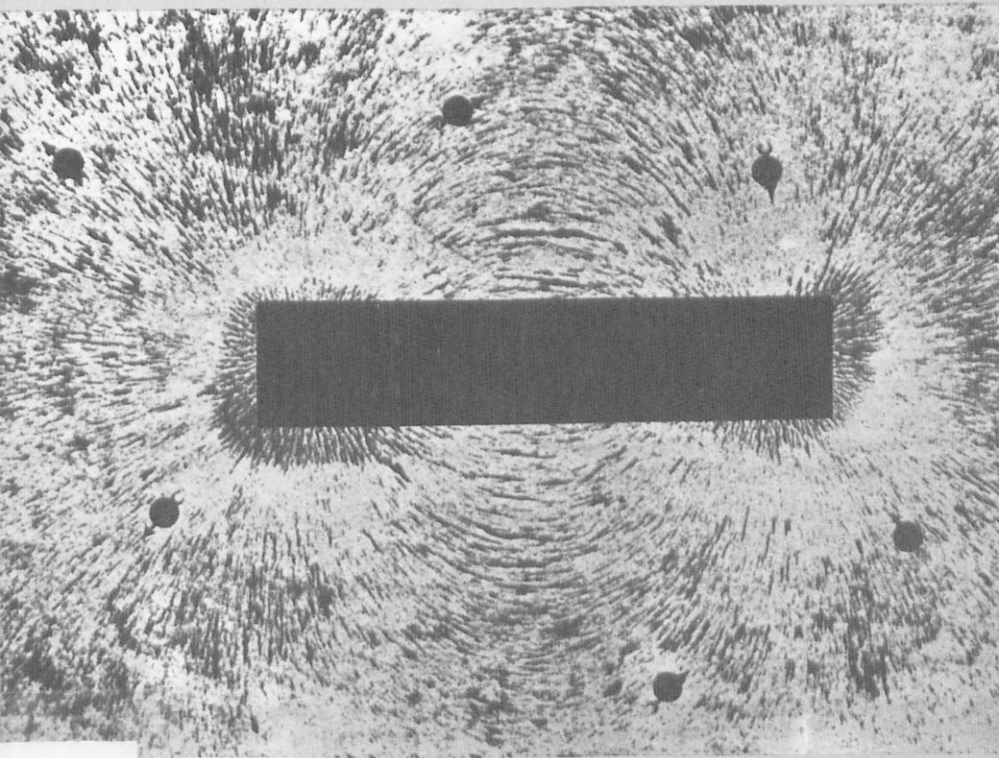


ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

ΦΥΣΙΚΗ

Β' ΛΥΚΕΙΟΥ



002
ΚΛΣ
ΣΤ2Β
1608

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ ΑΘΗΝΑ 1982

Ψηφιοποιήθηκε από το Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής

Α/Β ΗΚΙΖΥΦ

ΗΚΙΖΥΦ



ΣΧΒ
314
873
2001

ΣΤ

89

ΑΛΚΙΝΟΟΥ Ε. ΜΑΖΗ

Μάζη, Αλκίνοος

ΦΥΣΙΚΗ

Β' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ
ΑΘΗΝΑ 1982



002
47E
ET2B
1608

ΑΛΚΙΝΟΥ Ε ΜΑΧΗ
ΝΑΥΤ. ΟΡΓΑΝΩΣΗ

ΦΥΣΙΚΗ

Β ΛΥΚΕΙΟΥ

ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ ΤΗΣ ΒΟΥΛΗΣ
ΕΔΩΡΗΣΑΤΟ

Ορχιδεωδ. Βιολογία
3245 Έτος 1982

Τό βιβλίο μεταγλωττίστηκε από τό συγγραφέα σέ συνεργασία
μέ τόν κ. Κ. Μικρούδη, Γεν. Έπιθεωρητή Μ. Ε.

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Στατικός ηλεκτρισμός

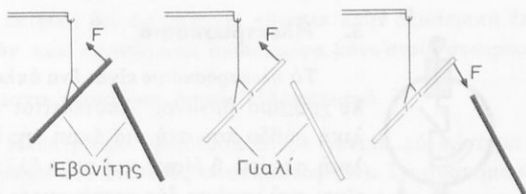
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

1. Θεμελιώδη φαινόμενα

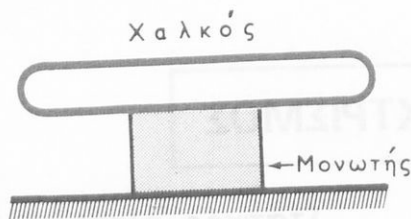
Έξι αιώνες π.Χ. ο Θαλής ο Μιλήσιος ανακάλυψε ότι το ηλεκτρο (κεχριμπάρι), όταν τρίβεται με μάλλινο ύφασμα, αποκτά την ιδιότητα να έλκει ελαφρά σώματα (π.χ. τρίχες, κομματάκια, μικρά φτερά κτλ). Αυτή η ιδιότητα που έχει το ηλεκτρο ονομάστηκε **ηλεκτρισμός**. Πειραματικά βρέθηκε ότι αυτή την ιδιότητα την έχουν και πολλά άλλα σώματα (γυαλί, έβονίτης, θείο κ.ά.).

Ηλεκτρίζουμε με *τριβή* δύο γυάλινες ράβδους και κρεμάμε τη μία με νήμα από μετάξι (σχ. 1). Αν στη ράβδο που κρέμεται πλησιάσουμε την άλλη ράβδο, παρατηρούμε ότι μεταξύ των δύο ράβδων αναπτύσσεται *άμοιβαία άπωση*. Το ίδιο παρατηρούμε και με δύο ηλεκτρισμένες ράβδους έβονίτη. Αν όμως στην ηλεκτρισμένη γυάλινη ράβδο πλησιάσουμε την ηλεκτρισμένη ράβδο έβονίτη, παρατηρούμε ότι μεταξύ των δύο ράβδων αναπτύσσεται *άμοιβαία έλξη*. Όταν ένα σώμα είναι ηλεκτρισμένο, λέμε ότι έχει πάνω του **ηλεκτρικό φορτίο**.

Από τα παραπάνω απλά πειράματα διαπιστώνουμε ότι υπάρχουν δύο



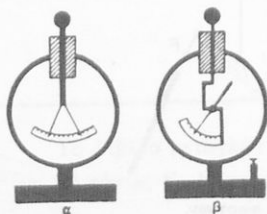
Σχ. 1. Δύναμη μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων.



Σχ. 2. Ήλεκτριση με τριβή μιάς ράβδου από χαλκό.

2. Μονωτές, άγωγοί, ήμιαγωγοί

Όταν ηλεκτρίσουμε με τριβή μιά ράβδο από γυαλί ή έβονίτη, παρατηρούμε ότι τά έλαφρά σώματα κολλάνε μόνο στό μέρος τής ράβδου πού τρίψαμε. Έπομένως μόνο σ' αυτό τό μέρος τής ράβδου ύάρχει ήλεκτρικό φορτίο, πού δέν μετακινείται προς τά υπόλοιπα τμήματα τής ράβδου. Τά ύλικά, όπως τό γυαλί και ό έβονίτης, πού δέν *επιτρέπουν* στά ήλεκτρικά φορτία νά κινούνται μέσα στή μάζα τους, ονομάζονται *μονωτές*. Μιά ράβδο από χαλκό τή στηρίζουμε πάνω σέ μονωτή (σχ. 2). Άν με ξηρό ύφασμα τρίψουμε ένα τμήμα τής χάλκινης ράβδου, παρατηρούμε ότι ήλεκτρίζεται όλη ή ράβδος του χαλκού. Αυτό φανεράνει ότι τά ήλεκτρικά φορτία εύκολα κινούνται μέσα στή μάζα του χαλκού. Τά ύλικά, όπως ό χαλκός, πού *επιτρέπουν* στά ήλεκτρικά φορτία νά κινούνται μέσα στή μάζα τους, ονομάζονται *άγωγοί*. Τέτοια ύλικά είναι τά μέταλλα, τά ύδατικά διαλύματα των όξέων, των βάσεων, των άλάτων, τό σόμα των ζώων, τό ύγρό έδαφος. Σέ μερικά ύλικά, όπως π.χ. τό πυρίτιο και τό γερμάνιο, ή ήλεκτρική συμπεριφορά τους είναι ένδιάμεση μεταξύ των άγωγών και των μονωτών και γι' αυτό τά ύλικά αυτά ονομάζονται *ήμιαγωγοί*.



Σχ. 3. Ήλεκτροσκόπιο.

3. Ήλεκτροσκόπιο

Τό ήλεκτροσκόπιο είναι ένα άπλό, αλλά πολύ χρήσιμο όργανο. Άποτελείται από μεταλλική ράβδο πού στή μιά άκρη τής έχει μεταλλική σφαίρα ή δίσκο και στήν άλλη άκρη τής είναι κολλημένες δύο στενόμακρες ταινίες από άλουμίνιο (σχ. 3). Ή ράβδος είναι στερεωμένη σέ γυάλινο ή μεταλλικό δοχείο με λαιμό

είδη ήλεκτρικού φορτίου, εκείνο πού άναπτύσσεται στό γυαλί και λέγεται **θετικό ήλεκτρικό φορτίο** και εκείνο πού άναπτύσσεται στόν έβονίτη και λέγεται **άρνητικό ήλεκτρικό φορτίο**.

Έπίσης από τά παραπάνω άπλά πειράματα καταλήγουμε στό έξής συμπέρασμα :

Τά όμώνυμα ήλεκτρικά φορτία άπωθούνται, ένώ τά έτερόνυμα έλκονται.

από ένα μονωτικό ύλικό. Άν στή σφαίρα του ήλεκτροσκοπίου άκουμπήσουμε ένα ήλεκτρισμένο σώμα (π.χ. γυάλινη ράβδος), παρατηρούμε ότι ή ράβδος ήλεκτριζεται μέ έπαφή και οί ταινίες του άλουμινίου άπωθοούνται, γιατί έχουν όμώνυμα ήλεκτρικά φορτία. Τό ήλεκτροσκόπιο έκφορτίζεται, άν στή σφαίρα του ήλεκτροσκοπίου άκουμπήσουμε τό χέρι μας. Άντί γιά ταινίες από άλουμίνιο τό ήλεκτροσκόπιο μπορεί νά έχει ένα λεπτό μεταλλικό δείκτη πού άπωθεΐται από τήν όμώνυμη ήλεκτρισμένη ράβδος του όργάνου (σχ. 3). Ή άπόκλιση του δείκτη είναι άνάλογη μέ τό ήλεκτρικό φορτίο πού έχει τό ήλεκτροσκόπιο.

4. Κατανομή του ήλεκτρικού φορτίου

Άς θεωρήσουμε μιά μονωμένη μεταλλική σφαίρα πού έχει άρνητικό ήλεκτρικό φορτίο. Ήπειδή τά όμώνυμα ήλεκτρικά φορτία άπωθοούνται μεταξύ τους, γι' αυτό τά φορτία αυτά κινούνται μέσα στή μάζα της σφαίρας και έρχονται στήν έξωτερική επιφάνειά της. Στο έσωτερικό των ήλεκτρισμένων άγωγών δέν ύπάρχουν ήλεκτρικά φορτία. Αυτό τό διαπιστώνουμε πειραματικά μέ έναν κοίλο ήλεκτρισμένο άγωγό, πού είναι μονωμένος (σχ. 4). Στην άκρη γυάλινης ράβδου είναι στερεωμένο ένα μεταλλικό σφαιρίδιο (τό λέμε δοκιμαστικό σφαιρίδιο). Όταν τό ουδέτερο σφαιρίδιο έρθει σέ έπαφή μέ τήν έξωτερική επιφάνεια του άγωγού, τό σφαιρίδιο παίρνει από τόν άγωγό λίγο ήλεκτρικό φορτίο (ήλεκτριση μέ έπαφή). Μέ τό ήλεκτροσκόπιο βλέπουμε ότι τό σφαιρίδιο είναι ήλεκτρισμένο. Άντίθετα τό σφαιρίδιο δέν παίρνει καθόλου ήλεκτρικό φορτίο, όταν έρχεται σέ έπαφή μέ τήν έσωτερική επιφάνεια του κοίλου άγωγού.



Σχ. 4. Κατανομή του φορτίου σέ άγωγό.

Σέ ένα σφαιρικό άγωγό τό ήλεκτρικό φορτίο κατανέμεται όμοιόμορφα στήν έξωτερική επιφάνειά του. Άν ό άγωγός έχει άκμές, τότε μεγάλο μέρος του ήλεκτρικού φορτίου του συγκεντρώνεται σ' αυτά τά σημεία, γιατί έξαιτίας της άπόσσεως των όμώνυμων ήλεκτρικών φορτίων, αυτά καταφεύγουν στά πιό μακρινά σημεία του άγωγού. Ωστε :

Τό ήλεκτρικό φορτίο ύπάρχει πάντοτε στήν έξωτερική επιφάνεια των άγωγών και κατανέμεται όμοιόμορφα μόνο στους σφαιρικούς άγωγούς.

5. Συστήματα μονάδων στον Ήλεκτρισμό

Στόν Ήλεκτρισμό χρησιμοποιούμε γενικά τό σύστημα MKSA πού, είναι ένα τμήμα του διεθνούς συστήματος (SI). Τό σύστημα CGS επεκτείνεται και στόν Ήλεκτρισμό και σ' αυτή τήν περίπτωση άποτελεί τό ήλεκτροστατικό σύστημα μονάδων (σύστημα ΗΣΜ). Τά δύο συστήματα

μονάδων, το ηλεκτρομαγνητικό σύστημα (HMM) και το ηλεκτροστατικό σύστημα (HSM) ανήκουν στο απόλυτο σύστημα μονάδων CGS. Θα εξετάσουμε τα ηλεκτρικά φαινόμενα χρησιμοποιώντας το σύστημα MKSA.

6. Νόμος του Coulomb

Δύο ηλεκτρικά φορτία Q_1 και Q_2 , που τα θεωρούμε ως σημεία, βρίσκονται στο κενό (ή στον αέρα) και η μεταξύ τους απόσταση είναι r . Σ' αυτή την περίπτωση βρίσκουμε ότι η δύναμη (έλξη ή άπωση) που αναπτύσσεται μεταξύ αυτών των δύο ηλεκτρικών φορτίων δίνεται από τον ακόλουθο νόμο του Coulomb :

Η έλξη ή η άπωση (F) που αναπτύσσεται μεταξύ δύο σημειακών ηλεκτρικών φορτίων (Q_1 και Q_2) είναι ανάλογη με το γινόμενο των ηλεκτρικών φορτίων και αντίστροφα ανάλογη με το τετράγωνο της απόστασής τους (r).

$$\text{νόμος του Coulomb} \quad F = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad (1)$$

όπου $K_{\eta\lambda}$ είναι μία σταθερή, που εξαρτάται από τις μονάδες και το μέσο που υπάρχει γύρω από τα δύο ηλεκτρικά φορτία. Η ηλεκτρική δύναμη F είναι θετική (άπωση), αν τα δύο ηλεκτρικά φορτία είναι ομόνομα, και αρνητική (έλξη), αν τα δύο ηλεκτρικά φορτία είναι ετερόνομα.

α. Ο νόμος του Coulomb στο σύστημα μονάδων MKSA. Η μονάδα ηλεκτρικού φορτίου στο σύστημα MKSA ονομάζεται Coulomb (1 Cb) και, όπως θα δούμε σε άλλο κεφάλαιο, η μονάδα αυτή σε συνάρτηση με τις θεμελιώδεις μονάδες είναι:

$$1 \text{ Coulomb (1 Cb)} = 1 \text{ Ampère} \cdot 1 \text{ sec} \quad \text{ή} \quad 1 \text{ Cb} = 1 \text{ A} \cdot \text{sec}$$

Όταν τα δύο ηλεκτρικά φορτία Q_1 και Q_2 βρίσκονται στο κενό (ή στον αέρα), τότε ορίστηκε(*), ότι η ηλεκτρική σταθερή $K_{\eta\lambda}$ έχει την τιμή:

$$\text{ηλεκτρική σταθερή του Coulomb} \quad K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2}$$

(*). Ορίστηκε ότι η ηλεκτρική σταθερή $K_{\eta\lambda}$ θα έχει την τιμή:

$$\text{ηλεκτρική σταθερή} \quad K_{\eta\lambda} = K_{\mu\alpha\gamma\nu} \cdot c^2$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$). Άρα είναι:

$$K_{\eta\lambda} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{sec}^2} \quad \text{ή} \quad K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{A}^2 \cdot \text{sec}^2} \quad \text{ή} \quad \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2}$$

“Ωστε στο σύστημα MKSA ο νόμος του Coulomb για το κενό (ή τον άερα) δίνεται από την εξίσωση :

νόμος του Coulomb $F = K_{ηλ} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{ηλ} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ Q_1, Q_2 \text{ σε Cb} \\ r \text{ σε m} \\ F \text{ σε N} \end{array} \right.$
--	---

“Ηλεκτροστατικός όρισμός της μονάδας ηλεκτρικού φορτίου.” Αν στην τελευταία εξίσωση βάλουμε $Q_1 = Q_2 = 1 \text{ Coulomb}$ και $r = 1 \text{ m}$, βρίσκουμε:

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2} \cdot \frac{(1 \text{ Cb})^2}{(1 \text{ m})^2} \quad \text{άρα} \quad F = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$$

Έτσι έχουμε τον ακόλουθο όρισμό :

1 Coulomb (1 Cb) είναι το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο, όταν βρίσκεται μέσα στο κενό σε απόσταση ενός μέτρου (1 m) από ίσο ηλεκτρικό φορτίο, εξασκεί σ’ αυτό δύναμη (F) ίση με $9 \cdot 10^9 \text{ N}$.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

1. Δύο σημειακά θετικά φορτία ίσα βρίσκονται μέσα στον άερα σε απόσταση $r = 10 \text{ cm}$ το ένα από το άλλο και εξασκούν αμοιβαία άπωση $F = 400 \text{ N}$. Πόσο είναι κάθε φορτίο;
2. Δύο σημειακά θετικά φορτία $Q_1 = 3 \text{ mCb}$ και $Q_2 = 0,4 \text{ mCb}$ βρίσκονται μέσα στον άερα σε απόσταση r το ένα από το άλλο και άπωθονται με δύναμη $F = 3 \cdot 10^4 \text{ N}$. Πόση είναι η απόσταση r ;
3. Δύο όμοιες πολύ μικρές σφαίρες, που καθεμιά έχει μάζα $m = 0,25 \text{ gr}$, κρέμονται από το ίδιο σημείο με δύο μονωτικά νήματα μήκους $l = 50 \text{ cm}$ και αρχικά βρίσκονται σε έπαφή μεταξύ τους. Σε κάθε σφαίρα δίνουμε το ίδιο φορτίο $+q$ και τότε οι δύο σφαίρες απομακρύνονται και ισορροπούν σε τέτοια θέση, ώστε τα δύο νήματα σχηματίζουν γωνία 90° . Πόσο είναι το φορτίο q κάθε σφαίρας ; $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.
4. Δύο ίσες μικρές μεταλλικές σφαίρες, που καθεμιά θεωρείται ως σημείο με άσημαντη μάζα, έχουν αντίστοιχα φορτία $q_1 = 16 \cdot 10^{-14} \text{ Cb}$ και $q_2 = -6,4 \cdot 10^{-14} \text{ Cb}$ και η μεταξύ τους απόσταση είναι $r_1 = 20 \text{ cm}$. Έπειτα οι δύο σφαίρες απομακρύνονται και η απόστασή τους γίνεται $r_2 = 50 \text{ cm}$. Νά συγκριθούν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των σφαιρών στις δύο θέσεις.
5. Στις άκρες A και B μιάς ευθείας, που έχει μήκος 15 cm , υπάρχουν δύο θετικά ηλεκτρικά φορτία, που αντίστοιχα είναι Q_A και $Q_B = 2Q_A$. Σε ποιο σημείο της ευθείας AB πρέπει να βρίσκεται το ηλεκτρικό φορτίο $q = +1 \text{ Cb}$, ώστε οι δύο δυνάμεις που ενεργούν σ’ αυτό εξαιτίας των δύο φορτίων να έχουν συνισταμένη ίση με μηδέν ;

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

7. Όρισμός του ηλεκτρικού πεδίου

Όταν ένα σώμα είναι ηλεκτρισμένο, τό ηλεκτρικό φορτίο του εξασκεί έλξη ή άπωση σε κάθε άλλο ηλεκτρικό φορτίο πού ύπάρχει μέσα στο χώρο γύρω από τό ηλεκτρισμένο σώμα. Τότε λέμε ότι γύρω από τό ηλεκτρισμένο σώμα δημιουργείται *ηλεκτρικό πεδίο*. "Ωστε :

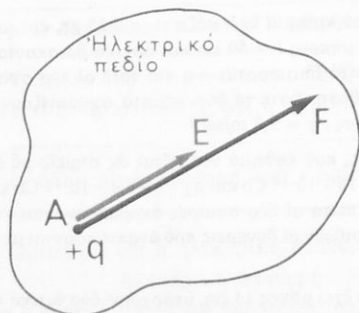
Ήλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ένας χώρος, όταν σε κάθε ηλεκτρικό φορτίο πού ύπάρχει μέσα σ' αυτόν εξασκούνται ηλεκτρικές δυνάμεις (έλξεις ή άπώσεις).

8. Στοιχεία του ηλεκτρικού πεδίου

α. Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Ένα ηλεκτρικό πεδίο σχηματίζεται στο κενό (ή στον άέρα). Σε ένα σημείο Α του ηλεκτρικού πεδίου ύπάρχει *ηλεκτρικό φορτίο* q (σχ. 5). Τότε τό ηλεκτρικό πεδίο εξασκεί σ' αυτό τό ηλεκτρικό φορτίο μία δύναμη \vec{F} . Στο σύστημα *MKSA* ισχύει ό ακόλουθος όρισμός :

Ένταση (\vec{E}) του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του ονομάζεται τό πηλίκο τής δυνάμεως \vec{F} πού ένεργεί στο ηλεκτρικό φορτίο q (πού βρίσκεται σ' αυτό τό σημείο) διά του ηλεκτρικού φορτίου q .

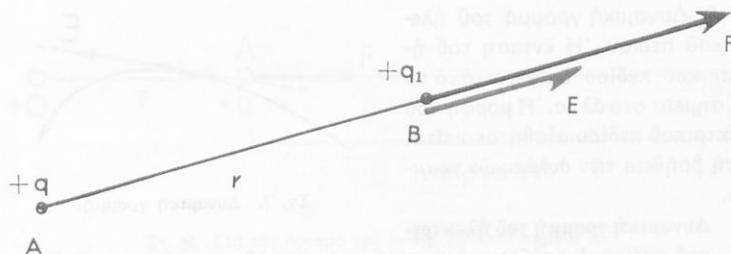
$$\text{ένταση ηλεκτρικού πεδίου} \quad \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



Σχ. 5. Ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Α.

Ή ένταση ηλεκτρικού πεδίου είναι *άνυσμα* \vec{E} , πού έχει *φορέα* τό φορέα τής δυνάμεως \vec{F} , *μέτρο* ίσο μέ τό πηλίκο $E = F/q$ και *φορά* κατά σύμβαση τή φορά τής δυνάμεως \vec{F} , όταν αυτή ένεργεί σε θετικό ηλεκτρικό φορτίο $+q$.

Άπό τήν εξίσωση $E = F/q$ συνάγεται ότι ή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του αριθμητικά είναι ίση μέ τή δύναμη πού εξασκεί τό πεδίο *στι*



Σχ. 6. Τό φορτίο $+q$ δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο.

μονάδα θετικού ηλεκτρικού φορτίου ($+ 1 \text{ Cb}$), όταν αυτή βρίσκεται στο θεωρούμενο σημείο του ηλεκτρικού πεδίου.

Μονάδα έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Αν στην εξίσωση $E = F/q$ βάλουμε $F = 1 \text{ N}$ και $q = 1 \text{ Cb}$, βρίσκουμε $E = 1 \text{ MKSA}$. Άρα:

Μονάδα έντασης ηλεκτρικού πεδίου είναι η ένταση ηλεκτρικού πεδίου που σε ηλεκτρικό φορτίο ίσο με 1 Coulomb (1 Cb) εξασκεί δύναμη ίση με 1 Newton (1 N).

μονάδα έντασης ηλεκτρικού πεδίου	$\frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ Coulomb}}$	ή $1 \frac{\text{N}}{\text{Cb}}$
-------------------------------------	--	----------------------------------

Υπολογισμός της έντασης ηλεκτρικού πεδίου. Ένα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο $+q$ (σχ. 6), δημιουργεί γύρω του ηλεκτρικό πεδίο. Σε απόσταση r βρίσκεται ηλεκτρικό φορτίο $+q_1$ και εξασκείται σ' αυτό δύναμη ίση με:

$$F = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{q \cdot q_1}{r^2}$$

Άρα στο σημείο B η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου είναι:

$$E = \frac{F}{q_1} = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{q}{r^2} \quad \text{ή} \quad \boxed{E = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{q}{r^2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ q \text{ σε Cb} \\ r \text{ σε m} \\ E \text{ σε N/Cb} \end{array} \right.$$

όπου q είναι τό ηλεκτρικό φορτίο που δημιουργεί τό ηλεκτρικό πεδίο.

Παράδειγμα. Αν είναι $q = +0,05 \text{ Cb}$ και $r = 10 \text{ cm}$, τότε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι:

$$E = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2} \cdot \frac{0,05 \text{ Cb}}{0,01 \text{ m}^2} \quad \text{και} \quad E = 45 \cdot 10^9 \frac{\text{N}}{\text{Cb}}$$

β. Δυναμική γραμμή του ηλεκτρικού πεδίου. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου διαφέρει από τό ένα σημείο στο άλλο. Η μορφή του ηλεκτρικού πεδίου αισθητοποιείται με τη βοήθεια των *δυναμικῶν γραμμῶν*.



Σχ. 7. Δυναμική γραμμή.

Δυναμική γραμμή του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται ή γραμμή που σε κάθε σημείο της τό άνυσμα τῆς έντάσεως (\vec{E}) του ηλεκτρικού πεδίου είναι εφαπτόμενο αὐτῆς τῆς γραμμῆς (σχ. 7).

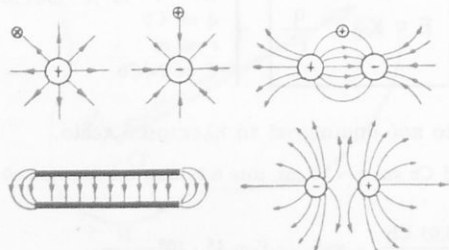
Ἀπό κάθε σημείο του ηλεκτρικού πεδίου περνάει *μόνο μιά* δυναμική γραμμή, που ἔχει φορά τῆ *φορά* του άνύσματος τῆς έντάσεως του πεδίου. Για τῆ δυναμική γραμμή μπορούμε νά δώσουμε τόν ἐξῆς ἐμπειρικό *ὄρισμό* :

Δυναμική γραμμή του ηλεκτρικού πεδίου είναι ή τροχιά που διαγράφει ἕνα θετικό ηλεκτρικό φορτίο (+q) μέ τήν ἐπίδραση του ηλεκτρικού πεδίου.

Στό σχῆμα 8 φαίνονται διάφορες μορφές ηλεκτρικῶν πεδίων. Μεταξύ δύο μεταλλικῶν πλακῶν, που είναι παράλληλες καί ἔχουν ἴσα ἀλλά ἀντίθετα ηλεκτρικά φορτία (+q καί -q), σχηματίζεται *ὁμογενές* ηλεκτρικό πεδίο, που οἱ δυναμικές γραμμές του είναι *παράλληλες* καί ή έντασή του είναι σταθερή σέ ὅλα τά σημεία.

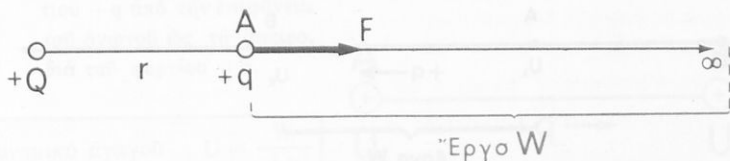
γ. Δυναμικό σέ ἕνα σημείο του ηλεκτρικού πεδίου. Ἐνα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο +Q παράγει γύρω του ηλεκτρικό πεδίο (σχ. 9). Στό σημείο A, που βρίσκεται σέ ἀπόσταση r, ὑπάρχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο +q καί ἐνεργεῖ σ' αὐτό ή ηλεκτροστατική δύναμη :

$$F = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q \cdot q}{r^2}$$



Σχ. 8. Διάφορες μορφές ηλεκτρικῶν πεδίων.

Ἐάν τό φορτίο +q είναι ἐλεύθερο, τότε μέ τήν ἐπίδραση τῆς δυνάμεως \vec{F} τό φορτίο +q *θά κινηθεῖ* κατά μήκος μιᾶς εὐθείας δυναμικῆς γραμμῆς ἀπό τό σημείο A ὡς τό ἄπειρο ($r = \infty$), ὅπου ή δύναμη F γίνεται ἴση μέ μηδέν ($F = 0$). Ἀλλά κατά τῆ μετα-



Σχ. 9. Για τόν όρισμό του δυναμικού στό σημείο A.

φορά του φορτίου +q από τό σημείο A ως τό άπειρο, τό ήλεκτρικό πεδίο παράγει έργο W. Τότε έχουμε τόν έξής όρισμό :

Δυναμικό (U) του ήλεκτρικού πεδίου σε ένα σημείο του ονομάζεται τό πηλίκο του έργου (W), που παράγεται από τό πεδίο κατά τή μεταφορά του φορτίου +q από τό θεωρούμενο σημείο ως τό άπειρο, διά του φορτίου q.

δυναμικό σε σημείο του ήλεκτρικού πεδίου	$U = \frac{W}{+q}$	(1)
---	--------------------	-----

Τό δυναμικό είναι μονόμετρο μέγεθος και είναι *θετικό* ή *άρνητικό*, ανάλογα μέ τό φορτίο Q που είναι ή αίτία του πεδίου. Αν είναι -Q, τότε τό δυναμικό στό σημείο A είναι άρνητικό, γιατί για τή μεταφορά του φορτίου +q από τό σημείο A ως τό άπειρο πρέπει νά δαπανηθεί έργο W.

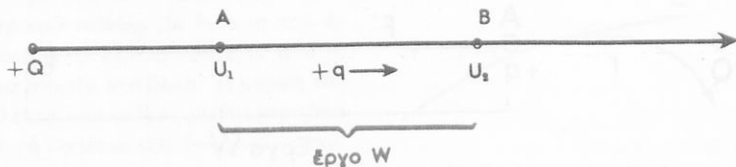
Αποδεικνύεται ότι τό δυναμικό σε απόσταση r από σημειακό φορτίο Q είναι :

δυναμικό σε απόσταση r	$U = K_{ηλ} \cdot \frac{Q}{r}$	$K_{ηλ} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2$
------------------------	--------------------------------	--

Μονάδα δυναμικού. Αν στην εξίσωση (1) βάλουμε W = 1 Joule και q = 1 Coulomb, βρίσκουμε U = 1 MKSA. Στο σύστημα MKSA ή *μονάδα δυναμικού* ονομάζεται *Volt* (1 V) και όρίζεται ως έξής :

Σε ένα σημείο του ήλεκτρικού πεδίου, τό δυναμικό είναι 1 Volt (1 V), όταν φορτίο 1 Coulomb (1 Cb), μεταφερόμενο εξαιτίας του πεδίου από τό σημείο αυτό ως τό άπειρο, παράγει έργο ίσο μέ 1 Joule.

μονάδα δυναμικού 1 Volt = $\frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Coulomb}}$ ή $1 \text{ V} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Cb}}$
--



Σχ. 10. Διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων A και B του ηλεκτρικού πεδίου.

δ. Διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του ηλεκτρικού πεδίου. Σέ δύο σημεία A και B (σχ. 10) του ηλεκτρικού πεδίου τό δυναμικό αντίστοιχα είναι U_1 και U_2 . Έπειδή είναι $U_1 > U_2$, μεταξύ των δύο σημείων υπάρχει *διαφορά δυναμικού* $U_1 - U_2$. Τό φορτίο $+q$ μεταφερόμενο εξαιτίας του πεδίου από τό σημείο A στό σημείο B παράγει έργο W και τότε ισχύει ό ακόλουθος *όρισμός* :

Διαφορά δυναμικού ($U_1 - U_2$) μεταξύ δύο σημείων του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται τό πηλίκο του έργου (W), πού παράγεται από τό πεδίο κατά τή μεταφορά του φορτίου $+q$ από τό ένα σημείο ως τό άλλο, διά του φορτίου $+q$.

$$\text{διαφορά δυναμικού} \quad U_1 - U_2 = \frac{W}{+q} \quad (2)$$

Άν στήν εξίσωση (2) είναι $W = 1$ Joule και $q = 1$ Cb, τότε είναι $U_1 - U_2 = 1$ Volt. Ωστε :

Ή διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση μέ 1 Volt, όταν κατά τή μεταφορά φορτίου 1 Coulomb από τό ένα σημείο ως τό άλλο τό πεδίο παράγει έργο ίσο μέ 1 Joule.

$$U_1 - U_2 = 1 \text{ Volt} = \frac{1 \text{ Joule}}{1 \text{ Coulomb}} = 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Cb}}$$

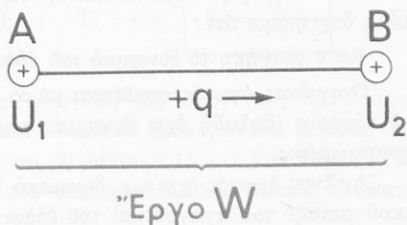
9. Δυναμικό άγωγού και διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο άγωγών

Μιά μικρή μεταλλική σφαίρα (άγωγός) έχει ηλεκτρικό φορτίο $+Q$, πού κατανέμεται όμοιόμορφα στήν επιφάνειά της. Τό φορτίο της σφαίρας δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο και οί δυναμικές γραμμές του αρχίζουν από τήν επιφάνεια της σφαίρας. Τότε μπορούμε νά δώσουμε τόν εξής *όρισμό* :

Δυναμικό (U) ενός άγωγού ονομάζεται τό πηλίκο του έργου (W), πού παράγεται από τό ηλεκτρικό πεδίο του άγωγού κατά τή μεταφορά φορ-

τίου $+q$ από την επιφάνεια του αγωγού ως τό άπειρο, διά του φορτίου $+q$.

$$\text{δυναμικό αγωγού} \quad U = \frac{W}{+q}$$



Σχ. 11. Διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο αγωγών A και B.

Δύο μικρές μεταλλικές σφαιρές A και B (σχ. 11) έχουν αντίστοιχα δυναμικό U_1 και U_2 και είναι $U_1 > U_2$. Τότε μεταξύ των δύο αγωγών υπάρχει διαφορά δυναμικού $U_1 - U_2$. Οί δύο αγωγοί

δημιουργούν ήλεκτρικό πεδίο, τό όποίο κατα τή μεταφορά του φορτίου $+q$ από τόν αγωγό A στόν αγωγό B παράγει έργο W. Τότε ίσχύει ή γνωστή (§ 8) εξίσωση :

$$\text{διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο αγωγών} \quad U_1 - U_2 = \frac{W}{+q} \quad (1)$$

Ή διαφορά δυναμικού μετριέται σε Volt. Είναι φανερό ότι ή εξίσωση (1) εκφράζει τό έργο πού παράγεται, όταν φορτίο 1 Coulomb μεταφέρεται εξαιτίας του πεδίου από τόν αγωγό A στόν αγωγό B. Γενικά τό θετικό ήλεκτρικό φορτίο *πηγαίνει πάντοτε από τόν αγωγό μέ τό μεγαλύτερο δυναμικό πρós τόν αγωγό μέ τό μικρότερο δυναμικό.* Ή διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο αγωγών ονομάζεται και *τάση*. "Όταν λέμε π.χ. ότι μεταξύ δύο αγωγών υπάρχει τάση $U_1 - U_2 = 220$ Volt, έννοούμε ότι κατά τή μεταφορά φορτίου 1 Coulomb από τόν ένα αγωγό στόν άλλο παράγεται έργο ίσο μέ 220 Joule.

α. Έργο παραγόμενο από ήλεκτρικό φορτίο. Από τήν εξίσωση (1) συμπεραίνουμε ότι, άν μεταξύ δύο αγωγών A και B υπάρχει διαφορά δυναμικού $U_1 - U_2$, τότε μπορούμε *νά λάβουμε έργο*, άν φορτίο q μεταβεί από τόν αγωγό A στόν αγωγό B. Τότε τό έργο πού θά λάβουμε δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\text{έργο από τήν κίνηση ήλεκτρικού φορτίου} \quad W = q \cdot (U_1 - U_2) \quad (2)$$

Ή κίνηση του ήλεκτρικού φορτίου q από τόν ένα αγωγό στόν άλλο είναι εύκολη, άν συνδέσουμε τους δύο αγωγούς μέ σύρμα. Ή εξίσωση (2), όπως θά δοθε σε άλλα κεφάλαια, έχει πάρα πολλές εφαρμογές.

β. Δυναμικό του εδάφους. Σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε διαφορές δυναμικού και όχι τις απόλυτες τιμές δυναμικού. Για ευκολία δεχτήκαμε ότι :

Κατά συνθήκη το δυναμικό του εδάφους είναι ίσο με μηδέν.

Όταν ένας αγωγός συνδέεται με το έδαφος, έχει πάντοτε το δυναμικό του εδάφους (δηλαδή έχει δυναμικό μηδέν) και λέμε ότι ο αγωγός είναι προσγειωμένος.

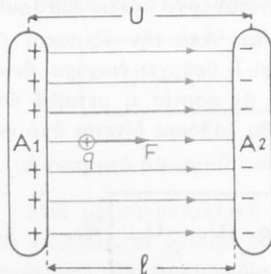
Αν ένας αγωγός έχει π.χ. δυναμικό $U = 60 \text{ V}$, τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ του αγωγού και του εδάφους είναι ίση με $U - 0 = U = 60 \text{ V}$. Αυτό σημαίνει ότι, αν φορτίο 1 Cb μεταφερθεί από τον αγωγό στο έδαφος, τότε παράγεται έργο ίσο με 60 Joule .

γ. Δυναμικό σφαιρικού αγωγού. Σφαιρικός αγωγός έχει ακτίνα R και ηλεκτρικό φορτίο q . Αποδεικνύεται ότι το δυναμικό (U) του σφαιρικού αγωγού είναι ανάλογο με το ηλεκτρικό φορτίο (q) και αντίστροφως ανάλογο με την ακτίνα του (R). Στο σύστημα MKSA το δυναμικό του σφαιρικού αγωγού δίνεται από την εξίσωση :

δυναμικό σφαιρικού αγωγού	$U = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q}{R}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ Q \text{ σε Cb} \\ R \text{ σε m} \\ U \text{ σε V} \end{array} \right.$
------------------------------	---	---

10. Σχέση μεταξύ διαφοράς δυναμικού και έντασης ηλεκτρικού πεδίου

Δύο επίπεδες παράλληλες μεταλλικές πλάκες έχουν ίσα αλλά ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία και η απόστασή τους είναι l (σχ. 12). Μεταξύ των δύο πλακών σχηματίζεται ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, που έχει σταθερή ένταση \vec{E} και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλακών είναι U . Στη μία άκρη A_1 μιās δυναμικής γραμμής A_1A_2 φέρνουμε ηλεκτρικό φορτίο q . Τότε στο φορτίο αυτό ενεργεί η δύναμη $\vec{F} = \vec{E} \cdot q$, η οποία μετακινεί το φορτίο q κατά διάστημα $A_1A_2 = l$ και παράγει έργο :



Σχ. 12. Σχέση μεταξύ της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου και της τάσεως U .

$$W = F \cdot l \quad \text{ή} \quad W = E \cdot q \cdot l$$

Όπως ξέρουμε (§ 9) το έργο αυτό είναι

Ίσο μέ $W = q \cdot U$. Άρα έχουμε τήν εξίσωση :

$$E \cdot q \cdot l = q \cdot U \quad \eta \quad E \cdot l = U \quad \text{καί} \quad E = \frac{U}{l} \quad (1)$$

Ή εξίσωση (1) φανερώνει ότι *ή ένταση* (E) όμογενοϋς ήλεκτρικοϋ πεδίοϋ είναι ίση μέ *τή μεταβολή τοϋ δυναμικοϋ* κατά μονάδα μήκοϋ τήσ δυναμικήσ γραμμήσ. Άν στήν εξίσωση (1) βάλουμε $U = 1 \text{ Volt}$ καί $l = 1 \text{ m}$, βρίσκουμε $E = 1 \text{ MKSA}$. Άστε στοϋ σύστημα MKSA *μονάδα έντάσεωσ ήλεκτρικοϋ πεδίοϋ* είναι :

$$\begin{array}{l} \text{μονάδα έντάσεωσ} \\ \text{ήλεκτρικοϋ πεδίοϋ} \end{array} \quad \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ m}} \quad \eta \quad 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

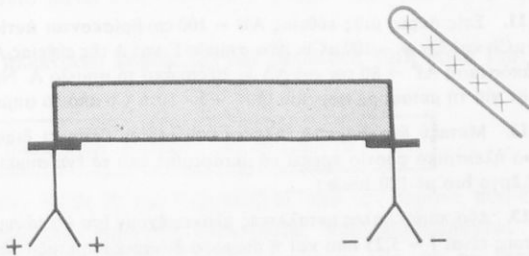
Παρατήρηση. Οί μονάδεσ έντάσεωσ ήλεκτρικοϋ πεδίοϋ 1 N/Cb καί 1 V/m είναι ίσοδύναμεσ, γιατί είναι :

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{Joule/Cb}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{m} \cdot \text{Cb}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{Cb}}$$

II. Ήλεκτριση άγωγοϋ μέ έπαγωγή

Πάνω στοϋσ δίσκοϋσ δύο όμοιοϋν ήλεκτροσκοπίωϋν στηρίζουμε τίσ δύο άκρεσ μιās μεταλλικήσ ράβδοϋ πού έχει άρκετό μήκοσ (σχ. 13). Στή μιά άκρη τήσ μεταλλικήσ ράβδοϋ πλησιάζουμε μιá ήλεκτρισμένη γυάλινη ράβδο, χωρίσ όμωσ νά έρθοϋν σέ έπαφή οί δύο ράβδοι. Παρατηροϋμε ότι καί τά δύο ήλεκτροσκοπία άποκτοϋν *ήλεκτρικά φορτία*. Εϋκόλα διαπιστώνουμε ότι τά δύο ήλεκτροσκοπία έχουν *έτερώνημα* ήλεκτρικά φορτία. Μόλισ άπομακρύνουμε τή γυάλινη ράβδο, άμέσωσ τά ήλεκτρικά φορτία τών δύο ήλεκτροσκοπίωϋν εξαφανίζονται. Αυτό δείχνει ότι τά έτερώνημα φορτία τών δύο ήλεκτροσκοπίωϋν ήταν κατ' άπόλυτη τιμή *ίσα*.

Ή μεταλλική ράβδοσ καί τά στελέχη τών δύο ήλεκτροσκοπίωϋν, στά όποία στηρίζεται ή ράβδοσ, άποτελοϋν ένα συνεχή μεταλλικό ά-άγωγό. "Όταν ό ά-άγωγός βρεθεί μέ-σα στοϋ *ήλεκτρικοϋ πεδίο* πού δημι-



Σχ. 13. Ήλεκτριση άγωγοϋ μέ έπαγωγή.

ουργεί το φορτίο της γυάλινης ράβδου, τότε ο άγωγός *ηλεκτρίζεται* και στις δύο άκρες του *εμφανίζονται* ίσα ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία. Αυτός ο τρόπος ηλεκτρίσεως του άγωγού ονομάζεται *ηλεκτρίση με επαγωγή*. Ωστε :

Όταν άγωγός βρεθεί μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο, αναπτύσσονται με επαγωγή πάνω στον άγωγό ίσα ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία, που προϋπάρχουν μέσα στη μάζα του άγωγού.

Παρατήρηση. Όταν η γυάλινη ράβδος βρίσκεται κοντά στον άγωγό, συνδέουμε τον άγωγό με το έδαφος. Το άπωθούμενο θετικό φορτίο ξεφεύγει στο έδαφος. Αν διακόψουμε τη συγκοινωνία με το έδαφος και απομακρύνουμε τη γυάλινη ράβδο, απομένει στον άγωγό το άρνητικό φορτίο, που δεν εξουδετερώνεται. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ένας άγωγός να διατηρήσει μόνο το ένα είδος φορτίου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

6. Σε ένα σημείο βρίσκεται ηλεκτρικό φορτίο $Q = +0,5 \text{ Cb}$. Πόση είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση 5 cm και 10 cm από το φορτίο Q;

7. Στις άκρες ευθείας AB μήκους 15 cm βρίσκονται δύο ηλεκτρικά φορτία $+Q$ και $+4Q$. Σε ποιο σημείο της ευθείας AB η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου είναι ίση με μηδέν;

8. Στις τέσσερις κορυφές A, B, Γ, Δ ενός τετραγώνου, που έχει πλευρά 4 cm, βρίσκονται αντίστοιχα τά ηλεκτρικά φορτία $+0,1$, $+0,1$, $-0,1$ και $-0,1 \text{ Cb}$. Πόση είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο κέντρο του τετραγώνου;

9. Στις κορυφές ισόπλευρου τριγώνου ABΓ βρίσκονται τρία ίσα θετικά ηλεκτρικά φορτία, που το καθένα είναι ίσο με $Q = +250 \mu\text{Cb}$. Ένα σημείο Δ βρίσκεται μέσα στο τρίγωνο και απέχει $r = 10 \text{ cm}$ από κάθε κορυφή του τριγώνου. Πόση είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο Δ;

10. Ένας ατομικός πυρήνας έχει φορτίο $Q = +80 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$. Νά βρεθεί το δυναμικό U σε απόσταση $r = 10^{-12} \text{ m}$ από αυτό τον πυρήνα. Πόση είναι η δυναμική ενέργεια $E_{\text{δυν}}$ που έχει φορτίο $q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$, όταν βρίσκεται σ' αυτή την απόσταση από τον πυρήνα;

11. Στις άκρες μιάς ευθείας AB = 100 cm βρίσκονται αντίστοιχα τά φορτία $Q_1 = +200 \mu\text{Cb}$ και $Q_2 = -100 \mu\text{Cb}$. Δύο σημεία Γ και Δ της ευθείας AB βρίσκονται αντίστοιχα σε απόσταση AG = 80 cm και AD = 20 cm από το σημείο A. Νά βρεθεί πόσο έργο απαιτείται για τη μεταφορά φορτίου $Q = +5 \cdot 10^{-4} \text{ Cb}$ από το σημείο Γ στο σημείο Δ.

12. Μεταξύ δύο σημείων ηλεκτρικού πεδίου υπάρχει διαφορά δυναμικού $U = 6 \text{ V}$. Πόσο ηλεκτρικό φορτίο πρέπει να μεταφερθεί από το ένα σημείο στο άλλο, για να παραχθεί έργο ίσο με 120 Joule;

13. Δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες έχουν ίσα ετερόνυμα φορτία. Αν η απόστασή τους είναι $l = 5,25 \text{ mm}$ και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλακών είναι $U = 1500 \text{ V}$, πόση είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου; Πόση δύναμη ενεργεί σε ηλεκτρικό φορτίο $q = +2 \cdot 10^{-4} \text{ Cb}$, που έρχεται μέσα σ' αυτό το ηλεκτρικό πεδίο;

14. Μεταξύ δύο παράλληλων μεταλλικών πλακών που απέχουν μεταξύ τους $l = 5$ cm υπάρχει τάση $U = 20\ 000$ V. Πόσο έργο παράγεται, όταν ένα φορτίο $q = 5 \cdot 10^{-8}$ Cb μεταφέρεται από το ηλεκτρικό πεδίο από τη θετική ως την αρνητική πλάκα;

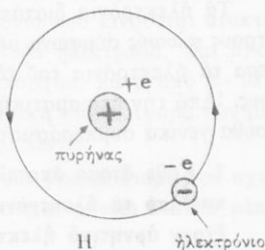
15. Σφαιρικός άγωγός έχει ακτίνα $R = 50$ cm. Πόσο είναι το δυναμικό του, αν το φορτίο του είναι $Q = 10^{-3}$ Cb; Πόσο φορτίο πρέπει να έχει αυτός ο άγωγός, ώστε το δυναμικό του να είναι ίσο με 10^5 V;

ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

12. Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο

Τά ηλεκτρικά φορτία (θετικά και αρνητικά) αναπτύσσονται πάνω στα σώματα με τριβή ή αναπτύσσονται πάνω στους άγωγούς, όταν αυτοί βρεθούν μέσα σε ηλεκτρικό πεδίο. Άρα μέσα στα άτομα της ύλης υπάρχουν ηλεκτρικά φορτία, που εκδηλώνονται, μόνο όταν δημιουργηθούν κατάλληλες συνθήκες. Το απλούστερο άτομο είναι το άτομο υδρογόνου. Ή θεωρητική και η πειραματική έρευνα απέδειξαν ότι το άτομο υδρογόνου αποτελείται από δύο μικρά σωματίδια, τον πυρήνα και το ηλεκτρόνιο. Ο πυρήνας βρίσκεται στο κέντρο του ατόμου, ονομάζεται ειδικότερα πρωτόνιο και έχει θετικό ηλεκτρικό φορτίο (σχ. 14).

Γύρω από τον πυρήνα περιφέρεται το ηλεκτρόνιο, που έχει αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο και η μάζα του είναι περίπου ίση με το $1/1840$ της μάζας του ατόμου υδρογόνου. Το αρνητικό φορτίο του ηλεκτρονίου είναι κατ' απόλυτη τιμή ίσο με το θετικό φορτίο του πρωτονίου, ονομάζεται στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (e) και είναι το μικρότερο ως σήμερα γνωστό ηλεκτρικό φορτίο που βρίσκουμε στη Φύση. Η έλξη που ο πυρήνας εξασκεί στο ηλεκτρόνιο είναι η κεντρομόλος δύναμη, η οποία συγκρατεί το ηλεκτρόνιο πάνω στην κυκλική τροχιά του. Μέ τις μετρήσεις βρήκαμε ότι :

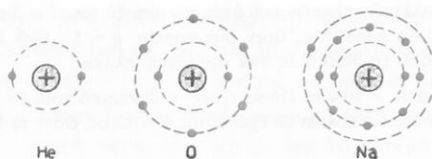


Σχ. 14. Σχηματική παράσταση του ατόμου υδρογόνου.

Το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο (e) κατ' απόλυτη τιμή είναι ίσο με $1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb

Δομή των ατόμων. Κάθε άτομο αποτελείται από τον πυρήνα, που έχει όρισμένο θετικό φορτίο, και από τα ηλεκτρόνια, που περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα και έχουν ολικό αρνητικό φορτίο ίσο με το θετικό φορτίο του πυρήνα. Όλοι οι πυρήνες, εκτός από τον πυρήνα του ατόμου



Σχ. 15. Άτομο ήλιου, οξυγόνου και νατρίου.

ριθμό πρωτονίων, π.χ. ο πυρήνας του ατόμου ήλιου έχει δύο πρωτόνια και επομένως έχει θετικό φορτίο $+2e$, ενώ ο πυρήνας του ατόμου οξυγόνου έχει οκτώ πρωτόνια και γι' αυτό έχει θετικό φορτίο $+8e$. Στο ουδέτερο άτομο το θετικό φορτίο του πυρήνα είναι ίσο και αντίθετο με το ολικό αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων που περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα. Όστε σέ κάθε είδος ατόμου γύρω από τον πυρήνα περιφέρονται τόσα ηλεκτρόνια, όσα είναι τά πρωτόνια του πυρήνα, π.χ. στό άτομο ήλιου υπάρχουν δύο ηλεκτρόνια που έχουν αρνητικό φορτίο $-2e$, ενώ στό άτομο οξυγόνου υπάρχουν οκτώ ηλεκτρόνια που έχουν ολικό αρνητικό φορτίο $-8e$ (σχ. 15).

Τά ηλεκτρόνια διατάσσονται γύρω από τον πυρήνα πάνω σέ όμοκεντρους *φλοιούς* σύμφωνα μέ όρισμένο νόμο τής Άτομικής Φυσικής. Ειδικότερα τά ηλεκτρόνια του έξωτερικού φλοιού όνομάζονται *ηλεκτρόνια σθένους*. Άπό τήν πειραματική και τή θεωρητική έρευνα καταλήξαμε στά ακόλουθα γενικά συμπεράσματα :

- I. Κάθε άτομο αποτελείται από τον πυρήνα, που έχει θετικό φορτίο, και από τά ηλεκτρόνια, που περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα και έχουν αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο.
- II. Τά θετικά φορτία υπάρχουν πάντοτε στους πυρήνες των ατόμων, ενώ τά αρνητικά φορτία μεταφέρονται πάντοτε από τά ηλεκτρόνια. Αδτά είναι ίδια σέ όλα τά άτομα τής ύλης.
- III. Τά θετικά και τά αρνητικά ηλεκτρικά φορτία είναι πάντοτε άκέραια πολλαπλάσια του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου (e).

13. Έμφάνιση ηλεκτρικών φορτίων

Τά φαινόμενα του ήλεκτρισμού όφείλονται στήν ικανότητα που έχουν τά ηλεκτρόνια *νά φεύγουν* από ένα άτομο και *νά πηγαίνουν* σέ ένα άλλο άτομο. Όταν όμως από ένα ουδέτερο άτομο *φύγουν* ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, καταστρέφεται ή ίσορροπία μεταξύ των ετερόνυμων φορτίων του

(*) Έδω αναφέρονται λίγα στοιχεία γιά τή δομή του ατόμου, άπαραίτητα γιά τήν έρμηνεία των φαινομένων που θά εξετάσουμε. Πιο λεπτομερής περιγραφή του ατόμου θά γίνει στήν Άτομική και Πυρηνική Φυσική.

ατόμου και το υπόλοιπο του ατόμου είναι ένα θετικό *ión* που έχει θετικό φορτίο (+e, +2e, +3e). Αντίθετα αν σε ένα ουδέτερο άτομο προστεθούν ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια, τότε σχηματίζεται *αρνητικό íon*, που έχει αρνητικό φορτίο (-e, -2e, -3e). Ωστε ένα σώμα είναι *ουδέτερο*, όταν τα άτομα του είναι ουδέτερα. Αν τα άτομα ενός σώματος χάσουν ηλεκτρόνια, το σώμα εμφανίζεται ηλεκτρισμένο με *θετικό* φορτίο. Αντίθετα, αν τα άτομα ενός σώματος προσλάβουν ηλεκτρόνια, το σώμα εμφανίζεται ηλεκτρισμένο με *αρνητικό* φορτίο. Γενικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι :

Ένα σώμα έχει θετικό φορτίο, όταν έχει χάσει ηλεκτρόνια και αντίθετα, έχει αρνητικό φορτίο, όταν έχει αποκτήσει πλεονάζοντα ηλεκτρόνια.

14. Τά ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων

Στά άτομα των μετάλλων τα *ηλεκτρόνια σθένους* είναι ένα, δύο ή τρία και συνδέονται πολύ χαλαρά με τον πυρήνα. Έτσι αυτά τα ηλεκτρόνια εύκολα ξεφεύγουν από την έλξη του πυρήνα και κινούνται διαρκώς και άτακτα μέσα στη μάζα του μετάλλου, όπως ακριβώς κινούνται τα μόρια ενός αερίου που είναι κλεισμένο μέσα σε δοχείο. Τα ηλεκτρόνια που κινούνται άτακτα μέσα στη μάζα του μετάλλου τα ονομάζουμε *ελεύθερα ηλεκτρόνια*, και αποτελούν ένα τεράστιο πλήθος (σε 1 cm³ χαλκού υπάρχουν πάνω από $8 \cdot 10^{22}$ ελεύθερα ηλεκτρόνια). Η χαρακτηριστική ηλεκτρική συμπεριφορά των μετάλλων οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνιά τους. Ωστε :

Στά μέταλλα τα ηλεκτρόνια σθένους ξεφεύγουν από τα άτομα και σχηματίζουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που διαρκώς κινούνται άτακτα μέσα στη μάζα του μετάλλου.

15. Έξηγηση της ηλεκτρίσεως των σωμάτων

α. *Ηλέκτριση με τριβή*. Όταν τρίβουμε δύο διαφορετικά σώματα το ένα πάνω στο άλλο (π.χ. γυαλί και ύφασμα), τότε τα σώματα έρχονται σε πολύ στενή επαφή μεταξύ τους. Εύκολα διαπιστώνουμε ότι αυτά τα δύο σώματα αποκτούν ίσα ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία. Αυτό συμβαίνει, γιατί τα ηλεκτρόνια έφυγαν από το ένα σώμα και πήγαν στο άλλο. Έτσι τα δύο σώματα εμφανίζονται ηλεκτρισμένα αλλά το ένα σώμα έχει *θετικό* φορτίο, ενώ το άλλο σώμα έχει *αρνητικό* φορτίο. Ωστε :

Όταν δύο διαφορετικά σώματα με την τριβή έρχονται σε στενή επαφή μεταξύ τους, τότε ηλεκτρόνια πηγαίνουν από το ένα σώμα στο άλλο και έτσι στα δύο σώματα εμφανίζονται ίσα ετερόνυμα ηλεκτρικά φορτία.

β. *Ηλέκτριση με επαφή*. Ένα σώμα Α, που έχει *αρνητικό* φορτίο,

έρχεται σέ έπαφή μέ ένα μονωμένο ουδέτερο άγωγό Β. Τότε ένα μέρος από τά ήλεκτρόνια πού πλεονάζουν στό σώμα Α πηγαίνει στόν άγωγό Β. Έτσι καί ό άγωγός Β άποκτá άρνητικό φορτίο. Αντίθετα, άν τό σώμα Α έχει θετικό φορτίο καί έρθει σέ έπαφή μέ τόν ουδέτερο άγωγό Β, τότε ένα μέρος από τά ελεύθερα ήλεκτρόνια του άγωγοϋ Β πηγαίνει στό σώμα Α. Έτσι καί ό άγωγός Β άποκτá θετικό φορτίο. Καί στίς δύο περιπτώσεις λέμε ότι ό άγωγός Β ήλεκτρίστηκε μέ έπαφή. Ώστε :

Όταν ένα σώμα, πού έχει ήλεκτρικό φορτίο (θετικό ή άρνητικό), έρχεται σέ έπαφή μέ μονωμένο ουδέτερο άγωγό, τότε ή φεύγουν από τόν άγωγό ή έρχονται σ' αυτόν ήλεκτρόνια καί έτσι έμφανίζεται στόν άγωγό ήλεκτρικό φορτίο (θετικό ή άρνητικό).

γ. *Ήλέκτριση μέ έπαγωγή.* Όταν μονωμένος ουδέτερος άγωγός βρεθεί μέσα σέ ήλεκτρικό πεδίο, τότε εξαιτίας του ήλεκτρικού πεδίου πολλά ελεύθερα ήλεκτρόνια του άγωγοϋ μετακινούνται καί σέ δύο περιοχές του άγωγοϋ έμφανίζονται *ΐσα έτερόνυμα* ήλεκτρικά φορτία. Ώστε :

Ή ήλέκτριση μέ έπαγωγή ενός άγωγοϋ όφείλεται στή μετακίνηση των ελεύθερων ήλεκτρονίων του άγωγοϋ εξαιτίας του ήλεκτρικού πεδίου.

δ. *Ήλέκτριση των μονωτών.* Αντίθετα μέ τούς άγωγούς οί μονωτές δέν έχουν ελεύθερα ήλεκτρόνια. Στο μονωτή, άν από μία περιοχή του αφαιρεθοϋν ήλεκτρόνια ή σέ μία περιοχή του προστεθοϋν ήλεκτρόνια, τά ήλεκτρικά φορτία παραμένουν *έντοπισμένα* σ' αυτή τήν περιοχή. Ώστε :

Οί μονωτές, επειδή δέν έχουν ελεύθερα ήλεκτρόνια, διατηροϋν έντοπισμένα τά ήλεκτρικά φορτία πού άναπτύσσονται σέ μία περιοχή τους.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

16. Πόσα ήλεκτρόνια πλεονάζουν σέ έναν άγωγό Α πού έχει φορτίο $Q_A = -6,4 \text{ Cb}$; Πόσα ήλεκτρόνια έχει χάσει ένας άγωγός Β πού έχει φορτίο $Q_B = +3,2 \text{ Cb}$;

17. Δύο έτερόνυμα στοιχειώδη ήλεκτρικά φορτία $+e$ καί $-e$ βρίσκονται σέ άπόσταση $r = 1 \text{ mm}$ τό ένα από τό άλλο. Μέ πόση δύναμη έλκονται αυτά τά δύο φορτία;

18. Μεταξύ δύο άγωγων ύπάρχει διαφορά δυναμικού $U = 1 \text{ V}$. Ένα ήλεκτρόνιο εξαιτίας του ήλεκτρικού πεδίου πηγαίνει από τόν έναν άγωγό στόν άλλο. Πόσο έργο παράγεται, όταν γίνεται αυτή ή μετακίνηση του ήλεκτρονίου;

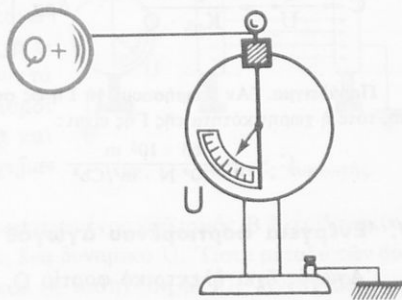
19. Ό ατομικός πυρήνας νατρίου έχει φορτίο $q = +11e$. Μέ πόση δυναμη αυτός ό πυρήνας άπωθει ένα πρωτόνιο, όταν ή μεταξύ τους άπόσταση είναι $r = 10^{-7} \text{ cm}$;

20. Μεταξύ δύο όριζόντιων μεταλλικών πλακών, πού ή άπόστασή τους είναι $l = 2 \text{ cm}$, θέλουμε νά διατηρηθεί αιώρουμένη μία μικρή σταγόνα λαδιου, πού έχει μάζα $m = 10^{-12} \text{ gr}$ καί φορτίο $q = +2e$. Πόση τάση πρέπει νά ύπάρχει μεταξύ των δύο πλακών; $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.

ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΓΩΓΟΥ — ΠΥΚΝΩΤΕΣ

16. Χωρητικότητα άγωγού

Τό δυναμικό ενός άγωγού τό μετράμε μέ ειδικό όργανο, πού όνομάζεται *ήλεκτρόμετρο* καί είναι βαθμολογημένο σέ Volt (σχ. 16). Ένας μονωμένος άγωγός έχει φορτίο Q καί μέ τό ήλεκτρόμετρο βρίσκουμε ότι έχει δυναμικό U . Άν τό φορτίο τοῦ άγωγού γίνει $2Q$, $3Q$..., βρίσκουμε ότι τό δυναμικό τοῦ άγωγού γίνεται αντίστοιχα $2U$, $3U$... Παρατηροῦμε ότι τό πηλίκο τοῦ φορτίου διά τοῦ δυναμικοῦ τοῦ άγωγού διατηρεῖται *σταθερό*. Άπό αὐτό τό πείραμα καταλήγουμε στόν όρισμό ενός νέου φυσικοῦ μεγέθους, πού όνομάζεται *χωρητικότητα* τοῦ άγωγού.



Σχ. 16. Μέτρηση τοῦ δυναμικοῦ ενός άγωγού.

Χωρητικότητα (C) ενός άγωγού όνομάζεται τό σταθερό πηλίκο τοῦ φορτίου (Q) διά τοῦ δυναμικοῦ (U) τοῦ άγωγού.

$$\text{χωρητικότητα άγωγού} \quad C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

Μονάδα χωρητικότητας. Άν στήν έξίσωση (1) βάλουμε $Q = 1$ Coulomb καί $U = 1$ Volt, βρίσκουμε $C = 1$ MKSA. Στό σύστημα MKSA ἡ μονάδα χωρητικότητας όνομάζεται *Farad* (1 F) καί όρίζεται ως εξής :

1 Farad (1 F) είναι ἡ χωρητικότητα άγωγού, ό οποῖος, όταν έχει φορτίο **1 Coulomb**, έχει δυναμικό ἴσο μέ **1 Volt**.

$$\begin{array}{l} \text{μονάδα} \\ \text{χωρητικότητας} \end{array} \quad 1 \text{ Farad} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Volt}} \quad \eta \quad 1 \text{ F} = 1 \frac{\text{Cb}}{\text{V}}$$

Στήν πράξη χρησιμοποιοῦμε συνήθως δύο πολύ μικρότερες μονάδες, τό *μικροφαράντ* ($1 \mu\text{F}$) καί τό *πικοφαράντ* (1 pF), πού είναι :

$$1 \mu\text{F} = 10^{-6} \text{ F} \quad \text{καί} \quad 1 \text{ pF} = 10^{-6} \mu\text{F} = 10^{-12} \text{ F}$$

Χωρητικότητα σφαιρικοῦ άγωγού. Σφαιρικός άγωγός έχει άκτίνα R ,

φορτίο Q και δυναμικό (§ 25γ) ίσο μέ $U = K_{\eta\lambda} \cdot Q/R$. Ό άγωγός αυτός έχει χωρητικότητα :

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q \cdot R}{K_{\eta\lambda} \cdot Q} \quad \text{άρα} \quad C = \frac{R}{K_{\eta\lambda}} \quad \left\{ \begin{array}{l} R \text{ σε m} \\ K_{\eta\lambda} \text{ σε N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ C \text{ σε F} \end{array} \right.$$

Παράδειγμα. Αν θεωρήσουμε τή Γη ως σφαιρικό άγωγό πού έχει άκτίνα $R = 6300$ km, τότε ή χωρητικότητα τής Γής είναι :

$$C = \frac{63 \cdot 10^5 \text{ m}}{9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ F} \quad \eta \quad C = 700 \mu\text{F}$$

17. Ήνέργεια φορτισμένου άγωγοϋ

Άγωγός έχει ήλεκτρικό φορτίο Q , δυναμικό U και χωρητικότητα :

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{άρα είναι} \quad Q = C \cdot U \quad (1)$$

Γιά νά φορτισθεί αυτός ό άγωγός, δαπανήθηκε ήνέργεια, ή όποία μένει *αποταμιευμένη* πάνω στον άγωγό. Άποδεικνύεται ότι ή *ήνέργεια* ($E_{\eta\lambda}$) πού έχει τότε ό άγωγός δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\left. \begin{array}{l} \text{ήνέργεια φορτισμένου} \\ \text{άγωγοϋ} \end{array} \right\} E_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} Q \cdot U \quad \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ σε Cb} \\ U \text{ σε V} \\ E_{\eta\lambda} \text{ σε Joule} \end{array} \right.$$

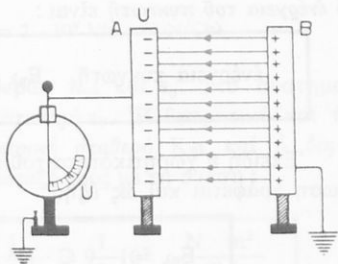
Ή τελευταία εξίσωση μπορεί νά λάβει και τήν εξής μορφή :

$$E_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad \eta \quad E_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}$$

18. Πυκνωτής

Είναι γνωστό (§ 16) ότι ένας μονωμένος άγωγός, πού έχει ήλεκτρικό φορτίο Q , έχει *σταθερή* χωρητικότητα $C = Q/U$. Έκτελούμε τό εξής πείραμα : Μιά μεταλλική πλάκα A (σχ. 17), είναι μονωμένη, έχει άρνητικό φορτίο $-Q$ και δυναμικό κατ' άπόλυτη τιμή ίσο μέ U . Στην πλάκα A πλησιάζουμε μία άλλη όμοια πλάκα B , πού είναι *προσγειωμένη*. Παρατηρούμε ότι τό δυναμικό τής πλάκας A *ελαττώνεται* και έπομένως ή χωρητικότητά της *αυξάνει*. Τό πείραμα αυτό δείχνει ότι ή χωρητικότητα ενός φορτισμένου άγωγοϋ *αυξάνει*, όταν σ' αυτό τόν άγωγό *πλησιάζει* άλλος προσγειωμένος άγωγός.

Τό σύστημα των δύο άγωγών A και B ονομάζεται *πυκνωτής* και οι δύο άγωγοί ονομάζονται *όπλισμοί* του πυκνωτή. Όταν κοντά στην πλάκα A φέρουμε την πλάκα B, αυτή ήλεκτριζεται με έπαγωγή, τά άρνητικά φορτία φεύγουν στο έδαφος και πάνω στην πλάκα B μένουν τά θετικά φορτία. Τότε οι δύο όπλισμοί έχουν ίσα έτερόνυμα φορτία + Q και - Q. Μεταξύ των δύο όπλισμών σχηματίζεται *όμογενές ήλεκτρικό πεδίο*.



Σχ. 17. Έπίπεδος πυκνωτής.

