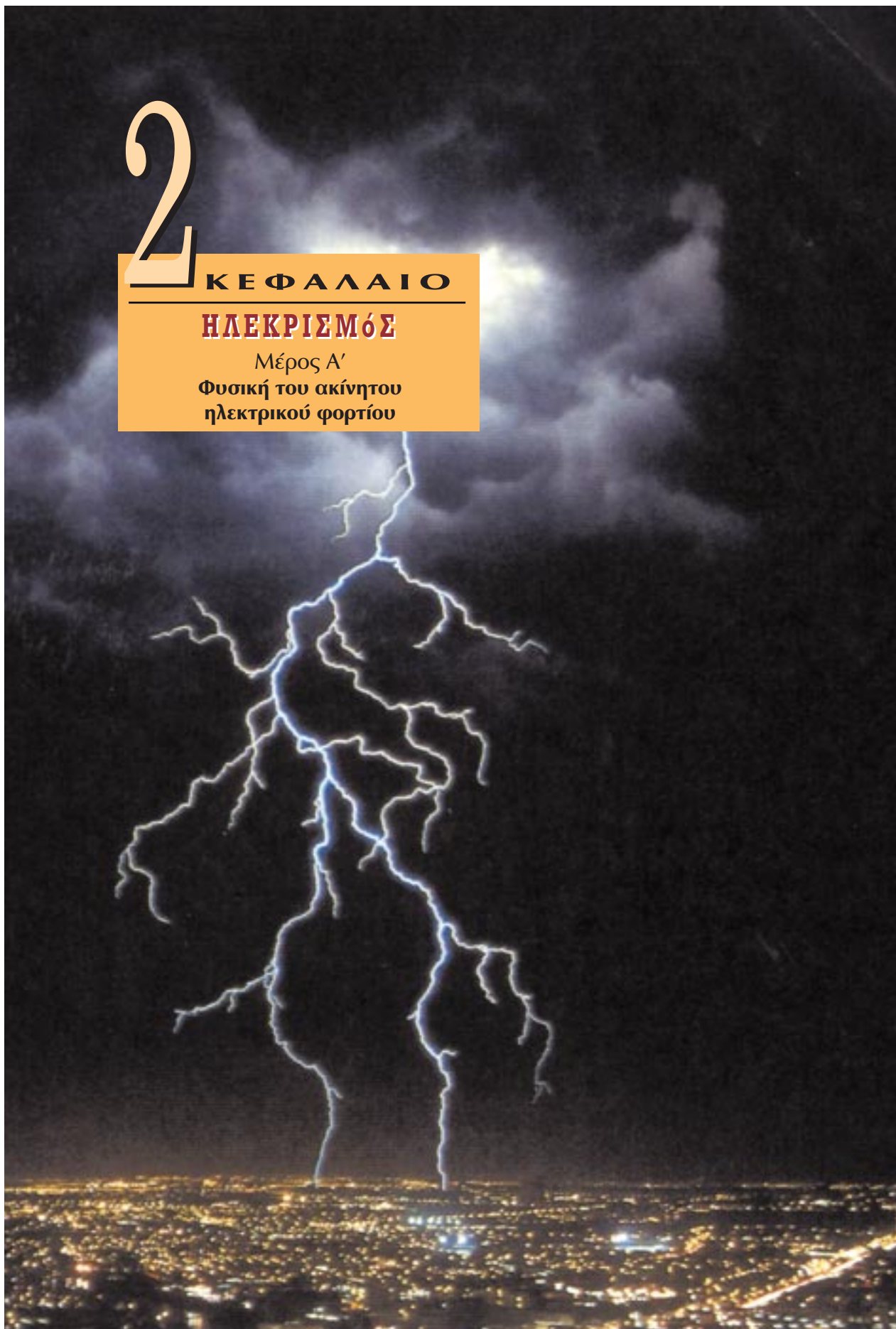


# 2

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΗΛΕΚΡΙΣΜΟΣ

Μέρος Α'  
Φυσική του ακίνητου  
ηλεκτρικού φορτίου



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### Αιώνες πριν.....



Εικ. 1 και 2

Η ιστορία του ηλεκτρισμού είναι πολύ παλιά. Ξεκινάει εδώ και χιλιάδες χρόνια από τους Αρχαίους Έλληνες. Η λέξη ηλεκτρισμός προέρχεται από την ελληνική λέξη **ήλεκτρο** (κεχριμπάρι). Το κεχριμπάρι είναι απολιθωμένος χυμός πεύκου, που το χρησιμοποιούν, για να κατασκευάζουν χάντρες και κοσμήματα. Είναι ένα λαμπερό, καθαρό, χρυσαφί υλικό που, πολλές φορές, περιέχει απολιθώματα εντόμων, τα οποία παγιδεύτηκαν μέσα του. Ένα μειονέκτημα των κοσμημάτων από κεχριμπάρι είναι ότι "τραβάνε" τη σκόνη πολύ εύκολα. Οι Αρχαίοι Έλληνες το παρατήρησαν και διαπίστωσαν ότι το ήλεκτρο είχε τη μυστηριώδη ιδιότητα να έλκει πολύ μικρά αντικείμενα, όταν το έτριβαν με ένα κομμάτι από ύφασμα. Εάν δεν έτυχε να το παρατηρήσετε αυτό με ένα πραγματικό κεχριμπάρι, μπορείτε να πειραματιστείτε με ένα πλαστικό στυλό ή με μια χτένα. (εικόνες 1 και 2). Το **ήλεκτρο**, όταν το τρίψουμε με ύφασμα, ασκεί σε μικρά αντικείμενα δύναμη, η οποία γι' αυτό το λόγο λέγεται **ηλεκτρική δύναμη**. Αυτά τα φαινόμενα υπήρξαν η αρχή του

**ηλεκτρισμού**. Η δύναμη αυτή ήταν πολύ μικρή σε σχέση με τη δύναμη της βαρύτητας ή με τη μαγνητική δύναμη (οι μαγνήτες μπορούσαν, τουλάχιστον, να μας δείξουν την κατεύθυνση του βορρά). Το αποτέλεσμα ήταν να ξεχαστεί για χιλιάδες χρόνια η παράξενη ιδιότητα του κεχριμπαριού.

## Η πρόσφατη ανακάλυψη του ηλεκτρισμού

Πριν από 200 περίπου χρόνια, η Επιστήμη δεν ήταν όπως είναι σήμερα. Πειρίχτε εμπειρισμό, και πολλοί από αυτούς που την "υπηρετούσαν" διέθεταν μπόλικο θράσος, χρησιμοποιούσαν πολλά τεχνάσματα, λίγη απάτη και αρκετό ρίσκο. Οι επιστήμονες της εποχής εκείνης αποκαλούσαν τους εαυτούς τους "φυσικούς φιλόσοφους". Μερικοί από τους "επιστήμονες" ήσαν πλούσιοι, που διέθεταν χρήμα και χρόνο, για να τα αφιερώσουν στο χόμπι τους, όπως ο Robert Boyle, που ανακάλυψε τον ομώνυμο νόμο για τα αέρια. Πολλοί κέρδιζαν την ζωή τους ασκώντας το επάγγελμα του γιατρού όπως ο William Gilbert, που πειραματίστηκε με μαγνήτες. Μερικοί ήσαν κληρικοί όπως ο Copernicus, που πρότεινε την επαναστατική, για την εποχή του, άποψη ότι η γη κινείται γύρω

από τον ήλιο και όχι το αντίθετο, όπως πίστευαν έως τότε.

Μερικές ανακαλύψεις έγιναν από τεχνίτες, άτομα με επιδεξιότητα στα χέρια τους, τα οποία κέρδιζαν τη ζωή τους κατασκευάζοντας ρολόγια και άλλα αντικείμενα. Ο σπουδαίος Άγγλος φυσικός Michael Faraday ξεκίνησε τη σταδιοδρομία του ως βιβλιοδέτης. Τότε άρχισε να εμφανίζεται πάλι ανανεωμένο το ενδιαφέρον για τον ηλεκτρισμό.

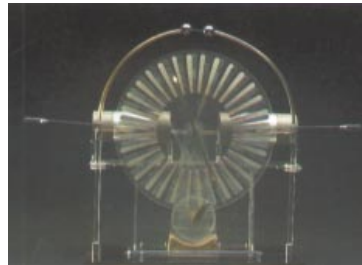
### Πηγή διασκέδασης

Μια διασκέδαση που συνηθιζόταν τον καιρό εκείνο στις χώρες της Δυτικής Ευρώπης είχε να κάνει με τους "ηλεκτρισμένους" ανθρώπους (εικόνα 3). Έπειθαν μικρά παιδιά και τα κρεμούσαν με νήματα από μετάξι. Στη συνέχεια, τα "φόρτιζαν" χτυπώντας τα με στεγνά ρούχα ώσπου ανορθώνονταν οι τρίχες της κεφαλής τους. Στο σκοτάδι διακρίνονταν μικρές εκκενώσεις (σαν μικροσκοπικές αστραπές), που ξεκινούσαν από τα παιδιά και κατέληγαν σε οποιονδήποτε βρισκόταν κοντά τους.



Εικ. 3

Αργότερα, επινοήθηκαν μηχανές που, χρησιμοποιώντας υλικά παρόμοια με το κεχριμπάρι, παρήγαγαν ηλεκτρισμό με τη στροφή μιας λαβής (εικόνα 4).



Εικ. 4

Η όλη υπόθεση έγινε τόσο δημοφιλής ώστε θα μπορούσε κάποιος να κερδίζει και χρήματα ηλεκτρίζοντας ανθρώπους στα πανηγύρια. Οι άνθρωποι πίστευαν ότι το να ηλεκτριστούν ήταν καλό για την υγεία τους και έτσι πλήρωναν χρήματα για αυτό.

Ο Peter van Musschenbroek από την Ολλανδία προσπάθησε το 1764 να ηλεκτρίσει το νερό και, από σύμπτωση, ανακάλυψε ένα νέο φαινόμενο. Το "φορτίο" μπορούσε να αποθηκευτεί σε ένα δοχείο.



Εικ. 5

Αυτό το δοχείο ήταν ο

πρώτος πυκνωτής και ονομάστηκε η Στάμνα του Λέιντεν (Leiden Jar) γιατί το πείραμα έγινε στην πόλη Λέιντεν.

Τα πράγματα, τώρα, σοβάρευαν. Μπορούσε να αποθηκευτεί αρκετό φορτίο, ώστε να προκαλέσει στους ανθρώπους ένα ισχυρό τίναγμα. Το σοκ μπορούσε να θανατώσει μικρά ζώα και πουλιά και να λιώσει σύρματα.

Στο Παρίσι, 180 στρατιώτες της βασιλικής φρουράς πιάστηκαν χέρι – χέρι και ευθυγραμμίστηκαν. Όταν αυτός που βρισκόταν στο ένα άκρο άγγιξε ένα δοχείο Λέιντεν, όλοι μαζί τινάχτηκαν στον αέρα την ίδια στιγμή. Το πείραμα ξανάγινε με 300 μοναχούς, που σχημάτισαν ουρά 100m. Τα αποτελέσματα ήταν ίδια. (εικόνα 5). Οι άνθρωποι πίστευαν ότι το σοκ που προκαλεί ο ηλεκτρισμός θεραπεύει την αρθρίτιδα και τους ρευματισμούς. Ξαφνικά ο ηλεκτρισμός έγινε δημοφιλής.

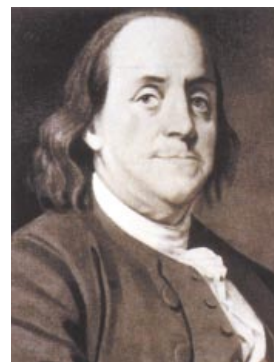
Ο ηλεκτρισμός σήμερα είναι παντού γύρω μας. Ζούμε σε μια Τεχνολογική Εποχή, στην οποία οι εφαρμογές του έχουν γίνει απαραίτητες στην καθημερινή μας ζωή. Υποθέστε προς στιγμήν ότι συμβαίνει ένα ξαφνικό μπλακ άουτ και σκεφθείτε τις επιπτώσεις του στη δουλειά σας, στη μελέτη σας και γενικά σε κάθε δραστηριότητα δική σας ή άλλων ανθρώπων. Δε θα ήταν εξαιρετική υπερβολή να πούμε ότι είμαστε, κατά κάποιον τρόπο, αιχμάλωτοι του ηλεκτρισμού και των εφαρμογών του.

### 2.1. Τι είναι ο ηλεκτρισμός;

Η φύση του ηλεκτρισμού κατανοήθηκε με πληρότητα στα πρώτα χρόνια του αιώνα μας. Μια πολύ καλή αρχή, όμως, είχε γίνει από τον Αμερικανό Benjamin Franklin (1706-1790). Η θεωρία του Φραγκλίνου για τον ηλεκτρισμό ήταν πολύ απλή. Σύμφωνα με αυτήν:

**Κάθε αντικείμενο περιέχει ηλεκτρισμό. Εάν ο ηλεκτρισμός που περιέχει είναι περισσότερος από το κανονικό μερίδιό του, τον ονομάζει "συν", εάν είναι λιγότερος από το κανονικό μερίδιό του, τον ονομάζει "μείον".**

Άρχισε τη ζωή του ως μαθητευόμενος σε τυπογραφείο και στη συνέχεια έγινε επιτυχημένος τυπογράφος. Σε ηλικία 40 ετών παρακολούθησε κάποια πειράματα ηλεκτρισμού και γοητεύτηκε τόσο πολύ, ώστε πούλησε το τυπογραφείο του και αφιέρωσε την υπόλοιπη ζωή του σε πειραματική έρευνα. Ήταν ο πρώτος που κατανόησε ότι η αστραπή είναι μια τεράστια ηλεκτρική εκκένωση. Για να συγκεντρώσει φορτίο από τα σύννεφα "πέταξε" ένα χαρταετό με μεγάλο κίνδυνο της ζωής του. Έμαθε αρκετά, ώστε να παραγάγει την πρώτη τεχνητή αστραπή για την οποία έγινε ξακουστός. Αργότερα, όταν οι αμερικανικές αποικίες ανεξαρτοποιήθηκαν από τη Βρετανία και απετέλεσαν τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η φήμη του ως ριζοσπάστη πολιτικού μεγάλωσε περισσότερο.



Σήμερα γνωρίζουμε ότι, πράγματι, υπάρχουν **δύο είδη** ηλεκτρικού φορτίου, τα οποία ακόμα τα ονομάζουμε "συν" και "μείον" ή **θετικό φορτίο** και **αρνητικό φορτίο**.

Η ονομασία "συν" και "μείον" δεν έχει καμία σχέση με τα αντίστοιχα σύμβολα



των μαθηματικών. Δεν πρέπει να φανταστείτε ότι το ηλεκτρόνιο έχει κάτι αρνητικό μέσα του ή ότι το πρωτόνιο έχει κάτι θετικό. Το ηλεκτρόνιο και το πρωτόνιο είναι δύο στοιχειώδη σωματίδια, που φέρουν ηλεκτρικά φορτία, τα οποία είναι από ποιοτική άποψη διαφορετικά και έχουν αντίθετες ιδιότητες. Δύο βολικά σύμβολα αντίθεσης είναι το  $+$  και το  $-$ . Έτσι υιοθετήθηκαν αυτά τα σύμβολα.

Τα ερωτήματα που προκύπτουν είναι:

1. **Τι είναι το ηλεκτρικό φορτίο**
2. **Πού βρίσκεται**
3. **Πώς αλληλεπιδρούν τα φορτία μεταξύ τους και με την ύλη γενικά.**

Απάντηση στο πρώτο ερώτημα δεν υπάρχει. Κανείς δε γνωρίζει **τι είναι** το ηλεκτρικό φορτίο. Εκείνο που γνωρίζουμε είναι ότι το ηλεκτρικό φορτίο παρουσιάζεται ως μία ιδιότητα των σωματιδίων που είναι γνωστά ως **ηλεκτρόνιο** και **πρωτόνιο** ( και όχι μόνον αυτών ).

Η απάντηση στο δεύτερο ερώτημα βρίσκεται στην προηγούμενη πρόταση: το ηλεκτρικό φορτίο είναι μια μυστηριώδης ιδιότητα, την οποία εμφανίζουν κάποια σωματίδια που ονομάζονται **στοιχειώδη σωματίδια**.

**Προσοχή:** δεν έχουν όλα τα στοιχειώδη σωματίδια ηλεκτρικό φορτίο. Εμάς θα μας απασχολήσουν το πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο.

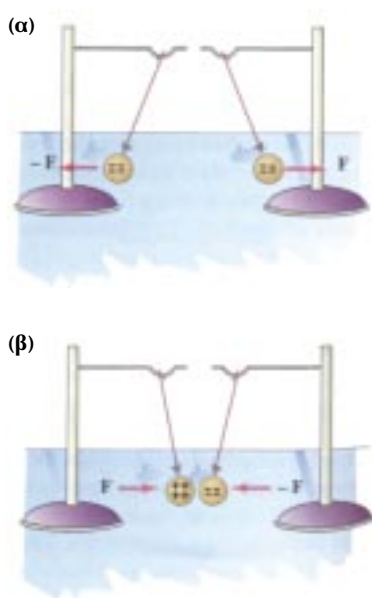
Η απάντηση στο τρίτο ερώτημα δίνεται από το πείραμα.

### Πείραμα

Τρίβουμε μια ράβδο από **καουτσούκ** με μάλλινο ύφασμα και στη συνέχεια την ακουμπάμε στο σφαιρίδιο ενός ηλεκτρικού εκκρεμούς. Επαναλαμβάνουμε το ίδιο με το σφαιρίδιο ενός δεύτερου εκκρεμούς και τοποθετούμε τα δύο σφαιρίδια απέναντι το ένα στο άλλο. Θα παρατηρήσουμε ότι τα σφαιρίδια απωθούνται (εικόνα 6α). Απομακρύνουμε το ένα εκκρεμές και φέρνουμε κοντά στο άλλο ένα τρίτο εκκρεμές, στο μπαλάκι του οποίου ακουμπήσαμε μια **γυάλινη ράβδο**, που την τρίψαμε με ένα μάλλινο ύφασμα. Θα παρατηρήσουμε ότι τα σφαιρίδια έλκονται (εικόνα 6β).

### Ερμηνεία

Είναι φανερό ότι τα φορτία των σφαιριδίων στην περίπτωση του σχήματος 6α είναι της ίδιας φύσης. Τα φορτία των σφαιρι-



Εικ. 6

δίων στην εικόνα 6β δεν είναι της ίδιας φύσης. Το φορτίο των δύο πρώτων σφαιριδίων ονομάζεται κατά σύμβαση **αρνητικό**. Το φορτίο του τρίτου σφαιριδίου ονομάζεται κατά σύμβαση **θετικό**.

### Συμπέρασμα

**Φορτία της ίδιας φύσης ( συν με συν ή πλην με πλην) απωθούνται.**  
**Φορτία αντίθετης φύσης (συν με πλην) έλκονται.**

Ο νόμος για τον τρόπο με τον οποίο ασκούνται δυνάμεις ανάμεσα στα φορτία ονομάζεται **νόμος Coulomb** και θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

## 2.2. Το άτομο

Το άτομο, όπως γνωρίζετε, είναι το μικρότερο κομμάτι στο οποίο μπορούμε να διαιρέσουμε την ύλη με χημικά μέσα (χημικές αντιδράσεις).

Κάθε άτομο αποτελείται από δύο συγκεκριμένες περιοχές. Η μία περιοχή βρίσκεται στο κέντρο του, είναι εξαιρετικά πυκνή και ονομάζεται πυρήνας. Ο **πυρήνας** περιέχει τα στοιχειώδη σωματίδια που ονομάζονται **πρωτόνιο** και **νετρόνιο**. Το πρωτόνιο φέρει αυτό το είδος του φορτίου που ονομάσαμε **θετικό**. Το νετρόνιο δε φέρει καθόλου φορτίο, είναι ουδέτερο. Η άλλη περιοχή είναι ένας **σφαιρικός φλοιός**, μέσα στον οποίο κινούνται σωματίδια, που ονομάζονται **ηλεκτρόνια**. Τα ηλεκτρόνια είναι πολύ μικρότερα από τα πρωτόνια και από τα νετρόνια και φέρουν αυτό το είδος του φορτίου που ονομάσαμε αρνητικό. Έχει διαπιστωθεί πειραματικά ότι:

**Το φορτίο του πρωτονίου είναι, κατ' απόλυτη τιμή, ίσο με το φορτίο του ηλεκτρονίου.**

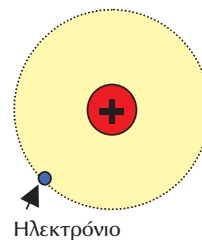
Στην εικόνα (7) απεικονίζεται ένα απλοποιημένο μοντέλο για το απλούστερο άτομο που υπάρχει στη φύση, το άτομο του υδρογόνου. Το άτομο αυτό έχει στον πυρήνα του ένα πρωτόνιο. Νετρόνιο δεν έχει.

Γύρω από τον πυρήνα περιφέρεται ένα μοναδικό ηλεκτρόνιο. Το συνολικό φορτίο του ατόμου ισούται με το άθροισμα του φορτίου του πρωτονίου και του φορτίου του ηλεκτρονίου. Αφού, όπως είπαμε, τα φορτία τους είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσα, είναι φανερό ότι το άτομο, στο σύνολό του, δεν εμφανίζει φορτίο. Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι το άτομο είναι **ουδέτερο**.

