

Φυσική

Τεύχος Β΄
Ομάδας Προσανατολισμού
Θετικών Σπουδών &
Σπουδών Υγείας

Γ΄ τάξη
Γενικού Λυκείου

4ος τόμος

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

**ΣΥΓΓΡΑΦΕΙΣ: ΑΛΕΚΟΣ ΙΩΑΝΝΟΥ
ΓΙΑΝΝΗΣ ΝΤΑΝΟΣ
ΑΓΓΕΛΟΣ ΠΗΤΤΑΣ
ΣΤΑΥΡΟΣ ΡΑΠΤΗΣ**

Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ.

**Υποπρόγραμμα 1: ΓΕΝΙΚΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΙΚΗ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ**

**Μέτρο 1.1: ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟ-
ΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΓΕΝΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙ-
ΔΕΥΣΗΣ**

**Ενέργεια 1.1α: Προγράμματα -
βιβλία**

**ΕΡΓΟ: ΑΝΑΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΚ-
ΣΥΓΧΡΟΝΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΡΟΓΡΑΜ-
ΜΑΤΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΜΕ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΠΑ-
ΡΑΓΩΓΗ ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ**

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

Η επανέκδοση του παρόντος βιβλίου πραγματοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών & Εκδόσεων «Διόφαντος» μέσω ψηφιακής μακέτας, η οποία δημιουργήθηκε με χρηματοδότηση από το ΕΣΠΑ / ΕΠ «Εκπαίδευση & Διά Βίου Μάθηση» / Πράξη «ΣΤΗΡΙΖΩ»



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
ανάπτυξη στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
Πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Οι διορθώσεις πραγματοποιήθηκαν κατόπιν έγκρισης του Δ.Σ. του Ινστιτούτου Εκπαιδευτικής Πολιτικής

**Η αξιολόγηση, η κρίση
των προσαρμογών και
η επιστημονική επιμέλεια
του προσαρμοσμένου βιβλίου
πραγματοποιείται από τη Μονάδα
Ενταξιακής και Ειδικής
Εκπαίδευσης του Ινστιτούτου
Εκπαιδευτικής Πολιτικής.**

**Η προσαρμογή του βιβλίου
για μαθητές με μειωμένη όραση
από το ΙΤΥΕ – ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ
πραγματοποιείται με βάση
τις προδιαγραφές που έχουν
αναπτυχθεί από ειδικούς
εμπειρογνώμονες για το ΙΕΠ.**

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ
ΓΙΑ ΜΑΘΗΤΕΣ
ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΟΡΑΣΗ**

ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ,
ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ
ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ**

**Α. ΙΩΑΝΝΟΥ - Γ. ΝΤΑΝΟΣ
Α. ΠΗΤΤΑΣ - Σ. ΡΑΠΤΗΣ**

**Η συγγραφή και η επιστημονική
επιμέλεια του βιβλίου
πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα
του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου**

Φυσική

Τεύχος Β΄

Ομάδας Προσανατολισμού

Θετικών Σπουδών &

Σπουδών Υγείας

Γ΄ τάξη Γενικού Λυκείου

4ος τόμος

Ι.Τ.Υ.Ε. «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»



ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

3

Νόμος Gauss 22

Δυναμικό 48

Κινήσεις σε ομογενές
ηλεκτρικό πεδίο 78

Πυκνωτές και χωρητικότητα ... 115

3-1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το «πεδίο» μπήκε στο λεξιλόγιο των φυσικών στις αρχές του περασμένου αιώνα από τον Michael Faraday (Φαραντέι), που προσπαθούσε να εξηγήσει πώς αλληλεπιδρούν σώματα που δεν βρίσκονται σε επαφή.

Πεδίο (δυνάμεων) είναι η περιοχή του χώρου μέσα στην οποία το κατάλληλο υπόθεμα δέχεται δύναμη.

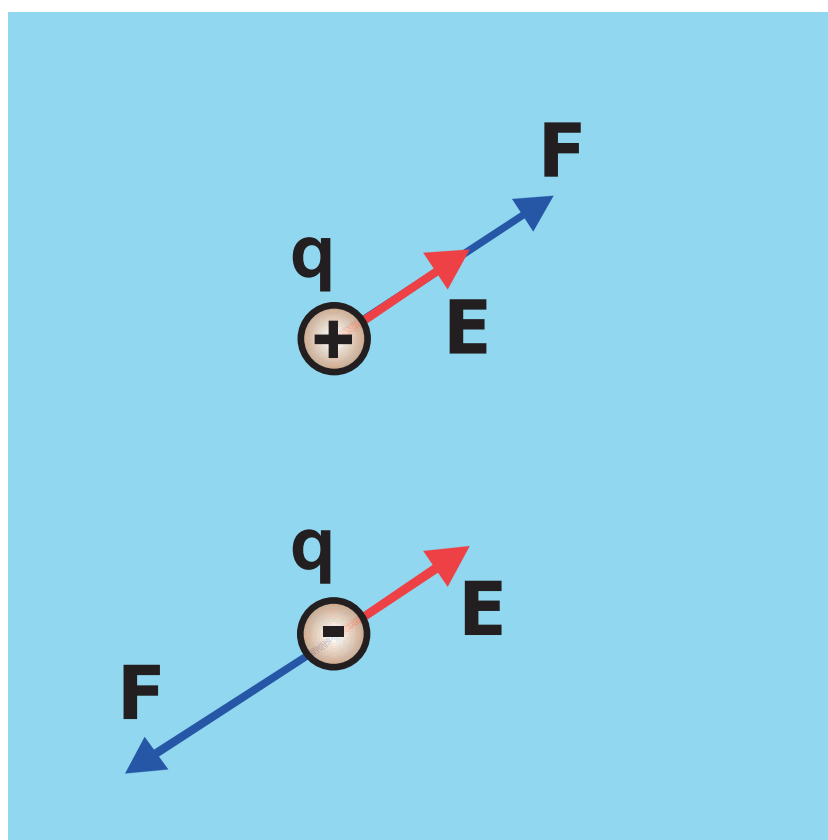
Πεδίο μπορεί να δημιουργήσει μια μάζα (βαρυτικό πεδίο), ένα ακίνητο ηλεκτρικό φορτίο (ηλεκτροστατικό πεδίο) ή ένα φορτίο που κινείται (μαγνητικό πεδίο).

Σε όλες τις περιπτώσεις μάς ενδι-

αφέρει να γνωρίζουμε τι δύναμη θα δέχεται το υπόθεμα όταν το φέρουμε σε συγκεκριμένο σημείο του πεδίου. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην εισαγωγή του διανυσματικού μεγέθους ένταση που την ορίσαμε ως τη δύναμη ανά μονάδα υποθέματος.

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιορισθούμε στη μελέτη του ηλεκτροστατικού και του βαρυτικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο θα το δούμε ξεχωριστά, στο επόμενο κεφάλαιο.

Το κοινό ανάμεσα στο ηλεκτροστατικό και το βαρυτικό πεδίο είναι ότι η δύναμη που δέχεται το υπόθεμα έχει την ίδια διεύθυνση με την ένταση και ότι το έργο της δύναμης του πεδίου δεν εξαρτάται από τη διαδρομή, είναι δηλαδή διατηρητικά πεδία.



Σχ. 3.1 Εάν σ' ένα σημείο του χώρου που καταλαμβάνει το ηλεκτροστατικό πεδίο βρεθεί ένα φορτίο q θα δεχθεί δύναμη. Εάν το q είναι θετικό η δύναμη θα είναι ομόρροπη της έντασης, ενώ αν το q είναι αρνητικό αντίρροπη.

Αρχικά θα ασχοληθούμε με το νόμο του Gauss, που περιγράφει τη σχέση μεταξύ του φορτίου και του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί, στη συνέχεια με το δυναμικό, μέγεθος που περιγράφει με διαφορετικό (συμπληρωματικό) τρόπο, το ηλεκτρικό πεδίο και, τέλος, με το πεδίο βαρύτητας.

3-2 ΕΝΤΑΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Υπενθυμίζουμε ότι ένταση σ' ένα σημείο A ενός ηλεκτροστατικού πεδίου είναι το σταθερό πηλίκο της δύναμης που ασκείται από το πεδίο σ' ένα φορτίο q (υπόθεμα), που θα βρεθεί στο σημείο A, προς το φορτίο αυτό.

$$E = \frac{F}{q}$$

Η ένταση είναι διανυσματικό μέγεθος που έχει την κατεύθυνση της δύναμης που ασκείται σε ένα θετικό φορτίο.

Εάν το πεδίο δημιουργείται από σημειακό φορτίο Q και η απόσταση του σημείου A από το Q είναι r η δύναμη που θα δεχθεί το φορτίο q σύμφωνα με το νόμο του Coulomb

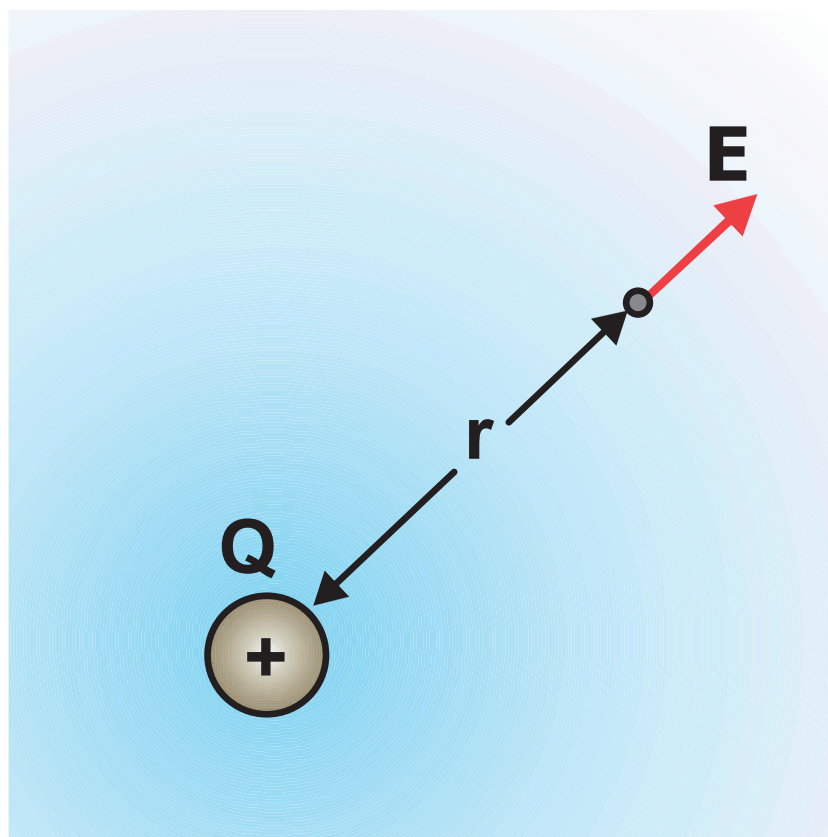
θα έχει μέτρο $F = K_c \frac{|Qq|}{r^2}$. Από τον

ορισμό της έντασης προκύπτει για την ένταση πεδίου σημειακού φορτίου Q ότι

$$E = K_c \frac{|Q|}{r^2}$$

Η σχέση ανάμεσα στην ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και στις

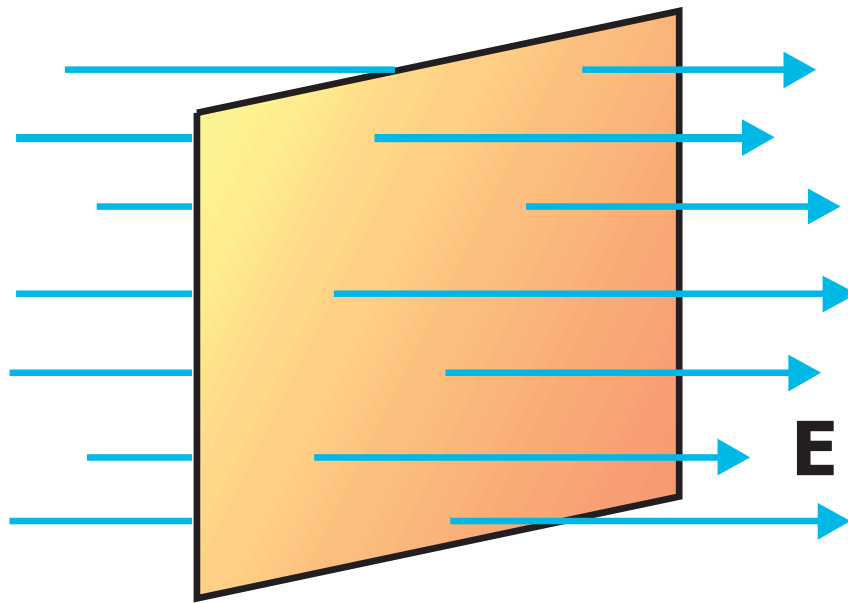
πηγές του (φορτία) μπορεί να εκφραστεί με ένα αξιοσημείωτα απλό τρόπο. Για να γίνει αυτό χρειάζεται πρώτα να ορίσουμε ένα νέο μέγεθος, που ονομάζεται ηλεκτρική ροή.



Σχ. 3.2 Ένα ακίνητο σημειακό ηλεκτρικό φορτίο Q δημιουργεί γύρω του στο χώρο ηλεκτροστατικό πεδίο.

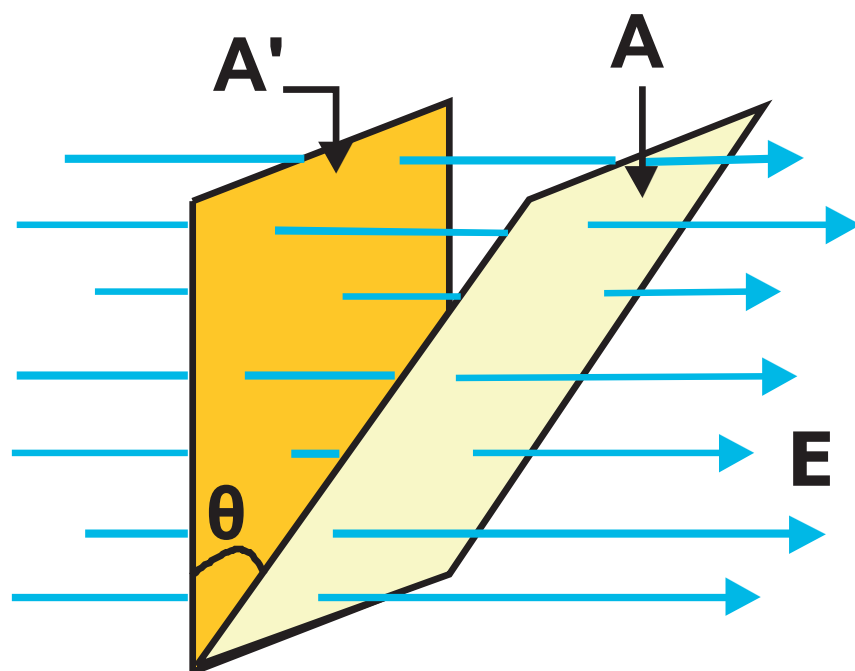
3-3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΡΟΗ

Έστω ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο και μια επιφάνεια εμβαδού A , κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου (σχ. 3.3). Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου σχεδιάζονται έτσι ώστε ο αριθμός τους που διαπερνά κάθετα τη μοναδιαία επιφάνεια να είναι ανάλογος με το μέτρο της έντασης του πεδίου. Ο συνολικός αριθμός των γραμμών που διαπερνούν την επιφάνεια A είναι ανάλογος με το γινόμενο EA . Το γινόμενο αυτό το ονομάζουμε ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια A και το συμβολίζουμε με Φ_E .

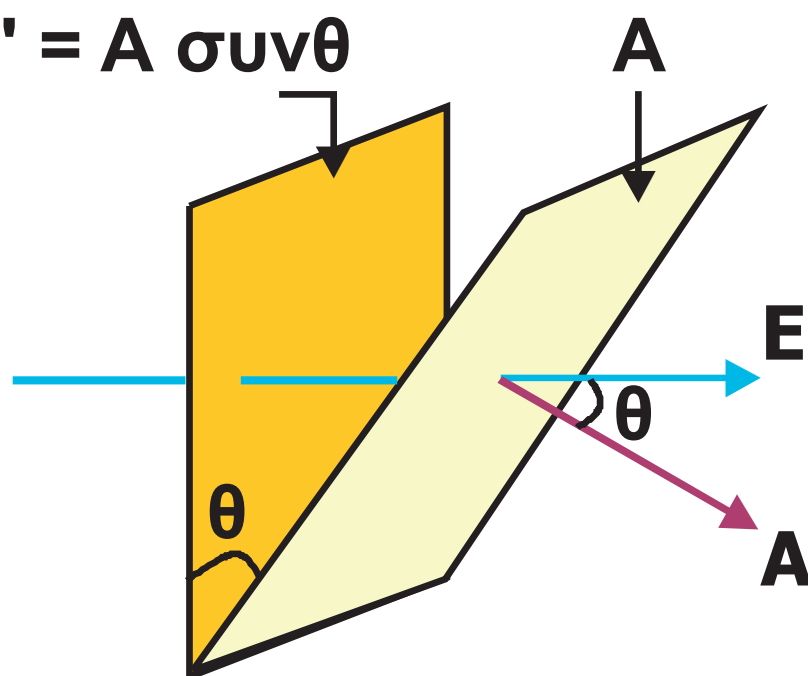


Σχ. 3.3 Η επιφάνεια είναι τοποθετημένη κάθετα στις δυναμικές γραμμές, ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου.

Αν η επιφάνεια A δεν είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές (σχ. 3.4), ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από την επιφάνεια A είναι ίσος με τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από την προβολή της επιφάνειας σε ένα επίπεδο κάθετο στις δυναμικές γραμμές.



$$A' = A \cos \theta$$



Σχ. 3.4 Από τις επιφάνειες A και A' περνάει η ίδια ηλεκτρική ροή αφού από τις δύο επιφάνειες διέρχεται ο ίδιος αριθμός δυναμικών γραμμών.

Από το σχήμα 3.4 βλέπουμε ότι $A' = A$ συνθ. Εφόσον ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από την A είναι ίσος με τον αριθμό των γραμμών που διέρχονται από την A' , η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια A είναι ίση με τη ροή που διέρχεται από την επιφάνεια A' . Επειδή $A' = A$ συνθ και $EA' = EA$ συνθ η ροή που διέρχεται από την επιφάνεια A είναι

$$\Phi_E = EA \text{ συν}\theta$$

Η γωνία θ είναι η γωνία που σχηματίζει ένα διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια A , ας το συμβολίσουμε με $\mathbf{A}$, με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών (σχ. 3.4). Πήραμε ένα κάθετο διάνυσμα και όχι απλά την

κάθετη στην επιφάνεια επειδή μια επιφάνεια έχει δύο όψεις και, αντίστοιχα, η ηλεκτρική ροή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Επομένως

Η ηλεκτρική ροή Φ_E που διέρχεται από μια επίπεδη επιφάνεια, εμβαδού A , η οποία βρίσκεται μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης E , είναι ίση με

$$\Phi_E = EA \cos\theta \quad (3.1)$$

όπου θ η γωνία που σχηματίζει το κάθετο στην επιφάνεια διάνυσμα A με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

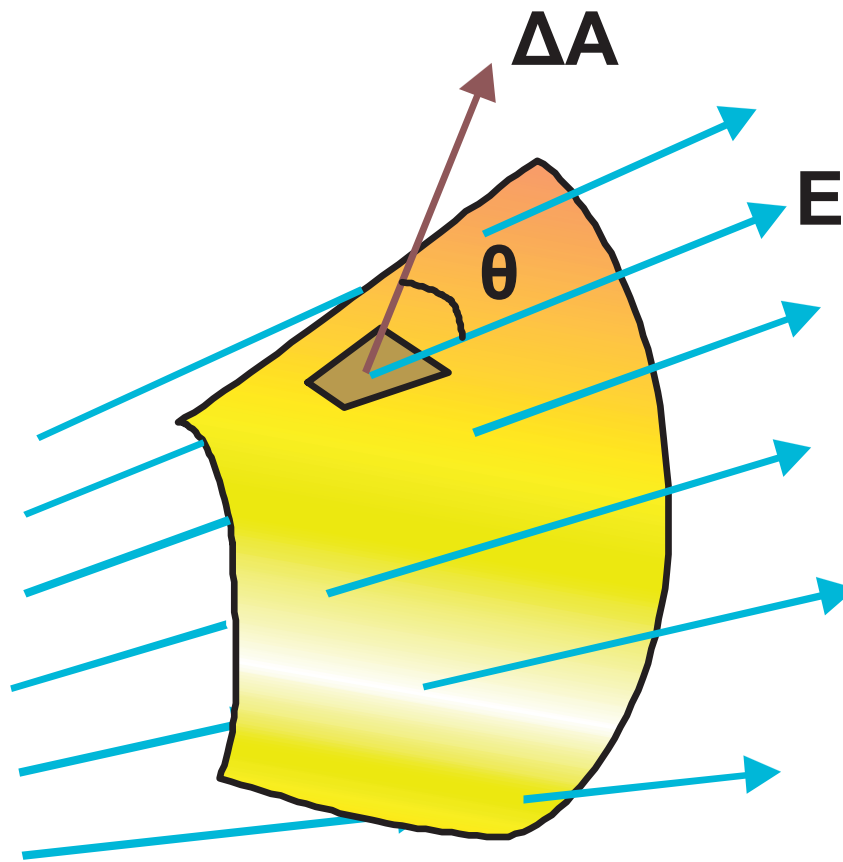
Η ηλεκτρική ροή στο SI μετريέται σε $\text{N m}^2/\text{C}$.

Στη γενικότερη περίπτωση όπου η επιφάνεια A δεν είναι επίπεδη και

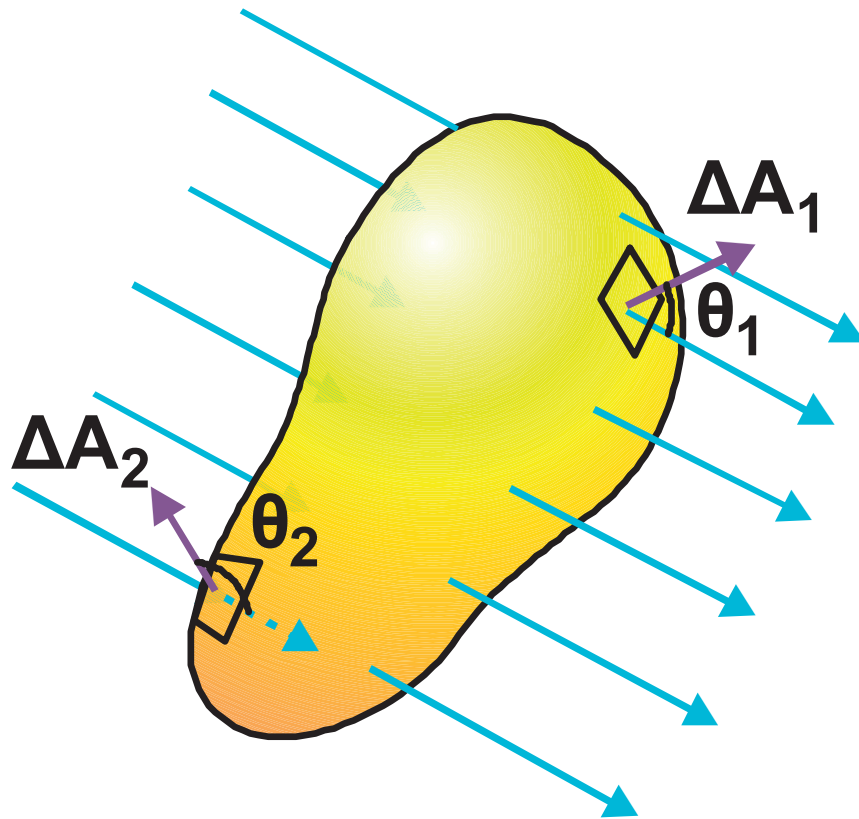
βρίσκεται μέσα σε ανομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο, επειδή ούτε οι γραμμές του πεδίου τέμνουν παντού την επιφάνεια με την ίδια γωνία, ούτε η ένταση έχει παντού την ίδια τιμή, για να βρούμε την ηλεκτρική ροή πρέπει να χωρίσουμε την επιφάνεια σε μικρά τμήματα ΔA , τόσο μικρά ώστε καθένα από αυτά να μπορεί να θεωρηθεί επίπεδη επιφάνεια και σε καθένα από αυτά η ένταση του πεδίου να μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Η ηλεκτρική ροή $\Delta\Phi_E$ που διέρχεται από μια στοιχειώδη επιφάνεια ΔA είναι $\Delta\Phi_E = E \Delta A \cos\theta$ και η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από ολόκληρη την επιφάνεια A προκύπτει από το άθροισμα αυτών των όρων

$$\Phi_E = \sum E_i \Delta A_i \cos\theta_i$$

όπου E_i , θ_i οι τιμές των E και θ για κάθε ΔA_i .



Σχ. 3.5 Για να βρούμε την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια επιφάνεια τυχαίου σχήματος χωρίζουμε την επιφάνεια σε μικρά τμήματα.



Σχ. 3.6 Κλειστή επιφάνεια μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Τα κάθετα διανύσματα ΔA εξ ορισμού κατευθύνονται προς τα έξω.

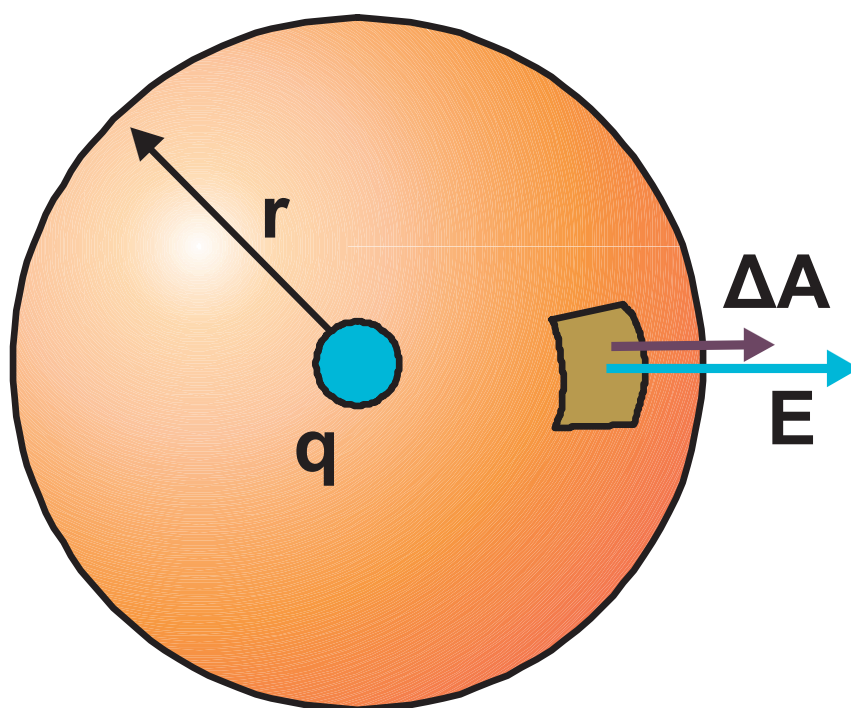
Συνήθως μας ενδιαφέρει η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια. Θεωρήστε ένα ηλεκτρικό πεδίο και μέσα σ' αυτό μια κλειστή επιφάνεια σαν μπαλόνι (σχ. 3.6) ή με οποιοδήποτε άλλο σχήμα. Για να υπολογίσουμε την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από αυτή την κλειστή επιφάνεια, ακολουθούμε τη διαδικασία που περιγράψαμε πιο πάνω. Χωρίζουμε την επιφάνεια σε πολύ μικρά τμήματα ΔA , υπολογίζουμε την ηλεκτρική ροή $\Delta\Phi_E$ που διέρχεται από κάθε ένα από αυτά και, τέλος, αθροίζουμε όλους τους όρους. Το κάθετο διάνυσμα σε κάθε μικρό στοιχείο επιφάνειας ΔA , λαμβάνεται με φορά προς τα έξω. Αν σε ένα στοιχείο επιφάνειας όπως το ΔA_1 οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται

προς τα έξω, η γωνία θ_1 είναι μικρότερη των 90° , το συνημίτονο της γωνίας είναι θετικό και επομένως και η ηλεκτρική ροή $\Delta\Phi_1$ που διέρχεται από το τμήμα αυτό της επιφάνειας είναι θετική. Σε άλλα τμήματα επιφάνειας, όπως το ΔA_2 όπου οι δυναμικές γραμμές κατευθύνονται προς τα μέσα, $\theta_2 > 90^\circ$, και επομένως $\Delta\Phi_2 < 0$.

Αν από την επιφάνεια εξέρχονται περισσότερες γραμμές από όσες εισέρχονται, η ολική ροή είναι θετική ενώ αν εισέρχονται περισσότερες από όσες εξέρχονται, αρνητική. Στο σχήμα 3.6 ο αριθμός των γραμμών που εισέρχονται είναι ίσος με τον αριθμό των γραμμών που εξέρχονται, επομένως η ολική ροή είναι μηδέν.

3-4 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ GAUSS (Γκάους)

Ο νόμος αυτός συνδέει την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια με το φορτίο που περικλείει η επιφάνεια.



Σχ. 3.7 Το σημειακό φορτίο q βρίσκεται στο κέντρο σφαίρας ακτίνας r .

