

ΦΥΣΙΚΗ: ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Ε.Ε. 2023-2024

Διδάσκοντες: Σ. ΚΟΣΙΩΝΗΣ, Ε. ΠΑΣΠΑΛΑΚΗΣ, και Ι. ΘΑΝΟΠΟΥΛΟΣ

SEARS & ZEMANSKY

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΗ ΦΥΣΙΚΗ με Σύγχρονη Φυσική

4η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΚΔΟΣΗ

ΜΕ QR CODE ΒΙΝΤΕΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΦΑΝΕΙΣ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ

Τόμος Β

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ
ΟΠΤΙΚΗ - ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ

YOUNG ΚΑΙ FREEDMAN

ΑΠΟΛΟΓΗ - ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

Θ. Η. Αλεξόπουλος
Ι. Α. Αρβανιτιδής
Α. Α. Αργυρίου
Ε. Α. Δρης
Η. Σ. Ζουμπούλης
Η. Κ. Κατσούφης
Γ. Α. Κουρούκλης
Κ. Β. Παρασκευαΐδης
Μ. Ν. Πιζάνιας
Ι. Π. Ρίζος
Θ. Ν. Τωμαράς
Κ. Χριστοδουλίδης

ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΑΠΑΖΗΣΗ

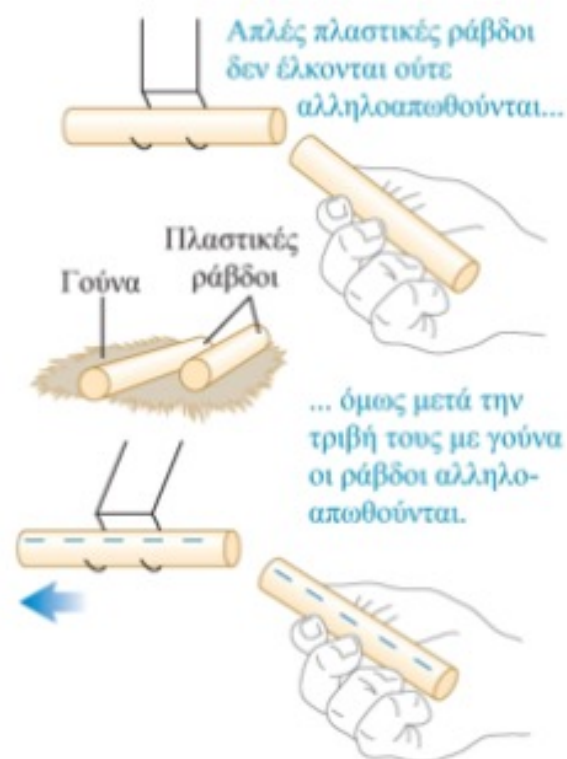
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 21

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

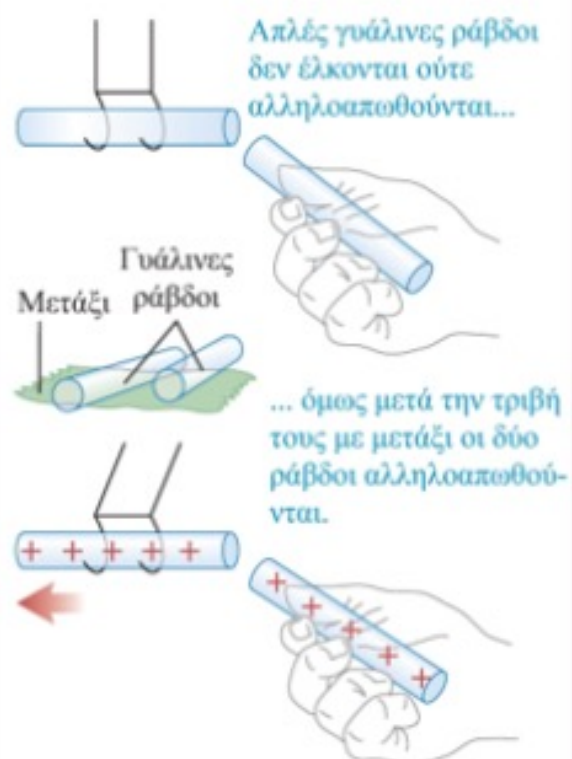
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

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

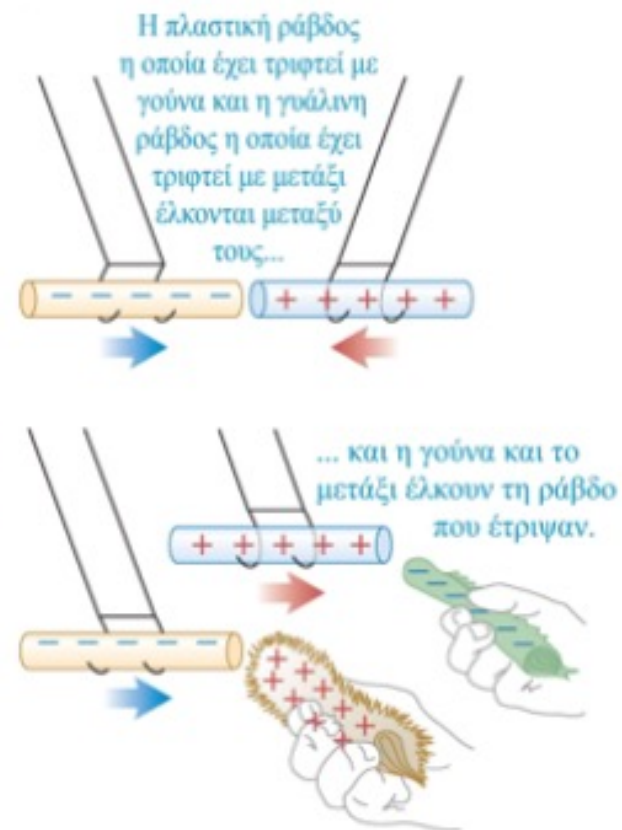
(a) Αλληλεπίδραση μεταξύ πλαστικών ράβδων, οι οποίες έχουν τριφτεί με γούνα



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



(c) Αλληλεπίδραση μεταξύ αντικειμένων με αντίθετα φορτία



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): | (b) Θετικό ιόν λιθίου (Li⁺): | (c) Αρνητικό ιόν λιθίου (Li⁻): |
| 3 πρωτόνια (3+) | 3 πρωτόνια (3+) | 3 πρωτόνια (3+) |
| 4 νετρόνια | 4 νετρόνια | 4 νετρόνια |
| 3 ηλεκτρόνια (3-) | 2 ηλεκτρόνια (2-) | 4 ηλεκτρόνια (4-) |
| Ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων και πρωτονίων:
Μηδενικό συνολικό φορτίο | Λιγότερα ηλεκτρόνια από πρωτόνια:
Θετικό συνολικό φορτίο | 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.

