

SEARS & ZEMANSKY

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ με Σύγχρονη Φυσική

3Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

Τόμος Β

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ ΟΠΤΙΚΗ - ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ

YOUNG ΚΑΙ FREEDMAN

ΔΙΑΦΑΝΕΙΕΣ
ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ

1. ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΗ

ΕΠΙΛΟΓΗ,
ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ
ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:
Ηλίας Κατσούφης

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΚΟ
ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗΣ:
Τζένη Πάλμου

Θ.Η. Αλεξόπουλος, ΕΜΠ
Ι.Α. Αρβανιτίδης, ΑΠΘ
Α.Α. Αργυρίου, Π. Πατρών
Ε.Α. Δρης, ΕΜΠ
Η.Σ. Ζουμπούλης, ΕΜΠ
Η.Κ. Κατσούφης, ΕΜΠ
Γ.Α. Κουρούκλης, ΑΠΘ
Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, ΕΜΠ
Μ.Ν. Πιζάνιας, Π. Πατρών
Ι.Π. Ρίζος, Π. Ιωαννίνων
Θ.Ν. Τομαράς, Π. Κρήτης
Κ. Χριστοδουλίδης, ΕΜΠ

Απόδοση βιβλίου στην Ελληνική γλώσσα και Επιμέλεια (αλφαβητικά):

Θ.Η. Αλεξόπουλος, Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Ι.Α. Αρβανιτίδης, Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Φυσικής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Α.Α. Αργυρίου, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ε.Α. Δρης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Σ. Ζουμπούλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Η.Κ. Κατσούφης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Γ.Α. Κουρούκλης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής του Τμήματος Χημικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Κ.Ε. Παρασκευαΐδης, τ. Αναπλ. Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

Μ.Ν. Πιζάνιας, Ομότιμος Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών

Ι.Π. Ρίζος, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Θ.Ν. Τομαράς, Καθηγητής του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης

Κ. Χριστοδουλίδης, Ομότιμος Καθηγητής Φυσικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου

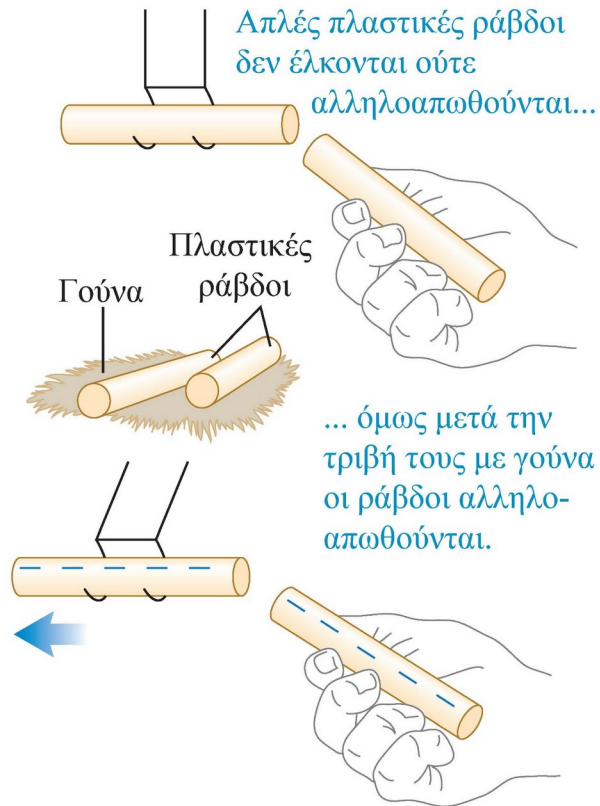
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 21

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

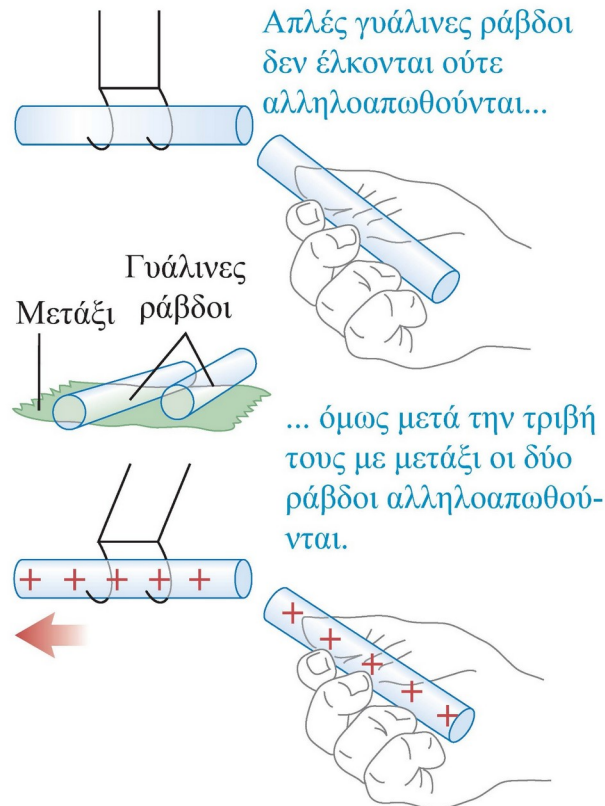
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

21.1 Πειράματα στατικού ηλεκτρισμού. (a) Αρνητικά φορτισμένα αντικείμενα αλληλοαπωθούνται. (b) Θετικά φορτισμένα αντικείμενα αλληλοαπωθούνται. (c) Θετικά φορτισμένα αντικείμενα και αρνητικά φορτισμένα αντικείμενα αλληλοέλκονται.

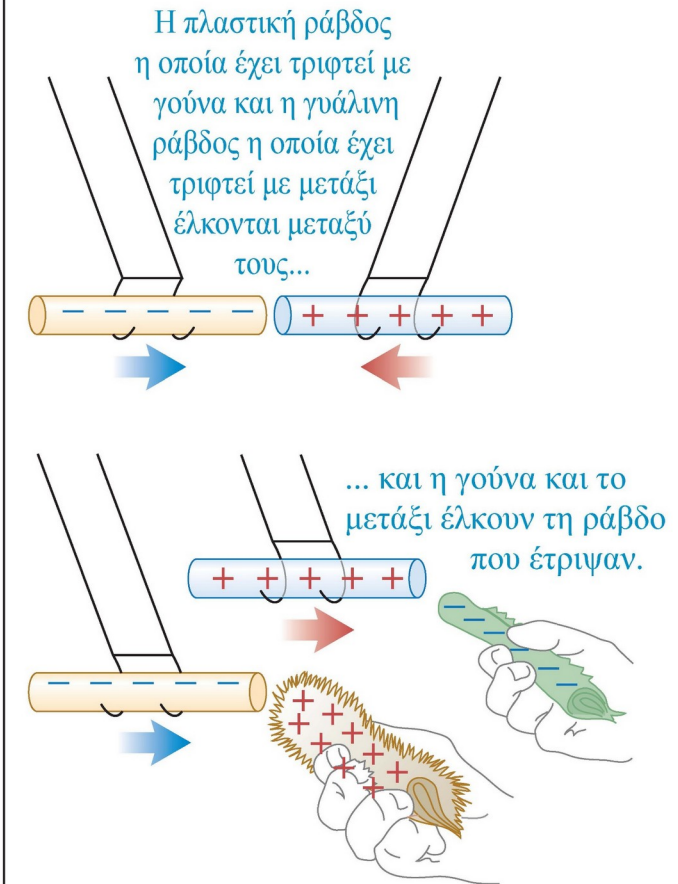
(a) Αλληλεπίδραση μεταξύ πλαστικών ράβδων, οι οποίες έχουν τριφτεί με γούνα