Έστω ένα σημειακό θετικό φορτίο q . Ας φανταστούμε μια σφαίρα ακτίνας r , όπως στο σχήμα 3.7, που έχει κέντρο το σημείο στο οποίο βρίσκεται το φορτίο. Θα υπολογίσουμε την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από τη σφαίρα. Γνωρίζουμε ότι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της σφαίρας έχει μέτρο

$$E = K_c \frac{q}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \quad (3.2)$$

διεύθυνση ακτινική και φορά προς τα έξω.

Χωρίζουμε την επιφάνεια της σφαίρας σε στοιχειώδη τμήματα ΔA , τόσο μικρά ώστε το καθένα από αυτά να μπορεί να θεωρηθεί

επίπεδο. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί το q τέμνουν κάθετα κάθε στοιχειώδη επιφάνεια ΔA και το κάθετο διάνυσμα ΔA σε κάθε τέτοια επιφάνεια είναι παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές. Η ολική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια της σφαίρας είναι

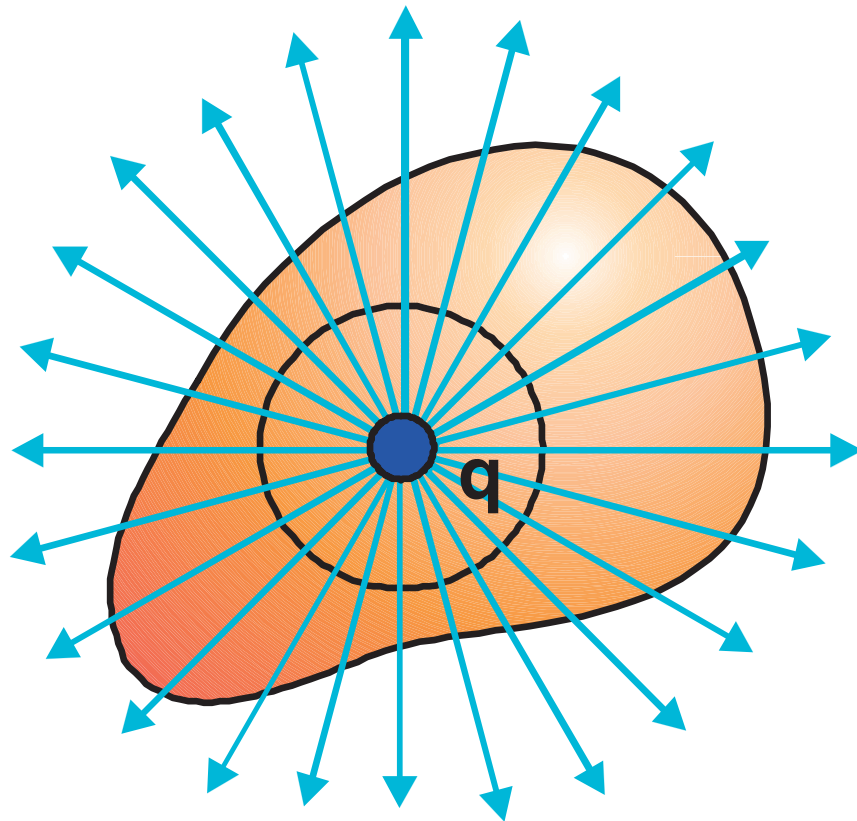
$$\begin{aligned}\Phi_E &= \sum E_i \Delta A_i \cos \theta_i = \\ &= \sum E \Delta A = E \sum \Delta A \quad (3.3)\end{aligned}$$

Ο όρος $\sum \Delta A$ δίνει το εμβαδόν της σφαιρικής επιφάνειας που είναι ίσο με $4\pi r^2$. Από τις σχέσεις (3.3) και (3.2) παίρνουμε

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

Από τη σχέση αυτή προκύπτει ότι η ηλεκτρική ροή (Φ_E) είναι ανεξάρτητη της ακτίνας r της σφαίρας που επιλέξαμε. Αυτό είναι λογικό γιατί, το πλήθος των δυναμικών γραμμών που περνά από οποιαδήποτε σφαιρική επιφάνεια με κέντρο το φορτίο είναι ίδιο ανεξάρτητα από την ακτίνα της. Στην πραγματικότητα η επιφάνεια δεν χρειάζεται να είναι σφαιρική. Από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια, που περικλείει το φορτίο q , (σχ. 3.8) θα περνάει ίδιος αριθμός δυναμικών γραμμών. Επομένως, η ηλεκτρική ροή για κάθε κλειστή επιφάνεια που περικλείει το φορτίο q είναι ίση με αυτή που βρήκαμε για τη σφαίρα, δηλαδή

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon_0}$$



Σχ. 3.8 Η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από τις δύο επιφάνειες είναι ίδια.

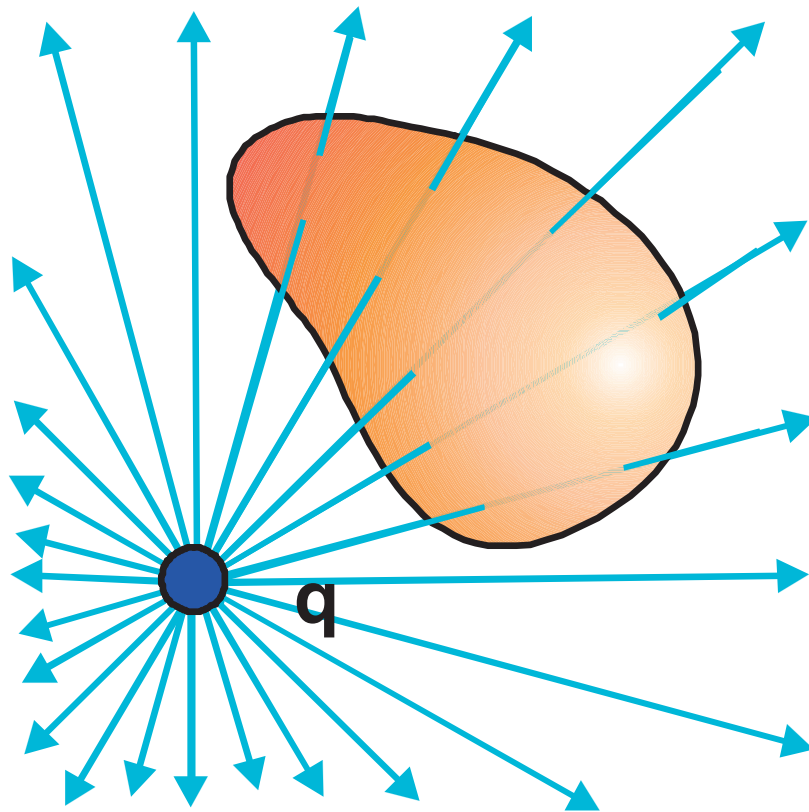
Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήξαμε γενικεύεται και στην περίπτωση που έχουμε πολλά σημειακά φορτία, ή φορτισμένα σώματα. Με την αρχή της επαλληλίας αποδεικνύεται ότι η ηλεκτρική ροή που δι-

έρχεται από μια οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια είναι ίση με $Q_{\text{εγκ}}/\epsilon_0$ όπου $Q_{\text{εγκ}}$ το φορτίο που περικλείεται από την κλειστή επιφάνεια. Η παραπάνω πρόταση αποτελεί το νόμο του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο. Σύμφωνα με αυτόν

η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια ισούται με το πηλίκο του ολικού φορτίου που περικλείει η επιφάνεια, προς τη σταθερά ϵ_0 .

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{εγκ}}}{\epsilon_0} \quad (3.4)$$

Την κλειστή επιφάνεια που επιλέγουμε για να εφαρμόσουμε το νόμο του Gauss θα την ονομάζουμε επιφάνεια Gauss.



Σχ. 3.9 Το φορτίο q βρίσκεται έξω από την επιφάνεια. Οι δυναμικές γραμμές του πεδίου που δημιουργεί και εισέρχονται σ' αυτή εξέρχονται από κάποιο άλλο σημείο απ' αυτή. Η συνολική ηλεκτρική ροή που περνάει από την επιφάνεια είναι ίση με μηδέν.

Κατά την εφαρμογή του νόμου του Gauss πρέπει να είμαστε προσεκτικοί. Ενώ το φορτίο $Q_{\text{εγκ}}$ στη σχέση (3.4) είναι το φορτίο που βρίσκεται μέσα στην επιφάνεια Gauss, το E είναι το ολικό ηλεκτρικό πεδίο που οφείλεται τόσο σε φορτία που βρίσκονται μέσα στην επιφάνεια όσο και σε φορτία που βρίσκονται έξω από αυτήν.

Ο νόμος του Gauss είναι θεμελιώδους σημασίας στην ηλεκτροστατική. Η σημασία του είναι ανάλογη με αυτήν του νόμου του Coulomb. Στην πραγματικότητα ο νόμος του Gauss και ο νόμος του Coulomb δεν είναι δυο ανεξάρτητοι φυσικοί νόμοι, αλλά ο ίδιος νόμος που εκφράζεται με δύο διαφορετικούς τρόπους.

Στη συνέχεια θα δούμε ότι ο νόμος του Gauss δίνει εύκολα την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε περιπτώσεις όπου έχουμε συμμετρική κατανομή φορτίου.



Εικ. 3.1 Karl Friedrich Gauss (1777-1855). Γερμανός, ένας από τους μεγαλύτερους μαθηματικούς όλων των αιώνων.

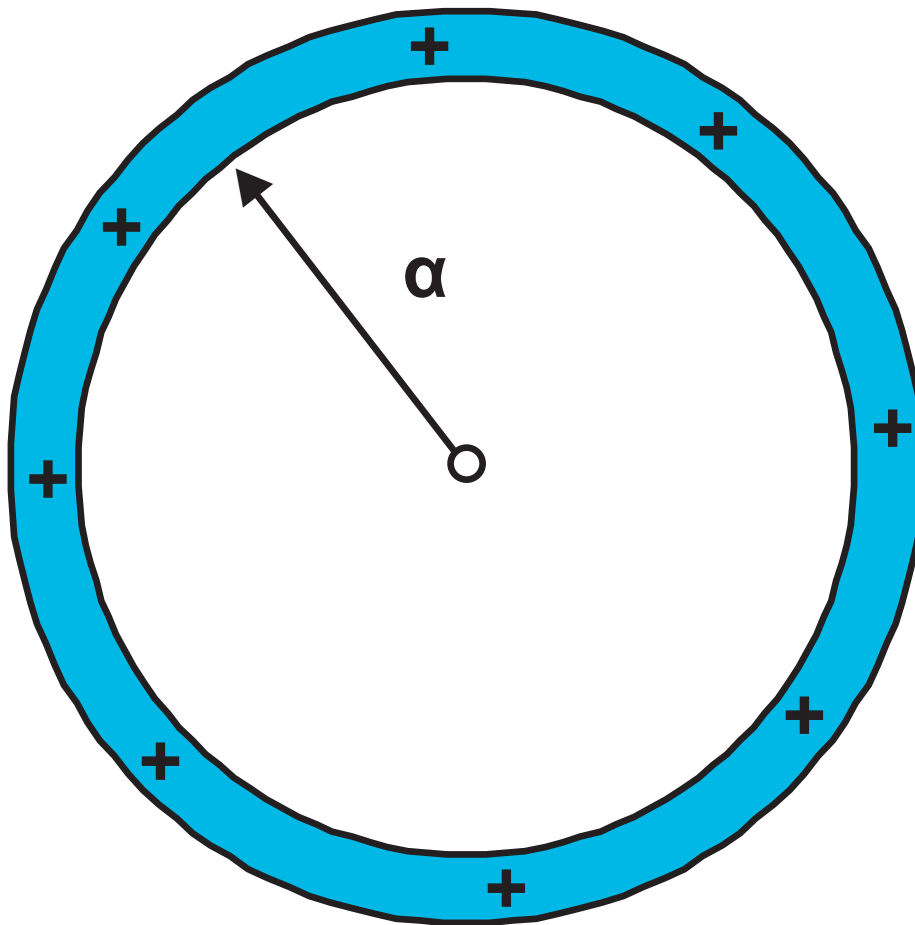
Εφαρμογές του νόμου του Gauss

Όπως είπαμε, με το νόμο του Gauss μπορούμε να υπολογίσουμε εύκολα την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε περιπτώσεις που το ηλεκτρικό φορτίο κατανέμεται συμμετρικά. Στις περιπτώσεις αυτές επιλέγουμε μια επιφάνεια (επιφάνεια Gauss) που έχει την ίδια συμμετρία με εκείνη της κατανομής του φορτίου.

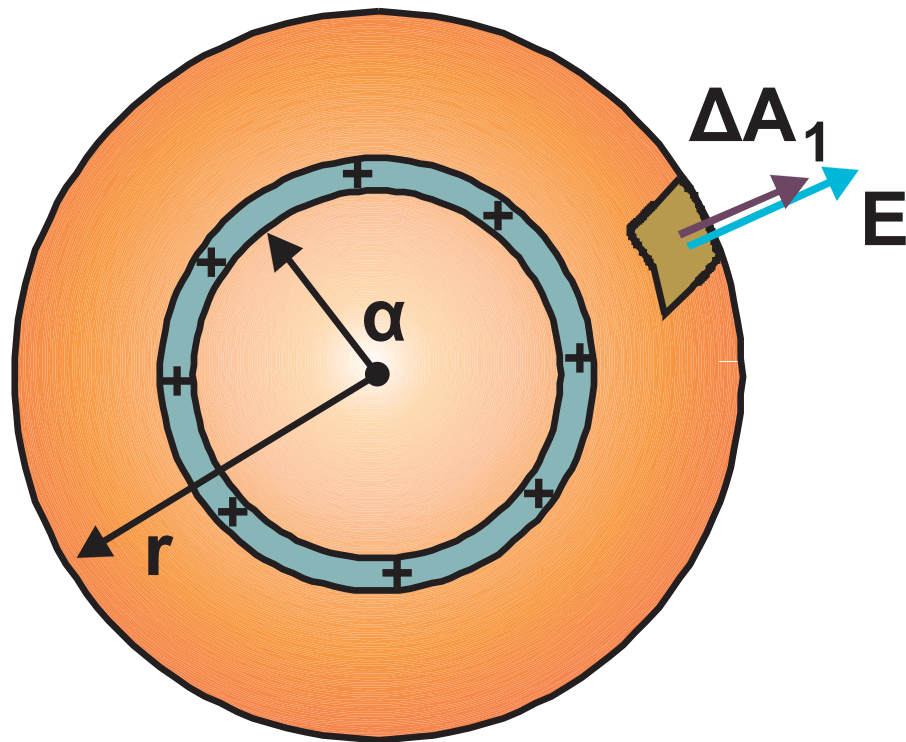
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.1

Ένα σφαιρικό κέλυφος που θεωρούμε ότι έχει αμελητέο πάχος (σχ. 3.10) έχει ακτίνα a και φέρει φορτίο Q , ομοιόμορφα κατανεμημένο στην επιφάνειά του. Βρείτε την ένταση

του ηλεκτρικού πεδίου στο εξωτερικό και στο εσωτερικό του σφαιρικού κελύφους.



Σχ. 3.10 Το ηλεκτρικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στο σφαιρικό κέλυφος.



Σχ. 3.11 Η επιφάνεια Gauss είναι σφαίρα ομόκεντρη με το κέλυφος με ακτίνα μεγαλύτερη ή ίση της ακτίνας του κελύφους.

Απάντηση:

Επειδή το φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο στην επιφάνεια του κελύφους, το πεδίο που δημιουργεί το κέλυφος έχει ακτινική

διεύθυνση και η ένταση έχει την ίδια τιμή σε όλα τα σημεία που απέχουν το ίδιο από το κέντρο του κελύφους. Για τους λόγους αυτούς επιλέγουμε ως επιφάνεια Gauss μια σφαιρική επιφάνεια, ομόκεντρη με το κέλυφος.

A) Η επιφάνεια Gauss έχει ακτίνα r μεγαλύτερη ή ίση της ακτίνας του κελύφους, $r \geq a$.

Χωρίζουμε την επιφάνεια σε πολύ μικρά τμήματα. Έστω ένα από αυτά, εμβαδού ΔA . Η κάθετη ΔA στην επιφάνεια ΔA και η ένταση του πεδίου σ' αυτή την περιοχή, έχουν την ίδια κατεύθυνση (σχ. 3.11), επομένως η ροή που διέρχεται από την επιφάνεια ΔA είναι

$$\Delta\Phi_E = E \Delta A \cos 0 = E \Delta A$$

Το ίδιο ισχύει και για κάθε άλλο

τμήμα ΔA της επιφάνειας Gauss.
Άρα η συνολική ροή είναι

$$\Phi_E = \sum E \Delta A = E \sum \Delta A = E 4\pi r^2 \quad (3.5)$$

Όμως από το νόμο του Gauss έχουμε

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{εγκ}}}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (3.6)$$

Από (3.5) και (3.6) έχουμε

$$E 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon_0} \text{ επομένως } E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Αυτή όμως είναι η σχέση που δίνει την ένταση του πεδίου που δημιουργεί ένα σημειακό φορτίο Q , σε απόσταση r . Επομένως ο σφαιρικός φλοιός συμπεριφέρεται, στον εξωτερικό του χώρο, σαν να ήταν ένα σημειακό φορτίο συγκεντρωμένο στο κέντρο του.

Ας δούμε όμως τι συμβαίνει στο εσωτερικό

B) Επιλέγουμε και πάλι μια σφαιρική επιφάνεια Gauss ομόκεντρη με το κέλυφος που τώρα έχει ακτίνα $r < a$. Αν, όπως και πριν, φανταστούμε την επιφάνεια χωρισμένη σε στοιχειώδη τμήματα, θα καταλήξουμε πάλι στη σχέση

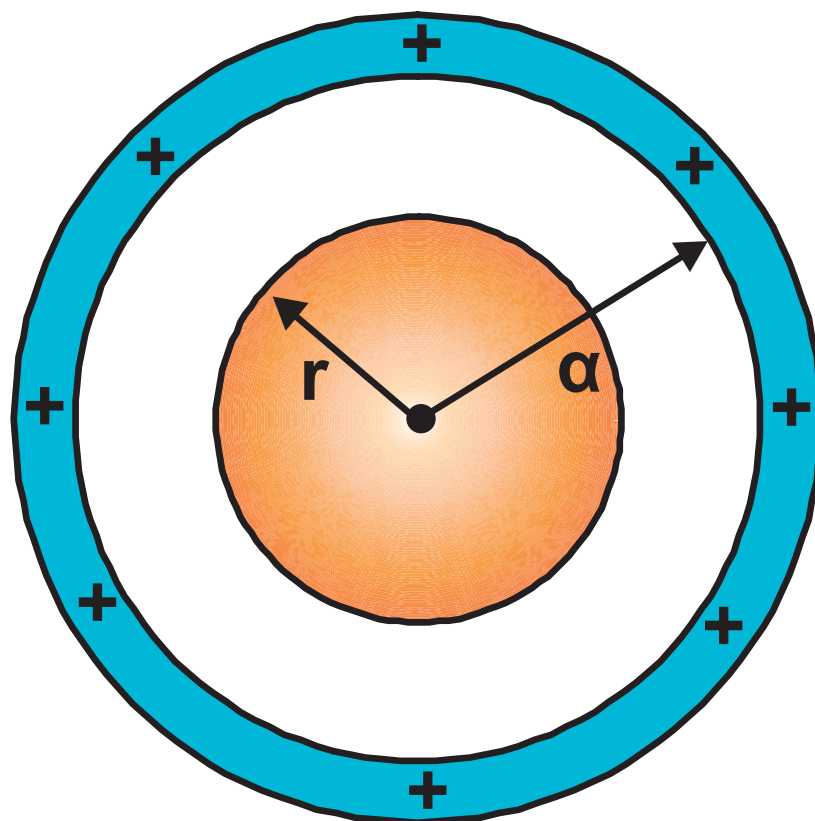
$$\Phi_E = \sum E \Delta A = E \sum \Delta A = E 4\pi r^2 \quad (3.7)$$

Σύμφωνα με το νόμο του Gauss

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{εγκ}}}{\epsilon_0} \quad \text{όμως } Q_{\text{εγκ}} = 0$$

$$\text{επομένως } \Phi_E = 0 \quad (3.8)$$

**Από (3.7) και (3.8) προκύπτει $E = 0$
Δηλαδή στο εσωτερικό του κελύφους δεν υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο.**



Σχ. 3.12 Η επιφάνεια Gauss είναι σφαίρα ομόκεντρη με το κέλυφος και με μικρότερη ακτίνα.

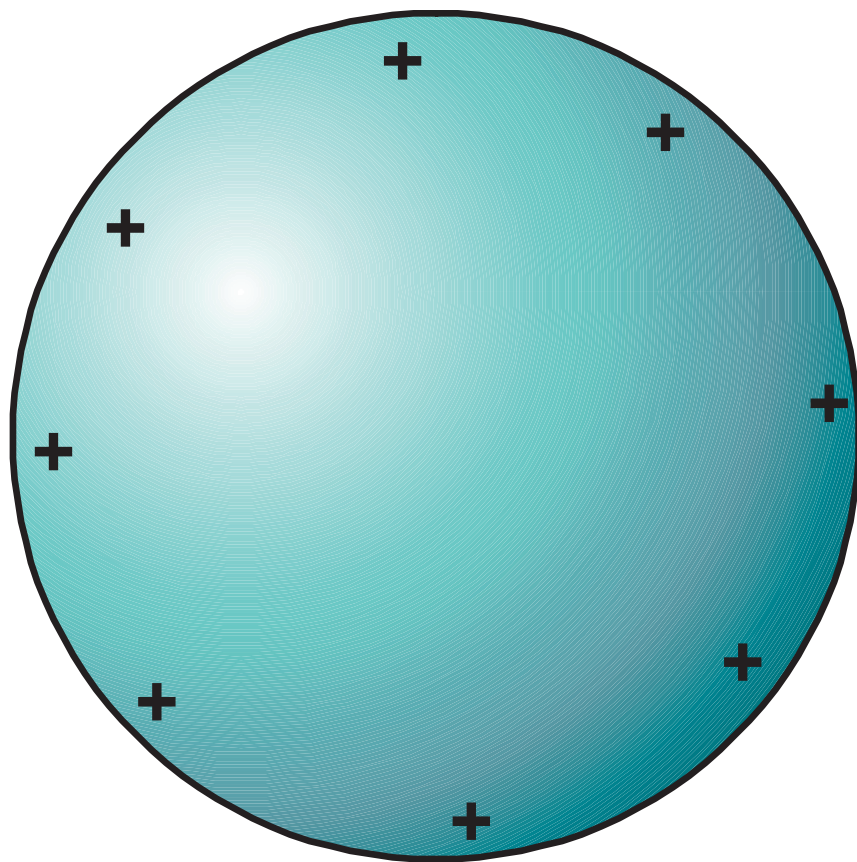
Παρατήρηση

Σε κάθε σώμα υπάρχει και θετικό και αρνητικό φορτίο. Στα ηλεκτρικά ουδέτερα σώματα, το ποσό του θετικού φορτίου είναι ίσο με το ποσό

του αρνητικού φορτίου. Αν ένα σώμα είναι φορτισμένο πλεονάζει το θετικό ή το αρνητικό φορτίο. Σε ένα φορτισμένο αγωγό οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των φορτίων που πλεονάζουν είναι ισχυρότερες από τις ελκτικές δυνάμεις που δέχονται από τα φορτία που έχουν αντίθετο πρόσημο. Έτσι τα φορτία που πλεονάζουν τείνουν να απομακρυνθούν μεταξύ τους και συγκεντρώνονται στην επιφάνεια του αγωγού.¹ Αν ο αγωγός είναι σφαιρικός το πλεονάζον φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα στην επιφάνεια του αγωγού. Επομένως το πεδίο που δημιουργεί ένας στατικά φορτισμέ-

¹ Στην πραγματικότητα τα φορτία που μετακινούνται στον αγωγό είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

νος σφαιρικός αγωγός είναι όμοιο με το πεδίο ενός φορτισμένου σφαιρικού κελύφους.



Σχ. 3.13 Όλο το φορτίο του σφαιρικού αγωγού βρίσκεται στην επιφάνειά του. Εξωτερικά ο αγωγός συμπεριφέρεται σαν όλο του το φορτίο να είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του (σαν σημειακό φορτίο). Στο εσωτερικό του αγωγού το πεδίο είναι μηδέν.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.2

Ένα πολύ μεγάλο (απείρου μήκους) σύρμα είναι ομοιόμορφα φορτισμένο. Αν το φορτίο που φέρει ανά μονάδα μήκους είναι λ (ονομάζεται και «γραμμική πυκνότητα φορτίου»), να βρεθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί.

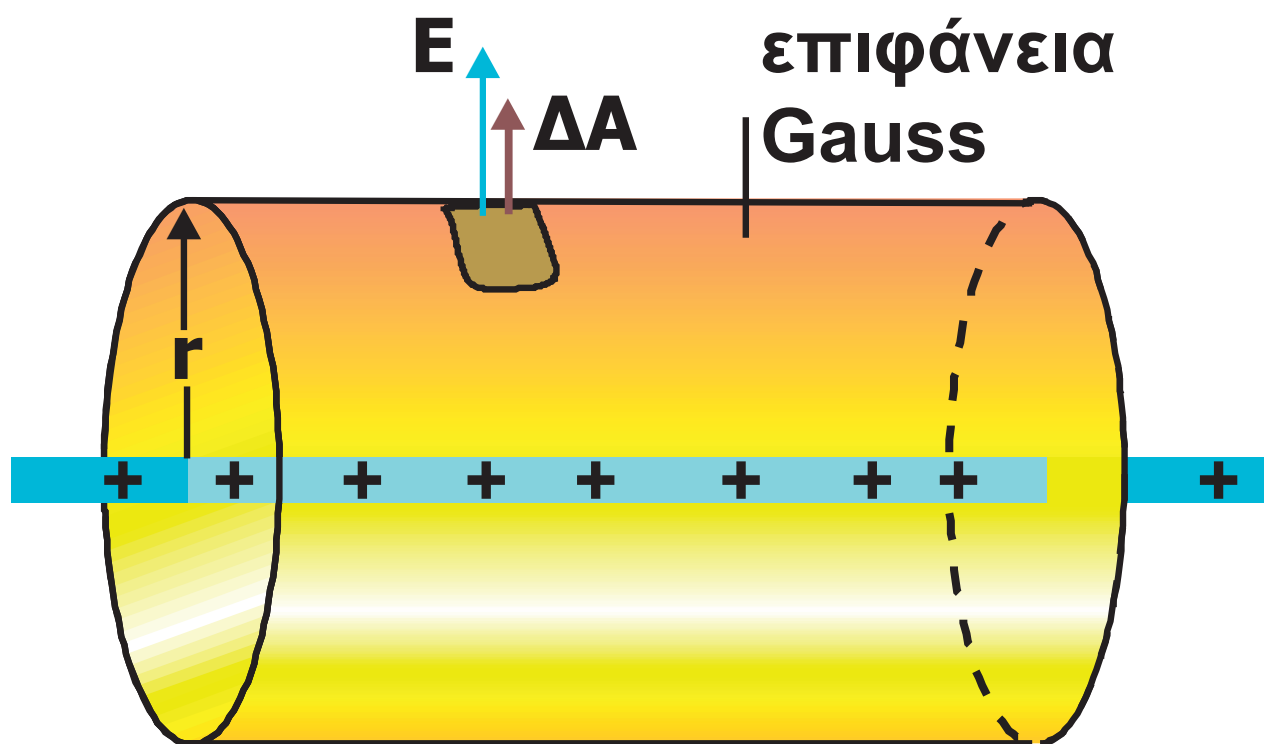
Απάντηση:

Για λόγους συμμετρίας, το πεδίο που δημιουργεί ένα τέτοιο σύρμα είναι ακτινικό και η τιμή της έντασης είναι ίδια σε όλα τα σημεία που απέχουν το ίδιο από το σύρμα. Τα σημεία αυτά αποτελούν μια κυλινδρική επιφάνεια.

Για να εκμεταλλευτούμε τη συμμετρία του πεδίου, επιλέγουμε ως επι-

φάνεια Gauss την επιφάνεια κυλίνδρου που έχει άξονα το φορτισμένο σύρμα, μήκος L και βάσεις που έχουν ακτίνα r .

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί το σύρμα είναι κάθετη και έχει το ίδιο μέτρο σε κάθε σημείο της κυρτής επιφάνειας του κυλίνδρου.



Σχ. 3.14 Επιλέγουμε επιφάνεια Gauss μια κυλινδρική επιφάνεια ομοαξονική με το σύρμα.