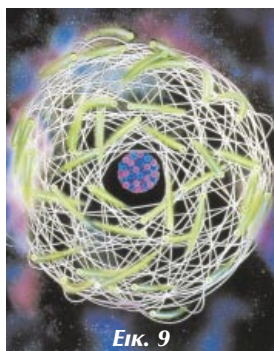
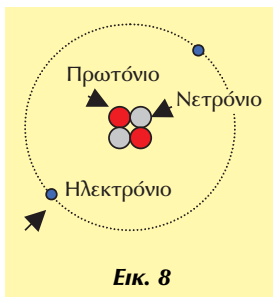
Στην εικόνα (8) απεικονίζεται το άτομο του στοιχείου " ήλιον" (He). Ο πυρή-

### EΡΕΥΝΑ

Να συγκεντρώσετε στοιχεία για τη ζωή και το έργο του Benjamin Franklin. Προσπαθήστε να βρείτε γκραβούρες εποχής και σχετικές εικόνες. Να συνθέσετε μια εργασία έκτασης 5 περίπου σελίδων και να την παραδώσετε στον καθηγητή σας.



Εικ. 7



#### Ας προσέξουμε:

Το ότι το άτομο είναι ουδέτερο δε σημαίνει ότι δεν έχει ηλεκτρικά φορτία. Ηλεκτρικά φορτία έχει. Η ουδετερότητά του οφείλεται στο ότι το ολικό θετικό φορτίο του πυρήνα ισούται με το συνολικό αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων.

νας του αποτελείται από 2 πρωτόνια και από 2 νετρόνια. Η στιβάδα των ηλεκτρονίων έχει 2 ηλεκτρόνια. Να παρατηρήσετε ότι, μολονότι το άτομο έχει ηλεκτρικά φορτία, στο συνολό του εμφανίζεται ουδέτερο, διότι το ολικό θετικό φορτίο των 2 πρωτονίων του πυρήνα αντισταθμίζεται από το ολικό αρνητικό φορτίο των 2 ηλεκτρονίων.

Τα άτομα όλων των στοιχείων, εφόσον δεν έχουν υποστεί κάποια ειδική επίδραση είναι ηλεκτρικά ουδέτερα. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που περιφέρονται γύρω από αυτόν.

Στην εικόνα (9) φαίνεται ένα άτομο σε τριδιάστατη απεικόνιση. Αποτελείται από ένα μικρό, θετικά φορτισμένο πυρήνα, γύρω από τον οποίο κινούνται τα αρνητικά ηλεκτρόνια. Οι κλειστές ηλεκτρονικές τροχιές είναι συμβολικές.

Ας θεωρήσουμε τώρα ένα **μεταλλικό σώμα** και ας εξετάσουμε τι συμβαίνει στο εσωτερικό του από ηλεκτρική άποψη. Τα άτομα των μετάλλων έχουν ηλεκτρόνια, που κατανέμονται σε ομάδες ή **στιβάδες** γύρω από τον πυρήνα. Είπαμε ότι τα ετερώνυμα φορτία έλκονται. Αυτό σημαίνει ότι τα θετικά πρωτόνια του πυρήνα έλκουν τα αρνητικά ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια της στιβάδας που απέχει περισσότερο από τον πυρήνα δέχονται τις ασθενέστερες ελκτικές δυνάμεις και ονομάζονται **εξωτερικά ηλεκτρόνια**. Στην περίπτωση ενός μετάλλου τα άτομά του έχουν πλησιάσει σε πολύ μικρές αποστάσεις, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στιβάδων των ατόμων να ασκούν μεταξύ τους δυνάμεις αρκετά ισχυρές, ώστε να αποσπαστούν από τα άτομα και να γίνουν πραγματικά ελεύθερα, κυκλοφορώντας τυχαία και απροσανατόλιστα στο εσωτερικό του μετάλλου.

Όταν αποσπάται ένα ηλεκτρόνιο από ένα άτομο, το συγκρότημα που απομένει παρουσιάζει θετικό φορτίο, διότι περισσεύει ένα πρωτόνιο του πυρήνα. Το θετικά φορτισμένο συγκρότημα που απομένει ονομάζεται **μονοσθενές θετικό ιόν**. Αν αποσπαστούν δύο ηλεκτρόνια, στο συγκρότημα θα περισσεύουν δύο θετικά πρωτόνια του πυρήνα, και θα έχουμε το **δισθενές θετικό ιόν**. Το ίδιο ισχύει αναλογικά για τρία ή για περισσότερα ηλεκτρόνια.

Είναι δυνατόν στην εξωτερική στιβάδα του ατόμου να προστεθούν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Στην περίπτωση αυτή το συγκρότημα θα παρουσιάζει



επιπλέον αρνητικό φορτίο ίσο με το φορτίο των ηλεκτρονίων που προσκολλήθηκαν, και θα έχουμε **αρνητικό ιόν**, μονοσθενές, δισθενές κτλ, ανάλογα με τον αριθμό των ηλεκτρονίων που προσκολλήθηκαν (αναφερόμαστε σε μέταλλα).

Τι, λοιπόν, θα βλέπαμε στο εσωτερικό ενός κομματιού από μέταλλο, αν διαθέταμε ένα υποθετικό μικροσκόπιο τόσο ισχυρό, ώστε να μπορούμε να διακρίνουμε τα ηλεκτρόνια και τα άλλα στοιχειώδη σωματίδια; Θα βλέπαμε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινούνται τυχαία και ακανόνιστα προς όλες τις διευθύνσεις σαν τυφλές μέλισσες. Θα βλέπαμε ακόμα τα θετικά ιόντα να ταλαντώνονται γύρω από τις καθορισμένες θέσεις τους, όπως περίπου ταλαντώνονται τα κτίρια μιας πόλης στην οποία σημειώθηκε σεισμός (εικόνα 10).

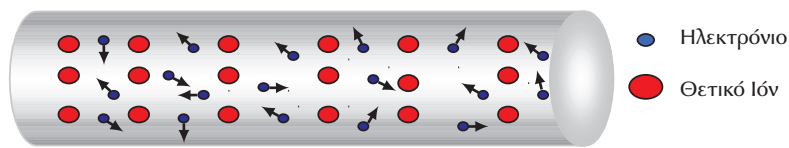
Αν δεχτούμε ότι από κάθε ουδέτερο άτομο αποσπάστηκε ένα ηλεκτρόνιο, στο εσωτερικό

#### Θετικό ιόν

Το φορτισμένο συγκρότημα που προκύπτει, από ένα ουδέτερο άτομο, αν από αυτό αφαιρεθούν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

#### Αρνητικό ιόν

Το φορτισμένο συγκρότημα που προκύπτει, αν σε ένα ουδέτερο άτομο, προστεθούν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια.



Εικ. 10

του μετάλλου θα έχουμε τόσα θετικά ιόντα όσα και ηλεκτρόνια. Επιπλέον, αφού το φορτίο του θετικού ιόντος είναι ίσο με το φορτίο του αρνητικού ελεύθερου ηλεκτρονίου, το ολικό φορτίο στο εσωτερικό του μετάλλου θα είναι μηδέν. Λέμε τότε ότι το σώμα είναι **ουδέτερο** ή **αφόρτιστο**.

#### Συμπέρασμα:

**Η ηλεκτρική ουδετερότητα των μετάλλων δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν φορτία στο εσωτερικό τους. Σημαίνει ότι το ολικό αρνητικό φορτίο των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι, κατ' απόλυτη τιμή, ίσο με το ολικό θετικό φορτίο των ιόντων.**

Από όσα ειπώθηκαν παραπάνω προκύπτει το επόμενο πολύ σημαντικό συμπέρασμα: για να **φορτίσουμε ηλεκτρικά** ένα σώμα, πρέπει να ανατρέψουμε την εξισορρόπηση θετικού και αρνητικού φορτίου. Τα μόνα φορτία που κινούνται ελεύθερα στο εσωτερικό των σωμάτων είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (ας θυμηθούμε: τα ιόντα ταλαντώνονται μόνο). Η φόρτιση θα γίνει με μετακίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων. Έτσι:

**A.** Για να φορτίσουμε ένα σώμα με θετικό φορτίο, πρέπει να του **αφαιρέσουμε ελεύθερα ηλεκτρόνια**.

**B.** Για να φορτίσουμε ένα σώμα με αρνητικό φορτίο, πρέπει να του **προσθέσουμε ηλεκτρόνια**.

Αυτό ακριβώς συμβαίνει, όταν προσπαθούμε να φορτίσουμε ένα σώμα, τρίβοντάς το με ένα ύφασμα. Ελεύθερα ηλεκτρόνια μετακινούνται από το ένα σώμα στο άλλο. Σε εκείνο που χάνει ηλεκτρόνια εμφανίζεται πλεόνασμα θετικού φορτίου και σε εκείνο που κερδίζει ηλεκτρόνια εμφανίζεται πλεόνασμα αρνητικού φορτίου.

## 2.3. Όργανα ηλεκτροστατικών μετρήσεων

### 1. Ηλεκτρικό εκκρεμές



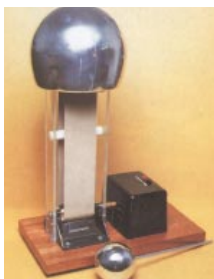
Αποτελείται από μία ή από δύο επιμεταλλωμένες μικρές σφαίρες από πολυστυρένιο (πολλές φορές χρησιμοποιείται και ψίχα κουφοζυλίας) που έχουν διάμετρο περίπου 16mm. Κάθε σφαίρα κρέμεται από ένα κεντρικό στέλεχος με νήμα από μετάξι, το οποίο είναι μονωτικό. Χρησιμοποιείται για να διαπιστώσουμε αν ένα σώμα είναι ηλεκτρισμένο. Το ολικό ύψος του οργάνου είναι περίπου 110mm. Χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της ηλεκτρίσης ενός σώματος.

### 2. Ηλεκτροσκόπιο



Το ηλεκτροσκόπιο είναι απαραίτητο εργαστηριακό όργανο για τα πειράματα στατικού ηλεκτρισμού. Αν βαθμονομηθεί κατάλληλα, μπορεί να μετρά το δυναμικό φορτισμένων σωμάτων ή το φορτίο τους.

### 3. Γεννήτρια Van de Graaf



Αποδεικνύεται πειραματικά ότι αν σε κάποιο σημείο της εσωτερικής επιφάνειας ενός κοίλου αγωγού τοποθετήσουμε κάποιο φορτίο, αυτό κινείται προς την εξωτερική του επιφάνεια. Στο εσωτερικό του αγωγού δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Ο Van de Graaf το εκμεταλλεύτηκε αυτό το 1931 και κατασκεύασε έναν επιταχυντή, ο οποίος είναι μια συσκευή που επιταχύνει την κίνηση των σωματιδίων, με αποτέλεσμα να αποκτούν υψηλές ενέργειες. Ένας μονωμένος ιμάντας μεταφέρει συνεχώς φορτία στο εσωτερικό ενός κοίλου αγωγού, τα οποία στη συνέχεια μεταφέρονται στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού. Καθώς συσσωρεύεται

φορτίο στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού, το δυναμικό του συνεχώς αυξάνεται.

#### 4. Μηχανή Wimshurst

Ηλεκτροστατική γεννήτρια. Παράγει μικρές ηλεκτρικές εκκενώσεις μήκους 8cm. Οι περιστρεφόμενοι δίσκοι έχουν διάμετρο 30cm. Οι συλλέκτες του φορτίου στηρίζονται σε οριζόντια μονωτική ράβδο. Συνήθως συνοδεύεται από "δοχεία Leyden", που μπορούν να συνδεονται και να αποσυνδέονται με σκοπό να μεταβάλλεται η χωρητικότητα.



### 2.4. Αγωγοί, μονωτές, ημιαγωγοί

#### Πείραμα

Το επιμεταλλωμένο μπαλλάκι ενός ηλεκτρικού εκκρεμούς (εικόνα 11), που κρέμεται με νήμα από μετάξι από το κατακόρυφο στέλεχος του εκκρεμούς, το συνδέουμε με λεπτό χάλκινο σύρμα με την κεφαλή ενός ηλεκτροσκοπίου, όπως φαίνεται στο σχήμα. Τοποθετούμε στο μπαλάκι αρνητικό φορτίο και παρατηρούμε ότι τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου αποκλίνουν. Είναι φανερό ότι μέρος του φορτίου (δηλαδή αριθμός ηλεκτρονίων) κινείται μέσα από το χάλκινο σύρμα και φτάνει στα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου, τα οποία, αποκτώντας ομώνυμα φορτία, απωθούνται. Εκφορτίζουμε το ηλεκτροσκόπιο και αντικαθιστούμε το χάλκινο σύρμα με νήμα από μετάξι. Τοποθετούμε στο μπαλλάκι αρνητικό φορτίο. Θα παρατηρήσουμε ότι τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου δεν αποκλίνουν τώρα.



Εικ. 11

#### Συμπέρασμα:

**Μέσα από το μετάξι δε μετακινούνται ηλεκτρόνια με κατεύθυνση προς τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου. Λέμε ότι ο χαλκός είναι αγωγός, ενώ το μετάξι είναι μονωτής.**

Το ερώτημα είναι: γιατί άλλα σώματα είναι αγωγοί και άλλα είναι μονωτές; Η εξήγηση βρίσκεται στην εσωτερική δομή των σωμάτων. Η δομή των μετάλλων είναι τέτοια, ώστε στο εσωτερικό τους να

**Αγωγοί** του ηλεκτρισμού ονομάζονται τα σώματα τα οποία επιτρέπουν στα ηλεκτρικά φορτία να κινηθούν μέσα τους.

**Μονωτές** ονομάζονται τα σώματα τα οποία δεν επιτρέπουν στα ηλεκτρικά φορτία να κινηθούν μέσα τους.

Τα μέταλλα και τα διαλύματα των ηλεκτρολυτών είναι αγωγοί του ηλεκτρισμού. Επίσης αγωγοί του ηλεκτρισμού είναι και τα ιονισμένα αέρια. Ορισμένα υλικά όπως το γυαλί, ο ξηρός αέρας, η μίκα, η παραφίνη, το σκληρό καουτσούκ, το μετάξι, το ξύλο, το μάρμαρο κ.ά. είναι μονωτές.

υπάρχει πολύ μεγάλος αριθμός από ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά μονάδα όγκου, τα οποία κινούνται τυχαία και χαοτικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Αυτό το νέφος από ελεύθερα ηλεκτρόνια που κινούνται στο εσωτερικό των μετάλλων ονομάζεται **ηλεκτρονικό νέφος**. Στους μονωτές υπάρχουν πολύ λιγότερα ελεύθερα ηλεκτρόνια ανά μονάδα όγκου. Η αγωγιμότητα των διαλυμάτων ηλεκτρολυτών οφείλεται στα **θετικά** και στα **αρνητικά ιόντα** που δημιουργούνται στο εσωτερικό τους. Τέλος, η αγωγιμότητα των ιονισμένων αερίων οφείλεται σε **θετικά** και σε **αρνητικά ιόντα**, καθώς και σε **ελεύθερα ηλεκτρόνια**.

Υπάρχει μια κατηγορία σωμάτων, τα οποία δεν είναι ιδανικοί αγωγοί αλλά ούτε και τέλει μονωτές. Τέτοια σώματα είναι το γερμάνιο, το πυρίτιο, ο άνθρακας κ.ά. Τα σώματα αυτά διαθέτουν στο

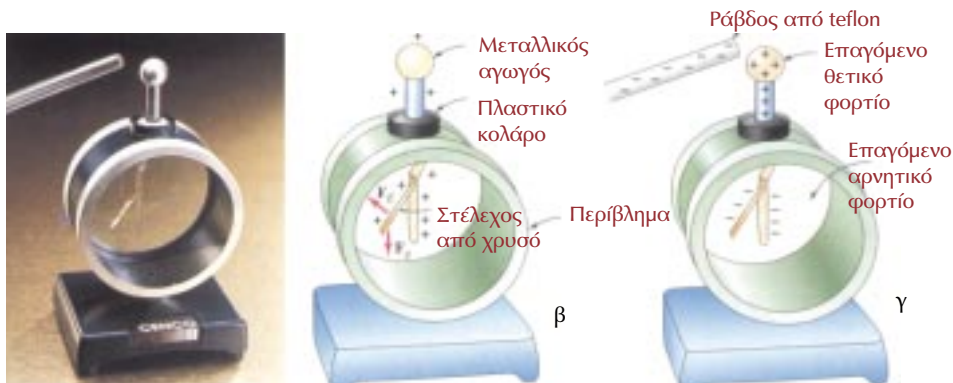
εσωτερικό τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς, αλλά ο αριθμός των φορέων στη μονάδα όγκου είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο για τους αγωγούς και μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο για τους μονωτές. Αυτά τα σώματα ονομάζονται **καθαροί ημιαγωγοί**.

Στην εικόνα 12 φαίνονται διάφορα υλικά καλά φθίνουσα σειρά αγωγιμότητας. Να παρατηρήσετε ότι την καλύτερη αγωγιμότητα την έχει ο Ag, αλλά και ο Cu δεν πάει πίσω. Ο χαλκός είναι πολύ φτηνότερος από τον άργυρο. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται χαλκός για την κατασκευή καλωδίων. Να παρατηρήσετε ότι ο άνθρακας κατατάσσεται στους αγωγούς, μολονότι δεν έχει εξαιρετική αγωγιμότητα.



Εικ. 12

## 2.5 Φόρτιση και ηλέκτριση των σωμάτων



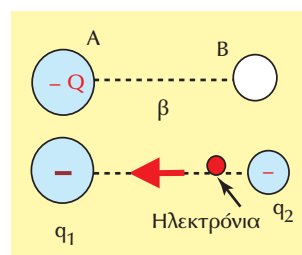
Εικ. 13

Το όργανο του σχήματος είναι το πολύ γνωστό σας ηλεκτροσκόπιο. Να παρατηρήσετε ότι προστατεύεται από τζάμι. Αυτό είναι πολύ σημαντικό, γιατί τα πειράματα με στατικό ηλεκτρισμό είναι πολύ ευαίσθητα στην ύπαρξη υγρασίας. Το ηλεκτροσκόπιο χρησιμοποιείται για να διαπιστώνουμε εάν ένα σώμα είναι φορτισμένο. Εάν βαθμονομηθεί κατάλληλα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση φορτίου ή δυναμικού

Όπως είπαμε στην παράγραφο 2.2, ένα ηλεκτρικά ουδέτερο σώμα περιέχει ίσες ποσότητες από θετικό και από αρνητικό φορτίο. Επειδή τα μόνα ευκίνητα φορτία είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, η φόρτιση και η ηλέκτριση των σωμάτων μπορεί να γίνει μόνο με μετακίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων.

### α. Φόρτιση με τριβή

Όταν τρίβουμε ένα σώμα με ύφασμα, το ένα σώμα προσφέρει στο άλλο ηλεκτρόνια. Έτσι, όταν τρίβουμε, π.χ. μια ράβδο από **σκληρό καουτσούκ** με ένα κομμάτι **υφάσματος**, μεταφέρονται ελεύθερα ηλεκτρόνια από το ύφασμα στη ράβδο. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ράβδος να αποκτά αρνητικό φορτίο και το ύφασμα θετικό. Όταν τρίβουμε μια γυάλινη ράβδο με ύφασμα, μεταφέρονται ηλεκτρόνια από τη ράβδο στο ύφασμα. Η γυάλινη ράβδος αποκτά θετικό φορτίο. Στην ηλέκτριση με τριβή τα φορτία που αποκτούν τα δύο σώματα είναι ίσα κατά μέγεθος και ετερόνυμα.



Εικ. 14 Μπορείτε να διακρίνετε κάποια σχέση ανάμεσα στα φορτία  $q_1$ ,  $q_2$  και  $Q$ ;

### Β. Φόρτιση με επαφή

Όταν ένα φορτισμένο σώμα έρχεται σε επαφή με ένα αφόρτιστο, παρατηρείται μετακίνηση φορτίου από το ένα σώμα στο άλλο. Στην εικόνα 14 το σώμα Α είναι αρνητικά φορτισμένο και το σώμα Β αφόρτιστο. Ενώνουμε τα δύο σώματα με ένα λεπτό μεταλλικό σύρμα. Από το σώμα Α, που έχει **περίσσειμα ηλεκ-**



**τρονίων**, θα κινηθούν κάποια ηλεκτρόνια προς το σώμα Β. Το αποτέλεσμα θα είναι να φορτιστεί και το σώμα Β αρνητικά. Στην περίπτωση αυτή το αρχικό φορτίο  $Q$  του σώματος Α θα διαμοιραστεί. Ένα μέρος αυτού, ας το πούμε  $q_1$ , θα παραμείνει στο Α και ένα μέρος  $q_2$  θα μετακινηθεί στο Β. Να παρατηρήσετε ότι τα φορτία  $q_1$ ,  $q_2$  είναι του ίδιου είδους.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί μια βασική αρχή διατήρησης για τη μετακίνηση και την ανταλλαγή φορτίων ανάμεσα στα φορτισμένα σώματα. Η αρχή αυτή είναι γενική και ονομάζεται **αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου**. Η διατύπωσή της είναι η εξής:

### Αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου

Το ολικό φορτίο σε κάθε απομονωμένο σύστημα σωμάτων παραμένει σταθερό.

