

Κεφάλαιο 21

Ο νόμος του Coulomb (Ηλεκτρικό φορτίο)

Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός

Οι νόμοι του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού έχουν πρωταρχικό ρόλο στη λειτουργία πολλών σύγχρονων συσκευών.

Οι ενδοατομικές και ενδομοριακές δυνάμεις, στις οποίες οφείλεται ο σχηματισμός των στερεών και των υγρών, είναι κατά βάση ηλεκτρικές.

Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Μερικά ιστορικά στοιχεία

Κινέζοι

- Από κινέζικα έγγραφα προκύπτει ότι το φαινόμενο του μαγνητισμού είχε παρατηρηθεί από το 2000 π.Χ.

Έλληνες

- Παρατήρηση ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων από το 700 π.Χ.
- Πειράματα με κεχριμπάρι και μαγνητίτη.

1600

- Ο William Gilbert έδειξε ότι τα ηλεκτρικά φαινόμενα δεν περιορίζονταν μόνο στο κεχριμπάρι.
- Τα ηλεκτρικά φαινόμενα παρατηρούνταν γενικά.

1785

- Ο Charles Coulomb επιβεβαίωσε ότι η ηλεκτρική δύναμη υπακούει στον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου.

Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Πρόσθετα ιστορικά στοιχεία

1819

- Ο Hans Oersted ανακάλυψε ότι, όταν τοποθετούσε μια πυξίδα κοντά σε ένα κύκλωμα που διαρρεόταν από ηλεκτρικό ρεύμα, η βελόνα της εκτρεπόταν.

1831

- Ο Michael Faraday και ο Joseph Henry έδειξαν ότι όταν ένα σύρμα κινείται κοντά σε έναν μαγνήτη, τότε στο σύρμα δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα.

1873

- Χρησιμοποιώντας αυτές τις παρατηρήσεις, καθώς και άλλα πειραματικά δεδομένα, ο James Clerk Maxwell διατύπωσε τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού.
 - Ενοποίησε τους κλάδους της φυσικής που ασχολούνται με τη μελέτη του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού.

Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Δυνάμεις

Ο ηλεκτρομαγνητισμός συνδέεται με τους άλλους κλάδους της φυσικής μέσω της έννοιας της δύναμης.

Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ φορτισμένων σωματιδίων είναι μία από τις θεμελιώδεις δυνάμεις της φύσης.

Ηλεκτρικά φορτία (1)

Υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικών φορτίων:

- Το θετικό και το αρνητικό.
 - Αρνητικό φορτίο φέρει, για παράδειγμα, το ηλεκτρόνιο.
 - Θετικό φορτίο φέρει, για παράδειγμα, το πρωτόνιο.

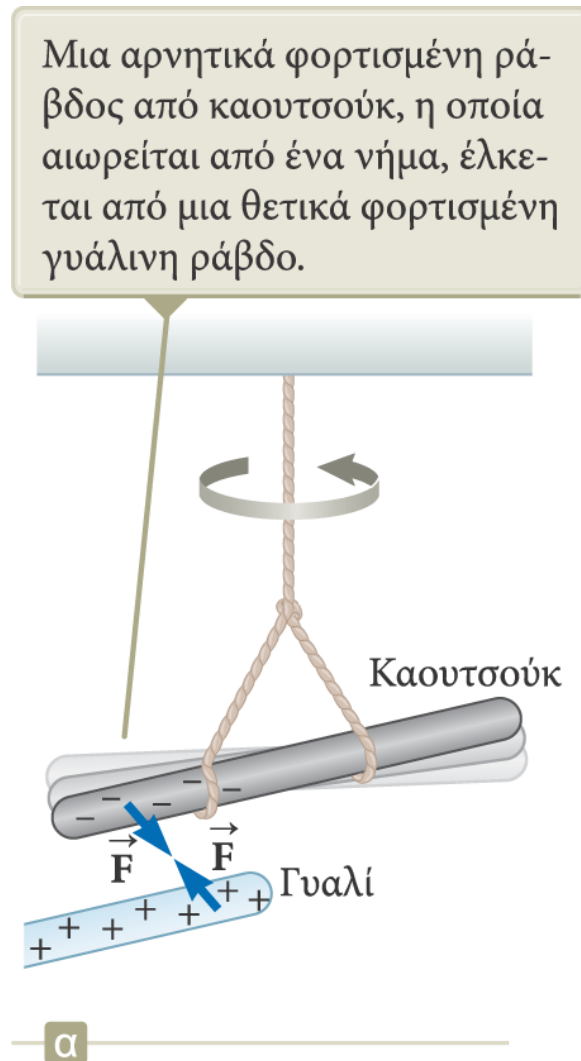
Τα ομόσημα φορτία απωθούνται, ενώ τα ετερόσημα φορτία έλκονται.

Ηλεκτρικά φορτία (2)

Η ράβδος από καουτσούκ είναι αρνητικά φορτισμένη.

Η ράβδος από γυαλί είναι θετικά φορτισμένη.

Οι δύο ράβδοι έλκονται.



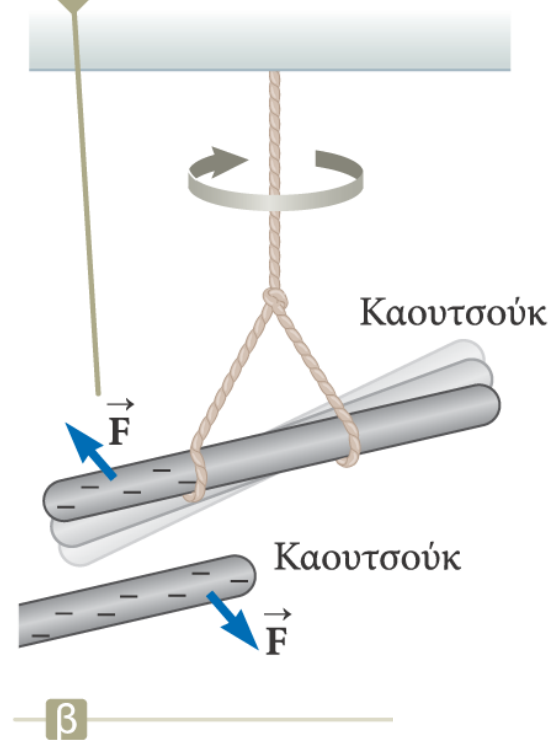
Ηλεκτρικά φορτία (3)

Η ράβδος από καουτσούκ είναι αρνητικά φορτισμένη.

Η δεύτερη ράβδος από καουτσούκ είναι και αυτή αρνητικά φορτισμένη.

Οι δύο ράβδοι απωθούνται.

Μια αρνητικά φορτισμένη ράβδος από καουτσούκ απωθείται από μια άλλη αρνητικά φορτισμένη ράβδο επίσης από καουτσούκ.



Περισσότερα στοιχεία για τα ηλεκτρικά φορτία

Σε ένα απομονωμένο σύστημα, το ηλεκτρικό φορτίο πάντα διατηρείται.

- Για παράδειγμα, όταν τρίβουμε ένα σώμα σε ένα άλλο, δεν δημιουργείται φορτίο.
- Η ηλέκτριση οφείλεται στη μεταφορά φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο.

Διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου

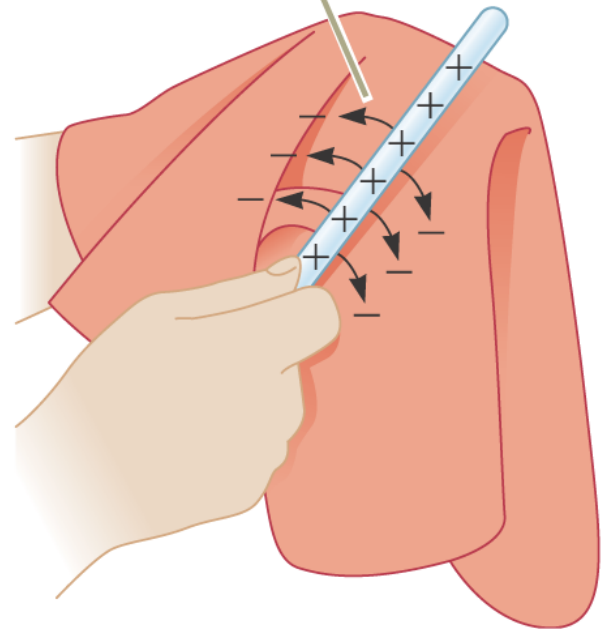
Μια γυάλινη ράβδος τρίβεται επάνω σε ένα μεταξωτό ύφασμα.

Μεταφέρονται ηλεκτρόνια από το γυαλί στο μετάξι.

Κάθε ηλεκτρόνιο προσθέτει ένα αρνητικό φορτίο στο μετάξι.