Αγωγοί, μονωτές και επαγόμενα φορτία

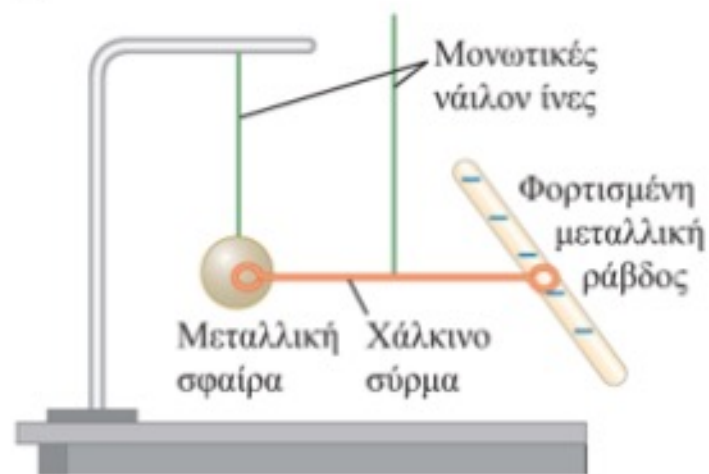
21.6 Ο χαλκός είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού· το νάιλον είναι καλός μονωτής.

(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.

(a)

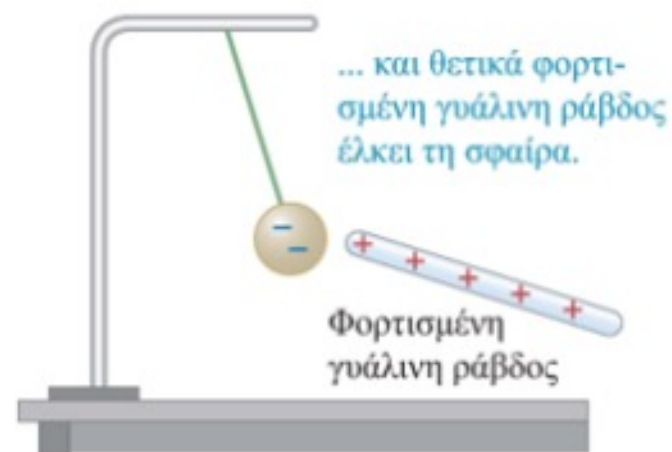


Το σύρμα άγει φορτίο από την αρνητικά φορτισμένη μεταλλική ράβδο προς τη μεταλλική σφαίρα.

(b)

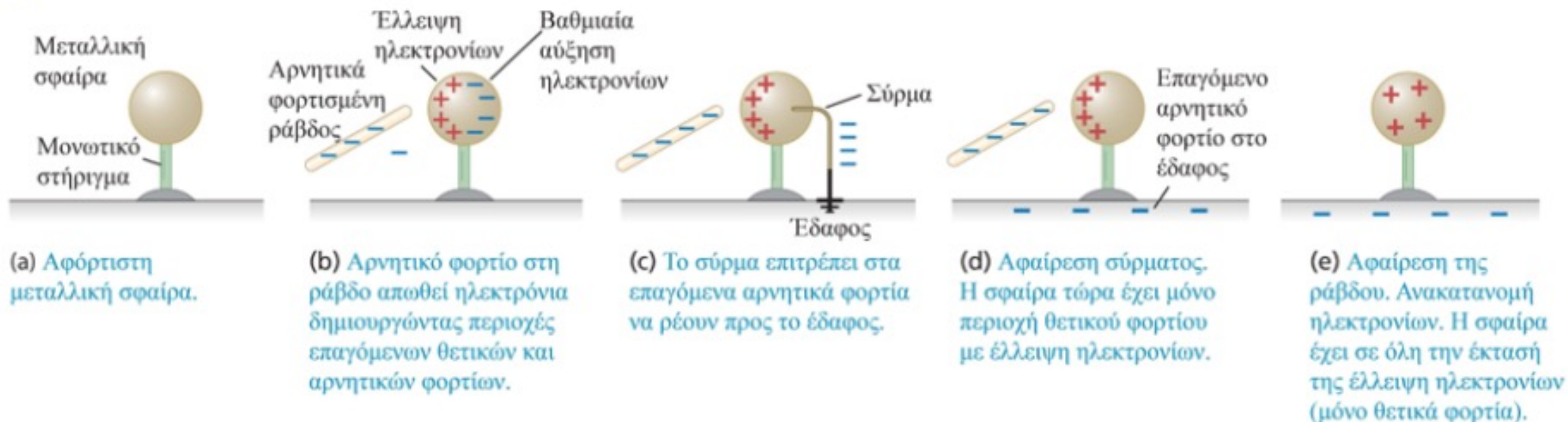


(c)



Φόρτιση μεταλλικής σφαίρας εξ επαγωγής

21.7 Φόρτιση μεταλλικής σφαίρας εξ επαγωγής.



