

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

# ΦΥΣΙΚΗ



Β' ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

Γενικής Παιδείας

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ, ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ

Φυσική  
Γενικής Παιδείας  
Β' ΤΑΞΗ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

Νίκος Αλεξάκης	Μενέλαος Σαμπράκος
Σταύρος Αμπατζής	Αργύρης Ψαλίδας
Γιώργος Γκουγκούσης	
Βαγγέλης Κουντούρης	Πέτρος Γεωργακάκος
Νίκος Μοσχοβίτης	Αθανάσιος Σκαλωμένος
Σάββας Οβαδίας	Νικόλαος Σφαρνάς
Κλεομένης Πετρόχειλος	Ιωάννης Χριστακόπουλος

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

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΗΣ ΕΚΔΟΣΗΣ

Το κεφάλαιο 1 προέρχεται από το βιβλίο «Φυσική Γενικής Παιδείας Β' τάξης Γενικού Λυκείου», ΙΤΥΕ «Διόφαντος» 2013

Το κεφάλαιο 2 προέρχεται από το βιβλίο «Φυσική Γενικής Παιδείας Α' τάξης Γενικού Λυκείου», ΙΤΥΕ «Διόφαντος» 2013

### ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

**Αλεξάκης Νίκος**, Msc φυσικός, καθηγητής 5ου Λυκείου Κορυδαλλού

**Αμπατζής Σταύρος**, Δρ φυσικός, καθηγητής Γενναδείου Σχολής

**Γκουγκούσης Γιώργος**, φυσικός, ιδιοκτήτης - διευθυντής φροντιστηρίου

**Κουντούρης Βαγγέλης**, φυσικός, καθηγητής 1ου Γυμνασίου Ιλίου

**Μοσχοβίτης Νίκος**, φυσικός, καθηγητής εκπ/ρίων Κωστέα - Γείτονα

**Οβαδίας Σάββας**, φυσικός, καθηγητής Λυκείου Ν. Αρτάκης

**Πετρόχειλος Κλεομένης**, φυσικός, καθηγητής Αμερικανικού Κολλεγίου

**Σαμπράκος Μενέλαος**, φυσικός, ιδιοκτήτης - διευθυντής φροντιστηρίου

**Ψαλίδας Αργύρης**, Δρ φυσικός, καθηγητής Κολλεγίου Αθηνών

### ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΗΣ ΣΥΓΓΡΑΦΙΚΗΣ ΟΜΑΔΑΣ

**Πετρόχειλος Κλεομένης**, φυσικός, καθηγητής Αμερικανικού Κολλεγίου

### ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΕΝΘΕΤΑ

**Καζαντζή Μαρία**, φυσικός, καθηγήτρια β/θμιας εκπαίδευσης

### ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

#### ΤΟΥ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ

**Ραγιαδάκος Χρήστος**, πάρεδρος στον τομέα Φυσικών Επιστημών του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου

### ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

Χριστοδούλου Ειρήνη, φιλόλογος

### ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΤΥΠΟΥ

ΚΑΙ ΚΑΛΛΙΤΕΧΝΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ  
Παπαζαχαροπούλου Μαρία

### ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Γαβριηλίδου Δανάη

### ΜΑΚΕΤΤΑ ΕΞΩΦΥΛΛΟΥ:

«ΑΦΟΙ ΠΕΡΓΑΜΑΛΗ»

Τα κεφάλαια 3 και 4 προέρχονται από το βιβλίο «Φυσική Γενικής Παιδείας Γ' τάξης Γενικού Λυκείου», ΙΤΥΕ «Διόφαντος» 2013

### ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

**Πέτρος Γεωργακάκος**, φυσικός, καθηγητής 3ου Λυκείου Ηλιούπολης

**Αθανάσιος Σκαλωμένος**, φυσικός, καθηγητής 1ου Λυκείου Ζωγράφου

**Νικόλαος Σφαρνάς**, φυσικός, καθηγητής 5ου Λυκείου Αθηνών

**Ιωάννης Χριστακόπουλος**, φυσικός, καθηγητής του Ε.Π.Λ. Νέας Φιλαδέλφειας «Μίλτος Κουντουράς»

### ΟΜΑΔΑ ΚΡΙΣΗΣ

**Ευάγγελος Κούκλης**, φυσικός, καθηγητής 6ου Λυκείου Ζωγράφου

**Σπύρος Τζαμαρίας**, φυσικός στοιχειωδών σωματιδίων. Κύριος ερευνητής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»

**Χρήστος Χρονόπουλος**, φυσικός, καθηγητής 4ου Λυκείου Αμαρουσίου

### ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

#### ΤΟΥ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ

**Χρήστος Δούκας**, πάρεδρος Παιδαγωγικού Ινστιτούτου, τομέας Φυσικών Επιστημών

### ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

**Μαιρίτα Κλειδωνάρη**, φιλόλογος, καθηγήτρια Λυκείου Αγίου Στεφάνου

Επιθυμούμε από τη θέση αυτή να ευχαριστήσουμε: την Ένωση Ελλήνων Φυσικών, τον καθηγητή του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Αθανάσιο Λαχανά, το Παιδαγωγικό Ινστιτούτο, τους συναδέλφους Γιώργο Σουβατζόγλου, Χρήστο Κωνσταντάκο, Γιάννη Γιαμάκη και Άγγελο Ελευθερίου και όλους τους συναδέλφους, για τις χρήσιμες παραπορίεις τους κατά τη διάρκεια της συγγραφής και την πολύμορφη βοήθεια που μας προσέφεραν.

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΠΑΝΕΚΔΟΣΗΣ

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

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



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
υπό την οργάνωση της Ελληνικής Κυβερνήσεως

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
Επόμενη γενιά μας

Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων</b>	
Εισαγωγικό ένθετο	5	
<b>1.1</b>	Ο νόμος του Coulomb	13
<b>1.2</b>	Ηλεκτρικό πεδίο	17
<b>1.3</b>	Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια	23
<b>1.4</b>	Δυναμικό - Διαφορά δυναμικού	26
<b>1.5</b>	Πυκνωτές	30
Σ' αυτή την ενότητα μάθαμε	36	
Στρατηγική επίλυσης προβλημάτων	37	
Ερωτήσεις - Δραστηριότητες	43	
Προβλήματα	51	
Ένθετο: Κεραυνός	57	
Ένθετο: Αλεξικέραυνο	58	
Ένθετο: Πυκνωτές και ανθρώπινο σώμα	58	
Ένθετο: Βενιαμίν Φραγκλίνος	58	
<b>2</b>	<b>Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα</b>	
<b>2.1</b>	Ηλεκτρικές πηγές	63
<b>2.2</b>	Ηλεκτρικό ρεύμα	63
<b>2.3</b>	Κανόνες του Kirchhoff	68
<b>2.4</b>	Αντίσταση (ωμική) - Αντιστάτης	72
<b>2.5</b>	Συνδεσμολογία αντιστατών (αντιστάσεων)	80
<b>2.6</b>	Ρυθμιστική (μεταβλητή) αντίσταση	86
<b>2.7</b>	Ενέργεια και ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος	88
<b>2.8</b>	Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) πηγής	96
<b>2.9</b>	Νόμος του Ohm για κλειστό κύκλωμα	98
<b>2.10</b>	Αποδέκτες	102
<b>2.11</b>	Δίοδος	102
Περίληψη	108	
Στρατηγική επίλυσης προβλημάτων	111	
Λυμένα προβλήματα	113	
Ερωτήσεις - Δραστηριότητες	119	
Προβλήματα	129	
Ένθετο: Α. Ηλεκτρική εγκατάσταση σπιτιού ηλεκτρικές συσκευές	135	
Ένθετο: Β. Οι ημιαγωγοί στη ζωή μας	140	
<b>3</b>	<b>Το Φως</b>	
<b>3.1</b>	Η φύση του φωτός	147
<b>3.2</b>	Η ταχύτητα του φωτός	150
<b>3.3</b>	Μήκος κύματος και συχνότητα του φωτός κατά τη διάδοση του	152
<b>3.4</b>	Ανάλυση λευκού φωτός και χρώματα	154
<b>3.5</b>	Πόλωση του φωτός	159
Ελεύθερο ανάγνωσμα	167	
Δραστηριότητα	169	
Σύνοψη 3ου κεφαλαίου	170	
Ερωτήσεις	171	
Ασκήσεις και προβλήματα	173	
<b>4</b>	<b>Ατομικά φαινόμενα</b>	
<b>4.1</b>	Ενέργεια του Ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου	177
<b>4.2</b>	Διακριτές ενεργειακές στάθμες	185
<b>4.3</b>	Μηχανισμός παραγωγής και απορρόφησης φωτονίων	187
<b>4.4</b>	Ακτίνες X	190
Σύνοψη 4ου κεφαλαίου	196	
Ερωτήσεις	197	
Ασκήσεις και προβλήματα	200	
Αιτιοκρατία και κβαντομηχανική	202	

# **(1 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ )**



- 1.1 Ο νόμος του Coulomb**
- 1.2 Ηλεκτρικό πεδίο - Ένταση - Δυναμικές γραμμές**
- 1.3 Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια**
- 1.4 Δυναμικό - Διαφορά δυναμικού**
- 1.5 Πυκνωτές**

## Εισαγωγικό ένθετο

Όλοι είχαμε την εμπειρία ενός ηλεκτρικού «τινάγματος» όταν ακουμπήσαμε το αμάξωμα ενός αυτοκινήτου, ή όταν σηκωθήκαμε από μια πλαστική καρέκλα, ή όταν αγγίξαμε την οθόνη ενός υπολογιστή.

Τα παραπάνω φαινόμενα και πολλά άλλα οφείλονται σε στατικά (ακίνητα) ηλεκτρικά φορτία, που συγκεντρώθηκαν σε κάποια περιοχή των σωμάτων που ηλεκτρίσθηκαν.

Εξάλλου για πολλούς αιώνες ήταν γνωστή η ιδιότητα του ήλεκτρου να έλκει ελαφρά αντικείμενα, αφού το τρίψουμε σε ένα κομμάτι ύφασμα.

Διαπιστώθηκε με πειράματα ότι την ιδιότητα αυτή αποκτούν και άλλα σώματα, όπως ο εβονίτης, το γυαλί, το ρετσίνι, το νάυλον, το λάστιχο, η πορσελάνη, η μίκα κ.ά. (πίνακας I).

Τα ηλεκτρισμένα σώματα χωρίζονται σε δύο ομάδες. Εκείνα που εμφανίζουν συμπεριφορά όμοια με την ηλεκτρισμένη ράβδο γυαλιού ονομάστηκαν θετικά ηλεκτρισμένα, και εκείνα που εμφανίζουν συμπεριφορά όμοια με την ηλεκτρισμένη ράβδο εβονίτη ονομάστηκαν αρνητικά ηλεκτρισμένα.

Η θετική και αρνητική ηλέκτριση αποδόθηκε στα θετικά και αρνητικά φορτία αντίστοιχα.

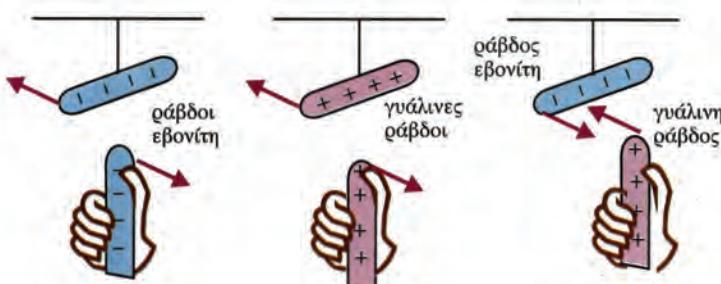
Δύο θετικά ή δύο αρνητικά φορτία ονομάζονται ομώνυμα φορτία.

Ένα θετικό και ένα αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο ονομάζονται ετερώνυμα φορτία.

Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ φορτισμένων σωμάτων μπορεί να είναι ελκτικές ή απωστικές (Εικ. 1).

ΟΜΑΔΑ Α	ΟΜΑΔΑ Β
Γυαλί (τριβή σε μετάξι ή ύφασμα)	Κεχριμπάρι (τριβή σε ύφασμα)
Μίκα (τριβή σε ύφασμα)	Κομμάτι θείου (τριβή σε μαλλί ή γούνα)
Αμίαντος (τριβή σε ύφασμα ή χαρτί)	Ελαστικό (τριβή σε ύφασμα)
	Μίκα (τριβή σε ξηρό μαλλί)

**Πίνακας I:** O B. Franklin ονόμασε τα υλικά της ομάδας (A) θετικά ηλεκτρισμένα και τα υλικά της ομάδας (B) αρνητικά ηλεκτρισμένα.



Εικόνα 1. (a) Τα ομόνυμα φορτία απωθούνται. (b) Τα ετερώνυμα φορτία έλκονται.

## Δομή της ύλης - Το ηλεκτρόνιο

Όλα τα σώματα αποτελούνται από άτομα. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιούμε για τα άτομα οικοδομείται από έναν πυρήνα, ο οποίος περιέχει τα πρωτόνια που έχουν όλα το ίδιο θετικό ηλεκτρικό φορτίο και τα νετρόνια που είναι ηλεκτρικά ουδέτερα.

## 6 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Γύρω από τον πυρήνα περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια. Κάθε ηλεκτρόνιο έχει αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο που είναι κατά απόλυτη τιμή ίσο με το θετικό φορτίο του πρωτονίου. Το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι η **μικρότερη ποσότητα αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου** που εμφανίζεται ελεύθερη στη φύση (Εικ. 2).

Κάθε άτομο περιέχει ίσο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων, γι' αυτό και είναι ηλεκτρικά ουδέτερο. Αν διαταραχθεί η ισορροπία αυτή, τότε λέμε ότι «ηλεκτρίζεται».

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια του πυρήνα **δεν είναι δυνατό να μετακινηθούν** με απλές φυσικές μεθόδους, αντίθετα τα ηλεκτρόνια είναι δυνατό να μετακινηθούν με απλές φυσικές μεθόδους, π.χ. με την τριβή ενός σώματος με κάποιο άλλο σώμα.



Το άτομο.  
Εικόνα 2.

### Το ηλεκτροσκόπιο

Το ηλεκτροσκόπιο είναι όργανο που χρησιμοποιείται στα εργαστήρια για την ανίχνευση του ηλεκτρικού φορτίου.