(b) Αλληλεπίδραση μεταξύ γυάλινων ράβδων που έχουν τριφτεί σε μετάξι

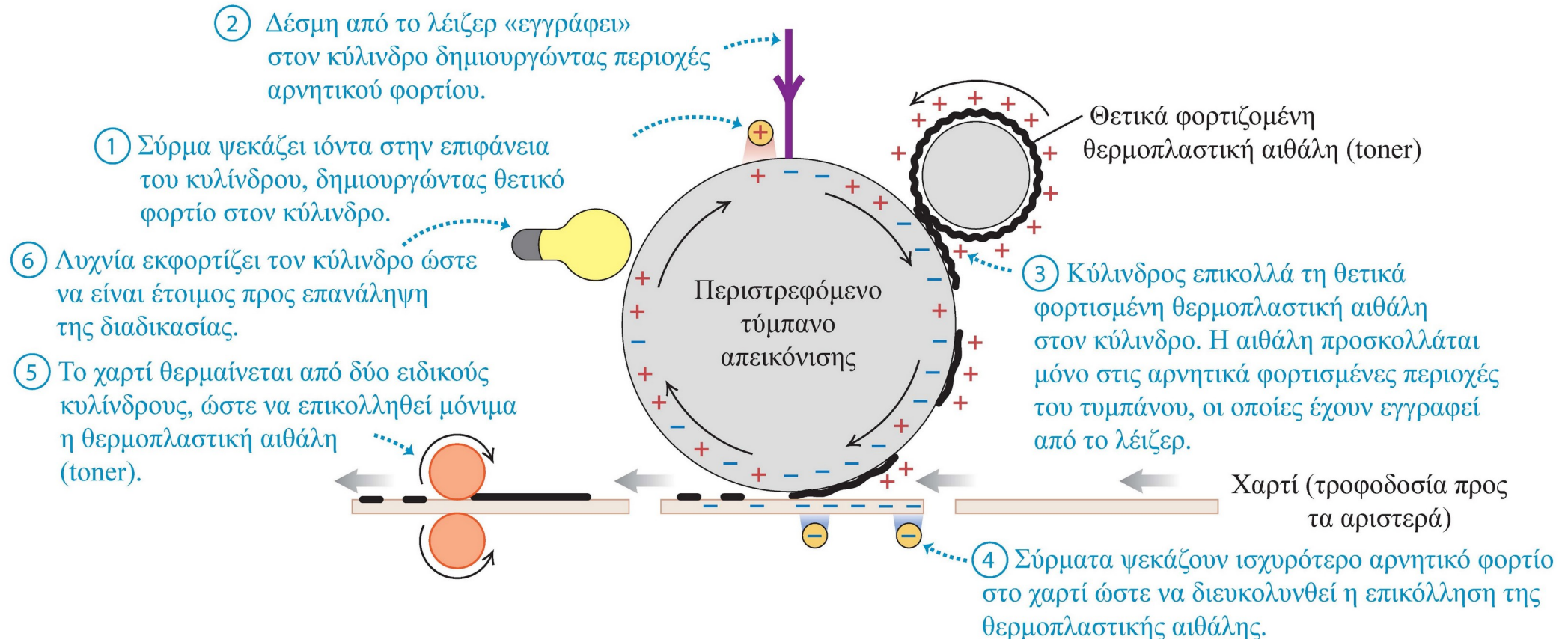


(c) Αλληλεπίδραση μεταξύ αντικειμένων με αντίθετα φορτία



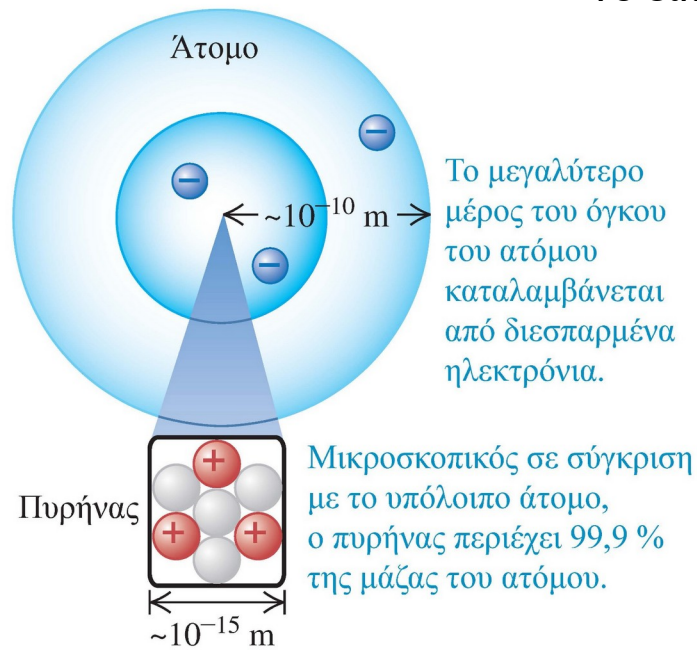
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

21.2 Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας ενός εκτυπωτή λέιζερ.



Ηλεκτρικό φορτίο και η δομή της ύλης

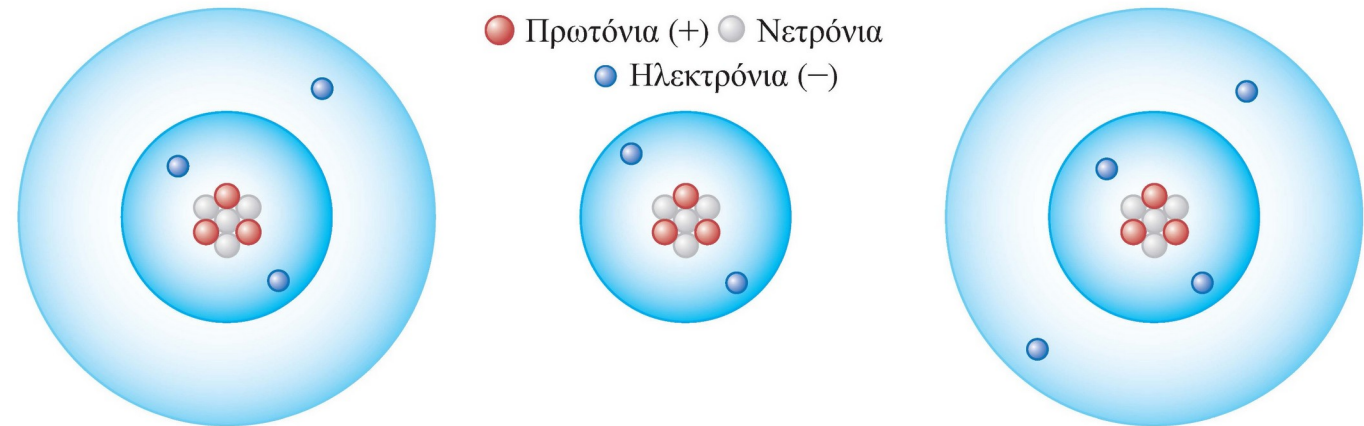
Το εικονιζόμενο άτομο είναι του στοιχείου λιθίου