Χωρητικότητα πυκνωτή. Ό προσγειωμένος όπλισμός B έχει δυναμικό μηδέν, ενώ ό άλλος όπλισμός A έχει ένα δυναμικό U. Ωστε μεταξύ των δύο όπλισμών υπάρχει διαφορά δυναμικού (ή τάση) ίση με U. Αν συνδέσουμε με σύρμα τους δύο όπλισμούς, τά φορτία των δύο όπλισμών εξαφανίζονται και λέμε ότι έγινε *έκφόρτιση* του πυκνωτή. Αυτό συμβαίνει, γιατί τά ηλεκτρόνια που πλεονάζουν στον όπλισμό A και πού έχουν όλικό φορτίο -Q, έρχονται στον όπλισμό B και εξουδετερώνουν τό θετικό φορτίο του +Q. Ωστε κατά την έκφόρτιση μετακινείται από τόν έναν όπλισμό στον άλλο ήλεκτρικό φορτίο πού, κατ' απόλυτη τιμή, είναι ίσο με Q. Αυτό τό φορτίο τό ονομάζουμε *ήλεκτρικό φορτίο του πυκνωτή*. Κατ' αναλογία με τόν όρισμό πού δώσαμε για τή χωρητικότητα άγωγού, έχουμε τόν ακόλουθο *όρισμό* :

Χωρητικότητα (C) πυκνωτή ονομάζεται τό σταθερό πηλίκο του ήλεκτρικού φορτίου (Q) του πυκνωτή διά της διαφοράς δυναμικού (U) πού υπάρχει μεταξύ των δύο όπλισμών του.

$$\text{χωρητικότητα πυκνωτή} \quad C = \frac{Q}{U}$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή μετριέται με τίς γνωστές μονάδες χωρητικότητας. Η χωρητικότητα (C) του πυκνωτή εκφράζει τό ήλεκτρικό φορτίο πού πρέπει νά δώσουμε στον πυκνωτή, για νά αυξηθεί κατά μία μονάδα δυναμικού ή διαφορά δυναμικού μεταξύ των όπλισμών του (για $U = 1$ είναι $C = Q$).

19. Ένέργεια φορτισμένου πυκνωτή

Όπως ένας φορτισμένος άγωγός, έτσι και ένας φορτισμένος πυκνωτής έχει αποταμιευμένη ενέργεια. Αν ό πυκνωτής έχει ήλεκτρικό φορτίο Q και μεταξύ των όπλισμών του υπάρχει διαφορά δυναμικού U (ή τάση), τότε

ή ενέργεια του πυκνωτή είναι :

$$\boxed{\text{ἐνέργεια πυκνωτή} \quad E_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} Q \cdot U} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ σέ Cb} \\ U \text{ σέ V} \\ E_{\eta\lambda} \text{ σέ Joule} \end{array} \right.$$

Ἐπειδή ἡ χωρητικότητα τοῦ πυκνωτή εἶναι $C = Q/U$, ἡ παραπάνω ἐξίσωση γράφεται καί ὡς ἐξῆς :

$$\boxed{E_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} C \cdot U^2 \quad \text{καί} \quad E_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C}}$$

20. Ἐπίπεδος πυκνωτής

Ἡ ἐπίπεδος πυκνωτής ἀποτελεῖται ἀπὸ δύο ἐπίπεδους παράλληλους ὄπλισμούς καί ἡ ἀπόσταση τοῦ ἑνὸς ὄπλισμοῦ ἀπὸ τὸν ἄλλο εἶναι l . Ἡ ἐπιφάνεια κάθε ὄπλισμοῦ ἔχει ἐμβαδὸ S καί μεταξύ τῶν δύο ὄπλισμῶν ὑπάρχει κενό (ἢ ἀέρας). Ἀποδεικνύεται ὅτι στό σύστημα MKSA ἡ χωρητικότητα (C_0) ἐπιπέδου πυκνωτή δίνεται ἀπὸ τήν ἐξίσωση :

$$\boxed{\text{χωρητικότητα ἐπιπέδου πυκνωτή} \quad C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 \text{ σέ Cb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \\ S \text{ σέ m}^2, l \text{ σέ m} \\ C \text{ σέ F} \end{array} \right.$$

ὅπου ϵ_0 εἶναι μιὰ σταθερή, πού ὀνομάζεται *διηλεκτρικὴ σταθερὴ τοῦ κενοῦ* καί εἶναι ἴση μέ :

$$\boxed{\text{διηλεκτρικὴ σταθερὴ τοῦ κενοῦ} \quad \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Cb}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}}$$

Παράδειγμα. Ἐπίπεδος πυκνωτής βρίσκεται στό κενό, ἡ ἀπόσταση τῶν ὄπλισμῶν του εἶναι $l = 5 \text{ mm}$, τὸ ἐμβαδὸ κάθε ὄπλισμοῦ εἶναι $S = 2 \text{ m}^2$ καί ἡ τάση μεταξύ τῶν ὄπλισμῶν του εἶναι $U = 10^4 \text{ V}$. Θὰ ὑπολογίσουμε τὴ χωρητικότητα (C_0) τοῦ πυκνωτή καί τὴν ἔνταση (E) τοῦ ὁμογενοῦς ἠλεκτρικοῦ πεδίου πού σχηματίζεται μεταξύ τῶν ὄπλισμῶν του. Ἡ χωρητικότητα εἶναι :

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Cb}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \cdot \frac{2 \text{ m}^2}{5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}$$

καί $C_0 = 3,54 \cdot 10^{-9} \text{ F} (*)$

Ἡ ἔνταση τοῦ ἠλεκτρικοῦ πεδίου εἶναι :

$$(*) \text{ Ἐχομε: } \frac{\text{Cb}^2}{\text{N} \cdot \text{m}} = \frac{\text{Cb}^2}{\text{Joule}} = \frac{\text{Cb}}{\text{Joule/Cb}} = \frac{\text{Cb}}{\text{V}} = \text{F}$$

$$E = \frac{U}{l} = \frac{10^4 \text{ V}}{5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \quad \text{καί} \quad E = 2 \cdot 10^6 \text{ V/m} \quad (\text{ή N/Cb})$$

Σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών σταθερών $K_{\eta\lambda}$ και ϵ_0 . Στο σύστημα MKSA τό κενό έχει όρισμένη διηλεκτρική σταθερή ϵ_0 . Η θεωρητική και ή πειραματική έρευνα απέδειξαν ότι ή ηλεκτρική σταθερή $K_{\eta\lambda}$ και ή διηλεκτρική σταθερή τοϋ κενού ϵ_0 συνδέονται μεταξύ τους με τή σχέση :

$$\text{οί δύο ηλεκτρικές σταθερές} \quad K_{\eta\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2}$$

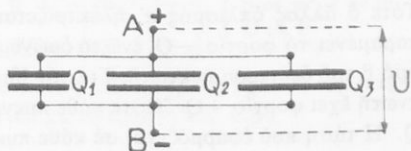
Παρατήρηση. Σύμφωνα με τήν παραπάνω σχέση στο σύστημα MKSA ό νόμος τοϋ Coulomb για τό κενό (ή τόν άέρα) σε συνάρτηση με τή διηλεκτρική σταθερή τοϋ κενού ϵ_0 δίνεται από τήν εξίσωση :

$$F_0 = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \text{ή} \quad F_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 \text{ σε Cb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \\ Q_1, Q_2 \text{ σε Cb} \\ r \text{ σε m, } F_0 \text{ σε N} \end{array} \right. \quad (1)$$

21. Σύνδεση πυκνωτών

Αν συνδέσουμε κατάλληλα πολλούς πυκνωτές, σχηματίζουμε μία συστοιχία πυκνωτών. Οί πίο άπλοί τρόποι συνδέσεως τών πυκνωτών είναι ή παράλληλη σύνδεση και ή σύνδεση κατά σειρά.

α. Παράλληλη σύνδεση. Στην παράλληλη σύνδεση οί πυκνωτές συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 18 (δηλαδή συνδέονται όλοι μαζί



Σχ. 18. Παράλληλη σύνδεση πυκνωτών.

οί θετικοί και όλοι μαζί οί άρνητικοί όπλισμοί). Αν οί πυκνωτές έχουν χωρητικότητα C_1, C_2, C_3 , τότε αποδεικνύεται ότι ή όλική χωρητικότητα $C_{ολ}$ τής συστοιχίας δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\text{παράλληλη σύνδεση} \quad C_{ολ} = C_1 + C_2 + C_3$$

Απόδειξη. Στους δύο όπλισμούς κάθε πυκνωτή εφαρμόζεται ή ίδια τάση U . Ωστε οί πυκνωτές έχουν ηλεκτρικά φορτία :

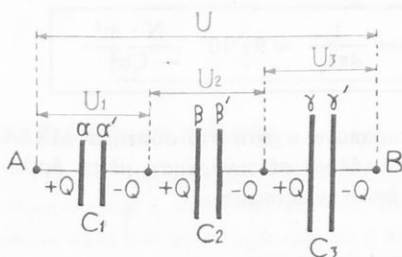
$$Q_1 = C_1 \cdot U \quad Q_2 = C_2 \cdot U \quad Q_3 = C_3 \cdot U$$

Τό *όλικό φορτίο* $Q_{ολ}$ τής συστοιχίας είναι :

$$Q_{ολ} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad \eta \quad Q_{ολ} = (C_1 + C_2 + C_3) \cdot U$$

Ή *όλική χωρητικότητα* $C_{ολ}$ τής συστοιχίας είναι :

$$C_{ολ} = \frac{Q_{ολ}}{U} \quad \alpha \rho \alpha \quad C_{ολ} = C_1 + C_2 + C_3$$



Σχ. 19. Σύνδεση πυκνωτών κατά σειρά.

β. Σύνδεση κατά σειρά. Στή *σύνδεση κατά σειρά* οί πυκνωτές συνδέονται όπως φαίνεται στο σχήμα 19 (δηλαδή ό άρνητικός όπλισμός του πρώτου πυκνωτή συνδέεται με τό θετικό όπλισμό του δεύτερου πυκνωτή κ.ο.κ.). Αν οί πυκνωτές έχουν χωρητικότητα C_1, C_2, C_3 , τότε αποδεικνύεται ότι *ή όλική χωρητικότητα* $C_{ολ}$ τής συστοιχίας δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\text{σύνδεση κατά σειρά} \quad \frac{1}{C_{ολ}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

Ή *Απόδειξη*. Στόν όπλισμό α του πρώτου πυκνωτή δίνουμε φορτίο $+Q$. Τότε ό άλλος όπλισμός α' ήλεκτρίζεται με έπαγωγή και στόν όπλισμό α' παραμένει τό φορτίο $-Q$, ενώ τό δμώνυμο φορτίο $+Q$ πηγαίνει στόν όπλισμό β του δεύτερου πυκνωτή. Για τόν ίδιο λόγο ό όπλισμός γ του τρίτου πυκνωτή έχει φορτίο $+Q$. Ωστε κάθε πυκνωτής έχει τό *ίδιο ήλεκτρικό φορτίο* Q . Ή τάση πού εφαρμόζεται σέ κάθε πυκνωτή είναι :

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \quad U_2 = \frac{Q}{C_2} \quad U_3 = \frac{Q}{C_3}$$

Ή *όλική τάση* U πού εφαρμόζεται στή συστοιχία είναι ίση με τό άθροισμα τών μερικών τάσεων, δηλαδή είναι :

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = Q \cdot \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

$$\text{καί} \quad \frac{U}{Q} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (1)$$

Ή *όλική χωρητικότητα* $C_{ολ}$ τής συστοιχίας είναι :

$$C_{ολ} = \frac{Q}{U} \quad \alpha \rho \alpha \quad \frac{1}{C_{ολ}} = \frac{U}{Q} \quad (2)$$

Από τις εξισώσεις (1) και (2) βρίσκουμε :

$$\frac{1}{C_{\text{ολ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

21α. Πυκνωτής με διηλεκτρικό υλικό

Ένας επίπεδος πυκνωτής έχει στον ένα όπλισμό του φορτίο $+Q$ και στον άλλο $-Q$. Η επιφάνεια κάθε όπλισμού έχει έμβαδό S και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο όπλισμών είναι U_0 . Η απόσταση των δύο όπλισμών είναι l . Όταν ο πυκνωτής βρίσκεται στο κενό (ή τον αέρα), τότε η χωρητικότητα (C_0) του πυκνωτή είναι :

$$C_0 = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l} \quad \text{καί ισχύει ή εξίσωση} \quad Q = C_0 \cdot U_0 \quad (1)$$

Μεταξύ των όπλισμών αυτού του πυκνωτή τοποθετούμε μία πλάκα από μονωτή, π.χ. γυαλί, που έχει πάχος l , όσο ήταν προηγουμένως τό πάχος του στρώματος του αέρα. Τότε η χωρητικότητα αυξάνει και από C_0 γίνεται $C > C_0$. Ο λόγος C/C_0 ονομάζεται *διηλεκτρική σταθερή* (ϵ) του γυαλιού, δέν έχει διαστάσεις και είναι διαφορετική για κάθε μονωτικό υλικό. Γενικά οί μονωτές ονομάζονται και *διηλεκτρικά υλικά*. Από τά παραπάνω συνάγεται ότι η *χωρητικότητα* (C) του επίπεδου πυκνωτή, όταν μεταξύ των όπλισμών του υπάρχει υλικό μέ *διηλεκτρική σταθερή* ϵ , είναι :

χωρητικότητα
πυκνωτή μέ
διηλεκτρικό

$$C = \epsilon \cdot C_0 \quad \text{ή} \quad C = \epsilon \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 \text{ σέ } \text{Cb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \\ S \text{ σέ } \text{m}^2, l \text{ σέ } \text{m} \\ C \text{ σέ } \text{F} \end{array} \right.$$

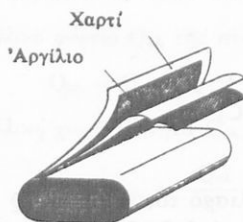
Παρατήρηση. Η διηλεκτρική σταθερή ϵ ονομάζεται *σχετική διηλεκτρική σταθερή* του υλικού, δηλαδή σχετικά μέ τό κενό ή τον αέρα.

Διηλεκτρική σταθερή (ϵ) *μερικων διηλεκτρικων*

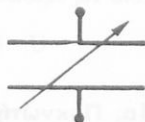
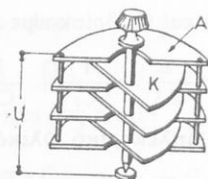
Παραφίνη 2. Χαρτί 2,4. Γυαλί 2-16. Μαρμαρυγίας 5-7.

21β. Μορφές πυκνωτων

Ο πυκνωτής που εξετάσαμε είναι *έπίπεδος πυκνωτής*. Στίς πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούμε σήμερα διάφορες μορφές πυκνωτων. Ο *φυλλωτός πυκνωτής* αποτελείται από δύο στενόμακρα φύλλα άργιλίου και μεταξύ τους υπάρχει ως διηλεκτρικό μία ταινία από παραφινωμένο χαρτί (σχ. 20). Οί όπλισμοί και τό διηλεκτρικό τυλίγονται, ώστε ο πυκνωτής νά έχει μικρό όγκο. Ο *μεταβλητός πυκνωτής* έχει ως διηλεκτρικό τον αέρα (σχ. 21). Ο ένας όπλισμός του αποτελείται από άκίνητες ήμικυκλικές πλάκες, που συνδέονται μεταξύ τους μέ μεταλλικές ράβδους. Ο άλλος όπλισμός



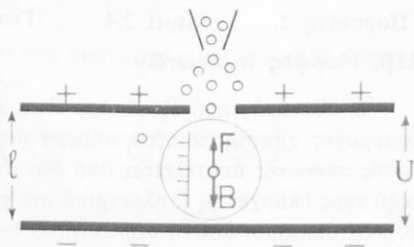
Φυλλωτός πυκνωτής.

Μεταβλητός πυκνωτής και
συμβολική παράστασή του.

του αποτελείται από όμοιες ήμικυκλικές πλάκες, που είναι στερεωμένες πάνω σε άξονα και μπορούν να μπαίνουν περισσότερο ή λιγότερο ανάμεσα στις μόνιμες πλάκες. Μέ τη μετακίνηση του κινητού όπλισμού μεταβάλλεται ή επιφάνεια (S) των όπλισμών και έτσι μεταβάλλεται ή χωρητικότητα του πυκνωτή. Οί μεταβλητοί πυκνωτές χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία και τήν τηλεόραση. Σε μερικές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πυκνωτές με *ύγρά διηλεκτρικά* (π χ. όρυκτέλαιο).

21 γ. Πειραματική απόδειξη του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου

Ο Millican (1910) πέτυχε να αποδείξει *πειραματικά* και να μετρήσει τό στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο e με τήν εξέης μέθοδο, που μπορούμε να τήν επαναλάβουμε. Μεταξύ δύο όριζόντιων μεταλλικών πλακών ύπάρχει όμογενές ηλεκτρικό πεδίο που οί δυναμικές γραμμές του είναι κατακόρυφες και ή έντασή του έχει μέτρο $E = U/l$, όπου U είναι ή διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πλακών και l ή απόστασή τους (σχ.21α). Μέ ψεκασμό σχηματίζονται κοντά σε μία τρύπα τής πάνω πλάκας μικρά σταγονίδια λαδιού (ύγρό που δέν εξατμίζεται και μπορεί να παραμείνει στον άερα άρκετό χρόνο). Κατά τόν ψεκασμό μερικά σταγονίδια ηλεκτρίζονται μέ τριβή. Μέ μία κατάλληλη διόπτρα έφοδιασμένη μέ μικρομετρική κλίμακα παρακολουθούμε τήν κίνηση των σταγονιδίων μέσα στό ηλεκτρικό πεδίο. Άς θεωρήσουμε ένα σταγονίδιο που έχει μάζα m βάρος $B = mg$ και ηλεκτρικό φορτίο κατ' απόλυτη τιμή ίσο μέ q . Τότε πάνω στό σταγονίδιο ένεργεί εξαιτίας του ηλεκτρικού φορτίου του μία ηλεκτρική δύναμη, που έχει μέτρο $F = Eq$ και είναι κατακόρυφη. Άν ρυθμίσουμε κατάλληλα τήν τάση U κατορθώνουμε



Σχ. 21 α. Σχηματική παράσταση του πειράματος του Millican.

νά διατηρείται τό σταγονίδιο ακίνητο. Τότε τό βάρος \vec{B} του σταγονιδίου καί ή ηλεκτρική δύναμη \vec{F} είναι αντίθετες (ή άνωση του άέρα πάνω στο σταγονίδιο θεωρείται άσήμαντη) καί ισχύει ή εξίσωση :

$$E \cdot q = m \cdot g \quad \eta \quad \frac{U}{l} \cdot q = m \cdot g \quad \text{καί} \quad q = \frac{m \cdot g \cdot l}{U} \quad (1)$$

Άν είναι γνωστή ή μάζα m του σταγονιδίου τότε από τήν εξίσωση (1) υπολογίζεται τό φορτίο q του σταγονιδίου. Ο Millikan από πολλές ακριβείς μετρήσεις κατέληξε στο εξής γενικό συμπέρασμα :

Τό ηλεκτρικό φορτίο (q) των σταγονιδίων λαδιού είναι πάντοτε άκέραιο πολλαπλάσιο ενός στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου e , που κατ' άπόλυτη τιμή είναι ίσο με τό ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου $1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb.

ηλεκτρικό φορτίο σταγονιδίου	$q = n \cdot e$
στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο	$ e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Cb

Υπολογισμός τής μάζας m του σταγονιδίου. Άν τό σταγονίδιο έχει άκτίνα r , καί πυκνότητα ρ τότε ή μάζα του m είναι :

$$m = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \rho \quad (2)$$

Ο άέρας έχει συντελεστή έσωτερικής τριβής η καί τό σταγονίδιο πέφτοντας μέσα στον άέρα άποκτá όριακή ταχύτητα v_{op} , που δίνεται από τήν εξίσωση:

$$v_{op} = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g}{\eta} \cdot (\rho - \rho_0)^* \quad (3)$$

όπου ρ_0 είναι ή πυκνότητα του άέρα. Τήν όριακή ταχύτητα τή μετράμε ως εξής : Όταν καταργηθεί τό ηλεκτρικό πεδίο, τό σταγονίδιο αρχίζει νά πέφτει, γρήγορα όμως ή κίνησή του γίνεται όμαλή γιατί τό σταγονίδιο άποκτá τήν όριακή ταχύτητα v_{op} , τήν όποία μπορούμε νά μετρήσουμε. Τότε από τήν εξίσωση (3) βρίσκουμε τήν άκτίνα r του σταγονιδίου καί έπειτα από τήν εξίσωση (2) βρίσκουμε τή μάζα m του σταγονιδίου.

(* Τό η είναι ό συντελεστής έσωτερικής τριβής των ρευστών. Η μονάδα του στο σύστημα SI είναι $1 \text{ N} \cdot \text{sec} \cdot \text{m}^{-2}$ καί ή τιμή του εξαρτáται από τό είδος του ρευστου.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

21. Ἀγωγός ἔχει χωρητικότητα $C = 10 \mu\text{F}$ καὶ δυναμικὸ $U = 4 \text{ V}$. Πόσο εἶναι τὸ φορτίο τοῦ ἀγωγοῦ;
22. Σφαιρικός ἀγωγός ἔχει ἀκτίνα $R = 6 \text{ cm}$ καὶ δυναμικὸ $U = 33 \cdot 10^3 \text{ V}$. Πόση εἶναι ἡ χωρητικὸτητα καὶ πόσο τὸ φορτίο τοῦ ἀγωγοῦ;
23. Δύο μεταλλικές σφαῖρες ἔχουν ἀκτίνες $R_1 = 2 \text{ cm}$ καὶ $R_2 = 1 \text{ cm}$ καὶ ἔχουν ἀντίστοιχα φορτία $q_1 = 40 \cdot 10^{-9} \text{ Cb}$ καὶ $q_2 = -30 \cdot 10^{-9} \text{ Cb}$. Ἀρχικά οἱ δύο σφαῖρες εἶναι μονωμένες, ἔπειτα τίς συνδέουμε μὲ σύρμα πού ἔχει ἀσήμαντη χωρητικὸτητα. Πόσο εἶναι τὸ δυναμικὸ τῶν σφαιρῶν μετὰ τὴ σύνδεσή τους;
24. Σφαιρικός ἀγωγός ἔχει ἀκτίνα $R = 9 \text{ cm}$. Πόσο φορτίο πρέπει νὰ λάβει ὁ ἀγωγός, γιὰ νὰ ἔχει ἐνέργεια ἴση μὲ $E_{\eta\lambda} = 5 \text{ Joule}$; Πόσο εἶναι τότε τὸ δυναμικὸ τοῦ ἀγωγοῦ;
25. Δύο μεταλλικές σφαῖρες Α καὶ Β ἔχουν ἀκτίνες $R_A = 5 \text{ cm}$, $R_B = 20 \text{ cm}$ καὶ ἀντίστοιχα δυναμικὸ $U_A = 30 \cdot 10^3 \text{ V}$ καὶ $U_B = 18 \cdot 10^3 \text{ V}$. Γιὰ μιὰ στιγμή φέρνουμε σὲ ἐπαφή τίς δύο σφαῖρες καὶ ἔπειτα τίς ἀπομακρύνουμε. α) Πόσο εἶναι τὸ φορτίο κάθε σφαῖρας πρὶν ἀπὸ τὴν ἐπαφή της καὶ μετὰ τὴν ἐπαφή της μὲ τὴν ἄλλη σφαῖρα; β) Πόσο εἶναι τὸ ἄθροισμα τῶν ἐνεργειῶν τῶν δύο σφαιρῶν πρὶν ἀπὸ τὴν ἐπαφή τους καὶ μετὰ τὴν ἐπαφή τους;
26. Ὁ κάθε ὄπλισμός ἑνὸς ἐπίπεδου πυκνωτῆ ἔχει ἐμβαδὸ $S = 1 \text{ m}$ καὶ μεταξύ τῶν ὄπλισμῶν του ὑπάρχει στρώμα ἀέρα, πού ἔχει πάχος $l = 1 \text{ mm}$. Ὁ ἕνας ὄπλισμός συνδέεται μὲ τὴ γῆ, ἐνῶ ὁ ἄλλος ὄπλισμός συνδέεται μὲ πηγή πού ἔχει σταθερὸ δυναμικὸ $U = 600 \text{ V}$. Νὰ βρεθεῖ ἡ χωρητικὸτητα, τὸ φορτίο καὶ ἡ ἐνέργεια τοῦ πυκνωτῆ.
27. Πυκνωτῆς ἔχει χωρητικὸτητα $C = 25 \mu\text{F}$. Πόση τάση U ὑπάρχει μεταξύ τῶν δύο ὄπλισμῶν του, ὅταν τὸ φορτίο του εἶναι $q = 10^{-3} \text{ Cb}$; Πόση ἐνέργεια ἔχει τότε ὁ πυκνωτῆς;
28. Ὁ κάθε ὄπλισμός ἑνὸς ἐπίπεδου πυκνωτῆ ἔχει ἐμβαδὸ $S = 10 \text{ cm}^2$ καὶ ἡ ἀπόσταση μεταξύ τῶν ὄπλισμῶν του εἶναι $l = 1 \text{ mm}$. Πόση εἶναι ἡ χωρητικὸτητα τοῦ πυκνωτῆ, ὅταν ἐφαρμόζεται στοὺς δύο ὄπλισμούς του τάση $U = 1000 \text{ V}$ καὶ πόση εἶναι ἡ ἐνέργεια τοῦ πυκνωτῆ;
29. Οἱ δύο ὀριζόντιοι ὄπλισμοὶ ἑνὸς πυκνωτῆ ἀπέχουν μεταξύ τους $l = 2 \text{ cm}$ καὶ ἔχουν διαφορὰ δυναμικοῦ $U = 3000 \text{ V}$. α) Πόση εἶναι ἡ ἐνταση τοῦ ὁμογενοῦς ηλεκτρικοῦ πεδίου; β) Μεταξύ τῶν δύο ὄπλισμῶν διατηρεῖται αἰωρούμενη μιὰ ηλεκτρισμένη σταγόνα λαδιοῦ, πού ἔχει μάζα $m = 12 \cdot 10^{-12} \text{ gr}$. Πόσο εἶναι τὸ φορτίο q τῆς σταγόνας; $g = 10 \text{ m/sec}^2$.
30. Δύο πυκνωτές ἔχουν χωρητικὸτητα $C_1 = 5 \mu\text{F}$ καὶ $C_2 = 15 \mu\text{F}$. α) Πόση εἶναι ἡ χωρητικὸτητα τῆς συστοιχίας, ὅταν συνδεθοῦν παράλληλα ἢ κατὰ σειρά; β) Ὅταν συνδεθοῦν παράλληλα, πόση τάση U πρέπει νὰ ἐφαρμόζεται στὶς ἄκρες τῆς συστοιχίας, ὥστε τὸ ὀλικὸ φορτίο της νὰ εἶναι $Q_{\text{ολ}} = 1 \text{ Cb}$; Πόσο εἶναι τότε τὸ φορτίο κάθε πυκνωτῆ;
31. Πέντε ὁμοιοι πυκνωτές ($n = 5$), πού ὁ καθένας ἔχει χωρητικὸτητα $C = 20 \mu\text{F}$, συνδέονται κατὰ σειρά καὶ στὶς ἄκρες τῆς συστοιχίας ἐφαρμόζεται τάση $U = 1200 \text{ V}$. Νὰ βρεθεῖ: α) ἡ ὀλικὴ χωρητικὸτητα $C_{\text{ολ}}$ τῆς συστοιχίας; β) τὸ φορτίο Q κάθε πυκνωτῆ καὶ τὸ ὀλικὸ φορτίο $Q_{\text{ολ}}$ τῆς συστοιχίας καὶ γ) ἡ ἐνέργεια E κάθε πυκνωτῆ καὶ ἡ ὀλικὴ ἐνέργεια $E_{\text{ολ}}$ τῆς συστοιχίας.
32. Μεταβλητὸς πυκνωτῆς ἀποτελεῖται ἀπὸ 16 σταθερὰ καὶ ἀπὸ 15 στρεπτά ἡμικύ-

κλια, που έχουν ακτίνα $r = 4 \text{ cm}$. 'Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ημικυκλίων είναι $l = 1,25 \text{ mm}$. Πόση είναι η μεγαλύτερη χωρητικότητα C του πυκνωτή ;

33. 'Η απόσταση των δύο οριζόντιων όπλισμών ενός πυκνωτή είναι $l = 2 \text{ cm}$ και μεταξύ των δύο όπλισμών του υπάρχει τάση $U = 120 \text{ V}$. 1) Νά βρεθεί η ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου. 2) Τό μέτρο της δύναμης F που ενεργεί πάνω σέ ένα ηλεκτρόνιο, όταν αυτό βρίσκεται μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.

34. Στο προηγούμενο πρόβλημα (33) τό ηλεκτρόνιο ξεκινάει από τόν άρνητικό όπλισμό του πυκνωτή χωρίς άρχική ταχύτητα. Νά βρεθεί ή επίταχυνση της κινήσεως του ηλεκτρονίου και ό λόγος της κατακόρυφης ηλεκτροστατικής δύναμης F που ενεργεί πάνω στο ηλεκτρόνιο προς τή δύναμη $F_{\text{βαρ}}$ που όφείλεται στη βαρύτητα. $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.

35. Μεταξύ των δύο οριζόντιων όπλισμών ενός πυκνωτή, που ή απόστασή τους είναι $l = 2 \text{ cm}$ διατηρείται αιώρούμενη μιά φορτισμένη σταγόνα λαδιού που έχει μάζα $m = 4 \cdot 10^{-13} \text{ kg}$ και φορτίο $q = 2,4 \cdot 10^{-18} \text{ Cb}$. Νά βρεθεί ή τάση U μεταξύ των δύο όπλισμών του πυκνωτή και ή ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου. $g = 9,8 \text{ m/sec}^2$.

36. Στους δύο όπλισμούς ενός πυκνωτή εφαρμόζεται τάση $U = 4000 \text{ V}$ και ή απόστασή τους είναι $l = 2 \text{ cm}$. 'Ενα ηλεκτρόνιο κινείται μέ σταθερή ταχύτητα που έχει μέτρο $v_0 = 10^4 \text{ m/sec}$ και μπαίνει μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο έτσι, ώστε ή ταχύτητά του νά έχει τή διεύθυνση των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου. 1) Νά προσδιοριστεί ή δύναμη που ενεργεί πάνω στο ηλεκτρόνιο. 2) 'Η κινητική ενέργεια $E_{\text{κιν}}$ του ηλεκτρονίου πρίν μπει μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. 3) 'Η μεταβολή $\Delta E_{\text{κιν}}$ της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου κατά τήν κίνησή του μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. $m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.

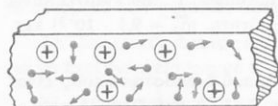
36α. Μιά σταγόνα λαδιού έχει διάμετρο $2r = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$ και έχει πάνω της ηλεκτρικό φορτίο κατ' άπόλυτη τιμή ίσο μέ $Q = 5e$. Θέλουμε νά διατηρηθεί αιώρούμενη μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει μεταξύ των όπλισμών ενός πυκνωτή, που ή μεταξύ τους απόσταση είναι $l = 1 \text{ cm}$. 1) Πόση τάση πρέπει νά εφαρμόσουμε στους όπλισμούς του πυκνωτή; 2) Πόσο πρέπει νά μεταβληθεί ή τάση, άν τό φορτίο της σταγόνας γίνει $Q' = 6e$; Πυκνότητα λαδιού $\rho = 0,9 \text{ gr/cm}^3$. $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$. $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.

Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα

ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ ΟΗΜ

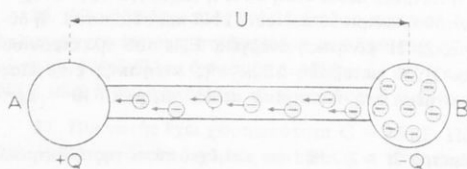
22. Τό ηλεκτρικό ρεύμα ως ροή ηλεκτρονίων

Μέσα σέ ένα σύρμα πού δέν διαρρέεται από ρεύμα τά ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται άτακτα (σχ. 22).

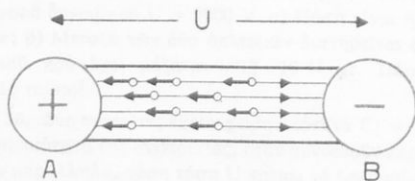


Σχ. 22. Τά ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται άτακτα.

Δύο ίσοι σφαιρικοί άγωγοί Α και Β έχουν ηλεκτρικά φορτία $+Q$ και $-Q$ και έπομένως μεταξύ αυτών των δύο άγωγών υπάρχει διαφορά δυναμικού U . Άν συνδέσουμε τούς δύο άγωγούς, τότε μέ τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τά ηλεκτρόνια πού πλεονάζουν στον άγωγό Β έρχονται μέσω του σύρματος στον άγωγό Α και εξουδετερώνουν τό θετικό φορ-



Σχ. 23. Ροή ηλεκτρονίων από τον άγωγό Β προς τον άγωγό Α.



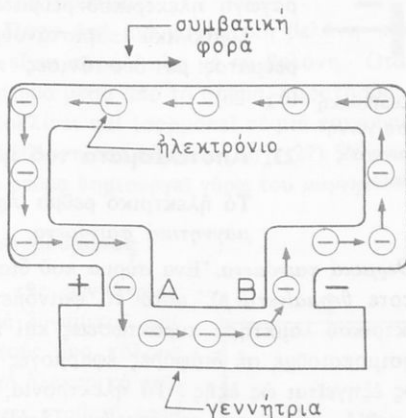
Σχ. 24. Τό ηλεκτρικό πεδίο έχει φορά από τον άγωγό Α προς τον άγωγό Β.

τίο του (σχ. 23). Έτσι οι δύο άγωγοί γίνονται ουδέτεροι. Αυτή ή ροή ηλεκτρονίων μέσα στό σύρμα είναι ένα **ηλεκτρικό ρεύμα**. Σ' αυτή τήν περίπτωση ή διάρκεια του ηλεκτρικού ρεύματος είναι **ελάχιστη**. Τά ηλεκτρόνια κινούνται μέ φορά αντίθετη μέ τή φορά του ηλεκτρικού πεδίου (σχ. 24)

Άν θέλουμε νά είναι **συνεχής ή ροή** των ηλεκτρονίων μέσα στό σύρμα, τότε πρέπει συνεχώς νά αφαιρούνται από τον άγωγό Α τά ηλεκτρόνια πού έρχονται σ' αυτόν και νά ξαναγυρίζουν στον άγωγό Β.

Πρέπει δηλαδή νά διατηρείται **σταθερή διαφορά δυναμικού** U μεταξύ των δύο άγωγών Α και Β. Η συνεχής αφαίρεση των ηλεκτρονίων από τον άγωγό Α και ή επαναφορά τους στον άγωγό Β γίνεται μέ ειδικές μηχανές πού ονομάζονται **γεννήτριες ρεύμα-**

τος ή πίο άπλά γεννήτριες (σχ. 25). Έτσι μπορούμε νά πούμε ότι κάθε γεννήτρια είναι μιά άντλία ηλεκτρονίων. Οί δύο άγωγοί Α και Β άποτελοϋν τούς δύο πόλους τής γεννήτριας (θετικός και άρνητικός πόλος). Τό ηλεκτρικό ρεύμα πού περνάει μέσα από τό σύρμα έχει σταθερή φορά από τόν άρνητικό πρós τό θετικό πόλο τής γεννήτριας (συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα). Αύτή ή



Σχ. 25. Η γεννήτρια εξασφαλίζει τή ροή τών ηλεκτρονίων μέσα στό σύρμα.

φορά του ρεύματος λέγεται *πραγματική φορά*. Όταν δέν ήταν άκόμη γνωστή ή φύση του ηλεκτρικού ρεύματος, δέχτηκαν κατά συνθήκη ότι τό ρεύμα πηγαινει από τό θετικό πρós τόν άρνητικό πόλο τής γεννήτριας. Αύτή ή φορά του ρεύματος λέγεται *συμβατική φορά* και εξακολουθεί νά εφαρμόζεται στην τεχνική. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά έξής συμπεράσματα :

- I. Τό ηλεκτρικό ρεύμα σέ μεταλλικούς άγωγούς είναι ροή ηλεκτρονίων.
- II. Η γεννήτρια δημιουργεί μεταξύ τών δύο πόλων τής σταθερή διαφορά δυναμικού (τάση) και εξαιτίας τής προκαλείται συνεχής ροή ηλεκτρονίων από τόν άρνητικό πρós τό θετικό πόλο τής γεννήτριας μέσω του άγωγού πού συνδέει τούς δύο πόλους τής.

Παρατήρηση. Θα εξετάσουμε τό ηλεκτρικό ρεύμα χρησιμοποιώντας τή συμβατική φορά του ρεύματος.

Είδη γεννητριών. Στην πράξη χρησιμοποιούμε κυρίως τρία είδη γεννητριών, τά *ηλεκτρικά στοιχεία*, τούς *συσσωρευτές* και τίς *βιομηχανικές γεννήτριες*.

Τά *ηλεκτρικά στοιχεία* χρησιμοποιούνται μόνο για τή λειτουργία μικρών φορητών συσκευών (ηλεκτρικά φανάρια, ραδιόφωνα, μαγνητόφωνα, ακουστικά, ύπολογιστές κ.ά.).

Οί *συσσωρευτές* χρησιμοποιούνται σέ πάρα πολλές εφαρμογές (αυτοκίνητα, ύποβρύχια, εργαστήρια κ.ά.).

Οί *βιομηχανικές γεννήτριες* άποτελοϋν τό σπουδαιότερο είδος γεννη-



Σχ. 26. Συμβολική παράσταση γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.

τριών και χρησιμοποιούνται για τή βιομηχανική παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

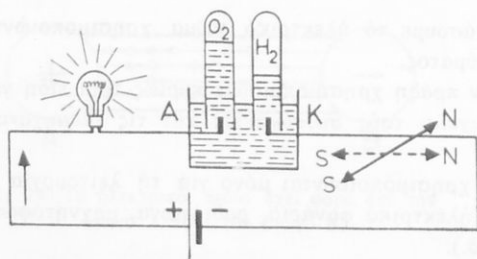
Συμβολικά παριστάνουμε μία γεννήτρια συνεχούς ρεύματος με δύο άνισες παράλληλες μικρές ευθείες (σχ. 26).

23. Αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος

Τό ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί θερμικά, χημικά και μαγνητικά φαινόμενα.

α. *Θερμικά φαινόμενα.* Ένα σύρμα που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα πάντοτε θερμαίνεται. Σ' αυτό τό φαινόμενο στηρίζεται ή λειτουργία του ηλεκτρικού λαμπτήρα πυρακτώσεως και πολλών θερμικών συσκευών που χρησιμοποιούμε σε διάφορες εφαρμογές (σχ. 27). Η θέρμανση του σύρματος εξηγείται ως εξής: Τά ηλεκτρόνια, μέ τήν επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, κινούνται και έπομένως αποκτούν *κινητική ενέργεια*. Καθώς όμως προχωρούν μέσα στή μάζα του σύρματος συγκρούονται μέ τά ακίνητα άτομα του μετάλλου και τότε μέρος τής κινητικής ενέργειας τών ηλεκτρονίων μετατρέπεται σε *θερμότητα*. Η θέρμανση τών άγωγών εξαιτίας του ηλεκτρικού ρεύματος που περνάει μέσα από αυτούς ονομάζεται φαινόμενο *Joule*.

β. *Χημικά φαινόμενα.* Όταν τό ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από ύδατικά διαλύματα οξέων, βάσεων και αλάτων, εμφανίζονται προϊόντα που προέρχονται από τή *χημική αποσύνθεση* αυτών τών σωμάτων. Τό φαινόμενο αυτό ονομάζεται *ηλεκτρόλυση* και ή συσκευή που χρησιμοποιείται για τήν ηλεκτρόλυση ονομάζεται *βολτάμετρο* (σχ. 27). Τά δύο ηλεκτρόδια, που συνδέονται μέ τό θετικό και τόν άρνητικό πόλο τής γεννήτριας, ονομάζονται αντίστοιχα *άνοδος* και *κάθοδος*.



Σχ. 27. Θερμικά, χημικά και μαγνητικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος.

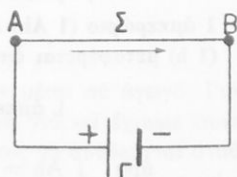
Κατά τήν ηλεκτρόλυση άραιών διαλυμάτων οξέων στήν *κάθοδο* συλλέγεται ύδρογόνο, ενώ κατά τήν ηλεκτρόλυση διαλυμάτων βάσεων και αλάτων συλλέγεται μέταλλο. Στο σχήμα 27 φαίνονται τά προϊόντα που συλλέγονται στά δύο ηλεκτρόδια κατά τήν

ηλεκτρόλυση διαλύματος θειικού οξέος. Τήν εξήγηση του φαινομένου της ηλεκτρολύσεως θά δοῦμε σέ ἄλλο κεφάλαιο.

γ. *Μαγνητικά φαινόμενα.* Πάνω ἀπό μιά μαγνητική βελόνη πού ἤρμεϊ, φέρνουμε ἓνα σύρμα πού εἶναι παράλληλο μέ τή βελόνη. "Όταν ἀφήσουμε νά περάσει ηλεκτρικό ρεύμα μέσα ἀπό τό σύρμα, παρατηροῦμε ὅτι ἡ μαγνητική βελόνη ἀμέσως ἀποκλίνει καί ἰσορροπεῖ σέ μιά καινούρια θέση σχηματίζοντας γωνία μέ τή διεύθυνση τοῦ σύρματος (σχ. 27). Τό φαινόμενο αὐτό δείχνει ὅτι τό ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεῖ γύρω του *μαγνητικό πεδίο*.

24. Ἔνταση τοῦ ηλεκτρικοῦ ρεύματος

Μεταξύ τῶν δύο πόλων τῆς γεννήτριας διατηρεῖται σταθερή διαφορά δυναμικοῦ καί τότε τό σύρμα πού συνδέει τούς δύο πόλους τῆς γεννήτριας διαρρέεται ἀπό ηλεκτρικό ρεύμα (σχ.28). Αὐτό τό ρεύμα ἔχει *σταθερή φορά* ἀπό τό θετικό πρὸς τόν ἀρνητικό πόλο τῆς γεννήτριας (συμβατική φορά) καί ὀνομάζεται *συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα*. Στή διάρκεια χρόνου t ἀπό μιά τομή τοῦ σύρματος περνάει ἡλεκτρικό φορτίο Q καί ἰσχύει ὁ ἐξῆς *ὀρισμός* :



Σχ. 28. Τό σύρμα (Σ) διαρρέεται ἀπό συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα.

Ἔνταση (I) ηλεκτρικοῦ ρεύματος ὀνομάζεται τό πηλίκο τοῦ ηλεκτρικοῦ φορτίου (Q) πού περνάει ἀπό μιά τομή τοῦ ἀγωγοῦ διά τοῦ ἀντίστοιχου χρόνου (t).

$$\text{ένταση ηλεκτρικοῦ ρεύματος} = \frac{\text{φορτίο}}{\text{χρόνος}} \quad I = \frac{Q}{t}$$

Μονάδα ἐντάσεως ρεύματος. Στό σύστημα MKSA ἡ ένταση ηλεκτρικοῦ ρεύματος εἶναι *θεμελιῶδες μέγεθος*. Ἡ *μονάδα ἐντάσεως ρεύματος* ὀνομάζεται *Ampère* (1 A) καί ὀρίζεται ἀπό ὀρισμένη ἐξίσωση τοῦ ηλεκτρομαγνητισμοῦ, μποροῦμε ὅμως νά τήν ὀρίσουμε ἀπό τήν ἐξίσωση $I = Q/t$, ἂν βάλουμε σ' αὐτή $Q = 1 \text{ Cb}$ καί $t = 1 \text{ sec}$. Ἔτσι βρίσκουμε ὅτι :

1 Ampère εἶναι ἡ ένταση ρεύματος πού κατά δευτερόλεπτο (1 sec) μεταφέρει ἡλεκτρικό φορτίο ἴσο μέ 1 Coulomb (1 Cb).

$$1 \text{ Ampère} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ sec}} \quad 1 \text{ A} = 1 \text{ Cb/sec}$$

Στις πρακτικές εφαρμογές χρησιμοποιούνται και τὰ ὑποπολλαπλάσια :

$$1 \text{ milliamperè (1 mA)} = 10^{-3} \text{ A, } 1 \text{ microampèrè (1 } \mu\text{A)} = 10^{-6} \text{ A}$$

Ἡ μονάδα ἠλεκτρικοῦ φορτίου ἀμπερώριο. Ἀπό τὴν ἐξίσωση ὀρισμοῦ τῆς ἐντάσεως ρεύματος $I = Q/t$ βρίσκουμε ὅτι στὴ διάρκεια χρόνου t ἔνα ἠλεκτρικό ρεῦμα πού ἔχει ἐνταση I μεταφέρει ἠλεκτρικό φορτίο :

$$Q = I \cdot t$$

Ἀπό αὐτὴ τὴν ἐξίσωση ὀρίζουμε μιά νέα πρακτικὴ μονάδα ἠλεκτρικοῦ φορτίου, πού ὀνομάζεται ἀμπερώριο (1 Ah) καὶ ὀρίζεται ὡς ἐξῆς :

1 ἀμπερώριο (1 Ah) εἶναι τὸ ἠλεκτρικό φορτίο, πού μέσα σέ μιά ὥρα (1 h) μεταφέρεται ἀπὸ ἠλεκτρικό ρεῦμα ἐντάσεως ἑνός Ampère (1 A).

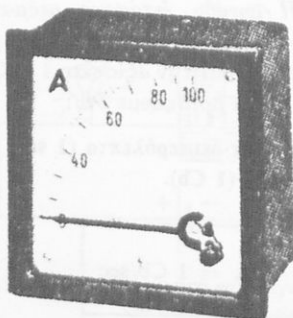
$$1 \text{ ἀμπερώριο (1 Ah)} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ h}$$

$$\text{ἄρα } 1 \text{ Ah} = 1 \frac{\text{Cb}}{\text{sec}} \cdot 3600 \text{ sec} \text{ καὶ } 1 \text{ Ah} = 3600 \text{ Cb}$$

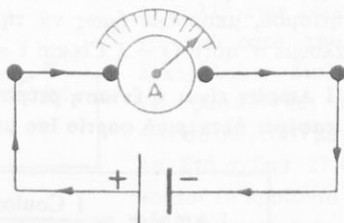
25. Μέτρηση τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος

Γιὰ τὴ μέτρηση τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος χρησιμοποιοῦμε εἰδικὰ ὄργανα πού ὀνομάζονται ἀμπερόμετρα (σχ. 29). Ἡ λειτουργία τους στηρίζεται στὰ θερμικά ἢ τὰ μαγνητικά ἀποτελέσματα τοῦ ρεύματος. Τὸ ἀμπερόμετρο τὸ συνδέουμε μὲ τὸν ἄγωγό ἔτσι, ὥστε τὸ ρεῦμα πού θέλουμε νὰ μετρήσουμε τὴν ἐντάσή του νὰ περνάει μέσα ἀπὸ τὸ ὄργανο (σχ. 30). Μὲ τὸ ἀμπερόμετρο βρίσκουμε ὅτι :

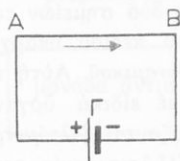
Σέ ὄλο τὸ μήκος τοῦ ἀγωγοῦ πού συνδέει τοὺς πόλους τῆς γεννήτριας ἢ ἐνταση (I) τοῦ ρεύματος εἶναι σταθερή.



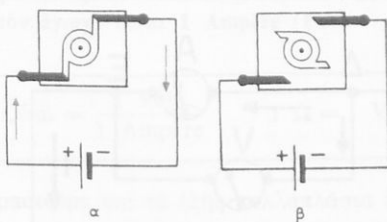
Σχ. 29. Ἀμπερόμετρο.



Σχ. 30. Μέτρηση τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος.



Σχ. 31. Κλειστό κύκλωμα.



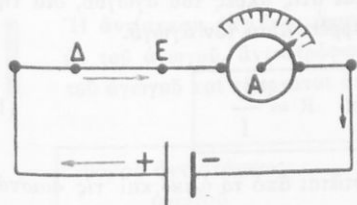
Σχ. 32. Διακόπτης (α κλειστό κύκλωμα, β άνοιχτό κύκλωμα).

26. Κύκλωμα

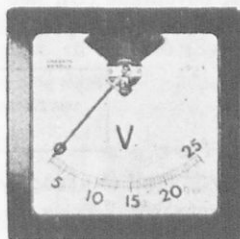
Το ηλεκτρικό ρεύμα είναι ροή ηλεκτρονίων μέσα σε άγωγο. Για να είναι συνεχής αυτή ή ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή για να έχουμε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, πρέπει οι δύο άκρες του σύρματος να συνδέονται σταθερά με τους δύο πόλους της γεννήτριας (σχ. 31). Τότε λέμε ότι έχουμε *κλειστό κύκλωμα*. Αν σε ένα σημείο του κυκλώματος παρεμβάλλουμε ένα μονωτή, π.χ. ένα στρώμα αέρα, τότε συμβαίνει διακοπή της ροής των ηλεκτρονίων, δηλαδή *διακοπή* του ρεύματος και λέμε ότι έχουμε *άνοιχτό κύκλωμα*. Για τη διακοπή ή την άποκατάσταση του ρεύματος χρησιμοποιούμε τους *διακόπτες*, που ως μονωτή έχουν συνήθως τον αέρα (σχ. 32).

27. Διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων του άγωγού

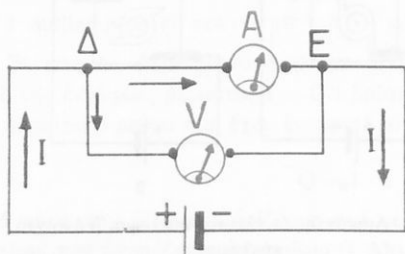
Όταν οι δύο πόλοι της γεννήτριας συνδέονται με σύρμα, το κύκλωμα είναι κλειστό και το σύρμα διαρρέεται από ρεύμα που έχει σταθερή ένταση I . Αυτή τη μετράμε με ένα αμπερόμετρο (σχ. 33). Η κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στο σύρμα οφείλεται στο *ηλεκτρικό πεδίο* που υπάρχει τότε μέσα στο σύρμα. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου αρχίζουν από το θετικό πόλο της γεννήτριας και καταλήγουν στον αρνητικό πόλο της. Μεταξύ δύο σημείων Δ και Ε του σύρματος τα ηλεκτρόνια κινούνται, επειδή μεταξύ



Σχ. 33. Μεταξύ των σημείων Δ και Ε του κυκλώματος υπάρχει διαφορά δυναμικού (τάση).



Σχ. 34. Βολτόμετρο.



Σχ. 35. Μέτρηση τῆς ἐντάσεως I τοῦ ρεύματος μετὸ ἀμπερόμετρο (A) καὶ τῆς τάσεως U μεταξύ τῶν σημείων Δ καὶ Ε μετὸ βολτόμετρο (V).

μείων Δ καὶ Ε τοῦ ἄγωγου, σχηματίζουμε μιὰ διακλάδωση τοῦ ρεύματος συνδέοντας τὸ βολτόμετρο μετὰ τὰ δύο σημεία Δ καὶ Ε τοῦ ἄγωγου (σχ. 35).

Παρατήρηση. Τὸ ἀμπερόμετρο μπαίνει στὸ κύκλωμα κατὰ σειρὰ, ἐνῶ τὸ βολτόμετρο μπαίνει σὲ ἓνα τμήμα τοῦ κυκλώματος κατὰ διακλάδωση.

28. Νόμος τοῦ Ohm γιὰ τμήμα ἄγωγου

α. Ἀντίσταση ἄγωγου. Ἐνα τμήμα ΔΕ τοῦ ἄγωγου (σχ. 35) διαρρέεται ἀπὸ ρεῦμα ἐντάσεως I ποῦ τὴ μετράμε μετὰ ἀμπερόμετρο. Μεταξύ τῶν δύο ἄκρων Δ καὶ Ε τοῦ ἄγωγου ὑπάρχει διαφορὰ δυναμικοῦ U (ἢ τάση), ποῦ τὴ μετράμε μετὰ βολτόμετρο. Πειραματικά βρίσκουμε ὅτι, ἂν ἡ διαφορὰ δυναμικοῦ μεταξύ τῶν σημείων Δ καὶ Ε γίνῃ $2U, 3U, 4U \dots$ ἢ ἐνταση τοῦ ρεύματος γίνῃ $2I, 3I, 4I \dots$ Ἄρα γιὰ τὸ τμήμα ΔΕ τοῦ ἄγωγου τὸ πηλίκο τῆς διαφορᾶς δυναμικοῦ ποῦ ἐφαρμόζεται στὶς ἄκρες τοῦ ἄγωγου διὰ τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος εἶναι σταθερό, χαρακτηριστικό γι' αὐτὸν ἄγωγό (ΔΕ) καὶ ὀνομάζεται *ἀντίσταση* τοῦ ἄγωγου. Ὡστε :

Ἀντίσταση (R) ἑνός ἄγωγου ὀνομάζεται τὸ σταθερὸ πηλίκο τῆς διαφορᾶς δυναμικοῦ (U), ποῦ ἐφαρμόζεται στὶς ἄκρες τοῦ ἄγωγου, διὰ τῆς ἐντάσεως (I) τοῦ ρεύματος, ποῦ διαρρέει αὐτὸ τὸν ἄγωγό.

$$\text{ἀντίσταση ἄγωγου } R = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Ἡ ἀντίσταση (R) ἑνός ἄγωγου ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὸ ὕλικό καὶ τὶς διαστάσεις τοῦ ἄγωγου καὶ ἀπὸ τὴ θερμοκρασία του.

Μονάδα ἀντιστάσεως ἄγωγου. Ἀπὸ τὴν ἐξίσωση (1) βρίσκουμε τὴ μονάδα ἀντιστάσεως ἄγωγου, ἢ ὁποία στὸ σύστημα MKSA ὀνομάζεται *Ohm* (ωm , 1Ω) καὶ ὀρίζεται ὡς ἑξῆς :

1 Ohm (1 Ω) είναι η αντίσταση που έχει ένας άγωγος, όταν στις άκρες του εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού 1 Volt (1 V) και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον άγωγό είναι 1 Ampère (1 A).

$$\text{μονάδα αντίστασεως } 1 \text{ Ohm} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampère}} \quad 1 \Omega = 1 \text{ V/A}$$

Στις εφαρμογές χρησιμοποιούμε και τα εξής πολλαπλάσια ή υποπολλαπλάσια της μονάδας Ohm :

$$1 \text{ kilohm (1 k}\Omega) = 10^3 \Omega \quad 1 \text{ megaohm (1 M}\Omega) = 10^6 \Omega$$

$$1 \text{ microohm (1 }\mu\Omega) = 10^{-6} \Omega$$

Παρατήρηση. Μιά στήλη υδραργύρου, που σε θερμοκρασία 0°C έχει μήκος 106,3 cm και τό εμβαδό της διατομής της είναι 1 mm², έχει αντίσταση ίση με 1 Ohm και αποτελεί τό πρότυπο της μονάδας αντίστασεως.

β. Νόμος του Ohm για τμήμα άγωγού. Ή εξίσωση (1) που βρήκαμε πειραματικά εκφράζει τόν ακόλουθο νόμο του Ohm :

Ή ένταση (I) του ρεύματος που διαρρέει έναν άγωγό είναι ανάλογη με τή διαφορά δυναμικού (U) που εφαρμόζεται στις άκρες του άγωγού και αντίστροφως ανάλογη με τήν αντίσταση (R) του άγωγού.

$$\text{νόμος του Ohm} \quad I = \frac{U}{R}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} U \text{ σε V} \\ R \text{ σε } \Omega \\ I \text{ σε A} \end{array} \right.$$

29. Νόμος της αντίστασεως άγωγού

Πειραματικά βρίσκουμε ότι για τήν αντίσταση ενός άγωγού ισχύει ό εξής νόμος της αντίστασεως άγωγού :

Ή αντίσταση (R) ενός όμογενοϋς άγωγού είναι ανάλογη με τό μήκος (l) του άγωγού, αντίστροφως ανάλογη με τό εμβαδό (S) της τομής του άγωγού και εξαρτάται από τό ύλικό του άγωγού.

νόμος αντίστασεως
άγωγού

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} l \text{ σε m, } S \text{ σε m}^2 \\ \rho \text{ σε } \Omega \cdot \text{m} \\ R \text{ σε } \Omega \end{array} \right. \quad (1)$$

Όπου ρ είναι μία σταθερή, που εξαρτάται από το υλικό του άγωγου και ονομάζεται *ειδική αντίσταση* του υλικού. Από την εξίσωση (1) βρίσκουμε :

$$\rho = R \cdot \frac{S}{l}$$

Άρα στο σύστημα MKSA μονάδα ειδικής αντίστασης είναι :

$$1 \Omega \cdot \frac{1 \text{ m}^2}{1 \text{ m}} \quad \eta \quad 1 \Omega \cdot \text{m}$$

Πειραματική απόδειξη. 1. Παίρνουμε σύρματα από το ίδιο μέταλλο και με το ίδιο έμβασό τομής (S), αλλά τα μήκη των συρμάτων είναι $l, 2l, 3l$. Στίς άκρες αυτών των συρμάτων εφαρμόζουμε διαδοχικά την ίδια διαφορά δυναμικού U και με άμπερόμετρο μετράμε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει κάθε σύρμα. Βρίσκουμε ότι οι αντίστοιχες εντάσεις των ρευμάτων είναι, $I, I/2, I/3$. Σύμφωνα με το νόμο του Ohm $I = U/R$, οι αντίστοιχες αντιστάσεις των συρμάτων είναι $R, 2R, 3R$, δηλαδή είναι *ανάλογες με το μήκος* των συρμάτων.

2. Παίρνουμε σύρματα από το ίδιο μέταλλο και με το ίδιο μήκος l , αλλά το έμβασό της τομής τους είναι $S, 2S, 3S$. Εφαρμόζουμε σ' αυτά τα σύρματα διαφορά δυναμικού U και βρίσκουμε ότι οι αντίστοιχες εντάσεις των ρευμάτων είναι $I, 2I, 3I$. Σύμφωνα με το νόμο του Ohm $I = U/R$ οι αντίστοιχες αντιστάσεις των συρμάτων είναι $R, R/2, R/3$, δηλαδή είναι *αντιστροφώς ανάλογες με το έμβασό της τομής* των συρμάτων.

3. Παίρνουμε σύρματα από διαφορετικά μέταλλα, αλλά τα σύρματα αυτά έχουν το ίδιο μήκος (l) και το ίδιο έμβασό τομής (S). Εφαρμόζουμε στα σύρματα την ίδια διαφορά δυναμικού (U). Τότε βρίσκουμε ότι οι εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τα σύρματα είναι διαφορετικές, γιατί η αντίσταση του κάθε σύρματος εξαρτάται από το υλικό του.

Μερικές ειδικές αντιστάσεις (σε $\Omega \cdot \text{m}$)

Άργυρος	$1,5 \cdot 10^{-8}$	Χαλκός	$1,6 \cdot 10^{-8}$	Άργίλιο	$2,5 \cdot 10^{-8}$
Βολφράμιο	$6 \cdot 10^{-8}$	Σίδηρος	$10 \cdot 10^{-8}$	Υδράργυρος	$94 \cdot 10^{-8}$

Σημείωση. Παρατηρούμε ότι *τή μικρότερη* ειδική αντίσταση έχουν κατά σειρά ο άργυρος, ο χαλκός και το άργίλιο και γι' αυτό τα σύρματα που χρησιμοποιούμε είναι κυρίως από χαλκό ή και από άργίλιο. Λέμε ότι αυτά τα τρία μέταλλα έχουν *τή μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα*.

Μεταβολή της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία. Πειραματικά βρήκαμε ότι *η ειδική αντίσταση* των καθαρών μετάλλων *αυξάνει* με

τή θερμοκρασία. Αν ένα μέταλλο στη θερμοκρασία 0°C έχει ειδική αντίσταση ρ_0 , τότε στη θερμοκρασία $\theta^{\circ}\text{C}$ έχει ειδική αντίσταση ρ που δίνεται από την εξίσωση :

$$\text{ειδική αντίσταση } \rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha\theta)$$

όπου α είναι ο θερμοκός συντελεστής αντίστασης και ο όποιος για τα καθάρια μέταλλα έχει περίπου την τιμή $\alpha = 0,004 \text{ grad}^{-1}$. Η μεταβολή της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία υπολογίζεται πάντοτε στην τεχνική και εφαρμόζεται για τη μέτρηση θερμοκρασιών με ειδικά θερμόμετρα, που ονομάζονται *θερμόμετρα αντίστασης*.

Υπεραγωγιμότητα. Όταν η θερμοκρασία των μετάλλων πλησιάσει προς το απόλυτο μηδέν, τότε η ειδική αντίστασή τους γίνεται ίση με μηδέν, δηλαδή οι άγωγοι δεν παρουσιάζουν αντίσταση. Το φαινόμενο αυτό το ονομάζουμε *υπεραγωγιμότητα* και είναι πολύ ενδιαφέρον, γιατί στις θερμοκρασίες κοντά στο απόλυτο μηδέν τα ηλεκτρόνια του ρεύματος κινούνται μέσα στο μέταλλο χωρίς να προκαλούν θέρμανση του άγωγου. Η θερμοκρασία, που κάτω από αυτήν, εκδηλώνεται η υπεραγωγιμότητα, είναι χαρακτηριστική για κάθε μέταλλο, π.χ. για το μόλυβδο είναι $T \leq 7^{\circ}\text{K}$, ενώ για τον κασσίτερο είναι $T \leq 4^{\circ}\text{K}$.

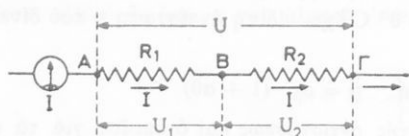
Άγωγοί σταθερής αντίστασης. Όρισμένα κράματα, όπως η *κωνσταντάνη* (Cu, Ni), ή *μαγγανίνη* (Mn, Cu, Ni) κ.ά. έχουν θερμοκός συντελεστής αντίστασης σχεδόν ίσο με μηδέν ($\alpha = 0$). Έπομένως η αντίσταση συρμάτων από τέτοια κράματα είναι *ανεξάρτητη* από τη θερμοκρασία. Σε όργανα ακριβείας και γενικά σε συσκευές που θέλουμε να έχουν σταθερή αντίσταση χρησιμοποιούμε σύρματα από κράματα σταθερής αντίστασης.

Ήμιαγωγοί. Οί *ήμιαγωγοί* σε χαμηλή θερμοκρασία (κάτω από 0°C) έχουν μεγάλη ειδική αντίσταση. Όταν όμως η θερμοκρασία των ήμιαγωγών αυξάνει, η ειδική αντίστασή τους *ελαττώνεται* πολύ γρήγορα. Ωστε, *αντίθετα με τα μέταλλα*, στους ήμιαγωγούς η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί σημαντική *ελάττωση της αντίστασης*. Έτσι από ήμιαγωγούς κατασκευάζουμε αντιστάσεις που είναι πολύ ευαίσθητες στις μεταβολές της θερμοκρασίας. Αυτές οι αντιστάσεις χρησιμοποιούνται σε διάφορες διατάξεις (π.χ. στη θερμομετρία).

30. Σύνδεση αντιστάσεων

Μεταξύ δύο σημείων ενός κυκλώματος μπορεί να υπάρχουν πολλές αντιστάσεις που συνδέονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους. Οί απλούστεροι τρόποι σύνδεσης αντιστάσεων είναι η *σύνδεση κατά σειρά* και η *παράλληλη σύνδεση*.

α. Σύνδεση αντιστάσεων κατά σειρά. Δύο αντιστάσεις R_1 και R_2



Σχ. 36. Σύνδεση δύο αντιστάσεων κατά σειρά.

στή σύνδεση αντιστάσεων κατά σειρά ή *όλική αντίσταση* ($R_{ολ}$) του συστήματος δίνεται από την εξίσωση:

$$R_{ολ} = R_1 + R_2 \text{ και γενικά}$$

$$R_{ολ} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Απόδειξη. Στις άκρες των αντιστάσεων R_1 και R_2 εφαρμόζονται αντίστοιχα οι τάσεις U_1 και U_2 . Τότε σύμφωνα με το νόμο του Ohm έχουμε τις εξισώσεις:

$$\text{για την αντίσταση } R_1$$

$$U_1 = I \cdot R_1$$

$$\text{για την αντίσταση } R_2$$

$$U_2 = I \cdot R_2$$

Αν προσθέσουμε κατά μέλη τις δύο εξισώσεις, βρίσκουμε:

$$U_1 + U_2 = I \cdot (R_1 + R_2) \quad \text{ή} \quad U = I \cdot (R_1 + R_2) \quad (1)$$

Τό σύστημα των δύο αντιστάσεων R_1 και R_2 έχει *όλική αντίσταση* $R_{ολ}$ και ισχύει ο νόμος του Ohm:

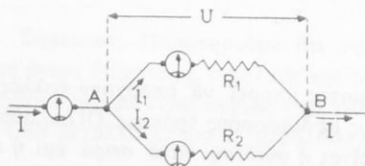
$$U = I \cdot R_{ολ} \quad (2)$$

Εξισώνοντας τα δεύτερα μέλη των εξισώσεων (1) και (2) βρίσκουμε:

$$R_{ολ} = R_1 + R_2$$

β. Παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων. Μεταξύ δύο σημείων A και B ενός κυκλώματος παρεμβάλλονται δύο αντιστάσεις R_1 και R_2 (σχ. 37).

Σ' αυτή την περίπτωση λέμε ότι έχουμε *παράλληλη σύνδεση* των αντιστάσεων R_1 και R_2 . Στο σημείο A του κυκλώματος τό κύριο ρεύμα που έχει ένταση I διακλαδίζεται σε δύο ρεύματα, που έχουν εντάσεις I_1 και I_2 . Με άμπερόμετρα μετράμε τις εντάσεις I , I_1 , I_2 των αντίστοιχων ρευμάτων και βρίσκουμε ότι ισχύει ο ακόλουθος κανόνας του Kirchhoff:



Σχ. 37. Παράλληλη σύνδεση δύο αντιστάσεων.

Σε μία διακλάδωση άγωγών ή ένταση (I) του κύριου ρεύματος είναι ίση με τό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων που διαρρέουν τούς άγωγούς της διακλαδώσεως.

$$\text{κανόνας του Kirchhoff } I = I_1 + I_2$$

Αποδεικνύεται ότι στην παράλληλη σύνδεση αντιστάσεων ή *όλική αντίσταση* ($R_{ολ}$) του συστήματος δίνεται από την εξίσωση :

$$\frac{1}{R_{ολ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{καί γενικά} \quad \frac{1}{R_{ολ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots + \frac{1}{R_v}$$

Απόδειξη. Στις δύο αντιστάσεις R_1 και R_2 εφαρμόζεται ή *ίδια τάση* U καί σύμφωνα με τό νόμο του Ohm έχουμε τις εξισώσεις :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{καί} \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

Αν προσθέσουμε κατά μέλη τις δύο εξισώσεις, βρίσκουμε ότι είναι :

$$I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} \quad \text{ή} \quad I = U \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

Τό σύστημα των δύο αντιστάσεων R_1 και R_2 έχει *όλική αντίσταση* $R_{ολ}$ καί ισχύει ό νόμος του Ohm :

$$I = \frac{U}{R_{ολ}} \quad (5)$$

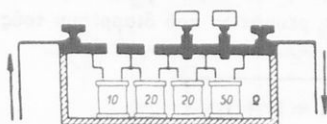
Εξισώνοντας τά δεύτερα μέλη των εξισώσεων (4) καί (5) βρίσκουμε :

$$\frac{1}{R_{ολ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

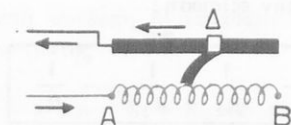
31. Μέτρηση αντιστάσεων

Η μέτρηση της αντιστάσεως ενός άγωγού ΔE (σχ. 35) γίνεται εύκολα, αν με τό *άμπερόμετρο* μετρήσουμε την ένταση I του ρεύματος που διαρρέει τόν άγωγό καί με τό *βολτόμετρο* μετρήσουμε την τάση U που εφαρμόζεται στις άκρες του άγωγού. Τότε ή αντίσταση του άγωγού είναι $R = U/I$. Στην πράξη για τή μέτρηση των αντιστάσεων χρησιμοποιούμε ειδικά όργανα, που ονομάζονται *ώμόμετρα*.

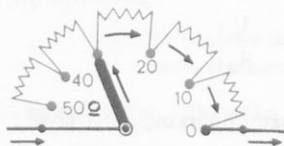
31 α. Ρυθμιστικές αντίστασεις



Σχ. 37α. Κιβώτιο αντίστασεων.



Σχ. 37β. Ρυθμιστική αντίσταση με δρομέα.

