ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΤΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗ

Ολοκληρώνοντας έναν πολυετή κύκλο παρουσίας στις Θετικές Επιστήμες, το βιβλίο των Halliday, Resnick και Walker συνεχίζει να αποτελεί ένα κλασικό σύγγραμμα στις βασικές αρχές της Φυσικής. Η επιτυχία του, όπως αυτή τεκμηριώνεται από τον κύκλο των επανεκδόσεων και την παγκοσμιότητα της κυκλοφορίας του σε 50 διαφορετικές γλώσσες μετάφρασης, βασίζεται πρωτίστως στη μαεστρία των συγγραφέων του ως προς τη βαθιά θεμελίωση των φυσικών εννοιών. Με απλή και κατανοητή γλώσσα, πλαισιωμένη από πλήθος ερωτήσεων κρίσης, το βιβλίο αυτό αποτελεί ένα από τα ολιγάριθμα εισαγωγικά συγγράμματα διεθνούς εμβέλειας στις έννοιες της Φυσικής. Η διαχρονικότητά του εξασφαλίζεται από τη συνεχή του βελτίωση, ενσωματώνοντας πλήθος υποδείξεων και παρατηρήσεων από μάχιμους δασκάλους της Φυσικής με την αξιοποίηση της διαλεκτικής εμπειρίας των αμφιθεάτρων μέσα από την αλληλεπίδραση διδασκόντων και διδασκομένων. Επιπρόσθετα, η σύνδεση των αναλυόμενων φυσικών εννοιών σε θεωρητικό επίπεδο με εφαρμογές και φαινόμενα της καθημερινής ζωής καθιστά το βιβλίο αυτό μοναδικό.

Η απόφαση του εκδοτικού οίκου να προχωρήσει στην προετοιμασία της παρούσας έκδοσης του συγγράμματος αυτού δεν ήταν εύκολη. Το μεταφρασμένο υλικό της παλαιότερης έκδοσης αποτελούσε φυσικά μια πρώτη ύλη, η οποία θα μπορούσε να δράσει υποστηρικτικά για τη διαμόρφωση της νέας. Η τελείως διαφορετική όμως δομή και οι εισηγμένες διαφοροποιήσεις της πρόσφατης έκδοσης του συγγράμματος απαιτούσαν ιδιαίτερη προσοχή. Αισθάνομαι ιδιαίτερα τυχερός που στην προσπάθεια αυτή συνεργάστηκα με ένα άξιο επιτελείο μεταφραστών και έμπειρων πανεπιστημιακών δασκάλων στον ρόλο των επιμελητών. Με βαθιά γνώση για το εκάστοτε γνωστικό αντικείμενο, αλλά και με την πολύχρονη διδακτική εμπειρία, ο κάθε επιμελητής βοήθησε καταλυτικά στη σωστή προετοιμασία των επιμέρους κεφαλαίων. Πιστεύω πως η ελληνική επανέκδοση του κλασικού συγγράμματος της *Φυσικής* των Halliday, Resnick και Walker στη σύγχρονη αυτή μορφή συμβαδίζει με τις απαιτήσεις και ανάγκες του σημερινού αναγνώστη.

Συγκεκριμένα, η παρούσα έκδοση του κλασικού αυτού συγγράμματος φέρνει ουσιαστικές βελτιώσεις, έχοντας αναμορφώσει στοχευμένα τον τρόπο παρουσίασης των βασικών εννοιών με νέα παραδείγματα και ερωτήσεις ελέγχου, επανασχεδιασμένα διαγράμματα και βελτιωμένα προβλήματα.

Πέρα από τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τους μεταφραστές και επιστημονικούς επιμελητές, αγαπητούς συνεργάτες και συναδέλφους που συνέδραμαν στην προσπάθεια αυτή, θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή μου προς τον εκδοτικό οίκο για τη φροντίδα και την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο εγχείρημα αυτό. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Κώστα Δαρδανό για την ιδιαίτερη αγάπη του προς τις θετικές επιστήμες, ως φυσικό επακόλουθο των φιλοσοφικών του αναζητήσεων, αλλά και για τον ιδιαίτερο ζήλο και αγωνία για την άρτια ολοκλήρωση της επανέκδοσης αυτής. Την Κλέλια Καταιβάτη και τον Θανάση Καπένη για την ιδιαίτερη υπομονή και επιμονή τους στις επάλληλες διορθώσεις και παρατηρήσεις του κειμένου εκ μέρους των επιμελητών, και την Κέλλυ Καραμανλή για την προσεγμένη σελιδοποίηση. Τέλος, ο καταλυτικός αισθητικός έλεγχος του συγγράμματος από τον Γιάννη Μαμάη πιστεύω πως κατάφερε να δώσει ένα καλαίσθητο και ευχάριστο στην ανάγνωση σύγγραμμα, το οποίο εύχομαι να αποτελεί ένα ποιοτικό έργο αναφοράς του σημερινού Έλληνα μελετητή των βασικών αρχών της Φυσικής.

Ευστάθιος Γ. Στυλιάρης

Dr.rer.nat., Καθηγητής Πυρηνικής Φυσικής
Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Αθήνα, Ιανουάριος 2026

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Η απαίτηση των διδασκόντων οδήγησε σε μια νέα έκδοση του εγχειριδίου που έλκει την καταγωγή του από το 1963 και οφείλεται στους David Halliday και Robert Resnick, το οποίο χρησιμοποίησα ως πρωτοετής φοιτητής του MIT (Θεέ μου, πόσο γρήγορα περνά ο καιρός). Ο σχεδιασμός αυτής της νέας έκδοσης μου επέτρεψε να συγκεντρώσω πολλά συναρπαστικά νέα παραδείγματα καθώς και να αναθεωρήσω ορισμένα από τα αγαπημένα παραδείγματα των οκτώ προηγούμενων εκδόσεων στις οποίες συμμετείχα. Ακολουθούν ορισμένα επιλεγμένα παραδείγματα αυτής της νέας έκδοσης.



Σχήμα 10.39 Ποια είναι η απαιτούμενη τάση στους αχίλλειους τένοντες του Michael Jackson στη χορευτική φιγούρα, που παρουσίασε στο video του τραγουδιού του Smooth Criminals, στην οποία γέρνει προς τα εμπρός, σχηματίζοντας γωνία 45° και αψηφώντας φαινομενικά τη βαρύτητα;



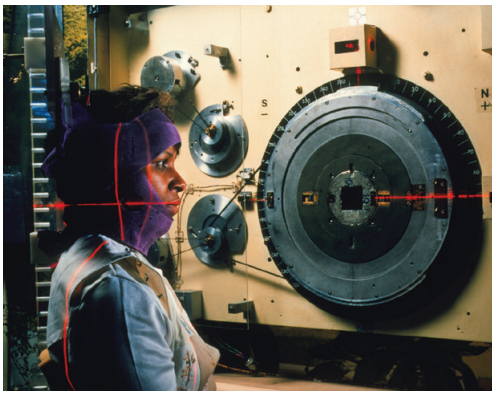
Σχήμα 10.7.2 Ποια είναι η αύξηση στην τάση που εμφανίζεται στον αχίλλειο τένοντα όταν χρησιμοποιούνται ψηλοτάκουνα παπούτσια;



Σχήμα 9.65 Οι πτώσεις αποτελούν έναν σοβαρό κίνδυνο για τους αθλητές του σκέιτμπορντ, τους ηλικιωμένους, τους ανθρώπους με επιληψία, αλλά και για το γενικό πληθυσμό. Πολύ συχνά, οι άνθρωποι πέφτουν πάνω στο προτεταμένο χέρι τους, σπάζοντας έτσι τον καρπό τους. Ποιο είναι το ύψος από το οποίο, πέφτοντας, θα έχουμε ως αποτέλεσμα ένα τέτοιο κάταγμα;



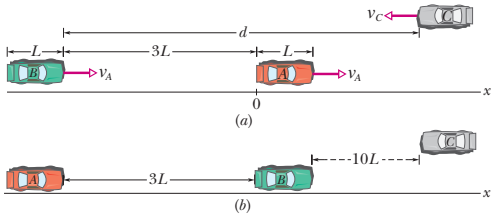
Σχήμα 35.5.4 Στη λειτουργική φασματοσκοπία στο υπέρυθρο (fNIRS), στο κεφάλι ενός ανθρώπου προσαρμόζεται ένα καπέλο που φέρει LED τα οποία εκπέμπουν στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου. Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να διεισδύσει στον εξωτερικό φλοιό του εγκεφάλου και να αποκαλύψει αν η συγκεκριμένη περιοχή ενεργοποιείται από μια ορισμένη δραστηριότητα, όπως η συμμετοχή σε ένα παιχνίδι μπέιζμπολ ή το πιλοτάρισμα ενός αεροπλάνου.



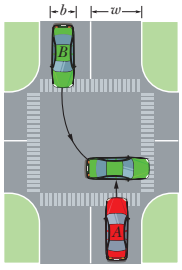
Σχήμα 28.5.2 Η θεραπεία με ταχέως κινούμενα νετρόνια είναι ένα πολλά υποσχόμενο όπλο ενάντια στις κακοήθειες του σιαλογόνου αδένα. Με ποιον τρόπο όμως μπορούμε να επιταχύνουμε σωματίδια που είναι ηλεκτρικά ουδέτερα έτσι ώστε να αποκτήσουν μεγάλες ταχύτητες;



Σχήμα 29.63 Η νόσος του Parkinson και άλλες δυσλειτουργίες του εγκεφάλου αντιμετωπίζονται με διακρανιακή μαγνητική διέγερση, στην οποία παλμικά μαγνητικά πεδία αναγκάζουν τους νευρώνες που βρίσκονται πολλά εκατοστά μέσα στο κεφάλι να εκφορτιστούν.



Σχήμα 2.37 Πώς θα πρέπει να προγραμματιστεί το αυτόνομα κινούμενο όχημα *B* ώστε να προσπεράσει με ασφάλεια το όχημα *A* χωρίς να υπάρχει κίνδυνος σύγκρουσης με το αντίθετα κατευθυνόμενο όχημα *C*;



Σχήμα 4.39 Σε μια αριστερή στροφή τύπου Pittsburgh, ένας οδηγός στην απέναντι λωρίδα κυκλοφορίας, που περιμένει να γίνει το φανάρι πράσινο, αστραπιαία οδηγεί το όχημά του μπροστά από το δικό σας κατά τη διάρκεια που είναι αναμμένο το κόκκινο. Σε μια αναπαράσταση του ατυχήματος, πόσο νωρίτερα από την ένδειξη του πράσινου επιχείρησε να πάρει τη στροφή ο άλλος οδηγός;



Σχήμα 9.6.4 Η πλέον επικίνδυνη σύγκρουση αυτοκινήτων είναι η μετωπική. Σε μια τέτοια σύγκρουση δύο αυτοκινήτων με την ίδια μάζα, πόσο μειώνεται η πιθανότητα θανάσιμου τραυματισμού του οδηγού αν μεταφέρει στο αυτοκίνητό του έναν επιβάτη;

Πέραν αυτών των ενδεικτικών παραδειγμάτων, υπάρχουν προβλήματα που ασχολούνται με:

- Την ανίχνευση από απόσταση της πτώσης ηλικιωμένων ανθρώπων.
- Την ψευδαίσθηση της ανύψωσης σε μια ρίψη της μπάλας του μπέιζμπολ με μεγάλη ταχύτητα.
- Την απόκρουση της μπάλας του μπέιζμπολ σε μια γρήγορη ρίψη παρά την προσωρινή απώλεια της όρασης.
- Την επικάθιση ενός πλοίου κατά την οποία το πλοίο βυθίζεται περισσότερο του αναμενομένου στο νερό ενός καναλιού.
- Τον συνήθη κίνδυνο για πρόκληση ατυχήματος που προκύπτει από την εξαφάνιση ενός ποδηλάτη από το οπτικό πεδίο σε μια διασταύρωση.
- Τη μέτρηση των δυναμικών σε μια καταιγίδα με τη βοήθεια των μιονίων

και πολλά άλλα.

ΤΙ ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΕ ΑΥΤΟ ΤΟ ΒΙΒΛΙΟ

- Σημεία κατανόησης, ένα για κάθε ενότητα.
- Ενδεικτικά Προβλήματα.
- Ανασκόπηση και σύνοψη στο τέλος κάθε κεφαλαίου.
- Σχεδόν 300 νέα προβλήματα συγκεντρωμένα στο τέλος των κεφαλαίων.

Κατά τη σύνθεση αυτής της έκδοσης, εστίασα την προσοχή μου σε πολλές περιοχές της έρευνας που μου κίνησαν το ενδιαφέρον και έγραψα νέο κείμενο καθώς και πολλά νέα προβλήματα. Ακολουθούν ενδεικτικά ορισμένες από αυτές τις περιοχές έρευνας:

Αφού ρίξουμε μια ματιά στην πρώτη εικόνα μιας μελανής οπής (για την οποία περίμενα σε όλη μου τη ζωή), στη συνέχεια εξετάζουμε τα βαρυτικά κύματα (θέμα για το οποίο συζητούσα με τον Rainer Weiss στο MIT όταν εργαζόμουν στο εργαστήριό του πολλά χρόνια προτού προτείνει την ιδέα της χρήσης ενός συμβολόμετρου ως ανιχνευτή αυτών των κυμάτων).

