



Ηλεκτρομαγνητισμός (205)

Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Διδάσκοντες Μαθήματος:

Αναπλ. Καθ. Κωνσταντίνος Πετρίδης (cpetridis@hmu.gr)

Επικ. Καθ. Γεώργιος Κακαβελάκης (kakavelakis@hmu.gr)

Προαπαιτούμενα μαθήματα

Δεν υπάρχουν προαπαιτούμενα μαθήματα - Συνίσταται η καλή γνώση Απειροστικού Λογισμού

Γλώσσα Διδασκαλίας και αξιολόγησης

Ελληνική και Αγγλική (αν υπάρχουν φοιτητές Erasmus)

Εβδομαδιαίες ώρες διδασκαλίας

4 ώρες θεωρίας και 1 ώρα εργαστήριο (το εργαστήριο θα ξεκινήσει όταν καλυφθεί η αντίστοιχη ύλη στη θεωρία)

Παρουσία

Θεωρία: Προαιρετική; Εργαστήριο: Υποχρεωτική (έως δυο απουσίες)

Ύλη της θεωρίας του μαθήματος

Μέρος 1° : Ηλεκτροστατική

Νόμος του Coulomb. Η έννοια του πεδίου. Ορισμός Έντασης Ηλεκτροστατικού Πεδίου. Ηλεκτρικές Δυναμικές Γραμμές. Ροή Ηλεκτροστατικού Πεδίου. Νόμος του Gauss. Η έννοια της διαφοράς δυναμικού. Η ενέργεια του ηλεκτροστατικού πεδίου. Η έννοια της χωρητικότητας. Τεχνικές υπολογισμού της χωρητικότητας. Η έννοια του πυκνωτή. Το ηλεκτροστατικό πεδίο στην ύλη. Τα διηλεκτρικά.

Μέρος 2° : Μαγνητοστατική

Η έννοια του ηλεκτρικού ρεύματος. Νόμος των Biot – Savart. Ο νόμος του Gauss στην μαγνητοστατική. Το διανυσματικό δυναμικό. Δύναμη μεταξύ ρευματοφόρων αγωγών. Νόμος του Ampere. Η μαγνητοστατική στην ύλη. Η έννοια του spin. Μια εισαγωγή στην σπιντρονική. Ρεύμα μετατόπισης. Νόμος των Ampere – Maxwell. Η έννοια της μαγνητικής ροής. Ο Νόμος του Faraday. Ο κανόνας του Lenz. Η έννοια της αυτεπαγωγής. Το πηνίο.

Μέρος 3° : Εξισώσεις του Maxwell και Εισαγωγή στα Ηλεκτρομαγνητικά Κύματα

Οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell στο κενό και στην ύλη. Η κυματική εξίσωση. Ταχύτητα του φωτός στο κενό και την ύλη. Κριτήρια δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Πίεση ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Ύλη των εργαστηριακών ασκήσεων του μαθήματος

Εργαστηριακές ασκήσεις ηλεκτρισμού

1^η Άσκηση: Φόρτιση – εκφόρτιση πυκνωτή

2^η Άσκηση: Γέφυρα Wheatstone

Εργαστηριακές ασκήσεις μαγνητισμού

3^η Άσκηση: Συντελεστή αυτεπαγωγής σωληνοειδούς

4^η Άσκηση: Φαινόμενο Hall

Εγγραφή το eclass του μαθήματος



Αναζήτηση...

Ενεργά εργαλεία

- Έγγραφα
- Ανακοινώσεις
- Ασκήσεις
- Γραμμή μάθησης
- Εργασίες
- Ερωτηματολόγια
- Ημερολόγιο
- Μηνύματα
- Ομάδες Χρηστών

 kakavelakis@hmu.gr

[Χαρτοφυλάκιο](#) / 205 - Ηλεκτρομαγνητισμός

205 - Ηλεκτρομαγνητισμός (205)

Κωσταντίνος Πετρίδης, Γεώργιος Κακαβελάκης

Περιγραφή 



Το μάθημα καλύπτει το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση των θεμελιωδών αρχών της ηλεκτροστατικής, της μαγνητοστατικής και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Μετά την ολοκλήρωση του μαθήματος οι φοιτητές θα είναι σε θέση να κατανοήσουν τις έννοιες του πεδίου, τα ηλεκτροστατικά φαινόμενα στη φύση και διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές (κεραυνοί, διαφορά δυναμικού, δίοδος pn, τρίοδος, κλωβός Faraday, αλεξικέραυνο, πυκνωτής, ρεύμα), τα μαγνητοστατικά φαινόμενα στη φύση και διάφορες ηλεκτρονικές συσκευές (πηγές μαγνητοστατικού πεδίου, ρεύμα, πηνίο, ενέργεια μαγνητικού πεδίου), τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και τα χαρακτηριστικά τους (αλληλεπίδραση χρονικά μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου με μαγνητικό πεδίο, εξισώσεις του Maxwell, ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού κύματος, πίεση ηλεκτρομαγνητικού κύματος, εφαρμογές στην οπτική και τα laser).

Εργαστηριακό μάθημα

Περιγραφή:

Το εργαστηριακό μέρος του μαθήματος παρέχει στους φοιτητές τη θεωρητική περιγραφή και την πειραματική εξάσκηση σε θεματι

[Περισσότερα](#) ↓

[Πληροφορίες](#) +



Τρόπος αξιολόγησης

- 30% - Εξέταση θεωρίας εργαστηριακών ασκήσεων
- 20% - Αναφορές εργαστηριακών ασκήσεων
- 50% - Τελική εξέταση

Βιβλιογραφία

Προτεινόμενη Βιβλιογραφία:

- Φυσική, Τόμος 2, Halliday-Resnick-Krane
- Πανεπιστημιακή Φυσική, Τόμος Β', H.D. Young & R.A. Freedman
- Φυσική, Τόμος Β', Halliday-Resnick-Walker
- **Physics for Scientists & Engineers Τόμος II Ηλεκτρομαγνητισμός, Serway (εκδόσεις Παπασωτηρίου)**
- Σημειώσεις Διδάσκοντα

Βιβλιογραφία στα Αγγλικά

- Physics for Scientists & Engineers by Serway

Εισαγωγή: Ηλεκτρισμός & Μαγνητισμός

Εισαγωγή: Ηλεκτρισμός & Μαγνητισμός

- Κλάδος της φυσικής που μελετά ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα
- Οι νόμοι του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού καθορίζουν τη λειτουργία σημαντικών ηλεκτρικών διατάξεων όπως πχ ραδιόφωνα, τηλεοράσεις, υπολογιστές, ηλεκτρικές, επιταχυντές σωματιδίων
- Οι ενδοατομικές και ενδομοριακές δυνάμεις, στις οποίες οφείλεται η συνοχή των στερεών και υγρών οφείλονται στον ηλεκτρισμό
- Γενικά όλα τα φαινόμενα που αντιλαμβανόμαστε με τις αισθήσεις μας (με εξαίρεση φαινόμενα που οφείλονται στη βαρύτητα) είναι, στο επίπεδο του ατόμου, αποτέλεσμα ηλεκτρικών δυνάμεων

Εισαγωγή: Ηλεκτρισμός & Μαγνητισμός

- Από το 2000 πΧ οι Κινέζοι είχαν παρατηρήσει μαγνητικά φαινόμενα
- Το 700 πΧ οι Αρχαίοι Έλληνες είχαν παρατηρήσει ότι αν τρίψεις ένα κομμάτι από ήλεκτρο (κεχριμπάρι) σε ένα ύφασμα, τότε το ήλεκτρο έλκει ελαφρά αντικείμενα (πχ πούπουλα)
- Επίσης παρατήρησαν ότι κομμάτια του ορυκτού μαγνητίτης (Fe_3O_4) έλκονται από το σίδηρο.
- Έτσι έδωσαν την ονομασία ηλεκτρισμός στα φαινόμενα που παρατηρούσαν όταν έτριβαν το ήλεκτρο και την ονομασία μαγνητισμός στα φαινόμενα που οφειλόταν στο ορυκτό Fe_3O_4 (ορυκτό που εξόρυξαν στη Μαγνησία, από όπου πήρε το όνομα του το ορυκτό).

Εισαγωγή: Ηλεκτρισμός & Μαγνητισμός

- Πολύ αργότερα, περίπου το 1600, ο William Gilbert ανακάλυψε ότι το φαινόμενο του ηλεκτρισμού ήταν γενικό φαινόμενο (δεν περιοριζόταν στο ηλεκτρο).
- Το 1785 ο Charles Coulomb, απέδειξε πειραματικά ότι ο νόμος της ηλεκτρικής δύναμης, είναι νόμος αντίστροφου τετραγώνου
- Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα έγινε αντιληπτό ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός είναι συγγενή φαινόμενα.
- Το 1820 ο Oersted παρατήρησε ότι η βελόνη της μαγνητικής πυξίδας εκτρέπεται από τη θέση της όταν βρίσκεται κοντά σε σύρματα μέσα από τα οποία διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα.
- Το 1831 οι Faraday και Henry παρατήρησαν (ανεξάρτητα) ότι όταν ένα σύρμα κινείται κοντά σε ένα μαγνήτη, τότε μέσα στο σύρμα δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα.

