξύ του πολεμικού και του κοπερνίκειου συστήματος.)

Άλλη σιωπηρή αποδοχή του νευτώνειου Σύμπαντος αναδύεται από τους στίχους του Tennyson, στο «Locksley Hall Sixty Years After»:

*Καθώς οι σιωπηλοί ουρανοί στριφογυρίζουν
και οι ήλιοι ακολουθούν τα πύρινα μονοπάτια τους,
οι πλανήτες στροβιλίζονται γύρω τους
και λάμπουν.*

Οι «αρχές του ανέφικτου» επέδρασαν, επίσης, βαθιά και διαβρωτικά στην ιστορία του πνεύματος. Προέρχονται από την τεχνολογία, καλύπτουν όλες τις θετικές επιστήμες και, ουσιαστικά, τις ενοποιούν μεταξύ τους. Προερχόμενες από την παλιά αντίληψη που εδραιωνόταν συνεχώς, δηλαδή ότι η Φύση συνωμοτεί εναντίον της προσπάθειάς μας να πάρουμε «κάτι από το τίποτε» — ενάντια στο να πετύχουμε χωρίς προσπάθεια και κόστος ατέλειωτη προμήθεια ύλης, κίνησης, αλλαγών ή θερμότητας —, τον 18ο αιώνα άρχισαν να ποσοτικοποιούνται αυτοί οι περιορισμοί. Η άποψη του Λουκρήτιου ότι «η θεϊκή δύναμη από το τίποτε δημιουργεί το τίποτε» εξελίχθηκε μέσα από τα θαυμάσια πειράματα του Lavoisier στο νόμο της

διατήρησης της μάζας. Οι έννοιες της μηχανικής ενέργειας είχαν αρχίσει να εμφανίζονται· η σύνδεσή τους, ωστόσο, με τα θερμικά φαινόμενα ακόμα δεν ήταν σαφής.

Ο 19ος αιώνας συνέλαβε τη μεγάλη σύνθεση του 1ου και του 2ου νόμου της Θερμοδυναμικής: την ενοποίηση της μηχανικής ενέργειας με τη θερμότητα, τη διατήρηση της ενέργειας συνολικά, το ότι ορισμένες αλλαγές είναι δυνατό να γίνουν αυτόματα και άλλες όχι, το ότι δεδομένη ποσότητα έργου είναι *δυνατό* να μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε θερμική ενέργεια, ενώ το αντίστροφο είναι *αδύνατο*, και την υπαγωγή κάθε μηχανικής, χημικής, θερμικής, ηλεκτρικής ή μαγνητικής μεταβολής μιας κατάστασης σ' αυτούς τους δύο νόμους. Με την ποσοτικοποίηση των «αρχών του ανέφικτου», που αναδύθηκε από την τεχνολογία της Βιομηχανικής Επανάστασης, αποκαλύφθηκε ότι μέσα στο χάος των ανόμοιων μορφών των μεταβολών υπάρχει τάξη. Αυτή η αποκάλυψη επηρέασε βαθιά τη σκέψη των κοινωνικών φιλοσόφων, λόγου χάρη, του Γάλλου George Soler [Humphrey (1951)] και του Αμερικανού ιστορικού Henry Adams (1918).

Μπορούμε να παρακολουθήσουμε τα ιστορικά γεγονότα και από άλλη σκοπιά. Ο 19ος αιώνας είχε συλλάβει τη μάζα και την ενέργεια ως δύο ανόμοια, κλειστά «συστήματα», που το καθένα υπερασπιζόταν μέχρις εσχάτων τον δικό του νόμο διατήρησης. Ο 20ός αιώνας, λόγω της επανάστασης στις έννοιες, την οποία επιτάχυνε ο Αϊνστάιν, άρχισε να αντιλαμβάνεται τη μάζα και την ενέργεια όχι ως δύο διαφορετικές μεταξύ τους έννοιες, αλλά ως ολότητα, μέσα στην οποία αλληλομετατρέπονται, όπως το έργο και η θερμότητα. Κατανοήσαμε, έτσι, πώς για πρακτικά άπειρο χρόνο η θερμοκρασία ενός ραδιενεργού υλικού διατηρείται υψηλότερα από εκείνη του περιβάλλοντός του, πώς ο Ήλιος λάμπει για πολύ χρόνο συγκριτικά με τις γεωλογικές περιόδους και, τέλος, πώς η τεράστια ενέργεια που βρίσκεται εγκλωβισμένη στον πυρήνα του ατόμου είναι δυνατό να απελευθερωθεί.

Τα γεγονότα που προαναφέραμε οδήγησαν κατευθείαν στα ηθικά και κοινωνικά προβλήματα τα οποία προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνολογίας που αναδύθηκε απ' αυτά στην ειρηνική βιομηχανία, αλλά και στη στρατιωτική. Αυτή η ιστορία και οι επιδράσεις της στην ανθρώπινη κοινωνία ξεκίνησαν πολύ πριν ο Fermi και οι βοηθοί του κατασκευάσουν τον πρώτο πυρηνικό αντιδραστήρα στο Σικάγο. Ελπίζω ότι οι μαθητές θα έχουν την ευκαιρία να αντιληφθούν αυτό το γεγονός (του οποίου η σημασία αυξάνει συνεχώς) όχι μόνο στο περιορισμένο πλαίσιο των άμεσων επιστημονικών, τεχνολογικών και κοινωνικών αποτελεσμάτων του αλλά και στο ευρύτερο πλαίσιο της ιστορίας του πνεύματος.

12.7 Παραλλαγές στο προηγούμενο θέμα

Τα προηγούμενα παραδείγματα επιστημολογικού, φιλοσοφικού και ιστορικού χαρακτήρα της επιστήμης θεωρώ ότι αναπτύσσουν ορισμένα χαρακτηριστικά της καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες που κατέγραψα στο εδάφιο 12.2 και εγγέουν φιλελεύθερες και ανθρωπιστικές απόψεις στο πρόγραμμα σπουδών. Πρόκειται, ωστόσο, για θέματα προσωπικής μου προτίμησης. Τα παρουσίασα για να κάνω τις απόψεις μου πιο συγκεκριμένες. Δεν θεωρώ, λοιπόν, ότι υπερτερούν έναντι άλλων επιλογών. Ο καθηγητής πρέπει να επιλέξει την ύλη και τα γεγονότα που τον συγκινούν περισσότερο και τα οποία μπορεί να παρουσιάσει στους μαθητές του με τον ελκυστικότερο τρόπο.

Πολλά στοιχεία χαρακτηρίζουν την επιστήμη. Ο James Conant τα ονομάζει «η τακτική και η στρατηγική της επιστήμης» και τα εξηγεί στο βιβλίο του: «Harvard Case Histories in Experimental Science» (1957). Υπάρχει το συναρπαστικό ζήτημα της αξιολόγησης και της αποδοχής των επιστημονικών θεωριών, που είναι εν μέρει επιστημονικό και εν μέρει κοινωνικό. Υπάρχουν τα φιλοσοφικά ζητήματα του θετικισμού και τα ερωτήματα για την «πραγματικότητα» των οντοτήτων που υπερβαίνουν τις αισθήσεις μας: των ατόμων, των μορίων, των ηλεκτρονίων του πυρήνα κτλ.

Υπάρχουν, επίσης, τα πιεστικά κοινωνικά προβλήματα που προέρχονται από την απελευθέρωση της πυρηνικής ενέργειας, από τις στρατιωτικές εφαρμογές της επιστήμης, από τον έλεγχο των γενετικών χαρακτηριστικών του ανθρώπου, από τη σύνθεση ζωής ύλης, από τον έλεγχο και τον περιορισμό της καταστροφής του γήινου περιβάλλοντος κτλ. Δεν έχω την πρόθεση να μειώσω τη σημασία αυτών των ζωτικών ζητημάτων. Συνήθως, όμως, καταπιάνομαι με την ανάλυση και τη συζήτησή τους αφού οι μαθητές φτάσουν στο σημείο να κατανοούν, σε κάποιο βαθμό, τους επιστημονικούς και τεχνικούς όρους του θέματος. Αν προηγουμένως έχουν όντως ασχοληθεί με την προαπαιτούμενη μελέτη ή οι προαπαιτούμενες γνώσεις αναπτύσσονται ευσυνειδήτητα όταν παρουσιάζεται η ανάγκη, οι συζητήσεις αυτού του είδους είναι ωφέλιμες και ουσιαστικές από μορφωτική άποψη. Αποτέλεσμα: βελτιώνουν την καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες. Όμως αν διαπραγματευτούμε τα ερωτήματα χωρίς προηγουμένως οι μαθητές να έχουν κατανοήσει ικανοποιητικά το επιστημονικό περιεχόμενό τους, όπως συχνά συμβαίνει, η προσπάθεια είναι απατηλή. Οι μαθητές αποκτούν τη λανθασμένη εντύπωση ότι εξέτασαν τα ερωτήματα και κατανόησαν το περιεχόμενό τους, ενώ στην πραγματικότητα χρησιμοποίησαν απλώς τεχνικούς όρους, χωρίς να αντιλαμβάνονται το νόημά τους, και ασχολήθηκαν με ανόητες και ανούσιες κενές γενικεύσεις. Σε αυτές τις συνθήκες, ενθαρρύνονται έμμεσα να ενστερνιστούν την ευρέως διαδεδομένη «ορθολογική» άποψη ότι «όλες οι γνώμες

είναι εξίσου καλές».

Είναι σαφώς αδύνατο να ασχοληθούμε με όλα όσα θα θέλαμε, στο πλαίσιο των θεμάτων όπως εκείνα που παρουσιάσαμε στα εδάφια 12.5 και 12.6 και αναφέραμε εν συντομία στο παρόν. Είναι, επίσης, αδύνατο να ασχοληθούμε με κάθε σημαντικό πρόβλημα και να αναδείξουμε κάθε σημαντική πλευρά του. Έχει περάσει όντως πολύς καιρός από τότε που μπορούσαμε να διδάσκουμε στους μαθητές μας όλα όσα χρειάζεται να ξέρουν. Δεν είναι πλέον νέα ή πρωτότυπη ιδέα ότι ο μόνος βιώσιμος και ρεαλιστικός σκοπός της εκπαίδευσης είναι οι μαθητές να μπορέσουν, από πνευματική άποψη, να «σταθούν στα δικά τους πόδια»: να τους δώσουμε ορισμένα βασικά πνευματικά εφόδια και να τους πληροφορήσουμε τι σημαίνει μαθαίνω και κατανοώ ένα θέμα, για να μπορούν να συνεχίσουν το διάβασμα, τη μελέτη και τη μάθησή τους, όταν το έχουν ανάγκη και τους παρουσιάζεται η ευκαιρία, χωρίς να εξαρτώνται επ' άπειρον από μια τυπική διδασκαλία. (Αυτή η πνευματική ανάπτυξη είναι κατ' ανάγκη αξεδιάλυτα συνδεδεμένη με την ικανότητα της κριτικής σκέψης, που μελετάμε στο επόμενο Κεφάλαιο.)

Αποτελεσματικό κριτήριο είναι το εξής: οι μαθητές δεν πρέπει να καταλήξουν να αναμασούν αποφθεγματικές εκφράσεις από «δεύτερο χέρι» για τη φύση και τις λειτουργίες της επιστήμης, χωρίς ουδέποτε να έχουν συνθέσει την αντίστοιχη γνώση μέσα από προσωπική διανοητική ενασχόλησή τους με το θέμα. Χωρίς στοιχειώδη συμμετοχή στην κατανόηση και ερμηνεία των επιστημονικών εννοιών, των θεωριών και της φιλοσοφίας, οι μαθητές μαθαίνουν τόσα πράγματα από τις δηλώσεις από «δεύτερο χέρι» όσα μαθαίνουν από ένα ερμηνευτικό σχόλιο για ένα ποίημα χωρίς να έχουν διαβάσει το ποίημα ή από μια συζήτηση για τις μεθόδους και τη φιλοσοφία της ιστορίας χωρίς να γνωρίζουν καθόλου ιστορία.

Είμαι πεπεισμένος ότι αν οι μαθητές είχαν την ευκαιρία να ασχοληθούν με τις θετικές επιστήμες, παρακολουθώντας τις στοιχειωδέστερες απόψεις και αποκτώντας τη στοιχειωδέστερη εμπειρία που προσπάθησα να περιγράψω προηγουμένως, θα αποκτούσαν γνώση με μεγαλύτερη διάρκεια, σύμφωνα με τους διακηρυγμένους στόχους της γενικής εκπαίδευσης. Αυτή η γνώση, όπως ακριβώς η ιστορική γνώση και η ευαισθησία για τη λογοτεχνία, θα συνέβαλε στην ανάπτυξη αρτιότερα μορφωμένων ατόμων και λογικά σκεπτόμενων πολιτών.

12.8 Θέματα σχετικά με την εφαρμογή των προηγούμενων ιδεών

Σε ανώτερο επίπεδο, ενθαρρύνω ιδιαίτερα τη δημιουργία περιστασιακών τμημάτων αφιερωμένων σε σημαντικά προβλήματα (όπως εκείνα που ανέφερα στο εδάφιο 12.7), όπου χρησιμοποιείται η καθ' ομάδας διδασκα-

λία — παρά το σχετικά υψηλό κόστος — για να εξασφαλιστεί η πολύπλευρη γνώση. Αλλά και σε κατώτερο επίπεδο, στο πλαίσιο του υπάρχοντος εκπαιδευτικού προγράμματος, θεωρώ ότι μπορούμε με παρόμοιο τρόπο να πετύχουμε πολλά πράγματα.

Τα τείχη που χωρίζουν μεταξύ τους τις σειρές μαθημάτων στις θετικές, τις ανθρωπιστικές και τις κοινωνικές επιστήμες είναι απαραίτητο να γίνουν πιο διαπερατά. Στα παραδείγματα που προανέφερα, προσπάθησα να δείξω πώς ένας καθηγητής θετικών επιστημών μπορεί να εμπλουτίσει το γενικό μορφωτικό περιεχόμενο του μαθήματός του. Πρέπει, ωστόσο, με προσωπική προσπάθεια να αυξήσει περισσότερο την καλλιέργειά του και να κατατοπιστεί περισσότερο για τον ιστορικό, φιλοσοφικό, επιστημολογικό και ανθρωπιστικό ή κοινωνικό απόηχο των θεμάτων που αναπτύσσει, απ' όσο έχει προετοιμαστεί σχετικά την περίοδο της εκπαίδευσής του. Υλικό γι' αυτό το σκοπό είναι άμεσα διαθέσιμο τόσο για τον καθηγητή όσο και για το μαθητή· χρειάζεται απλώς λίγη ευφυΐα για την επινοήση ερωτήσεων, προβλημάτων για το σπίτι και εργασιών που θα κατευθύνουν τους μαθητές να αντιμετωπίσουν ιδέες έξω από τα περιορισμένα τελικά συμπεράσματα, που συνιστούν το μεγαλύτερο τμήμα των περισσότερων εγχειριδίων μας. Η κατανόηση της συνεισφοράς του Γαλιλαίου στην ανάπτυξη της επιστήμης δεν βρίσκεται στο να μπορούμε να υπολογίζουμε πόσο ψηλά πηγαίνει μια πέτρα αν τη ρίξουμε κατακόρυφα προς τα πάνω· εκτός από αυτό τον υπολογισμό, πρέπει να περιλάβουμε και άλλα στοιχεία.

Είναι αληθές ότι αν στις υπάρχουσες σειρές μαθημάτων ενσταλάξουμε αυτή την αντίληψη, θα αναγκαστούμε να μείνουμε πίσω από την «κάλυψη» της ήδη υπερβολικά μεγάλης ύλης, που πρέπει να επιβάλουμε στους προθύμους και χωρίς κριτική σκέψη μαθητές μας. Πάντοτε υποστήριζα ότι αναγκάζουμε τους μαθητές μας να γίνουν «αυτόματες μηχανές αλέσματος εξισώσεων» και να αποστηθίζουν τυφλά μεθόδους επίλυσης προβλημάτων. Δεν τους δίνουμε την παραμικρή ευκαιρία να αντιληφθούν τι σημαίνει «κατανόω». Αν απαιτούσαμε, ωστόσο, να κατανοήσουν τις έννοιες και τον τρόπο σκέψης στο πλαίσιο που περιέγραψα, θα πετυχαίναμε πολύ υψηλότερες πνευματικές επιδόσεις και εκτελεστική ικανότητα από εκείνη που πετυχαίνουμε σήμερα, παρά το πάθος μας να καλύψουμε όλη την ύλη. Ορισμένοι από τους συνεργάτες μου παραπονιούνται ότι έτσι «νερώνουμε» τη διδασκαλία των θετικών επιστημών· δεν αντιλαμβάνονται, δηλαδή, ότι η άποψή μου μάλλον αναβαθμίζει τη διδασκαλία παρά την εξασθενίζει. Ουσιαστικό συστατικό είναι η επίδειξη ευσυνείδητης προσοχής στα προβλήματα της διδασκαλίας, της μάθησης, του τρόπου εκτέλεσης συλλογισμών, της διαμόρφωσης των εννοιών και της κατανόησης που συζητήσαμε σε προηγούμενα Κεφάλαια. Στην εξασφάλιση της αφομοίωσης των εννοιών και του τρόπου εκτέλεσης συλλογισμών, πρέπει να προσθέσουμε τα πνευματικά χαρακτηριστικά που προσδιορίσαμε στα προηγούμενα λίγα εδάφια.

Αυτά τα πνευματικά χαρακτηριστικά, παρεπιπτόντως, δεν πρέπει να περιοριστούν σε τμήματα γενικής μόρφωσης για μαθητές που δεν πρόκειται να ασχοληθούν με θετικές επιστήμες. Οι μελλοντικοί επιστήμονες θετικών επιστημών και οι μηχανικοί έχουν εξίσου ανάγκη καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες με τους επιστήμονες των ανθρωπιστικών επιστημών. Αυτή η καλλιέργεια, ωστόσο, δεν αναπτύσσεται στις υπάρχουσες σειρές μαθημάτων για υποψήφιους επιστήμονες θετικών επιστημών και μηχανικούς. Το ότι οι μαθητές λύνουν — ακόμα και σωστά — τα προβλήματα που υπάρχουν στο τέλος των κεφαλαίων δεν σημαίνει ότι τους αποκαλύπτεται η ιστορική, η φιλοσοφική και η ανθρωπιστική πλευρά του θέματος ούτε ότι αναπτύσσονται αυτόματα οι προϋποθέσεις της γνήσιας καλλιέργειας στις θετικές επιστήμες. Η πιο τρανταχτή απόδειξη της αποτυχίας μας να αναπτύξουμε αυτή την καλλιέργεια των θετικών επιστημών και των μηχανικών βρίσκεται στην ευρέως διαδεδομένη απροθυμία των μελών του προσωπικού των λύκων και των πανεπιστημίων να ενσταλάξουν και να αναπτύξουν ανθρωπιστικές ιδέες στο μάθημά τους. Οι περισσότεροι «τό 'σκαγαν» από τα μαθήματα των ανθρωπιστικών επιστημών, επειδή «δεν ήταν καλοί σ' αυτά». Ουδέποτε είδαν, λοιπόν, κάποια παράλληλη ιδέα μ' εκείνες των θετικών επιστημών. Σε πολλές περιπτώσεις, ο φόβος για τις ιδέες που σχετίζονται με τις θετικές επιστήμες οφείλεται μάλλον σε ανασφάλεια, λόγω ελλিপύς εκπαίδευσης, παρά σε προκατάληψη ενάντια στην αναγκαιότητα παρουσίαις τους.

Από άμεση εμπειρία γνωρίζω ότι οι μαθητές μπορούν και ανταποκρίνονται όντως στην απαίτηση αφ' ενός για βαθιά κατανόηση ενός θέματος, αφ' ετέρου για διείδυση στις γενικότερες διανοητικές πλευρές του. Είναι μάταιο, ωστόσο, να τους παροτρύνουμε να αντιληφθούν τη σημασία της γενικής μόρφωσης απλώς με κοινότοπες επισημάνσεις. Πρέπει καταρχάς να θέλουμε να τους παρουσιάσουμε ελκυστικά και σημαντικά παραδείγματα της πνευματικής, ηθικής ή αισθητικής εμπειρίας. Κατόπιν, πρέπει να διαθέτουμε τις απαραίτητες γνώσεις ώστε εμείς που διδάσκουμε σε σπουδαστές θετικών επιστημών και μηχανικούς να μπορούμε να κινηθούμε άνετα σ' αυτόν το χώρο, αλλιώς η παρότρυνσή μας είναι υποκριτική. Πώς μπορούμε να ζητάμε από τους μαθητές κάτι που εμείς δεν το ακολουθούμε;

Αυτή η υποχρέωση δεν αφορά μόνο τους διδάσκοντες θετικών επιστημών. Τα τείχη πρέπει να διαπεραστούν και από την άλλη κατεύθυνση. Οι καθηγητές ανθρωπιστικών και κοινωνικών επιστημών πρέπει να πιάσουν να «το σκάνε» από τα μαθήματα «σκληρής» επιστήμης, όπως συμβαίνει με τους περισσότερους στη διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών τους. Πρέπει να καταφέρουν να συλλάβουν λίγες, τουλάχιστον, ερωτήσεις του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;» που προανέφερα. Πρέπει, επίσης, να ασχοληθούν με συνέπεια με όσα στοιχεία των θετικών επιστημών περιέχονται στο μάθημα της κατεύθυνσής τους. Λόγου χάρη, στο μάθη-

μα της ιστορίας του 17ου αιώνα, πρέπει να μελετήσουν *σοβαρά* (όχι αδιάφορα και επιπόλαια) την επίδραση της σκέψης του Νεύτωνα. Οι επιστήμονες των ανθρωπιστικών και κοινωνικών επιστημών πρέπει να παρουσιάσουν στους μαθητές τους ένα παράδειγμα, όπως ακριβώς το ζητώ από τους συνεργάτες μου των θετικών και τεχνολογικών επιστημών. Σε αυτή την περίπτωση, ισχύει επίσης: πώς περιμένουμε από τους μαθητές να πάντων να «το σκάνε» από κάτω που τους κάνει σχεδόν ανασφαλείς, όταν το επιτρέπουμε στον εαυτό μας;

Επανελημμένα έχουμε επισημαίνει ότι, για να πετύχουμε αυτούς τους στόχους, πρέπει να περικόψουμε την ύλη και να επιβραδύνουμε το ρυθμό με τον οποίο την καλύπτουμε, όχι μόνο στα μαθήματα θετικών επιστημών, αλλά σε κάθε μάθημα. Οι μαθητές πρέπει να έχουν χρόνο να διαμορφώσουν τις έννοιες, να σκεφτούν, να συλλογιστούν και να αντιληφθούν τις μεταξή τους σχέσεις. Πρέπει να συζητήσουν για τις ιδέες και να γράψουν τη γνώμη τους γι' αυτές. Παραδείγματα εγχειριδίων με μειωμένη ύλη και επιλεγμένα θέματα υπάρχουν στη βιβλιογραφία· είναι, ωστόσο, λίγα. Για να αποσαφηνίσω τι εννοώ, παρά για να το υποστηρίξω ξεχωριστά, επισημαίνω το βιβλίο: «The Project Physics Course». Αυτό το εγχειρίδιο είναι δείγμα του πώς υφαίνεται μια παρουσίαση που μας μεταφέρει στην αφετηρία της σύγχρονης ατομικής και υποατομικής φυσικής, παραλείποντας άχρηστα θέματα και εισάγοντας πολλά από τα ζητήματα που παρουσιάσαμε στο παρόν βιβλίο. Επισημαίνω, επίσης, το βιβλίο των Casper και Noer (1972) «Revolutions in Physics», που ασχολείται με τον Νεύτωνα και τον Αϊνστάιν, χωρίς να προσπαθεί να καλύψει τα ενδιάμεσα θέματα. Αν ο διδάσκων στηριχθεί στα υπάρχοντα καλά δείγματα εγχειριδίων, είναι απολύτως δυνατό να δημιουργήσει μια λογική ακολουθία ιδεών που να ταιριάζει καλύτερα στην ικανότητά του και τις προτιμήσεις του.

12.9 Το πρόβλημα της ανάπτυξης της αντίληψης

Αν δεχτούμε την άποψη ότι ο αντικειμενικός σκοπός της γενικής εκπαίδευσης περιλαμβάνει την καλλιέργεια της σκέψης, του τρόπου εκτέλεσης συλλογισμών και της αντίληψης των μαθητών, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τα εμπειρικά αποτελέσματα που προέκυψαν από πρόσφατες μελέτες στον τρόπο που αναπτύσσεται η αντίληψη. Οι μελέτες [Arons (1976)· Chiappetta (1976)· Karplus κ.ά. (1979)· McKinnon και Renner (1971)· Perry (1970)] στηρίχθηκαν, συνήθως, στην εκτέλεση δύο ή περισσότερων δοκιμασιών Piaget που είναι πλέον κλασικές. Κάθε φορά προέκυψε ακριβώς ότι μόνο το 25% της «ενεργού διατομής» των μαθητών λυκείου ανταποκρίνεται με επιτυχία σ' αυτές τις δοκιμασίες. Οι μαθητές που ανταποκρίνονται με επιτυχία έχουν αναπτύξει στοιχειωδώς την ικανότητα να εκτελούν

αφηρημένους λογικούς συλλογισμούς. Το 50% δεν μπόρεσε να ανταποκριθεί με επιτυχία στις δοκιμασίες. Οι μαθητές αυτοί χρησιμοποιούν, ακόμα, κυρίως συγκεκριμένο τρόπο σκέψης. Τέλος, το 25% βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο και ανταποκρίνεται εν μέρει στις δοκιμασίες.

Οι μαθητές διαθέτουν την απαραίτητη νοημοσύνη, για να ξεπεράσουν αυτό το επίπεδο. Η ανάπτυξή της, ωστόσο, πρέπει να στηριχθεί απαραίτητα στην εξάσκηση και την εμπειρία, μέσω κατάλληλων τρόπων συλλογισμού. Σύμφωνα με την ορολογία του Piaget, η *επαναλαμβανόμενη* εξάσκηση οδηγεί στην προσαρμογή και την ισορροπία. Οι περισσότεροι μαθητές λυκείου έχουν, όντως, μεγάλη ανάγκη εξάσκησης στους τρόπους σκέψης και τους συλλογισμούς που καταγράφουμε και μελετάμε στο 13ο Κεφάλαιο.

Όπως ήδη επισήμανα, ο όγκος της ύλης και ο ρυθμός παρουσίασής της στα περισσότερα μαθήματα γενικής μόρφωσης στις θετικές επιστήμες αποκλείουν χρονοβόρες λειτουργίες σκέψης, συλλογισμού και κατανόησης. Οι περισσότεροι μαθητές, λοιπόν, ωθούνται στην τυφλή απομνημόνευση και καταλήγουν να θεωρούν ότι η γνώση και η κατανόηση εμποδίζουν την απομνημόνευση των όρων και των προτάσεων. Πράγματι, δεν επιμένουμε στην εκτέλεση συλλογισμών από τους μαθητές ούτε τους εξετάζουμε σ' αυτό επειδή είναι «πολύ δύσκολο». Τους εξετάζουμε, σχεδόν αποκλειστικά, στην απομνημόνευση των τελικών συμπερασμάτων. Έτσι όμως δεν υπάρχει ελπίδα να αναπτυχθεί η γνώση και η κατανόηση που χαρακτηρίζουν τη γνήσια καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες. Δεν αναπτύσσεται, επίσης, η καλλιέργεια σε *οποιοδήποτε* πεδίο όπου είναι απαραίτητη η εκτέλεση αφηρημένων λογικών συλλογισμών.