Η μορφή που συνήθως χρησιμοποιείται είναι το ηλεκτροσκόπιο με δείκτη (Εικ. 3). Αποτελείται από μία μεταλλική ράβδο, που στο πάνω άκρο της οποίας είναι στερεωμένο ένα μεταλλικό σφαιρίδιο. Στο μέσο της μεταλλικής ράβδου υπάρχει ένας μεταλλικός δείκτης (συνήθως φύλλο αλουμινίου).

Το σύστημα βρίσκεται μέσα σε μεταλλικό κουτί.

Όταν η μεταλλική ράβδος με το δείκτη φορτισθούν, απωθούνται λόγω του ομόσημου φορτίου τους. Όσο μεγαλύτερο είναι το ηλεκτρικό φορτίο τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ ράβδου και δείκτη.



Ηλεκτροσκόπιο.  
Εικόνα 3.

### Τρόποι ηλέκτρισης

#### 1. Με τριβή

Αν τρίψουμε μια ράβδο γυαλιού με ένα μεταξωτό ύφασμα, τότε ηλεκτρόνια της ράβδου μεταφέρονται στο ύφασμα. Η ράβδος έχει αποκτήσει θετικό ηλεκτρικό φορτίο (έλλειμμα  $e^-$ ), ενώ το ύφασμα αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο (πλεόνασμα  $e^-$ ).

Αντίστοιχα, τριβή ράβδου από εβονίτη με τρίχωμα γάτας προκαλεί μετακίνηση ηλεκτρονίων από το τρίχωμα στον εβονίτη. Έχουμε λοιπόν φόρτιση του εβονίτη με αρνητικό φορτίο (πλεόνασμα ηλεκτρονίων) και φόρτιση του τριχώματος με θετικό φορτίο (έλλειμμα ηλεκτρονίων) (Εικ. 4).

#### 2. Με επαγωγή

α. Πλησιάζουμε μία αρνητικά φορτισμένη ράβδο στο σφαιρίδιο ηλεκτροσκοπίου. Ο δείκτης αποκλίνει από την αρχική κατακόρυφη θέση του.

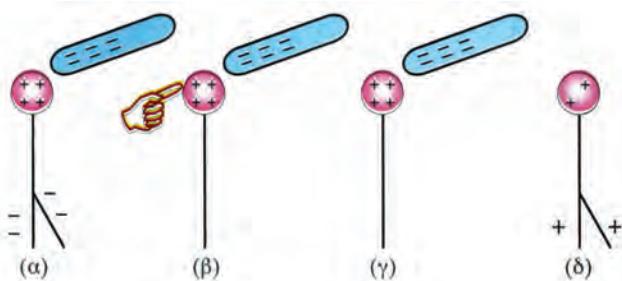
Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια (σφαιριδίου - ράβδου - δείκτη) απωθούνται προς τη μεταλλική ράβδο και το δείκτη, οπότε



Ηλέκτριση με τριβή.  
Εικόνα 4.

η ράβδος και ο δείκτης φορτίζονται αρνητικά ενώ το σφαιρίδιο θετικά (Εικ. 5α).

- β. Στη συνέχεια ακουμπάμε με το δάκτυλό μας το σφαιρίδιο του ηλεκτροσκοπίου. Ο δείκτης επανέρχεται στην αρχική του θέση. Αυτό συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια μέσω του σώματός μας μεταφέρονται στη γη. Το σφαιρίδιο παραμένει φορτισμένο θετικά (Εικ. 5β).
- γ. Μετά απομακρύνουμε το δάκτυλο μας από το σφαιρίδιο. Παρατηρούμε ότι το σύστημα παραμένει αμετάβλητο (Εικ. 5γ).
- δ. Τέλος, απομακρύνουμε και τη ράβδο από το σφαιρίδιο. Ο δείκτης αποκλίνει από την αρχική κατακόρυφη θέση του. Αυτό συμβαίνει γιατί ηλεκτρόνια της ράβδου και του δείκτη μεταφέρονται στο σφαιρίδιο, οπότε η ράβδος και ο δείκτης φορτίζονται θετικά. Το σφαιρίδιο παραμένει θετικά φορτισμένο, γιατί τα ηλεκτρόνια που μεταφέρθηκαν σ' αυτό εξουδετέρωσαν μέρος του θετικού του φορτίου (Εικ. 5δ).

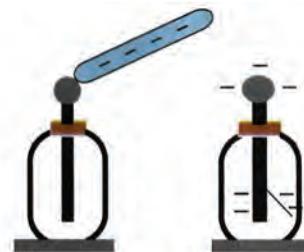


Εικόνα 5. Ηλέκτριση με επαγωγή.

### 3. Με επαφή

Αρνητικά φορτισμένη ράβδος εβονίτη έρχεται σε επαφή με το σφαιρίδιο αρχικά αφόρτιστου ηλεκτροσκοπίου και στη συνέχεια απομακρύνεται.

Παρατηρούμε ότι ο δείκτης αποκλίνει από την αρχική κατακόρυφη θέση του. Αυτό συμβαίνει γιατί ηλεκτρόνια από τη ράβδο του εβονίτη μεταφέρονται στο ηλεκτροσκόπιο φορτίζοντάς το αρνητικά (Εικ. 6). Βλέπουμε λοιπόν ότι ένα μέρος του φορτίου της ράβδου μεταφέρθηκε στο ηλεκτροσκόπιο κατά τη διάρκεια της επαφής.



Ηλέκτριση σώματος με επαφή.  
Εικόνα 6.

## Αγωγοί - Μονωτές - Ηλεκτρικό κύκλωμα

α) Στην καθημερινή ζωή συμβαίνουν φαινόμενα που προκαλούνται από κινούμενα ηλεκτρικά φορτία. Στην κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων οφείλεται ο ηλεκτρικός φωτισμός, η ηλεκτρική θέρμανση, η κίνηση των ηλεκτρικών κινητήρων, η λειτουργία του ραδιοφώνου, η λειτουργία της τηλεόρασης, η λειτουργία των ηλεκτρονικών υπολογιστών κ.ά. Με το σύνολο των φαινομένων που προκαλούνται από κινούμενα φορτία ασχολείται ο Δυναμικός Ηλεκτρισμός.

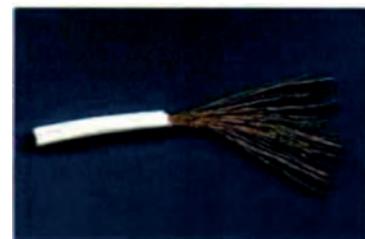
Τα σώματα που επιτρέπουν τη μετακίνηση φορτίου μέσα από τη μάζα τους λέγονται **αγωγοί**. Αγωγοί είναι τα μέταλλα, οι ηλεκτρολυτικοί αγωγοί, οι ημιαγωγοί, οι υπεραγωγοί, τα ιονισμένα αέρια, όπως και όλα τα έμβια όντα.

Τα σώματα που δεν επιτρέπουν τη μετακίνηση φορτίου μέσα από τη μάζα τους λέγονται **μονωτές**. Μονωτές είναι το ξύλο, το γυαλί, το πλαστικό, το χαρτί, το καουτσούκ, τα κεραμικά, το λάστιχο κ.ά.

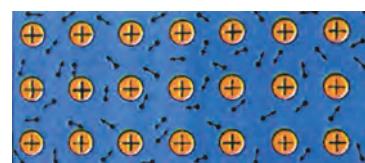
Ας δούμε τι γίνεται στους μεταλλικούς αγωγούς, που είναι οι συνηθέστεροι και έχουν μεγαλύτερη σχέση με την καθημερινή ζωή. Ένα τυπικό παράδειγμα μεταλλικού αγωγού είναι το χάλκινο σύρμα (Εικ. 7), το οποίο υπάρχει μέσα στα καλώδια που χρησιμοποιούμε στις οικιακές συσκευές. Στο εσωτερικό ενός ουδέτερου μεταλλικού αγωγού υπάρχει μεγάλος αριθμός (περίπου  $10^{23}/cm^3$ ) ελευθέρων ηλεκτρονίων και θετικών ιόντων. **Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια** είναι ηλεκτρόνια που ξέφυγαν από την έλξη του πυρήνα και κινούνται άτακτα προς όλες τις κατευθύνσεις με ταχύτητες της τάξης των  $km/s$  (Εικ. 8). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αποτελούν ένα είδος «**ηλεκτρονικού αερίου**», γιατί η κίνησή τους μοιάζει με την κίνηση των μορίων ενός αερίου. **Τα θετικά ιόντα** είναι τα ιόντα που προέκυψαν από τα άτομα του μετάλλου, επειδή τους ξέφυγαν τα ηλεκτρόνια. Τα θετικά ιόντα ταλαντώνονται γύρω από καθορισμένες θέσεις προς όλες τις κατευθύνσεις, με πλάτος που αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Τα θετικά ιόντα συνδέονται μεταξύ τους με ισχυρές δυνάμεις, όμοιες με εκείνες ενός ελατηρίου. Το σύνολο των θετικών ιόντων που είναι τοποθετημένα σε καθορισμένες θέσεις καλείται **πλέγμα** (Εικ. 9).

**Η αγωγιμότητα των μετάλλων οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια.**

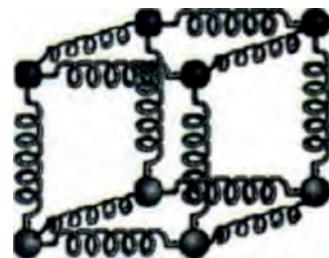
Στους μονωτές η μεγάλη πλειοψηφία των ηλεκτρονίων είναι δέσμια του πυρήνα τους. Υπάρχει περίπου ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ανά  $5\text{ cm}^3$ .



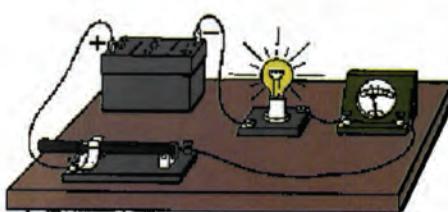
Χάλκινο σύρμα.  
Εικόνα 7.



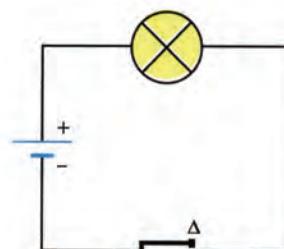
Εσωτερικό μεταλλικού αγωγού.  
Εικόνα 8.



Πλέγμα.  
Εικόνα 9.



(α)

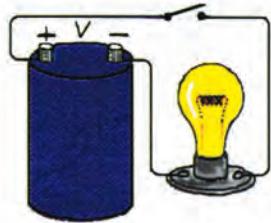


(β)

Εικόνα 10. Ηλεκτρικό κύκλωμα. (α) Εργαστηριακή διάταξη. (β) Συμβολισμός.

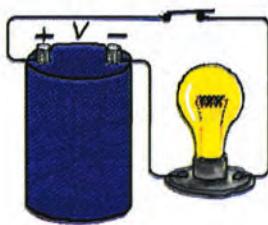
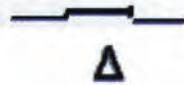
**β) Ηλεκτρικό κύκλωμα** λέμε μια κλειστή αγώγιμη διαδρομή, από την οποία διέρχεται το ηλεκτρικό ρεύμα. Η διάταξη της Εικόνας 10, η οποία αποτελείται από μια ηλεκτρική πηγή, ένα διακόπτη  $\Delta$ , ένα αμπερόμετρο και ένα λαμπτήρα  $\Lambda$ , είναι ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα.

## 9 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων



Εικόνα 11. Συμβολισμός ανοικτού διακόπτη. Εικόνα 12. Ανοικτό κύκλωμα.

Όταν ο διακόπτης Δ είναι ανοικτός (Εικ. 11), το κύκλωμα λέγεται **ανοικτό κύκλωμα** και δε διαρρέεται από ρεύμα (Εικ. 12).



Εικόνα 13. Συμβολισμός κλειστού διακόπτη. Εικόνα 14. Κλειστό κύκλωμα.

Όταν ο διακόπτης Δ είναι κλειστός (Εικ. 13), το κύκλωμα λέγεται **κλειστό κύκλωμα** και διαρρέεται από ρεύμα (Εικ. 14).

## Συμβολισμοί σε ηλεκτρικό κύκλωμα

Για να παραστήσουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα στο χαρτί μας, χρησιμοποιούμε σύμβολα για τα στοιχεία που το αποτελούν. Αυτό κάναμε και στο κύκλωμα της εικόνας 10. Στον παρακάτω πίνακα υπάρχουν τα σύμβολα των κυριοτέρων στοιχείων ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

	Ηλεκτρική Πηγή Συνεχούς Τάσης
	Διακόπτης Άνοικτός
	Διακόπτης Κλειστός
	Γείωση
	Λαμπτήρας
	Αντιστάτης
	Αμπερόμετρο
	Βολτόμετρο
	Πυκνωτής
	Μεταβλητός Πυκνωτής
	Μεταβλητή Αντίσταση
	Ηλεκτρολυτική Συσκευή
	Δίοδος

## Μαγνήτες

Οι Έλληνες και οι Κινέζοι ήξεραν από την αρχαιότητα (περίπου από τον 6<sup>ο</sup> π.Χ. αιώνα) ένα ορυκτό που είχε την ιδιότητα να έλκει διάφορα σιδερένια αντικείμενα, όπως καρφιά, βελόνες και ρινίσματα σιδήρου. Το ορυκτό αυτό που είχε βρεθεί στη Μαγνησία της Μικράς Ασίας ονομάστηκε μαγνητίτης. Η ιδιότητά του να έλκει τα σιδερένια αντικείμενα ονομάστηκε μαγνητισμός. Σήμερα γνωρίζουμε ότι το ορυκτό αυτό είναι το επιτεταρτοξίδιο του σιδήρου  $F_3O_4$ .