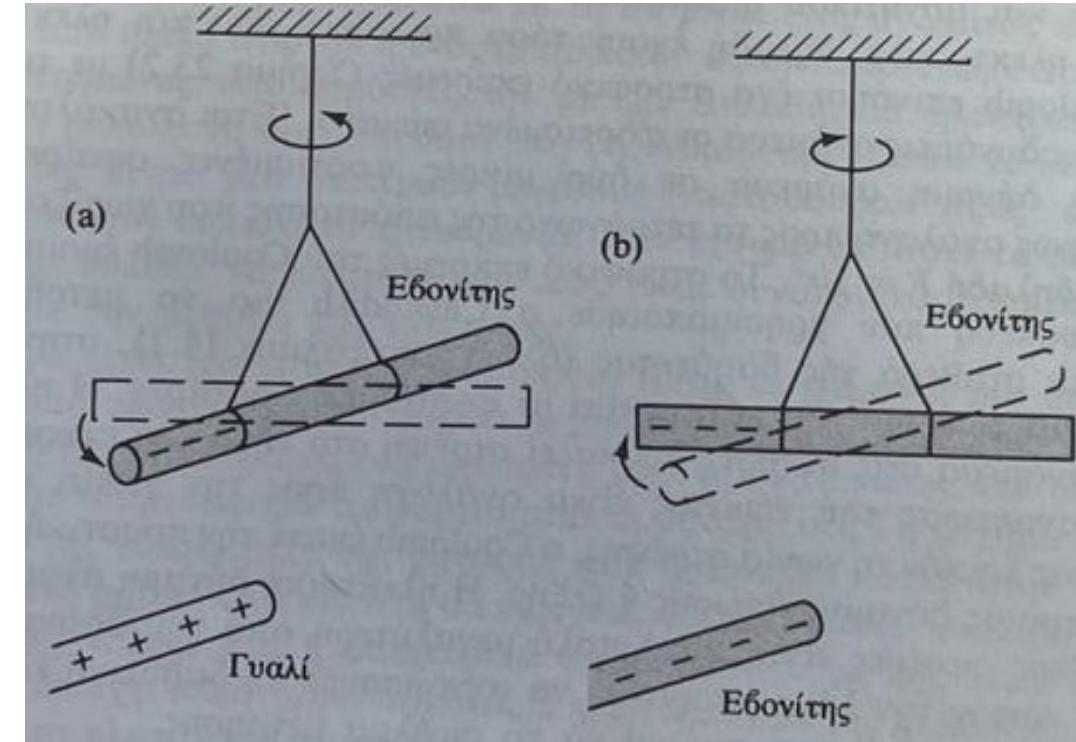
Εισαγωγή: Ηλεκτρισμός & Μαγνητισμός

- Το 1873 ο Maxwell, βασιζόμενος σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις που είχαν γίνει ως τότε, διατύπωσε τους νόμους του ηλεκτρομαγνητισμού.
- Ο όρος ηλεκτρομαγνητισμός εκφράζει συνδυασμένα τα συγγενή ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα
- Το 1888 ο Herz επιβεβαίωσε τις προβλέψεις του Maxwell, και παρήγαγε στο εργαστήριο του ηλεκτρομαγνητικά κύματα
- Στην ανακάλυψη αυτή οφείλεται η σημερινή τηλεόραση και ραδιοφωνία
- Η συμβολή του Maxwell στην επιστήμη είναι συγκρίσιμη με αυτή του Newton

1. Ηλεκτρικά Πεδία

1.1 Ιδιότητες των ηλεκτρικών φορτίων

- Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη ανάμεσα σε φορτισμένα σωματίδια είναι μια από τις θεμελιώδεις δυνάμεις στη φύση
- Ένα απλό πείραμα για την απόδειξη της παρουσίας ηλεκτρικών δυνάμεων και ηλεκτρικών φορτίων είναι το εξής:
- ✓ Να τρίψουμε με ένα μάλλινο ύφασμα ένα αντικείμενο πχ ένα μπαλόνι. Τότε το μπαλόνι αν το ακουμπήσουμε στον τοίχο αυτό θα κολλήσει εκεί για πολλή ώρα
- Όταν τα υλικά συμπεριφέρονται κατ' αυτό τον τρόπο λέμε ότι έχουν φορτιστεί ηλεκτρικά ή έχουν ηλεκτρικό φορτίο
- Ο Franklin το ~1700 απέδειξε ότι τα ηλεκτρικά φορτία είναι δύο ειδών, θετικά και αρνητικά
- Όταν φέρουμε κοντά δύο θετικά φορτισμένα σώματα αυτά απωθούνται, ενώ όταν φέρουμε κοντά ένα θετικά και ένα αρνητικά σώμα αυτά έλκονται
- Πχ μια γυάλινη ράβδος φορτίζεται θετικά, ενώ μια ράβδος από Εβονίτη φορτίζεται αρνητικά
- Μια σημαντική ιδιότητα είναι ότι το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται πάντοτε. Όταν δυο σώματα τρίβονται, φορτίο μεταφέρεται από το ένα σώμα στο άλλο
- Άρα όταν τρίβουμε τη γυάλινη ράβδο με το ύφασμα, το ύφασμα παίρνει αρνητικό φορτίο που είναι ίσο με την ποσότητα θετικού φορτίου που πήρε η γυάλινη ράβδος.
- Τα ηλεκτρόνια λοιπόν μετακινούνται από το γυαλί στο ύφασμα. Το ανάποδο γίνεται όταν τρίβουμε τον εβονίτη με το ύφασμα
- Η ηλεκτρικά ουδέτερη ύλη αποτελείται από ίσο αριθμό θετικών (πρωτόνια) και αρνητικών (ηλεκτρόνια) φορτίων



1.1 Ιδιότητες των ηλεκτρικών φορτίων

- Το ηλεκτρικό φορτίο υπάρχει στη φύση σε ακέραια πολλαπλάσια ενός θεμελιώδους ηλεκτρικού φορτίου, e .
- Άρα το ηλεκτρικό φορτίο είναι κβαντισμένο. $q = Ne$, όπου N ακέραιος αριθμός.
- Το ηλεκτρόνιο έχει φορτίο $-e$, ενώ το πρωτόνιο έχει φορτίο $+e$
- Ο Coulomb μέτρησε τη δύναμη ανάμεσα σε φορτισμένα σώματα και απέδειξε ότι ισχύει το εξής: $F \sim 1/r^2$

1.1 Ιδιότητες των ηλεκτρικών φορτίων

Ανακεφαλαιώνοντας τις ιδιότητες του ηλεκτρικού φορτίου:

1. Στη φύση υπάρχουν δύο είδη ηλεκτρικού φορτίου. Τα ομώνυμα φορτία απωθούνται, ενώ τα ετερόνυμα φορτία έλκονται
2. Η δύναμη ανάμεσα σε ηλεκτρικά φορτία, είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης τους ($F \sim 1/r^2$)
3. Το ηλεκτρικό φορτίο διατηρείται
4. Το ηλεκτρικό φορτίο είναι κβαντισμένο ($q = Ne$)

1.2 Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί

- Είναι σημαντικό να ταξινομήσουμε τα διάφορα υλικά με κριτήριο το αν αφήνουν να περάσουν ή όχι από μέσα τους τα ηλεκτρικά φορτία.
- Μονωτές ή διηλεκτρικά είναι τα υλικά (πχ γυαλί, καουτσούκ, κλπ) που δεν αφήνουν τα ηλ. Φορτία να τα διαπεράσουν
 - Όταν φορτιστεί ένας μονωτής, το φορτίο παραμένει στην επιφάνεια και δε μπορεί να μετακινηθεί
- Ενώ ονομάζουμε αγωγούς τα υλικά (πχ χαλκός, αλουμίνιο, κλπ) που αφήνουν τα φορτία να κινούνται μέσα τους
 - Μόλις φορτιστεί ένας αγωγός, αμέσως το φορτίο διασπείρεται σε όλη την επιφάνεια

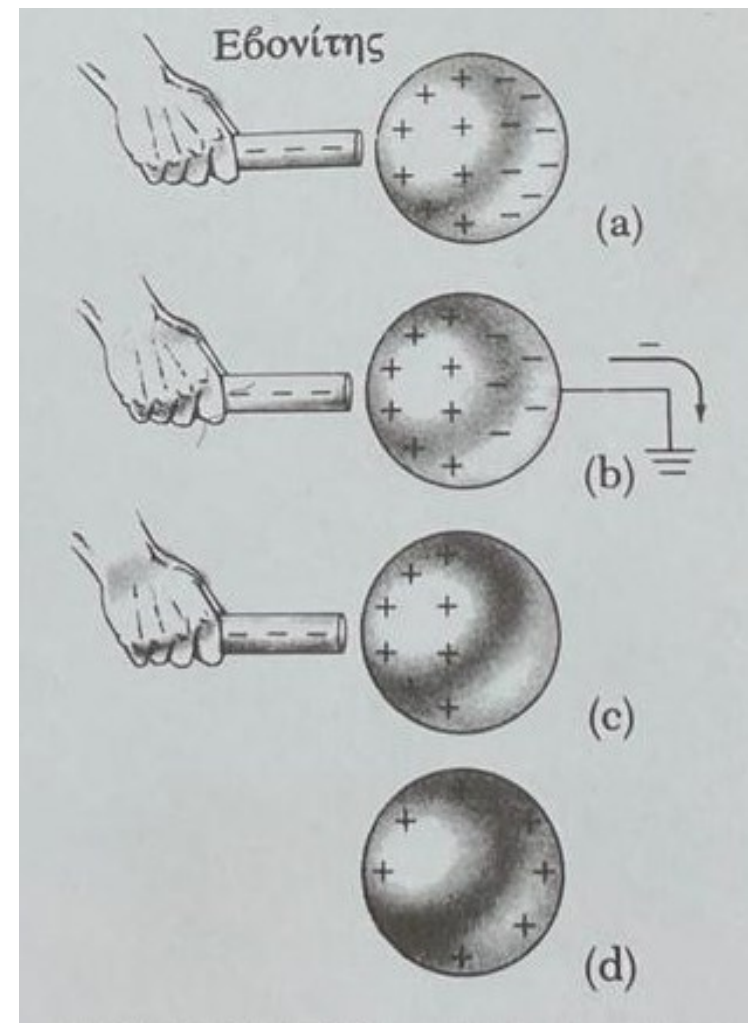
1.2 Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί

- Όταν αγωγός συνδέεται με τη γη, μέσω αγώγιμου σύρματος ή μέσω επαφής με ένα άνθρωπο (που πατάει πάνω στην επιφάνεια της γης), τότε λέμε ότι ο αγωγός είναι γειωμένος. Άρα τα ηλ. φορτία εύκολα διοχετεύονται στη γη. Η γη είναι μια άπειρου μεγέθους 'καταβόθρα' προς την οποία μεταναστεύουν εύκολα τα ηλεκτρόνια.
- Σύμβολο γείωσης: $\perp$
- Έτσι μπορούμε να φορτίσουμε ένα αγωγό με τη **μέθοδο της επαγωγής**