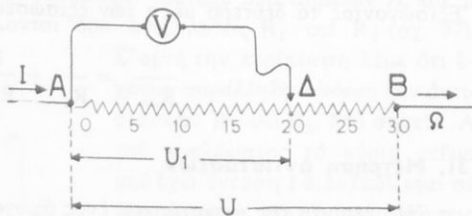


Σχ. 37γ. Ρυθμιστική αντίσταση με μοχλό.

Σε πολλές περιπτώσεις είναι ανάγκη να μεταβάλλουμε την ένταση (I) του ρεύματος που διαρρέει έναν άγωγο. Αυτό μπορεί να γίνει, αν μεταβληθεί η αντίσταση (R) του κυκλώματος. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιούμε ειδικά όργανα, που ονομάζονται *ρυθμιστικές αντίστασεις* και μπαίνουν στο κύκλωμα κατά σειρά. Έχουμε διάφορους τύπους ρυθμιστικών αντίστασεων. Το σχήμα 37α δείχνει ένα κιβώτιο *αντίστασεων*. Αφαιρώντας ορισμένα μεταλλικά κομμάτια παρεμβάλλουμε την αντίσταση που θέλουμε, π.χ. στο σχήμα φαίνεται ότι αυξήσαμε την αντίσταση του κυκλώματος κατά 30Ω . Στο σχήμα 37β φαίνεται μία *ρυθμιστική αντίσταση με δρομέα* και στο σχήμα 37γ μία *ρυθμιστική αντίσταση με μοχλό*. Μετακινώντας το δρομέα ή το μοχλό αυξάνουμε ή ελαττώνουμε την αντίσταση του κυκλώματος.

31 β. Ρυθμιστής τάσεως

Στις άκρες ενός ομογενούς άγωγου AB με σταθερή διατομή εφαρμόζεται σταθερή τάση U (σχ. 37δ). Ο άγωγός έχει αντίσταση R , διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασεως I και ισχύει η εξίσωση $I = U/R$. Το σχήμα $\Delta\Delta$ του άγωγού έχει αντίσταση R_1 . Σύμφωνα με το νόμο του Ohm ή τάση στις άκρες του άγωγού $\Delta\Delta$ είναι:



Σχ. 37δ. Διάταξη για τη μεταβολή της τάσεως.

$$U_1 = I \cdot R_1 \quad \text{ή} \quad U_1 = \frac{U}{R} \cdot R_1$$

“Αν μεταβάλλουμε την αντίσταση R_1 , παίρνουμε διάφορες τιμές της τάσεως U_1 . Σ’ αυτή την άρχή στηρίζεται ο ρυθμιστής τάσεως ή ποτενσιόμετρο. Η άκρη Α του άγωγού συνδέεται με τον ένα άκροδέκτη βολτομέτρου, ενώ ο άλλος άκροδέκτης του βολτομέτρου συνδέεται με δρομέα Δ, πού μπορεί νά μετακινείται κατά μήκος του άγωγού ΑΒ. Έτσι, μετακινώντας το δρομέα πάνω στόν άγωγό ΑΒ, παίρνουμε διάφορες τιμές τάσεων.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

37. Στις άκρες ενός σύρματος πού έχει αντίσταση $R = 2,5 \Omega$ εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού $U = 75 \text{ V}$. Πόσο ηλεκτρικό φορτίο περνάει από τό σύρμα σέ χρόνο $t = 20 \text{ min}$;

38. Ένα σύρμα έχει ειδική αντίσταση $\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ και διάμετρο $\delta = 1 \text{ mm}$. Πόσο μήκος l από αυτό τό σύρμα έχει αντίσταση $R = 16 \Omega$;

39. Ένα σύρμα έχει διάμετρο $\delta_1 = 1 \text{ mm}$ και αντίσταση $R_1 = 0,4 \Omega$ κατά μέτρο μήκους. Ένα σύρμα από τό ίδιο μέταλλο και μέ διάμετρο $\delta_2 = 0,4 \text{ mm}$ θέλουμε νά έχει αντίσταση $R_2 = 12,5 \Omega$. Πόσο μήκος l_2 πρέπει νά έχει τό δεύτερο σύρμα;

40. Τό χάλκινο σύρμα μιθς τηλεγραφικής γραμμής έχει μήκος l και διάμετρο $\delta\chi = 3 \text{ mm}$. Θέλουμε νά αντικαταστήσουμε τό χάλκινο σύρμα μέ σύρμα από άργίλιο, πού νά έχει τήν ίδια αντίσταση R μέ τό χάλκινο σύρμα. Πόση πρέπει νά είναι ή διάμετρος $\delta\alpha$ του σύρματος από άργίλιο και πόσος είναι ο λόγος του βάρους της νέας γραμμής προς τό βάρος της παλιής γραμμής; Ειδικές αντιστάσεις: χαλκού $\rho\chi = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, άργιλίου $\rho\alpha = 3 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$, Ειδικά βάρη: χαλκού: $\epsilon\chi = 9 \text{ g/m}^3$, άργιλίου $\epsilon\alpha = 2,7 \text{ g/cm}^3$.

41. Ένα σύρμα έχει αντίσταση $R = 0,5 \Omega$ και στις άκρες του εφαρμόζεται τάση $U = 6,4 \text{ V}$. Πόσα ηλεκτρόνια περνούν κάθε δευτερόλεπτο από μιά τομή του σύρματος; $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.

42. Ένα κυκλικό πλαίσιο αποτελείται από $N = 2000$ σπειρες, πού καθεμιά έχει διάμετρο $\Delta = 10 \text{ cm}$. Τό σύρμα έχει διάμετρο $\delta = 0,4 \text{ mm}$ και ειδική αντίσταση $\rho = 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Στις άκρες του πλαισίου εφαρμόζεται τάση $U = 100 \text{ V}$. Πόση είναι ή ένταση του ρεύματος πού διαρρέει τό πλαίσιο;

43. Τρεις αντιστάσεις $R_1 = 5 \Omega$, $R_2 = 10 \Omega$, $R_3 = 45 \Omega$ συνδέονται κατά σειρά. Στις άκρες του συστήματος εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού $U = 90 \text{ V}$. Πόση είναι ή ένταση του ρεύματος πού διαρρέει τό σύστημα; Πόση είναι ή διαφορά δυναμικού U_1 , U_2 , U_3 πού εφαρμόζεται αντίστοιχα στις άκρες κάθε αντιστάσεως;

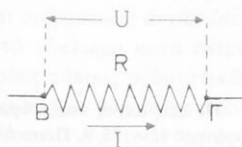
44. Δύο σύρματα, όταν συνδέονται κατά σειρά, έχουν αντίσταση $R = 30 \Omega$, ενώ όταν συνδέονται παράλληλα, έχουν όλική αντίσταση $R' = 3 \Omega$. Πόση είναι ή αντίσταση κάθε σύρματος;

45. Τρεις αντιστάσεις $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 4 \Omega$ συνδέονται παράλληλα και αυτό τό σύστημα συνδέεται κατά σειρά μέ αντίσταση $R_4 = 1 \Omega$. Στις άκρες όλου του συστήματος εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού $U = 20 \text{ V}$. Πόση είναι ή ένταση του ρεύματος πού διαρρέει καθεμιά από τίς τέσσερις αντιστάσεις;

ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

32. Ήνέργεια του ήλεκτρίκου ρεύματος

Ένα κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα πού έχει ένταση I . Θεωρούμε ένα τμήμα ΒΓ του σύρματος πού συνδέει τούς πόλους τής γεννήτριας (σχ. 38). Τό σύρμα ΒΓ έχει αντίσταση R και μεταξύ τών δύο άκρων του Β και Γ υπάρχει σταθερή διαφορά δυναμικού (τάση) U . Στη διάρκεια του χρόνου t τό ρεύμα μεταφέρει από τό σημείο Β στό σημείο Γ ένα ήλεκτρίκο φορτίο $Q = I \cdot t$. Άλλά, όπως ξέρουμε, κατά τή μεταφορά αυτού του φορτίου παράγεται έργο ίσο μέ $Q \cdot U$ ή και $U \cdot I \cdot t$. Όλο αυτό τό έργο μετατρέπεται οέ θερμότητα, πού παραμένει στό σύρμα και γι' αυτό τό σύρμα θερμαίνεται. Ωστε τό ήλεκτρίκο ρεύμα έχει ένέργεια, γιατί παράγει έργο. Ή ένέργεια του ρεύματος είναι ίση μέ τό έργο πού παράγει τό ρεύμα.



Σχ. 38. Τό ρεύμα παράγει έργο πάνω στό σύρμα ΒΓ.

Όταν λοιπόν ένα ρεύμα έντάσεως I διαρρέει επί χρόνο t έναν άγωγό πού έχει αντίσταση R , τότε ή ένέργεια ($E_{\eta\lambda}$) του ήλεκτρίκου ρεύματος ή όποία καταναλώνεται πάνω σ' αυτό τόν άγωγό, δίνεται από τίσ εξισώσεις :

<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">ένέργεια του ρεύματος</div> <div style="margin-right: 20px;"> $E_{\eta\lambda} = U \cdot I \cdot t$ $E_{\eta\lambda} = I^2 \cdot R \cdot t$ </div> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">}</div> <div style="margin-right: 20px;"> U σέ V I σέ A, t σέ sec R σέ Ω $E_{\eta\lambda}$ σέ Joule </div> <div style="font-size: 2em;">(1)</div> </div>
--

Ίσχύς του ήλεκτρίκου ρεύματος. Άπό τίσ εξισώσεις (1) βρίσκουμε ότι, αν ένα ρεύμα έντάσεως I διαρρέει άγωγό πού έχει αντίσταση R , τότε ή ισχύς (P) του ήλεκτρίκου ρεύματος ή όποία καταναλώνεται πάνω σ' αυτό τόν άγωγό, είναι $P = \frac{E_{\eta\lambda}}{t}$ και έπομένως δίνεται από τίσ εξισώσεις :

<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;">ισχύς του ρεύματος</div> <div style="margin-right: 20px;"> $P = U \cdot I$ $P = I^2 \cdot R$ </div> <div style="font-size: 3em; margin-right: 10px;">}</div> <div style="margin-right: 20px;"> U σέ V, I σέ A R σέ Ω P σέ W </div> </div>

Άν στίς εξισώσεις (1) βάλουμε $P = U \cdot I$ ή $P = I^2 \cdot R$, βρίσκουμε ότι ή ένέργεια ($E_{\eta\lambda}$) του ρεύματος, ή όποία καταναλώνεται πάνω σέ έναν άγωγό, δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\text{ένέργεια του ρεύματος } E_{\eta\lambda} = P \cdot t$$

Όταν σ' αυτή τήν εξίσωση ή ισχύς P μετριέται σέ κιλοβάτ (kW) και ό χρόνος t σέ ώρες (h,) τότε ή ενέργεια $E_{\eta\lambda}$ βρίσκεται σέ κιλοβατώρια (kWh).

Παράδειγμα. Στίς άκρες σύρματος εφαρμόζεται τάση $U = 220 \text{ V}$ και έπί χρόνο $t = 10 \text{ sec}$ τό σύρμα διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 4 \text{ A}$. Ή ενέργεια ($E_{\eta\lambda}$) του ρεύματος πού καταναλώθηκε πάνω στό σύρμα είναι :

$$E_{\eta\lambda} = U \cdot I \cdot t = 220 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} \cdot 10 \text{ sec} \quad \text{καί} \quad E_{\eta\lambda} = 8800 \text{ Joule}$$

Όλη αυτή ή ενέργεια έγινε *θερμότητα* πού έμεινε πάνω στό σύρμα. Αυτό τό ρεύμα έχει ισχύ (P) :

$$P = U \cdot I = 220 \text{ V} \cdot 4 \text{ A} \quad \text{καί} \quad P = 880 \text{ W}$$

Άν τό ρεύμα διαρρέει τό σύρμα έπί χρόνο $t = 3 \text{ h}$, τότε ή ενέργεια ($E_{\eta\lambda}$) του ρεύματος ή όποία καταναλώθηκε πάνω στό σύρμα, είναι :

$$E_{\eta\lambda} = P \cdot t = 0,880 \text{ kW} \cdot 3 \text{ h} \quad \text{καί} \quad E_{\eta\lambda} = 2,64 \text{ kWh}$$

33. Νόμος του Joule

Ή θέρμανση των άγωγών πού διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται *φαινόμενο Joule* και όφείλεται στό ότι ή ενέργεια του ρεύματος μετατρέπεται σέ θερμότητα. Στίς άκρες ενός σύρματος, πού έχει αντίσταση R , εφαρμόζεται σταθερή τάση U και τό σύρμα διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = U/R$. Στή διάρκεια χρόνου t πάνω στό σύρμα καταναλώνεται ενέργεια ($E_{\eta\lambda}$) του ρεύματος ίση μέ :

$$E_{\eta\lambda} = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1)$$

Όλη αυτή ή ενέργεια έγινε *θερμότητα* ($Q_{\theta\epsilon\rho\mu}$) πού έμεινε πάνω στόν άγωγό. Ξέρουμε ότι ισχύουν οι έξής σχέσεις ισοδυναμίας :

$$J = 4,19 \text{ Joule/cal} \quad \text{ή} \quad J = 0,24 \text{ cal/Joule}$$

Έπομένως ή θερμότητα ($Q_{\theta\epsilon\rho\mu}$), πού αναπτύσσεται πάνω στόν άγωγό, είναι :

$$Q_{\theta\epsilon\rho\mu} = 0,24 \cdot E_{\eta\lambda} \text{ cal} \quad \text{ή}$$

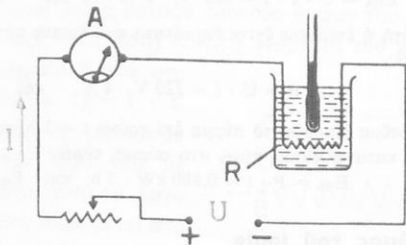
νόμος του Joule $Q_{\theta\epsilon\rho\mu} = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t$	$\left\{ \begin{array}{l} 0,24 \text{ cal/Joule} \\ I \text{ σέ A, } R \text{ σέ } \Omega \\ t \text{ σέ sec, } Q_{\theta\epsilon\rho\mu} \text{ σέ cal} \end{array} \right. \quad (2)$
--	---

Ή εξίσωση (2) εκφράζει τόν έξής *νόμο του Joule* :

Ή *θερμότητα* ($Q_{\theta\epsilon\rho\mu}$) πού αναπτύσσεται πάνω σέ έναν άγωγό είναι *ανάλογη* μέ τό τετράγωνο τής έντάσεως (I) του ρεύματος, *ανάλογη* μέ τήν αντίσταση (R) του άγωγού και *ανάλογη* μέ τό χρόνο (t) πού τό ρεύμα διαρρέει τόν άγωγό.

Γιά τήν πειραματική επαλήθευση του νόμου του Joule χρησιμοποιούμε

θερμιδόμετρο μέσα στο όποιο είναι βυθισμένο ένα σύρμα πού διαρρέεται από ρεύμα (σχ. 39). Διατηρούμε σταθερά τά μεγέθη R και t και μεταβάλλουμε μόνο την ένταση I του ρεύματος. Έπειτα διατηρούμε σταθερά τά μεγέθη I και t και μεταβάλλουμε μόνο την αντίσταση R του σύρματος. Και τέλος διατηρούμε σταθερά τά μεγέθη I και R και μεταβάλλουμε μόνο τό χρόνο t πού τό ρεύμα διαρρέει τό σύρμα. Έτσι εύκολα επιβεβαιώνουμε πειραματικά τό νόμο του Joule.



Σχ. 39. Για την πειραματική απόδειξη του νόμου του Joule.

α. Μονάδα θερμότητας στο σύστημα MKSA. Άγωγός έχει αντίσταση R και διαρρέεται από ρεύμα έντασεως I επί χρόνο t . Τότε πάνω σ' αυτό τόν άγωγό καταναλώνεται *ένέργεια* του ρεύματος ίση μέ :

$$E_{\eta\lambda} = I^2 \cdot R \cdot t \quad (3)$$

Όλη αυτή ή ενέργεια μετατρέπεται σέ *θερμότητα* ($Q_{\theta\epsilon\rho\mu}$). Η εξίσωση (3) στο σύστημα MKSA εκφράζει αυτή τή θερμότητα ($Q_{\theta\epsilon\rho\mu}$) σέ μονάδες ενέργειας αυτού του συστήματος, δηλαδή εκφράζει τή θερμότητα μετρημένη σέ Joule. Άν στην εξίσωση (3) βάλουμε $I = 1 \text{ A}$, $R = 1 \Omega$ και $t = 1 \text{ sec}$, βρίσκουμε $E_{\eta\lambda} = 1 \text{ Joule}$. Έτσι έχουμε τόν εξής *όρισμό* :

Στό σύστημα MKSA μονάδα θερμότητας είναι τό 1 Joule, δηλαδή ή θερμότητα ή όποία μέσα σέ 1 sec αναπτύσσεται πάνω σέ άγωγό πού έχει αντίσταση 1 Ω και διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως 1 A.

β. Νεκρή αντίσταση. Μιά αντίσταση R διαρρέεται από ρεύμα έντασεως I . Άν όλη ή ενέργεια του ρεύματος μετατρέπεται πάνω στην αντίσταση R σέ θερμότητα, τότε λέμε ότι ή αντίσταση R είναι μία *νεκρή αντίσταση*. Στίς άκρες τής αντίστασεως R υπάρχει τάση $U = I \cdot R$ και λέμε ότι πάνω στή νεκρή αντίσταση R συμβαίνει *πτώση τάσεως* ίση μέ $U = I \cdot R$.

34. Έφαρμογές του φαινομένου Joule

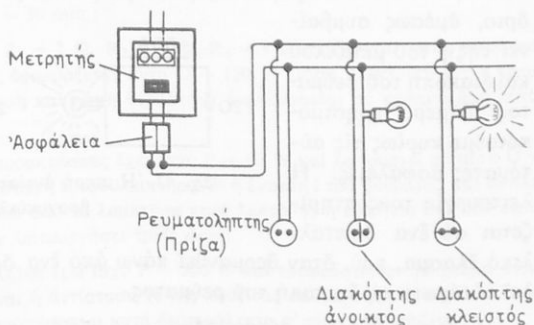
Ένας μεταλλικός άγωγός, πού διαρρέεται από ρεύμα, θερμαίνεται και μπορεί νά δώσει θερμότητα στο έξωτερικό περιβάλλον του. Όταν ένα σύρμα διαρρέεται από ρεύμα σταθερής έντασεως, τό σύρμα άποκτά μία *όρισμένη θερμοκρασία*. Σ' αυτή τήν περίπτωση έχει άποκατασταθεί *θερμική*

ισορροπία μεταξύ του σύρματος και του περιβάλλοντος. Τότε δηλ ή ισχύς πού καταναλώνεται πάνω στο σύρμα δίνεται στο περιβάλλον με τή μορφή θερμότητας. Γι' αυτό τό φαινόμενο Joule έχει πολλές εφαρμογές.

α. *Ήλεκτρικός λαμπτήρας πυρακτώσεως.* Αυτός αποτελείται από γυά-



Σχ. 40. Ήλεκτρικός λαμπτήρας πυρακτώσεως.

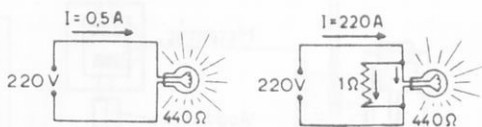


Σχ. 41. Παράλληλη σύνδεση τών λαμπτήρων.

λινο δοχείο μέσα στο όποιο υπάρχει ένα λεπτό σύρμα από πολύ δύστηκτο μέταλλο (βολφράμιο, τατάλιο, όσμιο). Τό μέταλλο πού χρησιμοποιούμε έχει θερμοκρασία τήξεως πάνω από 2700°C (σχ. 40). Μέσα στο δοχείο δέν υπάρχει όξυγόνο, για νά μή γίνει όξειδωση του μετάλλου, υπάρχει όμως ένα αδρανές άέριο (άργό, κρυπτό, άζωτο) πού έμποδίζει τήν έξαέρωση του μετάλλου. "Όταν τό σύρμα φωτοβολεί, ή θερμοκρασία του είναι πάνω από 2000°C . Στους σημερινούς λαμπτήρες για φωτεινή ισχύ μις candela καταναλώνεται ισχύς ρεύματος 0,5 ως 0,9 Watt. Σέ κάθε λαμπτήρα σημειώνονται δύο ένδείξεις, ή τάση στήν όποία ό λαμπήτρας λειτουργεί κανονικά και ή ισχύς πού καταναλώνει ό λαμπήτρας, όταν λειτουργεί κανονικά (π.χ. σημειώνονται 220 V, 60 W). "Όλοι οι λαμπήτρας μις έγκαταστάσεως πρέπει νά λειτουργούν με τήν ίδια τάση και γι' αυτό συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα (σχ. 41).

β. *Θερμικές συσκευές.* Αυτές είναι συσκευές πού παράγουν θερμότητα με τό ήλεκτρικό ρεύμα και χρησιμοποιούνται σέ πολλές περιπτώσεις. Σέ μερικές θερμικές συσκευές ή θερμότητα άκτινοβολείται άπευθείας από τό σύρμα (π.χ. στή θερμάστρα), ενώ σέ άλλες συσκευές ή θερμότητα συγκεντρώνεται πάνω σέ μιά μεταλλική πλάκα (π.χ. στήν κουζίνα, τό σίδερο). Ή παραγωγή θερμότητας με τό ήλεκτρικό ρεύμα είναι εύκολη, έξασφαλίζει καθαριότητα, ρυθμίζεται αυτόματα με τή βοήθεια θερμοστάτη και δέ δημιουργεί κινδύνους για τήν υγεία. Ή χρησιμοποίηση ήλεκτρικών πηγών θερμότητας διαρκώς έπεκτείνεται.

γ. *Ασφάλεια.* Η ασφάλεια είναι μία διάταξη που προκαλεί αυτόματη διακοπή του ρεύματος, όταν η έντασή του γίνει μεγαλύτερη από μία ορισμένη τιμή. Ο πιο απλός τύπος ασφάλειας είναι ένα μικρό σύρμα από εϋτηκτο μέταλλο. Μόλις η ένταση του ρεύματος γίνει μεγαλύτερη από ένα όριο, άμέσως συμβαίνει τήξη του μετάλλου και διακοπή του ρεύματος. Σήμερα χρησιμοποιούμε κυρίως τρεις αυτόματες ασφάλειες. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε ένα διμεταλλικό έλασμα, που, όταν θερμανθεί πάνω από ένα όριο, λυγίζει και προκαλεί αυτόματα τη διακοπή του ρεύματος.



Σχ. 42. Η μικρή αντίσταση 1Ω δημιουργεί βραχυκύκλωμα.

δ. *Βραχυκύκλωμα.* Κάθε ηλεκτρική συσκευή ή ηλεκτρική εγκατάσταση είναι έτσι κατασκευασμένη, ώστε να άντέχει σε ορισμένη ένταση ρεύματος. Σε μερικές όμως περιπτώσεις, διάφορα αίτια προκαλούν σημαντική αύξηση της εντάσεως του ρεύματος. Τότε λέμε ότι δημιουργήθηκε *βραχυκύκλωμα*. Η μεγάλη αύξηση της εντάσεως του ρεύματος θερμαίνει πάρα πολύ τους άγωγους και μπορεί να τους καταστρέψει ή να προκαλέσει πυρκαγιά. Βραχυκύκλωμα προκαλείται και όταν παράλληλα με μία συσκευή συνδεθεί μία πολύ μικρή αντίσταση. Αν π.χ. ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως, που έχει αντίσταση $R_L = 440 \Omega$, λειτουργεί με τάση $U = 220 \text{ V}$, τότε η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα είναι $I = 0,5 \text{ A}$ (σχ. 42). Οί υπόλοιποι άγωγοί του κυκλώματος έχουν άσημαντη αντίσταση. Παράλληλα με τό λαμπτήρα συνδέουμε ένα σύρμα που έχει αντίσταση $R_S = 1 \Omega$. Η όλική αντίσταση $R_{ολ}$ του κυκλώματος γίνεται τότε πολύ μικρή και περίπου ίση με 1Ω (είναι $R_{ολ} = 440/441 \Omega$). Η ένταση του ρεύματος στο κύκλωμα γίνεται πολύ μεγάλη και περίπου ίση με 220 A . Η θέρμανση των άγωγων είναι πολύ ισχυρή και υπάρχει κίνδυνος να καταστραφούν ή να προκληθεί πυρκαγιά.

Παρατήρηση. Τό φαινόμενο *Joule* είναι ένα πολύ γενικό φαινόμενο, που συνοδεύει πάντοτε τό πέρασμα του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τούς άγωγούς. Σε πολλές εφαρμογές εκμεταλλευόμαστε τό φαινόμενο *Joule*, αλλά τό φαινόμενο αυτό προκαλεί μεγάλες απώλειες ενέργειας πάνω στους άγωγούς που μεταφέρουν τό ηλεκτρικό ρεύμα. Σε άλλο κεφάλαιο θά δοϋμε πώς ή σύγχρονη τεχνική κατορθώνει κατά τή μεταφορά τής ηλεκτρικής ενέργειας νά περιορίζει σημαντικά τίσ απώλειες ενέργειας εξαιτίας του φαινομένου *Joule*.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

46. Στις άκρες ενός σύρματος που έχει αντίσταση $R = 18 \Omega$ εφαρμόζεται τάση $U = 54 \text{ V}$. Πόση ηλεκτρική ισχύς καταναλώνεται πάνω στην αντίσταση R και πόση ενέργεια καταναλώνεται σε χρόνο $t = 30 \text{ min}$;

47. Τρεις αντιστάσεις $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 3 \Omega$, $R_3 = 5 \Omega$ συνδέονται κατά σειρά και στις άκρες του συστήματος εφαρμόζεται τάση $U = 120 \text{ V}$. Πόση ηλεκτρική ισχύς καταναλώνεται σε κάθε αντίσταση και πόση θερμότητα αναπτύσσεται σε καθένα από αυτές σε χρόνο $t = 1 \text{ min}$;

48. Ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως έχει ισχύ $P = 60 \text{ W}$ και λειτουργεί με τάση $U = 220 \text{ V}$. Νά βρεθεί: α) η αντίσταση R του λαμπτήρα· β) η ένταση I του ρεύματος και το ηλεκτρικό φορτίο Q που περνάει από το λαμπτήρα κατά λεπτό· γ) η ενέργεια $E_{\text{ηλ}}$ που καταναλώνει ο λαμπτήρας, όταν λειτουργήσει τρεις ώρες.

49. Μιά ηλεκτρική κουζίνα έχει ισχύ $P = 500 \text{ W}$ και τροφοδοτείται με ρεύμα έντασης $I = 4 \text{ A}$. α) Πόση είναι η αντίσταση R της κουζίνας και με πόση τάση U λειτουργεί; β) Πόση θερμότητα αναπτύσσεται κατά δευτερόλεπτο σ' αυτή την κουζίνα;

50. Μιά ηλεκτρική κουζίνα έχει ισχύ $P = 500 \text{ W}$ και σε χρόνο $t = 10 \text{ min}$ θερμαίνει μάζα νερού $m = 500 \text{ gr}$ από 20° C σε 100° C . Πόσο μέρος από τη θερμότητα που αναπτύσσεται από το ρεύμα χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του νερού; Πόσος είναι ο συντελεστής απόδοσης;

51. Για να θερμάνουμε μέσα σε χρόνο $t = 5 \text{ min}$ νερό που έχει μάζα $m = 1 \text{ kg}$ από 20° C σε 100° C , βυθίζουμε μέσα στο νερό ένα σύρμα και στις άκρες του εφαρμόζουμε τάση $U = 220 \text{ V}$. Πόση πρέπει να είναι η αντίσταση R του σύρματος;

52. Δύο σύρματα από το ίδιο υλικό έχουν το ίδιο μήκος l αλλά η τομή τους έχει διαφορετικό έμβαδο και είναι $S_2 > S_1$. Τα δύο σύρματα συνδέονται πρώτα κατά σειρά και έπειτα παράλληλα. Όταν στις άκρες του συστήματος των αντιστάσεων εφαρμόζεται η ίδια τάση U , σε ποιο από τα δύο σύρματα αναπτύσσεται μεγαλύτερη θερμότητα σε καθένα από τις δύο περιπτώσεις;

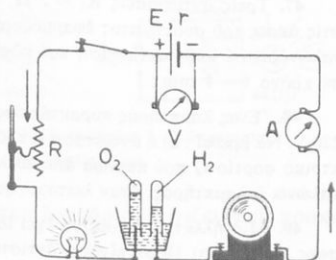
53. Ένας επίπεδος πυκνωτής έχει χωρητικότητα $C = 1,6 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$ και μεταξύ των όπλισμών του υπάρχει τάση $U_0 = 50\,000 \text{ V}$. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω μιας αντιστάσεως $R = 1000 \Omega$ και δεχόμαστε ότι στη διάρκεια t της εκφορτίσεως η τάση είναι κατά μέσο όρο ίση με $U = 25\,000 \text{ V}$. Πόσο χρόνο t διαρκεί η εκφόρτιση του πυκνωτή;

54. Μιά ηλεκτρονική συσκευή παίρνει την ενέργεια που χρειάζεται από τη μερική εκφόρτιση ενός πυκνωτή, που έχει χωρητικότητα $C = 0,25 \mu\text{F}$. Αρχικά η τάση στους όπλισμούς του πυκνωτή είναι $U_1 = 100\,000 \text{ V}$ και έπειτα μέσα σε χρόνο $t = 0,1 \text{ sec}$ ο πυκνωτής εκφορτίζεται και η τάση στους όπλισμούς του πέφτει και γίνεται $U = 40\,000 \text{ V}$. Πόσο φορτίο Q δίνει ο πυκνωτής στη συσκευή, πόση είναι κατά μέσο όρο η ένταση I του ρεύματος που διαρρέει τη συσκευή και πόση ενέργεια E δίνει ο πυκνωτής στη συσκευή;

35. Ή γεννήτρια στο κλειστό κύκλωμα

Γιά νά διαρρέεται από ρεύμα ένα κύκλωμα, πρέπει απαραίτητα νά υπάρξει στο κύκλωμα *γεννήτρια*. Όπως ξέρουμε (§ 22), ή γεννήτρια διατηρεί σταθερή διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο πόλων της, γιατί διαρκώς μεταφέρει ηλεκτρόνια από τό θετικό στόν αρνητικό πόλο της. Ωστε μέσα στή γεννήτρια υπάρχει άγωγός καί μέσω αούτου κινούνται τά ηλεκτρόνια. Έπομένως κάθε γεννήτρια έχει ορισμένη *έσωτερική αντίσταση* (r).

Στό κλειστό κύκλωμα πού δείχνει τό σχήμα 43 υπάρχουν ρυθμιστική αντίσταση (R), λαμπτήρας πυρακτώσεως, βολτάμετρο καί κινητήρας. Αύτή ή σειρά των άγωγων άποτελεί τό *έξωτερικό κύκλωμα*. Έξαιτίας του φαινομένου Joule πάνω σέ όλες τίς αντιστάσεις του κυκλώματος αναπτύσσεται *θερμότητα*. Στό λαμπτήρα πυρακτώσεως ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται τελικά σέ *φωτεινή ενέργεια*. Στό βολτάμετρο ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σέ *χημική ενέργεια*. Καί τέλος στόν κινητήρα ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σέ *μηχανική ενέργεια*. Ωστε :



Σχ. 43. Ή γεννήτρια δίνει ενέργεια στο κύκλωμα.

Ή γεννήτρια δίνει στο έξωτερικό κύκλωμα ηλεκτρική ενέργεια, ή οποία μετατρέπεται σέ θερμότητα (έξαιτίας του φαινομένου Joule) καί σέ χημική ή μηχανική ενέργεια μέσα στά βολτάμετρα ή τούς κινητήρες.

36. Ήλεκτρεγερτική δύναμη γεννήτριας

Σέ ένα κλειστό κύκλωμα (σχ. 43) ή ένταση I του ρεύματος είναι σταθερή σέ όλο τό κύκλωμα. Τό ρεύμα περνάει καί μέσα από τή γεννήτρια μέ συμβατική φορά από τόν αρνητικό πρός τό θετικό πόλο της γεννήτριας. Ή γεννήτρια παρέχει διαρκώς στό κύκλωμα ισχύ. Πειραματικά βρίσκουμε ότι :

Ή ισχύς (P) πού παρέχει ή γεννήτρια στο κύκλωμα είναι άνάλογη μέ τήν ένταση (I) του ρεύματος πού διαρρέει τό κύκλωμα.

$$\text{ισχύς γεννήτριας } P = E \cdot I$$

(1)

Ο συντελεστής E είναι μέγεθος χαρακτηριστικό της γεννήτριας και ονομάζεται **ηλεκτρεγερτική δύναμη** της γεννήτριας. Από την εξίσωση (1) προκύπτει ο εξής **όρισμός**:

Ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) γεννήτριας ονομάζεται το σταθερό πηλίκο της ισχύος (P), που παρέχει η γεννήτρια στο κύκλωμα, προς την ένταση (I) του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα.

ηλεκτρεγερτική δύναμη
γεννήτριας

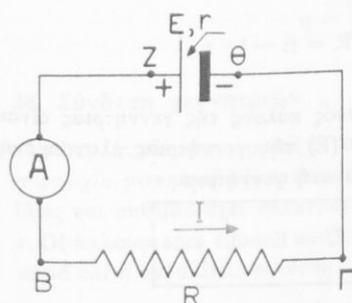
$$E = \frac{P}{I}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P \text{ σε W} \\ I \text{ σε A} \\ E \text{ σε W/A ή V} \end{array} \right. \quad (2)$$

Παρατηρούμε ότι στο σύστημα MKSA μονάδα ηλεκτρεγερτικής δύναμης είναι το 1 Volt (1 V). Από την εξίσωση (2) συνάγεται ότι η ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) της γεννήτριας εκφράζει την ισχύ που παρέχει η γεννήτρια στο κύκλωμα για κάθε 1 Ampère της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Αν π.χ. μία γεννήτρια έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 50$ Volt, τότε για κάθε 1 Ampère της έντασης του ρεύματος η γεννήτρια παρέχει ισχύ ίση με 50 Watt, δηλαδή παρέχει ισχύ 50 Watt/Ampère.

37. Νόμος του Ohm για κλειστό κύκλωμα

Σε ένα κλειστό κύκλωμα (σχ. 44) υπάρχει γεννήτρια, που έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη E και εσωτερική αντίσταση r . Το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται μόνο από μία νεκρή αντίσταση R . Οι άγωγοί που χρησιμοποιούνται για τη συνδεσμολογία έχουν ασήμαντη αντίσταση. Το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα έντασης I . Τότε η γεννήτρια παρέχει στο κύκλωμα ισχύ $P = E \cdot I$. Όλη αυτή η ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω στις δύο αντιστάσεις R και r . Σύμφωνα με το νόμο του Joule ή ισχύς



Σχ. 44. Για την απόδειξη του νόμου του Ohm σε κλειστό κύκλωμα.

που μετατρέπεται σε θερμότητα, είναι:

$$\begin{array}{ll} \text{πάνω στην αντίσταση } R & I^2 \cdot R \\ \text{πάνω στην αντίσταση } r & I^2 \cdot r \end{array}$$

Σύμφωνα με την αρχή της διατηρήσεως της ενέργειας ισχύει η εξίσωση :

$$E \cdot I^2 = I^2 \cdot R + I^2 \cdot r \quad \text{ή} \quad E = I \cdot (R + r) \quad (1)$$

Οι δύο αντιστάσεις R και r συνδέονται κατά σειρά και επομένως η *ολική αντίσταση* ($R_{ολ}$) του κυκλώματος είναι $R_{ολ} = R + r$. Έτσι από την εξίσωση (1) βρίσκουμε τον εξής νόμο του *Ohm* για κλειστό κύκλωμα :

Σε κλειστό κύκλωμα, που αποτελείται από γεννήτρια και εξωτερικές αντιστάσεις, η ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) της γεννήτριας είναι ίση με το γινόμενο της εντάσεως (I) του ρεύματος επί την ολική αντίσταση ($R_{ολ}$) του κυκλώματος.

νόμος του *Ohm*
(κλειστό κύκλωμα)

$$E = I \cdot R_{ολ}$$

$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ σε } A, R_{ολ} \text{ σε } \Omega \\ E \text{ σε } V \end{array} \right. \quad (2)$

Η εξίσωση (2) επαληθεύεται πειραματικά, αν στο κύκλωμα βάλουμε διαδοχικά γνωστές αντιστάσεις και μετρήσουμε τις αντίστοιχες εντάσεις του ρεύματος.

α. Τάση στους πόλους της γεννήτριας. Θεωρούμε το κύκλωμα που είχαμε παραπάνω (σχ. 44). Έπειδή οι άγωγοί της συνδεσμολογίας έχουν ασημάνη αντίσταση, οι δύο άκρες της αντιστάσεως R έχουν το ίδιο δυναμικό με τους αντίστοιχους πόλους της γεννήτριας. Ωστε η τάση U , που υπάρχει στις άκρες της αντιστάσεως R , είναι ίση με την τάση U , που υπάρχει στους πόλους της γεννήτριας. Για την αντίσταση R ισχύει η εξίσωση $U = I \cdot R$. Από την εξίσωση (1) έχουμε :

$$E = I \cdot R + I \cdot r \quad \text{άρα} \quad I \cdot R = E - I \cdot r$$

Η τελευταία εξίσωση φανερώνει ότι :

Σε κλειστό κύκλωμα η τάση (U) στους πόλους της γεννήτριας είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) της γεννήτριας ελαττωμένη κατά την πτώση τάσεως ($I \cdot r$) μέσα στη γεννήτρια.

τάση στους πόλους
γεννήτριας

$$U = E - I \cdot r$$

Αν το κύκλωμα είναι άνοιχτο, τότε είναι $I = 0$ και επομένως είναι $U = E$. Έτσι έχουμε τον εξής *όρισμό* :

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη (E) της γεννήτριας είναι ίση με την τάση (U) στους πόλους της γεννήτριας, όταν το κύκλωμα είναι άνοιχτο ($I = 0$).

Παράδειγμα. Στο κύκλωμα του σχήματος 44 είναι $E = 10 \text{ V}$, $r = 2 \Omega$ και θέλουμε το ρεύμα να έχει ένταση $I = 2 \text{ A}$. Η εξωτερική αντίσταση R βρίσκεται από την εξίσωση :

$$E = I \cdot (R + r) \quad \text{άρα} \quad R = \frac{E - I \cdot r}{I} = \frac{10 \text{ V} - (2 \text{ A} \cdot 2 \Omega)}{2 \text{ A}}$$

$$\text{καί} \quad R = 3 \Omega$$

Η τάση U στους πόλους της γεννήτριας είναι

$$U = E - I \cdot r = 10 \text{ V} - (2 \text{ A} \cdot 2 \Omega) \quad \text{καί} \quad U = 6 \text{ V}$$

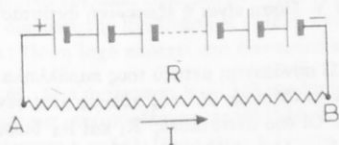
β. **Αποδέκτες.** Στο λαμπτήρα πυρακτώσεως και στην ηλεκτρική θερμάστρα ή ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται αποκλειστικά σε *θερμότητα*. Αυτές οι συσκευές είναι νεκρές αντιστάσεις. Στο βολτάμετρο ή στον ηλεκτρικό κινητήρα ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε *χημική* ή *μηχανική ενέργεια*. Αυτές οι συσκευές, στις όποιες η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε άλλη μορφή ενέργειας, διαφορετική από τη θερμότητα, ονομάζονται *αποδέκτες*. Έτσι π.χ. ο ανεμιστήρας είναι αποδέκτης, που μας δίνει *ωφέλιμη μηχανική ενέργεια*.

Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα περνάει μέσα από έναν αποδέκτη (π.χ. τον ανεμιστήρα), πάντοτε ένα μέρος από την ενέργεια του ρεύματος μετατρέπεται σε *θερμότητα*, εξαιτίας του φαινομένου Joule. Αυτή η θερμότητα αναπτύσσεται πάνω στην *έσωτερική αντίσταση* του αποδέκτη. Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούμε μετατρέπουν τα 80 ως 90% της ισχύος του ρεύματος σε *ωφέλιμη μηχανική ισχύ*. Ο συντελεστής αποδόσεως η ενός αποδέκτη είναι:

$$\eta = \frac{\text{ωφέλιμη ισχύς}}{\text{δαπανώμενη ισχύς}}$$

38. Σύνδεση γεννητριών

Αν συνδέσουμε μεταξύ τους πολλές γεννήτριες, σχηματίζουμε μία *συστοιχία γεννητριών* (μπαταρία). Θεωρούμε ότι όλες οι γεννήτριες είναι ίδιες και καθεμία έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη E και έσωτερική αντίσταση r . Οι απλούστεροι τρόποι συνδέσεως των γεννητριών είναι η *σύνδεση κατά σειρά* και η *παράλληλη σύνδεση*.

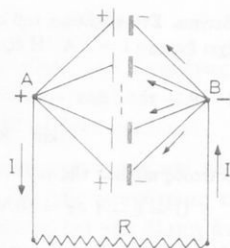


Σχ. 45. Σύνδεση γεννητριών κατά σειρά.

Στη σύνδεση γεννητριών κατά σειρά ο αρνητικός πόλος κάθε γεννήτριας συνδέεται με το θετικό πόλο της επόμενης γεννήτριας. Αν έχουμε n όμοιες γεννήτριες που καθεμία έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη E , τότε η *ολική ηλεκτρεγερτική δύναμη* $E_{ολ}$ της συστοιχίας είναι

$E_{ολ} = v \cdot E$ (σχ. 45).

Στήν παράλληλη σύνδεση γεννητριῶν συνδέονται ὄλοι οἱ θετικοί πόλοι καί ἀποτελοῦν τό θετικό πόλο τῆς συστοιχίας καί ὄλοι οἱ ἀρνητικοί πόλοι πού ἀποτελοῦν τόν ἀρνητικό πόλο τῆς. Ἄν ἔχουμε v ὁμοιες γεννήτριες πού καθεμιά ἔχει ἠλεκτρεγερτική δύναμη E , τότε ἡ ὀλική ἠλεκτρεγερτική δύναμη $E_{ολ}$ τῆς συστοιχίας εἶναι $E_{ολ} = E$ (σχ. 46).



Σχ. 46. Παράλληλη σύνδεση γεννητριῶν.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

55. Μιά γεννήτρια ἔχει ἠλεκτρεγερτική δύναμη $E = 12 \text{ V}$ καί ἐσωτερική ἀντίσταση $r = 10 \Omega$. Τό ἐξωτερικό κύκλωμα ἀποτελεῖται μόνο ἀπό δύο ἀντιστάσεις $R_1 = 26 \Omega$ καί $R_2 = 36 \Omega$. Πόση εἶναι ἡ διαφορά δυναμικοῦ στοῦς πόλους τῆς γεννήτριας καί πόση στίς ἄκρες κάθε ἀντιστάσεως;

56. Μιά γεννήτρια ἔχει ἠλεκτρεγερτική δύναμη $E = 2 \text{ V}$ καί ἐσωτερική ἀντίσταση $r = 8 \Omega$. Τό ἐξωτερικό κύκλωμα ἀποτελεῖται ἀπό μία ἀντίσταση R πού συνδέεται κατά σειρά μέ βολτόμετρο πού ἔχει ἐσωτερική ἀντίσταση $R_0 = 300 \Omega$. Πόση πρέπει νά εἶναι ἡ ἀντίσταση R , ὥστε τό βολτόμετρο νά δείχνει $U = 1,5 \text{ V}$;

57. Μιά γεννήτρια, ὅταν τό ἐξωτερικό κύκλωμα ἔχει ἀντίσταση $R_1 = 1 \Omega$, δίνει ρεύμα ἐντάσεως $I_1 = 1 \text{ A}$, ἐνῶ ὅταν τό ἐξωτερικό κύκλωμα ἔχει ἀντίσταση $R_2 = 2,5 \Omega$, δίνει ρεύμα ἐντάσεως $I_2 = 0,5 \text{ A}$. Πόση εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτική δύναμη E καί ἡ ἐσωτερική ἀντίσταση r τῆς γεννήτριας;

58. Ὄταν οἱ πόλοι μιάς γεννήτριας συνδέονται μέ ἐξωτερική ἀντίσταση $R_1 = 1 \Omega$, ἡ τάση στοῦς πόλους τῆς γεννήτριας εἶναι $U_1 = 1,5 \text{ V}$, ἐνῶ ὅταν οἱ πόλοι τῆς γεννήτριας συνδέονται μέ ἐξωτερική ἀντίσταση $R_2 = 2 \Omega$, ἡ τάση στοῦς πόλους τῆς γεννήτριας εἶναι $U_2 = 2 \text{ V}$. Πόση εἶναι ἡ ἠλεκτρεγερτική δύναμη E καί ἡ ἐσωτερική ἀντίσταση r τῆς γεννήτριας; Πόση ἰσχύ παρέχει στό κύκλωμα ἡ γεννήτρια σέ καθεμιά ἀπό τίς δύο περιπτώσεις;

59. Μιά γεννήτρια ἔχει ἠλεκτρεγερτική δύναμη $E = 40 \text{ V}$. Οἱ πόλοι τῆς συνδέονται μέ ἀντίσταση R καί τότε ἡ τάση στοῦς πόλους τῆς γεννήτριας εἶναι $U = 30,8 \text{ V}$. Ἡ ἀντίσταση R συνδέεται κατά σειρά μέ μιά ἄλλη ἀντίσταση $R_1 = 5 \Omega$ καί τότε ἡ τάση στοῦς πόλους τῆς γεννήτριας γίνεται $U_1 = 34,8 \text{ V}$. Πόση εἶναι ἡ ἐξωτερική ἀντίσταση R καί ἡ ἐσωτερική ἀντίσταση r τῆς γεννήτριας;

60. Δύο ἀντιστάσεις $R_1 = 3 \Omega$ καί $R_2 = 7 \Omega$ συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα καί οἱ δύο ἄκρες τοῦ συστήματος τῶν ἀντιστάσεων συνδέονται μέ τοῦς πόλους μιάς γεννήτριας, πού ἔχει ἐσωτερική ἀντίσταση $r = 0,9 \Omega$. Οἱ δύο ἀντιστάσεις R_1 καί R_2 διαρρέονται ἀπό ρεύματα, πού ἀντίστοιχα ἔχουν ἐνταση $I_1 = 14 \text{ A}$ καί $I_2 = 6 \text{ A}$. Πόση εἶναι ἡ ἠλε-

κτρεγερτική δύναμη E της γεννήτριας ; Πόση ισχύ παρέχει η γεννήτρια στο εξωτερικό κύκλωμα και πώς κατανέμεται αυτή η ισχύς στις δύο αντιστάσεις ;

61. Μιά ύδατόπτωση έχει ισχύ $P_{\text{υδ}} = 29,44 \text{ kW}$ και κινεί γεννήτρια που έχει συντελεστή απόδοσης $\eta = 80\%$. Το ρεύμα χρησιμοποιείται για το φωτισμό συνοικισμού, που διαθέτει λαμπτήρες με ισχύ $P_{\text{Λ}} = 75 \text{ W}$. Οι απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 10% . Πόσοι λαμπτήρες μπορεί να χρησιμοποιηθούν στο συνοικισμό ;

62. Μιά γεννήτρια έχει πολική τάση $U = 500 \text{ V}$ και δίνει ρεύμα έντασης $I = 350 \text{ A}$, που μεταφέρεται με μακρύ σύρμα στον τόπο καταναλώσεως. Πόση πρέπει να είναι η αντίσταση του σύρματος, αν θέλουμε οι απώλειες ισχύος πάνω στο σύρμα εξαιτίας του φαινομένου Joule να είναι ίσες με το $1/20$ της ισχύος της γεννήτριας ;

63. Μιά γεννήτρια έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 120 \text{ V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 1 \Omega$. Οι πόλοι της γεννήτριας συνδέονται με κινητήρα. Όταν ο κινητήρας δέστροφεται, η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι $U_1 = 90 \text{ V}$, ενώ, όταν ο κινητήρας στροφεται, η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι $U_2 = 115 \text{ V}$. Νά βρεθεί : α) η εσωτερική αντίσταση r' του κινητήρα· β) η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα σε όλο το κύκλωμα, όταν ο κινητήρας στροφεται· γ) η μηχανική ισχύς που δίνει ο κινητήρας.

64. Μιά γεννήτρια έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 52 \text{ V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 1 \Omega$. Το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται από μία αντίσταση $R = 5 \Omega$ και έναν κινητήρα. Όταν ο κινητήρας δέστροφεται, το ρεύμα έχει ένταση $I_1 = 4 \text{ A}$ ενώ, όταν ο κινητήρας στροφεται, το ρεύμα έχει ένταση $I_2 = 1 \text{ A}$. Νά βρεθεί : α) η εσωτερική αντίσταση r' του κινητήρα· β) η ισχύς που μετατρέπεται σε θερμότητα σε όλο το κύκλωμα, όταν ο κινητήρας στροφεται· γ) η μηχανική ισχύς που δίνει ο κινητήρας.

65. Ένας άνεμιστήρας λειτουργεί με τάση $U = 110 \text{ V}$, διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I = 0,6 \text{ A}$ και έχει εσωτερική αντίσταση $r = 110 \Omega$. Πόση ισχύ δίνει το ρεύμα στον άνεμιστήρα και πόση ισχύς μετατρέπεται σε θερμότητα ; Πόση μηχανική ισχύ δίνει ο άνεμιστήρας και πόσος είναι ο συντελεστής απόδοσης ;

66. Ένας κινητήρας λειτουργεί με τάση $U = 220 \text{ V}$, τροφοδοτείται με ρεύμα έντασης $I = 15 \text{ A}$ και έχει απόδοση 80% . Πόση ισχύς του ρεύματος μετατρέπεται σε θερμότητα και πόση μηχανική ισχύ δίνει ο κινητήρας ;

67. Μιά γεννήτρια έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 120 \text{ V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 1 \Omega$. Το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται από δύο παράλληλους κλάδους Α και Β. Ο κλάδος Α έχει αντίσταση $R_1 = 20 \Omega$ και ο κλάδος Β αντίσταση $R_2 = 5 \Omega$ και διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I_2 = 19,2 \text{ A}$. Πόση είναι η ένταση I_1 του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R_1 ; Πόση ισχύ παρέχει η γεννήτρια στο κύκλωμα και πόση από αυτή την ισχύ μετατρέπεται σε θερμότητα πάνω στην αντίσταση R_1 ;

68. Έχουμε $n = 10$ όμοιες γεννήτριες, που καθεμιά έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 5 \text{ V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 0,5 \Omega$. Συνδέουμε τις γεννήτριες κατά σειρά. Το εξωτερικό κύκλωμα είναι μία αντίσταση $R = 1,5 \Omega$. Πόση είναι η ένταση I του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R ; Πόση ένταση έχει το ρεύμα που περνάει από μία γεννήτρια ; Πόση ισχύ παρέχει στο εξωτερικό κύκλωμα ή συστοιχία ;

69. Μιά αντίσταση $R = 3 \Omega$ συνδέεται με συστοιχία που αποτελείται από δύο όμοιες γεννήτριες, που συνδέονται παράλληλα. Κάθε γεννήτρια έχει ΗΕΔ $E = 35 \text{ V}$ και εσωτερική αντίσταση $r = 1 \Omega$. Πόση είναι η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την αντίσταση R ;

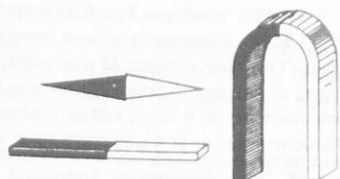
ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Ίδιότητες τῶν μαγνητῶν

39. Μαγνήτες. Μαγνητισμός

Ἀπό τὴν ἀρχαιότητα ἦταν γνωστό ὅτι ὁ φυσικός μαγνήτης (Fe_3O_4) ἔχει τὴν ιδιότητα νὰ ἔλκει μικρά κομμάτια σιδήρου ἢ χάλυβα. Αὐτὴ ἡ ιδιότητα τοῦ φυσικοῦ μαγνήτη ὀνομάζεται **μαγνητισμός**.

Ἄν μὲ ἓνα φυσικό μαγνήτη τρίψουμε πολλές φορές καὶ κατὰ τὴν ἴδια φορά μιά ράβδο χάλυβα, παρατηροῦμε ὅτι ὁ χάλυβας γίνεται **μόνιμος μαγνήτης** καὶ λέγεται **τεχνητός μαγνήτης**. Σήμερα κατασκευάζουμε εὐκόλα τεχνητούς μαγνήτες μὲ τὴ βοήθεια τοῦ ἠλεκτρικοῦ ρεύματος καὶ δίνουμε σ' αὐτούς διάφορα σχήματα (σχ. 47). Τούς τεχνητούς μαγνήτες τούς κατασκευάζουμε ἀπὸ χάλυβα ἢ ἀπὸ ὀρισμένα κράματα.

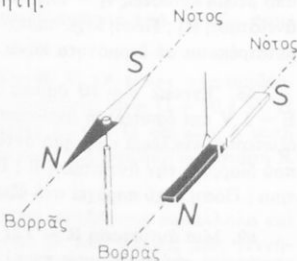


Σχ. 47. Τεχνητοὶ μαγνήτες.

40. Πόλοι τοῦ μαγνήτη

Μέσα σὲ ρινίσματα σιδήρου βυθίζουμε ἓνα μαγνήτη. Ὅταν σηκώσουμε τὸ μαγνήτη, βλέπουμε ὅτι τὰ ρινίσματα ἔχουν προσκολληθεῖ στὶς δύο ἄκρες τοῦ μαγνήτη, πού ὀνομάζονται **πόλοι** τοῦ μαγνήτη.

Μὲ νῆμα κρεμάμε ἓνα μαγνήτη ἔτσι, ὥστε νὰ μπορεῖ νὰ στρέφεται γύρω ἀπὸ κατακόρυφο ἄξονα (σχ. 48). Ὁ μαγνήτης ἰσορροπεῖ πάντοτε σὲ τέτοια θέση, ὥστε ὁ ἓνας πόλος του νὰ στρέφεται πρὸς τὸ Βορρὰ καὶ ὁ ἄλλος πόλος του πρὸς τὸ Νότο. Γι' αὐτὸ οἱ δύο πόλοι τοῦ μαγνήτη ὀνομάζονται ἀντίστοιχα **βόρειος πόλος** (N, North = Βορρὰς) καὶ **νότιος πόλος** (S, South = Νότος).



Σχ. 48. Οἱ δύο πόλοι τοῦ μαγνήτη

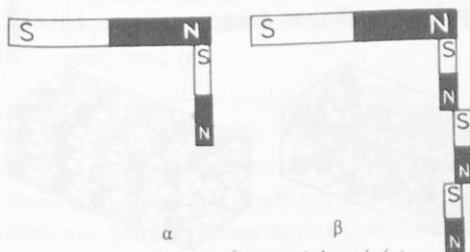
Ἄμοιβαία ἐπίδραση τῶν πόλων. Στόν ἓνα πόλο μιᾶς μαγνητικῆς βελόνης, πού μπορεῖ νά στρέφεται ἐλεύθερα γύρω ἀπό κατακόρυφο ἄξονα, πλησιάζουμε διαδοχικά τοὺς δύο πόλους ἑνός μαγνήτη. Τότε εὐκόλα διαπιστώνουμε ὅτι μεταξύ δύο ὁμώνυμων πόλων ἀναπτύσσεται ἀμοιβαία ἀπωση, ἐνῶ μεταξύ δύο ἐτερόνυμων πόλων ἀναπτύσσεται ἀμοιβαία ἔλξη. Ἡ δύναμη πού ἀναπτύσσεται μεταξύ δύο μαγνητικῶν πόλων καθὼς καὶ ἄλλα μαγνητικά φαινόμενα ἐρμηνεύονται εὐκόλα, ἂν ὑποθέσουμε ὅτι σέ κάθε μαγνητικό πόλο ὑπάρχει ἓνα ἰδιαίτερο φυσικό μέγεθος, πού ὀνομάζεται **ποσότητα μαγνητισμοῦ** (m) καὶ θεωρεῖται ὡς θετική (+ m) ἢ ἀρνητική (- m), ἀντίστοιχα γιά ἓνα βόρειο ἢ νότιο μαγνητικό πόλο.

41. Μαγνήτιση μέ ἐπαφή καί μέ ἐπαγωγή

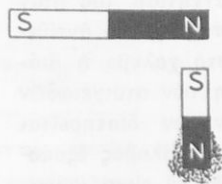
Ἄν ἡ μιά ἄκρη μικρῆς ράβδου ἀπό μαλακό σίδηρο ἔρθει σέ ἐπαφή μέ τό βόρειο πόλο ἑνός μαγνήτη, εὐκόλα διαπιστώνουμε ὅτι ἡ ἄλλη ἄκρη τῆς ράβδου ἔγινε βόρειος πόλος (σχ. 49α). Ὁ τρόπος μέ τόν ὁποῖο ἔγινε μαγνήτις ἡ ράβδος τοῦ μαλακοῦ σιδήρου, ὀνομάζεται *μαγνήτιση μέ ἐπαφή*. Ἡ μαγνητισμένη ράβδος μπορεῖ νά μαγνητίσει μέ τόν ἴδιο τρόπο μιά δεύτερη μικρή ράβδο μαλακοῦ σιδήρου, αὐτή μιά ἄλλη καί ἔτσι σχηματίζεται μιά σειρά ἀπό μικρές μαγνητισμένες ράβδους (σχ. 49β). Ἡ μαγνήτιση τοῦ μαλακοῦ σιδήρου εἶναι *προσωρινή* καί διαρκεῖ, ὅσο ὁ μαλακός σίδηρος βρίσκεται σέ ἐπαφή μέ τό μαγνήτη.

Ἡ μικρή ράβδος τοῦ μαλακοῦ σιδήρου μαγνητίζεται ἀκόμη καί ὅταν βρεθεῖ σέ μικρή ἀπόσταση ἀπό τό βόρειο πόλο τοῦ μαγνήτη (σχ. 50). Αὐτός ὁ τρόπος μαγνήτισεως τοῦ μαλακοῦ σιδήρου ὀνομάζεται *μαγνήτιση μέ ἐπαγωγή*. Καί σ' αὐτή τήν περίπτωση ἡ μαγνήτιση τοῦ μαλακοῦ σιδήρου εἶναι *προσωρινή* καί διαρκεῖ, ὅσο ὁ μαλακός σίδηρος βρίσκεται κοντά στό μαγνήτη.

Ἄν ἀντί γιά μαλακό σίδηρο χρησιμοποιήσουμε στά παραπάνω πειρά-

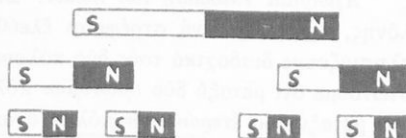


Σχ. 49. Μαγνήτιση μέ ἐπαφή (α) καί μαγνήτιση μέ ἐπαφή μιᾶς σειρᾶς ράβδων μαλακοῦ σιδήρου (β).



Σχ. 50. Μαγνήτιση μέ ἐπαγωγή.

ματα μία ράβδο από χάλυβα, παρατηρούμε ότι και ο χάλυβας μαγνητίζεται *μέ επαφή* και *μέ επαγωγή*, αλλά η μαγνήτισή του είναι *μόνιμη*.



42. Στοιχειώδεις μαγνήτες

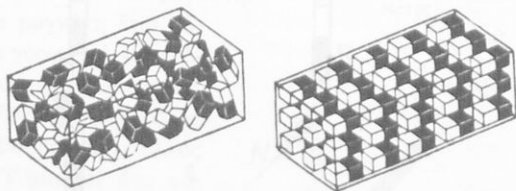
“Αν έναν ευθύγραμμο μαγνήτη τον κόψουμε σε δύο κομμάτια,

παρατηρούμε ότι κάθε κομμάτι έχει δύο *ετερώνυμους πόλους* (βόρειο και νότιο πόλο). Στο σημείο που χωρίστηκε ο αρχικός μαγνήτης εμφανίστηκαν δύο ετερώνυμοι πόλοι (σχ. 51).” Αν καθένα από τους δύο νέους μαγνήτες τον κόψουμε σε δύο κομμάτια, παρατηρούμε ότι κάθε κομμάτι έχει πάλι δύο ετερώνυμους πόλους. Από το πείραμα αυτό συμπεραίνουμε ότι είναι αδύνατο να απομονώσουμε ένα μαγνητικό πόλο, γιατί οι δύο μαγνητικοί πόλοι, ο βόρειος και ο νότιος, εμφανίζονται πάντοτε στις δύο άκρες ενός μαγνήτη.

Σχ. 51. Αδύνατη ή απομόνωση ενός μαγνητικού πόλου.

“Αν μπορούσαμε να εξακολουθήσουμε το χώρισμα ενός μαγνήτη ως τα ελάχιστα τμήματά του, δηλαδή ως τα μόρια ή τα άτομά του, τότε θα βλέπαμε ότι κάθε μόριο ή άτομο του μαγνήτη είναι ένας μικρότατος μαγνήτης, που έχει δύο ετερώνυμους πόλους και ονομάζεται *στοιχειώδης* ή *μοριακός μαγνήτης*.”

Μέσα σε μία ράβδο από μαλακό σίδηρο ή χάλυβα που δεν είναι μαγνητισμένη, οι στοιχειώδεις μαγνήτες διατάσσονται άτακτα (σχ. 52). Όταν όμως αυτή η ράβδος έρθει σε επαφή με ένα μαγνητικό πόλο ή βρεθεί σε μικρή απόσταση από αυτόν, τότε οι στοιχειώδεις μαγνήτες διατάσσονται μέσα στη ράβδο έτσι, ώστε στις δύο άκρες της εμφανίζονται δύο ετερώνυμοι πόλοι. Μέσα στη ράβδο οι στοιχειώδεις μαγνήτες σχηματίζουν παράλληλα νήματα. Όταν απομακρυνθεί ο πόλος, που προκάλεσε τη μαγνήτιση της ράβδου, τότε στο μαλακό σίδηρο ή διάταξη των στοιχειωδών μαγνητών άμέσως καταστρέφεται και ο μαλακός σίδηρος *απομαγνητίζεται*, δηλαδή η μαγνήτισή του ήταν *προσωρινή*, ενώ αντίθετα στο χάλυβα ή διάταξη των στοιχειωδών μαγνητών διατηρείται και ο χάλυβας εξακολουθεί να είναι *μαγνήτης*, δηλαδή η μαγνήτισή του είναι *μόνιμη*.



Σχ. 52. Στοιχειώδεις μαγνήτες σε άμαγνήτιστη και σε μαγνητισμένη ράβδο σιδήρου.

43. Συστήματα μονάδων στο Μαγνητισμό

Ἀπό τὰ ἑξὶ θεμελιώδη μεγέθη τοῦ διεθνoῦς συστήματος (SI) στή *Μηχανική* χρησιμοποιoῦμε μόνο τὰ τρία μηχανικά μεγέθη του (μῆκος, μάζα, χρόνος) καὶ ἔτσι διαμορφoῦνεται τὸ σύστημα MKS, πoῦ ἀποτελεῖ ἕνα τμήμα τοῦ διεθνoῦς συστήματος. Στὸ *Μαγνητισμὸ* καὶ τὸν *Ἡλεκτρισμὸ*, ἐκτὸς ἀπὸ τὰ τρία μηχανικά μεγέθη (μῆκος, μάζα, χρόνος), χρησιμοποιoῦμε καὶ ἕνα τέταρτο θεμελιώδες μέγεθος, τὴν *ἐνταση ἡλεκτροικοῦ ρεύματος*, πoῦ ὡς θεμελιώδη μονάδα ἔχει τὸ Ampère (1 A). Ἐτσι διαμορφoῦνεται τὸ σύστημα MKSA, πoῦ εἶναι πάλι ἕνα τμήμα τοῦ διεθνoῦς συστήματος μονάδων (SI).

Τὸ σύστημα CGS ἐπεκτείνεται καὶ στὸ Μαγνητισμὸ καὶ σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση ἀποτελεῖ τὸ *ἡλεκτρομαγνητικὸ σύστημα μονάδων* (σύστημα HMM). Ἀλλὰ σήμερα γενικά χρησιμοποιoῦμε τὸ σύστημα MKSA, γιατί οἱ μονάδες του εἶναι κατάλληλες γιὰ τίς πάρα πολλές ἐφαρμογές στὴν τεχνική. Γιὰ νὰ μὴ προκληθεῖ καμιά σύγχυση, θὰ ἐξετάσουμε τὰ μαγνητικά φαινόμενα χρησιμοποιώντας τὸ γενικά παραδεκτὸ σύστημα MKSA. Τὸ σύστημα μονάδων MKSA ἐπεκτείνεται σὲ ὁλόκληρο τὸ Μαγνητισμὸ καὶ τὸν Ἡλεκτρισμὸ καὶ μᾶς δίνει χρήσιμες μονάδες (ἀμπέρ, βόλτ, ὤμ κ. ἄ.).

44. Νόμος τοῦ Coulomb

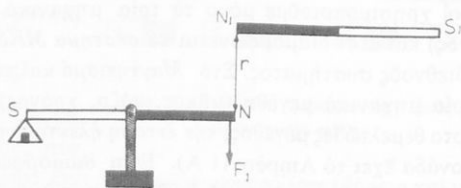
Δύο μαγνητικοὶ πόλοι, πoῦ τοὺς θεωροῦμε ὡς σημεῖα, βρίσκονται στὸ κενὸ (ἢ στὸν ἀέρα), ἔχουν ποσότητες μαγνητισμοῦ m_1 καὶ m_2 καὶ ἡ μεταξὺ τους ἀπόσταση εἶναι r . Πειραματικά βρίσκουμε ὅτι γιὰ τὴ μαγνητικὴ δύναμη \vec{F} (ἔλξη ἢ ἄπωση) πoῦ ἀναπτύσσεται μεταξὺ αὐτῶν τῶν δύο πόλων, ἰσχύει ὁ νόμος τοῦ Coulomb:

Ἡ ἔλξη ἢ ἡ ἄπωση (\vec{F}) πoῦ ἀναπτύσσεται μεταξὺ δύο ποσοτήτων μαγνητισμοῦ (m_1 καὶ m_2) εἶναι ἀνάλογη μὲ τὸ γινόμενο τῶν ποσοτήτων μαγνητισμοῦ καὶ ἀντιστρόφως ἀνάλογη μὲ τὸ τετράγωνο τῆς ἀποστάσεώς τους (r).

$$\text{νόμος τοῦ Coulomb} \quad F = K_{\text{μαγν}} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

ὅπου $K_{\text{μαγν}}$ εἶναι μιά σταθερὴ, πoῦ ἐξαρτᾶται ἀπὸ τίς μονάδες καὶ ἀπὸ τὸ μέσο πoῦ ὑπάρχει γύρω ἀπὸ τίς δύο ποσότητες μαγνητισμοῦ. Ἡ μαγνητικὴ δύναμη \vec{F} εἶναι θετικὴ (ἄπωση), ἂν οἱ δύο ποσότητες μαγνητισμοῦ εἶναι ὁμώνυμες καὶ ἀρνητικὴ (ἔλξη), ἂν οἱ δύο ποσότητες μαγνητισμοῦ εἶναι ἐτερόνυμες.

Πειραματική απόδειξη. Ο νόμος του Coulomb αποδεικνύεται πειραματικά με τη διάταξη που δείχνει το σχήμα 53. Ένας μακρύς και λεπτός μαγνήτης NS αποτελεί τη φάλαγγα ζυγού. Έστω m η ποσότητα μαγνητισμού του βό-



Σχ. 53. Σχηματική παράσταση της διατάξεως για την απόδειξη του νόμου του Coulomb.

ρειου πόλου του N. Σε απόσταση r από τον πόλο N φέρνουμε άλλο βόρειο πόλο N_1 ενός δεύτερου μαγνήτη N_1S_1 . Η άπωση F_1 , που εξασκείται τότε στον πόλο N, μετριέται εύκολα με τα σταθμά που βάζουμε στο δίσκο του ζυγού. Αν η απόσταση μεταξύ των δύο πόλων γίνει $2r, 3r, 4r$, η άπωση που εξασκείται στον πόλο N γίνεται αντίστοιχα $F_1/4, F_1/9, F_1/16$, δηλαδή ελαττώνεται *αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασεως* (r).