Στη ράβδο απομένει ισόποσο θετικό φορτίο.

Λόγω της διατήρησης του φορτίου, κάθε ηλεκτρόνιο προσθέτει αρνητικό φορτίο στο μεταξωτό ύφασμα και προσδίδει στη γυάλινη ράβδο ισότιμο θετικό φορτίο.



Κβάντωση του ηλεκτρικού φορτίου

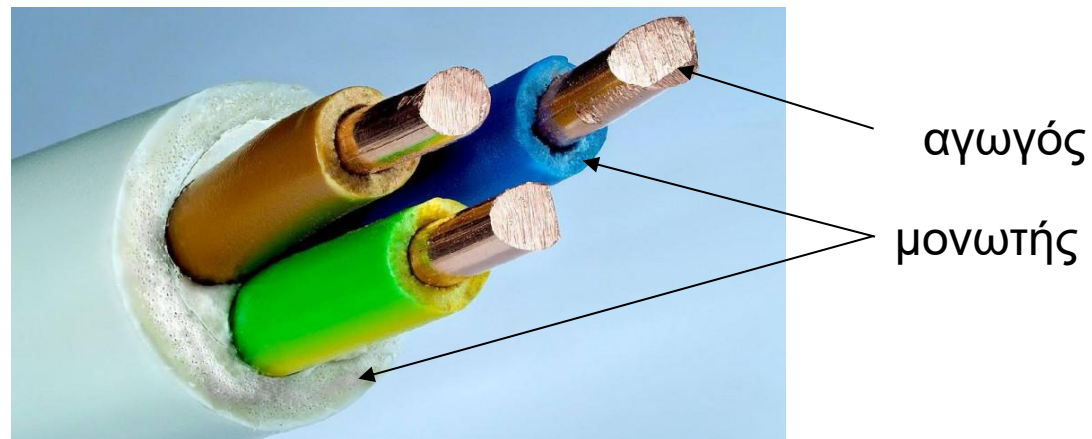
Το ηλεκτρικό φορτίο, q , είναι κβαντισμένο.

- q είναι το τυποποιημένο σύμβολο που χρησιμοποιείται για τη μεταβλητή του φορτίου.
- Το ηλεκτρικό φορτίο υπάρχει σε μορφή διακριτών «πακέτων».
- $q = \pm Ne$
 - Το N είναι ακέραιος αριθμός.
 - e είναι το στοιχειώδες φορτίο.
 - $|e| = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
 - Για το ηλεκτρόνιο: $q = -e$
 - Για το πρωτόνιο: $q = +e$

Ηλεκτρικοί αγωγοί

Ηλεκτρικοί αγωγοί ονομάζονται τα υλικά στα οποία κάποια από τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα.

- Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν είναι δεσμευμένα στα άτομα.
- Τα ηλεκτρόνια αυτά μπορούν να κινούνται με σχετική ελευθερία μέσα στο υλικό.
- Καλοί αγωγοί είναι, για παράδειγμα, ο χαλκός, το αλουμίνιο, και ο άργυρος.
- Όταν ένας καλός αγωγός φορτιστεί σε μια μικρή περιοχή του, τότε το φορτίο κατανέμεται άμεσα σε ολόκληρη την επιφάνειά του.



Ηλεκτρικοί μονωτές

Ηλεκτρικοί μονωτές ονομάζονται τα υλικά στα οποία όλα τα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα στα άτομα.

- Αυτά τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να κινούνται ελεύθερα μέσα στο υλικό.
- Μονωτές είναι, για παράδειγμα, το γυαλί, το καουτσούκ, και το ξύλο.
- Όταν ένας μονωτής φορτιστεί σε μια μικρή περιοχή του, τότε το φορτίο δεν μπορεί να κατανεμηθεί σε άλλα σημεία του υλικού.

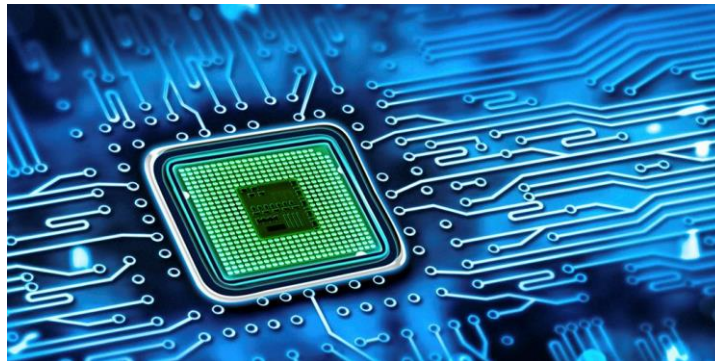
Ημιαγωγοί

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών είναι ενδιάμεσες εκείνων των αγωγών και των μονωτών.

Παραδείγματα ημιαγωγίμων υλικών είναι το πυρίτιο και το γερμάνιο.

- Ημιαγωγοί από τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται συνήθως στην κατασκευή ηλεκτρονικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (τσιπ).

Οι ηλεκτρικές ιδιότητες των ημιαγωγών μπορούν να τροποποιηθούν με την προσθήκη ελεγχόμενων ποσοτήτων ορισμένων ατόμων.



Charles Coulomb

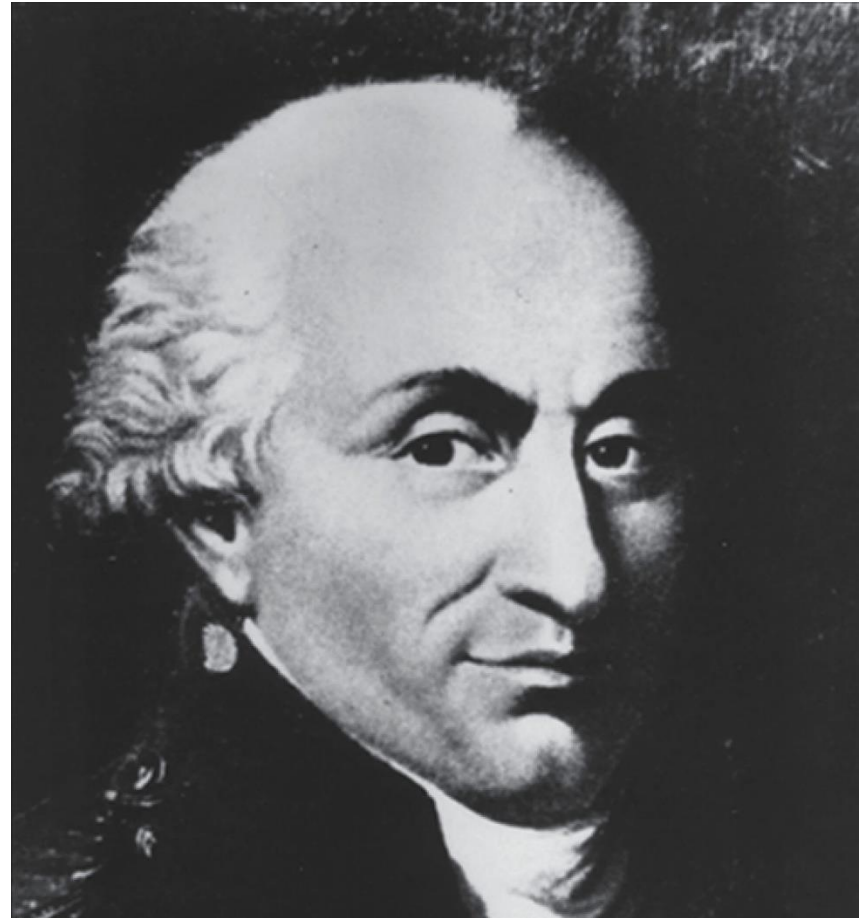
1736–1806

Γάλλος φυσικός

Η πιο σημαντική συνεισφορά του ήταν στους τομείς του ηλεκτροστατικής και του μαγνητισμού.

Ασχολήθηκε και με την έρευνα στους παρακάτω τομείς:

- Αντοχή υλικών
- Στατική των κατασκευών
- Εργονομία



Σημειακό φορτίο

Ο όρος **σημειακό φορτίο** αναφέρεται σε ένα σωματίδιο μηδενικού μεγέθους που φέρει ηλεκτρικό φορτίο.

- Η μοντελοποίηση των ηλεκτρονίων και των πρωτονίων ως σημειακών φορτίων μας επιτρέπει να περιγράψουμε ικανοποιητικά την ηλεκτρική συμπεριφορά τους.

Ο νόμος του Coulomb (συνέχεια)

Αν τα φορτία είναι ετερόσημα, τότε η δύναμη είναι ελκτική.

Αν τα φορτία είναι ομόσημα, τότε η δύναμη είναι απωστική.

Η ηλεκτρική δύναμη είναι συντηρητική.