- +** **Πρωτόνιο:** Θετικό φορτίο
Μάζα = $1,673 \times 10^{-27}$ kg
- **Νετρόνιο:** Μηδενικό φορτίο
Μάζα = $1,675 \times 10^{-27}$ kg
- **Ηλεκτρόνιο:** Αρνητικό φορτίο
Μάζα = $9,109 \times 10^{-31}$ kg

Τα φορτία του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου έχουν το ίδιο μέγεθος.

21.4 (a) Ένα ουδέτερο άτομο έχει τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων και πρωτονίων. (b) Ένα θετικό ιόν έχει έλλειμμα ηλεκτρονίων. (c) Ένα αρνητικό ιόν έχει περίσσεια ηλεκτρονίων. (Οι «φλοιοί» των ηλεκτρονίων αποτελούν σχηματική απεικόνιση της πραγματικής κατανομής των ηλεκτρονίων, ένα διάχυτο νέφος πολύ μεγαλύτερο συγκρινόμενο με τον πυρήνα.)



(a) **Ουδέτερο άτομο λιθίου (Li):**

3 πρωτόνια (3+)

4 νετρόνια

3 ηλεκτρόνια (3-)

Ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων και πρωτονίων:

Μηδενικό συνολικό φορτίο

(b) **Θετικό ιόν λιθίου (Li⁺):**

3 πρωτόνια (3+)

4 νετρόνια

2 ηλεκτρόνια (2-)

Λιγότερα ηλεκτρόνια από πρωτόνια:

Θετικό συνολικό φορτίο

(c) **Αρνητικό ιόν λιθίου (Li⁻):**

3 πρωτόνια (3+)

4 νετρόνια

4 ηλεκτρόνια (4-)

Περισσότερα ηλεκτρόνια από πρωτόνια:

Αρνητικό συνολικό φορτίο

Αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου

Το αλγεβρικό άθροισμα όλων των ηλεκτρικών φορτίων σε οποιοδήποτε κλειστό σύστημα είναι σταθερό.

Το μέτρο του φορτίου του ηλεκτρονίου ή το φορτίο του πρωτονίου είναι μια φυσική μονάδα φορτίου.

Οι περισσότερες δυνάμεις που ασκούνται στον σκιέρ της θάλασσας είναι ηλεκτρικές

21.5 Οι ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των γειτονικών μορίων δημιουργούν τη δύναμη που ασκεί το νερό στο σκι, την τάση στο σχοινί έλξης και την αντίσταση του αέρα στο σώμα του σκιέρ. Ηλεκτρικές αλληλεπιδράσεις συγκρατούν τα άτομα του σώματος του σκιέρ μεταξύ τους. Μόνο μία εξ ολοκλήρου μη ηλεκτρική δύναμη δρα στον σκιέρ, η δύναμη της βαρύτητας.



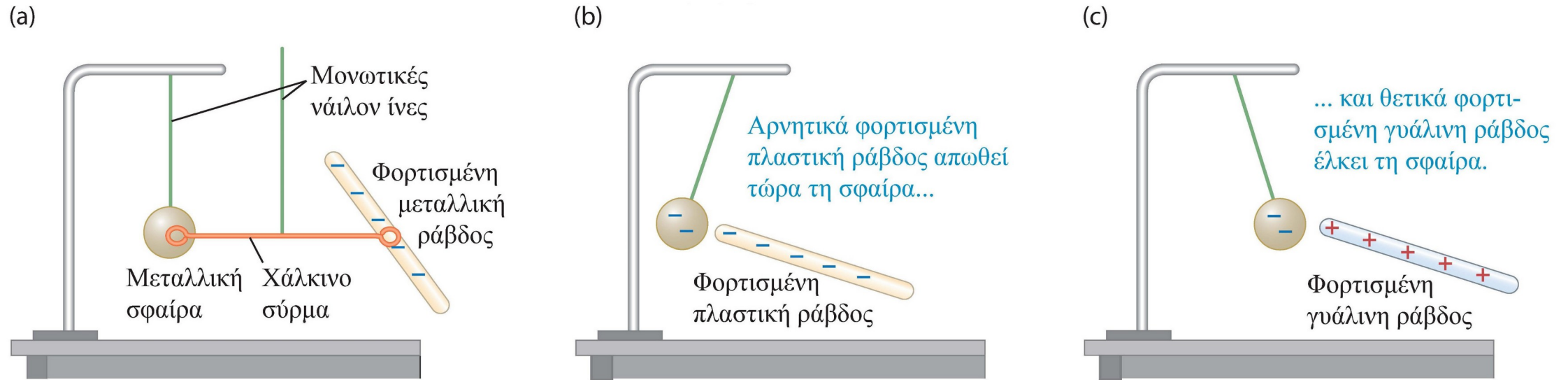
Αγωγοί, μονωτές και επαγόμενα φορτία

21.6 Ο χαλκός είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού· το νάιλον είναι καλός μονωτής.

(a) Τα σύρματα από χαλκό άγουν φορτίο μεταξύ της μεταλλικής σφαίρας και της φορτισμένης μεταλλικής ράβδου για να φορτίσουν τη σφαίρα αρνητικά

(b) Στη συνέχεια η μεταλλική σφαίρα απωθείται από την αρνητικά φορτισμένη πλαστική ράβδο και