Ο βόρειος πόλος N_1 έχει ποσότητα μαγνητισμού m_1 και ο βόρειος πόλος N_2 ενός άλλου μαγνήτη N_2S_2 έχει ποσότητα μαγνητισμού m_2 . Αν ο πόλος N_2 από την ίδια απόσταση r εξασκεί στον πόλο N διπλάσια άπωση ($2F_1$), τότε πρέπει να δεχτούμε ότι η ποσότητα μαγνητισμού m_2 του πόλου N_2 είναι διπλάσια από την ποσότητα μαγνητισμού m_1 του πόλου N_1 . Άρα οί ποσότητες μαγνητισμού m_1 και m_2 είναι *ανάλογες* με τις δυνάμεις F_1 και F_2 , τις όποιες εξασκούν αυτές οί δύο ποσότητες μαγνητισμού από την ίδια απόσταση r σε μιά τρίτη ποσότητα μαγνητισμού m , δηλαδή έχουμε :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{F_1}{F_2}$$

Ο πόλος N_1 εξασκεί στον πόλο N μιά άπωση F_1 , που είναι *ανάλογη* με την ποσότητα μαγνητισμού m_1 του πόλου N_1 . Σύμφωνα με το αξίωμα της δράσεως και αντιδράσεως και ο πόλος N εξασκεί στον πόλο N_1 αντίθετη άπωση F_1 , που είναι *ανάλογη* με την ποσότητα μαγνητισμού m του πόλου N. Ωστε η άπωση F_1 είναι *ανάλογη* και με την ποσότητα μαγνητισμού m και με την ποσότητα μαγνητισμού m_1 , δηλαδή είναι *ανάλογη με το γινόμενο $m \cdot m_1$ των δύο ποσοτήτων μαγνητισμού*.

α. Ο νόμος του Coulomb στο σύστημα μονάδων MKSA. Όταν οί δύο μαγνητικοί πόλοι m_1 και m_2 βρίσκονται στο *κενό* (ή στον *αέρα*), τότε όρίστηκε (1960) ότι η μαγνητική σταθερή $K_{\text{μαγν}}$ έχει την τιμή :

$$\text{μαγνητική σταθερή του Coulomb} \quad K_{\text{μαγν}} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

Μονάδα ποσότητας μαγνητισμού. Στο σύστημα MKSA μονάδα ποσότητας μαγνητισμού είναι τό :

$$1 \text{ Ampère} \cdot \text{mètre} \text{ (1 άμπέρ επί μέτρο) ή } 1 \text{ A} \cdot \text{m}$$

Ήν στην εξίσωση (1) βάλουμε τήν τιμή τής σταθερής $K_{\text{μαγν}}$, $m_1 = m_2 = 1 \text{ A} \cdot \text{m}$ καί $r = 1 \text{ m}$, βρίσκουμε :

$$F = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \frac{(1 \text{ A} \cdot \text{m})^2}{(1 \text{ m}^2)} \quad \text{καί} \quad F = 10^{-7} \text{ N}$$

Έτσι έχουμε τόν ακόλουθο *όρισμό* :

Μονάδα ποσότητας μαγνητισμού ($1 \text{ A} \cdot \text{m}$) είναι ή ποσότητα μαγνητισμού ή όποια, όταν βρίσκεται μέσα στό κενό σέ απόσταση ενός μέτρο (1 m) από ίση ποσότητα μαγνητισμού, *έξασκει σ'* αυτή δύναμη (F) ίση μέ 10^{-7} Newton .

Ήντε στό σύστημα MKSA ό νόμος του Coulomb για τό κενό (ή τόν άέρα) δίνεται από τήν εξίσωση :

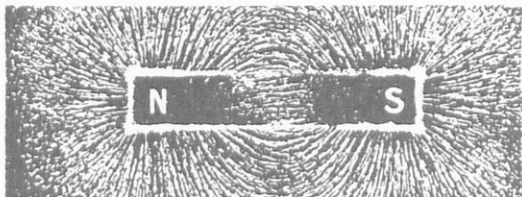
$$\text{νόμος του Coulomb} \quad F = 10^{-7} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad \left\{ \begin{array}{l} 10^{-7} \text{ σέ } \text{N/A}^2 \\ m_1, m_2 \text{ σέ } \text{A} \cdot \text{m} \\ r \text{ σέ } \text{m} \\ F \text{ σέ } \text{N} \end{array} \right. \quad (2)$$

β. Μαγνητικό δίπολο. Από τίς μετρήσεις βρήκαμε ότι *οί δύο έτερόνυμοι πόλοι* ενός μαγνήτη (δηλαδή ό βόρειος καί ό νότιος) έχουν κατ' απόλυτη τιμή *τήν ίδια ποσότητα μαγνητισμού* ($\pm m$), πού τή θεωρούμε συγκεκριμένη σέ δύο ορισμένα σημεία κοντά στίς άκρες του μαγνήτη. Δύο ίσοι (κατ' απόλυτη τιμή) *ετερόνυμοι πόλοι*, πού βρίσκονται σέ σταθερή μεταξύ τους απόσταση, αποτελούν ένα *μαγνητικό δίπολο*.

Μαγνητικό πεδίο

45. Μαγνητικό φάσμα. Όρισμός του μαγνητικού πεδίου

Κάτω από μία οριζόντια γάλινη πλάκα τοποθετούμε έναν εϋθύγραμμο μαγνήτη. Πάνω στην πλάκα ρίχνουμε ρινίσματα σιδήρου καί χτυπάμε ελαφρά τήν πλάκα. Τά ρινίσματα άναπηδοϋν καί διατάσσονται σέ κανονικές



Σχ. 54. Μαγνητικό φάσμα.

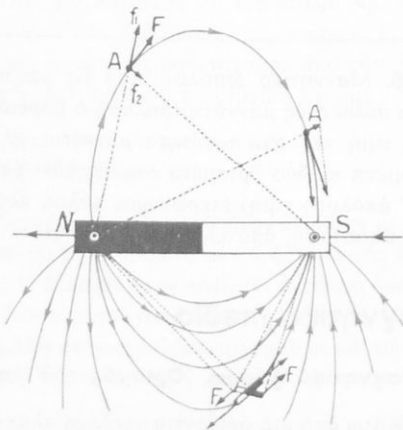
γραμμές, που αρχίζουν από τον έναν πόλο και καταλήγουν στον άλλο (σχ. 54). Αυτές οι γραμμές ονομάζονται *μαγνητικές δυναμικές γραμμές* και το σύστημα των γραμμών που σχηματίζεται πάνω στην πλάκα ονομάζεται *μαγνητικό φάσμα*. Αν πάνω στην πλάκα βάλουμε μικρές μαγνητικές βελόνες, παρατηρούμε ότι κάθε βελόνη, όταν ήρεμήσει, έχει τη διεύθυνση της εφαιπόμενης μιάς δυναμικής γραμμής (σχ. 55). Αυτή η θέση της μαγνητικής βελόνης οφείλεται στις μαγνητικές δυνάμεις, που εξασκούν στους δύο πόλους της οι δύο πόλοι του μαγνήτη. Ωστε το μαγνητικό φάσμα σχηματίζεται, γιατί τα ρινίσματα του σιδήρου *μαγνητίζονται* με επαγωγή και γίνονται μικροί μαγνήτες, οι οποίοι διατάσσονται κατά τη διεύθυνση της εφαιπόμενης σε κάθε σημείο της δυναμικής γραμμής.

Το μαγνητικό φάσμα αισθητοποιεί μία ιδιότητα που αποκτά ο χώρος γύρω από το μαγνήτη. Δηλαδή σε κάθε ποσότητα μαγνητισμού, που έρχεται μέσα σ' αυτόν το χώρο, εξασκούνται μαγνητικές δυνάμεις οι οποίες οφείλονται στο μαγνήτη. Τότε λέμε ότι γύρω από το μαγνήτη υπάρχει *μαγνητικό πεδίο*. Ωστε :

Μαγνητικό πεδίο ονομάζεται ένας χώρος, όταν σε κάθε ποσότητα μαγνητισμού που υπάρχει μέσα σ' αυτόν εξασκούνται μαγνητικές δυνάμεις (έλξεις ή απώσεις).

46. Στοιχεία του μαγνητικού πεδίου

α. Μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου. Ένα μαγνητικό πεδίο σχηματίζεται στο κενό (ή στον αέρα). Σε ένα σημείο Α του μαγνητι-



Σχ. 55. Έξηγηση του μαγνητικού φάσματος.



Σχ. 56. Η μαγνητική επαγωγή \vec{B} στο σημείο A του μαγνητικού πεδίου.

κού πεδίου υπάρχει μία ποσότητα μαγνητισμού $+m$ (σχ. 56). Τότε το μαγνητικό πεδίο εξασκεί σ' αυτή την ποσότητα μαγνητισμού μία δύναμη \vec{F} . Στο σύστημα MKSA ισχύει ο ακόλουθος ορισμός :

Μαγνητική επαγωγή (\vec{B}) του μαγνητικού πεδίου σε ένα σημείο του ονομάζεται το πηλίκο της δυνάμεως \vec{F}

πού ενεργεί στην ποσότητα μαγνητισμού m , (ή όποια βρίσκεται σ' αυτό τό σημείο), διά της ποσότητας μαγνητισμού m .

$$\text{μαγνητική επαγωγή} \quad \vec{B} = \frac{\vec{F}}{m} \quad (1)$$

Η μαγνητική επαγωγή είναι *άνυσμα* (\vec{B}), πού έχει *φορέα* τό φορέα της δυνάμεως, *μέτρο* ίσο μέ τό πηλίκο $B = F/m$ καί *φορά* κατά σύμβαση τή φορά της δυνάμεως \vec{F} , όταν αυτή ενεργεί σέ θετική ποσότητα μαγνητισμού $+m$.

Από τήν εξίσωση $B = F/m$ συνάγεται ότι ή μαγνητική επαγωγή σέ ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου αριθμητικά είναι ίση μέ τή δύναμη πού εξασκεί τό πεδίο *στή μονάδα θετικής ποσότητας μαγνητισμού*, όταν αυτή βρίσκεται στο θεωρούμενο σημείο του μαγνητικού πεδίου.

Μονάδα μαγνητικής επαγωγής. "Αν στήν εξίσωση $B = F/m$ βάλουμε $F = 1 \text{ N}$ καί $m = 1 \text{ A} \cdot \text{m}$, βρίσκουμε $B = 1 \text{ MKSA}$. Η μονάδα μαγνητικής επαγωγής ονομάζεται *Tesla* (1 T). "Αρα :

Σέ ένα σημείο μαγνητικού πεδίου ή μαγνητική επαγωγή B είναι ίση μέ 1 Tesla (1 T), όταν σέ μαγνητικό πόλο, πού βρίσκεται σ' αυτό τό σημείο καί έχει ποσότητα μαγνητισμού 1 μονάδα MKSA ($1 \text{ A} \cdot \text{m}$), εξασκείται δύναμη ίση μέ 1 Newton (1 N).

$$\text{μονάδα μαγνητικής επαγωγής} \quad 1 \text{ Tesla (1 T)} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ A} \cdot \text{m}} \quad \text{ή} \quad 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

β. Υπολογισμός της μαγνητικής επαγωγής. Έχουμε ένα μακρύ ευθύγραμμο μαγνήτη NS, πού ό βόρειος πόλος του N έχει ποσότητα μαγνητισμού $+m$ (σχ. 57). Έπειδή ό μαγνήτης έχει μεγάλο μήκος, μπορούμε κατά προσέγγιση νά θεωρήσουμε ότι ό πόλος N είναι μονωμένος καί δημιουργεί γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο. Σέ ένα σημείο A του μαγνητικού πεδίου

φέρνουμε τό βόρειο πόλο N_1 ενός άλλου μαγνήτη N_1S_1 . Ο πόλος N_1 έχει ποσότητα μαγνητισμού $+m_1$ και επομένως ο πόλος N έξασκει στόν πόλο N_1 δύναμη F ίση μέ :

$$F = K_{\text{μαγν}} \cdot \frac{m \cdot m_1}{r^2}$$

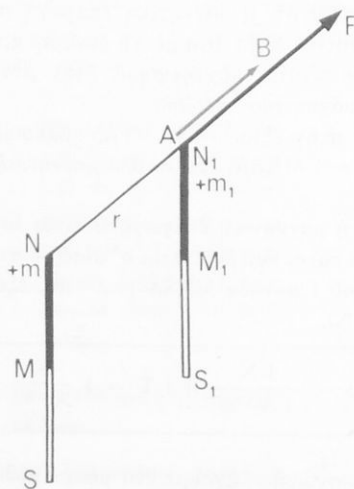
Άρα ή μαγνητική έπαγωγή B στό σημείο A του μαγνητικού πεδίου είναι :

$$B = \frac{F}{m_1} = K_{\text{μαγν}} \cdot \frac{m}{r^2} \quad \text{ή} \quad \boxed{B = 10^{-7} \cdot \frac{m}{r^2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} 10^{-7} \text{ σε } \text{N/A}^2 \\ m \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m} \\ r \text{ σε } \text{m} \\ B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$$

όπου m είναι ή ποσότητα μαγνητισμού που δημιουργεί τό μαγνητικό πεδίο.

Παράδειγμα. Ένας βόρειος μαγνητικός πόλος έχει ποσότητα μαγνητισμού $m = 5 \text{ A} \cdot \text{m}$. Σε απόσταση $r = 50 \text{ cm}$ από αυτό τόν πόλο ή μαγνητική έπαγωγή έχει μέτρο ίσο μέ :

$$B = 10^{-7} \cdot \frac{m}{r^2} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \frac{5 \text{ A} \cdot \text{m}}{(0,5 \text{ m})^2} \quad \text{καί} \quad B = 20 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad \text{ή} \quad \text{T}$$



Σχ. 57. Η δύναμη F που ενεργεί στόν πόλο N_1 και ή μαγνητική έπαγωγή B στό σημείο A του πεδίου.

γ. Δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου. Σε ένα σημείο A του μαγνητικού πεδίου βρίσκεται ένας σημειακός βόρειος πόλος N και ή μαγνητική έπαγωγή στό σημείο A είναι \vec{B} (σχ. 58). Για να αισθητοποιούμε τό μαγνητικό πεδίο σε κάθε σημείο



Σχ. 58. Το άνωσμα B είναι έφαπτόμενο της δυναμικής γραμμής.

του, έχουμε τις *δυναμικές γραμμές* του μαγνητικού πεδίου, για τις οποίες ισχύει ο εξής *όρισμός*:

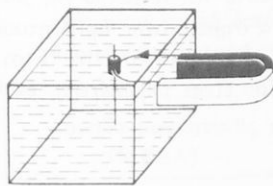
Δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου ονομάζεται ή γραμμή που σέ κάθε σημείο της τό άνυσμα της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} είναι εφαπτόμενο αυτής της γραμμής.

Επειδή σέ κάθε σημείο του μαγνητικού πεδίου ή μαγνητική επαγωγή είναι ένα όρισμένο άνυσμα \vec{B} , συνάγεται ότι από ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου περνάει *μόνο μιά* δυναμική γραμμή. Αυτή έχει φορά τή φορά του άνυσματος της μαγνητικής επαγωγής. Από τή φορά, πού κατά συνθήκη δεχόμαστε για τό άνυσμα της μαγνητικής επαγωγής, προκύπτει ότι ή δυναμική γραμμή έχει φορά από τό βόρειο πός τό νότιο πόλο του μαγνήτη (σχ. 9).

Από τά παραπάνω μπορούμε νά δώσουμε για τή δυναμική γραμμή τόν εξής εμπειρικό *όρισμό*:

Δυναμική γραμμή του μαγνητικού πεδίου είναι ή τροχιά πού διαγράφει ένας βόρειος μαγνητικός πόλος (+m) μέ τήν επίδραση του μαγνητικού πεδίου.

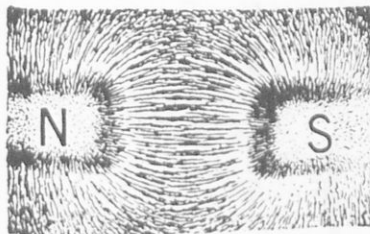
Αυτή ή κίνηση ενός βόρειου μαγνητικού πόλου άποδεικνύεται μέ τό εξής πείραμα. Στερεώνουμε ένα λεπτό καί μακρύ μαγνήτη σέ ένα φελλό καί



Σχ. 59. Κίνηση ενός βόρειου μαγνητικού πόλου.

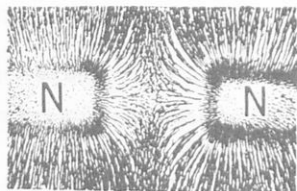
τόν βυθίζουμε μέσα σέ νερό έτσι, ώστε ο βόρειος πόλος του νά είναι έξω από τό νερό (σχ. 59). Αν φέρουμε τό βόρειο πόλο αυτού του μαγνήτη κοντά στό βόρειο πόλο ενός άλλου ισχυρού μαγνήτη, βλέπουμε ότι ο βόρειος πόλος πού εξέχει από τό νερό διαγράφει μιά *δυναμική γραμμή* καί έρχεται στό νότιο πόλο του ισχυρού μαγνήτη μέ τήν επίδραση συνισταμένης των δυνάμεων πού εξασκούν οί δύο πόλοι του ισχυρού μαγνήτη.

δ. *Όμογενές μαγνητικό πεδίο.* Μεταξύ δύο *έτερόνυμων* μαγνητικών πόλων σχηματίζουμε τό μαγνητικό φάσμα (σχ. 60). Παρατηρούμε ότι σ' αυτή τήν περίπτωση οί δυναμικές γραμμές είναι *παράλληλες*. Αυτό τό μαγνητικό πεδίο λέγεται *όμογενές*. Γενικά άποδεικνύεται ότι στό όμογενές μαγνητικό πεδίο τό άνυσμα της μαγνη-



Σχ. 60. Όμογενές μαγνητικό πεδίο μεταξύ δύο έτερόνυμων μαγνητικών πόλων.

τικῆς ἐπαγωγῆς (\vec{B}) σέ ὅλα τὰ σημεῖα τοῦ πεδίου ἔχει τὴν ἴδια διεύθυνση, τὴν ἴδια φορά καί τό ἴδιο μέτρο, δηλαδή ἡ μαγνητική ἐπαγωγή εἶναι σταθερή σέ ὅλα τὰ σημεῖα τοῦ πεδίου. Ἐνας πεταλοειδῆς μαγνήτης ἀνάμεσα στοὺς δύο βραχίονές του σχηματίζει ὁμογενές μαγνητικό πεδίο. Τό σχῆμα 61 δείχνει τό μαγνητικό φάσμα πού σχηματίζεται μεταξύ δύο ὁμώνυμων μαγνητικῶν πόλων (ἀνομοιογενές πεδίο). Ἐνα ὁμογενές μαγνητικό πεδίο τό παριστάνουμε μέ ἰσαπέχουσες παράλληλες γραμμές.

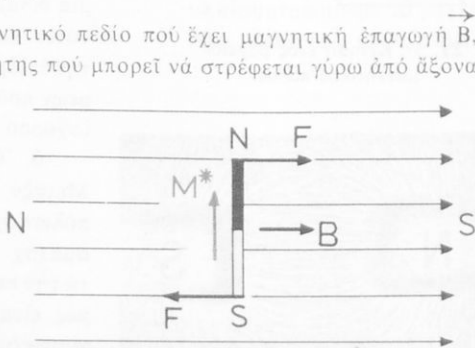


Σχ. 61: Μαγνητικό πεδίο μεταξύ δύο ὁμώνυμων μαγνητικῶν πόλων.

ε. Πυκνότητα δυναμικῶν γραμμῶν. Στό μαγνητικό φάσμα κοντά σέ κάθε πόλο, ὅπου ἡ μαγνητική ἐπαγωγή εἶναι μεγάλη, παρατηροῦμε *πύκνωση* τῶν δυναμικῶν γραμμῶν καί ἀντίθετα σέ μεγαλύτερη ἀπόσταση ἀπό τοὺς πόλους, ὅπου ἡ μαγνητική ἐπαγωγή εἶναι μικρότερη, παρατηροῦμε *ἀραίωση* τῶν δυναμικῶν γραμμῶν. Ὀνομάζουμε *πυκνότητα δυναμικῶν γραμμῶν* σέ ἕνα σημεῖο τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τόν ἀριθμό τῶν δυναμικῶν γραμμῶν οἱ ὁποῖες περνοῦν *κάθετα ἀπό τὴ μονάδα ἐπιφάνειας*, πού ὡς κέντρο ἔχει τό θεωρούμενο σημεῖο τοῦ πεδίου. Συμβατικά δεχόμαστε ὅτι *τό μέτρο τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς* τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου σέ ἕνα σημεῖο του ἀριθμητικά εἶναι ἴσο μέ τὴν πυκνότητα δυναμικῶν γραμμῶν σ' αὐτό τό σημεῖο. Ἐτσι, ὅπου ἡ μαγνητική ἐπαγωγή τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου εἶναι *μεγαλύτερη*, ἐκεῖ οἱ δυναμικές γραμμές εἶναι *πυκνότερες*.

47. Μαγνητική ροπή μαγνήτη

Μέσα σέ ὁμογενές μαγνητικό πεδίο πού ἔχει μαγνητική ἐπαγωγή \vec{B} , βρίσκεται εὐθύγραμμος μαγνήτης πού μπορεῖ νά στρέφεται γύρω ἀπό ἄξονα κάθετο στίς δυναμικές γραμμές (σχ. 62). Οἱ δύο πόλοι N καί S τοῦ μαγνήτη ἔχουν ἀντίστοιχα ποσότητες μαγνητισμοῦ $+m$ καί $-m$. Σέ κάθε πόλο τοῦ μαγνήτη τό μαγνητικό πεδίο ἐξασκεῖ μιά δύναμη, πού ἔχει μέτρο $F = B \cdot m$ καί εἶναι παράλληλη μέ τίς δυναμικές γραμμές. Ὄταν ὁ μαγνήτης σχηματίζει γωνία



Σχ. 62. Στό μαγνητικό δίπολο NS ἐνεργεῖ ζεύγος δυνάμεων.



Σχ. 63. Η μαγνητική ροπή είναι το άνυσμα \vec{M}^* .

μέ τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών, τότε στο μαγνήτη ενεργεί ζεύγος δυνάμεων, που τείνει να περιστρέψει το μαγνήτη και να κάνει τον άξονά του παράλληλο με τις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου.

α. Μαγνητική ροπή μαγνήτη. Αν ο μαγνήτης έχει μήκος l , τότε το γινόμενο της ποσότητας μαγνητισμού (m) του ενός πόλου του μαγνήτη επί την απόσταση (l) των δύο πόλων του, είναι μέγεθος σταθερό και χαρακτηριστικό γι' αυτόν το μαγνήτη και ονομάζεται *μαγνητική ροπή* (M^*) του μαγνήτη.

$$\text{μαγνητική ροπή μαγνήτη } M^* = m \cdot l \quad (1)$$

Η μαγνητική ροπή ενός μαγνήτη είναι *άνυσμα* \vec{M}^* που έχει φορέα τον κατά μήκος άξονα του μαγνήτη, *φορά* από το νότιο πόλο S προς το βόρειο πόλο N και *μέτρο* ίσο με το γινόμενο $m \cdot l$ (σχ. 63).

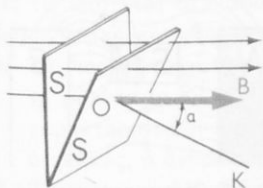
Μονάδα μαγνητικής ροπής. Αν στην εξίσωση (1) βάλουμε $m = 1 \text{ A} \cdot \text{m}$ και $l = 1 \text{ m}$, βρίσκουμε $M^* = 1 \text{ MKSA}$ μαγνητικής ροπής. Ωστε :

Στο σύστημα MKSA μονάδα μαγνητικής ροπής είναι η μαγνητική ροπή ενός μαγνητικού διπόλου που οι πόλοι του απέχουν 1 m και καθένας από αυτούς έχει *μιά μονάδα ποσότητας μαγνητισμού* ($1 \text{ A} \cdot \text{m}$).

$$\text{μονάδα μαγνητικής ροπής } 1 \text{ A} \cdot \text{m} \cdot 1 \text{ m} \text{ ή } 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \text{ (MKSA)}$$

48. Μαγνητική ροή .

Μέσα σε όμογενές μαγνητικό πεδίο, που έχει μαγνητική επαγωγή \vec{B} , έχουμε *μιά επιφάνεια*, ή όποια έχει *έμβαδό S* και ή κάθετος στην επιφάνεια σχηματίζει γωνία α με τις δυναμικές γραμμές του πεδίου (σχ. 64). Τότε ισχύει ο *έξης ορισμός* :



Σχ. 64. Από την επιφάνεια S περνάει μαγνητική ροή Φ .

Όνομάζεται *μαγνητική ροή* (Φ) το γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής (B) του μαγνητικού πεδίου επί το έμβαδό (S) της επιφάνειας και επί το *συνημίτονο* της γωνίας α (συν α).

$$\text{μαγνητική ροή} \quad \Phi = B \cdot S \cdot \text{συν } \alpha \quad (1)$$

Αν η επιφάνεια S είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου ($\alpha=0^\circ$), τότε η μαγνητική ροή έχει τή μέγιστη τιμή της :

$$\Phi = B \cdot S \quad (2)$$

Μονάδα μαγνητικής ροής. Αν στην εξίσωση (2) βάλουμε $B = 1$ Tesla (1 T) και $S = 1 \text{ m}^2$, βρίσκουμε $\Phi = 1$ MKSA. Η μονάδα μαγνητικής ροής ονομάζεται *Weber* (1 Wb). Άρα :

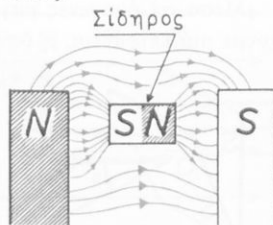
Ένα Weber (1 Wb) είναι η μαγνητική ροή που περνάει από μία επιφάνεια, η οποία έχει έμβαδό 1 m^2 και είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές ομογενούς μαγνητικού πεδίου με μαγνητική επαγωγή 1 Tesla (1 T).

$$\text{μονάδα μαγνητικής ροής} \quad 1 \text{ Weber (1 Wb)} = 1 \text{ Tesla} \cdot 1 \text{ m}^2 \quad \text{ή} \quad 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

49. Μαγνητική διαπερατότητα του σιδήρου

Σχηματίζουμε τό μαγνητικό φάσμα ενός ισχυρού πεταλοειδή μαγνήτη. Ανάμεσα στους δύο βραχίονές του τό μαγνητικό πεδίο είναι *όμογενές*, σχηματίζεται μέσα στον *άερα* και έχει σταθερή *μαγνητική επαγωγή* B_0 . Στο διάκενο που υπάρχει ανάμεσα στους δύο βραχίονες του μαγνήτη, τοποθετούμε μία μικρή κυλινδρική ράβδο από μαλακό σίδηρο έτσι, ώστε η βάση του κυλίνδρου, που έχει έμβαδό S , νά είναι κάθετη στις δυναμικές γραμμές του πεδίου. Σχηματίζουμε πάλι τό μαγνητικό φάσμα (σχ. 65). Βλέπουμε ότι τώρα τό μαγνητικό πεδίο δέν είναι *όμογενές*. Οί δυναμικές γραμμές λυγίζουν και προσπαθοῦν νά περάσουν *όσο είναι δυνατό περισσότερες* μέσα από τό σίδηρο. Σύγχρονα ή ράβδος *μαγνητίζεται* με επαγωγή και στις δύο άκρες της ράβδου σχηματίζονται νότιος και βόρειος πόλος.

Όταν δέν ὑπῆρχε ό σίδηρος μέσα στο μαγνητικό πεδίο, τότε στον *άερα* από μία επιφάνεια με έμβαδό S περνούσε μαγνητική ροή $\Phi_0 = B_0 \cdot S$. Όταν μέσα στο μαγνητικό πεδίο υπάρχει ό σίδηρος, τότε από τήν επιφάνεια με τό ίδιο έμβαδό S περνούν *πολύ περισσότερες δυναμικές γραμμές* και επομένως ή μαγνητική επαγωγή *αυξάνει* και γίνεται B . Σ' αυτή τήν περίπτωση από τήν επιφάνεια S περνάει μαγνητική ροή $\Phi = B \cdot S$. Ο λόγος Φ/Φ_0 ονο-



Σχ. 65. Οί δυναμικές γραμμές προσπαθοῦν νά περάσουν μέσα από τό σίδηρο.

μάζεται *μαγνητική διαπερατότητα* μ (*σχετική μαγνητική διαπερατότητα*) του σιδήρου. Ώστε είναι :

$$\mu = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \frac{B \cdot S}{B_0 \cdot S} \quad \text{ή} \quad \mu = \frac{B}{B_0} \quad (1)$$

Ἡ μαγνητική διαπερατότητα μ δέν ἔχει διαστάσεις. Ἀπό τά παραπάνω καταλήγουμε στά ἑξῆς συμπεράσματα :

I. Ὁ σίδηρος, ὅταν εἰσάγεται μέσα σέ μαγνητικό πεδίο, μαγνητίζεται καί προκαλεῖ μεγάλη συγκέντρωση τῶν δυναμικῶν γραμμῶν τοῦ πεδίου.

II. Μαγνητική διαπερατότητα (μ) τοῦ σιδήρου ὀνομάζεται ὁ λόγος τῆς μαγνητικῆς ροῆς (Φ), πού περνάει κάθετα ἀπό μιὰ ἐπιφάνεια τοῦ σιδήρου μέ ἔμβαδὸ S , πρὸς τὴ μαγνητικὴ ροὴ Φ_0 , πού περνάει ἀπὸ τὴν ἴδια ἐπιφάνεια στὸν ἀέρα.

III. Ὄταν μέσα σέ μαγνητικό πεδίο, πού στὸν ἀέρα ἔχει μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B_0 , εἰσάγεται σίδηρος, τότε ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ τοῦ πεδίου γίνεται ἴση μέ $B = \mu \cdot B_0$.

Ἡ μαγνητικὴ διαπερατότητα (μ) τοῦ σιδήρου ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴν τιμὴ τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς B_0 τοῦ πεδίου καί μπορεῖ νά λάβει μεγάλες τιμές (ὡς 15 000).

Σημείωση. Ἡ μαγνητικὴ διαπερατότητα μ πού ὀρίσαμε ἀπὸ τὴν ἐξίσωση (1) ὀνομάζεται *σχετικὴ μαγνητικὴ διαπερατότητα*, δηλαδή σχετικὰ μέ τὴ μαγνητικὴ διαπερατότητα τοῦ κενοῦ ἢ τοῦ ἀέρα.

50. Μαγνητικὴ κατάταξη τῶν ὑλικῶν

Ἡ πειραματικὴ ἔρευνα ἀπέδειξε ὅτι ὅλα τὰ ὑλικά, ὅταν βρεθοῦν μέσα σέ μαγνητικό πεδίο, παρουσιάζουν *μαγνητικὲς ιδιότητες*. Ἀνάλογα μέ αὐτὲς τὶς ιδιότητες τὰ διάφορα ὑλικά κατατάσσονται σέ τρεῖς κατηγορίες, τὰ *διαμαγνητικά*, τὰ *παραμαγνητικά* καί τὰ *σιδηρομαγνητικά* ὑλικά.

α. Τὰ *διαμαγνητικά* ἔχουν μαγνητικὴ διαπερατότητα *λίγο μικρότερη* ἀπὸ τὴ μονάδα ($\mu < 1$). Τὰ περισσότερα ὑλικά εἶναι διαμαγνητικά. Οἱ πιὸ χαρακτηριστικοὶ ἀντιπρόσωποι αὐτῶν τῶν ὑλικῶν εἶναι τὸ βισμούθιο, ὁ χαλκός, ὁ ἄνθρακας.

β. Τὰ *παραμαγνητικά* ἔχουν μαγνητικὴ διαπερατότητα *λίγο μεγαλύτερη* ἀπὸ τὴ μονάδα ($\mu > 1$). Τέτοια ὑλικά εἶναι τὸ ἀργίλιο, τὸ χρώμιο, τὸ ὑγρὸ ὀξυγόνο.

- γ. Τά σιδηρομαγνητικά είναι λίγα και έχουν μαγνητική διαπερατότητα, πολύ μεγαλύτερη από τή μονάδα ($\mu \gg 1$). Τέτοια υλικά είναι ό σίδηρος τό νικέλιο, τό κοβάλτιο καί μερικά κράματα. Τά σιδηρομαγνητικά υλικά έχουν τά εξής ιδιαίτερα χαρακτηριστικά : 1) Άποκτούν ισχυρή μαγνήτιση μέ τήν επίδραση άσθενών μαγνητικών πεδίων. 2) Ή μαγνητική διαπερατότητά τους εξαρτάται από τή μαγνητική έπαγωγή τοῦ πεδίου πού προκαλεί τή μαγνήτισή τους. 3) Μποροῦν νά διατηρήσουν τή μαγνήτισή τους καί όταν βρίσκονται έξω από τό μαγνητικό πεδίο (π.χ. οί μόνιμοι μαγνήτες). 4) Είναι σιδηρομαγνητικά, εφόσον ή θερμοκρασία τους είναι μικρότερη από ένα ὄριο (θερμοκρασία Curie), πού είναι χαρακτηριστικό γιά κάθε υλικό (π.χ. γιά τό σίδηρο είναι 770 °C). 5) Έχουν πολύ μεγάλες εφαρμογές στήν τεχνική.

Άπό τά παραπάνω συνάγονται τά εξής συμπεράσματα :

I. Ή ὕλη έχει γενικά μαγνητικές ιδιότητες.

II. Τά διάφορα υλικά ανάλογα μέ τή συμπεριφορά τους όταν βρεθοῦν μέσα σέ μαγνητικό πεδίο, διακρίνονται σέ διαμαγνητικά ($\mu < 1$), παραμαγνητικά ($\mu > 1$) καί σιδηρομαγνητικά ($\mu \gg 1$). Τά περισσότερα υλικά είναι διαμαγνητικά.

III. Ό διαμαγνητισμός καί ό παραμαγνητισμός εμφανίζονται μόνο όταν τό υλικό βρίσκεται μέσα σέ μαγνητικό πεδίο, ενώ ό σιδηρομαγνητισμός εμφανίζεται καί όταν ὀρισμένα υλικά βρίσκονται έξω από μαγνητικό πεδίο.

Παρατήρηση. Σέ άλλο κεφάλαιο θά δοῦμε πῶς ἐρμηνεύονται οί μαγνητικές ιδιότητες τῆς ὕλης.

51. Μαγνητική διαπερατότητα τοῦ κενοῦ

Στό σύστημα MKSA τό κενό έχει ὀρισμένη μαγνητική διαπερατότητα μ_0 . Ή θεωρητική καί ή πειραματική ἔρευνα ἀπέδειξαν ὅτι :

στό σύστημα MKSA ή μαγνητική διαπερατότητα μ_0 τοῦ κενοῦ έχει τήν τιμή :

$$\text{μαγνητική διαπερατότητα τοῦ κενοῦ } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \quad (1)$$

Σχέση μεταξύ τῶν μαγνητικῶν σταθερῶν $K_{\text{μαγν}}$ καί μ_0 . Άποφασίσθηκε (1960) ὅτι στό σύστημα MKSA ή μαγνητική σταθερή $K_{\text{μαγν}}$ θά έχει τήν εξής τιμή :

$$K_{\text{μαγν}} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \quad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) βρίσκουμε ότι οι δύο μαγνητικές σταθερές K_m και μ_0 συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση :

$$\text{μαγνητικές σταθερές} \quad K_{\text{μαγν}} = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \quad (3)$$

Παρατήρηση. Έπομένως ο νόμος του Coulomb σε συνάρτηση με τη μαγνητική διαπερατότητα του κενού μ_0 δίνεται από την εξίσωση :

νόμος του Coulomb
(γιά τó κενό)

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_0/4\pi \text{ σε } \text{N/A}^2 \\ m_1, m_2 \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m} \\ r \text{ σε } \text{m} \\ F \text{ σε } \text{N} \end{array} \right.$$

Μαγνητικό πεδίο της Γῆς

52. Μαγνητική απόκλιση

Έλαφριά μαγνητική βελόνη μπορεί νά στρέφεται πάνω σε οριζόντιο επίπεδο γύρω από κατακόρυφο άξονα. Η βελόνη ισορροπεί σε τέτοια θέση, ώστε ο κατά μήκος άξονάς της έχει διεύθυνση σχεδόν από Βορρά προς Νότο. Τό κατακόρυφο επίπεδο πού περνάει από τόν κατά μήκος άξονα της βελόνης λέγεται *μαγνητικός μεσημβρινός*. Αυτός σχηματίζει με τό γεωγραφικό μεσημβρινό του τόπου μιά γωνία (α) πού λέγεται *μαγνητική απόκλιση* (σχ. 66). Αυτή χαρακτηρίζεται ως *ανατολική* ή *δυτική*, όταν αντίστοιχα ο βόρειος πόλος της βελόνης βρίσκεται ανατολικά ή δυτικά του γεωγραφικού μεσημβρινοῦ. Ώστε :



Σχ. 66. Μαγνητική απόκλιση (α).

Μαγνητική απόκλιση ενός τόπου ονομάζεται η γωνία πού σχηματίζει σ' αυτό τόν τόπο ό μαγνητικός μεσημβρινός με τό γεωγραφικό μεσημβρινό.

53. Μαγνητική ἔγκλιση

Έλαφριά μαγνητική βελόνη μπορεί νά στρέφεται πάνω σε κατακόρυφο επίπεδο γύρω από κατακόρυφο άξονα πού περνάει από τό κέντρο βάρους

της (σχ. 67). Η βελόνη ισορροπεί σε τέτοια θέση, ώστε ο κατά μήκος άξονάς της βρίσκεται πάνω στο επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινού και σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο γωνία (ϵ), που λέγεται *μαγνητική έγκλιση*. Αυτή χαρακτηρίζεται ως *θετική* ή *αρνητική*, όταν αντίστοιχα ο βόρειος πόλος της βελόνης βρίσκεται κάτω ή πάνω από το οριζόντιο επίπεδο. Σ' ολόκληρο τό βόρειο ήμισφαίριο της Γης ή έγκλιση είναι θετική, ενώ στο νότιο ήμισφαίριο είναι αρνητική. "Οστε :

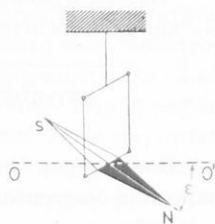
Μαγνητική έγκλιση ενός τόπου ονομάζεται ή γωνία που σχηματίζει σ' αυτό τον τόπο ο κατά μήκος άξονας της μαγνητικής βελόνης με το οριζόντιο επίπεδο, όταν ή βελόνη στρέφεται πάνω στο επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινού γύρω από οριζόντιο άξονα.

Με τή συσκευή που δείχνει τό σχήμα 68 βρίσκουμε εύκολα τήν απόκλιση καί τήν έγκλιση σ' έναν τόπο, όταν ο γωνιομετρικός κύκλος είναι αντίστοιχα οριζόντιος ή κατάκόρυφος.

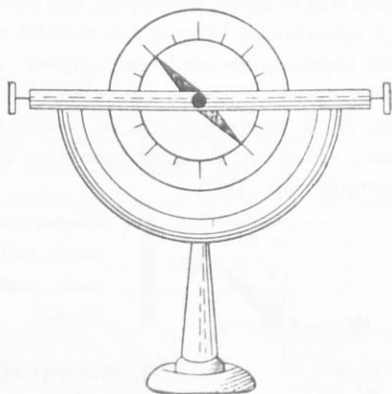
54. Γήινο μαγνητικό πεδίο

Σέ κάθε τόπο ή μαγνητική βελόνη απόκλισεως ισορροπεί έτσι, ώστε ο κατά μήκος άξονάς της νά έχει όρισμένη διεύθυνση. Αυτό τό φαινόμενο δείχνει ότι γύρω από τή Γη υπάρχει μαγνητικό πεδίο, που ονομάζεται **γήινο μαγνητικό πεδίο**. Η διεύθυνση τής μαγνητικής βελόνης έγκλίσεως είναι ή διεύθυνση μιās δυναμικής γραμμής του γήινου μαγνητικού πεδίου. Σέ έναν τόπο οί δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου τής Γης είναι σχεδόν εύθειες παράλληλες, δηλαδή τό μαγνητικό πεδίο είναι όμογενές.

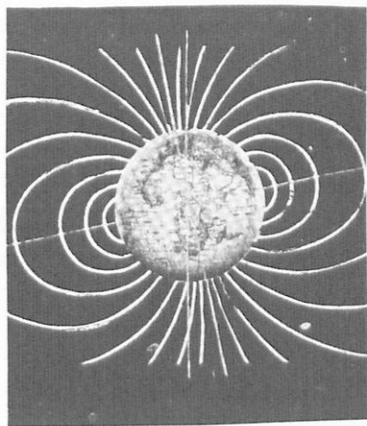
Στόν ίσημερινό ή έγκλιση είναι σχεδόν ίση με μηδέν ($\epsilon = 0^\circ$), καί ή μαγνητική βελόνη έγκλίσεως είναι σχεδόν οριζόντια. "Οσο



Σχ. 67. Μαγνητική έγκλιση (ϵ).



Σχ. 68. Διάταξη για τή μέτρηση τής μαγνητικής έγκλίσεως καί απόκλισεως (ό γωνιομετρικός κύκλος οριζόντιος).

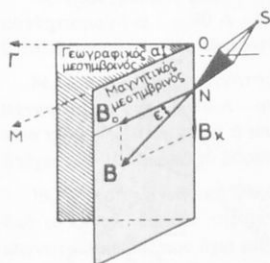


Σχ. 69. Σχηματική παράσταση του γήινου μαγνητικού πεδίου.

ὁμως προχωρούμε πρὸς βορρά ἢ ἔγκλιση συνεχῶς αὐξάνει καὶ σὲ μιά περιοχὴ κοντὰ στὸ βόρειο πόλο τῆς Γῆς ἡ ἔγκλιση γίνεται ἴση μὲ 90° ($\epsilon = 90^\circ$), δηλαδή ἐκεῖ ἡ μαγνητικὴ βελὸν ἔγκλισεως εἶναι κατακόρυφη ἔχοντας τὸ βόρειο πόλο τῆς πρὸς τὰ κάτω. Τὸ ἴδιο συμβαίνει καὶ σὲ μιά περιοχὴ κοντὰ στὸ νότιο πόλο τῆς Γῆς, ἀλλὰ ἐκεῖ ἡ κατακόρυφη βελὸν ἔχει πρὸς τὰ κάτω τὸ νότιο πόλο τῆς. Αὐτὲς οἱ δύο περιοχὲς τῆς Γῆς εἶναι οἱ δύο **μαγνητικοὶ πόλοι** τῆς Γῆς. Οἱ δυναμικὲς γραμμὲς τοῦ γήινου μαγνητικοῦ πεδίου βγαίνουν ἀπὸ τὸ γήινο μαγνητικό πόλο, πού βρίσκεται στὸ νότιο ἡμισφαίριο καὶ ὁ ὅποιος ἀπὸ

μαγνητικὴ ἀποψη εἶναι βόρειος μαγνητικός πόλος. Οἱ δυναμικὲς γραμμὲς διαγράφουν στὸ χῶρο μεγάλες καμπύλες γραμμὲς καὶ καταλήγουν στὸ γήινο μαγνητικό πόλο πού βρίσκεται στὸ βόρειο ἡμισφαίριο (σχ. 69). Ἐτσι ὁ πλανῆτης μας συμπεριφέρεται ὡς **μαγνητικό δίπολο**, πού ὁ ἄξονάς του (**γεωμαγνητικός ἄξονας**) σχηματίζει μὲ τὸ γεωγραφικὸ ἄξονα τῆς Γῆς γωνία περίπου ἴση μὲ 12° .

Τὰ τελευταῖα χρόνια μελετᾶμε τὸ γήινο μαγνητικό πεδίο σὲ μεγάλα ὕψη μὲ ἀεροπλάνα, πυραύλους καὶ τεχνητοὺς δορυφόρους. Δέν ξέρουμε ἀκόμη μὲ ἀκρίβεια σὲ ποιά αἰτία ὀφείλεται τὸ γήινο μαγνητικό πεδίο. Ἡ πιὸ πιθανὴ αἰτία φαίνεται ὅτι εἶναι ἠλεκτρικὰ ρεύματα, πού κυκλοφοροῦν στὸ ἐσωτερικὸ τῆς Γῆς ἢ καὶ στὴν ἀτμόσφαιρα.



Σχ. 70. Οἱ δύο συνιστώσες B_0 καὶ B_k τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς B τοῦ γήινου μαγνητικοῦ πεδίου.

55. Μαγνητικὰ στοιχεῖα ἑνὸς τόπου

Στὸ σχῆμα 70 φαίνονται τὰ ἐπίπεδα τοῦ γεωγραφικοῦ μεσημβρινοῦ (Γ) καὶ τοῦ μαγνητικοῦ μεσημβρινοῦ (M) ἑνὸς τόπου. Σ' αὐτὸ τὸν τόπο ἀντιστοιχεῖ ὀρισμένη **μαγνητικὴ ἀπόκλιση** (α) καὶ ὀρισμένη **μαγνητικὴ ἔγκλιση** (ϵ). Ἡ **μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ** τοῦ γήινου μαγνητικοῦ πεδίου σ' αὐτὸ τὸν τόπο εἶναι τὸ ἄνυσμα \vec{B} , πού ἔχει τὴ διεύθυνση τῆς μαγνητικῆς βελὸνης ἔγκλισεως καὶ ἀναλύεται σὲ δύο συνιστώσες, τὴν **ὀριζόντια συνιστώσα** \vec{B}_0 καὶ τὴν **κατακό-**

ροφη συνιστώσα B_{κ} . Από το σχηματιζόμενο ορθογώνιο τρίγωνο βρίσκουμε ότι η συνιστώσα B_0 έχει μέτρο :

οριζόντια συνιστώσα τής μαγνητικής επαγωγής	$B_0 = B \cdot \sin \epsilon$
--	-------------------------------

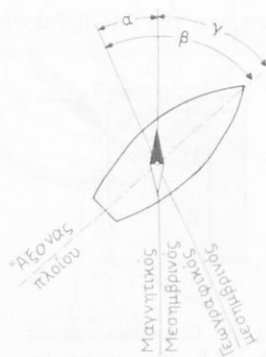
Τά μεγέθη B_0 και ϵ προσδιορίζονται πειραματικά και έτσι βρίσκουμε την τιμή τής μαγνητικής επαγωγής B σε έναν τόπο. Η οριζόντια συνιστώσα B_0 είναι περίπου ίση με $B_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ T. Από τή μελέτη του γήινου μαγνητικού πεδίου συνάγεται ότι :

Τά στοιχεία του γήινου μαγνητικού πεδίου σε έναν τόπο είναι ή μαγνητική απόκλιση (α), ή μαγνητική έγκλιση (ϵ) και ή μαγνητική επαγωγή (B).

Μεταβολές των μαγνητικών στοιχείων ενός τόπου. Τά μαγνητικά στοιχεία ενός τόπου παρουσιάζουν κανονικές ήμερήσιες και ετήσιες μεταβολές. Άλλά πολλές φορές τά μαγνητικά στοιχεία παρουσιάζουν απότομες μεταβολές, που ονομάζονται *μαγνητικές θύελλες* και συνοδεύουν ορισμένα φαινόμενα, όπως είναι οί σεισμοί, τό πολικό σέλας, οί κηλίδες του Ήλιου.

55a. Μαγνητική πυξίδα

Έφαρμογή του γήινου μαγνητικού πεδίου έχουμε στην *πυξίδα*, που τή χρησιμοποιούμε για νά προσανατολιζόμαστε πάνω στο οριζόντιο επίπεδο. Η πυξίδα είναι μαγνητική βελόνη αποκλίσεως και ό κατά μήκος άξονάς της (SN) δείχνει τή διεύθυνση του *μαγνητικού μεσημβρινοῦ*. Αν είναι γνωστή ή μαγνητική απόκλιση (α), τότε εύκολα βρίσκουμε τή διεύθυνση του *γεωγραφικού μεσημβρινοῦ* (σχ. 71). Η ναυτική πυξίδα αποτελείται από σύστημα εὐθύγραμμων μαγνητῶν και πάνω τους είναι στερεωμένος οριζόντιος δίσκος που δείχνει τά σημεῖα του ορίζοντα. Τό σύστημα τῶν εὐθύγραμμων μαγνητῶν ἀντιστοιχεί με ένα μαγνήτη, που στρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα στερεωμένο σε δοχείο. Αυτό είναι στερεωμένο έτσι, ώστε ό άξονας περιστροφής του μαγνήτη νά είναι πάντο-



Σχ. 71. Η χρήση τής πυξίδας στη ναυσιπλοία.

τε κατακόρυφος και να μή ἐπηρεάζεται ἀπό τούς κλυδωνισμούς τοῦ σκάφους. Στό ἐσωτερικό τοῦ δοχείου εἶναι χαραγμένη μικρή εὐθεία (γραμμὴ πίστεως) πού δείχνει τή διεύθυνση τοῦ κατά μήκος ἄξονα τοῦ πλοίου. Ὄταν ὁ πλοίαρχος ξέρει τή μαγνητική ἀπόκλιση α και τή γωνία β πού πρέπει να σχηματίζει ὁ ἄξονας τοῦ πλοίου με τὸ γεωγραφικὸ μεσημβρινό, βρίσκει ἀμέσως τή γωνία γ πού πρέπει να σχηματίζει ὁ ἄξονας τοῦ πλοίου με τὸ μαγνητικὸ μεσημβρινό (σχ. 71).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

70. Ὁ βόρειος πόλος N ἐνός μαγνήτη ἔχει ποσότητα μαγνητισμοῦ $m = 10 \text{ A} \cdot \text{m}$ και ἔλκει τὸ νότιο πόλο S_1 μιᾶς μαγνητικῆς βελόνης με δύναμη $F = 0,01 \text{ N}$, ὅταν ἡ ἀπόσταση αὐτῶν τῶν δύο πόλων εἶναι $r = 1,5 \text{ cm}$. Πόση ποσότητα μαγνητισμοῦ m_1 ἔχει κάθε πόλος τῆς μαγνητικῆς βελόνης;

71. Δύο βόρειοι μαγνητικοὶ πόλοι A και B βρίσκονται μέσα στὸν ἀέρα σὲ ἀπόσταση $r = 10 \text{ cm}$ και ἀπωθόνται με δύναμη $F = 0,204 \text{ N}$. Ἄν καθένας ἀπὸ αὐτοὺς τούς πόλους βρεθεῖ στὴν ἴδια ἀπόσταση r ἀπὸ ἕναν τρίτο βόρειο πόλο Γ, τὸν ἀπῶθει με δύναμη πού ἀντίστοιχα εἶναι F_A και F_B και ἰσχύει ἡ σχέση $F_A = 2F_B$. Πόση εἶναι ἡ ποσότητα μαγνητισμοῦ m_A και m_B τοῦ βόρειου πόλου τῶν δύο μαγνητῶν A και B;

72. Εὐθύγραμμος μαγνήτης ἔχει στὸ βόρειο πόλο του N ποσότητα μαγνητισμοῦ $m = 10 \text{ A} \cdot \text{m}$. α) Πόση εἶναι ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B σὲ ἕνα σημεῖο Γ, πού βρίσκεται σὲ ἀπόσταση $r = 5 \text{ cm}$ ἀπὸ τὸν πόλο N και κατά τὴν προέκταση τοῦ ἄξονα SN τοῦ μαγνήτη; β) Στὸ σημεῖο Γ φέρνουμε τὸ νότιο πόλο S' μιᾶς μαγνητικῆς βελόνης. Πόση πρέπει να εἶναι ἡ ποσότητα μαγνητισμοῦ m' τοῦ πόλου S' , ἂν θέλουμε νὰ ἐνεργεῖ σ' αὐτὸ τὸν πόλο ἔλξη ἔξαιτίας τοῦ πόλου N τοῦ μαγνήτη ἴση με $F = 10^{-4} \text{ N}$;

73. Εὐθύγραμμος μαγνήτης ἔχει μήκος $l = 8 \text{ cm}$ και κάθε πόλος του ἔχει ποσότητα μαγνητισμοῦ $|m| = 40 \text{ A} \cdot \text{m}$. Πόση εἶναι ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B σὲ ἕνα σημεῖο A, πού βρίσκεται πάνω στὴν κάθετο στὴ μέση O τοῦ μαγνήτη και σὲ ἀπόσταση $r = 3 \text{ cm}$ ἀπὸ τὸ O;

74. Εὐθύγραμμος μαγνήτης ἔχει μήκος $l = 20 \text{ cm}$ και κάθε πόλος του ἔχει ποσότητα μαγνητισμοῦ $|m| = 10 \text{ A} \cdot \text{m}$. Με διάμετρο τὸ μήκος l τοῦ μαγνήτη γράφουμε ἡμιπερίφερεια κύκλου. Πόση εἶναι ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B σὲ ἕνα σημεῖο M τῆς περιφέρειας, πού ἀπέχει $r = 10 \text{ cm}$ ἀπὸ τὸ βόρειο πόλο N τοῦ μαγνήτη;

75. Μικρὴ μαγνητικὴ βελόνη ἔχει μαγνητικὴ ροπή $M^* = 0,005 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ και κρέμεται ἀπὸ τὸ κέντρο βάρους τῆς με κατακόρυφο νῆμα. Ἡ βελόνη βρίσκεται μέσα σὲ ὁμογενὲς μαγνητικὸ πεδίο, πού ἔχει μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B και γιὰ νὰ διατηρήσουμε τή μαγνητικὴ βελόνη κάθετη στὶς δυναμικὲς γραμμὲς τοῦ πεδίου, ἐφαρμόζουμε ζεύγος δυνάμεων, πού ἔχει ροπή $M = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{m}$. Πόση εἶναι ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B τοῦ πεδίου;

76. Σὲ ἕναν τόπο ἡ ἔγκλιση εἶναι $\epsilon = +60^\circ$ και ἡ ὀριζὸντια συνιστώσα τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς τοῦ γήινου μαγνητικοῦ πεδίου εἶναι $B_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Πόση εἶναι ἡ κατακόρυφη συνιστώσα B_k και ἡ μαγνητικὴ ἐπαγωγὴ B τοῦ γήινου μαγνητικοῦ πεδίου σ' αὐτὸ τὸν τόπο;

77. Μαγνητική βελόνη έχει μαγνητική ροπή $M^* = 0,1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$ και κρέμεται από το κέντρο βάρους της με κατακόρυφο νήμα. 'Η Έγκλιση ο' αυτό τον τόπο είναι $\epsilon = + 60^\circ$. Πόσο αντίβαρο F πρέπει να εφαρμόσουμε σε απόσταση $a = 2 \text{ cm}$ από το κέντρο βάρους της βελόνης, για να διατηρείται οριζόντια ; 'Οριζόντια συνιστώσα $B_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$.

78. Κυκλικό πλαίσιο έχει ακτίνα $r = 10 \text{ cm}$, έχει $N = 100$ σπείρες και είναι κάθετο στο επίπεδο του μαγνητικού μεσημβρινοῦ. Πόση είναι η μαγνητική ροή που περνάει από το πλαίσιο, αν η οριζόντια συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι $B_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$;

79. 'Ο κάθε πόλος μιάς μικρής μαγνητικής βελόνης απόκλισεως έχει ποσότητα μαγνητισμού $|m| = 5 \text{ A} \cdot \text{m}$. 'Η βελόνη έχει μήκος $l = 10 \text{ cm}$ και η οριζόντια συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι $B_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Πόσο έργο ξοδεύουμε, όταν απομακρύνουμε τη βελόνη κατά 60° από τη θέση της ισορροπίας της ;

80. Εὐθύγραμμος μαγνήτης NS έχει μήκος $l = 20 \text{ cm}$ και στηρίζεται κατακόρυφα πάνω σε οριζόντιο επίπεδο με το βόρειο πόλο του N. Μέ μιά μικρή μαγνητική βελόνη απόκλισεως βρίσκουμε ότι σε ένα σημείο A του οριζόντιου επιπέδου δέν υπάρχει οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Τό σημείο A απέχει 15 cm από τό σημείο στηρίξεως N. 'Η οριζόντια συνιστώσα της μαγνητικής επαγωγής του γήινου μαγνητικού πεδίου είναι $B_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Πόση είναι η μαγνητική ροπή του μαγνήτη ;

81. Σέ ένα σημείο A πού απέχει $r = 10 \text{ cm}$ από ένα βόρειο πόλο N ή μαγνητική επαγωγή έχει μέτρο $B = 0,14 \text{ T}$. 1) Πόση είναι η ποσότητα μαγνητισμού m του πόλου N ; 2) Πόση πρέπει να είναι η ποσότητα μαγνητισμού m_1 του πόλου N, αν θέλουμε στο σημείο A η μαγνητική επαγωγή να έχει μέτρο ίσο με $B_1 = 0,28 \text{ T}$;

82. 'Η μαγνητική επαγωγή ενός ομογενούς μαγνητικού πεδίου έχει μέτρο $B = 0,5 \text{ T}$. Μέσα στο μαγνητικό πεδίο υπάρχει μιά επιφάνεια πού έχει έμβαδό $S = 20 \text{ cm}^2$. Πόση είναι η μαγνητική ροή Φ πού περνάει από αυτή την επιφάνεια, όταν η κάθετος στην επιφάνεια σχηματίζει με τη διεύθυνση των δυναμικών γραμμών γωνία α ίση με $0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$;

83. 'Ένας εὐθύγραμμος μαγνήτης NS έχει μήκος $l = 15 \text{ cm}$ και κάθε πόλος του έχει ποσότητα μαγνητισμού $m = 6 \text{ A} \cdot \text{m}$. 'Ένα σημείο A απέχει $r = 10 \text{ cm}$ από κάθε πόλο του μαγνήτη. Νά προσδιοριστεί η μαγνητική επαγωγή του μαγνητικού πεδίου στο σημείο A και πόση πρέπει να είναι η ποσότητα μαγνητισμού m_1 ενός βόρειου πόλου, πού, όταν βρίσκεται στο σημείο A, να ενεργεί πάνω του δύναμη πού έχει μέτρο $F = 18 \cdot 10^{-4} \text{ N}$.

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

56. Μαγνητικό πεδίο του ρεύματος

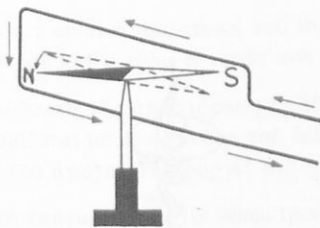
Ξέρουμε ότι τό ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί γύρω του *μαγνητικό πεδίο*, πού εκτρέπει τή μαγνητική βελόνη από τή θέση τής ισορροπίας της. Ή φορά κατά τήν όποία εκτρέπεται ό βόρειος πόλος τής μαγνητικής βελόνης εξαρτᾶται από τή φορά τοῦ ρεύματος. Ὡς φορά τοῦ ρεύματος παίρνομε τή συμβατική φορά. Τό πείραμα δείχνει ότι ἡ ἔκτροπή τής μαγνητικής βελόνης γίνεται σύμφωνα μέ τόν ἐξῆς *εμπειρικό κανόνα* τής δεξιᾶς παλάμης:



Σχ. 72. Σχέση μεταξύ τής φοράς τοῦ ρεύματος καί τής ἔκτροπής τής μαγνητικής βελόνης.

Ἄν φέρουμε τή δεξιᾶ παλάμη μας πάνω από τόν ἄγωγό ἔτσι, ὥστε ἡ ἐπιφάνεια τής παλάμης νά βλέπει τόν ἄγωγό καί τό ρεύμα νά μπαινει από τόν καρπό καί νά βγαίνει από τά δάχτυλα, τότε ό βόρειος πόλος τής βελόνης εκτρέπεται πρὸς τή διεύθυνση τοῦ ἀντίχειρα (σχ. 72). Ἡ ἔκτροπή τής μαγνητικής βελόνης αὐξάνει μέ τήν ἔνταση τοῦ ρεύματος. Ὄταν ἡ μαγνητική βελόνη εκτρέπεται ἀπό τήν ἀρχική θέση ισορροπίας της, τότε ισορροπεῖ σέ μιά νέα θέση μέ τήν ἐπίδραση δύο μαγνητικῶν πεδίων, τοῦ γῆινου μαγνητικοῦ πεδίου καί τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ ρεύματος.

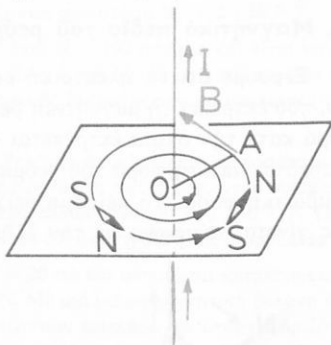
Γιά νά ἔχουμε αἰσθητή ἔκτροπή τής μαγνητικής βελόνης καί ἀπό ἕνα ἀσθενές ρεύμα, βάζομε γύρω ἀπό τή βελόνη ἕνα κατακόρυφο πλαίσιο, πού τό ἐπίπεδό του βρίσκεται πάνω στό ἐπίπεδο τοῦ μαγνητικοῦ μεσημβρινοῦ (σχ. 73). Ὄταν τό πλαίσιο διαρρέεται ἀπό ρεύμα, τότε κάθε τμήμα τοῦ πλαισίου προκαλεῖ ἔκτροπή τής μαγνητικής βελόνης κατά τήν ἴδια φορά. Σ' αὐτή τή διάταξη στηρίζεται ἡ λειτουργία πολλῶν ὀργάνων πού χρησιμοποιοῦμε γιά μετρήσεις (ὄπως π.χ. εἶναι τά ἀμπερόμετρα καί τά βολτόμετρα).



Σχ. 73. Ἡ ἔκτροπή τής μαγνητικής βελόνης εἶναι μεγαλύτερη.

57. Μαγνητικό πεδίο εϋθύγραμμου ρευματοφόρου άγωγού

Ένας μακρός κατακόρυφος άγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασεως I και περνάει από ένα όριζόντιο χαρτόνι (σχ. 74). Ρίχνουμε πάνω στο χαρτόνι ρινίσματα σιδήρου καί χτυπάμε ελαφρά τό χαρτόνι. Τότε πάνω στο χαρτόνι σχηματίζεται ένα μαγνητικό φάσμα, πού οί δυναμικές γραμμές του είναι όμόκεντροι κύκλοι· τά επίπεδα των κύκλων είναι κάθετα στον άγωγό (σχ. 75). Κατά μήκος μιās δυναμικής γραμμής μετακινούμε μιá μικρή μαγνητική βελόνη. Παρατηρούμε ότι σέ κάθε θέση ισορροπίας τής βελόνης, αϋτή έχει τή διεύθυνση τής έφαπτομένης τής δυναμικής γραμμής σ' αϋτό τό σημείο τής.



Σχ. 74. Μαγνητικό πεδίο γύρω από εϋθύγραμμο ρευματοφόρο άγωγό.

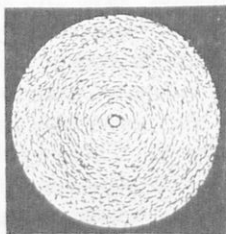
Η φορά των δυναμικών γραμμών είναι ή φορά κατά τήν όποία στρέφεται δεξιόστροφος κοχλίας, γιά νά προχωρήσει κατά τή φορά του ρεύματος (σχ. 76). Σέ κάθε σημείο τής δυναμικής γραμμής ή μαγνητική έπαγωγή B έχει τή διεύθυνση τής έφαπτομένης τής δυναμικής γραμμής σ' αϋτό τό σημείο (σχ. 74). Θεωρητικά καί πειραματικά άποδεικνύεται ότι :

Η μαγνητική έπαγωγή (B) του μαγνητικού πεδίου ενός εϋθύγραμμου ρευματοφόρου άγωγού, μέ μεγάλο μήκος, σέ άπόσταση r από τον άγωγό, είναι άνάλογη μέ τήν ένταση (I) του ρεύματος καί άντιστρόφως άνάλογη μέ τήν άπόσταση (r) του θεωρούμενου σημείου από τον άγωγό.

μαγνητική έπαγωγή
(εϋθύγραμμος άγωγός)

$$B = K_{\mu} \cdot \frac{2I}{r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, r \text{ σε m} \\ I \text{ σε A, } B \text{ σε T} \end{array} \right.$$



Σχ. 75. Μαγνητικό φάσμα εϋθύγραμμου ρευματοφόρου άγωγού.



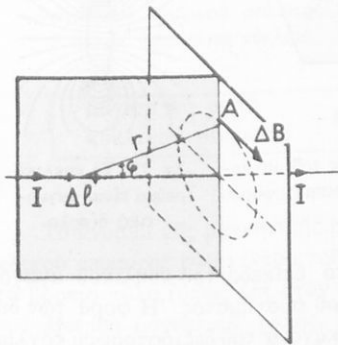
Σχ. 76. Φορά των δυναμικών γραμμών.

Παρατήρηση. "Αν ο ρευματοφόρος άγωγός αποτελείται από n εϋθύγραμμα σύρματα, πού τό καθένα διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I , τότε σέ απόσταση r από τή δέσμη τών συρμάτων ή μαγνητική έπαγωγή είναι :

$$B = K_{\mu} \cdot \frac{2I}{r} \cdot n$$

58. Νόμος Biot - Savart

Μακρός εϋθύγραμμος άγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I (σχ. 77). "Ένα στοιχειώδες τμήμα Δl του άγωγού δημιουργεί σέ ένα σημείο A του πεδίου μία στοιχειώδη μαγνητική έπαγωγή ΔB , πού προσδιορίζεται από τόν έξής νόμο Biot - Savart :



Σχ. 77. Νόμος Biot - Savart.

Η μαγνητική έπαγωγή ($\vec{\Delta B}$), πού δημιουργεί ένα στοιχειώδες τμήμα (Δl) εϋθύγραμμου ρευματοφόρου άγωγού σέ ένα σημείο του μαγνητικού πεδίου, είναι κάθετη στό επίπεδο πού περνάει από αυτό τό σημείο και από τό στοιχειώδες τμήμα του άγωγού· τό μέτρο (ΔB) τής μαγνητικής έπαγωγής στό θεωρούμενο σημείο δίνεται από τήν έξίσωση :

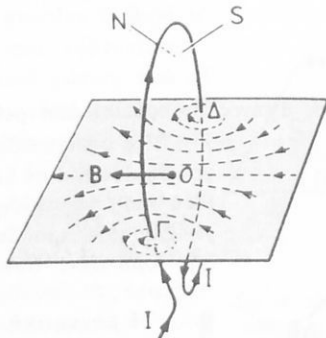
νόμος Biot - Savart $\Delta B = K_{\mu} \cdot \frac{I \cdot \Delta l}{r^2} \cdot \eta \mu \varphi$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2 \\ I \text{ σε A,} \\ \Delta l, r \text{ σε m} \\ \Delta B \text{ σε T} \end{array} \right. \quad (1)$$

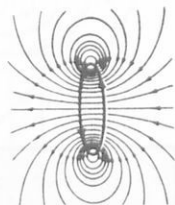
όπου r είναι ή απόσταση του σημείου A από τό στοιχειώδες τμήμα Δl του άγωγού και φ είναι ή γωνία πού σχηματίζει τό στοιχειώδες τμήμα Δl μέ τή διεύθυνση τής αποστάσεως r . Η φορά τής μαγνητικής έπαγωγής $\vec{\Delta B}$ προσδιορίζεται μέ τόν κανόνα του δεξιόστροφου κοχλίου. Κάθε στοιχειώδες τμήμα του άγωγού δημιουργεί στό σημείο A του πεδίου μία στοιχειώδη μαγνητική έπαγωγή $\vec{\Delta B}$. Τό γεωμετρικό άθροισμα όλων αυτών τών στοιχειωδών μαγνητικών έπαγωγών είναι ή όλική μαγνητική έπαγωγή \vec{B} στό σημείο A και όφείλεται σέ όλόκληρο τόν άγωγό.

59. Μαγνητικό πεδίο κυκλικού ρευματοφόρου άγωγού

Κατακόρυφος κυκλικός άγωγος διαρρέεται από ρεύμα έντασεως I . Πάνω σε ένα οριζόντιο χαρτόνι, που περνάει από τό κέντρο O του κυκλικού άγωγού, σχηματίζουμε τό μαγνητικό φάσμα (σχ. 78). Παρατηρούμε ότι κοντά στα σημεία Γ και Δ οι δυναμικές γραμμές είναι όμοκεντροι κύκλοι. Όσο απομακρυνόμαστε από τά σημεία Γ και Δ ή άκτίνα καμπυλότητας των δυναμικών γραμμών μεγαλώνει και μία δυναμική γραμμή είναι εύθεια κάθετη στό επίπεδο του κυκλικού άγωγού και ταυτίζεται μέ τόν άξονα συμμετρίας του συστήματος. Η φορά των δυναμικών γραμμών προσδιορίζεται μέ τόν κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία.



Σχ. 78. Δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου κυκλικού ρευματοφόρου άγωγού.



Σχ. 79. Τό κυκλικό ρεύμα είναι μαγνητικό δίπολο.