Πρόσθεσα ένα νέο ενδεικτικό πρόβλημα και αρκετά προβλήματα για τον φοιτητή πάνω στα οχήματα που κινούνται αυτόνομα, όπου το σύστημα ενός υπολογιστή επιφορτίζεται για την εκτίμηση του αν μια οδική πρακτική είναι ασφαλής, όπως για παράδειγμα η προσπέραση ενός αυτοκινήτου που κινείται με χαμηλή ταχύτητα ενώ ένα άλλο αυτοκίνητο μας προσεγγίζει από πίσω ευρισκόμενο στη λωρίδα προσπέρασης.

Εξερεύνησα τη θεραπεία του καρκίνου με τη χρήση ακτινοβολίας, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρονίων Augur-Meitner που κατανοήθηκαν για πρώτη φορά από τη Lise Meitner.

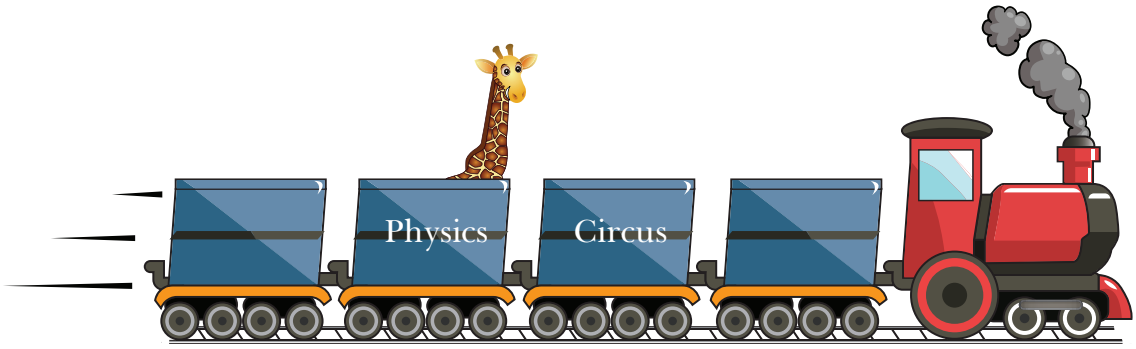
Ξεφύλλισα πολλές χιλιάδες ερευνητικά άρθρα στις περιοχές της ιατρικής, της μηχανικής, αλλά και της φυσι-

κής για να εντοπίσω έξυπνους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να αποκτήσουμε εικόνα από το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος χωρίς τη χρήση της παραδοσιακής επεμβατικής χειρουργικής. Ορισμένοι από αυτούς τους τρόπους συγκεντρώνονται στο ευρετήριο κάτω από την εγγραφή «ιατρικές πράξεις και εξοπλισμός». Ακολουθούν τρία ενδεικτικά παραδείγματα:

(1) Η ρομποτική χειρουργική, που χρησιμοποιεί τομές μιας θύρας και οπτικές ίνες, επιτρέπει σήμερα στους χειρουργούς να έχουν πρόσβαση σε εσωτερικά όργανα, με τον ασθενή να αναρρώνει σε λίγες μόλις ώρες αντί των ημερών ή των εβδομάδων που χρειαζόταν να νοσηλευθεί με τις παλαιότερες χειρουργικές τεχνικές.

(2) Η ενδοκρανιακή μαγνητική διέγερση χρησιμοποιείται για τη θεραπεία της χρόνιας κατάθλιψης, της νόσου του Parkinson, αλλά και άλλων δυσλειτουργιών του εγκεφάλου με την εφαρμογή παλμικών μαγνητικών πεδίων που παράγονται από πηνία που τοποθετούνται κοντά στο κρανίο και αναγκάζουν τους νευρώνες που βρίσκονται πολλά εκατοστά μέσα στο κεφάλι να εκφορτιστούν.

(3) Η μαγνητοεγκεφαλογραφία (MEG) χρησιμοποιείται για να παρακολουθούμε τον εγκέφαλο ενός ανθρώπου καθώς αυτός εκτελεί κάποια δραστηριότητα, όπως όταν διαβάζει. Κάθε δραστηριότητα προκαλεί ασθενείς ηλεκτρικούς παλμούς που αποστέλλονται κατά μήκος των αγώγιμων διαδρομών που συνδέουν τα εγκεφαλικά κύτταρα και κάθε τέτοιος παλμός προκαλεί ένα ασθενές μαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται από εξαιρετικά ευαίσθητες υπεραγώγιμες συσκευές κβαντικής συμβολής (SQUID).



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ένας μεγάλος αριθμός ανθρώπων συνέβαλαν με διάφορους τρόπους στη δημιουργία αυτού του βιβλίου. Οι Sen-Ben Liao του Lawrence Livermore National Laboratory, James Whitenton του Southern Polytechnic State University και Jerry Shi του Pasadena City College είχαν το ηράκλειο καθήκον της επίλυσης όλων των προβλημάτων που υπάρχουν στο βιβλίο. Στον εκδότη μου, τον John Wiley, το βιβλίο επωφελήθηκε από την υποστήριξη των John LaVacca και Jennifer Yee, των εκδοτών που επέβλεψαν ολόκληρο το έργο από την αρχή μέχρι την ολοκλήρωσή του, της Διευθύνουσας Εκδότριας Mary Donovan και της Βοηθού Έκδοσης Samantha Hart. Θα θέλαμε επίσης να ευχαριστήσουμε την Patricia Gutierrez και την ομάδα της Lumina, καθώς αυτοί ήταν που συγκέντρωσαν όλα τα επιμέρους τμήματα κατά τη διάρκεια της περίπλοκης διαδικασίας παραγωγής, καθώς και τις Προγραμματίστριες Μαθημάτων Corrina Santos και Kimberly Eskin για την αριστοτεχνική ανάπτυξη του περιεχομένου. Θα θέλαμε, επιπλέον, να ευχαριστήσουμε τον Jon Boylan για τα σχήματα και τη σχεδίαση του εξωφύλλου, την Helen Walden για την επιμέλεια του κειμένου και την Donna Mulder για τις διορθώσεις της.

Τέλος, όλοι οι εξωτερικοί κριτές έκαναν υπέροχη δουλειά και στο σημείο αυτό θα θέλαμε να αναγνωρίσουμε το χρέος μας σε καθένα από τα μέλη αυτής της μεγάλης ομάδας.

Maris A. Abolins, *Michigan State University*
Jonathan Abramson, *Portland State University*
Omar Adawi, *Parkland College*
Edward Adelson, *Ohio State University*
Nural Akchurin, *Texas Tech*
Yildirim Aktas, *University of North Carolina-Charlotte*
Barbara Andereck, *Ohio Wesleyan University*
Tetyana Antimirova, *Ryerson University*
Mark Arnett, *Kirkwood Community College*
Stephen R. Baker, *Naval Postgraduate School*
Arun Bansil, *Northeastern University*
Richard Barber, *Santa Clara University*
Neil Basecu, *Westchester Community College*
Anand Batra, *Howard University*
Sidi Benzahra, *California State Polytechnic University, Pomona*
Kenneth Bolland, *The Ohio State University*
Richard Bone, *Florida International University*
Michael E. Browne, *University of Idaho*
Timothy J. Burns, *Leeward Community College*
Joseph Buschi, *Manhattan College*
George Caplan, *Wellesley College*
Philip A. Casabella, *Rensselaer Polytechnic Institute*
Randall Caton, *Christopher Newport College*
John Cerne, *University at Buffalo, SUNY*
Roger Clapp, *University of South Florida*
W. R. Conkie, *Queen's University*
Renate Crawford, *University of Massachusetts-Dartmouth*
Mike Crivello, *San Diego State University*
Robert N. Davie, Jr., *St. Petersburg Junior College*
Cheryl K. Dellai, *Glendale Community College*
Eric R. Dietz, *California State University at Chico*
N. John DiNardo, *Drexel University*
Eugene Dunnam, *University of Florida*
Robert Endorf, *University of Cincinnati*
F. Paul Esposito, *University of Cincinnati*
Jerry Finkelstein, *San Jose State University*
Lev Gasparov, *University of North Florida*
Brian Geislinger, *Gadsden State Community College*
Corey Gerving, *United States Military Academy*
Robert H. Good, *California State University-Hayward*
Michael Gorman, *University of Houston*
Benjamin Grinstein, *University of California, San Diego*
John B. Gruber, *San Jose State University*
Ann Hanks, *American River College*
Randy Harris, *University of California-Davis*
Samuel Harris, *Purdue University*
Harold B. Hart, *Western Illinois University*
Rebecca Hartzler, *Seattle Central Community College*
Kevin Hope, *University of Montevallo*
John Hubisz, *North Carolina State University*
Joey Huston, *Michigan State University*
David Ingram, *Ohio University*
Shawn Jackson, *University of Tulsa*
Hector Jimenez, *University of Puerto Rico*
Sudhakar B. Joshi, *York University*
Leonard M. Kahn, *University of Rhode Island*
Rex Joyner, *Indiana Institute of Technology*
Michael Kalb, *The College of New Jersey*
Richard Kass, *The Ohio State University*
M.R. Khoshbin-e-Khoshnazar, *Research Institution for Curriculum Development and Educational Innovations (Tehran)*
Sudipa Kirtley, *Rose-Hulman Institute*
Leonard Kleinman, *University of Texas at Austin*
Craig Kletzing, *University of Iowa*

Peter F. Koehler, *University of Pittsburgh*
Arthur Z. Kovacs, *Rochester Institute of Technology*
Kenneth Krane, *Oregon State University*
Hadley Lawler, *Vanderbilt University*
Priscilla Laws, *Dickinson College*
Edbertho Leal, *Polytechnic University of Puerto Rico*
Vern Lindberg, *Rochester Institute of Technology*
Peter Loly, *University of Manitoba*
Stuart Loucks, *American River College*
Laurence Lurio, *Northern Illinois University*
James MacLaren, *Tulane University*
Ponn Maheswaranathan, *Winthrop University*
Andreas Mandelis, *University of Toronto*
Robert R. Marchini, *Memphis State University*
Andrea Markelz, *University at Buffalo, SUNY*
Paul Marquard, *Caspar College*
David Marx, *Illinois State University*
Dan Mazilu, *Washington and Lee University*
Jeffrey Colin McCallum, *The University of Melbourne*
Joe McCullough, *Cabrillo College*
James H. McGuire, *Tulane University*
David M. McKinstry, *Eastern Washington University*
Jordon Morelli, *Queen's University*
Eugene Mosca, *United States Naval Academy*
Carl E. Mungan, *United States Naval Academy*
Eric R. Murray, *Georgia Institute of Technology, School of Physics*
James Napolitano, *Rensselaer Polytechnic Institute*
Amjad Nazzal, *Wilkes University*
Allen Nock, *Northeast Mississippi Community College*
Blaine Norum, *University of Virginia*
Michael O'Shea, *Kansas State University*
Don N. Page, *University of Alberta*
Patrick Papin, *San Diego State University*
Kiumars Parvin, *San Jose State University*
Robert Pelcovits, *Brown University*
Oren P. Quist, *South Dakota State University*
Elie Riachi, *Fort Scott Community College*
Joe Redish, *University of Maryland*
Andrew Resnick, *Cleveland State University*
Andrew G. Rinzler, *University of Florida*
Timothy M. Ritter, *University of North Carolina at Pembroke*
Dubravka Rupnik, *Louisiana State University*
Robert Schabinger, *Rutgers University*
Ruth Schwartz, *Milwaukee School of Engineering*
Thomas M. Snyder, *Lincoln Land Community College*
Carol Strong, *University of Alabama at Huntsville*
Anderson Sunda-Meya, *Xavier University of Louisiana*
Dan Styer, *Oberlin College*
Nora Thornber, *Raritan Valley Community College*
Frank Wang, *LaGuardia Community College*
Keith Wanser, *California State University Fullerton*
Robert Webb, *Texas A&M University*
David Westmark, *University of South Alabama*
Edward Whittaker, *Stevens Institute of Technology*
Suzanne Willis, *Northern Illinois University*
Shannon Willoughby, *Montana State University*
Graham W. Wilson, *University of Kansas*
Roland Winkler, *Northern Illinois University*
William Zacharias, *Cleveland State University*
Ulrich Zurcher, *Cleveland State University*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 21

Ο Νόμος του Coulomb

21.1 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ COULOMB

Μαθησιακοί Στόχοι

Μετά τη μελέτη αυτής της ενότητας θα πρέπει να μπορείτε:

21.1.1 Να διακρίνετε πότε ένα σώμα είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, αρνητικά ή θετικά φορτισμένο και να προσδιορίζετε το είδος του φορτίου που πλεονάζει.