Η εξίσωση του νόμου του Coulomb

Ο νόμος του Coulomb διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}_{12}$$

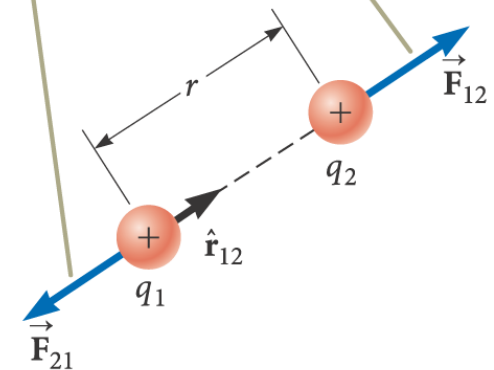
$\vec{r}_{12}$ το μοναδιαίο διάνυσμα στη διεύθυνση που ενώνει τα 2 φορτία

Η μονάδα του ηλεκτρικού φορτίου στο σύστημα μονάδων SI είναι το **1 coulomb (C)**.

k είναι η **σταθερά του Coulomb**.

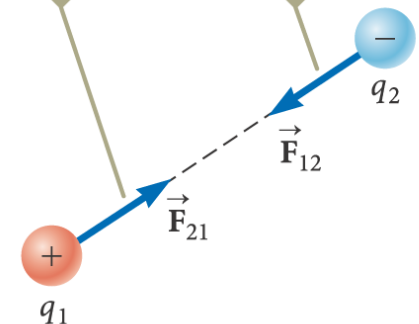
- $k = 8.9876 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2 = 1/(4\pi \epsilon_0)$
- Όπου ϵ_0 είναι η **διηλεκτρική σταθερά του κενού** (ή **ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού**).
- $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N}\cdot\text{m}^2$

Όταν τα φορτία είναι ομόσημα,
η δύναμη είναι απωστική.



α

Όταν τα φορτία είναι ετερόσημα,
η δύναμη είναι ελκτική.



β

Επισημάνσεις σχετικά με τον νόμο του Coulomb

Τα φορτία πρέπει να εκφράζονται σε coulomb.

- e είναι η μικρότερη μονάδα φορτίου.
 - Εξαιρείται το φορτίο των κουάρκ (τα οποία όμως δεν απομονώνονται).
- $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
- Άρα, 1 C πρέπει να έχει 6.24×10^{18} ηλεκτρόνια ή πρωτόνια.

Συνήθως τα φορτία είναι της τάξης των μC .

Προσοχή: η δύναμη είναι **διανυσματικό** μέγεθος.

Συνοπτική αναφορά των σωματιδίων

ΠΙΝΑΚΑΣ Η1.1

Φορτίο και μάζα ηλεκτρονίου, πρωτονίου, και νετρονίου.

Σωματίδιο	Φορτίο (σε C)	Μάζα (σε kg)
Ηλεκτρόνιο (e)	$-1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$9.109\,4 \times 10^{-31}$
Πρωτόνιο (p)	$+1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$1.672\,62 \times 10^{-27}$
Νετρόνιο (n)	0	$1.674\,93 \times 10^{-27}$

Το ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο έχουν ίδια τιμή φορτίου, αλλά τελείως διαφορετική μάζα.

Το πρωτόνιο και το νετρόνιο έχουν παρόμοια μάζα, αλλά τελείως διαφορετικό φορτίο.

Η διανυσματική φύση των ηλεκτρικών δυνάμεων

Οι ηλεκτρικές δυνάμεις υπακούουν στον τρίτο νόμο του Νεύτωνα.

Η δύναμη που δέχεται το q_1 είναι ίση κατά μέτρο και αντίθετη με τη δύναμη που δέχεται το q_2 .

- $\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12}$

Στην περίπτωση των ομόσημων φορτίων, το γινόμενο q_1q_2 είναι θετικό και η δύναμη είναι απωστική.

Πολλά φορτία – Αρχή της υπέρθεσης

Η συνισταμένη δύναμη που δέχεται κάθε φορτίο είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούν όλα τα άλλα επιμέρους φορτία.

- Προσοχή: Οι δυνάμεις προστίθενται *διανυσματικά*.

Η συνισταμένη δύναμη που δέχεται το φορτίο q_1 είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα όλων των δυνάμεων που ασκούν σε αυτό όλα τα υπόλοιπα φορτία.

Για παράδειγμα, αν υπάρχουν τέσσερα φορτία, η συνισταμένη δύναμη που δέχεται το ένα από αυτά είναι ίση με το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που ασκούν σε αυτό τα υπόλοιπα τρία φορτία.

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{21} + \vec{F}_{31} + \vec{F}_{41}$$

Θεωρήματα κελύφους στην ηλεκτροστατική

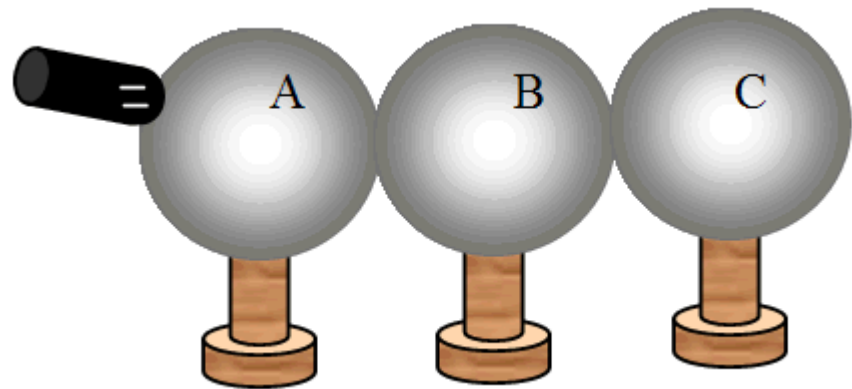
1. Ένα κέλυφος ομοιόμορφου φορτίου έλκει ή απωθεί ένα φορτισμένο σωματίδιο που βρίσκεται έξω από το κέλυφος σαν όλο το φορτίο του κελύφους να ήταν συγκεντρωμένο στο κέντρο του
2. Όταν η επιφάνεια κελύφους είναι ομοιόμορφα φορτισμένη και ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται στο εσωτερικό (οπουδήποτε), η συνολική ηλεκτροστατική δύναμη από το κέλυφος στο σωματίδιο είναι μηδέν

Το γυαλί είναι ένας πολύ καλός ηλεκτρικός μονωτής. Πώς είναι λοιπόν δυνατόν μια γυάλινη ράβδος να φορτιστεί τρίβοντάς την με πανί;

- α) Όταν η ράβδος τρίβεται, γίνεται ηλεκτρικός αγωγός.
- β) Παρόλο που η ράβδος είναι μονωτής, τυχόν επιπλέον φορτίο θα απομακρυνθεί σιγά σιγά.
- γ) Όταν η ράβδος τρίβεται, το τμήμα της ράβδου που έρχεται σε επαφή με το ύφασμα γίνεται ηλεκτρικά αγώγιμο.
- δ) Επειδή η ράβδος είναι μονωτής, το φορτίο που μεταφέρεται στην επιφάνεια της ράβδου δυσκολεύεται να κινηθεί.
- ε) Καμία από τις παραπάνω απαντήσεις δεν είναι σωστή.

Ερωτήσεις κατανόησης

Τρεις πανομοιότυπες αγωγίμες σφαίρες σε μεμονωμένες μονωτικές βάσεις είναι αρχικά ηλεκτρικά ουδέτερες. Οι τρεις σφαίρες είναι διατεταγμένες έτσι ώστε να βρίσκονται σε μια γραμμή και να εφάπτονται όπως φαίνεται. Μια αρνητικά φορτισμένη αγωγίμη ράβδος έρχεται σε επαφή με τη σφαίρα Α. Στη συνέχεια, κάποιος αφαιρεί τη σφαίρα Γ. Τότε, κάποιος αφαιρεί τη σφαίρα Β. Τέλος, η ράβδος αφαιρείται. Ποιο είναι το πρόσημο του τελικού φορτίου, αν υπάρχει, των τριών σφαιρών;



- | | A | B | C |
|----|---|---|---|
| a) | + | + | - |
| b) | + | - | + |
| c) | + | 0 | - |
| d) | - | + | 0 |
| e) | - | - | - |

Δύο αντικείμενα που χωρίζονται από απόσταση r φέρουν το καθένα φορτίο $-q$. Το μέγεθος της δύναμης που ασκείται στο δεύτερο αντικείμενο από το πρώτο είναι F . Αν το πρώτο αντικείμενο αφαιρεθεί και αντικατασταθεί με ένα πανομοιότυπο αντικείμενο που φέρει φορτίο $+4q$, ποιο είναι το μέγεθος της ηλεκτρικής δύναμης στο δεύτερο αντικείμενο;

α) $4F$

β) $2F$

γ) F

δ) $F/2$

ε) $F/4$

Ερωτήσεις κατανόησης

Ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται στο κέντρο μιας ομοιόμορφα φορτισμένης κοίλης σφαίρας. Ποια είναι η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο φορτισμένο σωματίδιο;

α) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι μηδέν Newton επειδή όλα τα φορτία στη σφαίρα είτε απωθούνται είτε έλκονται από το σωματίδιο, επομένως δεν ασκούν καμία δύναμη σε αυτό.

β) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι μηδέν Newton, επειδή το διανυσματικό άθροισμα όλων των δυνάμεων σε αυτό λόγω των φορτίων στη σφαίρα είναι μηδέν, επομένως δεν ασκούν δύναμη σε αυτό.

γ) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι η ελάχιστη στο κέντρο, αλλά το μέγεθός της θα είναι μεγαλύτερο από μηδέν Newton.

δ) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι θετική αν το σωματίδιο και η σφαίρα έχουν αντίθετα πρόσημα και αρνητική αν έχουν το ίδιο πρόσημο.

ε) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι αρνητική αν το σωματίδιο και η σφαίρα έχουν αντίθετα πρόσημα και θετική αν έχουν το ίδιο πρόσημο.

Ερωτήσεις κατανόησης

Ένα φορτισμένο σωματίδιο βρίσκεται σε απόσταση $R/2$ από το κέντρο μιας ομοιόμορφα φορτισμένης κοίλης σφαίρας ακτίνας R . Ποια είναι η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο φορτισμένο σωματίδιο;

α) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι μηδέν Newton επειδή το διανυσματικό άθροισμα όλων των δυνάμεων σε αυτό λόγω των φορτίων στη σφαίρα είναι μηδέν, επομένως δεν ασκούν δύναμη σε αυτό.

β) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι μεγαλύτερη από αυτή που θα ασκούσαν αν το σωματίδιο βρισκόταν στο κέντρο της σφαίρας.

γ) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι μικρότερη από αυτή που θα ασκούσαν αν το σωματίδιο βρισκόταν στο κέντρο της σφαίρας.

δ) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι θετική αν το σωματίδιο και η σφαίρα έχουν αντίθετα πρόσημα και αρνητική αν έχουν το ίδιο πρόσημο.

ε) Η καθαρή ηλεκτροστατική δύναμη στο σωματίδιο θα είναι αρνητική αν το σωματίδιο και η σφαίρα έχουν αντίθετα πρόσημα και θετική αν έχουν το ίδιο πρόσημο.

Κεφάλαιο 22

Ηλεκτρικό πεδίο

Το ηλεκτρικό πεδίο – Εισαγωγή

Η ηλεκτρική δύναμη είναι δύναμη πεδίου.

Οι δυνάμεις πεδίου ασκούνται εξ αποστάσεως.

- Υφίστανται ακόμα και όταν δεν υπάρχει φυσική επαφή μεταξύ των σωμάτων.

Η έννοια του πεδίου στον ηλεκτρισμό προτάθηκε από τον Faraday.

Ηλεκτρικά πεδία - ορισμός

Στον χώρο γύρω από ένα φορτισμένο σώμα υπάρχει **ηλεκτρικό πεδίο**.

- Αυτό το φορτισμένο σώμα είναι το **φορτίο-πηγή**.

Όταν σε αυτό το ηλεκτρικό πεδίο εισέλθει ένα άλλο φορτισμένο σώμα, το **δοκιμαστικό φορτίο**, τότε ασκείται ηλεκτρική δύναμη σε αυτό.

Το ηλεκτρικό πεδίο σημειακού φορτίου– Ορισμός (συνέχεια)

Ως ένταση ηλεκτρικού πεδίου ορίζεται η ηλεκτρική δύναμη που ασκείται στο δοκιμαστικό φορτίο ανά μονάδα φορτίου.

Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου, $\vec{E}$, σε ένα σημείο του χώρου ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής δύναμης $\vec{F}$ που δέχεται ένα θετικό δοκιμαστικό φορτίο, q_o , που έχει τοποθετηθεί σε εκείνο το σημείο, προς το δοκιμαστικό φορτίο:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_o}$$

Επισημάνσεις σχετικά με το ηλεκτρικό πεδίο

$\vec{E}$ είναι το πεδίο που παράγει ένα φορτίο ή μια κατανομή φορτίου και όχι το ίδιο το δοκιμαστικό φορτίο.

Η ύπαρξη ηλεκτρικού πεδίου είναι ιδιότητα του φορτίου-πηγής.

- Δηλαδή το πεδίο υφίσταται ανεξάρτητα της παρουσίας του δοκιμαστικού φορτίου.

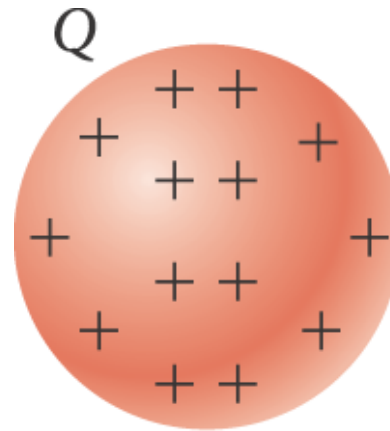
Το δοκιμαστικό φορτίο μας επιτρέπει να ανιχνεύσουμε το ηλεκτρικό πεδίο.

Τελευταίες επισημάνσεις σχετικά με το ηλεκτρικό πεδίο

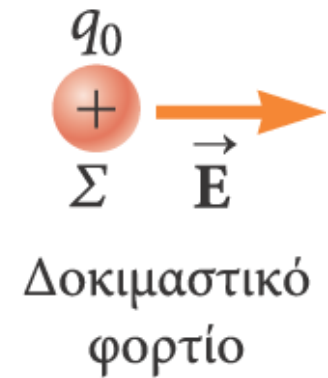
Η κατεύθυνση του $\vec{E}$ είναι ίδια με εκείνη της δύναμης που ασκείται σε ένα θετικό δοκιμαστικό φορτίο, το οποίο βρίσκεται στο πεδίο.

Η μονάδα πεδίου $\vec{E}$ στο σύστημα SI είναι τα N/C.

Μπορούμε επίσης να πούμε ότι σε ένα σημείο του χώρου υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο εφόσον ασκείται ηλεκτρική δύναμη σε ένα δοκιμαστικό φορτίο που βρίσκεται εκεί.



Φορτίο-πηγή



Δοκιμαστικό
φορτίο

Σχέση μεταξύ των F και E

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

- Η σχέση αυτή ισχύει μόνο για σημειακό φορτίο.
- Δηλαδή φορτία με μηδενικές διαστάσεις.
- Για μεγαλύτερα σώματα (κατανομές φορτίου), το πεδίο μπορεί έχει διαφορετική τιμή σε διαφορετικά σημεία του σώματος.

Διανυσματική μορφή του ηλεκτρικού πεδίου σημειακού φορτίου

Ο νόμος του Coulomb, ο οποίος εκφράζει τη δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ του φορτίου-πηγής και του δοκιμαστικού φορτίου, μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\vec{F}_e = k_e \frac{qq_o}{r^2} \hat{r}$$

Οπότε το ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q_o} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν πολλά φορτία - αρχική υπέρθεση

Το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο δημιουργεί μια ομάδα φορτίων-πηγών σε οποιοδήποτε σημείο Σ , ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των ηλεκτρικών πεδίων όλων των φορτίων.

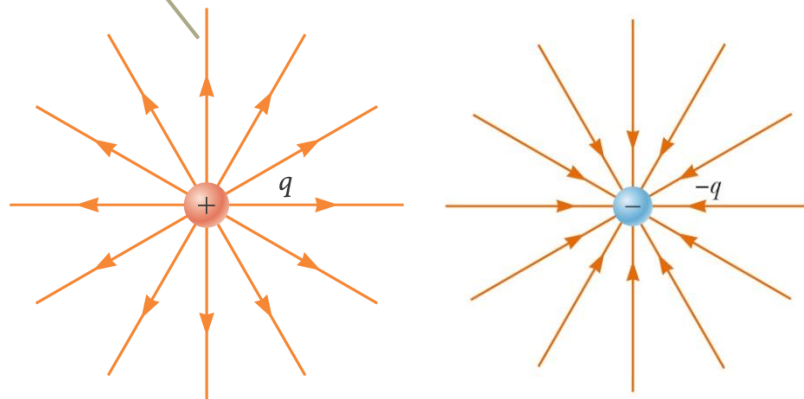
$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i$$

Σχετικά με την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου

α) Κατά σύμβαση, αν το φορτίο q είναι θετικό, τότε το ηλεκτρικό πεδίο έχει κατεύθυνση μακριά από το θετικό φορτίο-πηγή.

