



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική

Ενότητα: Ηλεκτρομαγνητισμός

Βαρουτάς Δημήτρης  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

## Ηλεκτρικά Πεδία

## 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.

Εισαγωγή

## 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 κεχρμπάρι και μαγνητίτη.
- **1600**
  - Ο William Gilbert έδειξε ότι τα ηλεκτρικά φαινόμενα δεν περιορίζονταν μόνο στο κεχρμπάρι.
  - Τα ηλεκτρικά φαινόμενα παρατηρούνταν γενικά.
- **1785**
  - Ο Charles Coulomb επεβεβαίωσε ότι η ηλεκτρική δύναμη υπακούει στον νόμο του αντίστροφου τετραγώνου.

Εισαγωγή

## Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Πρόσθετα ιστορικά στοιχεία

- **1819**
  - Ο Hans Oersted ανακάλυψε ότι, όταν τοποθετούσε μια πηξίδα κοντά σε ένα κύκλωμα που διαρρέονταν από ηλεκτρικό ρεύμα, η βελόνα της εκτρέπονταν.
- **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.

Εισαγωγή

## 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.

Εισαγωγή

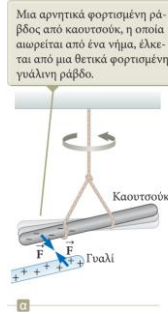
## Ηλεκτρικά φορτία (1)

- 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.

Ενότητα H1.1

## Ηλεκτρικά φορτία (2)

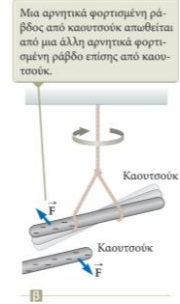
- Η ράβδος από καουτσούκ είναι αρνητικά φορτισμένη.
- Η ράβδος από γυαλί είναι θετικά φορτισμένη.
- Οι δύο ράβδοι έλκονται.



Ενότητα Η1.1

## Ηλεκτρικά φορτία (3)

- Η ράβδος από καουτσούκ είναι αρνητικά φορτισμένη.
- Η δεύτερη ράβδος από καουτσούκ είναι και αυτή αρνητικά φορτισμένη.
- Οι δύο ράβδοι απωθούνται.



Ενότητα Η1.1

## Περισσότερα στοιχεία για τα ηλεκτρικά φορτία

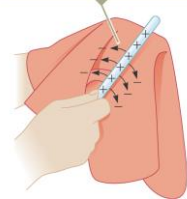
- Σε ένα απομονωμένο σύστημα, το ηλεκτρικό φορτίο πάντα διατηρείται.
  - Για παράδειγμα, όταν τρίβουμε ένα σώμα σε ένα άλλο, δεν δημιουργείται φορτίο.
  - Η ηλεκτρίση οφείλεται στη μεταφορά φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο.

Ενότητα Η1.1

## 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.



Ενότητα Η1.1

## 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:  $q = +e$

Ενότητα Η1.1

## 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.

Ενότητα Η1.2

## 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.

Ενότητα H1.2

## Ημιαγωγοί

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

Ενότητα H1.2

## Φόρτιση με επαγωγή (1)

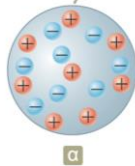
- Κατά τη φόρτιση μέσω επαγωγής, δεν απαιτείται επαφή με το σώμα που επάγει το φορτίο.

•(Α)

- Έστω ότι έχουμε μια ουδέτερη μεταλλική σφαίρα.

- Η σφαίρα έχει ίσο αριθμό θετικών και αρνητικών φορτίων.

Η ουδέτερη σφαίρα έχει ίσο πλήθος θετικών και αρνητικών φορτίων.



Ενότητα H1.2

## Φόρτιση με επαγωγή (2)

•(Β)

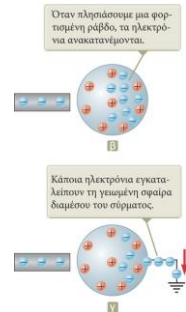
- Κοντά στη σφαίρα τοποθετείται μια φορτισμένη ράβδος από καουτσούκ.
- Η ράβδος, δεν έρχεται σε επαφή με τη σφαίρα.

- Γίνεται ανακατανομή των ηλεκτρονίων της ουδέτερης σφαίρας.

•(Γ)

- Η σφαίρα γεύνεται.

- Κάποια ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν τη γεωμένη σφαίρα διαμέσου του σύρματος.