Αν θέλουμε πραγματικά να πετύχουμε τους σκοπούς της γενικής εκπαίδευσης, είναι ουσιαστικό να στηριχθούμε στο ότι οι μαθητές μπορούν *όντως* να αναπτύξουν και να χρησιμοποιήσουν τη νοημοσύνη τους. Κατόπιν, πρέπει να τους δώσουμε την ευκαιρία να στοχαστούν, να συλλογιστούν και να αναπτύξουν τη διανοητική ικανότητά τους, τροφοδοτώντας τους με ύλη που το επίπεδό της και ο ρυθμός παρουσίασής της καθιστά δυνατή την αφομοίωσή της. Η γνησιότητα της κατανόησης μιας περιορισμένης σε έκταση ύλης ουσιαστικού περιεχομένου πρέπει, όσο κι αν κουράζει, να ελέγχεται με υψηλότερες πνευματικές προδιαγραφές και υψηλότερα πνευματικά κριτήρια από εκείνα που απαιτεί ο έλεγχος της ορολογίας προχωρημένων ή περιορισμένων θεμάτων που έχει απομνημονεύσει ο μαθητής.

12.10 Το πρόβλημα της εκπαίδευσης των καθηγητών και των δασκάλων

Δεν είναι δύσκολο να αντιληφθούμε ότι για να κατανοήσει καλύτερα το ευρύ κοινό το περιεχόμενο, τις μεθόδους, τα όρια και τον κοινωνικό ρόλο των θετικών επιστημών, η πρωτοβάθμια και η δευτεροβάθμια εκπαίδευ-

ση ασκούν ουσιαστική επιρροή και διαθέτουν την απαραίτητη αποτελεσματικότητα. Δεν θέλω να πω ότι στις μικρές τάξεις του σχολείου πρέπει να εισαγάγουμε σύνθετες γνώσεις ανώτερου επιπέδου: σ' αυτό το στάδιο, οι μαθητές είναι ανέτοιμοι για μια τέτοια συζήτηση. Μπορούμε, ωστόσο, να προετοιμάσουμε το έδαφος, ώστε ο ενήλικος, ώριμος πια, να προχωρήσει στην απαιτούμενη σύνθεση των γνώσεών του.

Αν ο μαθητής κατανοήσει όντως τις βασικές έννοιες που είναι δυνατό να αναπτυχθούν πλήρως στο δημοτικό και το γυμνάσιο, παράλληλα με την ανάπτυξη της ικανότητάς του για εκτέλεση αφηρημένων λογικών συλλογισμών, τότε στο λύκειο και το πανεπιστήμιο η διδασκαλία διευκολύνεται σημαντικά. Το επίπεδο γνώσεων και αντίληψης των μαθητών συντελεί ώστε η συζήτηση των φιλοσοφικών, ιστορικών, ηθικών και κοινωνικών ζητημάτων να είναι γόνιμη και ουσιαστική. Έτσι οι μαθητές θα κατορθώσουν να διεισδύσουν ακόμα και σε σύγχρονα θέματα των θετικών επιστημών που σήμερα τους φαίνονται απελπιστικά ακατανόητα. Αν διαθέτουν αυτό το προχωρημένο υπόβαθρο, ακόμα και το σύστημά μας (της «μαζικής παραγωγής») με τις παραδόσεις μπροστά σε πολυπληθή ακροατήρια, είναι δυνατό να γίνει πιο ουσιαστικό, αν όχι ιδανικό.

Προς το παρόν, μια τέτοια προσπάθεια εμποδίζεται όχι επειδή λείπει το κατάλληλο πρόγραμμα σπουδών στην πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια εκπαίδευση, αλλά επειδή η εκπαίδευση των δασκάλων και των καθηγητών στις θετικές επιστήμες είναι ανεπαρκής. Είναι αδύνατο να υπάρξει πρόγραμμα σπουδών, οσοδήποτε υψηλού επιπέδου, για να καλλιεργηθεί η ικανότητα στοχασμού, εκτέλεσης συλλογισμών και αντίληψης που δεν θα επηρεάζεται από τον διδάσκοντα. Ο διδάσκων μπορεί πάντοτε να αναιρέσει το σκοπό του προγράμματος με τη στάση του, με τα αρνητικά σχόλιά του και, κυρίως, με την επιλογή των θεμάτων στις εξετάσεις. Η πραγματική αξία του πνευματικού περιεχομένου ενός μαθήματος δεν προσδιορίζεται από το είδος των εγχειριδίων, αλλά από το είδος των εξετάσεων.* Αν θέλουμε να εφαρμόσουμε με επιτυχία βελτιωμένα προγράμματα σπουδών, πρέπει να διαθέτουμε δασκάλους και καθηγητές που θα μπορούν να χρησιμοποιούν τα μέσα διδασκαλίας. Αυτό σημαίνει ότι έχουν κατανοήσει βαθιά το περιεχόμενο του μαθήματος, καθώς και τον βαθύτερο σκοπό και το σχεδιασμό του προγράμματος. Η δεύτερη προϋπόθεση είναι αδύνατο να υπάρξει χωρίς την πρώτη.

Λόγου χάρη, η αιτία της περιορισμένης επιτυχίας ορισμένων εγχειριδίων της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης (π.χ. του «Elementary Science Study» Webster Division, McGraw-Hill Book Co., St. Louis, MO, και του «Science

* Σε αυτή τη φράση, ο συγγραφέας κάνει λογοπαίγνιο μεταξύ των αγγλικών λέξεων test (=εξέταση) και text (=εγχειρίδιο). (Σ.τ.μ.)

Curriculum Improvement Study» Delta Education, Nashua, NH) δεν είναι η εγγενής αδυναμία του μορφωτικού υλικού. Η αιτία βρίσκεται μάλλον στο ότι οι σχολές δεν κατορθώνουν τελικά να προετοιμάσουν δασκάλους με την απαραίτητη γνώση και αντίληψη στις θετικές επιστήμες, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιήσουν και να εφαρμόσουν αποτελεσματικά αυτά τα συστήματα. Στο Πανεπιστήμιο της Ουάσινγκτον, δουλεύοντας με δασκάλους που ήδη υπηρετούν ή ακόμα δεν έχουν αρχίσει να υπηρετούν σε σχολεία, έχουμε επισημάνει την ύπαρξη δύο κατηγοριών, που αρχικά δεν διακρίνονται μεταξύ τους: η πλειονότητα χρησιμοποιεί μάλλον συγκεκριμένους παρά αφηρημένους συλλογισμούς· δεν μπορεί να εκτελέσει συλλογισμούς που να περιλαμβάνουν λόγους και την πράξη της διαίρεσης· αποτυγχάνει σε δοκιμασίες ελέγχου μεταβλητών· δεν μπορεί να φανταστεί με αφηρημένο τρόπο το πιθανό ή το εύλογο αποτέλεσμα της μεταβολής που επιβάλλουμε σε κάποιο σύστημα. Η «γνώση» τους, σχετικά με τις θετικές επιστήμες, περιλαμβάνει αποκλειστικά απομνημόνευση ονομάτων, φράσεων και τεχνικών όρων. Μάλιστα, επειδή δεν κατανοούν με λειτουργικό τρόπο τους όρους, σε καμιά περίπτωση δεν μπορούν να εκτελέσουν συλλογισμούς με τη βοήθειά τους.

Με άλλα λόγια, αν οι δάσκαλοί μας της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης έχουν παρακολουθήσει κάποια μαθήματα θετικών επιστημών, τότε τα μαθήματα είναι του είδους που επικρίναμε στο εδάφιο 12.4. Είναι απολύτως σαφές ότι αυτές οι σειρές μαθημάτων δεν βοηθούν τον μελλοντικό δάσκαλο ούτε να εξασκήσει την ικανότητα εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών ούτε να κατανοήσει το περιεχόμενο της ύλης. Το μόνο που του μένει είναι να μισοθυμάται «συρμούς» λέξεων, λόγου χάρη «πυρήνας», «λείξερ», «παράξενα σωματίδια», «στροφορμή», «μαύρες τρύπες» κ.ά. Ταυτόχρονα, δεν έχει καταλάβει το νόημα της πυκνότητας και τη σχέση της με την πλεύση και τη βύθιση των σωμάτων, το νόμο της αδράνειας και τη σχέση του με το γιατί πιστεύουμε ότι η Γη και οι πλανήτες στρέφονται γύρω από τον Ήλιο, τη διάκριση μεταξύ της θερμότητας και της θερμοκρασίας. Δεν έχει επίσης κατανοήσει την αιτία των φάσεων της Σελήνης, την παρατηρούμενη φαινομενική ετήσια κίνηση του Ηλίου, τον τρόπο προσδιορισμού της διεύθυνσης «βορρά-νότου» ή του πότε είναι μεσημέρι και πότε μεσάνυχτα, την έννοια του ηλεκτρικού ρεύματος και τη συμπεριφορά του σε πολύ απλά κυκλώματα με αντιστάσεις, τα στοιχειώδη χαρακτηριστικά της κίνησης των κυμάτων, τα φαινόμενα του φωτός που κυριαρχούν στην καθημερινή ζωή κτλ.

Το καλύτερο πρόγραμμα πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης στις θετικές επιστήμες είναι μάλλον εκείνο που επιδιώκει να αναλύσει την καθημερινή εμπειρία παρά εκείνο που χρησιμοποιεί την «απόκρυφη» ορολογία της σύγχρονης φυσικής και απευθύνεται μόνο σε μυημένους. Οι δάσκαλοι ανακαλύπτουν, ωστόσο, ότι από την άποψη των βασικών γνώσεων, βρίσκονται

στο ίδιο επίπεδο με τους μαθητές και χάνουν την αυτοπεποίθησή τους. Αποτέλεσμα: δεν μπορούν να χρησιμοποιήσουν το εκπαιδευτικό υλικό. Έχω ακούσει τίμιους και ευαίσθητους δασκάλους να παρουσιάζουν αυθόρμητα, μ' αυτά ακριβώς τα λόγια, την κατάστασή τους.

Κατ' επανάληψη στην έρευνά μας, έχουμε επιβεβαιώσει την εμπειρική παρατήρηση ότι αν οι ενήλικοι (δάσκαλοι της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης που, ήδη, υπηρετούν ή αδιόριστοι) στην παιδική ηλικία τους δεν είχαν ποτέ τη μαθησιακή εμπειρία της εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών και της κατανόησης των εννοιών, την οποία ενθαρρύνει το πρόγραμμα σπουδών της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης, τότε αποκτούν αυτές τις ικανότητες συναντώντας και ξεπερνώντας τα ίδια εμπόδια με τα παιδιά και δοκιμάζοντας τις ίδιες δυσκολίες μ' αυτά. Το γεγονός ότι είναι ενήλικοι, ουσιαστικά δεν βοηθάει. Μάλιστα, ο ρυθμός κατανόησης των ενηλίκων είναι, συνήθως, μικρότερος από των παιδιών.

Το μεγαλύτερο τμήμα της προσπάθειας που καταβάλλεται σε σύντομα σεμινάρια, που έχουν σκοπό να βοηθήσουν τους δασκάλους να εφαρμόσουν ένα νέο πρόγραμμα σπουδών του δημοτικού, πάει εντελώς χαμένο: πρέπει να προηγηθεί η καλλιέργεια των προαπαιτούμενων γνώσεων. Το υπόβαθρο που οι περισσότεροι δάσκαλοι αποκτούν στο πανεπιστήμιο βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο μ' εκείνο των μαθητών τους. Είναι απατηλό να ελπίζουμε ότι μια σύντομη «κατήχηση» για τη φιλοσοφία του προγράμματος, ακολουθούμενη από μια σύντομη εξέταση λίγων ενδεικτικών εννοιών ύλης, οδηγεί στην κατανόηση του περιεχομένου του. Είναι επίσης απατηλό να ελπίζουμε ότι από τη στιγμή που οι δάσκαλοι θα αρχίσουν να διδάσκουν ελκυστικά και διαυγή θέματα, τα μαθαίνουν μαζί με τα παιδιά. Έχουμε ανακαλύψει ότι μόνον αν ο δάσκαλος «διασχίσει» αργά και υπομονετικά την ύλη και ασκηθεί στην εκτέλεση αφηρημένων λογικών συλλογισμών, αποκτά την απαραίτητη αυτοπεποίθηση για να εφαρμόσει αποτελεσματικά το πρόγραμμα σπουδών [Arons (1977)]. Εν τω μεταξύ, θα συνεχίσουμε να «παράγουμε» δασκάλους και καθηγητές που από τη στιγμή που παίρνουν το πτυχίο τους χρειάζονται «θεραπεία» εκτός κι αν τροποποιήσουμε το πρόγραμμα των πανεπιστημιακών σπουδών τους. Αυτή η κατάσταση, ωστόσο, δεν είναι αναπόφευκτη. Έρευνες της ομάδας μας έδειξαν ότι αν δώσουμε την ευκαιρία τους καθηγητές και στους δασκάλους (που πρόκειται να υπηρετήσουν στα σχολεία ή ήδη υπηρετούν) να ασχοληθούν με το εκπαιδευτικό υλικό και να το μελετήσουν με ρυθμό που επιτρέπει την κατανόηση και την αφομοίωσή του, οι περισσότεροι αναπτύσσουν όντως την απαιτούμενη ικανότητα εκτέλεσης συλλογισμών και κατανοούν την ύλη. Αυτό το γεγονός τους γεμίζει ικανοποίηση. Απλώς, δεν τους δίνεται η ευκαιρία.

Άλλη ένδειξη του ότι το υπόβαθρο των διδασκόντων δεν επαρκεί για να ανταποκριθούν σε νέα προγράμματα σπουδών, είναι ότι αντιδρούν ακόμα κι αν τους προσφέρεται το καλύτερο εκπαιδευτικό υλικό. Σε ορισμένες

περιπτώσεις που το υλικό έχει ήδη αγοραστεί από το σχολείο, παραμένει κλειδωμένο στην αποθήκη, και οι διδάσκοντες χρησιμοποιούν τα παλαιά εγχειρίδια. Σε άλλες περιπτώσεις, επειδή αισθάνονται ανασφαλείς, βρίσκουν ότι το νέο υλικό είναι «πολύ δύσκολο» για το παιδί, χωρίς να αντιλαμβάνονται ότι το πρόβλημα βρίσκεται στο ότι οι ίδιοι δεν το κατανοούν. Συνεργάζονται, λοιπόν, μεταξύ τους και κατευθύνουν τις ενέργειές τους και τις καλές προθέσεις τους για να συγγράψουν τα δικά τους υλικά. Μόλις, ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι άχρηστα κείμενα γεμάτα λάθη, παρανοήσεις και λανθασμένες διατυπώσεις, που πιθανόν έχουν αρνητική παιδευτική αξία. (Πρέπει πάλι να υπογραμμίσουμε ότι το υπάρχον άριστο εκπαιδευτικό υλικό για το δημοτικό έχει αναπτυχθεί από ώριμους και ικανότατους επιστήμονες που διαθέτουν τις απαραίτητες γνώσεις και αντιλήψεις.)

Η έρευνα στη διδασκαλία και τη μάθηση ίσως μας δώσει καλύτερο εκπαιδευτικό υλικό. Αυτό το υλικό, ωστόσο, ουδέποτε θα έχει όντως ευρεία επίδραση στα σχολεία, εκτός αν δημιουργήσουμε εκπαιδευτικούς που μπορούν να το εφαρμόσουν. Το πρόβλημα είναι πρωτεύον και έχει τις ρίζες του στο πανεπιστημιακό επίπεδο. Οι κατηγορίες και οι αντεγκλήσεις που στρέφονται εναντίον των δασκάλων και των καθηγητών στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αδικαιολόγητες και άδικες: «Το σφάλμα, αγαπητέ Βρούτε, δεν βρίσκεται στα άστρα μας...»

Εκτός από την κατανόηση της ύλης και την ενίσχυση της ικανότητας να εκτελούνται αφηρημένοι λογικοί συλλογισμοί, άλλη πλευρά της εκπαίδευσης των δασκάλων που αξίζει να προσέξουμε είναι η συμπεριφορά μέσα στην τάξη. Τα καλύτερα προγράμματα εκπαίδευσης στο δημοτικό δεν οργανώνονται γύρω από την παράδοση του μαθήματος με τη μορφή διάλεξης και κατ'ήχησης. Θεωρούν ότι η παρουσίαση πρέπει να είναι είδος εξερεύνησης, διαδικασία δοκιμής και λάθους, διαλόγου, παρουσίας επιχειρημάτων και ερμηνειών με τη συμμετοχή των ίδιων των μαθητών. (Αποδεικνύεται ότι αν εφαρμοστεί ικανοποιητικά ένα τέτοιο πρόγραμμα σπουδών, αυξάνεται αυτόματα η ικανότητα των παιδιών να κατανοούν ό,τι διαβάζουν και να εκτελούν αριθμητικούς συλλογισμούς [Bredderman (1982)· Shymansky κ.ά. (1983)· Wellman (1978)]. Σε πολλές περιπτώσεις, είναι σημαντικό, όταν οι μαθητές ακολουθούν λανθασμένο τρόπο σκέψης, να μην τους παρουσιάζει ο δάσκαλος με κατηγορηματικό και αποφθεγματικό τρόπο τη «σωστή απάντηση», αλλά να στρέφει την προσοχή τους στις ασυνέπειες ή τις αντιφάσεις των συλλογισμών τους και να τους οδηγεί στην αναθεώρηση και τη διόρθωσή τους. Μ' αυτήν τη συμπεριφορά του δασκάλου, οι μαθητές αποκτούν αυτοπεποίθηση, σιγουριά και σταθερό έλεγχο πάνω στις έννοιες και τον τρόπο εκτέλεσης συλλογισμών. Η παρουσίαση με τη μορφή διάλεξης και διακηρύξης της «σωστής απάντησης» είναι πολύ ευκολότερη και αποτελεί καταφύγιο για το δάσκαλο που δεν αισθάνεται ασφαλής με τις γνώσεις του.

Αλλά ακόμα κι αν ο δάσκαλος έχει το απαιτούμενο υπόβαθρο, είμαστε πολύ απαιτητικοί αν περιμένουμε ότι ένα νεαρό άτομο που για πρώτη φορά «ρίχνεται» σε τάξη θα έχει την εκλεπτυσμένη συμπεριφορά που προαναφέραμε. Οι δάσκαλοι που δεν άρχισαν ακόμα να υπηρετούν σε σχολείο είναι απαραίτητο να εξασκηθούν στον τρόπο διδασκαλίας. Πολλοί ερευνητές της χώρας μας και του εξωτερικού συμφωνούν ότι οι δάσκαλοι τείνουν να διδάσκουν όπως διδάχθηκαν οι ίδιοι. Αν στους δασκάλους που δεν υπηρετούν ακόμα σε σχολείο δίνουμε απλώς διαλέξεις στην τάξη, το μάθημά τους θα έχει επίσης τη μορφή διάλεξης. Αυτό συμβαίνει άσχετα από την «κατήχηση» που έχουν παρακολουθήσει (επίσης με μορφή διάλεξης) για τις «μεθόδους» διδασκαλίας. Αν θέλουμε να εφαρμόσουμε το πρόγραμμα διδασκαλίας θετικών επιστημών στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση, πρέπει να δημιουργήσουμε ολιγομελή τμήματα εκπαίδευσης δασκάλων. Έτσι, η σειρά μαθημάτων στις θετικές επιστήμες γίνεται και σειρά μαθημάτων για τις μεθόδους διδασκαλίας· αυτό είναι απαραίτητο. Αν οι δάσκαλοι εκπαιδευτούν μ' αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να αρχίσουμε να ελπίζουμε ότι θα μεταβληθεί η συμπεριφορά τους στο σχολείο. Αυτή η μεταβολή, που δεν μπορεί να είναι αποτέλεσμα μόνο της αλλαγής του εκπαιδευτικού υλικού, αυξάνει σημαντικά τη δυνατότητα καλλιέργειας των σπουδαστών στις θετικές επιστήμες στο λύκειο ή το πανεπιστήμιο.

12.11 Συμβολή του υπολογιστή

Από την έρευνα και τη μελέτη μεγάλου δείγματος μαθητών και εισαγωγικών σειρών μαθημάτων, προκύπτει ότι οι μαθητές δεν κατορθώνουν να αφομοιώσουν απολύτως μια έννοια ή έναν τρόπο εκτέλεσης συλλογισμών, εκτός κι αν μπορέσουν να τα προσεγγίσουν με εξατομικευμένη συζήτηση σωκρατικού τύπου. Το αποφασιστικό βήμα δεν γίνεται με την εργασία για το σπίτι, με τις ασκήσεις, με τα τεστ ή με την παθητική ακρόαση των επεξηγήσεων, όσο διανυγή κι αν είναι αυτά. Το «ρήγμα» δημιουργείται βαθμιαία, όταν ο σπουδαστής αρχίζει να αρθρώνει με *δικά του λόγια* ιδέες, συμπεράσματα και συλλογισμούς [Arons (1976), (1977), (1982)]. Αυτή τη διαπίστωση πρέπει να τη λάβουν υπόψη τους τόσο οι δάσκαλοι όσο και οι καθηγητές.

Θέματα που παρουσιάζουν δυσκολία είναι η εκτέλεση αριθμητικών συλλογισμών με τη χρήση των λόγων και της διαίρεσης, καθώς και η μετάφραση συμβόλων σε λέξεις και λέξεων σε σύμβολα (δηλαδή, η μετάφραση γραφημάτων, λόγου χάρι της γραφικής παράστασης της θέσης ως προς το χρόνο και της ταχύτητας ως προς το χρόνο στην κινηματική, με λέξεις και με αναπαράσταση της αντίστοιχης κίνησης με το χέρι· η μετάφραση της εκφώνησης ενός προβλήματος σε αριθμητικούς τύπους και η μετάφραση των

αριθμητικών ή αλγεβρικών εκφράσεων σε λέξεις κτλ.). Δυσκολία παρουσιάζει, επίσης, η διάκριση με λειτουργικό τρόπο της «θερμότητας» από τη «θερμοκρασία», η διαμόρφωση και η χρησιμοποίηση του προτύπου της ερμηνείας των φάσεων της Σελήνης (δηλαδή, η επιτυχής ενασχόληση με ερωτήματα του είδους «Θα περιμένετε ποτέ να δείτε την Πανσέληνο να ανατέλλει τα μεσάνυχτα; Ναι ή όχι και γιατί;»). Τέλος, δυσκολία παρουσιάζει η διαμόρφωση και η χρήση του προτύπου του ηλεκτρικού ρεύματος και της έννοιας της ηλεκτρικής αντίστασης στην πρόβλεψη των μεταβολών της έντασης της φωτοβολίας, αν τροποποιήσουμε (με βραχυκύκλωμα, αφαίρεση ή πρόσθεση λαμπτήρων κτλ.) ένα απλό κύκλωμα που αποτελείται από μπαταρίες και λαμπάκια [Arons (1982)].

Η απαραίτητη εξατομικευμένη συζήτηση με κάθε μαθητή είναι δυνατό να διαρκέσει είκοσι, τριάντα λεπτά ή περισσότερο. Σε ολιγομελείς τάξεις, κάτι τέτοιο μόλις που μπορεί να το πετύχει ο διδάσκων· για μεγαλύτερες τάξεις δεν συζητείται. Υιοθετούμε, λοιπόν, τη λανθασμένη άποψη ότι οι μαθητές που δεν μπορούν να αφομοιώσουν αυτές τις απλές και βασικές έννοιες και τους τρόπους συλλογισμού δεν έχουν θέση σε τμήματα θετικών επιστημών. Αν διερευνήσουμε, ωστόσο, αυτή την «ιδιοτελή» άποψη, καταλήγουμε αν όχι στη διεύρυνση των στόχων μας, τουλάχιστον σε μια λιγότερο «χονδροειδή» αντίληψη. Μεταξύ των μαθητών που αποτυγχάνουν ή εξαφανίζονται από τα μαθήματά μας στο λύκειο ή το πανεπιστήμιο (ή, κατά κύριο λόγο, ουδέποτε εγγράφονται σ' αυτά, εξαιτίας του ενδόμυχου φόβου τους και της ανασφάλειάς τους) και οι οποίοι θα είχαν «διασωθεί» με εξατομικευμένη βοήθεια σε στρατηγικά σημεία της εκπαίδευσής τους, υπάρχουν πολλά υποσχόμενες μειονότητες μαθητών, καθώς και η πλειονότητα των μελλοντικών δασκάλων πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης, για να μην αναφερθούμε στους υπόλοιπους.

Ιδού, λοιπόν, ένας τομέας στον οποίο μπορεί να βοηθήσει η σύγχρονη τεχνολογία. Η εμφάνιση προσωπικών υπολογιστών που μπορούν να σχεδιάζουν γραφήματα παρέχει τη δυνατότητα πραγματοποίησης της εξατομικευμένης «συνομιλίας» χωρίς τη χρήση αριθμητικών τιμών [Arons (1984d), (1986)]. Το πρόβλημα ανάγεται στη σύνταξη αποτελεσματικών «διαλόγων» που θα κατευθύνουν τους μαθητές να υπερπηδήσουν τις πρώτες σοβαρές δυσκολίες. Θα τους βοηθήσουν, επίσης, στην περαιτέρω μελέτη τους καθώς η εξάρτηση από τη βοήθεια της σωκρατικής μεθόδου θα ελαττώνεται.

Η σύνταξη αποτελεσματικών διαλόγων θα στηρίζεται, αναγκαστικά, κυρίως στα αποτελέσματα της έρευνας στη διδασκαλία, στη μάθηση και στην ανάπτυξη της γνώσης. Ο επιδέξιος προγραμματιστής πρέπει να έχει ευρεία ενημέρωση για το τι έχουμε μάθει γενικά για τον τρόπο που αναπτύσσεται η γνώση και για τον τρόπο εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών. Πρέπει, επίσης, να χρησιμοποιεί εκτενώς τα λεπτομερή δεδομένα για τον τρόπο που κάθε ιδιαίτερη έννοια αναπτύσσεται στη σκέψη των

μαθητών. Να χρησιμοποιεί, δηλαδή, τα αποτελέσματα των ερευνών, όπως εκείνα που συζητήσαμε στο παρόν βιβλίο και καταγράφονται στη βιβλιογραφία. Πολλοί έχουμε την τάση να κάνουμε υποθέσεις για το τι σκέφτονται οι μαθητές και τι παρανοούν σε διάφορες περιπτώσεις. Επειδή αυτές οι υποθέσεις αποτελούν μόνιμα επέκταση της προσωπικής εμπειρίας μας και των πρωτογενών αντιλήψεών μας, στην πραγματικότητα σπανίως είναι σωστές. Συχνά, λοιπόν, δεν αντιλαμβανόμαστε ή αποκρύπτουμε τις πραγματικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι μαθητές.

Κι όμως, για τη δημιουργία ενός πραγματικά αποτελεσματικού «διαλόγου» στον υπολογιστή, η σημαντικότερη (και δυσκολότερη) πρόβλεψη που πρέπει να κάνει ο συντάκτης του προγράμματος είναι εκείνη που κατευθύνει το μαθητή να διορθώσει τις λανθασμένες απαντήσεις (τελικά, είναι εύκολο να ασχοληθούμε με τις σωστές). Ο συντάκτης μπορεί να πετύχει τη διόρθωση των παρανοήσεων και των λανθασμένων συλλογισμών με σωκρατική μέθοδο μόνον αν γνωρίζει εκ των προτέρων ποιες λανθασμένες απαντήσεις είναι πιθανό να δοθούν στην πραγματικότητα. Για να δημιουργήσει, λοιπόν, κάποιο αξιόλογο εκπαιδευτικό υλικό, πρέπει να είναι απολύτως μυημένος στα αποτελέσματα της έρευνας στη διδακτική.