β) Αν το φορτίο q είναι αρνητικό, τότε το ηλεκτρικό πεδίο έχει κατεύθυνση προς το αρνητικό φορτίο-πηγή.

Για θετικό σημειακό φορτίο, οι γραμμές του πεδίου έχουν ακτινική κατεύθυνση μακριά από το φορτίο.



Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου

Οι γραμμές του πεδίου είναι ένας τρόπος αναπαράστασης της μορφής του ηλεκτρικού πεδίου.

Η διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου εφάπτεται στη γραμμή του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο της.

- Η κατεύθυνση της γραμμής είναι ίδια με εκείνη του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου.

Το πλήθος των γραμμών ανά μονάδα επιφάνειας που διέρχονται από μια επιφάνεια κάθετη σε αυτές είναι ανάλογο του μέτρου του ηλεκτρικού πεδίου σε αυτή την περιοχή.

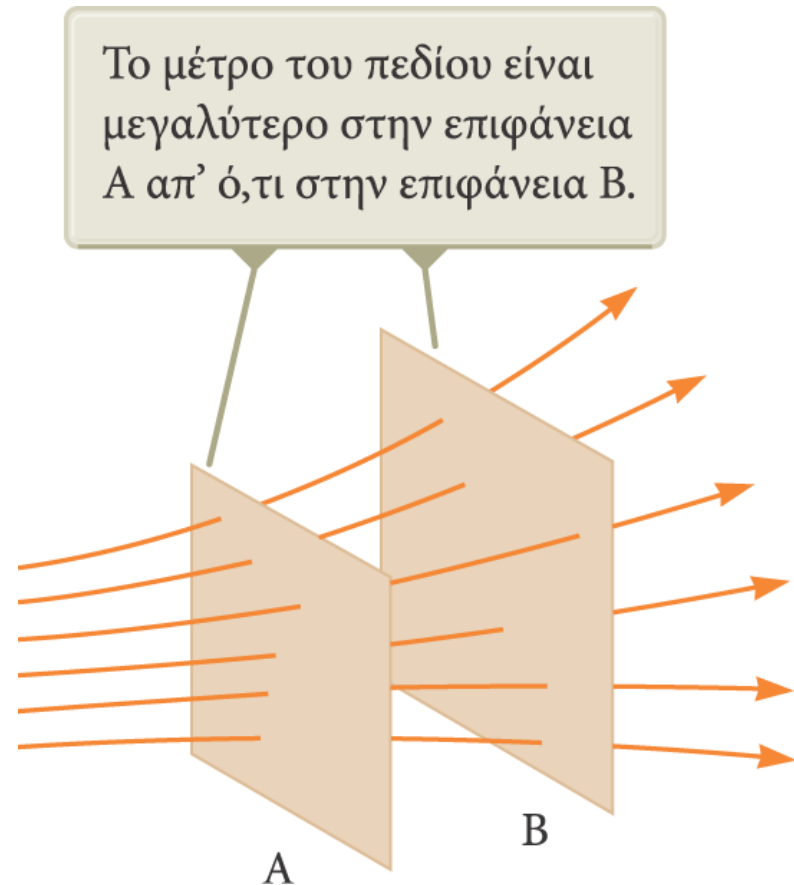
Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Γενικά στοιχεία

Η πυκνότητα των γραμμών του πεδίου που διέρχονται από την επιφάνεια A είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα των γραμμών του πεδίου που διέρχονται από την επιφάνεια B.

Το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου είναι μεγαλύτερο στην επιφάνεια A απ' ό,τι στην B.

Σε κάθε σημείο, οι γραμμές του πεδίου δείχνουν προς διαφορετική κατεύθυνση.

- Αυτό δείχνει ότι το πεδίο δεν είναι ομογενές.



Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Θετικό σημειακό φορτίο

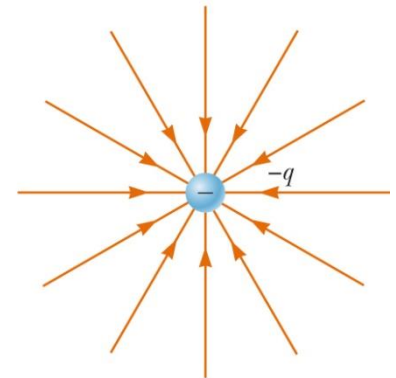
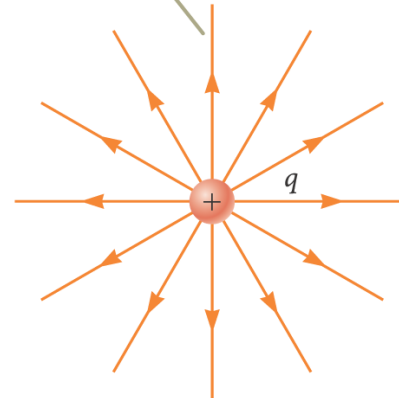
Οι γραμμές του πεδίου κατευθύνονται ακτινικά προς τα έξω σε κάθε διεύθυνση.

- Στον τριδιάστατο χώρο, η κατανομή είναι σφαιρική.

Οι γραμμές έχουν κατεύθυνση μακριά από το φορτίο-πηγή.

- Ένα θετικό δοκιμαστικό φορτίο μέσα σε αυτό το πεδίο θα δεχόταν μια απωστική δύναμη από το θετικό φορτίο-πηγή.

Για θετικό σημειακό φορτίο, οι γραμμές του πεδίου έχουν ακτινική κατεύθυνση μακριά από το φορτίο.



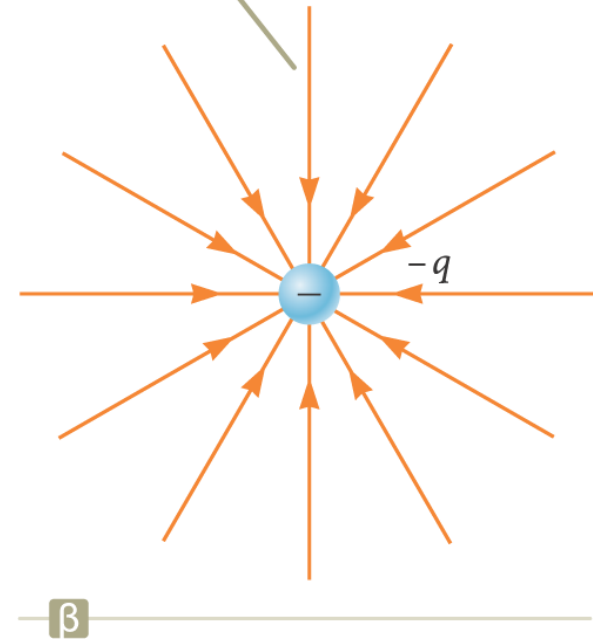
Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Αρνητικό σημειακό φορτίο

Οι γραμμές του πεδίου κατευθύνονται ακτινικά προς το φορτίο σε κάθε διεύθυνση.

Οι γραμμές έχουν κατεύθυνση προς το φορτίο-πηγή.

- Ένα θετικό δοκιμαστικό φορτίο μέσα σε αυτό το πεδίο θα δεχόταν μια ελκτική δύναμη από το αρνητικό φορτίο-πηγή.

Για αρνητικό σημειακό φορτίο, οι γραμμές του πεδίου έχουν ακτινική κατεύθυνση προς το φορτίο.



Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Κανόνες σχεδίασης

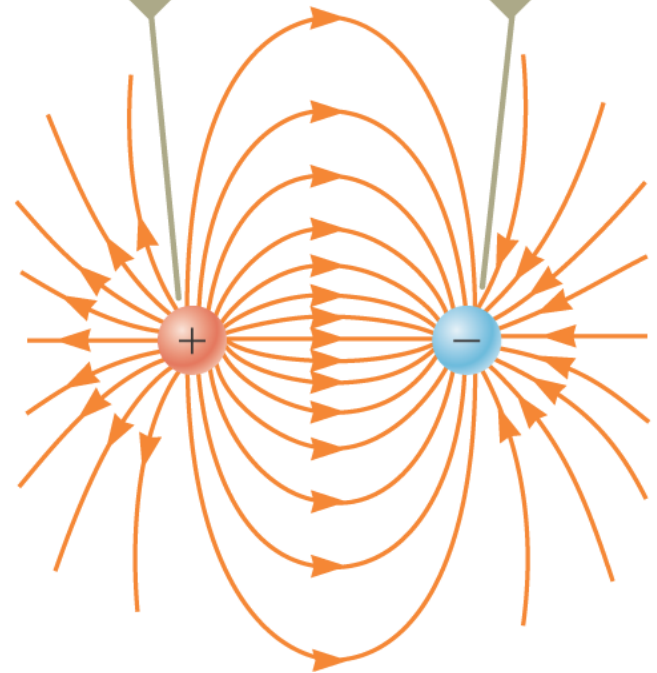
- Οι γραμμές ξεκινούν από θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά.
 - Σε περίπτωση περισσειας ενός τύπου φορτίου, κάποιες από αυτές θα ξεκινούν από το άπειρο ή θα καταλήγουν σε αυτό.
- Το πλήθος των γραμμών που ξεκινούν από ένα θετικό φορτίο ή καταλήγουν σε ένα αρνητικό είναι ανάλογο της τιμής του φορτίου.
- Οι γραμμές του πεδίου δεν τέμνονται ποτέ.
- Οι γραμμές του πεδίου **δεν** έχουν υλική υπόσταση. Αποτελούν μόνο μια γραφική αναπαράσταση που περιγράφει ποιοτικά το ηλεκτρικό πεδίο.

Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Ηλεκτρικό δίπολο

Τα φορτία είναι ίσα και ετερόσημα.

Το πλήθος των γραμμών του πεδίου που ξεκινούν από το θετικό φορτίο είναι ίσο με το πλήθος των γραμμών που καταλήγουν στο αρνητικό φορτίο.

Το πλήθος των γραμμών του πεδίου που ξεκινούν από το θετικό φορτίο είναι ίσο με το πλήθος των γραμμών που καταλήγουν στο αρνητικό φορτίο.



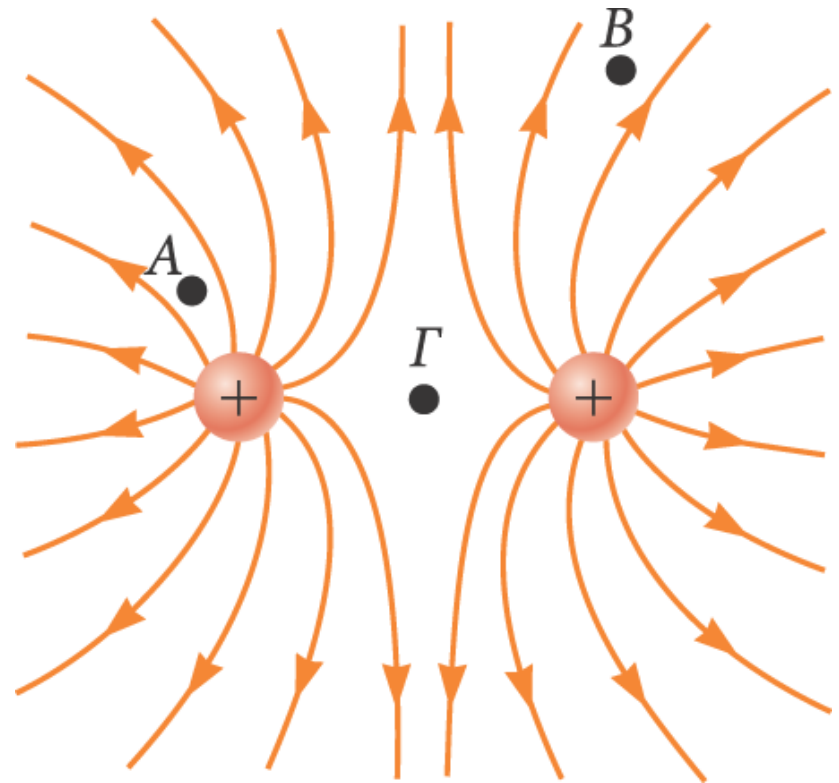
Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Ομόσημα φορτία

Τα φορτία είναι ίσα και θετικά.

Επειδή τα φορτία είναι ίσα, από καθένα τους ξεκινά ίδιο πλήθος γραμμών.

Σε μεγάλη απόσταση, το πεδίο είναι περίπου ίσο με εκείνο ενός σημειακού φορτίου με τιμή $2q$.

Επειδή δεν υπάρχουν αρνητικά φορτία, οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου εκτείνονται έως το άπειρο.



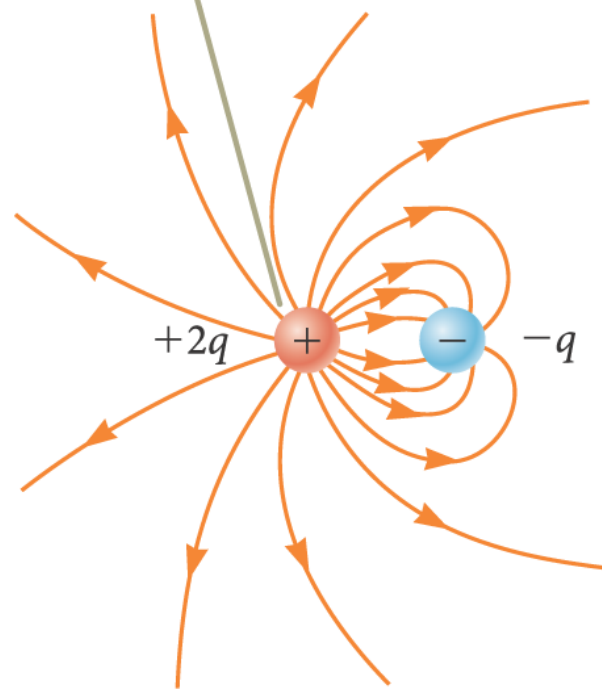
Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Άνισα και ετερόσημα φορτία

Το θετικό φορτίο έχει διπλάσια τιμή από το αρνητικό φορτίο.

Το πλήθος των γραμμών που ξεκινούν από το θετικό φορτίο είναι διπλάσιο εκείνου που καταλήγουν στο αρνητικό φορτίο.

Σε μεγάλη απόσταση, το πεδίο είναι περίπου ίσο με εκείνο ενός σημειακού φορτίου με τιμή $+q$.

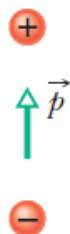
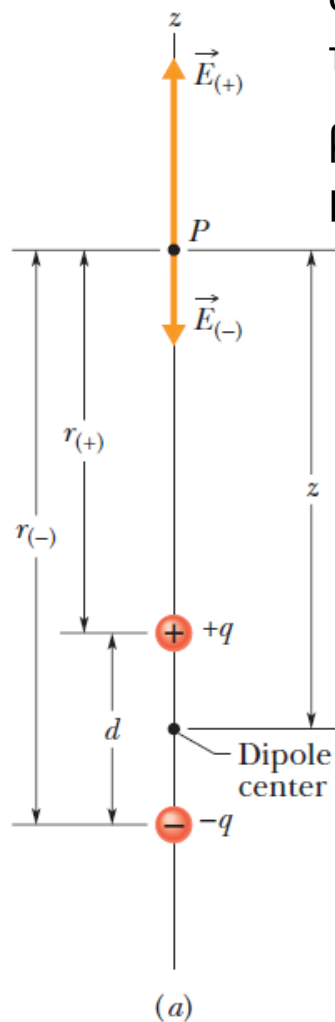
Οι μισές γραμμές που ξεκινούν από το $+2q$ καταλήγουν στο $-q$ και οι άλλες μισές καταλήγουν στο άπειρο.



Ηλεκτρικό πεδίο που οφείλεται σε ηλεκτρικό δίπολο

α) Ηλεκτρικό δίπολο και ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα του διπόλου

β) Η ηλεκτρική διπολική ροπή $\mathbf{p}$ με μέτρο qd



$$E = E_{(+)} - E_{(-)}$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_{(+)}^2} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_{(-)}^2}$$

$$= \frac{q}{4\pi\epsilon_0(z - \frac{1}{2}d)^2} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0(z + \frac{1}{2}d)^2}$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2} \left(\frac{1}{\left(1 - \frac{d}{2z}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 + \frac{d}{2z}\right)^2} \right)$$

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 z^2} \frac{2d/z}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 z^3} \frac{d}{\left(1 - \left(\frac{d}{2z}\right)^2\right)^2}$$

$$d/2z \ll 1$$

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{qd}{z^3}$$

$$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{p}{z^3} \quad (\text{electric dipole}).$$

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί μια συνεχής κατανομή φορτίων

Οι αποστάσεις μεταξύ των φορτίων μιας ομάδας από φορτία μπορεί να είναι πολύ μικρότερες από την απόσταση μεταξύ αυτής της ομάδας και του σημείου που μελετούμε.