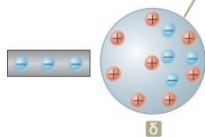
Ενότητα H1.2

## Φόρτιση με επαγωγή (3)

•(Δ)

- Αφαιρείται το σύρμα της γείωσης.
- Τώρα θα υπάρχουν περισσότερα θετικά φορτία.
- Τα φορτία δεν είναι κατανεμημένα ομοιόμορφα.
- Στη σφαίρα **επάγεται** θετικό φορτίο.

Το πλεονάζον θετικό φορτίο δεν κατανέμεται ομοιόμορφα.



Ενότητα H1.2

## Φόρτιση με επαγωγή (4)

•(Ε)

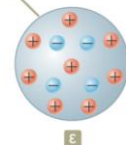
- Αφαιρείται η ράβδος.

- Τα ηλεκτρόνια που απομένουν στη σφαίρα ανακατανέμονται.
- Στη σφαίρα υπάρχει πάλι θετικό συνολικό φορτίο.

- Τώρα το φορτίο είναι κατανεμημένο ομοιόμορφα.

- Παρατηρούμε ότι η ράβδος δεν χάνει το αρνητικό φορτίο της κατά τη διαδικασία αυτή.

Τα ηλεκτρόνια που απομένουν ανακατανέμονται ομοιόμορφα, προσδίδοντας στη σφαίρα μια συνολικά ομοιόμορφη κατανομή θετικού φορτίου.



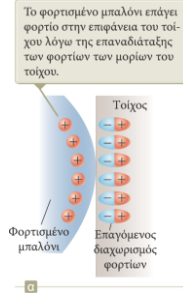
Ενότητα H1.2

## Αναδιάταξη των φορτίων στους μονωτές

•Στους μονωτές συμβαίνει μια διαδικασία παρόμοια με αυτή της επαγωγής στους αγωγούς.

•Γίνεται αναδιάταξη των φορτίων που υπάρχουν στα μόρια του υλικού.

•Η προσέγγιση των θετικών φορτίων στην επιφάνεια του σώματος και των αρνητικών φορτίων στην επιφάνεια του μονωτή προκαλεί μια ελκτική δύναμη μεταξύ του σώματος και του μονωτή.



Ενότητα H1.2

## Charles Coulomb

•1736–1806

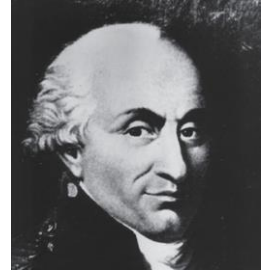
•Γάλλος φυσικός

•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



Ενότητα H1.3

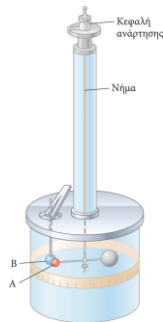
## Ο νόμος του Coulomb

•Ο Charles Coulomb μέτρησε το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ δύο μικρών φορτισμένων σφαιρών.

•Το μέτρο της δύναμης είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης  $r$  μεταξύ των φορτίων και ασκείται κατά μήκος της ευθείας που ενώνει τα δύο φορτία.

•Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο του γινομένου των τιμών των φορτίων,  $q_1$  και  $q_2$ , που φέρουν τα δύο σωματίδια.

•Ο νόμος του Coulomb δίνει το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ δύο ακίνητων σημειακών φορτίων.



Ενότητα H1.3

## 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 ιασημειωτικά την ηλεκτρική συμπεριφορά τους.

Ενότητα H1.3

## 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.

Ενότητα H1.3

## Η εξίσωση του νόμου του Coulomb

•Ο νόμος του Coulomb διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$F_e = k_e \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$$

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

•Όπου  $k_e$  είναι η **σταθερά του Coulomb**.

•  $k_e = 8.9876 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2 = 1/(4\pi \epsilon_0)$

• Όπου  $\epsilon_0$  είναι η **διηλεκτρική σταθερά του κενού** (ή ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού).

•  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N m}^2$

Ενότητα H1.3

## 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.
  - $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
  - Άρα, 1 C πρέπει να έχει  $6.24 \times 10^{18}$  ηλεκτρόνια ή πρωτόνια.
- Συνήθως τα φορτία είναι της τάξης των  $\mu\text{C}$ .
- Προσοχή: η δύναμη είναι διανυσματικό μέγεθος.