12.12 Διδάγματα από την πείρα

Λόγω της αναθέρμανσης του παλαιού ενδιαφέροντος για την εκπαίδευση των θετικών επιστημών και των μηχανικών, καθώς επίσης και για το πώς το ευρύ κοινό αντιλαμβάνεται τα αποτελέσματα της επιστήμης και της τεχνολογίας, ορισμένοι ερευνητές εντόπισαν τους λόγους «αποτυχίας» των προγραμμάτων σπουδών τις δεκαετίες του '50 και του '60. Ανέλαβαν, λοιπόν, νέα προσπάθεια συγγραφής σύγχρονων εγχειριδίων, ελπίζοντας ότι αυτή τη φορά θα είναι «καλύτερα» και αποτελεσματικότερα. Αν και το υπάρχον εκπαιδευτικό υλικό είναι δυνατό να βελτιωθεί από την άποψη της ποιότητας των παιδαγωγικών χαρακτηριστικών του, κάτι τέτοιο δεν θα ξεπερνούσε τα πραγματικά εμπόδια και τα βαρύτερα προβλήματα. Το εκπαιδευτικό υλικό, όσο «διαυγές», «επιδέξιο» και «επινοητικό» κι αν είναι, δεν μπορεί να «αυτοδίδαχθεί» [Arons (1981a)].

Προσωπικά, δεν θεωρώ ότι η εφαρμογή του προγράμματος διδασκαλίας στις θετικές επιστήμες τις δεκαετίες του '50 και του '60 απέτυχε. Την εποχή που ξεκίνησε η εν λόγω προσπάθεια, κυρίως με την προτροπή του Εθνικού Ιδρύματος Θετικών Επιστημών, ήταν μεγάλη ανάγκη να υπάρξουν νέα εγχειρίδια που βασίζονταν ιδιαίτερα στην εμπειρία του πειράματος και της παρατήρησης. Τα εγχειρίδια που υπήρχαν ήταν απαρχαιωμένα, γεμάτα λάθη και λανθασμένες διατυπώσεις, στείρα από πνευματική άποψη. Για πολλές γενιές το ένα εγχειρίδιο ήταν αντιγραφή του άλλου από συγγραφείς

που ούτε οι ίδιοι δεν κατανοούσαν ικανοποιητικά το περιεχόμενο.

Στη μεθυστική, κατανυκτική ατμόσφαιρα που υπήρχε πριν από 30 χρόνια, ηγετικές φυσιογνωμίες σε πεδία των θετικών επιστημών και της τεχνολογίας, διαθέτοντας πλούσια φαντασία, εισήγαγαν στα νέα εκπαιδευτικά υλικά σύγχρονες απόψεις σε σωστή λογική βάση. Είναι αληθές ότι η ποιότητα, από διδακτική άποψη, του υλικού δεν ήταν ομοιόμορφα υψηλή. Σε ορισμένα εγχειρίδια, ο ρυθμός ανάπτυξης των θεμάτων ήταν πολύ υψηλός για την ηλικία των ατόμων στα οποία απευθύνονταν. Άλλα εγχειρίδια άρχιζαν διακηρύσσοντας τελικά συμπεράσματα, που προκύπτουν από πολύπλοκες διερευνήσεις, και απαιτούσαν από τους μαθητές να τα απομνημονεύσουν χωρίς να εξετάσουν βαθύτερα ερωτήματα του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;» Κατόπιν, «έσερναν» τους μαθητές σε ακατανόητα συμπεράσματα που προέκυπταν από τις αρχικές, αστήρικτες διακηρύξεις. Πολλοί από τους επιστήμονες που ανέπτυξαν το εν λόγω διδακτικό υλικό δεν είχαν το προνόμιο να γνωρίζουν όσα μάθαμε αργότερα για την πραγματική ικανότητα μιας ομάδας ατόμων ορισμένης ηλικίας να εκτελεί αφηρημένους λογικούς συλλογισμούς [Arons (1976)· Chiappetta (1976)· Karplus κ.ά. (1979)· McKinnon και Renner (1971)]. Αποτέλεσμα: αναλώθηκαν σε αφαιρέσεις που ξεπερνούσαν κατά πολύ τη δυνατότητα του μαθητή (και πολλών διδασκόντων) προς τον οποίο απευθύνονταν. Ιδιαίτερα οι μαθηματικοί υπέφεραν από αυτόν τον αποπροσανατολισμό.

Κι όμως, μολονότι η προσπάθεια δεν έγινε στο κατάλληλο περιβάλλον και δεν ήταν προσαρμοσμένη στο κοινό προς το οποίο απευθυνόταν, εκπονήθηκαν αρκετά άριστα εγχειρίδια. Κατά τη γνώμη μου, τα καλύτερα είναι όσα σχεδιάστηκαν για το δημοτικό σχολείο [λόγου χάρη, το «Elementary Science Study» (1968) και το «Science Curriculum Improvement Study» (1968)]. Σ' αυτά τα υλικά, το παιδί αρχίζει από το μηδέν, χωρίς να προϋποτίθεται «γνώση» τεχνικών όρων. Πρώτα έρχονται οι ιδέες και κατόπιν οι ονομασίες. Οι ιδέες, μάλλον, συντίθενται με βάση την πείρα που αποκτάται με την παρατήρηση παρά συλλαμβάνονται στις παρουσιάσεις και τις διακηρύξεις με τη μορφή διάλεξης. Οι συλλογισμοί αρχίζουν από το επίπεδο που συνδέεται άμεσα με την εμπειρία. Κατόπιν, υπό τον όρο ότι ο μαθητής καθοδηγείται από ικανό δάσκαλο, προχωρούν βαθμιαία σε αφηρημένο επίπεδο. Επαναλαμβάνόμενες πνευματικές εμπειρίες αυτού του είδους καλλιεργούν την ικανότητα εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών και βοηθούν στην ανάπτυξη της. Ορισμένα «υγιή» και εν δυνάμει αποτελεσματικά υλικά αναπτύχθηκαν και για το γυμνάσιο. Σε πολλές περιπτώσεις, ωστόσο, ήταν περισσότερο προσαρμοσμένα σε μαθητές ανώτερου επιπέδου και όχι στην πλειονότητα του κοινού που οι δημιουργοί τους είχαν κατά νου. Αν και σε ορισμένες περιπτώσεις τα εν λόγω υλικά ταιριάζουν ικανοποιητικά σε μαθητές μεγαλύτερους κατά ένα, δύο ή ακόμα και τρία χρόνια, σπανίως χρησιμοποιούνται για μαθητές μεγαλύτερης ηλικίας, λόγω της αναστολής

που προκαλεί η σαφής αναφορά ότι απευθύνονται σε μικρότερες ηλικίες.

Το συμπέρασμα είναι ότι αναπτύχθηκε, *όντως*, σημαντικός όγκος υγιούς και χρήσιμου, από παιδαγωγική άποψη, υλικού παρά τις ατέλειες και τη δυσαρμονία του. Ακόμα και ύστερα από είκοσι ή περισσότερα χρόνια, λίγα απ' αυτά τα υλικά είναι απαρχαιωμένα και ξεπερασμένα. Η υιοθέτησή τους και η εφαρμογή τους, ωστόσο, μας απογοήτευσε. Ορισμένοι κριτικοί, λοιπόν, τα θεωρούν αποτυχημένα και θέλουν να ενεργοποιήσουν νέα έκρηξη ανάπτυξης παρόμοιου υλικού. Η αποτυχία που επικαλούνται, όμως, δεν οφείλεται στην κακή ποιότητα των υλικών· οφείλεται περισσότερο σε εξωτερικά αίτια, που ακόμα δεν έχουν ξεπεραστεί. Αν και το καλύτερο από τα εγχειρίδια που υπάρχουν δεν είναι, βεβαίως, η τελευταία λέξη εξέλιξης της διδακτικής και παρότι είναι δυνατό να γίνουν βελτιώσεις, υπό το φως των πρόσφατων γνώσεών μας για τη διδασκαλία και τη μάθηση, είμαι πεπεισμένος πως όταν η νέα γενιά υλικών υιοθετηθεί και εφαρμοστεί, «θα υποφέρει» από εκείνη ακριβώς την «ανεπάρκεια» που προκαλούν τα ίδια εξωτερικά αίτια.

Δύο ήταν οι κύριες αιτίες αυτής της αποτυχίας. Η πρώτη αφορούσε την αδυναμία της «επιμελητείας» να υποστηρίξει ικανοποιητικά τους δασκάλους που ρηφοκινδύνευαν στη δοκιμή του νέου διδακτικού υλικού. Υλικά που μπορούν να τα περιεργαστούν οι μαθητές και προορίζονται για εργαστηριακή χρήση απαιτούν συνεχή συντήρηση και ανεφοδιασμό. Επειδή οι δάσκαλοι έχουν πολλές ασχολίες και καθήκοντα, χρειάζονται σταθερή υποστήριξη όταν χρησιμοποιούν τα εν λόγω υλικά. Δεν μπορούν μαζί με τα υπόλοιπα καθήκοντά τους να ασχολούνται και με την απαραίτητη «επιμελητεία». Αν και παρασυρόμενοι από το αρχικό κύμα ενθουσιασμού τους είναι πιθανό να καταβάλουν αυτή την επιπλέον προσπάθεια (και αρκετοί το έκαναν), αυτή η προσπάθεια είναι αδύνατο να συνεχιστεί για πολύ. Ακόμα και στο πρώτο στάδιο, η απαραίτητη υποστήριξη κάποιας «επιμελητείας» σπάνια ήταν ισχυρή, και σύντομα, τη δεκαετία του '70, σταμάτησε επειδή εντάθηκαν οι οικονομικές πιέσεις που ασκούνταν στα σχολεία.

Σε κάθε εκπαιδευτική βαθμίδα, λοιπόν, ένα τρομερό εμπόδιο που πρέπει να ξεπεράσουμε είναι η έλλειψη υποστήριξης από κάποια επιμελητεία. Είναι απατηλό να υποθέτουμε ότι στο ευρύ κοινό θα καλλιεργηθεί επιτυχώς η βασική μόρφωση στις θετικές επιστήμες με διδακτικό υλικό που θα στηρίζεται μόνο στην προφορική διδασκαλία. Η απαραίτητη κατανόηση, η εκτέλεση συλλογισμών και η αφομοίωση των βασικών εννοιών και ιδεών θα αυξηθεί στα περισσότερα άτομα *μόνο* μέσα από την εμπειρία που προκύπτει από συγκεκριμένες παρατηρήσεις. Είναι αληθές ότι ορισμένα προικισμένα άτομα, χωρίς τη βοήθεια εκτέλεσης συγκεκριμένων παρατηρήσεων, διεισδύουν όντως στην επιστημονική κατανόηση και στον τρόπο έκτελεσης αφηρημένων συλλογισμών. Αυτό το μικρό τμήμα του πληθυσμού, ωστόσο, πραγματοποιεί *έτσι κι αλλιώς* αυτή τη διείσδυση (ίσως με κάποια

βραδύτητα) απλώς με τη βοήθεια των βιβλίων, των παραδόσεων, της εργασίας για το σπίτι και των επεξηγήσεων. Κατορθώνει να διεισδύσει στις ιδέες παρακάμπτοντας το εκπαιδευτικό σύστημα και όχι με τη βοήθειά του. Είμαστε όντως τυχεροί που υπάρχουν αυτά τα άτομα· αλλιώς, το επίπεδο της κάθε είδους βασικής μόρφωσης θα ήταν ακόμα χαμηλότερο. Κάθε φορά, ωστόσο, ο σκοπός μας είναι η γενναία αύξηση του πλήθους των ατόμων με βασική μόρφωση. Αυτός ο σκοπός επιτυγχάνεται μόνο αν δώσουμε την ευκαιρία στους μαθητές να έχουν απτή εμπειρία και τους προσφέρουμε σταθερή καθοδήγηση να αναγάγουν τον τρόπο διαμόρφωσης των εννοιών και εκτέλεσης συλλογισμών από το επίπεδο του συγκεκριμένου στο επίπεδο του αφηρημένου.

Η δεύτερη και ίσως σημαντικότερη αιτία της αποτυχίας των καλύτερων εκπαιδευτικών υλικών (συμπεριλαμβανομένων των υλικών τόσο στις θετικές επιστήμες όσο και στις κοινωνικές), κατά την υιοθέτηση και εφαρμογή τους, βρίσκεται στον τρόπο επιμόρφωσης των εκπαιδευτικών. Τεράστια χρηματικά ποσά έχουν διατεθεί και τεράστια προσπάθεια έχει καταβληθεί για να οργανωθούν θερινά σεμινάρια και ακαδημαϊκά προγράμματα μονοετούς διάρκειας υπό τη διεύθυνση του προσωπικού των λυκείων και των πανεπιστημίων. Ωστόσο, λίγα προγράμματα υπήρξαν ωφέλιμα. Κάθε φορά, οι οργανωτές των προγραμμάτων διαπίστωναν ότι οι εκπαιδευτικοί που παρακολουθούσαν τα προγράμματα είχαν κατανοήσει ελάχιστα τις έννοιες και το περιεχόμενο της ύλης που είχαν διδαχθεί ως μαθητές. Ανακάλυπταν ότι η ανάπτυξη των εννοιών στη σκέψη των εκπαιδευτικών βρισκόταν σχεδόν στο ίδιο επίπεδο με των μαθητών, τους οποίους οι εκπαιδευτικοί υποτίθεται ότι έπρεπε να διδάξουν. Οι εκπαιδευτές αντιλαμβάνονταν, λοιπόν, ότι έπρεπε να οδηγήσουν με βραδύ ρυθμό και προσοχή τους δασκάλους και τους καθηγητές μέσα από τις ίδιες πνευματικές εμπειρίες, τις οποίες στη συνέχεια οι εκπαιδευτικοί θα μετέφεραν στους μαθητές τους. Ωστόσο, στα περισσότερα επιμορφωτικά προγράμματα αυτή η ανάγκη δεν είχε γίνει κατανοητή ή δεν είχε εκτιμηθεί όσο έπρεπε. Θεωρούνταν, λανθασμένα, ότι οι δάσκαλοι του δημοτικού, αλλά και οι καθηγητές του γυμνασίου και του λυκείου, κατανοούν όντως τα στοιχεία της επιστήμης που διδάσκουν ή ότι αν η κατανόηση είναι ελλιπής, σύντομα την αναπτύσσουν μαζί με τους μαθητές τους, χρησιμοποιώντας απλώς νέα εξαιρετικής διαύγειας εκπαιδευτικά υλικά.

Στα θερινά σεμινάρια, λοιπόν, οι μετεκπαιδευόμενοι δίνουν διαλέξεις για την «εκπαιδευτική φιλοσοφία» των υλικών, χωρίς να κατανοούν την ουσία τους. Παρακολουθούν επίσης την παρουσίαση πιο προχωρημένων θεμάτων, για να διευρύνουν τις «αντιλήψεις» τους, πληροφορούμενοι τις σύγχρονες γνώσεις και την πρόοδο σε ποικίλα πεδία. Τα συγκεκριμένα θέματα, ωστόσο, τους είναι απολύτως ακατανόητα. Στις περισσότερες περιπτώσεις πρόκειται απλώς για μια επιπλέον σύντομη περιήγηση μέσα από σει-

ρές άσχετων και ακατάληπτων μαθημάτων, παρόμοιων μ' εκείνα που είχαν παρακολουθήσει στο πανεπιστήμιο. Οι γνώσεις αυτές, ωστόσο, ουδέποτε επέδρασαν στο επίπεδο της νόησής τους. Σε αυτή την περίπτωση, οι δάσκαλοι και οι καθηγητές δεν μπορούν να χειριστούν το νέο μορφωτικό υλικό με μεγαλύτερη επάρκεια απ' όση είχαν πριν παρακολουθήσουν τα προγράμματα επιμόρφωσης. Δεν είναι, λοιπόν, *δικό τους* σφάλμα το ότι δεν αντιλαμβάνονται την ανεπάρκειά τους. Δεν είναι, επίσης, *δικό τους* σφάλμα που, απογοητευμένοι από την εφαρμογή του νέου υλικού στην τάξη, αποδίδουν τα προβλήματα μάλλον στις δυσκολίες του υλικού παρά στη δική τους αδυναμία να το κατανοήσουν (αν και ακόμα αισθάνονται ανασφαλείς μ' αυτό το υλικό). (Σπεύδω να προσθέσω ότι δεν βάζω όλους τους εκπαιδευτικούς στο ίδιο «τσουβάλι». Γνωρίζω προσωπικά και ακούω συχνά ότι σε κάθε βαθμίδα υπάρχουν έξοχοι και ικανοί δάσκαλοι. Αποτελούν, ωστόσο, μικρό κλάσμα του εκπαιδευτικού πληθυσμού, για να μπορέσουν να συμβάλουν στη λύση του εθνικού προβλήματος.)

Αν θέλουμε να βελτιώσουμε το βαθμό κατανόησης από το ευρύ κοινό των δεδομένων των θετικών επιστημών, πρέπει να αντιμετωπίσουμε σθεναρά τους δύο σημαντικούς παράγοντες που προκαλούν την ανεπάρκεια που προαναφέραμε. Τα προβλήματα είναι πολύ δύσκολα: δεν είναι, ωστόσο, ενδογενώς άλυτα. Η θεραπεία είναι αναγκαστικά αρκετά δαπανηρή. Το δυσκολότερο πρόβλημα, ωστόσο, είναι το εξής: οι συνάδελφοι στα πανεπιστήμια πρέπει να αντιληφθούν ότι όντως υπάρχει πρόβλημα. Οι περισσότεροί τους λειτουργούν ακόμα στο πλαίσιο της αντίληψης ότι η εκπαίδευση των μελλοντικών εκπαιδευτικών (και όλων των υπόλοιπων σπουδαστών) είναι δυνατό να διεξαχθεί αποτελεσματικά, με ικανοποιητικά διευγείς προφορικές παρουσιάσεις της καθιερωμένης ύλης των εισαγωγικών μαθημάτων των θετικών επιστημών. Αν, όμως, συνεχίσουν με αυτή την πρακτική, δεν θα γίνει καμιά πρόοδος, άσχετα από την προσπάθεια για τη βελτίωση του διδακτικού υλικού.

Το εκπαιδευτικό υλικό, όσο μελετημένο κι αν είναι, ουδέποτε θα πραγματοποιήσει μόνο του τους στόχους μας. Βελτιώνεται το περιεχόμενο των μαθημάτων για τους προικισμένους μαθητές: δεν λύνεται, όμως, το πρόβλημα για την ευρεία, απολύτως σεβαστή, πλειονότητα των μαθητών. Το να «μαστορεύουμε» νέα εκπαιδευτικά υλικά χωρίς να δημιουργήσουμε τις προϋποθέσεις που προσπάθησα να προσδιορίσω, απορροφά συνεχώς τεράστια ποσότητα χρόνου και χρημάτων, χωρίς να οδηγεί σε πρόοδο: παραμένουμε ακριβώς στην ίδια κατάσταση. Έτσι, έχουμε νέα «σοδειά» παρόντων για την ανεπάρκεια και την ακαταλληλότητα των υλικών και, παράλληλα, αναθέρμανση της απαίτησης να αναπτυχθεί ένα νέο, άχρηστο ωστόσο, «κύμα» εκπαιδευτικού υλικού. Η καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες, πάντως, διευρύνει τον ορίζοντα της γενικής εκπαίδευσης.

13. ΚΡΙΤΙΚΗ ΣΚΕΨΗ¹

Η απλή, αλλά δύσκολη, τέχνη της εστίασης της προσοχής σε ένα θέμα, της προσεκτικής παρατήρησης, της παρακολούθησης ενός συλλογισμού, της ανακάλυψης μιας ασάφειας ή μιας λανθασμένης εξαγωγής συμπεράσματος, του ελέγχου υποθέσεων μέσω της συγκέντρωσης αντιπαραδειγμάτων, της οργάνωσης του χρόνου και της σκέψης με σκοπό τη μελέτη ενός ζητήματος — όλες αυτές οι τέχνες — ... δεν διδάσκονται «στον αέρα», αλλά μέσα από τις δυσκολίες ενός συγκεκριμένου θέματος. Δεν διδάσκονται σε μια ετήσια σειρά μαθημάτων· αποκτώνται βαθμιαία μέσα από δεκάδες συσχετίσεις.

Jacques Barzun

13.1 Εισαγωγή

Καμιά παρουσίαση εκπαιδευτικού προγράμματος, μεταρρυθμιστικής πρότασης ή πρότασης για τη δομή ενός μαθήματος δεν έχει γίνει μέχρι τώρα χωρίς να γίνει απότιση φόρου τιμής στον γενικό όρο «κριτική σκέψη» ή σε κάποιο συνώνυμό του. Ο χείμαρρος των αναφορών για την πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια εκπαίδευση που ξεχύθηκε τα τελευταία χρόνια δεν αποτελεί εξαίρεση: κάθε αναφορά, σε κάθε εκπαιδευτική βαθμίδα, επισημαίνει την ανάγκη να ενισχυθεί η ικανότητα σκέψης και εκτέλεσης συλλογισμών στη νεαρή ηλικία. Το αγαπημένο σύγχρονο κλισέ είναι: «ικανότητα στοχασμού ανώτερης τάξης». Λίγα, ωστόσο, από τα ντοκουμέντα που φτάνουν σ' εμένα προσπαθούν να συγκεκριμενοποιήσουν αυτή την έννοια, να παραθέσουν, δηλαδή, κάποιο λειτουργικό ορισμό της και παραδείγματα του τι είναι δυνατό να γίνει στην καθημερινή διδασκαλία, για να μετακινηθούμε προς τους διακηρυγμένους στόχους.

Σκοπός του παρόντος Κεφαλαίου, λοιπόν, είναι να αφαιρέσει το «περι-

1. Το παρόν Κεφάλαιο στηρίζεται σε ένα άρθρο που δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά στο «Liberal Education» [Arnold (1985)]. Τη στιγμή που γραφόταν, ο Καθηγητής Peter A. Facione (του Τμήματος Φιλοσοφίας του Πολιτειακού Πανεπιστημίου Fullerton της Καλιφόρνιας) ασχολείτο με το συντονισμό των απόψεων μιας επίλεκτης ομάδας μελετητών, που προσπαθούσαν να συμφωνήσουν σε έναν λειτουργικό ορισμό του όρου «κριτική σκέψη».

τύλιγμα» του όρου «κριτική σκέψη». Δηλαδή, να καταγράφει λίγες απλές και στοιχειώδεις διαδικασίες εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών που είναι κοινές σε κάθε τομέα γνώσης και μπορούμε να τις καλλιεργήσουμε και να τις δοκιμάσουμε ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας περιορισμένο πλήθος εννοιών, στις οποίες ο μαθητής μπορεί να διεισδύσει. Κατά συνέπεια, από τη συνύφανση στη συνείδηση του ατόμου των διαφορετικών διαδικασιών προκύπτει η μεγαλύτερη σύνθεση που θα χαρακτηρίζαμε «κριτική σκέψη». Όπως επισημαίνει και ο Barzun στο απόσπασμα που παραθέσαμε, αυτός ο στόχος είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω της εξάσκησης, κατά προτίμηση μάλιστα σε περισσότερα από ένα γνωστικά πεδία.

13.2 Κατάλογος διαδικασιών

Για να ριξουμε μια φευγαλέα ματιά σε ορισμένους τρόπους με τους οποίους η σχολική εκπαίδευση είναι δυνατό να βελτιώσει την ικανότητα των μαθητών να εκτελούν συλλογισμούς, είναι διδακτικό να εξετάσουμε λίγες από τις διαδικασίες σκέψης και εκτέλεσης συλλογισμών που περιέχονται στον τρόπο με τον οποίο αναλύουμε και διερευνούμε ένα ερώτημα. Σπάνια οι διδάσκοντες περιγράφουν ή υπογραμμίζουν τις εν λόγω διαδικασίες· όμως, οι διαδικασίες αυτές υπεισέρχονται σε πολλούς διαφορετικούς τομείς μελέτης. Εννοείται ότι ο κατάλογος που ακολουθεί είναι ενδεικτικός: δεν είναι ούτε πλήρης ούτε πολύπλευρος. Καλείται, λοιπόν, ο αναγνώστης να προσθέσει ή να επεξεργαστεί κάποιο επιπλέον σχετικό θέμα που το έχει εντοπίσει μόνος του ή αισθάνεται ότι έχει αμειώτερη σχέση με το γνωστικό πεδίο του.

1. Ενσυνείδητη προβολή των ερωτημάτων «Τι γνωρίζουμε...; Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί δεχόμαστε ή γιατί πιστεύουμε ότι...; Πώς αποδεικνύεται ότι...;», όταν μελετάμε κάποιο όγκο υλικού ή όταν προσεγγίζουμε κάποιο πρόβλημα. Θεωρήστε τον ισχυρισμό: «η Σελήνη λάμπει ανακλώντας το φως του Ηλίου». Τον ισχυρισμό αυτό θα τον διατύπωνε κάθε μαθητής ή ενήλικος. Πόσοι άνθρωποι, ωστόσο, μπορούν να περιγράψουν ένα απλό αποδεικτικό γεγονός (που θα μπορούσε να το διαπιστώσει οποιοσδήποτε διαθέτει όραση) αυτού του συμπεράσματος; (Παραμιπτόντως, αναφέρουμε ότι το εν λόγω συμπέρασμα ήταν απολύτως σαφές στους αρχαίους.) Δεν είναι απαραίτητη κάποια ιδιαίτερη διανοητική ικανότητα. Και νεαρά παιδιά ακόμη μπορούν να παρακολουθήσουν και να κατανοήσουν το θέμα. Είναι απαραίτητο, απλώς, να παρακολουθήσουν για λίγες ημέρες τη θέση της Σελήνης και του Ηλίου· δεν είναι, ωστόσο, αρκετό να παρακολουθήσουν μόνο τη θέση της Σελήνης. Κι όμως, για την πλειονότητα του πληθυσμού μας, το

«γεγονός» ότι η Σελήνη λάμπει ανακλώντας ηλιακό φως είναι παραδεκτή γνώση που δεν στηρίζεται στην κατανόηση.

Μπορούμε να διατυπώσουμε ακριβώς τις ίδιες παρατηρήσεις για τον ισχυρισμό ότι η Γη και οι πλανήτες στρέφονται γύρω από τον Ήλιο. Η επικύρωση και η αποδοχή αυτής της άποψης σηματοδοτεί μια σημαντική καμπή στην ιστορία του πνεύματος και στη συνολική άποψη για τη θέση του ανθρώπου στο Σύμπαν. Αν και η βάση στην οποία στηρίζεται ο εν λόγω ισχυρισμός είναι λεπτότερη και πολυπλοκότερη από εκείνη που αφορά τη λάμψη της Σελήνης, το ερώτημα «Πώς γνωρίζουμε ότι...» πρέπει να είναι ουσιαστικό τμήμα της γενικής μόρφωσης. Για τους περισσότερους, ωστόσο, είναι απλώς μια ευρέως παραδεκτή άποψη. Η ίδια κατάσταση ισχύει και για την άποψη ότι η ύλη δεν είναι συνεχής αλλά ασυνεχής.