Ένα σύστημα σωμάτων ονομάζεται απομονωμένο, όταν δεν αλληλεπιδρά με κανέναν τρόπο με το περιβάλλον του. Ένα τέτοιο σύστημα δεν ανταλλάσσει φορτία με το περιβάλλον του. Επιτρέπεται, όμως, η ανταλλαγή φορτίου ανάμεσα στα μέλη του. Είναι φανερό ότι σε ένα απομονωμένο σύστημα σωμάτων, που δεν παίρνει φορτίο από το περιβάλλον ούτε δίνει φορτίο σ' αυτό, το αλγεβρικό άθροισμα του φορτίου του δεν αλλάζει.

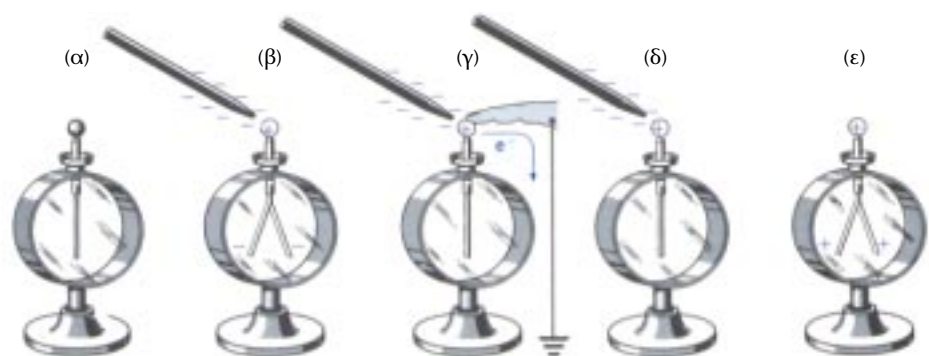
### γ. Ηλέκτριση με επαγωγή

Ας κάνουμε το πείραμα που φαίνεται στην εικόνα 15.

#### Πείραμα

Στο (α) έχουμε ένα ηλεκτροσκόπιο αφόρτιστο. Τρίβουμε μια ράβδο από καουτσούκ με γούνινο ύφασμα. Η ράβδος φορτίζεται αρνητικά. Πλησιάζουμε τη ράβδο στην κεφαλή του ηλεκτροσκοπίου,

χωρίς να την ακουμπήσουμε σ' αυτή (β). Η ράβδος θα απωθήσει ελεύθερα ηλεκτρόνια του μεταλικού στελέχους και θα τα συσσωρεύσει στα δύο φύλλα. Τα φύλλα θα αποκλίνουν. Στην κεφαλή του ηλεκτροσκοπίου θα εμφανιστεί θετικό



Αφόρτιστο  
ηλεκτροσκόπιο

Τα φύλλα φορτίζονται  
αρνητικά με επαγωγή

Τα ηλεκτρόνια  
κινούνται προς τη γη

Τα ηλεκτρόνια  
έφυγαν

Το ηλεκτροσκόπιο  
θετικά φορτισμένο

Εικ. 15

φορτίο. Στη συνέχεια, γειώνουμε την κεφαλή του ηλεκτροσκοπίου, ακουμπώντας την, π.χ., με το χέρι μας ( $\gamma$ ). Τα ηλεκτρόνια των φύλλων, απωθούμενα από το αρνητικό φορτίο της ράβδου, θα οδηγηθούν προς το έδαφος. Τα φύλλα θα πλησιάσουν. Η κεφαλή θα διατηρεί το θετικό φορτίο της ( $\gamma$ ). Απομακρύνουμε τη γείωση. Η κεφαλή θα διατηρεί το θετικό φορτίο και τα φύλλα θα είναι ενωμένα ( $\delta$ ). Απομακρύνουμε τη ράβδο. Παρατηρούμε ότι τα φύλλα αποκλίνουν πάλι ( $\epsilon$ ).

### Ερμηνεία :

Στην εικόνα 15 ( $\beta, \gamma, \delta, \epsilon$ ) φαίνεται η διαδικασία ηλεκτρίσης με επαγωγή. Η αρνητικά φορτισμένη ράβδος απωθεί ηλεκτρόνια προς τα μεταλλικά φύλλα, τα οποία έτσι αποκλίνουν. Στην κεφαλή του ηλεκτροσκοπίου περισσεύουν θετικά φορτία ( $\beta$ ). Αν, στη συνέχεια, γειώσουμε την κεφαλή, τα ηλεκτρόνια των φύλλων θα διαρρεύσουν προς τη γη και τα φύλλα θα συγκλίνουν ( $\gamma, \delta$ ). Αν απομακρύνουμε τη φορτισμένη ράβδο, θα κινηθούν ηλεκτρόνια από τα φύλλα και θα εξουδετερώσουν μέρος του θετικού φορτίου της κεφαλής. Τα φύλλα θα φορτιστούν θετικά και θα αποκλίνουν πάλι. Στο στιγμιότυπο ( $\epsilon$ ), όπου έχουμε απομακρύνει τη φορτισμένη ράβδο, ανέβηκαν ηλεκτρόνια από τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου και εξουδετέρωσαν θετικό φορτίο της κεφαλής. Τα φύλλα αποκτούν θετικό φορτίο, απωθούνται και αποκλίνουν. Το φορτίο που επάγεται στα φύλλα (**επαγόμενο φορτίο-θετικό**) είναι ετερόνυμο με το αρχικό φορτίο της ράβδου (**επάγον φορτίο-αρνητικό**).

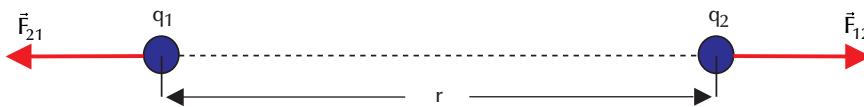
### Δραστηριότητες

1. Πάρτε μια λεπτή ράβδο από πλαστικό και τρίψτε την με ξηρό ύφασμα. Η ράβδος πρέπει να ηλεκτριστεί. Ελέξτε αν πράγματι ηλεκτρίστηκε, προσπαθώντας να τραβήξετε με αυτή μικρά κομματάκια χαρτιού.
2. Κρατήστε το φορτισμένο άκρο της κοντά στο αυτί σας. Αισθάνεστε ή ακούτε κάτι;
3. Τρίψτε με ένα στεγνό ύφασμα μια ράβδο από σκληρό καουτσούκ. Ακουμπήστε τη ράβδο στην κεφαλή ενός ηλεκτροσκοπίου. Φορτία από τη ράβδο θα μετακινηθούν προς τα φύλλα και αυτά θα αποκλίνουν. Στη συνέχεια, πάρτε μια γυάλινη ράβδο, τρίψτε την με στεγνό ύφασμα και κρατήστε την πολύ κοντά στην κεφαλή του ηλεκτροσκοπίου χωρίς να κάνετε επαφή με αυτήν. Παρατηρήστε τη συμπεριφορά των φύλλων του ηλεκτροσκοπίου και εξηγήστε την. Τι έχετε να πείτε για το φορτίο που αναπτύσσεται στο γυαλί;

## 2.6 Νόμος του Coulomb

Ο νόμος αυτός είναι **πειραματικός** και προσδιορίζει το μέτρο της ηλεκτρικής δύναμης ανάμεσα σε δύο φορτισμένα, σημειακά σώματα.

Ας υποθέσουμε ότι τα φορτία των δύο σωμάτων είναι  $q_1$  και  $q_2$  και ότι τα σώματα απέχουν απόσταση  $r$  (εικόνα 16).



Εικ. 16

Θα υποθέσουμε ότι τα φορτία των δύο σωμάτων είναι ομώνυμα (είτε και τα δύο θετικά είτε και τα δύο αρνητικά). Στην περίπτωση αυτή η δύναμη που ασκεί το καθένα στο άλλο είναι απωστική. Να παρατηρήσετε ότι οι δυνάμεις αυτές έχουν σχέση **δράσης-αντίδρασης** και κατά συνέπεια είναι αντίθετες, πράγμα που σημαίνει ότι έχουν το ίδιο μέτρο και αντίθετη κατεύθυνση. Από το πείραμα προκύπτει ότι το μέτρο καθεμιάς από αυτές τις δυνάμεις δίνεται από τη συνάρτηση:

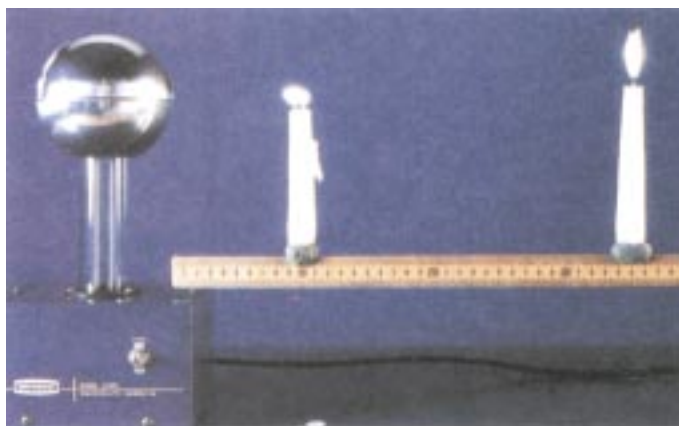
$$F = K_{\eta\lambda} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (2.1) \quad \text{όπου: } K_{\eta\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

Η σταθερά  $\epsilon_0$  ονομάζεται **επιτρεπτικότητα του κενού**

### Ποιοτικό πείραμα

Το επόμενο απλό πείραμα (εικόνα 17) φανερώνει ότι το μέτρο της δύναμης ανάμεσα σε δύο φορτισμένα σώματα ελαττώνεται, όταν η απόσταση των σωμάτων αυξάνεται.

Η γεννήτρια Van De Graaf είναι φορτισμένη αρνητικά. Στερεώνουμε δύο κεριά, ώστε οι φλόγες τους να βρίσκονται στην ίδια οριζόντια ευθεία με το κέντρο της σφαίρας. Το φορτίο της γεννήτριας ασκεί ελκτικές δυνάμεις στα θετικά ιόντα που βρίσκονται κοντά στα κεριά. Έτσι, δημιουργείται ένα ρεύμα ιόντων με κατεύθυνση προς την κεφαλή της γεννήτριας. Αυτό το ρεύμα προκαλεί καμπύλωση στις φλόγες των κεριών. Το φαινόμενο παρατηρείται έντονα στη φλόγα του πλησιέστερου κεριού. Η φλόγα του άλλου κεριού παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη.



Εικ. 17

**Διατύπωση του νόμου του Coulomb.**

Το μέτρο της ελκτικής ή απωστικής δύναμης ανάμεσα σε δύο φορτισμένα σημειακά σώματα είναι:

1. Ανάλογο των φορτίων των δύο σωμάτων.
2. Αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της απόστασής τους.

**Παρατηρήσεις :**

1. Ο νόμος ισχύει για σώματα που μπορούν να θεωρηθούν ως υλικά σημεία. Ισχύει, όμως, και στην περίπτωση που τα σώματα είναι φορτισμένες μονωτικές σφαίρες. Τότε, ως απόσταση  $r$  παίρνουμε την απόσταση των κέντρων τους. Εάν οι σφαίρες είναι μεταλλικές, πρέπει η απόστασή τους να είναι μεγάλη σε σχέση με τις διαστάσεις τους, ώστε να μην επηρεάζει καθεμιά την κατανομή του φορτίου στην άλλη.

2. Το ότι το μέτρο της δύναμης είναι αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της απόστασης σημαίνει ότι αν διπλασιάσουμε την απόσταση, το μέτρο της δύναμης θα γίνει 4 φορές μικρότερο, αν τριπλασιάσουμε την απόσταση, το μέτρο θα γίνει 9 φορές μικρότερο κ.ο.κ. Αντίστοιχα θα συμβαίνουν, όταν ελαττώσουμε την απόσταση. Τώρα, όμως, το μέτρο της δύναμης αυξάνεται.

Στον πίνακα I δίνονται στοιχεία για το φορτίο και τη μάζα των στοιχειωδών σωματιδίων ηλεκτρόνιο και πρωτόνιο. Οι τιμές αυτές αποτελούν πολύ καλή προσέγγιση των "πραγματικών" τιμών.

**ΠΙΝΑΚΑΣ I**

Σωματίδιο	Φορτίο	Μάζα
Ηλεκτρόνιο	$q_e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
Πρωτόνιο	$q_p = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$

**Παράδειγμα 1**

Ηλεκτρόνιο και πρωτόνιο βρίσκονται ακίνητα σε απόσταση  $r = 4,6 \text{ mm}$ . Να υπολογιστεί το μέτρο της ελκτικής δύναμης που ασκεί το ένα στο άλλο. Τα ηλεκτρικά φορτία του πρωτονίου και του ηλεκτρονίου είναι απολύτως ίσα ( $q_e = q_p = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ).

Να υπολογίσετε το λόγο της ηλεκτροστατικής έλξης και της βαρυτικής έλξης ανάμεσα στο πρωτόνιο και στο ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου. Το μέτρο της βαρυτικής έλξης ανάμεσα σε δύο σημειακές μάζες δίνεται από

τη σχέση,  $F_{\text{βαρ}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$  όπου  $G$  σταθερά της οποίας η τιμή είναι στο SI

$$G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2}$$

### Λύση

Με άμεση εφαρμογή του τύπου του νόμου του Coulomb έχουμε:

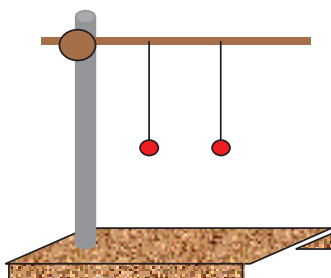
$$F_C = k_{\eta\lambda} \frac{q_e q_p}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \times 1,6 \cdot 10^{-19}}{(4,6 \cdot 10^{-3})^2} = 10^{-20} \text{ N}$$

Να παρατηρήσετε ότι:

1. Μετατρέψαμε τα mm σε m. Έτσι  $r = 4,6 \text{ mm} = 4,6 \times 10^{-3} \text{ m}$ . Να μην αμελείτε κάθε φορά που κάνετε αντικατάσταση μεγεθών σε έναν τύπο, να εκφράζετε τις μονάδες τους στο ίδιο σύστημα. Αν δεν το προσέξετε, το αποτέλεσμα θα είναι λανθασμένο. Στον ηλεκτρισμό χρησιμοποιούμε πάντοτε το σύστημα SI.
2. Ο τύπος που χρησιμοποιήσαμε μας δίνει το μέτρο της δύναμης. Από τη θεωρία γνωρίζουμε ότι οι δυνάμεις που ασκούνται ανάμεσα στα σωματίδια είναι ελκτικές, γιατί τα φορτία τους είναι ετερόσημα.

Η έκφραση για το ζητούμενο λόγο θα είναι:

$$\begin{aligned} \frac{F_C}{F_g} &= \frac{k_{\eta\lambda} \frac{q_e q_p}{r^2}}{G \frac{m_p m_e}{r^2}} = \frac{k_{\eta\lambda}}{G} \frac{q_e q_p}{m_e m_p} = \frac{9 \times 10^9}{6,67 \times 10^{-11}} \times \frac{(1,6 \times 10^{-19})^2}{9,1 \times 10^{-31} \times 1,67 \times 10^{-27}} = \\ &= \frac{9 \times (1,6^2)}{6,67 \times 9,1 \times 1,67} \times 10^{42} = 2,2 \times 10^{41} \end{aligned}$$



### Δραστηριότητα 4

Θα εξετάσουμε τον τρόπο αλληλεπίδρασης δύο φορτισμένων σωμάτων. Η εξέταση θα είναι ποιοτική.

Από την ίδια πλαστική ράβδο εξαρτούμε, με τη βοήθεια δύο νημάτων από μετάξι, δύο μικρά ελαφρά επιμεταλλωμένα σφαιρίδια.

1. Φορτίζουμε μια πλαστική ράβδο τρίβοντάς την με ένα στεγνό ύφασμα και την ακουμπάμε και στα δύο σφαιρίδια. Τι παρατηρείτε;

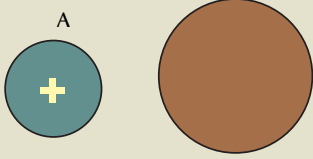
2. Φορτίζουμε μια γυάλινη ράβδο και την πλησιάζουμε στα σφαιρίδια. Τι παρατηρείτε;



**ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ...**

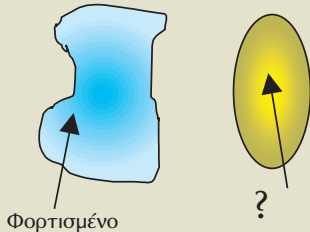
Σας δίνουν μια μεταλλική σφαίρα Α φορτισμένη θετικά. Κοντά σ' αυτήν πλησιάζετε μια άλλη ουδέτερη μεταλλική σφαίρα, όπως φαίνεται στο απέναντι σχήμα.

Το ερώτημα είναι: θα ασκηθούν δυνάμεις ανάμεσα στις σφαίρες;



**ΣΚΕΦΤΕΙΤΕ ΠΡΟΣΕΚΤΙΚΑ...**

Σας δίνουν δύο σώματα Α και Β, για τα οποία γνωρίζετε με βεβαιότητα ότι μόνο το ένα είναι φορτισμένο. Πλησιάζετε τα σώματα σε μικρή απόσταση προσέχοντας να μην ακουμπήσουν. Το ερώτημα είναι : η έλξη ή η άπωση των δύο σωμάτων θα σας πείσει ότι και το άλλο σώμα ήταν φορτισμένο ;



## 2.7. Ένταση ηλεκτροστατικού πεδίου

### Α. Γενικά

Ας ανακαλέσουμε στη μνήμη μας μερικά στοιχεία από την πείρα και τις γνώσεις μας.

1. Γνωρίζετε ότι αν κοντά σε ένα μαγνήτη φέρουμε ρινίσματα σιδήρου ή μικρές καρφίτσες, ο μαγνήτης θα τα "τραβήξει", και αυτά θα κολλήσουν πάνω του. Ο μαγνήτης τούς ασκεί ελκτικές δυνάμεις. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο χώρος γύρω από το μαγνήτη είναι **μαγνητικό πεδίο**. Την ιδιότητα αυτή την έδωσε στο χώρο η παρουσία του μαγνήτη. Η παρουσία ενός μαγνήτη, λοιπόν, κάνει το χώρο γύρω του μαγνητικό πεδίο.
2. Γνωρίζετε ότι αν αφήσουμε ένα σώμα από κάποιο ύψος από την επιφάνεια της γης, το σώμα κινείται προς τη γη. Αυτό συμβαίνει επειδή η γη ασκεί στο σώμα μια δύναμη που, όπως γνωρίζετε, ονομάζουμε **βάρος** του σώματος. Λέμε ότι ο χώρος γύρω από τη γη είναι **βαρυτικό πεδίο**. Την ιδιότητα αυτή την έδωσε στο χώρο η παρουσία της γης. Η ύπαρξη, λοιπόν, της μάζας της γης κάνει το χώρο γύρω της βαρυτικό πεδίο.

Η παρουσία οποιασδήποτε μάζας κάνει το χώρο γύρω της βαρυτικό πεδίο. Εσείς οι ίδιοι, λόγω της μάζας σας, δημιουργείτε γύρω σας τα δικά σας βαρυτικά πεδία. Ακόμα και ένα ηλεκτρόνιο δημιουργεί γύρω του το δικό του βαρυτικό πεδίο. Η διαφορά είναι ότι το δικό σας βαρυτικό πεδίο και το βαρυτικό πεδίο του ηλεκτρονίου είναι ασήμαντα σε σχέση με το βαρυτικό πεδίο της γης, διότι η μάζα σας και η μάζα του ηλεκτρονίου είναι εξαιρετικά μικρές σε σύγκριση με τη μάζα της γης.

**Δυναμικό πεδίο** είναι ο χώρος ο οποίος έχει την ιδιότητα να ασκεί δύναμη σε κάθε υπόθεμα που τοποθετείται σε αυτόν.

Ας μείνουμε λίγο στη λέξη **υπόθεμα**. Το υπόθεμα είναι εκείνο το "αντικείμενο" το οποίο "αισθάνεται" δύναμη από το αντίστοιχο δυναμικό πεδίο. Έτσι, θα έχουμε την επόμενη αντιστοίχιση:

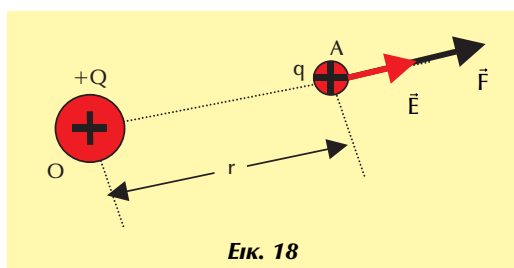
**Ηλεκτρικό πεδίο** είναι ο χώρος ο οποίος έχει την ιδιότητα να ασκεί δύναμη σε κάθε ηλεκτρικό φορτίο που τοποθετείται σε αυτόν.

ΠΕΔΙΟ	ΥΠΟΘΕΜΑ
Βαρυτικό Ηλεκτρικό	Μάζα Ηλεκτρικό φορτίο

Να σημειώσετε ότι η δράση των τριών παραπάνω πεδίων, θεωρητικά, εκτείνεται μέχρι το "άπειρο"

### Β. Ένταση ηλεκτροστατικού πεδίου

Ας φανταστούμε τώρα ότι σε κάποιο σημείο του χώρου έχουμε ένα ηλεκτρικό φορτίο  $Q$ . Ο νόμος του Coulomb μας λέγει ότι αν πλησιάσουμε ένα άλλο φορτίο  $q$ , το φορτίο  $Q$  θα ασκήσει πάνω στο  $q$  δύναμη, ελκτική ή απωστική, ανάλογα με τη φύση των φορτίων. Θα λέμε τότε ότι ο χώρος γύρω από το φορτίο  $Q$  έγινε **ηλεκτροδιαλικό πεδίο**.