Ενότητα H1.3

## Συνοπτική αναφορά των σωματιδίων

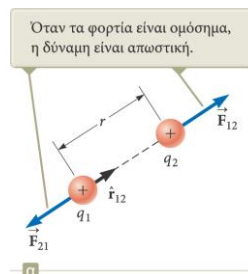
ΠΙΝΑΚΑΣ Η1.1 Φορτίο και μάζα ηλεκτρονίου, πρωτονίου, και νετρονίου.		
Σωματίδιο	Φορτίο (σε C)	Μάζα (σε kg)
Ηλεκτρόνιο ( $e$ )	$-1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$9.109\,4 \times 10^{-31}$
Πρωτόνιο ( $p$ )	$+1.602\,176\,5 \times 10^{-19}$	$1.672\,62 \times 10^{-27}$
Νετρόνιο ( $n$ )	0	$1.674\,93 \times 10^{-27}$

- 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.

Ενότητα H1.3

## Η διανυσματική φύση των ηλεκτρικών δυνάμεων (1)

- Σε διανυσματική μορφή, 
$$\vec{F}_{12} = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$
- $\hat{r}_{12}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση από το  $q_1$  προς το  $q_2$ .
- Μεταξύ ομόσημων φορτίων αναπτύσσεται απωστική δύναμη.



Ενότητα H1.3

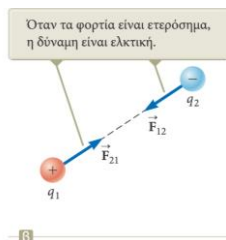
## Η διανυσματική φύση των ηλεκτρικών δυνάμεων (2)

- 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  $q_1 q_2$  είναι θετικό και η δύναμη είναι απωστική.

Ενότητα H1.3

## Η διανυσματική φύση των ηλεκτρικών δυνάμεων (3)

- Δύο ετερόσημα σημειακά φορτία βρίσκονται σε απόσταση  $r$  μεταξύ τους.
- Μεταξύ των ετερόσημων φορτίων αναπτύσσεται ελκτική δύναμη.
- Στην περίπτωση των ετερόσημων φορτίων, το γινόμενο  $q_1 q_2$  είναι αρνητικό και η δύναμη είναι ελκτική.



Ενότητα H1.3

Μια τελευταία επισήμανση σχετικά με τις κατευθύνσεις των δυνάμεων

- Το πρόσημο του γινομένου  $q_1 q_2$  δίνει τη σχετική κατεύθυνση της δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ των φορτίων  $q_1$  και  $q_2$ .
- Η απόλυτη κατεύθυνση προσδιορίζεται από τις πραγματικές θέσεις των φορτίων.

Ενότητα H1.3

## Πολλά φορτία

• 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.

•

Ενότητα H1.3

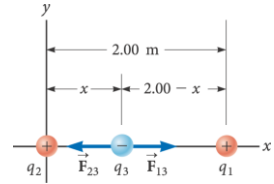
## Μηδενική συνισταμένη δύναμη – Παράδειγμα

• Σε ποιο σημείο έχει μηδενική τιμή η συνισταμένη δύναμη;

- Τα μέτρα των επιμέρους δυνάμεων θα είναι ίσα.
- Οι δυνάμεις θα έχουν αντίθετη κατεύθυνση.

• Προκύπτει μια δευτεροβάθμια εξίσωση.

• Επιλύουμε τη ρίζα της εξίσωσης για την οποία οι δυνάμεις έχουν αντίθετη κατεύθυνση.



Ενότητα H1.3

Η ηλεκτρική δύναμη σε συνδυασμό με άλλες δυνάμεις – Παράδειγμα

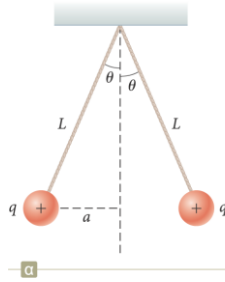
• Οι σφαίρες είναι σε ισορροπία.

• Ασκούν απωστική δύναμη η μία στην άλλη.

- Τα φορτία είναι ομόσημα.

• Μοντελοποιούμε κάθε σφαίρα ως σωματίδιο σε ισορροπία.

• Λύνουμε το πρόβλημα ως ένα πρόβλημα ισορροπίας, λαμβάνοντας υπόψη ότι μία από τις δυνάμεις είναι ηλεκτρική.



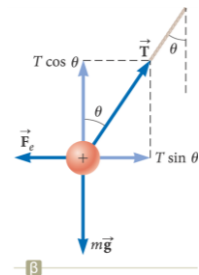
Ενότητα H1.3

Η ηλεκτρική δύναμη σε συνδυασμό με άλλες δυνάμεις – Παράδειγμα (συνέχεια)

• Το διάγραμμα δυνάμεων περιλαμβάνει τις συνιστώσες της τάσης, της ηλεκτρικής δύναμης, και του βάρους.