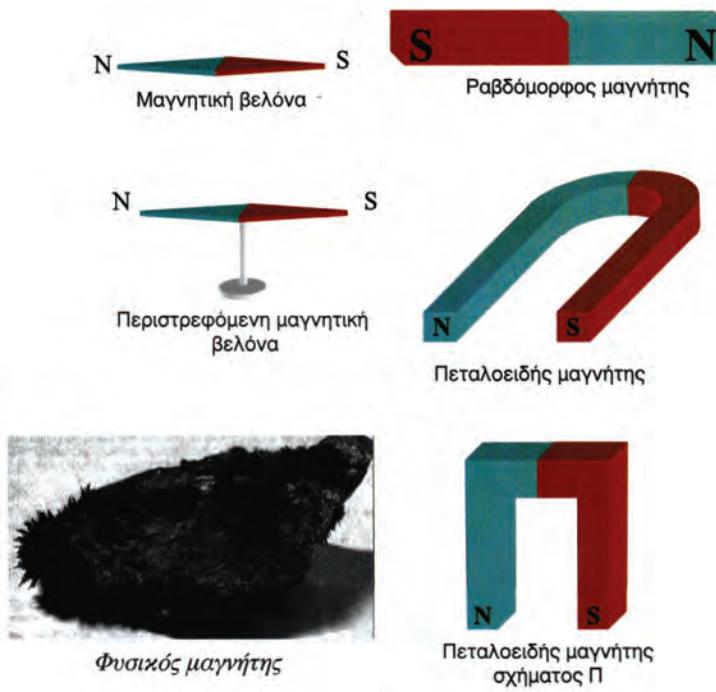
Έρευνες έχουν δείξει ότι ο μαγνήτης ασκεί δυνάμεις σε σώματα από σίδηρο, νικέλιο, κοβάλτιο ή κράματα των παραπάνω μετάλλων.

Ο Μαγνητίτης είναι φυσικός μαγνήτης. Συνήθως όμως χρησιμοποιούμε τεχνητούς μαγνήτες που έχουν κατάλληλο σχήμα ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται, π.χ. ράβδου (ραβδοειδής), πετάλου (πεταλοειδής), δίσκου, δακτυλίου ή βελόνας.

Αν φέρουμε κοντά σε ένα μαγνήτη αντικείμενα από μαγνητίσιμο υλικό τότε μετατρέπονται και αυτά σε μαγνήτες.

Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και αν ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένα μη μαγνητίσιμο υλικό, όπως π.χ. ξύλο.

Ορισμένα υλικά, όπως π.χ. ο χάλυβας, όταν μαγνητιστούν γίνονται μόνιμοι μαγνήτες, διατηρούν δηλαδή το μαγνητισμό τους για πολύ χρόνο, ενώ άλλα υλικά, όπως π.χ. ο μαλακός σίδηρος, διατηρούν το μαγνητισμό τους προσωρινά.



Συνηθισμένες μορφές μαγνητών

Κάθε άνθρωπος έχει παρατηρήσει κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας το φαινόμενο της δημιουργίας ενός κεραυνού που διαρκεί μερικά εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου. Όταν περπατάμε σ' ένα χαλί μπορεί να αισθανθούμε ένα ελαφρύ τίναγμα που προκαλεί ένας ηλεκτρικός σπινθήρας. Τα δύο αυτά φαινόμενα, παρά τη διαφορά ως προς την κλίμακα που εκδηλώνονται, προκαλούνται από την ίδια αιτία. Η αιτία αυτή είναι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των ηλεκτρικών φορτίων.

Σήμερα η ηλεκτρομαγνητική δύναμη αποτελεί μία από τις θεμελιώδεις δυνάμεις, η οποία μαζί με τις βαρυτικές (που έχετε διδαχθεί) και τις ασθενείς και ισχυρές πυρηνικές (που ωστόσο διδαχθούν στην επόμενη τάξη) αποτελούν τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις στη φύση.

Σ' αυτήν την ενότητα θα μάθουμε για τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ ακίνητων ηλεκτρικών φορτίων και πώς αυτές υπολογίζονται μέσω του νόμου του Coulomb.

Θα μάθουμε τι είναι το ηλεκτρικό πεδίο, πώς περιγράφονται οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις με τη βοήθειά του, καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά του.

Τέλος, θα μελετήσουμε τις αποθήκες ηλεκτρικού φορτίου και ενέργειας που ονομάζονται πυκνωτές, τη μορφή του πεδίου στο εσωτερικό τους και τη χρησιμότητά τους.

## (1.1) Ο νόμος του Coulomb

Η μελέτη των αλληλεπιδράσεων μεταξύ φορτισμένων σωμάτων ξεκινά από τον Έλληνα Θαλή το Μιλήσιο (600 π.Χ.), ο οποίος τρίβοντας το ήλεκτρο (κεχριμπάρι) με ξηρό ύφασμα παρατήρησε ότι αυτό μπορεί να έλκει μικρά αντικείμενα όπως μικρά κομμάτια χαρτιού. Γι' αυτό το φαινόμενο ονομάστηκε **ηλεκτρισμός**.

Παράλληλα παρατηρήθηκε η ιδιότητα που έχουν κάποια πετρώματα (Μαγνησία γη) να έλκουν τα σιδερένια αντικείμενα. Το φαινόμενο αυτό αντίστοιχα, ονομάστηκε **Μαγνητισμός**.

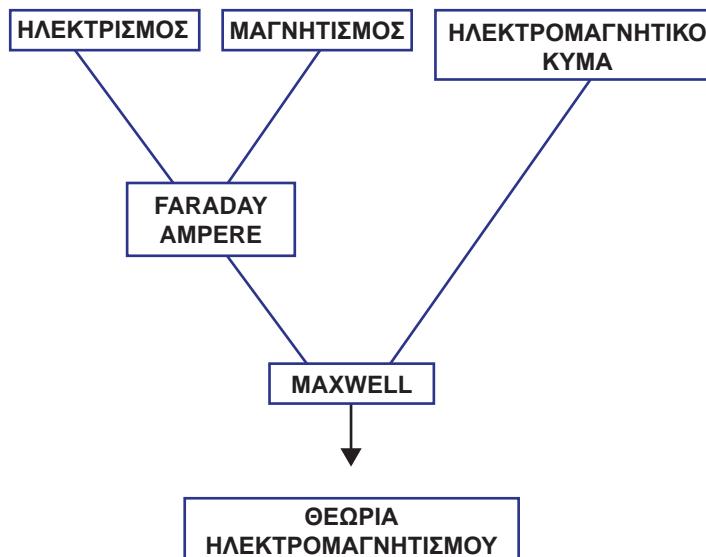
Τα δυο αυτά φαινόμενα θεωρούνταν ανεξάρτητα και μελετήθηκαν χωριστά ως το 1820. Τότε ο Δανός Hans Christian Oersted (1777-1851) διαπίστωσε πειραματικά ότι υπάρχει σχέση μεταξύ των δύο φαινομένων. Ακολούθησε πλήθος ερευνητών που μελέτησαν τη σχέση αυτή.

Κυριότεροι από τους ερευνητές ήταν ο Michael Faraday (1791-1867), ο Marie Ampère (1775-1836) και ο James Clerk Maxwell (1831-1879). Ο J.C. Maxwell μετά από μελέτες έφτασε στο συμπέρασμα ότι και το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Ο Maxwell με τέσσερις εξισώσεις του (1864), ολοκλήρωσε τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού. Η ενοποίηση ηλεκτρισμού-μαγνητισμού (θεωρία ηλεκτρομαγνητισμού) που αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα, αποτέλεσε ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της ανθρώπινης διανόησης.



*James Clark Maxwell, 1831-1879. Σκωτσέζος Φυσικός. Υπήρξε Καθηγητής στο King's College και αργότερα στο Cambridge. Διατύπωσε ένα πλήρες σύνολο νόμων για τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα και πέτυχε την ενοποίηση ηλεκτρισμού-μαγνητισμού. Τη θεωρία του δημοσίευσε το 1873 στο ονομαστό βιβλίο του με τίτλο «Treatise on Electricity and Magnetism».*

*Ο Γερμανός φυσικός I. Boltzmann αναφερόμενος στις εξισώσεις του Maxwell, παρέθεσε μια γραμμή από το έργο του Goëtte «τις γραμμές αντές τις έγραψε ένας θεός...».*

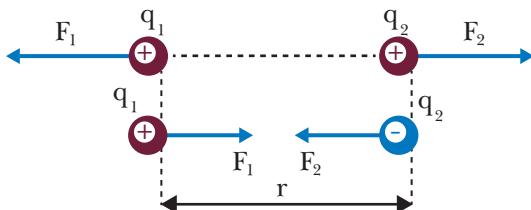


Ο Charles Augustin Coulomb το 1784, μετά από μία σειρά πειραμάτων, κατάφερε να μετρήσει τις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων. Τα συμπεράσματα διατύπωσε με τον παρακάτω νόμο που φέρει το όνομά του.

**«Κάθε σημειακό ηλεκτρικό φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο σημειακό ηλεκτρικό φορτίο. Το μέτρο της δύναμης είναι ανάλογο του γινομένου των φορτίων που αλληλεπιδρούν και αντίστροφα ανάλογο με το τετράγωνο της μεταξύ τους απόστασης.»**

Το μέτρο αυτής της ηλεκτρικής δύναμης\* δίνεται από τη σχέση:

$$F_C = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (1)$$



Εικόνα 1.1-1. (α) Δυνάμεις απωθητικές. (β) Δυνάμεις ελκτικές.

Η δύναμη Coulomb έχει:

**Μέτρο:** Υπολογίζεται από τη σχέση (1).

**Διεύθυνση:** Τη διεύθυνση της ευθείας που ενώνει τα δύο σημειακά φορτία\*\*, που είναι και φορέας της.

**Φορά:** Οι δυνάμεις Coulomb είναι ελκτικές για ετερώνυμα και απωστικές για ομώνυμα ηλεκτρικά φορτία.

**Σημείο εφαρμογής:** Τα σημειακά φορτία  $q_1$  και  $q_2$ .

Η μονάδα μέτρησης του ηλεκτρικού φορτίου στο S.I. είναι το 1C (1 Coulomb).

Η σταθερά  $k$  ονομάζεται ηλεκτρική σταθερά και εξαρτάται από το σύστημα μονάδων και το μέσο στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρικά φορτία.

Όταν τα ηλεκτρικά φορτία που αλληλεπιδρούν βρίσκονται στο κενό και κατά προσέγγιση στον αέρα, η σταθερά  $k$  δίνεται από τη σχέση:

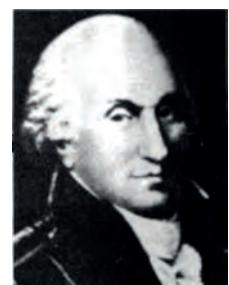
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

όπου  $\epsilon_0$  μία φυσική σταθερά που ονομάζεται απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού και έχει τιμή στο S.I.:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$

\* Η δύναμη αυτή ονομάζεται και δύναμη Coulomb.

\*\* Στη συνέχεια, όταν χρησιμοποιούμε τον όρο φορτίο, θα εννοούμε σημειακό ηλεκτρικό φορτίο, δηλαδή το φορτίο που φέρει ένα σώμα που θεωρείται σημειακό αντικείμενο.



Charles Augustin de Coulomb, 1736-1806. Γάλλος Φυσικός. Υπήρξε μηχανικός του γαλλικού στρατού. Με το ζυγό στρέψης που εφεύρε, απέδειξε ότι η ηλεκτρική δύναμη μεταξύ δύο μικρών φορτισμένων σφαιρών είναι αντίστροφα ανάλογη του τετραγώνου της απόστασής τους (νόμος αντιστρόφου τετραγώνου).

## 15 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Επομένως η σταθερά  $k$  έχει τιμή στο S.I. κατά προσέγγιση:

$$k \approx 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

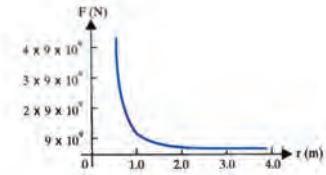
Ο νόμος του Coulomb ακολουθεί το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου, όπως και ο νόμος της παγκόσμιας έλξης, δηλαδή:

$$F = \sigma t a \theta \cdot \frac{1}{r^2} \quad (\text{Εικ. 2})$$

Ο Coulomb το 1785 χρησιμοποιώντας τον ομώνυμο «ζυγό στρέψης του Coulomb» επιβεβαίωσε το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου (Εικ. 3).

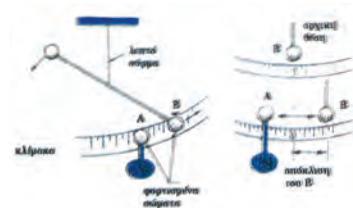
### Παράδειγμα 1

Δυο μικρά σώματα έχουν φορτία  $q_1 = +2 \mu\text{C}$  και  $q_2 = -2 \mu\text{C}$ . Τα σώματα απέχουν 2m. Να υπολογισθεί το μέτρο της ελεκτικής δύναμης που ασκεί το ένα φορτίο στο άλλο.



Το διάγραμμα των μέτρων της δύναμης Coulomb ως συνάρτηση της απόστασης των φορτίων.

Εικόνα 1.1-2.



Ο ζυγός στρέψης του Coulomb (αρχή λειτουργίας).

Εικόνα 1.1-3.

### Λύση

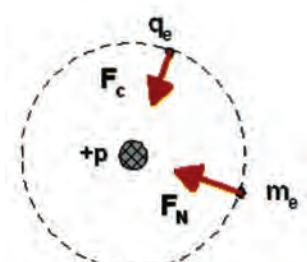
Το μέτρο της δύναμης είναι:

$$F_c = k \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6} \text{C} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{C}}{(2 \text{m})^2} = 9 \cdot 10^{-3} \text{N}$$

### Παράδειγμα 2

Να υπολογισθεί η δύναμη Coulomb που ασκείται μεταξύ πρωτονίου-ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου και να συγκριθεί με τη δύναμη παγκόσμιας έλξης που ασκείται μεταξύ τους. Πόση θα έπρεπε να είναι η μάζα του πυρήνα, ώστε οι δύο δυνάμεις να είναι ίσου μέτρου;

Δίδονται: φορτίο πρωτονίου  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$   
 μάζα πρωτονίου  $m_p = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{kg}$   
 φορτίο ηλεκτρονίου  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$   
 μάζα ηλεκτρονίου  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}$   
 ηλεκτρική σταθερά  $k = 9 \cdot 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2$   
 σταθερά παγκόσμιας έλξης  $G = 6,7 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2$  και  
 ακτίνα τροχιάς του ηλεκτρονίου  $r = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{m}$ .



Το άτομο του Υδρογόνου.

Εικόνα 1.1-4.