1.2 Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί

➤ Φόρτιση εξ επαγωγής

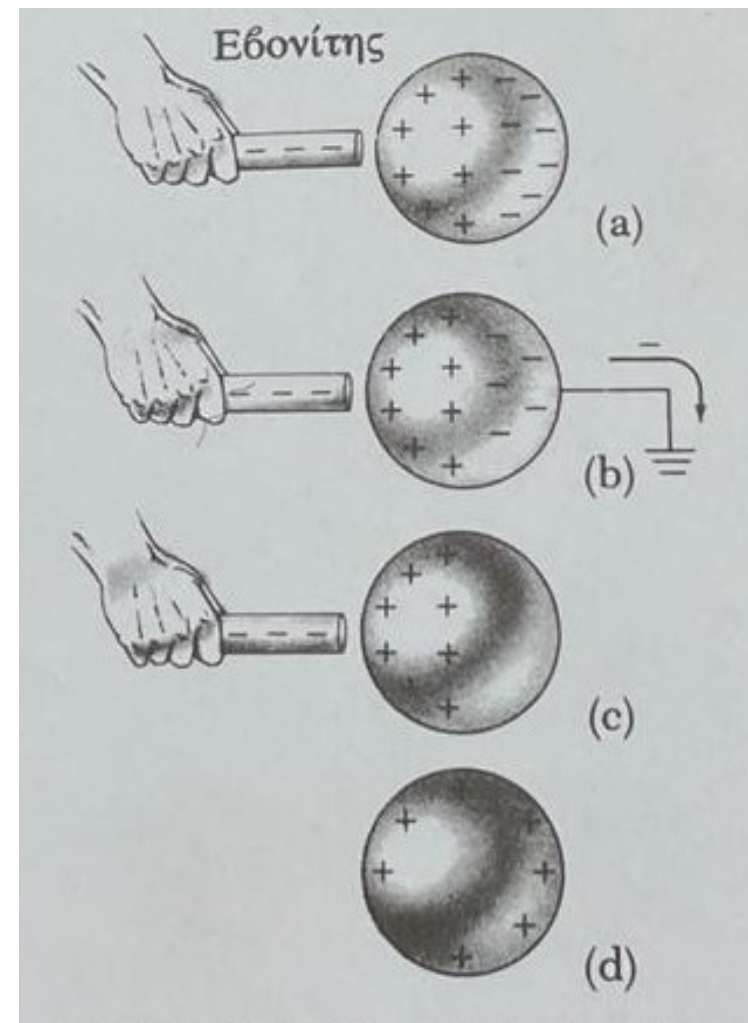
- (α) Φέρνουμε μια φορτισμένη ράβδο από εβονίτη κοντά σε μια μεταλλική σφαίρα που είναι ηλεκτρικά ουδέτερη και είναι ηλεκτρικά μονωμένη από τη γη (δεν συνδέεται με κάποιο αγωγό) ώστε να μεταφέρει τα φορτία από τη σφαίρα προς τη γη)
 - Η περιοχή που βρίσκεται κοντά στην αρνητικά φορτισμένη ράβδο αποκτά πλεόνασμα θετικών φορτίων λόγω ηλ. έλξης
 - Ενώ η απέναντι περιοχή αποκτά πλεόνασμα αρνητικών φορτίων λόγω ηλ. άπωσης



1.2 Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί

➤ Φόρτιση εξ επαγωγής

- (b) Αν επαναλάβουμε το προηγούμενο πείραμα, αλλά έχουμε γειώσει την μεταλλική σφαίρα, τότε θα παρατηρήσουμε ότι μέρος των ηλεκτρονίων της σφαίρας θα μεταβούν στη γη
- (c) Στη συνέχεια αν αφαιρέσουμε τη γείωση, θα δούμε ότι η σφαίρα έχει πλεόνασμα θετικών φορτίων, και λέμε ότι φορτίστηκε ηλεκτρικά εξ επαγωγής
- (d) Τέλος αν απομακρύνουμε τη ράβδο εβονίτη από τη μεταλλική σφαίρα, τότε θα δούμε ότι το θετικό φορτίο θα ισοκατανεμηθεί πάνω στην επιφάνεια της σφαίρας, αφού τα όμοια φορτία απωθούνται
 - Παρατήρηση: Κατά τη διάρκεια όλης αυτής της διαδικασίας, η ράβδος εβονίτη δεν έχασε καθόλου από το αρνητικό της φορτίο



1.2 Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί

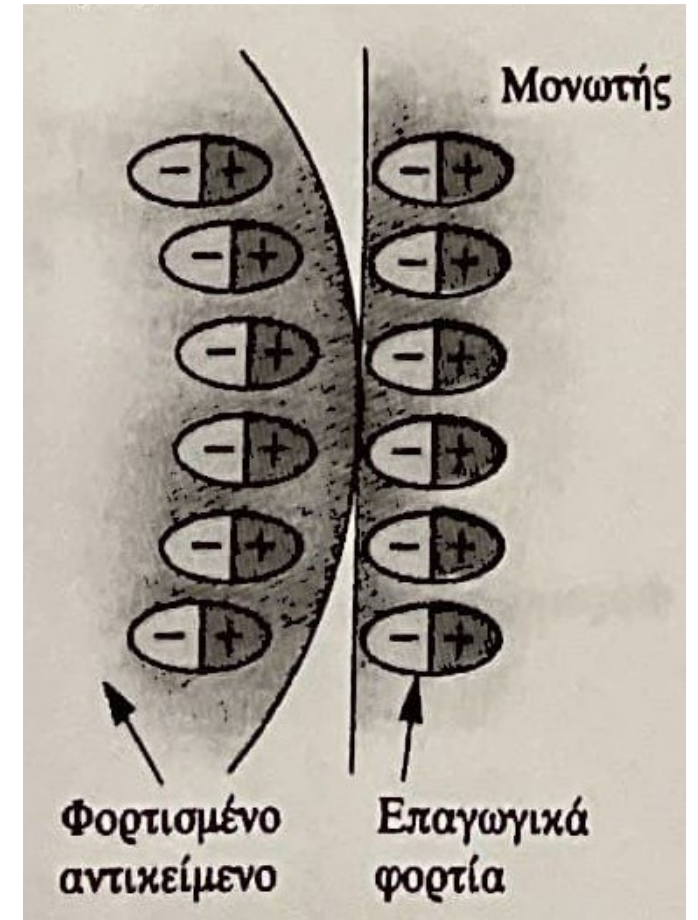
➤ Διαφορά φόρτισης εξ επαγωγής και φόρτισης με τριβή

- Για να φορτίσουμε ηλεκτρικά ένα σώμα εξ επαγωγής, δε χρειάζεται να το αγγίξουμε με το σώμα που είναι φορτισμένο
- Αντίθετα, για να φορτίσουμε ένα σώμα με τριβή πρέπει να αγγίξουμε τα δυο σώματα. Αυτή η μέθοδος φόρτισης λέγεται εξ επαφής.

1.2 Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί

➤ Φόρτιση μονωτή

- Για να φορτίσουμε ηλεκτρικά ένα μονωτή, χρησιμοποιούμε μια μέθοδο που μοιάζει με την εξ επαγωγής φόρτιση ενός αγωγού.
- Σε ένα μονωτή τα φορτία είναι δέσμια με τα άτομα (δεν κινούνται ελεύθερα) και ο αριθμός τους είναι παρόμοιος
- Όταν τα άτομα ενός μονωτή βρίσκονται κοντά σε ένα φορτισμένο σώμα (πχ θετικά φορτισμένο), τότε επάγεται (αρνητικό) φορτίο στιγμιαία στην επιφάνεια του μονωτή
- Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται πόλωση
- Είναι σημαντικό να θυμόμαστε ότι το επαγόμενο αυτό φορτίο στην επιφάνεια του μονωτή δεν είναι ελεύθερο να κινηθεί (είναι δέσμιο).



1.3 Ο νόμος του Coulomb

- Ο Coulomb, μετά από σειρά πειραμάτων, διατύπωσε το θεμελιώδη νόμο που περιγράφει την ηλεκτρική δύναμη ανάμεσα σε δύο ακίνητα φορτισμένα σώματα που έχει τις εξής ιδιότητες:
 - 1) Η δύναμη είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης r που χωρίζει τα δύο σώματα και η διεύθυνση της συμπίπτει με τη γραμμή που τα ενώνει
 - 2) Η δύναμη είναι ανάλογη με το γινόμενο των φορτίων q_1 και q_2 των δυο σωμάτων
 - 3) Η δύναμη είναι ελκτική αν τα φορτία των δυο σωμάτων είναι ετερόνυμα και απωστική αν είναι ομώνυμα.

Άρα με βάση τα παραπάνω συμπεράνουμε ότι η ηλ. δύναμη είναι: $F = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$

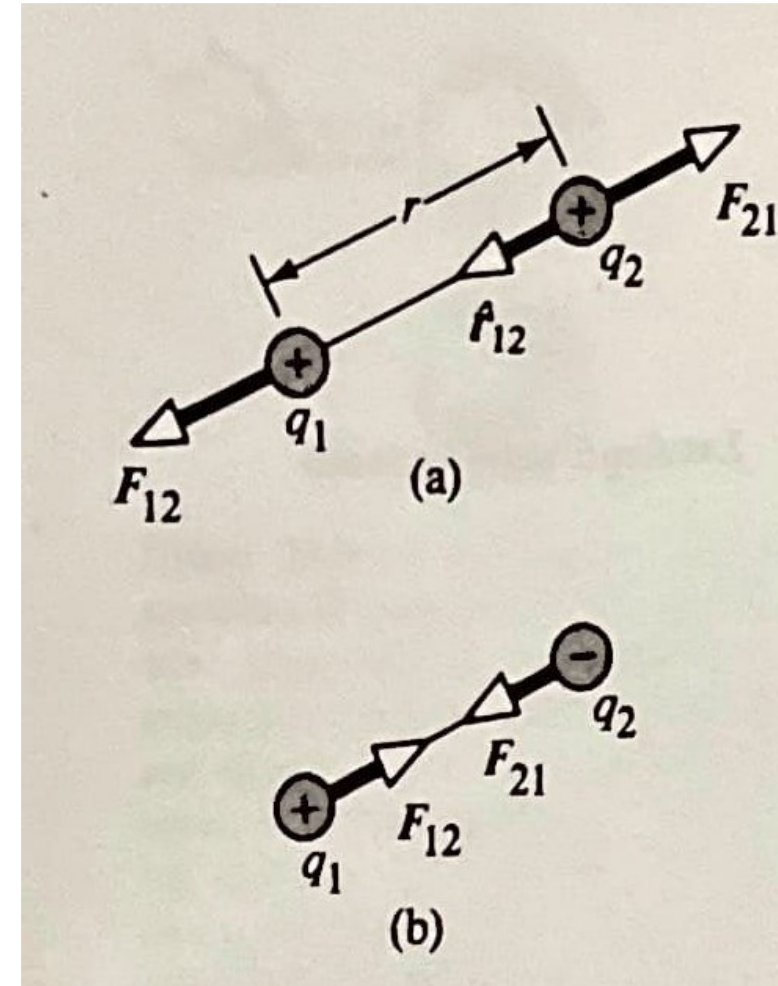
- όπου k είναι η λεγόμενη σταθερά του Coulomb
- η μονάδα του ηλ. φορτίου είναι το C (Coulomb), που ορίζεται χρησιμοποιώντας τη μονάδα ηλεκτρικού ρεύματος A (ampere).
- Πχ. αν μέσω ενός σύρματος διέρχεται ρεύμα 1 A σε ένα δευτερόλεπτο, τότε η ποσότητα φορτίου που διέρχεται μέσω της διατομής του καλωδίου είναι 1 C.