Εικ. 18

Στην εικόνα 18 φαίνεται μια περιοχή του χώρου και ένα ηλεκτρικό φορτίο-πηγή  $+Q$ , που διατηρείται ακίνητο στο σημείο  $O$ . Σύμφωνα με όσα είπαμε πιο πάνω, ο χώρος γύρω από το φορτίο  $+Q$  γίνεται ηλεκτροδιαλικό πεδίο.

Τα ηλεκτροστατικά πεδία που δημιουργούν τα διάφορα φορτία

δεν είναι εξίσου ισχυρά. (Θυμηθείτε το βαρυτικό πεδίο της γης και το δικό σας βαρυτικό πεδίο).

Υπάρχει, λοιπόν, η ανάγκη να επινοήσουμε ένα μέγεθος, με το οποίο θα διαπιστώνουμε πόσο ισχυρό είναι ένα ηλεκτροστατικό πεδίο. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται **ένταση** του ηλεκτροστατικού πεδίου. Για να ορίσουμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο  $A$ , κάνουμε το εξής υποθετικό πείραμα:

#### Υποθετικό πείραμα

1. Στο σημείο  $A$  του πεδίου που δημιουργεί το φορτίο  $Q$  τοποθετούμε ένα φορτίο  $q$ . Το φορτίο αυτό θα το ονομάζουμε **φορτίο - υπόθεμα**, για να το ξεχωρίζουμε από το φορτίο  $Q$ , που παράγει το πεδίο, και το οποίο θα ονομάζουμε **φορτίο - πηγή**. Ας πούμε  $F$  το μέτρο της δύναμης που δέχεται το φορτίο  $q$  από το φορτίο  $Q$ . Υπολογίζουμε την τιμή του πηλίκου  $\frac{F}{q}$ . Στο ίδιο σημείο  $A$  τοποθε-

τούμε φορτίο  $2q$  και υπολογίζουμε το μέτρο της δύναμης που ασκείται σε αυτό. Διαπιστώνουμε ότι το μέτρο της δύναμης είναι τώρα  $2F$ . Έτσι, το πηλίκο του μέτρου της δύναμης και του φορτίου είναι το ίδιο. Την ίδια διαπίστωση θα κάνουμε, αν δίνουμε στο φορτίο  $q$  συνεχώς μεγαλύτερες τιμές : το πηλίκο του μέτρου της δύναμης και του αντίστοιχου φορτίου θα παραμένει σταθερό. Φαίνεται λοιπόν ότι η τιμή αυτού του πηλίκου δεν εξαρτάται από το μέγεθος του δοκιμαστικού φορτίου-υποθέματος  $q$ .

2. Θα εξετάσουμε τώρα πώς εξαρτάται το μέτρο του πηλίκου  $\frac{F}{q}$  από το μέγεθος του φορτίου  $Q$ , που παράγει το πεδίο. Αν διπλασιάσουμε το φορτίο  $Q$ , διαπιστώνουμε ότι η τιμή του πηλίκου αυτού διπλασιάζεται. Αναλόγως, αν τριπλασιάσουμε, τετραπλασιάσουμε κτλ. το μέγεθος του φορτίου  $Q$ , η τιμή του πηλίκου θα τριπλασιάζεται, θα τετραπλασιάζεται κτλ. αντιστοίχως. Το συμπέρασμα είναι ότι το πηλίκο αυτό είναι ανάλογο προς το μέγεθος του φορτίου  $Q$ .

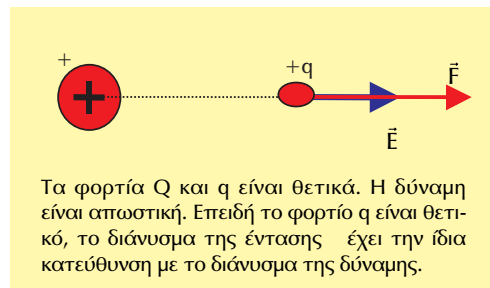
$$\frac{F}{q} \propto Q$$

3. Εάν απαναλάβουμε τη διαδικασία για ένα άλλο σημείο  $B$ , που απέχει από το φορτίο-πηγή  $Q$  απόσταση μεγαλύτερη από αυτήν του σημείου  $A$ , τα συμπεράσματα είναι ανάλογα. Πάλι το πηλίκο της δύναμης και του αντίστοιχου φορτίου  $q$ , που θα τοποθετούμε στο σημείο  $B$ , θα έχει την ίδια σταθερή τιμή ανεξάρτητα με το μέγεθος του φορτίου  $q$ . Θα υπάρχει, όμως, και μία διαφορά: η τιμή του πηλίκου θα είναι **μικρότερη** για το σημείο  $B$ .

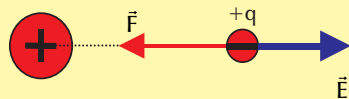
### Συμπέρασμα:

Η τιμή του πηλίκου της δύναμης και του αντίστοιχου φορτίου-υποθέματος  $q$  σε κάθε σημείο  $A$  του πεδίου είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του φορτίου  $q$ . Εξαρτάται, όμως, από το μέγεθος του φορτίου-πηγή  $Q$  και από την απόσταση από το φορτίο-πηγή  $Q$  του σημείου  $A$  και, μάλιστα, η τιμή του ελαττώνεται, όταν η απόσταση αυτή αυξάνεται. Αυτό το πηλίκο αποτελεί το μέτρο ενός διανύσματος (μην ξεχνάτε ότι η δύναμη είναι διάνυσμα), που αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος για τα ηλεκτροστατικά πεδία. Αυτό το διανυσματικό μέγεθος ονομάζεται **ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου**. Αφού η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος, πρέπει να προσδιορίσουμε και τα επόμενα στοιχεία : **σημείο εφαρμογής, κατεύθυνση**.

Στον καθορισμό της κατεύθυνσης του διανύσματος της έντασης ρόλο παίζει μόνο το είδος του φορτίου-πηγή. Στην εικόνα 19 το φορτίο-πηγή είναι θετικό. Βλέπετε ότι η κατεύθυνση της έντασης είναι η ίδια, μολονότι το φορτίο υπόθεμα στη μια περίπτωση είναι θετικό στην άλλη αρνητικό. Να παρατηρή-



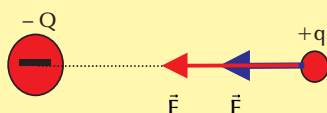
Εικ. 19



**Εικ. 19** Τα φορτία  $Q$  και  $q$  είναι ετερόνυμα. Η δύναμη είναι ελκτική. Επειδή το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό, το διάνυσμα της έντασης έχει αντίθετη κατεύθυνση με το διάνυσμα

σετε ότι το διάνυσμα "φεύγει" από το θετικό φορτίο.

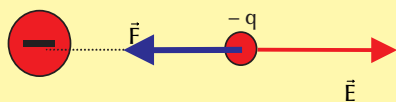
Στην εικόνα 20 το φορτίο-πηγή είναι αρνητικό. Στην περίπτωση αυτή η ένταση σε κάποιο σημείο Α "έρχεται" προς το φορτίο-πηγή ανεξάρτητα από το είδος του φορτίου-υποθέματος.



**Εικ. 20** Το φορτίο  $Q$  είναι αρνητικό. Το φορτίο  $q$  είναι θετικό. Η δύναμη είναι ελκτική. Επειδή το φορτίο  $q$  είναι θετικό, το διάνυσμα της έντασης έχει την ίδια κατεύθυνση με το διάνυσμα της δύναμης.

Παρατηρήστε προσεκτικά τις εικόνες 19 και 20. Θα διαπιστώσετε ότι όταν **το φορτίο  $q$  είναι θετικό**, τα διανύσματα της έντασης και της δύναμης έχουν την ίδια κατεύθυνση, ενώ όταν **το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό**, τα διανύσματα αυτά έχουν αντίθετη κατεύθυνση.

Όλα τα στοιχεία του διανύσματος της έντασης περιέχονται στον επόμενο γενικό ορισμό.



**Εικ. 20** Το φορτίο  $Q$  είναι αρνητικό. Το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό. Η δύναμη είναι απωστική. Επειδή το φορτίο  $q$  είναι αρνητικό, το διάνυσμα της έντασης έχει αντίθετη κατεύθυνση με το διάνυσμα της δύναμης.

Η ένταση σε κάποιο σημείο Α ηλεκτροστατικού πεδίου είναι διανυσματικό μέγεθος με τα εξής στοιχεία:

α. Σημείο εφαρμογής το σημείο Α

β. Κατεύθυνση ίδια με την κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται στο φορτίο  $q$ , αν αυτό είναι θετικό, και αντίθετη, αν αυτό είναι αρνητικό.

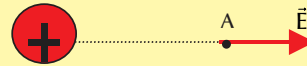
γ. Μέτρο που δίνει ο τύπος  $E = \frac{F}{q}$  (2.2α)

Τα προηγούμενα μπορούν να αποδοθούν με τη διανυσματική σχέση

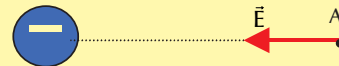
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2.2\alpha)$$

Η μονάδα έντασης στο SI προκύπτει από τη σχέση (2.2) και ισούται με  $\frac{1\text{N}}{\text{C}}$

Η μονάδα δεν έχει ιδιαίτερη ονομασία. Η σχεδίαση του διανύσματος της έντασης σε ένα σημείο A ηλεκτροστατικού πεδίου γίνεται σύμφωνα με τον κανόνα που φαίνεται στις εικόνες 21 και 22



**Εικ. 21**  $Q > 0$  Το διάνυσμα της έντασης στο σημείο A "φεύγει" από το Q.



**Εικ. 22**  $Q < 0$  Το διάνυσμα της έντασης στο σημείο A "έρχεται" προς το Q.

**Όταν το φορτίο-πηγή Q που δημιουργεί το πεδίο είναι θετικό, το διάνυσμα της έντασης "φεύγει" από αυτό. Όταν το φορτίο-πηγή Q που δημιουργεί το πεδίο είναι αρνητικό, το διάνυσμα της έντασης "έρχεται" προς αυτό.**

## Γ. Μέτρο της έντασης πεδίου Coulomb

Ας εφαρμόσουμε τη σχέση ορισμού της έντασης  $E = F/q$ , για να υπολογίσουμε το μέτρο της έντασης σε σημείο A ηλεκτροστατικού πεδίου, το οποίο δημιουργεί ένα μοναδικό φορτίο-πηγή Q.

Για το μέτρο της έντασης έχουμε:

$$E = \frac{F}{q} \quad (2.4)$$

Στη σχέση (2.4) χρησιμοποιούμε για το μέτρο της F την (2.1). Θα έχουμε:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{k_{\eta\lambda} \frac{|Q|q}{r^2}}{q} = k_{\eta\lambda} \frac{|Q|}{r^2} \quad E = k_{\eta\lambda} \frac{|Q|}{r^2} \quad (2.5)$$

Η σχέση (2.5) μας λέει αυτό το σημαντικό:

**Το μέτρο της έντασης ηλεκτροστατικού πεδίου σε σημείο A, που απέχει απόσταση r από φορτίο-πηγή Q, είναι :**

- 1. Ανάλογο του φορτίου-πηγή Q, που παράγει το πεδίο.**
- 2. Αντιστρόφως ανάλογο με το τετράγωνο της απόστασης του σημείου A από το φορτίο – πηγή Q.**

### Δραστηριότητα 5

Όπως αναφέραμε, η ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου είναι διανυσματικό μέγεθος. Γνωρίζετε ότι εκτός από τα διανυσματικά υπάρχουν και τα βαθμωτά μεγέθη. Από τις έως σήμερα γνώσεις σας να καταγράψετε 5 βαθμωτά και 5 δια-

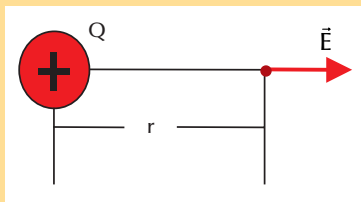


νυσματικά μεγέθη. Η καταγραφή να γίνει σε πίνακα με δύο στήλες. Να σκεφτείτε τα μεγέθη μετατόπιση και απόσταση. Διακρίνετε κάποια διαφορά μεταξύ τους; Επίσης τα μεγέθη επιφάνεια και εμβαδόν επιφάνειας.

### Παράδειγμα 2

Να υπολογίσετε την ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου σε απόσταση  $r_1 = 3\text{m}$  από το κέντρο μικρής σφαίρας, που φέρει φορτίο  $Q = 4\mu\text{C}$ .

#### Λύση



Α. Το μέτρο της έντασης  $\vec{E}_A$  θα υπολογιστεί με τη χρήση του τύπου (2.5). Με αντικατάσταση σε αυτόν θα έχουμε

$$E_A = k_{\eta\lambda} \frac{Q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6}}{9} = 3 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Β. Η φορά του διανύσματος της έντασης θα είναι "από" το φορτίο  $Q$ , μια και αυτό το φορτίο που παράγει το πεδίο είναι θετικό.

### Παράδειγμα 3

Σε ένα σημείο ηλεκτροστατικού πεδίου το διάνυσμα της έντασης είναι κατακόρυφο με φορά προς τα κάτω και έχει μέτρο  $2\text{N/C}$ . Στο σημείο αυτό τοποθετούμε μικρό σφαιρίδιο με μάζα  $3,2\text{mg}$  και παρατηρούμε ότι ηρεμεί. Να διαπιστώσετε το είδος και το μέγεθος του φορτίου του σφαιριδίου. Το μέτρο της έντασης του πεδίου βαρύτητας είναι  $g=10\text{m/s}^2$ .

#### Λύση

Στο σφαιρίδιο δρουν η δύναμη του βάρους  $B$  και η ηλεκτρική δύναμη  $F_{\eta\lambda}$ . Αφού το σφαιρίδιο ηρεμεί, οι δυνάμεις ισορροπούν. Δύο δυνάμεις ισορροπούν αν και μόνον αν είναι αντίθετες. Αυτό σημαίνει ότι η κατεύθυνση της ηλεκτρικής δύναμης πρέπει να είναι προς τα πάνω. Αφού η κατεύθυνση της έντασης είναι προς τα κάτω, συμπεραίνουμε ότι το σφαιρίδιο πρέπει να φέρει αρνητικό φορτίο, πράγμα που σημαίνει ότι πρέπει να έχει περίσσεια ηλεκτρονίων.

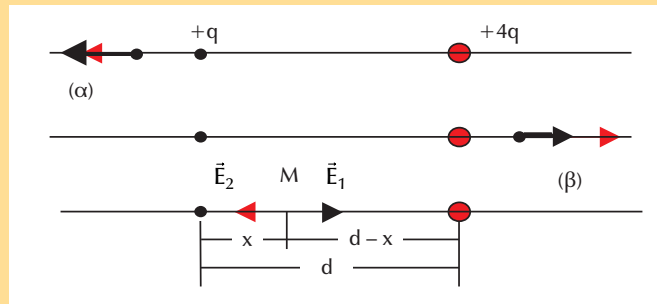
Για να υπολογίσουμε το μέγεθος του φορτίου, θα εξισώσουμε τα μέτρα των δύο δυνάμεων  $B=F_{\eta\lambda}$  ή  $mg=Eq$ . Από την τελευταία :  $q = \frac{mg}{E}$ .

Με αντικατάσταση :  $q = \frac{3,2 \times 10^{-6} \times 10}{2} = 1,6 \times 10^{-5} \text{ C}$  Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αντιστοιχεί σε αυτό το φορτίο είναι

$$N = \frac{1,6 \times 10^{-5} \text{ C}}{1,6 \times 10^{-19} \frac{\text{C}}{e}} = 10^{14} e$$

#### Παράδειγμα 4

Στα δύο άκρα ευθύγραμμου τμήματος με μήκος  $d = 30\text{m}$  τοποθετούνται δύο ομώνυμα θετικά φορτία  $q$  και  $4q$ . Να προσδιορίσετε τη θέση του σημείου του ευθύγραμμου τμήματος στο οποίο η ένταση του σύνθετου ηλεκτρικού πεδίου είναι μηδέν.



#### Λύση

Σε κάθε σημείο του χώρου υπάρχουν δύο εντάσεις, διότι υπάρχουν δύο φορτία που παράγουν πεδία. Η συνισταμένη ένταση θα είναι το διανυσματικό άθροισμα των δύο εντάσεων. Θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε σε ποια σημεία της ευθείας που περνάει από τα φορτία είναι δυνατόν η συνισταμένη ένταση να είναι μηδέν. Είναι φανερό ότι για να συμβαίνει αυτό, πρέπει οι δύο επιμέρους εντάσεις να είναι αντίθετες. Εξετάζουμε τις τρεις περιπτώσεις:

α. Σημεία αριστερά του μικρότερου φορτίου  $+q$ . Παρατηρούμε ότι στα σημεία αυτά οι εντάσεις είναι ομόρροπες με φορά προς τα αριστερά. Τα σημεία αυτά αποκλείονται.

β. Σημεία δεξιά του μεγαλύτερου φορτίου  $+4q$ . Παρατηρούμε ότι στα σημεία αυτά οι εντάσεις είναι ομόρροπες με φορά προς τα δεξιά. Τα σημεία αυτά αποκλείονται.

γ. Ας πάρουμε τυχόν σημείο  $M$  μεταξύ των φορτίων. Η ένταση στο  $M$  εξαιτίας του φορτίου  $+q$  έχει φορά προς τα δεξιά. Η ένταση στο  $M$  εξαιτίας του φορτίου  $+4q$  έχει φορά προς τα αριστερά. Αφού οι εντάσεις είναι αντίρροπες, μένει να προσδιορίσουμε σημείο τέτοιο, ώστε τα μέτρα των εντάσεων να είναι ίσα. Έτσι:

$$E_1 = E_2 \Leftrightarrow k_{\eta\lambda} \frac{q}{x^2} = k_{\eta\lambda} \frac{4q}{(d-x)^2} \Leftrightarrow 4x^2 = (d-x)^2 \Leftrightarrow \pm 2x = d-x$$

Από την τελευταία προκύπτει  $x = \frac{d}{3}$ . Η αρνητική λύση απορρίπτεται

#### Παράδειγμα 5

Σε δύο απέναντι κορυφές τετραγώνου πλευράς  $a = 3\text{m}$  τοποθετούνται δύο φορτία  $Q_1 = 4\mu\text{C}$  και  $Q_2 = 3\mu\text{C}$ . Να σχεδιάσετε τα διανύσματα των εντάσεων του ηλεκτρικού πεδίου στις δύο άλλες κορυφές και να υπολογίσετε τα μέτρα τους.

**Λύση**

Το μέτρο της έντασης του πεδίου που δημιουργεί το φορτίο  $Q_1$  στο σημείο Β θα υπολογιστεί από τον τύπο (2.5). Έτσι:

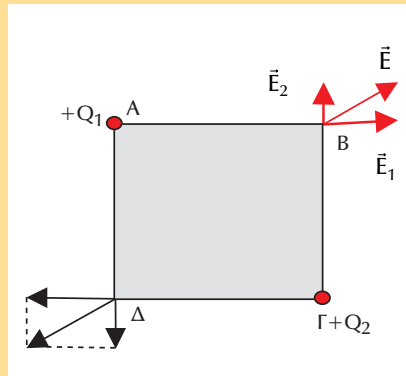
$$E_1 = k_{\eta\lambda} \frac{Q_1}{\alpha^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-6}}{9} = 4 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Το μέτρο της έντασης του πεδίου που δημιουργεί το φορτίο  $Q_2$  στο σημείο Β θα υπολογιστεί ανάλογα:

$$E_2 = k_{\eta\lambda} \frac{Q_2}{\alpha^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-6}}{9} = 3 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Η θέση του διανύσματος της συνισταμένης έντασης στο σημείο Β θα προσδιοριστεί με το γνωστό σας κανόνα του παραλληλογράμμου. Για το μέτρο της συνισταμένης έντασης έχουμε:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \sqrt{4^2 \times 10^6 + 3^2 \times 10^6} = 5 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

**2.8. Δυναμικές γραμμές**

Γνωρίζουμε ότι η παρουσία φορτίου ή φορτίων σε ένα χώρο τον κάνει ηλεκτροστατικό πεδίο. Εμείς, οπτικά, δεν μπορούμε να διαπιστώσουμε κάποια αλλαγή στο χώρο αυτό. Μοιάζει ακριβώς ο ίδιος, όπως ήταν και χωρίς την παρουσία των ηλεκτρικών φορτίων. Το ηλεκτρικό πεδίο, όμως, είναι εκεί, και αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε από την κίνηση ενός άλλου ηλεκτρικού φορτίου, που θα τοποθετήσουμε σε κάποιο σημείο του. Το ζητούμενο είναι να επινοήσουμε κάποιο τρόπο με τον οποίο θα μπορούμε να "βλέπουμε" το αόρατο ηλεκτροστατικό πεδίο.

Ο τρόπος αυτός υπάρχει και πραγματοποιείται με τις λεγόμενες δυναμικές γραμμές. Αυτές είναι γραμμές οι οποίες έχουν κάποιες ιδιότητες, και τις οποίες σχεδιάζουμε ακολουθώντας κάποιους κανόνες. Ας δούμε πρώτα τον ορισμό της δυναμικής γραμμής.