• Λύνουμε ως προς  $|q|$ .

• Αν δεν γνωρίζουμε το φορτίο των σφαιρών, τότε δεν μπορούμε να βρούμε το πρόσημο του  $q$ , αλλά απλώς να πούμε ότι τα φορτία είναι ομόσημα.



Ενότητα H1.3

## 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.

Ενότητα H1.4

## Το ηλεκτρικό πεδίο – 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.

Ενότητα H1.4

### Το ηλεκτρικό πεδίο – Ορισμός (συνέχεια)

- Το ηλεκτρικό πεδίο ορίζεται ως η ηλεκτρική δύναμη που ασκείται στο δοκιμαστικό φορτίο ανά μονάδα φορτίου.
- Το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου, σε ένα σημείο του χώρου ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής δύναμης που δέχεται ένα θετικό δοκιμαστικό φορτίο,  $q_0$ , που έχει τοποθετηθεί σε εκείνο το σημείο, προς το δοκιμαστικό φορτίο:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

Ενότητα H1.4

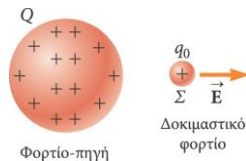
### Επισημάνσεις σχετικά με το ηλεκτρικό πεδίο

- 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.

Ενότητα H1.4

### 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.



Ενότητα H1.4

### Σχέση μεταξύ των F και E

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

- Η σχέση αυτή ισχύει μόνο για ένα σημειακό φορτίο.
- Δηλαδή φορτία με μηδενικές διαστάσεις.
- Για μεγαλύτερα σώματα, το πεδίο μπορεί έχει διαφορετική τιμή σε διαφορετικά σημεία του σώματος.
- Αν το φορτίο  $q$  είναι θετικό, τότε τα διανύσματα της δύναμης και του πεδίου είναι ομόρροπα.
- Αν το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό, τότε τα διανύσματα της δύναμης και του πεδίου είναι αντίρροπα.

Ενότητα H1.4

### Διανυσματική μορφή του ηλεκτρικού πεδίου

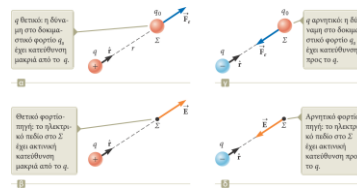
- Ο νόμος του Coulomb, ο οποίος εκφράζει τη δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ του φορτίου-πηγής και του δοκιμαστικού φορτίου, μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = k_e \frac{q}{r^2} \hat{r}$$

Ενότητα H1.4

### Περαιτέρω σχετικά με την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου

- α) Αν το φορτίο  $q$  είναι θετικό, τότε η δύναμη έχει κατεύθυνση μακριά από το  $q$ .
  - Το πεδίο έχει επίσης κατεύθυνση μακριά από το θετικό φορτίο-πηγή.
- β) Αν το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό, τότε η δύναμη έχει κατεύθυνση προς το  $q$ .
  - Το πεδίο έχει επίσης κατεύθυνση προς το αρνητικό φορτίο-πηγή.



Ενότητα H1.4



## Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν πολλά φορτία

•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.

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

Ενότητα H1.4

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.

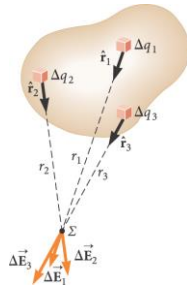
•Το σύστημα των φορτίων που βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ισοδυναμεί με ένα συνολικό φορτίο συνεχώς κατανεμημένο σε μια ευθεία, μια επιφάνεια ή έναν όγκο.

Ενότητα H1.5

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

•Μεθοδολογία:

- Διαιρούμε την κατανομή φορτίου σε στοιχειώδη φορτία, καθένα από τα οποία έχει φορτίο  $\Delta q$ .
- 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.



Ενότητα H1.5

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί μια συνεχής κατανομή φορτίων – Εξισώσεις

•Για κάθε στοιχειώδες φορτίο,

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

•Επειδή η κατανομή φορτίου είναι συνεχής,

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

Ενότητα H1.5

## Πυκνότητα φορτίου

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

- $\rho = Q/V$  με μονάδες  $C/m^3$

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

- $\sigma = Q/A$  με μονάδες  $C/m^2$

•**Γραμμική πυκνότητα φορτίου:** Το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος ευθείας μήκους  $\ell$ .