Φόρτιση εξ επαγωγής

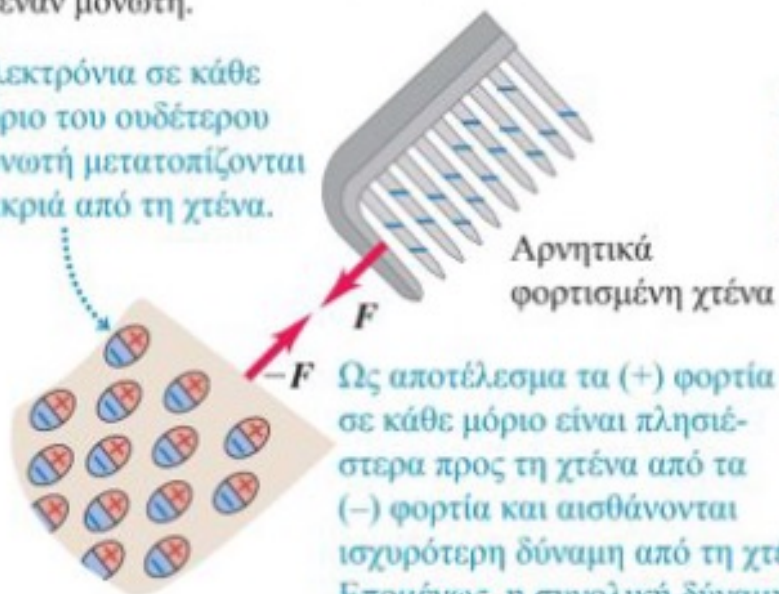
21.8 Τα φορτία στο εσωτερικό των μορίων ενός μονωτικού υλικού είναι δυνατό να μετακινηθούν λίγο. Ως αποτέλεσμα, μια χτένα με οποιοδήποτε πρόσημο φορτίου έλκει ένα ουδέτερο μονωτικό υλικό. Σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα ο ουδέτερος μονωτής ασκεί μια ίση σε μέγεθος ελκτική δύναμη στη χτένα.

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



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

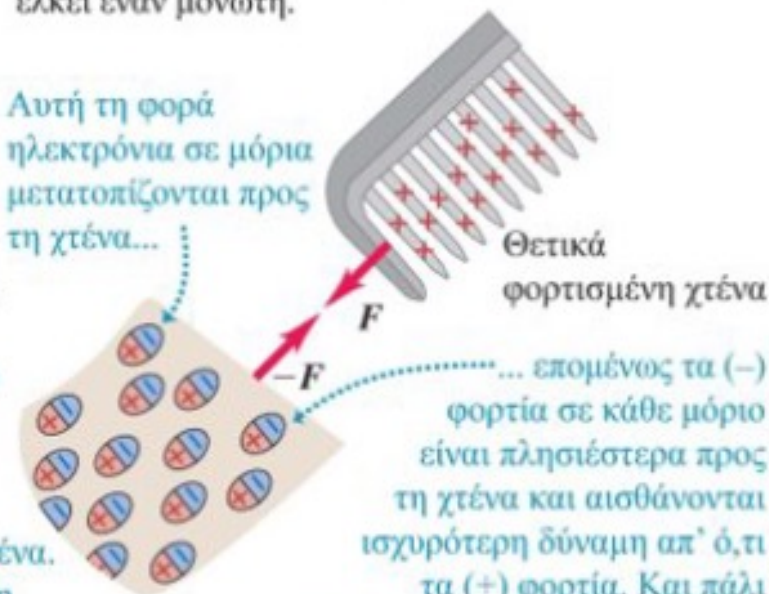
Ηλεκτρόνια σε κάθε μόριο του ουδέτερου μονωτή μετατοπίζονται μακριά από τη χτένα.



Ως αποτέλεσμα τα (+) φορτία σε κάθε μόριο είναι πλησιέστερα προς τη χτένα από τα (-) φορτία και αισθάνονται ισχυρότερη δύναμη από τη χτένα. Επομένως, η συνολική δύναμη είναι ελκτική.

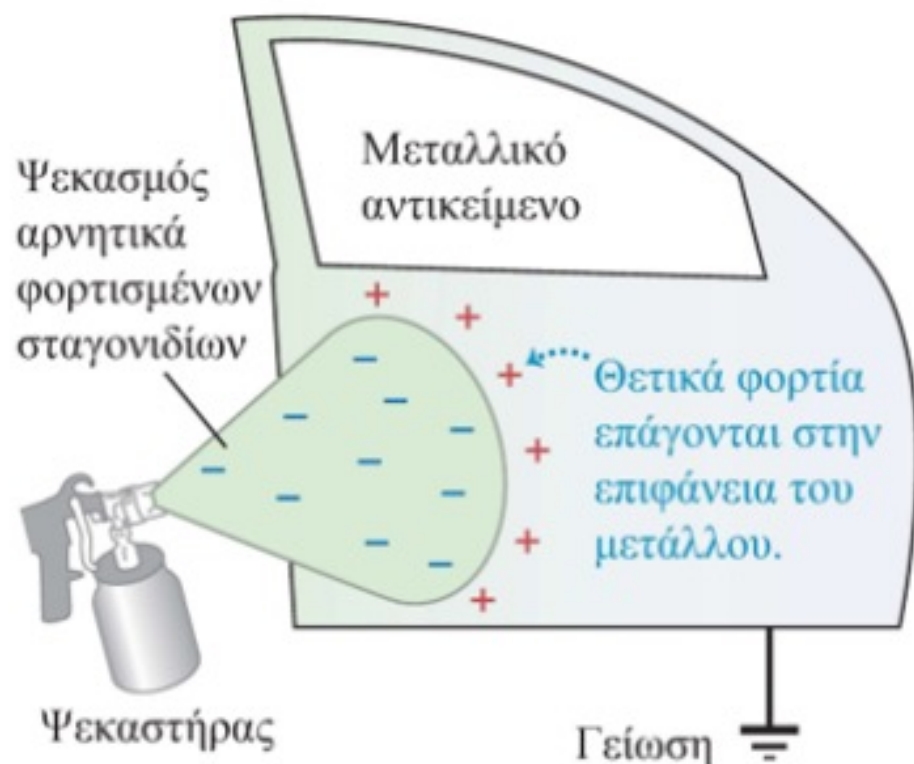
(c) Πώς μια θετικά φορτισμένη χτένα έλκει έναν μονωτή.

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



... επομένως τα (-) φορτία σε κάθε μόριο είναι πλησιέστερα προς τη χτένα και αισθάνονται ισχυρότερη δύναμη απ' ό,τι τα (+) φορτία. Και πάλι η ολική δύναμη είναι ελκτική.