21.1.2 Να διακρίνετε τους αγωγούς, τους μη αγωγούς (μονωτές), τους ημιαγωγούς και τους υπεραγωγούς.

21.1.3 Να περιγράφετε τις ηλεκτρικές ιδιότητες των σωματιδίων που βρίσκονται στο εσωτερικό του ατόμου.

21.1.4 Να γνωρίζετε τι είναι τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας και να εξηγείτε τον ρόλο τους στην ερμηνεία της αρνητικής και της θετικής φόρτισης ενός αγώγιμου υλικού.

21.1.5 Να γνωρίζετε τι σημαίνει «ηλεκτρικά μονωμένο» και τι «γειωμένο» σώμα.

21.1.6 Να εξηγείτε τον τρόπο με τον οποίο ένα φορτισμένο σώμα επάγει φορτίο σε ένα άλλο σώμα.

21.1.7 Να γνωρίζετε ότι τα ομόσημα φορτισμένα σώματα απωθούνται μεταξύ τους, ενώ τα ετερόσημα έλκονται.

21.1.8 Για κάθε σωματίδιο ενός ζεύγους φορτισμένων σωματιδίων να σχεδιάζετε το διάγραμμα ελεύθερου σώματος, έτσι ώστε να φαίνεται η ηλεκτροστατική δύναμη (δύναμη Coulomb) που ασκείται στο σωματίδιο και η αρχή του διανύσματος της δύναμης να βρίσκεται πάνω στο σωματίδιο.

21.1.9 Για κάθε σωματίδιο ενός ζεύγους φορτισμένων σωματιδίων να εφαρμόζετε τον νόμο του Coulomb συνδέοντας το μέτρο της ηλεκτροστατικής δύναμης με την ποσότητα του φορτίου των σωματιδίων και με την απόσταση μεταξύ τους.

21.1.10 Να γνωρίζετε ότι ο νόμος του Coulomb εφαρμόζεται μόνο σε (σημειακά) σωματίδια και σε σώματα τα οποία μπορούμε να θεωρήσουμε ως σωματίδια.

21.1.11 Αν ασκούνται περισσότερες από μία δυνάμεις σε ένα σωματίδιο, να βρίσκετε τη συνολική δύναμη προσθέτοντας τις δυνάμεις διανυσματικά και όχι ως μονόμετρα μεγέθη.

21.1.12 Να γνωρίζετε ότι ένα ομοιόμορφα φορτισμένο σφαιρικό κέλυφος έλκει ή απωθεί ένα φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται έξω από αυτό, σαν όλο το φορτίο του κελύφους να βρισκόταν συγκεντρωμένο στο κέντρο του, δηλαδή σαν να βρισκόταν εκεί ένα άλλο φορτισμένο σωματίδιο.

21.1.13 Να γνωρίζετε ότι αν ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται στο εσωτερικό ενός ομοιόμορφα φορτισμένου κελύφους, η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη που ασκείται από το κέλυφος στο σωματίδιο είναι μηδέν.

21.1.14 Να γνωρίζετε ότι αν πλεόνασμα φορτίου τοποθετηθεί σε σφαιρικό αγωγό, τότε αυτό κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού.

21.1.15 Να γνωρίζετε ότι αν δύο πανομοιότυποι σφαιρικοί αγωγοί έρθουν σε επαφή ή συνδεθούν μεταξύ τους με αγώγιμο σύρμα, τότε οποιοδήποτε πλεόνασμα φορτίου θα κατανεμηθεί εξίσου στους δύο αγωγούς.

21.1.16 Να γνωρίζετε ότι σε ένα μη αγώγιμο σώμα είναι δυνατόν να κατανεμηθεί φορτίο με οποιονδήποτε τρόπο, ακόμα και στο εσωτερικό του σώματος.

21.1.17 Να γνωρίζετε ότι το ρεύμα είναι ο ρυθμός με τον οποίο διέρχεται το φορτίο από ένα σημείο.

21.1.18 Να υπολογίζετε το ρεύμα σε κάποιο σημείο εφαρμόζοντας τη σχέση μεταξύ του ρεύματος, της ποσότητας του φορτίου που διέρχεται από το συγκεκριμένο σημείο σε κάποιο χρονικό διάστημα και αυτού του χρονικού διαστήματος.

Βασικές Ιδέες

- Η ισχύς της ηλεκτρικής αλληλεπίδρασης ενός σωματιδίου με σώματα του περιβάλλοντός του εξαρτάται από το ηλεκτρικό φορτίο του σωματιδίου (το οποίο συνήθως παριστάνεται με q). Το φορτίο μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Σωματίδια με ίδιο πρόσημο φορτίου απωθούνται μεταξύ τους και σωματίδια με αντίθετο πρόσημο έλκονται.
- Ένα σώμα με ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, ενώ με άνισες ποσότητες είναι φορτισμένο και έχει περίσσεια ενός είδους φορτίου.
- Οι αγωγοί είναι υλικά στα οποία σημαντικό πλήθος ηλεκτρονίων κινείται ελεύθερα. Στα μη αγώγιμα υλικά (μονωτές) τα φορτισμένα σωματίδια δεν κινούνται ελεύθερα.
- Το ηλεκτρικό ρεύμα i είναι ο ρυθμός dq/dt με τον οποίο το φορτίο διέρχεται από ένα σημείο:

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

- Ο νόμος του Coulomb περιγράφει την ηλεκτροστατική (ή απλώς ηλεκτρική) δύναμη μεταξύ δύο φορτισμένων σωματιδίων. Αν τα σωματίδια έχουν φορτία q_1 και q_2, απέχουν μεταξύ τους απόσταση r και είναι ακίνητα (ή κινούνται αργά), το

μέτρο της δύναμης που ασκεί το ένα σωματίδιο στο άλλο δίνεται από τη σχέση

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1|\,|q_2|}{r^2} \qquad \text{(νόμος του Coulomb)}$$

όπου $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\ \mathrm{C^2/N \cdot m^2}$ είναι η διηλεκτρική σταθερά. Συχνά, το πηλίκο $1/4\pi\varepsilon_0$ αντικαθίσταται από την ηλεκτροστατική σταθερά ή σταθερά του Coulomb $k = 8.99 \times 10^9\ \mathrm{N \cdot m^2/C^2}$.

- Το διάνυσμα της ηλεκτροστατικής δύναμης που ασκείται σε ένα φορτισμένο σωματίδιο από ένα δεύτερο φορτισμένο σωματίδιο κατευθύνεται προς το δεύτερο σωματίδιο (όταν τα φορτία είναι ετερόσημα) ή αντίθετα από αυτό (όταν τα φορτία είναι ομόσημα).
- Αν σε ένα σώμα ασκούνται πολλές ηλεκτροστατικές δυνάμεις, τότε η συνισταμένη δύναμη είναι το διανυσματικό (όχι βαθμωτό) άθροισμα των επιμέρους δυνάμεων.
- *Πρώτο θεώρημα κελύφους*: Όταν η επιφάνεια ενός κελύφους είναι φορτισμένη ομοιόμορφα και ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται έξω από το κέλυφος, τότε το σωματίδιο έλκεται ή απωθείται σαν να ήταν όλο το φορτίο του κελύφους συγκεντρωμένο σε ένα σωματίδιο τοποθετημένο στο κέντρο του κελύφους.
- *Δεύτερο θεώρημα κελύφους*: Όταν η επιφάνεια ενός κελύφους είναι φορτισμένη ομοιόμορφα και ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται στο εσωτερικό του κελύφους, τότε η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούνται στο σωματίδιο από το κέλυφος είναι μηδενική.
- Σε κάθε φορτισμένο, σφαιρικό, αγώγιμο κέλυφος το φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην (εξωτερική) επιφάνεια του κελύφους.

Φυσική Σημασία

Περιβάλλεστε από συσκευές που στηρίζονται στη φυσική του ηλεκτρομαγνητισμού, που είναι ο συνδυασμός ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων. Σ' αυτή τη φυσική βασίζονται οι υπολογιστές, η τηλεόραση, το ραδιόφωνο, οι τηλεπικοινωνίες, ο οικιακός φωτισμός, ακόμα και η ικανότητα που έχει η μεμβράνη περιτυλίγματος να προσκολλάται σε ένα δοχείο φαγητού. Η φυσική αυτή αποτελεί επίσης τη βάση του φυσικού κόσμου. Όχι μόνο συγκρατεί ενωμένα όλα τα άτομα και τα μόρια του κόσμου, αλλά επιπλέον προκαλεί τις αστραπές, το σέλας και το ουράνιο τόξο.

Η φυσική του ηλεκτρομαγνητισμού μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους πρώτους Έλληνες φιλοσόφους, οι οποίοι ανακάλυψαν ότι αν τρίψουμε ένα κομμάτι ήλεκτρο (κεχριμπάρι) και κατόπιν το φέρουμε σε επαφή με μικρά κομμάτια άχυρου, τότε αυτά έλκονται από το ήλεκτρο. Σήμερα γνωρίζουμε ότι η έλξη ανάμεσα στο ήλεκτρο και το άχυρο οφείλεται στην ηλεκτρική δύναμη. Οι Έλληνες φιλόσοφοι ανακάλυψαν επίσης πως αν ένα συγκεκριμένο είδος πέτρας (ένας φυσικός μαγνήτης) βρεθεί κοντά σε μικρά κομμάτια σιδήρου, τότε αυτά έλκονται από την πέτρα. Τώρα γνωρίζουμε ότι η έλξη ανάμεσα στον μαγνήτη και τον σίδηρο οφείλεται στη μαγνητική δύναμη.

Ξεκινώντας από τις ταπεινές αυτές ανακαλύψεις των Ελλήνων φιλοσόφων, οι επιστήμες του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού αναπτύχθηκαν ξεχωριστά για αιώνες –έως το 1820 για την ακρίβεια– όταν ο Hans Christian Oersted βρήκε μια σύνδεση μεταξύ τους: το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα σύρμα μπορεί να εκτρέψει τη βελόνα μιας μαγνητικής πυξίδας. Έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι ο Oersted έκανε αυτή την ανακάλυψη, η οποία αποτέλεσε μεγάλη έκπληξη, ενώ ετοίμαζε μια διάλεξη επίδειξης για τους φοιτητές του της φυσικής.

Η νέα επιστήμη του ηλεκτρομαγνητισμού αναπτύχθηκε περαιτέρω από ερευνητές σε πολλές χώρες. Ένας από τους καλύτερους ήταν ο Michael Faraday, ένας πραγματικά χαρισματικός πειραματιστής με ταλέντο στη διαίσθηση και την αντίληψη της φυσικής. Το ταλέντο του αυτό επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι οι εργαστηριακές του σημειώσεις δεν περιέχουν ούτε μία εξίσωση. Στα μέσα του δεκάτου ενάτου αιώνα ο James Clerk Maxwell διατύπωσε τις ιδέες του Faraday σε μαθηματική μορφή, εισήγαγε πολλές νέες δικές του ιδέες και έθεσε τον ηλεκτρομαγνητισμό σε στέρεη θεωρητική βάση.

Η θεώρησή μας για τον ηλεκτρομαγνητισμό εκτείνεται στα επόμενα 16 κεφάλαια. Ξεκινάμε με τα ηλεκτρικά φαινόμενα και το πρώτο μας βήμα είναι να εξετάσουμε τη φύση του ηλεκτρικού φορτίου και της ηλεκτρικής δύναμης.

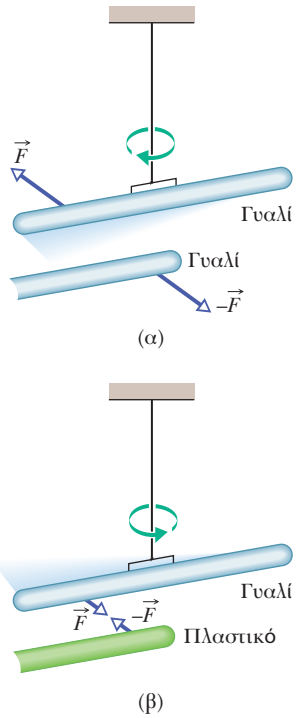
Ηλεκτρικό Φορτίο

Θα δούμε δύο επιδείξεις που φαίνονται μαγικές, αλλά σκοπός μας είναι να ανακαλύψουμε το νόημά τους. Αφού τρίψουμε μια γυάλινη ράβδο με μεταξωτό ύφασμα (σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας), την κρεμάμε από ένα νήμα που είναι δεμένο στο μέσο της (Σχ. 21.1.1α). Κατόπιν, τρίβουμε μια δεύτερη γυάλινη ράβδο με το μεταξωτό ύφασμα και την πλησιάζουμε στην κρεμασμένη ράβδο. Τότε η κρεμασμένη ράβδος απομακρύνεται με μαγικό τρόπο. Διαπιστώνουμε ότι κάποια δύναμη απωθεί την κρεμασμένη ράβδο από αυτή που κρατάμε, αλλά με ποιον τρόπο;

Δεν υπάρχει καμία επαφή μεταξύ τους, κανένα ρεύμα αέρα δεν έσπρωξε την κρεμασμένη ράβδο ούτε κάποιο ηχητικό κύμα διατάραξε την ισορροπία της.