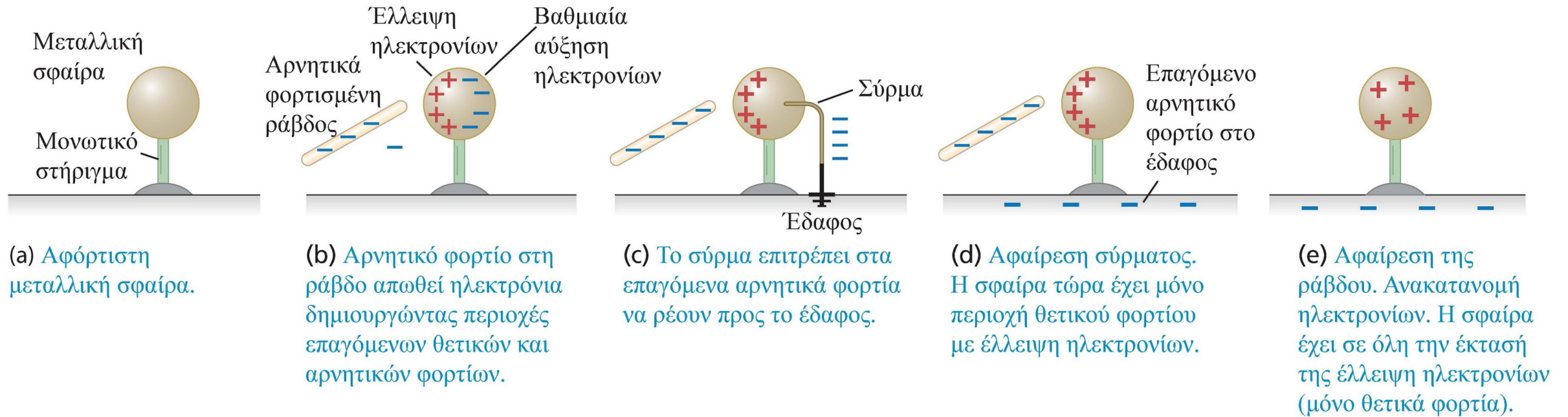
(c) έλκεται από τη θετικά φορτισμένη γυάλινη ράβδο.



Το σύρμα άγει φορτίο από την αρνητικά φορτισμένη μεταλλική ράβδο προς τη μεταλλική σφαίρα.

Φόρτιση μεταλλικής σφαίρας εξ επαγωγής

21.7 Φόρτιση μεταλλικής σφαίρας εξ επαγωγής.



Φόρτιση εξ επαγωγής

21.8 Τα φορτία στο εσωτερικό των μορίων ενός μονωτικού υλικού είναι δυνατό να μετακινηθούν λίγο. Ως αποτέλεσμα, μια χτένα με οποιοδήποτε πρόσημο φορτίου έλκει ένα ουδέτερο μονωτικό υλικό. Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα ο ουδέτερος μονωτής ασκεί μια ίση σε μέγεθος ελκτική δύναμη στη χτένα.

(a) Μια φορτισμένη χτένα έλκει μη φορτισμένα τεμάχια πλαστικού.



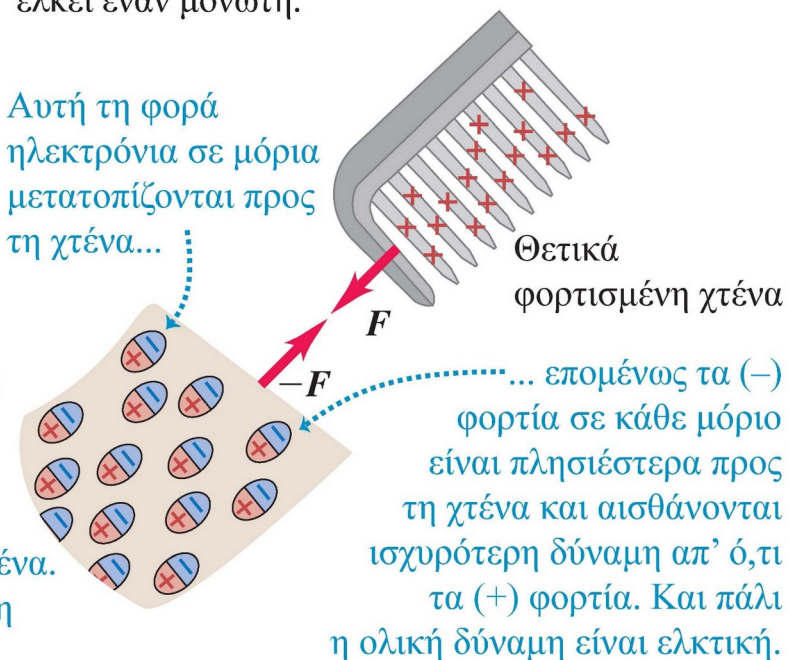
(b) Πώς μια αρνητικά φορτισμένη χτένα έλκει έναν μονωτή.

Ηλεκτρόνια σε κάθε μόριο του ουδέτερου μονωτή μετατοπίζονται μακριά από τη χτένα.

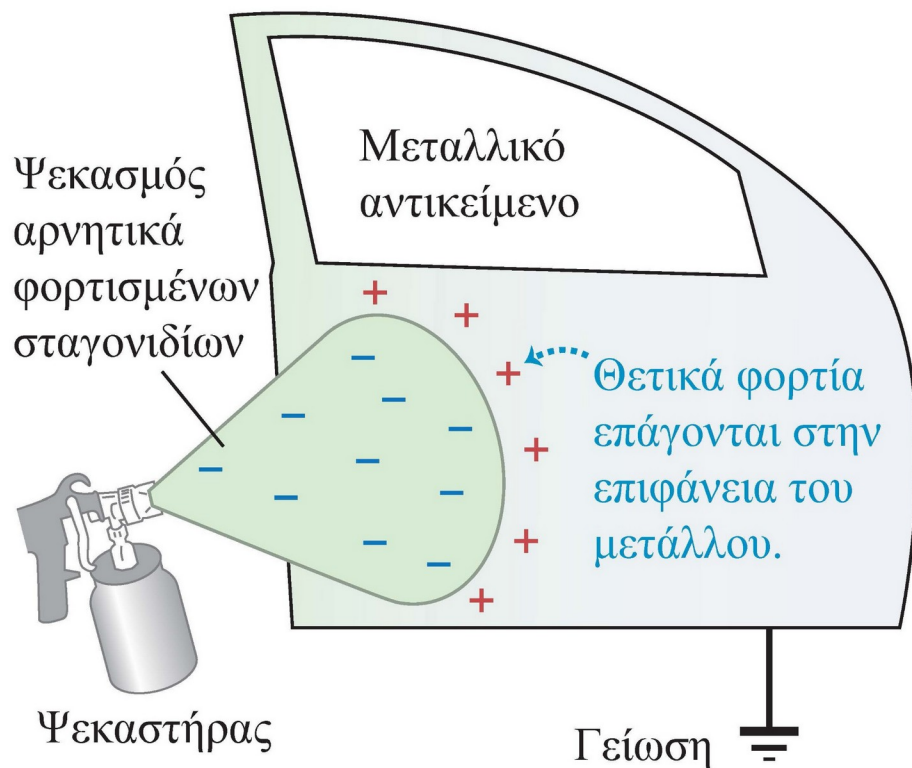


(c) Πώς μια θετικά φορτισμένη χτένα έλκει έναν μονωτή.

Αυτή τη φορά ηλεκτρόνια σε μόρια μετατοπίζονται προς τη χτένα...