Τό μαγνητικό φάσμα του κυκλικού ρεύματος είναι άνάλογο μέ τό μαγνητικό φάσμα ενός μικρού εύθύγραμμου μαγνήτη (σχ. 79). Οι δυναμικές γραμμές βγαίνουν από τή μία όψη του επιπέδου του κύκλου (βόρειος μαγνητικός πόλος) και μπαίνουν από τήν άλλη όψη του επιπέδου (νότιος μαγνητικός πόλος). Όστε τό κυκλικό ρεύμα άποτελεί ένα μαγνητικό δίπολο και παρουσιάζει δύο έτερόνυμους μαγνητικούς πόλους. Θεωρητικά και πειραματικά άποδεικνύεται ότι:

Η μαγνητική έπαγωγή (B) του μαγνητικού πεδίου κυκλικού ρευματοφόρου άγωγού στό κέντρο του κύκλου είναι κάθετη στό επίπεδο του κυκλικού άγωγού, είναι άνάλογη μέ τήν ένταση (I) του ρεύματος και αντίστροφως άνάλογη μέ τήν άκτίνα (r) του κύκλου.

μαγνητική έπαγωγή
(κυκλικός άγωγός)

$$B = K_{\mu} \cdot \frac{2\pi I}{r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, r \text{ σε m} \\ I \text{ σε A} \\ B \text{ σε T} \end{array} \right. \quad (1)$$

Παρατήρηση. Αν n σπείρες που έχουν τήν ίδια άκτίνα r σχηματίζουν

επίπεδο κυκλικό πλαίσιο που διαρρέεται από ρεύμα έντασεως I , τότε η μαγνητική επαγωγή στο κέντρο του κυκλικού πλαισίου είναι :

$$B = K_{\mu} \cdot \frac{2\pi I}{r} \cdot n$$



Σχ. 80. Μαγνητική ροπή (M^*) μαγνήτη και κυκλικού ρεύματος (S έμβαδό επιφάνειας κύκλου).

α. Μαγνητική ροπή κυκλικού ρεύματος. Ένα κυκλικό ρεύμα αποτελεί μαγνητικό δίπολο και έχει *μαγνητική ροπή* (σχ. 80). Αν S είναι το έμβαδό του κύκλου και I ή ένταση του ρεύματος, τότε στο σύστημα MKSA ή *μαγνητική ροπή* (M^*) του κυκλικού ρεύματος δίνεται από την εξίσωση :

μαγνητική ροπή κυκλικού ρεύματος	$M^* = I \cdot S$	$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ σε A, } S \text{ σε m}^2 \\ M^* \text{ σε A} \cdot \text{m}^2 \end{array} \right. \quad (2)$
-------------------------------------	-------------------	---

Τό άνυσμα της μαγνητικής ροπής \vec{M}^* είναι κάθετο στο επίπεδο του κυκλικού ρεύματος στο κέντρο του κύκλου και έχει φορά από τό νότιο προς τό βόρειο πόλο (όπως και στον εϋθύγραμμο μαγνήτη).

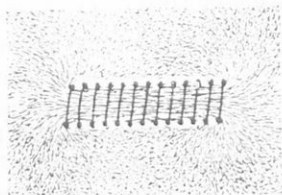
Μονάδα μαγνητικής ροπής. Στο σύστημα MKSA ή μονάδα μαγνητικής ροπής ορίζεται από την εξίσωση (2) ως εξής :

Μονάδα μαγνητικής ροπής είναι ή μαγνητική ροπή κυκλικού ρεύματος που έχει ένταση 1 Ampère και έμβαδό 1 m².

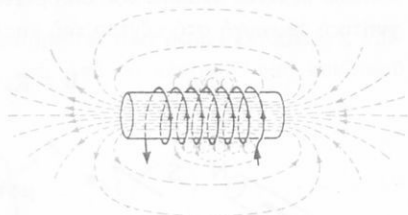
μονάδα μαγνητικής ροπής	$1 \text{ Ampère} \cdot 1 \text{ m}^2 \quad \text{ή} \quad 1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
-------------------------	--

60. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς

Όνομάζουμε *σωληνοειδές* ένα σύστημα από παράλληλα κυκλικά ρεύματα, που τά κέντρα τους βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία. Τέτοιο σύστημα κυκλικών ρευμάτων παίρνουμε, αν πάνω σε γυάλινο ή ξύλινο κύλινδρο τυλίξουμε σύρμα. Πάνω σε οριζόντιο χαρτόνι, που περνάει από τόν άξονα του σωληνοειδούς, σχηματίζουμε τό μαγνητικό φάσμα (σχ. 81). Παρατηρούμε ότι αυτό τό φάσμα είναι όμοιο μέ τό μαγνητικό φάσμα ενός *εϋθύγραμμου μαγνήτη* (σχ. 82). Μέ μιά μικρή μαγνητική βελόνη εύκολα διαπιστώνουμε ότι οί δύο άκρες του σωληνοειδούς αποτελούν δύο *ετερώνημους μαγνητικούς πόλους*. Στο έσωτερικό του σωληνοειδούς οί δυναμικές γραμμές



Σχ. 81. Μαγνητικό φάσμα σωληνοειδούς.



Σχ. 82. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδούς.

είναι *παράλληλες*. Το μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς προκύπτει από την πρόσθεση του μαγνητικού πεδίου που παράγεται από κάθε σπείρα του σωληνοειδούς. Η φορά των δυναμικών γραμμών βρίσκεται με τον εξής εμπειρικό κανόνα: "Όταν κατά μήκος του άξονα του σωληνοειδούς τοποθετήσουμε κοχλίας και τον στρέψουμε κατά τη φορά του ρεύματος μέσα στις σπείρες, τότε ο κοχλίας προχωρεί κατά τη φορά των δυναμικών γραμμών. Θεωρούμε ότι το μήκος του σωληνοειδούς είναι πολύ μεγάλο σχετικά με τη διάμετρο των σπειρών. Για ένα τέτοιο σωληνοειδές αποδεικνύεται ότι:

Στό έσωτερικό του σωληνοειδούς το μαγνητικό πεδίο είναι *όμογενές*, ή μαγνητική επαγωγή (B) έχει διεύθυνση *παράλληλη* με τον άξονα του σωληνοειδούς και είναι *ανάλογη* με την ένταση (I) του ρεύματος και με τον αριθμό (n) των σπειρών κατά μέτρο μήκους.

μαγνητική επαγωγή
(σωληνοειδές)

$$B = K_{\mu} \cdot 4\pi \cdot n \cdot I$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2 \\ n \text{ σπείρες/m} \\ I \text{ σε A, } B \text{ σε T} \end{array} \right.$$

Παρατήρηση. Αν το σωληνοειδές έχει συνολικά N σπείρες και μήκος l , τότε είναι $n = N/l$.

61. Προέλευση των μαγνητικών πεδίων

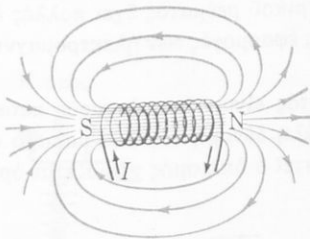
Όταν ένας άγωγός διαρρέεται από ρεύμα, τότε γύρω από τον άγωγό δημιουργείται πάντοτε *μαγνητικό πεδίο*. Αυτό το φαινόμενο είναι γενικό και μπορούμε να πούμε ότι *όλα τα μαγνητικά πεδία οφείλονται σε κινούμενα ηλεκτρικά φορτία*. Ένα κυκλικό ρεύμα αποτελεί μαγνητικό δίπολο, που έχει ορισμένη μαγνητική ροπή. Στο άτομο υδρογόνου ή κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα ισοδυναμεί με κυκλικό ρεύμα, δηλαδή δημιουργεί ένα στοιχειώδες μαγνητικό δίπολο. Γενικά η κίνηση των ήλε-

κτρονίων μέσα στο άτομο δημιουργεί στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα. Σε ένα μαγνήτη (μόνιμο ή προσωρινό) τά στοιχειώδη κυκλικά ρεύματα προσανατολίζονται έτσι, ώστε να αποτελέσουν ένα σωληνοειδές που έχει δύο έτερώνυμους μαγνητικούς πόλους. Ωστε μπορούμε να διατυπώσουμε το ακόλουθο γενικό συμπέρασμα :

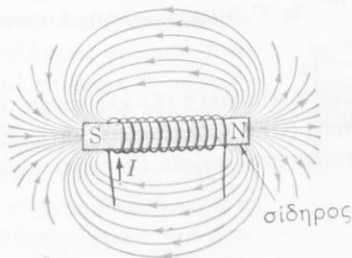
Οί μαγνητικές ιδιότητες της ύλης οφείλονται στα στοιχειώδη μαγνητικά δίπολα που δημιουργεί ή κίνηση των ήλεκτρονίων γύρω από τους πυρήνες των ατόμων.

62. Ήλεκτρομαγνήτης

Στό έσωτερικό ενός σωληνοειδούς, που διαρρέεται από ρεύμα, σχηματίζεται όμογενές μαγνητικό πεδίο (σχ. 83). Αν μέσα στό σωληνοειδές



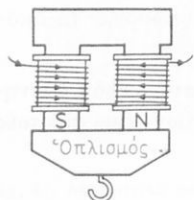
Σχ. 83. Σωληνοειδές χωρίς πυρήνα μαλακού σιδήρου.



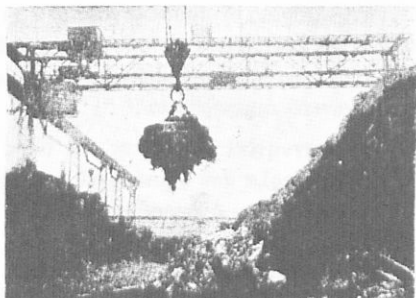
Σχ. 84. Ήλεκτρομαγνήτης.

βάλουμε μία ράβδο από μαλακό σίδηρο, τότε ή ράβδος γίνεται μαγνήτης και κάθε πόλος του συμπίπτει μέ τόν όμώνυμο πόλο του σωληνοειδούς (σχ. 84). Τό σύστημα που αποτελούν τό σωληνοειδές και ή ράβδος του μαλακού σιδήρου, ονομάζεται ήλεκτρομαγνήτης. Ή μαγνήτιση του μαλακού σιδήρου είναι προσωρινή και διαρκεί όσο χρόνο τό σωληνοειδές διαρρέεται από τό ρεύμα. Αν μέσα στό σωληνοειδές βάλουμε ράβδο από χάλυβα, ή ράβδος μεταβάλλεται σε μόνιμο μαγνήτη.

Τό σωληνοειδές έχει η σπείρες κατά μέτρο και διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως I . Όταν στό έσωτερικό του σωληνοειδούς υπάρχει αέρας, τότε ή μαγνητική έπαγωγή είναι B_0 . Αν μέσα στό σωληνοειδές βάλουμε μία ράβδο από μαλακό σίδηρο, που έχει μαγνητική διαπερατότητα μ , τότε στό έσωτερικό του σωληνοειδούς ή μαγνητική έπαγωγή γίνεται $B = \mu \cdot B_0$, δηλαδή γίνεται πολύ μεγαλύτερη.



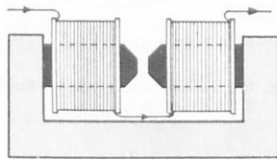
Σχ. 85. Ήλεκτρομαγνήτης με τον όπλισμό του.



Σχ. 86. Ήλεκτρομαγνητικός γερανός (άνύψωση αντικειμένων από σίδηρο).

Ήφαρμογές των ήλεκτρομαγνητών. Ή παροδική μαγνήτιση του μαλακού σιδήρου με την επίδραση του ήλεκτρικού ρεύματος έχει πολλές ήφαρμογές. Ή αναφέρουμε μερικές συνηθισμένες ήφαρμογές των ήλεκτρομαγνητών.

* **α. Ήλεκτρομαγνητικός γερανός.** Αυτός είναι ένας ισχυρός πεταλοειδής ήλεκτρομαγνήτης, πού ήλκει με μεγάλη δύναμη τον από μαλακό σίδηρο όπλισμό του (σχ. 85). Για νά αποσπαστεί ο όπλισμός χρειάζεται ορισμένη δύναμη, πού λέγεται *φέρουσα δύναμη* του ήλεκτρομαγνήτη και σέ μερικούς γερανούς είναι πολύ μεγάλη. Ήταν θέλουμε νά ανυψώσουμε αντικείμενα από σίδηρο, τότε αυτά αποτελούν τον όπλισμό του ήλεκτρομαγνήτη (σχ. 86). Στά ήργαστήρια χρησιμοποιούμε ήλεκτρομαγνήτες πού δημιουργούν ισχυρό όμογε- νές μαγνητικό πεδίο (σχ. 87).



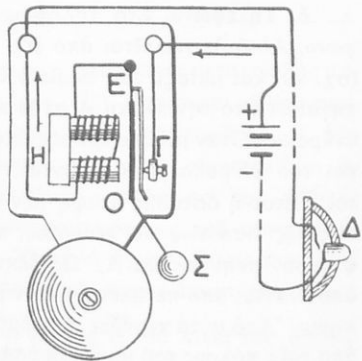
Σχ. 87. Ήλεκτρομαγνήτης ήργαστηρίου.

* **β. Ήλεκτρικό κουδούνι.** Πιέζοντας τό διακόπτη (Δ) κλείνουμε τό κύκλωμα (σχ. 88) και ο εύκίνητος όπλισμός (Ο) του ήλεκτρομαγνήτη (Η) ήλκεται. Ήλλά τότε τό κύκλωμα διακόπτεται (στό σημείο Γ), ο όπλισμός γυ-

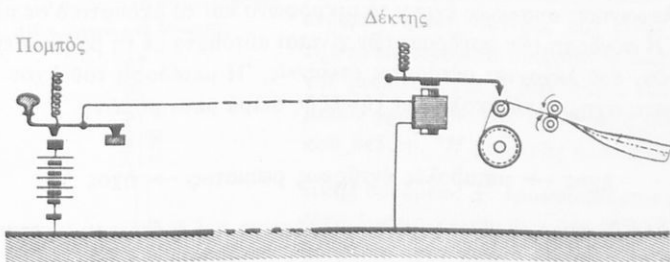
* Οί παράγραφοι πού φέρουν άστερίσκο δέν είναι ύποχρεωτικό νά διδαχτούν.

ρίξει στή θέση του και τό κύκλωμα πάλι κλείνει. Ό όπλισμός άμέσως έλκεται κ.ο.κ. Σέ κάθε έλξη του όπλισμού αντίστοιχεί ένα χτύπημα της σφαιράς Σ πάνω στό κουδούνι. Ή αυτόματη διακοπή και άποκατάσταση του ρεύματος γίνεται πολλές φορές στό δευτερόλεπτο.

* γ. Μορσικός τηλεγράφος. Ή λειτουργία του στηρίζεται στην έξής άρχή: Μέ κατάλληλο διακόπτη (πομπός) αφήνουμε νά φύγουν από τόν έναν τόπο ρεύματα μικρής ή μεγαλύτερης διάρκειας. Αυτά τά ρεύματα φτάνουν στό δέκτη, πού υπάρχει στόν άλλο τόπο, και περνούν από ήλεκτρομαγνήτη πού είναι έφοδιασμένος μέ πολύ εύκίνητο όπλισμό (σχ. 89). Όταν ό όπλισμός έλκεται,

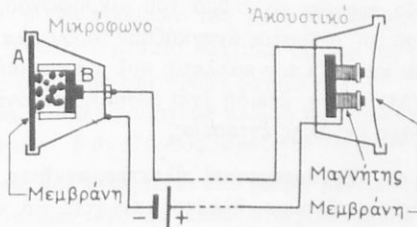


Σχ. 88. Ήλεκτρικό κουδούνι.



Σχ. 89. Άρχή του μορσικού τηλεγράφου.

ή μία άκρη του γράφει πάνω σέ ταινία από χαρτί μικρές ή μεγαλύτερες γραμμές, ανάλογα μέ τή διάρκεια του ρεύματος πού πέρασε από τόν ήλεκτρομαγνήτη. Ή ταινία ξετυλίγεται όμαλά. Μέ τά μορσικά σήματα είναι δυνατή ή μεταβίβαση λέξεων και αριθμών. Σήμερα στην τηλεγραφία χρησιμοποιούμε πολύ πιό τελειοποιημένα συστήματα.



Σχ. 90. Σχηματική παράσταση της άρχής του τηλεφώνου.

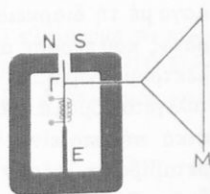
* **δ. Τηλέφωνο.** Στό τηλέφωνο ὡς πομπός χρησιμοποιεῖται τό *μικρόφωνο*. Αὐτό ἀποτελεῖται ἀπό δύο μονωμένες πλάκες Α καί Β ἀπό ἄνθρακα (σχ. 90) καί μεταξύ τῶν πλακῶν ὑπάρχουν κόκκοι ἀπό ἄνθρακα. Τό ρεῦμα πηγαίνει ἀπό τήν πλάκα Α στήν πλάκα Β περνώντας ἀπό τοὺς κόκκους τοῦ ἄνθρακα. Ὅταν μιλάμε ἐμπρός ἀπό τήν πλάκα Α, αὐτή πάλλεται καί οἱ κόκκοι τοῦ ἄνθρακα μετακινοῦνται. Τότε *ἀλλάζει ἡ ἀντίσταση* τοῦ κυκλώματος. Ἔτσι ἡ ἀσταθής ἐπαφή τῶν κόκκων τοῦ ἄνθρακα προκαλεῖ *διακυμάνσεις τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος*, πού ἀντιστοιχοῦν στοὺς ἤχους οἱ ὅποιοι φτάνουν στήν πλάκα Α. Ὡς δέκτης χρησιμοποιεῖται τό *ἀκουστικό*. Αὐτό ἀποτελεῖται ἀπό πεταλοειδή μόνιμο μαγνήτη πού ἔχει στίς ἄκρες του δύο πηνία. Ἀπό αὐτά περνάει τό ρεῦμα πού ἔρχεται ἀπό τό μικρόφωνο. Ἐμπρός ἀπό τοὺς πόλους τοῦ μαγνήτη ὑπάρχει μιά λεπτή πλάκα ἀπό μαλακό σίδηρο, ἡ ὁποία μπορεῖ νά πάλλεται. Οἱ διακυμάνσεις τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος προκαλοῦν ἀντίστοιχες μεταβολές τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου τοῦ μαγνήτη. Ἔτσι οἱ δυνάμεις πού ἐξασκεῖ ὁ μαγνήτης στήν πλάκα τοῦ μαλακοῦ σιδήρου μεταβάλλονται καί ἡ πλάκα ἀναγκάζεται νά πάλλεται. Μέ αὐτό τόν τρόπο ἡ πλάκα τοῦ ἀκουστικοῦ ἀναπαράγει τοὺς ἤχους πού φτάνουν στό μικρόφωνο. Οἱ τηλεφωνικές συσκευές ἔχουν τό μικρόφωνο καί τό ἀκουστικό σέ μιά διάταξη. Ἡ σύνδεση τῶν συνδρομητῶν γίνεται αὐτόματα μέ τή βοήθεια εἰδικῶν μηχανῶν, πού λέγονται *αὐτόματοι ἐπιλογεῖς*. Ἡ μετάδοση τοῦ ἤχου μέ τό τηλέφωνο σχηματικά ἀκολουθεῖ τήν ἐξῆς σειρά μετατροπῶν:

ἤχος → μεταβολές ἐντάσεως ρεύματος → ἤχος

Ἡ πρώτη μετατροπή γίνεται μέ τό μικρόφωνο καί ἡ δεύτερη γίνεται μέ τό ἀκουστικό.

* **ε. Ἡλεκτρομαγνητικό μεγάφωνο.** Αὐτό ἀποτελεῖται ἀπό ἰσχυρό ἠλεκτρομαγνήτη πού ἔχει μεταξύ τῶν πόλων του εὐκίνητο ἔλασμα Γ ἀπό μαλακό σίδηρο (σχ. 91). Γύρω ἀπό τή βάση τοῦ ἐλάσματος Γ ὑπάρχει πηνίο, ἀπό τό ὁποῖο περνάει τό ρεῦμα τοῦ μικροφώνου. Οἱ διακυμάνσεις τῆς ἐντάσεως αὐτοῦ τοῦ ρεύματος ἀναγκάζουν τό ἔλασμα Γ νά πάλλεται καί μαζί του πάλλεται καί μιά κωνική μεμβράνη (Μ). Αὐτή, ἐπειδή ἔχει μεγάλη ἐπιφάνεια, παράγει ἤχο μεγάλης ἐντάσεως.

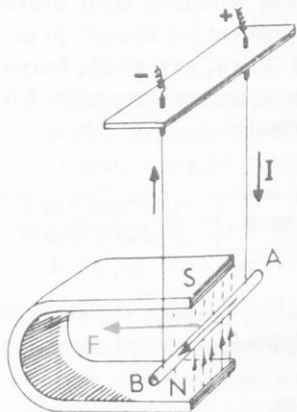
* **στ. Ἐργαστηριακοὶ ἠλεκτρομαγνήτες.** Στά ἐργαστήρια ἔχουμε ἠλεκτρομαγνήτες γιά πειραματικές ἐρευνες ἢ γιά τή λειτουργία ὀρισμένων διατάξεων πού χρησιμοποιοῦμε σήμερα στήν Πυρηνική Φυσική (*ἐπιταχυντές* ἠλεκτρισμένων σωματιδίων).



Σχ. 91. Ἡλεκτρομαγνητικό μεγάφωνο

63. Επίδραση μαγνητικού πεδίου σέ ρεύμα

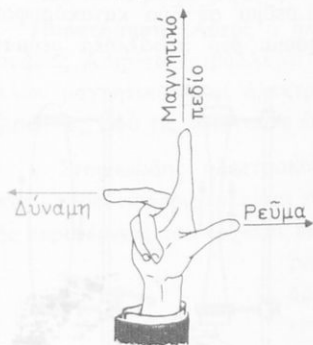
Μέσα στό *όμογενές μαγνητικό πεδίο* πού σχηματίζει ένας πεταλοειδής μαγνήτης (σχ. 92) φέρνουμε ευθύγραμμο άγωγό, πού είναι στερεωμένος σέ δύο κατακόρυφα εύκαμπτα σύρματα έτσι, ώστε νά είναι *όριζόντιος* καί *κάθετος* στις δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου. Όταν ο άγωγός διαρρέεται από ρεύμα, τότε στόν άγωγό αναπτύσσεται μιά



Σχ. 92. Τό μαγνητικό πεδίο έξασκει στόν άγωγό μιά δύναμη.

όριζόντια δύναμη \vec{F} πού κινεί τόν άγωγό. Αν αντιστραφεί ή φορά του ρεύματός ή ή φορά του μαγνητικού πεδίου, τότε αντιστρέφεται καί ή φορά της δύναμης \vec{F} .

Αυτή ή δύναμη \vec{F} πού αναπτύσσεται στόν άγωγό ονομάζεται *δύναμη Laplace* ή *ηλεκτρομαγνητική δύναμη* καί είναι *κάθετη* στό επίπεδο πού όρίζουν ή διεύθυνση του *ρεύματος* καί ή διεύθυνση των *δυναμικών γραμμών* του όμογενούς μαγνητικού πεδίου. Η *φορά* της ηλεκτρομαγνη-



Σχ. 93. Πώς βρίσκουμε τή φορά της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης \vec{F} .

Τότε τό μεσαίο δάχτυλο δείχνει τή *φορά* της *ηλεκτρομαγνητικής δύναμης* (κανόνας των τριών δαχτύλων).

Από τή μελέτη της επίδρασεως του μαγνητικού πεδίου πάνω σέ άγωγό πού διαρρέεται από ρεύμα συνάγεται ο ακόλουθος νόμος του Laplace:

I. Όταν ευθύγραμμος άγωγός πού διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται μέσα σέ *όμογενές μαγνητικό πεδίο*, τότε σέ κάθε στοιχειώδες τμήμα (Δl) του άγωγού αναπτύσσεται *ηλεκτρομαγνητική δύναμη*, ή όποία εφαρμόζεται στή μέση του άγωγού, είναι *κάθετη* στό επίπεδο πού όρίζεται από τόν άγωγό καί τή διεύθυνση των *δυναμικών γραμμών*

καί ἔχει φορά πού προσδιορίζεται μέ τόν κανόνα τῶν τριῶν δαχτύλων.

II. Τό μέτρο (F) τῆς ἠλεκτρομαγνητικῆς δυνάμεως εἶναι ἀνάλογο :
 α) μέ τό μήκος (Δl) τοῦ στοιχειώδους τμήματος τοῦ ἄγωγου, β) μέ τήν ἔνταση (I) τοῦ ρεύματος, γ) μέ τό μέτρο (B) τῆς μαγνητικῆς ἐπαγωγῆς τοῦ πεδίου καί δ) μέ τό ἡμίτονο τῆς γωνίας (φ) πού σχηματίζει ὁ ἄγωγός μέ τή διεύθυνση τῶν δυναμικῶν γραμμῶν.

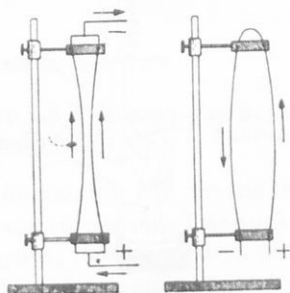
$$\text{νόμος τοῦ Laplace } F = \Delta l \cdot I \cdot B \cdot \eta \mu \varphi$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta l \text{ σέ m, } I \text{ σέ A} \\ B \text{ σέ T, } F \text{ σέ N} \end{array} \right.$$

Ἄν ὁ ἄγωγός εἶναι κάθετος στίς δυναμικές γραμμές τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου ($\varphi = 90^\circ$), τότε ἡ ἠλεκτρομαγνητική δύναμη ἔχει τή μέγιστη τιμή της :

$$F = \Delta l \cdot I \cdot B$$

α. Παράλληλα ρεύματα. Διαβιβάζουμε ρεύμα σέ δύο κατακόρυφους καί εὐκαμπτους ἄγωγούς ἔτσι, ὥστε νά ἔχουμε δύο παράλληλα ρεύματα (σχ. 94). Παρατηροῦμε ὅτι οἱ δύο ἄγωγοί ἔλκονται μεταξύ τους, ὅταν διαρρέονται ἀπό ὁμόροπα ρεύματα, ἐνῶ ἀντίθετα, οἱ δύο ἄγωγοί ἀπωθοῦνται μεταξύ τους, ὅταν διαρρέονται ἀπό ἀντίροπα ρεύματα. Αὐτή ἡ ἀμοιβαία ἔλξη ἢ ἄπωση τῶν δύο ἄγωγῶν εἶναι συνέπεια τοῦ νόμου τοῦ Laplace, γιατί κάθε ρεύμα δημιουργεῖ γύρω του μαγνητικό πεδίο πού ἐπιδρᾷ στό ἄλλο ρεύμα. Ἄν τό μήκος κάθε ἄγωγου εἶναι l , ἡ μεταξύ τους ἀπόσταση εἶναι r καί οἱ δύο ἄγωγοί διαρρέονται ἀπό ρεύμα ἐντάσεως I , τότε εὐκόλα βρίσκουμε ὅτι ἡ ἠλεκτρομαγνητική δύναμη μέ τήν ὁποία ἔλκονται ἢ ἀπωθοῦνται μεταξύ τους οἱ δύο ἄγωγοί ἔχει μέτρο :



Σχ. 94. Ἐλξη ἢ ἄπωση μεταξύ δύο παράλληλων ρευμάτων.

δύναμη μεταξύ παράλληλων ρευμάτων

$$F = K_{\mu} \cdot \frac{2l \cdot I^2}{r}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2 \\ l, r \text{ σέ m} \\ I \text{ σέ A} \\ F \text{ σέ N} \end{array} \right. \quad (1)$$

Παρατήρηση. Άν τά δύο παράλληλα ρεύματα έχουν εντάσεις I_1 και I_2 , τότε είναι :

$$F = K_{\mu} \cdot \frac{2l \cdot I_1 \cdot I_2}{r}$$

β. Όρισμός της θεμελιώδους μονάδας Ampère στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI). Ξέρουμε ότι στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI), επομένως και στο σύστημα MKSA (πού είναι τμήμα του συστήματος SI), ή μονάδα εντάσεως ρεύματος 1 Ampère (1 A) είναι θεμελιώδης μονάδα και ορίζεται από την εξίσωση (1). Άν σ' αυτή την εξίσωση βάλουμε :

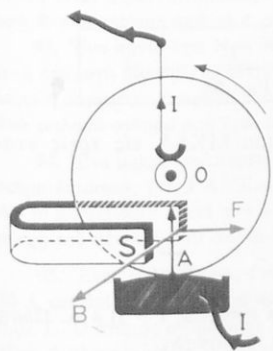
$$l = 1 \text{ m}, I = 1 \text{ A}, r = 1 \text{ m}, \text{ βρίσκουμε } F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

Έτσι έχουμε τον εξής ορισμό :

1 Ampère (1 A) είναι ή ένταση ρεύματος πού, όταν διαρρέει δύο παράλληλους, ευθύγραμμους και με άπειρο μήκος άγωγούς οί όποιοι βρίσκονται στο κενό και απέχουν μεταξύ τους 1 m, αναπτύσσει μεταξύ αυτών των άγωγών ήλεκτρομαγνητική δύναμη ίση με $2 \cdot 10^{-7}$ Newton κατά μέτρο μήκους.

Παρατήρηση. Αυτός ό ήλεκτρομαγνητικός ορισμός της θεμελιώδους μονάδας Ampère επιβάλλεται από θεωρητικούς λόγους. Οί μονάδες των άλλων μαγνητικών και ήλεκτρικών μεγεθών καθορίζονται από όρισμένες εξισώσεις, πού τίς παίρνουμε ως εξισώσεις όρισμού.

γ. Στοιχειώδης ήλεκτροκινητήρας. Ένας κατακόρυφος χάλκινος δίσκος μπορεί νά περιστρέφεται γύρω από όριζόντιο άξονα και ένα μικρό τμήμα της περιφέρειάς του έρχεται πάντοτε σε έπαφή με την έπιφάνεια ύδραργύρου (σχ. 95). Ό άξονας του τροχού και ό ύδραργύρος συνδέονται με τούς πόλους γεννήτριας. Τότε κατά τή διεύθυνση της άκτίνας OA περνάει ρεύμα. Ό δίσκος βρίσκεται μέσα σε όμογενές μαγνητικό πεδίο πού ή μαγνητική έπαγωγή του B είναι κάθετη στο έπίπεδο του δίσκου. Παρατηρούμε ότι ό δίσκος περιστρέφεται. Αυτή ή κίνηση του δίσκου εξηγείται ως εξής :



Σχ. 95. Αρχή του ήλεκτροκινητήρα.

Τό ρεύμα πού διατρέχει τήν άκτίνα OA, διατρέχει έναν ευθύγραμμο άγωγό και επομένως πάνω στην άκτίνα ενεργεί μιά ήλεκτρομαγνητική δύναμη F πού είναι κάθετη στην άκτίνα, βρίσκεται πάνω στο έπίπεδο του δι-

σκου καί γι' αυτό προκαλεί την περιστροφή του δίσκου. Τό ίδιο συμβαίνει σέ κάθε άκτινα του δίσκου, όταν αυτή διαρρέεται από τό ρεύμα. Άν αντι-στραφεί ή φορά του ρεύματος ή ή φορά του μαγνητικού πεδίου, τότε αντι-στρέφεται καί ή φορά της περιστροφής του δίσκου. Τό πείραμα αυτό έρμη-νεύει τή λειτουργία των *ηλεκτροκινητήρων*.

64. Γενική παρατήρηση γιά τίς σταθερές του *συστήματος μονάδων MKSA*

Όπως είδαμε, στίς εξισώσεις του Μαγνητισμού καί του 'Ηλεκτρισμού υπάρχουν όρισμένες σταθερές πού οί τιμές τους αναφέρονται άνακεφαλιαιω-τικά στόν παρακάτω πίνακα.

Μαγνητικές καί ηλεκτρικές σταθερές

Μέγεθος	Σταθερή
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$
Διηλεκτρική σταθερή του κενού	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Cb}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$
Μαγνητική σταθερή του Coulomb	$K_\mu = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$
'Ηλεκτρική σταθερή του Coulomb	$K_{\eta\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2}$
Σχέση των σταθερών K_μ καί $K_{\eta\lambda}$	$K_{\eta\lambda} = K_\mu \cdot c^2$

Παρατήρηση. Άν στήν τελευταία εξίσωση βάλουμε τίς τιμές των σταθερών $K_{\eta\lambda}$ καί K_μ , βρίσκουμε :

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot c^2 \quad \text{άρα}$$

$$\frac{1}{\mu_0 \cdot \epsilon_0} = c^2$$

'Η εξίσωση πού βρήκαμε συνδέει στό σύστημα MKSA τίς τρεις σταθερές του κενού μ_0 , ϵ_0 καί c .

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

84. Ένας εϋθύγραμμος άγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 31,4 \text{ A}$. Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή B σέ άπόσταση $r = 5 \text{ cm}$ από τόν άγωγό ;

85. Ένας εϋθύγραμμος άγωγός άποτελείται από μία δέσημ 6 εϋθύγραμμων συρμάτων πού τό καθένα διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 10 \text{ A}$. Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή

Β σε απόσταση $r = 2 \text{ cm}$ από τον άγωγό ; Άν σ' αυτό τό σημείο του πεδίου είναι ένας μαγνητικός πόλος μέ ποσότητα μαγνητισμού $m = + 4 \text{ A} \cdot \text{m}$, πόση δύναμη έξασκει τό πεδίο σ' αυτό τόν πόλο ;

86. Δύο εϋθύγραμμοι άγωγοί είναι παράλληλοι, απέχουν μεταξύ τους 6 cm και διαρρέονται από ρεύματα που έχουν τήν ίδια ένταση $I = 30 \text{ A}$. Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή σέ ένα σημείο Δ, που βρίσκεται μεταξύ τών δύο άγωγών και απέχει $r_1 = 2 \text{ cm}$ από τόν ένα άγωγό και $r_2 = 4 \text{ cm}$ από τόν άλλο, όταν τά δύο παράλληλα ρεύματα είναι όμόρροπα και όταν είναι αντίρροπα ;

87. Ένας εϋθύγραμμος άγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 2 \text{ A}$. Σέ απόσταση r από τόν άγωγό βρίσκεται βόρειος μαγνητικός πόλος, που έχει ποσότητα μαγνητισμού $m = 0,5 \text{ A} \cdot \text{m}$ και μπορεί νά κινείται ελεύθερα μέ τήν επίδραση του μαγνητικού πεδίου του ρεύματος. Πόσο έργο (W) παράγεται από τό πεδίο, όταν ό πόλος m διαγράψει μία όλόκληρη δυναμική γραμμή του πεδίου ; Ποιά σχέση έχει αυτό τό έργο μέ τήν απόσταση r ;

88. Ένας κυκλικός άγωγός έχει άκτίνα $r = 20 \text{ cm}$ και διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 5 \text{ A}$. Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή B στό κέντρο του κυκλικού άγωγού ;

89. Ένα κυκλικό πλαίσιο άποτελείται από $n = 50$ σπείρες, που καθεμιά έχει άκτίνα $r = 10 \text{ cm}$. Πόση πρέπει νά είναι ή ένταση I του ρεύματος, ώστε ή μαγνητική έπαγωγή στό κέντρο του πλαισίου νά είναι ίση μέ $B = 6,28 \cdot 10^{-3} \text{ T}$; Πόση μαγνητική ροή Φ περνάει από τό πλαίσιο ;

90. Ένα κυκλικό πλαίσιο άποτελείται από $n = 100$ σπείρες, που ή άκτίνα τους είναι $r = 10 \text{ cm}$. Οί άκρες του πλαισίου συνδέονται μέ γεννήτρια, που έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη $E = 6 \text{ V}$ και έσωτερική αντίσταση $R_g = 2 \Omega$. Τότε στό κέντρο του πλαισίου ή μαγνητική έπαγωγή έχει μέτρο $B = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Πόση είναι ή αντίσταση R του πλαισίου ;

91. Ένα πηνίο άποτελείται από $N = 1600$ σπείρες, έχει μήκος $l = 10 \text{ cm}$ και διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 15 \text{ A}$. Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή στό κέντρο του πηνίου ;

92. Ένα πηνίο έχει μήκος $l = 50 \text{ cm}$ και άποτελείται από $N = 500$ σπείρες, που καθεμιά έχει έμβαδό $S = 20 \text{ cm}^2$. Τό πηνίο διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 0,5 \text{ A}$. Πόση είναι ή μαγνητική έπαγωγή B στό κέντρο του πηνίου και πόση είναι ή μαγνητική ροή Φ που περνάει από τό πηνίο ;

93. Ένα πηνίο έχει $N = 4000$ σπείρες, μήκος $l = 40 \text{ cm}$ και στό κέντρο του ή μαγνητική έπαγωγή είναι $B_0 = 251,2 \cdot 10^{-3} \text{ T}$. Πόση είναι ή ένταση I του ρεύματος ; Πόση γίνεται ή μαγνητική έπαγωγή στό κέντρο του πηνίου, άν μέσα σ' αυτό βάλουμε μία ράβδο από μαλακό σίδηρο που έχει μαγνητική διαπερατότητα $\mu = 3000$;

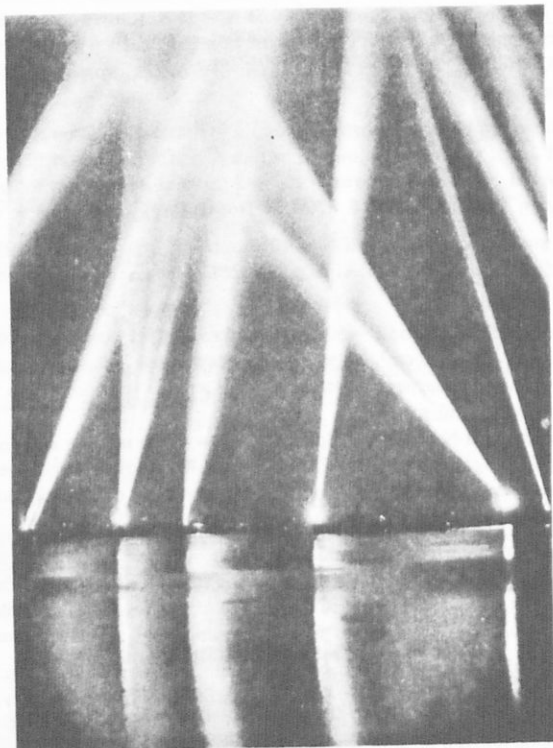
94. Ένα μακρύ σωληνοειδές άποτελείται από $n = 12$ σπείρες/cm και διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 3 \text{ A}$. Ένας μαγνητικός πόλος μέ ποσότητα μαγνητισμού $m = +50 \text{ A} \cdot \text{m}$ μετακινείται κατά $s = 4 \text{ cm}$ κατά μήκος του άξονα του σωληνοειδούς. Πόσο έργο παράγεται κατά τή μετακίνηση αυτή ;

95. Ένας εϋθύγραμμος άγωγός μήκους $l = 5 \text{ cm}$ διαρρέεται από ρεύμα έντάσεως $I = 20 \text{ A}$ και βρίσκεται μέσα σέ όμογενές μαγνητικό πεδίο που έχει μαγνητική έπαγωγή $B = 0,02 \text{ T}$. Ό άγωγός σχηματίζει γωνία $\varphi = 30^\circ$ μέ τίς δυναμικές γραμμές του πεδίου. Πόση είναι ή ηλεκτρομαγνητική δύναμη F που αναπτύσσεται στόν άγωγό ; Πόση είναι ή μεγαλύτερη τιμή που μπορεί νά έχει ή δύναμη F και πότε συμβαίνει αυτό ;

96. Δύο εθύγραμμα σύρματα μήκους $l = 40$ cm απέχουν μεταξύ τους $r = 4$ cm. Τα σύρματα διαρρέονται από όμορροπα ρεύματα έντασεως $I = 2$ A. Πόση είναι η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F που ενεργεί στο κάθε σύρμα εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου του άλλου ρεύματος ;

97. Δύο κατακόρυφα σύρματα Γ και Δ έχουν μεγάλο μήκος, απέχουν μεταξύ τους 8 cm και διαρρέονται από ρεύματα που έχουν φορά προς τα πάνω και ένταση $I_{\Gamma} = 30$ A και $I_{\Delta} = 20$ A. Ένα τρίτο κατακόρυφο σύρμα Ζ βρίσκεται ανάμεσα στα δύο προηγούμενα σύρματα, σε απόσταση 3 cm από το σύρμα Γ και 5 cm από το σύρμα Δ και διαρρέεται από ρεύμα που έχει φορά προς τα κάτω και ένταση $I_Z = 10$ A. Νά βρεθεί η δύναμη F που ενεργεί πάνω σε μήκος $l = 25$ cm του σύρματος Ζ.

98. Στο άτομο του υδρογόνου το ηλεκτρόνιο διαγράφει με ταχύτητα $v = 2,2 \cdot 10^6$ m/sec κυκλική τροχιά, που έχει ακτίνα $r = 0,53 \cdot 10^{-10}$ m. α) Πόσο ηλεκτρικό φορτίο q περνάει κατά δευτερόλεπτο από ένα σημείο της τροχιάς του ηλεκτρονίου ; β) Πόση είναι η ένταση I του κυκλικού ρεύματος που δημιουργεί η κίνηση του ηλεκτρονίου ; γ) Πόση είναι η μαγνητική επαγωγή B στο κέντρο αυτού του κυκλικού ρεύματος ;



Φωτεινές δέσμες προβολέων.

ΟΠΤΙΚΗ

Διάδοση του φωτός

65. Όρισμοί

Όνομάζουμε *φως* τό φυσικό αίτιο πού διεγείρει τό μάτι μας καί τό κάνει νά βλέπουμε. Τό πείραμα ἀπέδειξε ὅτι τό φῶς εἶναι μιά *μορφή ἐνέργειας*, πού διαδίδεται μέ τά ἠλεκτρομαγνητικά κύματα.

Ἐνα σῶμα εἶναι ὁρατό, ὅταν στέλνει φῶς στό μάτι μας. Μερικά σῶματα ἐκπέμπουν ἀπό μόνα τους φῶς καί ὀνομάζονται *αὐτόφωτα σῶματα* ἢ *φωτεινές πηγές* (Ἥλιος, ἀπλανεῖς ἀστέρες, φλόγες). Ἐνα σῶμα, πού δέν εἶναι αὐτόφωτο, γίνεται ὁρατό μόνο ὅταν πέφτει πάνω του τό φῶς μιᾶς φωτεινῆς πηγῆς καί ἕνα μέρος αὐτοῦ τοῦ φωτός ἐκπέμπεται ἀπό τό σῶμα. Αὐτά τά σῶματα ὀνομάζονται *ἐτερόφωτα σῶματα* (Σελήνη, πλανῆτες, τά περισσότερα ἀπό τά γύρω μας σῶματα). Τό φῶς, πού ἐκπέμπουν οἱ διάφορες φωτεινές πηγές (φυσικές καί τεχνητές), ἔχει τήν ἴδια φύση καί ἀκολουθεῖ τούς ἴδιους νόμους. Ὄνομάζουμε *διαφανή σῶματα* ἐκεῖνα πού ἀφήνουν τό φῶς νά περάσει μέσα ἀπό τήν ὕλη τους (γυαλί, ἀέρας, νερό σέ μικρό πάχος). Ἀντίθετα πολλά σῶματα δέν ἀφήνουν τό φῶς νά περάσει μέσα ἀπό τήν ὕλη τους καί ὀνομάζονται *ἀδιαφανή* (πλάκα ἀπό μέταλλο, ξύλο κ.ἄ.). Μερικά ἄλλα σῶματα (ὀρισμένα εἶδη γυαλιοῦ), πού τά ὀνομάζουμε *ἡμιδιαφανή*, ἀφήνουν τό φῶς νά περάσει, ἀλλά δέν ἐπιτρέπουν νά διακρίνεται τό σχῆμα τῶν φωτεινῶν ἀντικειμένων. Ἡ διάκριση τῶν σωμάτων σέ διαφανή, ἀδιαφανή καί ἡμιδιαφανή δέν εἶναι ἀπόλυτη, γιατί π.χ. τό νερό, ὅταν σχηματίζει παχύ στρώμα εἶναι ἀδιαφανές, ἐνῶ ἀντίθετα, ἕνα πολύ λεπτό φύλλο χρυσοῦ εἶναι ἡμιδιαφανές.

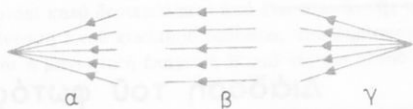
Ὅλες οἱ συνηθισμένες φωτεινές πηγές ἔχουν διαστάσεις, σέ πολλές ὁμως περιπτώσεις δεχόμαστε ὅτι ἡ φωτεινή πηγή δέν ἔχει διαστάσεις καί

τότε λέμε ότι ή φωτεινή πηγή είναι *φωτεινό σημείο*, πού έκπέμπει φώς προς όλες τίς διευθύνσεις.

66. Εὐθύγραμμη διάδοση τοῦ φωτός

Ἄπό διάφορα φαινόμενα τῆς καθημερινῆς ζωῆς (π.χ. τό σχηματισμό τῆς σκιᾶς ἑνός σώματος), κυρίως ὁμως ἀπό τή μελέτη τῶν ὀπτικῶν φαινομένων συνάγεται ὁ ἀκόλουθος νόμος τῆς εὐθύγραμμης διαδόσεως τοῦ φωτός:

Μέσα σέ ὁμογενές καί ισότροπο μέσο τό φώς διαδίδεται εὐθύγραμμα.



Σχ. 96. Φωτεινές δέσμες (α συγκλίνουσα, β παράλληλη, γ ἀποκλίνουσα).

α. Φωτεινή ἀκτίνα, φωτεινές δέσμες. Ἡ εὐθεῖα γραμμή πού ἀκολουθεῖ τό φώς κατά τή διάδοσή του ὀνομάζεται *φωτεινή ἀκτίνα*. Οἱ φωτεινές ἀκτίνες ξεφεύγουν ἀπό τή φωτεινή πηγή ὁμοίμορφα προς όλες τίς κατευθύνσεις.

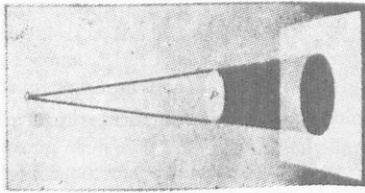
Πολλές φωτεινές ἀκτίνες ἀποτελοῦν μία *φωτεινή δέσμη*. Ἄν όλες οἱ ἀκτίνες μιᾶς φωτεινῆς δέσμης περνοῦν ἀπό ἕνα σημείο, τότε ή δέσμη ὀνομάζεται *στιγματική* καί τό θεωρούμενο σημείο ὀνομάζεται ἔστια τῆς δέσμης. Μία φωτεινή δέσμη μπορεῖ νά εἶναι *συγκλίνουσα*, *ἀποκλίνουσα* ή *παράλληλη* (σχ. 96).

67. Γεωμετρική καί Φυσική Ὀπτική

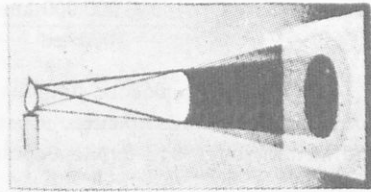
Ὄνομάζεται Ὀπτική τό μέρος τῆς Φυσικῆς πού ἐξετάζει τίς ιδιότητες τοῦ φωτός καί τά φαινόμενα πού προκαλεῖ τό φώς (*ὀπτικά φαινόμενα*). Πολλά ὀπτικά φαινόμενα μπορούμε νά τά ἐξετάσουμε χωρίς νά λάβουμε ὑπόψη τή φύση τοῦ φωτός. Σ' αὐτά τά φαινόμενα οἱ φωτεινές ἀκτίνες θεωροῦνται ὡς γεωμετρικές ἀκτίνες καί ἰσχύει ὁ νόμος τῆς εὐθύγραμμης διαδόσεως τοῦ φωτός. Αὐτός ὁ τρόπος μελέτης τῶν ὀπτικῶν φαινομένων ἀποτελεῖ τή *Γεωμετρική Ὀπτική*. Ὑπάρχουν ὁμως καί ὀπτικά φαινόμενα πού, γιά νά τά ἐξηγήσουμε, πρέπει νά λάβουμε ὑπόψη ὅτι τό φώς διαδίδεται μέ κύματα. Αὐτός ὁ τρόπος μελέτης τῶν ὀπτικῶν φαινομένων ἀποτελεῖ τή *Φυσική ή Κυματική Ὀπτική* καί ἐρμηνεύει τό σύνολο τῶν ὀπτικῶν φαινομένων.

68. Ἀποτελέσματα τῆς εὐθύγραμμης διαδόσεως τοῦ φωτός

α. Σκιά. Ἄν στήν πορεία τῶν φωτεινῶν ἀκτίνων βρεθεῖ ἕνα ἀδιαφανές σῶμα, τότε πίσω ἀπό τό σῶμα ὑπάρχει ἕνας χῶρος, στόν ὁποῖο δέν μπαίνει φώς. Ὁ χῶρος αὐτός ὀνομάζεται *σκιά*. Ὄταν ή φωτεινή πηγή εἶναι *σημεῖο*



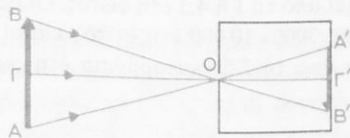
Σχ. 97. Σχηματισμός σκιάς.



Σχ. 98. Σκιά και παρασκιά.

(σχ. 97), τότε η μετάβαση από το σκοτεινό στο φωτεινό χώρο γίνεται απότομα. Όταν όμως η φωτεινή πηγή έχει διαστάσεις, τότε πίσω από το σώμα σχηματίζεται η σκιά, στην οποία δεν μπαίνει καμιά φωτεινή ακτίνα, και ακόμη σχηματίζεται και η παρασκιά, δηλαδή ένας χώρος στον οποίο φτάνουν φωτεινές ακτίνες, που προέρχονται μόνο από ορισμένα σημεία της φωτεινής πηγής (σχ. 98). Σ' αυτή την περίπτωση η μετάβαση από το σκοτεινό στο φωτεινό χώρο γίνεται βαθμιαία.

β. Σκοτεινός θάλαμος. Ο σκοτεινός θάλαμος είναι κλειστό κιβώτιο, που στη μία έδρα του υπάρχει μικρή τρύπα Ο (σχ. 99). Αν εμπρός από αυτή την έδρα φέρουμε ένα φωτεινό αντικείμενο (ΑΒ), τότε πάνω στην απέναντι έδρα σχηματίζεται αντιστραμμένη ή εικόνα (Α'Β') του αντικειμένου. Η εικόνα αυτή ονομάζεται εἶδωλο και οφείλεται στην εὐθύγραμμη διάδοση του φωτός. Το μέγεθος του εἰδώλου προσδιορίζεται από τη σχέση :

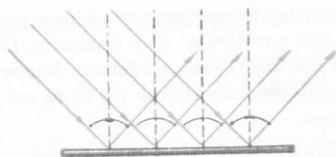


Σχ. 99. Σκοτεινός θάλαμος.

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OG'}{OG}$$

69. Ταχύτητα διαδόσεως του φωτός

Όταν το φως διαδίδεται στην επιφάνεια της Γης από έναν τόπο σε άλλο, φαίνεται ότι δεν μεσολαβεί αισθητός χρόνος από τη στιγμή, που φεύγει το φως από τον έναν τόπο, ως τη στιγμή που φτάνει στον άλλο τόπο. Πρώτος ο Δανός αστρονόμος Rømer (1675) βρήκε ότι το φως μέσα σε 1000 δευτερόλεπτα διατρέχει τη διάμετρο της τροχιάς της Γης, που είναι ίση με 300



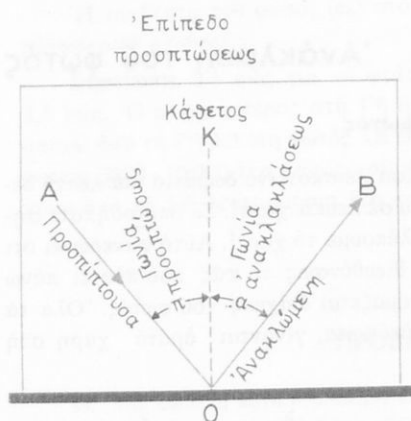
Σχ. 101. 'Ανάκλαση του φωτός από λεία και γυαλιστερή επιφάνεια.

φτει πάνω σε λεία και γυαλιστερή (στιλπνή) επιφάνεια.

Αλλά και μία λεία και γυαλιστερή επιφάνεια έχει πάντοτε μικρές ανωμαλίες, που προκαλούν μικρή διάχυση. Αυτό φαίνεται από το ότι η φωτεινή κηλίδα, που σχηματίζεται πάνω στη μεταλλική πλάκα, είναι όρατη από οποιοδήποτε σημείο του δωματίου παρατηρούμε την πλάκα.

71. 'Ανάκλαση του φωτός

α. Όρισμοί. Οί επιφάνειες που προκαλούν ανάκλαση του φωτός ονομάζονται *καθρέφτες* (κάτοπτρα). 'Ανάλογα με τη μορφή που έχει η επιφάνεια του καθρέφτη, διακρίνουμε τούς καθρέφτες σε *επίπεδους*, *σφαιρικούς*, *παροβολικούς*, *κυλινδρικούς*. 'Η ακτίνα ΑΟ (σχ. 102) ονομάζεται *προσπίπτουσα* ακτίνα και η ακτίνα ΟΒ ονομάζεται *ανακλώμενη* ακτίνα.



Σχ. 102. Οί γωνίες προσπίψεως (π) και ανακλάσεως (α).

τε ή φωτεινή δέσμη *αλλάζει πορεία* και κατευθύνεται προς *ορισμένη διεύθυνση* (σχ. 101). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται *ανάκλαση* του φωτός. 'Ωστε η διάχυση συμβαίνει, όταν το φως πέφτει πάνω σε *τραχιά και ανώμαλη* επιφάνεια, ενώ η ανάκλαση συμβαίνει, όταν το φως πέ-

φτει πάνω σε *λεία και γυαλιστερή* (στιλπνή) επιφάνεια. 'Αλλά και μία λεία και γυαλιστερή επιφάνεια έχει πάντοτε μικρές ανωμαλίες, που προκαλούν μικρή διάχυση. Αυτό φαίνεται από το ότι η φωτεινή κηλίδα, που σχηματίζεται πάνω στη μεταλλική πλάκα, είναι όρατη από οποιοδήποτε σημείο του δωματίου παρατηρούμε την πλάκα.

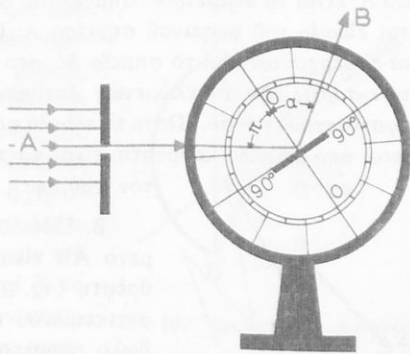
β. Νόμοι της ανακλάσεως. 'Η θεωρητική και πειραματική έρευνα απέδειξε ότι ισχύουν οί εξής *νόμοι της ανακλάσεως του φωτός*:

I. 'Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα βρίσκονται πάνω στο επίπεδο προσπίψεως.

II. 'Η γωνία ανακλάσεως είναι ίση με τη γωνία προσπίψεως.

'Ωστε, αν η προσπίπτουσα ακτίνα είναι κάθετος στον καθρέφτη ($\pi = 0^\circ$), τότε και η ανακλώμενη ακτίνα είναι κάθετος στον καθρέφτη ($\alpha = 0^\circ$).

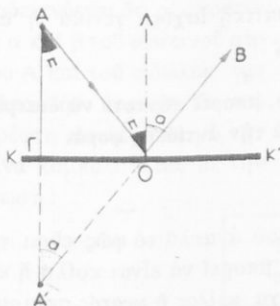
Οί νόμοι της ανάκλασεως του φωτός επαληθεύονται από την εφαρμογή τους στους καθρέφτες. Κατά προσέγγιση οί νόμοι της ανάκλασεως επαληθεύονται πειραματικά με τη διάταξη που δείχνει τό σχήμα 103). Στο κέντρο γωνιομετρικού κύκλου είναι στερεωμένος μικρός επίπεδος καθρέφτης. Μιά πολύ λεπτή φωτεινή δέσμη πέφτει πάνω στον καθρέφτη καί ανάκλαται. Στρέφοντας τό γωνιομετρικό κύκλο μεταβάλλουμε τή γωνία προσπτώσεως (π). Βρίσκουμε ότι πάντοτε ή γωνία ανάκλασεως (α) είναι ίση με τή γωνία προσπτώσεως.



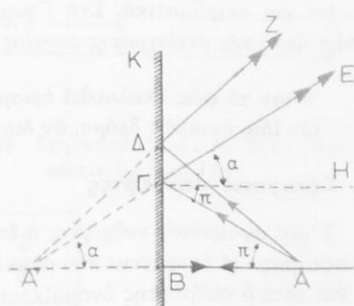
Σχ. 103. Για τήν απόδειξη των νόμων τής ανάκλασεως του φωτός.

72. Επίπεδοι καθρέφτες

α. Είδωλο φωτεινού σημείου. Μιά φωτεινή ακτίνα ΑΟ (σχ. 104), που προέρχεται από φωτεινό σημείο Α, δίνει τήν ανάκλωμενη ακτίνα ΟΒ. Αυτές οί δύο ακτίνες βρίσκονται στό ίδιο επίπεδο με τήν κάθετο ΛΟ στον καθρέφτη. Αν φέρουμε τήν ΑΓ κάθετο στον καθρέφτη, τότε ή προέκταση τής ΟΒ τέμνει τήν προέκταση τής ΑΓ σέ ένα σημείο Α'. Εύκολα βρίσκουμε ότι τά ορθογώνια τρίγωνα ΑΓΟ καί Α'ΓΟ είναι ίσα, καί επομένως είναι $ΑΓ = Α'Γ$. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε γιά κάθε ακτίνα, που προέρχεται από τό φωτεινό σημείο Α καί ανάκλαται πάνω στον καθρέφτη (σχ. 105). Τό

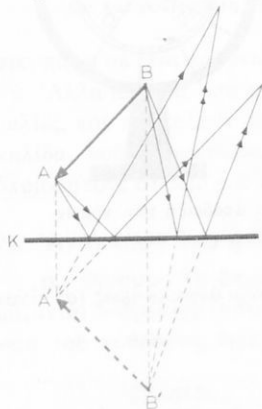


Σχ. 104. Ανάκλαση του φωτός απο επίπεδο καθρέφτη.



Σχ. 105. Τό είδωλο Α' του φωτεινού σημείου Α είναι φανταστικό.

σημείο A' είναι τό *συμμετρικό* σημείο τοῦ A ὡς πρὸς τὸν καθρέφτη καὶ ὀνομάζεται *εἶδωλο* τοῦ φωτεινοῦ σημείου A . Οἱ ἀνακλῶμενες ἀκτίνες *φαινομενικά* προέρχονται ἀπὸ τό σημείο A' , στό ὅποιο καταλήγουν οἱ *φανταστικές προεκτάσεις* τῶν ἀνακλῶμενων ἀκτίνων. Γι' αὐτό τό σημείο A' ὀνομάζεται *φανταστικό εἶδωλο*. Ὡστε τό *εἶδωλο φωτεινοῦ σημείου*, τό ὅποιο σχηματίζεται ἀπὸ ἐπίπεδο καθρέφτη, είναι *φανταστικό* καὶ *συμμετρικό* ὡς πρὸς τὸν καθρέφτη.



Σχ. 106. Τό εἶδωλο $A'B'$ τοῦ ἀντικειμένου AB είναι φανταστικό.

β. Εἶδωλο ἀντικειμένου. Ἐάν ἓνα ἀντικείμενο AB είναι ἐμπρὸς ἀπὸ τὸν ἐπίπεδο καθρέφτη (σχ. 106), τότε σέ κάθε σημείο τοῦ ἀντικειμένου ἀντιστοιχεῖ ἓνα φανταστικό εἶδωλο *συμμετρικό* ὡς πρὸς τὸν καθρέφτη. Τό σύνολο αὐτῶν τῶν φανταστικῶν εἰδώλων σχηματίζει ἓνα *φανταστικό εἶδωλο* $A'B'$. Εὐκόλα βρῖσκουμε ὅτι τό εἶδωλο $A'B'$ είναι *ὄρθιο*, ἴσο μέ τό ἀντικείμενο AB καὶ *συμμετρικό* τοῦ ἀντικειμένου AB ὡς πρὸς τὸν καθρέφτη. Ἀλλά τό εἶδωλο καὶ τό ἀντικείμενο δέν είναι *ἐφαρμόσιμα*, δηλαδή τό δεξιό χέρι μας είναι ἀριστερό στό εἶδωλό μας. Ὡστε τό εἶδωλο ἀντικειμένου, τό ὅποιο σχηματίζεται ἀπὸ ἐπίπεδο καθρέφτη, είναι *φανταστικό*, *ὄρθιο*, ἴσο

μέ τό ἀντικείμενο καὶ *συμμετρικό* ὡς πρὸς τὸν καθρέφτη.

73. Ἀρχή τῆς ἀντίστροφης πορείας τοῦ φωτός

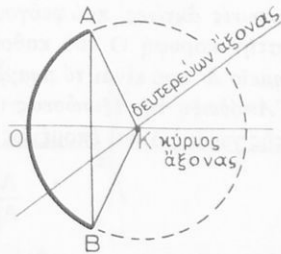
Ἐάν προσπίπτουσα ἀκτίνα είναι ἡ BO (σχ. 109), τότε σύμφωνα μέ τό νόμο τῆς ἀνακλάσεως ἡ ἀκτίνα OA θά είναι ἡ ἀνακλῶμενη. Αὐτό ἐπαληθεύεται καὶ πειραματικά. Στή Γεωμετρική Όπτική ἰσχύει γενικά ἡ ἀκόλουθη *ἀρχή τῆς ἀντίστροφης πορείας τοῦ φωτός*:

■ Ὅταν τό φῶς ἀκολουθεῖ ὀρισμένο δρόμο, *μπορεῖ πάντοτε νά διατρέξει τὸν ἴδιο ἀκριβῶς δρόμο, ἂν διαδοθεῖ κατὰ τὴν ἀντίθετη φορά.*

74. Σφαιρικοί καθρέφτες

Στοὺς *σφαιρικούς καθρέφτες* ἡ ἐπιφάνεια πού ἀνακλᾷ τό φῶς είναι τμήμα σφαίρας. Ἡ ἐπιφάνεια πού ἀνακλᾷ τό φῶς *μπορεῖ νά είναι κοίλη ἢ κυρτή* καὶ τότε ὁ καθρέφτης ὀνομάζεται ἀντίστοιχα *κοίλος ἢ κυρτός* σφαιρικός καθρέφτης. Τό μέσο O τοῦ καθρέφτη (σχ. 107) ὀνομάζεται *κορυφή* τοῦ καθρέφτη καὶ τό κέντρο K τῆς σφαίρας ὀνομάζεται *κέντρο καμπυλότητας* τοῦ

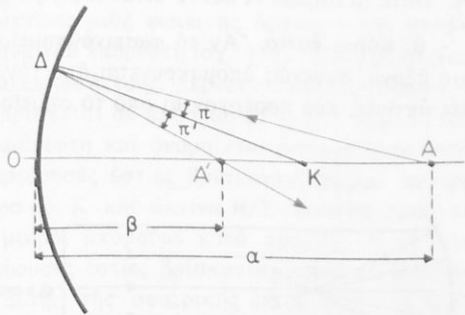
καθρέφτη. Η ευθεία ΚΟ, που περνάει από το κέντρο καμπυλότητας Κ και από την κορυφή Ο, ονομάζεται *κύριος άξονας* του καθρέφτη. Κάθε άλλη ευθεία, που περνάει από το κέντρο καμπυλότητας Κ, ονομάζεται *δευτερεύων άξονας* του καθρέφτη. Η γωνία ΑΚΒ ονομάζεται *άνοιγμα* του καθρέφτη. Για να σχηματιστεί εύκρινές είδωλο, πρέπει να ισχύουν οι έξης συνθήκες: α) το άνοιγμα του καθρέφτη να είναι *πολύ μικρό* και β) το αντικείμενο να είναι *κάθετο* στον κύριο άξονα και *κοντά σ' αυτόν*. Στά παρακάτω υποθέτουμε ότι ισχύουν αυτές οι δύο συνθήκες.



Σχ. 107. Σφαιρικός καθρέφτης.

75. Κοίλοι σφαιρικοί καθρέφτες

α. Είδωλο φωτεινού σημείου. Ένα φωτεινό σημείο Α βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα (σχ. 108). Κάθε φωτεινή ακτίνα, που προέρχεται από το σημείο Α και πέφτει στον καθρέφτη, ανακλάται σχηματίζοντας ίσες γωνίες ($\pi = \pi'$) με την κάθετο στο σημείο που πέφτει ή ακτίνα, δηλαδή με την ακτίνα καμπυλότητας (ΚΔ) του καθρέφτη. Έτσι η προσπίπτουσα ακτίνα (ΑΔ), μετά την ανάκλασή της τέμνει τον κύριο άξονα σέ ένα σημείο Α', που είναι το *πραγματικό είδωλο* του φωτεινού σημείου Α.



Σχ. 108 Σχηματισμός του ειδώλου (Α') ενός φωτεινού σημείου (Α).

Ο καθρέφτης έχει ακτίνα καμπυλότητας $KO = R$. Αποδεικνύεται ότι οι αποστάσεις α και β του φωτεινού σημείου Α και του ειδώλου του Α' από την κορυφή Ο του καθρέφτη συνδέονται με την ακτίνα καμπυλότητας με την έξιςωση :

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{2}{R} \tag{1}$$

Η έξιςωση (1) φανεράνει ότι η απόσταση β του ειδώλου Α' από την κορυφή

Ο εξαρτάται μόνο από την ακτίνα καμπυλότητας R του καθρέφτη και από την απόσταση a του φωτεινού σημείου A από τον καθρέφτη. Ἐπομένως *ὅλες οἱ φωτεινές ἀκτίνες*, πού φεύγουν από τό φωτεινό σημείο A καί πέφτουν κοντά στήν κορυφή O τοῦ καθρέφτη, μετά τήν ἀνάκλασή τους, περνοῦν από τό σημείο A' πού εἶναι τό *πραγματικό εἶδωλο* τοῦ φωτεινού σημείου A .

Ἀπόδειξη τῆς ἐξισώσεως (1). Στό τρίγωνο $A\Delta A'$ ἢ ΔK εἶναι διχοτόμος τῆς γωνίας Δ καί ἔπομένως ἔχουμε τή σχέση :

$$\frac{AK}{A'K} = \frac{A\Delta}{A'\Delta} \quad (2)$$

Ἐπειδή τό ἄνοιγμα τοῦ καθρέφτη εἶναι πολύ μικρό, τό σημείο Δ βρίσκεται πολύ κοντά στήν κορυφή O . Μποροῦμε λοιπόν κατά προσέγγιση νά λάβουμε $A\Delta \simeq AO = a$ καί $A'\Delta \simeq A'O = \beta$. Τότε ἡ ἐξίσωση (2) γράφεται :

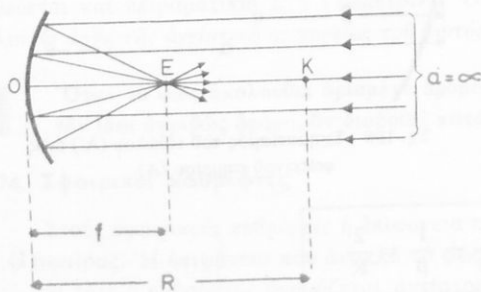
$$\frac{a-R}{R-\beta} = \frac{a}{\beta} \quad \text{ἄρα} \quad \beta R + aR = 2a\beta \quad (3)$$

Ἄν διαιρέσουμε καί τά δύο μέλη τῆς ἐξισώσεως (3) διά $a\beta R$, βρίσκουμε :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{\beta} = \frac{2}{R}$$

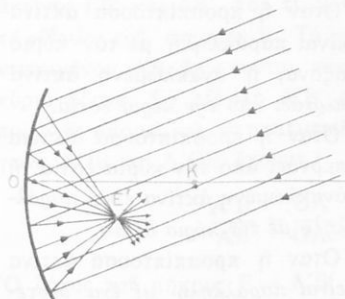
Ἄν τό φωτεινό σημείο τό βάλουμε στή θέση A' , τότε, σύμφωνα μέ τήν ἀρχή τῆς ἀντίστροφης πορείας τοῦ φωτός, τό εἶδωλό του σχηματίζεται στή θέση A . Ὡστε τά σημεία A καί A' εἶναι *συζυγή σημεία*.

β. Κύρια ἔστια. Ἄν τό φωτεινό σημείο A , κινούμενο πάνω στόν κύριο ἄξονα, συνεχῶς ἀπομακρύνεται από τόν καθρέφτη, τότε ὅλες οἱ φωτεινές ἀκτίνες, πού προέρχονται από τό σημείο A καί πέφτουν πάνω στόν καθρέφτη, τελικά γίνονται παράλληλες μέ τόν κύριο ἄξονα (σχ. 109). Σ' αὐτή τήν περίπτωση *ὅλες οἱ ἀνακλῶμενες ἀκτίνες* περνοῦν από ἓνα σημείο E , πού ὀνομάζεται *κύρια ἔστια* τοῦ καθρέφτη. Ἡ ἀπόσταση τῆς κύριας ἔστιας E από τήν κορυφή O ὀνομάζεται *ἔστιακή ἀπόσταση* (f) τοῦ καθρέφτη καί εἶναι *σταθερή*. Ἄν στήν ἐξίσωση (1) βάλουμε



Σχ. 109. Κύρια ἔστια (E) τοῦ κοίλου καθρέφτη.