Στην επόμενη επίδειξη αντικαθιστούμε τη δεύτερη ράβδο με μια πλαστική που την έχουμε τρίψει με ένα κομμάτι γούνα. Αυτή τη φορά η κρεμασμένη ράβδος κινείται προς το μέρος της πλαστικής (Σχ. 21.1.1β). Όπως συμβαίνει και με την άπωση, η έλξη συμβαίνει χωρίς οποιαδήποτε επαφή ή φανερή επικοινωνία μεταξύ των δύο ράβδων.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε πώς η κρεμασμένη ράβδος αναγνωρίζει την παρουσία της άλλης, αλλά στο παρόν κεφάλαιο θα εστιάσουμε την προσοχή μας μόνο στις δυνάμεις που υπεισέρχονται. Στην πρώτη επίδειξη η δύναμη στην κρεμασμένη ράβδο ήταν *απωστική* και στη δεύτερη *ελκτική*. Ύστερα από πάρα πολλές έρευνες, οι επιστήμονες αντιλήφθηκαν ότι οι δυνάμεις σε αυτά τα δύο είδη επιδείξεων οφείλονται στο *ηλεκτρικό φορτίο* που εναποθέτουμε στις ράβδους όταν αυτές έρχονται σε επαφή με το μετάξι ή τη γούνα. Το ηλεκτρικό φορτίο είναι μια εσωτερική ιδιότητα των θεμελιωδών σωματιδίων από τα οποία αποτελούνται τα σώματα, όπως οι ράβδοι, το μετάξι και η γούνα. Δηλαδή, το φορτίο είναι μια ιδιότητα που συνοδεύει τα σωματίδια οπουδήποτε κι αν βρεθούν.



Σχήμα 21.1.1 (α) Οι δύο γυάλινες ράβδοι έχουν τριφτεί με μεταξωτό ύφασμα. Η μία από αυτές κρέμεται από νήμα. Όταν βρίσκονται κοντά μεταξύ τους, απωθούνται αμοιβαία. (β) Η πλαστική ράβδος έχει τριφτεί με ένα κομμάτι γούνα. Όταν την πλησιάσουμε στη γυάλινη ράβδο, έλκονται αμοιβαία.

Δύο είδη Υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου, τα οποία ο Αμερικανός επιστήμονας και πολιτικός Benjamin Franklin ονόμασε θετικό και αρνητικό φορτίο. Θα μπορούσε να τους έχει δώσει οποιοδήποτε άλλο όνομα (π.χ. κεράσι και καρύδι), αλλά η χρήση αλγεβρικών προσήμων ως ονομασίες είναι πρακτική όταν προσθέτουμε φορτία για να βρούμε το συνολικό φορτίο. Στα περισσότερα αντικείμενα καθημερινής χρήσης, όπως είναι ένα φλιτζάνι, το πλήθος των αρνητικά φορτισμένων σωματιδίων είναι ίσο με το πλήθος των θετικά φορτισμένων και για τον λόγο αυτό το συνολικό φορτίο είναι μηδενικό. Τότε λέμε ότι υπάρχει *ισορροπία* φορτίου και ότι το σώμα είναι *ηλεκτρικά ουδέτερο* (ή, για συντομία, απλώς *ουδέτερο*).

Πλεόνασμα φορτίου Συνήθως είστε σχεδόν ηλεκτρικά ουδέτεροι. Όμως, αν ζείτε σε περιοχές με χαμηλή υγρασία, γνωρίζετε ότι αν περπατήσετε πάνω σε κάποια είδη χαλιού, η ισορροπία του φορτίου που υπάρχει στο σώμα σας μπορεί να διαταραχθεί λίγο. Σε αυτές τις περιπτώσεις είτε κερδίζετε αρνητικό φορτίο από το χαλί (στα σημεία επαφής της σόλας των παπουτσιών σας με το χαλί) και φορτίζεστε αρνητικά είτε χάνετε αρνητικό φορτίο και φορτίζεστε θετικά. Σε αμφότερες τις περιπτώσεις λέμε ότι το *φορτίο πλεονάζει*. Πιθανόν δεν το αντιλαμβάνεστε αυτό μέχρι να πλησιάσετε το πόμολο μιας πόρτας ή έναν άλλο άνθρωπο. Αν το πλεονάζον φορτίο σας είναι αρκετό, ανάμεσα σε εσάς και στο άλλο σώμα αναπτύσσεται ένας σπινθήρας που εξουδετερώνει το πλεονάζον φορτίο. Ο σπινθήρας μπορεί να είναι απλώς ενοχλητικός αλλά μπορεί και να προκαλέσει πόνο. Αυτή η *φόρτιση* και η *εκφόρτιση* δεν συμβαίνει σε συνθήκες υγρασίας, διότι το νερό που υπάρχει στον αέρα *εξουδετερώνει* το πλεονάζον φορτίο σας τόσο γρήγορα όσο το αποκτάτε.

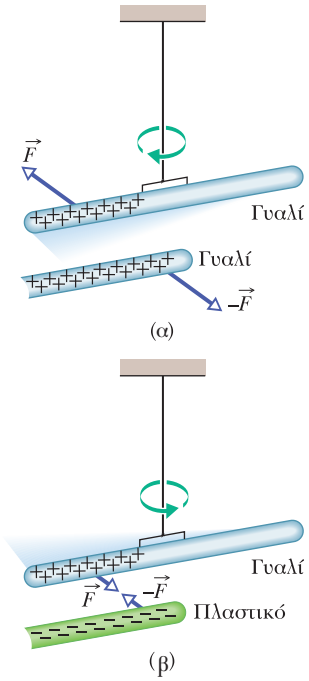
Δύο από τα μεγαλύτερα μυστήρια της φυσικής είναι τα εξής: (1) *Γιατί* στο σύμπαν υπάρχουν σωματίδια με ηλεκτρικό φορτίο (τι είναι στην πραγματικότητα το ηλεκτρικό φορτίο;) και (2) *γιατί* υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου (και όχι, ας πούμε, ένα ή τρία); Απλώς δεν γνωρίζουμε τις απαντήσεις. Ωστόσο, εκτελώντας πολλά πειράματα παρόμοια με τις δύο επιδείξεις μας οι επιστήμονες ανακάλυψαν ότι:

Σωματίδια με το ίδιο πρόσημο ηλεκτρικού φορτίου απωθούνται μεταξύ τους και σωματίδια με αντίθετο πρόσημο έλκονται μεταξύ τους.

Σε λίγο θα διατυπώσουμε αυτόν τον κανόνα σε ποσοτική μορφή, τον νόμο του Coulomb για την *ηλεκτροστατική* (ή *ηλεκτρική*) *δύναμη* μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων. Χρησιμοποιούμε τον όρο *ηλεκτροστατικός* για να δώσουμε έμφαση στο γεγονός ότι τα φορτία είτε είναι ακίνητα το ένα σε σχέση με το άλλο είτε κινούνται πολύ αργά.

Επιδείξεις Ας επιστρέψουμε στις επιδείξεις για να κατανοήσουμε τις κινήσεις της ράβδου ως κάτι που δεν συμβαίνει με μαγικό τρόπο. Όταν τρίβουμε τη γυάλινη ράβδο με ένα μεταξωτό ύφασμα, μικρή ποσότητα αρνητικού φορτίου μετακινείται από τη ράβδο στο ύφασμα (όπως μεταφέρεται φορτίο ανάμεσα σε εσάς και στο χαλί) και η ράβδος απομένει με μικρό πλεόνασμα θετικού φορτίου. (Η κατεύθυνση της κίνησης του αρνητικού φορτίου δεν είναι προφανής και απαιτείται να πειραματιστούμε πολύ για να την προσδιορίσουμε.) *Τρίβουμε* το μετάξι πάνω στη ράβδο για να αυξήσουμε τα σημεία επαφής μεταξύ τους και έτσι να αυξηθεί το μεταφερόμενο φορτίο. Ωστόσο, ακόμα και έτσι μετακινείται ελάχιστο φορτίο. Κρεμάμε τη ράβδο από το νήμα ώστε να τη *μονώσουμε ηλεκτρικά* από το περιβάλλον της (δηλαδή, το περιβάλλον της ράβδου να μην μπορεί να εξουδετερώσει το πλεονάζον φορτίο της δίνοντάς της αρνητικό φορτίο για να εξισορροπηθεί ξανά το συνολικό φορτίο της). Όταν τρίψουμε με μετάξι τη δεύτερη ράβδο, αυτή φορτίζεται επίσης θετικά. Επομένως, όταν την πλησιάσουμε στην πρώτη ράβδο, αυτές απωθούνται μεταξύ τους (Σχ. 21.1.2α).

Κατόπιν, όταν τρίβουμε με τη γούνα την πλαστική ράβδο, αυτή κερδίζει πλεόνασμα αρνητικού φορτίου από τη γούνα. (Και σε αυτή την περίπτωση, η κατεύθυνση προς την οποία μεταφέρεται το φορτίο προκύπτει από πολλά πειράματα.) Όταν πλησιάζουμε την πλαστική ράβδο (που είναι αρνητικά φορτισμένη) στην κρεμασμένη γυάλινη ράβδο (που είναι θετικά φορτισμένη), αυτές έλκονται μεταξύ τους (Σχ. 21.1.2β). Όλη αυτή η διαδικασία δεν είναι εμφανής: Δεν μπορείτε να διακρίνετε το φορτίο ή τη μεταφορά του, αλλά μόνο τα αποτελέσματά τους.



Σχήμα 21.1.2 (α) Δύο φορτισμένες ράβδοι με το ίδιο πρόσημο απωθούνται μεταξύ τους. (β) Δύο φορτισμένες ράβδοι με αντίθετα πρόσημα έλκονται μεταξύ τους. Τα θετικά πρόσημα δηλώνουν θετικό συνολικό φορτίο και τα αρνητικά πρόσημα δηλώνουν αρνητικό συνολικό φορτίο.

Αγωγοί και Μονωτές

Γενικά, μπορούμε να ταξινομήσουμε τα υλικά σύμφωνα με την ικανότητα του φορτίου να κινείται διαμέσου αυτών. Οι **αγωγοί** είναι υλικά μέσω των οποίων το φορτίο μπορεί να κινείται σχετικά ελεύθερα.

Παραδείγματα αγωγών αποτελούν τα μέταλλα (όπως ο χαλκός στα σύρματα των κοινών καλωδίων), το ανθρώπινο σώμα και το νερό της βρύσης. Οι **μη-αγωγοί** –ή αλλιώς **μονωτές**– είναι υλικά μέσω των οποίων το φορτίο δεν μπορεί να κινηθεί ελεύθερα. Παραδείγματα μονωτών είναι το καουτσούκ (όπως η μόνωση στο κοινό καλώδιο), το πλαστικό, το γυαλί και το αποσταγμένο νερό. Οι **ημιαγωγοί** είναι υλικά που τοποθετούνται μεταξύ των αγωγών και των μονωτών, όπως είναι για παράδειγμα το πυρίτιο και το γερμάνιο στα ολοκληρωμένα κυκλώματα υπολογιστών. Οι **υπεραγωγοί** είναι υλικά που είναι *τέλειοι* αγωγοί, καθώς επιτρέπουν στο φορτίο να κινείται χωρίς *κανένα* εμπόδιο. Σε αυτά τα κεφάλαια ασχολούμαστε μόνο με αγωγούς και μονωτές.

Αγώγιμη Διαδρομή Παραθέτουμε ένα παράδειγμα που δείχνει πώς η αγωγιμότητα μπορεί να εξαλείψει το πλεονάζον φορτίο ενός αντικειμένου. Αν τρίψετε μια χάλκινη ράβδο με μάλλινο ύφασμα, μεταφέρεται φορτίο από το μάλλινο ύφασμα στη ράβδο. Ωστόσο, αν κρατάτε τη ράβδο ενώ παράλληλα αγγίζετε μια βρύση δεν είναι δυνατό να φορτίσετε τη ράβδο παρά τη μεταφορά φορτίου. Ο λόγος είναι πως εσείς, η ράβδος και η βρύση είστε όλοι αγωγοί συνδεδεμένοι μέσω της υδραυλικής εγκατάστασης με την επιφάνεια της Γης, η οποία είναι ένας τεράστιος αγωγός. Επειδή τα πλεονάζοντα φορτία που μεταφέρονται στη ράβδο από το μάλλινο ύφασμα απωθούνται μεταξύ τους και απομακρύνονται κινούμενα αρχικά διαμέσου της ράβδου, μετά διαμέσου του σώματός σας και μετά κατόπιν της βρύσης και της υδραυλικής εγκατάστασης και καταλήγουν στην επιφάνεια της Γης, όπου μπορούν να διασκορπιστούν. Η διαδικασία αυτή αφήνει τη ράβδο ηλεκτρικά ουδέτερη.