1.3 Ο νόμος του Coulomb

- Η σταθερά $k \approx 9.0 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}$
- Συχνά η σταθερά k εκφράζεται χρησιμοποιώντας τη σταθερά ϵ_0 (διηλεκτρική σταθερά του κενού: $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$)
- Όπου $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$
- Το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι: $e \approx 1.6 \times 10^{-19} C$, (ίσο και αντίθετο με το φορτίο του πρωτονίου)
- 1 C ηλεκτρικού φορτίου ισούται με φορτίο 6.3×10^{18} ηλεκτρονίων
- Σκεφτείτε ότι σε ένα πείραμα φόρτισης εξ επαφής μεταφέρεται φορτίο $\sim 10^{-6} C$. Άρα μεταφέρεται ένα απειροστά μικρό μέρος του συνολικού φορτίου αν λάβουμε υπόψιν μας ότι σε ένα cm^3 ενός αγωγού υπάρχουν $\sim 10^{23}$ ελεύθερα ηλεκτρόνια.

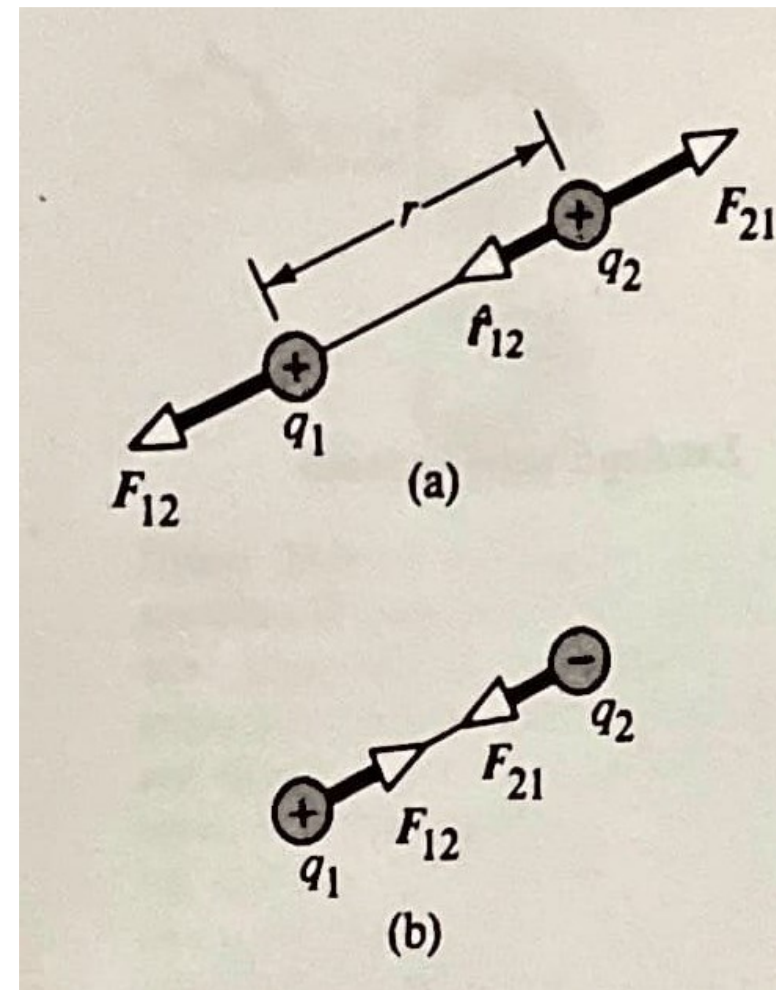
1.3 Ο νόμος του Coulomb

- Όταν χρησιμοποιούμε το νόμο του Coulomb δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η δύναμη είναι διανυσματικό μέγεθος
- Σημείωση: Ο νόμος του Coulomb ισχύει ακριβώς μόνο για σημειακά φορτία ή σωματίδια
- Αν $\hat{r}_{12}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που κατευθύνεται από το φορτίο q_2 στο φορτίο q_1 , τότε συμβολίζοντας F_{12} την ηλεκτρική δύναμη που ασκεί το φορτίο q_2 πάνω στο q_1 , μπορούμε να γράψουμε τη διανυσματική σχέση:
$$\mathbf{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}_{12}$$
- Επειδή όμως ισχύει ο τρίτος νόμος του Νεύτωνα, η ηλ. δύναμη που ασκεί το φορτίο q_1 πάνω στο φορτίο q_2 είναι ίση σε μέτρο με τη δύναμη που ασκεί το φορτίο q_2 πάνω στο φορτίο q_1 αλλά αντίθετη σε κατεύθυνση. Άρα $\mathbf{F}_{21} = -\mathbf{F}_{12}$



1.3 Ο νόμος του Coulomb

- Αν τα q_1 και q_2 έχουν το ίδιο φορτίο, τότε το γινόμενο τους είναι θετικό, άρα η δύναμη είναι απωστική
- Αν τα q_1 και q_2 έχουν αντίθετο φορτίο, τότε το γινόμενο τους είναι αρνητικό, άρα η δύναμη είναι ελκτική
- Χρησιμοποιώντας την διανυσματική εξίσωση του νόμου του Coulomb, μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη ανάμεσα σε δυο οποιαδήποτε φορτία με την παρουσία και πολλών άλλων φορτίων
- Άρα η ολική δύναμη που ασκείται πάνω σε κάθε φορτίο ισούται με τη διανυσματική συνισταμένη των δυνάμεων που ασκεί καθένα από τα φορτία πάνω του
- Αυτό ονομάζεται αρχή της επαλληλίας στην ηλεκτροστατική
- Πχ εάν υπάρχουν 4 φορτία, τότε η συνισταμένη δύναμη που υφίσταται το σώμα 1 λόγω της ύπαρξης των φορτίων των σωμάτων 2, 3 και 4 είναι: $\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14}$



1.4 Το ηλεκτρικό πεδίο

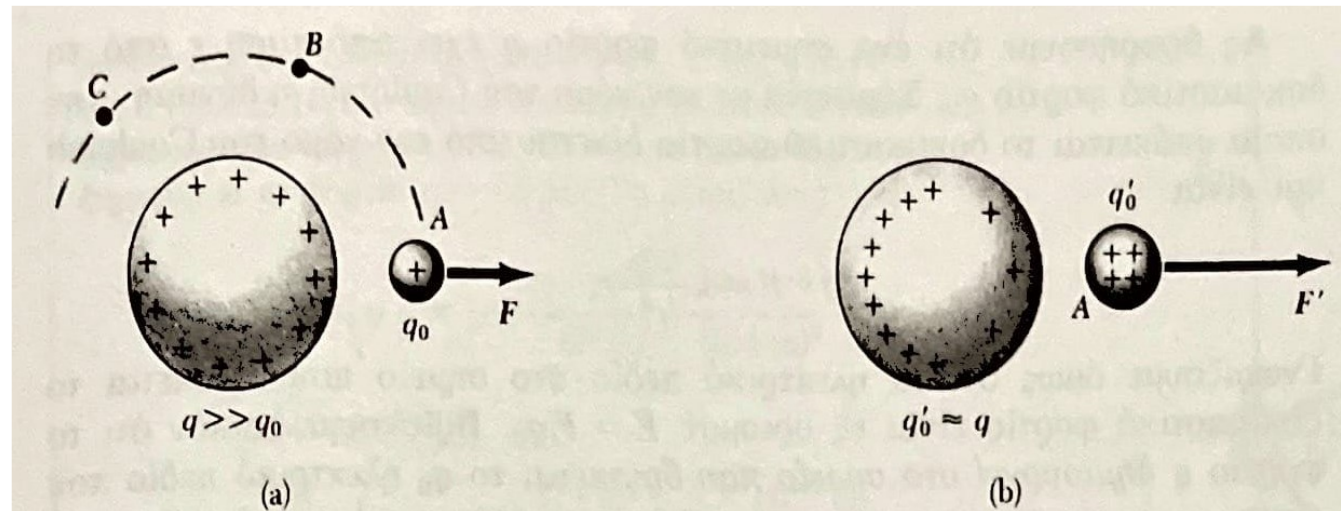
- Το ηλεκτρικό πεδίο (ή η ένταση του ηλ. πεδίου) σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου ισούται με το πηλίκο της δύναμης την οποία υφίσταται ένα 'δοκιμαστικό' φορτίο q_0 , το οποίο βρίσκεται στο σημείο αυτό δια του φορτίου αυτού (q_0)
 - Το φορτίο q_0 θα το αποκαλούμε δοκιμαστικό, γιατί το χρησιμοποιούμε για να ανιχνεύσουμε την ύπαρξη ηλ. πεδίου που δημιουργήσαν άλλα ηλεκτρικά φορτία
- Το διάνυσμα του ηλ. πεδίου $\mathbf{E}$ (ή της έντασης του ηλ. πεδίου) σε ένα τυχαίο σημείο του χώρου είναι εξ ορισμού ίσο με το πηλίκο της δύναμης η οποία ασκείται πάνω σε ένα δοκιμαστικό φορτίο q_0 , που βρίσκεται στο σημείο αυτό, δια του φορτίου αυτού q_0 : $\mathbf{E} \equiv \frac{\mathbf{F}}{q_0}$
 - Σημείωση: η ένταση του πεδίου $\mathbf{E}$ περιγράφει το εξωτερικό προς το q_0 ηλ. πεδίο, δηλαδή δεν περιγράφει το πεδίο που παράγεται από το ίδιο το q_0