Η ροή που διαπερνά τις βάσεις του κυλίνδρου είναι μηδέν, γιατί η ένταση είναι παράλληλη με τις πλευρές αυτές. Αν χωρίσουμε την κυρτή επιφάνεια του κυλίνδρου σε στοιχειώδη τμήματα, η κάθετη σε κάθε τέτοιο στοιχειώδες τμήμα είναι παράλληλη με την ένταση του πεδίου. Η ολική ροή που διέρχεται από τον κύλινδρο είναι:

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \\ &= \Phi_{\text{ΣΤΙΣ ΒΑΣΕΙΣ}} + \Phi_{\text{ΚΥΡΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ}} = \\ &= \Phi_{\text{ΚΥΡΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{όμως } \Phi_{\text{ΚΥΡΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ}} &= \sum E \Delta A = \\ &= E \sum \Delta A = E 2\pi r L\end{aligned}$$

επομένως

$$\Phi_E = E 2\pi r L \quad (3.9)$$

Το ολικό φορτίο που περικλείει η κυλινδρική επιφάνεια είναι λL . Επομένως ο νόμος του Gauss γράφεται

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{εγκ}}}{\epsilon_0} = \frac{\lambda L}{\epsilon_0}$$

Αντικαθιστώντας την ηλεκτρική ροή από την (3.9) έχουμε

$$E 2\pi r L = \frac{\lambda L}{\epsilon_0} \text{ από όπου } E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r},$$

δηλαδή

η ένταση σε ένα σημείο του πεδίου που δημιουργεί το σύρμα είναι αντίστροφα ανάλογη της απόστασης από αυτό.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.3

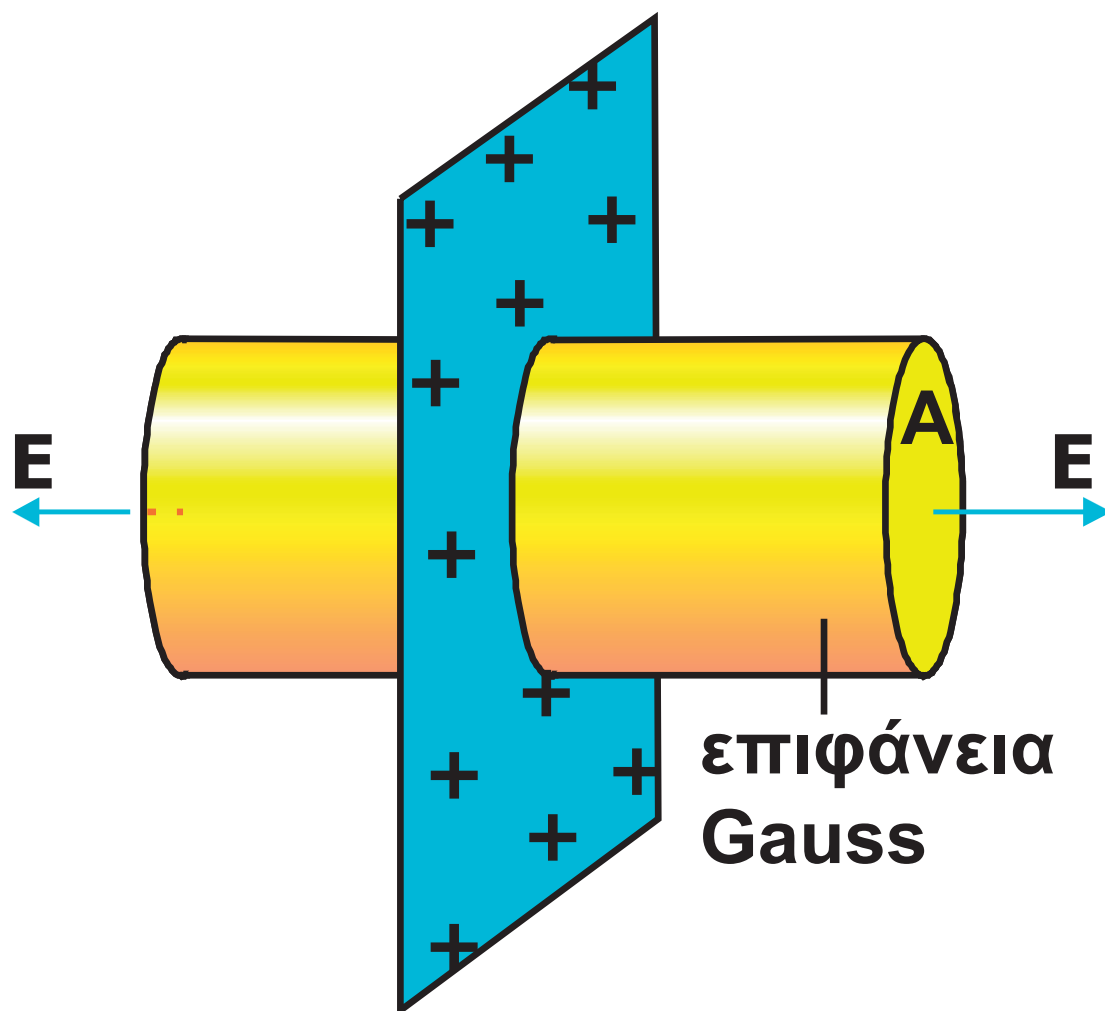
Έστω ένα επίπεδο φύλλο άπειρων διαστάσεων, που είναι ομοιόμορφα φορτισμένο. Το φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας είναι σ (λέγεται και «επιφανειακή πυκνότητα φορτίου»). Ζητάμε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί η φορτισμένη επιφάνεια.

Απάντηση:

Η ένταση του πεδίου, για λόγους συμμετρίας, έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο του φορτισμένου φύλλου και το ίδιο μέτρο σε δύο σημεία που απέχουν εξίσου από το φορτισμένο φύλλο και βρίσκονται σε αντίθετες πλευρές.

Επιλέγουμε ως επιφάνεια Gauss την επιφάνεια ενός κυλίνδρου που

έχει τον άξονά του κάθετο στο φορτισμένο φύλλο και τις δύο βάσεις του, εμβαδού A , να ισαπέχουν από το φορτισμένο επίπεδο.



Σχ. 3.15 Επιλέγουμε επιφάνεια Gauss μια κυλινδρική επιφάνεια. Ο άξονας του κυλίνδρου είναι κάθετος στο φορτισμένο φύλλο και οι βάσεις του ισαπέχουν από αυτό.

Η ροή που διέρχεται από την κυρτή επιφάνεια του κυλίνδρου είναι μηδέν αφού κάθε στοιχειώδες τμήμα της είναι παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι κάθετη στις βάσεις του κυλίνδρου και το μέτρο της είναι ίδιο και στις δύο βάσεις. Η ροή που διέρχεται από κάθε βάση είναι EA . Η ολική ροή που διέρχεται από τον κύλινδρο είναι

$$\begin{aligned}\Phi_E &= \\ &= \Phi_{\text{ΚΥΡΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ}} + \Phi_{\text{ΣΤΙΣ ΒΑΣΕΙΣ}} = \\ &= \Phi_{\text{ΣΤΙΣ ΒΑΣΕΙΣ}} = 2EA\end{aligned}\quad (3.10)$$

Το ολικό φορτίο που περιέχεται στην κυλινδρική επιφάνεια είναι σA . Σύμφωνα με τον νόμο του Gauss

$$\Phi_E = \frac{Q_{\text{εγκ}}}{\epsilon_0} \quad \text{ή} \quad \Phi_E = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}\quad (3.11)$$

Από (3.11) και (3.10) προκύπτει

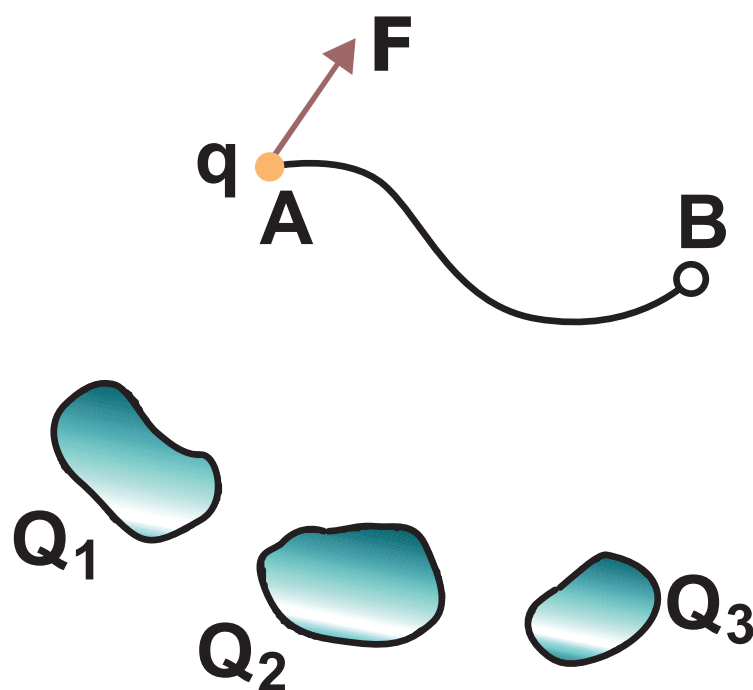
$$2EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0} \text{ ή } E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (3.12)$$

Από το αποτέλεσμα προκύπτει ότι η τιμή της έντασης είναι ανεξάρτητη της απόστασης από το φορτισμένο φύλλο.

Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί το φορτισμένο φύλλο απείρων διαστάσεων είναι ομογενές σε κάθε περιοχή του χώρου που ορίζεται από αυτό.

3-5 ΔΥΝΑΜΙΚΟ - ΔΙΑΦΟΡΑ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Υποθέστε ότι έχουμε μερικά ακίνητα φορτισμένα σώματα (σχ. 3.16). Τα σώματα αυτά δημιουργούν γύρω τους ηλεκτρικό πεδίο. Αν σε κάποιο σημείο A του ηλεκτρικού πεδίου τοποθετήσουμε ένα σωματίδιο με φορτίο q , το πεδίο θα ασκήσει στο φορτίο δύναμη $F = Eq$. Αν μετακινήσουμε το φορτίο q από το σημείο A, σε ένα άλλο σημείο B, του ηλεκτρικού πεδίου, σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί στο φορτίο q δύναμη. Η δύναμη αυτή, κατά τη μετακίνηση του φορτίου, παράγει ή καταναλώνει έργο.



Σχ. 3.16 Ο χώρος γύρω από τα φορτισμένα σώματα είναι ηλεκτρικό πεδίο. Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί δύναμη F σε ένα φορτίο.

Αποδεικνύεται ότι το έργο της δύναμης του πεδίου κατά τη μετακίνηση του φορτίου q , από το σημείο A στο σημείο B του ηλεκτρικού πεδίου, είναι το ίδιο, όποια διαδρομή και αν επιλέξουμε (τέτοια πεδία ονομάζονται διατηρητικά). Αν μάλιστα το

έργο αυτό διαιρεθεί με το φορτίο που μετακινείται, τότε το πηλίκο W/q , που εκφράζει το έργο ανά μονάδα φορτίου, είναι ανεξάρτητο όχι μόνο από τη διαδρομή αλλά και από το φορτίο που μετακινείται κάθε φορά.

Την ιδιότητα αυτή του ηλεκτρικού πεδίου την εκμεταλλευόμαστε για να ορίσουμε ένα νέο μέγεθος, το δυναμικό. Συγκεκριμένα:

Ονομάζουμε δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του A το σταθερό πηλίκο του έργου της δύναμης που ασκεί το πεδίο σε φορτίο q , κατά τη μετακίνηση του φορτίου q από το σημείο A στο άπειρο, προς το φορτίο που μετακινείται.

$$V_A = \frac{W_{A \rightarrow \infty}}{q} \quad (3.13)$$

Το δυναμικό είναι μονόμετρο μέγεθος. Η μονάδα του στο σύστημα SI είναι το 1 Volt (V), που ισοδυναμεί με 1 J/C.

Τη διαφορά των δυναμικών μεταξύ δύο σημείων A και B την ονομάζουμε διαφορά δυναμικού ή τάση των σημείων A και B.

Η διαφορά δυναμικού, $V_A - V_B$ ανάμεσα σε δύο σημεία A και B του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση με το πηλίκο του έργου που παράγει ή καταναλώνει η δύναμη του πεδίου κατά τη μετακίνηση ενός φορτίου q από το σημείο A στο σημείο B προς το φορτίο q.

$$V_A - V_B = \frac{W_{A \rightarrow B}}{q} \quad (3.14)$$

Το έργο της δύναμης του πεδίου όταν μετατοπίζεται φορτίο q ανάμεσα σε δύο σημεία που παρουσιάζουν διαφορά δυναμικού, είναι

$$W_{A \rightarrow B} = (V_A - V_B)q$$

Αν το φορτίο που μετακινείται είναι το στοιχειώδες φορτίο ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$) και η διαφορά δυναμικού που παρουσιάζουν τα σημεία A και B είναι 1 V, το έργο της δύναμης του πεδίου είναι $W = 1 \text{ V} \cdot 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$. Το έργο αυτό το ονομάζουμε ηλεκτρονιοβόλτ και το συμβολίζουμε με 1 eV.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Η διαφορά δυναμικού εκφράζει το έργο της δύναμης του πεδίου, ανά μονάδα φορτίου, κατά τη μετακίνη-

ση ενός φορτίου μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. Επειδή το δυναμικό σχετίζεται με το έργο, είναι ένα μέγεθος εξαιρετικά χρήσιμο για τη μελέτη ενός προβλήματος από ενεργειακή άποψη.

Αν αφήσουμε σε ένα σημείο A του ηλεκτρικού πεδίου ένα θετικό φορτίο αυτό θα κινηθεί στην κατεύθυνση της δύναμης που δέχεται από το πεδίο. Το έργο αυτής της δύναμης είναι θετικό και επομένως η διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου A και ενός άλλου σημείου B στη διαδρομή του φορτίου ($V_A - V_B$) είναι θετική, δηλαδή το δυναμικό στο σημείο B είναι μικρότερο από το δυναμικό στο σημείο A .

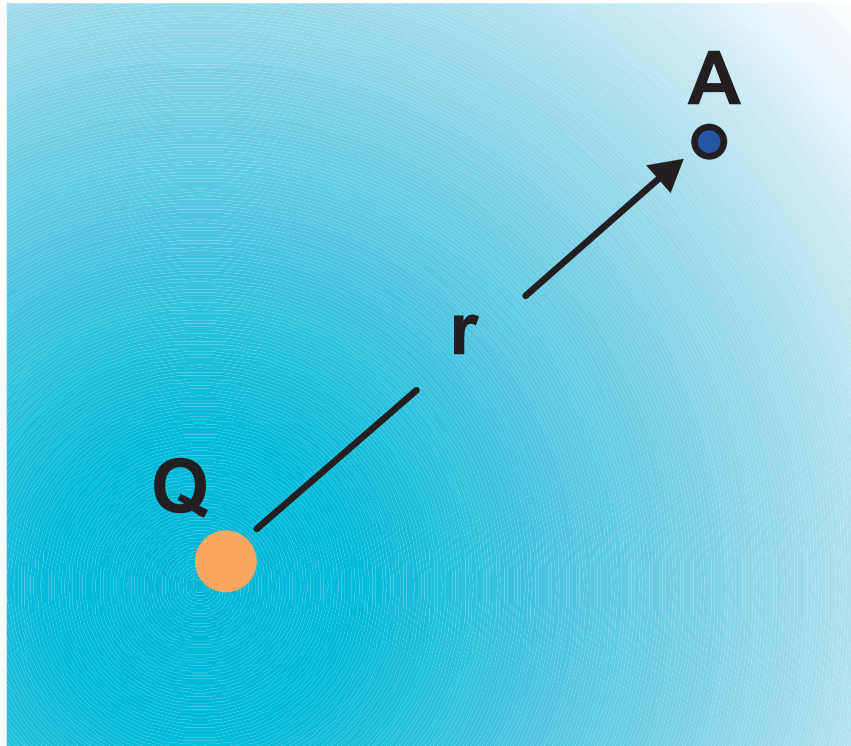
Το ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει τα θετικά φορτία που αφήνονται ($u_0 = 0$) σε ένα σημείο του να κινούνται στην

κατεύθυνση στην οποία τα δυναμικά μικραίνουν. Αντίθετα, τα αρνητικά φορτία κινούνται προς την κατεύθυνση στην οποία τα δυναμικά αυξάνονται.

Το δυναμικό πεδίου που οφείλεται σε σημειακό φορτίο

Αποδεικνύεται ότι το δυναμικό του πεδίου που οφείλεται σε σημειακό φορτίο Q , σε ένα σημείο που απέχει από το φορτίο απόσταση r , έχει τιμή

$$V = K_c \frac{Q}{r} \quad (3.15)$$



Σχ. 3.17 Σημειακό φορτίο Q δημιουργεί στο χώρο ηλεκτρικό πεδίο. Το δυναμικό στο σημείο A του πεδίου είναι $V_A = K_c \frac{Q}{r}$.

Παρατηρήσεις

1. Στη σχέση (3.15) το φορτίο μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Αντίστοιχα, το δυναμικό είναι θετικό ή αρνητικό.

2. Όταν το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από πολλά σημειακά φορτία $Q_1, Q_2, Q_3 \dots$, για να υπολογίσουμε το δυναμικό στο σημείο A (V_A), στηριζόμαστε στην αρχή της επαλληλίας. Σύμφωνα με αυτή το δυναμικό του πεδίου που δημιουργούν στο σημείο A όλα τα φορτία ισούται με το άθροισμα των δυναμικών των πεδίων που θα δημιουργούσε το κάθε φορτίο Q_1, Q_2 κ.λπ. στο σημείο A , δηλαδή

$$V_A = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

Δυναμικό φορτισμένου αγωγού

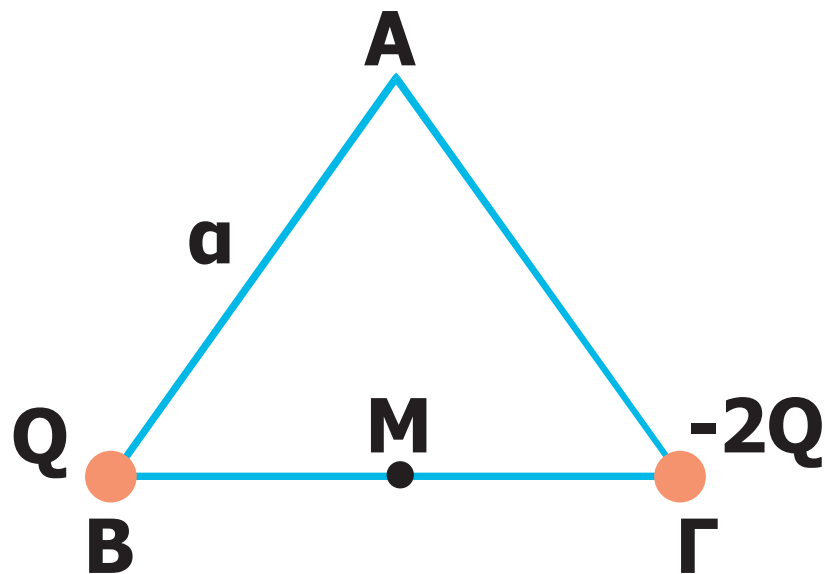
Ένας στατικά φορτισμένος αγωγός, δηλαδή ένας αγωγός που φέρει ακίνητα φορτία, έχει παντού το ίδιο δυναμικό, διότι αν το δυναμικό

δεν ήταν ίδιο παντού δε θα είχα-
με φορτία ακίνητα -σε ισορροπία-
αλλά φορτία σε κίνηση.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.4

Στις κορυφές B και Γ νοητού ισό-
πλευρου τριγώνου ABΓ πλευράς
α, έχουν τοποθετηθεί τα σημειακά
φορτία Q και $-2Q$, αντίστοιχα. Να
υπολογιστούν:

- α) Το δυναμικό του πεδίου στην κο-
ρυφή A.
- β) Το δυναμικό του πεδίου στο ση-
μείο M, μέσον της BΓ.
- γ) Το έργο της δύναμης του πεδί-
ου κατά τη μετακίνηση ενός ηλε-
κτρονίου από το σημείο A στο M.



Σχ. 3.18

Απάντηση:

α) Αν το φορτίο Q ήταν μόνο του, το πεδίο που θα δημιουργούσε θα είχε στο A δυναμικό $V_1^A = K_c \frac{Q}{\alpha}$

Αντίστοιχα, το πεδίο που θα δημιουργούσε το φορτίο $-2Q$ θα είχε στο A δυναμικό $V_2^A = K_c \frac{-2Q}{\alpha}$

Το πεδίο που δημιουργούν και τα δύο φορτία μαζί στο σημείο A έχει δυναμικό:

$$V_A = V_1^A + V_2^A = -K_c \frac{Q}{\alpha} \quad (3.16)$$

β) Με ανάλογο τρόπο βρίσκουμε το δυναμικό του σημείου M.

$$V_1^M = K_c \frac{Q}{\alpha/2} = 2K_c \frac{Q}{\alpha},$$

$$V_2^M = K_c \frac{-2Q}{\alpha/2} = -4K_c \frac{Q}{\alpha}$$

$$V_M = V_1^M + V_2^M = -2K_c \frac{Q}{\alpha} \quad (3.17)$$

$$\gamma) V_A - V_M = \frac{W_{A \rightarrow M}}{-e} \text{ επομένως}$$

$$W_{A \rightarrow M} = (V_A - V_M)(-e)$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές του δυναμικού από τις (3.16) και (3.17) παίρνουμε
$$W_{A \rightarrow M} = -K_c \frac{Qe}{a}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.5

Ένα πρωτόνιο βάλλεται από μεγάλη απόσταση, με ταχύτητα $u = 400 \text{ m / s}$, προς ακίνητο πυρήνα άνθρακα. Να υπολογιστεί η ελάχιστη απόσταση από τον πυρήνα στην οποία θα φτάσει το πρωτόνιο. Δίνονται: το στοιχειώδες φορτίο $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$, η μάζα του πρωτονίου $m_p = 1,6 \times 10^{-27} \text{ Kg}$, ο ατομικός αριθμός του άνθρακα: 6, η σταθερά του Coulomb $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$. Θα υποθέσετε ότι ο πυρήνας παραμένει ακίνητος σε όλη τη διάρκεια του φαινομένου.

Απάντηση:

Το φορτίο του πυρήνα του άνθρακα είναι $Q = 6e$.

Στο σημείο A, το πλησιέστερο προς τον πυρήνα σημείο στο οποίο φτάνει το πρωτόνιο, η ταχύτητά του στιγμιαία μηδενίζεται.

Εφαρμόζουμε το θεώρημα έργου - ενέργειας για το πρωτόνιο, κατά την κίνησή του από το άπειρο μέχρι τη θέση A.

$$W_{\infty \rightarrow A} = K_A - K_{\infty} \text{ ή}$$

$$W_{\infty \rightarrow A} = 0 - \frac{1}{2} m_p u^2 \quad (3.18)$$

$$\text{Όμως } W_{\infty \rightarrow A} = -W_{A \rightarrow \infty} = -V_A e \quad (3.19)$$

όπου V_A το δυναμικό που δημιουργεί ο πυρήνας στο σημείο A. Αν το

σημείο A απέχει από τον πυρήνα
απόσταση r

$$V_A = K_c \frac{Q}{r} = K_c \frac{6e}{r} \quad (3.20)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.19) και (3.20)
στην (3.18) έχουμε

$$-K_c \frac{6e^2}{r} = -\frac{1}{2} m_p u^2 \text{ επομένως}$$

$$r = \frac{12K_c e^2}{m_p u^2} \text{ από όπου}$$

$$r = 10,8 \times 10^{-6} \text{ m}$$

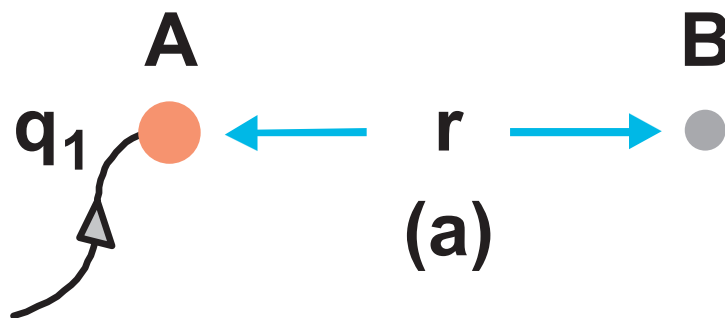
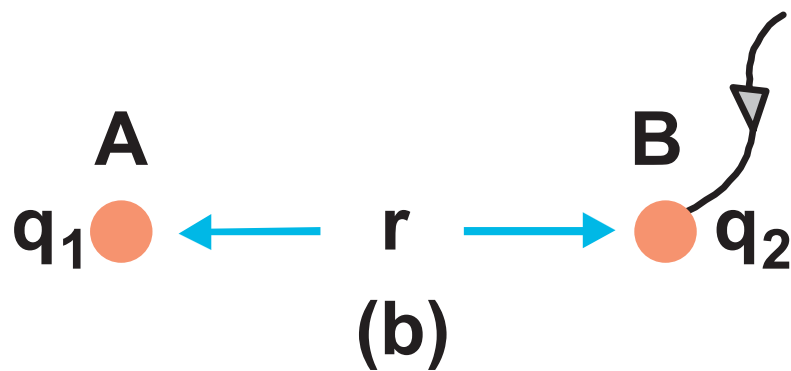
3-6 Η ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΛ- ΛΩΝ ΣΗΜΕΙΑΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Έστω ένα σύστημα που αποτελείται από δύο σημειακά φορτία, τα q_1 και q_2 (σχ. 3.19). Ας ονομάσουμε A και B τις θέσεις τους και r την απόστασή τους. Επειδή τα φορτία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, το σύστημα έχει δυναμική ενέργεια. Δεν θα είχαν ενέργεια αν βρίσκονταν σε άπειρη απόσταση το ένα από το άλλο ώστε να μην αλληλεπιδρούν.

Η ενέργεια που έχει το σύστημα των δύο φορτίων είναι ίση με το έργο που απαιτείται για να μεταφερθούν από πολύ μακριά και να τοποθετηθούν στις θέσεις τους. Ας φανταστούμε μια τέτοια διαδικασία.



Σχ. 3.19 Σύστημα δύο σημειακών φορτίων.



Σχ. 3.20 Αρχικά τοποθετούμε το q_1 στο σημείο A (a), στη συνέχεια το q_2 στο σημείο B (b).

Στις θέσεις A και B δεν υπάρχουν φορτία. Τα q_1 και q_2 βρίσκονται πολύ μακριά και σε άπειρη απόσταση μεταξύ τους.

Το φορτίο q_1 μπορεί να μεταφερθεί στο A, χωρίς παραγωγή ή δαπάνη έργου. Στη συνέχεια μεταφέρεται το q_2 στο B. Το φορτίο q_2 , κινείται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο του που έχει δημιουργηθεί από το q_1 . Το έργο που απαιτείται για τη μεταφορά του είναι αντίθετο του έργου της δύναμης του πεδίου. Είναι:

$$\begin{aligned} -W_{\infty \rightarrow B} &= W_{B \rightarrow \infty} = V_B q_2 = \\ &= K_c \frac{q_1}{r} q_2 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Επομένως το έργο που απαιτείται για να τοποθετηθούν τα δύο φορτία στις θέσεις τους είναι

$$W = K_c \frac{q_1 q_2}{r} \quad (3.22)$$

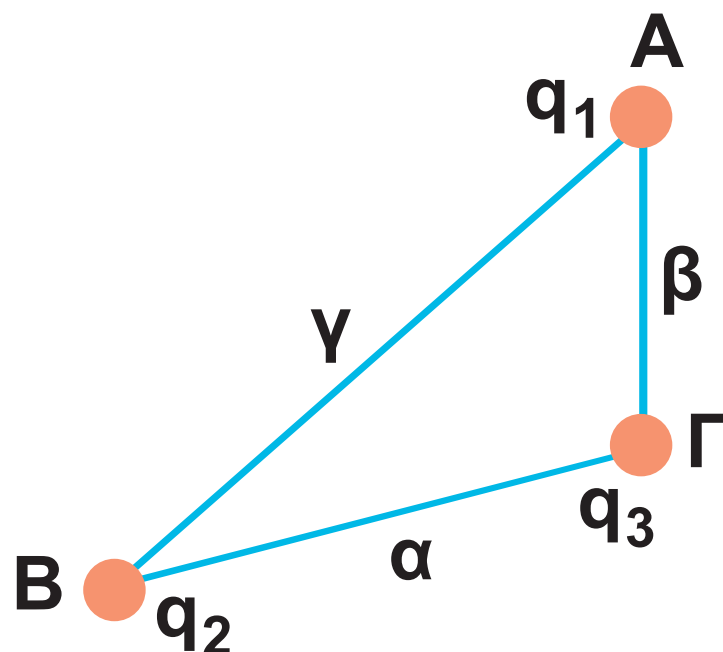
Τόση είναι και η δυναμική ενέργεια του συστήματος των δύο φορτίων.

$$U = K_c \frac{q_1 q_2}{r} \quad (3.23)$$

Να σημειώσουμε ότι η δυναμική ενέργεια που υπολογίσαμε ανήκει και στα δύο φορτία – ανήκει στο σύστημα. Δεν υπάρχει κανένας λογικός τρόπος να αποδώσουμε μέρος αυτής της ενέργειας σε κάποιο από τα φορτία.

Από τη σχέση (3.23) προκύπτει ότι αν τα φορτία είναι ομώνυμα η δυναμική τους ενέργεια είναι θετική. Αυτό είναι συνέπεια των απωστικών δυ-

νάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ τους. Για να μεταφερθούν τα φορτία από πολύ μακριά και να πλησιάσουν σε απόσταση r πρέπει να προσφερθεί έργο στο σύστημα. Αντίθετα, αν τα φορτία είναι ετερόνυμα έλκονται και απαιτείται αρνητικό έργο για να τοποθετηθούν σε απόσταση r μεταξύ τους. Επομένως η δυναμική τους ενέργεια είναι αρνητική.



Σχ. 3.21 Σύστημα τριών σημειακών φορτίων.

Με τον τρόπο που περιγράψαμε βρίσκουμε τη δυναμική ενέργεια και στις περιπτώσεις που ένα σύστημα αποτελείται από περισσότερα σημειακά φορτία. Στο σχήμα 3.21 παριστάνεται ένα σύστημα αποτελούμενο από τρία σημειακά φορτία. Η δυναμική ενέργεια του συστήματος είναι ίση με το έργο που απαιτείται για να μεταφερθούν αυτά τα φορτία από πολύ μακριά και να τοποθετηθούν ένα - ένα στις θέσεις τους. Βρίσκουμε έτσι ότι η δυναμική ενέργεια του συστήματος αυτού είναι

$$U = K_c \frac{q_1 q_2}{\gamma} + K_c \frac{q_1 q_3}{\beta} + K_c \frac{q_2 q_3}{\alpha} \quad (3.24)$$

Παρατηρείστε ότι στη σχέση αυτή η ενέργεια του συστήματος είναι το άθροισμα των ενεργειών που έχουν τα φορτία ανά ζεύγη.