### Λύση

Η δύναμη Coulomb μεταξύ πρωτονίου-ηλεκτρονίου είναι:

$$F_c = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{C})(1,6 \cdot 10^{-19} \text{C})}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{m})^2} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{N}$$

## 16 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Η δύναμη παγκόσμιας έλξης μεταξύ των μαζών πρωτονίου-ηλεκτρονίου είναι:

$$F_N = G \frac{m_p \cdot m_e}{r^2} = 6,7 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Nm}^2}{\text{kg}^2} \frac{1,7 \cdot 10^{-27} \text{kg} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{m})^2} = 3,7 \cdot 10^{-47} \text{N}$$

Άρα:

$$\frac{F_C}{F_N} = 2,2 \cdot 10^{+39}$$

Η δύναμη Coulomb είναι περίπου  $10^{39}$  φορές μεγαλύτερη από τη δύναμη παγκόσμιας έλξης, γι' αυτό επικρατεί και οικοδομεί τον μικρόκοσμο.

Για τον υπολογισμό της υποθετικής μάζας  $m'_p$  του πυρήνα εργαζόμαστε ως εξής:

$$F'_N = F_C \quad \& \quad G \frac{m'_p \cdot m_e}{r^2} = k \frac{q_p \cdot q_e}{r^2} \quad \&$$
$$m'_p = \frac{k |q_p \cdot q_e|}{G \cdot m_e} \quad \& \quad m'_p = \frac{9 \cdot 10^9 \text{Nm}^2/\text{C}^2 \cdot (1,6 \cdot 10^{-19} \text{C})^2}{6,7 \cdot 10^{-11} \text{Nm}^2/\text{kg}^2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}} \quad \&$$
$$m'_p = 3,8 \cdot 10^{12} \text{kg}$$

Δηλαδή η μάζα του πυρήνα θα έπρεπε να είναι δέκα χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από τη μάζα ενός τάνκερ 380.000 τόνων!!!

## (1.2) Ηλεκτρικό πεδίο

Όπως μάθαμε, κάθε φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο φορτίο. Η δύναμη μεταξύ των φορτίων τείνει στο μηδέν όταν η απόστασή τους τείνει στο άπειρο. Επομένως, ένα ηλεκτρικό φορτίο ασκεί δύναμη σε κάθε άλλο ηλεκτρικό φορτίο που θα βρεθεί στο χώρο γύρω από αυτό.

**Ηλεκτρικό πεδίο ονομάζουμε το χώρο μέσα στον οποίο όταν βρεθεί ηλεκτρικό φορτίο δέχεται ηλεκτροστατική δύναμη.**

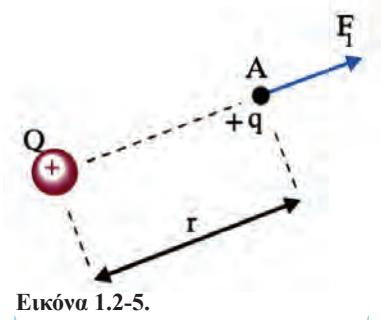
Για να αποδείξουμε πειραματικά την ύπαρξη του ηλεκτρικού πεδίου σε κάποιο σημείο, χρησιμοποιούμε ένα σημειακό ηλεκτρικό φορτίο που ονομάζουμε δοκιμαστικό φορτίο. Αν το δοκιμαστικό φορτίο δεχεται ηλεκτρική δύναμη, υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο εκείνο.

\* Συνηθίζεται να χρησιμοποιούμε τον όρο «ηλεκτρικό πεδίο» αντί του ορθού «ηλεκτροστατικό πεδίο».

### Ένταση ηλεκτρικού πεδίου

Σε κάποιο σημείο του χώρου θεωρούμε ακίνητο σημειακό ηλεκτρικό φορτίο  $+Q$ . Το φορτίο  $+Q$  δημιουργεί σε κάθε σημείο του χώρου γύρω από αυτό ηλεκτρικό πεδίο. Το φορτίο  $+Q$  το ονομάζουμε **πηγή του πεδίου**. Η δύναμη που ασκείται από το φορτίο πηγή  $Q$  σε ένα δοκιμαστικό φορτίο  $q$  που βρίσκεται στη θέση (A) (Εικ. 5) είναι ανάλογη των φορτίων  $Q$  και  $q$ . Από το νόμο του Coulomb έχουμε:

$$F_1 = k \frac{|Q|}{r^2} \cdot |q|$$



Εικόνα 1.2-5.

Αν στην ίδια θέση A που ήταν το  $q$  τοποθετήσουμε ένα άλλο δοκιμαστικό φορτίο  $q' = 2q$ , η δύναμη που δέχεται είναι:

$$F_2 = k \frac{|Q|}{r^2} \cdot |q'| = k \frac{|Q|}{r^2} \cdot 2|q|$$

Το συμπέρασμα είναι ότι η δύναμη που δέχεται το δοκιμαστικό φορτίο διπλασιάζεται όταν αυτό διπλασιασθεί.

Επομένως το πηλίκο  $\frac{F}{|q|}$  της δύναμης προς το δοκιμαστικό φορτίο στη θέση A είναι σταθερό. Το ίδιο συμβαίνει σε κάθε άλλη θέση του χώρου γύρω από το φορτίο  $Q$ .

Επομένως για να εκφράσουμε την ηλεκτρική επίδραση ενός φορτίου  $Q$  στα διάφορα δοκιμαστικά φορτία που τοποθετούνται σε συγκεκριμένη θέση γύρω από το  $Q$ , είναι περισσότερο χρήσιμο να την

εκφράσουμε μέσω ενός νέου φυσικού μεγέθους που είναι ίσο με το πηλίκο  $\frac{\vec{F}}{q}$ , ονομάζεται ένταση και ορίζεται ως εξής:

Ένταση  $\vec{E}$  σε σημείο ηλεκτρικού πεδίου ονομάζουμε το φυσικό διανυσματικό μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του μέτρου της δύναμης που ασκείται σε φορτίο  $q$  που βρίσκεται σ' αυτό το σημείο προς το φορτίο αυτό και κατεύθυνση την κατεύθυνση της δύναμης, αν αυτή ασκείται σε θετικό φορτίο.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad (2)$$

Μονάδα μέτρησης της έντασης στο S.I. είναι το 1 N/C.

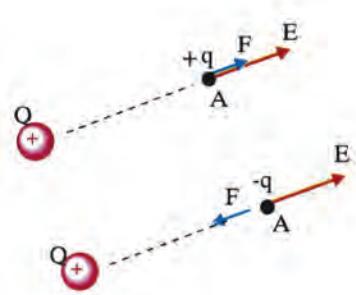
Αν το δοκιμαστικό φορτίο ήταν αρνητικό, η ένταση του πεδίου  $\vec{E}$  στη θέση A δεν θα άλλαζε κατεύθυνση και μέτρο (Εικ. 6, 7).

Όπως γίνεται αντιληπτό, η ένταση έχει φορά προς το φορτίο Q αν αυτό είναι αρνητικό και αντίθετη αν το φορτίο είναι θετικό, ανεξάρτητα από το είδος του δοκιμαστικού φορτίου q (Εικ. 6, 7).

Τι σημαίνει η έκφραση «Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στη θέση A έχει τιμή 10 N/C»;

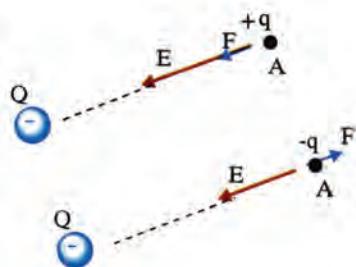
Σημαίνει ότι, αν τοποθετηθεί στη θέση A του πεδίου δοκιμαστικό φορτίο 1C, η δύναμη που θα δεχτεί θα είναι 10 N και η φορά της θα είναι εκείνη που προσδιορίζεται από το φορτίο πηγή (Εικ. 6, 7).

Δηλαδή το μέτρο της έντασης σε κάποιο σημείο του πεδίου μας δείχνει πόσο ισχυρό είναι το πεδίο στο σημείο αυτό.



Η ένταση του πεδίου που δημιουργεί ένα θετικό σημειακό φορτίο Q «απομακρύνεται» από το φορτίο.

Εικόνα 1.2-6.



Η ένταση του πεδίου που δημιουργεί ένα αρνητικό σημειακό φορτίο Q κατευθύνεται προς το φορτίο.

Εικόνα 1.2-7.

## Ηλεκτροστατικό πεδίο Coulomb

Ηλεκτροστατικό πεδίο Coulomb ονομάζουμε το πεδίο που δημιουργείται από ένα ακίνητο σημειακό φορτίο Q.

## Ένταση ηλεκτροστατικού πεδίου Coulomb

Με βάση τη σχέση ορισμού της έντασης, το μέτρο της είναι:

$$E = \frac{F}{q} \quad (3)$$

μπορούμε να οδηγηθούμε σε μια «ειδική σχέση» η οποία ισχύει για το ηλεκτροστατικό πεδίο Coulomb.

Το δοκιμαστικό φορτίο q δέχεται δύναμη Coulomb λόγω του φορτίου Q, η οποία σύμφωνα με τη σχέση (1) είναι:

$$F = k \frac{|Q \cdot q|}{r^2}$$

Επομένως λόγω της (3):

## 19 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

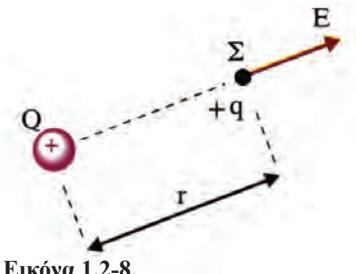
$$E_{(\Sigma)} = \frac{k \cdot \frac{|Q \cdot q|}{r^2}}{|q|} \Rightarrow E_{(\Sigma)} = k \frac{|Q|}{r^2} \quad (4)$$

όπου  $|Q|$  η απόλυτη τιμή του φορτίου που δημιουργεί το πεδίο και  $r$  η απόσταση μεταξύ του σημείου « $\Sigma$ » και του φορτίου  $Q$  (Εικ. 8).

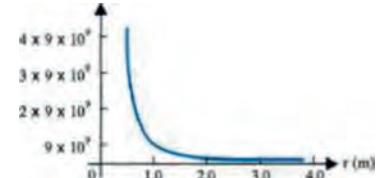
Στον πίνακα (I) καταγράφεται η ένταση ηλεκτρικών πεδίων σε ενδιαφέρουσες περιπτώσεις:

### Πίνακας (I)

Στην επιφάνεια ενός αστεριού Pulsar	$10^{14} \text{ N/C}$
Στην τροχιά που στρέφεται το $e^-$ στο άτομο H	$10^{11} \text{ N/C}$
Κατά τη διάρκεια κεραυνού	$10^4 \text{ N/C}$
Κοντά σε πομπό RADAR	$10^3 \text{ N/C}$
Σε ραδιοφωνικό κύμα	$10^{-1} \text{ N/C}$
Ηλεκτρική εγκατάσταση σπιτιού	$10^{-2} \text{ N/C}$



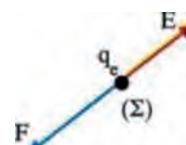
Εικόνα 1.2-8.



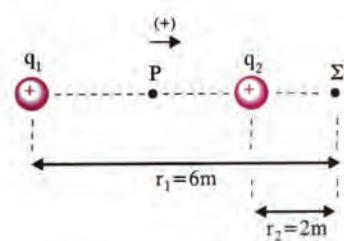
Το μέτρο της έντασης ηλεκτροστατικού πεδίου Coulomb ως συνάρτηση της απόστασης  $r$  από το φορτίο  $Q$ .  
Εικόνα 1.2-9.



Radar  
Εικόνα 1.2-10.



Εικόνα 1.2-11.



Εικόνα 1.2-12.

## 20 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

(β) Στο σημείο (P) που βρίσκεται στη θέση  $x = 2\text{m}$ .

2. Σε ποια θέση η ένταση του πεδίου έχει τιμή μηδέν;

$$\text{Δίνεται: } k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}.$$

Αύση

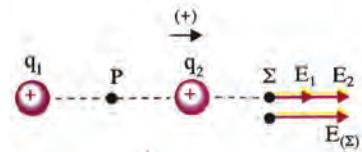
1. (α) Στη θέση ( $\Sigma$ ) οι εντάσεις  $\vec{E}_1$  και  $\vec{E}_2$  που οφείλονται στα φορτία  $q_1$  και  $q_2$ , αντίστοιχα, είναι ομόρροπες και έχουν θετική φορά (Εικ. 13).

Επομένως το μέτρο της έντασης είναι:

$$E_{(\Sigma)} = E_1 + E_2 \quad (1)$$

$$E_1 = k \frac{|q_1|}{r_1^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\text{C}}{(6\text{m})^2} = 1\text{N/C}$$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{r_2^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{16 \cdot 10^{-9}\text{C}}{(2\text{m})^2} = 36\text{N/C}$$



Εικόνα 1.2-13.

Από τη σχέση (1) έχουμε:

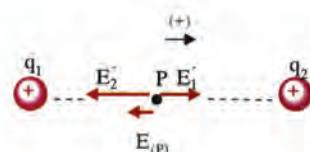
$$E_{(\Sigma)} = 1\text{N/C} + 36\text{N/C} = 37\text{N/C} \text{ και τη θετική κατεύθυνση.}$$

(β) Στη θέση (P)  $r'_1 = r'_2 = 2\text{m}$

$$E_{(P)} = E'_1 - E'_2 \quad (2) \text{ επειδή οι εντάσεις είναι αντίθετης φοράς (Εικ. 14).}$$

$$E'_1 = k \frac{|q_1|}{r'^2_1} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-9}\text{C}}{(2\text{m})^2} = 9\text{N/C}$$

$$E'_2 = k \frac{|q_2|}{r'^2_2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{16 \cdot 10^{-9}\text{C}}{(2\text{m})^2} = 36\text{N/C}$$



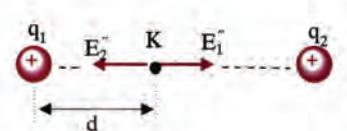
Εικόνα 1.2-14.

Επομένως η ολική ένταση στη θέση (P) είναι:

$$E_{(P)} = 9\text{N/C} - 36\text{N/C} = -27\text{N/C}$$

Το πρόσημο (-) έχει φυσική σημασία και σημαίνει ότι η  $E_{(P)}$  έχει αρνητική κατεύθυνση, δηλαδή της έντασης  $\vec{E}'_2$ .