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

Ενότητα H1.5

## 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:  $dq = \lambda d\ell$

Ενότητα H1.5

## 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;

Ενότητα H1.5

## 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 συνισταμένο πεδίο.
- Προσοχή στη χρήση των διανυσματικών ποσοτήτων.

#### • Ανάλυση μιας συνεχούς κατανομής φορτίου:

- Αντικαταστήστε τα διανυσματικά άθροισμα, που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του ολικού ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο από τα επιμέρους φορτία, με διανυσματικά ολοκληρώματα.
- Διατρέψτε 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 απλοποιήσετε τους υπολογισμούς.

Ενότητα H1.5

Χρήσιμες συμβουλές για την επίλυση προβλημάτων (τελική διαφάνεια)

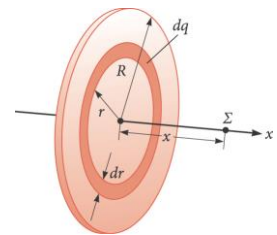
### •Ολοκλήρωση

- Ελέγξτε αν η παράσταση του ηλεκτρικού πεδίου στην οποία καταλήξατε συμφωνεί με τη νοητική σας αναπαράσταση.
- Ελέγξτε αν η λύση αντικατοπτρίζει τη συμμετρία που είχατε εντοπίσει.
- Μεταβάλλετε νοερά παραμέτρους για να να εξακριβώσετε αν το μαθηματικό αποτέλεσμα μεταβάλλεται με εύλογο τρόπο.

Ενότητα H1.5

## Φορτισμένος δίσκος – Παράδειγμα

- Ο δίσκος έχει ακτίνα  $R$  και ομοιόμορφη πυκνότητα φορτίου  $\sigma$ .
- Επιλέξτε έναν στοιχειώδη δακτύλιο ακτίνας  $r$  με στοιχειώδες φορτίο  $dq$ .
- Το εμβαδόν της επιφάνειας του στοιχειώδους δακτυλίου είναι  $2\pi r dr$ .
- Βρείτε το συνολικό πεδίο με ολοκλήρωση.



Ενότητα H1.5

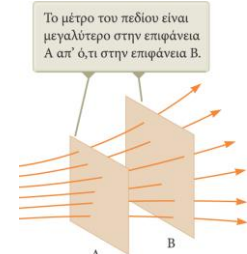
## Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου

- 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.

Ενότητα H1.6

## 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.



Ενότητα H1.6

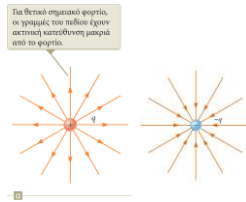
### Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Θετικό σημειακό φορτίο

• 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.



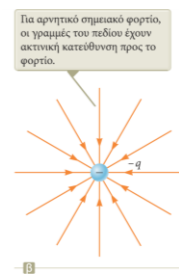
Ενότητα H1.6

### 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.



Ενότητα H1.6

### Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Κανόνες σχεδίασης

• Οι γραμμές ξεκινούν από θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά.

- Σε περίπτωση περισσεύσεως 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.

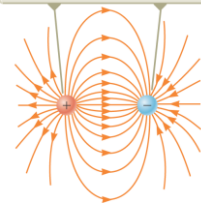
Ενότητα H1.6

### 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.



Ενότητα H1.6

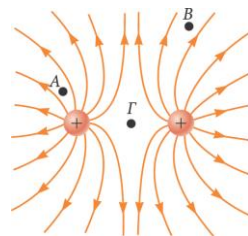
### Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Ομόσημα φορτία

• 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.



Ενότητα H1.6

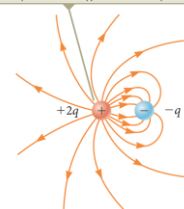
### Γραμμές ηλεκτρικού πεδίου – Άνισα και ετερόσημα φορτία

• 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.



Ενότητα H1.6

## 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.

Ενότητα Η1.7

## Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων (συνέχεια)

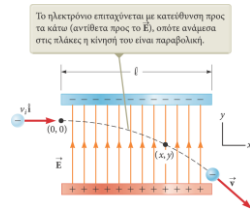
$$\vec{F}_e = q\vec{E} = m\vec{a}$$

- 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.

Ενότητα Η1.7

## 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.



Ενότητα Η1.7

Τέλος

Ηλεκτρικά πεδία

# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.





# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Βαρουτάς Δημήτρης. «Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Ηλεκτρομαγνητισμός». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI121/>.



# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