Ηλεκτρικές δυνάμεις σε αφόρτιστα αντικείμενα



21.9 Η διαδικασία ηλεκτροστατικής βαφής

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,

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

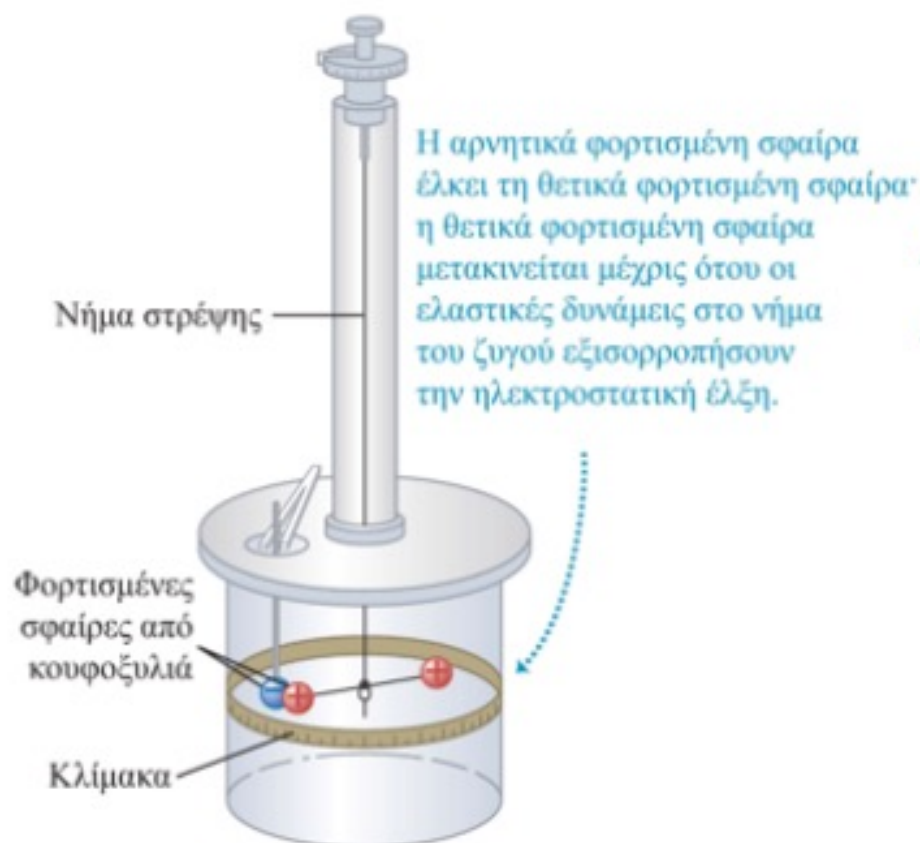
Τιμές των δύο φορτίων

Απόσταση μεταξύ των δύο φορτίων

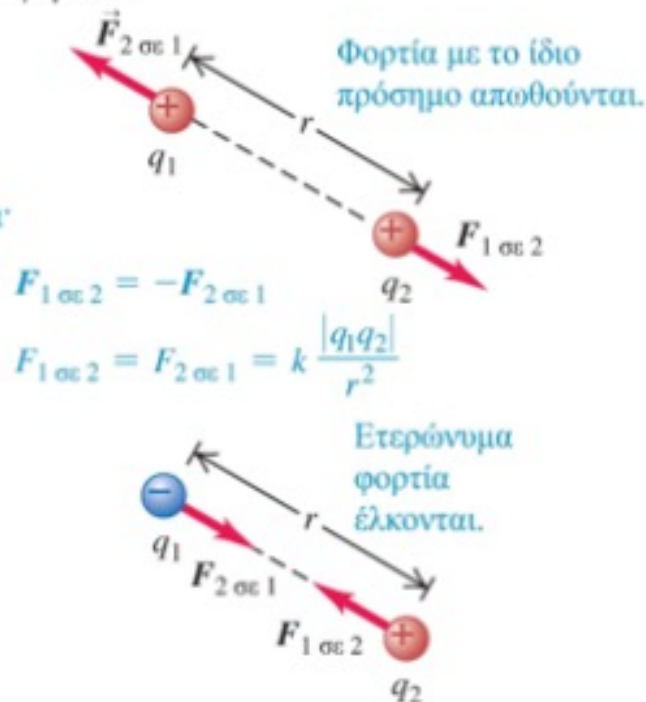
Μέτρηση της ηλεκτρικής δύναμης μεταξύ δύο σημειακών φορτίων

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

(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.

Διανυσματική πρόσθεση ηλεκτρικών δυνάμεων Στο Σχ. 22-8 δύο ίσα θετικά σημειακά φορτία $q = 2,0 \mu\text{C}$ αλληλεπιδρούν με ένα τρίτο σημειακό φορτίο $Q = 4,0 \mu\text{C}$. Βρείτε το μέτρο και την κατεύθυνση της ολικής (συνισταμένης) δύναμης στο Q .

ΛΥΣΗ Η λέξη κλειδί είναι η *ολική*. Πρέπει να υπολογίσουμε τη δύναμη που εξασκεί στο Q καθένα φορτίο και μετά να βρούμε το διανυσματικό τους άθροισμα. Ο ευκολότερος τρόπος να γίνει αυτό είναι με χρήση συνιστωσών. Το σχήμα δείχνει τη δύναμη στο Q , που οφείλεται στο πάνω φορτίο q . Από τον νόμο του Coulomb το μέτρο F αυτής της δύναμης είναι

$$F = 9,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \frac{(4,0 \times 10^{-6} \text{ C})(2,0 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,50 \text{ m})^2} = 0,29 \text{ N}.$$

Οι συνιστώσες αυτής της δύναμης δίνονται από τις σχέσεις

$$F_x = F \cos \alpha = (0,29 \text{ N}) \frac{0,40 \text{ m}}{0,50 \text{ m}} = 0,23 \text{ N}.$$

$$F_y = -F \sin \alpha = -(0,29 \text{ N}) \frac{0,30 \text{ m}}{0,50 \text{ m}} = -0,17 \text{ N}.$$