Όταν δημιουργούμε, όπως παραπάνω, μια αγώγιμη διαδρομή μεταξύ ενός αντικειμένου και της επιφάνειας της Γης, λέμε ότι *γειώνουμε* το αντικείμενο, και όταν ουδετεροποιούμε το αντικείμενο (εξαλείφοντας την ανισορροπία θετικού ή αρνητικού φορτίου), λέμε ότι *εκφορτίζουμε* το αντικείμενο. Αν, αντί να κρατάτε τη χάλκινη ράβδο στο χέρι σας, την κρατάτε με μια μονωτική λαβή, τότε εξαλείφετε την αγώγιμη διαδρομή προς τη Γη και η ράβδος μπορεί να φορτιστεί με το τρίψιμο (το φορτίο παραμένει στη ράβδο), αρκεί να μην την αγγίζετε απευθείας με το χέρι σας.

Φορτισμένα Σωματίδια Οι ιδιότητες των αγωγών και των μονωτών οφείλονται στη δομή και στην ηλεκτρική φύση των ατόμων. Τα άτομα αποτελούνται από θετικά φορτισμένα *πρωτόνια*, αρνητικά φορτισμένα *ηλεκτρό-*

νια και ηλεκτρικά ουδέτερα *νετρόνια*. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι στοιβαγμένα σε έναν κεντρικό *πυρήνα*.

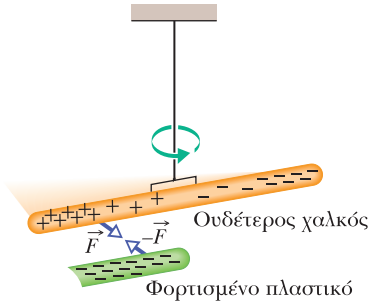
Το φορτίο ενός μονήρους ηλεκτρονίου και το φορτίο ενός μονήρους πρωτονίου έχουν το ίδιο μέγεθος αλλά αντίθετα πρόσημα. Επομένως, ένα ηλεκτρικά ουδέτερο άτομο περιέχει ίσο πλήθος ηλεκτρονίων και πρωτονίων. Τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται κοντά στον πυρήνα επειδή έχουν αντίθετο ηλεκτρικό πρόσημο από τα πρωτόνια κι έτσι έλκονται από τον πυρήνα.

Όταν τα άτομα ενός αγωγού, όπως ο χαλκός, ενώνονται ώστε να σχηματίσουν το στερεό σώμα, κάποια από τα εξωτερικά (κι επομένως ασθενέστερα συγκρατημένα) ηλεκτρόνια αποκτούν την ελευθερία να περιφέρονται μέσα στο στερεό, αφήνοντας πίσω τους θετικά φορτισμένα άτομα (*θετικά ιόντα*). Ονομάζουμε αυτά τα κινούμενα ηλεκτρόνια ως *ηλεκτρόνια αγωγιμότητας*. Υπάρχουν πολύ λίγα (ή καθόλου) ελεύθερα ηλεκτρόνια σε έναν μονωτή.

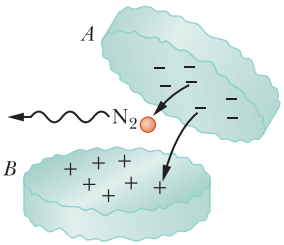
Επαγώμενο Φορτίο Το πείραμα του Σχ. 21.1.3 δείχνει την κινητικότητα του φορτίου σε έναν αγωγό. Μια αρνητικά φορτισμένη πλαστική ράβδος θα έλκει το ένα ή το άλλο άκρο μιας μονωμένης, ηλεκτρικά ουδέτερης, χάλκινης ράβδου. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι πολλά από τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας που βρίσκονται στο πιο κοντινό άκρο της χάλκινης ράβδου απωθούνται από το αρνητικό φορτίο στην πλαστική ράβδο. Κάποια από τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας μετακινούνται προς το απώτατο άκρο της χάλκινης ράβδου, μειώνοντας τα ηλεκτρόνια στο εγγύτερο άκρο και αφήνοντάς το έτσι με πλεονάζον θετικό φορτίο. Αυτό το θετικό φορτίο έλκεται από το αρνητικό φορτίο της πλαστικής ράβδου. Παρότι η χάλκινη ράβδος παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερη, λέμε ότι έχει *επαγόμενο φορτίο*, που σημαίνει ότι κάποια από τα θετικά και αρνητικά της φορτία έχουν διαχωριστεί εξαιτίας της παρουσίας κάποιου κοντινού φορτίου.

Ομοίως, αν φέρουμε μια θετικά φορτισμένη γυάλινη ράβδο κοντά στο ένα άκρο μιας ουδέτερης χάλκινης ράβδου, επάγεται πάλι φορτίο στην ουδέτερη χάλκινη ράβδο, αλλά τώρα το εγγύτερο άκρο της κερδίζει ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, φορτίζεται αρνητικά και έλκεται από τη γυάλινη ράβδο, ενώ το άλλο άκρο της είναι θετικά φορτισμένο.

Σημειώστε ότι μόνο τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας, με τα αρνητικά τους φορτία, μπορούν να μετακινηθούν. Τα θετικά ιόντα είναι σταθερά στη θέση τους. Επομένως, ένα αντικείμενο γίνεται θετικά φορτισμένο μόνο μέσω της *αφαίρεσης αρνητικών φορτίων*.



Σχήμα 21.1.3 Μια ουδέτερη χάλκινη ράβδος μονώνεται ηλεκτρικά από το περιβάλλον της αιωρούμενη από μονωτικό νήμα. Οποιοδήποτε άκρο της χάλκινης ράβδου θα έλκεται από μια φορτισμένη ράβδο. Εδώ, τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας στη χάλκινη ράβδο απωθούνται προς το απώτερο άκρο της από το ηλεκτρικό φορτίο στην πλαστική ράβδο. Τότε αυτό το αρνητικό φορτίο έλκει το θετικό φορτίο που απομένει στο εγγύτερο άκρο της χάλκινης ράβδου, περιστρέφοντάς τη ώστε να φέρει αυτό το άκρο πιο κοντά στην πλαστική ράβδο.



Σχήμα 21.1.4 Δύο κομμάτια μιας καραμέλας καθώς απομακρύνονται μεταξύ τους. Τα ηλεκτρόνια που μεταπηδούν από την αρνητική επιφάνεια του κομματιού *A* προς τη θετική επιφάνεια του κομματιού *B* συγκρούονται με τα μόρια του αζώτου (N_2) του αέρα.

Μπλε Λάμψεις από Καραμέλες

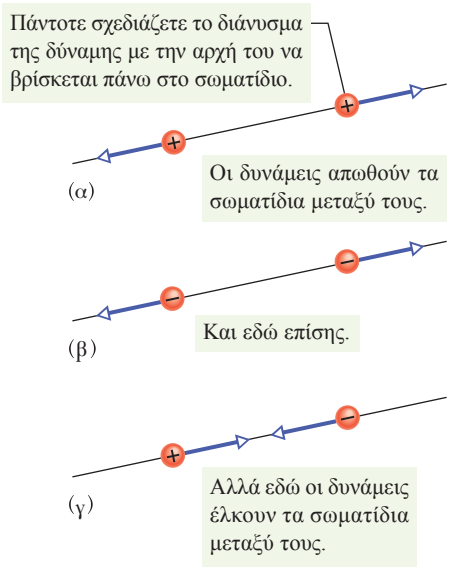
Μια έμμεση απόδειξη της έλξης φορτίων με αντίθετα πρόσημα μπορούμε να δούμε με μια καραμέλα με γεύση π.χ. μέντας. Αν προσαρμόσετε τα μάτια σας στο σκοτάδι για 15 περίπου λεπτά και μετά πείτε σε έναν φίλο να δαγκώσει ένα κομμάτι της καραμέλας στο σκοτάδι, θα δείτε μια ασθενή μπλε λάμψη στο στόμα του φίλου σας σε κάθε δαγκωνιά. Όταν μια δαγκωνιά σπάει έναν κρύσταλλο ζάχαρης σε κομμάτια, κάθε κομμάτι θα καταλήξει πιθανότατα με διαφορετικό πλήθος ηλεκτρονίων. Υποθέστε ότι ένας κρύσταλλος σπάει στα κομμάτια *A* και *B*, με το *A* να καταλήγει με περισσότερα ηλεκτρόνια στην επιφάνειά του απ' ό,τι το *B* (Σχ. 21.1.4). Αυτό σημαίνει ότι το *B* έχει θετικά ιόντα (άτομα που έχασαν ηλεκτρόνια προς το *A*) στην επιφάνειά του. Επειδή τα ηλεκτρόνια στο *A* έλκονται ισχυρά από τα θετικά ιόντα στο *B*, κάποια από αυτά τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν διαμέσου του διάκενου μεταξύ των κομματιών.

Καθώς τα *A* και *B* απομακρύνονται μεταξύ τους, ο αέρας (κυρίως άζωτο, N_2) εισρέει στο διάκενο και πολλά από τα ηλεκτρόνια που μεταπηδούν συγκρούονται με τα μόρια του αζώτου στον αέρα, προκαλώντας την εκπομπή υπεριώδους φωτός από τα μόρια. Δεν μπορείτε να δείτε αυτό το είδος φωτός. Ωστόσο, τα μόρια της μέντας στις επιφάνειες των κομματιών της καραμέλας απορροφούν το υπεριώδες φως και τότε εκπέμπουν μπλε φως, το οποίο *μπορείτε* να δείτε – είναι το μπλε φως που βγαίνει από το στόμα του φίλου σας.

Ο Νόμος του Coulomb

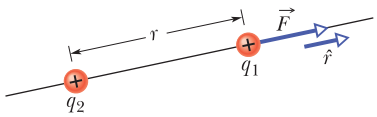
Προτού προχωρήσουμε στην εξίσωση του νόμου του Coulomb, πρέπει να κάνουμε μια επισήμανση. Αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο για φορτισμένα σωματίδια (και για λίγα σώματα που μπορούμε να τα χειριστούμε ως σωματίδια). Για εκτεταμένα σώματα όπου το φορτίο τους βρίσκεται σε πολλές διαφορετικές περιοχές πάνω σε αυτά χρειαζόμαστε πιο ισχυρές τεχνικές. Έτσι, στην παρούσα ενότητα μελετάμε μόνο φορτισμένα σωματίδια και όχι, ας πούμε, δύο ηλεκτρισμένες γάτες.

Αν δύο φορτισμένα σωματίδια πλησιάσουν μεταξύ τους, το ένα ασκεί **ηλεκτροστατική δύναμη** στο άλλο. Η κατεύθυνση των διανυσμάτων των δυνάμεων εξαρτάται από το πρόσημο των φορτίων. Αν τα φορτία είναι ομόσημα, τα σωματίδια απωθούνται αμοιβαία. Αυτό σημαίνει ότι το διάνυσμα της δύναμης που ασκείται στο ένα φορτίο κατευθύνεται μακριά από το άλλο φορτίο (Σχ. 21.1.5α και β). Αν αφήσουμε ελεύθερα τα σωματίδια, αυτά θα επιταχυνθούν απομακρυνόμενα το ένα από το άλλο. Αντιθέτως, αν τα φορτία των σωματιδίων είναι ετερόσημα, τότε έλκονται αμοιβαία. Αυτό σημαίνει ότι το διάνυσμα της δύναμης που ασκείται στο ένα φορτίο κατευθύνεται προς το άλλο (Σχ. 21.1.5γ). Αν αφήσουμε ελεύθερα τα σωματίδια, αυτά θα επιταχυνθούν πλησιάζοντας μεταξύ τους.



Σχήμα 21.1.5 Δύο φορτισμένα σωματίδια απωθούνται μεταξύ τους αν έχουν το ίδιο πρόσημο φορτίου, είτε (α) και τα δύο θετικό, είτε (β) και τα δύο αρνητικό. (γ) Έλκονται μεταξύ τους αν έχουν αντίθετο πρόσημο φορτίου.

Η εξίσωση της ηλεκτροστατικής δύναμης που ασκείται στα σωματίδια ονομάζεται **νόμος του Coulomb**, προς τιμήν του Charles-Augustin de Coulomb, ο οποίος οδηγήθηκε στην εν λόγω εξίσωση με πειράματα που εκτέλεσε το 1785. Ας γράψουμε την εξίσωση σε διανυσματική μορφή, αναφερόμενοι στα σωματίδια που φαίνονται στο Σχ. 21.1.6, όπου το σωματίδιο 1 έχει φορτίο q_1 και το σωματίδιο 2 έχει φορτίο q_2. (Αυτά τα σύμβολα είναι δυνατόν να παριστάνουν θετικό ή αρνητικό φορτίο.) Εστιάζοντας την προσοχή μας στο σωματίδιο 1, γράφουμε τη δύναμη που ασκείται σε αυτό με τη βοήθεια του μοναδιαίου διανύσματος $\hat{\mathrm{r}}$ που βρίσκεται πάνω στον άξονα ο οποίος διέρχεται από τα δύο σωματίδια και κατευθύνεται πέρα από το σωματίδιο 2. (Όπως συμβαίνει με κάθε μοναδιαίο διάνυσμα, το $\hat{\mathrm{r}}$ έχει μέτρο ακριβώς ίσο με 1 και είναι αδιάστατο. Σκοπός του είναι να δείχνει την κατεύθυνση, όπως τα βέλη στις πινακίδες των δρόμων.) Με βάση αυτές τις επιλογές, γράφουμε την ηλεκτροστατική δύναμη ως εξής:



Σχήμα 21.1.6 Η ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο 1 μπορεί να περιγραφεί με βάση ένα μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{r}$ κατά μήκος ενός άξονα που διέρχεται από τα δύο σωματίδια, με φορά απομακρυνόμενη από το σωματίδιο 2.