Παρόμοια ερωτήματα είναι δυνατό να τεθούν και να μελετηθούν και σε άλλους τομείς γνώσης: Πώς έμαθαν οι ιστορικοί πώς ζούσαν οι Αιγύπτιοι, οι Βαβυλώνιοι ή οι Αθηναίοι; Πού βασίζονται οι ισχυρισμοί των εγχειριδίων για τα αποτελέσματα της ανάκλησης του Διατάγματος της Νάντης; Τι αποδεικτικά στοιχεία διαθέτουμε για το ότι ορισμένη φορολογική και νομισματική πολιτική προωθεί την οικονομική σταθερότητα; Ποια είναι η βάση αποδοχής του δόγματος του διαχωρισμού της εκκλησίας από την πολιτεία στο πολιτικό σύστημά μας;

Οι ερευνητές του τρόπου με τον οποίο αναπτύσσεται η αντίληψη [λόγου χάρη, οι Anderson (1980) και Lawson (1982)] κατατάσσουν τα είδη της γνώσης σε δύο κατηγορίες: στην απεικονιστική (figurative) ή δηλωτική (declarative) και στη λειτουργική (operative) ή διαδικαστική (procedural). Δηλωτική γνώση σημαίνει ότι γνωρίζω «γεγονότα» (λόγου χάρη, η ύλη αποτελείται από άτομα και μόρια· τα ζώα εισπνέουν οξυγόνο και εκπνέουν διοξείδιο του άνθρακα· οι ΗΠΑ εισήλθαν στον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο μετά την επίθεση των Ιαπώνων στο Περγλ Χάρμπορ το Δεκέμβριο του 1941 κτλ.). Λειτουργική γνώση σημαίνει ότι αντιλαμβάνομαι την προέλευση της δηλωτικής γνώσης ή τη βάση στην οποία στηρίζεται (λόγου χάρη, τι ενδείξεις έχουμε ότι η δομή της ύλης δεν είναι συνεχής αλλά ασυνεχής; Τι εννοούμε με τους όρους «οξυγόνο» και «διοξείδιο» του άνθρακα; Πώς διακρίνουμε τις δύο ουσίες μεταξύ τους; Ποιοι γεωπολιτικοί και οικονομικοί λόγοι οδήγησαν στην κήρυξη του πολέμου από τους Αμερικανούς;). Η λειτουργική γνώση περιλαμβάνει, επίσης, την ικανότητα να χρησιμοποιούμε, να εφαρμόζουμε, να μετασχηματίζουμε και να αντιλαμβανόμαστε τη σημασία της δηλωτικής γνώσης σε νέες καταστάσεις.

«Πάνω απ' όλα», αναφέρει ο Alfred North Whitehead, σε ένα διάσημο απόσπασμα από την πρώτη σελίδα του βιβλίου «The Aims of Education», «πρέπει να προσέχουμε τις ιδέες που αποκαλώ "αδρανείς"· δηλαδή, εκείνες τις ιδέες που τις δεχόμαστε απλώς χωρίς να τις αξιοποιούμε ή να τις ελέγχουμε ή να τις χρησιμοποιούμε σε νέους συνδυασμούς». Ο John Gardner

θρηνολογούσε ότι «δίνουμε στα χέρια των μαθητών κομμένα λουλούδια απαγορεύοντάς τους να παρατηρήσουν τα φυτά που μεγαλώνουν».

Τα παιδιά της προσχολικής ηλικίας, σχεδόν πάντοτε, θέτουν ερωτήσεις του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;», μέχρις ότου η τυπική εκπαίδευση τους διδάξει να σταματήσουν αυτή τη συνήθεια. Κατόπιν, στο γυμνάσιο και το λύκειο πρέπει να παρακινήσουμε, να έλξουμε και να καλοπιάσουμε τους περισσότερους μαθητές, για να θέσουν και να ερευνήσουν τέτοια ερωτήματα· δεν το κάνουν πλέον αυθόρμητα. Συνήθως, οι απαιτήσεις και το είδος των εξετάσεων όλο και περισσότερο οδηγούν τους μαθητές στην απομνημόνευση τελικών συμπερασμάτων, αδρανοποιώντας κάθε προσπάθεια ανάπτυξης. Κι όμως, αν διαθέσουμε χρόνο στους μαθητές και τους ενθαρρύνουμε, είναι δυνατό να καλλιεργηθεί η συνήθεια της αναζήτησης, να αναπτυχθεί η απαιτούμενη ικανότητα και να προκύψει η ικανοποίηση της γνώσης. Το αποτέλεσμα είναι σαφέστερο και η εξέλιξη πολύ ταχύτερη αν εφαρμόσουμε προσεκτικά και ταυτόχρονα αυτή την απαίτηση στα μαθήματα των θετικών επιστημών, των ανθρωπιστικών επιστημών, της ιστορίας και των κοινωνικών επιστημών, και όχι αν την αφήσουμε να εκδηλωθεί sporadικά (αν όχι καθόλου) σε ένα μόνο μάθημα ή τομέα γνώσης.

2. *Σαφής αντίληψη των κενών που υπάρχουν στην προσφερόμενη γνώση. Η αντίληψη του πότε φτάνουμε σε κάποιο συμπέρασμα ή παίρνουμε μια απόφαση, χωρίς να κατέχουμε όλο τον όγκο της πληροφορίας, και η ανοχή της ασάφειας και της αβεβαιότητας. Η αντίληψη του πότε δεχόμαστε κάτι καλόπιστα, χωρίς να ερευνούμε ερωτήματα του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;»* Ενδιαφέρουσες έρευνες για την ικανότητα αντίληψης και την ωριμότητα της σκέψης έχουν διεξαχθεί με τη βοήθεια ερωτήσεων σε τεστ και προβλημάτων στα οποία ορισμένα απαραίτητα δεδομένα ή τμήμα πληροφορίας είχαν σκόπιμα παραλειφθεί, και οι ερωτήσεις ήταν αδύνατο να απαντηθούν χωρίς την πρόσθετη πληροφορία ή χωρίς να γίνουν ορισμένες εύλογες υποθέσεις που καλύπτουν το κενό. Οι περισσότεροι μαθητές και πολλοί ώριμοι ενήλικοι ανταποκρίθηκαν με πολύ μικρή επιτυχία στα τεστ. Επειδή είχαν ελάχιστα εξασκηθεί σε αυτό τον αναλυτικό τρόπο σκέψης, δεν κατόρθωσαν να αντιληφθούν μόνοι τους ότι η πληροφορία ήταν ελλιπής. Αν κάποιος τους έλεγε τι συμβαίνει, ορισμένοι, εξετάζοντας πάλι το πρόβλημα, προσδιόριζαν το κενό· πολλοί, ωστόσο, ακόμα και σ' αυτή την περίπτωση, δεν μπορούσαν να το προσδιορίσουν.

Στο μάθημα, περιστασιακά, είναι απαραίτητο να ζητήσουμε από τους μαθητές να δεχτούν καλόπιστα κάτι, άσχετα από το πόσο προσεκτικά προσπαθούμε να εξετάσουμε τα αποδεικτικά στοιχεία και να δικαιολογήσουμε τα πρότυπα μας και τις έννοιες. Αυτό είναι απολύτως δικαιολογημένο. Δεν

πρέπει, ωστόσο, να γίνεται χωρίς να ενημερώνουμε τους μαθητές τι αφήνουμε αναπόδεικτο και τι ακριβώς πρέπει να αποδεχτούν. Χωρίς αυτή τη φροντίδα, οι μαθητές δεν διαθέτουν ένα πλαίσιο αναφοράς για να εντάξουν τις γνώσεις τους: δεν κατορθώνουν να διαχωρίσουν σαφώς τις περιπτώσεις για τις οποίες διαθέτουν όντως αποδεικτικά στοιχεία από τις υπόλοιπες.

3. *Διάκριση μεταξύ της παρατήρησης και της εξαγωγής συμπεράσματος, δηλαδή μεταξύ βεβαιωμένων γεγονότων και του συμπεράσματος που προκύπτει απ' αυτά.* Πολλοί μαθητές δυσκολεύονται να αντιληφθούν αυτή τη διάκριση, ακόμα και σε ολοφάνερες για τον καθηγητή καταστάσεις. Δεν έχουν συνηθίσει να παρακολουθούν μια ακολουθία συλλογισμών. Συχνά μπερδεύονται με την τεχνική ορολογία, την οποία, αν και τους έχει παρουσιαστεί, ουδέποτε κατανόησαν.

Στην περίπτωση της ερμηνείας της λάμψης της Σελήνης λόγω χάρη (την οποία παραθέσαμε προηγουμένως), οι μαθητές πρέπει να συνειδητοποιήσουν άμεσα ότι *παρατηρούν*: η έκταση της φωτιζόμενης περιοχής αυξάνεται σταθερά, καθώς η γωνία μεταξύ της Σελήνης και του Ηλίου αυξάνεται: όταν δε η γωνία γίνει 180° , ο δίσκος της Σελήνης φωτίζεται πλήρως. Αυτή η άμεση παρατήρηση οδηγεί με τη σειρά της στο *συμπέρασμα* ότι, τελικά, παρατηρούμε ανακλώμενο ηλιακό φως.

Πριν από μερικά χρόνια, αναπτύσσοντας σε μια ομάδα δασκάλων την έννοια του «οξυγόνου» (χωρίς οποιαδήποτε προηγούμενη αναφορά στον όρο), τους ζήτησα να εκτελέσουν το εξής πείραμα: μέσα σε ανοιχτό χωνευτήρι μετάλλων θέρμαιναν κόκκινο μεταλλικό χαλκό και περιοδικά ζύγιζαν το χωνευτήρι. Παρατηρούσαν, λοιπόν, ότι ο χαλκός μαύριζε και ότι το βάρος του χωνευτηριού και του περιεχομένου του αυξανόταν σταθερά. Όταν περιφέρθηκα μέσα στο εργαστήριο και τους ρώτησα τι έχουν *παρατηρήσει* μέχρι τώρα, πολλοί απάντησαν: «Παρατηρήσαμε ότι το οξυγόνο ενώνεται με το χαλκό». Όταν με ειρωνικό ύφος ζήτησα να μάθω αν *παρατήρησαν* όντως να συμβαίνει κάτι τέτοιο, αντέδρασαν με αμηχανία. Με μια σειρά ερωτήσεων σωκρατικού τύπου, προσπάθησα να τους οδηγήσω να περιγράψουν τι όντως είχαν παρατηρήσει και να το αντιδιαστείλουν από το *συμπέρασμα* ότι, για να αυξάνεται η ποσότητα του μαύρου υλικού στο χωνευτήρι, κάτι από τον αέρα πρέπει να ενώνεται με το χαλκό. Έπρεπε να αποκαλυφθεί σαφώς ότι αυτό το «κάτι από τον αέρα» ήταν ουσία την οποία, τελικά, ονομάζουμε «οξυγόνο». Οι εκπαιδευόμενοι ήθελαν να χρησιμοποιήσουν την τεχνική ορολογία που κατείχαν εκ των προτέρων χωρίς, όμως, να γνωρίζουν πού βασίζεται.

Το συγκεκριμένο γεγονός δείχνει τη σημασία τού να δίνεται επανειλημμένα η ευκαιρία στους μαθητές να διακρίνουν τη διαφορά μεταξύ της

παρατήρησης και του συμπεράσματος. Μία μόνο διορθωτική παρέμβαση δεν είναι αρκετή· ευκαιρίες υπάρχουν πολλές. Λόγου χάρι, πρέπει να διακρίνουμε τη διαφορά μεταξύ των παρατηρήσεων του Mendel (ότι ο λόγος μεταξύ πληθυσμών με μέλη διαφορετικών χαρακτηριστικών χρώματος και μεγέθους παίρνει σχεδόν ακέραιες τιμές) και του συμπεράσματος (ότι υπάρχουν διακριτά στοιχεία που ρυθμίζουν τα κληρονομικά χαρακτηριστικά). Στη μελέτη της λογοτεχνίας, πρέπει να διακρίνουμε τη διαφορά μεταξύ της *δομής* ενός μυθιστορήματος ή ενός ποιήματος και της *ερμηνείας* του έργου. Στη μελέτη της ιστορίας, πρέπει να διακρίνουμε τη διαφορά μεταξύ των πρωταρχικών ιστορικών δεδομένων ή πληροφοριών, που παρατίθενται από τους ιστορικούς, και του πώς οι ιστορικοί ερμηνεύουν τα δεδομένα.

Σημαντική άσκηση, που κάποτε τη χρησιμοποιούσαν οι συνάδελφοί μου ιστορικοί, ήταν η εξής: έδιναν στους σπουδαστές ένα αντίγραφο του Κώδικα του Χαμουραμπί και τους ζητούσαν να συντάξουν μια σύντομη αναφορά για το εξής ζήτημα: «Από αυτό τον κώδικα νόμων, τι συμπεραίνετε για τη ζωή των ανθρώπων και τις αξίες τους;» Η άσκηση συνδυάζει τις διαδικασίες 1 και 3.

4. *Η αντίληψη ότι οι λέξεις δεν είναι οι ιδέες, αλλά τα σύμβολά τους. Η αντίληψη ότι, για τη διατύπωση νέου ορισμού, είναι αναγκαίο να χρησιμοποιήσουμε λέξεις που έχουν οριστεί προηγουμένως και βασίζονται στην κοινή εμπειρία και να αποφύγουμε να παραπλανηθούμε από την τεχνική ορολογία.* Αν λάβουμε υπόψη μας τον τρόπο διδασκαλίας με τον οποίο επιβάλλουμε τις έννοιες (ιδιαίτερα των θετικών επιστημών) στους μαθητές των πρώτων τάξεων, δεν είναι παράδοξο το ότι οι μαθητές δεν έχουν σχεδόν καμιά αίσθηση της διαδικασίας του λειτουργικού ορισμού. Δεν είναι, επίσης, παράδοξο το ότι καταλήγουν να θεωρούν τις έννοιες στέρεες και αμετάβλητες οντότητες, με μοναδική και απόλυτη σημασία, την οποία «γνώριζε» αυτόματα εκείνος που τις εισήγαγε και ότι, παρακολουθώντας με κομμένη ανάσα την παρουσίασή της, πρέπει να την αφομοιώσει διαισθητικά «μονορουφί». Πολλοί μαθητές αισθάνονται ότι βρίσκονται μπροστά σε μια αποκάλυψη, όταν πλέον τους δίνεται η δυνατότητα να παρατηρήσουν ότι οι έννοιες εξελίσσονται, ότι περνούν από στάδια επαναορισμού, «λείανσης» και εκλέπτυνσης, και ότι εκκινούμε από ένα αόριστο, πρωταρχικό διαισθητικό πλαίσιο και, επωφελούμενοι από τη γνώση που αποκτάμε μέσα από τις διαδοχικές εφαρμογές της έννοιας, οδηγούμαστε στο τελικό στάδιο εκλέπτυνσής της.

Στο δικό μου μάθημα, από την πρώτη μέρα επισημαίνω ότι θα λειτουργήσουμε με βάση την αρχή: «Πρώτα η ιδέα και μετά η ονομασία». Επισημαίνω, επίσης, ότι οι επιστημονικοί όροι αποκτούν νόημα μόνο αν περιγραφούν με λέξεις της κοινής εμπειρίας που προηγουμένως έχουμε ορίσει.

Όταν οι μαθητές προσπαθούν να κάνουν επίδειξη πολυμάθειας (ή όταν, στην αδυναμία τους να απαντήσουν σε έρωτήσεις, βρίσκουν καταφύγιο) «πετώντας» τεχνικούς όρους που δεν τους έχουμε ορίσει ακόμα στο μάθημα, κι εγώ και το προσωπικό μου μένουμε απολύτως ανέκφραστοι και δείχνουμε να μην καταλαβαίνουμε. Οι μαθητές «μπαίνουν» γρήγορα στο νόημα: σταματούν να «πετούν» όρους και αρχίζουν να αντιλαμβάνονται μόνοι τους αν κατανοούν όντως το νόημα ενός όρου. Κατόπιν, παρασυρόμενοι αρχίζουν να μου αναφέρουν περιπτώσεις στο μάθημα της ψυχολογίας, της κοινωνιολογίας, των οικονομικών και των πολιτικών επιστημών, όπου, κάθε φορά που αναζήτησαν τον λειτουργικό ορισμό των τεχνικών όρων, «μπήκαν σε μελάδες». Είναι ενδιαφέρον ότι πολλοί μαθητές μπορούν να διεισδύσουν σχετικά γρήγορα και εύκολα σε αυτή την περιοχή ανάπτυξης της αντίληψης. Δυστυχώς, αυτό δεν ισχύει για τους περισσότερους τρόπους εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών.

5. *Ο έλεγχος των υποθέσεων (ιδιαίτερα των έμμεσων, μη διατυπωμένων υποθέσεων) που βρίσκονται πίσω από μια πορεία συλλογισμών.* Στα μαθήματα θετικών επιστημών, ο συγκεκριμένος έλεγχος γίνεται σχετικά εύκολα. Οι εξιδανικεύσεις, οι προσεγγίσεις και οι απλοποιήσεις βρίσκονται πλησίον της «επιφάνειας»: στις περισσότερες παρουσιάσεις, λοιπόν, περιγράφονται με απόλυτη σαφήνεια. Επειδή, ωστόσο, δεν επισημαίνονται και δεν επαναδιατυπώνονται με σαφήνεια και σπάνια, αν όχι ποτέ, ζητούνται σε τεστ και εξετάσεις, οι μαθητές τις αγνοούν ή τις παραβλέπουν. Στην ιστορία, στις ανθρωπιστικές και τις κοινωνικές επιστήμες, οι βαθύτερες υποθέσεις είναι πολύπλοκότερες και διατυπώνονται με μικρότερη σαφήνεια. Για να ελεγχθούν, λοιπόν, οι διδάσκοντες και οι μαθητές πρέπει να δείξουν ιδιαίτερη και συνειδητή προσοχή.

6. *Εξαγωγή συμπεράσματος από δεδομένα, παρατηρήσεις ή άλλα αποδεικτικά στοιχεία και συνειδητοποίηση του πότε είναι αδύνατο να εξαχθεί ένα ακλόνητο συμπέρασμα.* Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει στοιχειώδεις συλλογισμούς (δηλαδή, συλλογισμούς του είδους «αν ...τότε»), συνδυαστικούς συλλογισμούς, το να αντιλαμβανόμαστε πότε μεταβλητές που σχετίζονται με το θέμα ελέγχθηκαν ή όχι, κτλ. Οι συλλογισμοί μας πρέπει να εκτελούνται ανεξάρτητα από την πορεία συλλογισμών κάποιου άλλου. Πρέπει να επιχειρούμε συλλογισμούς του είδους «αν ...τότε», στηριζόμενοι στα δεδομένα, χωρίς να κατευθυνόμαστε από κάποια εξωτερική «αυθεντία». Πρέπει να μπορούμε να διακρίνουμε σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος παρά τη στατιστική διασπορά και την αβεβαιότητα των δεδομένων. Πρέπει να γνωρίζουμε ότι αν παραλείψουμε να ελέγξουμε μια σημαντική μεταβλητή, καταστρέφεται η δυνατότητα να συμπεράνουμε μια σχέση αιτίου-αποτελέ-

σματος. Πρέπει να μπορούμε να διακρίνουμε πότε δύο εναλλακτικά πρότυπα, εξηγήσεις ή ερμηνείες είναι εξίσου έγκυρες, οπότε είναι αδύνατο με λογικά επιχειρήματα να προκρίνουμε τη μία από τις δυο.

Ως παράδειγμα της τελευταίας κατάστασης, παρουσιάζω μια περίπτωση που πολύ συχνά τη συναντώ κατά τη διάρκεια της διδασκαλίας μου. Όταν οι μαθητές, σε γενικά μαθήματα θετικών επιστημών, αρχίζουν να ανταποκρίνονται σε εργασίες που τους ανατίθενται και οι οποίες τους οδηγούν να παρατηρούν γεγονότα που συμβαίνουν στον ουρανό (λόγου χάρη, την ημερήσια μεταβολή της θέσης της ανατολής, της θέσης της δύσης και του ύψους του Ηλίου, το «γέμισμα» και το «άδειασμα» της Σελήνης, τη συμπεριφορά των άστρων και των άμεσα ορατών πλανητών), ελπίζουν ότι αυτές οι διά γυμνού οφθαλμού παρατηρήσεις θα τους επιτρέψουν αμέσως να «αντιληφθούν» την «αλήθεια» με την οποία τους εφοδίασε η «αυθεντία», ότι, δηλαδή, η Γη και οι πλανήτες στρέφονται γύρω από τον Ήλιο. Παράλληλα, αρνούνται να δεχτούν το γεγονός ότι τόσο το γεωκεντρικό όσο και το ηλιοκεντρικό πρότυπο εξηγούν με λογικό τρόπο, εξίσου ικανοποιητικά, τις παρατηρήσεις. Δεν δέχονται, επίσης, ότι σ' αυτό το επίπεδο παρατήρησης, είναι αδύνατο με λογικά επιχειρήματα να αποκλείσουμε το ένα από τα δύο πρότυπα. Αναστατώνονται από τη διαπίστωση ότι προσωρινά μπορούμε να επιλέξουμε για λόγους απλότητας ή λόγω αισθητικών ή θρησκευτικών προτιμήσεων οποιοδήποτε από τα δύο πρότυπα. Η προηγούμενη εμπειρία τους τους είχε διδάξει ότι κάθε φορά υπάρχει μόνο μία απάντηση. Δεν είχαν ποτέ οδηγηθεί να «σταθούν σε κάποια απόσταση» από το θέμα, για να αντιληφθούν ότι ορισμένες φορές πρέπει να υποχωρήσουμε, προσωρινά ή για πάντα, προ των αξεδιάλυτων μεταξύ τους εναλλακτικών απόψεων. Ουδέποτε χρειάστηκε να περιμένουν υπομονετικά μέχρις ότου συλλεχθούν αρκετές πληροφορίες και αποδεικτικά στοιχεία, για να διατυπωθεί μόνο μία απάντηση σε ένα σημαντικό ερώτημα. Κάθε φορά, είτε διαθέταμε τα αποδεικτικά στοιχεία είτε όχι, η τελική απάντηση διακηρυσσόταν — για λόγους «πληρότητας» — από την αρχή. Έτσι, δεν αναπτύσσεται η ικανότητα του πότε μπορούμε να αποφασίσουμε για την ορθότητα μιας άποψης και πότε όχι.

Μια παράλληλη, ουσιαστικά, κατάσταση εμφανίζεται στο πρώτο στάδιο διαμόρφωσης των εννοιών του στατικού ηλεκτρισμού (βλ. εδάφια 6.7 και 6.8). Οι μαθητές είναι πολύ απρόθυμοι να δεχτούν ότι, πριν μάθουν οτιδήποτε για τη μικροσκοπική δομή της ύλης και για το ρόλο του ηλεκτρικού φορτίου σε μικροσκοπικό επίπεδο, δεν μπορούν να αποφανθούν από παρατηρήσιμα (μακροσκοπικά) φαινόμενα αν το θετικό φορτίο, το αρνητικό ή και τα δύο είναι ευκίνητα ή μετακινούμενα. Θέλουν να τους πούμε αμέσως τη «σωστή απάντηση». Δεν αντιλαμβάνονται ότι το καθένα από τα τρία πρότυπα εξηγεί εξίσου καλά τις παρατηρήσεις μας και ότι οι προβλέψεις των τριών προτύπων για φαινόμενα που εκδηλώνονται σε νέες καταστάσεις

είναι εξίσου επιτυχημένες.

Αν επιστήσουμε σαφώς την προσοχή των μαθητών σε τούτο το θέμα, η εμπειρία που περιγράψαμε προηγουμένως είναι δυνατό να παίξει σημαντικό ρόλο στην ενίσχυση της ικανότητάς τους να αξιολογούν τι γνωρίζουν και τι όχι, τι μπορούν να συμπεράνουν σε μια περίπτωση και τι όχι.

7. *Εκτέλεση υποθετικο-επαγωγικών συλλογισμών: εφαρμογή γνωστών αρχών και περιορισμών σε δεδομένες συνθήκες και σύλληψη με αφηρημένο τρόπο των εύλογων ενδεχομένων που προκύπτουν από μεταβολές που μπορούμε να φανταστούμε ότι επιβάλλονται στο σύστημα.* Ευκαιρίες για συλλογισμούς αυτού του είδους αφθονούν σε κάθε σειρά μαθημάτων. Κι όμως, τις περισσότερες φορές δίνουμε στους μαθητές προκαθορισμένα ερωτήματα που δεν «ανοίγουν την πόρτα» σε υποθετικο-επαγωγικούς συλλογισμούς τους οποίους μπορούν να εκτελέσουν με τη βοήθεια της φαντασίας τους. Οι προκαθορισμένες καταστάσεις είναι σημαντικές και αποτελούν απαραίτητες αφετηριακές ασκήσεις· είναι, ωστόσο, απαραίτητο να ακολουθούνται από ερωτήσεις που παρακινούν το μαθητή να επινοήσει πιθανές αλλαγές και να αναζητήσει τις εύλογες συνέπειές τους.

8. *Διάκριση μεταξύ του αναγωγικού και του επαγωγικού συλλογισμού: το να διακρίνουμε πότε ένα επιχείρημα εκκινεί από το ειδικό και καταλήγει στο γενικό ή το αντίστροφο.* Οι έννοιες «ηλεκτρικό κύκλωμα», «ηλεκτρικό ρεύμα» και «αντίσταση» είναι δυνατό να προκύψουν από πολύ απλές παρατηρήσεις που γίνονται με τη βοήθεια μπαταριών και κυκλωμάτων με λαμπάκια. Οδηγούμεστε έτσι στη δημιουργία ενός προτύπου για τη λειτουργία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Κατόπιν, το πρότυπο είναι η βάση για επαγωγικά συμπεράσματα, για προβλέψεις του τι θα συμβεί στη φωτοβολία των λαμπτήρων σε νέους συνδυασμούς ή σε περίπτωση που επιβάλουμε αλλαγές στο κύκλωμα (λόγου χάρι, αν βραχυκυκλώσουμε κάποια σημεία του κυκλώματος).

Παρόμοιος τρόπος σκέψης είναι δυνατό να αναπτυχθεί στο πλαίσιο οικονομικών προτύπων ή διαδικασιών. Ουσιαστικά, σε κάθε τέτοια περίπτωση υπεισέρχονται υποθετικο-επαγωγικοί συλλογισμοί. Κάθε φορά, ωστόσο, πρέπει να έχουμε πλήρη συνείδηση της διαφοράς μεταξύ του αναγωγικού και του επαγωγικού τρόπου σκέψης.

9. *Έλεγχος της εσωτερικής συνέπειας των συλλογισμών μας και ανάπτυξη της αυτοπεποίθησης.* Έχει περάσει πολύς καιρός από τότε που μπορούσαμε να διδάξουμε στους μαθητές μας κάθε απαραίτητη γι' αυτούς γνώση. Η κύρια λειτουργία της εκπαίδευσης — και ιδιαίτερα της ανώτερης — πρέπει να είναι το να βοηθήσει τα άτομα «να σταθούν στα δικά τους πόδια»

από την άποψη των νοητικών ικανοτήτων, να τους προσφέρει τα πρώτα νοητικά εφόδια και να τους ενημερώσει τι σημαίνει μαθαίνω και κατανοώ κάποιο θέμα. Για να μπορούν έτσι τα άτομα αυτά να συνεχίσουν τη μελέτη και την απόκτηση νέων γνώσεων, όταν έχουν ανάγκη και τους δοθεί η ευκαιρία, χωρίς να εξαρτώνται συνεχώς από το σύστημα εκπαίδευσης.

Για να συνεχιστεί η γνήσια μάθηση κατ' ιδίαν (όχι απλώς η συσσώρευση γεγονότων), είναι απαραίτητη η ικανότητα να κρίνουμε πότε έχουμε όντως κατανοήσει κάποιο θέμα και μπορούμε να εξαγάγουμε ορισμένα συμπεράσματα με τη βοήθεια της γνώσης που έχουμε αποκτήσει. Η διαδικασία της εξαγωγής συμπερασμάτων συνεπάγεται έλεγχο του τρόπου σκέψης μας και των αποτελεσμάτων των συλλογισμών μας, από την άποψη της ορθότητάς τους ή τουλάχιστον της εσωτερικής συνοχής και συνέπειάς τους. Η εν λόγω διανοητική δραστηριότητα, είναι, βεβαίως, πολύπλοκη. Οι μαθητές, λοιπόν, πρέπει αρχικώς να ενημερωθούν για τη διαδικασία και τη σημασία της. Κατόπιν, χρειάζονται εξάσκηση και βοήθεια.