2. Η ένταση του πεδίου είναι μηδέν σε σημείο (K) που βρίσκεται μεταξύ των φορτίων  $q_1$  και  $q_2$ , γιατί πρέπει οι δύο εντάσεις  $\vec{E}'_1$  και  $\vec{E}'_2$  να είναι αντίθετες (Εικ. 15). Έστω  $d$  η απόσταση του (K) από το φορτίο  $q_1$ , επομένως  $x_1 - d$  η απόσταση του (K) από το φορτίο  $q_2$ . Επειδή οι εντάσεις θα έχουν ίσα μέτρα έχουμε:



Εικόνα 1.2-15.

$$E''_1 = E''_2 \text{ ή } k \frac{|q_1|}{d^2} = k \frac{|q_2|}{(x_1-d)^2} \text{ ή}$$

$$\left( \frac{x_1-d}{d} \right)^2 = \frac{|q_2|}{|q_1|} \text{ ή } \frac{x_1}{d} - 1 = \pm \sqrt{\frac{|q_2|}{|q_1|}} \text{ ή}$$

$$\frac{x_1}{d} = 1 \pm \sqrt{\frac{|q_2|}{|q_1|}} \text{ ή } d = \frac{x_1}{1 \pm \sqrt{\frac{|q_2|}{|q_1|}}} \text{ ή}$$

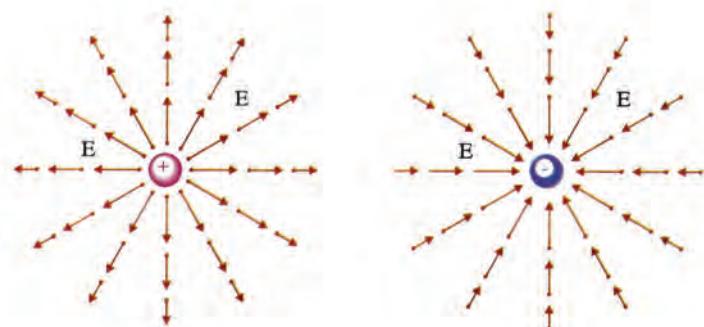
$$d = \frac{4m}{1 \pm \sqrt{\frac{16 \cdot 10^{-9} C}{4 \cdot 10^{-9} C}}} \text{ ή } d_1 = \frac{4}{3} m \text{ και } d_2 = -4m$$

Άρα το ζητούμενο σημείο θα απέχει  $d_1 = 4/3m$  από το φορτίο  $q_1$ . Η λύση  $d_2 = -4m$  απορρίπτεται, γιατί το σημείο K δε θα βρίσκεται μεταξύ των φορτίων  $q_1$  και  $q_2$ .

### Δυναμικές γραμμές

Όπως αναφέραμε, ένα ακίνητο σημειακό φορτίο  $Q$  δημιουργεί γύρω του ηλεκτρικό πεδίο. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου διαφέρει από το ένα σημείο στο άλλο.

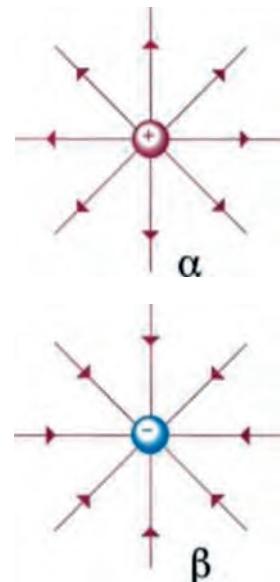
Για να αισθητοποιήσουμε το άόρατο πεδίο μέσω της έντασης, πρέπει να σχεδιάσουμε ένα διάνυσμα έντασης για κάθε σημείο του χώρου γύρω από το φορτίο  $Q$  (Εικ. 16).



Εικόνα 1.2-16. Διανύσματα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται γύρω από (a) θετικό σημειακό φορτίο, (b) αρνητικό σημειακό φορτίο.

Επειδή είναι αδύνατο να σχεδιάσουμε άπειρα διανύσματα έντασης, μπορούμε να χαράξουμε αντιπροσωπευτικά μερικές γραμμές (Εικ. 17).

Οι γραμμές αυτές σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε η ένταση του πεδίου να είναι εφαπτόμενη σε κάθε σημείο τους και ονομάζονται **δυναμικές γραμμές**.



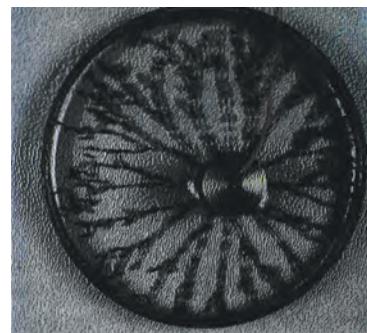
(a) Οι δυναμικές γραμμές αποκλίνουν και κατευθύνονται από το θετικό φορτίο προς το άπειρο. (β) Οι δυναμικές γραμμές συγκλίνουν και κατευθύνονται προς το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο.

Εικόνα 1.2-17.

Οι δυναμικές γραμμές ενός ηλεκτρικού πεδίου μπορούν να γίνουν ορατές, αν πραγματοποιήσουμε το εξής πείραμα.

Σε μία λεκάνη με μονωτικό υγρό (π.χ. καστορέλαιο) ρίχνουμε σπόρους χλόης ή σουσάμι οι οποίοι επιπλέουν. Στη συνέχεια τοποθετούμε με κατάλληλο τρόπο ένα μικρό φορτισμένο σώμα σε ένα σημείο του υγρού και διαπιστώνουμε ότι οι σπόροι διατάσσονται όπως φαίνεται στην [Εικόνα 18](#).

Η μορφή αυτή είναι ίδια με τη μορφή των δυναμικών γραμμών της [Εικόνας 17](#).

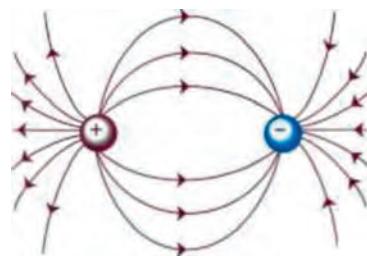


Εικόνα 1.2-18.

### Ιδιότητες των δυναμικών γραμμών

Οι δυναμικές γραμμές έχουν τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Απομακρύνονται από τα θετικά φορτία και κατευθύνονται προς τα αρνητικά, επομένως είναι ανοικτές.
2. Η ένταση του πεδίου έχει μεγαλύτερο μέτρο στις περιοχές του χώρου, όπου είναι πιο πυκνές ([Εικ. 22](#)).
3. Δεν τέμνονται.



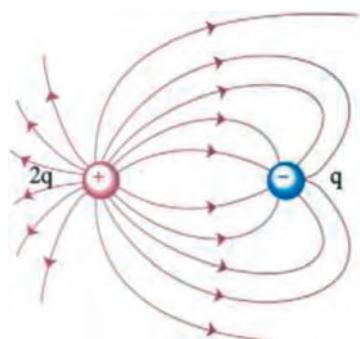
Δυναμικές γραμμές πεδίου δύο αντίθετων φορτίων  $+Q$  και  $-Q$ .

Εικόνα 1.2-19.

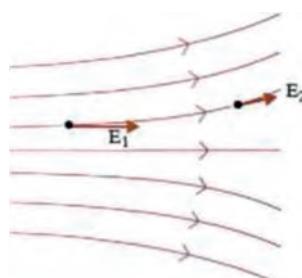
### Διάφορες μορφές πεδίων

Ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται και από συστήματα δύο ή περισσότερων ηλεκτρικών φορτίων. Μερικές από τις απλούστερες μορφές τους φαίνονται σχεδιασμένες στις [Εικόνες 19, 21, 22](#).

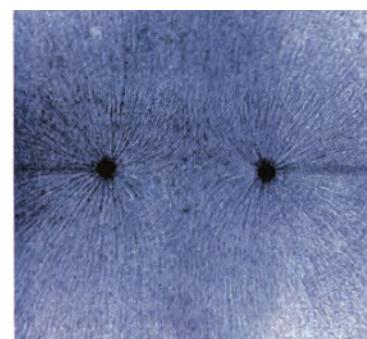
Τα πεδία που αντιστοιχούν στις [Εικόνες 18 έως 22](#) είναι πεδία που η έντασή τους μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Τα πεδία αυτά ονομάζονται **ανομοιογενή**.



Εικόνα 1.2-21. Δυναμικές γραμμές πεδίου δύο φορτίων  $+2q$  και  $-q$ .



Εικόνα 1.2-22. Μορφή ανομοιογενούς πεδίου.



Δυναμικές γραμμές πεδίου δύο ίσων αρνητικών φορτίων.

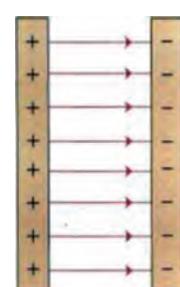
Εικόνα 1.2-20.

### Ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο

Ένα ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται **ομογενές** όταν η έντασή του είναι ίδια σε κάθε σημείο του.

Το πεδίο αυτό απεικονίζεται με τη βοήθεια δυναμικών γραμμών, οι οποίες είναι παράλληλες, ίδιας φοράς και ισαπέχουν ([Εικ. 23](#)).

Σε ένα εργαστήριο η «κατασκευή» ενός ομογενούς ηλεκτρικού πε-



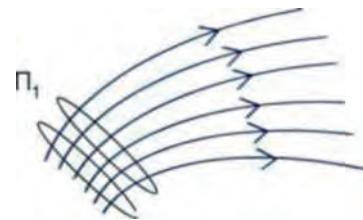
Απεικόνιση ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Η έντασή του είναι σταθερή σε κάθε σημείο μεταξύ των πλακών.

Εικόνα 1.2-23.

δίου είναι δυνατή, αν φορτίσουμε ένα σύστημα δύο όμοιων παράλληλων μεταλλικών πλακών με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία (Εικ. 23). Το σύστημα αυτό ονομάζεται **επίπεδος πυκνωτής** και θα τον μελετήσουμε στην παράγραφο 1.5.

Τα ηλεκτρικά πεδία που εμφανίζονται στη φύση είναι ανομοιογενή και έχουν ένταση που σε κάθε σημείο του πεδίου είναι εν γένει διαφορετικού μέτρου και κατεύθυνσης (Εικ. 24).

Ένα τέτοιο πεδίο είναι δυνατόν κατά προσέγγιση να θεωρηθεί «τοπικά ομογενές» (Εικ. 24, περιοχή  $\Pi_1$ ).



Στην περιοχή  $\Pi_1$  μπορεί το ηλεκτρικό πεδίο να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ομογενές.

Εικόνα 1.2-24.

## (1.3) Ηλεκτρική δυναμική ενέργεια

### Βαρυτικό πεδίο και βαρυτική δυναμική ενέργεια

Όπως γνωρίζουμε, η βαρυτική δυναμική ενέργεια Γης-σώματος είναι ιδιότητα του συστήματος των δύο σωμάτων.

Η ιδιότητα αυτή οφείλεται στην ύπαρξη δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των σωμάτων.

Αν τα δύο σώματα βρεθούν σε άπειρη απόσταση το ένα ως προς το άλλο, τότε πρακτικά δεν ασκούνται δυνάμεις αλληλεπίδρασης και η δυναμική ενέργεια του συστήματος θεωρούμε ότι μηδενίζεται.

Η σχέση που συνδέει τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας συστήματος σωμάτων με το έργο των **συντηρητικών δυνάμεων** αλληλεπίδρασης, όπως π.χ. το βάρος, είναι:

$$\Delta U = -W \text{ ή } U_{TEA} - U_{APX} = -W \text{ ή } W = -(U_{TEA} - U_{APX}) \quad (5)$$

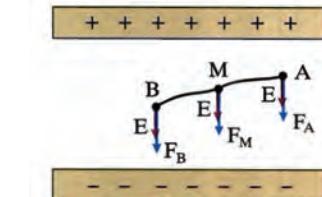
Κατά τη μετακίνηση μάζας  $m$  από τη θέση (A) σε άπειρη απόσταση (πρακτικά σε απόσταση που η δύναμη αλληλεπίδρασης να μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα), το έργο της δύναμης του πεδίου  $W_{A \rightarrow \infty}$  (Εικ. 26) σύμφωνα με τη σχέση (5) είναι:

$$W_{A \rightarrow \infty} = -(U_{\infty} - U_A) \text{ ή } W_{A \rightarrow \infty} = U_A - U_{\infty}$$

Επειδή όμως σε άπειρη απόσταση\* η δυναμική ενέργεια του σώματος είναι  $U_{\infty} = 0$  έχουμε:

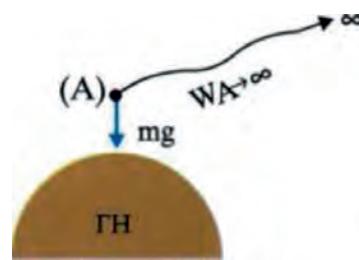
$$U_{(A)} = W_{A \rightarrow \infty} \quad (6)$$

Από τη σχέση (6) προκύπτει ότι η δυναμική ενέργεια του συστήματος στην αρχική θέση είναι ίση με το έργο της δύναμης του βαρυτικού πεδίου κατά τη μετακίνηση της μάζας από τη θέση (A) στο άπειρο.



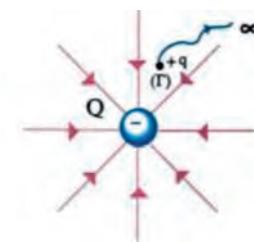
Οι δυνάμεις στις θέσεις  $A$ ,  $B$ ,  $M$  ομογενός πεδίον σε θετικό φορτίο  $q$  είναι ίσες, όπως και σε κάθε άλλο σημείο τουν.

Εικόνα 1.2-25.



Εικόνα 1.3-26.

\*Όταν αναφέρουμε άπειρη απόσταση, αυτή μπορεί να αντιστοιχεί σε απόσταση που για συνήθη φορτία μπορεί να είναι λίγα εκατοστά: δηλαδή ως άπειρη απόσταση θεωρούμε την απόσταση στην οποία η δύναμη που δέχεται το δοκιμαστικό φορτίο δεν είναι πρακτικά ανιχνεύσιμη.



Εικόνα 1.3-27.