**Δυναμική γραμμή** ενός ηλεκτροστατικού πεδίου είναι η νοητή γραμμή σε κάθε σημείο της οποίας το διάνυσμα της έντασης είναι εφαπτόμενο.

Βασικό χαρακτηριστικό των δυναμικών γραμμών των ηλεκτροστατικών πεδίων είναι ότι είναι ανοιχτές γραμμές (έχουν αρχή και τέλος), **που ξεκινούν από θετικά φορτία και καταλήγουν σε αρνητικά.**

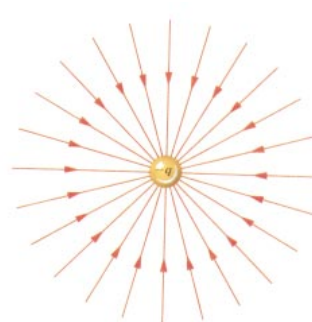
Η εικόνα των δυναμικών γραμμών μας δίνει διάφορες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών πεδίων. Ισχύουν τα επόμενα:

1. Οι δυναμικές γραμμές **δεν τέμνονται**.
2. Σε περιοχές όπου η ένταση είναι μεγάλη (ισχυρό πεδίο) η πυκνότητα των δυναμικών γραμμών είναι μεγάλη.
3. Στις δυναμικές γραμμές αποδίδουμε κατεύθυνση. Η κατεύθυνσή τους προσδιορίζεται από την κατεύθυνση του διανύσματος της έντασης και "συμπίπτει" με αυτή.

Στα σχήματα απεικονίζονται οι δυναμικές γραμμές των ηλεκτροστατικών πεδίων που δημιουργούν κάποιες κατανομές φορτίων.



Εικ. 23



Εικ. 24

Στην εικόνα 23 φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί ένα και μόνο θετικό φορτίο.

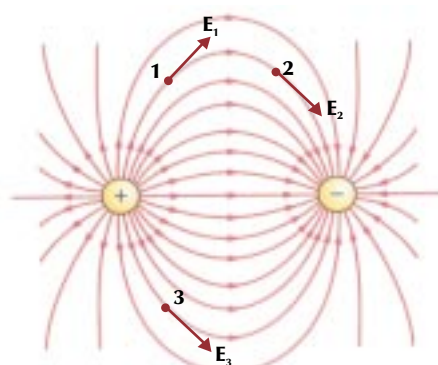
Παρατηρήστε ότι οι δυναμικές γραμμές είναι ευθείες που ξεκινούν από το θετικό φορτίο. Παρατηρήστε ακόμα ότι κοντά στο φορτίο η πυκνότητά τους είναι μεγάλη, πράγμα που σημαίνει ότι εκεί η ένταση είναι μεγάλη.

Στην εικόνα 24 φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί ένα μόνο αρνητικό φορτίο.

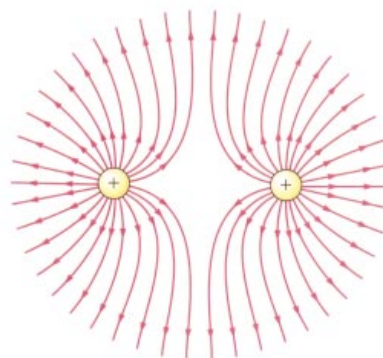
Παρατηρήστε ότι οι δυναμικές γραμμές είναι ευθείες που καταλήγουν στο αρνητικό φορτίο.

Στην εικόνα 25 φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργείται από δύο ετερόνυμα και ίσα φορτία.

Παρατηρήστε ότι οι δυναμικές γραμμές ξεκινούν από το θετικό φορτίο και καταλήγουν στο αρνητικό. Παρατηρήστε ακόμα ότι στις περιοχές κοντά στα φορτία η πυκνότητα των δυ-



Εικ. 25



Εικ. 26

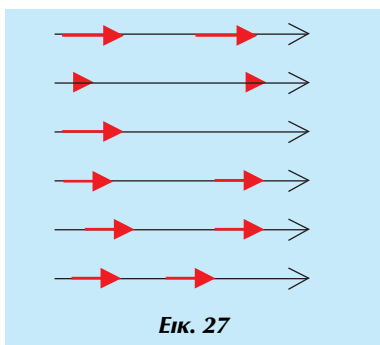
ναμικών γραμμών είναι μεγάλη. Εκεί το πεδίο είναι ισχυρό.

Στην εικόνα 26 φαίνονται οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργείται από δύο ομώνυμα θετικά φορτία.

### Μορφές ηλεκτροστατικών πεδίων

Τα ηλεκτροστατικά πεδία μπορούμε να τα ταξινομήσουμε σε δύο κατηγορίες: στα **ομογενή** και στα **μη ομογενή**.

#### Α) Ομογενές πεδίο



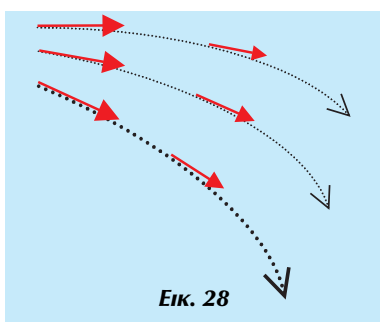
Εικ. 27

Είναι εκείνο στο οποίο η ένταση έχει παντού την ίδια τιμή.

Μην ξεχνάτε ότι η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος. Για να έχει παντού την ίδια τιμή, πρέπει τα διανύσματα που την απεικονίζουν να είναι ίσα σε κάθε σημείο, πράγμα που σημαίνει ότι εκτός από το ίδιο μέτρο πρέπει να έχουν και την ίδια κατεύθυνση. Το συμπέρασμα είναι ότι οι δυναμικές γραμμές πρέπει να είναι παράλληλες και ισόπυκνες. Στην εικόνα

27 απεικονίζεται ένα ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο. Θα δούμε στη συνέχεια πώς μπορούμε να δημιουργήσουμε ομογενή ηλεκτροστατικά πεδία και πώς μπορούμε να τα αξιοποιήσουμε.

#### Β) Μη ομογενές πεδίο



Εικ. 28

Είναι εκείνο στο οποίο η ένταση έχει διαφορετική τιμή στα διάφορα σημεία του. Τα πεδία που δημιουργούνται από μεμονωμένα ηλεκτρικά φορτία είναι μη ομογενή.

Στην εικόνα 28 απεικονίζεται ένα μη ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο. Παρατηρήστε ότι η κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών "συμπίπτει" με την κατεύθυνση της έντασης.

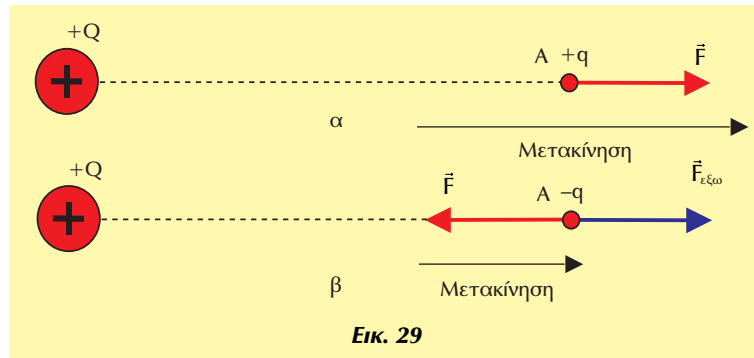
Προσπαθήστε τώρα εσείς να απαντήσετε στα επόμενα ερωτήματα :

1. Πού πιστεύετε ότι βρίσκονται τα θετικά φορτία ;
2. Σε ποια περιοχή η ένταση του πεδίου είναι μεγαλύτερη;



## 2.8. Δυναμικό ηλεκτροστατικού πεδίου

Ας φανταστούμε στο χώρο ένα μοναδικό ακίνητο θετικό ηλεκτρικό φορτίο-πηγή  $+Q$  (εικόνα 29). Όπως γνωρίζουμε, ο χώρος γύρω του είναι ηλεκτροστατικό πεδίο. Ας θεωρήσουμε ένα σημείο A του χώρου. Στο σημείο A φέρουμε ένα δοκιμαστικό θετικό φορτίο  $+q$ , που μπορεί να κινείται ελεύθερα. Θα μελετήσουμε τη συμπεριφορά του (θα αγνοήσουμε το βαρυτικό πεδίο).



Εικ. 29

Ας εξετάσουμε τι συμβαίνει στο σχήμα (α).

Το φορτίο-υπόθεμα  $+q$  δέχεται από το φορτίο-πηγή  $+Q$  απωστική δύναμη. Επειδή είναι ελεύθερο, θα αρχίσει να κινείται απομακρυνόμενο από το  $+Q$ . Καθώς θα απομακρύνεται, το μέτρο της δύναμης θα μειώνεται συνεχώς και, θεωρητικά, σε άπειρη απόσταση θα μηδενιστεί. Εφόσον το μέτρο της δύναμης μειώνεται συνεχώς, το ίδιο θα ισχύει και για την επιτάχυνση  $\alpha$ . Η κίνηση θα είναι επιταχυνόμενη, όχι όμως ομαλά. Αυτό σημαίνει ότι η ταχύτητα θα **αυξάνεται συνεχώς**. Όπως γνωρίζετε από τη Μηχανική, όταν μια δύναμη ασκείται σε ένα σώμα που μετακινείται παράγεται ή δαπανάται έργο. Στην περίπτωση που η μετακίνηση του σώματος έχει την ίδια κατεύθυνση με την δύναμη, το έργο ονομάζεται παραγόμενο. Αυτό σημαίνει ότι, μέσω του έργου, μεταφέρεται ενέργεια στο σώμα. Στην περίπτωση που εξετάζουμε το έργο είναι παραγόμενο. Ας ονομάσουμε  $W_{A\infty}$  το έργο που θα παράγει η δύναμη μέχρι να πάει το φορτίο  $q$  στο "άπειρο". Μέσω του έργου αυτής της δύναμης μεταφέρεται συνεχώς ενέργεια στο φορτίο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η κινητική του ενέργεια. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από το ηλεκτροστατικό πεδίο που δημιουργεί το υπόθεμα-πηγή. Αυτό σημαίνει ότι στο ηλεκτροστατικό πεδίο είναι αποθηκευμένη ενέργεια.

Με τη βοήθεια του έργου  $W_{A\infty}$ , που παράγει η δύναμη στο φορτίο-υπόθεμα κατά τη μετακίνησή του από το σημείο A μέχρι το άπειρο, μπορούμε να ορίσουμε ένα νέο μέγεθος, που χαρακτηρίζει το ηλεκτροστατικό πεδίο. Το μέγεθος αυτό ονομάζεται **δυναμικό**.

Σε κάθε ηλεκτροστατικό πεδίο είναι αποθηκευμένη ενέργεια.

**Δυναμικό σε σημείο A ηλεκτροστατικού πεδίου ονομάζουμε το βαθμωτό μέγεθος που ορίζεται από το πηλίκο του έργου της ηλεκτροστατικής δύναμης για τη μετακίνηση φορτίου  $q$  από το σημείο A στο άπειρο διά του φορτίου  $q$ .**

$$V_A = \frac{W_{Ax}}{q} \quad (2.6)$$

Η μονάδα του δυναμικού στο SI, όπως προκύπτει από τη σχέση (2.6), είναι  $\frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ C}}$ . Η μονάδα αυτή ονομάζεται 1 Volt ( 1V)  
Έτσι:  $1\text{V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{C}}$

Η σχέση (2.6) χρησιμοποιείται, όταν θέλουμε να υπολογίσουμε το έργο για τη μετακίνηση φορτίου  $q$  από σημείο A ηλεκτροστατικού πεδίου, όπου το δυναμικό είναι  $V_A$ , μέχρι το άπειρο. Στην περίπτωση αυτή η σχέση γράφεται:  
 $W_{A\infty} = q V_A \quad (2.7)$

Η σχέση (2.6) μπορεί να δημιουργήσει την παραπλανητική εντύπωση ότι το δυναμικό σε σημείο A ηλεκτροστατικού πεδίου εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου-υποθέματος  $q$ , που μετακινείται από το A στο άπειρο. Αυτό δεν είναι σωστό. Το έργο αποδεικνύεται ότι είναι ανάλογο του

φορτίου  $q$ , με αποτέλεσμα το φορτίο  $q$  να απαλείφεται τελικά στη σχέση (2.6).

Από ποιοτική άποψη το δυναμικό σε σημείο A ηλεκτροστατικού πεδίου εκφράζει το έργο της πεδιακής δύναμης ανά μονάδα φορτίου-υποθέματος για τη μετακίνηση οποιουδήποτε φορτίου από το σημείο A στο άπειρο.

Για να υπολογίζουμε το δυναμικό που δημιουργεί ένα ακίνητο ηλεκτρικό φορτίο  $Q$  σε απόσταση  $r$  από αυτό, χρησιμοποιείται η εξίσωση:

$$V = k_{\eta\lambda} \frac{Q}{r} \quad (2.8)$$

**Παρατήρηση:** Στην εξίσωση (2.8) το φορτίο θα εισάγεται με το "πρόσημό" του. Αυτό σημαίνει ότι αν το φορτίο που παράγει το πεδίο είναι θετικό, το δυναμικό σε κάθε σημείο του θα είναι θετικό. Αν το φορτίο που παράγει το πεδίο είναι αρνητικό, το δυναμικό σε κάθε σημείο του θα είναι αρνητικό.

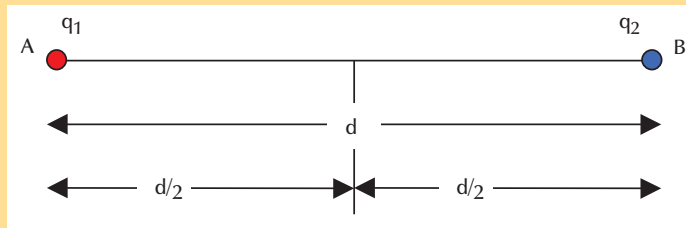
Ας μελετήσουμε τώρα την περίπτωση της εικόνας (29,β), όπου το φορτίο-πηγή  $Q$  είναι αρνητικό, για να δούμε πώς θα ορίσουμε το δυναμικό στο σημείο A σε αυτή την περίπτωση. Αν στο σημείο A φέρουμε τώρα ένα θετικό φορτίο  $+q$ , αυτό θα μετακινηθεί προς το φορτίο  $Q$  και όχι προς το άπειρο. Τι κάνουμε τώρα; Εμείς επιμένουμε. Θα μετακινήσουμε το φορτίο  $+q$  προς το άπειρο. Καταλαβαίνετε ότι πρέπει τώρα να ασκήσουμε εξωτερική δύναμη  $\vec{F}_{\text{εξωτ}}$  με κατεύθυνση αντίθετη με την κατεύθυνση της δύναμης  $\vec{F}$  του πεδίου, της οποίας το μέτρο να είναι τουλάχιστον ίσο με το μέτρο της  $\vec{F}$ . Για τον ορισμό του δυναμικού θα χρησιμοποιήσουμε πάλι το έργο της ηλεκτροστατικής δύναμης  $\vec{F}$  και όχι το έργο της  $\vec{F}_{\text{εξωτ}}$ . Η διαφορά είναι ότι τώρα το έργο της  $\vec{F}$  θα είναι αρνητικό, πράγμα που σημαίνει ότι και το δυναμικό στο σημείο A θα είναι αρνητικό.

### Παράδειγμα 7

Στα άκρα ευθύγραμμου τμήματος AB, μήκους  $d=1\text{m}$  βρίσκονται δύο φορτία  $q_1 = +3\mu\text{C}$  και  $q_2 = -2\mu\text{C}$ . Να υπολογίσετε το δυναμικό στο μέσο M του ευθύγραμμου τμήματος. Θέλουμε να μεταφέρουμε στο σημείο αυτό από "άπειρη" απόσταση ένα φορτίο  $q = +\frac{1}{18}\text{mC}$ . Να υπολογίσετε το έργο των δυνάμεων του πεδίου και να εξετάσετε εάν το φορτίο κινείται από μόνο του ή εάν πρέπει εμείς να του ασκούμε δύναμη.

### Λύση

Το δυναμικό στο σημείο M θα είναι άθροισμα δύο δυναμικών : του δυναμικού που δημιουργεί στο M το φορτίο που είναι στο A και του δυναμικού που δημιουργεί στο M το φορτίο που είναι στο B. Έτσι θα έχουμε:



$$V_M = V_{M(q_1)} + V_{M(q_2)} = K_{\eta\lambda} \frac{q_1}{d/2} + K_{\eta\lambda} \frac{q_2}{d/2} = \frac{2K_{\eta\lambda}}{d} (q_1 + q_2)$$

Με αντικατάσταση έχουμε :

$$V_M = \frac{2 \times 9 \times 10^9}{1} (3 - 2) \times 10^{-6} = 18 \times 10^3 \text{ V}$$

Το έργο των ηλεκτροστατικών δυνάμεων για τη μεταφορά του φορτίου  $q$  από το M στο άπειρο δίνεται από τη σχέση  $V_{M\infty} = q V_M$ . Με αντικατάσταση έχουμε:

$$V_{M\infty} = +\frac{1}{18} \times 10^{-3} \times 18 \times 10^3 = 1\text{J}$$

Για τη μεταφορά του φορτίου από το άπειρο στο σημείο M το έργο θα είναι  $-1\text{J}$ . Αφού το έργο είναι αρνητικό, πρέπει εμείς να ασκούμε δύναμη στο φορτίο  $q$ , για να έλθει από το άπειρο στο σημείο M.

**Παρατήρηση:** Το έργο της ηλεκτροστατικής δύναμης για μετακίνηση υποθέματος ανάμεσα σε δύο σημεία του πεδίου είναι ανεξάρτητο της ακολουθούμενης διαδρομής. Αυτό σημαίνει ότι αν για τη διαδρομή A B είναι  $\alpha \text{ J}$ , για τη διαδρομή θα είναι  $-\alpha \text{ J}$

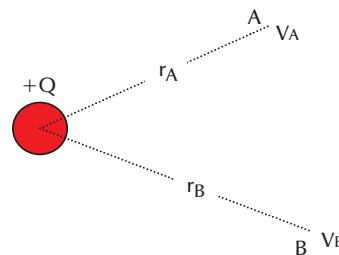
## 2.9. Διαφορά δυναμικού σημείων ηλεκτροστατικού πεδίου

Ας θεωρήσουμε θετικό φορτίο-πηγή  $+Q$ , που δημιουργεί στο χώρο ηλεκτρικό πεδίο (εικόνα 30). Θεωρούμε δύο τυχαία σημεία A και B. Ας πούμε τα δυναμικά των σημείων A και B,  $V_A$  και  $V_B$  αντιστοίχως.

Ονομάζουμε **διαφορά δυναμικού** των σημείων A και B τη διαφορά των δυναμικών τους  $V_A$  και  $V_B$ .

$$V_{AB} = V_A - V_B \quad (2.9)$$

Η διαφορά δυναμικού είναι βαθμωτό μέγεθος όπως και το δυναμικό.  
Η μονάδα διαφοράς δυναμικού είναι το 1Volt όπως και για το δυναμικό.



Εικ. 30

Η σχέση (2.9) αν συνδυαστεί με τη σχέση (2.8), που δίνει το δυναμικό σε σημείο ηλεκτροστατικού πεδίου, δίνει:

$$V_{AB} = V_A - V_B = k_{\eta\lambda} \frac{Q}{r_A} - k_{\eta\lambda} \frac{Q}{r_B} = k_{\eta\lambda} Q \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) \quad (2.10)$$

### Δραστηριότητες 6

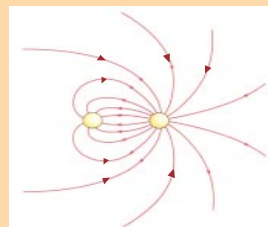
Να θεωρήσετε στο τετράδιό σας ένα σημειακό φορτίο ίσο με  $Q=3\mu\text{C}$  στο σημείο A. Να υπολογίσετε το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου σε σημείο M, που απέχει απόσταση  $r=1\text{m}$ . Να προσδιορίσετε όλα τα σημεία της επιφάνειας του τετραδίου σας που έχουν το ίδιο δυναμικό με το σημείο M. Στη συνέχεια, να προσδιορίσετε όλα τα σημεία της επιφάνειας του τετραδίου σας στα οποία το δυναμικό έχει τιμές  $V/2$ ,  $V/3$ ,  $V/6$ ,  $V/9$ ,  $V/12$ , όπου  $V$  το δυναμικό του σημείου M. Να σύρετε και μερικές δυναμικές γραμμές του πεδίου. Να εξετάσετε πώς οι δυναμικές γραμμές τέμνουν τις γραμμές πάνω στις οποίες βρίσκονται τα σημεία που έχουν το ίδιο δυναμικό. Τελικά, να εξετάσετε το ίδιο θέμα στο χώρο.

### Δραστηριότητες 7

Να παρατηρήσετε τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτροστατικού πεδίου που δημιουργεί το σύστημα των δύο φορτισμένων σωμάτων.