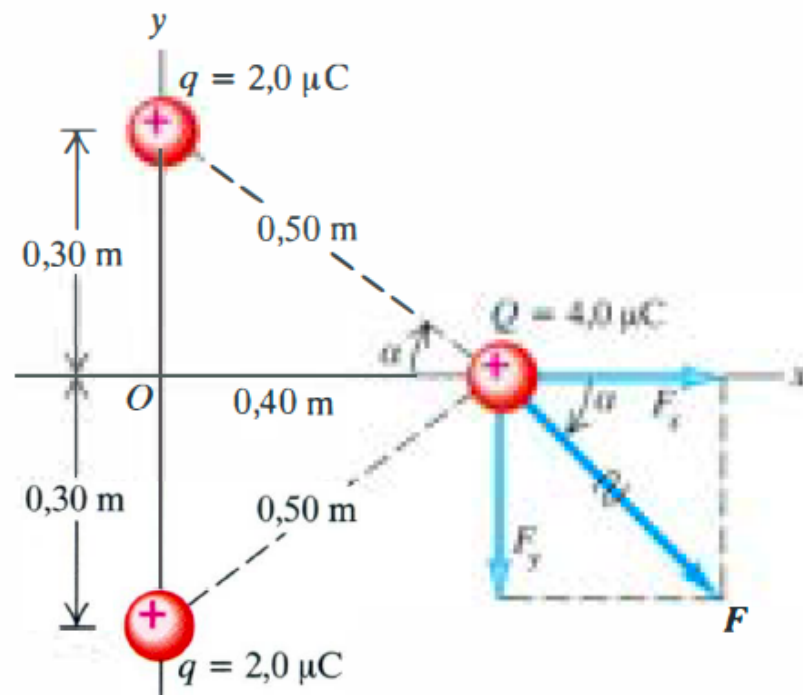
Το κάτω φορτίο q εξασκεί δύναμη με το ίδιο μέτρο, αλλά αντίθετη κατεύθυνση. Από τη συμμετρία βλέπουμε ότι η x

συνιστώσα της είναι ίδια με τη συνιστώσα x της δύναμης που οφείλεται στο πάνω φορτίο, αλλά η y συνιστώσα της έχει την αντίθετη κατεύθυνση. Επομένως βρίσκουμε

$$F_x = 0,23 \text{ N} + 0,23 \text{ N} = 0,46 \text{ N},$$

$$F_y = -0,17 \text{ N} + 0,17 \text{ N} = 0.$$

Η ολική δύναμη στο Q βρίσκεται στην κατεύθυνση $+x$, με μέτρο $0,46 \text{ N}$. Πώς θα άλλαζε η λύση αυτή αν το κάτω φορτίο ήταν αρνητικό;



22-8 F είναι η δύναμη στο Q που οφείλεται στο πάνω φορτίο q . ■

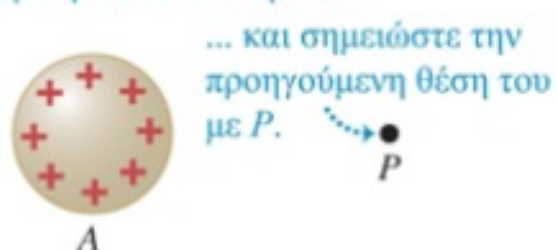
Ηλεκτρικό πεδίο και ηλεκτρικές δυνάμεις

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

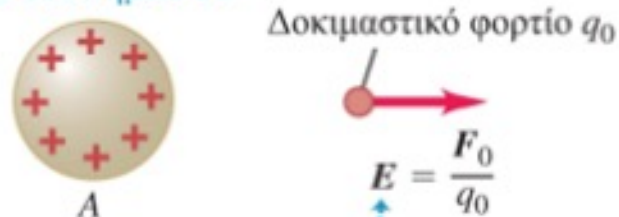
(a) Οι σφαίρες A και B αλληλοασκούν ηλεκτρικές δυνάμεις.



(b) Απομακρύνετε το σώμα B ...



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



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

$$E = \frac{F_0}{q_0}$$

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

(21.3)

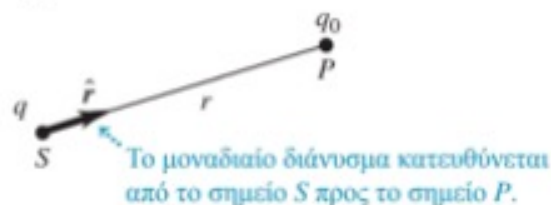
$$F_0 = q_0 E$$

(δύναμη που ασκείται σε σημειακό
φορτίο q_0 από ηλεκτρικό πεδίο E)

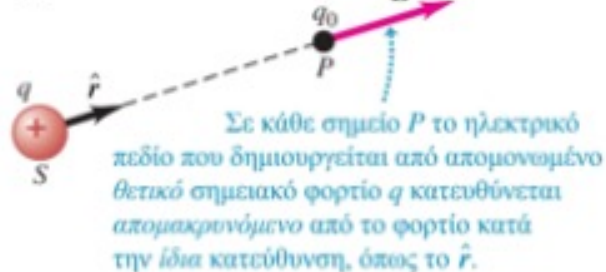
(21.4)

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 αλλά *δρα* στο φορτίο q_0 στο σημείο P

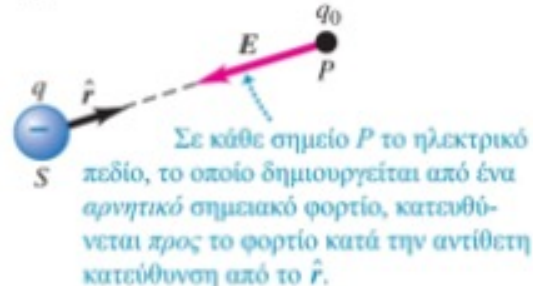
(a)



(b)

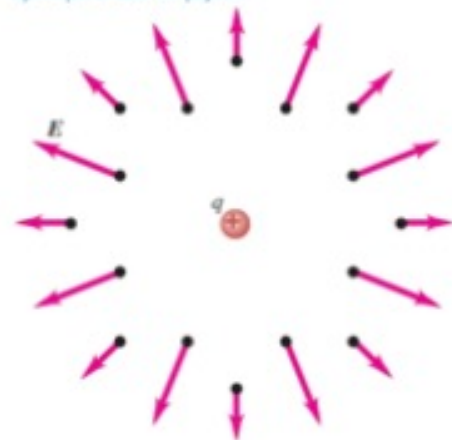


(c)



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.