Στα μαθήματα θετικών επιστημών, θά 'πρεπε να ζητάμε από τους μαθητές να ελέγχουν και να επαληθεύουν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα, διερευνώντας αν τα αποτελέσματα έχουν νόημα σε ακραίες ή ειδικές περιπτώσεις, στις οποίες καταλήγουν με λογικό, απλό και ευθύ τρόπο. Θά 'πρεπε να τους κατευθύνουμε να λύνουν κάθε πρόβλημα με εναλλακτικούς τρόπους, αν αυτό είναι δυνατό. Οι μαθητές πρέπει να ακολουθούν αυτόν τον τρόπο σκέψης τόσο σε ποσοτικά όσο και ποιοτικά προβλήματα. Στις ανθρωπιστικές και τις κοινωνικές επιστήμες, ο έλεγχος της εσωτερικής συνέπειας είναι πολύπλοκότερος· είναι, ωστόσο, εξίσου σημαντικός και πρέπει να καλλιεργείται προσεκτικά. Θά 'πρεπε να βοηθάμε τους μαθητές να διαισθάνονται πότε μπορούν, όντας σίγουροι για την πληρότητα και τη συνέπεια ή τη λογική των συλλογισμών τους, να προχωρήσουν χωρίς τον καθηγητή και χωρίς να απευθύνονται σε κάποιον άλλο για τη «σωστή απάντηση».

10. Ανάπτυξη της αυτογνωσίας ως προς τη μέθοδο σκέψης και συλλογισμού. Αυτή η δεξιότητα είναι η υψηλότερη και η πιο εκλεπτυσμένη: προϋποθέτει τις υπόλοιπες που έχουμε καταχωρίσει στον κατάλογο. Περιλαμβάνει τη διαδικασία κατά την οποία, απομακρυνόμενοι από το θέμα, αναγνωρίζουμε τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται (σκοπίμα επικαλούμενοι τις καταλληλότερες για τις δεδομένες συνθήκες) και δημιουργούμε τις προϋποθέσεις για τη συνειδητή μεταφορά των μεθόδων συλλογισμού από οικείες σε μη οικείες καταστάσεις.

Αν διαθέτουμε αντίληψη αυτού του είδους, μπορούμε να αρχίσουμε να διεισδύουμε σε νέες καταστάσεις, θέτοντας στον εαυτό μας δοκιμαστικές ερωτήσεις και επινοώντας απαντήσεις. Αρχίζοντας με τεχνητές, εξιδανι-

κευμένες, υπεραπλουστευμένες εκδοχές του προβλήματος, διεισδύουμε βαθμιαία σε ρεαλιστικότερες και πιο σύνθετες εκδοχές. Από μια άποψη, η εν λόγω διαδικασία είναι ο μηχανισμός που υπεισέρχεται στην ανεξάρτητη έρευνα και διερεύνηση.

13.3 Γιατί μας ενδιαφέρει η κριτική σκέψη;

Ο προηγούμενος κατάλογος των διαδικασιών σκέψης και συλλογισμού, που εμπεριέχει τον γενικό όρο «κριτική σκέψη», δεν είναι ούτε πλήρης ούτε εξαντλητικός. Για διδακτικούς λόγους, προσπάθησα να απομονώσω και να περιγράψω είδη και στάδια δεξιοτήτων που φαίνεται ότι συνδέονται με την εκτέλεση διαυγών συλλογισμών και με τη γνήσια κατανόηση σε ευρύ πεδίο διαφορετικών τομέων. Προσπάθησα επίσης να δείξω ότι, απ' αυτή την άποψη, διαφορετικοί τομείς έχουν βαθιά συγγένεια. Ισχυρίζομαι, λοιπόν, ότι οι εν λόγω δεξιότητες περιέχουν τα χαρακτηριστικά που ο Jacques Barzun προσδιόρισε στην παράγραφο που υπάρχει με τη μορφή υπότιτλου στην αρχή του παρόντος Κεφαλαίου.

Για να αναπτυχθεί αυτή η πνευματική ικανότητα, είναι απαραίτητη η εκτενής και μόνιμη εξάσκηση. Η εξάσκηση, ωστόσο, δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί εκτός του περιεχομένου του μαθήματος. Μόνο στο πλαίσιο του μαθήματος και με την ενασχόληση με γόνιμες περιοχές της ύλης είναι δυνατό να αποκτηθούν ενδιαφέρουσες και σημαντικές εμπειρίες. Αν και είναι δυνατό, καταρχάς, να πραγματοποιηθεί εν μέρει η εξάσκηση στο πλαίσιο τεχνητών ασκήσεων και επίλυσης παραδόξων ή ακόμα και μέσα από την ανάλυση του αποτελέσματος ενός αθλητικού αγώνα, μου φαίνεται ότι είναι απώλεια χρόνου να καταφεύγουμε σε αποστειρωμένες διεξόδους, όταν όλοι οι ζωντανοί τομείς του πολιτισμού βρίσκονται στη διάθεσή μας.

Γιατί θέλουμε να καλλιεργήσουμε δεξιότητες του είδους που καταχώρισα στον κατάλογο; Υπάρχουν πολλοί προφανείς λόγοι που συνδέονται με την ποιότητα ζωής, με την επαγγελματική ικανότητα, με την πρόοδο του πολιτισμού και γενικά της κοινωνίας· θέλω, ωστόσο, να επισημάνω έναν κοινωνικοπολιτικό λόγο: την εκπαίδευση ενός ενημερωμένου δημοκρατικού πολίτη. Ποιες ικανότητες χαρακτηρίζουν έναν τέτοιο πολίτη;

Ο δικαστής Learned Hand, διακεκριμένος νομομαθής της προηγούμενης γενιάς, ισχυρίζεται, με εύστοχη ειρωνεία, ότι θα μπορούσαμε να προστατεύσουμε τις πολιτικές ελευθερίες μόνο αν θελήσουμε να ασχοληθούμε με «την ανυπόφορα δύσκολη σκέψη, που είναι η πιο αντιπαθητική δραστηριότητα». Ο John Dewey στο έργο του «Democracy and Education» ισχυρίζεται ότι: «Η αντίθετη δραστηριότητα της λειτουργίας της σκέψης είναι η κοινότοπη και η ιδιότροπη συμπεριφορά. Και στις δύο περιπτώσεις αρνούμαστε να αναγνωρίσουμε την ευθύνη για τις μελλοντικές συνέπειες που θα

προκύψουν από την παρούσα δράση μας.»

Οι απόψεις των Barzun, Hand και Dewey είναι δυνατό να αναλυθούν σε θεμελιωδέστερα συστατικά. Η λεπτή διάκριση μεταξύ του προσωπικού συμφέροντος όπως το αντιλαμβάνεται ο ενημερωμένος πολίτης και του προσωπικού συμφέροντος όπως το αντιλαμβάνεται ο πολίτης με περιορισμένη αντίληψη προκύπτει από υποθετικο-επαγωγικούς συλλογισμούς. Συλλογισμοί αυτού του είδους υπεισέρχονται αναπόφευκτα, όταν φανταζόμαστε τις πιθανές συνέπειες των αποφάσεων που λαμβάνονται και της πολιτικής που εφαρμόζεται σε οικονομικούς και πολιτικούς τομείς. Γι' αυτή την πολιτική ψηφίζουμε.

Είναι απαραίτητο να διακρίνουμε τη διαφορά μεταξύ των γεγονότων και των συμπερασμάτων που υπεισέρχονται σε κάποιους ισχυρισμούς. Επειδή είναι αναγκαίο να διατυπώνουμε ορισμένες ανιχνευτικές κρίσεις ή να παίρνουμε δοκιμαστικά ορισμένες αποφάσεις, είναι προτιμότερο να το κάνουμε έχοντας ολοκληρωμένη αντίληψη για τα κενά που υπάρχουν στις πληροφορίες που διαθέτουμε παρά να αυταπατώμαστε για τη βεβαιότητα των πληροφοριών μας. Είναι απολύτως επιθυμητό να μπορούμε να θέτουμε κριτικές, ανιχνευτικές και γόνιμες ερωτήσεις που αφορούν καταστάσεις για τις οποίες έχουμε πολύ μικρή ή και καθόλου πείρα. Είναι απαραίτητο να αντιλαμβανόμαστε σαφώς σε ποιο βαθμό γνωρίζουμε και κατανοούμε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα.

Οι εν λόγω ικανότητες περιέχονται στον κατάλογο που προανέφερα. Πιστεύω, επίσης, ότι όλες είναι δυνατό να καλλιεργηθούν και να αναπτυχθούν, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό, στη μεγάλη πλειονότητα των μαθητών του λυκείου. Αυτός ο στόχος είναι δυνατό να επιτευχθεί μέσω της κατάλληλης σχεδίασης εμπειριών που περιλαμβάνουν μεγάλη ποικιλία θεμάτων.

Σπεύδω να επισημάνω ότι δεν επαρκούν οι συγκεκριμένες δεξιότητες για να εξασφαλιστεί η καλή συμπεριφορά ή άλλες επιθυμητές πνευματικές ή ατομικές αρετές των πολιτών. Άλλα συστατικά (οι ηθικές αξίες είναι το λιγότερο) θέτουν τους δικούς τους περιορισμούς και τις δικές τους συνολικές συνθήκες στη διαδικασία εκτέλεσης σκέψεων και συλλογισμών. Αν και οι εν λόγω αξίες δεν είναι ανεξάρτητες από αυτή τη διαδικασία, θεωρώ ότι το θέμα, από την άποψη της εκπαίδευσης, ξεφεύγει από τα όρια του παρόντος σύντομου δοκιμίου. Θεωρώ, επίσης, ότι οι αξίες αυτές είναι απαραίτητο να μελετηθούν ιδιαίτερα.

13.4 Το υπάρχον επίπεδο ικανότητας εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, αρκετά καθυστερημένα, ορισμένοι ερευνη-

τές αναγνώρισαν τελικά ότι μεγάλο τμήμα της διδακτέας ύλης των θετικών επιστημών, καθώς και ο όγκος της και ο ρυθμός με τον οποίο την προσφέρουμε στους μαθητές, δεν ταιριάζουν καθόλου με το υπάρχον επίπεδο της διανοητικής ανάπτυξης των μαθητών. Η διαπίστωση αφορά μαθητές κάθε ηλικίας. Είμαι πεπεισμένος ότι το ίδιο συμβαίνει και σε άλλους τομείς· δεν το διακρίνουμε, ωστόσο, εύκολα, επειδή οι εργασίες που ανατίθενται στους μαθητές και τα τεστ δεν αποσκοπούν στον έλεγχο της ικανότητας εκτέλεσης συλλογισμών και της κατανόησης των ιδεών αλλά στον έλεγχο απομνημόνευσης των τελικών συμπερασμάτων και των διαδικασιών.

Ανέφερα ότι μόνο «ορισμένοι» εκπαιδευτικοί γνωρίζουν, τελικά, την ύπαρξη του προβλήματος, επειδή, παρά τις κατηγορηματικές και αμείλικτες στατιστικές, πολλοί διδάσκοντες στα σχολεία και στα πανεπιστήμια δεν γνωρίζουν τα δεδομένα που έχουν έρθει στο φως· άλλοι δεν κατορθώνουν να διακρίνουν κάποια σχέση με τη δική τους διδασκαλία.

Το 1971 ερευνητές άρχισαν να διευθύνουν στοιχειώδεις δοκιμασίες εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών (παρόμοιες μ' εκείνες που για πρώτη φορά εφάρμοσε ο Jean Piaget [βλ. Piaget και Inhelder (1958)], μελετώντας την ανάπτυξη της ικανότητας του παιδιού να εκτελεί αφηρημένους λογικούς συλλογισμούς) από εφήβους και ενήλικους κολεγίων, καθώς και μεγαλύτερους (βλ. λόγου χάρη τις εργασίες των Chiapetta (1976), McKinnon και Renner (1971)). Οι δοκιμασίες εστιάστηκαν, κυρίως, σε αριθμητικούς συλλογισμούς με λόγους ή διαιρέσεις και στην αντίληψη της αναγκαιότητας ότι, για να προσδιορίσουμε μια σχέση αιτίου-αποτελέσματος, πρέπει να ελέγξουμε τις μεταβλητές.

Αν και το αποτέλεσμα διέφερε από πληθυσμό σε πληθυσμό (μεταξύ ατόμων οικονομικά μειονεκτούντων και ατόμων οικονομικά προνομιούχων, μεταξύ ατόμων που ασχολούνταν με θετικές επιστήμες και με τεχνολογία και ατόμων που ασχολούνταν με ανθρωπιστικές επιστήμες, μεταξύ ατόμων που ασχολούνταν με καλές τέχνες και ατόμων που ασχολούνταν με κοινωνικές επιστήμες κτλ.), καθώς από τότε, το 1971, που μελετήθηκε το πρώτο μικρό δείγμα, αυξανόταν ο όγκος των δεδομένων, ο συνολικός μέσος όρος παρέμενε ουσιαστικά αμετάβλητος. Αποκαλυπτικότερο ήταν το ότι, όταν η ηλικία των ατόμων του δείγματος ξεπερνούσε τα 12 ή 13 χρόνια, ο μέσος όρος δεν μεταβαλλόταν ουσιαστικά: γενικά, το ένα τρίτο του συνολικού αριθμού των ατόμων έλυνε σωστά τις ασκήσεις· άλλο ένα τρίτο, επίσης, αν και δεν ανταποκρινόταν σωστά, έδειχνε να βρίσκεται σε ένα πρώτο στάδιο αφομοίωσης του απαραίτητου τρόπου εκτέλεσης συλλογισμών· το υπόλοιπο ένα τρίτο αποτύγχανε πλήρως. Σύμφωνα με την ορολογία του Piaget, θεωρούμε ότι η πρώτη ομάδα χρησιμοποιεί τυποποιημένους συλλογισμούς, η τρίτη χρησιμοποιεί, κυρίως, συγκεκριμένους συλλογισμούς και η μεσαία ομάδα βρίσκεται σε μεταβατικό στάδιο μεταξύ των καταστάσεων των δύο προηγούμενων ομάδων [Arons και Karplus (1976)].

Οι αδυναμίες που αποκαλύφθηκαν με τις δύο εξειδικευμένες δοκιμασίες μόνες τους δεν σημαίνουν τίποτε· συνδέονται, ωστόσο, στενά με αδυναμίες σε άλλους τρόπους εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών. Συνδέονται, λόγου χάρη, με την αδυναμία διάκρισης της διαφοράς μεταξύ της παρατήρησης και του συμπεράσματος. Συνδέονται, επίσης, με την αδυναμία εκτέλεσης συλλογισμών που περιλαμβάνουν συνυπολογισμούς, απόρριψη και κατάταξη σε σειρά και με την αδυναμία αναγνώρισης των κενών που υπάρχουν στις διαθέσιμες πληροφορίες. Συνδέονται, τέλος, με την αδυναμίες εκτέλεσης κάθε είδους υποθετικο-επαγωγικού συλλογισμού.

Το μεγαλύτερο τμήμα της διδακτέας ύλης, στα περισσότερα μαθήματα του γυμνασίου και του λυκείου, προϋποθέτει σιωπηρά ότι έχει ήδη αναπτυχθεί ικανοποιητικά η ικανότητα εκτέλεσης συλλογισμών. Λίγοι, ωστόσο, μαθητές (λιγότερο από το ένα τρίτο) είναι έτοιμοι να λειτουργήσουν με αυτό τον τρόπο. Οι υπόλοιποι, επειδή δεν διαθέτουν την απαραίτητη βοήθεια υποστήριξης και σαφείς ασκήσεις, καταφεύγουν απεγνωσμένα στην απομνημόνευση των τελικών συμπερασμάτων και των διαδικασιών. Επειδή δεν κατορθώνουν να αναπτύξουν τις μεθόδους που υπεισέρχονται στην κριτική σκέψη, δεν καταφέρνουν να αποκτήσουν την εμπειρία της γνώσης κατανόησης και καταλήγουν να νομίζουν ότι η γνώση ενσταλάσσεται από το διδάσκοντα και συνίσταται στον προσδιορισμό της διαφοράς μεταξύ μυστηριωδών τεχνικών όρων σε τεστ πολλαπλής επιλογής. [Ο αναγνώστης που γνωρίζει τις μελέτες του William G. Perry (1970) θα αναγνωρίσει την πρώτη κατηγορία της διανοητικής αντίληψης των μαθητών λυκείου που αναφέρει ο συγγραφέας.]

13.5 Είναι δυνατό να βελτιωθεί η ικανότητα εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών;

Στην Ομάδα Διδασκαλίας της Φυσικής του Πανεπιστημίου της Ουάσινγκτον, στην οποία ανήκω, για πολλά χρόνια εργαστήκαμε εντατικά με δασκάλους δημοτικού που επρόκειτο να διοριστούν ή ήδη υπηρετούσαν σε σχολεία και με άλλους αποφοίτους θεωρητικών σχολών, που είχαν ηλικία μεταξύ 18 και 30 ετών. Αρχικά, τυποποιημένους τρόπους συλλογισμού δεν χρησιμοποιούσε περισσότερο από το 10%. Αρχίζαμε λοιπόν με πολύ βασικές και συγκεκριμένες παρατηρήσεις και εμπειρίες και από αυτές δημιουργούσαμε τις κατάλληλες έννοιες. Κατόπιν, προχωρούσαμε αργά, αφήνοντας τους σπουδαστές να υποπέσουν σε λάθη και να τα διορθώσουν (όταν πλέον αντιμετώπιζαν αντιφάσεις ή ασυνέπειες), επιμένοντας να περιγράφουν προφορικά και γραπτά την πορεία των συλλογισμών τους και τις επεξηγήσεις τους. Τέλος, ύστερα από ημέρες και εβδομάδες επαναλαμβάναμε τους ίδιους τρόπους συλλογισμού σε νέο πλαίσιο. Αποτέλεσμα: κατορθώ-

σαμε να αυξήσουμε το ποσοστό εκείνων που χρησιμοποιούσαν επιτυχώς αφηρημένες μορφές συλλογισμών μέχρι 70% έως 90% (αναλόγως με τη φύση της άσκησης).

Το σημαντικότερο πρακτικό μάθημα για μας ήταν το εξής: η επανάληψη είναι απολύτως απαραίτητη. Δεν πρέπει, ωστόσο, να γίνεται στο ίδιο πλαίσιο μέχρι να επιτευχθεί η «αφομοίωση», αλλά σε μεταλλασμένο και πλουσιότερο πλαίσιο, μέσα στο οποίο θα εμφανίζονται συνεχώς ευκαιρίες για επανάληψη. Γρήγορες ασκήσεις θεραπείας που προηγούνται της «κανονικής» ανάπτυξης ενός θέματος είναι ουσιαστικά άχρηστες. Στο πλαίσιο του μαθήματος, πρέπει να δημιουργήσουμε προϋποθέσεις, ώστε οι σπουδαστές να συναντούν τους ίδιους τρόπους εκτέλεσης συλλογισμών, και να τους αφήσουμε να ωφεληθούν από τα λάθη τους. Η πρόοδος φαίνεται, σαφώς, από το ότι ύστερα από κάθε τέτοια συνάντηση, το ποσοστό των σπουδαστών που ανταποκρίνονται με επιτυχία στις δοκιμασίες αυξάνεται.²

Η εφαρμογή ενός ιδιαίτερου τρόπου εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών, που αρχικά αναπτύχθηκε σε ορισμένη περιοχή της ύλης (λόγου χάρη, στην περιοχή των βασικών γνώσεων στις θετικές επιστήμες), σε ανώτερο επίπεδο στην ίδια περιοχή προϋποθέτει μεγάλο άλμα. Ακόμα δυσκολότερη είναι η εφαρμογή του σε απολύτως διαφορετικές περιοχές. Τα λίγα ενδεικτικά στοιχεία που διαθέτουμε δείχνουν ότι, αν έχουμε πείρα μόνο σε έναν τομέα γνώσης, δύσκολα μπορούμε να μεταφερθούμε σε άλλον. Προσωπικά, είμαι απολύτως πεπεισμένος (κυρίως από αποσπασματικές ανεπίσημες

2. Σε κάθε είδους δοκιμασία (λόγου χάρη, σε δοκιμασία που περιλαμβάνει αριθμητικούς συλλογισμούς με διαιρέσεις ή τη διαμόρφωση σαφούς λειτουργικής και ποιότητας διάκρισης μεταξύ της μάζας και του όγκου), η εξέλιξη της προόδου των μαθητών είναι αντιπροσωπευτική: Ύστερα από λίγες επαναλήψεις, το ποσοστό επιτυχόντων μεγαλώνει σημαντικά. Η καμπύλη, ωστόσο, είναι κοίλη προς τα κάτω και ύστερα από τέσσερις έως έξι ευκαιρίες επανάληψης σταθεροποιείται μεταξύ του 70% και του 90% [Arons (1976)· Rosenquist (1982)]. Δεν μπορούσαμε ποτέ να πετύχουμε ποσοστό 100%. Περίπου το 15% των μαθητών, οι οποίοι βρίσκονταν υπό την καθοδήγησή μας, ουδέποτε ανέπτυξε την ικανότητα να ανταποκρίνεται με επιτυχία σε δεδομένη άσκηση, ακόμα και με περαιτέρω επαναλήψεις και με εντατική εξατομικευμένη διδασκαλία.

Υπάρχουν ορισμένες προφανείς ερωτήσεις: Η επιδεξιότητά μας δεν επαρκεί για να κατευθύνουμε και να εκπαιδεύσουμε αυτό το 15%; Ύστερα από μεγαλύτερο χρονικό διάστημα εμφανίζεται πάλι το ίδιο ποσοστό επιτυχίας; Τι θα συνέβαινε αν τα ίδια άτομα είχαν εκπαιδευτεί με αυτόν τον τρόπο στην ηλικία των 11 ή 12 χρόνων και όχι με τόση καθυστέρηση; Υπάρχουν ορισμένα άτομα που αντικειμενικά είναι αδύνατο να αναπτύξουν αυτές τις ικανότητες; Μήπως οι παρατηρήσεις μας για κάποιο λόγο δεν είναι έγκυρες; Το μόνο, ωστόσο, που μπορούμε να πούμε είναι ότι δεν γνωρίζουμε τις απαντήσεις. Έχουμε φτάσει σε κάποιο σημείο μέγιστης απόδοσης στον διαθέσιμο χρόνο και με τα διαθέσιμα μέσα δεν μπορούμε, όμως, να προχωρήσουμε περισσότερο. Το εμπειρικό γεγονός είναι ότι η καμπύλη προόδου σταθεροποιείται κάτω από το 100%. Ελπίζουμε ότι με την πάροδο του χρόνου θα αρχίσουν να έρχονται στο φως απαντήσεις στα συγκεκριμένα ερωτήματα.

ενδείξεις ανάμεικτες με ευσεβή πόθο) ότι μεγάλη πρόοδος είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί, αν ταυτόχρονα σε διαφορετικούς τομείς οι σπουδαστές εκτεθούν σε διανοητικές εμπειρίες ενός είδους. Η συγκεκριμένη άποψη είναι, μάλλον, εικασία: σε λυκειακό επίπεδο, δεν έχουν εκτελεστεί συντονισμένα πειράματα.

Οι αποσπασματικές ενδείξεις που έχω υπόψη μου προέρχονται από δύο διαφορετικές πηγές:

1. *Εμπειρία από ένα «σφιχτοδεμένο» πρόγραμμα σπουδών του Amherst College τις δεκαετίες του '50 και του '60.* Στο πλαίσιο του εν λόγω προγράμματος, υπήρχε ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ μιας σειράς μαθημάτων συντακτικού αγγλικής γλώσσας, θετικών επιστημών, αμερικανικής ιστορίας και μαθημάτων για τον Δυτικό Πολιτισμό. Οι σειρές είχαν μεταξύ τους ορισμένα κοινά στοιχεία: στη στάση απέναντι στο αντικείμενό τους, στον τρόπο προσέγγισής του και στο διανοητικό περιεχόμενό τους [Kennedy (1955)· Arons (1978)]. Εκ των υστέρων, οι απόφοιτοι εκείνης της περιόδου έχουν την τάση να σχολιάζουν πολύ κολακευτικά την επίδραση της τότε εμπειρίας στη διανοητική τους ανάπτυξη. (Ένα τόσο «σφιχτοδεμένο» πρόγραμμα σπουδών είναι, μάλλον, ειδική περίπτωση· όπως, λοιπόν, συνέβη και τότε, είναι δυνατό να εφαρμοστεί μόνο σε μικρό ομοιογενές σώμα μαθητών. Σε περισσότερο ετερογενείς καταστάσεις, συνετές μετατροπές θα ήταν αποτελεσματικές.)

2. *Γεγονότα που αναφέρθηκαν για την επίδραση του εκπαιδευτικού υλικού διδασκαλίας των θετικών επιστημών στο δημοτικό, που αναπτύχθηκε υπό την αιγίδα του Εθνικού Ιδρύματος Θετικών Επιστημών τη δεκαετία του '60.* Οι ενδείξεις είναι πολύ έμμεσες· υποβάλλουν, ωστόσο, πολλές ιδέες και αξίζει να συζητηθούν λίγο. Οι ομάδες που ανέπτυξαν τα νέα εκπαιδευτικά προγράμματα και τα εφάρμοσαν σε μαθητές, επιχείρησαν να διδάξουν και να «συναντήσουν» τους μαθητές στο δικό τους πνευματικό επίπεδο, θεωρώντας ως σημείο εκκίνησης το γλωσσικό και εννοιολογικό υπόβαθρό τους. Δεν στηρίχθηκαν σε «εξωτικές», μη ελεγμένες υποθέσεις και παραδοχές για τον τρόπο που το παιδί μαθαίνει. Η ανάπτυξη των θεμάτων εκκινούσε από δεδομένα της άμεσης εμπειρίας και από παρατηρήσεις. Από αυτά τα δεδομένα, με τη διαδικασία της επαγωγής και της σύνθεσης, αναπτύσσονταν οι έννοιες, με το δάσκαλο μάλλον να καθοδηγεί παρά να «βγάζει λόγους». Πρώτα αναπτύσσονταν οι ιδέες και μετά επινοούνταν τα ονόματα. Οι τεχνικοί όροι αναπτύσσονταν με λειτουργικό τρόπο, μόνο αφού τα εμπειρικά δεδομένα τους προσέδιδαν κύρος και νόημα. [Ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει, λόγου χάρη, στο πρόγραμμα «Elementary Science Study» (Webster Division McGraw-Hill Book Co., St. Luis, MO· «Science

Curriculum Improvement Study and Science», «A Process Approach», και τα δύο από το Delta Education, Nashua NH.]

Η ουσία του τρόπου διδασκαλίας, στο πλαίσιο αυτών των προγραμμάτων φυσικής ή βιολογίας, είναι να δοθεί χρόνος στο παιδί για να ερευνήσει, να ελέγξει, να χειριστεί, να συζητήσει και να διατυπώσει ισχυρισμούς για τα νοήματα και τις ερμηνείες, να αρθρώσει υποθέσεις, να ακολουθήσει δοκιμαστικά κάποιες σκέψεις μέχρι να φτάσει σε αδιέξοδο, να επαναλάβει τα βήματά του (αν το θεωρήσει απαραίτητο), να κάνει λάθη και να αναθεωρήσει τις απόψεις του και τον τρόπο ερμηνείας, όταν καθοδηγούμενο αντιληφθεί ότι υπάρχουν αντιφάσεις σ' αυτές (παρά να του ειπωθεί με τη μορφή διακήρυξης ότι οι ιδέες του είναι «σωστές» ή «λαθεμένες») και να αποφασίσει τότε και πώς πρέπει να εκτελέσει αριθμητικούς υπολογισμούς.