Προσπαθήστε:

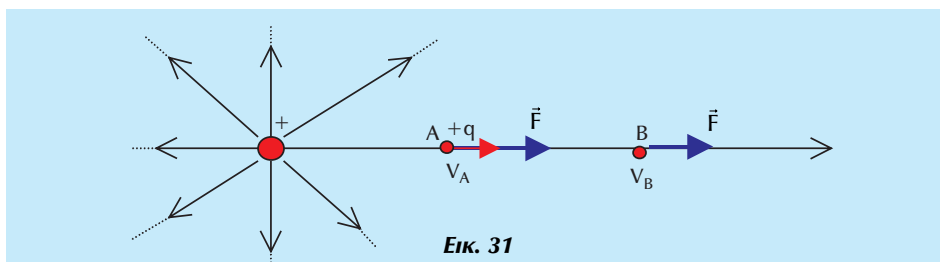
1. Να διαπιστώσετε το είδος του φορτίου κάθε σώματος.
2. Να διαπιστώσετε ποιο από τα δύο σώματα έχει περισσότερο φορτίο



Στην εικόνα 31 φαίνεται το ηλεκτροστατικό πεδίο που δημιουργεί ένα θετικό φορτίο  $+Q$ . Στο σχήμα φαίνονται μερικές από τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Θεωρούμε μία από αυτές και ένα σημείο A πάνω της σε απόσταση  $r_A$  από το φορτίο Q. Ας πούμε  $V_A$  το δυναμικό του πεδίου στο σημείο A. Ας θεωρήσουμε και ένα σημείο B πάνω στην ίδια δυναμική γραμμή σε απόσταση  $r_B$  με  $r_B > r_A$  από το φορτίο Q. Ας πούμε  $V_B$  το δυναμικό στο σημείο B. Είναι φανερό από τη σχέση (2.8) ότι το δυναμικό στο B θα είναι μικρότερο από το δυναμικό στο A, αφού το σημείο B είναι μακρύτερα από το φορτίο Q σε σχέση με το σημείο A. Το ίδιο θα συμβαίνει και για κάποιο σημείο Γ, που βρίσκεται μακρύτερα από το B. Το συμπέρασμα είναι:

$$V_A > V_B > V_\Gamma$$

**Καθώς απομακρυνόμαστε από το θετικό φορτίο, το δυναμικό του πεδίου ελαττώνεται και στο "άπειρο" μηδενίζεται. Αν παρατηρήσετε και την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών, μπορείτε να συμπεράνετε ότι : Κατά τη κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών το δυναμικό ελαττώνεται.**



Ας φανταστούμε ότι τοποθετούμε στο σημείο A ένα θετικό φορτίο  $+q$  και το αφήνουμε ελεύθερο. Το φορτίο αυτό θα δέχεται συνεχώς από το ακίνητο φορτίο  $+Q$  απωστική δύναμη και θα μετακινείται πάνω στη δυναμική γραμμή απομακρυνόμενο από το σημείο A και κινούμενο προς το σημείο B, το οποίο και θα προσπεράσει με κατεύθυνση προς το "άπειρο". Το συμπέρασμα είναι φανερό:

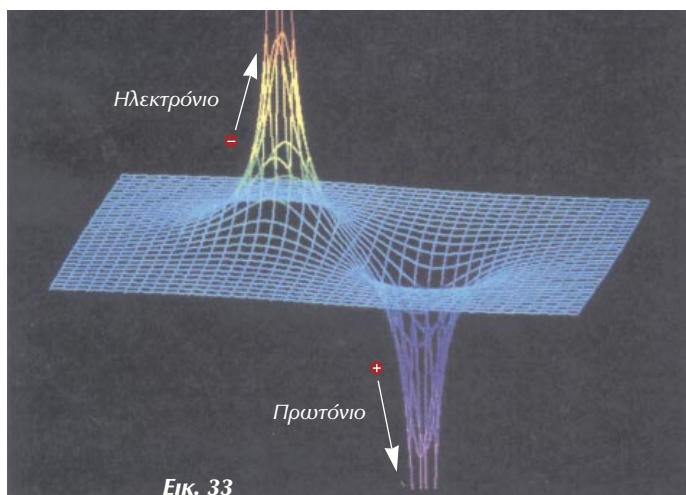
**Τα θετικά φορτία κινούνται από μόνα τους από περιοχές υψηλού δυναμικού προς περιοχές χαμηλού δυναμικού.**

Ας φανταστούμε τώρα ότι στο σημείο B (σημείο με χαμηλότερο δυναμικό από το A) τοποθετούμε αρνητικό φορτίο  $-q$ . Αυτό το φορτίο θα δέχεται ελκτική δύναμη από το φορτίο  $+Q$  και θα κινείται προς το σημείο A (σημείο με υψηλότερο δυναμικό), το οποίο θα προσπεράσει πλησιάζοντας το φορτίο  $+Q$ . Το ίδιο θα ισχύει σε οποιοδήποτε σημείο (ακόμα και σε περιοχή του "απείρου") και αν τοποθετήσουμε το φορτίο  $-q$ . Αυτό θα κινείται πλησιάζοντας προς το A, δηλα-

δή θα κινείται από περιοχές χαμηλού δυναμικού προς περιοχές υψηλού δυναμικού. Το συμπέρασμα είναι φανερό:

**Τα αρνητικά φορτία κινούνται από μόνα τους από περιοχές χαμηλού δυναμικού προς περιοχές υψηλού δυναμικού**

Το τελευταίο συμπέρασμα είναι πολύ σημαντικό και θα σας βοηθήσει να κατανοήσετε τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στους αγωγούς. Στην επόμενη εικόνα 33 βλέπετε σχηματικά τον τρόπο κίνησης θετικών και αρνητικών φορτίων σε ηλεκτροστατικό πεδίο. Αναφερόμαστε σε κινήσεις ηλεκτρικών φορτίων που είναι "αυθόρμητες", δηλαδή σε κινήσεις που δεν επιβάλλονται σε αυτά από εξωτερικές δυνάμεις. Κάθε φορτίο που θα τοποθετηθεί σε ηλεκτρικό πεδίο και θα αφεθεί να κινηθεί θα αποκτήσει ενέργεια, η οποία θα είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη θα είναι η διαφορά δυναμικού που θα το επιταχύνει. Τα ηλεκτρόνια, τα οποία έχουν πολύ μικρή μάζα, αποκτούν σχετικά εύκολα πολύ υψηλές ταχύτητες, που πλησιάζουν την ταχύτητα του φωτός. Εξαιτίας αυτού χρησιμοποιούνται ως βλήματα για τη διάσπαση συνθετότερων δομών ύλης και για τη μελέτη των συστατικών της.



#### ΑΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΙΣΤΟΥΜΕ

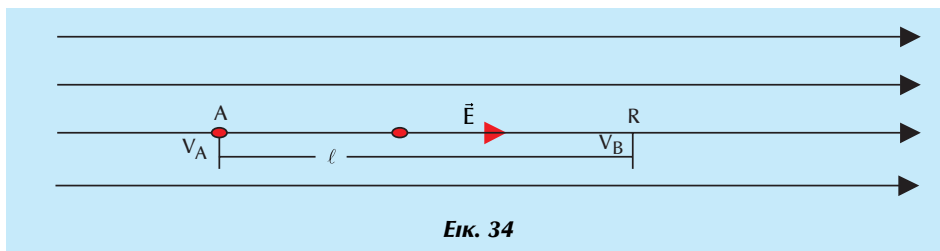
Να αντιστοιχίσετε τα θετικά φορτία προς τη συνηθισμένη ύλη και το δυναμικό του ηλεκτροστατικού πεδίου προς την απόσταση ενός σώματος από την επιφάνεια του εδάφους. Γνωρίζετε ότι τα σώματα κινούνται από μόνα τους από μεγάλα ύψη προς μικρά ύψη. Κάτι ανάλογο συμβαίνει με τα θετικά φορτία. Κινούνται από μόνα τους από υψηλά δυναμικά προς χαμηλά.

Θα αναρωτηθείτε βέβαια αν υπάρχει κάτι ανάλογο για τα αρνητικά φορτία στον πραγματικό κόσμο που ζούμε και τον οποίο γνωρίζουμε. Δυστυχώς, δεν έχουν διαπι-



στωθεί ακόμα αρνητικές μάζες ( η αντιύλη δεν είναι αρνητική μάζα). Αν όμως υπήρχαν, η συμπεριφορά τους θα ήταν ανάλογη με τη συμπεριφορά των αρνητικών φορτίων. Δηλαδή, θα ανυψώνονταν από μόνες τους. Αυτό μοιάζει λίγο με επιστημονική φαντασία. Υπάρχει, όμως, λόγος να περιορίσουμε τη φαντασία μας; Στο κάτω κάτω, η "προχθεσινή" φαντασία του Ιουλίου Βερν είναι σημερινή πραγματικότητα.

Ας δούμε τώρα μια σχέση, που είναι πολύ βασική για τα ομογενή ηλεκτροστατικά πεδία. Στην εικόνα 34 φαίνεται ένα ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο και οι δυναμικές γραμμές του. Θεωρούμε τα σημεία A και B πάνω στην ίδια δυναμική γραμμή. Επειδή κατά μήκος μιας δυναμικής γραμμής το δυναμικό ελαττώνεται, έχουμε ότι  $V_A > V_B$ . Ας τοποθετήσουμε στο σημείο A φορτίο  $q$ . Το φορτίο θα δεχτεί δύναμη  $F$  και θα κινηθεί προς το σημείο B.



Αφού το πεδίο είναι ομογενές, η ένταση έχει παντού την ίδια τιμή. Από τη σχέση  $F = Eq$  αντιλαμβανόμαστε ότι και η δύναμη θα έχει σταθερή τιμή. Ας πούμε ότι τα σημεία A και B απέχουν απόσταση  $\ell$ . Όταν το φορτίο διανύσει τη μετατόπιση, η δύναμη του πεδίου θα έχει παραγάγει στο φορτίο έργο ίσο με:

$$W_{AB} = F \cdot \ell = Eq\ell$$

Από τον ορισμό της διαφοράς δυναμικού των σημείων A και B έχουμε :

$$V_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q}$$

Από το συνδυασμό των δύο τελευταίων έχουμε :

$$V_{AB} = E \cdot \ell \quad \text{ή} \quad E = \frac{V_{AB}}{\ell} \quad (2.11)$$

### Παράδειγμα 8

Δύο παράλληλες επίπεδες μεταλλικές πλάκες διατηρούνται κατακόρυφες και αντικριστές. Οι πλάκες έχουν φορτιστεί με ετερόνυμα, απολύτως ίσα, ηλεκτρικά φορτία και απέχουν απόσταση  $\ell = 5 \text{ cm}$ . Ανάμεσά τους υπάρχει διαφορά δυναμικού  $V_{AB} = 40\text{V}$ .

**Α.** Πόσο είναι το μέτρο της έντασης του ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου ανάμεσα στις πλάκες;

**Β.** Πολύ κοντά στη θετική πλάκα τοποθετείται μικρό σώμα με μάζα  $m = 8 \text{ mg}$  και φορτίο  $q = 8 \text{ mC}$ . Να υπολογίσετε το μέτρο της δύναμης και το μέτρο της επιτάχυνσης του σώματος.

**Γ.** Να υπολογίσετε το έργο της ηλεκτροστατικής δύναμης μέχρι να φτάσει το σώμα στην αρνητική πλάκα.

**Δ.** Να υπολογίσετε το χρονικό διάστημα που χρειάζεται, για να καλύψει την παραπάνω διαδρομή και το μέτρο της ταχύτητάς του στο τέλος της διαδρομής.

**Ε.** Να υπολογίσετε τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του μικρού σώματος στη διαδρομή του από τη μία πλάκα στην άλλη και να τη συγκρίνετε με το έργο της ηλεκτροστατικής δύναμης.

Θα υποθέσετε ότι η μόνη δύναμη που ασκείται στο σώμα είναι η δύναμη από το ηλεκτροστατικό πεδίο.

#### ΛΥΣΗ

α. Το μέτρο της έντασης θα υπολογιστεί από τη σχέση :

$$E = \frac{V_{AB}}{\ell} \text{ , από την οποία προκύπτει:}$$

$$E = \frac{40}{5 \times 10^{-2}} = 800 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

β. Το μέτρο της δύναμης που θα ασκηθεί στο φορτίο  $q$  θα είναι:

$$F = Eq = 800 \times 5 \times 10^{-3} = 4 \text{ N}$$

γ. Η επιτάχυνση που θα αποκτήσει το σώμα θα είναι:

$$\alpha = \frac{F}{m} = \frac{4}{8 \times 10^{-3}} = 500 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

δ. Το έργο της ηλεκτροστατικής δύναμης είναι  $W_{AB} = F \ell = 4 \times 5 \times 10^{-2} = 0,2 \text{ J}$  .

ε. Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται, για να καλύψει την διαδρομή θα υπολογιστεί από τη σχέση  $s = \frac{1}{2} \alpha t^2$  .

$$\text{Από αυτή } t = \sqrt{\frac{2s}{\alpha}} = \sqrt{\frac{2 \times 5 \times 10^{-2}}{500}} = \sqrt{2} \times 10^{-2} \text{ s}$$

Το μέτρο της ταχύτητας θα είναι :  $v = \alpha t = 500 \times \sqrt{2} \times 10^{-2} = 5 \sqrt{2} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

Ε. Η μεταβολή της κινητικής ενέργειας του σώματος είναι:

$$\Delta K_{\text{κιν}} = K_{\text{τελ}} - K_{\text{αρχ}} = \frac{1}{2} m v^2 - 0 = \frac{1}{2} \times 8 \times 10^{-3} \times 50 = 0,2 \text{ J}$$

### Δραστηριότητες

Πολλά σχολικά εργαστήρια έχουν γεννήτριες Van de Graaf. Εάν αυτό συμβαίνει και με το δικό σας, προσπαθήστε να κάνετε το επόμενο πείραμα. Βάλτε σε λειτουργία τη μηχανή και ακουμπήστε το ένα χέρι σας στο σφαιρικό αγωγό. Εάν θέλετε, πιαστείτε χέρι χέρι με ένα συμμαθητή σας. Θα διαπιστώσετε ότι οι τρίχες της κεφαλής και των δύο σας ανορθώνονται. Πού νομίζετε ότι οφείλεται αυτό.

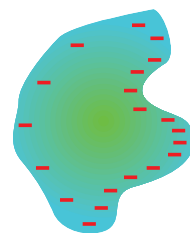


### Προσοχή:

Αυτή η δραστηριότητα πρέπει να γίνεται πάντοτε με την παρουσία του καθηγητή σας. Πρέπει, επίσης, να ληφθεί φροντίδα, ώστε το μεταλλικό περίβλημα της συσκευής να είναι καλά γειωμένο. Υπάρχει κίνδυνος ατυχήματος.

## 2.10 Χωριτικότητα αγωγού

Ας μελετήσουμε το ηλεκτροστατικό πεδίο που δημιουργείται γύρω από ένα φορτισμένο μεταλλικό αγωγό. Στην εικόνα 35 ο μεταλλικός αγωγός φορτίστηκε αρνητικά με την προσφορά σε αυτόν ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια, επειδή απωθούνται, κατανέμονται στην εξωτερική του επιφάνεια και σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα (της τάξης των  $10^{-8}$  s) ηρεμούν. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα σημεία της εξωτερικής επιφάνειας και του εσωτερικού του αγωγού έχουν το ίδιο δυναμικό. Η εξήγηση είναι απλή : εάν όλα τα σημεία δεν είχαν τελικά το ίδιο δυναμικό, θα υπήρχε μόνιμη μετακίνηση φορτίων εξαιτίας διαφορών δυναμικού. Τέτοια μετακίνηση θα σημαίνει παραγωγή έργου εκ του μηδενός και δεν παρατηρείται. Λέμε ότι η εξωτερική επιφάνεια κάθε φορτισμένου μεταλλικού αγωγού είναι **ισοδυναμική**.

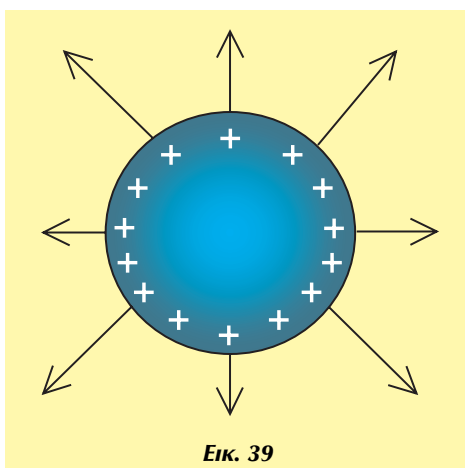


Εικ. 35

Η εξωτερική επιφάνεια φορτισμένου μεταλλικού αγωγού που είναι σε ηλεκτροστατική ισορροπία είναι ισοδυναμική.

Από δώ και πέρα όταν θα λέμε "το δυναμικό ενός μεταλλικού αγωγού", θα εννοούμε το δυναμικό κάθε σημείου της εξωτερικής του επιφάνειας.

### Α. Χωρητικότητα αγωγού



Εικ. 39

Στον αγωγό Α (εικόνα 39) προσφέρουμε φορτίο  $Q$ . Το φορτίο κατανέμεται στην εξωτερική επιφάνεια και ηρεμεί ταχύτατα. Ας πούμε  $V$  το δυναμικό κάθε σημείου της επιφάνειάς του. Το ερώτημα που θα εξετάσουμε είναι τούτο: αν συνεχίσουμε να προσφέρουμε φορτίο στον αγωγό, τι θα συμβαίνει με το δυναμικό του; Προτού μελετήσουμε το θέμα πειραματικά, ας το σκεφτούμε λίγο θεωρητικά. Το πρώτο πολύ μικρό φορτίο που θα προσθέσουμε στον, αρχικά αφόρτιστο, αγωγό θα τοποθετηθεί χωρίς να δαπανήσουμε ενέργεια. Από δώ και

πέρα κάθε προσπάθειά μας για την τοποθέτηση νέου πολύ μικρού φορτίου θα συναντά την απωστική δράση του φορτίου που υπάρχει ήδη στον αγωγό. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να δαπανούμε ενέργεια. Η ενέργεια αυτή θα αποθηκεύεται στο πεδίο του αγωγού, πράγμα που σημαίνει ότι θα αυξάνεται το δυναμικό του αγωγού.

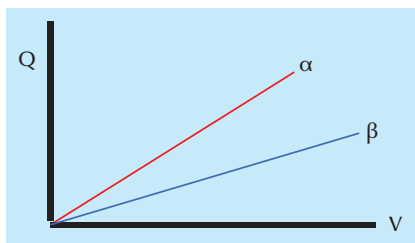
Για να διερευνήσουμε τη σχέση ανάμεσα στο φορτίο του αγωγού και στο δυναμικό του, θα κάνουμε το επόμενο πείραμα.

### Πείραμα

Στον αγωγό Α προσφέρουμε φορτίο  $Q$  και σημειώνουμε το δυναμικό που

ΠΙΝΑΚΑΣ II		
Φορτίο $Q$	Δυναμικό $V$	Πηλίκο $Q/V$
$Q$	$V$	$Q/V$
$Q/2$	$V/2$	$Q/V$
$Q/3$	$V/3$	$Q/V$
$Q/4$	$V/4$	$Q/V$

καταγράφει ηλεκτροσκόπιο συνδεδεμένο με τον αγωγό και βαθμονομημένο σε μονάδες δυναμικού. Υποδιπλασιάζουμε το φορτίο και παρατηρούμε ότι η ένδειξη του οργάνου υποδιπλασιάζεται. Υποτριπλασιάζουμε το φορτίο και παρατηρούμε ότι η ένδειξη του οργάνου υποτριπλασιάζεται. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων καταγράφονται στον πίνακα II.



Τα ζεύγη των αντίστοιχων τιμών φορτίου-δυναμικού τα μεταφέρουμε σε διάγραμμα με άξονες  $Q$ ,  $V$ . Τα σημεία που απεικονίζουν τα αντίστοιχα ζεύγη για τον ίδιο αγωγό βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία, η οποία περνά από την αρχή των αξόνων (ευθεία α). Αν επαναλάβουμε τις μετρήσεις με άλλο αγωγό και απεικονίσουμε τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών στο ίδιο διάγραμμα, θα πάρουμε πάλι μια ευθεία, η οποία θα έχει διαφορετική κλίση (ευθεία β).

### Συμπέρασμα

Το συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι το πηλίκο του φορτίου του αγωγού και του αντίστοιχου δυναμικού παραμένει σταθερό:

$$\frac{Q}{V} = \text{σταθερό}$$

Το σταθερό αυτό πηλίκο ονομάζεται χωρητικότητα του αγωγού και συμβολίζεται με  $C$ . Έτσι :

**Χωρητικότητα αγωγού** ονομάζεται το σταθερό πηλίκο του φορτίου  $Q$  του αγωγού και του δυναμικού του  $V$ .

$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.12)$$

Από τη σχέση (2.12) προκύπτει ότι η μονάδα χωρητικότητας στο σύστημα SI είναι  $1 \frac{C}{V}$ . Η μονάδα αυτή ονομάζεται 1Farad ( 1 F ) προς τιμή του Άγγλου φυσικού Michael Faraday.  $1 \frac{C}{V} \quad (2.12)$

Υποπολλαπλάσια της μονάδας είναι :

$1 \text{ m F} = 10^{-3} \text{ F}$	(μιλifarάντ)
$1 \mu \text{ F} = 10^{-6} \text{ F}$	(μικροfarάντ)
$1 \text{ n F} = 10^{-9} \text{ F}$	(νανοfarάντ)
$1 \text{ p F} = 10^{-12} \text{ F}$	(πικοfarάντ)

**Παράδειγμα 9**

Να υπολογίσετε τη χωρητικότητα σφαιρικού αγωγού ακτίνας  $R$ . Στη συνέχεια να θεωρήσετε τη γη ως σφαίρα με ακτίνα  $R = 6\,600\text{ km}$  και να υπολογίσετε τη χωρητικότητά της.