1.4 Το ηλεκτρικό πεδίο

- Οι μονάδες του $\mathbf{E}$ στο SI είναι: N/C
- Η κατεύθυνση του $\mathbf{E}$ είναι η ίδια με την κατεύθυνση της $\mathbf{F}$, αφού υποθέσαμε ότι η $\mathbf{F}$ δρα πάνω σε ένα θετικό φορτίο
- Λέμε λοιπόν ότι σε κάποιο σημείο του χώρου υπάρχει ηλ. πεδίο όταν πάνω σε ένα δοκιμαστικό φορτίο που ηρεμεί και το οποίο θα τοποθετήσουμε στο σημείο αυτό, δράσει μια ηλεκτρική δύναμη.
- Έτσι αν γνωρίζουμε το ηλ. πεδίο σε κάποιο σημείο, μπορούμε να υπολογίσουμε τη δύναμη την οποία υφίσταται οποιοδήποτε φορτισμένο σώματίδιο που θα τοποθετηθεί στο σημείο αυτό
- Το ηλ. πεδίο υπάρχει σε κάποιο σημείο του χώρου ανεξάρτητα από το αν υπάρχει στο σημείο το δοκιμαστικό ηλεκτρικό φορτίο το οποίο υφίσταται την επίδραση του πεδίου

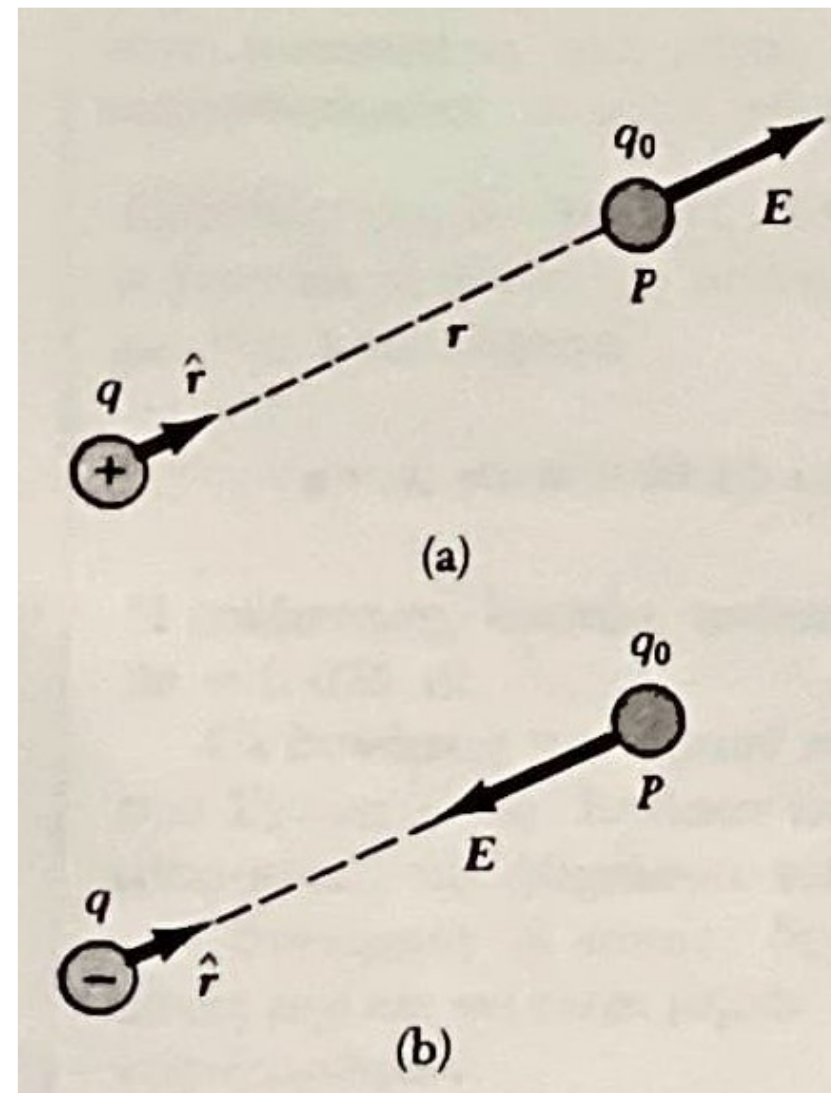
1.4 Το ηλεκτρικό πεδίο

- Όταν εφαρμόζουμε την εξίσωση του ηλ. πεδίου ($E \equiv \frac{F}{q_0}$), πρέπει να υποθέτουμε ότι το δοκιμαστικό φορτίο είναι επαρκώς μικρό ώστε να μη διαταράσσει την κατανομή του ηλεκτρικού φορτίου που δημιουργεί το ηλ. πεδίο.
- Άρα αν τοποθετήσουμε ένα απειροστά μικρό φορτίο q_0 κοντά σε μια ομογενώς φορτισμένη μεταλλική σφαίρα (σχήμα a), το φορτίο της σφαίρας που παράγει το ηλ. πεδίο δεν επηρεάζεται
 - Επιπλέον, η δύναμη F την οποία υφίσταται το δοκιμαστικό φορτίο έχει το ίδιο μέτρο όταν το δοκιμαστικό φορτίο βρίσκεται σε σημεία που ισαπέχουν από τη σφαίρα (A, B, C)
- Αν όμως το δοκιμαστικό φορτίο είναι αρκετά μεγάλο (σχήμα b), τότε μπορεί να επηρεάσει το φορτίο που βρίσκεται στην επιφάνεια της σφαίρας.
 - Έτσι ο λόγος της δύναμης προς το δοκιμαστικό φορτίο στο σημείο A είναι τώρα διαφορετικός
 - Καθώς το δοκιμαστικό φορτίο κινείται στις θέσεις B και C μεταβάλλεται η κατανομή φορτίου στην επιφάνεια της σφαίρας



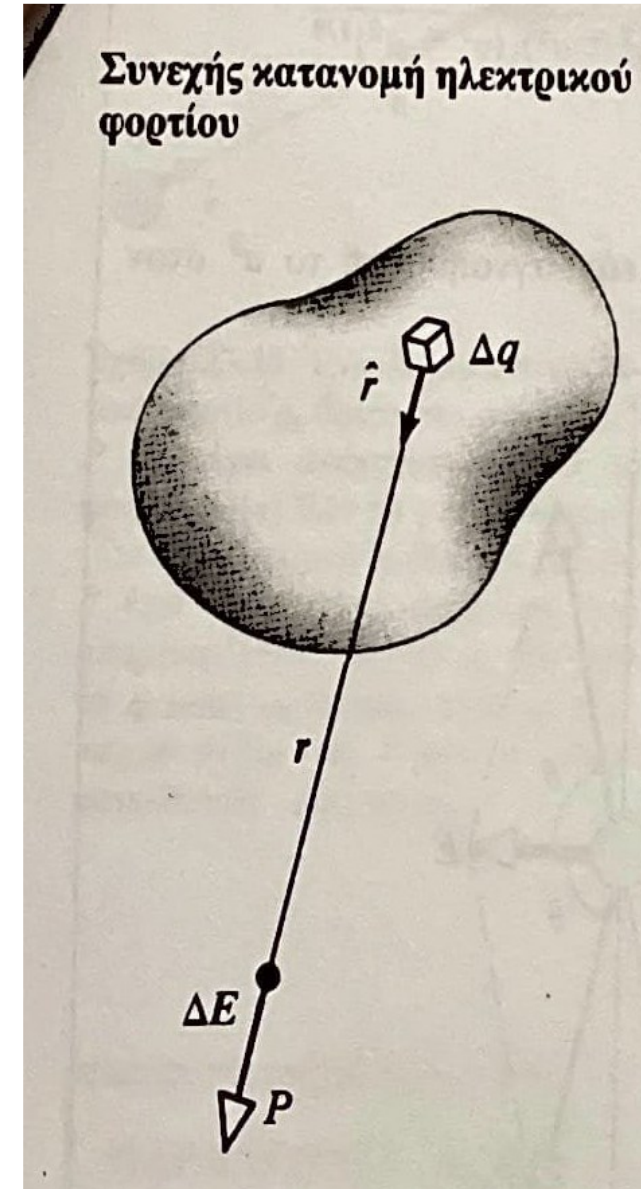
1.4 Το ηλεκτρικό πεδίο

- Ας θεωρήσουμε ότι ένα σημειακό φορτίο q έχει απόσταση r από το δοκιμαστικό φορτίο q_0 . Τότε σύμφωνα με το νόμο Coulomb, η δύναμη στην οποία υπόκειται το δοκιμαστικό φορτίο είναι: $\mathbf{F} = k \frac{q q_0}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$
- Γνωρίζουμε όμως ότι το ηλ. πεδίο στο σημείο που βρίσκεται το δοκιμαστικό φορτίο q_0 , είναι εξ ορισμού: $\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{q}$
- Βρίσκουμε λοιπόν ότι το φορτίο q δημιουργεί στο σημείο που βρίσκεται το q_0 ηλ. πεδίο που είναι: $\mathbf{E} = k \frac{q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$, όπου $\hat{\mathbf{r}}$ είναι το μοναδιαίο διάνυσμα που κατευθύνεται από το q προς το q_0
- Αν το q είναι θετικό, το πεδίο κατευθύνεται ακτινικά απομακρυσμένο από το φορτίο
- Αν το q είναι αρνητικό, το πεδίο κατευθύνεται ακτινικά προς το φορτίο
- Αν θέλουμε να υπολογίσουμε το ηλ. πεδίο που δημιουργούν πολλά ηλ. φορτία σε ένα σημείο P, υπολογίζουμε πρώτα το ηλ. πεδίο που δημιουργεί στο P το κάθε φορτίο και μετά τα αθροίζουμε όλα
- Έτσι, το ολικό ηλ. πεδίο που δημιουργείται από μια ομάδα φορτίων είναι η διανυσματική συνισταμένη των ηλ. πεδίων καθενός φορτίου ξεχωριστά
- Άρα το συνολικό ηλ. πεδίο είναι: $\mathbf{E} = k \sum_i \frac{q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i$, όπου r_i είναι η απόσταση του φορτίου q_i από το σημείο P που βρίσκεται το q , και $\hat{\mathbf{r}}_i$ είναι μοναδιαία διανύσματα που κατευθύνονται από το q_i προς το P.