Ορισμένες φορές, ο εν λόγω τρόπος μάθησης ονομάζεται (παραπλανητικά) «μάθηση μέσω της ανακάλυψης». Δεν περιμένουμε, βεβαίως, από το δεκάχρονο παιδί να γίνει Νεύτων, Faraday, Agassize ή Δαρβίνος και να «ανακαλύψει» εκ νέου τις έννοιες και τις θεωρίες. Κανονικά, τα δραστήρια, περίεργα παιδιά, απλώς αντιδρούν θετικά στην ευκαιρία που τους δίνεται να μάθουν μέσω *καθοδηγούμενης* εμπειρίας και παρατήρησης. Συγκρατούν, ότι μαθαίνουν, επειδή συνθέτουν μόνοι τους απτά εμπειρικά δεδομένα: δεν απομνημονεύουν σωρούς από άγνωστες λέξεις χωρίς νόημα. Γνωρίζουν από πού προέρχεται η γνώση τους και μπορούν να θέσουν ερωτήματα του είδους: «Πώς γνωρίζουμε ότι...; Γιατί πιστεύουμε ότι...;»

Από τότε που για πρώτη φορά εμφανίστηκαν αυτά τα προγράμματα, οι ερευνητές έλεγξαν τις επιδόσεις των μαθητών που είχαν εκτεθεί σ' αυτά. Τα παιδιά, εκτός του ότι έδειχναν ότι είχαν βελτιωθεί σημαντικά στον έλεγχο των θεμάτων που αφορούσαν τις θετικές επιστήμες, έδειχναν σημαντικά μεγαλύτερη πρόοδο στον προφορικό λόγο και στην ικανότητα εκτέλεσης αριθμητικών συλλογισμών. Μάλιστα, η επίδραση του προγράμματος ήταν εντονότερη σε μη προνομιούχα παιδιά [βλ. Bredderman (1982), Shymansky κ.ά. (1983), Wellman (1978)]. Με άλλα λόγια, όταν ο συγκεκριμένος τρόπος εκπαίδευσης εφαρμόζεται ικανοποιητικά, επηρεάζει και άλλους τομείς εκτός από τη συμπεριφορά του παιδιού στο πλαίσιο των θετικών επιστημών.

Δεν υπάρχει άμεση παρόμοια απόδειξη που να στηρίζει την άποψη ότι με τη διδακτική προσπάθεια που περιέγραψα θα ενισχύαμε την ικανότητα των μαθητών του λυκείου να εκτελούν συλλογισμούς. Ισχυρίζομαι, ωστόσο, ότι οι παρατηρήσεις της επίδρασης πάνω στο παιδί των προγραμμάτων διδασκαλίας των θετικών επιστημών όπου το παιδί προσανατολίζεται στην ανεύρεση της γνώσης είναι, τουλάχιστον, πολύ ενθαρρυντικές. Επειδή υπεισέρχονται παρόμοιες διαδικασίες και στην εκπαίδευση των μαθητών του λυκείου, νομίζω ότι η προσπάθεια αξίζει να επαναληφθεί και με αυτούς.

13.6 Οι συνέπειες της δυσαρμονίας μεταξύ της διδακτέας ύλης και της αντίληψης των μαθητών

Είμαστε όντως τυχεροί, επειδή σημαντικό τμήμα του μαθητικού πληθυσμού μας, ίσως το ένα τέταρτο, αφομοιώνει αυτομάτως τους τρόπους εκτέλεσης αφηρημένων λογικών συλλογισμών. (Σκεφτείτε τις συνέπειες στην κοινωνία μας αν συνέβαινε το αντίθετο!) Αυτό το γεγονός, ωστόσο, δεν μειώνει την απαίτηση να βελτιώσουμε την προσπάθειά μας. Όπως επισήμανα προηγουμένως, σήμερα υπάρχει σοβαρή δυσαρμονία μεταξύ του εκπαιδευτικού υλικού και των προσδοκιών του από τη μια πλευρά και του πραγματικού επιπέδου πνευματικής ανάπτυξης των μαθητών από την άλλη. Τα εκπαιδευτικά υλικά προϋποθέτουν έμμεσα ικανότητα εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών. Προϋποθέτουν, επίσης, επίπεδο γνώσης και ικανότητες διατύπωσης επεξηγήσεων, που πολλοί μαθητές δεν διαθέτουν ακόμα. Ούτε τα υλικά ούτε οι κυρίαρχοι τρόποι διδασκαλίας προσφέρουν επίμονη, επαναλαμβανόμενη καθοδήγηση με ομαλό ρυθμό. Αυτή η καθοδήγηση βοηθά τους μαθητές να αναπτύξουν τις απαραίτητες πνευματικές ικανότητες.

Η δυσαρμονία αυτή έχει εκτεταμένες επιβλαβείς συνέπειες. Επιβάλλονται στους μαθητές να αφομοιώσουν ύλη που προϋποθέτει ικανότητα εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών, την οποία ακόμα δεν διαθέτουν, τους ωθούμε στην απομνημόνευση. Διατρέχοντας, μάλιστα, την ύλη με ρυθμό που αποκλείει την ουσιαστική μάθηση και κατανόηση, ακόμα και στην περίπτωση που έχουν σχηματιστεί οι απαραίτητες δεξιότητες εκτέλεσης συλλογισμών, το πρόβλημα εντείνεται. Σε τέτοιες συνθήκες πίεσης, οι μαθητές δεν αποκτούν εμπειρία τι σημαίνει όντως «κατανοώ». Δεν μπορούν να ελέγξουν τη «γνώση» τους μέσω εύλογων συμπερασμάτων που προκύπτουν απ' αυτή ή ως προς την εσωτερική συνέπειά της. Δεν έχουν ιδέα για την προέλευση των κοινώς παραδεκτών ιδεών ή συμπερασμάτων, για το πώς αξιολογούνται και γιατί τα δεχόμαστε ή τα πιστεύουμε. Με άλλα λόγια, δεν έχουν την ευκαιρία να αναπτύξουν τις συνήθειες της κριτικής σκέψης που προσδιορίσαμε στο παρόν δοκίμιο. Αποκτούν, μάλιστα, τη λανθασμένη αντίληψη ότι η γνώση συνίσταται στην απομνημόνευση διακηρύξεων και τεχνικής ορολογίας και στην αναμάσηση των κοινώς παραδεκτών «γεγονότων». Αν και οι συγκεκριμένες παραλείψεις επικρατούν ευρέως στις θετικές επιστήμες, δεν περιορίζονται σ' αυτές. Διαποτίζουν όλο το σύστημά μας, συμπεριλαμβανομένου του μαθήματος της ιστορίας και των ανθρωπιστικών και κοινωνικών επιστημών.

Ένα παράδειγμα που δείχνει το μηχανισμό με τον οποίο ένα ολόκληρο σύστημα εκπαίδευσης υποβαθμίζεται, προκύπτει από την εμπειρία μου με την εκτέλεση αριθμητικών συλλογισμών. Όταν ανακάλυψα ότι όχι περισ-

σότερο από το 10% των προπτυχιακών φοιτητών τμημάτων θεωρητικής κατεύθυνσης μπορούσε να εκτελέσει αριθμητικούς συλλογισμούς χρησιμοποιώντας τη διαίρεση, αναρωτήθηκα τι απέγιναν τα παλιά προβλήματα της πρακτικής αριθμητικής που χρησιμοποιούνταν για να καλλιεργηθεί ο εν λόγω τρόπος εκτέλεσης συλλογισμών στην 5η και την 6η τάξη του δημοτικού. Ανατρέχοντας στα υπάρχοντα εγχειρίδια αριθμητικής του δημοτικού, διαπίστωσα ότι υπήρχαν ακόμα σ' αυτά προβλήματα της δικής μου εποχής και ίσως να είχαν βελτιωθεί σημαντικά. Όταν ρώτημα τους φοιτητές μου στο πανεπιστήμιο γι' αυτό το θέμα, άρχισαν να αποκαλύπτουν ότι ουδέποτε, ουσιαστικά, υποχρεώθηκαν να λύσουν τέτοια προβλήματα στο σχολείο, επειδή ήταν «πολύ δύσκολα». Όταν άρχισα να εργάζομαι με δασκάλους του δημοτικού που ήδη υπηρετούσαν σε σχολείο και ανακάλυψα ότι και οι ίδιοι δεν μπορούσαν να αντιμετωπίσουν τέτοια προβλήματα, η εικόνα αποσαφηνίστηκε: ο μηχανικός θα περιέγραφε το σύστημα ως «βρόχο εκφυλιζόμενης επανατροφοδότησης». Η αδυναμία των δασκάλων στην εκτέλεση αριθμητικών συλλογισμών ουδέποτε ανιχνεύθηκε ούτε θεραπεύτηκε όταν οι δάσκαλοι βρέθηκαν στο πανεπιστήμιο. Αποφοίτησαν, πήγαν στα σχολεία και, με το να μη ζητάνε από τους μαθητές να εκτελέσουν προβλήματα πρακτικής αριθμητικής, με τη δικαιολογία ότι τα συγκεκριμένα προβλήματα είναι «πολύ δύσκολα», μεταβίβασαν την αδυναμία και το φόβο τους στα περισσότερα παιδιά. Αυτά τα παιδιά συνέχισαν τις σπουδές τους στο πανεπιστήμιο κ.ο.κ.

Η περίπτωση εκτέλεσης αριθμητικών συλλογισμών είναι ιδιαίτερα σαφές και ζωντανό παράδειγμα. Αυτή η εικόνα εμφανίζεται επανειλημμένα σε πολλές περιπτώσεις: στην αδυναμία των μαθητών να αφομοιώσουν και να κατανοήσουν τις θεμελιωδέστερες έννοιες των θετικών επιστημών (λόγου χάρη, την ταχύτητα και την επιτάχυνση ή την έννοια της πλευσης και της βύθισης), στην ανεπάρκειά τους στον γραπτό και προφορικό λόγο, στην ανικανότητά τους να παρακολουθήσουν τον τρόπο σκέψης του ιστορικού και στην τυφλή προσήλωσή τους, κατά συνέπεια, στα ιστορικά «γεγονότα».

Θά 'θελα να επισημάνω, με ιδιαίτερη έμφαση, ότι οι δάσκαλοι με τις αδυναμίες που περιέγραψα δεν είναι οι μόνοι που πρέπει να κατηγορούμε γι' αυτή την κατάσταση. Η είσοδος στο «βρόχο επανατροφοδότησης» (του μεταφορικού σχήματός μου) βρίσκεται στα *δικά μας* χέρια στα λύκεια και στα πανεπιστήμια. *Εμείς* δικαιωνίζουμε τη δυσαρμονία: με τα μέσα που *εμείς* ελέγχουμε δεν κατορθώνουμε να θεραπεύσουμε τις αδυναμίες και να ενισχύσουμε την ικανότητα εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών. *Εμείς* φτιάχνουμε τους δασκάλους έτσι όπως είναι.

Η δυσαρμονία για την οποία παραπονιέμαι, δεν επηρεάζει μόνο τους μελλοντικούς δασκάλους, αλλά όλο τον μαθητικό πληθυσμό, εκτός από το 25% που (παρά το υπάρχον σύστημα) κατορθώνει να διεισδύσει αυτόματα στα χαρακτηριστικά της εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών. Επιμένω τό-

σο πολύ στους δασκάλους, επειδή παίζουν κρίσιμο ρόλο στη συντήρηση του «βρόχου ανατροφοδότησης». Φανταστείτε την τεράστια ώθηση που θα προέκυπτε αν, μεταβάλλοντας τον παράγοντα δάσκαλο, η «εκφυλιζόμενη επανατροφοδότηση» μετατρέποταν σε «αναζωογονούσα». Φανταστείτε πόσα πράγματα θα μπορούσαμε να πετύχουμε σε πανεπιστημιακό επίπεδο αν εξαλειφόταν η δυσαρμονία μεταξύ του υλικού και της ετοιμότητας των μαθητών!

13.7 Εξακρίβωση των δυσκολιών των μαθητών

Είναι χρήσιμο να μπορούμε με αξιόπιστο τρόπο να επισημάνουμε ορισμένες μόνιμες μαθησιακές δυσκολίες των μαθητών και να διαπιστώσουμε το επίπεδο της ικανότητάς τους να εκτελούν αφηρημένους συλλογισμούς. Πρέπει, δηλαδή, να μάθουμε να θέτουμε ακολουθίες απλών ερωτήσεων που καθοδηγούν με προμελετημένο σωκρατικό τρόπο τους μαθητές. Μετά από κάθε ερώτηση, πρέπει να σιωπούμε και να ακούμε προσεκτικά την απάντηση. (Όταν η απάντηση δεν δοθεί μέσα σε ένα δευτερόλεπτο, υπάρχει η τάση μεταξύ των περισσότερων άπειρων ερωτητητών να δίνουν την απάντηση ή να αλλάζουν την ερώτηση. Πρέπει να μάθουμε να περιμένουμε τέσσερα-πέντε δευτερόλεπτα. Τότε, επειδή δίνουμε την ευκαιρία στους μαθητές να σκεφτούν, διατυπώνουν τις απαντήσεις τους πιο ολοκληρωμένα και αποκαλύπτεται ακριβώς ο τρόπος σκέψης τους.)

Από τις απαντήσεις των μαθητών σε προσεγμένες ερωτήσεις του είδους που προαναφέραμε, αρχίζουμε να διακρίνουμε τα κύρια σφάλματα, τις παρανοήσεις και τα λανθασμένα βήματα στην πορεία της σκέψης τους. Δεν μαθαίνουμε τίποτα δίνοντας στους μαθητές «σωστές απαντήσεις» ή «σαφείς ερμηνείες». Στην πραγματικότητα, οι μαθητές δεν ωφελούνται από απαντήσεις ή επεξηγήσεις αυτού του είδους· απλώς τις απομνημονεύουν. Τους βοηθάμε πολύ ουσιαστικότερα, αν τους κατευθύνουμε να έρθουν αντιμέτωποι με τις αντιφάσεις και τις ασυνέπειες των λόγων τους. Αποτέλεσμα: μεταβάλλουν αυτόματα τις απόψεις που έχουν διατυπώσει.

Σ' αυτούς τους διαλόγους, δύο σημεία κάνουν εντύπωση στους πρωτόπειρους ερευνητές. Πρώτον, διαπιστώνουν ότι, ουσιαστικά, όλες οι προηγούμενες εικασίες τους για το τι σκέφονται και για το τι δεν σκέφτονται οι μαθητές είναι λανθασμένες· αντίθετα, αποκαλύπτονται απολύτως απρόβλεπτες, αλλά θεμελιώδεις, αληθοφανείς και βαθιά ριζωμένες πρωτογενείς αντιλήψεις, παρανοήσεις και πλάνες (τις οποίες ο ερευνητής αγνοούσε). Δεύτερον, ανακαλύπτουν «τη σανίδα σωτηρίας» σε αυτή την απρόβλεπτη πολυπλοκότητα: το κλισέ που λέγεται συχνά, ότι τα άτομα διαφέρουν απολύτως μεταξύ τους, είναι ολοφάνερα λανθασμένο· κάθε είδος παρανόησης ή λανθασμένου τρόπος σκέψης εμφανίζεται με αξιοσημείωτη επαναληψι-

μότητα σε πολλά άτομα. Ορισμένες δυσκολίες και παρανοήσεις επικρατούν ευρέως. Αν ανακαλύψουμε κάποια προσέγγιση ή ιδέα με την οποία ξεπερνιέται μια ιδιαίτερη δυσκολία, η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν είναι χρήσιμη μόνο σε ένα άτομο αλλά σε πολλά.

Πρέπει να επισημάνω ότι τα συμπεράσματα είναι απαραίτητο να στηρίζονται σε προσεκτική και ακριβή ακρόαση των μαθητών. Η επιπόλαιη προέκταση της εμπειρίας μας οδηγεί πάντοτε σε λανθασμένα συμπεράσματα. Όσοι από εμάς ήταν αρκετά τυχεροί για να γίνουν ικανοί επαγγελματίες στον τομέα των θετικών επιστημών, ανήκουν, κυρίως, στη μειονότητα του 25% που προανέφερα. Προχωρήσαμε *παρά* το υπάρχον σύστημα και όχι *εξαιτίας* του. Η μαθησιακή εμπειρία μας δεν είναι αντιπροσωπευτική. Αν την επικαλούμαστε, λοιπόν, σπανίως οδηγούμεστε σε σωστή αντίληψη για το τι συμβαίνει στους περισσότερους μαθητές.

13.8 Οι εξετάσεις

Το επάγγελμά μας πάσχει σοβαρά από το χαμηλό επίπεδο ποιότητας των εξετάσεων. Σε κάθε τομέα υπάρχει εκτενής και λεπτομερής βιβλιογραφία για το θέμα των εξετάσεων· η επίδρασή της, όμως, είναι δυστυχώς περιορισμένη. Ορισμένοι κυνικοί έχουν επισημάνει ότι υπάρχει καταστροφική συμπαιγνία μεταξύ μαθητών και καθηγητών: οι μαθητές αποδέχονται μια κακή διδασκαλία υπό τον όρο ότι θα δώσουν κακής ποιότητας εξετάσεις.

Είναι περιττό να προσποιούμαστε ότι θέτουμε ανώτερους πνευματικούς στόχους, ενώ εξετάζουμε μόνο τα τελικά συμπεράσματα, το λεξιλόγιο και τα «γεγονότα» ή τις «πληροφορίες». Οι πραγματικοί στόχοι, βεβαίως, δεν προσδιορίζονται από το τι λέμε, αλλά από το τι ζητάμε στις εξετάσεις. Οι μαθητές διαπιστώνουν γρήγορα ποιες είναι οι πραγματικές απαιτήσεις μιας σειράς μαθημάτων και κατευθύνουν τις προσπάθειές τους σύμφωνα με αυτές τις απαιτήσεις. Η προσοχή τους είναι δυνατό να εστιαστεί σε ανώτερες διανοητικές διαδικασίες και απαιτήσεις μόνο αν αυτά τα στοιχεία περιλαμβάνονται στις εξετάσεις και στις γραπτές εργασίες και παίζουν σημαντικό ρόλο στη βαθμολόγησή τους.

Ελπίζω διακαώς ότι, αν το προσωπικό δείξει μεγαλύτερη ενσυνείδητη προσοχή στον τρόπο σκέψης και εκτέλεσης συλλογισμών, θα οδηγηθούμε στη στατιστική βελτίωση της ποιότητας των θεμάτων που δίνονται στις εξετάσεις και στις γραπτές εργασίες. Είναι δύσκολο να βρεθούν καλά θέματα και η έμπνευση ενός ατόμου δεν επαρκεί. Η συνεργατική προσπάθεια θα μπορούσε, λοιπόν, να ενισχύσει την τράπεζα επιτυχημένων θεμάτων εξετάσεων και να βοηθήσει την ανταλλαγή τους μεταξύ των συναδέλφων.

13.9 Ορισμένες σκέψεις για τη βελτίωση του διδακτικού προσωπικού

Ο στόχος της ενίσχυσης της κριτικής σκέψης των μαθητών είναι σχεδόν καθολικά αποδεκτός. Φαίνεται λογικό, λοιπόν, να καθοδηγηθούν τα μέλη του προσωπικού να ακονίσουν τη δική τους κριτική σκέψη επιλέγοντας θέματα από την ύλη της ειδικότητάς τους — θέματα που τα έχουν διδάξει και με τα οποία αισθάνονται άνετα. Το πρόβλημα είναι πώς να ξεφύγουμε από τις ασαφείς και ανούσιες γενικεύσεις και να εξασφαλίσουμε τις προϋποθέσεις για τη μελέτη και το χειρισμό ειδικών θεμάτων. Αυτός ο στόχος πραγματοποιείται αν εντοπίσουμε σε μια ενότητα τον τρόπο σκέψης και εκτέλεσης συλλογισμών που πρέπει να ακολουθούν οι μαθητές και αν επινοήσουμε ερωτήσεις που καθοδηγούν τους μαθητές να διεκδύσουν σ' αυτόν.

Χρήσιμα αποτελέσματα είναι δυνατό να προκύψουν από την οργάνωση σεμιναρίων για το προσωπικό όπου οι συμμετέχοντες εκτελούν κατά ζεύγη εργασίες που τους έχουν ζητηθεί. Εργασίες αυτού του είδους είναι:

1. Επιλέξτε από την περιοχή της ειδικότητάς σας μια ενότητα ύλης με την οποία είστε βαθιά εξοικειωμένοι και που η μελέτη της πιστεύετε ότι θα βοηθήσει το μαθητή να πετύχει συγκεκριμένο πνευματικό στόχο ή να αποκτήσει επίγνωση του θέματος ή ότι θα του χρησιμεύσει στην εξάσκηση σε συγκεκριμένο τρόπο εκτέλεσης συλλογισμών. (Η ενότητα πρέπει να είναι όσο το δυνατό μικρότερης έκτασης· ο στόχος της, ωστόσο, πρέπει να είναι υψηλός και να μην εκφυλίζεται σε τετριμμένο θέμα.)

2. Εκθέστε το σκοπό ή το είδος της επίγνωσης που υπεισέρχεται.

3. Περιγράψτε την ουσία της ενότητας· δείξτε πώς μέσω της ενότητας εξασφαλίζεται η πραγματοποίηση του στόχου ή η απόκτηση της ικανότητας.

4. Καταγράψτε τις ικανότητες εκτέλεσης αφηρημένων συλλογισμών που πρέπει ήδη να κατέχουν οι μαθητές ή πρέπει να τους βοηθήσουμε να αναπτύξουν, για να μπορέσουν να αντιμετωπίσουν κατάλληλα το θέμα και να μην αναγκαστούν να καταφύγουν στην απομνημόνευση. (Η ανάλυση πρέπει να στηρίζεται στον κατάλογο που προσδιορίσαμε στο παρόν άρθρο ή σε άλλο κατάλογο κατάλληλα τροποποιημένο ή συμπληρωμένο.)

5. Προσδιορίστε το είδος της βοήθειας προς τους μαθητές που θα δυσκολευτούν να διεκδύσουν στο υλικό. (Η βοήθεια είναι δυνατό να περιλαμβάνει ερωτήσεις που συμβάλουν να εξαχθούν σημαντικά συμπεράσματα ή να αποσαφηνιστούν έννοιες, ή ερωτήσεις που εστιάζουν την προσοχή σε δυσδιάκριτες παραδοχές.)

6. Προσδιορίστε το περιεχόμενο της γραπτής εργασίας που θα ζητήσετε από τους μαθητές σχετικά με το θέμα. Προσδιορίστε, επίσης, τον τρόπο με τον οποίο θα ελέγξετε αν τελικά το έχουν αφομοιώσει και κατανοήσει.

7. Προσδιορίστε πώς θα καθοδηγήσετε τους μαθητές να «σταθούν μακριά» από το θέμα, για να συνειδητοποιήσουν τα χαρακτηριστικά του τρόπου σκέψης και των συλλογισμών με τα οποία ασχολήθηκαν. Προσδιορίστε, επίσης, πώς θα βοηθήσετε τους μαθητές να συνδέσουν την εμπειρία που είχαν στο συγκεκριμένο πεδίο με την εμπειρία που έχουν αποκτήσει σε άλλα μαθήματα.

Φαντάζομαι ότι στο σεμινάριο θα συναντώνται άτομα του ίδιου αλλά και διαφορετικού γνωστικού τομέα. Κάθε ζεύγος θα παρουσιάζει την ανάλυσή του για να συζητηθεί και να σχολιαστεί απ' όλη την ομάδα. Δεν είναι απαραίτητο να υπάρχουν «εμπειρογνώμονες» ή «αυθεντίες» για να κατευθύνουν τις εργασίες του σεμιναρίου. Θέλω να πιστεύω ότι τα μέλη του προσωπικού που ενδιαφέρονται σοβαρά για την ανάπτυξη των μαθητών τους θα βρουν την άσκηση ενδιαφέρουσα και πνευματικά διεγερτική. Θα συνειδητοποιήσουν τα κοινά στοιχεία μεταξύ διαφορετικών τομέων και θα προσδιορίσουν ακριβέστερα τις πραγματικές διαφορές τους. Η αναγκαιότητα να παρουσιάζεται η ουσία μιας ιδιαίτερης πνευματικής άσκησης σε συναδέλφους άλλων τομέων θα βοηθήσει να ελαττωθεί η χρησιμοποίηση τεχνικής ορολογίας και θα ακονίσει την αντίληψη του πώς είναι δυνατό να αξιοποιήσουμε ορισμένες περιοχές της ύλης. Τέλος, όλη η επιχείρηση θα βοηθήσει στην καλλιέργεια ενός εκπαιδευτικού κλίματος όπου οι εκπαιδευόμενοι θα αντιλαμβάνονται σαφώς ότι βοηθούνται να αναπτύξουν τη δική τους ικανότητα κριτικής σκέψης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ADAMS, H. (1918), *The Education of Henry Adams* (Houghton Mifflin, Boston (many subsequent editions)).
- ADLER, C. (1958), "On the Humanization of Some Physics Problems," *Am. J. Phys.* **26**, 42.
- AIKEN, C. (1953), *Collected Poems* (Oxford University Press, New York).
- ANDERSON, J. R. (1980), *Cognitive Psychology and Its Implications* (Freeman, San Francisco).
- ANDERSON, J. R. ed. (1981), *Cognitive Skills and Their Acquisition* (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ).
- ARONS, A. B. (1965), *Development of Concepts of Physics* (Addison-Wesley, Reading, MA).
- ARONS, A. B. (1975), "Newton and the American Political Tradition," *Am. J. Phys.* **43**, 209.
- ARONS, A. B. (1976), "Cultivating the Capacity for Formal Reasoning," *Am. J. Phys.* **44**, 834.
- ARONS, A. B. (1977), *The Various Language: An Inquiry Approach to the Physical Sciences* (Oxford University Press, New York).
- ARONS, A. B. (1978), "Teaching Science" in *Scholars Who Teach*, CAHN, S. M., ed. (Nelson-Hall, Chicago).
- ARONS, A. B. (1979), "Basic Physics of the Semidiurnal Lunar Tide," *Am. J. Phys.* **47**, 934.
- ARONS, A. B. (1981a), "Whither Do We Hurry Hence?" in *AAPT Pathways*. Proceedings of the Fiftieth Anniversary Symposium of the AAPT. (Published by the American Association of Physics Teachers.)
- ARONS, A. B. (1981b), "Thinking, Reasoning and Understanding in Introductory Physics Courses," *The Physics Teacher* **19**, 166.
- ARONS, A. B. (1982), "Phenomenology and Logical Reasoning in Introductory Physics Courses," *Am. J. Phys.* **50**, 13.
- ARONS, A. B. (1983a), "Achieving Wider Scientific Literacy," *Daedalus* Spring 1983.
- ARONS, A. B. (1983b), "Student Patterns of Thinking and Reasoning, Part One," *The Physics Teacher* **21**, 576.
- ARONS, A. B. (1984a,b), "Student Patterns of Thinking and Reasoning, Parts Two and Three," *The Physics Teacher* **22**, 21, 88.
- ARONS, A. B. (1984c), "Education Through Science," *J. Col. Sci. Teaching* **13**, 210.
- ARONS, A. B. (1984d), "Computer-Based Instructional Dialogs in Science Courses," *Science* **224**, 1051.
- ARONS, A. B. (1985), "Critical Thinking and the Baccalaureate Curriculum," *Liberal Education* **71**, 141.
- ARONS, A. B. (1986), "Overcoming Conceptual Difficulties in Physical Science Through Computer-Based Socratic Dialogs," in *Designing Computer-Based Learning Materials*, WEINSTOCK, H., and BORK, A., eds. Proceedings of the NATO workshop held in San Miniato, Italy, July 1985. NATO ASI Series F: Computer and Systems Sciences, Vol. 23 (Springer-Verlag, Berlin, New York).