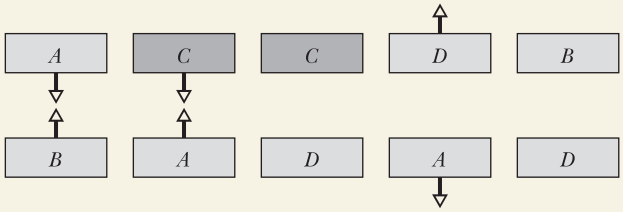
$$\vec{F} = k\frac{q_1 q_2}{r^2}\hat{\mathrm{r}} \qquad \text{(Νόμος του Coulomb).} \qquad (21.1.1)$$

όπου r είναι η απόσταση μεταξύ των σωματιδίων και k είναι μια θετική σταθερά που ονομάζεται *ηλεκτροστατική σταθερά* ή *σταθερά του Coulomb* (θα εξετάσουμε την k παρακάτω).

Ας ελέγξουμε κατ' αρχάς την κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο σωματίδιο 1, όπως αυτή προβλέπεται από την Εξ. 21.1.1. Αν τα q_1 και q_2 είναι ομόσημα, το γινόμενο q_1q_2 είναι θετικό. Έτσι, η Εξ. 21.1.1 μας λέει ότι η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο 1 έχει την κατεύθυνση του $\hat{\mathrm{r}}$. Αυτό είναι συνεπές με το γεγονός ότι το σωματίδιο 1 απωθείται από το 2. Κατόπιν, αν τα q_1 και q_2 είναι ετερόσημα, το γινόμενο q_1q_2 είναι αρνητικό. Συνεπώς, η Εξ. 21.1.1 μας λέει ότι η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο 1 κατευθύνεται αντίθετα από το $\hat{\mathrm{r}}$. Αυτό συμφωνεί με το γεγονός ότι το σωματίδιο 1 έλκεται από το σωματίδιο 2.

ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 21.1.1

Το σχήμα δείχνει πέντε ζεύγη πλακών: οι A, B και D είναι φορτισμένες πλαστικές πλάκες και η C είναι μια ηλεκτρικά ουδέτερη χάλκινη πλάκα. Οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις ανάμεσα στις πλάκες φαίνονται για τρία από τα ζεύγη πλακών. Για τα υπόλοιπα δύο ζεύγη, οι πλάκες απωθούν ή έλκουν η μία την άλλη;



Παρατήρηση Δείτε ένα πολύ περίεργο γεγονός. Η μορφή της Εξ. 21.1.1 είναι όμοια με την εξίσωση του Νεύτωνα (Εξ. 13.1.3), η οποία ισχύει για τη βαρυτική δύναμη μεταξύ δύο σωματιδίων μάζας m_1 και m_2 που βρίσκονται σε απόσταση r:

$$\vec{F} = G\frac{m_1 m_2}{r^2}\hat{\mathrm{r}} \qquad \text{(Νόμος του Νεύτωνα)}, \tag{21.1.2}$$

όπου G είναι η βαρυτική σταθερά. Αν και τα δύο είδη δύναμης διαφέρουν πολύ μεταξύ τους, αμφότερες οι εξισώσεις περιγράφουν νόμους αντίστροφου τετραγώνου (δηλαδή, εξάρτηση από το $1/r^2$) που περιλαμβάνουν το γινόμενο μιας ιδιότητας των σωματιδίων που αλληλεπιδρούν: Στη μία περίπτωση η ιδιότητα είναι το φορτίο και στην άλλη η μάζα. Όμως, οι νόμοι διαφέρουν μεταξύ τους στο γεγονός ότι η βαρυτική δύναμη είναι πάντοτε ελκτική, ενώ η ηλεκτροστατική μπορεί να είναι είτε ελκτική είτε απωστική, ανάλογα με το πρόσημο των φορτίων. Αυτή η διαφορά προέρχεται από το γεγονός ότι υπάρχει μόνο ένα είδος μάζας αλλά δύο είδη φορτίου.

Μονάδα Στο SI η μονάδα του φορτίου είναι το **coulomb**. Για πρακτικούς λόγους που σχετίζονται με την ακρίβεια των μετρήσεων, η μονάδα coulomb προκύπτει από τη μονάδα του ηλεκτρικού ρεύματος i, η οποία στο SI είναι το *ampere*. Στο Κεφάλαιο 26 θα εξετάσουμε λεπτομερώς την έννοια του ρεύματος, αλλά προς το παρόν ας επισημάνουμε ότι ηλεκτρικό ρεύμα i είναι ο ρυθμός dq/dt με τον οποίο το φορτίο διέρχεται από ένα σημείο ή μια περιοχή:

$$i = \frac{dq}{dt} \qquad \text{(ηλεκτρικό ρεύμα)}. \tag{21.1.3}$$

Αναδιατάσσοντας την Εξ. 21.1.3 και αντικαθιστώντας τα σύμβολα με τις μονάδες τους (coulomb C, ampere A και δευτερόλεπτο s), βλέπουμε ότι

$$1\mathrm{C} = (1\mathrm{A})(1\mathrm{s}).$$

Μέτρο της δύναμης Για ιστορικούς λόγους (και επειδή με αυτόν τον τρόπο απλοποιούνται πολλοί τύποι), στην Εξ. 21.1.1 η ηλεκτροστατική σταθερά k γράφεται συχνά ως $1/4\pi\varepsilon_0$. Σε αυτή την περίπτωση, το μέτρο της ηλεκτροστατικής δύναμης του νόμου του Coulomb γίνεται

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1||q_2|}{r^2} \qquad \text{(Νόμος του Coulomb)}. \tag{21.1.4}$$

Οι σταθερές στις Εξ. 21.1.1 και 21.1.4 έχουν την τιμή:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 8.99 \times 10^9\,\mathrm{N\cdot m^2/C^2}. \tag{21.1.5}$$

Η ποσότητα ε_0, η οποία ονομάζεται **διηλεκτρική σταθερά**, ορισμένες φορές εμφανίζεται μεμονωμένα στις εξισώσεις και για το κενό είναι ίση με:

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}\,\mathrm{C^2/N\cdot m^2}. \tag{21.1.6}$$

Επεξεργασία προβλημάτων Σημειώστε ότι η απόλυτη τιμή των φορτίων που εμφανίζεται στην Εξ. 21.1.4 μας δίνει το μέτρο της δύναμης. Στο παρόν κεφάλαιο, λοιπόν, όταν λύνουμε προβλήματα χρησιμοποιούμε την Εξ. 21.1.4 για να βρούμε το μέτρο της δύναμης που ασκείται στο σωματίδιο που έχουμε επιλέξει εξαιτίας της παρουσίας ενός δεύτερου σωματιδίου και με ξεχωριστή διαδικασία προσδιορίζουμε την κατεύθυνση αυτής της δύναμης, λαμβάνοντας υπόψη το πρόσημο των δύο φορτίων.

Πολλαπλές δυνάμεις Όπως συμβαίνει με όλες τις δυνάμεις που μελετάμε στο παρόν βιβλίο, η ηλεκτροστατική δύναμη υπακούει στην αρχή της υπέρθεσης. Υποθέστε ότι έχουμε n φορτισμένα σωματίδια κοντά σε ένα επιλεγμένο σωματίδιο, που ονομάζουμε σωματίδιο 1. Τότε, η συνισταμένη δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο 1 δίνεται από το διανυσματικό άθροισμα

$$\vec{F}_{1,\text{net}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} + \vec{F}_{14} + \vec{F}_{15} + \cdots + \vec{F}_{1n}, \tag{21.1.7}$$

όπου, για παράδειγμα, η F_{14} είναι η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο 1 λόγω της παρουσίας του σωματιδίου 4.

Επειδή αυτή η εξίσωση είναι το κλειδί για την επίλυση πολλών προβλημάτων, ας τη διατυπώσουμε περιφραστικά. Αν θέλετε να υπολογίσετε τη συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα επιλεγμένο φορτισμένο σωματίδιο που περιβάλλεται από άλλα φορτισμένα σωματίδια, αρχικά προσδιορίστε με σαφήνεια το εν λόγω σωματίδιο και κατόπιν βρείτε τη δύναμη που ασκεί σε αυτό καθένα από τα υπόλοιπα σωματίδια. Στη συνέχεια, σχεδιάστε τα διανύσματα αυτών των δυνάμεων σε ένα διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το επιλεγμένο σωματίδιο, έτσι ώστε οι αρχές των διανυσμάτων να βρίσκονται πάνω σε αυτό. (Αυτή η διαδικασία ίσως φαίνεται τετριμμένη, όμως αν δεν μπορέσετε να την ολοκληρώσετε, θα οδηγηθείτε σε λάθη.) Κατόπιν, προσθέστε *διανυσματικά* όλες τις δυνάμεις μεταξύ τους, σύμφωνα με τους κανόνες του Κεφαλαίου 3, και όχι όπως προσθέτουμε μονόμετρα μεγέθη (δηλαδή, δεν μπορείτε να προσθέσετε απλώς τα μέτρα των δυνάμεων). Το αποτέλεσμα είναι η συνολική (συνισταμένη) δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο.

Αν και λόγω του διανυσματικού χαρακτήρα των δυνάμεων τα προβλήματα είναι δυσκολότερα απ' ό,τι αν είχαμε απλώς μονόμετρα μεγέθη, να είστε ευγνώμονες για το γεγονός ότι ισχύει η Εξ. 21.1.7. Αν δύο διανύσματα δυνάμεων δεν προστίθεντο απλώς μεταξύ τους, αλλά για κάποιο λόγο το ένα ενίσχυε το άλλο, θα ήταν πολύ δύσκολο να κατανοήσουμε και να διαχειριστούμε τον φυσικό κόσμο.

Οι θεωρίες των κελυφών Κατ' αναλογία με τις θεωρίες των κελυφών για τη βαρυτική δύναμη (Ενθετο 13.1), έχουμε δύο θεωρίες κελυφών για την ηλεκτροστατική δύναμη:

1ο *θεώρημα των κελυφών*: Όταν η επιφάνεια ενός κελύφους είναι ομοιόμορφα φορτισμένη και ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται έξω από το κέλυφος, το σωματίδιο έλκεται ή απωθείται σαν όλο το φορτίο του κελύφους να ήταν συγκεντρωμένο σε ένα σωματίδιο στο κέντρο του.

2ο *θεώρημα των κελυφών*: Όταν η επιφάνεια ενός κελύφους είναι ομοιόμορφα φορτισμένη και ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται στο εσωτερικό του κελύφους, το κέλυφος δεν ασκεί δύναμη στο σωματίδιο.

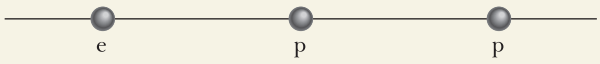
(Στο πλαίσιο του πρώτου θεωρήματος, θεωρούμε ότι το φορτίο του κελύφους είναι αρκετά μεγαλύτερο από το φορτίο του σωματιδίου ώστε η παρουσία του σωματιδίου να έχει αμελητέα επίδραση στην κατανομή του φορτίου πάνω στο κέλυφος.)

Σφαιρικοί Αγωγοί

Αν τοποθετηθεί πλεονάζον φορτίο σε σφαιρικό κέλυφος από αγώγιμο υλικό, το πλεονάζον φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην (εξωτερική) επιφάνεια. Για παράδειγμα, αν τοποθετήσουμε πλεονάζοντα ηλεκτρόνια σε μεταλλικό σφαιρικό κέλυφος, αυτά τα ηλεκτρόνια απωθούν το ένα το άλλο και τείνουν να απομακρύνονται μεταξύ τους, οπότε απλώνονται πάνω σε όλη τη διαθέσιμη επιφάνεια μέχρι να κατανεμηθούν ομοιόμορφα. Αυτή η διάταξη μεγιστοποιεί τις αποστάσεις ανάμεσα σε όλα τα ζεύγη πλεοναζόντων ηλεκτρονίων. Τότε, σύμφωνα με το πρώτο θεώρημα των κελυφών, το κέλυφος θα έλξει ή θα απωθήσει ένα εξωτερικό φορτίο σαν να είχε συγκεντρωμένο όλο το πλεονάζον φορτίο στο κέντρο του.