1.5 Το ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς κατανομής

- Όταν τα φορτία βρίσκονται πολύ κοντά το ένα στο άλλο (σε σχέση με την απόσταση που έχουν από το σημείο υπολογισμού του ηλ. πεδίου), τότε λέμε ότι έχουμε μια συνεχή κατανομή φορτίου
- Θεωρούμε δηλαδή το πυκνό αυτό σύστημα φορτίων είναι ισοδύναμο με μια συνεχή κατανομή, η οποία έχει αυτό το φορτίο κατανεμημένο στο χώρο ή σε μια επιφάνεια
- Για τον υπολογισμό του ηλ. πεδίου σε αυτή την περίπτωση:
 - 1) Χωρίζουμε την κατανομή φορτίου σε μικρά μέρη, καθένα από τα οποία περιέχει ένα μικρό φορτίο Δq
 - 2) Χρησιμοποιούμε το νόμο του Coulomb για να υπολογίσουμε τη δύναμη και το πεδίο που δημιουργεί στο σημείο P καθένα από τα φορτία Δq
 - 3) Τέλος βρίσκουμε το συνολικό ηλ. πεδίο αθροίζοντας διανυσματικά τα επιμέρους πεδία με την αρχή της επαλληλίας



1.5 Το ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς κατανομής

- Ένα φορτίο Δq που έχει απόσταση r από το σημείο P, δημιουργεί στο σημείο P ηλ. πεδίο: $\Delta \mathbf{E} = k \frac{\Delta q}{r^2} \hat{\mathbf{r}}$, όπου $\hat{\mathbf{r}}$ το μοναδιαίο διάνυσμα που κατευθύνεται από φορτίο στο σημείο P

- Το συνολικό ηλ. πεδίο που δημιουργούν στο P όλα τα φορτία είναι:

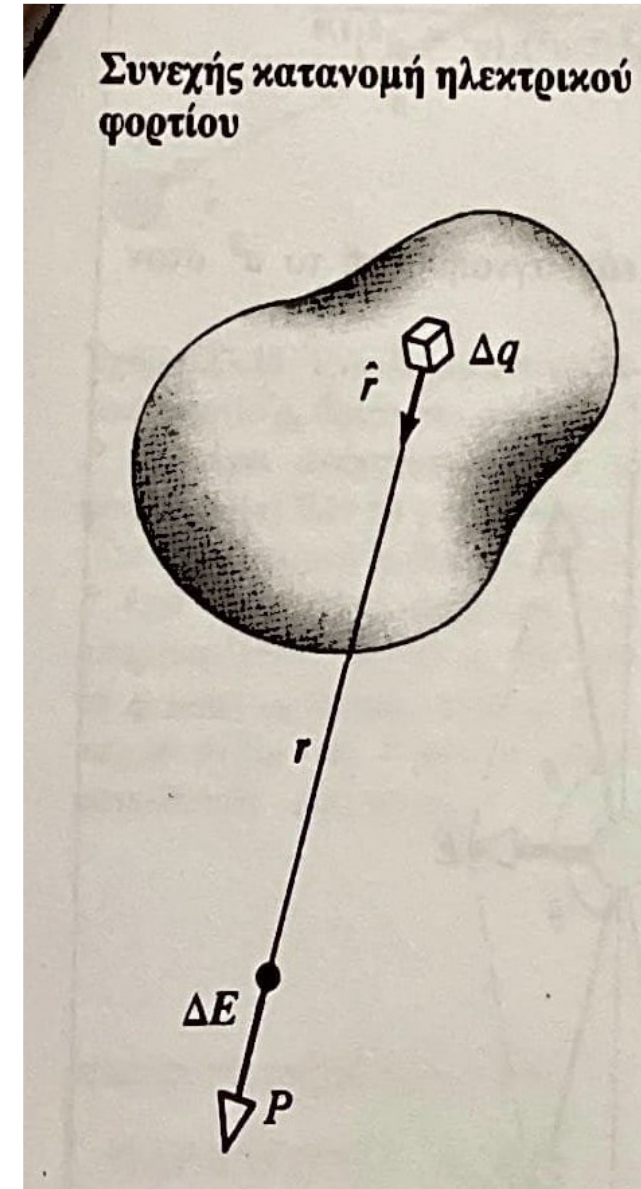
$$\mathbf{E} \approx k \sum_i \frac{\Delta q_i}{r_i^2} \hat{\mathbf{r}}_i, \text{ όπου } i \text{ είναι περιγράφει το μέρος του φορτίου}$$

- Αν τώρα θεωρήσουμε την απόσταση μεταξύ των φορτίων πολύ μικρή σε σχέση με την απόσταση που έχουν τα φορτία με το σημείο P, τότε μπορούμε κατά προσέγγιση να πούμε ότι η κατανομή των φορτίων είναι συνεχής

- Έτσι το συνιστάμενο πεδίο στο όριο όπου $\Delta q_i \rightarrow 0$, γίνεται:

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

- **Προσοχή:** Για να υπολογίσουμε σωστά το ολοκλήρωμα διανυσμάτων θα υποθέτουμε ομοιόμορφη (ή ομογενή) κατανομή φορτίου σε μια επιφάνεια ή ένα χώρο



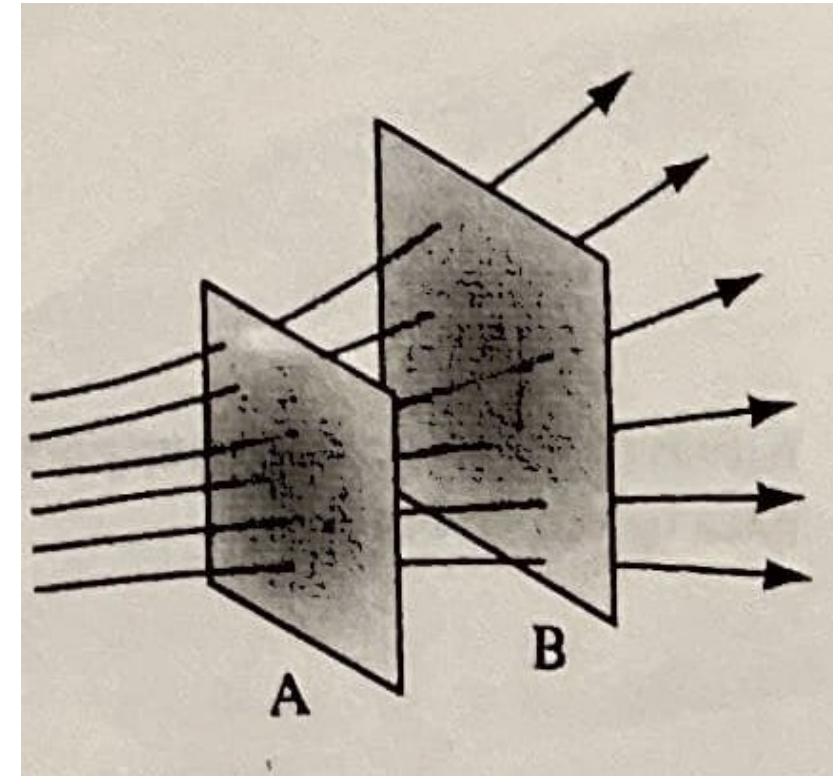
1.5 Το ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς κατανομής

- Για να διευκολύνουμε τους υπολογισμούς μας θα χρησιμοποιήσουμε τον όρο πυκνότητα φορτίου
- Αν ένα φορτίο Q είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε ένα **χώρο V** , τότε η χωρική πυκνότητα φορτίου ρ ορίζεται ως: $\rho = \frac{Q}{V}$, φορτίο ανά μονάδα όγκου, με μονάδες C/cm^3
- Αν ένα φορτίο Q είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε μια **επιφάνεια A** , τότε η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου σ ορίζεται ως: $\sigma = \frac{Q}{A}$, φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας, με μονάδες C/cm^2
- Αν ένα φορτίο Q είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο σε μια **γραμμή μήκους l** , τότε η γραμμική πυκνότητα φορτίου λ ορίζεται ως: $\lambda = \frac{Q}{l}$, φορτίο ανά μονάδα μήκους, με μονάδες C/cm
- Αν όμως το φορτίο δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο πάνω στο ένα χώρο, σε μια επιφάνεια ή σε μια γραμμή τότε εκφράζουμε τις πυκνότητες αυτές ως:

$\rho = \frac{dQ}{dV}$ ή $\sigma = \frac{dQ}{dA}$ ή $\lambda = \frac{dQ}{dl}$, όπου dQ είναι η ποσότητα ηλ. φορτίου που βρίσκεται σε ένα χώρο dV , σε μια επιφάνεια dA ή σε μια γραμμή dl

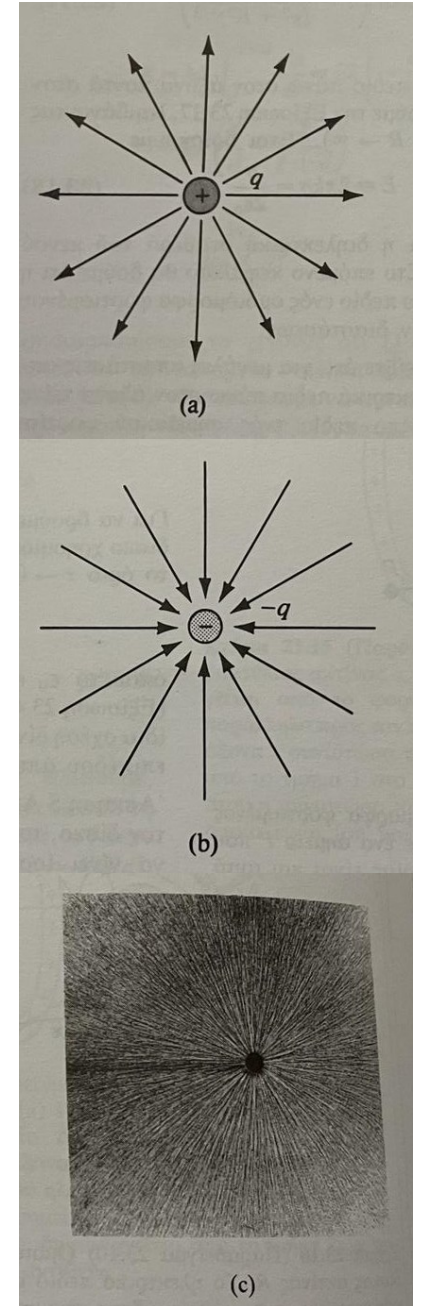
1.6 Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου

- Ένας εξυπηρετικός τρόπος οπτικής αναπαράστασης των ηλ. πεδίων, είναι με τη σχεδίαση γραμμών που έχουν την ίδια κατεύθυνση με το ηλ. πεδίο
- Τις γραμμές αυτές τις ονομάζουμε δυναμικές γραμμές και με αυτές περιγράφουμε το ηλ. πεδίο ως εξής:
 - 1) Η διεύθυνση του διανύσματος του ηλ. πεδίου εφάπτεται με τις δυναμικές γραμμές του ηλ. πεδίου σε κάθε σημείο
 - 2) Ο αριθμός των γραμμών του πεδίου που διέρχονται μέσα από μια επιφάνεια κάθετη σε αυτές είναι ανάλογος με το μέτρο του ηλ. πεδίου στην περιοχή αυτή
- Άρα όταν οι γραμμές είναι πυκνές το E είναι μεγάλο, ενώ όταν οι γραμμές είναι αραιές το E είναι μικρό
- Η πυκνότητα γραμμών στην (κάθετη) επιφάνεια A του σχήματος είναι μεγαλύτερη από την πυκνότητα γραμμών στην (κάθετη) επιφάνεια B. Άρα το E έχει μεγαλύτερη ένταση στην επιφάνεια A από ότι στην B.