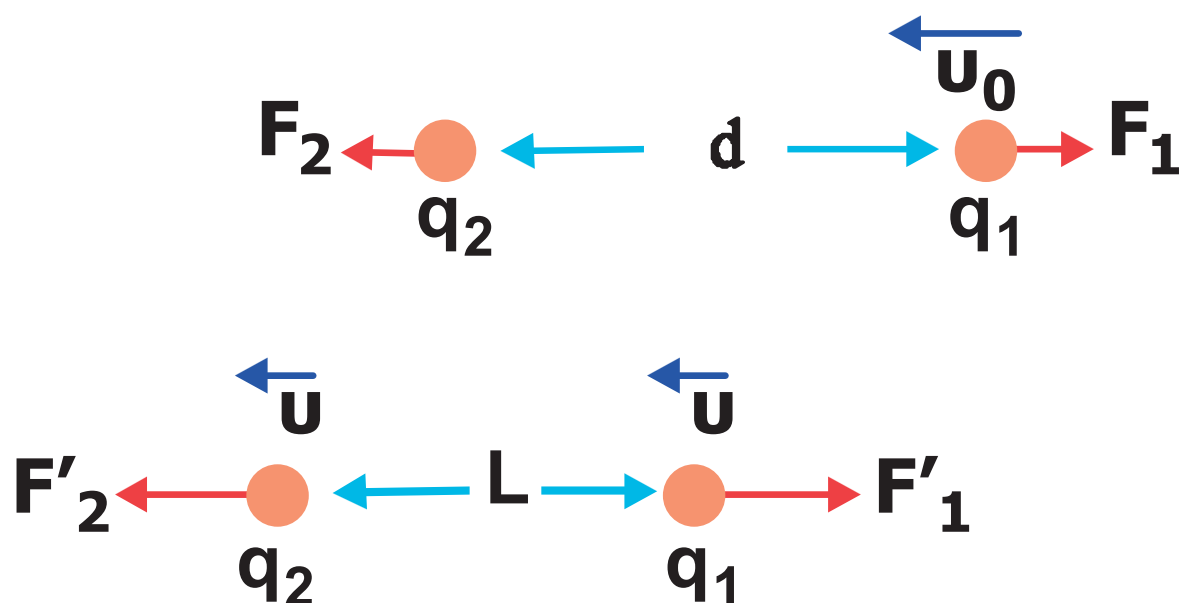
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.6

Σφαιρίδιο μάζας $m_1 = 22 \times 10^{-5}$ Kg φορτισμένο με θετικό φορτίο $q_1 = 11 \times 10^{-7}$ C βάλλεται με αρχική ταχύτητα $u_0 = 30$ m / s προς δεύτερο σφαιρίδιο με μάζα $m_2 = 2m_1$ και φορτίο $q_2 = 2q_1$ που είναι αρχικά ακίνητο σε απόσταση $d = 2$ m από το πρώτο. Αν τα σφαιρίδια βρίσκονται πάνω σε οριζόντιο, λείο και μονωτικό δάπεδο να βρεθεί η ελάχιστη απόσταση L στην οποία θα πλησιάσουν.
Δίνεται $K_c = 9 \times 10^9$ N · m²/C².

Απάντηση:

Οι δυνάμεις ανάμεσα στα σφαιρίδια είναι απωστικές. Έτσι το σώμα μάζας m_1 επιβραδύνεται και το σώμα

μάζας m_2 επιταχύνεται. Όσο η ταχύτητα του m_1 είναι μεγαλύτερη της ταχύτητας του m_2 η απόσταση μεταξύ των σωμάτων μικραίνει. Κάποια στιγμή οι ταχύτητές τους θα γίνουν ίσες και στη συνέχεια η ταχύτητα του m_1 θα γίνει μεγαλύτερη από την ταχύτητα του m_2 (τότε η απόσταση μεταξύ τους θα μεγαλώνει). Τα σώματα θα βρεθούν στην ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ τους τη στιγμή κατά την οποία οι ταχύτητές τους θα εξισωθούν $u_1 = u_2 = u$.



Σχ. 3.22

Η μηχανική ενέργεια του συστήματος διατηρείται. Αν θεωρήσουμε ως αρχική θέση τη θέση από την οποία βάλλεται το σφαιρίδιο m_1 και ως τελική τη θέση που τα σφαιρίδια βρίσκονται στην ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους θα ισχύει

$$K_{\text{αρχ}} + U_{\text{αρχ}} = K_{\text{τελ}} + U_{\text{τελ}}$$

ΟΠΟΤΕ

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} m_1 u_0^2 + K_c \frac{q_1 q_2}{d} &= \\ &= \frac{1}{2} m_1 u_1^2 + \frac{1}{2} m_2 u_2^2 + K_c \frac{q_1 q_2}{L} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ή } \frac{1}{2} m_1 u_0^2 + K_c \frac{2q_1^2}{d} &= \\ &= \frac{3}{2} m_1 u^2 + K_c \frac{2q_1^2}{L} \end{aligned} \quad (3.27)$$

Επειδή στο σύστημα δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις, η ορμή του συστήματος διατηρείται.

$$P_{\text{αρχ}} = P_{\text{τελ}}$$

Θεωρώντας θετική κατεύθυνση την αρχική φορά κίνησης του m_1 η παραπάνω σχέση γράφεται αλγεβρικά.
 $m_1 u_o = m_1 u_1 + m_2 u_2$ ή $m_1 u_o = 3m_1 u$

οπότε $u = \frac{u_o}{3}$

αντικαθιστώντας στην (3.27) και λύνοντας ως προς L προκύπτει

$$L = \frac{6dK_c q_1^2}{dm_1 u_o^2 + 6K_c q_1^2} = 0,28 \text{ m}$$

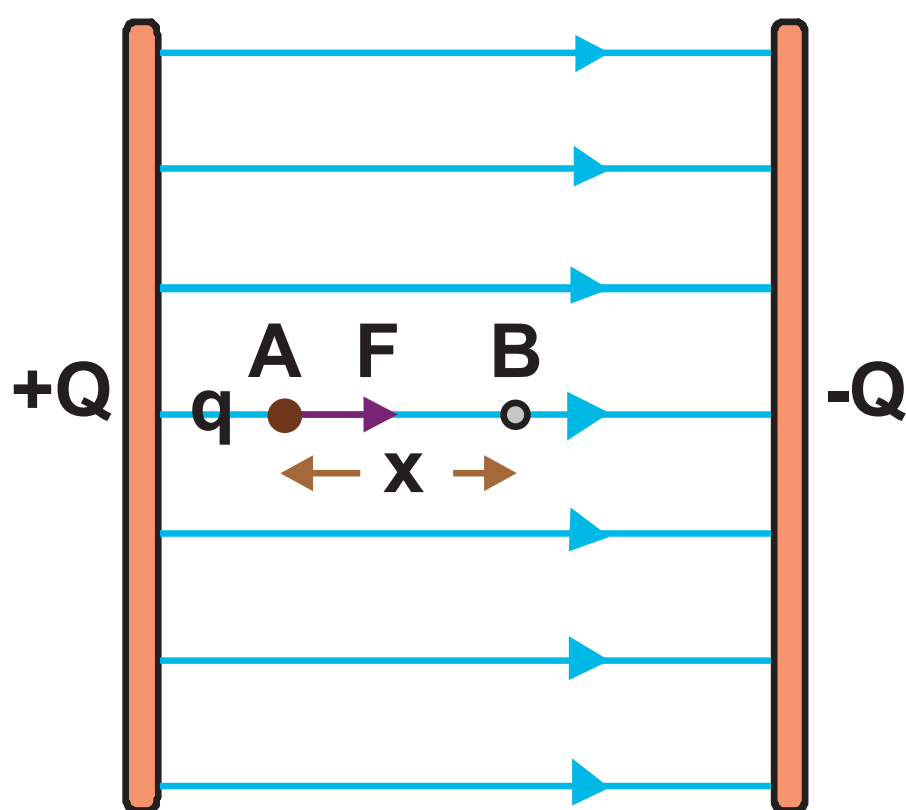
Παρατήρηση: Για τη λύση του προβλήματος χρησιμοποιήσαμε την

αρχή διατήρησης της μηχανικής ενέργειας. Όμως, το πεδίο που δημιουργείται από κινούμενα φορτία είναι ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και όταν, όπως συμβαίνει στο πρόβλημά μας τα φορτία επιταχύνονται ένα μέρος της ενέργειάς τους μεταφέρεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο περιβάλλον.

3-7 ΣΧΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΟ ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Η ένταση και το δυναμικό είναι μεγέθη που περιγράφουν το ηλεκτρικό πεδίο. Λογικό είναι, λοιπόν, τα δύο μεγέθη να σχετίζονται. Πράγματι υπάρχει μια γενική σχέση ανάμεσα στην ένταση και το δυναμικό

η οποία όμως απαιτεί μαθηματικά που ξεφεύγουν από το επίπεδο αυτού του βιβλίου. Εμείς θα δούμε πώς σχετίζονται αυτά τα δύο μεγέθη στην περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές.



Σχ. 3.23 Θετικό σημειακό φορτίο q αφήνεται στο σημείο A ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Το πεδίο ασκεί δύναμη που έχει την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών.

Έστω το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο του σχήματος 3.23. Αν στο σημείο A αφεθεί ένα θετικό φορτίο q , θα δεχτεί δύναμη $F = Eq$ στην κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών και θα κινηθεί κατά μήκος της δυναμικής γραμμής στην οποία βρίσκεται. Έστω ότι B είναι ένα άλλο σημείο, πάνω στην ίδια δυναμική γραμμή που απέχει από το σημείο A απόσταση x . Το έργο της δύναμης F κατά τη μετακίνηση του φορτίου από το σημείο A στο σημείο B είναι

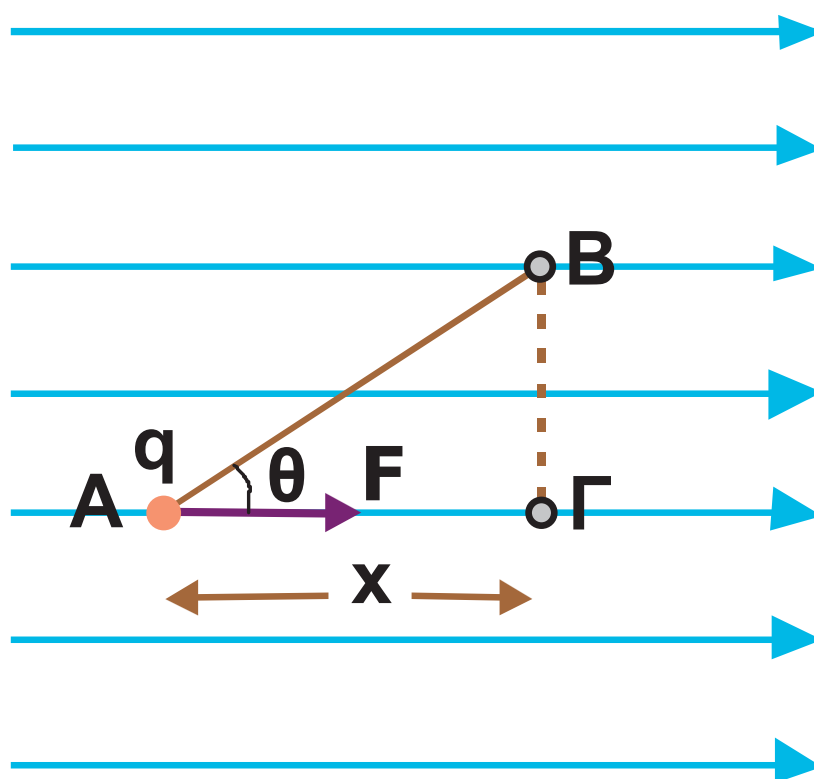
$$W = F x = Eq x \quad (3.28)$$

Γνωρίζουμε όμως ότι $W = (V_A - V_B)q$
Έτσι, η σχέση (3.28) γίνεται

$$Eq x = (V_A - V_B)q \quad \text{ή} \quad E = \frac{V_A - V_B}{x}$$

$$\text{ή} \quad E = \frac{V}{x} \quad (3.29),$$

όπου με V συμβολίσαμε τη διαφορά δυναμικού των σημείων A και B .



Σχ. 3.24 Το έργο της δύναμης του πεδίου κατά τη μετακίνησή του από το A στο B είναι ίσο με το έργο κατά τη μετακίνησή του από το A στο Γ .

Ας εξετάσουμε τώρα τη γενικότερη περίπτωση στην οποία τα σημεία A και B δεν βρίσκονται πάνω στην ίδια δυναμική γραμμή (σχ. 3.24). Αν ανα-

γκάσουμε ένα φορτίο q , να κινηθεί από το σημείο A στο B κατά μήκος της ευθείας AB το έργο της δύναμης του πεδίου είναι

$$W = F(AB)\cos\theta = F(AB)\frac{(AG)}{(AB)} = \\ = F(AG) = Eqx$$

και επειδή $W = (V_A - V_B)q$ προκύπτει πάλι η σχέση (3.29)

Γενικεύοντας το συμπέρασμα της (3.29) μπορούμε να πούμε ότι η ένταση στο ομογενές ηλεκτρικό πεδίο είναι ίση με το πηλίκο της διαφοράς δυναμικού δύο οποιωνδήποτε σημείων του ηλεκτρικού πεδίου προς την απόστασή τους x , μετρημένη κατά μήκος μιας δυναμικής γραμμής.

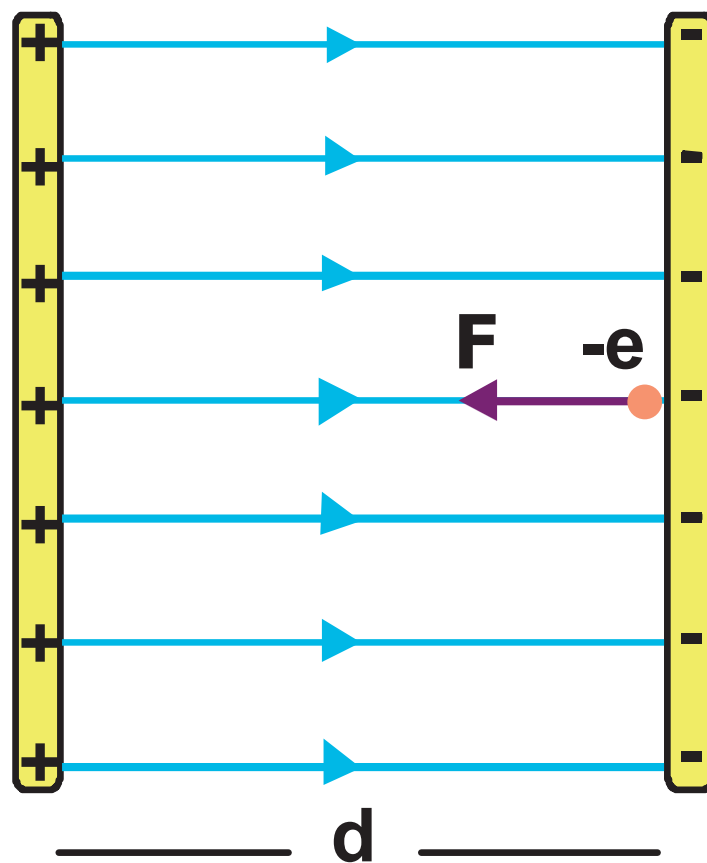
3-8 ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΣΕ ΟΜΟΓΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες φορτισμένες με αντίθετα φορτία, όπως στο σχήμα, δημιουργούν ανάμεσά τους ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Αν μέσα σ' αυτό το πεδίο βρεθεί ένα φορτισμένο σωματίδιο θα δεχτεί σταθερή δύναμη $F = Eq$ και θα αποκτήσει σταθερή επιτάχυνση $a = \frac{Eq}{m}$.

Α. Κίνηση χωρίς αρχική ταχύτητα

Ένα ηλεκτρόνιο (σχ. 3.25) αφήνεται πολύ κοντά στην αρνητική πλάκα. Το ηλεκτρόνιο θα δεχτεί από το πεδίο δύναμη σταθερού μέτρου

$F = Ee$ (E : η ένταση του πεδίου και e : το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο) αντίρροπη της E και θα κινηθεί ευθύγραμμα ομαλά επιταχυνόμενα, με επιτάχυνση $a = F / m_e$.



Σχ. 3.25 Ένα ηλεκτρόνιο αφήνεται μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

Η κίνηση του ηλεκτρονίου περιγράφεται από τις σχέσεις

$$\alpha = F / m_e = Ee / m_e$$

$$v = \alpha t$$

$$x = \frac{1}{2} \alpha t^2$$

από τις οποίες μπορούμε να υπολογίσουμε:

1. Πόσο χρόνο χρειάζεται το ηλεκτρόνιο για να φτάσει στην απέναντι πλάκα;

Αν η απόσταση ανάμεσα στις πλάκες είναι d από τη σχέση

$$d = \frac{1}{2} \alpha t_1^2 \text{ βρίσκουμε } t_1 = \sqrt{\frac{2d}{\alpha}}.$$

2. Με ποια ταχύτητα φτάνει το ηλεκτρόνιο στη θετική πλάκα;

Αντικαθιστώντας στη σχέση $u = a t$ το χρόνο που βρήκαμε παραπάνω βρίσκουμε $u_1 = \sqrt{2ad}$.

Ας κάνουμε μια αριθμητική εφαρμογή για να δούμε για ποιας τάξης μεγέθους ταχύτητες και χρόνους μιλάμε.

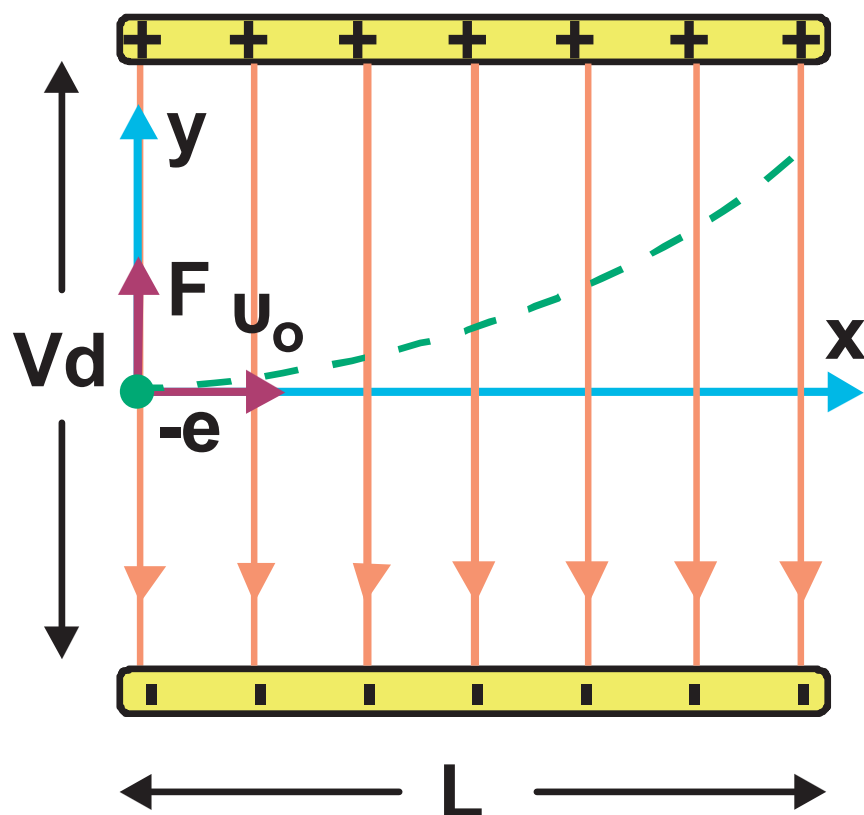
Αν η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις μεταλλικές πλάκες είναι $V = 1 \text{ kV}$ και η απόσταση μεταξύ τους $d = 5 \text{ mm}$ η ένταση του πεδίου στο εσωτερικό του θα είναι $E = 2 \times 10^5 \text{ N / C}$, η δύναμη που θα δεχθεί το ηλεκτρόνιο θα έχει μέτρο $F = 3,2 \times 10^{-14} \text{ N}$ ($e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), η επιτάχυνση θα είναι $a = 3,5 \times 10^{16} \text{ m/s}^2$ ($m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$), ο χρόνος για να φτάσει στον απέναντι οπλισμό $t_1 = 5,3 \times 10^{-10} \text{ s}$ και η τελική του ταχύτητα $u_1 = 1,9 \times 10^7 \text{ m / s}$.

Διατάξεις που χρησιμοποιούν τον παραπάνω μηχανισμό (επιτάχυνση φορτισμένου σωματιδίου σε ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο) έχουν ευρεία εφαρμογή σε μια σειρά από συσκευές όπως ο φασματογράφος μάζας, ο καθοδικός σωλήνας και άλλες.

B. Κίνηση με αρχική ταχύτητα κάθετη στις δυναμικές γραμμές

Θεωρούμε ότι οι παράλληλες μεταλλικές πλάκες του σχήματος 3.26 είναι φορτισμένες με φορτία $+q$ και $-q$, έχουν μήκος L , απέχουν μεταξύ τους απόσταση d και η διαφορά δυναμικού τους είναι V . Ένα ηλεκτρόνιο εισέρχεται με αρχική ταχύτητα u_0 κάθετη στις δυναμικές γραμμές του ομογενούς πεδίου που σχη-

ματίζεται ανάμεσα στις πλάκες. Το ηλεκτρόνιο κατά την κίνησή του μέσα στο ομογενές πεδίο δέχεται σταθερή δύναμη F .



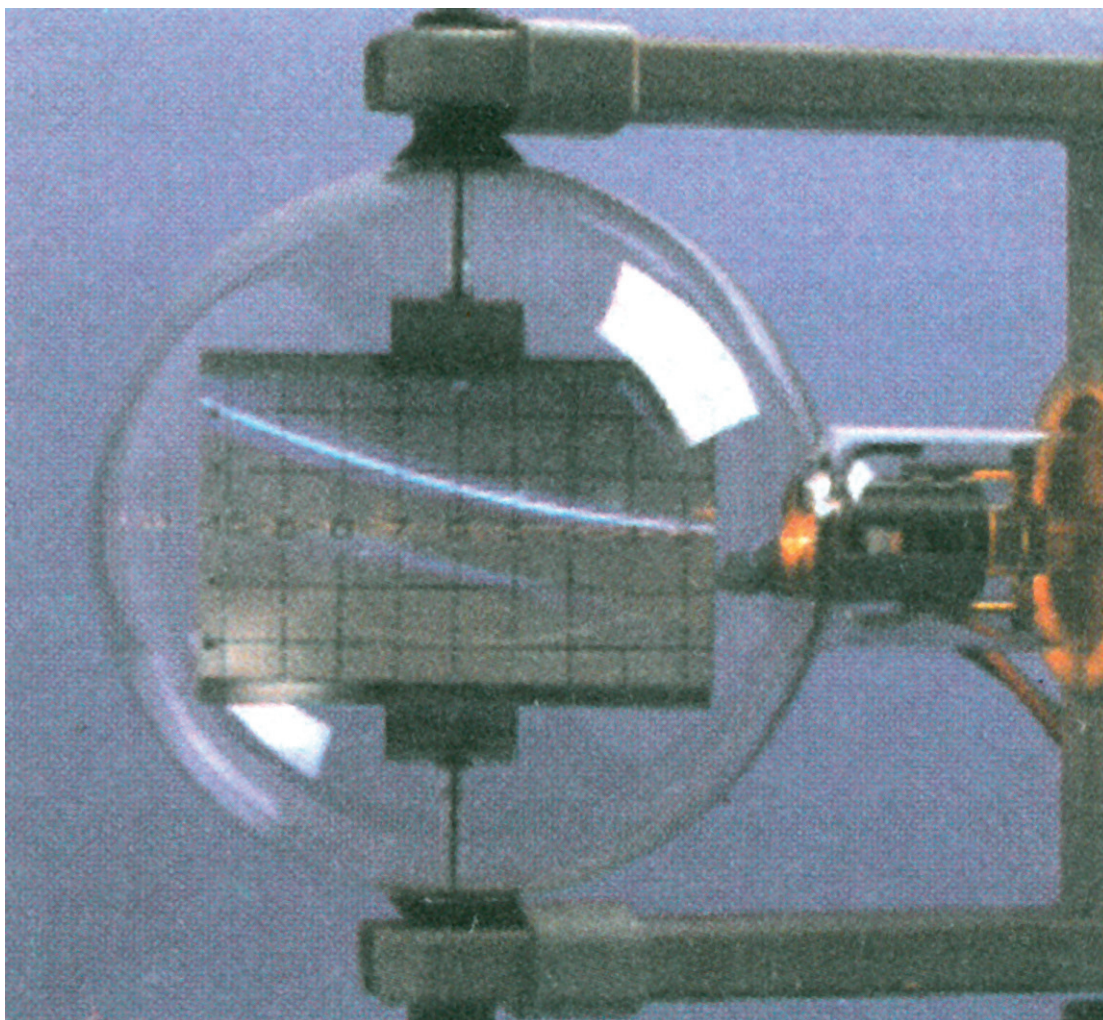
Σχ. 3.26 Το ηλεκτρόνιο εισέρχεται στο ηλεκτρικό πεδίο με ταχύτητα κάθετη στις δυναμικές γραμμές. Η δύναμη που δέχεται από το πεδίο το αναγκάζει να διαγράψει παραβολική τροχιά.

Για τη μελέτη μιας τέτοιας κίνησης θα εφαρμόσουμε την αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων.

Διαλέγουμε δύο άξονες πάνω στους οποίους αναλύουμε την κίνηση. Εδώ θα επιλέξουμε έναν άξονα παράλληλο στις δυναμικές γραμμές κι έναν κάθετο σ' αυτές.

Αφού η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις φορτισμένες πλάκες είναι V , η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου μεταξύ των πλακών θα είναι $E = \frac{V}{d}$ (ομογενές πεδίο).

Στον άξονα x το ηλεκτρόνιο δεν δέχεται δύναμη και έτσι θα κινηθεί ευθύγραμμα ομαλά, διατηρώντας την αρχική του ταχύτητα u_0 .



Εικ. 3.2 Πειραματική διάταξη για τη μελέτη της απόκλισης μιας δέσμης ηλεκτρονίων μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

Στον άξονα y δέχεται καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης μια δύναμη σταθερή, κατακόρυφη, με φορά προς τα πάνω $F = Ee$ ή επειδή

$E = \frac{V}{d}$, $F = \frac{Ve}{d}$. Το ηλεκτρόνιο θα εκτελέσει σ' αυτό τον άξονα ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση χωρίς αρχική ταχύτητα με επιτάχυνση

$$\alpha_y = \frac{F}{m_e} = \frac{Ee}{m_e} = \frac{Ve}{dm_e} \quad (3.30)$$

Τελικά, στον άξονα x θα ισχύουν:

$$u_x = u_0 \quad (3.31)$$

$$x = u_0 t \quad (3.32)$$

ενώ στον y :

$$u_y = \alpha_y t \quad (3.33)$$

$$y = \frac{1}{2} \alpha_y t^2 \quad (3.34)$$

Από τις σχέσεις αυτές μπορούν να υπολογισθούν:

1. Χρόνος παραμονής στο πεδίο

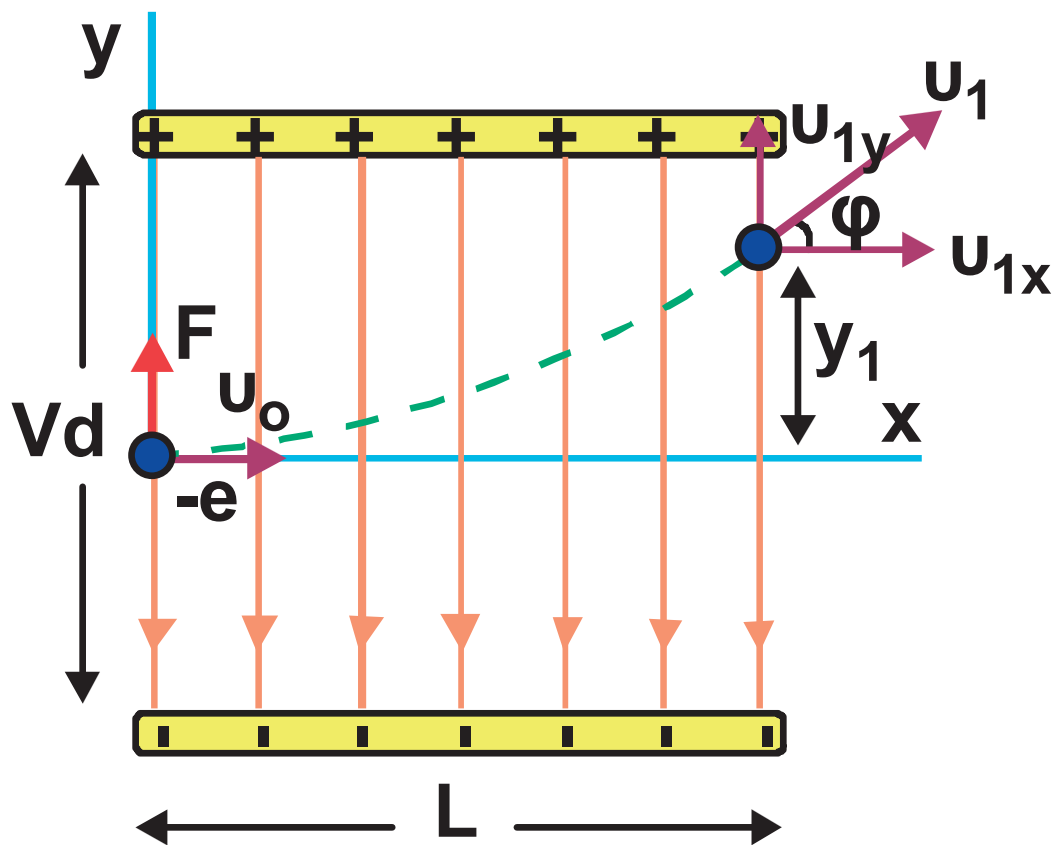
Το ηλεκτρόνιο θα εξέλθει από το πεδίο όταν, στον άξονα x θα έχει μετατοπιστεί κατά L . Αν στη σχέση (3.32) θέσουμε όπου x το L και λύσουμε ως προς t προκύπτει:

$$t_1 = \frac{L}{u_0} \quad (3.35)$$

2. Απόκλιση από την αρχική διεύθυνση κίνησης στην έξοδο

Εάν στη σχέση (3.34) θέσουμε στη θέση του t το χρόνο παραμονής στο πεδίο βρίσκουμε την κατακόρυφη απόκλιση y του ηλεκτρονίου από την αρχική του θέση, κατά την έξοδό του από το πεδίο.

$$y_1 = \frac{1}{2} \alpha_y t_1^2 \quad \text{ή} \quad y_1 = \frac{1}{2} \frac{V_e}{dm_e} \left(\frac{L}{u_0} \right)^2 \quad (3.36)$$



Σχ. 3.27 Όταν το ηλεκτρόνιο εξέρχεται από το πεδίο έχει αποκλίνει κατά y_1 από την αρχική του διεύθυνση και η ταχύτητά του είναι συνισταμένη της αρχικής ταχύτητας u_o και της ταχύτητας u_{1y} .