Ηλεκτρικές δυνάμεις σε αφόρτιστα αντικείμενα



21.9 Η διαδικασία ηλεκτροστατικής βαφής (σύγκριση Σχ. 21.7b και Σχ. 21.7c). Μεταλλικό αντικείμενο, το οποίο πρόκειται να βαφεί, συνδέεται με τη γη (γείωση) και στα σταγονίδια της βαφής προστίθεται ηλεκτρικό φορτίο καθώς εξέρχονται από το στόμιο του ψεκαστήρα. Επαγόμενα φορτία αντίθετου πρόσημου εμφανίζονται καθώς πλησιάζουν, όπως φαίνεται στο Σχ. 21.7b, και έλκουν τα σταγονίδια στην επιφάνεια. Η διαδικασία αυτή ελαχιστοποιεί τον υπερψεκασμό λόγω διασποράς νεφών σωματιδίων βαφής και αποδίδει εξαιρετικά ομαλή επιφάνεια.

Ο νόμος του COULOMB

Το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο σημειακών ηλεκτρικών φορτίων είναι ευθέως ανάλογο του γινομένου των φορτίων και αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ αυτών.

Νόμος Coulomb:

Μέτρο ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο σημειακών φορτίων

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1q_2|}{r^2} \quad (21.2)$$

Ηλεκτρική σταθερά

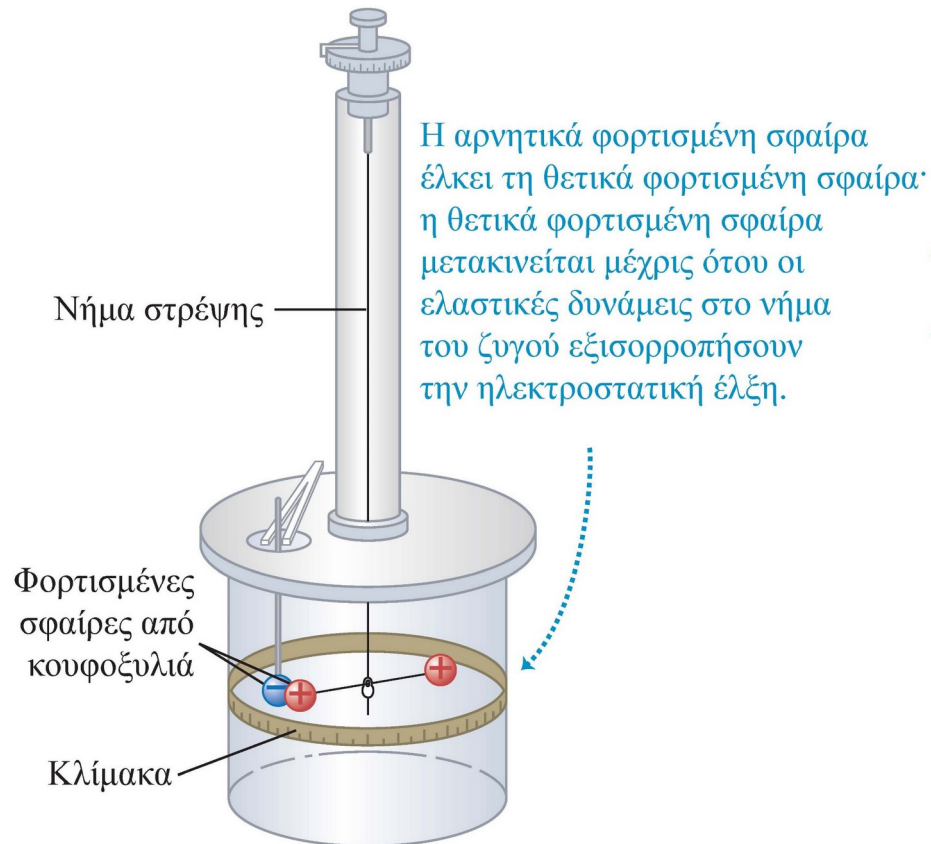
Τιμές των δύο φορτίων

Απόσταση μεταξύ των δύο φορτίων

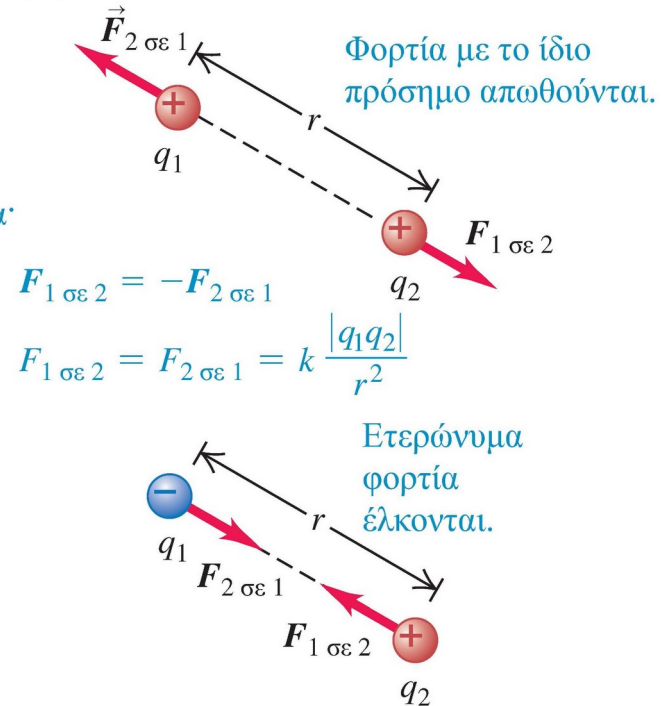
Μέτρηση της ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο σημειακών φορτίων

21.10 (a) Μέτρηση της ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο σημειακών φορτίων. (b) Οι ηλεκτρικές δυνάμεις μεταξύ σημειακών φορτίων υπακούουν στον τρίτο νόμο: $\vec{F}_{1 \text{ σε } 2} = -\vec{F}_{2 \text{ σε } 1}$.

(a) Ζυγός στρέψης του τύπου που χρησιμοποίησε ο Κουλόμπ για να μετρήσει την ηλεκτρική δύναμη.



(b) Αλληλεπίδραση μεταξύ σημειακών φορτίων.



Ορισμός του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου

Η πλέον θεμελιώδης μονάδα φορτίου είναι το φορτίο ενός πρωτονίου, το οποίο συμβολίζεται με e . Η τιμή αυτού του φορτίου ορίζεται να είναι*

$$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C} \quad (\text{ακριβώς})$$

Ένα coulomb παριστάνει το αρνητικό του ολικού φορτίου περίπου 6×10^{18} ηλεκτρονίων. Αναφέρουμε ως σύγκριση ότι κύβος χαλκού διαστάσεων 1 cm περιέχει περίπου $2,4 \times 10^{24}$ ηλεκτρόνια. Περίπου 10^{19} ηλεκτρόνια διέρχονται από το νήμα πυράκτωσης ενός ηλεκτρικού φακού ανά δευτερόλεπτο.