Αν αφαιρέσουμε αρνητικό φορτίο από ένα σφαιρικό μεταλλικό κέλυφος, το θετικό φορτίο που προκύπτει στο κέλυφος κατανέμεται επίσης ομοιόμορφα στην επιφάνεια του κελύφους. Για παράδειγμα, αν αφαιρέσουμε n ηλεκτρόνια, τότε υπάρχουν n θέσεις θετικού φορτίου (θέσεις από τις οποίες λείπει ένα ηλεκτρόνιο) που κατανέμονται ομοιόμορφα πάνω στο κέλυφος. Σύμφωνα με το πρώτο θεώρημα των κελυφών, το κέλυφος και πάλι θα έλξει ή θα απωθήσει ένα εξωτερικό φορτίο σαν να είχε συγκεντρωμένο όλο το πλεονάζον φορτίο στο κέντρο του.

ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 21.1.2



Το σχήμα δείχνει δύο πρωτόνια (συμβολίζονται με p) και ένα ηλεκτρόνιο (συμβολίζεται με e) πάνω σε κάποιον άξονα. Για το κεντρικό πρωτόνιο, ποια είναι η κατεύθυνση (α) της δύναμης που ασκείται εξαιτίας του ηλεκτρονίου, (β) της δύναμης που ασκείται εξαιτίας του άλλου πρωτονίου και (γ) της συνισταμένης δύναμης;

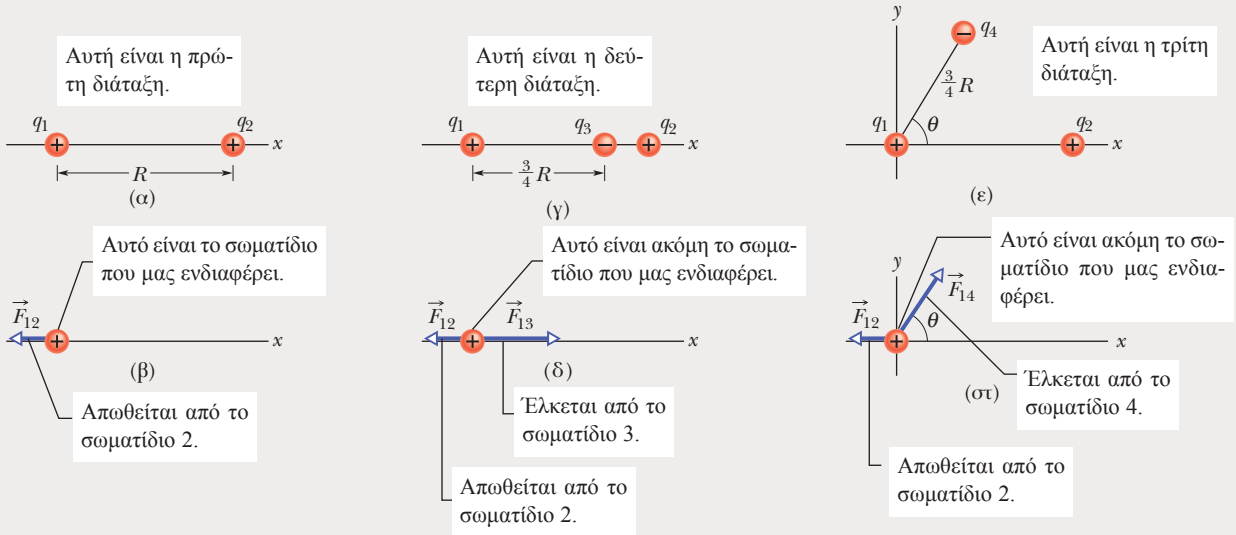
Ενδεικτικό Πρόβλημα 21.1.1 Εύρεση της ολικής δύναμης που οφείλεται σε δύο άλλα φορτία

Αυτό το ενδεικτικό πρόβλημα περιέχει στην πραγματικότητα τρία παραδείγματα, κλιμακούμενα από βασικές έννοιες σε δυσκολότερα ερωτήματα. Σε κάθε ερώτημα έχουμε το ίδιο φορτισμένο σωματίδιο 1. Αρχικά, ασκείται μία μόνο δύναμη σε αυτό (εύκολη περίπτωση). Στη συνέχεια, υπάρχουν δύο δυνάμεις, αλλά με ακριβώς αντίθετες κατευθύνσεις (όχι πολύ δύσκολο). Στην τελευταία περίπτωση υπάρχουν πάλι δύο δυνάμεις, αλλά τώρα με πολύ διαφορετικές κατευθύνσεις (οπότε πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπόψη το γεγονός ότι είναι διανύσματα). Το κλειδί και για τα τρία παραδείγματα είναι να σχεδιάσετε σωστά τις δυνάμεις πριν καταλήξετε σε μια αριθμομηχανή, διαφορετικά μπορεί να κάνετε υπολογισμούς χωρίς νόημα.

(α) Το Σχ. 21.1.7α δείχνει δύο θετικά φορτισμένα σωματίδια τοποθετημένα ακλόνητα πάνω στον άξονα x. Τα φορτία είναι $q_1 = 1.60 \times 10^{-19}$ C και $q_2 = 3.20 \times 10^{-19}$ C και η απόσταση μεταξύ τους είναι $R = 0.0200$ m. Πόσο είναι το μέτρο και ποια είναι η κατεύθυνση της ηλεκτροστατικής δύναμης $\vec{F}_{12}$ που ασκείται στο σωματίδιο 1 από το σωματίδιο 2;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ

Επειδή και τα δύο σωματίδια είναι θετικά φορτισμένα, το σωματίδιο 1 απωθείται από το σωματίδιο 2 με δύναμη της οποίας το μέτρο δίνεται από την Εξ. 21.1.4. Συνεπώς, η δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο 1 έχει κατεύθυνση απομακρυνόμενη από το σωματίδιο 2 προς την αρνητική κατεύθυνση του άξονα x, όπως φαίνεται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος του Σχ. 21.1.7β.



Σχήμα 21.1.7 (α) Δύο φορτισμένα σωματίδια με φορτία q_1 και q_2 βρίσκονται στερεωμένα πάνω σε έναν άξονα x. (β) Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το σωματίδιο 1 που δείχνει την ηλεκτροστατική δύναμη που του ασκείται από το σωματίδιο 2. (γ) Συμπεριλαμβάνεται το σωματίδιο 3. (δ) Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το σωματίδιο 1. (ε) Συμπεριλαμβάνεται το σωματίδιο 4. (στ) Το διάγραμμα ελεύθερου σώματος για το σωματίδιο 1.

Δύο σωματίδια: Χρησιμοποιώντας την Εξ. 21.1.4, αντικαθιστώντας το r με την απόσταση R, γράφουμε το μέτρο F_{12} της δύναμης αυτής ως

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1||q_2|}{R^2} \\ &= (8.99\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}) \\ &\quad\times\frac{(1.60\times10^{-19}\ \mathrm{C})(3.20\times10^{-19}\ \mathrm{C})}{(0.0200\ \mathrm{m})^2} \\ &= 1.15\times10^{-24}\ \mathrm{N}. \end{aligned}$$

Επομένως, η δύναμη $\vec{F}_{12}$ έχει το ακόλουθο μέτρο και κατεύθυνση (ως προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα x):

$$1.15\times10^{-24}\ \mathrm{N}\ \text{και}\ 180^\circ. \qquad \text{(Απάντηση)}$$

Μπορούμε επίσης να γράψουμε την $\vec{F}_{12}$ σε συμβολισμό μοναδιαίων διανυσμάτων ως

$$\vec{F}_{12} = -(1.15\times10^{-24}\ \mathrm{N})\hat{\mathrm{i}} \qquad \text{(Απάντηση)}$$

(β) Το Σχ. 21.1.7γ είναι ίδιο με το Σχ. 21.1.7α εκτός από το γεγονός ότι τώρα το σωματίδιο 3 βρίσκεται στον άξονα x ανάμεσα στα σωματίδια 1 και 2. Το σωματίδιο 3 έχει φορτίο $q_3 = -3.20\times10^{-19}$ C και βρίσκεται σε απόσταση $\frac{3}{4}R$ από το σωματίδιο 1. Πόση είναι η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ στο σωματίδιο 1 εξαιτίας των σωματιδίων 2 και 3;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ

Η παρουσία του σωματιδίου 3 δεν αλλάζει την ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο 1 από το σωματίδιο 2. Επομένως, η δύναμη $\vec{F}_{12}$ εξακολουθεί να δρα στο σωματίδιο 1. Ομοίως, η δύναμη $\vec{F}_{13}$ που δρα στο σωματίδιο 1 εξαιτίας του σωματιδίου 3 δεν επηρεάζεται από την παρουσία του σωματιδίου 2. Επειδή τα σωματίδια 1 και 3 έχουν φορτία με αντίθετα πρόσημα, το σωματίδιο 1 έλκεται από το σωματίδιο 3. Επομένως, η δύναμη $\vec{F}_{13}$ κατευθύνεται προς το σωματίδιο 3, όπως σημειώνεται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος του Σχ. 21.1.7δ.

Τρία σωματίδια: Για να βρούμε το μέτρο της $\vec{F}_{13}$, μπορούμε να ξαναγράψουμε την Εξ. 21.1.4 σαν

$$\begin{aligned} F_{13} &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1||q_3|}{(\frac{3}{4}R)^2} \\ &= (8.99\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}) \\ &\quad\times\frac{(1.60\times10^{-19}\ \mathrm{C})(3.20\times10^{-19}\ \mathrm{C})}{(\frac{3}{4})^2(0.0200\ \mathrm{m})^2} \\ &= 2.05\times10^{-24}\ \mathrm{N}. \end{aligned}$$

Μπορούμε επίσης να γράψουμε την $\vec{F}_{13}$ σε συμβολισμό μοναδιαίων διανυσμάτων

$$\vec{F}_{13} = (2.05\times10^{-24}\ \mathrm{N})\hat{\mathrm{i}}.$$

Η συνολική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ στο σωματίδιο 1 είναι το διανυσματικό άθροισμα των $\vec{F}_{12}$ και $\vec{F}_{13}$. Δηλαδή, με τη βοήθεια της Εξ. 21.1.7, μπορούμε να υπολογίσουμε τη συνολική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ στο σωματίδιο 1 σε συμβολισμό μοναδιαίων διανυσμάτων ως:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{1,\mathrm{net}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} \\ &= -(1.15\times10^{-24}\ \mathrm{N})\hat{\mathrm{i}} + (2.05\times10^{-24}\ \mathrm{N})\hat{\mathrm{i}} \\ &= (9.00\times10^{-25}\ \mathrm{N})\hat{\mathrm{i}}. \qquad \text{(Απάντηση)} \end{aligned}$$

Επομένως, η $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ έχει το εξής μέτρο και κατεύθυνση (ως προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα x):

$$9.00\times10^{-25}\ \mathrm{N}\ \text{και}\ 0^\circ. \qquad \text{(Απάντηση)}$$

(γ) Το Σχ. 21.1.7ε είναι πανομοιότυπο με το Σχ. 21.1.7α με τη διαφορά ότι τώρα συμπεριλαμβάνεται το σωματίδιο 4. Αυτό έχει φορτίο $q_4 = -3.20\times10^{-19}$ C και βρίσκεται σε απόσταση $3R/4$ από το σωματίδιο 1, πάνω στην ευθεία που σχηματίζει γωνία $\theta = 60^\circ$ με τον άξονα x. Πόση είναι η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ στο σωματίδιο 1 εξαιτίας των σωματιδίων 2 και 4;

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ

Η συνολική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ είναι το διανυσματικό άθροισμα της $\vec{F}_{12}$ και της νέας δύναμης $\vec{F}_{14}$ που δρα στο σωματίδιο 1 εξαιτίας του σωματιδίου 4. Επειδή τα σωματίδια 1 και 4 έχουν φορτία με αντίθετο πρόσημο, το σωματίδιο 1 έλκεται από το σωματίδιο 4. Συνεπώς, η δύναμη $\vec{F}_{14}$ κατευθύνεται προς το σωματίδιο 4, υπό γωνία $\theta = 60^\circ$, όπως σημειώνεται στο διάγραμμα ελεύθερου σώματος του Σχ. 21.1.7στ.

Τέσσερα σωματίδια: Μπορούμε να ξαναγράψουμε την Εξ. 21.1.4 σαν

$$\begin{aligned} F_{14} &= \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{|q_1||q_4|}{(\frac{3}{4}R)^2} \\ &= (8.99\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}) \\ &\quad\times\frac{(1.60\times10^{-19}\ \mathrm{C})(3.20\times10^{-19}\ \mathrm{C})}{(\frac{3}{4})^2(0.0200\ \mathrm{m})^2} \\ &= 2.05\times10^{-24}\ \mathrm{N}. \end{aligned}$$

Τότε, από την Εξ. 21.1.7 μπορούμε να γράψουμε τη συνολική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ στο σωματίδιο 1 σαν

$$\vec{F}_{1,\mathrm{net}} = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14}$$

Επειδή οι δυνάμεις $\vec{F}_{12}$ και $\vec{F}_{14}$ δεν κατευθύνονται κα-

τά τον ίδιο άξονα, *δεν μπορούμε* να τις προσθέσουμε απλά συνδυάζοντας τα μέτρα τους. Αντί για αυτό, πρέπει να τις αθροίσουμε ως διανύσματα, χρησιμοποιώντας μία από τις παρακάτω μεθόδους.