3. Ταχύτητα εξόδου από το πεδίο

Κατά την έξοδό του από το πεδίο, η ταχύτητα του ηλεκτρονίου στον άξονα x θα είναι $u_{1x} = u_0$ ενώ στον y θα είναι $u_{1y} = a_y t_1$ και από τις (3.30)

και (3.35)
$$u_{1y} = \frac{Ve}{dm_e} \frac{L}{u_0}$$

Η ταχύτητα που θα έχει το ηλεκτρόνιο κατά την έξοδό του θα είναι

$$u_1 = \sqrt{u_{1x}^2 + u_{1y}^2} \text{ οπότε}$$

$$u_1 = \sqrt{u_0^2 + \left(\frac{VeL}{dm_e u_0} \right)^2}$$

και
$$\epsilon\phi\phi = \frac{u_{1y}}{u_{1x}} = \frac{VeL}{dm_e u_0^2} \quad (3.37)$$

4. Η εξίσωση της τροχιάς του ηλεκτρονίου

Η εξίσωση της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι η σχέση που συνδέει τις μετατοπίσεις του στους άξονες x και y .

Λύνουμε την (3.32) ως προς t και αντικαθιστούμε στην (3.34) λαμβάνοντας υπόψη και την (3.30). Βρίσκουμε έτσι μια σχέση $y = f(x)$

$$y = \frac{1}{2} \alpha_y t^2 \quad \text{ή} \quad y = \frac{1}{2} \frac{V_e}{dm_e u_0^2} x^2 \quad \text{ή}$$

$$y = \frac{V_e}{2dm_e u_0^2} x^2$$

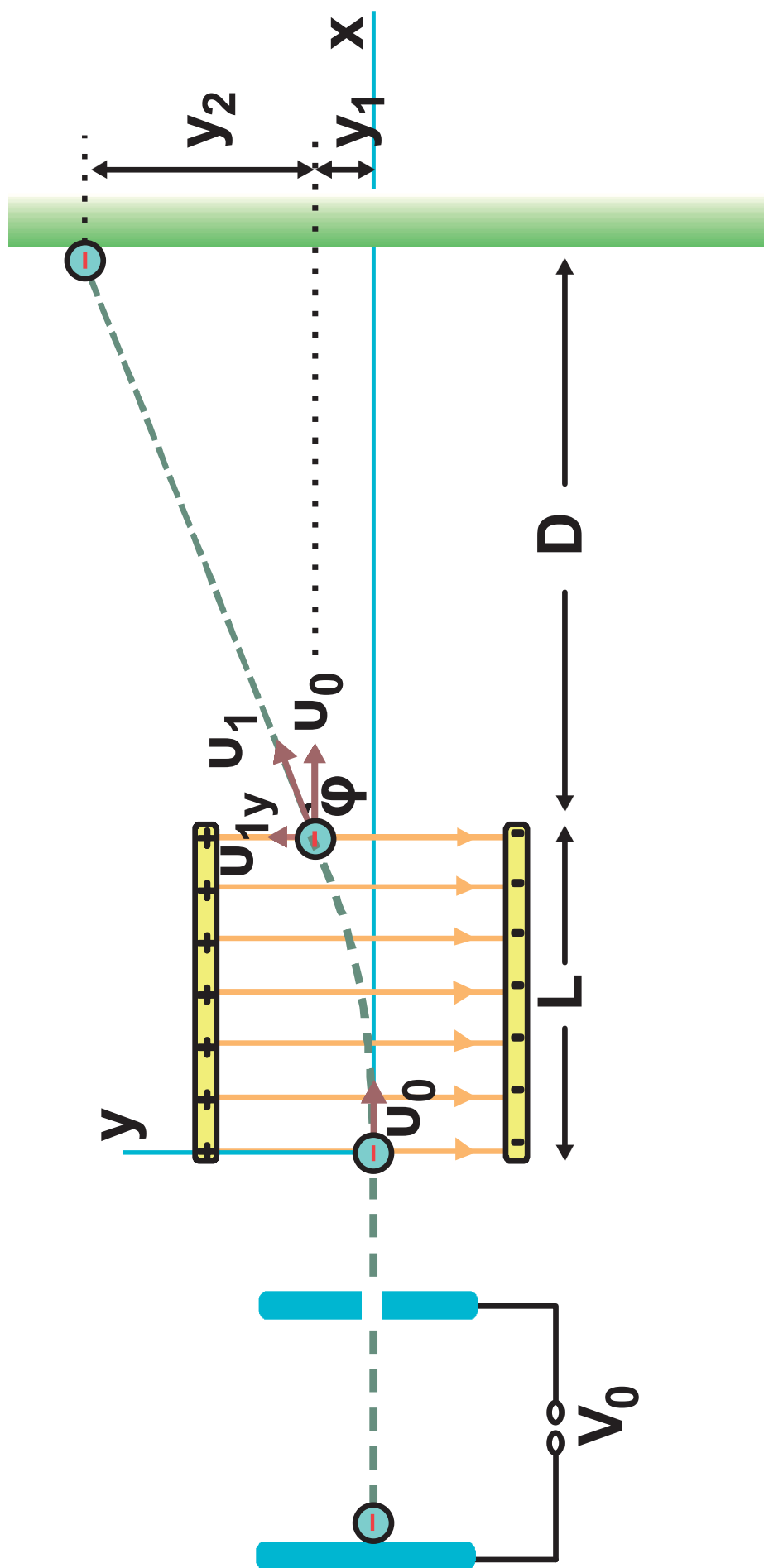
Πρόκειται για μια σχέση της μορφής $y = ax^2$, άρα η τροχιά του ηλεκτρονίου είναι παραβολική.

Στη μελέτη της κίνησης του ηλεκτρονίου μέσα στο ομογενές ηλεκτρικό πεδίο δε λάβαμε καθόλου υπόψη το βάρος του. Αυτό έγινε γιατί το βάρος είναι αμελητέο συγκριτικά με την F . Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το βάρος ενός ηλεκτρονίου είναι $w_e = 8,9 \times 10^{-30} \text{ N}$ ενώ η ηλεκτρική δύναμη που δέχεται ένα ηλεκτρόνιο στο εσωτερικό ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου σαν αυτό που περιγράψαμε με διαφορά δυναμικού $V = 1 \text{ kV}$ και απόσταση μεταξύ των πλακών $d = 5 \text{ mm}$ είναι $F = 3,2 \times 10^{-14} \text{ N}$, δηλαδή 36×10^{14} φορές μεγαλύτερη του βάρους. Το συμπέρασμα αυτό, ότι το βάρος είναι αμελητέο συγκρινόμενο με την ηλεκτρική δύναμη, ισχύει και για τα άλλα στοιχειώδη σωματίδια -πρωτόνια, πυρήνες, ιόντα- όταν κινούνται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.7

Δέσμη ηλεκτρονίων επιταχύνεται από την ηρεμία από διαφορά δυναμικού V_0 . Στη συνέχεια μπαίνει σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο που σχηματίζεται ανάμεσα σε δυο φορτισμένες πλάκες (πλακίδια απόκλισης) κάθετα στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις πλάκες είναι V και η μεταξύ τους απόσταση d . Το μήκος των πλακών είναι L . Τα ηλεκτρόνια βγαίνοντας από το ομογενές πεδίο προσκρούουν σε φθορίζουσα οθόνη που είναι τοποθετημένη κάθετα στην αρχική διεύθυνση κίνησης. Η οθόνη απέχει απόσταση D από τα πλακίδια απόκλισης. Η όλη διάταξη βρίσκεται μέσα σ' ένα σωλήνα υψηλού κενού ώστε να αποφεύγονται

οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αέρα. Να βρεθεί η θέση στην οποία θα πέσει η δέσμη πάνω στη φθορίζουσα οθόνη. Δίνονται το στοιχειώδες φορτίο e και η μάζα του ηλεκτρονίου m_e .



ΣX - 3.28

Απάντηση:

Τα ηλεκτρόνια επιταχυνόμενα από τη διαφορά δυναμικού V_0 αποκτούν κινητική ενέργεια που δίνεται από το θεώρημα έργου - ενέργειας.

$$\frac{1}{2} m_e u_0^2 = eV_0 \text{ οπότε } u_0 = \sqrt{\frac{2eV_0}{m_e}} \quad (3.38)$$

Η κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργούν τα πλακίδια απόκλισης, μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Όταν τα ηλεκτρόνια εξέλθουν από τα πλακίδια απόκλισης θα έχουν εκτραπεί από την αρχική τους πορεία κατά y_1 . Η απόκλιση αυτή υπολογίστηκε στην (3.36) επομένως

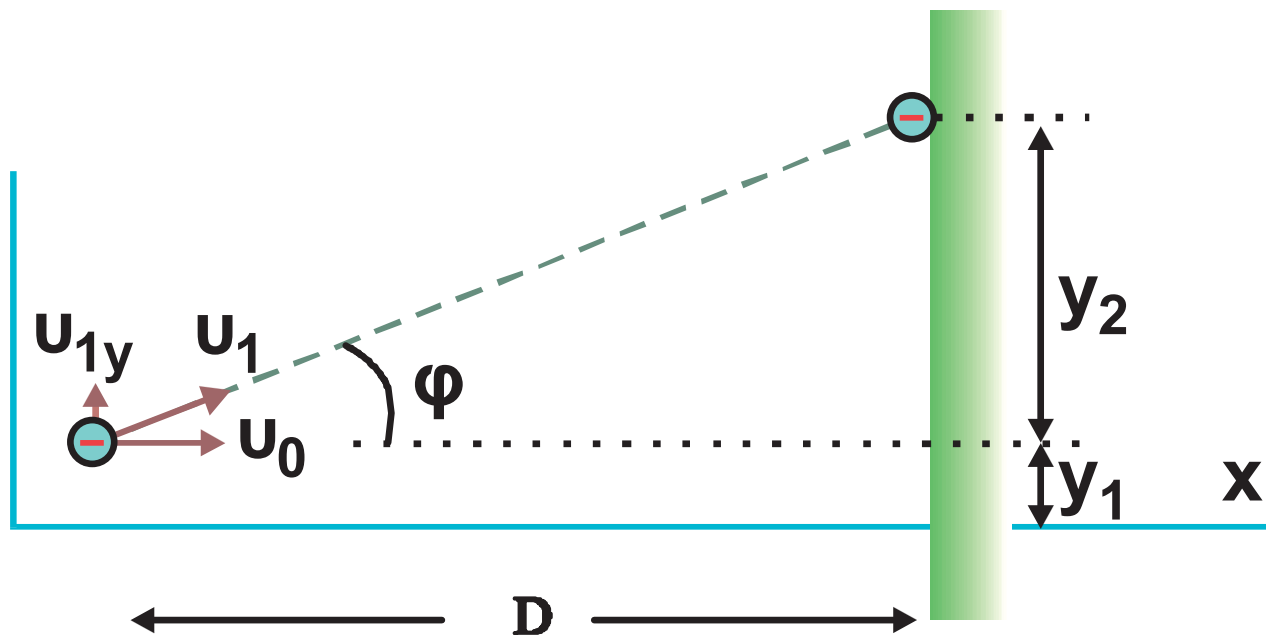
$$y_1 = \frac{1}{2} \frac{Ve}{dm_e} \left(\frac{L}{u_0} \right)^2 \quad (3.39)$$

Η γωνία που σχηματίζει η ταχύτητα εξόδου των ηλεκτρονίων με την αρχική διεύθυνση κίνησης, επίσης υπολογίστηκε από τη σχέση

$$\epsilon\phi\phi = \frac{VeL}{dm_e u_0^2} \quad (3.40)$$

Τα ηλεκτρόνια βγαίνοντας από το ομογενές πεδίο των πλακιδίων κινούνται ευθύγραμμα ομαλά με u_1 . Μεγεθύνοντας την περιοχή εξόδου (σχ. 3.29) βλέπουμε ότι σχηματίζεται ένα ορθογώνιο τρίγωνο με κάθετες πλευρές τις D και y_2 και υποτείνουσα την τροχιά των ηλεκτρονίων. Ισχύει

$$\epsilon\phi\phi = \frac{y_2}{D} \text{ οπότε } y_2 = D\epsilon\phi\phi$$



Σχ. 3.29

Αντικαθιστώντας την (3.40) βρίσκουμε

$$y_2 = \frac{DVeL}{dm_e u_0^2} \quad (3.41)$$

Η θέση της δέσμης στην οθόνη απέχει απόσταση $y_1 + y_2$ από την αρχική διεύθυνση της δέσμης. Από τις (3.38), (3.39) και (3.41) βρίσκουμε:

$$y_1 + y_2 = \frac{VL}{2V_0 d} \left(D + \frac{L}{2} \right)$$

Ο ΚΑΘΟΔΙΚΟΣ ΣΩΛΗΝΑΣ

Ο καθοδικός σωλήνας (σχ. 3.30) είναι ένας γυάλινος «σωλήνας» το εσωτερικό του οποίου βρίσκεται σε υψηλό κενό. Η λειτουργία του στηρίζεται σε τρεις διαδοχικές διατάξεις.

Η πρώτη ονομάζεται τηλεβόλο ηλεκτρονίων και είναι υπεύθυνη για την παραγωγή, επιτάχυνση και εστίαση μιας δέσμης ηλεκτρονίων.

Η δεύτερη είναι ένας συνδυασμός ομογενών πεδίων. Μεταβάλλοντας την ένταση των πεδίων κατευθύνουμε τη δέσμη των ηλεκτρονίων.

Η τρίτη είναι η οθόνη στην οποία παρατηρούμε τη θέση όπου προσπίπτουν τα ηλεκτρόνια. Ο σωλήνας απέναντι από το τηλεβόλο είναι επιστρωμένος με ειδικό υλικό που

έχει την ιδιότητα να φθορίζει, δηλαδή να εκπέμπει φως, όταν πάνω του προσπίπτουν σωματίδια με μεγάλη ταχύτητα. Πάνω σ' αυτό το τμήμα του σωλήνα, που αποτελεί την οθόνη, πέφτουν με μεγάλη ταχύτητα τα ηλεκτρόνια της δέσμης. Στο σημείο στο οποίο πέφτουν τα ηλεκτρόνια η οθόνη φθορίζει έντονα και δημιουργείται μια φωτεινή κηλίδα.

Πλακίδια
οριζόντιας
απόκλισης

Εστίαση Πλακίδια
κατακόρυφης
απόκλισης

Πλέγμα
ελέγχου

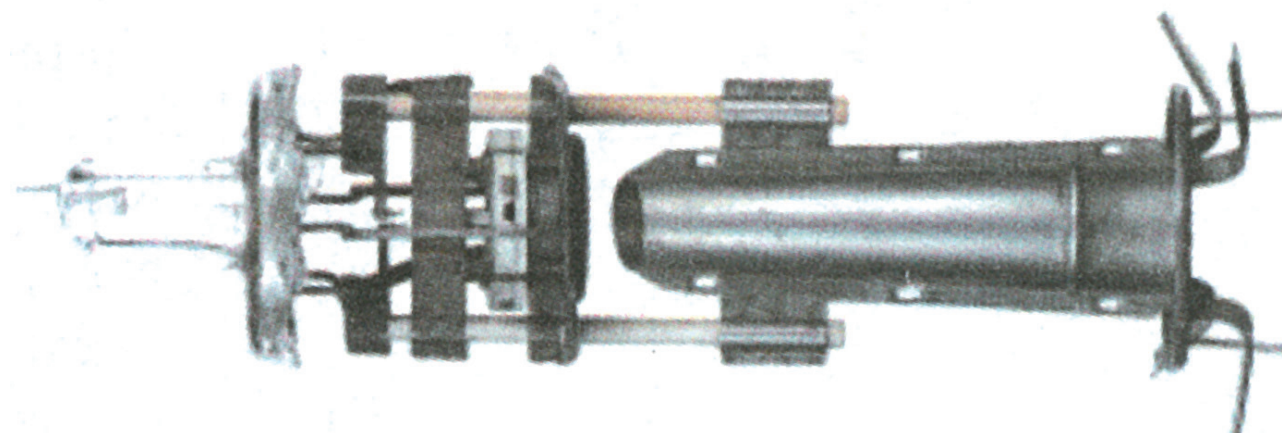
Θερμαι-
νόμενο
νήμα

Κάθοδος Επιταχύνουσα
άνοδος

ΣΧ. 3.30

Στο αριστερό άκρο του σχήματος 3.30 φαίνεται το τηλεβόλο. Τα ηλεκτρόνια παράγονται εκεί με τη θέρμανση ενός μεταλλικού νήματος (κάθοδος). Θερμαίνοντας ένα μέταλλο δίνουμε σε κάποια από τα ελεύθερα ηλεκτρόνιά του κινητική ενέργεια αρκετή για να το εγκαταλείψουν. Στη συνέχεια τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται ανάμεσα στην κάθοδο και σε ένα άλλο ηλεκτρόδιο (άνοδος). Η άνοδος βρίσκεται σε δυναμικό υψηλότερο από το δυναμικό της καθόδου και φέρει οπή. Τα περισσότερα ηλεκτρόνια που επιταχύνονται προς την άνοδο προσκρούουν σ' αυτή. Όσα από αυτά περνάνε από την οπή σχηματίζουν δέσμη και κινούνται προς την οθόνη με την οριζόντια ταχύτητα που απέκτησαν. Η

διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου είναι μερικά kV. Έτσι, η ταχύτητα που αποκτούν τα ηλεκτρόνια είναι της τάξεως των 10^7 m / s.



Εικ. 3.3 Τηλεβόλο ηλεκτρονίων.

Στο τηλεβόλο, υπάρχουν διατάξεις που επιτρέπουν τον έλεγχο του αριθμού των ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς την οθόνη και την εστίαση της δέσμης.

Το εσωτερικό του καθοδικού σωλήνα βρίσκεται σε υψηλό κενό (περίπου 10^{-7} atm). Έτσι ελαχιστο-

ποιούνται οι κρούσεις των ηλεκτρονίων της δέσμης με τα μόρια του αέρα που περιέχονται σ' αυτόν.

Η δέσμη των ηλεκτρονίων διέρχεται στη συνέχεια ανάμεσα από δύο ζεύγη μεταλλικών πλακιδίων (πλακίδια απόκλισης). Στο ένα ζεύγος τα μεταλλικά πλακίδια είναι οριζόντια και το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται ανάμεσά τους εκτρέπει τη δέσμη των ηλεκτρονίων κατακόρυφα. Το άλλο ζεύγος πλακιδίων είναι κατακόρυφο και εκτρέπει τη δέσμη των ηλεκτρονίων οριζόντια. Οι σχέσεις (3.39), (3.41) δείχνουν ότι η απόκλιση είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται μεταξύ των πλακιδίων. Έτσι το σημείο της οθόνης στο οποίο προσπίπτει η δέσμη εξαρτάται από τις τάσεις που

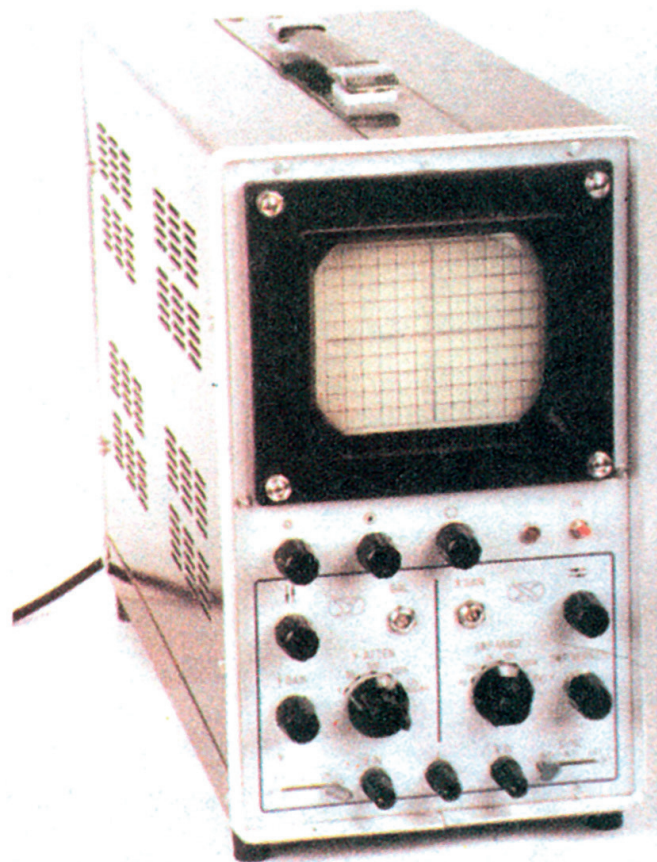
εφαρμόζουμε σε κάθε χρονική στιγμή στα δύο ζεύγη πλακιδίων. Εάν η διαφορά δυναμικού και στα δύο ζεύγη πλακιδίων απόκλισης είναι μηδενική τα ηλεκτρόνια της δέσμης κινούνται χωρίς να αποκλίνουν από την ευθύγραμμη τροχιά τους και προσκρούουν στο κέντρο της οθόνης.

Μετά την έξοδο από τα πεδία των πλακιδίων απόκλισης και μέχρι την πρόσκρουση στη φθορίζουσα οθόνη τα ηλεκτρόνια κινούνται ευθύγραμμα ομαλά.

Ο καθοδικός σωλήνας αποτελεί το βασικό στοιχείο του παλμογράφου. Πιο σύνθετες παραλλαγές του, πάνω όμως στην ίδια αρχή λειτουργίας, αποτελούν οι οθόνες της τηλεόρασης και του υπολογιστή.

ΠΑΛΜΟΓΡΑΦΟΣ

Μια ειδική εφαρμογή του καθοδικού σωλήνα είναι ο παλμογράφος. Το κύριο στοιχείο ενός παλμογράφου είναι ένας καθοδικός σωλήνας του οποίου η οθόνη είναι βαθμολογημένη ώστε να μας επιτρέπει να κάνουμε μετρήσεις.

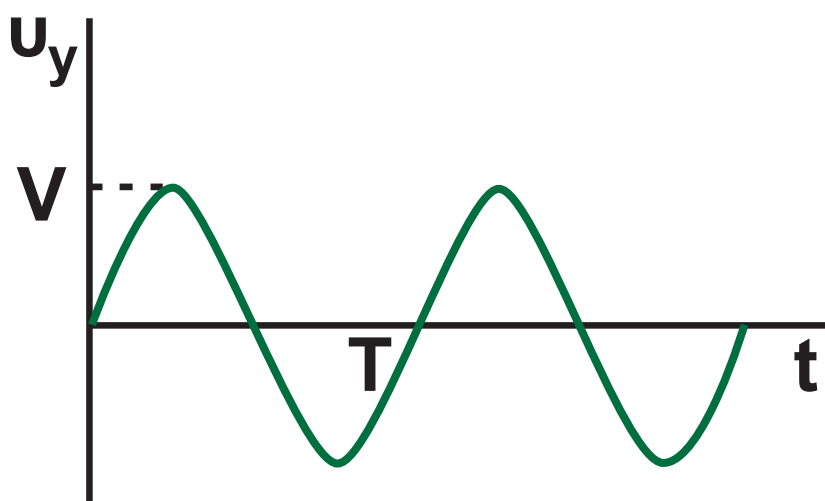


Εικ. 3.4 Παλμογράφος.

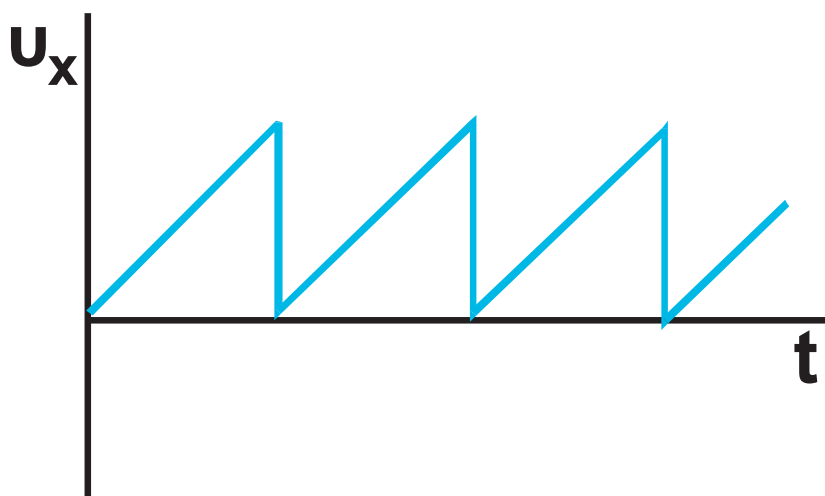
Εξωτερικά ο παλμογράφος είναι ένα κουτί με μια οθόνη στην μπροστινή πλευρά και διάφορους ρυθμιστές (κουμπιά). Με τους ρυθμιστές υπάρχει η δυνατότητα:

- α) Να ρυθμίζεται η φωτεινότητα της κηλίδας. Η ρύθμιση αυτή αντιστοιχεί σε μεταβολή της τάσης που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια στο τηλεβόλο.**
- β) Να ρυθμίζεται η τάση «σάρωσης» για την οποία θα μιλήσουμε πιο κάτω.**
- γ) Να εφαρμόζεται εξωτερικά τάση στα πλακίδια οριζόντιας και κατακόρυφης απόκλισης.**
- δ) Να εστιάζεται η δέσμη ώστε η κηλίδα να γίνεται όσο το δυνατό μικρότερη και να ξεχωρίζει καθαρά.**

Εάν μεταξύ των πλακιδίων κατακόρυφης εκτροπής εφαρμόσουμε μια τάση που μεταβάλλεται με τον χρόνο, έστω μια τάση της μορφής $u_y = V \sin \omega t$ (εναλλασσόμενη τάση) (σχ. 3.31) και στα πλακίδια οριζόντιας εκτροπής δεν εφαρμόζεται τάση η φωτεινή κηλίδα θα κινείται πάνω - κάτω σύμφωνα με τις αυξομειώσεις της u_y . Για εναλλασσόμενες τάσεις όπως αυτή του δικτύου της ΔΕΗ η κηλίδα κινείται τόσο γρήγορα (50 φορές το δευτερόλεπτο) ώστε το μάτι να τη βλέπει σαν μια κατακόρυφη γραμμή.



Σχ. 3.31 Εναλλασόμενη τάση.



Σχ. 3.32 Πριονωτή τάση.

Τάση σάρωσης

Εάν μεταξύ των πλακιδίων οριζόντιας εκτροπής εφαρμόσουμε τάση u_x η οποία αυξάνεται γραμμικά και στη συνέχεια ελαττώνεται απότομα (πριονωτή τάση σχ. 3.32) η κηλίδα στην οθόνη θα κινείται οριζόντια και ισοταχώς από τα αριστερά προς τα δεξιά και θα επιστρέφει απότομα πίσω, για να ξαναρχίσει πάλι την ίδια κίνηση. Αυτή η παλινδρομική οριζόντια κίνηση της κηλίδας ονομάζεται σάρωση της οθόνης. Την τάση σάρωσης την εφαρμόζει ο ίδιος ο παλμογράφος και υπάρχει δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας της u_x ώστε να επιτυγχάνουμε γρήγορη ή αργή σάρωση.