1.6 Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου

- Στο σχήμα (a) βλέπουμε τις δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου ενός θετικού σημειακού φορτίου (βλέπουμε την 2D απεικόνιση, στην πραγματικότητα είναι σε 3D και μοιάζουν με τα αγκάθια ενός αχινού)
- Όπως βλέπουμε οι δυναμικές γραμμές απομακρύνονται από το φορτίο, και αφού το φορτίο είναι θετικό, τότε το αυτό σημαίνει πως το δοκιμαστικό φορτίο είναι θετικό και αυτό
- Το αντίθετο συμβαίνει όταν το φορτίο είναι αρνητικό (σχήμα b). Οι δυναμικές γραμμές πηγαίνουν προς το φορτίο και αφού το φορτίο είναι αρνητικό, τότε το αυτό σημαίνει πως το δοκιμαστικό φορτίο είναι θετικό
- Και στις δυο περιπτώσεις οι γραμμές είναι ακτινικές και εκτείνονται ως το άπειρο
- Επίσης όσο οι γραμμές πλησιάζουν στο φορτίο γίνονται και πιο πυκνές, γεγονός αναμενόμενο αφού γνωρίζουμε ότι το πεδίο φθίνει όσο απομακρυνόμαστε από το φορτίο

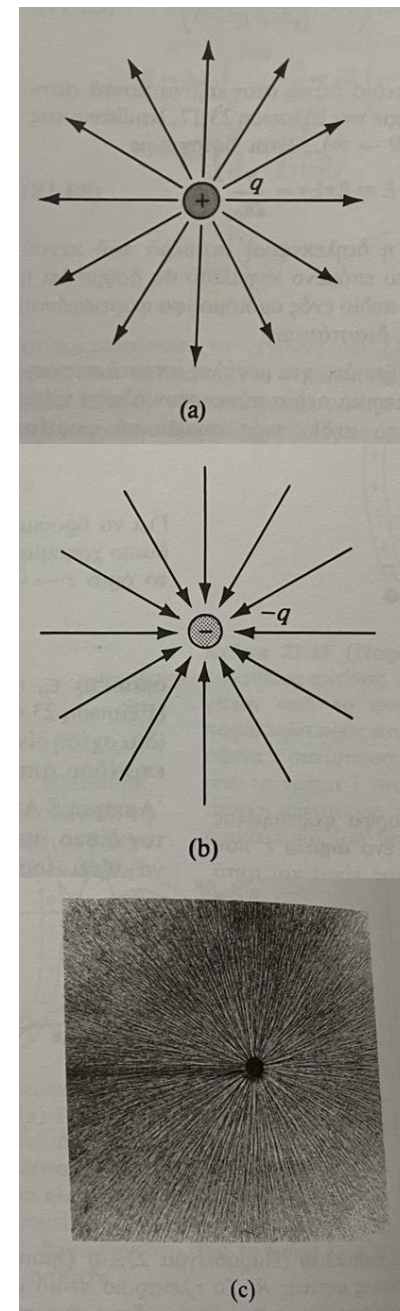


1.6 Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου

Κανόνες χάραξης δυναμικών γραμμών

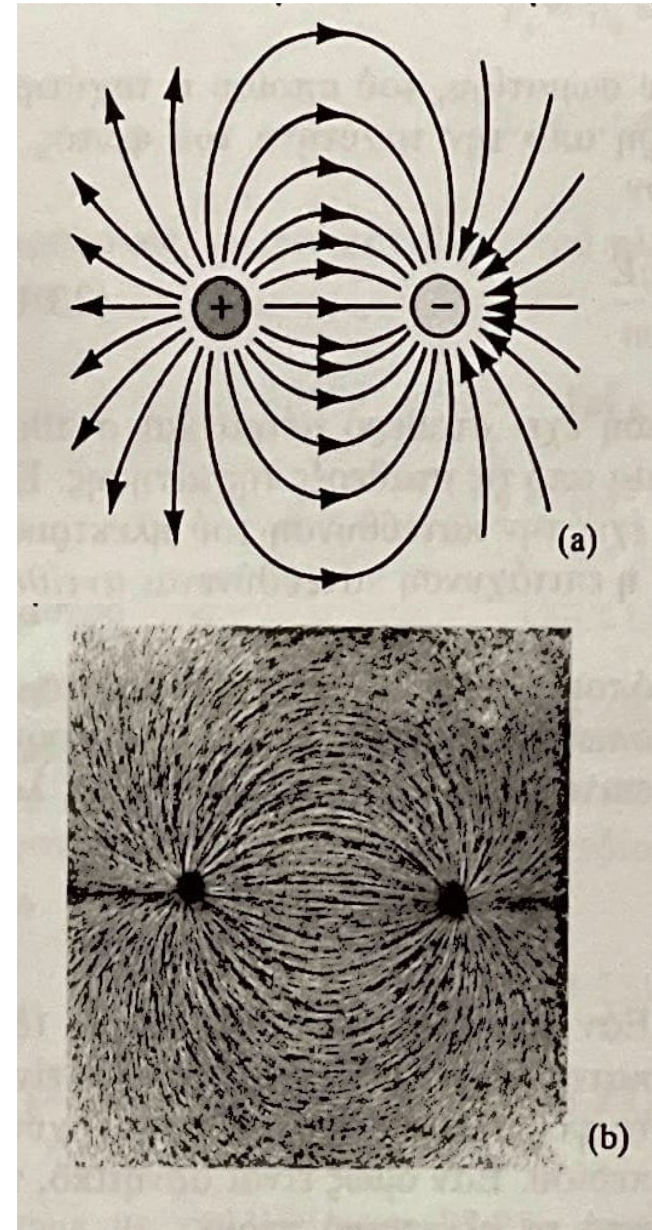
- Οι γραμμές ξεκινούν από θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά ή στο άπειρο
- Ο αριθμός των γραμμών που απομακρύνονται από ένα θετικό φορτίο ή που καταλήγουν σε ένα αρνητικό φορτίο είναι ανάλογος με το μέτρο του φορτίου
- Δύο γραμμές δεν τέμνονται ποτέ
- Επίσης ισχύει η εξής αναλογία γραμμών με αριθμό φορτίων: $\frac{N_2}{N_1} = \frac{Q_2}{Q_1}$

Άρα αν γνωρίζουμε το φορτίο δύο σωμάτων μπορούμε να υπολογίσουμε την αναλογία των δυναμικών γραμμών τους



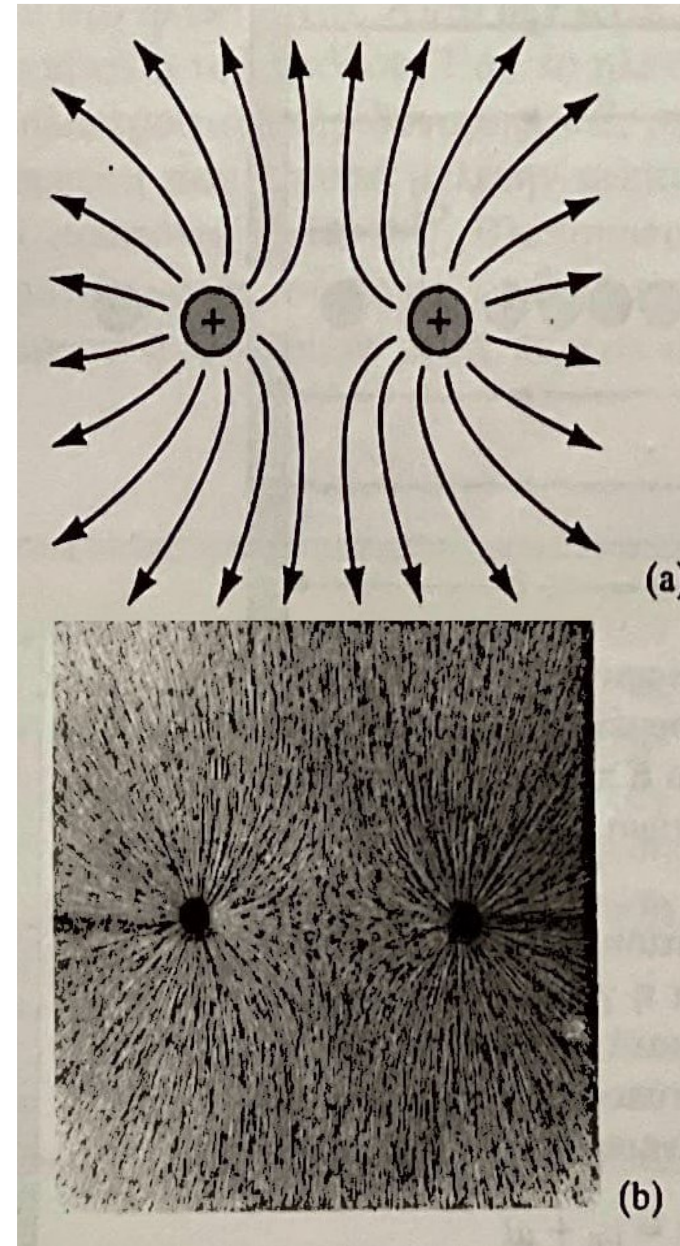
1.6 Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου

- Στο σχήμα (a) στα δεξιά βλέπουμε τις δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου δυο ίσων αλλά αντιθετών φορτίων, ενός θετικού και ενός αρνητικού φορτίου (ηλεκτρικό δίπολο)
- Στην περίπτωση αυτή, ο αριθμός των γραμμών που αναδύονται από το θετικό φορτίο, ισούται με τον αριθμό των γραμμών που καταλήγουν στο αρνητικό φορτίο. Κοντά στα φορτία οι γραμμές έχουν ακτινική διεύθυνση
- Ο μεγάλος αριθμός των γραμμών στην περιοχή ανάμεσα στα φορτία συμβολίζει την ύπαρξη ισχυρού ηλ. πεδίου
- Η έλξη των δυο φορτίων φαίνεται από την κατεύθυνση των γραμμών



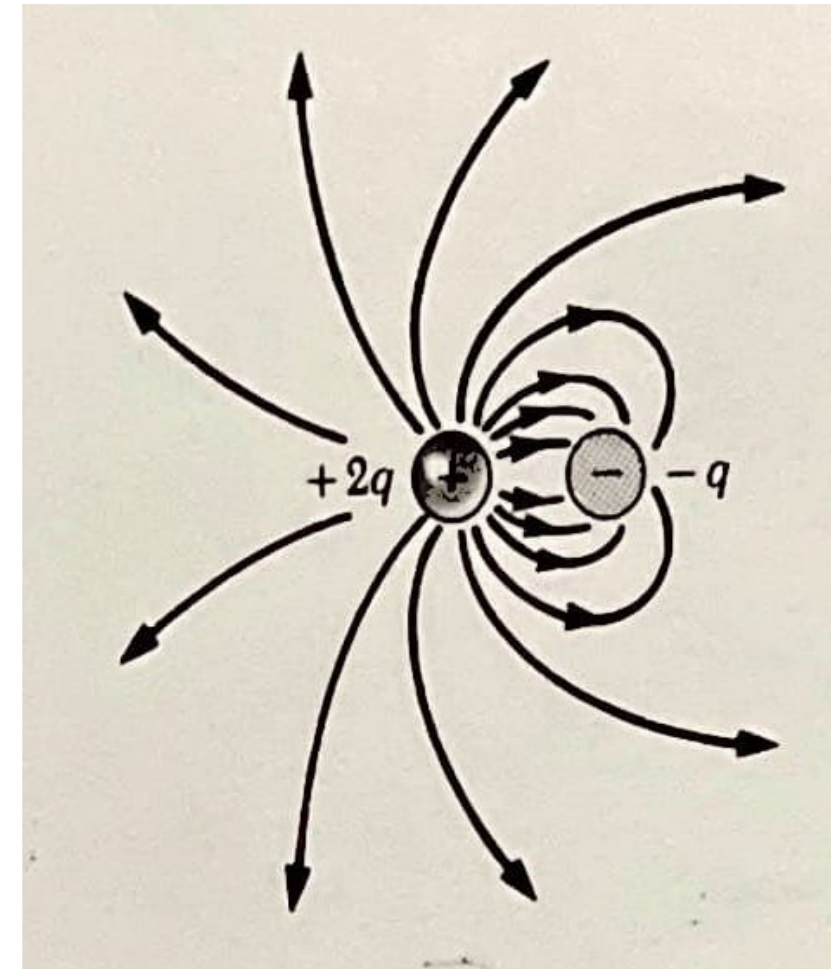
1.6 Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου

- Στο σχήμα (a) βλέπουμε τις δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου δυο ίσων θετικών φορτίων
- Και σε αυτή την περίπτωση, κοντά στα φορτία οι γραμμές είναι ακτινικές
- Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τα φορτία, το πεδίο είναι προσεγγιστικά ίσο με αυτό ενός φορτίου $2q$
- Η άπωση των δυο όμοιων φορτίων φαίνεται από την κατεύθυνση των γραμμών



1.6 Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου

- Στο σχήμα (a) βλέπουμε τις δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου που δημιουργείται από την αλληλεπίδραση ενός φορτίου $+2q$ και ενός $-q$
- Ο αριθμός των γραμμών που αναδύονται από το θετικό φορτίο, είναι διπλάσιος από τον αριθμό των γραμμών που καταλήγουν στο αρνητικό φορτίο
- Άρα μόνο κατά το ήμισυ του αριθμού τους οι γραμμές του θετικού φορτίου καταλήγει στο αρνητικό
- Οι υπόλοιπες υποθέτουμε ότι καταλήγουν σε κάποιο άλλο αρνητικό φορτίο που υπάρχει στο άπειρο
- Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις (σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των δυο φορτίων), οι γραμμές του πεδίου είναι όμοιες με τις γραμμές ενός φορτίου $+q$



1.7 Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων σε ομογενές ηλ. πεδίο

- Η κίνηση αυτή είναι ισοδύναμη με την κίνηση βλήματος μέσα σε ομογενές βαρυτικό πεδίο
- Όταν τοποθετήσουμε ένα φορτίο q σε ένα ομογενές ηλ. πεδίο $\mathbf{E}$, η ηλεκτρική δύναμη που υφίσταται είναι $q\mathbf{E}$.
- Έτσι αν αυτή είναι η μόνη δύναμη που ασκείται στο φορτίο, τότε εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$\mathbf{F} = q\mathbf{E} = m\mathbf{a}$, όπου m η μάζα του φορτισμένου σωματιδίου

- Η επιτάχυνση του σωματιδίου είναι: $\mathbf{a} = \frac{q\mathbf{E}}{m}$
- Αν το ηλ. πεδίο είναι ομογενές (σταθερό μέτρο και κατεύθυνση), τότε η επιτάχυνση είναι σταθερή
- Αν το φορτίο είναι θετικό, τότε επιταχύνεται με την κατεύθυνση του ηλ. πεδίου
- Αν το φορτίο είναι αρνητικό, τότε επιταχύνεται αντίθετα με την κατεύθυνση του ηλ. πεδίου

1.7 Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων σε ομογενές ηλ. πεδίο

- Στο σχήμα βλέπουμε το ηλ. πεδίο που δημιουργούν δυο παράλληλες αντίθετα φορτισμένες μεταλλικές πλάκες
- Το πεδίο αυτό είναι ομογενές (οι πλάκες είναι σταθερές)
- Ένα ηλεκτρόνιο, φορτίου $-e$, εισέρχεται οριζόντια μέσα σε ομογενές ηλ. πεδίο με σταθερή αρχική ταχύτητα $v_0 \mathbf{j}$
- Το πεδίο κατευθύνεται κατά τη θετική φορά του άξονα Y
- Επομένως το ηλεκτρόνιο θα επιταχυνθεί προς την αρνητική κατεύθυνση του άξονα Y με επιτάχυνση:

$$\mathbf{a} = -\frac{eE}{m} \mathbf{j} \text{ (σταθερή)}$$

- Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ηλεκτρονίου μετά από χρόνο t στο πεδίο είναι:

$$v_x = v_0 = \text{σταθερή και } v_y = \mathbf{a}t = -\frac{eE}{m} t$$

- Οι συντεταγμένες του ηλεκτρονίου μέσα στο πεδίο μετά από χρόνο t είναι:

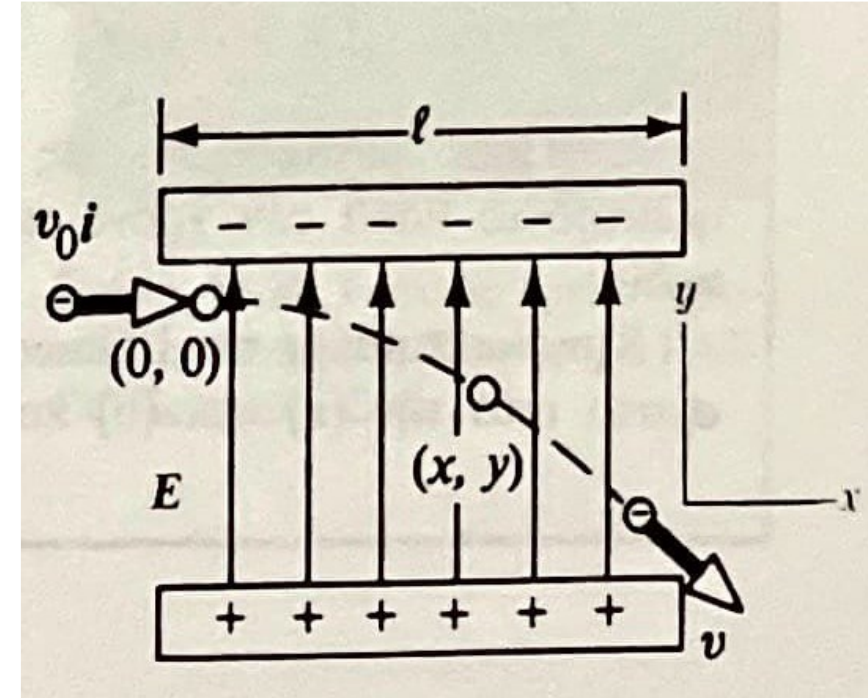
$$x = v_0 t \text{ και } y = \frac{1}{2} a t^2 = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2$$

- Αντικαθιστούμε την $x = v_0 t \Rightarrow t = \frac{x}{v_0}$ στην $y = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m} t^2$ και έχουμε:

$$y = -\frac{1}{2} \frac{eE}{m} \frac{x^2}{v_0^2}, \text{ άρα παρατηρούμε ότι το } y \text{ είναι ανάλογο του } x^2$$

Άρα η τροχιά του ηλεκτρονίου σε ομογενές ηλ. πεδίο είναι **παραβολική**

- Φυσικά έχουμε αγνοήσει την επίδραση της βαρυτικής δύναμης στο ηλεκτρόνιο αλλά αυτή είναι κατά >10 τάξεις μεγέθους μικρότερη από ένα ηλεκτρικό πεδίο 10^4 N/C



Συνοψίζοντας τι είδαμε στο Κεφάλαιο 1

- ✓ Εισαγωγή: Ηλεκτρισμός & Μαγνητισμός
- ✓ Ιδιότητες των ηλεκτρικών φορτίων
- ✓ Μονωτές (διηλεκτρικά) και αγωγοί
- ✓ Ο νόμος του Coulomb
- ✓ Το ηλεκτρικό πεδίο
- ✓ Το ηλεκτρικό πεδίο συνεχούς κατανομής
- ✓ Δυναμικές γραμμές ηλ. πεδίου
- ✓ Κίνηση φορτισμένων σωματιδίων σε ομογενές ηλ. πεδίο

Ερωτήσεις;