* Στο SI από τον Μάιο 2019
(Δείτε Παράρτημα A του βιβλίου Πανεπιστημιακή Φυσική Young-Freedman, 3^η ελληνική έκδοση 2019).

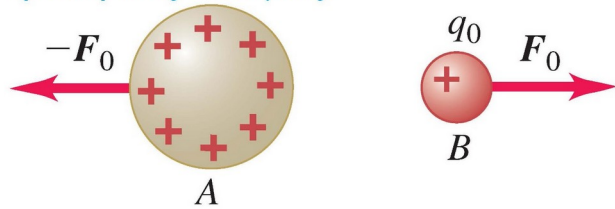
Αρχή της επαλληλίας δυνάμεων

Όπως έχουμε διατυπώσει τον νόμο του Coulomb, αυτός περιγράφει μόνο την αλληλεπίδραση δύο *σημειακών* φορτίων. Πειράματα δείχνουν ότι, όταν δύο φορτία ασκούν δυνάμεις ταυτόχρονα σε τρίτο φορτίο, η ολική ασκούμενη δύναμη, η οποία ασκείται στο σώμα αυτό, είναι το *διανυσματικό άθροισμα* των δύο δυνάμεων, τις οποίες ασκούν καθένα από τα δύο φορτία. Αυτή η σημαντική ιδιότητα καλείται **αρχή της επαλληλίας (ή της υπέρθεσης) δυνάμεων** και ισχύει για οποιοδήποτε πλήθος φορτίων. Χρησιμοποιώντας την αρχή αυτή, μπορούμε να εφαρμόσουμε τον νόμο του Coulomb σε *οποιαδήποτε* συλλογή φορτίων.

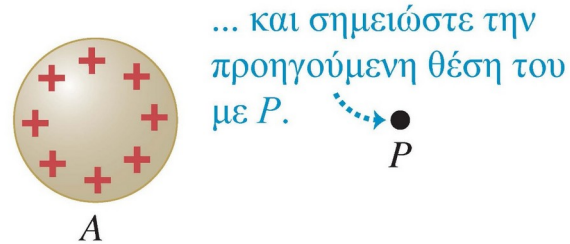
Ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρικές δυνάμεις

21.15 Ένα φορτισμένο σώμα δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο στον περιβάλλοντα χώρο.

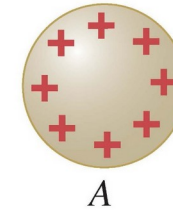
(a) Οι σφαίρες A και B αλληλοασκούν ηλεκτρικές δυνάμεις.



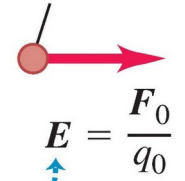
(b) Απομακρύνετε το σώμα B ...



(c) Το σώμα A δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο E στο σημείο P .



Δοκιμαστικό φορτίο q_0



E είναι η δύναμη ανά μονάδα φορτίου, η οποία ασκείται από το A σε δοκιμαστικό φορτίο στο σημείο P .

Η ηλεκτρική δύναμη ασκείται σε ένα φορτισμένο σώμα από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργήθηκε από άλλα φορτισμένα σώματα.

Ορισμός του ηλεκτρικού πεδίου E σε κάποιο σημείο

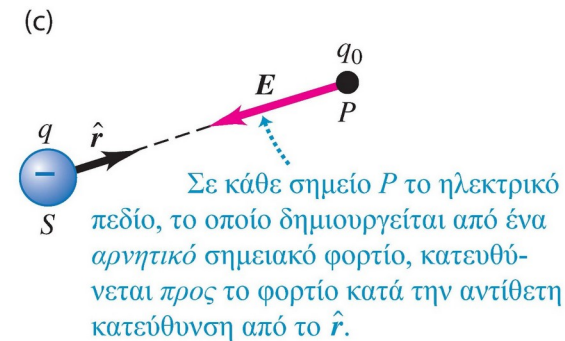
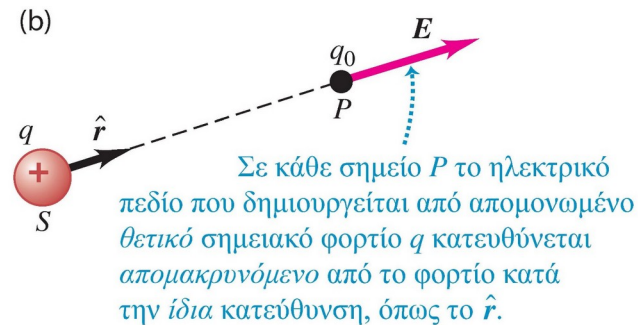
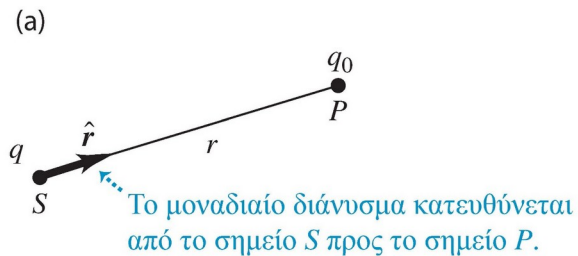
Ηλεκτρικό πεδίο: ηλεκτρική δύναμη ανά μονάδα φορτίου

$$E = \frac{F_0}{q_0} \quad (21.3)$$

Ηλεκτρική δύναμη σε δοκιμαστικό φορτίο q_0 οφειλόμενη σε άλλα φορτία
 Τιμή του δοκιμαστικού φορτίου

$$F_0 = q_0 E \quad (\text{δύναμη που ασκείται σε σημειακό φορτίο } q_0 \text{ από ηλεκτρικό πεδίο } E) \quad (21.4)$$

21.17 Το ηλεκτρικό πεδίο E παράγεται στο σημείο P από ένα σημειακό φορτίο q στο σημείο S . Να επισημάνουμε ότι και στα δύο Σχ. (b) και (c) το ηλεκτρικό πεδίο παράγεται από το φορτίο q [δείτε Εξ. (21.17)] αλλά δρα στο φορτίο q_0 στο σημείο P [δείτε Εξ. (21.14)].