Ηλεκτρικό πεδίο
οφειλόμενο σε
σημειακό φορτίο

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

Ηλεκτρική σταθερά

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

(21.7)

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:

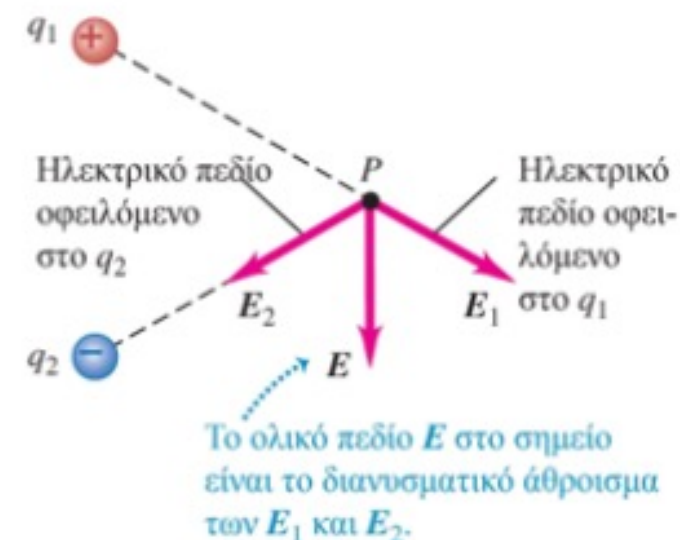
$$F_0 = F_1 + F_2 + F_3 + \dots = q_0 E_1 + q_0 E_2 + q_0 E_3 + \dots$$

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

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

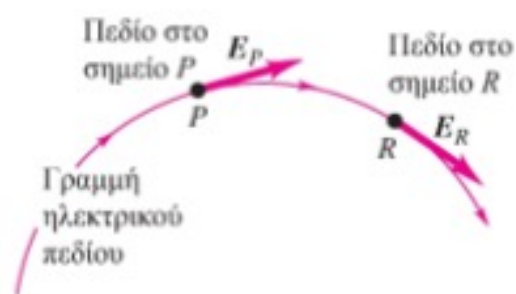
Το ολικό ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο P είναι το διανυσματικό άθροισμα των πεδίων στο σημείο P , το οποίο οφείλεται σε κάθε σημειακό φορτίο (Σχ. 21.21). Η διατύπωση αυτή αποτελεί την **αρχή της επαλληλίας (ή της υπέρθεσης) των ηλεκτρικών πεδίων**.

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.

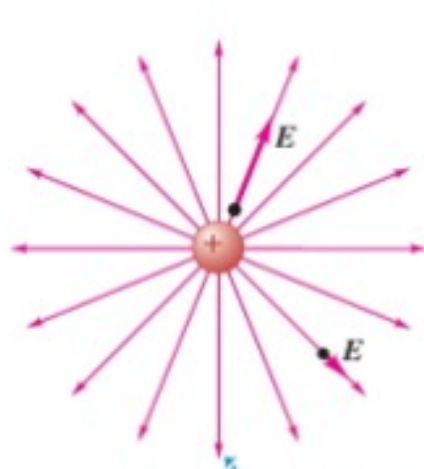


21.28 Ηλεκτρικές γραμμές πεδίου τριών διαφορετικών κατανομών φορτίων. Γενικά, το μέτρο του πεδίου E είναι διαφορετικό σε διαφορετικά σημεία κατά μήκος δεδομένης γραμμής πεδίου.

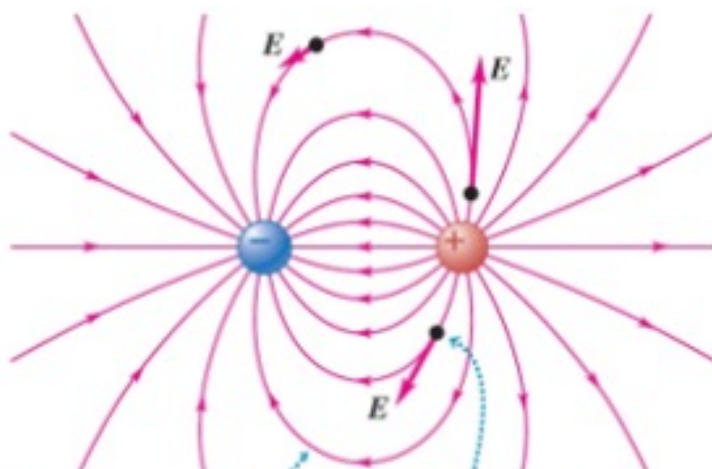
(a) Σημειακό θετικό φορτίο

(b) Δύο ίσα και αντίθετα φορτία (δίπολο)

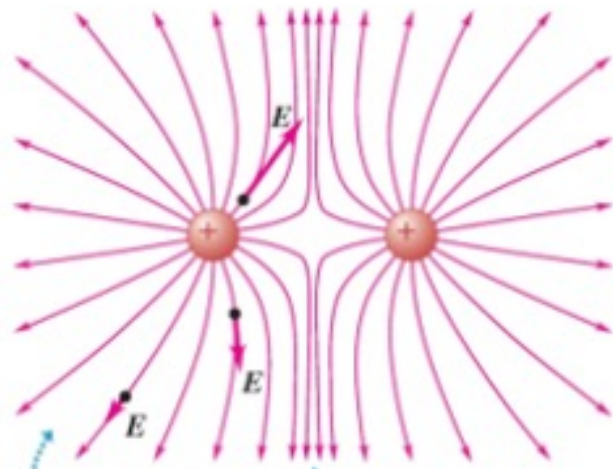
(c) Δύο ίσα θετικά φορτία



Οι γραμμές πεδίου πάντοτε απομακρύνονται από (+) φορτία και κατευθύνονται προς (-) φορτία.

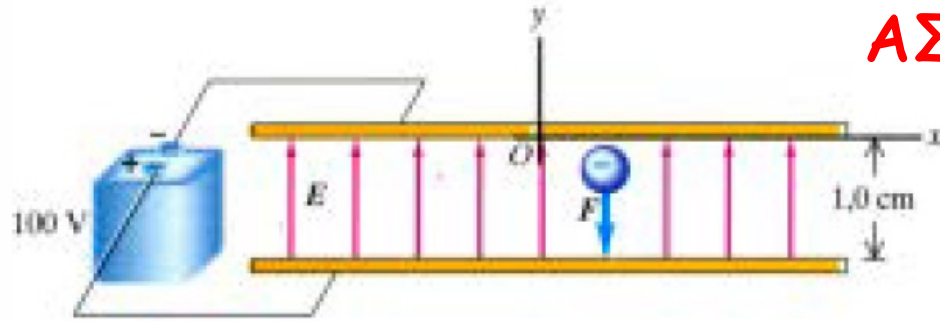


Σε κάθε σημείο του χώρου το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου είναι εφαπτόμενο στη γραμμή πεδίου, η οποία διέρχεται διά του σημείου.