- ARONS, A. B., and BORK, A. M. (1964), "Newton's Laws of Motion and the 17th Century Laws of Impact," *Am. J. Phys.* 32, 313.
- ARONS, A. B., and KARPLUS, R. (1976), "Implications of Accumulating Data on Levels of Intellectual Development," *Am. J. Phys.* 44, 396.
- ARONS, A. B., and PEPPARD, M. B. (1965), "Einstein's Proposal of the Photon Concept: A Translation of the *Annalen der Physik* Paper of 1905," *Am. J. Phys.* 33, 367.
- BARTLETT, A. A. (1976-1979), "The Exponential Function" (Parts I-IX) *The Physics Teacher* 14, 393, 485; 15, 37, 98, 225; 16, 23, 92; 17, 23.
- BIRKS, J. B. (1962), *Rutherford at Manchester* (Heywood & Co. Ltd., London).
- BOHR, N. (1913), "On the Constitution of Atoms and Molecules," *Phil. Mag.* 26, 6, 1.
- BORK, A. (1979), "Interactive Learning," *Am. J. Phys.* 47, 5.
- BORK, A. (1981), *Learning With Computers* (Digital Press, Bedford, MA).
- BRASELL, H. (1987), "The Effect of Real-Time Laboratory Graphing on Learning Graphic Representations of Distance and Velocity," *J. Res. Sci. Teach.* 24, 385.
- BREDDERMAN, T. (1982), "Effects of Activity-Based Science in Elementary School," in *Education in the '80's: Science*. ROWE, M. B., ed. (National Education Association, Washington, DC).
- BRIDGMAN, P. W. (1941), *The Nature of Thermodynamics* (Harvard University Press, Cambridge, MA).
- BRIDGMAN, P. W. (1962), *A Sophisticate's Primer of Relativity* (Wesleyan University Press, Middletown, CT. Revised edition 1983).
- BRUSH, S. G. (1961), "John James Waterston and the Kinetic Theory of Gases," *Am. Scientist* 49, 202.
- BRUSH, S. G. (1965), *Kinetic Theory. Vol. 1. The Nature of Gases and of Heat* (Pergamon Press, Oxford).
- CASPER, B. M. and NOER, R. J. (1972), *Revolutions in Physics* (W. W. Norton & Co., New York).
- CHAMPAGNE, A. B., GUNSTONE, R. F., and KLOPPER, L. E. (1985), "Instructional Consequences of Students' Knowledge about Physical Phenomena," in *Cognitive Structure and Conceptual Change*, WEST, L. H. T., and PINES, A. L., eds. (Academic Press, Orlando, FL).
- CHAMPAGNE, A. B., KLOPPER, L. E., and ANDERSON, J. H. (1980), "Factors Influencing the Learning of Classical Mechanics," *Am. J. Phys.* 48, 1074.
- CHIAPPETTA, E. L. (1976), "A Review of Piagetian Studies Relevant to Science Instruction at the Secondary and College Level," *Sci. Ed.* 60, 253.
- CLEMENT, J. (1979), "Mapping a Student's Causal Conceptions from a Problem Solving Protocol," in *Cognitive Process Instruction*, LOCHHEAD, J., and CLEMENT, J., eds. (Franklin Institute Press, Philadelphia).
- CLEMENT, J. (1982), "Students' Preconceptions in Introductory Mechanics," *Am. J. Phys.* 50, 66.
- CLEMENT, J. (1983), "A Conceptual Model Discussed by Galileo and Used Intuitively by Physics Students," in *Mental Models*, GENTNER, D., and STEVENS, A. L., eds. (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ).
- CLEMENT, J. (1986), "Overcoming Conceptual Difficulties in Mechanics." Paper presented at AAPT Summer Meeting 23-27 June, Columbus, OH.
- CLEMENT, J. (1987), "Overcoming Students' Misconceptions in Physics: The Role of Anchoring Intuitions and Analogical Validity," in *Proceedings of Second International Seminar: Misconceptions and Educational Strategies in Science and Mathematics III*, NOVAK, J., ed. (Cornell University, Ithaca, NY).
- CLEMENT, J., LOCHHEAD, J., and MONK, G. S. (1981), "Translation Difficulties in Learning Mathematics," *Am. Mathematical Monthly*, 88, 286.
- COHEN, I. B., ed. (1941), *B. Franklin's Experiments, a New Edition of Franklin's Experiments and Observations on Electricity*, edited, with a critical and historical introduction (Harvard University Press, Cambridge, MA). [Letter IV from this edition is reprinted in *Science* 123, 47 (1956) in recognition of the 250th anniversary of the birth of Benjamin Franklin.]

- COHEN, R., EYLON, B., and GANIEL, U. (1983), "Potential Difference and Current in Simple Electric Circuits: A Study of Students' Concepts," *Am. J. Phys.* 51, 407.
- CONANT, J. B., and NASH, L. K., eds. (1957), *Harvard Case Histories in Experimental Science* (Harvard University Press, Cambridge, MA).
- CRANE, H. R. (1960), "Creative Thinking and Experimenting," *Am. J. Phys.* 28, 437.
- CRANE, H. R. (1969a), "Better Teaching with Better Problems and Exams," *Phys. Today* 22(3).
- CRANE, H. R. (1969b), "Problems for Introductory Physics. Part I," *The Physics Teacher* 7, 371.
- CRANE, H. R. (1970), "Problems for Introductory Physics. Part II," *The Physics Teacher* 8, 182.
- DI SESSA, A. (1982), "Unlearning Aristotelian Physics: A Study of Knowledge-Based Learning," *Cog. Sci.* 6, 37.
- DRIVER, R., and EASELEY, J. (1978), "Pupils and Paradigms: A Review of Literature Related to Concepts Development in Adolescent Science Students," *Studies in Science Education* 5, 61.
- EINSTEIN, A. (1905a), "Über eine die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt," *Ann. d. Phys.* 4, 17, 132. [English translation: Arons and Peppard (1965).]
- EINSTEIN, A. (1905b), "Zur Elektrodynamik bewegter Körper" *Ann. d. Phys.* 4, 17, 891. [English translation in *The Principle of Relativity: A Collection of Original Memoirs on the Special and General Theory of Relativity*. (Methuen & Co. Ltd., 1923. Reprinted by Dover Publications, Inc., New York.)]
- EINSTEIN, A. (1961), *Relativity: The Special and the General Theory* (Crown Publishers, New York).
- EISBERG, R. M. (1976), *Applied Mathematical Physics with Programmable Pocket Calculators* (McGraw-Hill, New York).
- EISENBUD, L. (1958), "On the Classical Laws of Motion," *Am. J. Phys.* 26, 144.
- Elementary Science Study (ESS)* (1968ff) Webster Division, McGraw-Hill Book Co., New York, also Delta Education, Nashua, NH. (These materials, together with other elementary science curricula, are available on a CD-ROM published under the title *Science Helper K-8 CD ROM* by PC-SIG, Sunnyvale, CA.)
- ERICKSON, G., and AGUIRRE, J. (1984), "Student Conceptions About the Vector Characteristics of Three Physics Concepts," *J. Res. in Sci. Teach.* 21(5).
- ERLICHSON, H. (1977), "Work and Kinetic Energy for an Automobile Coming to a Stop," *Am. J. Phys.* 45, 769.
- EVANS, J. (1978), "Teaching Electricity with Batteries and Bulbs," *The Physics Teacher* 16, 15.
- FARADAY, M. (1839), "Identity of Electricities Derived from Different Sources," in *Experimental Researches in Electricity*, Vol. I (Taylor and Francis, London). (Reprinted by Dover Publications, New York. 1965a, p. 76.)
- FARADAY, M. (1855), "On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force," in *Experimental Researches in Electricity*, Vol. III (Taylor and Francis, London). (Reprinted by Dover Publications, New York. 1965b, p. 408.)
- FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B., and SANDS, M. (1963), *The Feynman Lectures on Physics* (Addison-Wesley, Reading, MA).
- FERGUSON-HESSLER, M. G. M., and DE JONG, T. (1987), "On the Quality of Knowledge in the Field of Electricity and Magnetism," *Am. J. Phys.* 55, 492.
- FREDETTE, M. H., and CLEMENT, J. J. (1981), "Student Misconceptions of an Electric Circuit: What Do They Mean?" *J. Coll. Sci. Teach.* 10, 280.
- GENTNER, D., and GENTNER, D. R. (1983), "Flowing Water or Teeming Crowds: Mental Models of Electricity," in *Mental Models*, GENTNER, D., and STEVENS, A. L., eds. (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ).
- GOLDBERG, F. M., and ANDERSON, J. H. (1989), "Student Difficulties with Graphical Representations of Negative Values of Velocity," *The Physics Teacher* 27, 254.
- GOLDBERG, F. M., and MCDERMOTT, L. C. (1986), "Student Difficulties in Understanding Image Formation by a Plane Mirror," *The Physics Teacher* 24, 472.

- GOLDBERG, F. M., and MCDERMOTT, L. C. (1987), "An Investigation of Student Understanding of the Real Image Formed by a Converging Lens or Concave Mirror," *Am. J. Phys.* 55, 108.
- GOLDSTEIN, M., and GOLDSTEIN, I. F. (1978), *How We Know* (Plenum Press, New York).
- GUNSTONE, R. F. (1984), "Circular Motion: Some Pre-Instructional Alternative Frameworks," *Res. in Sci. Ed.* 14, 125.
- GUNSTONE, R. F. (1987), "Student Understanding in Mechanics: A Large Population Survey," *Am. J. Phys.* 55, 691.
- GUNSTONE, R. F., CHAMPAGNE, A. B., and KLOPFER, L. E. (1981), "Instruction for Understanding: A Case Study," *Australian Sci. Teachers Jour.* 27, 27.
- GUNSTONE, R. F., and WHITE, R. (1981), "Understanding Gravity," *Sci. Ed.* 65, 291.
- HABER-SCHAIM, U., et al. (1960ff), *PSSC Physics*, Several Editions 1960–date (D. C. Heath & Co., Lexington, MA).
- HAKE, R. R. (1987), "Promoting Student Crossover to the Newtonian World," *Am. J. Phys.* 55, 878.
- HALLOUN, I. A., and HESTENES, D. (1985), "The Initial State of College Physics Students," *Am. J. Phys.* 53, 1043; also "Common Sense Concepts About Motion," *Am. J. Phys.* 53, 1056.
- HALLOUN, I. A., and HESTENES, D. (1987), "Modeling Instruction in Mechanics," *Am. J. Phys.* 55, 455.
- HARNWELL, G. P., and LIVINGOOD, J. J. (1933), *Experimental Atomic Physics*. (McGraw-Hill, New York).
- HEILBRON, J. L. (1979), *Electricity in the 17th and 18th Centuries. A Study of Early Modern Physics* (University of California Press, Berkeley, CA).
- HESTENES, D. (1987), "Toward a Modeling Theory of Physics Instruction," *Am. J. Phys.* 55, 440.
- HOLTON, G. (1973), *Introduction to Concepts and Theories in Physical Science*, 2nd ed. revised by BRUSH, S. G. (Addison-Wesley, Reading, MA).
- HOLTON, G. (1978), "Subelectrons, Presuppositions, and the Millikan-Ehrenhaft Dispute," in *The Scientific Imagination* (Cambridge University Press, Cambridge).
- HOBBIE, R. K. (1973), "Teaching Exponential Growth and Decay: Examples from Medicine," *Am. J. Phys.* 41, 389.
- HOFSTADTER, D. R. (1982), "Number Numbness or Why Innumeracy May Be Just as Dangerous as Illiteracy," *Sci. Am.* 5, 20.
- HUGGINS, E. R. (1968), *Physics 1* (W. A. Benjamin, New York).
- HUGHES, A. L. (1913), "On the Emission Velocities of Photo-Electrons," *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, Series A 212, 205.
- HUMPHREY, R. D. (1951), *Georges Sorel, Prophet Without Honor* (Harvard University Press, Cambridge, MA).
- IONA, M. (1979), "Teaching Electrical Resistance," *The Physics Teacher* 17, 299.
- IONA, M. (1983), "We Ought to Use the Conventional Current Direction," *The Physics Teacher* 21, 334.
- IONA, M. (1987), "Why Johnny Can't Learn Physics from Textbooks I Have Known," *Am. J. Phys.* 55, 299.
- INHELDER, B., and PIAGET, J. (1958), *The Growth of Logical Thinking from Childhood to Adolescence* (Basic Books, New York).
- JOHNSTONE, A. H., and MUGHOL, A. R. (1978), "The Concept of Electrical Resistance," *Phys. Educ.* 13, 46.
- KARPLUS, R. (1977), "Science Teaching and the Development of Reasoning," *J. Res. Sci. Ed.* 14, 169.
- KARPLUS, R., KARPLUS, E., FORMISANO, M., and PAULSEN, A-C. (1979), "Proportional Reasoning and Control of Variables in Seven Countries," in *Cognitive Process Instruction*, LOCHHEAD, J., and CLEMENT, J., eds. (Franklin Institute Press, Philadelphia).
- KELLER, J. B. (1987), "Newton's Second Law," *Am. J. Phys.* 55, 1145.
- KENNEDY, G. (1955), *Education at Amherst* (Harper and Brothers, New York).

- KIDD, R., ARDINI, J., and ANTON, A. (1989), "Evolution of the Modern Photon," *Am. J. Phys.* 57, 27.
- KUNZ, K. S. (1971), "Visualizing Large Numbers," *Am. J. Phys.* 39, 452.
- LAMB, H. (1932), *Hydrodynamics* (Cambridge University Press, Cambridge).
- LAPP, C. J. (1940), "Effectiveness of Mathematical versus Physical Solutions in Problem Solving in College Physics," *Am. J. Phys.* 8, 241.
- LARKIN, J. (1981), "Cognition of Learning Physics," *Am. J. Phys.* 49, 534.
- LARKIN, J. (1983), "The Role of Problem Representation in Physics," in *Mental Models*, GENTNER, D., and STEVENS, A. L., eds. (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ).
- LAWSON, A. E. (1980), "Relationships among Level of Intellectual Development, Cognitive Style, and Grades in a College Biology Course," *Sci. Ed.* 64, 95.
- LAWSON, A. E. (1982), "The Reality of General Cognitive Operations," *Sci. Ed.* 66, 229.
- LAWSON, A. E., LAWSON, D. I., and LAWSON, C. A. (1984), "Proportional Reasoning and the Linguistic Abilities Required for Hypothetico-Deductive Reasoning," *J. Res. Sci. Teach.* 21, 119.
- LAWSON, A. E., and WOLLMAN, W. T. (1975), "Physics Problems and the Process of Self-Regulation," *The Physics Teacher* 13, 470.
- LAWSON, R. A., and McDERMOTT, L. C. (1987), "Student Understanding of the Work-Energy and Impulse-Momentum Theorems," *Am. J. Phys.* 55, 811.
- LENARD, P. (1902), "Über die Lichtelektrische Wirkung," *Ann. d. Phys.* 4, 8, 149.
- LIN, H. (1978), "Newtonian Mechanics and the Human Body: Some Estimates of Performance," *Am. J. Phys.* 46, 15.
- LIN, H. (1982), "Fundamentals of Zoological Scaling," *Am. J. Phys.* 50, 72.
- LOCHHEAD, J. (1981), "Faculty Interpretations of Simple Algebraic Statements: The Professor's Side of the Equation," *Jour. of Mathematical Behavior* Spring 1981.
- MACH, E. (1893), *The Science of Mechanics* (Open Court Publishing Co., Chicago).
- MAGIE, W. F. (1935), *Source Book in Physics* (McGraw-Hill, New York).
- MALONEY, D. P. (1984), "Rule Governed Approaches to Physics: Newton's Third Law," *Phys. Ed.* 19, 37.
- MCCLOSKEY, M., CAMARAZZA, A., and GREEN, B. (1980), "Curvilinear Motion in the Absence of External Forces," *Science* 210, 1139.
- MCCLOSKEY, M. (1983), "Intuitive Physics," *Sci. Am.* 249, 122.
- McDERMOTT, L. C. (1980), "Teaching Physics to Promote Cognitive Development in Academically Disadvantaged Students Aspiring to Science-Related Careers," in *Physics Teaching*. Proceedings of the GIREP conference held at the Weizmann Institute of Science, Rehovot, Israel. August 19-24, 1979. GANIEL, U., ed. (Balaban International Science Services, Jerusalem).
- McDERMOTT, L. C. (1984), "Research on Conceptual Understanding in Mechanics," *Physics Today* 37, 24.
- McDERMOTT, L. C., PITERNICK, L. K., and ROSENQUIST, M. L. (1980), "Helping Minority Students Succeed in Science. I. Development of a Curriculum in Physics and Biology," *J. Coll. Sci. Teach.* 9, 135.
- McDERMOTT, L. C., ROSENQUIST, M. L., and VAN ZEE, E. H. (1983), "Strategies to Improve the Performance of Minority Students in the Sciences," in *Teaching Minority Students: New Directions for Teaching and Learning*, no. 16. CONES, J. H. III, NOONAN, J. F., and JANHA, D., eds. (Jossey-Bass, San Francisco).
- McDERMOTT, L. C., ROSENQUIST, M. L., and VAN ZEE, E. H. (1987), "Student Difficulties in Connecting Graphs and Physics: Examples from Kinematics," *Am. J. Phys.* 55, 503.
- McKINNON, J. W., and RENNER, J. W. (1971), "Are Colleges Concerned with Intellectual Development?" *Am. J. Phys.* 39, 1047.
- MEMORY, J. D. (1973), "Kinematics Problems for Joggers," *Am. J. Phys.* 41, 1205.
- MEMORY, J. D., and JENKINS, A. W., Jr. (1977), "Estimating Orders of Magnitude," *The Physics Teacher* 15, 43.
- MERRILL, J. R. (1976), *Using Computers in Physics* (Houghton Mifflin Co., Boston).
- MILLIKAN, R. A. (1909), "A New Modification of the Cloud Method of Measuring the

- Elementary Electrical Charge and the Most Probable Value of that Charge," *Phys. Rev.* **29**, 560.
- MILLIKAN, R. A. (1911), "The Isolation of an Ion, a Precision Measurement of Its Charge, and the Correction of Stokes's Law," *Phys. Rev.* **32**, 349.
- MILLIKAN, R. A. (1916), "A Direct Photoelectric Determination of Planck's Constant 'h'," *Phys. Rev.* **7**, 355.
- MILLIKAN, R. A. (1917), *The Electron* (University of Chicago Press, Chicago (1st ed. 1917; 2nd ed. 1924)).
- MILLIKAN, R. A. (1949), "Albert Einstein on his Seventieth Birthday," *Rev. Mod. Phys.* **21**, 343.
- MINSTRELL, J. (1982), "Explaining the 'At Rest' Condition of an Object," *The Physics Teacher* **20**, 10.
- MINSTRELL, J. (1984), "Teaching for the Understanding of Ideas: Forces on Moving Objects," in *1984 Yearbook of the Association for the Education of Teachers* (ERIC Clearinghouse, Ohio State University, Columbus, OH).
- MORRISON, P. (1963), "Fermi Questions," *Am. J. Phys.* **31**, 626.
- OKUN, L. B. (1989), "The Concept of Mass," *Phys. Today* **42:6**, 31.
- OPPENHEIMER, J. R. (1963), "Communication and Comprehension of Scientific Knowledge," *Science* **142**, 1144.
- OSBORNE, R. (1984), "Children's Dynamics," *The Physics Teacher* **22**, 504.
- PANOFSKY, W. K. H., and PHILLIPS, M. (1962), *Classical Electricity and Magnetism*, 2nd ed. (Addison-Wesley, Reading, MA).
- PENCHINA, C. M. (1978), "Pseudowork-Energy Principle," *Am. J. Phys.* **46**, 295.
- PERRY, W. G. (1970), *Forms of Intellectual and Ethical Development in the College Years* (Holt, Rinehart & Winston, New York).
- PETERS, P. C. (1982), "Even Honors Students Have Conceptual Difficulties With Physics," *Am. J. Phys.* **50**, 501.
- PETERS, P. C. (1986), "An Alternative Derivation of Relativistic Momentum," *Am. J. Phys.* **54**, 804.
- PIAGET, J., and INHELDER, B. (1958), *Growth of Logical Thinking* (Basic Books, New York).
- Plato Physics I* (1983), (Control Data Corp., Minneapolis, MN).
- REIF, F. (1981), "Teaching Problem Solving—A Scientific Approach," *The Physics Teacher* **19**, 310.
- REIF, F. (1985), "Acquiring an Effective Understanding of Scientific Concepts," in *Cognitive Structure and Conceptual Change*, WEST, L. H. T., and PINES, L., eds. (Academic Press, Orlando, FL).
- REIF, F., LARKIN, J. H., and BRACKETT, B. C. (1976), "Teaching General Learning and Problem Solving Skills," *Am. J. Phys.* **44**, 212.
- REIF, F., and HELLER, J. I. (1982), "Knowledge Structures and Problem Solving in Physics," *Educational Psychologist* **17**, 102.
- REIF, F., and HELLER, J. I. (1984), "Prescribing Effective Human Problem Solving Processes: Problem Description in Physics," *Cognition and Instruction* **1**, 177.
- RESNICK, R., and HALLIDAY, D. (1977, 1985), *Physics*, 3rd and 4th eds. (John Wiley & Sons, New York).
- RICHARDSON, O. W., and COMPTON, K. T. (1912), "The Photoelectric Effect," *Phil. Mag. Series 6*, **24**, 575.
- ROGERS, E. M. (1960), *Physics for the Inquiring Mind* (Princeton University Press, Princeton, NJ).
- ROLLER, D., and ROLLER, D. H. D. (1957), "The Development of the Concept of Electrical Charge," in *Harvard Case Histories in Experimental Science*, CONANT, J. B., and NASH, L. K., eds. (Harvard University Press, Cambridge, MA).
- ROMER, R. H. (1982), "What do 'Voltmeters' Measure?: Faraday's Law in a Multiply Connected Region," *Am. J. Phys.* **50**, 1089.
- ROSENQUIST, M. L. (1982), *Improving Preparation for College Physics of Minority Students Aspiring to Science-Related Careers* (Unpublished dissertation, University of Washington, Seattle, WA).

- ROSENQUIST, M. L., and MCDERMOTT, L. C. (1987), "A Conceptual Approach to Teaching Kinematics," *Am. J. Phys.* 55, 407.
- ROSINICK, P., and CLEMENT, J. (1980), "Learning Without Understanding: The Effect of Tutoring Strategies on Algebra Misconceptions," *Jour. of Mathematical Behavior* 3, No. 1.
- RUTHERFORD, E. (1903), "The Magnetic and Electric Deviation of the Easily Absorbed Rays from Radium," *Phil. Mag.* 5, 6, 177.
- RUTHERFORD, E. (1906), "The Mass and Velocity of the α -particles Expelled from Radium and Actinium," *Phil. Mag.* 12, 6, 348.
- RUTHERFORD, E., and ROYDS, T. (1909), "The Nature of the α -Particle from Radioactive Substances," *Phil. Mag.* 17, 6, 281 [reprinted in Birks (1962)].
- RUTHERFORD, F. J., HOLTON, G., and WATSON, F. G. (1981), *The Project Physics Course*, 3rd ed. (Holt, Rinehart and Winston, New York).
- Science Curriculum Improvement Study (SCIS) (1968ff), Delta Education, Nashua, NH. (These materials, together with other elementary science curricula, are available on a CD-ROM published under the title Science Helper K-8 CDROM by PC-SIG, Sunnyvale, CA.)
- SHAHN, E. (1988). "On Science Literacy," in *Educational Philosophy and Theory*. Journal of the Philosophy of Education Society of Australia. Special topic issue on Science Education. MATTHEWS, M. R., ed. (20)2, 42.
- SHANKLAND, R. S. (1963), "Conversations with Albert Einstein," *Am J. Phys.* 31, 47.
- SHERWOOD, B. A. (1983), "Pseudowork and Real Work," *Am. J. Phys.* 51, 597.
- SHERWOOD, B. A., and BERNARD, W. H. (1984), "Work and Heat Transfer in the Presence of Sliding Friction," *Am. J. Phys.* 52, 1001.
- SHAMOS, M. (1959), *Great Experiments in Physics* (Henry Holt & Co., New York).
- SHYMANSKY, J. A., KYLE, W. C., JR., and ALPORT, J. M. (1983), "The Effects of New Science Curricula on Student Performance," *J. Res. Sci. Teaching* 20, 387.
- ST. JOHN, M. (1980), "Thinking Like a Physicist in the Laboratory," *The Physics Teacher* 18, 436.
- STEAD, B. F., and OSBORNE, R. J. (1980), "Exploring Science Students' Concepts of Light," *Austr. Sci. Teach. Jour.* 26, 84.
- STEINBERG, M. S. (1983), "Reinventing Electricity," in *Proceedings of the International Seminar on Misconceptions in Science and Mathematics*, HELM, H., and NOVAK, J., eds. (Cornell University, Ithaca, NY).
- STEINBERG, M. S. (1986), "The Origins of Force—Misconceptions and Classroom Controversy" (Paper presented at summer meeting of the American Association of Physics Teachers, Ohio State University, 26 June).
- STEINBERG, M. S. (1987), "Transient Lamp Lighting with High-Tech Capacitors," *The Physics Teacher* 25, 95.
- STEINBERG, M. S., and FREDETTE, N. (1986), "Exploring and Improving Student Reasoning in Electricity with Capacitor-Controlled Bulb Lighting" (Workshop conducted at AAPT Summer Meeting, 23–27 June, Columbus, OH).
- STEVENSON, H. W., SHIN-YING LEE, and STIGLER, J. W. (1986), "Mathematics Achievement of Chinese, Japanese, and American Children," *Science* 231, 693.
- STRIKE, K. A., and POSNER, G. J. (1982), "Conceptual Change and Science Teaching," *Eur. J. Sci. Ed.* 4, 231.
- THOMSON, G. P. (1956), "J. J. Thomson and The Discovery of the Electron," *Physics Today* 9:8, 19.
- THOMSON, J. J. (1897), "Cathode Rays," *Phil. Mag.* 44, 5, 293 [Excerpts are to be found in Magie (1935) and Shamos (1959)].
- THOMSON, J. J. (1899), "On the Masses of Ions in Gases at Low Pressures," *Phil. Mag.* 48, 5, 547.
- THOMSON, J. J. (1912), "Multiply Charged Atoms," *Phil. Mag.* 24, 6, 668.
- THORNTON, R. K. (1987a), "Access to College Science: Microcomputer-Based Laboratories for the Naive Science Learner," *Collegiate Microcomputer* 1, 100.