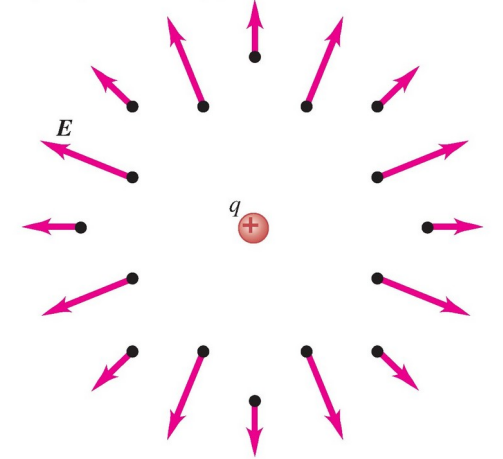
Ηλεκτρικό πεδίο οφειλόμενο σε σημειακό φορτίο

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \hat{r} \quad (21.7)$$

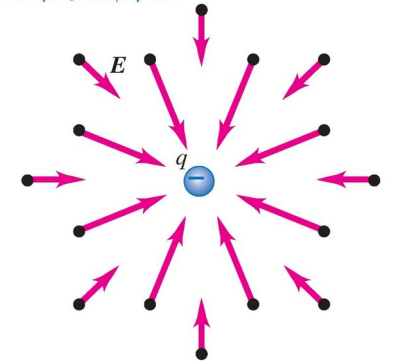
Τιμή του ηλεκτρικού φορτίου
 Μοναδιαίο διάνυσμα από το σημειακό φορτίο προς το σημείο μέτρησης του πεδίου
 Απόσταση από το σημειακό φορτίο ως το σημείο μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου
 Ηλεκτρική σταθερά

21.18 Σημειακό φορτίο q παράγει ηλεκτρικό πεδίο E σε όλα τα σημεία του χώρου. Η ένταση του πεδίου μειώνεται με την αύξηση της απόστασης.

(a) Το ηλεκτρικό πεδίο παραγόμενο από θετικό σημειακό φορτίο πάντοτε κατευθύνεται απομακρυνόμενο από το φορτίο.



(b) Το ηλεκτρικό πεδίο παραγόμενο από αρνητικό σημειακό φορτίο πάντοτε κατευθύνεται προς το φορτίο.



Αρχή της επαλληλίας ηλεκτρικών πεδίων

Η Επαλληλία (Υπέρθεση) Ηλεκτρικών Πεδίων

Για να υπολογίσουμε το πεδίο, το οποίο δημιουργείται από μια κατανομή φορτίων, θεωρούμε ότι η κατανομή αυτή αποτελείται από πολλά σημειακά φορτία q_1, q_2, q_3, \dots .

Σε οποιοδήποτε σημείο P , κάθε σημειακό φορτίο παράγει το δικό του ηλεκτρικό πεδίο E_1, E_2, E_3, \dots , και επομένως ένα δοκιμαστικό φορτίο q_0 αισθάνεται μια δύναμη $F_1 = q_0 E_1$ από το φορτίο q_1 , μια δύναμη $F_2 = q_0 E_2$ από το φορτίο q_2 , κ.ο.κ. Από την αρχή της επαλληλίας (ή της υπέρθεσης), η ολική δύναμη F_0 , την οποία ασκεί η κατανομή φορτίου στο φορτίο q_0 , είναι το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων αυτών:

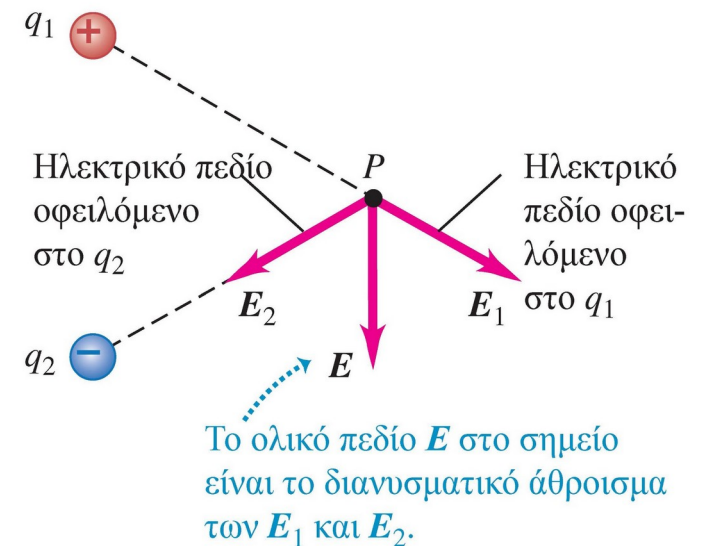
$$F_0 = F_1 + F_2 + F_3 + \dots = q_0 E_1 + q_0 E_2 + q_0 E_3 + \dots$$

Το συνδυασμένο αποτέλεσμα όλων των φορτίων της κατανομής περιγράφεται από το ολικό ηλεκτρικό πεδίο E στο σημείο P . Λαμβάνοντας υπόψη τον ορισμό του ηλεκτρικού πεδίου, Εξ. (21.3), προκύπτει

$$E = \frac{F_0}{q_0} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots$$

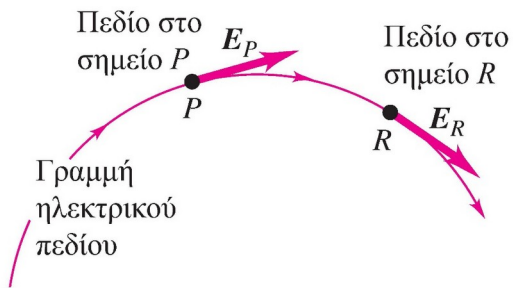
Το ολικό ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο P είναι το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων στο σημείο P , το οποίο οφείλεται σε κάθε σημειακό φορτίο (Σχ. 21.21). Η διατύπωση αυτή αποτελεί την **αρχή της επαλληλίας** (ή της υπέρθεσης) των ηλεκτρικών πεδίων.

21.21 Γραφική παράσταση της αρχής της επαλληλίας (ή της υπέρθεσης) των ηλεκτρικών πεδίων.



Ηλεκτρικές πεδιακές γραμμές

21.27 Η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο είναι εφαπτομενική στη γραμμή του πεδίου στο συγκεκριμένο σημείο.