Μέθοδος 1 *Αθροίζοντας απευθείας σε αριθμομηχανή που υποστηρίζει διανύσματα.* Για την $\vec{F}_{12}$ εισάγουμε το μέτρο 1.15×10^{-24} και τη γωνία 180°. Για την $\vec{F}_{14}$ εισάγουμε το μέτρο 2.05×10^{-24} και τη γωνία 60°. Στη συνέχεια, προσθέτουμε τα διανύσματα.

Μέθοδος 2 *Αθροίζοντας χρησιμοποιώντας τον συμβολισμό μοναδιαίων διανυσμάτων.* Πρώτα ξαναγράφουμε την $\vec{F}_{14}$ ως

$$\vec{F}_{14} = (F_{14}\cos\theta)\hat{\mathrm{i}} + (F_{14}\sin\theta)\hat{\mathrm{j}}.$$

Αντικαθιστώντας με 2.05×10^{-24} N την $\vec{F}_{14}$ και τη θ με 60°, προκύπτει

$$\vec{F}_{14} = (1.025 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{i}} + (1.775 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{j}}.$$

Στη συνέχεια, αθροίζουμε

$$\begin{aligned}\vec{F}_{1,\mathrm{net}} &= \vec{F}_{12} + \vec{F}_{14}\\ &= -(1.15 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{i}}\\ &\quad + (1.025 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{i}} + (1.775 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{j}}\\ &\approx (-1.25 \times 10^{-25}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{i}} + (1.78 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})\hat{\mathrm{j}}.\end{aligned}$$

Μέθοδος 3 *Αθροίζοντας συνιστώσες ανά άξονα.* Το άθροισμα των συνιστωσών x μας δίνει

$$\begin{aligned}F_{1,\mathrm{net},x} &= F_{12,x} + F_{14,x} = F_{12} + F_{14}\cos 60°\\ &= -1.15 \times 10^{-24}\,\mathrm{N} + (2.05 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})(\cos 60°)\\ &= -1.25 \times 10^{-25}\,\mathrm{N}.\end{aligned}$$

Το άθροισμα των συνιστωσών y μας δίνει

$$\begin{aligned}F_{1,\mathrm{net},y} &= F_{12,y} + F_{14,y} = 0 + F_{14}\sin 60°\\ &= (2.05 \times 10^{-24}\,\mathrm{N})(\sin 60°)\\ &= 1.78 \times 10^{-24}\,\mathrm{N}.\end{aligned}$$

Η συνολική δύναμη $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ έχει μέτρο

$$F_{1,\mathrm{net}} = \sqrt{F_{1,\mathrm{net},x}^2 + F_{1,\mathrm{net},y}^2} = 1.78 \times 10^{-24}\,\mathrm{N}$$

(Απάντηση)

Για να βρούμε την κατεύθυνσή της $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$, παίρνουμε

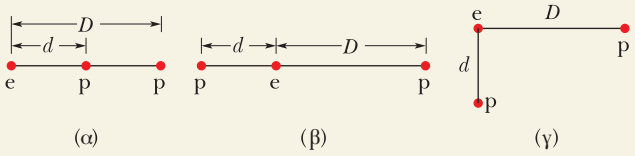
$$\theta = \tan^{-1}\frac{F_{1,\mathrm{net},y}}{F_{1,\mathrm{net},x}} = -86.0°.$$

Ωστόσο, αυτό το αποτέλεσμα είναι παράλογο επειδή η $\vec{F}_{1,\mathrm{net}}$ πρέπει να έχει κατεύθυνση μεταξύ των κατευθύνσεων των $\vec{F}_{12}$ και $\vec{F}_{14}$. Για να διορθώσουμε τη θ, προσθέτουμε 180° και παίρνουμε

$$-86.0° + 180° = 94.0°. \quad \text{(Απάντηση)}$$

ΣΗΜΕΙΟ ΚΑΤΑΝΟΗΣΗΣ 21.1.3

Το σχήμα εδώ δείχνει τρεις διατάξεις ενός ηλεκτρονίου e και δύο πρωτονίων p. (α) Να κατατάξετε τις διατάξεις σύμφωνα με το μέτρο της συνολικής δύναμης στο ηλεκτρόνιο εξαιτίας των πρωτονίων, με τη μεγαλύτερη τιμή πρώτη. (β) Στη διάταξη γ η γωνία μεταξύ της συνολικής δύναμης που ασκείται στο ηλεκτρόνιο και της ευθείας που σημειώνεται με d είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από 45°;



Ενδεικτικό Πρόβλημα 21.1.2 Ισορροπία δύο δυνάμεων που ασκούνται σε ένα σωματίδιο

Το Σχ. 21.1.8α δείχνει δύο σωματίδια στερωμένα στις θέσεις τους: ένα σωματίδιο φορτίου $q_1 = +8q$ στην αρχή των αξόνων και ένα σωματίδιο φορτίου $q_2 = -2q$ στο $x = L$. Σε ποιο σημείο (εκτός από απείρως μακριά) μπορεί να τοποθετηθεί ένα πρωτόνιο, έτσι ώστε να βρίσκεται σε *ισορροπία* (η συνολική δύναμη σε αυτό να είναι μηδέν); Η ισορροπία αυτή είναι *ευσταθής* ή *ασταθής*; (Δηλαδή, εάν το πρωτόνιο μετατοπιστεί, οι δυνάμεις που του ασκούνται το επαναφέρουν στη θέση ισορροπίας ή το οδηγούν μακρυά από αυτήν;)

ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ

Αν $\vec{F}_1$ είναι η δύναμη στο πρωτόνιο από το φορτίο q_1 και $\vec{F}_2$ είναι η δύναμη στο πρωτόνιο από το φορτίο q_2, τότε το σημείο που αναζητάμε είναι εκεί όπου $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$. Επομένως,

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \qquad (21.1.8)$$

Αυτό σημαίνει ότι στο σημείο που αναζητάμε οι δυνάμεις που ασκούνται στο πρωτόνιο εξαιτίας των άλλων δύο σωματιδίων πρέπει να έχουν ίσα μέτρα,

$$F_1 = F_2, \qquad (21.1.9)$$

και ότι οι δυνάμεις πρέπει να έχουν αντίθετες κατευθύνσεις.

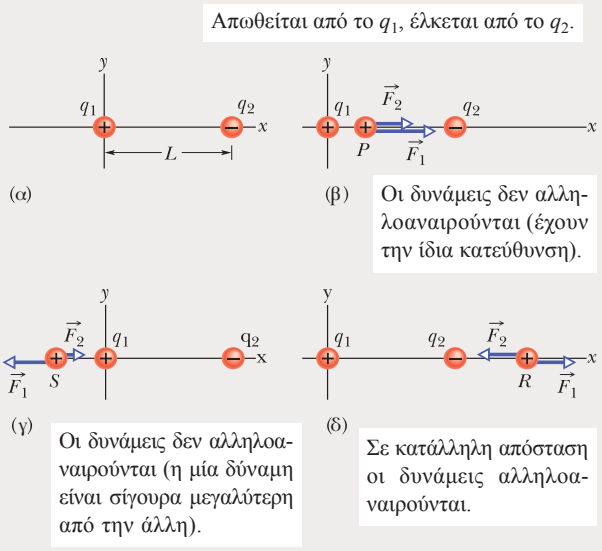
Συλλογισμός: Επειδή ένα πρωτόνιο έχει θετικό φορτίο, είναι ομόσημο με το σωματίδιο με φορτίο q_1 και η δύναμη $\vec{F}_1$ πρέπει να έχει κατεύθυνση απομακρυνόμενη από το q_1. Επίσης, το πρωτόνιο και το σωματίδιο με φορτίο q_2 έχουν αντίθετα πρόσημα, οπότε η δύναμη $\vec{F}_2$ πρέπει να έχει κατεύθυνση προς το q_2. Η δύναμη «απομακρυνόμενη από το q_1» μπορεί να είναι αντίθετης κατεύθυνσης από τη δύναμη «προς το q_2» μόνο αν το πρωτόνιο βρίσκεται επί του άξονα x.

Αν το πρωτόνιο βρίσκεται στον άξονα x σε οποιοδήποτε σημείο μεταξύ των q_1 και q_2, όπως στο σημείο P στο Σχ. 21.1.8β, τότε οι $\vec{F}_1$ και $\vec{F}_2$ έχουν την ίδια κατεύθυνση και όχι αντίθετη, όπως απαιτείται. Αν το πρωτόνιο είναι σε οποιοδήποτε σημείο του άξονα x στα αριστερά του q_1, όπως στο σημείο S στο Σχ. 21.1.8γ, τότε οι $\vec{F}_1$ και $\vec{F}_2$ έχουν αντίθετη κατεύθυνση. Ωστόσο, από την Εξ. 21.1.4 προκύπτει ότι οι $\vec{F}_1$ και $\vec{F}_2$ δεν μπορούν να έχουν ίσα μέτρα εκεί: η $\vec{F}_1$ θα είναι μεγαλύτερη από την $\vec{F}_2$ επειδή παράγεται από ένα πλησιέστερο φορτίο (με μικρότερο r) μεγαλύτερου μεγέθους ($8q$ έναντι $2q$).

Τέλος, αν το πρωτόνιο βρίσκεται σε οποιοδήποτε σημείο στον άξονα x στα δεξιά του q_2, όπως στο σημείο R στο Σχ. 21.1.8δ, τότε οι $\vec{F}_1$ και $\vec{F}_2$ έχουν και πάλι αντίθετη κατεύθυνση. Ωστόσο, επειδή τώρα το φορτίο με το μεγαλύτερο μέγεθος (q_1) βρίσκεται μακρύτερα από το πρωτόνιο απ' ό,τι το φορτίο μικρότερου μεγέθους, υπάρχει ένα σημείο όπου η $\vec{F}_1$ θα είναι ίση με την $\vec{F}_2$. Έστω x η συντεταγμένη αυτού του σημείου και έστω q_p το φορτίο του πρωτονίου.

Υπολογισμοί: Με τη βοήθεια της Εξ. 21.1.4 μπορούμε τώρα να ξαναγράψουμε την Εξ. 21.1.9 (η οποία λέει ότι οι δυνάμεις έχουν ίσα μέτρα):

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{8qq_p}{x^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2qq_p}{(x-L)^2}. \qquad (21.1.10)$$



Σχήμα 21.1.8 (α) Δύο σωματίδια με φορτία q_1 και q_2 βρίσκονται στερεωμένα στον άξονα x, σε απόσταση L μεταξύ τους. (β)-(δ). Τρεις πιθανές θέσεις P, S και R για ένα πρωτόνιο. Σε κάθε θέση, $\vec{F}_1$ είναι η δύναμη στο πρωτόνιο από το σωματίδιο 1 και $\vec{F}_2$ είναι η δύναμη στο πρωτόνιο από το σωματίδιο 2.

(Σημειώστε ότι μόνο τα μεγέθη των φορτίων εμφανίζονται στην Εξ. 21.1.10.) Έχουμε ήδη αποφασίσει σχετικά με τις κατευθύνσεις των δυναμέων στο Σχ. 21.1.8δ και δεν θέλουμε να εισάγουμε εδώ κάποιο θετικό ή αρνητικό πρόσημο. Αναδιατάσσοντας την Εξ. 21.1.10 μας δίνει

$$\left(\frac{x-L}{x}\right)^2 = \frac{1}{4}.$$

Αφού πάρουμε τις τετραγωνικές ρίζες και των δύο μελών, έχουμε

$$\frac{x-L}{x} = \frac{1}{2}$$

που μας δίνει

$$x = 2L. \qquad \text{(Απάντηση)}$$

Η ισορροπία στο $x = 2L$ είναι ασταθής. Δηλαδή, αν το πρωτόνιο εκτραπεί προς τ' αριστερά του σημείου R, τότε και το μέτρο F_1 και το F_2 αυξάνονται, αλλά η F_2 αυξάνεται περισσότερο (επειδή το q_2 είναι πιο κοντά σε σχέση με το q_1) και η συνολική δύναμη θα οδηγήσει το πρωτόνιο ακόμη πιο αριστερά. Αν το πρωτόνιο εκτραπεί προς τα δεξιά, τότε και το F_1 και το F_2 μειώνονται, αλλά το F_2 μειώνεται περισσότερο και η συνολική δύναμη θα οδηγήσει το πρωτόνιο ακόμη πιο δεξιά. Σε μια ευσταθή ισορροπία, αν το πρωτόνιο εκτραπεί ελαφρώς, επανέρχεται στη θέση ισορροπίας.