- THORNTON, R. K. (1987b), "Tools for Scientific Thinking: Microcomputer-Based Laboratories for Physics Teaching," *Phys. Ed.* 22, 230.
- TIPLER, P. A. (1976, 1982), *Physics*, 1st and 2nd eds. (Worth Publishers, New York).
- TOBIAS, S. (1986), "Peer Perspectives on the Teaching of Science," *Change* 18, 36.
- TOBIAS, S. (1988), "Insiders and Outsiders," *Academic Connections*. Winter 1988. Office of Academic Affairs, The College Board, New York.
- TOBIAS, S., and HAKE, R. R. (1988), "Professors as Physics Students: What Can They Teach Us?" *Am. J. Phys.* 56, 786.
- TOLMAN, R. C., and STEWART, T. D. (1916), "The Electromotive Force Produced by the Acceleration of Metals," *Phys. Rev.* 8, 97.
- TOLMAN, R. C., and STEWART, T. D. (1917), "The Mass of the Electric Carrier in Copper, Silver, and Aluminum," *Phys. Rev.* 9, 164.
- TROWBRIDGE, D. E. (1988), "Applying Research Results to the Development of Computer Assisted Instruction," in *Proceedings of the Conference on Computers in Physics Instruction*, RISLEY, J. S., and REDDISH, E. F., eds. (North Carolina State University, Raleigh, NC).
- TROWBRIDGE, D. E., and MCDERMOTT, L. C. (1980), "Investigation of Student Understanding of the Concept of Velocity in One Dimension," *Am. J. Phys.* 48, 1020.
- TROWBRIDGE, D. E., and MCDERMOTT, L. C. (1981), "Investigation of Student Understanding of the Concept of Acceleration in One Dimension," *Am. J. Phys.* 49, 242.
- TSANTES, E. (1974), "Note on the Tides," *Am. J. Phys.* 42, 330.
- VIENNOT, L. (1979), "Le Raisonnement Spontané en Dynamique Elementaire," *Eur. J. Sci. Ed.* 1, 205.
- WATTS, D. M. (1985), "Student Conceptions of Light: A Case Study," *Phys. Ed.* 20, 183.
- WEINSTOCK, R. (1961), "What's F ? What's m ? What's a ?" *Am. J. Phys.* 29, 698.
- WEINSTOCK, H., and BORK, A., eds. (1986), *Design of Computer-Based Learning Materials*, Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Learning Physics and Mathematics via Computers held in San Miniato, Italy, 15-26 July 1985. NATO. ASI Series F, *Computer and Systems Sciences*, Vol. 23. (Springer Verlag, Berlin, New York).
- WELLMAN, R. T. (1978), "Science: A Basic Language for Reading Development," in *What Research Says to the Science Teacher* Vol. 1., ROWE, M. B., ed. (National Science Teachers Association, Washington, DC).
- WESTFALL, R. S. (1971), *Force in Newton's Physics* (American Elsevier, New York).
- WHITAKER, R. J. (1983), "Aristotle Is not Dead: Student Understanding of Trajectory Motion," *Am. J. Phys.* 51, 352.
- WHITE, B. (1983), "Sources of Difficulty in Understanding Newtonian Dynamics," *Cog. Sci.* 7, 41.
- WHITE, B. (1984), "Designing Computer Games to Help Physics Students Understand Newtonian Laws of Motion," *Cog. and Instr.* 1, 69.
- WHITTAKER, E. (1951), *A History of the Theories of Aether and Electricity* (Thos. Nelson & Sons, London; also Harper Torchbook No. 531, Harper & Brothers, New York, 1960).
- WILLIAMS, E. R., FALLER, J. E., and HILL, H. A. (1971), "New Experimental Test of Coulomb's Law: A Laboratory Upper Limit on the Photon Rest Mass," *Phys. Rev. Lett.* 26, 721.
- WISER, M., and CAREY, S. (1983), "When Heat and Temperature Were One," in *Mental Models*, GENTNER, D., and STEVENS, A. L., eds. (Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ).

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

A

Αγωγός 240
 λειτουργικός ορισμός 271
Αδράνεια
 επιδείξεις 142
 νόμος 95, 99, 110
Αδρανειακή μάζα
 σύγκριση με τη βαρυτική μάζα 108
 λειτουργικός ορισμός 102
Αϊνστάιν
 και ειδική θεωρία της σχετικότητας 405
 και η έννοια του φωτονίου 390-394
Αισθήσεις
 γεγονότα που δεν αντιλαμβανόμαστε άμεσα με τις αισθήσεις μας 119, 123, 143, 341, 444
Ακτίνες 342
Ακτίνια
 μέτρηση με ακτίνια 41, 168, 344
Αλγεβρικά πρόσημα
 ερμηνεία 62
Αλγεβρικές εκφράσεις
 περιφραστική ερμηνεία 42, 147, 178
Ανά
 η χρήση της λέξης «ανά» από τους μαθητές 30
Ανάκλαση
 σύγκριση μεταξύ κατοπτρικής και διάχυτης 350
Ανισότητες 181
Αντίσταση ηλεκτρική
 και νόμος του Ohm 282
 λειτουργικός ορισμός 274
Αντιστροφική συλλογισμού 30, 64, 124, 330, 343, 346, 357
Άτομο 366-368
Amprère
 το πείραμα με τα παράλληλα σύρματα 307
Avogadro, αριθμός 366, 383

B

Βάρος
 και η δύναμη σε στήριγμα 129
 και μάζα 107
 μονάδες 107
 έλλειψη βάρους 129
Βαρύτητα
 και αέρας 127-128
 και γήινη επίδραση 125
 προβλήματα στη διατύπωση 126
 και «ελαφρότητα» 126
 σύγκριση με ηλεκτρισμό και μαγνητισμό 238-239
Βαρυτική αλληλεπίδραση
 σύγκριση με ηλεκτρική και μαγνητική 238-239, 248
Βαρυτική μάζα 108
Βέλη αναπαράστασης διαφορετικών διανυσματικών μεγεθών 125
Βολή 162
 σύνθεση κινήσεων 163
 μέγιστο ύψος 68
Βορράς 41, 247
Βραδύτητα 56
Balmer-Rydberg
 τύπος 380, 398
Bohr
 άτομο 395

Γ

Γαλιλαίος
 και βαρύτητα 126
 και βολή 162
 και σύγχρονη επιστήμη 79-84
Γεγονός 53
Γραφικές παραστάσεις και αριθμητικοί συλλογισμοί 33
ερμηνεία στην κινηματική 57

Δ

Δεν συμβαίνει: αποσαφήνιση του τι δεν συμβαίνει 103, 110, 138, 141, 144, 159, 177, 190, 240, 244, 284, 285, 337, 372, 390, 436

Διάνυσμα

άλγεβρα 157
απεικόνιση 124
αφαίρεση 157
ορισμός 159
πρόσθεση 157
συνιστώσες 160

Διότι: χρήση της λέξης «διότι» 45

Διαστάσεις μεγεθών

σχέση μεταξύ διαστάσεων και μονάδων 170

Διατύπωση: προβλήματα διατύπωσης

στη βαρύτητα 44
στη διάκριση μεταξύ βαρυτικής και αδρανειακής μάζας 108
στη δύναμη 116
στο ηλεκτρικό φορτίο 242
στην «κάθετη» δύναμη 137
στην κεντρομόλο δύναμη 177
κατά το σχηματισμό εννοιών 33, 111
στην τριβή που αντιτίθεται στην κίνηση 141

Δράση από απόσταση 123, 256

κριτική του Faraday 311

Δυνάμεις 95

αλληλοεξουδετέρωση 105
στη βολή 131
διαγράμματα 115, 180, 443
προβλήματα στη διατύπωση 116
διασπαρμένες δυνάμεις 128
διάκριση μεταξύ ενεργητικών και παθητικών δυνάμεων 119
στην ελεύθερη πτώση 131
«κάθετη» δύναμη 136
κεντρομόλος δύναμη 176, 231
λειτουργικός ορισμός 100
μηδενικού έργου 218
και νήματα 133
και ρυθμός μεταβολής της ορμής 199
και τάση 133
φρανταστικές δυνάμεις 183
φυγόκεντρο δύναμη 183

Δυναμόμετρο 101-104, 108**Δυναμικό: διαφορά δυναμικού 277****Ε**

Ειδική θεωρία της σχετικότητας 405

Είδωλο

σχηματισμός σε συγκλίνοντα φακό 353

σχηματισμός σε επίπεδο κάτοπτρο 351

Εκτίμηση μεγέθους 384-386, 444**Ελαφρότητα 126, 468****Εμβαδό 23-24**

στις γραφικές παραστάσεις της κινηματικής 65

στη γραφική παράσταση του έργου και της ώθησης 233-236

Εμπειρική άποψη

διαφορά μεταξύ εμπειρικής και θεωρητικής άποψης 380

Ενέργεια 195

διατήρηση 208-212, 365

εσωτερική 211-212

θερμική 204-206

μεταβολές της ενέργειας κατά την επιτάχυνση αυτοκινήτου 226

μεταβολή της ενέργειας κατά την κύλιση 221

στην πλαστική κρούση 224

Ενθαλπία 212-214**Έννοιες**

επινόηση των εννοιών 56, 452

Ένταση πεδίου

βαρυτικού 259

ηλεκτρικού 258

Επαναορισμός 61, 463**Επιστήμη, «οπισθοδρομική» 250, 274****Επιστημονική καλλιέργεια 365, 376, 379, 380, 391, 432, 451**

ορισμός 452

Επιτάχυνση 62

βαρύτητας 62

γωνιακή 172

έρευνα για τον τρόπο κατανόησής της 72

εφαπτομενική συνιστώσα 172

κεντρομόλος 229

ορισμός 62

τα σώματα δεν τινάζονται προς τα πίσω όταν επιταχύνονται 138

Έργο 196, 205

λειτουργικός ορισμός 208

κατά την τριβή ολίσθησης 214

πραγματικό έργο 208

ψευδοέργο 208

Έργο-κινητική ενέργεια

θεώρημα 196, 204

Η

Ηλεκτρογενετική δύναμη (ΗΕΔ)
από επαγωγή σε πολλαπλά συνεκτική πε-
ριοχή 310

Ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις:
διάκριση μεταξύ βαρυτικών, ηλεκτρικών
και μαγνητικών αλληλεπιδράσεων 238, 248

Ηλεκτρισμός
πειράματα στο σπίτι 241
προσδιορισμός διαφορετικής προέλευσης
του ηλεκτρισμού 266
ρεύμα 263
τριβής 239

Ηλεκτρομαγνητισμός 301
και το πείραμα του Ampère 307

Ηλεκτρόνιο
και ηλεκτρικό ρεύμα 287
ως φορέας του ηλεκτρικού φορτίου στα μέ-
ταλλα 290
και ηλεκτρικό φορτίο 240, 251
και το πείραμα του Thomson 368

Θ

Θερμική
διαστολή 443
αλληλεπίδραση 201

Θερμοδυναμική
πρώτος νόμος 205, 208, 209, 212

Θερμοκρασία 200

Θερμότητα 200
λειτουργικός ορισμός 203
«μετατροπή έργου σε θερμότητα» 204, 207,
217
μεταφορά 202, 212
μέτρηση της μεταφερόμενης θερμότητας
203
στην τριβή ολίσθησης 214

Θέση 53
στιγμαία θέση 54, 60

Ι, J

Ισότητα: διαφορετικό νόημα ισότητων 144-
145, 259

Ιδέα: πρώτα η ιδέα και μετά η ονομασία 55,
62, 127, 170, 189, 271, 277, 453, 494

Ισχύς: απόδοση γραμμών μεταφοράς ηλε-
κτρικής ισχύος 289

Joule: θερμότητα και νόμος του Joule 279-
281

Κ, C

Καθοδικές ακτίνες
σε σωλήνες Crookes 363
στο πείραμα του Thomson 369

Κατακόρυφος 41, 127, 181

Κάτοπτρο
σχηματισμός ειδώλου σε επίπεδο κάτο-
πτρο 351

Κενό
και ελεύθερη πτώση 128
το νόημα του κενού 128

Κεντρομόλος δύναμη 176-183, 231
μη συγγραμμικών δυνάμεων 176
συγγραμμικών δυνάμεων 180

Κινηματική 51
γραφικές παραστάσεις 57
λύση προβλημάτων 70
χρήση υπολογιστή τσέπης 71

Κινητική θεωρία 431
παραδοχές 434

Κλίμακα
αλλαγή κλίμακας 36, 383, 436

Κριτική σκέψη 257, 263, 489

Κρούση
ενεργειακές μεταβολές μορίων 224

Κυκλική κίνηση 171-189
πρωτογενείς αντιλήψεις 173

Κύκλωμα
ηλεκτρικό 270
βραχυκύκλωμα 275
λειτουργικός ορισμός 271
πειράματα 276
πρότυπο ρεύματος 285

Κύλιση
κάθοδος σε κεκλιμένο επίπεδο 221
χωρίς ολίσθηση 222

Κύμα
μέτωπο
σε μια διάσταση 332-341
σε δύο διαστάσεις 342
σωματιδιακή και κυματική ταχύτητα 321
γραφική απεικόνιση παλμού 322-325
ταχύτητα διάδοσης 330
μεταβατικά φαινόμενα 341
παλμοί
δημιουργία 325-326
ανάκλαση 326

κυματικοί συρμοί
 περιοδικοί και ημιτονοειδείς 343
 ταχύτητα κύματος
 σε ρευστό 334
 σε ρηχό νερό 337
 σε χορδή 332
 Cavendish
 ηλεκτρική αντίσταση 275
 Coulomb
 νόμος 252

A, L

Λειτουργικός ορισμός 24, 44, 97, 100, 111, 453
 δύναμης και μάζας 100
 έντασης ηλεκτρικού πεδίου 258
 και η καλλιέργεια στις θετικές επιστήμες 453
 συνιστώσας διανύσματος 160
 Λόγος 27-31
 συλλογισμοί με λόγους 285, 383, 436
 και άνοιγμα φακού 359
 περιφραστική ερμηνεία 27
 Lenard, P.
 και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο 386
 και η φύση της καθοδικής δέσμης 368

M

Μαγνητικές αλληλεπιδράσεις
 διάκριση μεταξύ βαρυτικών, ηλεκτρικών
 και μαγνητικών αλληλεπιδράσεων 238, 248
 σε ηλεκτρολύτη που διαρρέεται από ρεύμα 307
 μεταξύ ρευματοφόρων αγωγών 305-307
 Μαγνητικό πεδίο
 γύρω από ρευματοφόρο αγωγό 302
 γύρω από κινούμενο ηλεκτροστατικό φορτίο 304
 μέτρηση του μαγνητικού πεδίου 318
 Μαγνητικοί πόλοι 247
 όμοιοι και ανόμοιοι 247
 Μάζα
 αδρανειακή 98
 και βάρος 107
 διάκριση μεταξύ του αντικειμένου και μιας ιδιότητάς του 104
 Μεσημέρι 41
 Μεσονύκτιο 41

Μονάδες
 σχέση μεταξύ διαστάσεων και μονάδων 170
 Maxwell, J.C.
 και η θεωρία πεδίου 317
 Millikan
 το πείραμα του Millikan 378

N

Νεύτων
 και κεντρομόλος δύναμη 229
 πρώτος νόμος 99
 δεύτερος νόμος 100
 τρίτος νόμος 117
 διατύπωση του τρίτου νόμου 119
 δράση από απόσταση 123
 ηλεκτροστατική αλληλεπίδραση 255
 νήματα και ο τρίτος νόμος 133
 δακτύλοι: η ερμηνεία του σκοτεινού κέντρου από τον Young 348
 Νήματα 133
 χωρίς μάζα 134
 Νόμοι της κίνησης
 πρώτος νόμος 99, 100
 δεύτερος νόμος 100
 τρίτος νόμος 117
 και δράση από απόσταση 123
 διατύπωση των νόμων της κίνησης 119
 Νόμος της αδράνειας
 κατανόηση 110
 συγκεκριμένες παρατηρήσεις 112
 Νότος 41, 247

O

Όγκος 26
 Ορμή 195, 230
 Oersted
 πείραμα του Oersted 302
 Ohm: νόμος του Ohm και η ευκνησία των φορέων στην αγωγιμότητα των μετάλλων 284
 και η ηλεκτρική αντίσταση 274, 282
 ιστορική εξέλιξη του νόμου 278

II, P

Παλίρροια 186
 Παρατήρηση και συμπεράσμα 84, 203, 363, 453

Πεδίο

- η έννοια του πεδίου 312
- η θεωρία του Maxwell 317

Πίεση, υδροστατική 441

Πόλωση, ηλεκτρική 242, 249

Πρόβλημα των δύο σωμάτων 184

Προβλήματα: επίλυση προβλημάτων 70, 146

Προτογενείς αντιλήψεις 95

Perrin: το φορτίο της καθοδικής δέσμης 370

P, R

Ρεύμα

- ηλεκτρικό 272
- από επαγωγή σε πολλαπλά συνεκτική περιοχή 310
- εσωτερικό ή επιφανειακό φαινόμενο 284
- και το πρότυπο του κυκλώματος 285
- σύγκριση μεταξύ συμβατικής φοράς και της κίνησης των ηλεκτρονίων 287

Ροπή 189

Rowland, H.

- μαγνητικό πεδίο γύρω από κινούμενο ηλεκτροστατικό φορτίο 305

Rutherford-Royds

- πείραμα 381

Rudberg: σταθερά 188, 398

Σ

Σπειροειδής επανάληψη και ανακύκλωση ιδεών 34, 106, 112, 124, 168, 171, 173, 175, 177, 181, 186, 191, 195, 199, 229, 255, 257, 291, 293, 308, 331, 344, 362, 373, 377, 386, 389, 395, 404, 443

Στροφή δρόμου

- κίνηση σε στροφή με κλίση προς το εσωτερικό της 180
- χωρίς κλίση 176, 180

Συλλογισμοί

- αντιστροφή 30, 64, 114, 330, 343, 346, 357
- αριθμητικοί 31, 33, 173
- με λόγους 285, 383, 436
- με συναρτήσεις 36

Συμβολή κυμάτων

- από δύο πηγές 345
- από φράγμα 347

Συμπίεστικότητα

- σύγκριση μεταξύ υγρών, στερεών και αερίων 435

Συστήματα αναφοράς

- και ειδική θεωρία σχετικότητας 406
- και έρευνα για το απόλυτο σύστημα αναφοράς 408
- και φανταστικές δυνάμεις 138, 183

Σωματίδια α 380

Τ

Τάση νήματος 133

Ταυτόχρονο

- «από απόσταση» 406
- τοπικό 406
- ως προς ένα σύστημα αναφοράς 406

Ταχύτητα 51, 100

- γραμμική 172
- γραφική παράσταση 65
- γωνιακή 172
- έρευνα στην κατανόηση της έννοιας της ταχύτητας 72
- μέση 55
- στιγμιαία 55, 59

Τριβή 140

- και έργο 214
- και θερμότητα 204, 214

Τριγωνομετρία 40, 170

Thomson, J.J.

- και η φύση των καθοδικών ακτίνων 233

Tolman-Stewart

- πείραμα 181

Υ

Υπέρθεση ηλεκτρικών πεδίων 260

Υπολογιστές

- και η άλγεβρα των διανυσμάτων 158, 162
- σε διδακτικούς διαλόγους 483
- και η έννοια της ροπής 192
- στην κινηματική 71
- και μνημονικοί κανόνες του ηλεκτρομαγνητισμού 309

Φ, F

Φαινομενολογικοί συλλογισμοί 166

- στο πείραμα του Ampère 308
- και το άτομο του Bohr 403
- με είδωλα 353
- στη θερμική διαστολή 444
- στο πείραμα του Young με τους δακτυλίους του Νεύτωνα 350

Φακοί

σχηματισμός ειδώλου με συγκλίνοντα φακό
353

Φορτίο

ηλεκτρικό 239

από επαγωγή 251

διατήρηση 257

θετικό και αρνητικό 242, 246, 258

μέτρηση του φορτίου 252

όμοια και ανόμοια φορτία 242-246

στοιχειώδης ποσότητα 378

Φραγκλίνος και φορτίο 258

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο 386**Φωτόνιο**

η έννοια του φωτονίου 386-394

και το άτομο του Bohr 398

Faraday

και δυναμικές γραμμές 316

και δράση από απόσταση 311

και ενέργεια ηλεκτρικού κυλώματος 280

και ηλεκτρικό ρευστό 269

και μαγνητικό πεδίο γύρω από κινούμενο
φορτίο 304

ο νόμος του Faraday για την ηλεκτρεγερτι-
κή δύναμη από επαγωγή σε πολλαπλά συ-
νεκτική περιοχή 310

και ταύτιση μεταξύ διαφορετικών ηλεκτρι-
σμών 266

X

Χάος 449

Χρονική στιγμή 54

Χρονομετρική ένδειξη 53

Χρόνος 53

Ω

Ωθηση 113, 196

θεώρημα ώθησης-ορμής 204

ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝ

R.P. FEYNMAN

QED-Κβαντική ηλεκτροδυναμική

«Όσοι ασχολούνται με τη φυσική και όσοι απλά ενδιαφέρονται για μια ευρύτερη ενημέρωση στα προβλήματα της πρέπει να διαβάσουν το βιβλίο αυτό...».

“Scientific American”

J.S. TREFIL

Διαλογισμοί το ηλιοβασίλεμα: μελετώντας τα φυσικά φαινόμενα του ουρανού.

«Αυτό το βιβλίο πρέπει να υπάρχει σε όλες τις σχολικές βιβλιοθήκες: είναι κατάλληλο για κάθε μαθητή και καθηγητή».

“The Physics Teacher”

J. NARLIKAR

Η ελαφρότητα της βαρύτητας

Θαυμάσια εισαγωγή σ' όλα τα φαινόμενα της βαρύτητας — από την αδράνεια, την πτώση των σωμάτων, τη δυναμική των βλημάτων μέχρι τις μαύρες οπές και τα σχετικιστικά φαινόμενα.

H. BONDI

Σχετικότητα και κοινή λογική

Ένα πρωτότυπο βιβλίο που προσεγγίζει τη θεωρία της Ειδικής Σχετικότητας μέσα από τη νευτώνεια φυσική και τις καθημερινές μας εμπειρίες.

R. HAZEN

Η Ρήξη

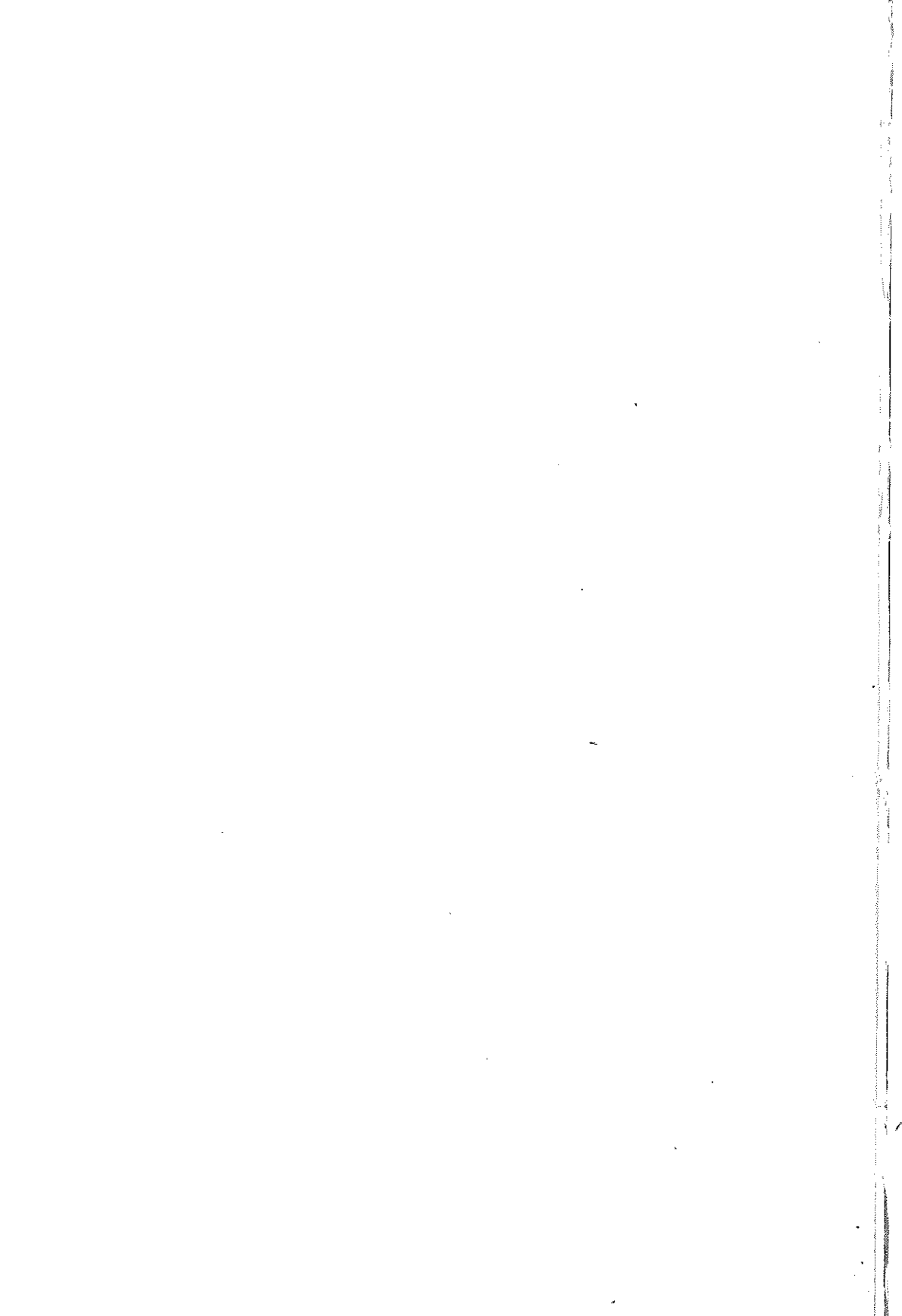
Το μοναδικό βιβλίο που εκδόθηκε στην Ελλάδα με αντικείμενο την υπεργωγιμότητα.

G. FEINBERG

21ος Αιών — Το μέλλον της επιστήμης

«Είναι μοναδικό βιβλίο· καθένας που επιθυμεί να νιώσει την ηδονή ενός ταξιδιού στο άγνωστο δεν έχει παρά να το διαβάσει».

Isaak Asimov



Θαυμάσιος οδηγός για τις
βασικές έννοιες της φυσικής
που δε θα μπορούσε να έχει
γραφεί από κανέναν άλλο!

“The Physics Teacher”

Το βιβλίο αυτό προσφέρει
στους καθηγητές φυσικής
πολλές ιδέες για άμεση
εφαρμογή στην τάξη...
Σε οποιαδήποτε βαθμίδα κι αν
διδάσκετε φυσική, διαβάστε το!

“Physics Today”

Το βιβλίο αυτό είναι ένας πλήρης οδηγός διδασκαλίας της φυσικής που διδάσκεται στο γυμνάσιο, στο λύκειο και, ως ένα βαθμό, σ' έναν ανώτερο κύκλο σπουδών.

Συγγραφέας του είναι ο Arnold Arons, ένας από τους πιο έμπειρους ερευνητές διδακτικής της φυσικής. Καλύπτοντας κάθε περιοχή της φυσικής, εντοπίζει μία προς μία τις δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι μαθητές στην κατανόηση των φυσικών εννοιών. Παράλληλα, προτείνει συγκεκριμένους τρόπους «θεραπείας».

Τα σώματα τινάζονται προς τα πίσω όταν επιταχύνονται;

Πώς όρισε ο Νεύτωνας τη μάζα και τη δύναμη;

Ένα θερμό σώμα περικλείει θερμότητα;

Γιατί υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου

και όχι ένα ή τρία;

Τα έγχρωμα φίλτρα προσθέτουν χρώμα στο λευκό φως;

Είναι χρήσιμο να διδάσκουμε την «ξεπερασμένη»

θεωρία του Bohr για το άτομο;

Ποιες ιδέες της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας και

της θεωρίας του χάους είναι δυνατό να διδάξουμε σε

στοιχειώδες επίπεδο;

Ποιες συνηθισμένες εκφράσεις προκαλούν σύγχυση στην

κατανόηση των φυσικών εννοιών;

Ποια βοήθεια προσφέρουν οι υπολογιστές στη διδασκαλία

της φυσικής;

Αυτά είναι ορισμένα από τα πολλά ερωτήματα που μελετώνται στο βιβλίο.

Επίσης, περιέχονται περιγραφές πρωτότυπων πειραμάτων, πρωτότυπα προβλήματα, ερωτήσεις για τεστ και εκτενής βιβλιογραφία.

Ο Οδηγός Διδασκαλίας της Φυσικής είναι ένα έγκυρο και μοναδικό βοήθημα για κάθε καθηγητή φυσικής.