**Λύση**

Το δυναμικό σε κάθε σημείο της επιφάνειας της σφαίρας ακτίνας  $R$  δίνεται από τη σχέση  $V = k_{\eta\lambda} \frac{Q}{R}$ . Χρησιμοποιούμε για τη χωρητικότητα τη σχέση

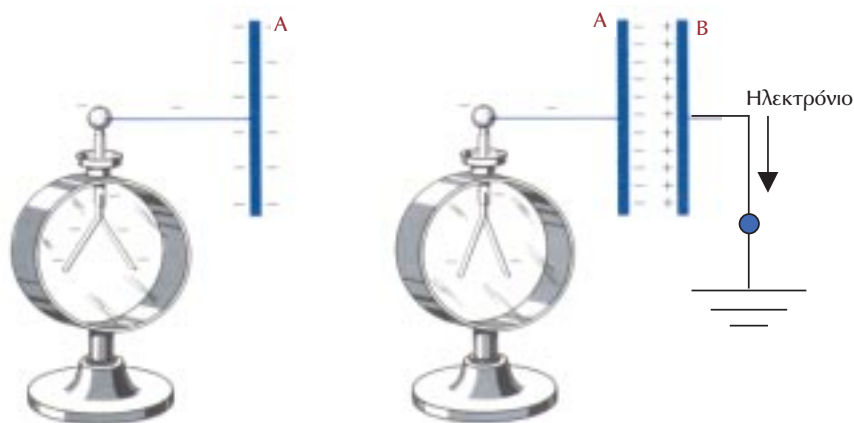
$$C = \frac{Q}{V}. \text{ Από τις δύο αυτές σχέσεις έχουμε: } C = \frac{1}{k_{\eta\lambda}} R.$$

Η χωρητικότητα της γης θα είναι τότε :

$$C_{\text{ΓΗΣ}} = \frac{1}{9 \times 10^9} \times 6,6 \times 10^6 = 0,73\text{ mF}$$

**2.11. Ο πυκνωτής****Πείραμα**

Στην εικόνα 40 ένας επίπεδος φορτισμένος μεταλλικός αγωγός  $A$  έχει συνδεθεί με την κεφαλή του ηλεκτροσκόπιου. Ο αγωγός και το ηλεκτροσκόπιο αποτελούν ένα μονωμένο σύστημα σε ισορροπία. Αυτό σημαίνει ότι έχουν το ίδιο δυναμικό, το οποίο καταγράφεται από το ηλεκτροσκόπιο. Ας πούμε  $-Q$  το φορτίο του αγωγού.

**Εικ. 40**

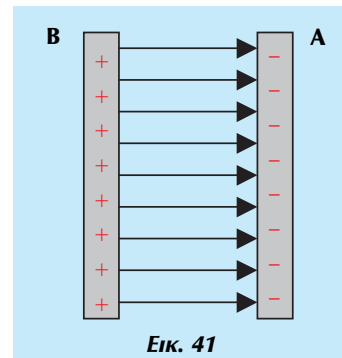
Στον αρνητικά φορτισμένο επίπεδο αγωγό πλησιάζουμε έναν άλλο επίπεδο, αρχικά αφόρτιστο, μεταλλικό αγωγό  $B$ , με το ίδιο εμβαδόν επιφάνειας, ώστε να



βρίσκονται ο ένας απέναντι στον άλλο, και γειώνουμε τον αγωγό B. Θα παρατηρήσουμε ότι τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου θα συγκλίνουν. Αυτό σημαίνει ότι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο μεταλλικές πλάκες ελαττώθηκε .

### Ερμηνεία

Ελεύθερα ηλεκτρόνια του αγωγού B απωθούνται από το αρνητικό φορτίο του αγωγού A και τοποθετούνται στη δεξιά πλευρά του αγωγού B. Ας πούμε  $-Q$  το φορτίο αυτών των ηλεκτρονίων. Στην αριστερή πλευρά του αγωγού B θα πλεονάσουν θετικά φορτία. Ας πούμε  $+Q$  το φορτίο αυτό. Όταν συνδέσουμε τον αγωγό B με το έδαφος, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που βρίσκονταν στη δεξιά πλευρά του θα διαρρεύσουν προς το έδαφος.



Μπορούμε να παρατηρήσουμε (Εικόνα 41) ότι

1. Το ηλεκτρικό πεδίο περιορίζεται, ουσιαστικά, στο χώρο ανάμεσα στις δύο επίπεδες πλάκες. Το ηλεκτροστατικό πεδίο που σχηματίζεται ανάμεσα στις δύο πλάκες είναι με καλή προσέγγιση ομογενές. Το σύστημα των δύο αγωγών ονομάζεται πυκνωτής.
2. Στο σύστημα των δύο αγωγών αποθηκεύονται περισσότερα ηλεκτρικά φορτία, για τη μετατόπιση των οποίων δαπανήσαμε ενέργεια με μορφή μηχανικού έργου. Η ενέργεια αυτή αποθηκεύεται στο ηλεκτροστατικό πεδίο. Γενικά:

**Πυκνωτής** ονομάζεται κάθε σύστημα αγωγών μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό. Στο σύστημα αυτό μπορούμε να αποθηκεύσουμε ηλεκτρικά φορτία.

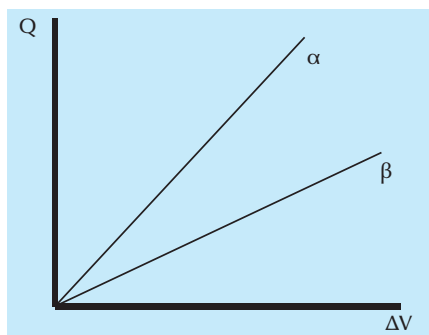
Συνήθως οι αγωγοί του συστήματος είναι δύο. Η ονομασία του πυκνωτή προέρχεται από τη μορφή των δύο αγωγών του. Ο πυκνωτής στον οποίο αναφερθήκαμε ονομάζεται **επίπεδος πυκνωτής**. Μπορούμε να έχουμε **σφαιρικούς πυκνωτές** και **κυλινδρικούς πυκνωτές**.

**Φορτίο ενός πυκνωτή** ονομάζουμε το φορτίο που φέρει κάθε οπλισμός του, θεωρούμενο κατ' απόλυτη τιμή

Αποδεικνύεται πειραματικά ότι το πηλίκο του φορτίου ενός πυκνωτή και της αντίστοιχης διαφοράς δυναμικού των οπλισμών του παραμένει σταθερό. Στην εικόνα 42 υποδεικνύεται ένα πείραμα, με το οποίο μπορούμε να αποδείξουμε ότι το πηλίκο του φορτίου του πυκνωτή και της διαφοράς δυναμικού των οπλισμών του παραμένει σταθερό.



Εικ. 42



Εικ. 43

### Πείραμα

Φορτίζουμε τον πυκνωτή με τη βοήθεια πηγής γνωστής τάσης  $V_0$  και μετράμε το αντίστοιχο φορτίο του  $Q_0$ . Εκφορτίζουμε τον πυκνωτή και τον επαναφορτίζουμε χρησιμοποιώντας πηγή διπλάσιας τάσης  $2V_0$ . Θα διαπιστώσουμε ότι το φορτίο είναι  $2Q_0$ . Εκφορτίζουμε τον πυκνωτή και τον επαναφορτίζουμε χρησιμοποιώντας πηγή τριπλάσιας τάσης  $3V_0$ . Θα διαπιστώσουμε ότι το φορτίο τριπλασιάστηκε. Μπορούμε να συνεχίσουμε αυτή τη διαδικασία αυξάνοντας ή ελαττώνοντας την τάση του πυκνωτή. Κάθε φορά θα διαπιστώνουμε ότι το φορτίο είναι ανάλογο της τάσης, πράγμα που σημαίνει ότι το πηλίκο του φορτίου και της τάσης παραμένει σταθερό.

Στο διάγραμμα της εικόνας 43 έχουμε απεικονίσει τα ζεύγη των αντίστοιχων τιμών φορτίου και τάσης για κάποιο συγκεκριμένο πυκνωτή. Τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα ζεύγη τοποθετούνται πάνω σε ευθεία γραμμή (ευθεία α). Εάν επαναλάβουμε το πείραμα με ένα διαφορετικό πυκνωτή, πάλι τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών φορτίου και τάσης θα απεικονίζονταν με σημεία που βρίσκονται σε ευθεία γραμμή, η οποία,

όμως, θα είναι διαφορετική από την προηγούμενη (ευθεία β).

### Συμπέρασμα :

Το πηλίκο του φορτίου του πυκνωτή και της αντίστοιχης τάσης του είναι σταθερό και δεν εξαρτάται ούτε από το φορτίο του πυκνωτή ούτε από την τάση του. Αυτό το χαρακτηριστικό πηλίκο ονομάζεται **χωρητικότητα C** του πυκνωτή.

**Χωρητικότητα C** ενός πυκνωτή ονομάζεται το σταθερό πηλίκο του φορτίου του πυκνωτή προς την διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του  $V$ .

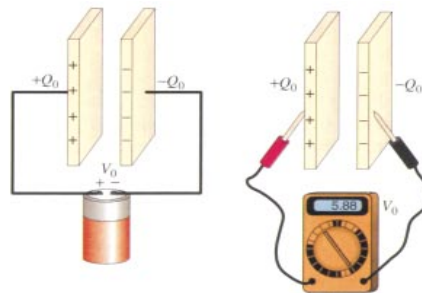
$$C = \frac{Q}{V} \quad (2.13)$$

Θα εξετάσουμε τώρα τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η χωρητικότητα ενός πυκνωτή.

### A. Σχέση χωρητικότητας C και απόστασης οπλισμών

#### Πείραμα 1

Στην εικόνα 44 ο πυκνωτής φορτίστηκε από πηγή τάσης  $V_0$  και αποσυνδέθηκε από την πηγή φόρτισης. Το βολτόμετρο που είναι συνδεδεμένο στους οπλισμούς του καταγράφει την τάση του πυκνωτή, η οποία είναι η τάση της πηγής φόρτισης. Πλησιάζουμε το δεξιό οπλισμό, ώστε η απόσταση των δύο οπλισμών να γίνει  $\frac{\ell}{2}$ , δηλαδή

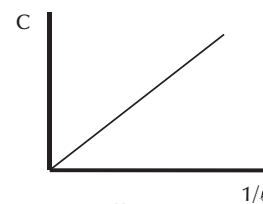


Εικ. 44

η μισή από την αρχική. Θα παρατηρήσουμε ότι η ένδειξη του οργάνου θα γίνει  $V_0/2$ . Αν συνεχίσουμε να ελαττώνουμε την απόσταση των οπλισμών του πυκνωτή, θα διαπιστώνουμε ότι και η τάση του θα ελαττώνεται αναλόγως. Να παρατηρήσετε ότι το φορτίο του πυκνωτή παραμένει σταθερό διότι, έχει αποσυνδεθεί από την πηγή φόρτισης.

Στο διάγραμμα της εικόνας (45) έχουμε απεικονίσει τα αντίστοιχα ζεύγη τιμών χωρητικότητας και αντίστροφης απόστασης οπλισμών. Τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τα ζεύγη αυτά είναι τοποθετημένα σε ευθεία γραμμή.

ΠΙΝΑΚΑΣ III			
Φορτίο $Q$	Απόσταση $\ell$	Διαφορά δυναμικού $V$	Χωρητι- κότητα
$Q$	$\frac{\ell}{2}$	$\frac{V_0}{2}$	$2C$
$Q$	$\frac{\ell}{3}$	$\frac{V_0}{3}$	$3C$
$Q$	$\frac{\ell}{4}$	$\frac{V_0}{4}$	$4C$



Εικ. 45

#### Ερμηνεία:

Στον πίνακα (III) φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τη μελέτη του πίνακα φαίνεται ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι αντίστροφα ανάλογη με την απόσταση των οπλισμών του.

$$C \propto \frac{1}{\ell} \quad (\alpha)$$

### Β. Σχέση χωρητικότητας C και εμβαδού οπλισμών A

Πειραματιζόμενοι με ανάλογο τρόπο μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση του εμβαδού των οπλισμών στη χωρητικότητα του πυκνωτή. Διαθέτουμε πυκνωτές με εμβαδά οπλισμών A, 2A, 3A,...

#### Πείραμα 2

Φορτίζουμε όλους τους πυκνωτές στην ίδια τάση  $V_0$  και διατηρούμε την πηγή συνδεδεμένη στους πυκνωτές.

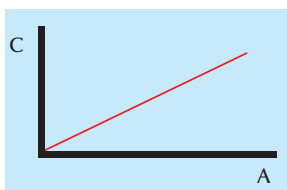
Σε αυτή την περίπτωση όλοι οι πυκνωτές έχουν και διατηρούν την ίδια τάση. Μετρούμε το φορτίο  $Q_0$  στον πυκνωτή με εμβαδόν οπλισμών A. Μετρούμε τα φορτία των άλλων πυκνω-

ΠΙΝΑΚΑΣ ΙΙΙ			
Διαφορά δυναμικού V	Εμβαδόν οπλισμών A	Φορτίο Q	Χωρητικότητα $C = \frac{Q}{V}$
V	A	Q	C
V	2A	2Q	2C
V	3A	3Q	3C
V	4A	4Q	4C

τών και διαπιστώνουμε ότι το φορτίο στον πυκνωτή με διπλάσιο εμβαδόν οπλισμών είναι διπλάσιο, στον πυκνωτή με τριπλάσιο εμβαδόν είναι τριπλάσιο κ.ο.κ.

Τα ζεύγη των αντίστοιχων τιμών χωρητικότητας-εμβαδού οπλισμών τα μεταφέρουμε σε διάγραμμα. Παρατηρούμε ότι τα σημεία που αντιπροσωπεύουν τα αντίστοιχα ζεύγη βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή.

#### Ερμηνεία



Εικ. 46

Από τη σχέση (2.13) συμπεραίνουμε ότι η χωρητικότητα διπλασιάζεται, τριπλασιάζεται, τετραπλασιάζεται, όταν διπλασιάζεται, τριπλασιάζεται, τετραπλασιάζεται αντίστοιχα το εμβαδόν των οπλισμών. Το συμπέρασμα είναι ότι η χωρητικότητα είναι ανάλογη με το εμβαδόν των οπλισμών.

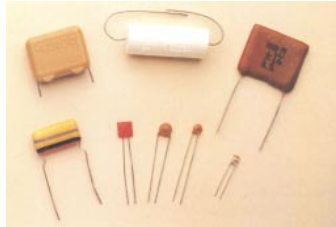
$$C \propto A \quad (\beta)$$

Από τις (α) και (β) προκύπτει το συμπέρασμα ότι:

$$C \propto \frac{A}{l} \quad (\gamma).$$

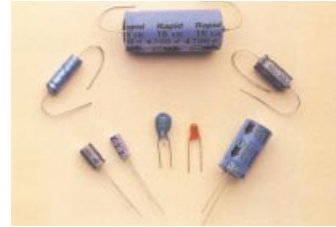
Η σχέση αναλογίας (γ) γίνεται ισότητα με την εισαγωγή μιας σταθεράς, που συμβολίζεται με  $\epsilon_0$  και ονομάζεται **απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού**.

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{l}$$



Κοινοί πυκνωτές. Έχουν σχετικά μικρές τιμές χωρητικότητας. Δεν έχει σημασία ο τρόπος σύνδεσής τους στο κύκλωμα.

Εικ. 48

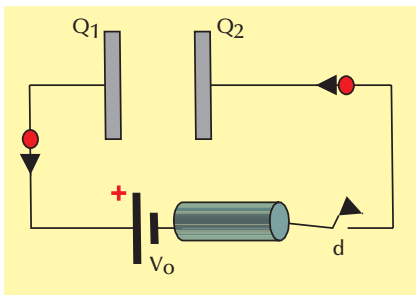


Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές. Έχουν σχετικά μεγάλες τιμές χωρητικότητας και φέρουν θετικό (+) και αρνητικό ακροδέκτη (-). Πρέπει να συνδέονται με τη σωστή πολικότητα.

## 2.12. Ενέργεια πυκνωτή

### Α. Φόρτιση πυκνωτή

Η φόρτιση ενός πυκνωτή γίνεται με τη σύνδεση των οπλισμών με πηγή συνεχούς τάσης και με την παρεμβολή ενός αντιστάτη (το θέμα της ηλεκτρικής



Εικ. 49

πηγής και του αντιστάτη θα τα μελετήσουμε στο επόμενο Κεφάλαιο). Το κύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 49. Με απλά λόγια μπορούμε να πούμε ότι όταν κλείσουμε τον διακόπτη  $d$ , συμβαίνουν τα εξής: Ο θετικός πόλος της πηγής αποσπά από τον οπλισμό  $Q_1$  ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται μέσα από την πηγή και μεταφέρονται στον οπλισμό  $Q_2$ . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η τάση του πυκνωτή, ώσπου η τάση του να γίνει ίση με την τάση  $V_0$  της πηγής που τον φορτίζει.

Ας πούμε  $Q_0$  το αντίστοιχο φορτίο του πυκνωτή. Για τη φόρτιση του πυκνωτή η πηγή δαπανά ενέργεια. Η ενέργεια που δαπανά η πηγή αποταμιεύεται με μορφή ενέργειας ηλεκτροστατικού πεδίου στο χώρο μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή. Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται από τη σχέση

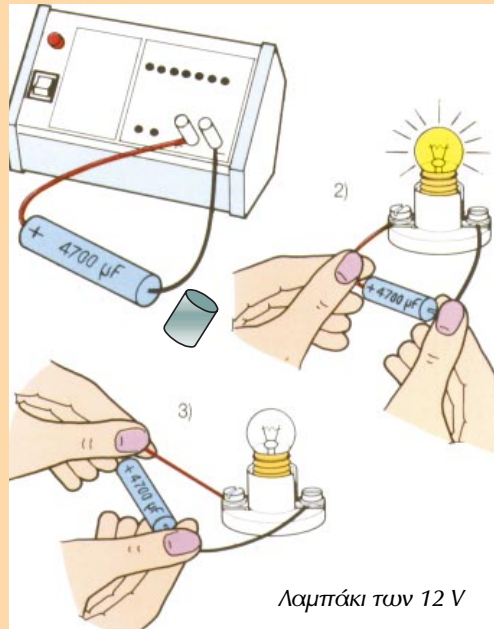
$$E = \frac{1}{2} Q_0 V_0 \quad (2.15)$$

Αν λάβουμε υπόψη μας και τη σχέση  $C = Q/V$ , η τελευταία μπορεί να γραφεί:

$$E = \frac{1}{2} C V_0^2 \quad E = \frac{1}{2} \frac{Q_0^2}{C} \quad (2.16)$$

### Δραστηριότητα 9

Συνδέστε έναν πυκνωτή με χωρητικότητα περίπου  $5 \times 10^3 \mu\text{F}$  με πηγή 12Volt, παρεμβάλλοντας έναν αντιστάτη με τιμή αντίστασης περίπου  $10\text{k}\Omega$ . Προσέξτε να συνδέσετε το + του πυκνωτή με το θετικό πόλο της πηγής. Στη συνέχεια αποσυνδέστε την πηγή και συνδέστε τον πυκνωτή με ένα λαμπάκι με τάση λειτουργίας 12-Volt. Προσπαθήστε να εξηγήσετε όλες τις ενεργειακές μετατροπές που παρατηρούνται. Αντικαταστήστε τον αντιστάτη με άλλον, που έχει αντίσταση  $1\text{M}\Omega$ , και επαναλάβετε τα ίδια. Τι παρατηρείτε;



**Προσοχή:** η δραστηριότητα πρέπει να πραγματοποιηθεί με την παρουσία του καθηγητή σας.

## 2.13 Διηλεκτρικά

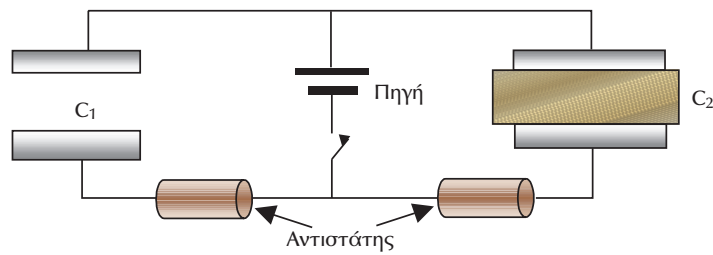
Ας επαναλάβουμε τα πειράματα που έκανε ο Faraday.

Θα χρησιμοποιήσουμε δύο απόλυτα όμοιους πυκνωτές αέρα. Στο χώρο μεταξύ των οπλισμών του ενός υπάρχει συνηθισμένος αέρας. Στο χώρο μεταξύ των οπλισμών του άλλου τοποθετούμε ένα μονωτικό υλικό (π.χ. γυαλί, πλαστικό, παραφίνη κ.ά.). Συνδέουμε τους πυκνωτές προς τους πόλους της ίδιας πηγής, όπως φαίνεται στην εικόνα 52. Έτσι, εξασφαλίζουμε ότι οι πυκνωτές θα φορτιστούν στην ίδια τάση. Στη συνέχεια, μετράμε τα φορτία των δύο οπλισμών και διαπιστώνουμε ότι το φορτίο του πυκνωτή που φέρει στο εσωτερικό του το μονωτικό υλικό είναι μεγαλύτερο από το φορτίο του άλλου πυκνωτή κατά κάποιον παράγοντα  $\epsilon$ . Διαπιστώνουμε, δηλαδή, ότι  $Q_2 = \epsilon Q_1$ . Αν πειραματιστούμε με πηγές διαφορετικών τάσεων, πάντοτε θα διαπιστώνουμε ότι το φορτίο του πυκνωτή με το μονωτικό είναι μεγαλύτερο από το φορτίο του άλλου πυκνωτή κατά τον ίδιο παράγοντα  $\epsilon$ .