Οι γραμμές πεδίου πλησιάζουν η μία με την άλλη όπου το πεδίο είναι ισχυρό και απομακρύνονται όπου το πεδίο είναι ασθενέστερο.

ΑΣΚΗΣΗ 1



22-12 Ομογενές ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ δύο παράλληλων αγωγικών πλακών, συνδεδεμένων με μπαταρία 100 V. (Η απόσταση των πλακών έχει μεγεθυνθεί σε αυτό το σχήμα σε σχέση με τις διαστάσεις τους.)

Αν οι πόλοι μπαταρίας 100 V συνδεθούν με δύο μεγάλες παράλληλες οριζόντιες πλάκες που απέχουν μεταξύ τους 1,0 cm, τα φορτία που συσσωρεύονται στις πλάκες προκαλούν στον μεταξύ τους χώρο ηλεκτρικό πεδίο που είναι σε πολύ καλή προσέγγιση ομογενές και έχει μέτρο $E = 10^4$ N/C. Υποθέστε πως το E είναι κατακόρυφο, με κατεύθυνση

προς τα πάνω, όπως δείχνουν τα διανύσματα στο Σχ. 22-12

Να υπολογιστεί η ηλεκτρική δύναμη που ασκεί αυτό το πεδίο σε ένα ηλεκτρόνιο και να συγκριθεί με τη δύναμη βαρύτητας που ασκείται στο ηλεκτρόνιο (δηλ. με το βάρος του πάνω στη Γη).

ΛΥΣΗ Από αυτό το κεφάλαιο χρειαζόμαστε τα παρακάτω δεδομένα:

Φορτίο ηλεκτρονίου (κατά μέτρο) $e = 1,60 \times 10^{-19}$ C.

Μάζα ηλεκτρονίου $m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg.

$$F_{\text{elec}} = eE = (1,60 \times 10^{-19} \text{ C}) (10^4 \text{ N/C}) = 1,60 \times 10^{-15} \text{ N}$$

$$F_{\text{grav}} = mg = (9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}) (9,8 \text{ m/s}^2) = 8,93 \times 10^{-30} \text{ N.}$$

Ο λόγος της ηλεκτρικής προς τη βαρυτική δύναμη είναι

$$\frac{F_{\text{elec}}}{F_{\text{grav}}} = \frac{1,60 \times 10^{-15} \text{ N}}{8,93 \times 10^{-30} \text{ N}} = 1,8 \times 10^{14}.$$

ΑΣΚΗΣΗ 2

Ηλεκτρόνιο σε ομογενές πεδίο Αν το ηλεκτρόνιο ξεκινήσει από την πάνω πλάκα, ενώ αρχικά ηρεμεί, με πόση ταχύτητα φτάνει στην κάτω πλάκα, αφού έχει διανύσει 1,0 cm; Πόση θα είναι τότε η κινητική του ενέργεια; Πόσος χρόνος απαιτείται για να διανύσει αυτή την απόσταση;

ΛΥΣΗ Σημειώστε ότι το E κατευθύνεται προς τα πάνω ενώ η F προς τα κάτω, αφού το φορτίο είναι αρνητικό. Επομένως η F_y είναι αρνητική. Αφού η F_y είναι σταθερή, το ηλεκτρόνιο κινείται με σταθερή επιτάχυνση a_y , που δίνεται από τη σχέση:

$$a_y = \frac{F_y}{m} = \frac{-eE}{m} = \frac{-1,60 \times 10^{-15} \text{ N}}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}} \\ = -1,76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2.$$

Αυτή είναι τεράστια επιτάχυνση: για να την αποκτήσει αυτοκίνητο με μάζα 1000 kg θα χρειαζόταν δύναμη περίπου $2 \times 10^{18} \text{ N}$ ή περίπου 2×10^{14} τόνων.

Στο Σχ. 22-12 έχουμε ένα σύστημα συντεταγμένων. Μπορούμε να βρούμε την ταχύτητα του ηλεκτρονίου σε κάθε σημείο με έναν από τους τύπους στην

περίπτωση σταθερής επιτάχυνσης, $v^2 = v_0^2 + 2a_y(y - y_0)$. Στην περίπτωσή μας έχουμε $v_0 = 0$ και $y_0 = 0$, οπότε για $y = -1,0 \text{ cm} = 1,0 \times 10^{-2} \text{ m}$ το μέτρο v της ταχύτητας είναι

$$v = \sqrt{2a_y y} = \sqrt{2(-1,76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2)(-1,0 \times 10^{-2} \text{ m})} \\ = 5,9 \times 10^6 \text{ m/s}.$$

Το διάνυσμα της ταχύτητας κατευθύνεται προς τα κάτω, οπότε η y συνιστώσα του είναι $v_y = -5,9 \times 10^6 \text{ m/s}$. Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(5,9 \times 10^6 \text{ m/s})^2 \\ = 1,6 \times 10^{-17} \text{ J}.$$

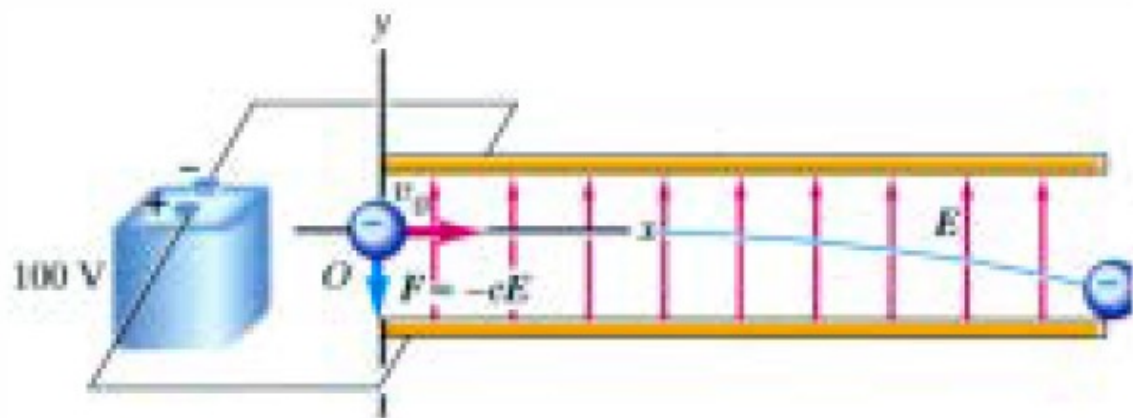
Ο χρόνος που απαιτείται είναι

$$t = \frac{v_y}{a_y} = \frac{-5,9 \times 10^6 \text{ m/s}}{-1,76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2} \\ = 3,4 \times 10^{-9} \text{ s}.$$