Μερικές από τις πιο απλές χρήσεις του παλμογράφου είναι:

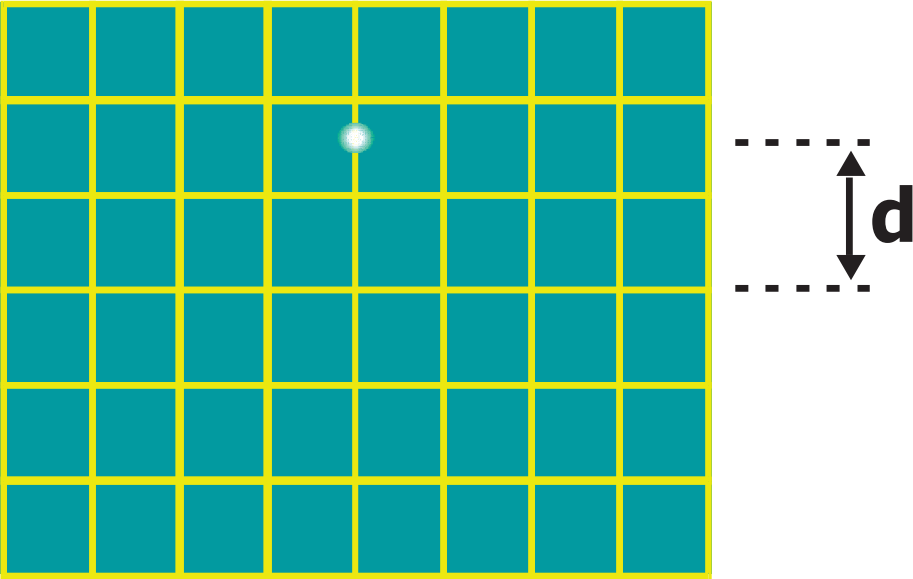
α) Μέτρηση συνεχούς τάσεως

Απενεργοποιούμε την τάση σάρωσης και εφαρμόζουμε την τάση V που θέλουμε να μετρήσουμε στα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης. Η κηλίδα αποκλίνει κατακόρυφα (σχ. 3.33α). Από την απόσταση της κηλίδας από το κέντρο της οθόνης μπορούμε να βρούμε την εφαρμοζόμενη συνεχή τάση V .

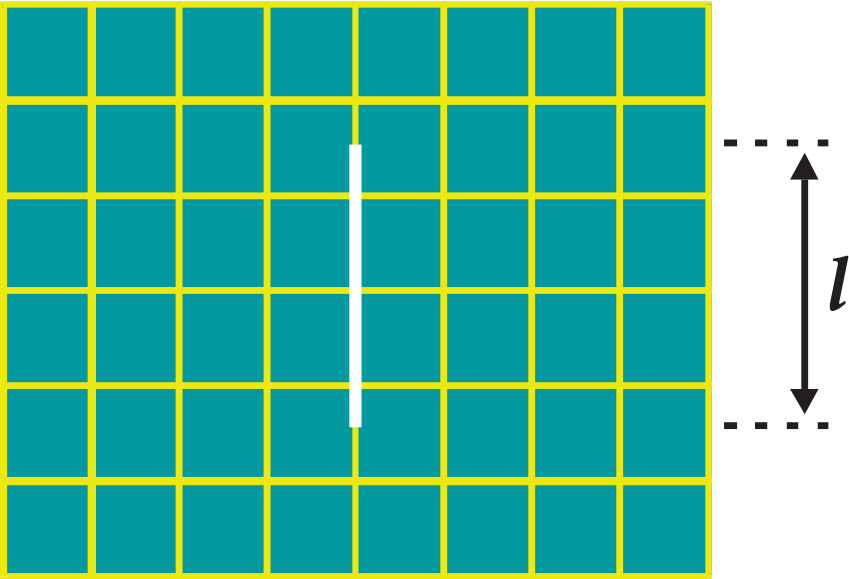
β) Μέτρηση εναλλασσόμενης τάσης

Απενεργοποιούμε την τάση σάρωσης και στα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης εφαρμόζουμε τάση

της μορφής $u_y = V \eta \mu \omega t$ (εναλλασσόμενη τάση) (σχ. 3.31). Η κηλίδα θα ανεβοκατεβαίνει γρήγορα κατά κύρυφα και στην οθόνη του παλμογράφου θα σχηματιστεί μια κατακόρυφη γραμμή (σχ. 3.33β). Από το μήκος της γραμμής μπορούμε να υπολογίσουμε το V (πλάτος της εναλλασσόμενης τάσης). Συγκεκριμένα το μήκος της γραμμής είναι ανάλογο του $2V$.



(α)



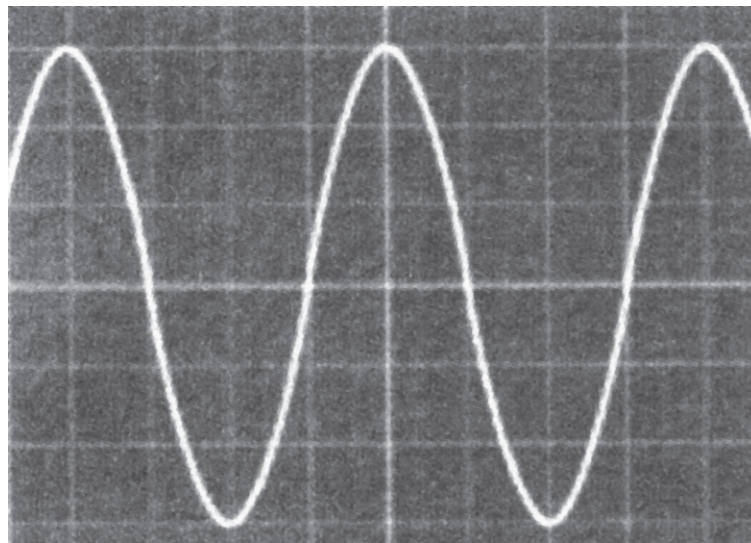
(β)

Σχ. 3.33 (α) Συνεχής τάση V εφαρμόζεται στα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης, η απόσταση d της κηλίδας από το κέντρο της οθόνης είναι ανάλογη της τάσης V . **(β)** Εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται στα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης, το μήκος της γραμμής στην οθόνη είναι ανάλογο του διπλάσιου πλάτους της εναλλασσόμενης τάσης.

γ) Μελέτη κυματομορφών

Εφαρμόζουμε ταυτόχρονα τη u_x (τάση σάρωσης), στα πλακίδια οριζόντιας απόκλισης και τη u_y (εναλλασσόμενη) στα πλακίδια κατακόρυφης απόκλισης. Αυτό που προκύπτει στην οθόνη είναι μια κυματοειδής γραμμή (εικ. 3.5) που ονομάζεται κυ-

ματομορφή της τάσης u_y . Μπορούμε έτσι να παρακολουθήσουμε στην οθόνη του παλμογράφου και να μελετήσουμε τάσεις που μεταβάλλονται με το χρόνο, όπως η εναλλασσόμενη αλλά και πιο σύνθετες.



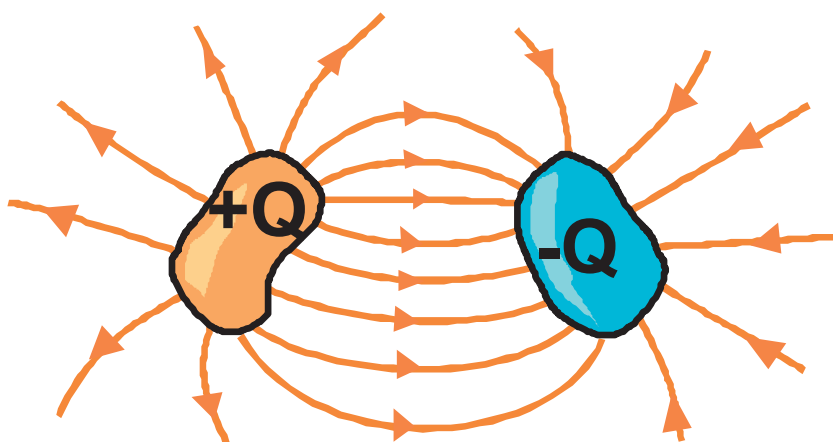
Εικ. 3.5 Η κυματομορφή μιας εναλλασσόμενης τάσης όπως φαίνεται στην οθόνη του παλμογράφου.

Επειδή τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρή μάζα, η απόκλιση της δέσμης των ηλεκτρονίων στον καθοδικό

σωλήνα συμβαίνει σχεδόν ακαριαία και ο παλμογράφος έχει τη δυνατότητα να δείξει πολύ γρήγορες μεταβολές στην τάση.

3-9 ΠΥΚΝΩΤΗΣ ΚΑΙ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ο πυκνωτής είναι μια διάταξη που αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο και ηλεκτρική δυναμική ενέργεια. Ένας πυκνωτής αποτελείται από δύο αγωγούς που βρίσκονται κοντά και χωρίζονται μεταξύ τους από το κενό, τον αέρα, ή από άλλο μονωτή. Οι αγωγοί του σχήματος 3.34 αποτελούν έναν πυκνωτή. Οι δύο αγωγοί που αποτελούν τον πυκνωτή ονομάζονται οπλισμοί.



Σχ. 3.34 Ένας πυκνωτής αποτελείται από δύο γειτονικούς αγωγούς φορτισμένους. Οι αγωγοί φορτίζονται με φορτία $+Q$ και $-Q$.

Πυκνωτής ονομάζεται σύστημα δύο γειτονικών αγωγών (οπλισμοί), που χωρίζονται μεταξύ τους με κάποιο μονωτικό υλικό. Οι αγωγοί φορτίζονται με φορτία $+Q$ και $-Q$.

Φορτίο του πυκνωτή ονομάζεται το θετικό φορτίο του ενός από τους οπλισμούς του, ενώ τάση του πυ-

κνωτή ονομάζεται η διαφορά δυναμικού V , μεταξύ των οπλισμών του. Σε έναν πυκνωτή αποθηκεύεται πολύ πιο εύκολα φορτίο, από ό,τι σε κάθε ένα μεμονωμένο αγωγό από αυτούς που αποτελούν τον πυκνωτή.

Σε κάθε πυκνωτή η τάση του είναι ανάλογη του φορτίου του, δηλαδή το πηλίκο του φορτίου προς την τάση είναι σταθερό. Το πηλίκο αυτό το ονομάζουμε χωρητικότητα του πυκνωτή.

Χωρητικότητα C ενός πυκνωτή ονομάζεται το σταθερό πηλίκο του φορτίου του (Q) προς την τάση του (V).

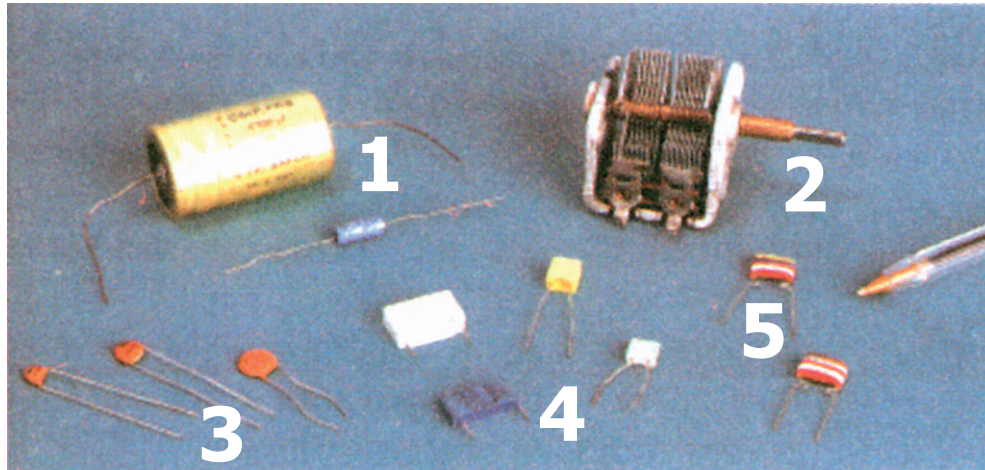
$$C = \frac{Q}{V}$$

Μονάδα χωρητικότητας είναι το Farad, που συμβολίζεται με το F. $1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$.

Ονομάζεται έτσι προς τιμήν του Michael Faraday, ο οποίος μεταξύ των άλλων, ερεύνησε και το θέμα της χωρητικότητας. Το 1 Farad είναι πολύ μεγάλη χωρητικότητα. Οι χωρητικότητες των πυκνωτών που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι της τάξης του μικροφαράντ, ($1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F}$), του νανοφαράντ, ($1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$) και του πικοφαράντ, ($1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$).

Οι πυκνωτές παριστάνονται με δύο μικρές παράλληλες ισοϋψείς γραμμές, με ακροδέκτες συνδεδεμένους στο μέσον τους.





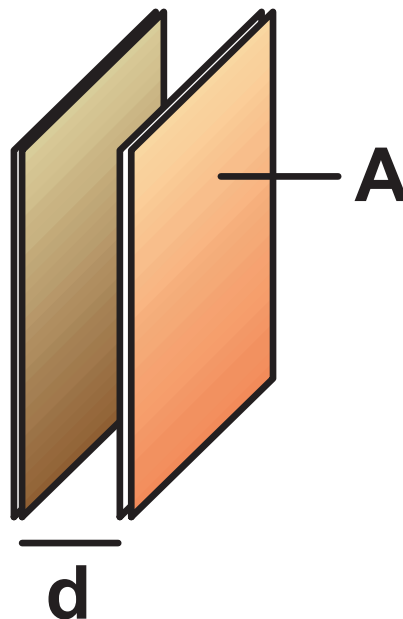
Εικ. 3.6 Τύποι πυκνωτών.

Υπάρχουν πολλοί τύποι πυκνωτών. Στην εικόνα 3.6 φαίνονται μερικοί από αυτούς. Συνήθως παίρνουν το όνομά τους από το σχήμα των οπλισμών τους. Ο σφαιρικός πυκνωτής αποτελείται από δύο ομόκεντρους σφαιρικούς αγωγούς και ο κυλινδρικός από δύο ομοαξονικούς κυλινδρικούς αγωγούς. Ο επίπεδος πυκνωτής αποτελείται από δύο επίπεδες παράλληλες, μεταλλικές πλάκες, ίδιας επιφάνειας A , που απέχουν μεταξύ τους απόσταση d

και βρίσκονται η μια απέναντι στην άλλη.

Η χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή είναι ανάλογη της επιφάνειας A των οπλισμών και αντίστροφα ανάλογη της απόστασης d μεταξύ των οπλισμών.

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$



Σχ. 3.35 Επίπεδος πυκνωτής.

Γενικότερα η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία της διάταξης (δηλαδή από το μέγεθος, το σχήμα, τις σχετικές θέσεις των δύο αγωγών) και από το είδος του μονωτικού υλικού (ονομάζεται και διηλεκτρικό) ανάμεσα στους οπλισμούς του.

Οι πυκνωτές αποτελούν βασικά στοιχεία των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Όταν γυρίζουμε το κουμπί του ραδιοφώνου για να επιλέξουμε σταθμό μεταβάλλουμε τη χωρητικότητα ενός πυκνωτή. Το φως που εκπέμπει το φλας της φωτογραφικής μηχανής προέρχεται από την εκφόρτιση ενός πυκνωτή. Οι πυκνωτές χρησιμοποιούνται ακόμα στους καθοδικούς σωλήνες, στα τσιπ των

υπολογιστών και σε χιλιάδες άλλες εφαρμογές.



Εικ. 3.7 Η λειτουργία του φλας της φωτογραφικής μηχανής στηρίζεται στην εκφόρτιση ενός πυκνωτή διαμέσου μιας λυχνίας ξένου. Καθώς εκφορτίζεται ο πυκνωτής το αέριο ξένο ιονίζεται με αποτέλεσμα την έντονη αναλαμπή μικρής διάρκειας.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.8

Οι οπλισμοί ενός επίπεδου πυκνωτή έχουν επιφάνεια $A = 4 \text{ cm}^2$ και η απόστασή τους είναι $d = 2 \text{ mm}$. Υπολογίστε:

- α) Τη χωρητικότητά του.
- β) Το φορτίο που θα αποκτήσει ο πυκνωτής αν συνδεθεί σε πηγή τάσης $V = 12 \text{ V}$. Δίνεται $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / (\text{N m}^2)$

Απάντηση:

Η χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d},$$

από την οποία, με αντικατάσταση, βρίσκουμε:

123 / 105

$$C = (8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}) \frac{4 \times 10^{-4} m^2}{2 \times 10^{-3} m} =$$

$$= 17,7 \times 10^{-13} = 1,77 \text{ pF}$$

Το φορτίο του πυκνωτή, όταν συνδεθεί με την πηγή, θα είναι:

$$Q = CV = 1,77 \text{ pF } 12 \text{ V} = 21,24 \text{ pC} =$$

$$= 21,24 \times 10^{-12} \text{ C}$$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.9

Ένας επίπεδος πυκνωτής έχει χωρητικότητα $10 \mu\text{F}$ και φορτίζεται σε πηγή με τάση $V = 100 \text{ V}$. Στη συνέχεια, αφού αποσυνδεθεί από την πηγή, οι οπλισμοί του απομακρύνονται έως ότου η απόσταση μετα-

ξύ τους διπλασιαστεί. Να υπολογιστούν:

- α) η νέα χωρητικότητα του πυκνωτή και**
- β) η τάση του μετά την απομάκρυνση των οπλισμών του.**

Απάντηση:

Η αρχική χωρητικότητα του πυκνωτή υπολογίζεται από τη σχέση

$$C_o = \epsilon_o \frac{A}{d} \quad (3.42)$$

Όταν διπλασιάσουμε την απόσταση των οπλισμών του, η χωρητικότητά του γίνεται

$$C = \epsilon_o \frac{A}{2d} \quad (3.43)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (3.43) και (3.42) παίρνουμε:

$$C = \frac{C_0}{2} = 5 \mu F$$

Το φορτίο στους οπλισμούς του θα παραμείνει ίδιο και μετά την απομάκρυνση των οπλισμών. Εφόσον ο πυκνωτής δε συνδέεται με κάποιο κύκλωμα οι οπλισμοί του είναι απομονωμένοι αγωγοί και θα διατηρήσουν το φορτίο τους. Αφού με την απομάκρυνση των οπλισμών η χωρητικότητα μεταβάλλεται, αλλά το φορτίο μένει το ίδιο, θα αλλάξει η τάση στους οπλισμούς του πυκνωτή. Αν η νέα τάση του πυκνωτή είναι V' μπορούμε να γράψουμε

$$C = \frac{Q}{V'} \quad (3.44)$$

Πριν την απομάκρυνση των οπλισμών του, η χωρητικότητα του πυκνωτή ήταν:

$$C_o = \frac{Q}{V} \quad (3.45)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (3.45) και (3.44) παίρνουμε:

$$\frac{C_o}{C} = \frac{V'}{V} \quad \text{ή} \quad V' = \frac{C_o}{C} V \quad \text{επομένως}$$

$$V' = 200 \text{ V}$$

3-10 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΜΕΝΗ ΣΕ ΦΟΡΤΙΣΜΕΝΟ ΠΥΚΝΩΤΗ

Σε προηγούμενη παράγραφο είδαμε ότι όλες οι διατάξεις φορτίου έχουν ορισμένη ηλεκτρική δυναμική ενέργεια U , ίση με το έργο που

απαιτείται για να τοποθετηθούν τα φορτία στις θέσεις τους. Ένας φορτισμένος πυκνωτής έχει δυναμική ενέργεια U η οποία δίνεται από τη σχέση

$$U = \frac{1}{2} C V^2 \quad (3.46)$$

Η ενέργεια του φορτισμένου πυκνωτή αποδίδεται κατά την εκφόρτισή του. Αν ενώσουμε τους δύο οπλισμούς του πυκνωτή με έναν αγωγό θα μετακινηθούν φορτία από τον έναν οπλισμό στον άλλο μέχρι οι δύο οπλισμοί να αποκτήσουν το ίδιο δυναμικό. Τότε λέμε ότι ο πυκνωτής εκφορτίστηκε. Κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή η αποθηκευμένη ηλεκτρική δυναμική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα

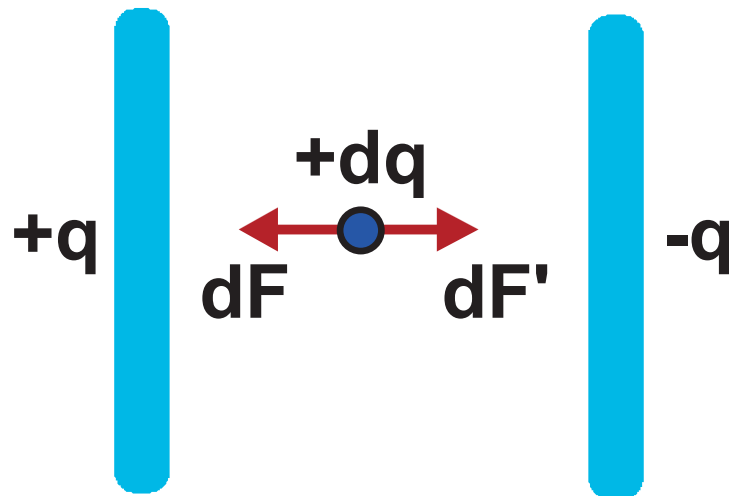
στον αγωγό που συνδέει τους οπλισμούς.

Υπολογισμός της ενέργειας φορτισμένου πυκνωτή

Για να υπολογίσουμε τη δυναμική ενέργεια που έχει αποθηκευμένη ένας φορτισμένος πυκνωτής, ας φανταστούμε μια υποθετική διαδικασία φόρτισης: Σε έναν αρχικά αφόρτιστο πυκνωτή παίρνουμε μικρές ποσότητες φορτίου $+dq$ από τον έναν οπλισμό και τις τοποθετούμε στον άλλο. Ο οπλισμός από τον οποίο αφαιρείται θετικό φορτίο θα φορτιστεί αρνητικά ενώ ο οπλισμός στον οποίο προσθέτουμε θετικό φορτίο, θα φορτιστεί θετικά. Έστω q_0 και V_0 οι τελικές τιμές για το φορτίο και την τάση του πυκνωτή.

Η μεταφορά του πρώτου φορτίου dq από τον έναν οπλισμό στον άλλο γίνεται χωρίς να καταναλώσουμε έργο. Με την απόσπαση όμως του πρώτου φορτίου $+dq$ από τον έναν οπλισμό και την εγκατάστασή του στον άλλο, ο πρώτος οπλισμός θα έχει φορτίο $-dq$ και ο δεύτερος $+dq$. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πεδίου. Τώρα πια, η μεταφορά νέου φορτίου dq απαιτεί προσπάθεια (έργο), εξ αιτίας της δύναμης $dF' = Edq$ που ασκεί το πεδίο στο φορτίο. Η δύναμη dF που μετακινεί το φορτίο πρέπει να εξουδετερώσει τη δύναμη dF' του πεδίου. Όσο προχωράει η φόρτιση του πυκνωτή, το ηλεκτρικό του πεδίο θα γίνεται πιο ισχυρό και θα απαιτείται ολοένα και μεγαλύτερο έργο για τη μετακίνηση φορτίου

dq . Το έργο της δύναμης dF είναι θετικό και ίσο απολύτως με το έργο της δύναμης dF' του πεδίου.



Σχ. 3.36 Ο πυκνωτής φορτίζεται με τη μεταφορά απειροστά μικρών φορτίων dq από τον έναν οπλισμό στον άλλο.

Αν κάποια στιγμή η τάση του πυκνωτή είναι V , το έργο της δύναμης που απαιτείται για τη μετακίνηση φορτίου dq , από τον έναν οπλισμό στον άλλο είναι

$$dW = V dq.$$

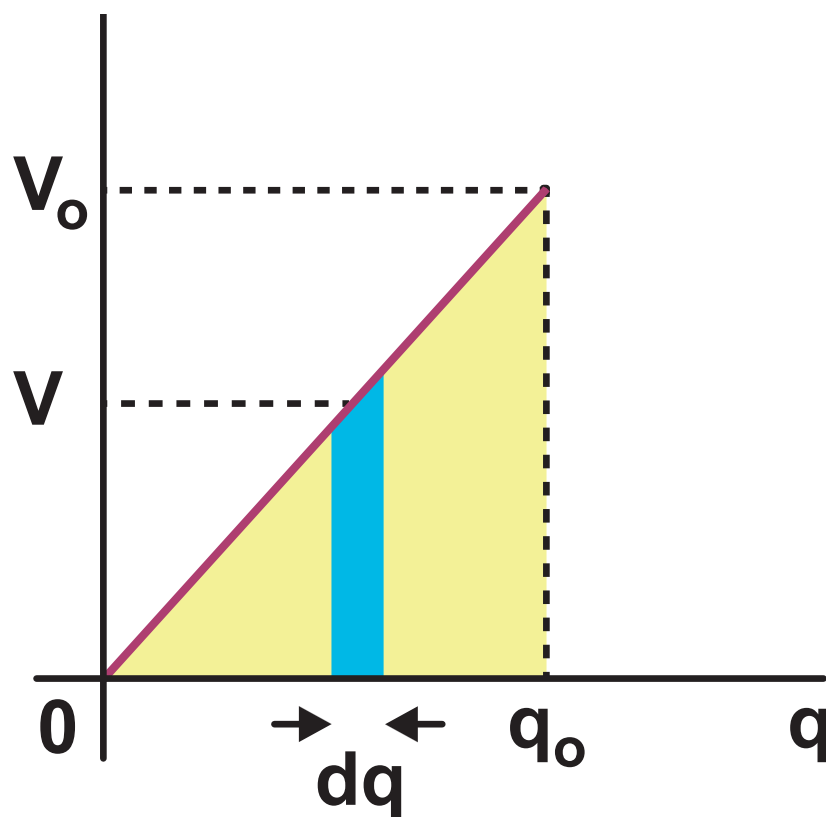
$$\text{Ισχύει } C = \frac{q}{V} \text{ ή } V = \frac{1}{C} q$$

Η γραφική παράσταση της σχέσης $V = f(q)$ από τη στιγμή που το φορτίο του πυκνωτή είναι μηδέν μέχρι να αποκτήσει την τελική του τιμή q_0 , είναι ευθεία που περνάει από την αρχή των αξόνων (σχ. 3.37). Από τη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι αν το σχήμα με το μπλε χρώμα μπορεί να θεωρηθεί παραλληλόγραμμο -και μπορεί να θεωρηθεί αν το dq είναι απειροστά μικρό- το εμβαδόν του θα είναι ίσο με $V \cdot dq$ και θα δίνει το έργο που απαιτείται για τη μεταφορά του φορτίου dq . Το συνολικό έργο που απαιτείται για να φορτιστεί ο πυκνωτής θα είναι ίσο με το εμβαδόν του τριγώνου από τη γραμμή του διαγράμματος μέχρι τον άξονα q , δηλαδή

$$W = \frac{1}{2} q_0 V_0 \quad \text{ή} \quad W = \frac{1}{2} C V_0^2$$

Επομένως η δυναμική ενέργεια του φορτισμένου πυκνωτή είναι

$$U = \frac{1}{2} C V_0^2$$

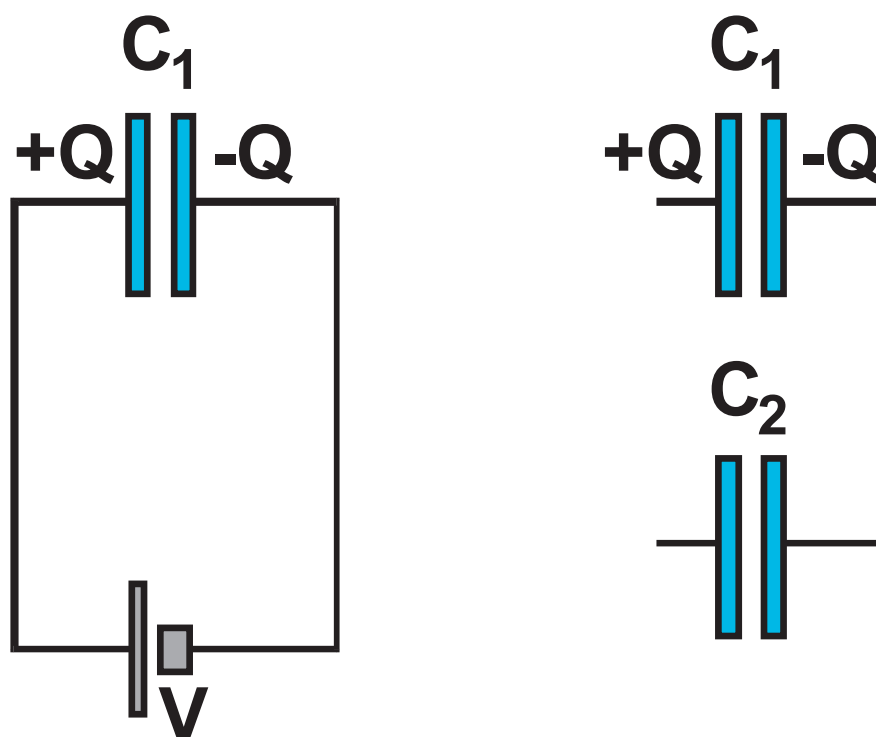


Σχ. 3.37 Από τη γραφική παράσταση της σχέσης $V = q/C$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια του πυκνωτή.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3.10

Πυκνωτής χωρητικότητας $C_1 = 4 \mu\text{F}$, φορτίζεται από την πηγή, τάσης $V = 20 \text{ V}$, με φορτίο Q . Στη συνέχεια ο πυκνωτής αποσυνδέεται από την πηγή και συνδέεται με αφόρτιστο πυκνωτή χωρητικότητας $C_2 = 12 \mu\text{F}$ όπως στο σχήμα 3.39:

- α) Να υπολογιστεί η κοινή τάση V' που θα αποκτήσουν οι πυκνωτές μετά τη σύνδεσή τους.
- β) Το φορτίο που θα αποκτήσει κάθε πυκνωτής μετά τη σύνδεση.
- γ) Με τη σύνδεση των δυο πυκνωτών μεταβάλλεται η ενέργεια του συστήματος. Πόσο μεταβλήθηκε η ενέργεια; Πού οφείλεται η μεταβολή αυτή;



Σχ. 3.38

Απάντηση:

Ο πυκνωτής χωρητικότητας C_1 , κατά τη σύνδεσή του με την πηγή απέκτησε φορτίο

$$Q = C_1 V = 80 \mu\text{C}$$

Μετά την αποσύνδεση της πηγής και τη σύνδεση των δύο πυκνωτών μεταξύ τους, ένα μέρος του φορτίου Q μετακινείται ώστε να φορτιστεί και ο πυκνωτής C_2 . Οι πυκνωτές C_1 και

C_2 αποκτούν φορτία Q_1 και Q_2 , αντίστοιχα και η (κοινή) διαφορά δυναμικού στους οπλισμούς γίνεται V' .

α) Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης του φορτίου:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3.47)$$

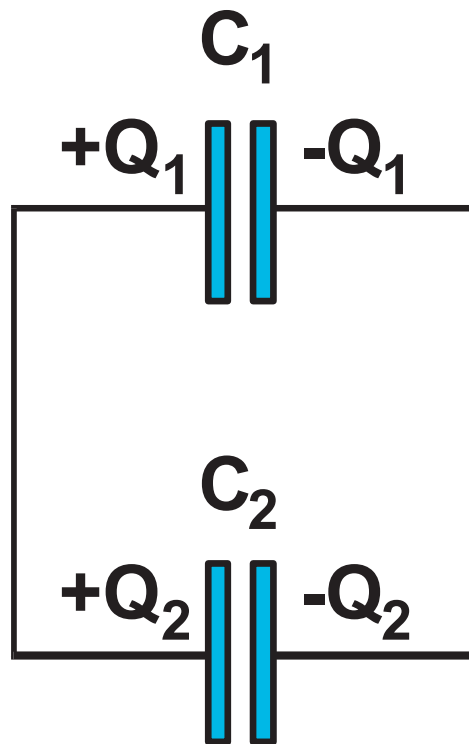
Για κάθε ένα από τους πυκνωτές ισχύει:

$$Q_1 = C_1 V' \text{ και } Q_2 = C_2 V' \quad (3.48)$$

Αντικαθιστώντας τις (3.48) στην (3.47) έχουμε:

$$Q = C_1 V' + C_2 V' \text{ ή } Q = (C_1 + C_2) V'$$

$$\text{επομένως } V' = \frac{Q}{C_1 + C_2} = 5 \text{ V}$$



Σχ. 3.39

β) Αντικαθιστώντας την τιμή του V' στις σχέσεις (3.48) υπολογίζουμε τα φορτία που απέκτησαν οι πυκνωτές:

$$Q_1 = 20 \mu\text{C} \text{ και } Q_2 = 60 \mu\text{C}$$

Παρατηρούμε ότι ο πυκνωτής με τη μεγαλύτερη χωρητικότητα «κρατάει» και το περισσότερο φορτίο.

γ) Η ενέργεια του συστήματος μεταβλήθηκε κατά

$$\begin{aligned}\Delta U &= U_{\text{μετά}} - U_{\text{πριν}} = \\ &= \frac{1}{2} C_1 V'^2 + \frac{1}{2} C_2 V'^2 - \frac{1}{2} C_1 V^2 = \\ &= -6 \times 10^{-4} \text{ J}\end{aligned}$$

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι η ενέργεια του συστήματος ελαττώθηκε. Η ηλεκτρική ενέργεια που χάθηκε από το σύστημα έγινε θερμότητα στους αγωγούς κατά τη μετακίνηση φορτίου από τον έναν πυκνωτή στον άλλο.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

Ηλεκτρική ροή - Νόμος του Gauss

3.1 Η ηλεκτρική ροή που περνάει από μια κλειστή επιφάνεια εξαρτάται:

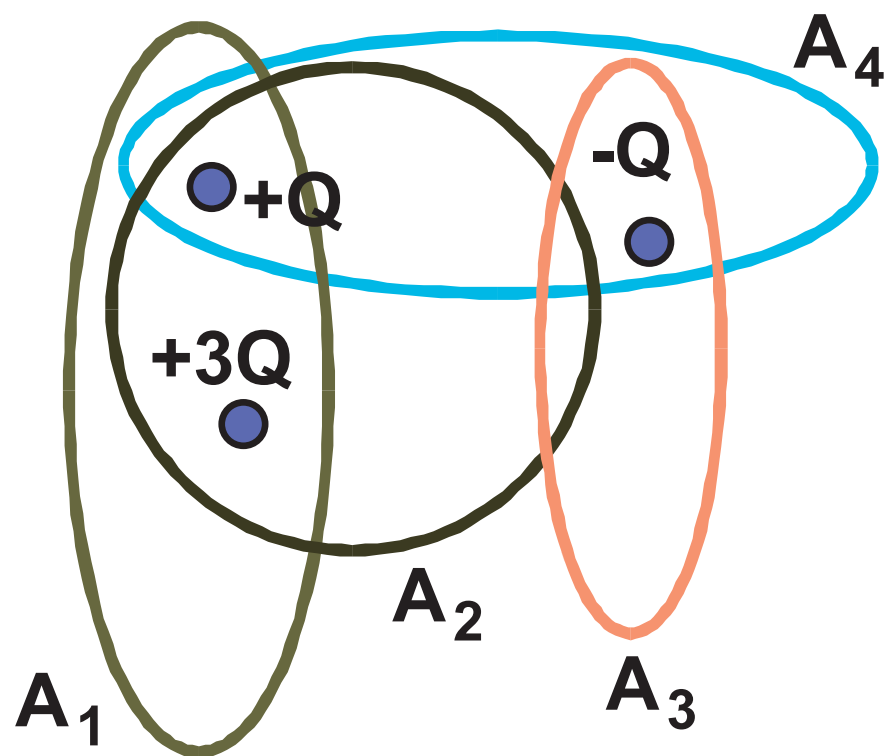
- α)** Μόνο από το φορτίο που περικλείει η επιφάνεια.
- β)** Από το φορτίο που περικλείει η επιφάνεια και από το σχήμα της.
- γ)** Από το συνολικό φορτίο που δημιουργεί το πεδίο, δηλαδή από φορτία που βρίσκονται εντός ή εκτός της επιφάνειας.
- δ)** Από το συνολικό φορτίο που υπάρχει μέσα και έξω από την επιφάνεια και από το σχήμα της.

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

3.2 Σε μια κλειστή επιφάνεια εισέρχονται περισσότερες δυναμικές γραμμές από όσες εξέρχονται. Τι συμπεραίνετε για το είδος του φορτίου που περικλείει η επιφάνεια;

3.3 Στο σχήμα 3.54 απεικονίζονται τέσσερις κλειστές επιφάνειες A_1 , A_2 , A_3 , A_4 καθώς και τα φορτία $+Q$, $-Q$ και $+3Q$. Αν Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 και Φ_4 είναι η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την αντίστοιχη επιφάνεια. Αντιστοιχίστε στα στοιχεία της πρώτης στήλης στοιχεία της δεύτερης.

Φ_1	$-Q/\epsilon_0$
Φ_2	$2Q/\epsilon_0$
Φ_3	$3Q/\epsilon_0$
Φ_4	0
	$4Q/\epsilon_0$
	$-Q$



$\Sigma\chi$. 3.54

- 3.4 Στο εσωτερικό μιας σφαίρας υπάρχουν τα φορτία $+Q$ και $-Q$. Ποιες από τις επόμενες προτάσεις είναι σωστές;**
- α) Η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από τη σφαίρα είναι μηδέν.**
 - β) Την επιφάνεια της σφαίρας δεν τη διαπερνούν δυναμικές γραμμές.**
 - γ) Το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια της σφαίρας είναι μηδέν.**
 - δ) Ο αριθμός των δυναμικών γραμμών που εισέρχονται στη σφαίρα είναι ίσος με τον αριθμό των δυναμικών γραμμών που εξέρχονται από αυτήν.**

3.5 Ένα σημειακό φορτίο βρίσκεται στο κέντρο σφαιρικής επιφάνειας. Η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια μεταβάλλεται όταν:

- α) το φορτίο μετακινηθεί από το κέντρο αλλά παραμένει μέσα στην σφαίρα.**
- β) το φορτίο μετακινηθεί έξω από τη σφαίρα.**
- γ) τοποθετηθεί δεύτερο φορτίο κοντά, αλλά έξω από τη σφαίρα.**

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

- 3.6 Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν και αφορούν στο φορτίο και το ηλεκτρικό πεδίο φορτισμένου σφαιρικού αγωγού είναι σωστές;**
- α) Το φορτίο του αγωγού κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το χώρο που καταλαμβάνει.**
 - β) Στο εσωτερικό του ο αγωγός δεν είναι φορτισμένος.**
 - γ) Το πεδίο έξω από τον αγωγό είναι όμοιο με το πεδίο που δημιουργεί ένα σημειακό φορτίο.**
 - δ) Στο εσωτερικό του αγωγού, το μέτρο της έντασης είναι αντίστροφα ανάλογο της απόστασης από το κέντρο του σφαιρικού αγωγού.**

3.7 Να παρασταθεί γραφικά το μέτρο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί σφαιρικός φορτισμένος αγωγός ακτίνας R , σε συνάρτηση με την απόσταση x από το κέντρο του αγωγού, για $x < R$ και $x > R$.

Δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου - ενέργεια συστήματος σημειακών φορτίων

3.8 Φορτίο q , μετακινείται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο, από το σημείο A στο σημείο B . Το έργο της δύναμης του πεδίου:

- α) Είναι μικρότερο αν το φορτίο ακολουθήσει την πιο σύντομη διαδρομή.**
- β) Είναι ίδιο σε όλες τις δυνατές διαδρομές.**

γ) Εξαρτάται από την ταχύτητα με την οποία μετακινείται το φορτίο.

δ) Εξαρτάται από το πόσο χρόνο διαρκεί η μετακίνηση.

Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

3.9 Συμπληρώστε τα κενά.

Εάν μετακινηθεί ένα σημειακό φορτίο q από σημείο Α σε σημείο Β, μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο, το έργο της δύναμης του πεδίου είναι ίσο με το γινόμενο των δύο σημείων επί το φορτίο q που μετακινείται. Το έργο αυτό είναι ανεξάρτητο που ακολουθεί το φορτίο κατά τη μετακίνησή του από το Α στο Β. Τέτοια πεδία, όπως το ηλεκτρικό, που το έργο τους εξαρτάται

μόνο από την αρχική και τελική θέση του σώματος που μετακινείται ονομάζονται

3.10 Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV) είναι

- α) Το φορτίο του ηλεκτρονίου;**
- β) Μονάδα δυναμικού;**
- γ) Μονάδα έντασης ηλεκτρικού πεδίου;**
- δ) Μονάδα έργου ή ενέργειας;**

**3.11 Το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο που απέχει απόσταση r από το σημειακό φορτίο στο οποίο οφείλεται το πεδίο είναι -200 V . Ένα άλλο σημείο που απέχει απόσταση $2r$ από το σημειακό φορτίο έχει δυναμικό α) -100 V ; β) -50 V ; γ) -200 V ; δ) -400 V ;
Δικαιολογήστε την απάντησή σας.**

3.12 Δύο σημειακά φορτία $+Q$ και $-Q$ είναι τοποθετημένα στα σημεία A και B ευθύγραμμου τμήματος AB. Ποια από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστή;

- α) Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο M του τμήματος AB είναι μηδέν.**
- β) Το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο M του τμήματος AB είναι μηδέν.**
- γ) Η δυναμική ενέργεια του συστήματος των δύο φορτίων είναι μηδέν.**
- δ) Η δυναμική ενέργεια του συστήματος των δύο φορτίων είναι θετική.**

3.13 Διατρέχοντας μια δυναμική γραμμή κατά τη φορά της έντασης, τα δυναμικά

- α) Αυξάνονται.**
 - β) Ελαττώνονται.**
 - γ) Έχουν την ίδια τιμή.**
 - δ) Τίποτα από τα παραπάνω.**
- Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.**

3.14 Ένα αρνητικό φορτίο, αφήνεται μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Το φορτίο θα κινηθεί:

- α) Προς τα εκεί που τα δυναμικά αυξάνονται.**
- β) Προς τα εκεί που τα δυναμικά μειώνονται.**
- γ) Προς την κατεύθυνση που το δυναμικό έχει την ίδια τιμή.**
- δ) Η κατεύθυνση στην οποία θα κινηθεί δεν έχει να κάνει με το δυναμικό.**

Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

3.15 Δικαιολογήστε την πρόταση:
«Το δυναμικό ενός ηλεκτροστα-
τικά φορτισμένου αγωγού είναι
ίδιο σε όλα του τα σημεία».

**3.16 Να παρασταθεί γραφικά το
δυναμικό σφαιρικού αγωγού
ακτίνας R , φορτισμένου με θε-
τικό φορτίο Q , σε συνάρτηση
με την απόσταση x από το κέ-
ντρο του, για $x < R$ και $x > R$.**

Ομογενές ηλεκτρικό πεδίο

**3.17 Η διαφορά δυναμικού μεταξύ
δύο σημείων A και B , που βρί-
σκονται πάνω στην ίδια δυνα-
μική γραμμή μέσα σε ομογενές
ηλεκτρικό πεδίο**
α) δεν εξαρτάται από την από-
σταση των σημείων A και B .

- β) είναι ανάλογη με την απόστασή τους.
- γ) είναι ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασής τους.
- δ) είναι αντίστροφα ανάλογη με την απόστασή τους.
- Επιλέξτε τη σωστή απάντηση.

3.18 Ένα ηλεκτρόνιο εκτοξεύεται με ταχύτητα u_0 παράλληλα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου, στην κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών. Η κίνηση που θα κάνει είναι:

- α) Ευθύγραμμη ομαλή.
- β) Ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη.
- γ) Ευθύγραμμη ομαλά επιβραδυνόμενη.

Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

3.19 Ένα ηλεκτρόνιο εκτοξεύεται με ταχύτητα u_0 κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Η κίνηση που θα κάνει

- α) είναι ευθύγραμμη ομαλή.**
 - β) είναι ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη.**
 - γ) έχει σταθερή επιτάχυνση.**
 - δ) είναι κυκλική.**
- Ποια πρόταση είναι σωστή;**

3.20 Η επιτάχυνση που αποκτάει φορτισμένο σωματίδιο μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο

- α) Μένει σταθερή.**
- β) Έχει σταθερό μέτρο αλλά η κατεύθυνσή της εξαρτάται από την κατεύθυνση της αρχικής ταχύτητας του σωματιδίου.**

- γ) Είναι ανάλογη με τη μάζα του.
δ) Είναι αντίστροφα ανάλογη με το φορτίο του.
ε) Είναι ανάλογη με την ένταση του πεδίου.
Επιλέξτε τις σωστές προτάσεις.

- 3.21 Πρωτόνια και πυρήνες He (He: ήλιον, ατομικός αριθμός 2, μαζικός αριθμός 4) βάλλονται με την ίδια ταχύτητα κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από ζεύγος φορτισμένων πλακιδίων. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές;
- α) Ο χρόνος κίνησης όλων των σωματιδίων μέσα στο πεδίο είναι ίδιος.
β) Η δύναμη που δέχονται οι

πυρήνες ηλίου είναι μεγαλύτερη από τη δύναμη που δέχονται τα πρωτόνια.

γ) Τα πρωτόνια αποκτούν μεγαλύτερη επιτάχυνση από τους πυρήνες ηλίου.

δ) Οι πυρήνες του ηλίου υφίστανται τη μεγαλύτερη εκτροπή.

3.22 Δέσμη ηλεκτρονίων, με την ίδια ταχύτητα, εισέρχεται κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από ζεύγος φορτισμένων πλακιδίων. Αν αυξηθεί η τάση ανάμεσα στα φορτισμένα πλακίδια που δημιουργούν το πεδίο:

1) Ο χρόνος εξόδου των ηλεκτρονίων από το πεδίο:

- α) αυξάνεται;
 - β) μειώνεται;
 - γ) παραμένει ίδιος;
- 2) Η εκτροπή που υφίσταται η δέσμη από το πεδίο:
- α) αυξάνεται;
 - β) μειώνεται;
 - γ) παραμένει ίδια;
- Επιλέξτε τις σωστές απαντήσεις.**

3.23 Με ποιο τρόπο παράγονται και επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια στον καθοδικό σωλήνα; Σε τι χρησιμεύουν τα πλακίδια απόκλισης στον καθοδικό σωλήνα; Γιατί είναι απαραίτητο στο εσωτερικό του να υπάρχει κενό αέρα;

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Ηλεκτρική ροή - νόμος του Gauss

3.43 Ένας δίσκος ακτίνας $r = 0,2 \text{ m}$ βρίσκεται μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης $E = 500 \text{ N / C}$. Υπολογίστε την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από το δίσκο, αν:

- α) Είναι τοποθετημένος με το επίπεδό του κάθετο στις δυναμικές γραμμές του πεδίου.
- β) Το επίπεδό του είναι παράλληλο στις δυναμικές γραμμές.
- γ) Η κάθετη στο επίπεδό του σχηματίζει με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου γωνία 60° .

[Απ: α) $62,8 \text{ Nm}^2/\text{C}$, β) 0, γ) $31,4 \text{ Nm}^2/\text{C}$]

**3.44 Μια κλειστή επιφάνεια περι-
κλείει φορτίο $10 \mu\text{C}$. Ποια είναι
η ηλεκτρική ροή που περνάει
από την επιφάνεια;**

Δίνεται:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2).$$

$$[\text{Απ: } 1,13 \times 10^6 \text{ (Nm}^2/\text{C)}]$$

**3.45 Η ηλεκτρική ροή που διέρχε-
ται από μια κλειστή επιφάνεια
είναι $\Phi = 2 \text{ Nm}^2/\text{C}$. Υπολογίστε
το φορτίο που περικλείει η επι-
φάνεια.**

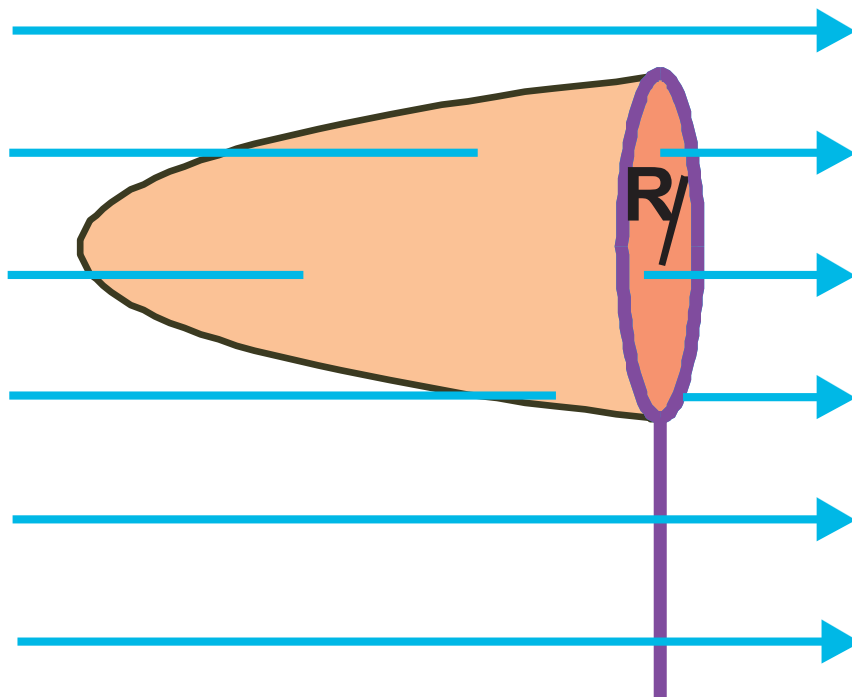
Δίνεται:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2).$$

$$[\text{Απ: } 17,7 \times 10^{-12} \text{ C}]$$

**3.46 Μια απόχρη είναι τοποθετημέ-
νη μέσα σε ομογενές ηλεκτρι-
κό πεδίο έντασης E με τρόπο
ώστε η κυκλική στεφάνη της**

να είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές του (σχ. 3.55). Υπολογίστε την ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την επιφάνεια που ορίζει το δίκτυ της απόχης. Δίνονται η ένταση E του πεδίου και η ακτίνα R της κυκλικής στεφάνης της απόχης. [Απ: $-E\pi R^2$]



Σχ. 3.55

**3.47 Όπως γνωρίζετε, στην ατμόσφαιρα υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Τις ημέρες με καλοκαιρία το πεδίο είναι ασθενές. Αν μια τέτοια μέρα το πεδίο, κοντά στην επιφάνεια της Γης, έχει μέτρο $E = 100 \text{ N / C}$, κατεύθυνση κατακόρυφη προς τα κάτω, και υποθέσουμε ότι είναι παντού (σε όλη την επιφάνεια της Γης) το ίδιο, υπολογίστε το φορτίο που φέρει η Γη. Δίνεται η ακτίνα της Γης $R_{\Gamma} = 6400 \text{ km}$ και η σταθερά $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$.
[Απ: -455,295 C]**

3.48 Ένας λεπτός σφαιρικός φλοιός ακτίνας $R = 20 \text{ cm}$ φέρει ηλεκτρικό φορτίο $Q = 24 \text{ } \mu\text{C}$, ομοιόμορφα κατανεμημένο στην επιφάνειά του. Να υπολογιστεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε σημεία που απέχουν από το κέντρο του

α) $r_1 = 40 \text{ cm}$, και

β) $r_2 = 10 \text{ cm}$.

Δίνεται:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2).$$

[Απ: α) $1,35 \times 10^6 \text{ N/C}$ β) μηδέν]

3.49 Μια σφαίρα ακτίνας $R = 1 \text{ m}$, από μονωτικό υλικό, φέρει φορτίο $Q = 12 \text{ } \mu\text{C}$, ομοιόμορφα κατανεμημένο σε ολόκληρο τον όγκο της. Πόση είναι η ηλεκτρική ροή που διέρχεται από μια σφαιρική επιφάνεια, ομόκεντρη με τη φορτισμένη σφαίρα, ακτίνας
α) 20 cm β) 60 cm γ) 80 cm
δ) $1,2 \text{ m}$ ε) 2 m ;

Ο όγκος σφαίρας ακτίνας r υπολογίζεται από τη σχέση

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3.$$

Δίνεται:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2).$$

$$[\text{Απ: } \alpha) 10,8 \times 10^3 \text{ Nm}^2/\text{C}$$

$$\beta) 29,2 \times 10^4 \text{ Nm}^2/\text{C}$$

$$\gamma) 69,4 \times 10^4 \text{ Nm}^2/\text{C}$$

$$\delta) 135 \times 10^4 \text{ Nm}^2/\text{C}$$

$$\epsilon) 135 \times 10^4 \text{ Nm}^2/\text{C}]$$

3.50 Ένα σύρμα πολύ μεγάλου μήκους έχει φορτίο $4 \mu\text{C}$ ανά μέτρο μήκους του. Υπολογίστε την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί το σύρμα σε απόσταση α) 10 cm και β) 20 cm από το σύρμα.

Δίνεται:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2).$$

$$[\text{Απ: } 720 \times 10^3 \text{ N/C, } 360 \times 10^3 \text{ N/C}]$$

Δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου - ενέργεια συστήματος φορτίων

3.51 Σημειακό φορτίο $Q = 2 \times 10^{-7} \text{ C}$ δημιουργεί πεδίο που σε ένα σημείο του Α έχει δυναμικό $V = 300 \text{ V}$. Να υπολογιστεί η απόσταση του σημείου Α από το φορτίο. Δίνεται η σταθερά $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.
[Απ: 6 m]

3.52 Σημειακό φορτίο $q = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$ βρίσκεται τοποθετημένο στο ευθύγραμμο τμήμα ΑΒ, μήκους 3 m σε απόσταση 2 m από το Α (μεταξύ των Α και Β). Υπολογίστε τη διαφορά δυναμικού $V_A - V_B$.
Δίνεται η σταθερά $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.
[Απ: -90 V]

3.53 Το πεδίο που δημιουργεί ένα σημειακό φορτίο Q σε ένα σημείο A έχει ένταση $E = 60 \text{ N/C}$ και δυναμικό $V = 180 \text{ V}$. Να υπολογίσετε το φορτίο και την απόσταση του σημείου A από το σημειακό φορτίο Q . Δίνεται η σταθερά $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.
[Απ: $6 \times 10^{-8} \text{ C}$, 3 m]

3.54 Σημειακό φορτίο $Q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$, βρίσκεται στο σημείο A . Να υπολογίσετε το έργο της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου κατά τη μετακίνηση φορτίου $q = 10^{-8} \text{ C}$ από ένα σημείο B , το οποίο απέχει $r_1 = (AB) = 1 \text{ cm}$ από το φορτίο Q , σε σημείο Γ , το οποίο απέχει $r_2 = (A\Gamma) = 4 \text{ cm}$ από το Q . Δίνεται: $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.
[Απ: $13,5 \times 10^{-3} \text{ J}$]

3.55 Στις κορυφές Β και Γ, ορθογώνιου τριγώνου ΑΒΓ, με $\hat{A} = 90^\circ$, βρίσκονται τα φορτία $Q_1 = 4 \times 10^{-8} \text{ C}$ και $Q_2 = 5 \times 10^{-8} \text{ C}$. Αν $AB = 3 \text{ cm}$ και $AG = 4 \text{ cm}$, να υπολογιστούν:

- α) Τα δυναμικά στα σημεία Α και Μ, όπου Μ το μέσον της ΒΓ.
- β) Το έργο που παράγεται από το ηλεκτρικό πεδίο κατά τη μετακίνηση φορτίου $2 \times 10^{-10} \text{ C}$ από το σημείο Α στο Μ.
- Δίνεται: $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.
- [Απ: 23250 V, 32400 V, $-183 \times 10^{-8} \text{ J}$]

3.56 Σε κάθε κορυφή ενός ισόπλευρου τριγώνου ΑΒΓ, πλευράς $a = 30 \text{ cm}$, βρίσκεται φορτίο $q = 2 \mu\text{C}$. Να υπολογιστεί η

ενέργεια του συστήματος των τριών φορτίων.

Δίνεται: $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.

[Απ: $36 \times 10^{-2} \text{ J}$]

3.57 Ακίνητο σημειακό φορτίο

$Q = 100 \text{ } \mu\text{C}$, βρίσκεται στο σημείο A. Μικρή σφαίρα με μάζα $m = 10 \text{ g}$ και φορτίο $q = 20 \text{ nC}$ βρίσκεται στο σημείο B, στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με το A και σε απόσταση $r_1 = 30 \text{ cm}$ από αυτό. Αν η σφαίρα που βρίσκεται στο σημείο B αφεθεί ελεύθερη, λόγω της απωστικής δύναμης που δέχεται, κινείται χωρίς τριβές. Να υπολογίσετε την ταχύτητά της:

α) Όταν βρίσκεται σε απόσταση $r_2 = 60 \text{ cm}$ από το A.

β) Όταν βρίσκεται σε πολύ με-

γάλη απόσταση από το σημείο A.

Δίνεται: $K_c = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2/\text{C}^2$.

[Απ: α) $\sqrt{6} \text{ m / s}$, β) $2\sqrt{3} \text{ m / s}$]

Ομογενές ηλεκτρικό πεδίο

3.58 Σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, κατά μήκος μιας δυναμικής γραμμής, βρίσκονται, διαδοχικά, τα σημεία A, B και Γ. Εάν $V_A - V_B = 5 \text{ V}$ και οι αποστάσεις μεταξύ των σημείων είναι $AB = x$ και $B\Gamma = x$, ποια είναι η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα σημεία A-Γ και B-Γ;
[Απ: 10 V, 5 V]

3.59 Ο αέρας είναι μονωτής, αλλά για ηλεκτρικό πεδίο έντασης μεγαλύτερης από $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ γίνεται αγωγός (δημιουργείται ηλεκτρικός σπινθήρας). Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων σε ένα μπουζί είναι περίπου 0,5 mm. Πόση είναι η ελάχιστη διαφορά δυναμικού που πρέπει να εφαρμοστεί στα ηλεκτρόδια, ώστε να παραχθεί ηλεκτρικός σπινθήρας; Θεωρήστε το πεδίο που δημιουργείται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ομογενές.
[Απ: 1500 V]

**3.60 Στο ομογενές ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει ανάμεσα σε δυο οριζόντιες πλάκες με φορτία $+Q$ και $-Q$, αιωρείται (ισορροπεί) σωματίδιο μάζας $m = 10^{-3} \text{ kg}$ και φορτίου $q = 5 \times 10^{-7} \text{ C}$. Αν οι δύο πλάκες απέχουν μεταξύ τους απόσταση $l = 2 \text{ cm}$, να υπολογιστεί η διαφορά δυναμικού που παρουσιάζουν. Δίνεται $g = 10 \text{ m/s}^2$.
[Απ: 400 V]**

3.61 Ανάμεσα σε δύο παράλληλες κατακόρυφες μεταλλικές πλάκες, που είναι φορτισμένες με φορτία $+Q$ και $-Q$, ισορροπεί μια μικρή φορτισμένη σφαίρα εκκρεμούς, σε θέση τέτοια ώστε το νήμα του να σχηματίζει γωνία 6° με την κατακόρυφο. Οι δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες απέχουν απόσταση $d = 10 \text{ cm}$ και παρουσιάζουν διαφορά δυναμικού $V = 200 \text{ V}$. Η σφαίρα του εκκρεμούς έχει μάζα $m = 2 \text{ mg}$. Να υπολογιστεί το φορτίο της σφαίρας. Δίνονται $g = 10 \text{ m/s}^2$, $\varepsilon\varphi 6^\circ = 0,1$.
[Απ: 10^{-9} C]

3.62 Ηλεκτρόνιο βάλλεται με ταχύτητα $u_0 = 2 \times 10^4 \text{ m/s}$ παράλληλα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου έντασης $E = 91 \text{ V / m}$.