ἔστιακή ἀπόσταση (f) τοῦ καθρέφτη καί εἶναι σταθερή. Ἄν στήν ἐξίσωση (1) βάλουμε



Σχ. 110. Δευτερεύουσα έστια του κοίλου καθρέφτη.



Σχ. 111. Έστιακό επίπεδο του κοίλου καθρέφτη.

$\alpha = \infty$, βρίσκουμε: $\beta = \frac{R}{2} = \text{σταθ.}$

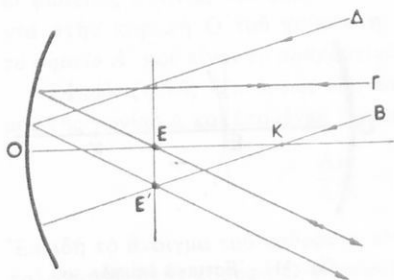
Η έστιακή απόσταση (f) του κοίλου καθρέφτη είναι ίση με τό μισό της ακτίνας καμπυλότητας (R).

έστιακή απόσταση $f = \frac{R}{2}$

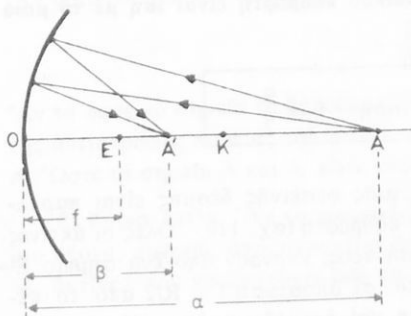
γ. Έστιακό επίπεδο. Οί άκτίνες μιάς φωτεινής δέσμης είναι παράλληλες μέ ένα δευτερεύοντα άξονα του καθρέφτη (σχ. 110. Όλες οί άκτίνες αϋτής τής δέσμης, μετά τήν ανάκλασή τους, περνούν από ένα σημείο E' του δευτερεύοντα άξονα, πού βρίσκεται σέ απόσταση $f = R/2$ από τό κέντρο καμπυλότητας (K) του καθρέφτη και ονομάζεται δευτερεύουσα έστία του καθρέφτη. Όλες οί δευτερεύουσες έστίες βρίσκονται σέ μία σφαιρική επιφάνεια, πού έχει κέντρο τό K και άκτινα $R/2$. Έπειδή όμως τό άνοιγμα του καθρέφτη είναι μικρό, μπορούμε κατά προσέγγιση νά θεωρήσουμε ότι όλες οί δευτερεύουσες έστίες βρίσκονται πάνω σέ ένα επίπεδο, πού είναι έφαπτόμενο αϋτής τής σφαιρικής επιφάνειας στή θέση τής κύριας έστίας (E) και κάθετο στον κύριο άξονα (σχ. 111). Τό επίπεδο αϋτό ονομάζεται έστιακό επίπεδο του καθρέφτη.

δ. Πορεία μερικων ανακλώμενων ακτίνων. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά ακόλουθα συμπεράσματα για τήν πορεία πού ακολουθούν όρισμένες ανακλώμενες άκτίνες και για τή θέση του ειδώλου A' ενός φωτεινού σημείου, πού βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα (σχ. 112).

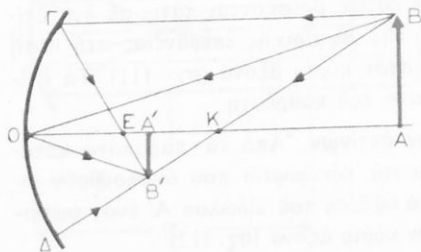
1. Όταν ή προσπίπτουσα άκτινα περνάει από τό κέντρο καμπυλότητας, ή ανακλώμενη άκτινα ακολουθεί αντίστροφα τήν ίδια πορεία.



Σχ. 112. Πορεία μερικών ακτίνων μετά την ανάκλασή τους.



Σχ. 113. Προσδιορισμός της θέσεως του ειδώλου (A') ενός φωτεινού σημείου (A).



Σχ. 114. Ἡ κατασκευή του ειδώλου (A'B') ενός αντικειμένου (AB).

2. Ὄταν ἡ προσπίπτουσα ἀκτίνα εἶναι παράλληλη μέ τόν κύριο ἄξονα, ἡ ἀνακλώμενη ἀκτίνα περνάει ἀπό τήν κύρια ἐστία.

3. Ὄταν ἡ προσπίπτουσα ἀκτίνα περνάει ἀπό τήν κύρια ἐστία, ἡ ἀνακλώμενη ἀκτίνα εἶναι παράλληλη μέ τόν κύριο ἄξονα.

4. Ὄταν ἡ προσπίπτουσα ἀκτίνα εἶναι παράλληλη μέ ἕνα δευτερεύοντα ἄξονα, ἡ ἀνακλώμενη ἀκτίνα περνάει ἀπό τήν ἀντίστοιχη δευτερεύουσα ἐστία, πού βρίσκεται πάνω στό ἐστιακό ἐπίπεδο.

5. Ὄταν φωτεινό σημεῖο βρίσκεται πάνω στόν κύριο ἄξονα τό εἶδωλό του σχηματίζεται πάνω στόν κύριο ἄξονα (σχ. 113). Οἱ ἀποστάσεις τοῦ φωτεινοῦ σημείου (α) καί τοῦ ειδώλου (β) ἀπό τήν κορυφή τοῦ καθρέφτη συνδέονται μεταξύ τους μέ τήν ἐξίσωση:

$$\text{θέση τοῦ ειδώλου} \quad \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

$$\text{ὅπου} \quad f = \frac{R}{2}$$

ε. Εἶδωλο ἀντικειμένου. Ὡς φωτεινό ἀντικείμενο θεωροῦμε μιά εὐθεῖα AB κάθετη στόν κύριο ἄξονα (σχ. 114). Ἐπειδή ξέρουμε τήν πορεία ὀρισμένων ἀνακλώμενων ἀκτίνων, μπορούμε νά κατασκευάσουμε τό εἶδωλο A'B'. Ἐτσι οἱ ἀκτίνες ΒΓ καί ΒΔ, πού προέρχονται ἀπό τήν ἄκρη Β τοῦ ἀντικειμένου δίνουν τίς ἀνακλώμενες

ἀκτίνες ΓΒ' καὶ ΔΒ', πού τέμνονται στό σημεῖο Β'. Αὐτό τό σημεῖο εἶναι τό εἶδωλο τοῦ σημείου Β. Τά εἶδωλα ὄλων τῶν ἄλλων σημείων τοῦ ἀντικειμένου ΑΒ βρίσκονται πάνω στήν εὐθεῖα Α'Β', πού εἶναι κάθετη στόν κύριο ἄξονα. Τό εἶδωλο Α'Β' εἶναι ἀντιστραμμένο καί πραγματικό καί ἐπομένως μπορεῖ νά σχηματιστεῖ πάνω σέ διάφραγμα. Ἀπό τά ὅμοια τρίγωνα ΑΟΒ καί Α'ΟΒ' ἔχουμε :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA} \quad \eta \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{\beta}{\alpha}$$

Ὁ λόγος τοῦ μήκους $E = A'B'$ τοῦ εἰδώλου πρὸς τό μήκος $A = AB$ τοῦ ἀντικειμένου ὀνομάζεται (γραμμική) μεγέθυνση καί προσδιορίζεται ἀπό τήν ἐξίσωση :

$$\text{μεγέθυνση} \quad \frac{E}{A} = \frac{\beta}{\alpha}$$

(4)

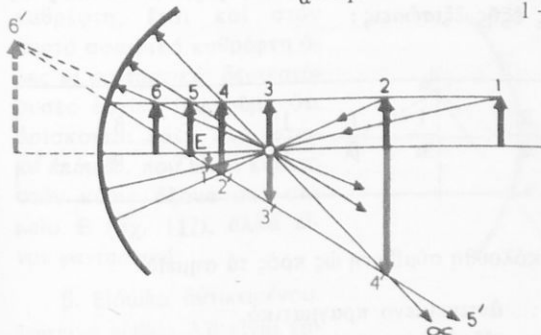
Οἱ ἀποστάσεις $OA = \alpha$ καί $OA' = \beta$ τοῦ ἀντικειμένου καί τοῦ εἰδώλου ἀπό τήν κορυφή τοῦ καθρέφτη, δηλαδή ἡ θέση τοῦ εἰδώλου, προσδιορίζεται ἀπό τή γνωστή ἐξίσωση :

$$\text{θέση τοῦ εἰδώλου} \quad \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \quad \delta\text{που } f = \frac{R}{2}$$

(5)

στ. Πραγματικό ἢ φανταστικό εἶδωλο. Ἄν λύσουμε τήν ἐξίσωση (5) ὡς πρὸς β , ἔχουμε :

$$\beta = \frac{\alpha f}{\alpha - f} \quad \eta \quad \beta = \frac{f}{1 - \frac{f}{\alpha}}$$
(6)



Σχ. 115. Ὁ κοίλος καθρέφτης σχηματίζει εἶδωλο πραγματικό (1', 2', 3', 4') καί εἶδωλο φανταστικό (6').

1. Ὄταν τό ἀντικείμενο βρίσκεται στό ἄπειρο ($\alpha = \infty$), τότε εἶναι $\beta = f$, δηλαδή τό εἶδωλο σχηματίζεται στήν κύρια ἐστία, εἶναι πραγματικό, ἀλλά εἶναι σημεῖο.

2. Τό ἀντικείμενο βρῖ-

σκεται πέρα από τό κέντρο καμπυλότητας ($a > 2f$). Μέ τή γεωμετρική κατασκευή (σχ. 115) βρίσκουμε ότι τό είδωλο σχηματίζεται μεταξύ τής κύριας έστίας καί τοῦ κέντρου καμπυλότητας ($f < \beta < 2f$) καί εἶναι πραγματικό, ἀντιστραμμένο καί μικρότερο ἀπό τό ἀντικείμενο.

3. Τό ἀντικείμενο βρίσκεται στό κέντρο καμπυλότητας ($a = 2f$). Τότε εἶναι $\beta = 2f$, δηλαδή τό είδωλο σχηματίζεται στό κέντρο καμπυλότητας καί εἶναι πραγματικό, ἀντιστραμμένο καί ἴσο μέ τό ἀντικείμενο.
4. Τό ἀντικείμενο βρίσκεται μεταξύ τής κύριας έστίας καί τοῦ κέντρου καμπυλότητας ($f < a < 2f$). Τό είδωλο σχηματίζεται πέρα ἀπό τό κέντρο καμπυλότητας ($\beta > 2f$) καί εἶναι πραγματικό, ἀντιστραμμένο καί μεγαλύτερο ἀπό τό ἀντικείμενο.
5. Τό ἀντικείμενο βρίσκεται στήν κύρια έστία ($a = f$). Τότε εἶναι $\beta = \infty$, δηλαδή τό είδωλο σχηματίζεται στό ἄπειρο. Σ' αὐτή τήν περίπτωση δέν ὑπάρχει είδωλο.
6. Τό ἀντικείμενο βρίσκεται μεταξύ τής κύριας έστίας καί τοῦ καθρέφτη ($a < f$). Ἀπό τήν ἐξίσωση (6) βρίσκουμε ότι τό β ἔχει ἀρνητική τιμή ($\beta < 0$). Μέ τή γεωμετρική κατασκευή βρίσκουμε ότι τό είδωλο σχηματίζεται πίσω ἀπό τόν καθρέφτη καί εἶναι φανταστικό, ὄρθιο καί μεγαλύτερο ἀπό τό ἀντικείμενο.

Τά παραπάνω εὐκολά ἐπαληθεύονται καί πειραματικά. Ἔτσι καταλήγουμε στά ἀκόλουθα συμπεράσματα γιά τούς κοίλους σφαιρικούς καθρέφτες :

I. Ὁ κοῖλος σφαιρικός καθρέφτης σχηματίζει είδωλο πραγματικό, ὅταν τό ἀντικείμενο βρίσκεται πέρα ἀπό τήν κύρια έστία ($a > f$), ἐνῶ σχηματίζει είδωλο φανταστικό, ὅταν τό ἀντικείμενο βρίσκεται μεταξύ τής κύριας έστίας καί τοῦ καθρέφτη ($a < f$).

II. Ἡ θέση καί τό μέγεθος τοῦ είδώλου προσδιορίζονται σέ ὄλες τίς περιπτώσεις ἀπό τίς ἐξῆς ἐξισώσεις :

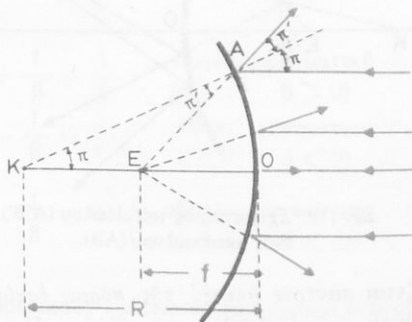
κοῖλοι καθρέφτες	$f = \frac{R}{2}$	$\frac{1}{a} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$	$\frac{E}{A} = \frac{\beta}{a}$
---------------------	-------------------	---	---------------------------------

μέ τόν ὄρο ότι ἰσχύει ἡ ἀκόλουθη σύμβαση ὡς πρός τά σημεῖα

- a θετικό : ἀντικείμενο πραγματικό
- β θετικό : είδωλο πραγματικό
- β ἀρνητικό : είδωλο φανταστικό

76. Κυρτοί σφαιρικοί καθρέφτες

α. Κύρια έστια. Πάνω στον κυρτό σφαιρικό καθρέφτη πέφτει δέσμη φωτεινών ακτίνων, που είναι παράλληλες με τον κύριο άξονα του καθρέφτη (σχ. 116). Η προέκταση μιās ανακλώμενης ακτίνας συναντᾷ τον κύριο άξονα σέ ένα σημείο E. Εύκολα βρίσκουμε ότι τό τρίγωνο ΚΕΑ είναι ισοσκελές καί επομένως είναι $EK = EA$. Έπειδή τό άνοιγμα του καθρέφτη είναι μικρό, μπορούμε κατά προσέγγιση νά δεχτοῦμε ότι είναι $EA = EO$. Τότε είναι $EK = EO = R/2$. Όλες λοιπόν οί ανακλώμενες ακτίνες φαινομενικά προέρχονται από τή φανταστική κύρια έστία E, που βρίσκεται στή μέση τῆς ακτίνας καμπυλότητας. Ωστε :

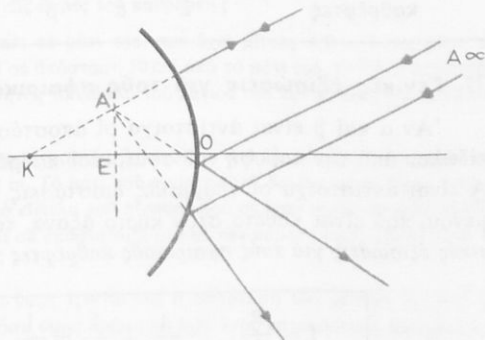


Σχ. 116. Η κύρια έστια (E) του κυρτού καθρέφτη είναι φανταστική.

■ Η κύρια έστια του κυρτού σφαιρικού καθρέφτη είναι φανταστική καί ἡ έστιακή απόσταση (f) είναι ἴση μέ τό μισό τῆς ακτίνας καμπυλότητας (R) του καθρέφτη.

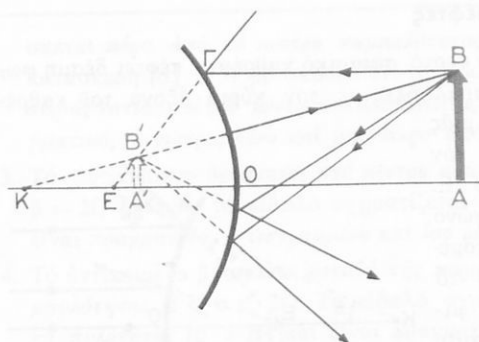
έστιακή απόσταση $f = \frac{R}{2}$

“Όπως στον κοίλο σφαιρικό καθρέφτη, έτσι καί στον κυρτό σφαιρικό καθρέφτη ὅλες οί φανταστικές δευτερεύουσες έστίες θεωροῦμε ότι βρίσκονται πάνω στό *έστιακό επίπεδο*, που είναι κάθετο στον κύριο άξονα στό σημείο E (σχ. 117), αλλά είναι φανταστικό.



Σχ. 117. Έστιακό επίπεδο του κυρτού καθρέφτη.

β. Εἶδωλο αντικειμένου. Φωτεινή εὐθεία AB είναι κάθετη στον κύριο άξονα του



Σχ. 118. Σχηματισμός του ειδώλου (A'B') ενός αντικειμένου (AB).

ζεται πάντοτε μεταξύ της κύριας εστίας και της κορυφής του καθρέφτη. Η θέση και το μέγεθος του ειδώλου δίνονται από τις αντίστοιχες εξισώσεις, που ισχύουν για τους κοίλους καθρέφτες, με τη διαφορά ότι πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η κύρια εστία είναι φανταστική ($f < 0$) και ότι το είδωλο είναι επίσης φανταστικό ($\beta < 0$). Έτσι καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα για τους κυρτούς σφαιρικούς καθρέφτες:

I. Ο κυρτός σφαιρικός καθρέφτης σχηματίζει είδωλο φανταστικό, ὄρθιο και μικρότερο από το αντικείμενο. Το είδωλο σχηματίζεται πάντοτε μεταξύ της κύριας εστίας και του καθρέφτη ($\beta < f$).

II. Η θέση και το μέγεθος του ειδώλου προσδιορίζονται από τις εξής εξισώσεις:

$$\text{κυρτοί καθρέφτες} \quad f = -\frac{R}{2} \quad \frac{1}{a} - \frac{1}{\beta} = -\frac{1}{f} \quad \frac{E}{A} = -\frac{\beta}{a}$$

77. Γενικές εξισώσεις για τους σφαιρικούς καθρέφτες

Αν a και β είναι αντίστοιχα οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από την κορυφή του σφαιρικού καθρέφτη (κοίλου ή κυρτού), E και A είναι αντίστοιχα οι γραμμικές διαστάσεις του ειδώλου και του αντικειμένου, που είναι κάθετο στον κύριο άξονα, τότε ισχύουν οι ακόλουθες γενικές εξισώσεις για τους σφαιρικούς καθρέφτες:

$$f = \frac{R}{2} \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \quad \frac{E}{A} = \frac{\beta}{a}$$

καθρέφτη (σχ. 118). Οι ακτίνες, που πέφτουν πάνω στον καθρέφτη και έχουν τη διεύθυνση του κύριου άξονα ή οποιοδήποτε δευτερεύοντα άξονα, μετά την ανάκλασή τους πάνω στον καθρέφτη έχουν την ίδια διεύθυνση. Αν λοιπόν εργαστούμε όπως και στους κοίλους καθρέφτες, κατασκευάζουμε το είδωλο A'B'. Αυτό το είδωλο είναι φανταστικό, ὄρθιο, μικρότερο από το αντικείμενο και σχηματί-

108. Ἡ κεντρικὴ ἀκτὴν μιᾶς συγκλίνουσας φωτεινῆς δέσμης εἶναι ὀριζόντια. Στὴν πορεία τῆς δέσμης καὶ σὲ ἀπόσταση 10 cm ἀπὸ τὴν ἐστία τῆς δέσμης βάζουμε ἕνα ἐπίπεδο καθρέφτη, πού σχηματίζει γωνία 45° μὲ τὴν κεντρικὴ ἀκτὴν τῆς δέσμης. Πού σχηματίζεται ἡ νέα ἐστία τῆς δέσμης;

Σφαιρικοὶ καθρέφτες

109. Πάνω στὸν κύριον ἄξονα κοίλου καθρέφτη καὶ σὲ ἀπόσταση δεκαπλάσια ἀπὸ τὴν ἐστιακὴ ἀπόστασίν του ($a = 10 f$) βρίσκεται ἕνα φωτεινὸ σημεῖο. Πόσο ἀπέχει τὸ εἶδωλο ἀπὸ τὴν φωτεινὴ πηγὴ;

110. Ἐνας κοῖλος σφαιρικός καθρέφτης ἔχει ἀκτὴν καμπυλότητος $R = 40$ cm. Πού πρέπει νὰ τοποθετηθεῖ ἕνα ἀντικείμενο AB, γιὰ νὰ σχηματιστεῖ εἶδωλο πραγματικὸ τρεῖς φορές μεγαλύτερο ἢ τέσσερις φορές μικρότερο ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο;

111. Ἐνας κοῖλος σφαιρικός καθρέφτης ἔχει ἐστιακὴ ἀπόσταση f . Σὲ πόση ἀπόσταση ἀπὸ τὸν καθρέφτη πρέπει νὰ τοποθετήσουμε ἕνα ἀντικείμενο, γιὰ νὰ πάρουμε εἶδωλο φανταστικὸ διπλάσιο ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο ἢ εἶδωλο πραγματικὸ διπλάσιο ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο;

112. Ἐνας κοῖλος σφαιρικός καθρέφτης δίνει ὄρθιον εἶδωλο 5 φορές μεγαλύτερο ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο. Ἡ ἀπόσταση τοῦ εἰδώλου ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο εἶναι 80 cm. Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση τοῦ ἀντικειμένου ἀπὸ τὸν καθρέφτη καὶ πόση εἶναι ἡ ἐστιακὴ ἀπόσταση τοῦ καθρέφτη;

113. Ἐνας παρατηρητὴς βλέπει τὸ μάτι του, πού ἔχει μῆκος $AB = 3$ cm, μέσα σὲ κοῖλο καθρέφτη πού ἔχει ἐστιακὴ ἀπόσταση 12 cm καὶ τὸν κρατεῖ σὲ ἀπόσταση 10 cm ἀπὸ τὸ μάτι. Πού σχηματίζεται τὸ εἶδωλο τοῦ ματιοῦ; Μὲ ποιά γωνία βλέπει ὁ παρατηρητὴς αὐτὸ τὸ εἶδωλο; Νὰ συγκριθεῖ αὐτὴ ἡ γωνία μὲ ἐκείνη πού βρέθηκε στὸ ἀντίστοιχο πρόβλημα 117.

114. Ἐνα ἀντικείμενο AB ἀπέχει 75 cm ἀπὸ ἕνα τοῖχο. Πού πρέπει νὰ τοποθετήσουμε ἕνα κοῖλο καθρέφτη ἐστιακῆς ἀποστάσεως $f = 20$ cm, γιὰ νὰ σχηματιστεῖ πάνω στὸν τοῖχο καθαρὸ εἶδωλο τοῦ ἀντικειμένου;

115. Ἡ φαινόμενη διάμετρος τοῦ δίσκου τῆς Σελήνης εἶναι $\omega = 31'$. Πόση εἶναι ἡ διάμετρος τοῦ εἰδώλου τῆς Σελήνης πού σχηματίζεται ἀπὸ κοῖλο καθρέφτη ἐστιακῆς ἀποστάσεως $f = 12,90$ m;

116. Ἐνα φωτεινὸ σημεῖο A ἀπέχει 40 cm ἀπὸ κοῖλο καθρέφτη K, ἐστιακῆς ἀποστάσεως $f = 30$ cm. Κάθετα στὸν κύριον ἄξονα αὐτοῦ τοῦ καθρέφτη τοποθετοῦμε ἐπίπεδο καθρέφτη K'. Πού πρέπει νὰ τοποθετήσουμε τὸν καθρέφτη K', ὥστε οἱ ἀκτίνες πού-φεύγουν ἀπὸ τὸ σημεῖο A, ἀφοῦ ἀνακλασθοῦν διαδοχικὰ πάνω στοὺς δύο καθρέφτες νὰ συγκεντρώνονται στὸ σημεῖο A;

117. Κυρτὸς σφαιρικός καθρέφτης δίνει εἶδωλο 8 φορές μικρότερο ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο. Ἡ ἀπόσταση τοῦ εἰδώλου ἀπὸ τὸ ἀντικείμενο φαίνεται ὅτι εἶναι 90 cm. Πόση εἶναι ἡ ἀπόσταση τοῦ ἀντικειμένου ἀπὸ τὸν καθρέφτη καὶ ἡ ἀκτὴν καμπυλότητος τοῦ καθρέφτη;

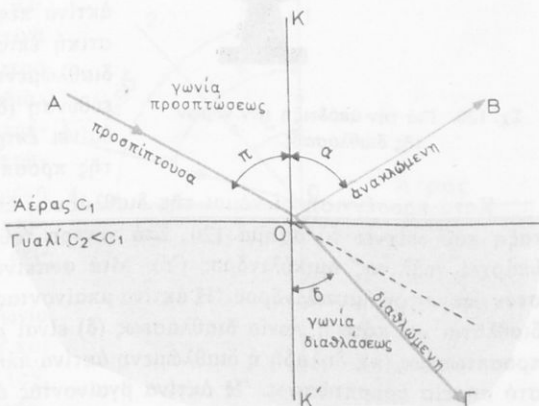
118. Δύο σφαιρικοὶ καθρέφτες, ὁ ἕνας κυρτὸς M_1 καὶ ὁ ἄλλος κοῖλος M_2 , ἔχουν τὴν ἴδια ἀκτὴν καμπυλότητος $R = 20$ cm, τὸν ἴδιον κύριον ἄξονα, οἱ ἐπιφανεῖές τους εἶναι ἢ μιὰ ἀπέναντι στὴν ἄλλη καὶ ἡ ἀπόσταση τῶν δύο κορυφῶν τους εἶναι $O_1O_2 = 40$ cm. Στὴ μέση αὐτῆς τῆς ἀποστάσεως τοποθετοῦμε ἕνα ἀντικείμενο AB. Νὰ βρεθεῖ ἡ θέση τοῦ εἰδώλου πού σχηματίζεται μετὰ τὴν ἀνάκλαση τῶν ἀκτίνων πρῶτα πάνω στὸν κυρτὸ καὶ ἔπειτα πάνω στὸν κοῖλο καθρέφτη.

119. Έμπρός από κοίλο καθρέφτη Μ εστιακής απόστασης 50 cm τοποθετούμε κάθετα στον κύριο άξονα έναν επίπεδο καθρέφτη Ν έτσι, ώστε οι επιφανείες τους να είναι ή μία απέναντι στην άλλη. Η απόσταση ανάμεσα στους δύο καθρέφτες είναι $\delta = 2$ m. Μία μικρή φωτεινή εϋθεία που έχει ύψος $AB = 5$ cm και είναι κάθετη στον κύριο άξονα βρίσκεται σε απόσταση 25 cm από τον κοίλο καθρέφτη Μ. Να βρεθεί η θέση και το μέγεθος του ειδώλου που σχηματίζεται μετά την ανάκλαση των ακτίνων πρώτα πάνω στον κοίλο καθρέφτη Μ και έπειτα πάνω στον επίπεδο καθρέφτη Ν.

Διάθλαση του φωτός

78. Διάθλαση του φωτός

α. Όρισμός. Όταν μια λεπτή μονοχρωματική δέσμη φωτός πέφτει πλάγια πάνω στην επιφάνεια που διαχωρίζει δύο διαφορετικά διαφανή μέσα, τότε ένα μέρος του φωτός μπαίνει στο δεύτερο διαφανές μέσο, αλλάζοντας όμως διεύθυνση (σχ. 119). Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται διάθλαση του φωτός και οφείλεται στο ότι η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική στα δύο διαφανή μέσα. Το επίπεδο ΑΟΚ στο οποίο βρίσκονται η προσπίπτουσα ακτίνα (ΑΟ) και ή κάθετος (ΚΚ') στη διαχωριστική επιφάνεια, είναι το επίπεδο προσπτώσεως. Η ακτίνα ΟΓ είναι ή διαθλώμενη ακτίνα και ή γωνία ΓΟΚ' είναι ή γωνία διαθλάσεως.



Σχ. 119. Οι γωνίες προσπτώσεως (π) και διαθλάσεως (δ).

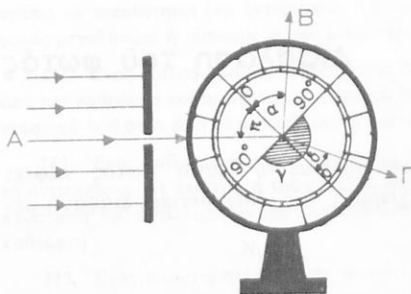
είναι το επίπεδο προσπτώσεως. Η ακτίνα ΟΓ είναι ή διαθλώμενη ακτίνα και ή γωνία ΓΟΚ' είναι ή γωνία διαθλάσεως.

β. Νόμοι της διαθλάσεως του φωτός. Από τή μελέτη του φαινομένου της διαθλάσεως βρέθηκαν οι εξής νόμοι της διαθλάσεως του φωτός :

- I. Η προσπίπτουσα και ή διαθλώμενη ακτίνα βρίσκονται στο επίπεδο προσπτώσεως.
- II. Ο λόγος του ημίτονου της γωνίας προσπτώσεως (π) προς το ημίτονο της γωνίας διαθλάσεως (δ) είναι σταθερός, ονομάζεται δείκτης δια-

θλάσεως (n) και είναι ίσος με τό λόγο τῶν ταχυτήτων τοῦ φωτός στά δύο διαφανή μέσα.

$$\text{δείκτης διαθλάσεως} \quad n_{2,1} = \frac{\eta \mu \pi}{\eta \mu \delta} = \frac{c_1}{c_2}$$



Σχ. 120. Για τήν απόδειξη τῶν νόμων τῆς διαθλάσεως.

Ὁ δείκτης διαθλάσεως ἐξαρτᾶται ἀπό τή φύση τῶν δύο διαφανῶν μέσων καί εἶναι ἀνεξάρτητος ἀπό τή γωνία προσπτώσεως. Ὁ δείκτης διαθλάσεως, πού ὀρίσαμε γιά τό σύστημα ἀέρας - γυαλί, εἶναι ὁ σχετικός δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιοῦ ὡς πρός τόν ἀέρα. Ἄν ἡ ἀκτίνα πέφτει κάθετα στή διαθλαστική ἐπιφάνεια ($\pi = 0^\circ$), τότε ἡ διαθλώμενη ἀκτίνα δέν ἀλλάζει διεύθυνση ($\delta = 0^\circ$), δηλαδή δέν παθαίνει ἐκτροπή ἀπό τή διεύθυνση τῆς προσπίπτουσας ἀκτίνας.

Κατά προσέγγιση οἱ νόμοι τῆς διαθλάσεως ἐπαληθεύονται μέ τή διάταξη πού δείχνει τό σχῆμα 120. Στό κέντρο τοῦ γωνιομετρικοῦ κύκλου ὑπάρχει γυάλινος ἡμικύλινδρος (Y). Μιά φωτεινή ἀκτίνα πέφτει κάθετα στόν ἄξονα τοῦ ἡμικυλίνδρου. Ἡ ἀκτίνα μπαίνοντας ἀπό τόν ἀέρα στό γυαλί διαθλάται καί τότε ἡ γωνία διαθλάσεως (δ) εἶναι μικρότερη ἀπό τή γωνία προσπτώσεως (π), δηλαδή ἡ διαθλώμενη ἀκτίνα πλησιάζει πρός τήν κάθετο στό σημεῖο προσπτώσεως. Ἡ ἀκτίνα βγαίνοντας ἀπό τό γυαλί στόν ἀέρα δέν ἀλλάζει διεύθυνση, γιατί πέφτει κάθετα στήν κυλινδρική ἐπιφάνεια, πού διαχωρίζει τό γυαλί ἀπό τόν ἀέρα. Ὄταν μεταβάλλουμε τή γωνία προσπτώσεως π , μεταβάλλεται καί ἡ γωνία διαθλάσεως δ , ἀλλά ὁ λόγος $\eta \mu \pi / \eta \mu \delta$ μένει σταθερός.

γ. Ἀπόλυτος δείκτης διαθλάσεως. Ὁ δείκτης διαθλάσεως, πού ἀντιστοιχεῖ σέ μετάβαση τοῦ φωτός ἀπό τό κενό στό διαφανές ὑλικό, ὀνομάζεται ἀπόλυτος δείκτης διαθλάσεως τοῦ ὑλικοῦ. Στήν πράξη χρησιμοποιοῦμε τό σχετικό δείκτη διαθλάσεως, πού ἀντιστοιχεῖ σέ μετάβαση τοῦ φωτός ἀπό τόν ἀέρα στά διάφορα διαφανή ὑλικά. Γενικά βρήκαμε ὅτι ὁ σχετικός δείκτης διαθλάσεως ἑνός ὑλικοῦ ὡς πρός τόν ἀέρα εἶναι κατά μεγάλη προσέγγιση ἴσος μέ τόν ἀπόλυτο δείκτη διαθλάσεως τοῦ ὑλικοῦ.

Ο άπόλυτος δείκτης διαθλάσεως του άέρα είναι :

$$n = \frac{c_0 \text{ (κενό)}}{c \text{ (άέρα)}} = 1,000\,293 \quad \eta \quad n \simeq 1$$

Δείκτες διαθλάσεως
(γιά τήν κίτρινη άκτινοβολία του νατρίου)

διαμάντι $n = 2,470$, κοινό γυαλί $n = 1,540$, νερό $n = 1,333$

79. Όριακή γωνία

Άπό δύο διαφανή μέσα έκεινο στό όποιο ή ταχύτητα του φωτός έχει μικρότερη τιμή ονομάζεται *οπτικά πυκνότερο* (ή *διαθλαστικότερο*). Έτσι τό γυαλί, τό νερό είναι οπτικά πυκνότερα άπό τόν άέρα (*). Σύμφωνα μέ τήν έξίσωση :

$$n = \frac{\eta\mu \pi}{\eta\mu \delta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (1)$$

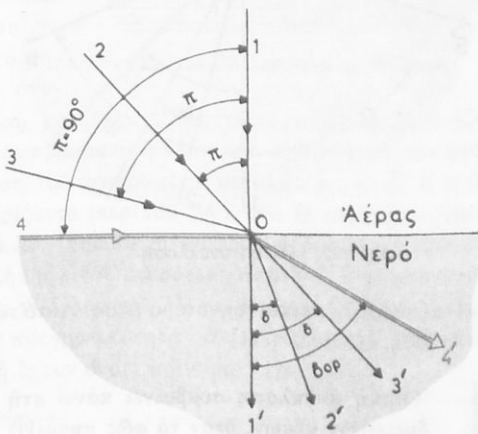
άν είναι $c_2 < c_1$, τότε είναι $\eta\mu \pi > \eta\mu \delta$ και $\pi > \delta$. Ωστε, όταν μία φωτεινή άκτινα μπαίνει σέ οπτικά πυκνότερο διαφανές μέσο, ή γωνία διαθλάσεως είναι πάντοτε μικρότερη άπό τή γωνία προσπτώσεως, δηλαδή ή διαθλώμενη άκτινα πλησιάζει πρός τήν κάθετο στή διαχωριστική έπιφάνεια.

Όταν αυξάνει ή γωνία προσπτώσεως π , αυξάνει και ή γωνία διαθλάσεως δ (σχ. 121). Καί όταν ή γωνία προσπτώσεως τείνει νά λάβει τή μέγιστη τιμή της $\pi = 90^\circ$, ή γωνία διαθλάσεως τείνει νά λάβει μία όριακή τιμή δ_{op} , πού ονομάζεται *όριακή γωνία*. Άπό τήν έξίσωση :

$$n = \frac{\eta\mu 90^\circ}{\eta\mu \delta_{op}} \quad \text{βρίσκουμε} \quad \eta\mu \delta_{op} = \frac{1}{n}$$

Ωστε, τό ήμίτονο της όριακής γωνίας (δ_{op}) είναι ίσο μέ τό αντίστροφο του δείκτη διαθλάσεως (n). Για τό σύστημα άέρα-νερό είναι $\delta_{op} = 48,5^\circ$

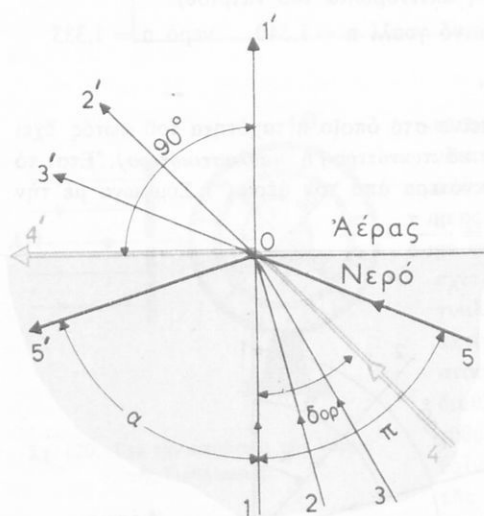
(*). Τό οπτικά πυκνότερο υλικό δέν έχει πάντοτε και τή μεγαλύτερη πυκνότητα (ρ), π.χ. τό οινόπνευμα είναι οπτικά πυκνότερο άπό τό νερό.



Σχ. 121. Όριακή γωνία (δ_{op}).

80. Όλική ανάκλαση

Σύμφωνα με την αρχή της αντίστροφης πορείας του φωτός, όταν μία φωτεινή ακτίνα μπαίνει από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο μέσο, τότε η γωνία διαθλάσεως είναι μεγαλύτερη από

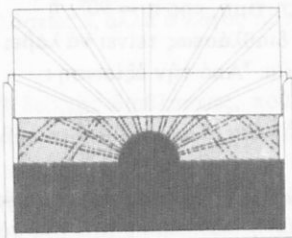


Σχ. 122. Όλική ανάκλαση.

τη γωνία προσπτώσεως και η διαθλώμενη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια. Αν η γωνία προσπτώσεως γίνει ίση με την όριακή γωνία δ_{0p} , τότε η γωνία διαθλάσεως έχει τη μεγαλύτερη τιμή της και είναι ίση με 90° (σχ. 122). Αν η γωνία προσπτώσεως γίνει μεγαλύτερη από την όριακή γωνία δ_{0p} , δεν μπορεί να συμβεί διάθλαση. Τότε η προσπίπτουσα ακτίνα ανακλάται πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια σύμφωνα με τους νόμους της ανακλάσεως και εξακολουθεί να διαδίδεται μέσα στο οπτικά πυκνότερο μέσο. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *όλική ανάκλαση*. Ωστε :

Όλική ανάκλαση συμβαίνει πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφανών μέσων, όταν το φως πηγαίνει από το οπτικά πυκνότερο στο οπτικά αραιότερο μέσο και η γωνία προσπτώσεως είναι μεγαλύτερη από την όριακή γωνία (δ_{0p}).

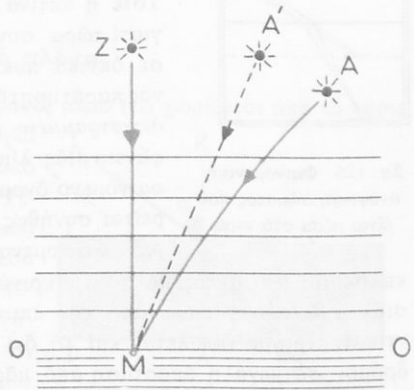
Πειραματικά το φαινόμενο της ολικής ανακλάσεως επαληθεύεται με τη διάταξη που δείχνει το σχήμα 123. Μέσα στο νερό υπάρχει μεταλλική σφαίρα, που έχει τρύπες κατά μήκος ενός μέγιστου κύκλου της σφαίρας. Μέσα σ' αυτήν υπάρχει ηλεκτρικός λαμπτήρας.



Σχ. 123. Πειραματική διάταξη για την απόδειξη της ολικής ανακλάσεως.

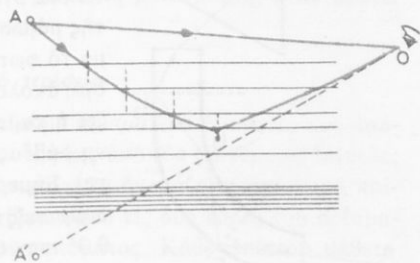
81. Αποτελέσματα της διαθλάσεως

α. Ατμοσφαιρική διάθλαση. Ξέρουμε ότι η πυκνότητα των στρωμάτων της ατμόσφαιρας συνεχώς ελαττώνεται, όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της θάλασσας. Μία φωτεινή ακτίνα, που προέρχεται από έναν άστέρα, καθώς προχωρεί μέσα στην ατμόσφαιρα, παθαίνει συνεχώς διαδοχικές διαθλάσεις. Έπειδή η ακτίνα συνεχώς πηγαίνει από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο στρώμα αέρα, γι' αυτό η ακτίνα διαθλάται *πλησιάζοντας* προς την κάθετο (σχ. 124). Έτσι η φωτεινή ακτίνα παίρνει μορφή καμπύλης και τό μάτι μας Μ βλέπει τον άστέρα κατά τη διεύθυνση της εφαπτομένης της καμπύλης στο σημείο Μ. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται *ατμοσφαιρική διάθλαση* και έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζει τον άστέρα ψηλότερα από την πραγματική θέση του σχετικά με τον ορίζοντα. Η φαινομενική άνυψωση του άστέρα είναι μεγαλύτερη, όταν ο άστέρας βρίσκεται κοντά στον ορίζοντα (περίπου 34'), ενώ δε συμβαίνει, όταν ο άστέρας βρίσκεται στο Ζενίθ. Έπειδή η φαινόμενη διάμετρος του δίσκου του Ήλιου και της Σελήνης είναι μικρότερη από 34', η ατμοσφαιρική διάθλαση μās παρουσιάζει τό δίσκο του Ήλιου και της Σελήνης πάνω από τον ορίζοντα, ενώ στην πραγματικότητα ο Ήλιος και η Σελήνη ή δέν έχουν ακόμη ανατείλει ή έχουν δύσει πριν από λίγο χρόνο.

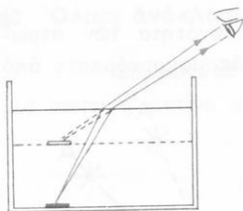


Σχ. 124. Ατμοσφαιρική διάθλαση.

β. Αντικατοπτρισμός. Όταν σε μία περιοχή τό έδαφος θερμαίνεται πολύ (π.χ. στις έρημους), τότε τά στρώματα του αέρα, που βρίσκονται σε έπαφή με τό έδαφος θερμαίνονται πολύ και γίνονται αραιότερα από τά υπερκείμενα στρώματα. Μία φωτεινή ακτίνα, που προέρχεται από ένα ψηλό αντικείμενο (π.χ. ένα δέντρο), μπαίνει τότε συνεχώς από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο στρώμα και μεταβάλλεται σε κα-



Σχ. 125. Αντικατοπτρισμός.



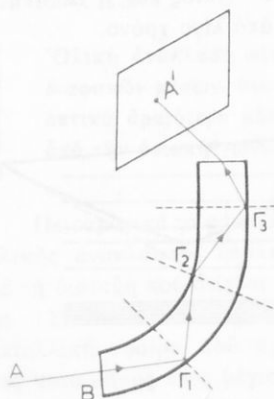
Σχ. 126. Φαινομενική ανύψωση σώματος που είναι μέσα στο νερό.

μπύλη (σχ. 125). Στη διαχωριστική επιφάνεια δύο τέτοιων στρωμάτων ή ακτίνα δέν μπαίνει στο αραιότερο στρώμα, αλλά εκεί παθαίνει *ολική ανάκλαση*. Τότε η ακτίνα ακολουθεί μία συμμετρική πορεία, γιατί τώρα συνεχώς μπαίνει από οπτικά αραιότερα σε οπτικά πυκνότερα στρώματα. Έτσι τό μάτι ενός παρατηρητή βλέπει τό είδωλο του αντικειμένου *αντιστραμμένο*, σάν νά ήταν εμπρός του ή ήρεμη επιφάνεια μιās λίμνης (επίπεδος καθρέφτης). Αυτό τό φαινόμενο ονομάζεται *αντικατοπτρισμός* καί παρατηρείται συνήθως στις έρημους τίς μεσημβρινές ώρες. Φαινόμενα αντικατοπτρισμού παρατηρούμε τό

καλοκαίρι στις άκτές, καί τότε μακρινά τμήματα της ξηράς (άκρωτήρια, νησιά) τά βλέπουμε πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Επίσης σε άντικατοπτρισμό όφείλεται καί τό ότι τό καλοκαίρι οί ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι σε μεγάλη απόσταση από μās φαίνονται βρεγμένοι.

γ. Φαινομενική ανύψωση. Έξαιτίας της διαθλάσεως ό πυθμένας ενός δοχείου, που περιέχει νερό, ή ένα αντικείμενο που βρίσκεται μέσα στο νερό, φαίνονται πιο κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού από όσο είναι στην πραγματικότητα (σχ. 126). Σ' αυτή τή φαινομενική ανύψωση όφείλεται καί τό ότι μία εϋθύγραμμη ράβδος, που ένα μέρος της βρίσκεται μέσα στο νερό, δέ φαίνεται εϋθύγραμμη.

δ. Φωτοαγωγοί. Μιά λεπτή δέσμη φωτεινών ακτίνων AB πέφτει κάθετα πάνω στην μία βάση *γυάλινης* κυλινδρικής ράβδου, που είναι καμπυλωμένη (σχ. 127). Αν ή καμπυλότητα της ράβδου δέν είναι πολύ μεγάλη, τότε



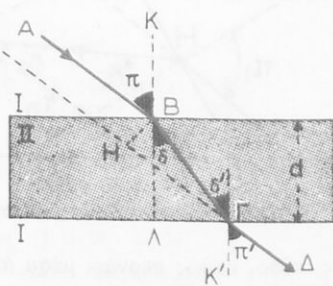
Σχ. 127. Φωτοαγωγός.

ή φωτεινή δέσμη παθαίνει διαδοχικά *ολική ανάκλαση* σε διάφορα σημεία ($\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3 \dots$) των εσωτερικών τοιχωμάτων της ράβδου καί τελικά βγαίνει στον άερα από την άλλη βάση της ράβδου καί σχηματίζει πάνω σε διάφραγμα τό φωτεινό σημείο A'. Έτσι ή φωτεινή δέσμη ακολουθεί μία τροχιά, που την προσδιορίζει ή καμπυλωμένη ράβδος. Γι' αυτό ή γυάλινη ράβδος ονομάζεται *φωτοαγωγός* (light pipe). Σήμερα κατασκευάζονται φωτοαγωγοί από διαφανείς πλαστικές ίνες που έχουν διάμετρο 0,05 mm. Οί φωτοαγωγοί χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, π.χ. στην χειρουργική για *ένδοσκόπησης*. Φωτοαγωγοί είναι καί οί φλέβες

του κινούμενου νερού. Το φως βγαίνει στον αέρα, τη στιγμή που η φλέβα του νερού διαχωρίζεται σε σταγονίδια, που εμφανίζονται πολύ φωτεινά (φωτεινοί πίδακες).

82. Διάδοση του φωτός μέσα από πλάκα

Ένα ομογενές και ισότροπο διαφανές μέσο (II) χωρίζεται από το γύρω του διαφανές μέσο (I) με δύο παράλληλα επίπεδα (σχ. 128). Τότε το πρώτο από αυτά τα δύο μέσα αποτελεί μία πλάκα. Τέτοιο σύστημα διαφανών μέσων αποτελεί μία γυάλινη πλάκα, που βρίσκεται μέσα στον αέρα. Μία φωτεινή ακτίνα AB πέφτει στην πάνω έδρα της πλάκας και αφού πάθει δύο διαθλάσεις βγαίνει στον αέρα. Οι δύο γωνίες δ και δ' , που σχηματίζονται μέσα στο γυαλί, είναι ίσες (γιατί είναι εντός εναλλάξ). Επομένως για τις δύο διαθλάσεις, ισχύουν οι σχέσεις:



Σχ. 128. Η ακτίνα AB παθαίνει μόνο παράλληλη μετατόπιση.

$$\text{στό σημείο B} \quad n = \frac{\eta\mu \pi}{\eta\mu \delta} \quad \text{στό σημείο Γ} \quad n = \frac{\eta\mu \pi'}{\eta\mu \delta'}$$

Επειδή είναι $\delta = \delta'$, έπεται ότι είναι $\pi = \pi'$. Η ακτίνα $\Gamma\Delta$, που βγαίνει από την πλάκα, είναι παράλληλη με την προσπίπτουσα ακτίνα AB. Ωστε, για την περίπτωση που και οι δύο έδρες της πλάκας βρίσκονται σε έπαφή με το ίδιο διαφανές μέσο, καταλήγουμε στο ακόλουθο συμπέρασμα:

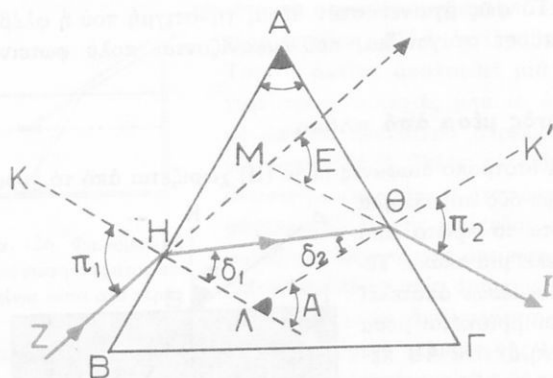
Όταν μία φωτεινή ακτίνα περνάει μέσω από πλάκα, τότε η ακτίνα παθαίνει μόνο παράλληλη μετατόπιση.

Η φωτεινή ακτίνα δεν παθαίνει παράλληλη μετατόπιση, όταν πέφτει κάθετα πάνω στη μια έδρα της πλάκας.

83. Διάδοση του φωτός μέσα από πρίσμα

α. Όρισμοί. Στην Όπτική ονομάζουμε πρίσμα ένα ομογενές και ισότροπο διαφανές μέσο, που περιορίζεται κυρίως από δύο τεμνόμενες επίπεδες επιφάνειες. Η τομή αυτών των δύο επιφανειών ονομάζεται άκμή του πρίσματος. Η διέδρη γωνία, που σχηματίζεται από τις δύο έδρες του πρίσματος, ονομάζεται διαθλαστική γωνία του πρίσματος. Κάθε επίπεδο κάθετο στην άκμή του πρίσματος ονομάζεται κόρυα τομής του πρίσματος.

Στην παρακάτω μελέτη του πρίσματος υποθέτουμε ότι ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες: α) Η προσπίπτουσα ακτίνα βρίσκεται πάνω σε μία



Σχ. 129. Ἡ ἀκτίνα ZH ἐκτρέπεται κατά τή γωνία E.

φῶς, αὐτό, καθώς περνάει μέσα ἀπό τό πρίσμα, ἀναλύεται σέ πολλά ἀπλά χρώματα.

β. Ἐξισώσεις τοῦ πρίσματος. Τό σχῆμα 129 δείχνει μιά κύρια τομή πρίσματος, πού ἔχει διαθλαστική γωνία A καί σχετικό δείκτη διαθλάσεως ὡς πρὸς τόν ἀέρα n. Μιά φωτεινή ἀκτίνα ZH διαθλάται στά σημεῖα H καί Θ καί βγαίνει στὸν ἀέρα. Γι' αὐτές τὶς δύο διαθλάσεις ἰσχύουν οἱ ἐξισώσεις:

$$\eta\mu \pi_1 = n \cdot \eta\mu \delta_1 \quad \text{καί} \quad \eta\mu \pi_2 = n \cdot \eta\mu \delta_2$$

Οἱ δύο κάθετες KΛ καί K'Λ σχηματίζουν τὴν ὀξεία γωνία α, πού εἶναι ἴση μὲ τὴ διαθλαστικὴ γωνία A τοῦ πρίσματος. Ἐπειδὴ ἡ γωνία α εἶναι ἐξωτερικὴ γωνία τοῦ τριγώνου ΛΗΘ, ἔχουμε τὴ σχέση:

$$\alpha = \delta_1 + \delta_2 \quad \text{ἢ} \quad A = \delta_1 + \delta_2$$

Ἡ γωνία πού σχηματίζουν οἱ προεκτάσεις τῆς προσπίπτουσας ἀκτίνας ZH καί τῆς ἐξερχόμενης ἀκτίνας ΘΙ ὀνομάζεται γωνία ἐκτροπῆς (E) καί, ἐπειδὴ εἶναι ἐξωτερικὴ γωνία τοῦ τριγώνου ΗΜΘ, ἔχουμε τὴ σχέση:

$$E = (\pi_1 - \delta_1) + (\pi_2 - \delta_2) \quad \text{ἢ} \quad E = \pi_1 + \pi_2 - (\delta_1 + \delta_2)$$

$$\text{ἄρα} \quad E = \pi_1 + \pi_2 - A$$

Ἀπὸ τὰ παραπάνω συνάγεται τό συμπέρασμα:

Ἐπὶ μιά φωτεινὴ ἀκτίνα περνάει μέσα ἀπὸ πρίσμα, ἡ ἀκτίνα καθαίνει δύο διαθλάσεις καί ἰσχύουν οἱ ἐξισώσεις:

ἐξισώσεις	$\eta\mu \pi_1 = n \cdot \eta\mu \delta_1$	$\eta\mu \pi_2 = n \cdot \eta\mu \delta_2$
τοῦ πρίσματος	$A = \delta_1 + \delta_2$	$E = \pi_1 + \pi_2 - A$

κύρια τομή τοῦ πρίσματος. Τότε σύμφωνα μὲ τὸ νόμο τῆς διαθλάσεως καί ἡ διαθλώμενη ἀκτίνα βρίσκεται πάνω στήν ἴδια κύρια τομή. β) Τό φῶς πού χρησιμοποιοῦμε εἶναι μονοχρωματικό, γιατί, ἂν πάνω στό πρίσμα πέσει λευκό

γ. Λεπτό πρίσμα. Αν η διαθλαστική γωνία A του πρίσματος είναι πολύ μικρή (λεπτό πρίσμα) και η γωνία προσπτώσεως π_1 είναι επίσης πολύ μικρή, τότε αντί για τὰ ἡμίτονα τῶν γωνιῶν μπορούμε νὰ πάρουμε τὶς ἴδιες τὶς γωνίες μετρημένες σὲ ἀκτίνια.
Σ' αὐτὴ τὴν περίπτωση εἶναι:

$$\pi_1 = n \cdot \delta_1 \quad \text{καὶ} \quad \pi_2 = n \cdot \delta_2$$

Ἄρα ἡ γωνία ἐκτροπῆς (E) εἶναι:

$$E = n \cdot \delta_1 + n \cdot \delta_2 - A \quad \text{ἢ} \quad E = n \cdot (\delta_1 + \delta_2) - A$$

$$\text{καὶ} \quad E = nA - A$$

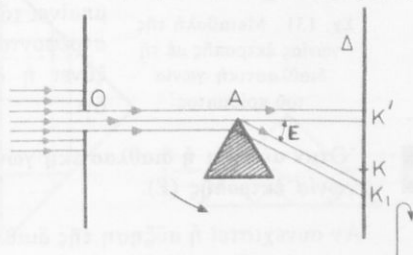
Ἀπὸ τὴν τελευταία ἐξίσωση βρίσκουμε:

$$\text{ἐξίσωση λεπτοῦ πρίσματος} \quad E = A \cdot (n - 1)$$

Όταν τὸ πρίσμα εἶναι λεπτό καὶ ἡ γωνία προσπτώσεως εἶναι μικρή, ἡ γωνία ἐκτροπῆς (E) εἶναι ἀνάλογη μὲ τὴ διαθλαστικὴ γωνία (A) τοῦ πρίσματος.

δ. Μεταβολὴ τῆς γωνίας ἐκτροπῆς. Ἐλάχιστη ἐκτροπή. Οἱ ἐξισώσεις τοῦ πρίσματος δείχνουν ὅτι ἡ γωνία ἐκτροπῆς E ἐξαρτᾶται ἀπὸ τὴ διαθλαστικὴ γωνία A , τὸ δείκτη διαθλάσεως n τοῦ πρίσματος καὶ τὴ γωνία προσπτώσεως π_1 .

Στὴν πορεία μιᾶς λεπτῆς παράλληλης μονοχρωματικῆς δέσμης παρεμβάλλουμε πρίσμα ἔτσι, ὥστε ἓνα μέρος τῶν ἀκτίνων τῆς δέσμης νὰ πέφτει πάνω στὸ πρίσμα κάθετα στὴν ἀκμὴ του (σχ. 130). Τότε στὸ διάφραγμα σχηματίζονται δύο φωτεινὲς κηλίδες. Ἡ κηλίδα K προέρχεται ἀπὸ τὶς ἀκτίνες τῆς δέσμης πού δὲν πέρασαν ἀπὸ τὸ πρίσμα, ἐνῶ ἡ κηλίδα K_1 προέρχεται ἀπὸ τὶς ἀκτίνες πού πέρασαν ἀπὸ τὸ πρίσμα καὶ ἔπαθαν ἐκτροπή. Παίρνουμε ὡς ἄξονα περιστροφῆς τὴν ἀκμὴ τοῦ πρίσματος. Τότε στρέφοντας τὸ πρίσμα μεταβάλλουμε τὴ γωνία προσπτώσεως. Ἡ φορὰ τῆς περιστροφῆς τοῦ πρίσματος εἶναι τέτοια, ὥστε ἡ κηλίδα K_1 νὰ πλησιάζει πρὸς τὴν κηλίδα K' . Μὲ αὐτὴ τὴν περιστροφὴ τοῦ πρίσματος ἡ γωνία προσπτώσεως συνεχῶς ἐλαττώνεται. Παρα-



Σχ. 130. Μεταβολὴ τῆς γωνίας ἐκτροπῆς μὲ τὴ γωνία προσπτώσεως.

τηρούμε ότι η κηλίδα K_1 στην αρχή πλησιάζει προς την κηλίδα K' , φτάνει ως τη θέση K και έπειτα συνεχώς απομακρύνεται από την κηλίδα K' . Αυτό το πείραμα δείχνει ότι για μία όρισμένη τιμή της γωνίας προσπτώσεως ή γωνία έκτροπής (E) λαβαίνει την ελάχιστη τιμή της, που ονομάζεται *ελάχιστη έκτροπή*. Όταν πραγματοποιείται η *ελάχιστη έκτροπή*, λέμε ότι το πρίσμα βρίσκεται στη θέση *ελάχιστης έκτροπής*. Θεωρητικά και πειραματικά αποδεικνύεται ότι:

Στή θέση της ελάχιστης έκτροπής ή γωνία προσπτώσεως (π_1) είναι ίση με τη γωνία εξόδου της ακτίνας (π_2) από το πρίσμα και τότε η ακτίνα μέσα στο πρίσμα έχει συμμετρική θέση σχετικά με την προσπίπτουσα και την εξερχόμενη ακτίνα.

Έπειδή στη θέση της ελάχιστης έκτροπής είναι $\pi_1 = \pi_2$, έπεται ότι είναι και $\delta_1 = \delta_2$. Τότε από τις γνωστές εξισώσεις του πρίσματος βρίσκουμε ότι για τη θέση της ελάχιστης έκτροπής ισχύουν οι εξισώσεις:

θέση ελάχιστης
έκτροπής

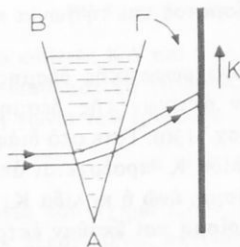
$$\pi_1 = \pi_2$$

$$A = 2\delta_1$$

$$\delta_1 = \delta_2 \quad \eta\mu \pi_1 = n \cdot \eta\mu \delta_1$$

$$E_{ελαχ} = 2\pi_1 - A$$

ε. Μεταβολή της γωνίας έκτροπής με τη διαθλαστική γωνία. Για να



Σχ. 131. Μεταβολή της γωνίας έκτροπής με τη διαθλαστική γωνία του πρίσματος.

έχουμε πρίσμα με μεταβλητή διαθλαστική γωνία, χρησιμοποιούμε δοχείο, που οι δύο πλάγιες έδρες του μπορούν να στρέφονται γύρω από οριζόντιο άξονα (σχ. 131). Μέσα στο δοχείο υπάρχει νερό, που αποτελεί ένα υγρό πρίσμα. Πάνω στη μία έδρα του πρίσματος πέφτει λεπτή παράλληλη μονοχρωματική δέσμη. Διατηρούμε σταθερή την έδρα, από την οποία μπαίνει το φως στο πρίσμα (π_1 σταθερή), και στρέφοντας την άλλη έδρα έτσι, ώστε να αυξάνει ή διαθλαστική γωνία, διαπιστώνουμε ότι:

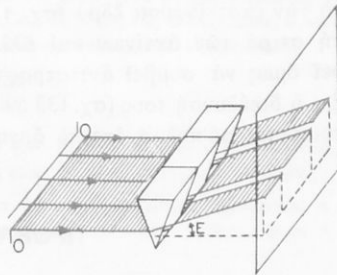
Όταν αυξάνει ή διαθλαστική γωνία (A) του πρίσματος, αυξάνει και η γωνία έκτροπής (E).

Αν συνεχιστεί η αύξηση της διαθλαστικής γωνίας (A), έρχεται στιγμή που η φωτεινή δέσμη *δέ βγαίνει από το πρίσμα*, αλλά πάνω στην έδρα $A\Gamma$ παθαίνει *ολική ανάκλαση*. Έτσι βρέθηκε ότι:

■ Η φωτεινή ακτίνα βγαίνει από το πρίσμα, όταν η διαθλαστική γωνία του (A) είναι μικρότερη ή ίση με το διπλάσιο της όριακής γωνίας (δ_{op}).

συνθήκη για την έξοδο της ακτίνας $A \leq 2 \delta_{op}$

στ. Μεταβολή της γωνίας έκτροπής με το δείκτη διαθλάσεως. Έχουμε ένα σύστημα πρισμάτων (πολύπρισμα) που αποτελείται από πρίσματα, τα οποία έχουν την ίδια διαθλαστική γωνία (A σταθερή), διαφορετικούς όμως δείκτες διαθλάσεως (σχ. 132). Στο πολύπρισμα πέφτει λεπτή παράλληλη μονοχρωματική δέσμη (π_1 σταθερή). Πάνω σε ένα διάφραγμα παρατηρούμε ότι:

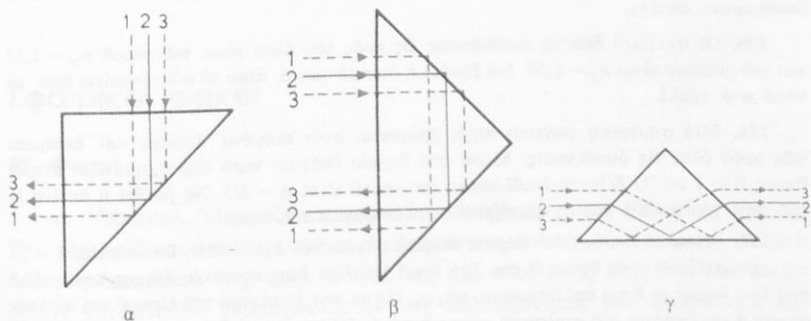


Σχ. 132. Μεταβολή της γωνίας έκτροπής με το δείκτη διαθλάσεως του πρίσματος.

■ Η γωνία έκτροπής (E) αυξάνει, όταν αυξάνει ο δείκτης διαθλάσεως (n) του πρίσματος.

84. Πρίσματα όλικης ανάκλασεως

Τα πρίσματα όλικης ανάκλασεως είναι γυάλινα πρίσματα και η λειτουργία τους στηρίζεται στο φαινόμενο της όλικης ανάκλασεως (για το γυαλί η όριακή γωνία είναι $\delta_{op} \approx 42^\circ$). Η κύρια τομή ενός πρίσματος όλικης ανάκλασεως είναι ορθογώνιο ίσοσκελές τρίγωνο (σχ. 133α). Μία φωτεινή ακτίνα, που πέφτει κάθετα πάνω στη μία κάθετη έδρα του πρίσματος, πέφτει πάνω στην ύποτείνουσα έδρα με γωνία προσπτώσεως 45° , δηλαδή μεγαλύ-



Σχ. 133. Πρίσμα όλικης ανάκλασεως.

τερη από την όριακή γωνία. Τότε η άκτινα πάνω στην ύποτείνουσα έδρα παθαίνει όλική ανάκλαση και βγαίνει από την άλλη κάθετη έδρα χωρίς έκτροπή. Η διεύθυνση της άκτινας αλλάζει κατά 90° .

Αν οι φωτεινές άκτινες πέσουν κάθετα πάνω στην ύποτείνουσα έδρα, τότε κάθε άκτινα παθαίνει δύο όλικές ανακλάσεις και βγαίνει πάλι κάθετα από την ύποτείνουσα έδρα (σχ. 133 β). Έτσι όμως συμβαίνει αντίστροφη στή σειρά των άκτινων και άλλαγή στή διεύθυνσή τους κατά 180° . Μπορεί όμως νά συμβεί αντίστροφη στή σειρά των άκτινων, χωρίς νά αλλάξει η διεύθυνσή τους (σχ. 133 γ). Τα πρίσματα όλικής ανακλάσεως χρησιμοποιούνται σε πολλά όπτικά όργανα (τηλεσκόπια, περισκόπια κ.ά.).

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

120. Μία άκτινα μονοχρωματικού φωτός μπαίνει από τον άέρα σε διαφανές σώμα Α. Η γωνία προσπτώσεως είναι $\pi = 45^\circ$ και η γωνία διαθλάσεως είναι $\delta = 30^\circ$. Πόσος είναι ό δείκτης διαθλάσεως του σώματος Α ως προς τον άέρα; Αν η ταχύτητα του φωτός στον άέρα είναι $c_0 = 300\ 000$ km/sec, πόση είναι η ταχύτητα του φωτός στο σώμα Α;

121. Ό δείκτης διαθλάσεως του νερού ως προς τον άέρα είναι $n = 4/3$. Πόση είναι η ταχύτητα του φωτός στο νερό;

122. Μία φωτεινή άκτινα πηγαίνοντας από τον άέρα στο γυαλί σχηματίζει γωνία προσπτώσεως $\pi = 45^\circ$. Ό δείκτης διαθλάσεως του γυαλιού είναι $n = \sqrt{2}$. Πόση έκτροπή παθαίνει η φωτεινή άκτινα μπαίνοντας μέσα στο γυαλί;

123. Πόσος είναι ό σχετικός δείκτης διαθλάσεως του οίονπνεύματος ως προς τό γυαλί, αν οι δείκτες διαθλάσεως αυτών των δύο σωμάτων ως προς τον άέρα αντίστοιχα είναι: $n_1 = 1,36$ και $n_2 = 1,54$;

124. Μία άκτινα μονοχρωματικού φωτός πέφτει με γωνία προσπτώσεως 50° πάνω σε μία γυάλινη πλάκα που έχει δείκτη διαθλάσεως $n = 1,50$. Νά βρεθούν η γωνία ανακλάσεως, η γωνία διαθλάσεως και η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους η ανακλώμενη και η διαθλώμενη άκτινα.

125. Οι σχετικοί δείκτες διαθλάσεως ως προς τον άέρα είναι του νερού $n_N = 1,33$ και του γυαλιού είναι $n_\Gamma = 1,54$. Νά βρεθεί η όριακή γωνία, όταν τό φώς πηγαίνει από τό νερό στο γυαλί.

126. Μία σημειακή φωτεινή πηγή βρίσκεται στον πυθμένα δοχείου και εκπέμπει φώς προς όλες τις διευθύνσεις. Μέσα στο δοχείο υπάρχει νερό που σχηματίζει στήλη ύψους $h = 1$ m. Ό δείκτης διαθλάσεως του νερού είναι $n = 4/3$. Νά βρεθεί η άκτινα R του φωτεινού κύκλου που σχηματίζεται στην έπιφάνεια του νερού.

127. Μέσα σε ένα δοχείο υπάρχει διαφανές υγρό, που έχει δείκτη διαθλάσεως $n = \sqrt{2}$ και σχηματίζει στήλη ύψους 9 cm. Στο υγρό έπιπλέει ένας κυκλικός δίσκος από φελλό που έχει διάμετρο 8 cm και άσημαντο πάχος. Πάνω από τό κέντρο του δίσκου και σε απόσταση 4 cm υπάρχει μία σημειακή φωτεινή πηγή. Πόση είναι η διάμετρος του σκοτεινού κύκλου που σχηματίζεται στον πυθμένα του δοχείου;

128. Μιά μονοχρωματική ακτίνα πέφτει πλάγια πάνω σε μία γυάλινη πλάκα, που έχει δείκτη διαθλάσεως n . Ποιά σχέση πρέπει να ισχύει, για να είναι η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα κάθετες μεταξύ τους;
Έφαρμογή $n = 1,5$. $\epsilon\phi\ 57^\circ = 1,5$.