Αλλάζοντας το μονωτικό και χρησιμοποιώντας διαφορετικές τάσεις, διαπι-



στώνουμε ότι πάντοτε το φορτίο του πυκνωτή με το μονωτικό είναι μεγαλύτερο του φορτίου του άλλου πυκνωτή κατά έναν παράγοντα  $\epsilon$ , που έχει, όμως, διαφορετική τιμή για τα διάφορα μονωτικά που χρησιμοποιούμε.



Εικ. 52

### Συμπεράσματα

1. Το φανερό συμπέρασμα είναι ότι η τιμή του μεγέθους  $\epsilon$  διαφέρει από μονωτή σε μονωτή.
2. Ας δούμε και κάτι ακόμα: ας πούμε  $Q_2$  το φορτίο του πυκνωτή με το μονωτικό και  $Q_1$  το φορτίο του πυκνωτή χωρίς το μονωτικό. Από την πειραματική σχέση προκύπτει με διαίρεση με  $V$  (που είναι η κοινή τάση των πυκνωτών) ότι:

$$\frac{Q_2}{V} = C_2$$

Όμως: 
$$\frac{Q_1}{V} = C_1$$

Από τις δύο τελευταίες προκύπτει ότι:

$$C_2 = \epsilon C_1 \quad (2.17)$$

Όλα τα μονωτικά υλικά παρουσιάζουν την ιδιότητα να αυξάνουν τη χωρητικότητα των πυκνωτών, όταν τοποθετούνται στο εσωτερικό τους. Τα υλικά αυτά ονομάζονται και **διηλεκτρικά**.

### Συμπέρασμα :

**Η εισαγωγή ενός μονωτικού (διηλεκτρικού) στο εσωτερικό ενός πυκνωτή αυξάνει τη χωρητικότητά του.**

Η σταθερά  $\epsilon$  στη σχέση (2.17) ονομάζεται **διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού**.

Παρατηρήσεις :

- Από τη σχέση (2.17) φαίνεται ότι η σταθερά  $\epsilon$  δεν έχει διαστάσεις.
- Από τη διαξαγωγή του πειράματος προκύπτει ότι η σταθερά  $\epsilon$  είναι αριθμός μεγαλύτερος από τη μονάδα ( $\epsilon > 1$ ).
- Με το προηγούμενο πείραμα είδαμε ότι η εισαγωγή του διηλεκτρικού αυξάνει τη χωρητικότητα του πυκνωτή. Ο τρόπος εισαγωγής του διηλεκτρικού, που εξετάσαμε, ονομάζεται εισαγωγή με **σταθερή τάση**, γιατί στη διάρκεια του πειράματος η τάση των πυκνωτών παρέμενε σταθερή και ίση με την τάση της πηγής.
- Θα μπορούσαμε να επαναλάβουμε το πείραμα εισάγοντας το διηλεκτρικό με **σταθερό φορτίο**. Στην περίπτωση αυτή θα έπρεπε να φορτίσουμε τους πυκνωτές στην ίδια τάση, να τους αποσυνδέσουμε από την πηγή ( οπότε το φορτίο τους θα ήταν το ίδιο και στη συνέχεια θα παρέμενε σταθερό) και κατόπιν να εισαγάγουμε στον έναν από αυτούς το διηλεκτρικό. Μην ανησυχείτε. Το αποτέλεσμα δε θα άλλαζε. Θα διαπιστώναμε ότι, και στην περίπτωση αυτή, η χωρητικότητα του πυκνωτή με το διηλεκτρικό θα αυξανόταν.

**Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή αυξάνεται, όταν στο εσωτερικό του τοποθετούμε διηλεκτρικό, ανεξάρτητα αν η εισαγωγή γίνεται με σταθερή τάση ή με σταθερό φορτίο.**

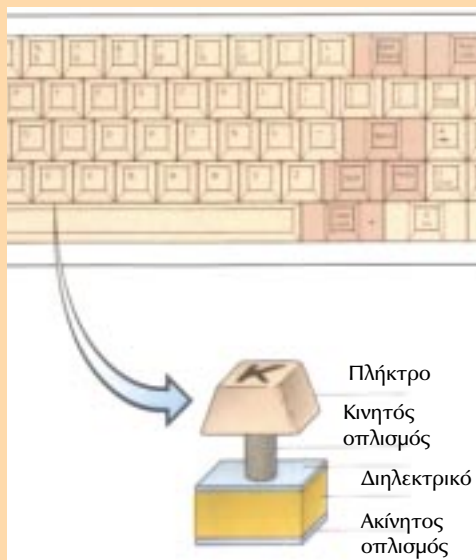
## 2.14 Διηλεκτρική αντοχή

Θα νόμιζε κανείς ότι αν αυξήσουμε την τάση, μπορούμε να αυξήσουμε ακόμα περισσότερο το φορτίο του πυκνωτή. Εδώ, όμως, μπαίνει ένα όριο, που προσδιορίζεται από ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος του διηλεκτρικού, το οποίο ονομάζεται **διηλεκτρική αντοχή**. Η διηλεκτρική αντοχή ενός διηλεκτρικού είναι η μέγιστη ένταση ηλεκτρικού πεδίου που μπορεί να υπάρχει στο εσωτερικό του χωρίς να δημιουργηθεί ηλεκτρική εκκένωση, η οποία θα τρυπήσει και θα καταστρέψει το διηλεκτρικό. Η διηλεκτρική αντοχή εκφράζεται σε kV/cm. Στον πίνακα IV δίνονται οι τιμές της διηλεκτρικής αντοχής για διάφορα υλικά.

ΠΙΝΑΚΑΣ IV	
Διηλεκτρικό υλικό	Διηλεκτρική αντοχή ( kV / cm )
Αέρας	30
Λάδι	75
Παραφίνη	350
Χαρτί	400
Μίκα	500
Γυαλί	1000

### Δραστηριότητα 10

Ένα κοινό είδος πλήκτρου στα πληκτρολόγια των υπολογιστών βασίζεται στην ιδέα της χωρητικότητας. Ανάμεσα στον κινητό οπλισμό και τον ακίνητο τοποθετείται διηλεκτρικό. Όταν πιέζεται το πλήκτρο, ο κινητός οπλισμός πλησιάζει τον ακίνητο και η χωρητικότητα αυξάνεται. Με ηλεκτρονικά κυκλώματα ο υπολογιστής εντοπίζει τη μεταβολή της χωρητικότητας και αναγνωρίζει ποιο πλήκτρο πιάστηκε. Να υπολογίσετε για ένα τέτοιο πλήκτρο την μεταβολή της χωρητικότητας που προκαλείται από την πίεσή του. Σας δίνουν τα επόμενα: Η κανονική απόσταση οπλισμών είναι  $5 \times 10^{-3} \text{ m}$  και γίνεται  $0,15 \times 10^{-3} \text{ m}$ , όταν πιέσουμε το πλήκτρο.



Το εμβαδόν της επιφάνειας κάθε οπλισμού είναι  $9,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$  και η διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού είναι 3,5.

### Δραστηριότητα 11

Η μαθήτριά της εικόνας φόρτισε με τριβή μερικά μπαλόνια και τα ακούμπησε σε έναν κατακόρυφο τοίχο. Όπως παρατηρείτε, τα μπαλόνια παρέμειναν κολλημένα στον τοίχο. Να επαναλάβετε το πείραμα και να προσπαθήσετε να εξηγήσετε το φαινόμενο που παρατηρείτε.



### Δραστηριότητα 12

Από μια βρύση του σπιτιού σας αφήστε να τρέχει μια πολύ λεπτή φλέβα νερού. Πάρτε ένα μπαλόνι και φορτίστε το με τριβή. Πλησιάστε το μπαλόνι στη φλέβα του νερού χωρίς, όμως, να το ακουμπήσετε σε αυτήν. Θα παρατηρήσετε ότι η φλέβα κάμπτεται και πλησιάζει προς το μπαλόνι. Προσπαθήστε να εξηγήσετε το φαινόμενο. Σκεφτείτε αν το φορτισμένο μπαλόνι ασκεί στα μόρια του νερού δυνάμεις. Μήπως αυτό σας λέει κάτι για την κατανομή των φορτίων στο μόριο του νερού;



## Εφαρμογές



Ο Benjamin Franklin έκανε σημαντικές ανακαλύψεις για το στατικό ηλεκτρισμό κατά τον 17ο αιώνα. Απέδειξε ότι τα αλεξικέραυνα εκφορτίζουν τα σύννεφα. Η τεχνική του περιλάμβανε το πέταγμα αετών κάτω από σύννεφα καταιγίδων, πράγμα εξαιρετικά επικίνδυνο. Μην το δοκιμάσετε.

Ο στατικός ηλεκτρισμός μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμος για την Τεχνολογία μας. Μπορεί, όμως, να είναι και επικίνδυνος. Ας δούμε και τις δύο όψεις του.

### 1. Η αστραπή

Η αστραπή είναι μια γιγαντιαία εκφόρτιση, στη διάρκεια της οποίας αλληλοεξουδετερώνονται αντίθετα φορτία. Η εκφόρτιση μπορεί να γίνει μεταξύ νεφών ή μεταξύ νέφους και του εδάφους. Τα φορτία συσσωρεύονται εξαιτίας της κίνησης των σταγονιδίων, η οποία προκαλείται από τα ρεύματα αέρα που δημιουργούνται στα σύννεφα, ιδιαίτερα όταν είναι καταιγίδα. Η τριβή που δημιουργείται από τους ανέμους στο εσωτερικό ενός σύννεφου μπορεί να αποσπάσει ηλεκτρόνια από τα σταγονίδια του νερού και από τους κρυστάλλους του πάγου, και έτσι να δημιουργηθεί ένα πλεόνασμα φορτίου. Για να δημιουργηθεί αυτή η ηλεκτρική εκκένωση, πρέπει να υπάρχει διαφορά δυναμικού εκατοντάδων εκατομμυρίων Volt. Σε κάθε αστραπή απελευθερώνεται ενέργεια περίπου 360 εκατομμύρια Joule. Υπολογίζεται ότι εκατό αστραπές χτυπούν το έδαφος της γης κάθε δευτερόλεπτο. Στην περίπτωση που το κάτω μέρος ενός σύννεφου φορτίζεται αρνητικά, στην επιφάνεια του εδάφους επάγονται θετικά φορτία και, εφόσον η τάση είναι αρκετά υψηλή, ξεσπάει ηλεκτρική εκκένωση. Το φαινόμενο είναι πολύπλοκο. Συχνά δημιουργούνται σύντομα ρεύματα ηλεκτρονίων, που κινούνται προς το έδαφος μέσα από την ίδια ιονισμένη στήλη αέρα. Το ολικό φορτίο που μετακινείται είναι εξαιρετικά μικρό-μερικά, μόνο, Coulomb. Το φως που εκπέμπεται προκαλείται από θερμο-

κρασίες της τάξης των 30 000 K στο ιονισμένο ρεύμα, που κινείται προς το έδαφος. Ο θόρυβος που ακούμε παράγεται από την ξαφνική εκτόνωση του αέρα που περιβάλλει τη φωτεινή λωρίδα. Δεν υπάρχουν τρόποι, για να απο-

φρευχθούν οι αστραπές. Υπάρχουν, όμως, τρόποι προστασίας από την καταστροφικότητά τους. Τα αλεξικέραυνα, που επινοήθηκαν από τον Benjamin Franklin, χρησιμοποιούνται συχνά για την προστασία κτιρίων που είναι κατασκευασμένα από μη αγώγιμα υλικά. Είναι μεταλλικές ράβδοι με οξυτάτα άκρα, που είναι στρατηγικά τοποθετημένες πάνω από τα υψηλότερα μέρη των κτιρίων. Τα άλλα άκρα των ράβδων είναι γειωμένα. Εάν ξεσπάσει αστραπή, οι ράβδοι λειτουργούν ως ένας καλός αγώγιμος δρόμος του φορτίου προς το έδαφος. Στα σύγχρονα κτίρια που διαθέτουν μεταλλικό σκελετό ο αγώγιμος δρόμος για το έδαφος προσφέρεται από τον ίδιο το σκελετό, εφόσον βέβαια αυτός είναι γειωμένος. Οι κεραίες της τηλεόρασης δεν προστατεύουν τα κτίρια από τις αστραπές, ακόμα και εάν φέρουν σύστημα πρόσδεσης των αστραπών.

## 2. Το "μπουζί"

Τα μπουζί με σπινθήρα προκαλούν την καύση της βενζίνης και του οξυγόνου στους κυλίνδρους των μηχανών των αυτοκινήτων παλαιού τύπου. Η τάση που αναπτύσσεται είναι περίπου 40-kV και είναι ικανή να προκαλέσει ηλεκτρική εκκένωση απαραίτητη για την ανάφλεξη του καυσίμου.

## 3. Βαφή αυτοκινήτων

Όταν η βαφή εκτινάσσεται από ακροφύσιο, τα σταγονίδια αποκτούν ηλεκτρικό φορτίο εξαιτίας τριβής. Το ακροφύσιο συνδέεται με το θετικό πόλο μιας ηλεκτροστατικής γεννήτριας. Όταν πρόκειται να βάψουμε ένα αντικείμενο, π.χ. ένα αυτοκίνητο, με ηλεκτροστατική μέθοδο, το φορτίζουμε σε κάποιο χαμηλότερο δυναμικό από το δυναμικό των σταγονιδίων της βαφής, συνδέοντάς το προς τον αρνητικό πόλο της γεννήτριας, ο οποίος είναι γειωμένος. Η μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη, όταν το αντικείμενο έχει πολύπλοκο σχήμα, διότι τα σταγονίδια της βαφής ακολουθούν τις δυναμικές γραμμές και επικάθονται και σε μέρη του αντικειμένου που είναι "κρυμμένα" για τους συνηθισμένους τρόπους βαφής.



## 4. Συναγερμός καπνού

Διαθέτει έναν ανιχνευτή, ο οποίος περιέχει μια πολύ ασθενή ραδιενεργό πηγή, που ιονίζει τον αέρα στο εσωτερικό του ανιχνευτή. Εάν δημιουργηθεί καπνός, εξαιτίας πυρκαγιάς, παράγονται πολύ περισσότερα ιόντα, τα οποία εισέρχονται στον ανιχνευτή και βάζουν σε λειτουργία σύστημα συναγερμού με σειρήνα ή με άλλα μέσα.



### 5. Αντιστατικά δάπεδα

Κατά τη διάρκεια των εγχειρήσεων χορηγούνται στους ασθενείς αναισθητικά αέρια, που συνήθως μεταφέρονται σε ατσάλινους κυλίνδρους και η

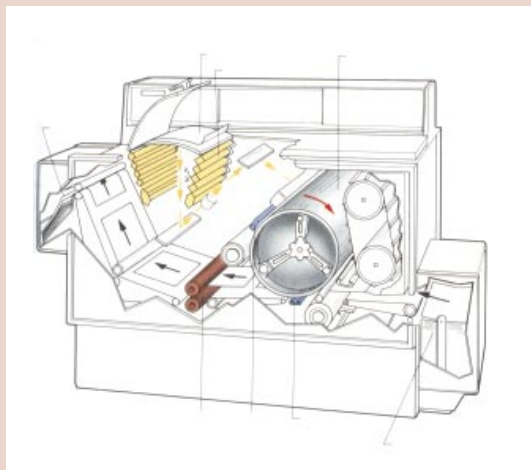


χρήση τους ελέγχεται προσεκτικά από αναισθησιολόγους. Μερικά από τα αέρια αυτά είναι εκρηκτικά. Εάν το αέριο διαφύγει στην ατμόσφαιρα, θα μπορούσε να προκληθεί έκρηξη από τυχαίο σπινθήρα. Για να αποφευχθούν τέτοιες καταστάσεις, τα πατώματα εφοδιάζονται με μία **αντιστατική επιφάνεια**, της οποίας ο ρόλος είναι να συγκεντρώνει τα φορτία που υπάρχουν στο χώρο των εγχειρήσεων και

να τα διοχετεύει προς τη γη. Η επιφάνεια αυτή είναι ένας μέτριος μονωτής και όχι ένας καλός αγωγός. Το αντίθετο θα δημιουργούσε κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί;

### 6. Φωτοτυπικό μηχάνημα

Η καρδιά του φωτοτυπικού μηχανήματος είναι το ξυρογραφικό τύμπανο, το οποίο είναι ένα τύμπανο από αλουμίνιο, που φέρει επίστρωση από σελήνιο. Το αλουμίνιο είναι πολύ καλός αγωγός. Το σελήνιο είναι φωτοαγωγός, δηλαδή σε σκοτάδι είναι μονωτής και γίνεται αγώγιμος, όταν φωτιστεί. Αυτό



σημαίνει ότι αν τοποθετηθεί στο τύμπανο ένα θετικό φορτίο σε σκοτάδι, αυτό το φορτίο θα παραμείνει εκεί. Αν στη συνέχεια το τύμπανο φωτιστεί, θα περάσουν από το αλουμίνιο στο σελήνιο ηλεκτρόνια και θα εξουδετερώσουν το θετικό φορτίο. Αρχικά, ένα ηλεκτρόδιο που ονομάζεται *corotron* φορτίζει με θετικό φορτίο σε σκοτάδι την επιφάνεια του σεληνίου. Στη συνέχεια, ένα σύνολο από φακούς και καθρέπτες

εστιάζει ένα είδωλο του κειμένου, το οποίο θα φωτοτυπηθεί στο περιστρεφόμενο τύμπανο. Οι σκοτεινές και οι φωτεινές περιοχές του κειμένου σχηματίζουν αντίστοιχες περιοχές πάνω στο τύμπανο. Οι σκοτεινές περιοχές διατηρούν το θετικό φορτίο τους, αλλά οι φωτεινές γίνονται αγώγιμες και χά-



νουν το θετικό φορτίο τους με αποτέλεσμα να γίνουν ουδέτερες. Έτσι, στην επιφάνεια του σεληνίου σχηματίζεται ένα είδωλο του κειμένου από θετικά φορτία. Στο τρίτο στάδιο χρησιμοποιείται μια ειδική ξηρή μαύρη σκόνη, η οποία ονομάζεται toner. Η σκόνη φορτίζεται αρνητικά και διασκορπίζεται στην επιφάνεια του τύμπανου, όπου "κάθεται" επιλεκτικά στις περιοχές που φέρουν θετικό φορτίο. Στο τέταρτο στάδιο η μαύρη σκόνη μεταφέρεται σε λευκό χαρτί. Επειδή η έλξη των θετικών περιοχών συγκρατεί το toner πάνω στο τύμπανο, το χαρτί φορτίζεται με ένα άλλο ηλεκτρόδιο με μεγαλύτερο θετικό φορτίο από αυτό που έχει το τύμπανο. Τελικά, το χαρτί μαζί με το toner περνούν μέσα από πιεστικούς κυλίνδρους, οι οποίοι θερμαίνονται. Αποτέλεσμα της θέρμανσης είναι το λιώσιμο του toner. Το υγρό εμποτίζει τις ίνες του χαρτιού και παράγεται το τελικό είδωλο.

Πρέπει να ομολογήσουμε ότι το να φωτοτυπήσει κάποιος ένα κείμενο είναι πολύ πιο εύκολο από το να κατανοήσει τους μηχανισμούς λειτουργίας του σε όλα τα στάδια.

### 7. Σωλήνες υγρών καυσίμων

Όταν ένα βυτιοφόρο ξεφορτώνει βενζίνη ή πετρέλαιο, η τριβή του υγρού με το σωλήνα αναγκάζει το υγρό και το σωλήνα (και το βυτιοφόρο) να αποκτήσουν αντίθετα φορτία. Αυτή η συσσώρευση φορτίου μπορεί να δημιουργήσει σπινθήρα με καταστροφικές συνέπειες. Για να το αποφύγουν αυτό, συνδέουν το βυτιοφόρο με το έδαφος με ένα μεταλλικό αγωγό. Κάτι ανάλογο συμβαίνει και με τα αεροπλάνα που ανεφοδιάζονται ενώ πετούν. Πριν αρχίσει η μεταφορά του καυσίμου, ενώνουν τα δύο αεροπλάνα με ένα μεταλλικό αγωγό. Μπορείτε να καταλάβετε γιατί;



### 8. Τραγωδίες στη θάλασσα

Στην απέναντι εικόνα φαίνεται ένα πετρελαιοφόρο στον κόλπο του Τόκιο ύστερα από έκρηξη, που συνέβη το 1989. Πιθανόν, η έκρηξη προήλθε από σπινθήρα. Ενδεχομένως το ίδιο συνέβη και στο πετρελαιοφόρο *Berge Istra*, που βυθίστηκε στις 29 Δεκεμβρίου 1975, χωρίς να αφήσει ίχνη μετά από έκρηξη. Από τα 32 μέλη του πληρώματος σώθηκαν μόνο δύο.