- α) Να υπολογιστεί η δύναμη που δέχεται το ηλεκτρόνιο και η επιτάχυνση που θα αποκτήσει.**
- β) Να γραφούν οι σχέσεις που περιγράφουν την κίνησή του μέσα στο πεδίο. Εξετάστε τις περιπτώσεις στις οποίες η ταχύτητα του ηλεκτρονίου είναι I) ομόρροπη και II) αντίρροπη προς τις δυναμικές γραμμές.**

Δίνονται η μάζα του ηλεκτρονίου $m_e = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ και το στοιχειώδες φορτίο $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

[Απ: $1,456 \times 10^{-17} \text{ N}$,
 $16 \times 10^{12} \text{ m/s}^2$]

3.63 Ηλεκτρόνιο βάλλεται με ταχύτητα u_0 ομόρροπη με τις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτροστατικού πεδίου έντασης E . Να βρεθεί σε πόσο χρόνο θα μηδενιστεί στιγμιαία η ταχύτητά του, σε πόσο χρόνο θα επιστρέψει στην αρχική του θέση και τι ταχύτητα θα έχει τότε. Σχολιάστε το αποτέλεσμα. Δίνονται η μάζα του ηλεκτρονίου m_e και το στοιχειώδες φορτίο e .
[Απ: $m u_0 / E \cdot e$, $2 m u_0 / E \cdot e$, $-u_0$]

3.64 Δέσμη ηλεκτρονίων εισέρχεται κάθετα στις δυναμικές γραμμές ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου που σχηματίζουν δύο παράλληλες φορτισμένες πλάκες. Αν η ταχύτητα των ηλεκτρονίων της δέσμης είναι u_0 να βρεθεί η απόκλιση που θα υποστεί η δέσμη από το πεδίο καθώς και η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από το πεδίο. Δίνονται η ταχύτητα u_0 , το μήκος l των φορτισμένων πλακών, η ένταση E του πεδίου, η μάζα του ηλεκτρονίου m_e και το στοιχειώδες φορτίο e .

$$[\text{Απ: } y = \frac{Eel^2}{2m_e u_0^2}, u = \sqrt{u_0^2 + \frac{E^2 e^2 l^2}{m_e^2 u_0}},$$

$$\varphi = \frac{Eel}{m_e u_0^2}]$$

Χωρητικότητα - ενέργεια φορτισμένου πυκνωτή

3.65 Πυκνωτής χωρητικότητας 6 pF, φορτίζεται σε διαφορά δυναμικού 12 V. Να υπολογιστεί το φορτίο του.
[Απ: 72 pC]

3.66 Οι οπλισμοί επίπεδου πυκνωτή έχουν σχήμα δίσκου ακτίνας 4 cm και απέχουν μεταξύ τους 1 mm. Τι φορτίο θα αποκτήσει ο πυκνωτής όταν συνδεθεί σε τάση $V = 10 \text{ V}$; Δίνεται:
 $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2)$.
[Απ: 444,6 pC]

3.67 Οι οπλισμοί ενός επίπεδου πυκνωτή έχουν εμβαδόν $A = 72 \text{ cm}^2$ και απέχουν μεταξύ τους $d = 1,2 \text{ mm}$. Στον πυκνωτή εφαρμόζεται τάση $V = 12 \text{ V}$. Υπολογίστε:

α) Την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των οπλισμών του.

β) Τη χωρητικότητά του.

γ) Το φορτίο του.

Δίνεται:

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N m}^2).$$

$$[\text{Απ: } 10^4 \text{ V / m, } 53,1 \text{ pF, } 637,2 \text{ pC}]$$

3.68 Επίπεδος πυκνωτής με χωρητικότητα $C = 10 \text{ }\mu\text{F}$ συνδέεται με πηγή που τον φορτίζει σε τάση $V = 100 \text{ V}$. Χωρίς να απομακρυνθεί ο πυκνωτής από την πηγή διπλασιάζουμε την

**απόσταση των οπλισμών του.
Να υπολογιστούν:**

α) Η νέα χωρητικότητα του πυκνωτή.

**β) Το φορτίο του πυκνωτή
πριν και μετά την απομάκρυνση των οπλισμών του.**

[Απ: 5 μF , 1000 μC , 500 μC]

**3.69 Πυκνωτής χωρητικότητας
 $C = 20 \mu\text{F}$ φορτίζεται σε τάση
 $V = 500 \text{ V}$. Πόση ενέργεια μπορεί να δώσει ο πυκνωτής αν εκφορτιστεί;
[Απ: 2,5 J]**

3.70 Πυκνωτής χωρητικότητας $C_1 = 20 \mu\text{F}$ φορτίζεται σε τάση $V_1 = 80 \text{ V}$. Ο πυκνωτής αποσυνδέεται από την πηγή που τον φόρτισε και συνδέεται με αφόρτιστο πυκνωτή χωρητικότητας $C_2 = 5 \mu\text{F}$. Να υπολογιστούν:

- α) Η τάση που θα αποκτήσουν οι δύο πυκνωτές μετά τη σύνδεσή τους.**
- β) Το φορτίο κάθε πυκνωτή μετά τη σύνδεση.**
- γ) Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια που θα χαθεί με τη σύνδεση των δύο πυκνωτών.**

[Απ: α) 64 V , β) $1280 \mu\text{C}$, $320 \mu\text{C}$ γ) $12,8 \times 10^{-3} \text{ J}$]

ΠΙΝΑΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΩΝ - ΧΡΗΣΙΜΑ ΜΕΓΕΘΗ

ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΦΥΣΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

Όνομα

Ταχύτητα του φωτός

Φορτίο ηλεκτρονίου (απόλυτη τιμή)

Βαρυτική σταθερά

Σταθερά Planck

Σταθερά Boltzmann

Σταθερά Avogadro

Σταθερά των αερίων

Μάζα ηλεκτρονίου

Μάζα νετρονίου

Μάζα πρωτονίου

Διηλεκτρική σταθερά του κενού

Σταθερά Coulomb

Μαγνητική διαπερατότητα του κενού

Σύμβολο Τιμή

c	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$
e	$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
G	$6,67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$
h	$6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
k	$1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$
N_A	$6,022 \times 10^{23} \text{ μόρια/mol}$
R	$8,314 \text{ J / mol} \cdot \text{K}$
m_e	$9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$
m_n	$1,675 \times 10^{-27} \text{ kg}$
m_p	$1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$
ε_o	$8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$
K_c	$9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$
μ_o	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb / A} \cdot \text{m}$

ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΙΜΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ

Όνομα

Μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας

Κανονική ατμοσφαιρική πίεση

Απόλυτο μηδέν

Ηλεκτρονιοβόλτ

Ενέργεια ηρεμίας ηλεκτρονίου

Γραμμομοριακός όγκος ιδανικού
αερίου (s.t.p.)

Σύμβολο Τιμή

	4,186 J / cal
1 atm	$1,013 \times 10^5 \text{ P (N / m}^2\text{)}$
0 K	−273 °C
1 eV	$1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$
mc^2	0,511 MeV
V_{mol}	22,4 L / mol

ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ ΟΡΩΝ

A

αδιαβατική μεταβολή: μεταβολή στη διάρκεια της οποίας το σύστημα δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον.

αδιαβατικό τοίχωμα: τοίχωμα που δεν επιτρέπει την ανταλλαγή θερμότητας.

ακτίνα Schwarzschild: η μέγιστη ακτίνα που πρέπει να έχει ένα ουράνιο σώμα μάζας M για να είναι μαύρη τρύπα.

ακτινοβολία Cerenkov: ορατή ακτινοβολία που προέρχεται από τις κρούσεις φορτισμένων σωματιδίων με τα άτομα.

αμοιβαία επαγωγή: η εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ένα κύκλωμα εξαιτίας της μεταβολής

του ρεύματος σε ένα άλλο κύκλωμα.

ανόρθωση εναλλασσόμενης τάσης: η μετατροπή της σε συνεχή τάση.

αντιστρεπτή μεταβολή: μεταβολή στην οποία υπάρχει δυνατότητα επαναφοράς του συστήματος και του περιβάλλοντος στην αρχική τους κατάσταση.

απόλυτη θερμοκρασία: η θερμοκρασία στην κλίμακα Kelvin. Το μηδέν της κλίμακας είναι το απόλυτο μηδέν.

απόλυτο μηδέν: η θερμοκρασία κάτω από την από την οποία δεν είναι δυνατό να φτάσουμε. Αντιστοιχεί στους $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ατμομηχανή: είδος θερμικής μηχανής. Σε αυτή το «μέσον» είναι το νερό, δεξαμενή υψηλής θερμοκρασίας

ο λέβητας όπου θερμαίνεται το νερό και δεξαμενή χαμηλής θερμοκρασίας ο συμπυκνωτής όπου ψύχεται το νερό.

αυτεπαγωγή: η εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ένα κύκλωμα όταν μεταβάλλεται το ρεύμα που το διαρρέει.

B

βαρυτικό πεδίο: ο χώρος στον οποίο όταν βρεθεί μια μάζα θα δεχθεί δύναμη.

βόρειο σέλας: φωτεινό φαινόμενο που εκδηλώνεται κοντά στο βόρειο πόλο της Γης και οφείλεται στις κρούσεις φορτισμένων σωματιδίων με τα άτομα του αέρα.

βρασμός: φαινόμενο κατά το οποίο ένα υγρό μεταβαίνει στην αέρια φάση από όλη τη μάζα του.

Γ

γαλβανόμετρο: όργανο που δείχνει αν περνάει ρεύμα.

γραμμική πυκνότητα φορτίου: το πηλίκο του φορτίου Δq που αντιστοιχεί σε μήκος Δl ενός αγωγού προς το μήκος αυτό.

Δ

διατηρητικό πεδίο: πεδίο στο οποίο η δύναμη που ασκεί δεν παράγει έργο κατά τη μετακίνηση του υποθέματος σε κλειστή τροχιά.

διαφορά δυναμικού (μεταξύ δύο σημείων βαρυτικού πεδίου): το πηλίκο του έργου που παράγει ή καταναλώνει η δύναμη του πεδίου κατά τη μετακίνηση μιας μάζας m από το ένα σημείο στο άλλο προς τη μάζα αυτή.

διαφορά δυναμικού (μεταξύ δύο σημείων ηλεκτρικού πεδίου): το πηλίκο του έργου που παράγει ή καταναλώνει η δύναμη του πεδίου κατά τη μετακίνηση φορτίου q από το ένα σημείο στο άλλο προς το φορτίο αυτό.

διηλεκτρική αντοχή: η τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου πάνω από την οποία το διηλεκτρικό συμπεριφέρεται ως αγωγός.

διηλεκτρική σταθερά (διηλεκτρικού): ο λόγος της χωρητικότητας ενός πυκνωτή με το διηλεκτρικό προς τη χωρητικότητα του ίδιου πυκνωτή στο κενό.

διηλεκτρικό: σώμα στο οποίο δεν μπορούν να κινηθούν ηλεκτρικά φορτία, ο μονωτής.

δίοδος: συσκευή που επιτρέπει την κίνηση των ηλεκτρονίων μόνο προς μία κατεύθυνση.

δύναμη Laplace: η δύναμη που δέχεται ρευματοφόρος αγωγός που βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο.

δύναμη Lorentz: η δύναμη που δέχεται ένα ηλεκτρικό φορτίο που κινείται σε μαγνητικό πεδίο.

δύναμη κεντρική: η δύναμη αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο μαζών ή δύο φορτίων που έχει τη διεύθυνση της ευθείας που ορίζεται από τα κέντρα μάζας ή τα κέντρα φορτίων αντίστοιχα.

δυναμικό βαρυτικού πεδίου: το σταθερό πηλίκο του έργου που παράγει η δύναμη του πεδίου κατά τη μετακίνηση μάζας m από ένα σημείο του πεδίου μέχρι το άπειρο προς τη μάζα αυτή.

δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου: το σταθερό πηλίκο του έργου που παράγει η δύναμη του πεδίου κατά

τη μετακίνηση φορτίου q από ένα σημείο του πεδίου μέχρι το άπειρο προς το φορτίο αυτό.
δυναμό: γεννήτρια.

Ε

ειδική γραμμομοριακή θερμότητα υπό σταθερή πίεση (C_p): το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσφέρουμε σε 1 mol αερίου, του οποίου η πίεση μένει σταθερή, για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά 1°C .

ειδική γραμμομοριακή θερμότητα υπό σταθερό όγκο (C_v): το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσφέρουμε σε 1 mol αερίου, του οποίου ο όγκος είναι σταθερός για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά 1°C .

ειδική γραμμομοριακή θερμότητα: το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσφέρουμε στη μονάδα μάζας του υλικού για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ειδική θερμότητα: το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσφέρουμε σε 1 g του υλικού για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

εκτόνωση ελεύθερη: η αύξηση του όγκου του αερίου που γίνεται χωρίς παραγωγή έργου, η ανεμπόδιστη αύξηση του όγκου ενός αερίου.

εναλλακτήρας: η γεννήτρια εναλλασσόμενης τάσης.

εναλλασσόμενο ρεύμα: ρεύμα του οποίου η ένταση είναι αρμονική συνάρτηση του χρόνου.

ενεργός ένταση (εναλλασσόμενου ρεύματος): η ένταση ενός συνεχούς

ρεύματος που έχει τα ίδια θερμικά αποτελέσματα με το εναλλασσόμενο. ενεργός τάση (εναλλασσόμενης τάσης): η τιμή της συνεχούς τάσης που όταν εφαρμόζεται σε μια αντίσταση δίνει ρεύμα με ένταση ίση με την ενεργό τιμή του εναλλασσόμενου ρεύματος που προκαλεί η εναλλασσόμενη τάση.

ενεργός ταχύτητα: η τετραγωνική ρίζα της μέσης τιμής των τετραγώνων των ταχυτήτων.

ένταση βαρυτικού πεδίου: το πηλίκο της δύναμης που δέχεται μάζα m σε ένα σημείο του πεδίου προς τη μάζα αυτή.

ένταση ηλεκτρικού πεδίου: το πηλίκο της δύναμης που δέχεται φορτίο q σε ένα σημείο του πεδίου προς το φορτίο αυτό. Η κατεύθυνσή της συμπίπτει με την κατεύθυνση

της δύναμης που ασκείται σε θετικό φορτίο.

ένταση μαγνητικού πεδίου: το πηλίκο της μέγιστης δύναμης που δέχεται από μαγνητικό πεδίο ένας αγωγός μήκους l , που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I , προς το γινόμενο Il .

εντροπία: μέγεθος που συνδέεται με την αταξία που επικρατεί στα δομικά συστατικά του συστήματος και με την ικανότητα του συστήματος να παράγει έργο.

εξαερίωση: η μετάβαση ενός σώματος από την υγρή στην αέρια φάση.

εξάτμιση: η εξαερίωση που γίνεται μόνο από την επιφάνεια του υγρού.

εξίσωση της τροχιάς: η συνάρτηση $y = f(x)$ των συντεταγμένων του σώματος.

επαγωγή: η εμφάνιση ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε έναν αγωγό όταν μεταβάλλεται η μαγνητική ροή που περνάει από την επιφάνεια που ορίζει με το σχήμα του ή όταν διέρχεται μαγνητική ροή από την επιφάνεια που ορίζει με την κίνησή του.

επαγωγική σύζευξη δύο κυκλωμάτων: δύο κυκλώματα βρίσκονται σε επαγωγική σύζευξη όταν η μεταβολή του ρεύματος στο ένα δημιουργεί ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή στο άλλο.

επιλογέας ταχυτήτων: διάταξη που επιτρέπει να περάσουν μόνο φορτισμένα σωματίδια που έχουν ορισμένη ταχύτητα. Βασίζεται στο συνδυασμό μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου με τις δυναμικές γραμμές τους κάθετες μεταξύ τους.

επίπεδος πυκνωτής: πυκνωτής του οποίου οι οπλισμοί είναι παράλληλες επίπεδες μεταλλικές επιφάνειες.

επιφάνεια Gauss: μια κλειστή επιφάνεια που επιλέγουμε για να εφαρμόσουμε το νόμο του Gauss.

επιφανειακή πυκνότητα φορτίου: το πηλίκο του φορτίου Δq που αντιστοιχεί σε επιφάνεια ΔA προς την επιφάνεια αυτή.

εσωτερική ενέργεια: ενέργεια που εμπεριέχει ένα σώμα και είναι το άθροισμα των ενεργειών των σωματιδίων που το απαρτίζουν, ως αποτέλεσμα της σχετικής τους κίνησης ως προς το κέντρο μάζας του σώματος και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους. Εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Z

ζώνες Van Allen: ζώνες που περιβάλλουν τη Γη στις οποίες παρατηρήθηκε μεγάλη πυκνότητα φορτισμένων σωματιδίων.

H

ηλεκτρική ροή από στοιχειώδη επιφάνεια ΔA : το γινόμενο του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου επί το εμβαδόν της επιφάνειας ΔA επί το συνημίτονο της γωνίας ανάμεσα στην ένταση και την κάθετη στην επιφάνεια.

ηλεκτρικό πεδίο: ο χώρος στον οποίο όταν βρεθεί ένα φορτίο θα δεχθεί δύναμη.

ηλεκτρονικό τηλεβόλο: τμήμα του καθοδικού σωλήνα που εξασφαλίζει την εκπομπή, επιτάχυνση και εστίαση των ηλεκτρονίων.

ηλεκτρονιοβόλτ: το έργο που παράγει η δύναμη του πεδίου όταν μετατοπίζεται το στοιχειώδες φορτίο μεταξύ δύο σημείων που έχουν διαφορά δυναμικού 1 V.
(1 eV = $1,6 \times 10^{-19}$ Joule).



θερμικά μονωμένο σύστημα: σύστημα που δεν αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του. Θερμικά μονωμένο αν δεν ανταλλάσσει θερμότητα με το περιβάλλον.

θερμική μηχανή: μηχανή που μετατρέπει τη θερμότητα σε μηχανικό έργο.

θερμοδυναμική ισορροπία: η κατάσταση στην οποία οι θερμοδυναμικές μεταβλητές του συστήματος παραμένουν σταθερές.

θερμοδυναμική μεταβλητή: μέγεθος που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε ένα θερμοδυναμικό σύστημα.

θερμοδυναμική: η επιστήμη που εξετάζει τις μετατροπές της θερμότητας σε μηχανικό έργο.

θερμότητα: μορφή ενέργειας που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο που έχει χαμηλότερη θερμοκρασία.

I

ιδανικά αέρια: Μακροσκοπικά, τα αέρια που υπακούουν στην καταστατική εξίσωση, σε όλες τις συνθήκες. Από μικροσκοπική άποψη τα αέρια των οποίων τα μόρια είναι τέλειες σφαίρες, δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους παρά μόνο όταν συγκρούονται και οι συγκρούσεις

με τα τοιχώματα του δοχείου στο οποίο βρίσκονται είναι τελείως ελαστικές.

ισοβαρής μεταβολή: μεταβολή στη διάρκεια της οποίας η πίεση του αερίου μένει σταθερή.

ισόθερμη μεταβολή: μεταβολή στη διάρκεια της οποίας η θερμοκρασία του αερίου μένει σταθερή.

ισότοπα (άτομα): άτομα που έχουν τον ίδιο ατομικό αριθμό αλλά διαφορετικό μαζικό αριθμό - άτομα του ίδιου στοιχείου που έχουν διαφορετικό αριθμό νετρονίων, άρα διαφορετική μάζα.

ισόχωρη μεταβολή: μεταβολή στη διάρκεια της οποίας ο όγκος του αερίου μένει σταθερός.

K

κινητική θεωρία: θεωρία που διατυπώθηκε για να ερμηνευτεί η συμπεριφορά των αερίων. Βασική της παραδοχή ότι τα αέρια αποτελούνται από μεγάλο αριθμό σωματιδίων που κινούνται άτακτα.

κορεσμένοι ατμοί: Ατμοί που συνυπάρχουν σε ισορροπία με την υγρή φάση του σώματος.

κυκλική μεταβολή: κάθε μεταβολή στο τέλος της οποίας το αέριο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.

κύκλος Carnot: Κυκλική αντιστρεπτή μεταβολή ορισμένης ποσότητας αερίου που περιλαμβάνει ισόθερμη εκτόνωση, αδιαβατική εκτόνωση, ισόθερμη συμπίεση και αδιαβατική συμπίεση.

M

μαγνητική ροή από επιφάνεια ΔA :
το γινόμενο του μέτρου της έντασης του μαγνητικού πεδίου επί το εμβαδόν της επιφάνειας ΔA επί το συνημίτονο της γωνίας ανάμεσα στην ένταση και την κάθετη στην επιφάνεια.

μαγνητική φιάλη: μαγνητικό πεδίο που εγκλωβίζει φορτισμένα σωματίδια. Είναι ισχυρό στα άκρα και ασθενές στο μέσο.

μαγνητικό πεδίο: ο χώρος στον οποίο δέχονται δυνάμεις κινούμενα ηλεκτρικά φορτία ή ρευματοφόροι αγωγοί.

μακροσκοπική μελέτη: η μελέτη ενός συστήματος κατά τη διάρκεια της οποίας αδιαφορούμε για τους δομικούς του λίθους (άτομα, μόρια, κ.λπ.).

μαύρη τρύπα: ουράνιο σώμα για το οποίο η ταχύτητα διαφυγής ισούται με την ταχύτητα του φωτός-που δεσμεύει στο βαρυτικό του πεδίο και τα φωτόνια.

μέση ισχύς (εναλλασσόμενου ρεύματος): το πηλίκο της ενέργειας που μεταφέρει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε χρόνο μιας περιόδου προς το χρόνο αυτό.

μέση ταχύτητα μορίων: ο μέσος όρος των ταχυτήτων των μορίων.

μηχανή Carnot: Μια ιδανική θερμική μηχανή που έχει το μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης από όλες τις μηχανές που λειτουργούν ανάμεσα στις θερμοκρασίες T_1 και T_2 .

μικροσκοπική μελέτη: η μελέτη ενός συστήματος με βάση τη συμπεριφορά των δομικών του λίθων.

Π

παλμογράφος: ηλεκτρονική διάταξη που επιτρέπει να παρακολουθούμε και να μετράμε μεταβαλλόμενες τάσεις.

πεδίο δυνάμεων: χώρος στον οποίο ασκείται δύναμη στο κατάλληλο υπόθεμα που βρίσκεται σε αυτόν.

πιο πιθανή ταχύτητα (των μορίων ενός αερίου): αν ομαδοποιήσουμε τα μόρια ενός αερίου με βάση την ταχύτητά τους, η ταχύτητα της πιο πολυπληθούς ομάδας.

πόλωση διηλεκτρικού: η ανακατανομή των ηλεκτρικών φορτίων του διηλεκτρικού όταν εισάγεται σε ηλεκτρικό πεδίο.

πυκνωτής: σύστημα δυο αγωγών που βρίσκονται σε μικρή απόσταση και χωρίζονται από το κενό ή από ένα διηλεκτρικό.

P

ρότορας: το κινητό μέρος μιας γεννήτριας ή ενός ηλεκτροκινητήρα.

Σ

σημειακή μάζα: μάζα που είναι συγκεντρωμένη σε ένα σημείο- σώμα που έχει πολύ μικρές διαστάσεις.

σημείο βρασμού: το σημείο ζέσεως.

σημείο ζέσεως: η θερμοκρασία στην οποία βράζει ένα υγρό.

σταθερά του Boltzmann: το πηλίκο της παγκόσμιας σταθεράς των ιδανικών αερίων με τον αριθμό N_A .

στάτορας: το ακίνητο μέρος μιας γεννήτριας ή ενός ηλεκτροκινητήρα.

συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής δυο κυκλωμάτων: το πηλίκο της

επαγωγικής ηλεκτρεγερτικής δύναμης που αναπτύσσεται σε ένα κύκλωμα προς το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος στο άλλο κύκλωμα. συντελεστής αυτεπαγωγής ενός κυκλώματος: το πηλίκο της επαγωγικής ηλεκτρεγερτικής δύναμης που αναπτύσσεται στο κύκλωμα προς το ρυθμό μεταβολής του ρεύματος που το διαρρέει.

συντελεστής απόδοσης θερμικής μηχανής: ο λόγος του έργου που αποδίδει σε έναν κύκλο η μηχανή προς τη θερμότητα που παίρνει από τη θερμή δεξαμενή στον ίδιο χρόνο.

συντελεστής απόδοσης θερμικής μηχανής: ο λόγος του ωφέλιμου έργου που αποδίδει μια θερμική μηχανή προς τη θερμότητα που προσλαμβάνει από το περιβάλλον.

T

τάση σάρωσης: η περιοδική τάση που εφαρμόζεται στα πλακίδια οριζόντιας εκτροπής ενός παλμογράφου. Χαρακτηριστικό της είναι ότι αυξάνεται γραμμικά και μηδενίζεται απότομα.

ταχύτητα διαφυγής: η ελάχιστη ταχύτητα που πρέπει να έχει ένα σώμα για να εγκαταλείψει το βαρυτικό πεδίο ενός ουράνιου σώματος.

Φ

φασματογράφος μάζας: διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πηλίκου m/q φορτισμένων σωματιδίων.

φθορισμός: η εκπομπή ακτινοβολίας από ένα σώμα στο οποίο προσπίπτουν φωτόνια ή φορτισμένα

σωματίδια που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από ορισμένη τιμή.

X

χωρητικότητα πυκνωτή: το σταθερό πηλίκο του φορτίου του πυκνωτή προς τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους οπλισμούς του.

ΑΛΦΑΒΗΤΙΚΟ ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

Δ

διαφορά δυναμικού	51
δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου.....	51

Ε

ενέργεια δυναμική	63
ένταση ηλεκτρικού πεδίου	9
επιφάνεια GAUSS.....	27

Η

ηλεκτρονιοβόλτ	52
ηλεκτρονίων τηλεβόλο	102

Κ

καθοδικός σωλήνας	98
-------------------------	----

Ν

νόμος Gauss για τον ηλεκτρισμό...	22
-----------------------------------	----

Π

παλμογράφος	105
πεδίο διατηρητικό	7
πεδίο δυνάμεων	6
πυκνωτή ενέργεια	127
πυκνωτή χωρητικότητα	117
πυκνωτής	116
πυκνωτής επίπεδος	119

Ρ

ροή ηλεκτρική	16
---------------------	----

Σ

σάρωσης τάση	109
--------------------	-----

Τ

τροχιάς εξίσωση	90
-----------------------	----

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Πανεπιστημιακή Φυσική Hugh D. Young Εκδόσεις Παπαζήση.**
- 2. Physics for scientists & engineers Serway.**
- 3. Φυσική Halliday Resnick Εκδόσεις Πνευματικός.**
- 4. Halliday - Resnick - Walker Fundamentals of Physics Extended (fifth edition).**
- 5. F.J. Keller - W.E. Gettys - M.J. Skove Physics (second edition).**
- 6. ΟΗΑΝΙΑΝ Physics - Εκδόσεις Συμμετρία - Μετάφραση Α. Φίλιππα.**

7. **Edward M. Purcell Ηλεκτρισμός
- Μαγνητισμός. Μαθήματα Φυσικής - Πανεπιστήμιο Berkeley.
Έκδοση Ε.Μ.Π.**
8. **Κ.Δ. Αλεξόπουλος - Δ.Ι. Μαρίνος
Γενική Φυσική - Εκδόσεις ΟΛΥ-
ΜΠΙΑ.**
9. **Οι έννοιες της Φυσικής Paul G.
Hewitt - Πανεπιστημιακές Εκδό-
σεις Κρήτης.**
10. **Εισαγωγή στην Ηλεκτροδυνα-
μική David J. Griffiths - Πανεπι-
στημιακές Εκδόσεις Κρήτης.**
11. **Κλασσική και σύγχρονη Φυσι-
κή Kenneth W. Ford - Εκδόσεις
Πνευματικός.**

**12. Η εξέλιξη των ιδεών στη Φυσική
Einstein, Infeld - Εκδόσεις Δω-
δώνη.**

**13. Η ελαφρότητα της Βαρύτητας
Jayant Narlikar - Εκδόσεις Τρο-
χαλία.**

**14. Robert March Φυσική για ποιη-
τές - Εκδόσεις Δίαυλος.**

**15. Ιστορία της Φυσικής Emilio
Segre - Εκδόσεις Δίαυλος.**



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

3 Ηλεκτρικό πεδίο

Εισαγωγή	6
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	9
Ηλεκτρική ροή	12
Ο νόμος του Gauss	22
Δυναμικό - Διαφορά δυναμικού	48
Δυναμική ενέργεια πολλών σημειακών φορτίων	63
Σχέση έντασης - διαφοράς δυναμικού στο ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο	73
Κινήσεις φορτισμένων σωματιδίων σε ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο	78
Ο καθοδικός σωλήνας	98
Παλμογράφος	105
Πυκνωτής και χωρητικότητα	115

Ενέργεια αποθηκευμένη σε φορτισμένο πυκνωτή.....	127
Ερωτήσεις.....	139
Ασκήσεις.....	156

Παραρτήματα	
Πίνακες σταθερών.....	178
Λεξιλόγιο όρων.....	182
Αλφαβητικό ευρετήριο.....	206
Βιβλιογραφία.....	208

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του νόμου 1129 της 15/21 Μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946,108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Θρησκευμάτων και Αθλητισμού / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.