### Ηλεκτρικό πεδίο και δυναμική ενέργεια

Έστω ακλόνητο αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο  $Q$  που δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Στη θέση  $(r)$  του πεδίου βρίσκεται θετικό δοκιμαστικό φορτίο  $q$  (Εικ. 27). Επειδή οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις είναι συντηρητικές, κατ' αναλογία με το βαρυτικό πεδίο, η δυναμική ενέργεια

## 24 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

του συστήματος των δύο φορτίων δίνεται από τη σχέση (6).

Ο υπολογισμός του έργου  $W_{\Gamma \rightarrow \infty}$  δε γίνεται με απλά μαθηματικά, διότι υπάρχουν δύο δυσκολίες. Η πρώτη είναι ότι η δύναμη μεταβάλλεται με την απόσταση  $\left( F = k \frac{|Qq|}{r^2} \right)$  και η δεύτερη ότι η μετατόπιση

είναι απείρου μήκους. Με τη χρήση όμως ανώτερων μαθηματικών αποδεικνύεται ότι το έργο είναι:

$$W_{\Gamma \rightarrow \infty} = k \frac{Q \cdot q}{r}$$

και λόγω της (6) η δυναμική ενέργεια του συστήματος των φορτίων στην αρχική θέση είναι:

$$U_{(\Gamma)} = k \frac{Q \cdot q}{r} \quad (7)$$

όπου  $k$  η ηλεκτρική σταθερά και  $r$  η απόσταση μεταξύ των ηλεκτρικών φορτίων στην αρχική θέση.

Επειδή το φορτίο πηγή  $Q$  είναι ακλόνητο, θεωρούμε καταχρηστικά ότι η δυναμική ενέργεια του συστήματος ανήκει στο φορτίο  $q$ .

Δηλαδή θα λέμε ότι «η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του φορτίου  $q$  στη θέση  $(\Gamma)$  του πεδίου είναι  $U_{(\Gamma)}$ ».

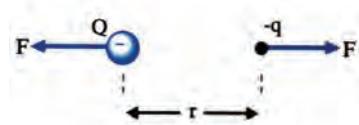
Όπως προκύπτει από τη σχέση (7), το πρόσημο της δυναμικής ενέργειας του ηλεκτρικού φορτίου  $q$  στη θέση  $(\Gamma)$  μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό, αν τα φορτία  $Q, q$  είναι ομώνυμα ή ετερώνυμα αντίστοιχα. Ποιο είναι όμως το φυσικό περιεχόμενο της θετικής ή αρνητικής δυναμικής ενέργειας;

Όταν έχουμε ομώνυμα ηλεκτρικά φορτία, οι δυνάμεις που ασκούνται είναι απωθητικές (Εικ. 28).

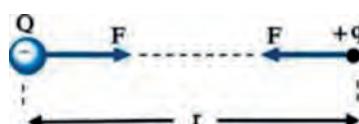
Επομένως, το έργο της δύναμης του πεδίου είναι παραγόμενο (θετικό) κατά τη μετακίνηση του φορτίου  $q$  από τη θέση  $(\Gamma)$  στο άπειρο και η δυναμική ενέργεια του φορτίου  $q$  στη θέση  $(\Gamma)$  είναι θετική. Αυτό σημαίνει ότι το φορτίο  $q$  μπορεί να μετακινείται αυθόρμητα προς το άπειρο και η δυναμική του ενέργεια να ελαττώνεται.

Όταν έχουμε ετερώνυμα ηλεκτρικά φορτία, οι δυνάμεις που ασκούνται είναι ελκτικές (Εικ. 29).

Επομένως, το έργο της δύναμης του πεδίου είναι καταναλισκόμενο (αρνητικό) κατά τη μετακίνηση του φορτίου  $q$  από τη θέση  $(\Gamma)$  στο άπειρο και η δυναμική ενέργεια του φορτίου  $q$  στη θέση  $(\Gamma)$  είναι αρνητική. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να προσφερθεί ενέργεια στο φορτίο  $q$  για να μετακινηθεί προς το άπειρο με αποτέλεσμα η δυναμική του ενέργεια να αυξάνεται.



Ομώνυμα ηλεκτρικά φορτία. Η δυναμική ενέργεια  $U_r$  είναι θετική.  
Εικόνα 1.3-28.



Ετερώνυμα ηλεκτρικά φορτία. Η δυναμική ενέργεια  $U_r$  είναι αρνητική.  
Εικόνα 1.3-29.

### Παράδειγμα 5

Να υπολογισθούν η δυναμική, η κινητική και η μηχανική ενέργεια του ηλεκτρονίου που περιστρέφεται στη στοιβάδα Κ του ατόμου του υδρογόνου.

Δίνονται: Το φορτίο του ηλεκτρονίου  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ ,  
το φορτίο του πρωτονίου  $q_p = +1,6 \cdot 10^{-19} C$ ,  
η ηλεκτρική σταθερά  $k = 9 \cdot 10^9 N \cdot m^2/C^2$   
και η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου  $r = 5,3 \cdot 10^{-11} m$ .

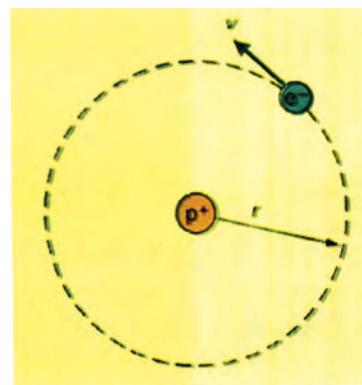
### Λύση

Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από τη σχέση:

$$U_e = k \frac{q_p \cdot q_e}{r} \quad (1)$$

$$\text{ή } U_e = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} \frac{1,6 \cdot 10^{-19} C (-1,6 \cdot 10^{-19} C)}{5,3 \cdot 10^{-11} m} \text{ ή}$$

$$U_e \approx -4,350 \cdot 10^{-18} J \quad (2)$$



Εικόνα 1.3-30.

Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από τη σχέση:

$$K_e = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad (3)$$

Από την κυκλική κίνηση γνωρίζουμε ότι το ρόλο της αναγκαίας κεντρομόλου των πραγματοποιεί η δύναμη Coulomb. Άρα:

$$F_C = \frac{mv^2}{r} = k \frac{|q_p \cdot q_e|}{r^2} \text{ ή } v = \sqrt{\frac{k |q_p \cdot q_e|}{m_e \cdot r}} \quad (4)$$

Από τη σχέση (3) λόγω της (4) έχουμε:

$$K_e = \frac{k |q_p \cdot q_e|}{2r} \text{ ή } K_e = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} C)^2}{2 \cdot 5,3 \cdot 10^{-11} m}$$

$$\text{ή } K_e = 2,175 \cdot 10^{-18} J \quad (5)$$

Η μηχανική ενέργεια  $E_M$  είναι  $E_M = K + U$  (6), επομένως:

$$E_M = K_e + U_e = + 2,175 \cdot 10^{-18} J - 4,350 \cdot 10^{-18} J = - 2,175 \cdot 10^{-18} J$$

Οι σχέσεις με τις οποίες συνδέονται οι παραπάνω ενέργειες είναι:

$$K = \frac{1}{2} |U| \text{ και } E_M = -K$$

Επειδή η ενέργεια σε επίπεδο ατόμου είναι πολύ μικρής τιμής, χρησιμοποιούμε ως μονάδα μέτρησης (στη φυσική στοιχειωδών σωματιδίων) και το eV (electron volt) ηλεκτρονιοβόλτη:  $1eV = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Joule.

## (1.4) Δυναμικό - Διαφορά δυναμικού

### Δυναμικό

Όπως είδαμε στην προηγούμενη παράγραφο, η δυναμική ενέργεια δοκιμαστικού φορτίου  $q$  στη θέση  $(\Gamma)$  που απέχει απόσταση  $r$  από φορτίο «πηγή» του πεδίου  $Q$  (Εικ. 31) είναι:

$$U_1 = k \frac{Q}{r} q$$

Αν στη θέση  $(\Gamma)$  τοποθετήσουμε ένα άλλο δοκιμαστικό φορτίο  $q' = 2q$ , η δυναμική του ενέργεια γίνεται:

$$U_2 = k \frac{Q}{r} \cdot 2q$$

Διαπιστώνουμε ότι  $U_2 = 2U_1$ , δηλαδή η δυναμική ενέργεια είναι ανάλογη του φορτίου  $q$ . Το πηλίκο της δυναμικής ενέργειας του φορτίου  $q$  προς το φορτίο αυτό είναι μία φυσική ποσότητα που έχει σταθερή τιμή ανεξάρτητη του φορτίου  $q$  στη συγκεκριμένη θέση  $(\Gamma)$  του πεδίου. Τη φυσική αυτή ποσότητα ονομάζουμε δυναμικό του πεδίου στη θέση  $(\Gamma)$  και συμβολίζεται  $V_\Gamma$ .

**Δυναμικό σε μια θέση  $(\Gamma)$  ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται το μονόμετρο φυσικό μέγεθος που είναι ίσο με το πηλίκο της δυναμικής ενέργειας φορτίου  $q$  στη θέση  $\Gamma$  προς το φορτίο αυτό.**

Το δυναμικό δίνεται από τη σχέση:

$$V_\Gamma = \frac{U_\Gamma}{q} \quad (8)$$

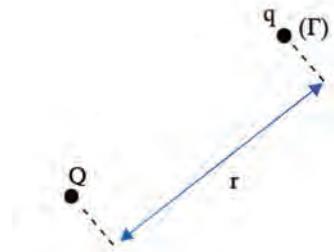
Μονάδα μέτρησης του δυναμικού στο S.I. είναι το  $1V = \frac{1J}{1C}$   
 $\left(1\text{ Volt} = \frac{1\text{ Joule}}{1\text{ Coulomb}}\right)$ .

Επειδή  $U_\Gamma = W_{\Gamma \rightarrow \infty}$  η σχέση (8) γράφεται:

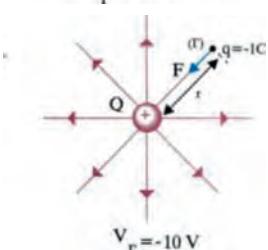
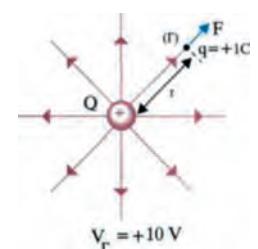
$$V_{(\Gamma)} = \frac{W_{\Gamma \rightarrow \infty}}{q} \quad (9)$$

Τι σημαίνει λοιπόν ότι το δυναμικό σε μια θέση  $(\Gamma)$  του πεδίου είναι  $V_\Gamma = +10V$ ;

Σημαίνει ότι, αν βρεθεί στη θέση  $(\Gamma)$  δοκιμαστικό φορτίο  $+1C$ , θα έχει ηλεκτρική δυναμική ενέργεια  $+10J$ , ή ισοδύναμα, αν βρεθεί στη



Εικόνα 1.4-31.



Εικόνα 1.4-32.

## 27 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Θέση (Γ) δοκιμαστικό φορτίο -1C, θα έχει ηλεκτρική δυναμική ενέργεια -10J (Εικ. 32).

### Δυναμικό ηλεκτροστατικού πεδίου Coulomb

Με βάση τη σχέση ορισμού του φυσικού μεγέθους του δυναμικού:

$$V_r = \frac{U_r}{q}$$

και αντικαθιστώντας τη δυναμική ενέργεια φορτίου  $q$  στη θέση (Γ) με τη σχέση:

$$U_r = k \frac{Q \cdot q}{r}$$

έχουμε:

$$V_r = k \frac{Q}{r} \quad (10)$$

όπου  $Q$  το φορτίο που δημιουργεί το πεδίο και  $r$  η απόσταση μεταξύ του σημείου (Γ) και του φορτίου  $Q$ .

### Παράδειγμα 6

1. Να βρεθεί το δυναμικό σε απόσταση

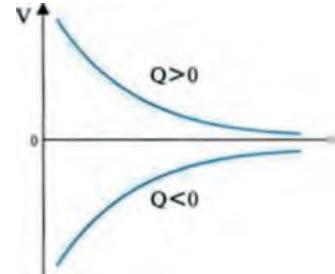
(α) 30cm

(β) 60cm

από ένα φορτίο πηγή  $Q = -4\mu C$ .

2. Πόση δυναμική ενέργεια έχει φορτίο  $q' = 2\mu C$  αν βρεθεί σε απόσταση 30cm;

Δίνεται ότι:  $1\mu C = 10^{-6} C$  και  $k = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2}$ .



Το δυναμικό  $V$  ως συνάρτηση της απόστασης  $r$  από θετικό και από αρνητικό φορτίο πηγή  $Q$ .  
Εικόνα 1.4-33.

### Αύση

1. Το δυναμικό δίνεται από τη σχέση:

$$V = k \frac{Q}{r}$$

(α) Στην απόσταση των 30cm το δυναμικό είναι:

$$V_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} \cdot \frac{-4 \cdot 10^{-6} C}{3 \cdot 10^{-1} m} \quad \text{ή} \quad V_1 = -12 \cdot 10^4 V$$

(β) Στην απόσταση των 60cm το δυναμικό είναι:

$$V_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} \cdot \frac{-4 \cdot 10^{-6} C}{6 \cdot 10^{-1} m} \quad \text{ή} \quad V_2 = -6 \cdot 10^4 V$$

2. Η δυναμική ενέργεια του φορτίου  $q'$  υπολογίζεται από τη σχέση του δυναμικού:

$$V = \frac{U}{q'}$$

Από τη σχέση αυτή έχουμε:

$$U = V \cdot q' \quad \text{ή} \quad U = -12 \cdot 10^4 V \cdot 2 \cdot 10^{-6} C = -0,24 J$$

Αυτό σημαίνει ότι κατά τη μετακίνηση φορτίου  $2\mu C$  στο άπειρο η δύναμη του πεδίου καταναλώνει έργο ίσο με  $0,24 J$ .

### Διαφορά δυναμικού

Έστω φορτίο πηγή  $Q$  και δοκιμαστικό φορτίο  $q$ , το οποίο μετακινείται από μια θέση  $(\Sigma)$  σε μια άλλη θέση  $(P)$  του πεδίου (Εικ. 34). Το φορτίο  $Q$  στις θέσεις  $(\Sigma)$  και  $(P)$  έχει δυναμική ενέργεια  $U_\Sigma$  και  $U_P$  αντίστοιχα. Τα δυναμικά στις θέσεις  $(\Sigma)$  και  $(P)$  είναι  $V_\Sigma$  και  $V_P$  αντίστοιχα.