129. Μιά φωτεινή ακτίνα μπαίνοντας από τον αέρα μέσα σε μία πλάκα σχηματίζει γωνία προσπτώσεως π και γωνία διαθλάσεως δ . Αν τό πάχος της πλάκας είναι d , να βρεθεί ότι η παράλληλη μετατόπιση a της φωτεινής ακτίνας δίνεται από την εξίσωση:

$$a = d \cdot \frac{\eta\mu(\pi - \delta)}{\sigma\upsilon\nu \delta}$$

130. Μιά φωτεινή ακτίνα περνάει μέσα από πρίσμα που έχει διαθλαστική γωνία $A = 60^\circ$ και δείκτη διαθλάσεως $n = \sqrt{2}$. Πόση είναι η γωνία ελάχιστης έκτροπης;

131. Ένα πρίσμα έχει διαθλαστική γωνία $A = 45^\circ$ και δείκτη διαθλάσεως $n = 1,5$. Η φωτεινή ακτίνα σχηματίζει γωνία προσπτώσεως $\pi_1 = 30^\circ$. Πόση είναι η γωνία έκτροπης;

132. Η κύρια τομή πρίσματος είναι ισόπλευρο τρίγωνο $AB\Gamma$. Μιά φωτεινή ακτίνα πέφτει κάθετα πάνω στην έδρα AB . Να κατασκευαστεί η πορεία της ακτίνας και να βρεθεί πόση είναι η γωνία έκτροπης, αν ο δείκτης διαθλάσεως του πρίσματος είναι $n = \sqrt{2}$.

133. Ένα λεπτό γυάλινο πρίσμα έχει διαθλαστική γωνία $A_1 = 5^\circ$, δείκτη διαθλάσεως $n_1 = 1,52$ και βρίσκεται σε έπαφή με ένα άλλο γυάλινο πρίσμα που έχει δείκτη διαθλάσεως $n_2 = 1,63$. Μιά φωτεινή ακτίνα, όταν πέφτει κάθετα πάνω στην έδρα του ενός πρίσματος, βγαίνει από την έδρα του άλλου πρίσματος χωρίς να πάθει έκτροπή. Πόση είναι η διαθλαστική γωνία A_2 του άλλου πρίσματος;

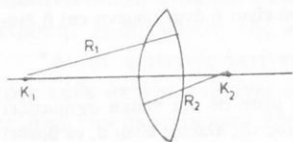
134. Μιά φωτεινή ακτίνα πέφτει κάθετα πάνω στη μία έδρα πρίσματος, που έχει διαθλαστική γωνία A και βγαίνει στον αέρα από την άλλη έδρα του πρίσματος σχηματίζοντας με την κάθετο στην έδρα γωνία π_2 . Να βρεθεί ο δείκτης διαθλάσεως n του πρίσματος.
Έφαρμογή $A = 30^\circ$. $\pi_2 = 45^\circ$.

135. Πόση πρέπει να είναι η διαθλαστική γωνία A ενός πρίσματος που έχει δείκτη διαθλάσεως $n = 1,75$, για να μη μπορεί η φωτεινή ακτίνα να βγει από την άλλη έδρα του πρίσματος στον αέρα; $\eta\mu 35^\circ \approx 0,571$.

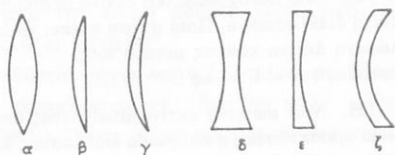
Σφαιρικοί φακοί

85. Φακοί

α. Όρισμοί. Ονομάζουμε *φακό* ένα διαφανές μέσο (συνήθως γυαλί), που περιορίζεται από δύο σφαιρικές επιφάνειες ή από μία σφαιρική και μία επίπεδη επιφάνεια (σχ. 134). Οι ακτίνες καμπυλότητας (R_1, R_2) των σφαιρικών επιφανειών ονομάζονται *ακτίνες καμπυλότητας* του φακού. Τά κέντρα καμπυλότητας K_1, K_2 των σφαιρικών επιφανειών ονομάζονται *κέντρα καμπυλότητας* του φακού. Η εϋθεια K_1K_2 που περνάει από τά δύο κέντρα



Σχ. 134. Σφαιρικός φακός (R_1, R_2 , ακτίνες καμπυλότητας, K_1, K_2 κέντρα καμπυλότητας).



Σχ. 135. Σφαιρικοί φακοί (α, β, γ, συγκεντρωτικοί, δ, ε, ζ άποκεντρωτικοί φακοί).

καμπυλότητας, ονομάζεται *κύριος άξονας* του φακού.

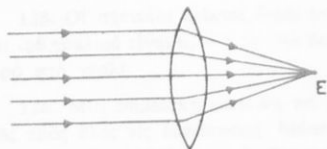
Στήν παρακάτω μελέτη των φακών δεχόμαστε ότι ισχύουν οι εξής συνθήκες :

α) Ὁ φακός βρίσκεται μέσα στον *άερα*, πού ὁ δείκτης διαθλάσεώς του είναι κατά προσέγγιση ἴσος μέ τή μονάδα ($n_{αε\rho} = 1$).

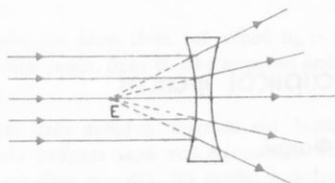
β) Οἱ φωτεινές ακτίνες πού πέφτουν στό φακό βρίσκονται *πολύ κοντά* στον κύριο άξονα (κεντρικές ακτίνες).

γ) Τό φῶς πού πέφτει στό φακό είναι *μονοχρωματικό*.

β. Συγκεντρωτικοί καί άποκεντρωτικοί φακοί. Ἐπό τό συνδυασμό δύο σφαιρικῶν ἐπιφανειῶν ἢ μιᾶς σφαιρικῆς καί μιᾶς ἐπίπεδης ἐπιφάνειας προκύπτουν ἐξί εἶδη φακῶν (σχ. 135). Οἱ φακοί πού εἶναι παχύτεροι στή μέση καί λεπτότεροι στίς ἄκρες ονομάζονται *συγκεντρωτικοί* (ἢ *συγκλίνοντες*) φακοί, γιατί μεταβάλλουν σέ συγκλίνουσα δέσμη μιά παράλληλη δέσμη φωτεινῶν ακτίνων πού πέφτει πάνω τους (σχ. 136). Ἐντίθετα οἱ φακοί, πού εἶναι λεπτότεροι στή μέση καί παχύτεροι στίς ἄκρες, ονομάζονται *άποκεντρωτικοί* (ἢ *ἀποκλίνοντες*) φακοί, γιατί μεταβάλλουν σέ ἀποκλίνουσα δέσμη μιά παράλληλη δέσμη φωτεινῶν ακτίνων πού πέφτει πάνω τους (σχ. 137).

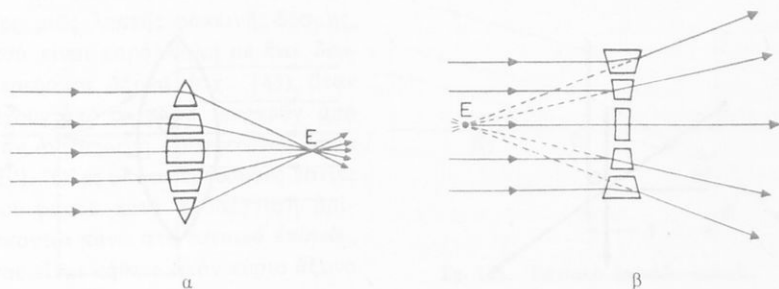


Σχ. 136. Ἡ κύρια ἐστία (E) τοῦ συγκεντρωτικοῦ φακού.



Σχ. 137. Ἡ κύρια ἐστία (E) στόν άποκεντρωτικό φακό εἶναι φανταστική.

Ἐταν ἕνας συγκεντρωτικός φακός βρίσκεται μέσα σέ περιβάλλον ὀπτικά πικνότερο ἀπό τόν φακό συμπεριφέρεται σάν άποκεντρωτικός καί αντίστροφα.

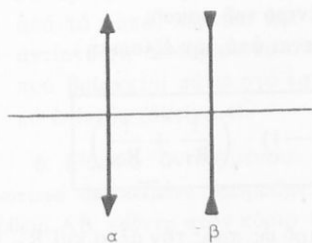


Σχ. 138. Ξεήγηση της ιδιότητας των φακών να σχηματίζουν συγκλίνουσα (α) ή αποκλίνουσα (β) δέσμη.

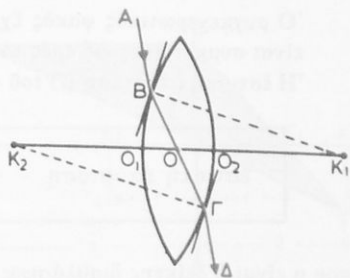
Ἡ ιδιότητα αὐτὴ τῶν φακῶν ἐρμηνεύεται, ἂν θεωρήσουμε ὅτι ὁ φακὸς ἀποτελεῖται ἀπὸ μικρὰ τμήματα πρισμάτων, ποὺ οἱ διαθλαστικὲς γωνίες τους (A) μεταβάλλονται συνεχῶς, ὅσο προχωροῦμε ἀπὸ τὸν κύριον ἄξονα πρὸς τὶς ἄκρες τοῦ φακοῦ (σχ. 138).

Τὸ πάχος τῶν φακῶν ποὺ συνήθως χρησιμοποιοῦμε, ὅταν τὸ μετρῶμε κατὰ μῆκος τοῦ κύριου ἄξονα, εἶναι πολὺ μικρὸ σχετικὰ μὲ τὶς ἀκτίνες κάμψης. Αὐτοὶ οἱ φακοὶ ὀνομάζονται *λεπτοὶ φακοὶ* καὶ γραφικὰ παριστάνονται ὅπως δείχνει τὸ σχῆμα 139.

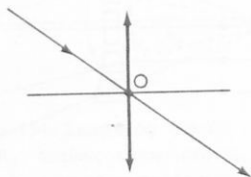
γ. Ὀπτικὸ κέντρο τοῦ φακοῦ. Ὁ κύριος ἄξονας τοῦ φακοῦ τέμνει τὶς δύο σφαιρικὲς ἐπιφάνειες σὲ δύο σημεῖα O_1 καὶ O_2 (σχ. 140). Στους λεπτοὺς φακοὺς θεωροῦμε ὅτι αὐτὰ τὰ δύο σημεῖα συμπίπτουν σὲ ἓνα σημεῖο O τοῦ κύριου ἄξονα (σχ. 141). Αὐτὸ τὸ σημεῖο ὀνομάζεται *ὀπτικὸ κέντρο* τοῦ φακοῦ καὶ ἔχει τὴν ἐξῆς ιδιότητα :



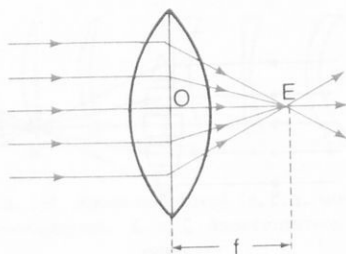
Σχ. 139. Σχηματικὴ παράσταση τῶν λεπτῶν φακῶν (α συγκεντρωτικός, β ἀποκεντρωτικός φακός).



Σχ. 140. Ἡ ἀκτὴν ποὺ περνᾷ ἀπὸ τὸ ὀπτικὸ κέντρο δὲν παθαίνει ἐκτροπή.



Σχ. 141. Δευτερεύων άξονας φακού.



Σχ. 142 'Εστιακή απόσταση (f) του φακού.

Μιά φωτεινή άκτινα, πού περνάει από τό όπτικό κέντρο, βγαίνει από τό φακό χωρίς έκτροπή.

Κάθε ευθεία, πού περνάει από τό όπτικό κέντρο (έκτός από τόν κύριο άξονα) όνομάζεται *δευτερεύων άξονας* του φακού (σχ. 141).

86. Συγκεντρωτικοί φακοί

α. Κύρια έστία. Έστιακή απόσταση. Σέ ένα συγκεντρωτικό φακό πέφτει μία φωτεινή δέσμη παράλληλη μέ τόν κύριο άξονα (σχ. 142). Όλες οί άκτινες πού βγαίνουν από τό φακό περνούν από ένα σημείο E του κύριου άξονα, πού όνομάζεται *κύρια έστία* του φακού. Η απόσταση της κύριας έστίας από τό όπτικό κέντρο όνομάζεται *έστιακή απόσταση* (f) του φακού. Αυτή είναι *σταθερή* και *ανεξάρτητη* από τή φορά των φωτεινών άκτινων πού πέφτουν στό φακό. Όστε :

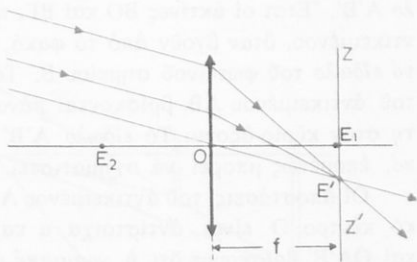
Ό συγκεντρωτικός φακός έχει δύο πραγματικές κύριες έστίες (E), πού είναι συμμετρικές ως προς τό όπτικό κέντρο του φακού.

Η έστιακή απόσταση (f) του φακού δίνεται από τήν εξίσωση :

$$\text{έστιακή απόσταση} \quad \frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

όπου n είναι ό δείκτης διαθλάσεως του γυαλιού ως προς τόν άέρα και R_1, R_2 είναι οί άκτινες καμπυλότητας του φακού. Αν ή μία επιφάνεια του φακού είναι επίπεδη, τότε είναι $R_2 = \infty$ (άρα $1/R_2 = 0$). Τά R_1 και R_2 έχουν θετική τιμή, όταν αντίστοιχούν σέ *κυρτές* επιφάνειες των φακών.

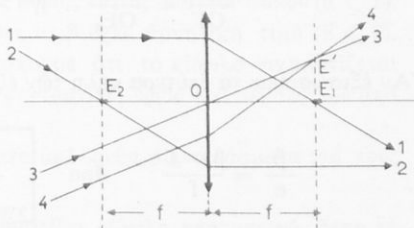
β. Έστιακό επίπεδο. Οί άκτινες μιάς λεπτής φωτεινής δέσμης, πού είναι παράλληλη μέ ένα δευτερεύοντα άξονα (σχ. 143), όταν βγουν από τό φακό, περνούν από τήν αντίστοιχη δευτερεύουσα έστία (E'). Όλες οί δευτερεύουσες έστιες του φακού κατά προσέγγιση βρίσκονται πάνω στο έστιακό επίπεδο, πού είναι κάθετο στον κύριο άξονα στο σημείο E .



Σχ. 143. Έστιακό επίπεδο φακού.

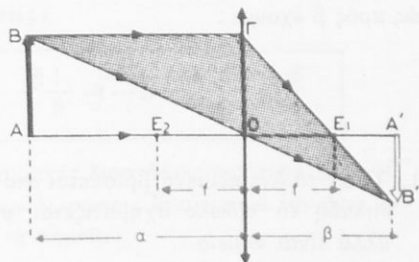
γ. Πορεία μερικων άκτινων πού περνούν μέσα από συγκεντρωτικό φακό. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά ακόλουθα συμπεράσματα σχετικά μέ τήν πορεία ορισμένων άκτινων (σχ. 144), πού περνούν μέσα από συγκεντρωτικό φακό :

1. Μιά άκτινα παράλληλη μέ τόν κύριο άξονα, όταν βγει από τό φακό, περνάει από τήν κύρια έστία (άκτινα 1).
2. Μιά άκτινα πού περνάει από τήν κύρια έστία, όταν βγει από τό φακό, είναι παράλληλη μέ τόν κύριο άξονα (άκτινα 2).
3. Μιά άκτινα, όταν περνάει από τό οπτικό κέντρο, βγαίνει από τό φακό χωρίς έκτροπή (άκτινα 3).
4. Μιά άκτινα παράλληλη μέ ένα δευτερεύοντα άξονα, όταν βγει από τό φακό, περνάει από τήν αντίστοιχη δευτερεύουσα έστία, πού βρίσκεται πάνω στο έστιακό επίπεδο (άκτινα 4).



Σχ. 144. Πορεία μερικων άκτινων πού περνούν μέσα από συγκεντρωτικό φακό.

δ. Είδωλο αντικειμένου. Ός φωτεινό αντικείμενο θεωρούμε μία εϋθεια AB , κάθετη στον κύριο άξονα (σχ. 145). Έπειδή ξέρουμε τήν πορεία ορισμένων άκτινων, μπορούμε να κατασκευάσουμε τό είδω-



Σχ. 145. Πραγματικό είδωλο ($A'B'$) ενός αντικειμένου (AB).

λο $A'B'$. Έτσι οι ακτίνες BO και $B\Gamma$, πού φεύγουν από την άκρη B του αντικειμένου, όταν βγούν από τό φακό, τέμνονται στό σημείο B' , πού είναι τό είδωλο τοῦ φωτεινοῦ σημείου B . Τά είδωλα ὄλων τῶν ἄλλων σημείων τοῦ αντικειμένου AB βρίσκονται πάνω στήν εὐθεία $A'B'$, πού είναι κάθετη στόν κύριο ἄξονα. Τό είδωλο $A'B'$ είναι ἀντιστραμμένο καί πραγματικό, ἐπομένως μπορεῖ νά σχηματιστεῖ πάνω σέ διάφραγμα.

Οἱ ἀποστάσεις τοῦ αντικειμένου AB καί τοῦ ειδώλου $A'B'$ ἀπό τό ὀπτικό κέντρο O εἶναι ἀντίστοιχα α καί β . Ἀπό τά ὅμοια τρίγωνα OAB καί $OA'B'$ βρίσκουμε ὅτι ἡ γραμμική μεγέθυνση εἶναι :

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{OA'}{OA} \quad \text{ἢ} \quad \boxed{\frac{A'B'}{AB} = \frac{\beta}{\alpha}} \quad (1)$$

Ἀπό τά ὅμοια τρίγωνα GOE_1 καί $A'B'E_1$ βρίσκουμε :

$$\frac{A'B'}{OG} = \frac{E_1A'}{OE_1} \quad \text{ἢ} \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{\beta - f}{f} \quad (2)$$

Ἄν ἐξισώσουμε τά δεύτερα μέλη τῶν ἐξισώσεων (1) καί (2), ἔχουμε :

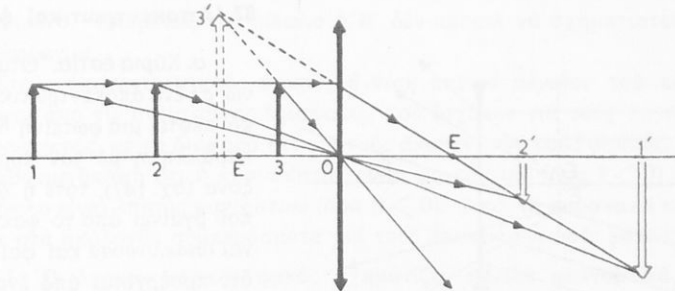
$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\beta - f}{f} \quad \text{ἄρα} \quad \boxed{\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}} \quad (3)$$

Ἡ ἐξίσωση (1) προσδιορίζει τό μέγεθος τοῦ ειδώλου καί ἡ ἐξίσωση (3) προσδιορίζει τή θέση τοῦ ειδώλου.

ε. Πραγματικό ἢ φανταστικό είδωλο. Ἄν λύσουμε τήν ἐξίσωση (3) ὡς πρός β ἔχουμε :

$$\beta = \frac{\alpha f}{\alpha - f} \quad \text{ἢ} \quad \beta = \frac{f}{1 - \frac{f}{\alpha}} \quad (4)$$

1. Ὄταν τό αντικείμενο βρίσκεται στό ἄπειρο ($\alpha = \infty$), τότε εἶναι $\beta = f$, δηλαδή τό είδωλο σχηματίζεται στήν κούρια ἐστία, εἶναι πραγματικό, ἀλλά εἶναι σημείο.
2. Τό αντικείμενο βρίσκεται πέρα ἀπό τήν κούρια ἐστία ($\alpha > f$). Τότε τό είδωλο σχηματίζεται πέρα ἀπό τήν ἄλλη κούρια ἐστία ($\beta > f$) καί εἶναι πραγματικό καί ἀντιστραμμένο (σχ. 146).



Σχ. 146. Ο συγκεντρωτικός φακός σχηματίζει είδωλο πραγματικό (1', 2') και είδωλο φανταστικό (3').

3. Τό αντικείμενο βρίσκεται στην κύρια έστια ($a = f$). Τότε τό είδωλο σχηματίζεται στό άπειρο ($\beta = \infty$), δηλαδή σ' αυτή τήν περίπτωση δέν υπάρχει είδωλο.
4. Τό αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ τής κύριας έστιας καί τοῦ φακοῦ ($a < f$). Ἀπό τήν εξίσωση (4) βρίσκουμε ὅτι τό β ἔχει ἄρνητική τιμή ($\beta < 0$). Μέ τή γεωμετρική κατασκευή βρίσκουμε ὅτι τό είδωλο σχηματίζεται πρὸς τό ἴδιο μέρος τοῦ φακοῦ, εἶναι φανταστικό, ὄρθιο καί μεγαλύτερο ἀπό τό αντικείμενο.

Ἀπό τά παραπάνω καταλήγουμε στά ἀκόλουθα συμπεράσματα γιά τούς συγκεντρωτικούς φακοῦς :

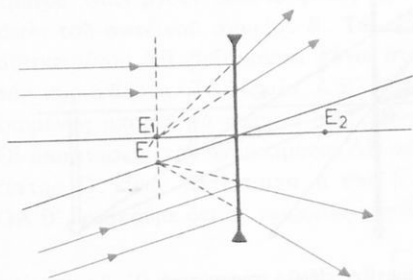
I. Ὁ συγκεντρωτικός φακός σχηματίζει είδωλο πραγματικό, ὅταν τό αντικείμενο βρίσκεται πέρα ἀπό τήν κύρια έστια ($a > f$), ἐνῶ σχηματίζει είδωλο φανταστικό, ὅταν τό αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ τής κύριας έστιας καί τοῦ φακοῦ ($a < f$).

II. Ἡ θέση καί τό μέγεθος τοῦ ειδώλου προσδιορίζονται σέ ὄλες τίς περιπτώσεις ἀπό τίς ἐξῆς εξισώσεις :

συγκεντρωτικοί φακοί	$\frac{1}{a} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \quad \frac{E}{A} = \frac{\beta}{a}$
----------------------	---

ὅπου E καί A εἶναι ἀντίστοιχα οἱ γραμμικές διαστάσεις τοῦ ειδώλου A'B' καί τοῦ αντικειμένου AB. Οἱ παραπάνω εξισώσεις ἰσχύουν μέ τόν ὄρο νά δεχτοῦμε τήν ἐξῆς σύμβαση ὡς πρὸς τά σημεῖα :

- a θετικό : αντικείμενο πραγματικό
- β θετικό : είδωλο πραγματικό
- β ἄρνητικό : είδωλο φανταστικό.



Σχ. 147. Κύρια έστία (E) και έστιακό επίπεδο σε αποκλίνοντα φακό.

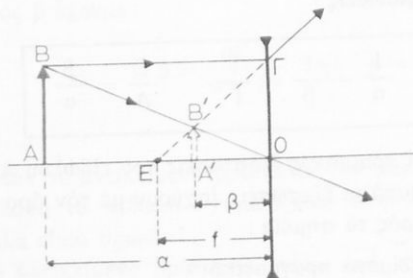
Ὁ αποκεντρωτικός φακός έχει δύο φανταστικές κύριες έστίες (E) πού είναι συμμετρικές ως προς τό όπτικό κέντρο του φακού.

Ἡ έστιακή απόσταση (f) του φακού είναι άρνητική και προσδιορίζεται από την εξίσωση :

$$\text{έστιακή απόσταση} \quad \frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left(\frac{1}{-R_1} + \frac{1}{-R_2} \right)$$

Τά R_1 και R_2 έχουν άρνητική τιμή, όταν αντιστοιχούν σε κοίλες επιφάνειες των φακών. Στόν αποκεντρωτικό φακό και οί δευτερεύουσες έστίες είναι φανταστικές και βρίσκονται πάνω σε δύο έστιακά επίπεδα φανταστικά.

β. Είδωλο άντικειμένου. Ὡς φωτεινό άντικείμενο θεωρούμε μία εϋθεια AB κάθετη στόν κύριο άξονα. Ἐπειδή ξέρουμε την πορεία όρισμένων άκτινων, μπορούμε νά κατασκευάσουμε τό είδωλο A'B' (σχ. 148). Οί άκτίνες BΓ και BO, πού προέρχονται από την άκρη B του άντικειμένου, όταν βγούν από τό φακό, φαίνεται ότι προέρχονται από τό σημείο B', πού είναι τό είδωλο του φωτεινού σημείου B. Τό είδωλο A'B' είναι κάθετο στόν κύριο άξονα, φανταστικό, όρθιο και μικρότερο από τό



Σχ. 148. Φανταστικό είδωλο (A'B') ενός άντικειμένου (AB).

άντικείμενο. Έπομένως το είδωλο Α'Β' δέν μπορεί νά σχηματιστεί πάνω σέ διάφραγμα.

Στούς άποκεντρωτικούς φακούς ή θέση και τό μέγεθος του είδώλου δίνονται από τίς αντίστοιχες εξισώσεις, πού ισχύουν γιά τούς συγκεντρωτικούς φακούς, μέ τή διαφορά ότι γιά τούς άποκεντρωτικούς φακούς, πρέπει νά λάβουμε υπόψη ότι ή κύρια έστία είναι φανταστική (άρα $f < 0$) και ότι τό είδωλο είναι επίσης φανταστικό (άρα $\beta < 0$). Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά ακόλουθα συμπεράσματα γιά τούς άποκεντρωτικούς φακούς :

I. Ο άποκεντρωτικός φακός σχηματίζει είδωλο φανταστικό, όρθιο και μικρότερο από τό αντικείμενο. Τό είδωλο σχηματίζεται πάντοτε μεταξύ του φακού και της φανταστικής κύριας έστίας του.

II. Η θέση και τό μέγεθος του είδώλου προσδιορίζονται από τίς εξισώσεις :

$$\text{άποκεντρωτικοί φακοί} \quad \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} = -\frac{1}{f} \quad \frac{E}{A} = -\frac{\beta}{\alpha}$$

88. Γενικές εξισώσεις τών φακών

Αν α και β είναι αντίστοιχα οί απόστάσεις του αντικειμένου και του είδώλου από τό φακό (συγκεντρωτικό ή άποκεντρωτικό), E και A είναι αντίστοιχα οί γραμμικές διαστάσεις του είδώλου και του αντικειμένου (πού είναι κάθετο στον κύριο άξονα) και τέλος R_1 και R_2 είναι οί άκτινες καμπυλότητας του φακού, τότε γιά όλες τίς δυνατές περιπτώσεις ισχύουν οί ακόλουθες γενικές εξισώσεις τών φακών :

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \quad \frac{E}{A} = \frac{\beta}{\alpha}$$

Γιά τίς παραπάνω εξισώσεις ισχύει ή έξής σύμβαση : θεωρούμε άρνητικά τά μεγέθη α , β , f , όταν αντιστοιχούν σέ σημεία φανταστικά, και τίς άκτινες καμπυλότητας R_1 , R_2 , όταν αντιστοιχούν σέ κοίλες επιφάνειες. Έτσι γιά πραγματικό αντικείμενο ($\alpha > 0$) έχουμε τίς έξής περιπτώσεις :

$$\left. \begin{array}{l} \text{συγκεντρωτικός φακός} \\ (R_1 > 0, R_2 > 0, f > 0) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \\ \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{είδωλο πραγματικό} \\ (\alpha > f, \beta > 0) \\ \text{είδωλο φανταστικό} \\ (\alpha < f, \beta < 0) \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{άποκεντρωτικός φακός} \\ (R_1 < 0, R_2 < 0, f < 0) \end{array} \right\} \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\beta} = -\frac{1}{f} \quad \begin{array}{l} \text{είδωλο φανταστικό} \\ (\alpha > 0, \beta < 0) \end{array}$$

Παράδειγμα. Ἀμφίκυρτος φακός ἔχει δείκτη διαθλάσεως $n = 1,5$ καὶ ἀκτίνες καμπυλότητας $R_1 = 40 \text{ cm}$ καὶ $R_2 = 60 \text{ cm}$. Σὲ ἀπόσταση $a = 40 \text{ cm}$ ἀπὸ τὸ φακὸ τοποθετεῖται φωτεινὴ εὐθεῖα, πού ἔχει μῆκος $A = 5 \text{ cm}$. Θὰ προσδιορίσουμε τὴ θέση (β) καὶ τὸ μέγεθος (E) τοῦ εἰδώλου. Οἱ δύο ἐπιφάνειες τοῦ φακοῦ εἶναι κυρτές, ἄρα οἱ ἀκτίνες καμπυλότητας εἶναι θετικές. Ἡ ἔστιακή ἀπόσταση (f) τοῦ φακοῦ βρίσκεται ἀπὸ τὴν ἐξίσωση :

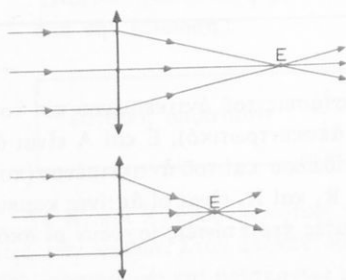
$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = (1,5-1) \cdot \left(\frac{1}{40 \text{ cm}} + \frac{1}{60 \text{ cm}} \right) \quad \text{καὶ} \quad f = 48 \text{ cm}$$

Δίνεται ὅτι εἶναι $a < f$. Ἄρα τὸ εἶδωλο εἶναι φανταστικόν. Αὐτὸ φαίνεται καὶ ὅταν υπολογίσουμε τὴν ἀπόσταση β τοῦ εἰδώλου ἀπὸ τὸ φακόν. Ἀπὸ τὴν ἐξίσωση :

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \quad \text{βρίσκουμε} \quad \beta = \frac{a \cdot f}{a-f} = \frac{40 \text{ cm} \cdot 48 \text{ cm}}{(40-48) \text{ cm}} \quad \text{καὶ} \quad \beta = -240 \text{ cm}$$

Τὸ μέγεθος τοῦ εἰδώλου (κατὰ ἀπόλυτη τιμὴ) εἶναι :

$$E = A \cdot \frac{\beta}{a} = 5 \text{ cm} \cdot \frac{240 \text{ cm}}{40 \text{ cm}} \quad \text{καὶ} \quad E = 30 \text{ cm}$$



Σχ. 149. Γιά τὸν ὀρισμὸ τῆς ἰσχύος τοῦ φακοῦ.

89. Ἴσχύς φακοῦ

Σὲ ἓνα συγκεντρωτικόν φακόν πέφτει φωτεινὴ δέσμη παράλληλη μὲ τὸν κύριον ἄξονα (σχ. 149). Ὁ φακός μετατρέπει αὐτὴ τὴ δέσμη σὲ τόσο περισσότερη συγκλίνουσα, ὅσο μικρότερη εἶναι ἡ ἔστιακή ἀπόσταση (f) τοῦ φακοῦ. Ὀνομάζεται ἰσχύς (I) ἑνὸς φακοῦ τὸ ἀντίστροφο τῆς ἔστιακῆς ἀποστάσεώς του (f).

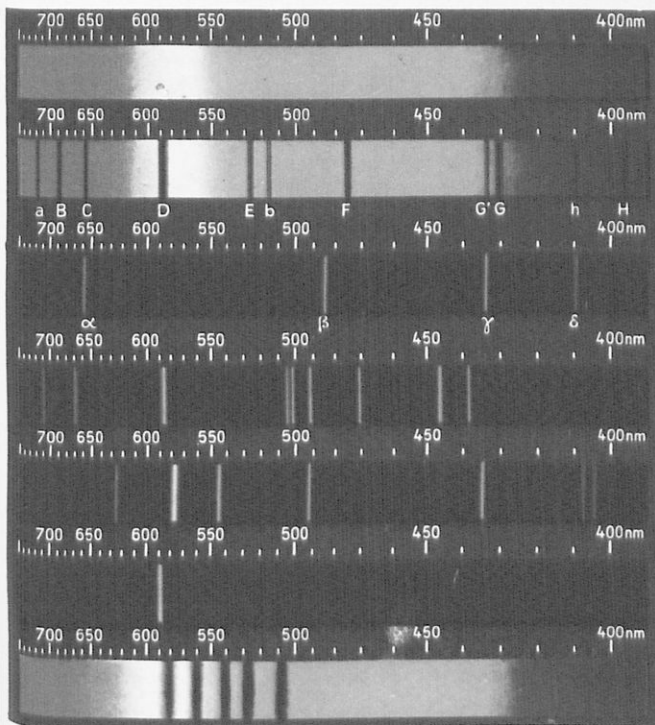
$$\text{ἰσχύς φακοῦ} \quad I = \frac{1}{f}$$

Ἡ ἰσχύς εἶναι θετικὴ στοὺς συγκεντρωτικούς φακοὺς καὶ ἀρνητικὴ στοὺς ἀποκεντρωτικούς. Στὸ σύστημα SI μονάδα ἰσχύος εἶναι ἡ *διοπτρία* (1 dpt), πού ὀρίζεται ὡς ἑξῆς :

Διοπτρία (1 dpt) εἶναι ἡ ἰσχύς φακοῦ, πού ἔχει ἔστιακή ἀπόσταση (f) ἴση μὲ ἓνα μέτρο (1 m).

$$1 \text{ διοπτρία (1 dpt)} = \frac{1}{1 \text{ m}} \quad \text{ἢ} \quad 1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$$

Α. Φάσμα που δίνει το πρίσμα



Λαμπτήρας
πυρακτώσεως

Ήλιακό φάσμα

Ύδρογόνο
H

Ήλιο
He

Ύδράργυρος
Hg

Νάτριο
Na

Φάσμα απορροφήσεως
από υπερμαγνητικό
κάλιο

Φάσματα έκπομπής και απορροφήσεως.

Οι διαιρέσεις της κλίμακας δείχνουν τα μήκη κύματος ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$)

Έτσι π.χ. συγκεντρωτικός φακός, πού έχει έστιακή απόσταση $f = 20$ cm, έχει ισχύ :

$$I = \frac{1}{f} \hat{=} \frac{1}{0,20 \text{ m}} \quad \text{καί} \quad I = 5 \text{ dpt}$$

90. Σύστημα λεπτῶν φακῶν

Όταν πολλοί λεπτοί φακοί έχουν τόν ίδιο κύριο άξονα καί βρίσκονται σέ έπαφή, τότε αὐτοί οί φακοί άποτελοῦν ένα σύστημα φακῶν, πού ή ισχύς του ($I_{ολ}$) εἶναι ίση μέ τό άλγεβρικό άθροισμα τῶν ισχύων ὄλων τῶν φακῶν τοῦ συστήματος, δηλαδή εἶναι :

$$I_{ολ} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

Ώστε τό σύστημα φακῶν ισοδυναμεῖ μέ ένα φακό, πού έχει έστιακή απόσταση $f_{ολ}$ καί ισχύ :

$$I_{ολ} = \frac{1}{f_{ολ}} \quad \text{άρα} \quad \boxed{\frac{1}{f_{ολ}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \dots + \frac{1}{f_v}}$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

136. Οί άκτίνες καμπυλότητας ενός φακού, πού έχει δείκτη διαθλάσεως $n = 1,5$ εἶναι $R_1 = 40$ cm καί $R_2 = 60$ cm. Πόση εἶναι ή έστιακή απόσταση f τοῦ φακού ;

137. Ἡ μιá άκτίνα καμπυλότητας άμφίκυρτου φακού εἶναι $R_1 = 15$ cm, ό δείκτης διαθλάσεως τοῦ φακού εἶναι $n = 1,5$ καί ή έστιακή απόστασή του εἶναι $f = 10$ cm. Πόση εἶναι ή άλλη άκτίνα καμπυλότητας R_2 τοῦ φακού ;

138. Σέ έναν άμφίκυρτο φακό οί δύο άκτίνες καμπυλότητας εἶναι ίσες μέ $R_1 = R_2 = 50$ cm. Ἡ έστιακή απόσταση τοῦ φακού γιά όρισμένη άκτινοβολία εἶναι $f = 45$ cm. Πόσος εἶναι ό δείκτης διαθλάσεως τοῦ γυαλιού γι' αὐτή τήν άκτινοβολία ;

139. Σέ πόση απόσταση από ένα συγκεντρωτικό φακό έστιακής άποστάσεως f πρέπει νά τοποθετήσουμε ένα άντικείμενο, γιά νά εἶναι τό εἶδωλο 3 φορές μεγαλύτερο από τό άντικείμενο ;

140. Ένα φωτεινό σημεῖο βρίσκεται πάνω στόν κύριο άξονα συγκεντρωτικού φακού έστιακής άποστάσεως 15 cm. Ἡ απόσταση τοῦ εἶδῶλου από τό φακό εἶναι κατά 80 cm μικρότερη από τήν απόσταση τοῦ άντικειμένου από τό φακό. Νά βρεθοῦν οί άποστάσεις τοῦ εἶδῶλου καί τοῦ άντικειμένου από τό φακό.

141. Σέ πόση απόσταση από συγκεντρωτικό φακό έστιακής άποστάσεως 15 cm πρέπει νά τοποθετήσουμε ένα άντικείμενο, ὥστε τό εἶδωλο πού σχηματίζεται νά έχει επιφάνεια 9 φορές μεγαλύτερη από τήν επιφάνεια τοῦ άντικειμένου ;

142. Μιά φωτεινή εὐθεία, πού ἔχει μήκος $AB = 2$ cm, βρίσκεται σέ ἀπόσταση $d = 1$ m ἀπό ἕνα διάφραγμα. Μεταξύ τῆς εὐθείας καί τοῦ διαφράγματος τοποθετοῦμε ἕνα συγκεντρωτικό φακό καί τότε στό διάφραγμα σχηματίζεται καθαρό εἶδωλο, ὅταν ὁ φακός βρίσκεται σέ δύο θέσεις πού ἀπέχουν $l = 40$ cm ἢ μιά ἀπό τήν ἄλλη. Πόση εἶναι ἡ ἔστιακή ἀπόσταση τοῦ φακοῦ καί πόσο εἶναι τό μήκος τῶν δύο εἰδώλων πού σχηματίζονται πάνω στό διάφραγμα;

143. Σέ ἀπόσταση 20 cm ἀπό ἀποκεντρωτικό φακό ἔστιακῆς ἀποστάσεως -12 cm τοποθετοῦμε ἀντικείμενο πού ἔχει μήκος $AB = 10$ cm. Νά βρεθεῖ ἡ θέση καί τό μέγεθος τοῦ εἰδώλου.

144. Πάνω σέ ἕναν ἀποκεντρωτικό φακό πέφτει μιά κυλινδρική δέσμη ἀκτίνων πού εἶναι παράλληλες μέ τόν κύριο ἄξονα τοῦ φακοῦ. Σέ ἀπόσταση 16 cm ἀπό τό φακό καί κάθετα στόν ἄξονά του φέρνουμε ἕνα διάφραγμα. Τότε πάνω στό διάφραγμα σχηματίζεται ἕνας φωτεινός κύκλος, πού ἡ διάμετρος του εἶναι 3 φορές μεγαλύτερη ἀπό τήν διάμετρο τῆς δέσμης πού πέφτει στό φακό. Πόση εἶναι ἡ ἔστιακή ἀπόσταση τοῦ φακοῦ;

145. Ἐνας συμμετρικός ἀμφίκυρτος φακός ἔχει δείκτη διαθλάσεως $n = 1,5$ καί ἐπιπλεῖ στήν ἐπιφάνεια ὑδραργύρου. Σέ ὕψος 25 cm πάνω ἀπό τό φακό εἶναι ἕνα φωτεινό σημεῖο A πού βρίσκεται πάνω στόν κύριο ἄξονα τοῦ φακοῦ. Τότε τό εἶδωλο σχηματίζεται στή θέση πού εἶναι καί τό σημεῖο A. Πόση εἶναι ἡ ἔστιακή ἀπόσταση τοῦ φακοῦ;

146. Μέ ἕνα φακό, πού ἔχει ἰσχύ 5 διοπτρίες, θέλουμε νά σχηματίσουμε πάνω σέ ἕναν τοῖχο (διάφραγμα) τό εἶδωλο A'B' ἑνός ἀντικειμένου AB καί τό μήκος τοῦ εἰδώλου νά εἶναι 20 φορές μεγαλύτερο ἀπό τό μήκος τοῦ ἀντικειμένου. Ὁ κύριος ἄξονας τοῦ φακοῦ εἶναι κάθετος στόν τοῖχο. Νά βρεθοῦν οἱ ἀποστάσεις τοῦ φακοῦ ἀπό τόν τοῖχο καί τοῦ ἀντικειμένου ἀπό τό φακό.

147. Ἐνα ἀντικείμενο ἔχει μήκος $AB = 10$ cm καί βρίσκεται σέ ἀπόσταση 40 cm ἀπό συγκεντρωτικό φακό Λ_1 , πού ἔχει ἔστιακή ἀπόσταση $f_1 = 30$ cm. Θέλουμε νά σχηματίσουμε τό εἶδωλο τοῦ ἀντικειμένου πάνω σέ διάφραγμα πού ἀπέχει 6 m ἀπό τό φακό Λ_1 . Αὐτό τό πετυχαίνουμε, ἂν φέρουμε σέ ἐπαφή μέ τό φακό Λ_1 ἕναν ἄλλο φακό Λ_2 , πού ἔχει ἔστιακή ἀπόσταση f_2 . Τί εἶδους φακός εἶναι ὁ Λ_2 καί πόση εἶναι ἡ ἔστιακή ἀπόστασή του; Πόσο εἶναι τό μέγεθος τοῦ εἰδώλου πού σχηματίζεται πάνω στό διάφραγμα;

148. Ἐχομε ἕνα συγκεντρωτικό φακό, ἔστιακῆς ἀποστάσεως 50 cm. Πάνω στόν κύριο ἄξονα τοῦ φακοῦ καί σέ ἀπόσταση 75 cm ἀπό τό φακό τοποθετοῦμε φωτεινό σημεῖο Σ καί πίσω ἀπό τό φακό σέ ἀπόσταση $d = 1$ m ἀπό αὐτόν τοποθετοῦμε ἕναν ἐπίπεδο καθρέφτη K κάθετα στόν κύριο ἄξονα τοῦ φακοῦ. α) Νά βρεθεῖ ἡ θέση τοῦ τελικοῦ εἰδώλου Σ' . β) Νά βρεθεῖ πού πρέπει νά τοποθετήσουμε τόν ἐπίπεδο καθρέφτη K, ὥστε τό τελικό εἶδωλο Σ' νά σχηματίζεται στή θέση πού βρίσκεται τό φωτεινό σημεῖο Σ .

149. Δύο συγκεντρωτικοί φακοί Λ_1 καί Λ_2 ἔχουν τόν ἴδιο κύριο ἄξονα, τήν ἴδια ἔστιακή ἀπόσταση $f = 2$ cm καί ἡ μεταξύ τους ἀπόσταση εἶναι d . Πάνω στόν πρῶτο φακό Λ_1 πέφτει μιά φωτεινή δέσμη παράλληλη μέ τόν κύριο ἄξονα τοῦ συστήματος τῶν δύο φακῶν. Νά βρεθεῖ ἡ θέση καί τό εἶδος τοῦ τελικοῦ εἰδώλου, ὅταν ἡ ἀπόσταση τῶν φακῶν εἶναι $d = 6$ cm καί $d = 3$ cm.

Όπτικά όργανα

91. Όπτικά όργανα. Μεγέθυνση.

Όσο μεγαλύτερο είναι το είδωλο που σχηματίζεται πάνω στον άμφιβληστροειδή, τόσο περισσότερες λεπτομέρειες του αντικειμένου διακρίνουμε. Ξέρουμε ότι το μέγεθος του ειδώλου είναι *ανάλογο* με τη φαινόμενη διάμετρο του αντικειμένου, και ότι η *μέγιστη δυνατή* φαινόμενη διάμετρος αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως. Για να αυξήσουμε ακόμη περισσότερο τη φαινόμενη διάμετρο, χρησιμοποιούμε διάφορα *οπτικά όργανα*, για τα όποια ισχύει ο ακόλουθος όρισμός :

Μεγέθυνση (M) ενός οπτικού οργάνου ονομάζεται ο λόγος της γωνίας (ω_2), με την οποία βλέπουμε μέσω του οργάνου το είδωλο (A'B'), προς τη γωνία (ω_1), με την οποία βλέπουμε το αντικείμενο (AB) με γυμνό μάτι, όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως.

$$\text{μεγέθυνση } M = \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

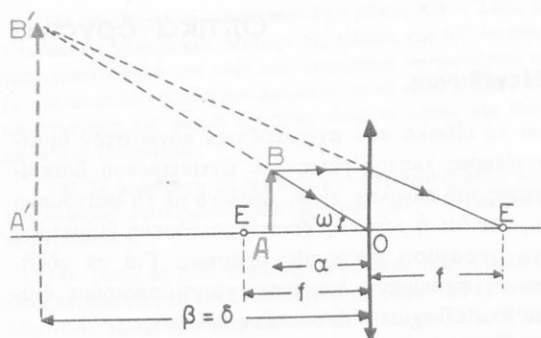
Η μεγέθυνση που όρισαμε είναι η *γωνιακή μεγέθυνση*. Ο λόγος των γραμμικών διαστάσεων του ειδώλου (A'B') και του αντικειμένου (AB) ονομάζεται *γραμμική μεγέθυνση* (γ).

$$\text{γραμμική μεγέθυνση } \gamma = \frac{A'B'}{AB}$$

Η γωνία ω_2 έχει *τη μεγαλύτερη τιμή*, όταν το είδωλο A'B' σχηματίζεται στην ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως (περίπου 25 cm).

92. Άπλό μικροσκόπιο

Το *άπλο μικροσκόπιο* (ή *μεγεθυντικός φακός*) είναι ένας συγκεντρωτικός φακός με μικρή έστιακή απόσταση f . Το αντικείμενο AB, που θέλουμε να παρατηρήσουμε, το τοποθετούμε μεταξύ της κύριας έστιας και του φακού (σχ. 150). Τότε το είδωλο A'B', που παρατηρούμε, είναι *φανταστικό, όρθιο* και *μεγαλύτερο* από το αντικείμενο. Η γωνία ω_2 , με την οποία



Σχ. 150. Σχηματική παράσταση του άπλου μικροσκοπίου.

βλέπουμε το είδωλο $A'B'$, έχει τη μεγαλύτερη τιμή, όταν το είδωλο σχηματίζεται στην ελάχιστη απόσταση ευκρινούς όρασεως (δ), δηλαδή όταν είναι $\beta = \delta$.

Τότε ισχύει η εξίσωση:

$$\frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\delta} = \frac{1}{f}$$

$$\text{Άρα } \alpha = \frac{f \cdot \delta}{f + \delta} \quad (1)$$

Η εξίσωση (1) καθορίζει σε πόση απόσταση από το φακό πρέπει να τοποθετηθεί το αντικείμενο AB , ώστε το είδωλο $A'B'$ να διακρίνεται καθαρά. Υποθέτουμε ότι το μάτι μας βρίσκεται σε επαφή με το φακό, ώστε το σύστημα μάτι - φακός να έχουν το ίδιο οπτικό κέντρο.

α. Ίσχύς του άπλου μικροσκοπίου. Όταν είναι $\beta = \delta$, το είδωλο φαίνεται καθαρά με τη γωνία ω (σχ. 150). Άρα μέσω του φακού ή μονάδα μήκους ενός αντικειμένου AB φαίνεται με τη γωνία ω/AB . Για όλα γενικά τα μικροσκόπια ισχύει ο ακόλουθος ορισμός:

Ίσχύς (I) του μικροσκοπίου ονομάζεται η γωνία, με την οποία βλέπουμε, μέσω του φακού, τη μονάδα μήκους του αντικειμένου.

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό ή ισχύς του άπλου μικροσκοπίου είναι:

$$\text{ισχύς άπλου μικροσκοπίου. } I = \frac{\omega}{AB} \quad (2)$$

Άπό την εξίσωση (2) βρίσκουμε ότι μονάδα ισχύος του μικροσκοπίου είναι:

$$\text{μονάδα ισχύος } \frac{1 \text{ rad}}{1 \text{ m}} = 1 \text{ m}^{-1} \quad \text{Άρα } 1 \text{ διοπτρία (1 dpt)}$$

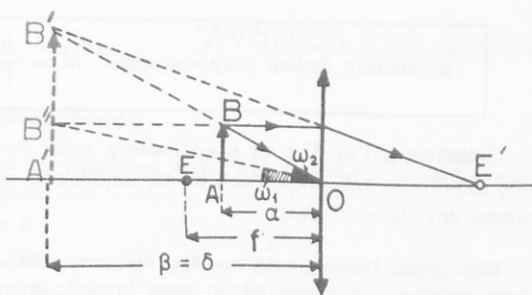
Στό όρθογώνιο τρίγωνο OAB είναι :

$$AB = OA \cdot \epsilon\phi \omega$$

Άν λάβουμε υπόψη ότι ή γωνία ω είναι πολύ μικρή και ή έστιακή απόσταση f είναι επίσης πολύ μικρή, τότε κατά μεγάλη προσέγγιση μπορούμενά λάβουμε :

$$AB = f \cdot \omega$$

Έπομένως από την έξιωση (2) βρίσκουμε ότι ή ισχύς του άπλοῦ μικροσκοπίου είναι :



Σχ. 151. Μεγέθυνση του άπλοῦ μικροσκοπίου. ($M = \omega / \omega_1$).

ισχύς άπλοῦ μικροσκοπίου $I = \frac{1}{f}$

β. Μεγέθυνση του άπλοῦ μικροσκοπίου. Όταν είναι $\beta = \delta$ (σχ. 151), οί γωνίες ω_2 και ω_1 είναι πολύ μικρές και από τά όρθογώνια τρίγωνα OAB και OA'B'' βρίσκουμε ότι είναι :

$$\omega_2 = \frac{AB}{OA} \quad \eta \quad \omega_2 = \frac{AB}{\alpha}$$

και
$$\omega_1 = \frac{A'B''}{OA'} \quad \eta \quad \omega_1 = \frac{AB}{\delta}$$

Όστε ή μεγέθυνση του άπλοῦ μικροσκοπίου είναι :

$$M = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad \eta \quad M = \frac{\delta}{\alpha} \tag{3}$$

Άν στην παραπάνω έξιωση αντικαταστήσουμε τό α από την έξιωση (1), βρίσκουμε ότι ή μεγέθυνση του άπλοῦ μικροσκοπίου είναι :

μεγέθυνση άπλοῦ μικροσκοπίου $M = 1 + \frac{\delta}{f}$ (4)

Έπειδή ή έστιακή απόσταση του φακού είναι πολύ μικρή, μπορούμε

νά θεωρήσουμε ότι είναι $a \simeq f$. Τότε από την εξίσωση (3) βρίσκουμε ότι κατά μεγάλη προσέγγιση ή μεγέθυνση του άπλου μικροσκοπίου είναι :

$$\text{μεγέθυνση άπλου μικροσκοπίου } M = \frac{\delta}{f} \quad \text{ή} \quad M = I \cdot \delta$$

Σημείωση. Για όλα τα μικροσκόπια κατά συνθήκη ονομάζουμε *έμπροσκή μεγέθυνση* του μικροσκοπίου τη μεγέθυνση που αντιστοιχεί στο κανονικό μάτι ($\delta = 25 \text{ cm}$).

Παράδειγμα. Παρατηρητής, που έχει ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως $\delta = 25 \text{ cm}$, παρατηρεί με συγκεντρωτικό φακό έστιακής απόστάσεως $f = 2 \text{ cm}$ αντικείμενο που έχει μήκος $AB = 2 \text{ mm}$.

Ή ισχύς του άπλου μικροσκοπίου είναι :

$$I = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,02 \text{ m}} \quad \text{καί} \quad I = 50 \text{ dpt}$$

Ή μεγέθυνση είναι :

$$M = \frac{\delta}{f} = \frac{25 \text{ cm}}{2 \text{ cm}} \quad \text{καί} \quad M = 12,5$$

$$\text{ή} \quad M = 1 + \frac{\delta}{f} = 1 + 12,5 \quad \text{καί} \quad M = 13,5$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

150. Ένας παρατηρητής έχει ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως 12 cm και χρησιμοποιεί ως άπλο μικροσκόπιο ένα συγκεντρωτικό φακό έστιακής απόστάσεως 4 cm . Ο φακός βρίσκεται σε έπαφή με τό μάτι του παρατηρητή. Πόση είναι ή μεγέθυνση γι' αυτόν τόν παρατηρητή και πόση είναι ή απόσταση του αντικειμένου από τό φακό ;

151. Ένας παρατηρητής έχει ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως 25 cm και χρησιμοποιεί ως άπλο μικροσκόπιο ένα συγκεντρωτικό φακό έστιακής απόστάσεως 5 cm . Πού πρέπει νά τοποθετηθεί τό αντικείμενο που παρατηρεί και πόση είναι ή μεγέθυνση ;

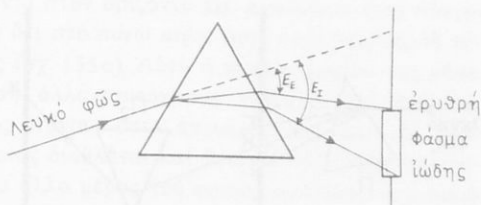
152. Ένας παρατηρητής, που έχει ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως 20 cm , χρησιμοποιεί ως άπλο μικροσκόπιο συγκεντρωτικό φακό που έχει ισχύ 12 διοπτρίες . Πόση είναι ή μεγέθυνση ; Ήν τό είδωλο που παρατηρεί έχει μήκος 4 cm , πόσο είναι τό μήκος του αντικειμένου ;

153. Ένας συγκεντρωτικός φακός έχει ισχύ 12 dpt και χρησιμοποιείται ως άπλο μικροσκόπιο από παρατηρητή που έχει ελάχιστη απόσταση εύκρινους όρασεως $\delta = 20 \text{ cm}$. Πόση είναι ή μεγέθυνση ; Ήν τό παρατηρούμενο είδωλο έχει μήκος $A'B' = 4 \text{ cm}$, πόσο είναι τό μήκος AB του αντικειμένου ;

Ἀνάλυση τοῦ φωτός

93. Ἀνάλυση τοῦ λευκοῦ φωτός

Πάνω σέ ἓνα πρίσμα ἀφήνουμε νά πέσει λεπτή δέσμη λευκοῦ φωτός (σχ. 152). Ἄν στήν πορεία τῶν ἀκτίνων πού βγαίνουν ἀπό τό πρίσμα βάλουμε ἓνα διάφραγμα, βλέπουμε ὅτι σχηματίζεται μιά *συνεχῆς ἔγχρωμη ταινία*, πού ὀνομάζεται *φάσμα*. Ἡ μετάβαση ἀπό τό ἓνα χρῶμα τοῦ φάσματος στό ἐπόμενο γίνεται ἀνεπαίσθητα. Κατά σειρά διακρίνουμε κυρίως τά ἑξῆς χρῶματα : ἐρυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό, βαθύ κυανό καί ἰώδες.



Σχ. 152. Ἀνάλυση τοῦ λευκοῦ φωτός μέ τό πρίσμα.

Τό φαινόμενο αὐτό ὀνομάζεται *ἀνάλυση* τοῦ φωτός καί δείχνει ὅτι τό λευκό φῶς εἶναι *σύνθετο*.

Κάθε χρῶμα τοῦ φάσματος ὀνομάζεται γενικά *ἀκτινοβολία* (π.χ. ἐρυθρή ἀκτινοβολία, κίτρινη ἀκτινοβολία κ.λ.). Τό φάσμα ἀποτελεῖται ἀπό ἓνα πολύ μεγάλο πλῆθος ἀκτινοβολιῶν. Ὡστε τό λευκό φῶς περνώντας μέσα ἀπό τό πρίσμα *ἀναλύεται* στίς ὁρατές ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος.

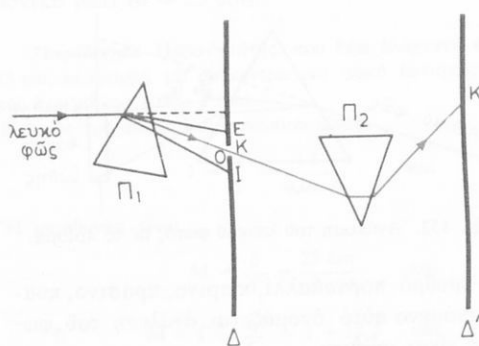
α. Ἐξήγηση τῆς ἀναλύσεως τοῦ φωτός. Στό *κενό* ὅλες οἱ ἀκτινοβολίες (δηλαδή οἱ ἀκτίνες ὅλων τῶν χρωμάτων τοῦ φάσματος) διαδίδονται *μέ τήν ἴδια ταχύτητα*. Μέσα ὁμως στά διάφορα *ὕλικά* (π.χ. τό γυαλί) οἱ ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος διαδίδονται *μέ διαφορετική ταχύτητα*. Ἔτσι κάθε ἀκτινοβολία ἔχει *ἰδιαίτερο* δείκτη διαθλάσεως. Στό παραπάνω πείραμα ὅλες οἱ ἀκτίνες τῆς δέσμης τοῦ λευκοῦ φωτός πέφτουν πάνω στό πρίσμα μέ τήν ἴδια γωνία προσπίψεως. Παρατηροῦμε ὅτι *τή μικρότερη* ἐκτροπή παρουσιάζει ἡ ἐρυθρή ἀκτινοβολία καί *τή μεγαλύτερη* ἡ ἰώδης ἀκτινοβολία. Ἐπειδή ξέρομε ὅτι ἡ γωνία ἐκτροπῆς εἶναι ἀνάλογη μέ τό δείκτη διαθλάσεως, καταλήγουμε στό συμπέρασμα ὅτι οἱ δείκτες διαθλάσεως, πού ἀντιστοιχοῦν στίς διάφορες ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος, *συνεχῶς αὐξάνουν*, ὅσο *προχωροῦμε* ἀπό τήν ἐρυθρή πρὸς τήν ἰώδη ἀκτινοβολία τοῦ φάσματος. Ἔτσι ὁ Νεύτωνας ἔδωσε τήν ἀκόλουθη ἐξήγηση στό φαινόμενο τῆς ἀναλύσεως τοῦ φωτός :

Τό λευκό φῶς ἀποτελεῖται ἀπό μεγάλο πλῆθος ἀκτινοβολιῶν καί σέ καθεμιά ἀπό αὐτές ἀντιστοιχεῖ ἰδιαίτερος δείκτης διαθλάσεως.

Ὅταν τό λευκό φῶς περνάει μέσα ἀπό τό πρίσμα, οἱ ἀκτινοβολίες διαχωρίζονται, γιατί καθεμιά ἀπό αὐτές παθαίνει διαφορετική ἐκτροπή.

94. Ἰδιότητες τῶν ἀκτινοβολιῶν τοῦ φάσματος

Στό διάφραγμα πού σχηματίζεται τό φάσμα (σχ. 153), δημιουργοῦμε μικρό ἄνοιγμα καί ἀφήνουμε

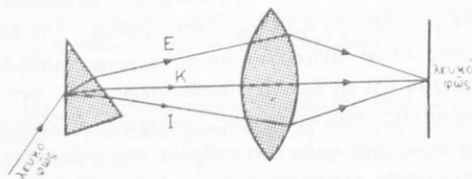


Σχ. 153 Κάθε ἀκτινοβολία τοῦ φάσματος εἶναι ἀπλή.

νά περάσει ἀπό αὐτό μόνο μιᾶ ἀκτινοβολία τοῦ φάσματος (π.χ. ἡ κίτρινη). Αὐτή ἡ ἀκτινοβολία πέφτει ἔπειτα πάνω σέ δεύτερο πρίσμα. Παρατηροῦμε ὅτι τό δεύτερο πρίσμα προκαλεῖ μόνο ἐκτροπή τῆς ἀκτινοβολίας, ὄχι ὅμως καί ἀνάλυσή της σέ ἄλλες ἀκτινοβολίες. Ὅστε κάθε ἀκτινοβολία τοῦ φάσματος εἶναι ἀπλή καί δέν ἀναλύεται σέ ἄλλες ἀπλούστερες.

Ἄν μέ ἓνα συγκεντρωτικό φακό συγκεντρώσουμε πάνω σέ διάφραγμα ὅλες τίς ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος, παίρνομε λευκό φῶς (σχ. 154). Ὅστε οἱ ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος, ὅταν συγκεντρωθοῦν, δίνουν λευκό φῶς.

Συμπληρωματικά χρώματα. Μέ ἓνα μικρό πρίσμα ἐκτρέπομε ἓνα ἀπό τά χρώματα τοῦ φάσματος, π.χ. τό ἐρυθρό καί συγκεντρώνομε τά υπόλοιπα χρώματα. Αὐτά δίνουν ἓνα πράσινο χρώμα, πού προέρχεται ἀπό τήν ἀνάμιξη τῶν υπόλοιπων χρωμάτων τοῦ φάσματος. Δύο χρώματα, ὅπως π.χ. τό ἐρυθρό καί τό πράσινο, πού, ὅταν ἀναμιγνύονται μέ ὀρισμένες ἀναλογίες, δίνουν λευκό φῶς, ὀνομάζονται **συμπληρωματικά χρώματα**. Κάθε χρώμα λοιπόν



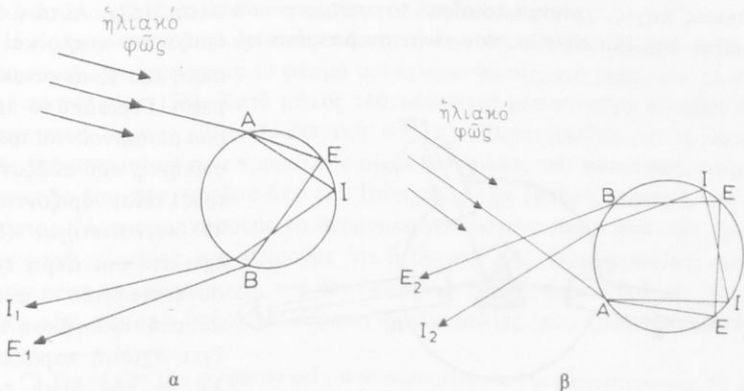
Σχ. 154. Ἄνασύνθεση τοῦ λευκοῦ φωτός.

τοῦ φάσματος εἶναι συμπληρωματικό τοῦ χρώματος πού προέρχεται ἀπό τήν ἀνάμιξη ὄλων τῶν ἄλλων χρωμάτων τοῦ φάσματος.

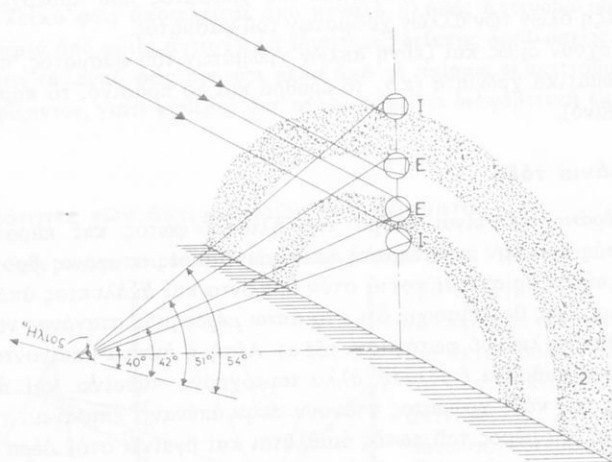
Ἐπὶ τούτων ὁμοίως καί ζεύγη ἀπλῶν χρωμάτων τοῦ φάσματος, πού εἶναι συμπληρωματικά χρώματα (π.χ. τό ἐρυθρό καί τό πράσινο, τό πορτοκαλλί καί τό κυανό).

95. Οὐράνιο τόξο

Τό οὐράνιο τόξο εἶναι φάσμα τοῦ ἡλιακοῦ φωτός καί παρατηρεῖται ὅταν ἐμπρός ἀπό τόν παρατηρητή ὑπάρχουν μικρές σταγόνες βροχῆς καί πίσω ἀπό αὐτόν βρίσκεται κοντά στόν ὀρίζοντα καί ἀκάλυπτος ἀπό σύννεφα ὁ ἥλιος. Ἄς θεωρήσουμε ὅτι στό πάνω μέρος μιᾶς σταγόνας νεροῦ πέφτει μιᾶ ἀκτίνα λευκοῦ φωτός (σχ. 155 α). Αὐτή ἡ ἀκτίνα μπαίνοντας μέσα στή σταγόνα παθαίνει διάθλαση, ἀλλά ταυτόχρονα παθαίνει καί ἀνάλωση. Οἱ ἀκτίνες τοῦ κάθε χρώματος φτάνουν στήν ἀπέναντι ἐπιφάνεια τῆς σταγόνας, ὅπου ἕνα μέρος τοῦ φωτός διαθλάται καί βγαίνει στόν ἀέρα (δέ σημειώνεται στό σχῆμα), καί ἕνα ἄλλο μέρος τοῦ φωτός ἀνακλάται καί ἀφοῦ διατρέξει πάλι τή σταγόνα, φτάνει στήν ἐμπρόσθια ἐπιφάνεια τῆς σταγόνας. Ἐκεῖ οἱ ἀκτίνες παθαίνουν νέα διάθλαση καί βγαίνουν στόν ἀέρα. Ὅπως δείχνει τό σχῆμα, οἱ ἐρυθρές ἀκτίνες E_1 , πού μπαίνουν στό μάτι μας, μᾶς φαίνεται ὅτι προέρχονται ἀπό σημεῖα α πού βρίσκονται ψηλότερα παρά τά σημεῖα ἀπό τά ὁποῖα μᾶς φαίνεται ὅτι προέρχονται οἱ ἰώδεις ἀκτίνες I_1 , πού φτάνουν στό μάτι μας. Ἔτσι στό πρωτεῦον οὐράνιο τόξο τό ἐρυθρό χρώμα φαίνεται πάνω ἀπό τό ἰώδες. Μερικές ἀπό τίς παράλληλες ἡλιακές ἀκτίνες πέφτουν στό κάτω μέρος τῶν σταγόνων (σχ. 155 β). Οἱ ἀκτίνες, πού



Σχ. 155. Γιά τήν ἐξήγηση τοῦ οὐράνιου τόξου.

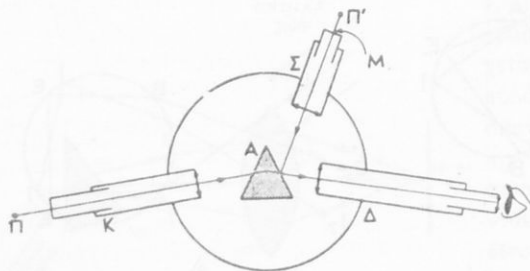


Σχ. 156. Τό πρωτευον (κάτω) καί τό δευτερευον (πάνω) οὐράνιο τόξο.

προκύπτουν ἀπό τήν ἀνάλυση τοῦ φωτός, παθαίνουν μέσα στή σταγόνα δύο ἀνακλάσεις καί ἔπειτα ξαναβγαίνουν στόν ἀέρα. Αὐτό τό φαινόμενο δημιουργεῖ τό δευτερευον οὐράνιο τόξο, στό ὁποῖο βλέπουμε τό ἴδιες χρώμα I_2 πάνω ἀπό τό ἐρυθρό E_2 (σχ. 156).

96. Φασματοσκόπιο

Γιά τή μελέτη τοῦ φάσματος τοῦ φωτός, πού ἐκπέμπουν οἱ διάφορες φωτεινές πηγές, χρησιμοποιοῦμε τό φασματοσκόπιο (σχ. 157). Αὐτό ἀποτελεῖται ἀπό ἕνα πρίσμα, πού εἶναι στερεωμένο σέ ὀριζόντιο κύκλο καί ἡ



Σχ. 157. Φασματοσκόπιο (σχηματική παράσταση).

ἀκμή του εἶναι κατακόρυφη. Γύρω ἀπό τό πρίσμα μετακινοῦνται τρεῖς σωληνες, πού οἱ ἄξονές τους εἶναι ὀριζόντιοι. Ὁ κατευθυντήρας (Κ) ἔχει στή μία ἄκρη του συγκεντρωτικό φακό καί στήν ἄλλη ἄκρη του ἔχει σχισμή παράλληλη μέ τήν ἀκμή τοῦ πρίσματος. Ἡ σχισμή

βρίσκεται στο έστιακό επίπεδο του φακού και φωτίζεται από τη φωτεινή πηγή (Π) πού τό φως της θέλουμε νά τό αναλύσουμε. Έτσι πάνω στό πρίσμα πέφτουν παράλληλες ακτίνες (δηλαδή μέ τήν ίδια γωνία προσπτώσεως).

Η *διόπτρα* (Δ) δέχεται τίς ακτίνες πού βγαίνουν από τό πρίσμα (δηλαδή τό φάσμα). Ο άντικειμενικός φακός τής διόπτρας σχηματίζει πραγματικό είδωλο του φάσματος και μέ τόν προσοφθάλμιο φακό τής διόπτρας παρατηρούμε αυτό τό είδωλο. Ο τρίτος σωλήνας (Σ) έχει στή μιά άκρη του συγκενρωτικό φακό και στήν άλλη άκρη του, πού συμπίπτει μέ τό έστιακό επίπεδο του φακού, έχει διαφανή μικρομετρική κλίμακα (*σωλήνας τής κλίμακας*). Η κλίμακα φωτίζεται από μιά ισχυρή φωτεινή πηγή (Π'). Οί ακτίνες πού προέρχονται από τήν κλίμακα ανακλώνται πάνω στή μιά έδρα του πρίσματος και μπαίνουν στή διόπτρα. Όταν λοιπόν παρατηρούμε μέ τόν προσοφθάλμιο τής διόπτρας, βλέπουμε τό είδωλο του φάσματος πάνω στό είδωλο τής κλίμακας.