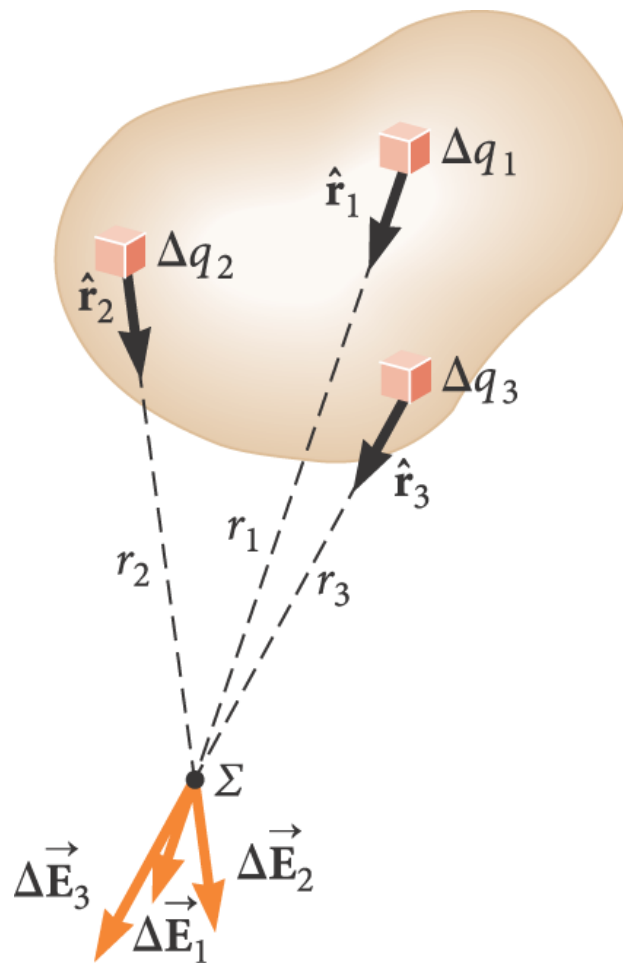
Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορούμε να μοντελοποιήσουμε το σύστημα φορτίων ως συνεχές.

Το σύστημα των φορτίων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ισοδυναμεί με ένα συνολικό φορτίο συνεχώς κατανεμημένο σε μια ευθεία, μια επιφάνεια ή έναν όγκο.

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί μια συνεχής κατανομή φορτίων (συνέχεια)

Μεθοδολογία:

- Διαιρούμε την κατανομή φορτίου σε στοιχειώδη φορτία, καθένα από τα οποία έχει φορτίο Δq .
- Υπολογίζουμε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί ένα από αυτά τα στοιχειώδη φορτία στο σημείο Σ .
- Υπολογίζουμε το συνολικό πεδίο αθροίζοντας τις συνεισφορές όλων των στοιχειωδών φορτίων.



Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί μια συνεχής κατανομή φορτίων – Εξισώσεις

Για κάθε στοιχειώδες φορτίο,

$$\Delta \vec{\mathbf{E}} = k_e \frac{\Delta q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Επειδή η κατανομή φορτίου είναι συνεχής,

$$\vec{\mathbf{E}} = k_e \lim_{\Delta q_i \rightarrow 0} \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i = k_e \int \frac{dq}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$$

Πυκνότητα φορτίου

Χωρική πυκνότητα φορτίου: Το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όγκο V .

- $\rho \equiv Q / V$ με μονάδες C/m^3

Επιφανειακή πυκνότητα φορτίου: Το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε επιφάνεια εμβαδού A .

- $\sigma \equiv Q / A$ με μονάδες C/m^2

Γραμμική πυκνότητα φορτίου: Το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος ευθείας μήκους ℓ .

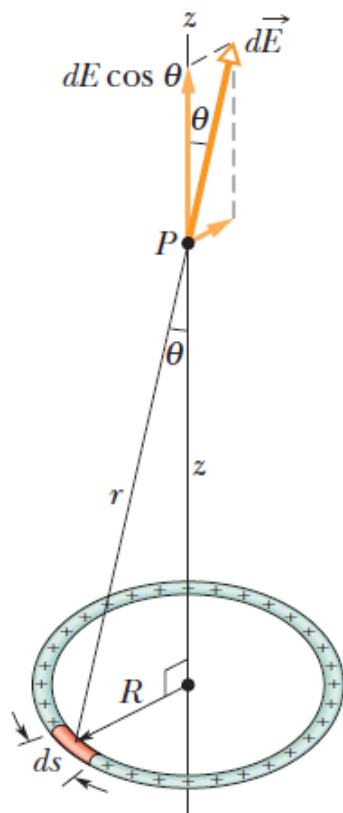
- $\lambda \equiv Q / \ell$ με μονάδες C/m

Ποσότητα φορτίου σε στοιχειώδη όγκο

Αν το φορτίο δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στον όγκο, την επιφάνεια ή την ευθεία, τότε η ποσότητα του στοιχειώδους φορτίου, dq , δίνεται από τις σχέσεις:

- Για έναν στοιχειώδη όγκο: $dq = \rho \, dV$
- Για μια στοιχειώδη επιφάνεια: $dq = \sigma \, dA$
- Για ένα στοιχειώδες ευθύγραμμο τμήμα: $dq = \lambda \, d\ell$

Ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα φορτισμένου δακτυλίου



$$dq = \lambda ds.$$

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda ds}{r^2}.$$

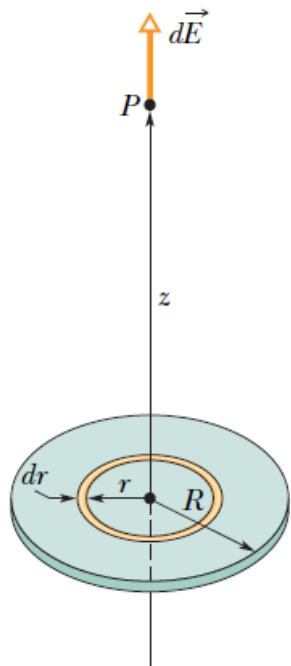
$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda ds}{(z^2 + R^2)}.$$

$$dE \cos \theta = \frac{z\lambda}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}} ds.$$

$$\begin{aligned} E &= \int dE \cos \theta = \frac{z\lambda}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}} \int_0^{2\pi R} ds \\ &= \frac{z\lambda(2\pi R)}{4\pi\epsilon_0(z^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qz}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \end{aligned}$$

ολικό
φορτίο
δακτύλου $Q = \lambda \cdot 2\pi R$

Ηλεκτρικό πεδίο στον άξονα φορτισμένου δίσκου



$$dq = \sigma dA = \sigma (2\pi r dr),$$

ηλεκ. πεδίο στοιχείου
ακτίνας r

$$dE = \frac{z\sigma 2\pi r dr}{4\pi\epsilon_0(z^2 + r^2)^{3/2}} = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \frac{2r dr}{(z^2 + r^2)^{3/2}}$$

$$E = \int dE = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \int_0^R (z^2 + r^2)^{-3/2} (2r) dr. = \frac{\sigma z}{4\epsilon_0} \left[\frac{(z^2 + r^2)^{-1/2}}{-\frac{1}{2}} \right]_0^R.$$



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \left(1 - \frac{z}{\sqrt{z^2 + R^2}} \right) \quad (\text{charged disk})$$

$R \rightarrow \infty$



$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (\text{infinite sheet}).$$

Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων

Αν ένα φορτισμένο σωματίδιο βρεθεί μέσα σε ένα ηλεκτρικό πεδίο, θα δεχτεί μια ηλεκτρική δύναμη.

Αν αυτή είναι η μόνη δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο, τότε είναι και η συνισταμένη δύναμη που δέχεται.

Η συνισταμένη δύναμη θα επιταχύνει το σωματίδιο σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα.

Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων (συνέχεια)

$$\vec{F}_e = q\vec{E} = m\vec{a}$$

Αν το πεδίο είναι ομογενές, τότε η επιτάχυνση θα είναι σταθερή.

Η κίνηση ενός τέτοιου σωματιδίου περιγράφεται από το μοντέλο του σταθερά επιταχυνόμενου σωματιδίου.

- Υπό την επίδραση της ηλεκτρικής δύναμης, το σωματίδιο κινείται σύμφωνα με τα γνωστά μοντέλα δυνάμεων και κίνησης.

Αν το σωματίδιο φέρει θετικό φορτίο, η επιτάχυνσή του έχει την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου.

Αν το σωματίδιο φέρει αρνητικό φορτίο, η επιτάχυνσή του έχει κατεύθυνση αντίθετη από εκείνη του ηλεκτρικού πεδίου.