https://videos.papazissi.gr/EX21_7/

ΑΣΚΗΣΗ 3

Τροχιά ηλεκτρονίου Αν ένα ηλεκτρόνιο εισχωρήσει στο ηλεκτρικό πεδίο με αρχική οριζόντια ταχύτητα v_0 (Σχ. 22-13), ποια είναι η εξίσωση της τροχιάς του;



22-13 Η παραβολική τροχιά ηλεκτρονίου σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

Η δύναμη και η επιτάχυνση είναι ίδιες με εκείνες της Άσκησης 2

ΛΥΣΗ

Το πεδίο κατευθύνεται προς τα πάνω αλλά η δύναμη που εξασκείται στο (αρνητικά φορτισμένο) ηλεκτρόνιο κατευθύνεται προς τα κάτω. Η συνιστώσα x της επιτάχυνσης μηδενίζεται· η συνιστώσα y είναι $-(eE/m)$. Τη χρονική στιγμή t έχουμε

$$x = v_0 t,$$

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2 = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2.$$

Απαλείφοντας το t μεταξύ αυτών των εξισώσεων παίρνουμε

$$y = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m v_0^2} x^2.$$

Αυτή είναι εξίσωση παραβολής, ακριβώς όπως της τροχιάς βλήματος που βάλλεται οριζόντια μέσα στο πεδίο βαρύτη-

Πεδίο φορτισμένου δακτυλίου Ένας αγωγός, σε σχήμα δακτυλίου με ακτίνα a , φέρει ολικό φορτίο Q ομογενώς κατανομημένο επάνω του (Σχ. 22-16). Να βρεθεί το ηλεκτρικό πεδίο σε σημείο P του άξονα του δακτυλίου σε απόσταση x από το κέντρο του.

ΛΥΣΗ

Φανταζόμαστε πως ο δακτύλιος διαμερίζεται σε μικρά τμήματα ds , όπως φαίνεται στο σχήμα. Ας είναι dQ το φορτίο του τμήματος ds . Το τετράγωνο της απόστασης r του σημείου P του πεδίου από αυτό το φορτίο είναι $r^2 = x^2 + a^2$. Το μέτρο dE της συνεισφοράς dE αυτού του φορτίου στο ηλεκτρικό πεδίο σε σημείο P του πεδίου δίνεται από τη σχέση

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{x^2 + a^2}.$$

Η συνιστώσα dE_x αυτού του πεδίου κατά τον άξονα x είναι

$$dE_x = dE \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dQ}{x^2 + a^2} \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{x dQ}{(x^2 + a^2)^{3/2}}$$

Για να βρούμε την ολική συνιστώσα x , E_x , του πεδίου στο σημείο P , ολοκληρώνουμε αυτή την έκφραση:

$$E_x = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{x dQ}{(x^2 + a^2)^{3/2}}.$$

Αφού το x δεν μεταβάλλεται, καθώς προχωρούμε από σημείο σε σημείο γύρω στον δακτύλιο, όλοι οι παράγοντες του δεξιού μέλους εκτός από το dQ είναι σταθεροί και μπορούν να βγουν έξω από το ολοκλήρωμα. Το ολοκλήρωμα του dQ είναι απλά το ολικό φορτίο Q οπότε, τελικά, βρί-

σκουμε

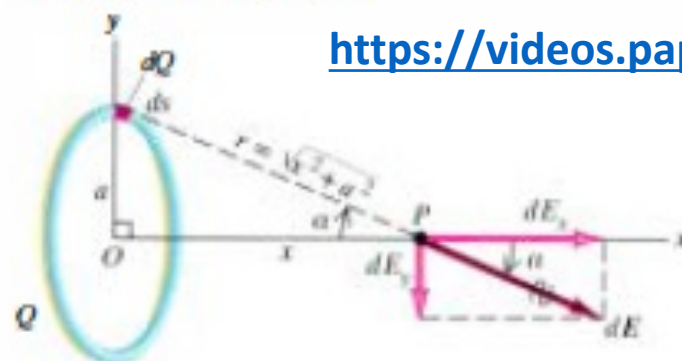
$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qx}{(x^2 + a^2)^{3/2}}. \quad (22-7)$$

Από τη συμμετρία καταλαβαίνουμε πως δεν μπορεί να υπάρχει συνιστώσα του E κάθετη στον άξονα x , οπότε το πεδίο στο P περιγράφεται πλήρως από τη x συνιστώσα του.

Η Εξ. (22-7) φανερώνει ότι στο κέντρο του δακτυλίου ($x = 0$) το πεδίο μηδενίζεται. Αυτό ήταν αναμενόμενο αφού τα φορτία που φέρουν διαμετρικά αντίθετα τμήματα του δακτυλίου εξασκούν αντίθετες δυνάμεις, που αλληλοαναιρούνται, πάνω σε δοκιμαστικό φορτίο στη θέση αυτή. Όταν το σημείο P του πεδίου βρίσκεται σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τις διαστάσεις του δακτυλίου (δηλ. όταν $x \gg a$) ο παρονομαστής στην Εξ. (22-7) γίνεται περίπου ίσος με x^3 και η έκφραση γίνεται, προσεγγιστικά,

$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{x^2}.$$

Όταν βρισκόμαστε τόσο μακριά από τον δακτύλιο, ώστε η ακτίνα του a να είναι αμελητέα σε σύγκριση με την απόσταση x , ο δακτύλιος φαίνεται σαν σημειακό φορτίο. Πάλι αυτό ακριβώς θα περιμέναμε.



22-16 Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου στον άξονα φορτισμένου δακτυλίου.

https://videos.papazissi.gr/EX21_9/