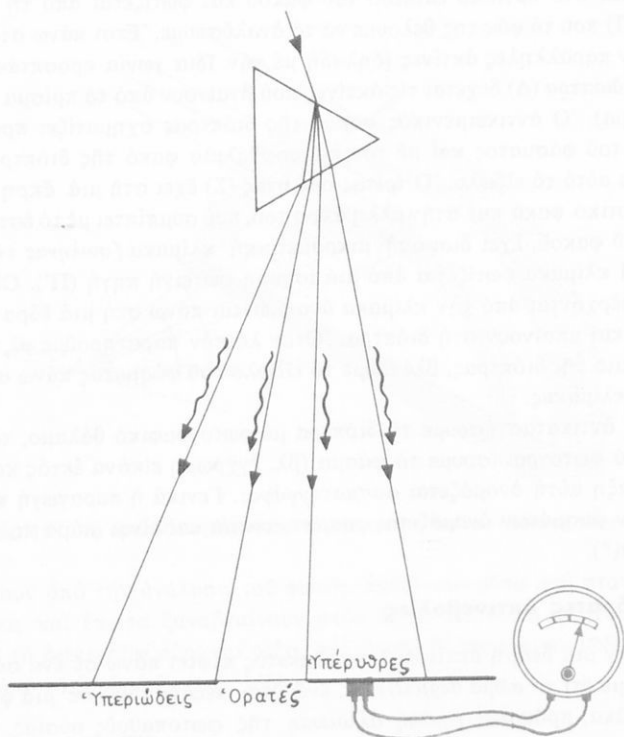
Αν αντικαταστήσουμε τή διόπτρα μέ φωτογραφικό θάλαμο, τότε μπορούμε νά φωτογραφίσουμε τό φάσμα (βλ. έγχρωμη εικόνα εκτός κειμένου). Η διάταξη αυτή ονομάζεται *φασματογράφος*. Γενικά ή παραγωγή και ή μελέτη των φασμάτων ονομάζεται *φασματοσκοπία* και είναι πάρα πολύ ένδιαφέρουσα(*).

97. Αόρατες ακτινοβολίες

Όταν μιά δέσμη ακτίνων λευκού φωτός πέφτει πάνω σέ ένα σώμα, παρατηρούμε ότι τό σώμα *θερμαίνεται*, ενώ όταν πέφτει πάνω σέ μιά φωτογραφική πλάκα, προκαλεί *χημική αλλοίωση* τής φωτοπαθοϋς ουσίας. Τά φαινόμενα αυτά δείχνουν ότι τό λευκό φως μεταφέρει *ένέργεια*, πού μετατρέπεται σέ άλλες μορφές ενέργειας π.χ. σέ *θερμότητα* ή *χημική ενέργεια*, όταν τό φως απορροφάται από τά σώματα στά όποια πέφτει.

Χρησιμοποιώντας πρίσμα και φακό από κατάλληλο ύλικό σχηματίζουμε πάνω σέ διάφραγμα τό φάσμα του λευκού φωτός, πού εκπέμπει τό ηλεκτρικό τόξο (σχ.158). Κατά μήκος του φάσματος μετακινούμε εύπαθές θερμομετρικό όργανο (θερμοηλεκτρική στήλη). Παρατηρούμε ότι ή ύψωση τής θερμοκρασίας, πού προκαλούν οί ακτινοβολίες του φάσματος, αυξάνει συνεχώς όσο προχωρούμε από τήν ίώδη πρός τήν έρυθρή περιοχή του φάσματος. Αν μετακινήσουμε τό θερμομετρικό όργανο *πέρα από τήν έρυθρή άκρη του φάσματος*, παρατηρούμε ότι ή ύψωση τής θερμοκρασίας *συνεχίζεται* μέσα σέ μιά περιοχή, πού δέν υπάρχουν όρατές ακτινοβολίες. Άρα σ' αυτή τήν περιοχή υπάρχουν *άορατες* ακτινοβολίες, πού ονομάζονται *ύπε-*

(*) Για τά είδη των φασμάτων και για τά συμπεράσματα τής φασματοσκοπίας θά επανέλθουμε στήν επόμενη τάξη.



Σχ. 158. Σχηματική διάταξη για την εξέταση των όρατων και των άορατων ακτινοβολιών του φάσματος.

ρυθρες ακτινοβολίες. Αυτές αναπτύσσουν πολύ μεγαλύτερη θερμότητα από τις άλλες ακτινοβολίες του φάσματος και η γωνία έκτροπής τους είναι μικρότερη από τη γωνία έκτροπής της όρατης ερυθρης ακτινοβολίας.

Προβάλλουμε τό φάσμα πάνω σέ φωτογραφική πλάκα. Όταν εμφανίσουμε την πλάκα, παρατηρούμε ότι η προσβολή της γίνεται τόσο πιό έντονη, όσο προχωρούμε προς την ιώδη περιοχή του φάσματος και ότι πέρα από τήν ιώδη άκρη του φάσματος ή προσβολή της πλάκας συνεχίζεται ακόμη πιό έντονη μέσα σέ μία περιοχή, που δέν υπάρχουν όρατες ακτινοβολίες. Άρα σ' αυτή την περιοχή υπάρχουν άορατες ακτινοβολίες, που όνομάζονται *υπεριώδεις ακτινοβολίες*. Αυτές προσβάλλουν τή φωτογραφική πλάκα *πιό έντονα* από τις άλλες ακτινοβολίες του φάσματος και η γωνία έκτροπής τους είναι *μεγαλύτερη* από τη γωνία έκτροπής της όρατης ιώδους ακτινοβολίας. Από τά παραπάνω καταλήγουμε στά ακόλουθα συμπεράσματα :

I. Μιά φωτεινή πηγή, εκτός από τις όρατες ακτινοβολίες, εκπέμπει και άορατες υπέρυθρες και υπεριώδεις ακτινοβολίες.

II. Οί υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν δείκτη διαθλάσεως μικρότερο από τό δείκτη διαθλάσεως τής όρατής έρυθρής ακτινοβολίας. Αντίθετα οί υπεριώδεις ακτινοβολίες έχουν δείκτη διαθλάσεως μεγαλύτερο από τό δείκτη διαθλάσεως τής όρατής ιώδους ακτινοβολίας.

α. Υπέρυθρες ακτινοβολίες. Κάθε σώμα πού έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από τή θερμοκρασία του περιβάλλοντος ακτινοβολεί θερμότητα. Πειραματικά βρίσκουμε ότι ή ακτινοβολία πού εκπέμπουν τά θερμά σώματα είναι υπέρυθρες ακτινοβολίες πού λέγονται και θερμικές ακτίνες και σχηματίζουν ένα φάσμα μεγάλης εκτάσεως. Όσο αυξάνει ή θερμοκρασία ενός σώματος, τόσο περισσότερο οί υπέρυθρες ακτινοβολίες πού εκπέμπει τό σώμα πλησιάζουν προς τις όρατες ακτινοβολίες. Καί όταν τό σώμα αποκτήσει μία όρισμένη θερμοκρασία, τότε αρχίζει νά εκπέμπει πρώτα όρατή έρυθρή ακτινοβολία και έπειτα διαδοχικά τις υπόλοιπες όρατες ακτινοβολίες.

Η μεγαλύτερη πηγή υπέρυθρων ακτίνων είναι ό "Ηλιος. Γύρω μας κάθε θερμό σώμα εκπέμπει υπέρυθρες ακτίνες. Όταν πάνω σε ένα σώμα πέφτουν υπέρυθρες ακτίνες, τότε ένα μέρος τής ενέργειάς τους πάντοτε απορροφάται από τό σώμα και ή υπόλοιπη ενέργειά τους ανακλάται ή διαχέεται ή περνάει μέσα από τό σώμα. Τό κοινό γυαλί απορροφά σχεδόν όλοκληρωτικά τις υπέρυθρες ακτίνες, ενώ αντίθετα τό χλωριούχο νάτριο είναι σχεδόν τελείως διαφανές γι' αυτές τις ακτίνες.

Οί υπέρυθρες ακτίνες έχουν σήμερα αρκετές εφαρμογές. Στα θερμοκήπια εκμεταλλευόμαστε τήν ιδιότητα πού έχει τό γυαλί νά είναι διαφανές για τις όρατες ήλιακές ακτίνες, αλλά άδιαφανές για τις υπέρυθρες ακτίνες. Οί όρατες ήλιακές ακτίνες περνούν από τό γυαλί και θερμαίνουν τό έδαφος. Αυτό όμως εκπέμπει υπέρυθρες ακτίνες, πού δέν περνούν από τό γυαλί, και έτσι ή θερμότητα μένει παγιδευμένη μέσα στό θερμοκήπιο. Άλλη ένδιαφέρουσα εφαρμογή είναι ή φωτογράφιση με υπέρυθρες ακτίνες, χρησιμοποιώντας ειδικά φίλμ, πού είναι ευαίσθητα σ' αυτές τις ακτίνες. Έπειδή τά σύννεφα και ή όμίχλη είναι σχεδόν τελείως διαφανή για τις υπέρυθρες ακτίνες, γι' αυτό μπορούμε νά φωτογραφίζουμε και περιοχές σκεπασμένες με σύννεφα ή όμίχλη.

β. Υπεριώδεις ακτινοβολίες. Οί υπεριώδεις ακτινοβολίες ή και υπεριώδεις ακτίνες εκπέμπονται από τά διάπυρα σώματα μαζί με τις υπέρυθρες και τις όρατες ακτινοβολίες. Φως πλούσιο σε υπεριώδεις ακτίνες μας δίνει ή λυχνία άτμών ύδραργύρου. Τό δοχείο της είναι από χαλαζία, πού είναι διαφανής για τις υπεριώδεις ακτίνες, ενώ αντίθετα τό γυαλί είναι τελείως άδιαφανές γι' αυτές τις ακτίνες.

Ἡ ἐνέργεια, πού μεταφέρουν οἱ ὑπέρυθρες ἀκτίνες, ὅταν ἀπορροφᾶται ἀπό τήν ὕλη, μετατρέπεται ἀποκλειστικά *σέ θερμότητα*. Ἐνῶ ἡ ἐνέργεια πού μεταφέρουν οἱ ὑπεριώδεις ἀκτίνες, ὅταν ἀπορροφᾶται ἀπό τήν ὕλη, μετατρέπεται εὐκόλα *σέ ἄλλες μορφές ἐνέργειας*, διαφορετικές ἀπό τή θερμότητα. Ἔτσι στό φωτοκύτταρο ἡ ἐνέργεια τῶν ὑπεριώδων ἀκτίνων μετατρέπεται *σέ ἠλεκτρική ἐνέργεια* καί *σέ* πολλές φωτοχημικές ἀντιδράσεις μετατρέπεται *σέ χημική ἐνέργεια*.

Οἱ ὑπεριώδεις ἀκτίνες προκαλοῦν βιολογικά φαινόμενα, π.χ. σκοτώθουν τά μικρόβια καί γι' αὐτό τίς χρησιμοποιοῦμε γιά ἀποστείρωση τοῦ νεροῦ καί στή θεραπευτική, προκαλοῦν τό καλοκαίρι τό μαύρισμα τοῦ δέρματος ἢ καί ἐγκαύματα, προσβάλλουν τά μάτια μας καί γι' αὐτό τά προφυλάγομε μέ μαῦρα γυαλιά. Μέσα στους ἐπιφανειακοὺς ἴστους μας οἱ ἠλιακές ὑπεριώδεις ἀκτίνες προκαλοῦν τή σύνθεση τῆς βιταμίνης D, πού εἶναι ἀπαραίτητη γιά τήν ἀνάπτυξη τῶν ὀστέων. Ὅταν λείψουν αὐτές οἱ ἀκτίνες, ἐμφανίζεται ραχιτισμός.

Οἱ ὑπεριώδεις ἀκτίνες ἔχουν πολλές ἐφαρμογές. Μιά συνηθισμένη ἐφαρμογή τους εἶναι οἱ *λαμπτήρες φθορισμοῦ*. Σ' αὐτούς οἱ διάπυροι ἀτμοὶ ὑδραργύρου ἐκπέμπουν ἀόρατες ὑπεριώδεις ἀκτίνες, τίς ὁποῖες οἱ φθορίζουσες οὐσίες τίς μετατρέπουν *σέ* ὄρατές ἀκτίνες.

98. Τό χρῶμα τῶν σωμάτων

Ὅταν τό λευκό φῶς πέφτει πάνω *σέ* ἓνα σῶμα, τότε τό σῶμα ἀπορροφᾶ ὀρισμένες ἀκτινοβολίες τοῦ λευκοῦ φωτός. Αὐτή ἡ ἀπορρόφηση ἐξηγεῖ τό *χρῶμα* πού παίρνουν τά διάφορα σώματα. Εὐκόλα μπορούμε νά βροῦμε τίς ἀκτινοβολίες, πού *ἐκλεκτικά* ἀπορροφᾶ ἓνα σῶμα. Φωτίζουμε τό σῶμα μέ τό λευκό φῶς μιᾶς ἰσχυρῆς φωτεινῆς πηγῆς καί μέ τό φασματοσκόπιο ἐξετάζουμε τό φῶς πού ἀνακλᾶται ἢ διαχέεται ἀπό τό σῶμα ἢ περνάει μέσα ἀπό αὐτό, ἂν τό σῶμα εἶναι διαφανές.

Τά *διαφανή σώματα* (γυαλί, χαλαζίας, νερό κ.λ.), πού φαίνονται ἄχρωμα, ἀφήνουν νά περάσουν μέσα ἀπό τήν ὕλη τους σχεδόν *ὄλες* οἱ ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος τοῦ λευκοῦ φωτός. Τά *διαφανή σώματα*, πού φαίνονται *ἐγχρωμα* (χρωματισμένο γυαλί, διαλύματα χρωστικῶν οὐσιῶν), *ἀπορροφῶν* ὀρισμένες ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος τοῦ λευκοῦ φωτός. Ἔτσι π.χ. μία γυάλινη πλάκα φαίνεται πράσινη, γιατί μέσα ἀπό τό γυαλί περνοῦν μόνο οἱ πράσινες ἀκτινοβολίες, ἐνῶ ὄλες τίς ἄλλες ἀκτινοβολίες τό γυαλί τίς ἀπορροφᾶ.

Τά *ἀδιαφανή σώματα* ὀφείλουν τό χρῶμα τους στό φῶς πού ἀνακλᾶται ἢ διαχέεται ἀπό τό σῶμα. Ἄν τό σῶμα ἀπορροφᾶ *ὄλες* τίς ἀκτινοβολίες τοῦ φάσματος τοῦ λευκοῦ φωτός, τότε τό σῶμα φαίνεται *μαῦρο*. Ἀντίθετα, ἂν

μέ την ίδια αναλογία διαχέονται όλες οι ακτινοβολίες του φάσματος του λευκού φωτός, τότε το σώμα φαίνεται λευκό. Τέλος, αν το σώμα απορροφά όρισμένες ακτινοβολίες του φάσματος του λευκού φωτός, τότε το χρώμα του σώματος προσδιορίζεται από τις ακτινοβολίες που διαχέονται. Το χρώμα ενός σώματος εξαρτάται και από το είδος του φωτός που πέφτει πάνω στο σώμα. Αν π.χ. ένα χαρτί, που έχει χρώμα ερυθρό, το βάλουμε στο ερυθρό τμήμα του ηλιακού φάσματος, το χαρτί φαίνεται ερυθρό, ενώ σε κάθε άλλη περιοχή του φάσματος το χαρτί αυτό φαίνεται μαύρο. Από τα παραπάνω καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα :

Τό χρώμα τών σωμάτων οφείλεται στό ότι κάθε σώμα απορροφά εκλεκτικά όρισμένες ακτινοβολίες τού λευκού φωτός, και τίς υπόλοιπες τίς αφήνει νά περάσουν ή τίς ανακλά και τίς διαχέει.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

154. Μιά φωτεινή ακτίνα λευκού φωτός πέφτει κάθετα πάνω στή μιά έδρα λεπτού πρίσματος πού έχει διαθλαστική γωνία $A = 8^\circ$. Γι' αυτό τό πρίσμα οί δείκτες διαθλάσεως γιά τήν ερυθρή και τήν ιώδη ακτινοβολία είναι αντίστοιχα $n_E = 1,505$ και $n_I = 1,520$. Πόση είναι ή γωνία έκτροπής E_E και E_I γι' αυτές τίς δύο άκραιοές ακτινοβολίες τού φάσματος ; Πόση είναι ή διαφορά τών γωνιών έκτροπής $E_I - E_E$;

155. Μιά φωτεινή ακτίνα λευκού φωτός πέφτει κάθετα πάνω στή μιά έδρα λεπτού πρίσματος πού έχει διαθλαστική γωνία $A = 10^\circ$. Οί δείκτες διαθλάσεως γιά τήν ερυθρή και τήν ιώδη ακτινοβολία είναι αντίστοιχα $n_E = 1,53$ και $n_I = 1,55$. Τό φάσμα σχηματίζεται πάνω σέ διάφραγμα πού απέχει 2 m από τό πρίσμα. Κατά προσέγγιση θεωρούμε ότι ή εξερχόμενη από τό πρίσμα ερυθρή ακτίνα είναι κάθετη στό διάφραγμα. Πόσο μήκος έχει τό φάσμα πού σχηματίζεται πάνω στό διάφραγμα ;

156. Ένα σύστημα από δύο λεπτά πρίσματα μέ διαθλαστικές γωνίες A_1 και A_2 θέλουμε να μη προκαλεί έκτροπή σέ όρισμένη ακτινοβολία, πού γιά τά δύο αυτά πρίσματα οί δείκτες διαθλάσεως αντίστοιχα είναι n_1 και n_2 . Πόσος πρέπει νά είναι ό λόγος τών διαθλαστικών γωνιών A_1 και A_2 τών δύο πρισμάτων ;

Φωτομετρία

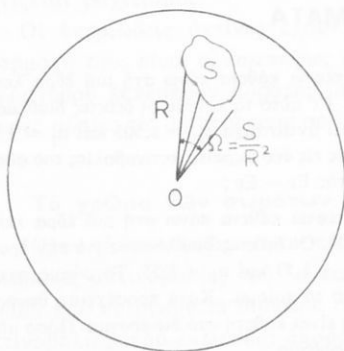
99. Φωτεινή Ενέργεια

Από την καθημερινή παρατήρηση διαπιστώνουμε ότι οι φωτεινές πηγές είναι σώματα που συνήθως έχουν μεγάλη θερμοκρασία. Αντίστροφα διαπιστώνουμε ότι, όταν το φως απορροφάται από ένα σώμα, τότε το σώμα θερμαίνεται. Οι άπλές αυτές παρατηρήσεις φανερώνουν ότι *η θερμοότητα μετατρέπεται σε φως* και αντίστροφα *το φως μετατρέπεται σε θερμοότητα*. Έτσι καταλήγουμε στο εξής συμπέρασμα :

Τό φως είναι μία μορφή ενέργειας, που την ονομάζουμε φωτεινή ενέργεια.

100. Στερεή γωνία και μονάδα της

Μιά σφαίρα έχει κέντρο O και ακτίνα R . Στην επιφάνεια της σφαίρας θεωρούμε ένα τμήμα της που έχει έμβαδό S (σχ. 159). Οι ακτίνες της σφαίρας, που καταλήγουν σε όλα τα σημεία της περιμέτρου της επιφάνειας S , σχηματίζουν μία στερεή γωνία Ω και αποδεικνύεται ότι ισχύει η εξίσωση: $S = \Omega \cdot R^2$.



Σχ. 159. Ορισμός στερεής γωνίας.

Από αυτή την εξίσωση έχουμε την ακόλουθη εξίσωση όρισμού της στερεής γωνίας :

$$\text{στερεή γωνία } \Omega = \frac{S}{R^2}$$

Αν είναι $S = R^2$, τότε είναι $\Omega = 1$. Η μονάδα στερεής γωνίας ονομάζεται στερακτίνο (1 sterad). Ωστε :

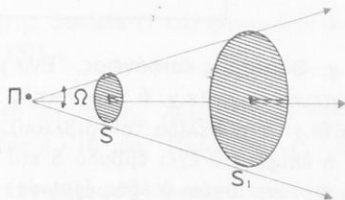
Μονάδα στερεής γωνίας είναι τό στερακτίνο (1 sterad), δηλαδή η στερεή γωνία που έχει την κορυφή της στο κέντρο σφαίρας με ακτίνα R και αντιστοιχεί σε τμήμα της σφαιρικής επιφάνειας που έχει έμβαδό (S) ίσο με R^2 .

Η στερεή γωνία (Ω) που έχει κορυφή της τό κέντρο O της σφαίρας και αντιστοιχεί σε όλη τή σφαιρική επιφάνεια ($S = 4\pi R^2$) είναι :

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} \quad \text{Άρα} \quad \Omega = 4\pi \text{ sterad}$$

101. Φωτομετρικά μεγέθη

α. Φωτεινή ροή. Κάθε φωτεινή πηγή εκπέμπει συνεχώς *φωτεινή ενέργεια*, που διαδίδεται στο γύρω από την πηγή διαφανές μέσο, τό όποιο θεωρούμε όμογενές καί ισότροπο. Ός φωτεινή πηγή παίρνουμε ένα φωτεινό σημείο (σχ. 160) που εκπέμπει φωτεινή ενέργεια όμοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Θεωρούμε έναν κώνο που έχει κορυφή τή φωτεινή πηγή καί στερεή γωνία Ω . Μέσα σ' αυτή τή στερεή γωνία ή φωτεινή πηγή στή διάρκεια του χρόνου t εκπέμπει ενέργεια E . Έπομένως από μιά τομή του κώνου περνάει κατά δευτερόλεπτο φωτεινή ενέργεια ίση μέ E/t . Αυτή ή ενέργεια όνομάζεται φωτεινή ροή (Φ) καί εκφράζει τήν ισχύ που περνάει από τή θεωρούμενη επιφάνεια. Όστε :



Σχ. 160. Όρισμός τής φωτεινής ροής.

Φωτεινή ροή (Φ) όνομάζεται ή ισχύς που περνάει από μιά επιφάνεια (δηλαδή ή φωτεινή ενέργεια που περνάει κατά δευτερόλεπτο από τή θεωρούμενη επιφάνεια).

$$\text{φωτεινή ροή} = \frac{\text{φωτεινή ενέργεια}}{\text{χρόνος}} \quad \Phi = \frac{E}{t} \quad (1)$$

β. Ένταση φωτεινής πηγής. Μέσα στή στερεή γωνία Ω (σχ. 167) ή φωτεινή πηγή εκπέμπει φωτεινή ροή Φ . Έπομένως κατά μονάδα στερεής γωνίας ή φωτεινή πηγή εκπέμπει φωτεινή ροή ίση μέ Φ/Ω . Αυτή ή φωτεινή ροή όνομάζεται ένταση (I) τής φωτεινής πηγής (*). Όστε :

Ένταση (I) φωτεινής πηγής όνομάζεται ή φωτεινή ροή που εκπέμπει ή φωτεινή πηγή κατά μονάδα στερεής γωνίας.

$$\text{ένταση φωτεινής πηγής} = \frac{\text{φωτεινή ροή}}{\text{στερεή γωνία}} \quad I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (2)$$

Έπειδή ή φωτεινή πηγή εκπέμπει όμοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις, γι' αυτό από τήν εξίσωση (2) για $\Omega = 4\pi$ sterad βρίσκουμε ότι :

(*) Η ένταση φωτεινής πηγής όνομάζεται καί φωτοβολία τής πηγής.

Ἡ ὀλική φωτεινή ροή ($\Phi_{ολ}$) πού ἐκπέμπει μιὰ σημαϊακή φωτεινή πηγὴ, ἢ ὁποία ἔχει σταθερὴ ἔνταση (I) πρὸς ὅλες τὶς διευθύνσεις, εἶναι ἴση μὲ $4\pi \cdot I$.

$$\text{ὀλική φωτεινή ροή} \quad \Phi_{ολ} = 4\pi \cdot I \quad (3)$$

γ. Φωτισμός ἐπιφάνειας. Ἐνα μέρος τῆς φωτεινῆς ροῆς πού ἐκπέμπει ἡ φωτεινὴ πηγὴ (π.χ. ὁ ἠλεκτρικὸς λαμπτήρας) πέφτει πάνω σὲ μιὰ ἐπιφάνεια (π.χ. στὴ σελίδα τοῦ βιβλίου). Τότε λέμε ὅτι ἡ ἐπιφάνεια *φωτίζεται*. Ἄν ἡ ἐπιφάνεια ἔχει ἐμβαδὸ S καὶ πάνω της πέφτει *ὁμοίομορφα* φωτεινὴ ροὴ Φ , τότε ἰσχύει ὁ ἑξῆς ὄρισμός :

Φωτισμός (B) μιᾶς ἐπιφάνειας ὀνομάζεται τὸ πηλίκο τῆς φωτεινῆς ροῆς (Φ) διὰ τοῦ ἐμβαδοῦ (S) τῆς ἐπιφάνειας (ὅταν ἡ φωτεινὴ ροὴ πέφτει ὁμοίομορφα πάνω στὴν ἐπιφάνεια).

$$\text{φωτισμός ἐπιφάνειας} = \frac{\text{φωτεινὴ ροὴ}}{\text{ἐμβαδὸ ἐπιφάνειας}} \quad B = \frac{\Phi}{S} \quad (4)$$

Εἶναι φανερό ὅτι τὸ πηλίκο $\frac{\Phi}{S}$ φανερώνει τὴ φωτεινὴ ροὴ πού πέφτει πάνω στὴ μονάδα ἐπιφάνειας.

102. Μονάδες τῶν φωτομετρικῶν μεγεθῶν

Γνωρίσαμε τρία φωτομετρικὰ μεγέθη, τὴ φωτεινὴ ροὴ (Φ), τὴν ἔνταση φωτεινῆς πηγῆς (I) καὶ τὸ φωτισμὸ ἐπιφάνειας (B). Αὐτὰ τὰ μεγέθη τὰ μετράμε μὲ κατάλληλες μονάδες, πού προκύπτουν ἀπὸ τὸν ὄρισμὸ τῆς μονάδας ἐντάσεως φωτεινῆς πηγῆς.

α. Μονάδα ἐντάσεως φωτεινῆς πηγῆς. Ὡς μονάδα ἐντάσεως φωτεινῆς πηγῆς παίρνουμε τὴν ἔνταση μιᾶς *πρότυπης* φωτεινῆς πηγῆς, πού δίνει λευκὸ φῶς καὶ διατηρεῖ σταθερὴ τὴν ἐκπομπή της. Ἡ μονάδα ἐντάσεως φωτεινῆς πηγῆς ὀνομάζεται *candela* (1 cd) καὶ πραγματοποιεῖται ἀπὸ ὀρισμένη πρότυπη φωτεινὴ πηγὴ (*). Ὡστε :

(*) *Candela* (1 cd) εἶναι τὸ $1/60$ τῆς φωτεινῆς ἰσχύος πού ἐκπέμπει κάθετα ἐπιφάνεια 1 cm^2 λευκοχρύσου, ὁ ὁποῖος ἔχει θερμοκρασία ἴση μὲ τὴ θερμοκρασία τῆς τήξεώς του ($1773,5^\circ \text{C}$).

Μονάδα έντάσεως φωτεινής πηγής είναι ή candela (1 cd), δηλαδή ή ένταση μιὰς όρισμένης πρότυπης φωτεινής πηγής.

μονάδα έντάσεως φωτεινής πηγής 1 candela (1 cd)

Ή μονάδα έντάσεως φωτεινής πηγής candela (1 cd) είναι θεμελιώδης μονάδα στό Διεθνές Σύστημα μονάδων (SI).

Ή ένταση μερικῶν φωτεινῶν πηγῶν:

Λαμπτήρας πυρακτώσεως (100 W) 150 cd. Φανός αὐτοκινήτου (32 W) $15 \cdot 10^3$ cd. Ἀντιαεροπορικός προβολέας $8 \cdot 10^8$ cd. Ήλιος $2 \cdot 10^{27}$ cd.

β. Μονάδα φωτεινής ροῆς. Ἀπό τήν ἐξίσωση όρισμοῦ τῆς έντάσεως φωτεινής πηγής $I = \Phi/\Omega$ βρίσκουμε:

$$\Phi = I \cdot \Omega$$

Ἄν είναι $I = 1$ cd καί $\Omega = 1$ sterad, τότε είναι $\Phi = 1$. Ἡ μονάδα φωτεινής ροῆς όνομάζεται lumen (1 lm). Ὡστε:

Μονάδα φωτεινής ροῆς είναι τό lumen (1 lm), δηλαδή ή φωτεινή ροή, τήν όποία ἐκπέμπει φωτεινή πηγή έντάσεως μιὰς candela (1 cd) μέσα σέ στερεή γωνία ίση μέ ένα στερακτίριο (1 sterad), όταν ή πηγή συμπίπτει μέ τή κορυφή τῆς στερεᾶς γωνίας.

μονάδα φωτεινής ροῆς 1 lumen (1 lm) 1 lm = 1 cd · 1 sterad

Ἐπομένως μιὰ σημειακή φωτεινή πηγή, πού ἔχει τήν ἴδια ένταση I πρός όλες τίς διευθύνσεις, ἐκπέμπει όλική φωτεινή ροή ίση μέ:

$$\text{όλική φωτεινή ροή } \Phi_{\text{ολ}} = 4\pi \cdot I \text{ lumen}$$

γ. Μονάδα φωτισμοῦ. Ἄν στήν ἐξίσωση όρισμοῦ τοῦ φωτισμοῦ μιὰς ἐπιφάνειας $B = \Phi/S$ είναι $\Phi = 1$ lm καί $S = 1$ m², τότε είναι $B = 1$. Ἡ μονάδα φωτισμοῦ όνομάζεται lux (1 lx). Ὡστε:

Μονάδα φωτισμοῦ είναι τό lux (1 lux), δηλαδή ό φωτισμός, τόν όποιο προκαλεῖ φωτεινή ροή ενός lumen (1 lm), όταν πέφτει κάθετα πάνω σέ ἐπιφάνεια ενός τετραγωνικοῦ μέτρου (1 m²).

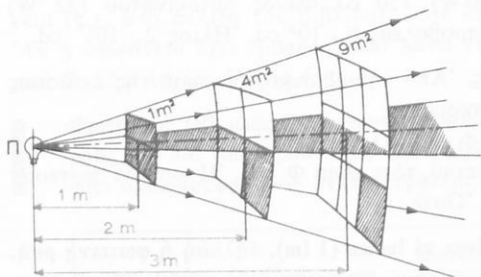
μονάδα φωτισμοῦ 1 lux (1 lx) 1 lux = 1 lm/1 m² = 1 lm/m²

Γιά νά διαβάζουμε άνετα, πρέπει ό φωτισμός του κειμένου νά είναι ίσος μέ 25 lux.

103. Νόμος του φωτισμού

Μιά σημειακή φωτεινή πηγή (σχ. 161) έχει σταθερή ένταση I προς όλες τίσ διευθύνσεις και εκπέμπει όλική φωτεινή ροή

$$\Phi_{ολ} = 4\pi \cdot I$$

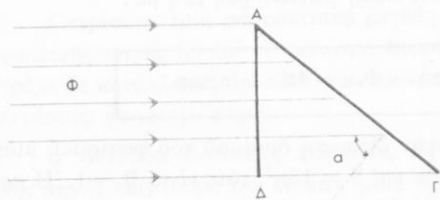


Σχ. 161. Μεταβολή του φωτισμού μέ τήν απόσταση.

Αυτή περνάει διαδοχικά από σφαιρικές επιφάνειες, πού οί άκτινες τους συνεχώς αυξάνουν. Τά έμβαδά τών σφαιρικών επιφανειών αυξάνουν ανάλογα μέ τά τετράγωνα τών άκτινων τους. Οί φωτεινές άκτινες πέφτουν κάθετα πάνω σέ κάθε σφαιρική επιφάνεια. Άρα για μία σφαιρική επιφάνεια μέ άκτινα R ό κάθετος φωτισμός της ($B_{καθ}$) είναι :

$$B_{καθ} = \frac{\Phi_{ολ}}{4\pi \cdot R^2} = \frac{4\pi \cdot I}{4\pi \cdot R^2}$$

και
$$B_{καθ} = \frac{I}{R^2} \quad (1)$$



Σχ. 162. Μεταβολή του φωτισμού μέ τή γωνία προσπτώσεως.

Μιά παράλληλη φωτεινή δέσμη πέφτει πάνω σέ επιφάνεια ΑΓ (σχ. 162), πού έχει έμβαδό S . Η γωνία προσπτώσεως είναι α . Πάνω στην επιφάνεια ΑΓ πέφτει φωτεινή ροή Φ και ό φωτισμός (B) αυτης τής επιφάνειας είναι :

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2)$$

Η ίδια φωτεινή ροή Φ πέφτει κάθετα πάνω στην επιφάνεια ΑΔ, πού έχει έμβαδό $S' = S \cdot \text{συν } \alpha$. Ο κάθετος φωτισμός ($B_{καθ}$) τής επιφάνειας ΑΔ είναι:

$$B_{\text{καθ}} = \frac{\Phi}{S'} \quad \text{ή} \quad B_{\text{καθ}} = \frac{\Phi}{S \cdot \text{συν } \alpha} \quad (3)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (2) και (3) έχουμε :

$$\frac{B}{B_{\text{καθ}}} = \frac{S \cdot \text{συν } \alpha}{S} \quad \text{άρα} \quad B = B_{\text{καθ}} \cdot \text{συν } \alpha \quad (4)$$

Από τις εξισώσεις (1) και (4) βρίσκουμε την ακόλουθη γενικότερη εξίσωση που εκφράζει *τό νόμο του φωτισμού* :

$$\text{νόμος του φωτισμού} \quad B = \frac{I}{R^2} \cdot \text{συν } \alpha$$

Ο φωτισμός (B) μιās επιφάνειας είναι ανάλογος με την ένταση (I) της φωτεινής πηγής, αντιστρόφως ανάλογος με τό τετράγωνο της απόστασεως (R) της επιφάνειας από τή φωτεινή πηγή και ανάλογος με τό συνημίτονο της γωνίας προσπτώσεως (α).

Αν οί φωτεινές ακτίνες πέφτουν *κάθετα* πάνω στην επιφάνεια ($\alpha = 0^\circ$), τότε ό φωτισμός της επιφάνειας έχει *τή μεγαλύτερη τιμή* $B_{\text{καθ}} = I/R^2$.

Άλλος όρισμός της μονάδας φωτισμού *lux*. Αν στην εξίσωση $B_{\text{καθ}} = I/R^2$ είναι $I = 1 \text{ cd}$, $R = 1 \text{ m}$, τότε ό κάθετος φωτισμός είναι $B_{\text{καθ}} = 1 \text{ lux}$. Ωστε :

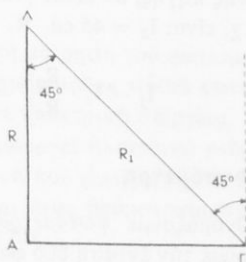
1 lux είναι ό φωτισμός μιās επιφάνειας που βρίσκεται σε απόσταση 1 m από φωτεινή πηγή έντασεως 1 cd, όταν οί φωτεινές ακτίνες πέφτουν κάθετα πάνω στην επιφάνεια.

$$\text{κάθετος φωτισμός} \quad 1 \text{ lux} = \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2}$$

Παράδειγμα. Ένας οριζόντιος δρόμος φωτίζεται από ηλεκτρικό λαμπτήρα, που έχει ένταση $I = 500 \text{ cd}$ και βρίσκεται σε ύψος $R = 5 \text{ m}$ από τό κατάστρωμα του δρόμου. Ακριβώς κάτω από τό λαμπτήρα (σχ. 163) ό φωτισμός του δρόμου είναι :

$$B_{\text{καθ}} = \frac{I}{R^2} = \frac{500 \text{ cd}}{25 \text{ m}^2} \quad \text{και} \quad B_{\text{καθ}} = 20 \text{ lux}$$

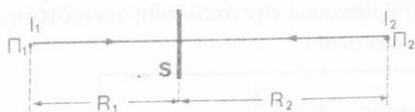
Σε απόσταση $ΑΓ = 5 \text{ m}$ από την κατακόρυφο που περνάει από τό λαμπτήρα οί φωτεινές ακτίνες πέφτουν με γωνία προσπτώσεως $\alpha = 45^\circ$ και ή απόσταση από τόν λαμπτήρα είναι $R_1 = \sqrt{2}R$. Στο σημείο Γ ό φωτισμός του δρόμου είναι :



Σχ. 163. Υπολογισμός του φωτισμού στα σημεία Α και Γ του δάφους.

$$B = \frac{I}{R_1^2} \cdot \sigma \text{υν } \alpha = \frac{500 \text{ cd}}{50 \text{ m}^2} \cdot \sigma \text{υν } 45^\circ \quad \text{καί} \quad B \simeq 7,1 \text{ lux}$$

104. Σύγκριση τῆς ἐντάσεως φωτεινῶν πηγῶν



Σχ. 164. Σύγκριση τῆς ἐντάσεως δύο φωτεινῶν πηγῶν.

Ἡ φωτομετρία ἀσχολεῖται μέ τόν ὀρισμό τῶν φωτομετρικῶν μεγεθῶν, τόν ὀρισμό τῶν μονάδων τους καί βρίσκει τίς σχέσεις πού συνδέουν τά διάφορα φωτομετρικά μεγέθη. Ἐνα τέτοιο θέμα εἶναι ἡ σχέση πού ὑπάρχει μεταξύ τῶν ἐντάσεων δύο φωτεινῶν πηγῶν.

Θεωροῦμε δύο φωτεινές πηγές Π₁ καί Π₂, πού ἀντίστοιχα ἔχουν ἔνταση I₁ καί I₂ (σχ. 164). Ἐν οἱ δύο πηγές προκαλοῦν τόν ἴδιο κάθετο φωτισμό πάνω σέ μία ἐπιφάνεια S, τότε ἰσχύει ἡ ἐξίσωση :

$$B_{\text{καθ}} = \frac{I_1}{R_1^2} = \frac{I_2}{R_2^2} \quad \text{ἄρα} \quad \boxed{\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}} \quad (1)$$

Ἡ ἐξίσωση (1) ὀνομάζεται ἐξίσωση τῶν ἴσων φωτισμῶν καί φανερώνει ὅτι :

Ἐν ὅταν δύο φωτεινές πηγές φωτίζουν ἐξίσου μία ἐπιφάνεια, οἱ ἐντάσεις τῶν φωτεινῶν πηγῶν εἶναι ἀνάλογες μέ τά τετράγωνα τῶν ἀποστάσεων τῶν πηγῶν ἀπό τήν ἐπιφάνεια πού φωτίζεται ἐξίσου.

Ἀπό τήν ἐξίσωση (1) μποροῦμε νά ὑπολογίσουμε τήν ἔνταση τῆς μιᾶς φωτεινῆς πηγῆς, ἂν εἶναι γνωστά τά ἄλλα μεγέθη.

Ἐν π.χ. εἶναι I₂ = 45 cd, R₁ = 0,5 m καί R₂ = 1,5 m, τότε εἶναι :

$$I_1 = I_2 \cdot \frac{R_1^2}{R_2^2} = 45 \text{ cd} \cdot \frac{(0,5 \text{ m})^2}{(1,5 \text{ m})^2} \quad \text{καί} \quad I_1 = 5 \text{ cd}$$

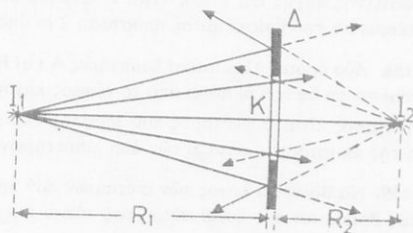
105. Φωτόμετρα

Ἐνομάζουμε *φωτόμετρα* τά ὄργανα πού χρησιμοποιοῦμε γιά νά συγκρίνουμε τήν ἔνταση δύο φωτεινῶν πηγῶν ἢ γιά νά μετρήσουμε τό φωτισμό.

α. Φωτόμετρο Bunsen. Ἡ λειτουργία του στηρίζεται στήν ἐξίσωση τῶν ἴσων φωτισμῶν. Ἀποτελεῖται ἀπό ἕνα λευκό φύλλο χαρτιοῦ μέ μία κηλίδα, ἡ ὁποία σχηματίστηκε ἀπό λιπαρή οὐσία. Ἡ κηλίδα εἶναι *περισσό-*

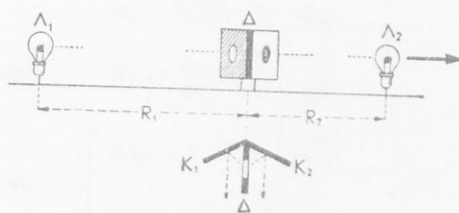
τερο διαφανής από το υπόλοιπο χαρτί. Το διάφραγμα (Δ) με την κηλίδα (K) τοποθετείται μεταξύ των δύο φωτεινών πηγών και κάθετα στην ευθεία που τις συνδέει (σχ. 165). Όταν οι δύο πηγές φωτίζουν εξίσου την κηλίδα, αυτή εξαφανίζεται και όλο το διάφραγμα είναι ομοιόμορφα φωτισμένο. Τότε ισχύει η εξίσωση

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}$$



Σχ. 165. Φωτόμετρο του Bunsen.

από την οποία βρίσκουμε την ένταση της μίας πηγής, όταν είναι γνωστή ή ένταση της άλλης πηγής. Το διάφραγμα βρίσκεται ανάμεσα σε δύο επίπεδους καθρέφτες και μέσα σ' αυτούς βλέπουμε ταυτόχρονα και τις δύο όψεις του χαρτιού (σχ. 166). Στα επισημονικά εργαστήρια για τη μέτρηση της έντασεως των φωτεινών πηγών χρησιμοποιούμε πολύ πιό ακριβή φωτόμετρα.



Σχ. 166. Παρατηρούμε το διάφραγμα μέσα στους δύο καθρέφτες.

β. Μέτρηση του φωτισμού. Για την άμεση μέτρηση του φωτισμού μίας επιφάνειας (π.χ. κατά τη φωτογράφιση) χρησιμοποιούμε ειδικά φωτόμετρα, στα οποία η φωτεινή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Το φως που πέφτει πάνω σε όρισμένη επιφάνεια, δημιουργεί ηλεκτρικό ρεύμα, που η έντασή του είναι ανάλογη με τη φωτεινή ροή που φωτίζει την επιφάνεια. Το άμπερόμετρο αντί να δείχνει άμπέρ, είναι έτσι βαθμολογημένο, ώστε άμέσως δείχνει το φωτισμό της επιφάνειας σε lux.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

157. Μία φωτεινή πηγή παράγει φωτεινή ροή $\Phi = 60$ lumen. Πόση είναι η ένταση I της φωτεινής πηγής και πόσος είναι ο κάθετος φωτισμός που προκαλεί αυτή η πηγή σε μία επιφάνεια που βρίσκεται σε απόσταση 2 m από την πηγή;

158. Δύο όμοιοι ηλεκτρικοί λαμπτήρες A και B, που ο καθένας έχει ένταση $I = 500$ cd, βρίσκονται σε ύψος 9 m πάνω από το έδαφος και η οριζόντια απόστασή τους είναι $AB = 12$ m. Πόσος είναι ο φωτισμός του εδάφους ακριβώς κάτω από κάθε λαμπτήρα και στή μέση της απόστασεως μεταξύ των δύο λαμπτήρων;

159. Νά βρεθεί ο λόγος των φωτισμών που προκαλεί ο Ήλιος σε έναν τόπο, όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ αυτού του τόπου και όταν είναι σε ύψος 30° πάνω από τον ορίζοντα.

160. Δύο φωτεινές πηγές P_1 και P_2 που έχουν αντίστοιχα εντάσεις I_1 και I_2 , βρίσκονται στις άκρες μιάς ευθείας. Ένα σημείο Γ αυτής της ευθείας απέχει από τις δύο φωτεινές πηγές $P_1\Gamma = \alpha$ και $P_2\Gamma = \beta$. Πάνω στην κάθετο που περνάει από το σημείο Γ μετακινείται μία μικρή σφαίρα Σ . Σε πόση απόσταση από το σημείο Γ πρέπει να βρεθεί η σφαίρα Σ , για να δέχεται τον ίδιο φωτισμό από τις δύο φωτεινές πηγές;

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

Μερικές φυσικές σταθερές

Ταχύτητα φωτός στο κενό	$c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{sec}}$
Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο	$ e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$
Μαγνητική διαπερατότητα κενού	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$
Διηλεκτρική σταθερή κενού	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Cb}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$
Σταθερή Faraday	$F = 96\,490 \frac{\text{Cb}}{\text{γραμμοίσοδύναμο}}$
Μάζα ήρεμίας ηλεκτρονίου	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Μαγνητική σταθερή του Coulomb	$K_\mu = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$
Ήλεκτρική σταθερή του Coulomb	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2} \\ K_{\eta\lambda} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{Cb}^2} \end{array} \right.$
Σχέση των σταθερών $K_{\eta\lambda}$ και K_μ	$K_{\eta\lambda} = K_\mu \cdot c^2$

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

Κυριότερες μονάδες του συστήματος MKSA

Μέγεθος		Μονάδα
Μήκος	1 μέτρο	1 m
Μάζα	1 χιλιόγραμμα	1 kg
Χρόνος	1 δευτερόλεπτο	1 s
Ένταση ρεύματος	1 Ampère	1 A
Δύναμη	1 Newton	$1 \text{ N} = 1 \text{ kgr} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Ενέργεια	1 Joule	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
Ίσχύς	1 Watt	$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$
Ηλεκτρικό φορτίο	1 Coulomb	$1 \text{ Cb} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
Δυναμικό	1 Volt	$1 \text{ V} = 1 \frac{\text{J}}{\text{Cb}}$
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	$1 \frac{\text{Newton}}{\text{Cb}}$	$1 \frac{\text{N}}{\text{Cb}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}$
Χωρητικότητα	1 Farad	$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{Cb}}{\text{V}} = 1 \frac{\text{Cb}^2}{\text{J}}$
Αντίσταση αγωγού	1 Ohm	$1 \Omega = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}}$
Ειδική αντίσταση	1 Ohm · m	$1 \Omega \cdot \text{m}$
Ποσότητα μαγνητισμού	1 Ampère · m	$1 \text{ A} \cdot \text{m}$
Μαγνητική ροή	1 Weber	$1 \text{ Wb} = 1 \frac{\text{J}}{\text{A}}$
Μαγνητική επαγωγή	1 Tesla	$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1 \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$
Μαγνητική ροπή	1 Ampère · m ²	$1 \text{ A} \cdot \text{m}^2$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

Κυριότερες εξισώσεις του Ήλεκτρισμού και του Μαγνητισμού
στο σύστημα μονάδων MKSA

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Νόμος του Coulomb
(σημειακά φορτία στο
κενό ή στον αέρα)

$$F = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ Q_1, Q_2 \text{ σε Cb} \\ r \text{ σε m} \\ F \text{ σε N} \end{array} \right.$$

Ένταση ηλεκτρικού
πεδίου

$$E = \frac{F}{q} \quad E = \frac{U}{l} \left\{ \begin{array}{l} F \text{ σε N, } q \text{ σε Cb} \\ U \text{ σε V, } l \text{ σε m} \\ E \text{ σε N/Cb ή V/m} \end{array} \right.$$

Ένταση ηλεκτρικού πε-
δίου σε απόσταση r από
σημειακό φορτίο Q στο
κενό ή στον αέρα

$$E = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q}{r^2} \left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ Q \text{ σε Cb, } r \text{ σε m} \\ E \text{ σε N/Cb ή V/m} \end{array} \right.$$

Δυναμικό σε απόσταση r
από σημειακό φορτίο Q
στο κενό ή στον αέρα

$$U = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q}{r} \left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ Q \text{ σε Cb, } r \text{ σε m} \\ U \text{ σε V} \end{array} \right.$$

Δυναμικό σφαιρικού άγω-
γού με ακτίνα R και φορ-
φορτίο Q

$$U = K_{\eta\lambda} \cdot \frac{Q}{R} \left\{ \begin{array}{l} K_{\eta\lambda} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{Cb}^2 \\ Q \text{ σε Cb, } R \text{ σε m} \\ U \text{ σε V} \end{array} \right.$$

Χωρητικότητα άγωγού

$$C = \frac{Q}{U} \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ σε Cb, } U \text{ σε V} \\ C \text{ σε F} \end{array} \right.$$

Χωρητικότητα σφαιρικού
άγωγού με ακτίνα R

$$C = \epsilon_0 \cdot 4\pi R \left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Cb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \\ R \text{ σε m, } C \text{ σε F} \end{array} \right.$$

Ένέργεια φορτισμένου
άγωγού

$$E = \frac{1}{2} Q \cdot U \left\{ \begin{array}{l} Q \text{ σε Cb, } U \text{ σε V} \\ E \text{ σε J} \end{array} \right.$$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 (συνέχεια)

Χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή στο κενό ή στον αέρα	$C = \epsilon_0 \cdot \frac{S}{l}$	$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Cb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \\ S \text{ σε } \text{m}^2, l \text{ σε } \text{m} \\ C \text{ σε } \text{F} \end{array} \right.$
Ένέργεια φορτισμένου πυκνωτή	$E = \frac{1}{2} Q \cdot U$	$\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ σε } \text{Cb}, U \text{ σε } \text{V} \\ E \text{ σε } \text{J} \end{array} \right.$
Χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή με διηλεκτρικό υλικό (ϵ)	$C = \epsilon_0 \cdot \frac{\epsilon S}{l}$	$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{Cb}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \\ S \text{ σε } \text{m}^2, l \text{ σε } \text{m} \\ C \text{ σε } \text{F} \end{array} \right.$
Ένταση ρεύματος	$I = \frac{Q}{t}$	$\left\{ \begin{array}{l} Q \text{ σε } \text{Cb}, t \text{ σε } \text{s} \\ I \text{ σε } \text{A} \end{array} \right.$
Αντίσταση αγωγού	$R = \frac{U}{I} \quad R = \rho \cdot \frac{l}{S}$	$\left\{ \begin{array}{l} U \text{ σε } \text{V}, I \text{ σε } \text{A} \\ l \text{ σε } \text{m}, S \text{ σε } \text{m}^2 \\ \rho \text{ σε } \Omega \cdot \text{m}, R \text{ σε } \Omega \end{array} \right.$
Κλειστό κύκλωμα	$E = I \cdot R_{\text{ολ}}$	$\left\{ \begin{array}{l} E \text{ σε } \text{V}, I \text{ σε } \text{A} \\ R_{\text{ολ}} \text{ σε } \Omega \end{array} \right.$

ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ – ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Νόμος του Coulomb (σημειακοί πόλοι στο κενό ή στον αέρα)	$F = K_{\mu} \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{N/A}^2 \\ m_1, m_2 \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m} \\ r \text{ σε } \text{m} \\ F \text{ σε } \text{N} \end{array} \right.$
Μαγνητική επαγωγή	$B = \frac{F}{m}$	$\left\{ \begin{array}{l} F \text{ σε } \text{N}, m \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m} \\ B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική επαγωγή σε απόσταση r από σημειακό μαγνητικό πόλο m στο κενό ή στον αέρα	$B_0 = K_{\mu} \cdot \frac{m}{r^2}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{N/A}^2 \\ m \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m} \\ r \text{ σε } \text{m} \\ B_0 \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$

ΠΙΝΑΚΑΣ 3 (συνέχεια)

Μαγνητική επαγωγή μέσα σε υλικό με μαγνητική διαπερατότητα μ	$B = \mu \cdot K_{\mu} \cdot \frac{m}{r^2}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2 \\ m \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m}, r \text{ σε } \text{m} \\ B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική ροή	$\Phi = B \cdot S \cdot \text{συν } \alpha$	$\left\{ \begin{array}{l} B \text{ σε } \text{T}, S \text{ σε } \text{m}^2 \\ \Phi \text{ σε } \text{Wb} \end{array} \right.$
Μαγνητική ροπή μαγνητικού διπόλου	$M^* = m \cdot l$	$\left\{ \begin{array}{l} m \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m}, l \text{ σε } \text{m} \\ M^* \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m}^2 \end{array} \right.$
Νόμος Biot - Savart	$\Delta B = K_{\mu} \cdot \frac{I \cdot \Delta l}{r^2} \cdot \eta\mu \phi$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, I \text{ σε } \text{A} \\ l, r \text{ σε } \text{m}, \Delta B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική επαγωγή σε απόσταση r από ευθύγραμμο άγωγο	$B = K_{\mu} \cdot \frac{2I}{r}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, r \text{ σε } \text{m} \\ I \text{ σε } \text{A}, B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική επαγωγή στο κέντρο κυκλικού άγωγού ακτίνας R	$B = K_{\mu} \cdot \frac{2\pi I}{r}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, I \text{ σε } \text{A} \\ r \text{ σε } \text{m}, B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική επαγωγή στο μέσο σωληνοειδούς	$B = K_{\mu} \cdot 4\pi \cdot n \cdot I$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, I \text{ σε } \text{A} \\ n \text{ σπειρες/m}, B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική επαγωγή σωληνοειδούς με πυρήνα σιδήρου (μ)	$B = K_{\mu} \cdot 4\pi \cdot \mu \cdot n \cdot I$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, I \text{ σε } \text{A} \\ n \text{ σπειρες/m}, B \text{ σε } \text{T} \end{array} \right.$
Μαγνητική ροπή κυκλικού ρεύματος (I σπείρα)	$M^* = I \cdot S$	$\left\{ \begin{array}{l} I \text{ σε } \text{A}, S \text{ σε } \text{m}^2 \\ M^* \text{ σε } \text{A} \cdot \text{m}^2 \end{array} \right.$
Νόμος του Laplace	$F = l \cdot I \cdot B \cdot \eta\mu \phi$	$\left\{ \begin{array}{l} l \text{ σε } \text{m}, I \text{ σε } \text{A} \\ B \text{ σε } \text{T}, F \text{ σε } \text{N} \end{array} \right.$
Ήλεκτρομαγνητική δύναμη μεταξύ δύο παράλληλων ρευμάτων	$F = K_{\mu} \cdot \frac{2l \cdot I_1 \cdot I_2}{r}$	$\left\{ \begin{array}{l} K_{\mu} = 10^{-7} \text{ N/A}^2, l, r \text{ σε } \text{m} \\ I_1, I_2 \text{ σε } \text{A}, F \text{ σε } \text{N} \end{array} \right.$

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ

Ἡλεκτρικό φορτίο

Σελίδες

Θεμελιώδη φαινόμενα. Μονωτές, αγωγοί, ἡμιαγωγοί. Ἡλεκτροσκόπιο. Κατανομή τοῦ ἡλεκτρικοῦ φορτίου. Συστήματα μονάδων στὸν Ἡλεκτρισμό. Νόμος τοῦ Coulomb	5
---	---

Ἡλεκτρικό πεδίο

Ὅρισμός τοῦ ἡλεκτρικοῦ πεδίου. Στοιχεῖα τοῦ ἡλεκτρικοῦ πεδίου. Δυναμικό αγωγοῦ καὶ διαφορά δυναμικοῦ μεταξύ δύο αγωγῶν. Σχέση μεταξύ διαφορᾶς δυναμικοῦ καὶ ἐντάσεως ἡλεκτρικοῦ πεδίου. Ἡλέκτριση αγωγοῦ μέ ἐπαγωγή	10
---	----

Φύση τοῦ ἡλεκτρισμοῦ

Στοιχειῶδες ἡλεκτρικό φορτίο. Ἐμφάνιση ἡλεκτρικῶν φορτίων. Τά ἐλεύθερα ἡλεκτρόνια τῶν μετάλλων. Ἐξήγηση τῆς ἡλεκτρίσεως τῶν σωμάτων	19
---	----

Χωρητικότητα αγωγοῦ — Πυκνωτές

Χωρητικότητα αγωγοῦ. Ἐνέργεια φορτισμένου αγωγοῦ. Πυκνωτῆς. Ἐνέργεια φορτισμένου πυκνωτῆ. Ἐπίπεδος πυκνωτῆς. Σύνδεση πυκνωτῶν. Πυκνωτῆς μέ διηλεκτρικό ὑλικό. Μορφές πυκνωτῶν.	23
---	----

ΣΥΝΕΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΡΕΥΜΑ

Νόμος τοῦ Ohm

Τό ἡλεκτρικό ρεύμα ὡς ροή ἡλεκτρονίων. Ἀποτελέσματα τοῦ τοῦ ἡλεκτρικοῦ ρεύματος. Ἐνταση τοῦ ἡλεκτρικοῦ ρεύματος. Μέτρηση τῆς ἐντάσεως τοῦ ρεύματος. Κύκλωμα. Διαφορά δυναμικοῦ μεταξύ δύο σημείων τοῦ αγωγοῦ. Νόμος τοῦ Ohm γιά τμήμα αγωγοῦ. Νόμος τῆς ἀντιστάσεως αγωγοῦ. Σύνδεση ἀντιστάσεων. Μέτρηση ἀντιστάσεων.	34
--	----

Ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρικοῦ ρεύματος

Ἐνέργεια τοῦ ἠλεκτρικοῦ ρεύματος. Νόμος τοῦ Joule. Ἐφαρμογές τοῦ φαινομένου Joule	48
---	----

Κλειστό κύκλωμα

Ἡ γεννήτρια στό κλειστό κύκλωμα. Ἡλεκτρεγερτική δύναμη γεννήτριας. Νόμος τοῦ Ohm γιά κλειστό κύκλωμα. Σύνδεση γεννητριῶν	54
--	----

ΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ**Ἰδιότητες τῶν μαγνητῶν**

Μαγνήτες. Μαγνητισμός. Πόλοι τοῦ μαγνήτη. Μαγνήτιση μέ ἔπαφή καί μέ ἔπαγωγή. Στοιχειώδεις μαγνήτες. Συστήματα μονάδων στό Μαγνητισμό. Νόμος τοῦ Coulomb	60
---	----

Μαγνητικό πεδίο

Μαγνητικό φάσμα. Ὅρισμός τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου. Στοιχεῖα τοῦ μαγνητικοῦ πεδίου. Μαγνητική ροπή μαγνήτη. Μαγνητική ροή. Μαγνητική διαπερατότητα τοῦ σιδήρου. Μαγνητική κατάταξη τῶν ὑλικῶν. Μαγνητική διαπερατότητα τοῦ κενοῦ.	65
---	----

Μαγνητικό πεδίο τῆς Γῆς

Μαγνητική ἀπόκλιση. Μαγνητική ἔγκλιση. Γήινο μαγνητικό πεδίο. Μαγνητικά στοιχεῖα ἑνός τόπου. Μαγνητική πυξίδα	75
--	----

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΣ

Μαγνητικό πεδίο τοῦ ρεύματος. Μαγνητικό πεδίο εὐθύγραμμου ρευματοφόρου ἀγωγοῦ. Νόμος Biot-Savart. Μαγνητικό πεδίο κυκλικοῦ ρευματοφόρου ἀγωγοῦ. Μαγνητικό πεδίο σωληνοειδοῦς. Προέλευση τῶν μαγνητικῶν πεδίων. Ἡλεκτρομαγνήτης. Ἐπίδραση μαγνητικοῦ πεδίου σέ ρεῦμα.	81
---	----

ΟΠΤΙΚΗ

Διάδοση του φωτός

Όρισμοί. Εὐθύγραμμη διάδοση του φωτός. Γεωμετρική καὶ Φυσική Ὀπτική. Ἀποτελέσματα τῆς εὐθύγραμμης διαδόσεως του φωτός. Ταχύτητα διαδόσεως του φωτός 97

Ἀνάκλαση του φωτός

Διάχυση καὶ ἀνάκλαση του φωτός. Ἀνάκλαση του φωτός. Ἐπίπεδοι καθρέφτες. Ἀρχὴ τῆς ἀντίστροφης πορείας του φωτός. Σφαιρικοί καθρέφτες. Κοῖλοι σφαιρικοί καθρέφτες. Κυρτοὶ σφαιρικοί καθρέφτες. Γενικὲς ἐξισώσεις γιὰ τοὺς σφαιρικοὺς καθρέφτες 101

Διάθλαση του φωτός

Διάθλαση του φωτός. Ὀριακὴ γωνία. Ὀλικὴ ἀνάκλαση. Ἀποτελέσματα τῆς διαθλάσεως. Διάδοση του φωτός μέσα ἀπὸ πλάκα. Διάδοση του φωτός μέσα ἀπὸ πρίσμα. Πρίσματα ὀλικῆς ἀνακλάσεως 115

Σφαιρικοί φακοί

Φακοί. Συγκεντρωτικοὶ φακοί. Ἀποκεντρωτικοὶ φακοί. Γενικὲς ἐξισώσεις τῶν φακῶν. Ἴσχύς φακοῦ. Σύστημα λεπτῶν φακῶν. 127

Ὀπτικά ὄργανα

Ὀπτικά ὄργανα. Μεγέθυνση. Ἀπλό μικροσκόπιο. 139

Ἀνάλυση του φωτός

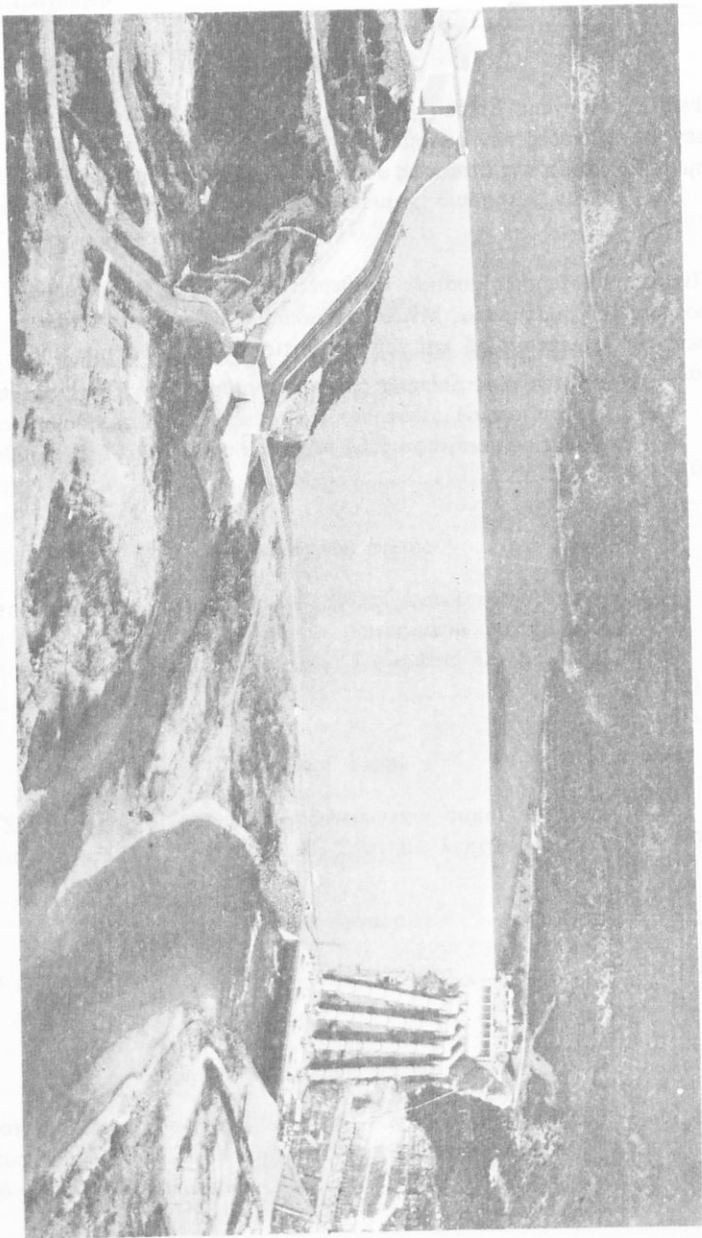
Ἀνάλυση του λευκοῦ φωτός. Ἰδιότητες τῶν ἀκτινοβολιῶν του φάσματος. Οὐράνιο τόξο. Φασματοσκόπιο. Ἀόρατες ἀκτινοβολίες. Τὸ χρῶμα τῶν σωμάτων 143

Φωτομετρία

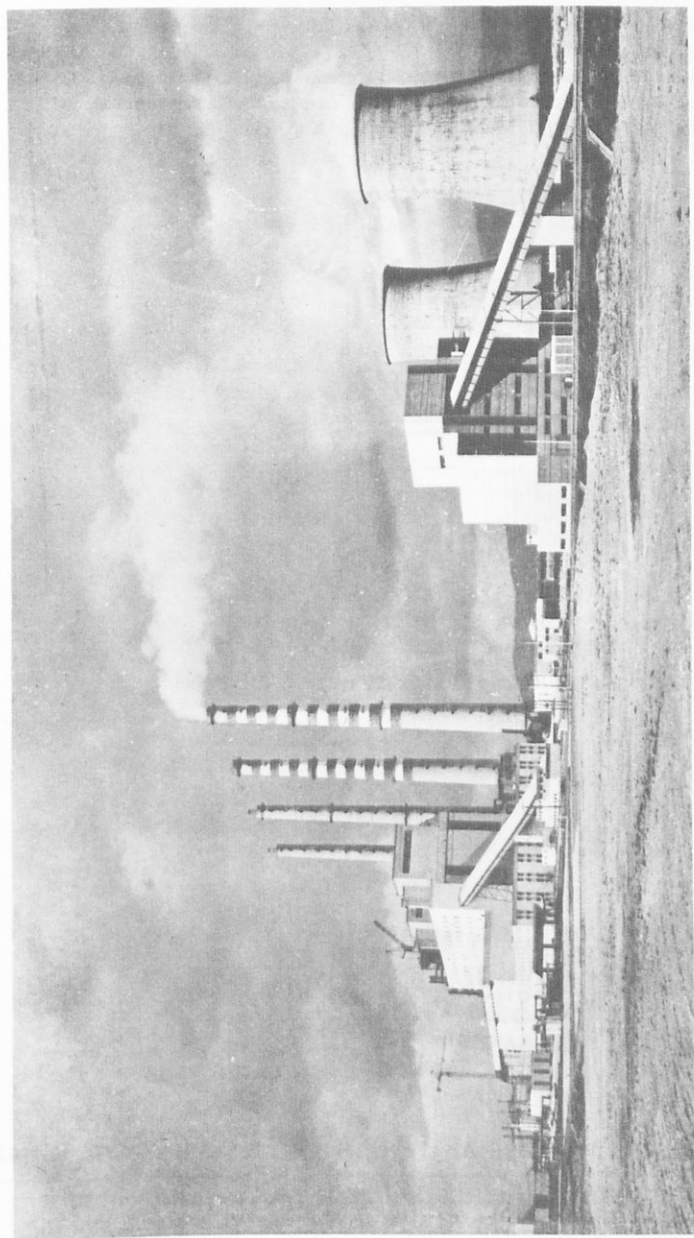
Φωτεινή ενέργεια. Στερεή γωνία και μονάδα της. Φωτομετρικά μεγέθη. Μονάδες των φωτομετρικών μεγεθών. Νόμος του φωτισμού. Σύγκριση της εντάσεως φωτεινών πηγών. Φωτόμετρα	152
--	-----

Πίνακες

Πίνακας 1. Μερικές φυσικές σταθερές. Πίνακας 2. Κυριότερες μονάδες του συστήματος MKSA. Πίνακας 3. Κυριότερες εξισώσεις του Ήλεκτρισμού και του Μαγνητισμού στο σύστημα μονάδων MKSA	161
--	-----



Υδροηλεκτρικό έργοστάσιο Καστρακίου (Αγελώφως).
Οι τέσσερις μονάδες του δίνουν συνολική ισχύ 320 μεγαβάτ.



Θερμοηλεκτρικό έργοστάσιο Καρδίτσας Πτολεμαΐδας.
Οι δύο σέ λειτουργία μονάδες δίνουν συνολική ισχύ 600 μεγαβάτ.

Τά αντίτυπα τοῦ βιβλίου φέρουν τό κάτωθι βιβλιόσημο γιά ἀπόδειξη τῆς γνησιότητος αὐτῶν.

Ἐπίσης, πωλῶν ἢ χρησιμοποιοῦν αὐτό διώκεται κατὰ τὰς διατάξεις τοῦ ἀρθροῦ 7 τοῦ Νόμου 1129 τῆς 15/21 Μαρτίου 1946 (Ἐφ. Κυβ. 1946, Α' 108)».



ΕΚΔΟΣΗ ΚΒ'/ΚΓ' 1982 (IV) – ΑΝΤΙΤΥΠΑ 138.000 – ΣΥΜΒΑΣΗ 3758/5-2-82

ΕΚΤΥΠΩΣΗ: Θ. ΝΤΑΣΗΣ – ΒΙΒΛΙΟΔΕΣΙΑ: Δ. ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ