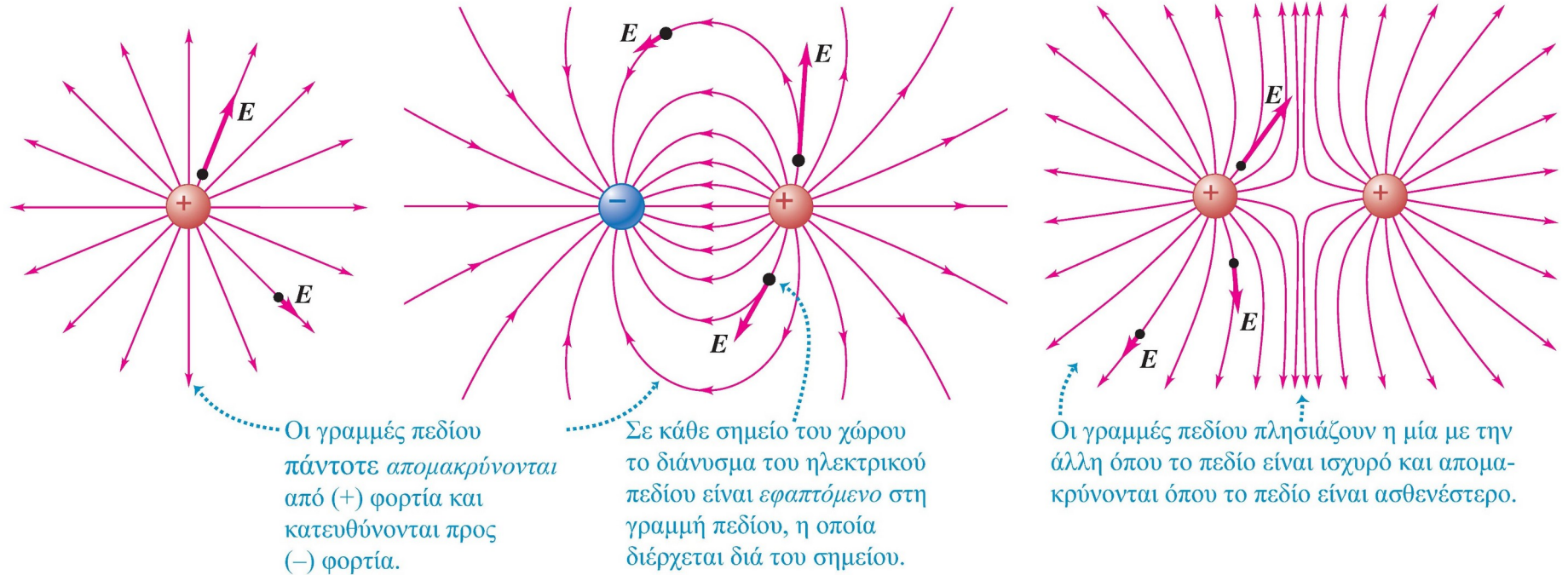


21.28 Ηλεκτρικές γραμμές πεδίου τριών διαφορετικών κατανομών φορτίων. Γενικά, το μέτρο του πεδίου E είναι διαφορετικό σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος δεδομένης γραμμής πεδίου.

(a) Σημειακό θετικό φορτίο

(b) Δύο ίσα και αντίθετα φορτία (δίπολο)

(c) Δύο ίσα θετικά φορτία



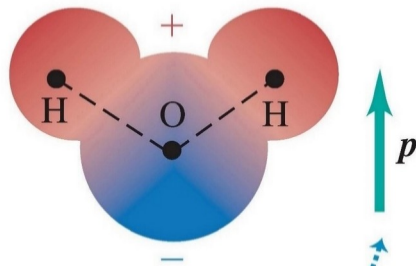
Ηλεκτρικά Δίπολα

Ηλεκτρικό δίπολο είναι ένα ζεύγος σημειακών φορτίων με ίσα μέτρα και αντίθετα πρόσημα (ένα θετικό φορτίο q και ένα αρνητικό φορτίο $-q$) των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι d .

21.30 (a) Ένα μόριο νερού είναι παράδειγμα ενός ηλεκτρικού διπόλου.

(b) Κάθε δοκιμαστικός σωλήνας περιέχει διάλυμα διαφορετικής ουσίας σε νερό. Η μεγάλη ηλεκτρική διπολική ροπή του νερού καθιστά το μόριο του νερού εξαιρετικό διαλύτη.

(a) Μόριο νερού στο οποίο φαίνεται το θετικό φορτίο ως κόκκινο και το αρνητικό φορτίο ως μπλε.



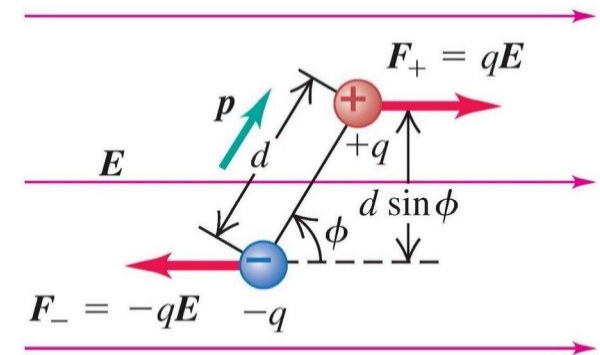
Η ηλεκτρική διπολική ροπή p κατευθύνεται από το άκρο με αρνητικό πρόσημο προς το άκρο με θετικό πρόσημο.

(b) Διάφορες ουσίες διαλυμένες σε νερό.



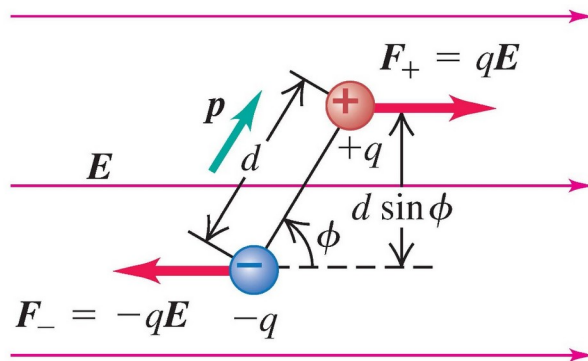
$$p = qd \quad (\text{μέτρο της ηλεκτρικής ροπής}) \quad (21.14)$$

21.31 Η συνισταμένη δύναμη σε αυτό το ηλεκτρικό δίπολο είναι μηδέν, όμως ασκείται ροπή η οποία κατευθύνεται προς τη σελίδα και τείνει να περιστρέψει το δίπολο δεξιόστροφα.



Δύναμη και ροπή σε ηλεκτρικό δίπολο

21.31 Η συνισταμένη δύναμη σε αυτό το ηλεκτρικό δίπολο είναι μηδέν, όμως ασκείται ροπή η οποία κατευθύνεται προς τη σελίδα και τείνει να περιστρέψει το δίπολο δεξιόστροφα.



$$\tau = (qE)(d \sin \phi) \quad (21.13)$$

$$p = qd \quad (\text{μέτρο της ηλεκτρικής ροπής}) \quad (21.14)$$

Μέτρο της ροπής η οποία ασκείται σε ένα ηλεκτρικό δίπολο

$$\tau = pE \sin \phi$$

Μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου E
Γωνία μεταξύ p και E
Μέτρο της ηλεκτρικής διπολικής ροπής p

(21.15)

Διανυσματική ροπή σε ηλεκτρικό δίπολο

$$\tau = p \times E$$

Ηλεκτρική διπολική ροπή
Ηλεκτρικό πεδίο

(21.16)

Δυναμική ενέργεια ενός ηλεκτρικού διπόλου

Όταν μεταβάλλεται ο προσανατολισμός ενός διπόλου σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, η ροπή που ασκεί το ηλεκτρικό πεδίο εκτελεί έργο σε αυτό με αντίστοιχη μεταβολή της δυναμικής του ενέργειας.

$$dW = \tau d\phi = -pE \sin \phi d\phi$$

$$\begin{aligned} W &= \int_{\phi_1}^{\phi_2} (-pE \sin \phi) d\phi \\ &= pE \cos \phi_2 - pE \cos \phi_1 \end{aligned}$$

$$U(\phi) = -pE \cos \phi \quad (21.17)$$

Δυναμική ενέργεια
ηλεκτρικού διπόλου
σε ηλεκτρικό πεδίο

$$U = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E}$$

Ηλεκτρικό πεδίο

Ηλεκτρική διπολική ροπή

(21.18)