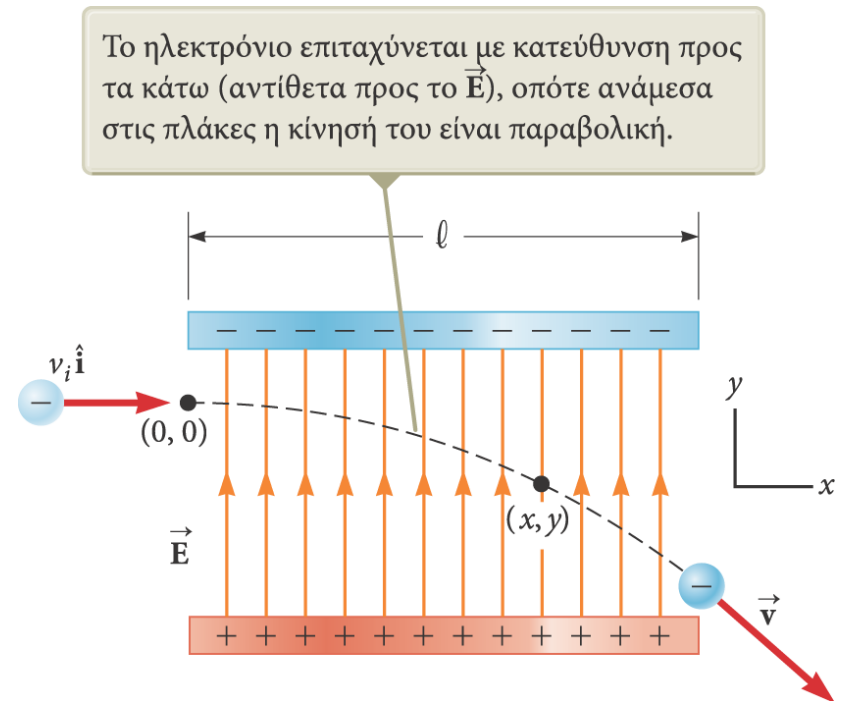
Ηλεκτρόνιο μέσα σε ομογενές πεδίο – Παράδειγμα

Το ηλεκτρόνιο βάλλεται οριζόντια σε ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

Το ηλεκτρόνιο επιταχύνεται με κατεύθυνση προς τα κάτω.

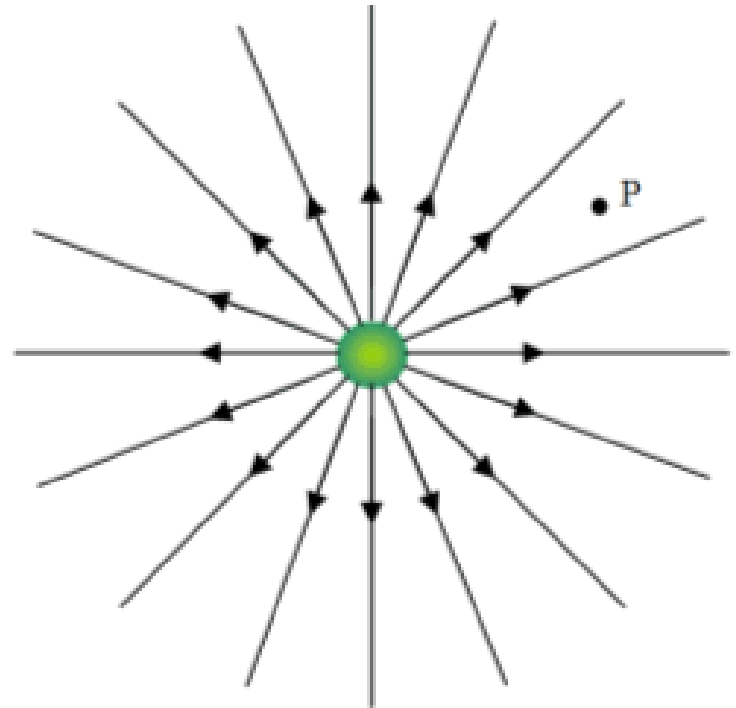
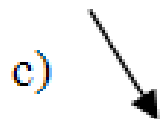
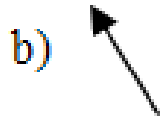
- Το ηλεκτρόνιο είναι αρνητικά φορτισμένο, επομένως η επιτάχυνσή του είναι αντίθετη της κατεύθυνσης του πεδίου.

Όσο βρίσκεται μεταξύ των φορτισμένων πλακών, διαγράφει παραβολική τροχιά.



Στο σχήμα, οι συνεχείς γραμμές με τα βέλη αντιπροσωπεύουν το ηλεκτρικό πεδίο που οφείλεται στο φορτισμένο αντικείμενο. Ένα ηλεκτρόνιο τοποθετείται στο σημείο P και απελευθερώνεται από την ηρεμία. Ποιο από τα παρακάτω διανύσματα αντιπροσωπεύει την κατεύθυνση της δύναμης, εάν υπάρχει, στο ηλεκτρόνιο;

a) Η δύναμη θα είναι μηδέν



Ένα ηλεκτρόνιο που ταξιδεύει οριζόντια προς τα δεξιά εισέρχεται σε μια περιοχή όπου ένα ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο κατευθύνεται προς τα κάτω. Ποια είναι η κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο ηλεκτρόνιο μόλις εισέλθει στο πεδίο;

- a) Προς τα επάνω
- b) Προς τα κάτω
- c) Προς τα δεξιά
- d) Προς τα αριστερά
- e) Δε θα ασκηθεί δύναμη

Ένα θετικά φορτισμένο αντικείμενο βρίσκεται στα αριστερά ενός αρνητικά φορτισμένου αντικειμένου όπως φαίνεται. Εμφανίζονται γραμμές ηλεκτρικού πεδίου που συνδέουν τα δύο αντικείμενα. Τα πέντε σημεία στις γραμμές ηλεκτρικού πεδίου φέρουν τις ετικέτες A, B, C, D και E. Σε ποιο από αυτά τα σημεία ένα δοκιμαστικό φορτίο θα δεχόταν τη μεγαλύτερη και σε ποιο τη μικρότερη δύναμη;

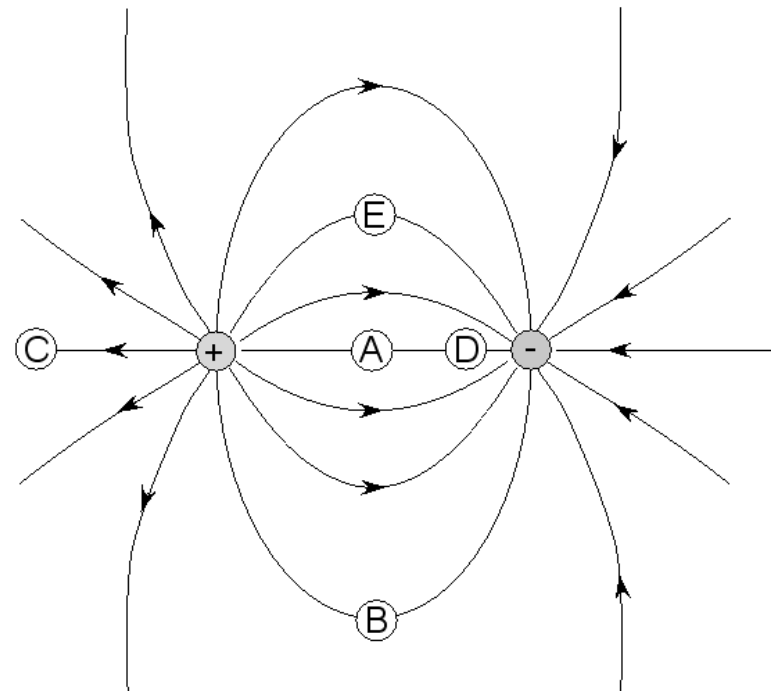
a) A

b) B

c) C

d) D

e) E



Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων

Μοντελοποίηση

- Σχηματίστε μια νοερή εικόνα του προβλήματος.
- Φανταστείτε το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από τα φορτία ή την κατανομή των φορτίων.

Κατηγοριοποίηση

- Πρόκειται για ένα μεμονωμένο φορτίο;
- Πρόκειται για μια ομάδα μεμονωμένων φορτίων;
- Πρόκειται για μια συνεχή κατανομή φορτίων;

Μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων (συνέχεια)

Ανάλυση

- **Ανάλυση μιας ομάδας μεμονωμένων φορτίων:**
 - Χρησιμοποιήστε την αρχή της υπέρθεσης, υπολογίστε τα πεδία που δημιουργούνται από τα επιμέρους φορτία στο υπό μελέτη σημείο, και έπειτα προσθέστε διανυσματικά τα πεδία για να βρείτε το συνιστάμενο πεδίο.
 - Προσοχή στη χρήση των διανυσματικών ποσοτήτων.
- **Ανάλυση μιας συνεχούς κατανομής φορτίου:**
 - Αντικαταστήστε τα διανυσματικά αθροίσματα, που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του ολικού ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο από τα επιμέρους φορτία, με διανυσματικά ολοκληρώματα.
 - Διαιρέστε την κατανομή φορτίου σε απειροστά τμήματα και υπολογίστε το διανυσματικό άθροισμα ολοκληρώνοντας σε ολόκληρο το εύρος της κατανομής φορτίου.
- **Συμμετρία:**
 - Εκμεταλλευτείτε τη συμμετρία, εφόσον υπάρχει, για να απλουστεύσετε τους υπολογισμούς.