Η διαφορά  $V_\Sigma - V_P$  ονομάζεται **διαφορά δυναμικού** μεταξύ των σημείων  $(\Sigma)$  και  $(P)$  και συμβολίζεται  $V_{\Sigma P}$  και είναι:

$$V_{\Sigma P} = V_\Sigma - V_P \quad \text{ή} \quad V_{\Sigma P} = \frac{U_\Sigma}{q} - \frac{U_P}{q} \quad \text{ή} \quad V_{\Sigma P} = \frac{U_\Sigma - U_P}{q} \quad (11)$$

Όπως έχουμε αναφέρει για το ηλεκτροστατικό πεδίο ισχύει:

$$W_{\Sigma \rightarrow P} = -\Delta U_{\Sigma P} = U_\Sigma - U_P$$

Επομένως, η σχέση (11) γίνεται ισοδύναμα:

$$V_{\Sigma P} = \frac{W_{\Sigma \rightarrow P}}{q}$$

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων  $(\Sigma)$  και  $(P)$  ηλεκτρικού πεδίου ισούται με το πηλίκο του έργου της δύναμης του πεδίου κατά τη μεταφορά δοκιμαστικού φορτίου  $q$  από τη θέση  $(\Sigma)$  στη θέση  $(P)$ , προς το φορτίο αυτό.

$$V_{\Sigma P} = \frac{W_{\Sigma \rightarrow P}}{q} \quad (12)$$

Η διαφορά δυναμικού επομένως μας δίνει: το έργο της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου ανά μονάδα φορτίου για τη μετακίνησή του από τη θέση  $(\Sigma)$  στη θέση  $(P)$ .

Έστω ότι δύο σημεία  $(\Sigma)$  και  $(P)$  (Εικ. 35) του ηλεκτροστατικού πεδίου έχουν δυναμικά  $V_\Sigma = +14$  Volt και  $V_P = +10$  Volt. Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο σημείων είναι:

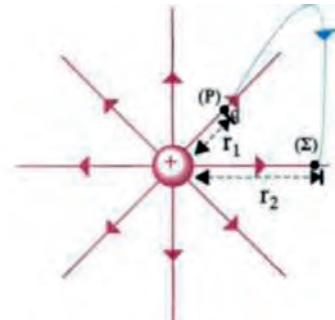
$$V_{\Sigma P} = V_\Sigma - V_P = 14V - 10V = 4V$$

Αυτό σημαίνει ότι κατά τη μετακίνηση θετικού δοκιμαστικού φορτίου ενός Coulomb από τη θέση  $(\Sigma)$  στη θέση  $(P)$  το έργο της δύναμης του πεδίου είναι  $+4J$  και η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του δοκιμαστικού φορτίου ελαττώθηκε κατά  $4J$ .

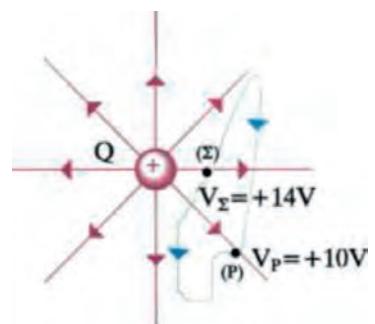
### Παρατηρήσεις

- Στην περίπτωση του πεδίου Coulomb η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων  $(\Sigma)$  και  $(P)$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{\Sigma P} = V_\Sigma - V_P = k \frac{Q}{r_1} - k \frac{Q}{r_2} \quad \text{ή} \quad V_{\Sigma P} = kQ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (13)$$



Εικόνα 1.4-34.



Η διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ δύο σημείων  $\Sigma$  και  $P$ .

$$V_\Sigma - V_P \quad \text{ή} \quad V_{\Sigma P} = +4V$$

Εικόνα 1.4-35.

## 29 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

όπου  $r_1$ ,  $r_2$  οι αποστάσεις των σημείων ( $\Sigma$ ) και ( $P$ ) αντίστοιχα από το φορτίο  $Q$ .

2. Από τη σχέση (12) έχουμε ότι:

$$W_{\Sigma \rightarrow P} = q \cdot V_{\Sigma P} \quad (14)$$

Η σχέση αυτή μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε το έργο της δύναμης του πεδίου κατά τη μετακίνηση ηλεκτρικού φορτίου  $q$  από το σημείο ( $\Sigma$ ) σε σημείο ( $P$ ), των οποίων η διαφορά δυναμικού είναι  $V_{\Sigma P}$ .

### Παράδειγμα 7

Δίνεται σημειακό ηλεκτρικό φορτίο  $Q = +10^{-8} C$  και δύο σημεία ( $P$ ) και ( $\Sigma$ ) τα οποία απέχουν αποστάσεις  $r_1 = 0,4 m$  και  $r_2 = 0,8 m$  αντίστοιχα από το φορτίο  $Q$  (Εικ. 36). Να βρεθούν:

(α) Η διαφορά δυναμικού  $V_{P\Sigma}$  μεταξύ των σημείων ( $P$ ) και ( $\Sigma$ ).

(β) Το έργο της δύναμης του πεδίου, όταν φορτίο  $q = +4 \mu C$  μετακινθεί από τη θέση ( $P$ ) στη θέση ( $\Sigma$ ).

(γ) Ποια είναι η φυσική σημασία του  $W_{P\Sigma}$ ;

Δίνεται:  $k = 9 \cdot 10^9 Nm^2/C^2$ .

### Λύση

(α) Η διαφορά δυναμικού  $V_{P\Sigma}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_{P\Sigma} = V_P - V_\Sigma \quad (1)$$

Από τη σχέση (10) έχουμε:  $V_P = k \frac{Q}{r_1} \quad (2)$

και  $V_\Sigma = k \frac{Q}{r_2} \quad (3)$

Η (1) λόγω των (2) και (3) γίνεται:

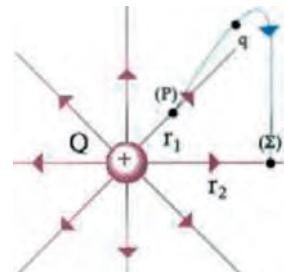
$$V_{P\Sigma} = V_P - V_\Sigma = k \frac{Q}{r_1} - k \frac{Q}{r_2} = kQ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \text{ή}$$

$$V_{P\Sigma} = 9 \cdot 10^9 \frac{N \cdot m^2}{C^2} 10^{-8} C \left( \frac{1}{0,4 m} - \frac{1}{0,8 m} \right) = 112,5 \text{ Volts}$$

(β) Το έργο της δύναμης υπολογίζεται από τη σχέση (14):

$$W_{P \rightarrow \Sigma} = q \cdot V_{P\Sigma} \text{ ή } W_{P \rightarrow \Sigma} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 112,5 V = 450 \text{ Joule}$$

(γ) Το αποτέλεσμα της ερώτησης (β) σημαίνει ότι κατά τη μετακίνηση του φορτίου  $q$  από το ( $\Sigma$ ) στο ( $P$ ) η δύναμη του πεδίου παράγει έργο ίσο με 450J ή ότι η δυναμική ενέργεια του φορτίου στη θέση ( $\Sigma$ ) μειώθηκε κατά 450 Joule.



Εικόνα 1.4-36.

## (1.5) Πυκνωτές

Σε πολλές από τις συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή ζωή, όπως τα στερεφωνικά συγκροτήματα, οι τηλεοράσεις, οι τηλεφωνικές συσκευές, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές, υπάρχει η ανάγκη να αποθηκεύεται κάποια ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου για ορισμένο χρονικό διάστημα και να χρησιμοποιείται την κατάλληλη χρονική στιγμή.

Η διάταξη με την οποία επιτυγχάνεται η αποθήκευση του ηλεκτρικού φορτίου είναι ο **πυκνωτής**.

Ο πυκνωτής είναι μία συσκευή που χρησιμεύει ως αποθήκη ηλεκτρικού φορτίου και επομένως ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από δύο αγωγούς που διαχωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό.

Ο πρώτος πυκνωτής κατασκευάστηκε στο Πανεπιστήμιο του Leyden της Ολλανδίας το 1745 (Εικ. 37).

Αποτελείται από ένα γυάλινο δοχείο το οποίο έχει καλυφθεί εσωτερικά και εξωτερικά με λεπτά φύλλα μετάλλου. Ένα κατακόρυφο μεταλλικό στέλεχος που περνά από το στόμιο του δοχείου έχει στο επάνω μέρος του ένα μεταλλικό σφαιρίδιο και είναι μονωμένο με κατάλληλο πώμα. Το κάτω άκρο του στελέχους μέσω μιας μεταλλικής αλυσίδας έρχεται σε επαφή με το εσωτερικό φύλλο του μετάλλου-αγωγού.

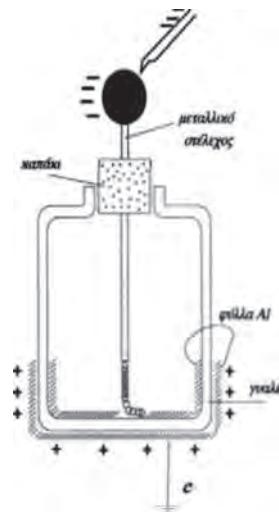
Οι δύο αγωγοί (φύλλα μετάλλου), εσωτερικός και εξωτερικός, αποτελούν τον πυκνωτή. Αν με μια φορτισμένη ράβδο φορτίσουμε τον εσωτερικό αγωγό αρνητικά, τότε τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού αγωγού απωθούμενα διαφεύγουν μέσω της γείωσης και ο αγωγός φορτίζεται θετικά. Διακόπτοντας την επαφή με τη ράβδο και τη γείωση έχουμε ένα φορτισμένο πυκνωτή.

### Επίπεδος πυκνωτής - Φόρτιση

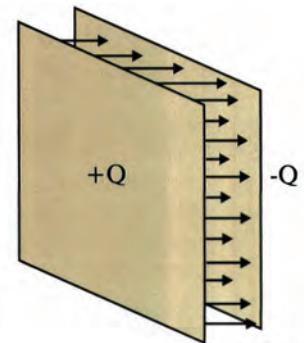
Τυπική μορφή πυκνωτή είναι ο **επίπεδος πυκνωτής**. Αποτελείται από δύο όμοια λεπτά και επίπεδα μεταλλικά φύλλα (πλάκες), που βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση σε σχέση με τις διαστάσεις τους.

Τα δύο μεταλλικά φύλλα ονομάζονται **οπλισμοί του πυκνωτή** (Εικ. 38).

Ο επίπεδος πυκνωτής είναι η μόνη διάταξη με την οποία μπορούμε να παράγουμε **ομογενές ηλεκτρικό πεδίο** φορτίζοντάς τον, με την παρακάτω διαδικασία.



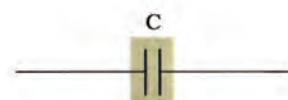
Ο πρώτος πυκνωτής (Leyden).  
Εικόνα 1.5-37.



Επίπεδος πυκνωτής.  
Εικόνα 1.5-38.



Πυκνωτής εμπορίου.  
Εικόνα 1.5-39.

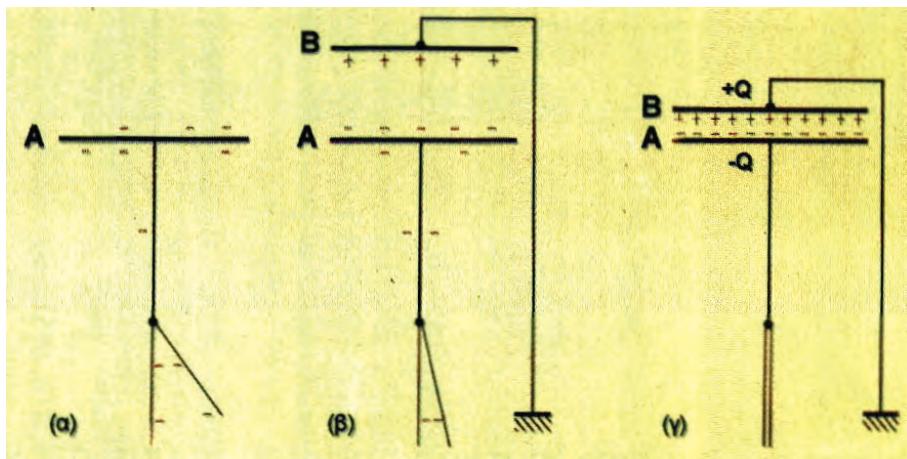


Συμβολισμός του επίπεδου πυκνωτή.  
Εικόνα 1.5-40.

## 31 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Έστω μια επίπεδη μεταλλική πλάκα (A) η οποία έχει συνδεθεί με ένα ηλεκτροσκόπιο (Εικ. 41), την οποία φορτίζουμε με αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο. Μια δεύτερη όμοια μεταλλική πλάκα (B), που είναι γειωμένη, τοποθετείται κοντά στην (A).

Η πλάκα (B) αποκτά θετικό ηλεκτρικό φορτίο καθώς πλησιάζει την (A), γιατί ελεύθερα ηλεκτρόνια της, απωθούμενα από τα ηλεκτρόνια της φορτισμένης πλάκας (A), φεύγουν προς τη Γη.



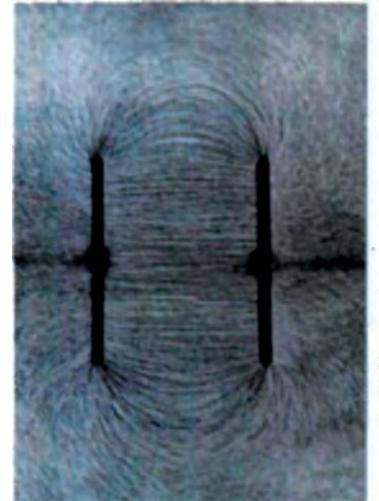
Εικόνα 1.5-41.

Ταυτοχρόνως, καθώς η πλάκα (B) πλησιάζει την πλάκα (A), διαπιστώνουμε ότι η πλάκα (A) αποκτά όλο και μεγαλύτερο αρνητικό φορτίο. Η αύξηση του ηλεκτρικού φορτίου της πλάκας (A) αποδεικνύεται από το πλησίασμα των φύλλων του ηλεκτροσκοπίου (Εικ. 41β). Αυτό οφείλεται στη μετακίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων από τα φύλλα του ηλεκτροσκοπίου και του στελέχους προς την πλάκα (A), λόγω των ελκτικών δυνάμεων Coulomb, οι οποίες μεγαλώνουν, καθώς πλησιάζει η πλάκα (B).

Τελικά, οι δύο οπλισμοί αλληλεπιδρώντας αποκτούν αντίθετα ηλεκτρικά φορτία  $+Q$  και  $-Q$ . Τότε λέμε ότι ο πυκνωτής είναι φορτισμένος. Η απόλυτη τιμή  $|Q|$  του φορτίου ενός από τους δύο οπλισμούς του λέγεται **φορτίο του πυκνωτή**. Λόγω της ανάπτυξης ηλεκτρικού φορτίου στους αγωγούς (A) και (B), εμφανίζεται σε κάθε έναν από αυτούς δυναμικό  $V_A$  και  $V_B$  αντίστοιχα. Η διαφορά  $V_A - V_B$  ή  $V_{AB}$  ή  $V$  ονομάζεται διαφορά δυναμικού ή τάση του πυκνωτή.

### Χωρητικότητα πυκνωτή

Αν φορτίσουμε διαδοχικά έναν πυκνωτή με φορτία  $Q$ ,  $2Q$ ,  $3Q$  κ.λπ. αποδεικνύεται ότι η τάση του γίνεται αντίστοιχα  $V$ ,  $2V$ ,  $3V$  κ.λπ. Επομένως, το φορτίο και η τάση ενός πυκνωτή είναι μεγέθη ανάλογα. Το



Φάσμα ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου.

Εικόνα 1.5-42.

## 32 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

πηλίκο τους είναι χαρακτηριστικό μέγεθος του πυκνωτή, ονομάζεται χωρητικότητα του πυκνωτή και συμβολίζεται με το γράμμα C.

**Χωρητικότητα C ενός πυκνωτή ονομάζεται το μονόμετρο φυσικό μέγεθος που είναι ίσο με το πηλίκο του ηλεκτρικού φορτίου Q του πυκνωτή προς την τάση V του πυκνωτή.**

$$C = \frac{Q}{V} \quad (15)$$

Μονάδα χωρητικότητας στο S.I. είναι το 1F ( $1\text{Farad} = \frac{1\text{Coulomb}}{1\text{Volt}}$ ).

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος, γιατί μας πληροφορεί για το φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα τάσης μεταξύ των οπλισμών του.

Η χωρητικότητα C ενός πυκνωτή δεν εξαρτάται από το φορτίο και την τάση του, αλλά εξαρτάται από το σχήμα, τις διαστάσεις και την απόσταση των οπλισμών του, καθώς και από το μονωτή (διηλεκτρικό) που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών του.

Ο ορισμός της χωρητικότητας, όπως δόθηκε από τη σχέση (15), ισχύει για κάθε μορφής πυκνωτή.

Ειδικά όμως για έναν επίπεδο πυκνωτή, όταν μεταξύ των οπλισμών του υπάρχει κενό ή αέρας, αποδεικνύεται ότι η χωρητικότητά του δίλνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{\ell} \quad (16)$$

όπου  $\epsilon_0$  η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού:

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{N}\cdot\text{m}^2$ , S το εμβαδόν οπλισμού και  $\ell$  η απόσταση των οπλισμών του (Εικ. 43).

Αν μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή υπάρχει κάποιο μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό) η χωρητικότητά του δίλνεται από τη σχέση:

$$C = \epsilon \cdot \epsilon_0 \frac{S}{\ell}$$

όπου  $\epsilon$  η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού που είναι καθαρός αριθμός και εξαρτάται από το μονωτικό υλικό (πίνακας I) ειδικά για το κενό ή τον αέρα είναι:  $\epsilon = 1$ .

### Ενέργεια φορτισμένου πυκνωτή

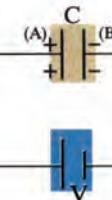
Στο εργαστήριο εκτελούμε την παρακάτω διαδικασία. Φορτίζουμε έναν πυκνωτή  $C = 25.000\mu\text{F}$  με συνεχή τάση  $V = 12\text{V}$  (Εικ. 44). Ο πυκνωτής συνδέεται μέσω διακόπτη με αντιστάτη αντίστασης  $R = 100\Omega$  και με λαμπτήρα (με χαρακτηριστικά  $6\text{V}$  και  $60\text{mA}$ ).

Πίνακας 1

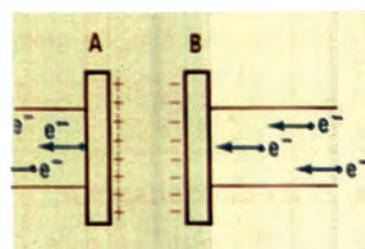
Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά
κενό	1
αέρας	1,0005
νερό	80
χαρτί	3,5
μίκα	5,4
κεχριμπάρι	2,7
γυαλί	4,5
πορσελάνη	6,5
πολυαιθυλένιο	2,3



Πειραματικός έλεγχος της εξάρτησης της χωρητικότητας πυκνωτή από την απόσταση των οπλισμών του.  
Εικόνα 1.5-43.



Ένας πυκνωτής μπορεί να φορτιστεί μέσω μιας πηγής. Ηλεκτρόνια μεταφέρονται από τον οπλισμό A στον οπλισμό B. Όταν η τάση γίνει ίση με τη τάση της πηγής, ο πυκνωτής φορτίστηκε.  
Εικόνα 1.5-44.



Κίνηση ηλεκτρονίων κατά τη φόρτιση πυκνωτή, μέσω ηλεκτρικής πηγής.  
Εικόνα 1.5-45.

### 33 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Κλείνουμε το διακόπτη και παρατηρούμε ότι ο λαμπτήρας αρχικά φωτοβολεί και γρήγορα σβήνει. Τη διαδικασία αυτή ονομάζουμε **εκφόρτιση του πυκνωτή** (Εικ. 46).

Από πού προέρχεται η ενέργεια φωτοβολίας του λαμπτήρα; Επειδή δεν υπάρχει άλλο στοιχείο στο κύκλωμα εκτός από τον πυκνωτή, τον αντιστάτη και τον λαμπτήρα, η ενέργεια αυτή προέρχεται από το φορτισμένο πυκνωτή.

Πώς ο πυκνωτής απέκτησε αυτή την ενέργεια;

Ο πυκνωτής απέκτησε αυτή την ενέργεια κατά τη διαδικασία φόρτισής του. Αυτό συμβαίνει γιατί απαιτείται προσφορά ενέργειας για τη μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς του. Τα αντίθετα φορτία των δύο οπλισμών παρουσιάζουν αναλογία με ένα τεντωμένο ελατήριο.

Για την παραμόρφωση ελατηρίου απαιτείται ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σ' αυτό με μορφή ελαστικής δυναμικής ενέργειας. Το ελατήριο κατά την επαναφορά του στην αρχική του κατάσταση προσφέρει την αποθηκευμένη ενέργεια.

Αντίστοιχα, για τη φόρτιση του πυκνωτή απαιτείται ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σ' αυτόν με μορφή ηλεκτρικής δυναμικής ενέργειας. Ο πυκνωτής κατά την εκφόρτισή του προσφέρει την αποθηκευμένη σ' αυτόν ενέργεια.

Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$U = \frac{Q \cdot V}{2} \quad (17)$$

Εάν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση ορισμού  $C = \frac{Q}{V}$ , έχουμε και τις ισοδύναμες:

$$U = \frac{C \cdot V^2}{2} \quad \text{ή} \quad U = \frac{Q^2}{2C}$$

### Σχέση μέτρου έντασης και διαφοράς δυναμικού σε ομογενές ηλεκτροστατικό πεδίο

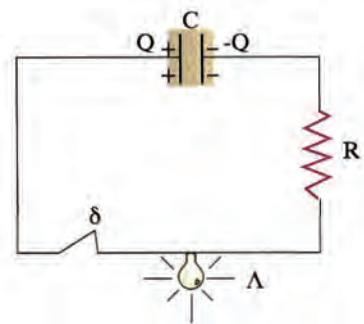
Διαθέτουμε ένα φορτισμένο πυκνωτή του οποίου η τάση είναι  $V$  και η απόσταση των οπλισμών του  $\ell$  (Εικ. 47).

Έστω ότι δοκιμαστικό φορτίο  $+q$  αφήνεται αρχικά πολύ κοντά στον οπλισμό (A). Λόγω του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου, το φορτίο δέχεται δύναμη  $F = E \cdot q$ , και μετακινείται μέχρι τον οπλισμό (B). Κατά τη μετακίνηση, η δύναμη του πεδίου παράγει έργο:

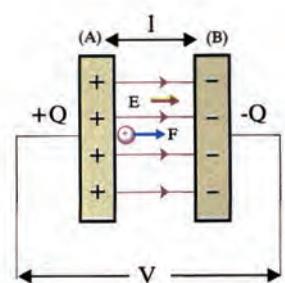
$$W_{AB} = F \cdot \ell \quad \text{ή} \quad W_{AB} = E \cdot q \cdot \ell \quad (I)$$

Το έργο αυτό μπορεί να υπολογισθεί από τη γνωστή μας σχέση (14):

$$W_{AB} = q \cdot V \quad (II)$$



Εικόνα 1.5-46.



Εικόνα 1.5-47.

## 34 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

Επομένως, από τις (I) και (II) έχουμε:

$$E \cdot q \cdot \ell = q \cdot V \text{ ή}$$

$$E = \frac{V}{\ell} \quad (18)$$

Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια άλλη μονάδα μέτρησης της έντασης  $E$  του πεδίου:  $1V/m$ .

Η μονάδα  $1V/m$  είναι ίση με τη γνωστή μονάδα  $1N/C$ .

### Τύποι πυκνωτών

Οι συνηθέστερες μορφές πυκνωτών που χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές είναι:

#### (α) Πυκνωτές αέρα

Οι πυκνωτές αυτοί αποτελούνται από δύο συστήματα μεταλλικών πλακών, που αντιστοιχούν στους δύο οπλισμούς του πυκνωτή. Οι πλάκες κάθε συστήματος είναι σε αγώγιμη σύνδεση και βρίσκονται η μία μέσα στην άλλη χωρίς να ακουμπούν μεταξύ τους. Αν το ένα σύστημα των μεταλλικών πλακών είναι ακίνητο, ενώ το άλλο μπορεί να στρέφεται, τότε έχουμε ένα **μεταβλητό πυκνωτή** (Εικ. 48). Η μεταβολή της χωρητικότητάς του γίνεται με τη στροφή του κινητού οπλισμού, οπότε τα ελάσματά του μπαίνουν ή βγαίνουν μέσα στα ελάσματα του ακίνητου οπλισμού.

Οι χωρητικότητες τέτοιων πυκνωτών φθάνουν από  $10-400pF$  και χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνικούς δέκτες. ( $1pF = 10^{-12}F$ )

#### (β) Πυκνωτές με στερεά διηλεκτρικά

Οι οπλισμοί τους αποτελούνται από πολύ λεπτά μεταλλικά φύλλα, και μεταξύ τους παρεμβάλλονται λεπτά φύλλα διηλεκτρικού (όπως χαρτί, μίκα).

Τα λεπτά φύλλα του μετάλλου με το διηλεκτρικό τυλίγονται με τέτοιο τρόπο ώστε ο όγκος του πυκνωτή να είναι μικρός (Εικ. 49).

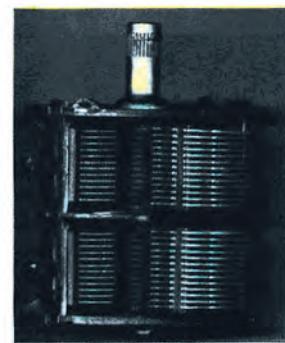
Οι χωρητικότητες των πυκνωτών αυτών φθάνουν από  $100pF$  έως  $1\mu F$ . ( $1\mu F = 10^{-6}F$ )

Χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές συσκευές.

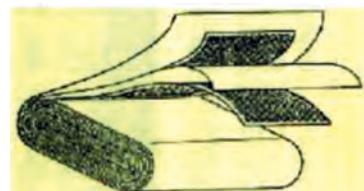
#### (γ) Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

Αποτελούνται από δύο μεταλλικά φύλλα που χωρίζονται με χαρτί που έχει εμπλουτιστεί με διάλυμα ηλεκτρολύτη. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν πολύ μεγαλύτερες χωρητικότητες από τους προηγούμενους. Οι χωρητικότητες των πυκνωτών αυτών φθάνουν από  $10-2000\mu F$  (Εικ. 50).

Χρησιμοποιούνται στο κύκλωμα εκκίνησης ηλεκτρικών κινητήρων.



Μεταβλητός πυκνωτής.  
Εικόνα 1.5-48.



Τύλιγμα πυκνωτή με στερεό διηλεκτρικό.  
Εικόνα 1.5-49.



Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής.  
Εικόνα 1.5-50.

## Ηλεκτροστατική μηχανή Wimshurst

Όταν χρειαζόμαστε μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικού φορτίου χρησιμοποιούμε τις ηλεκτροστατικές μηχανές.

Μια γνωστή ηλεκτροστατική μηχανή είναι και η μηχανή Wimshurst. Κατασκευάστηκε από τον Άγγλο μηχανικό James Wimshurst το 1883.

Η μηχανή αυτή χρησιμοποιείται στα περισσότερα σχολικά εργαστήρια φυσικής.

Η μηχανή με την περιστροφή των δύο δίσκων αναπτύσσει αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, τα οποία αποθηκεύονται σε δύο φιάλες-πυκνωτές (τύπου Leyden).

Οι δύο πυκνωτές είναι συνδεδεμένοι με δύο μεταλλικά στελέχη, που καταλήγουν σε δύο αγώγιμα σφαιρίδια. Τα σφαιρίδια καθώς λειτουργεί η μηχανή φορτίζονται με αντίθετα φορτία, όπως και οι πυκνωτές.

Αν πλησιάσουμε τα δύο σφαιρίδια, για κατάλληλη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ τους (από  $15000-30000V/cm$ ), ξεσπά ηλεκτρικός σπινθήρας. Αυτό συμβαίνει γιατί ηλεκτρόνια του αρνητικά φορτισμένου σφαιριδίου οδηγούνται μέσω του αέρα προς το θετικά φορτισμένο, με αποτέλεσμα την εκφόρτιση του συστήματος.

Η εμφάνιση του σπινθήρα σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια του φαινομένου καταστράφηκε η «μονωτική συμπεριφορά» του ατμοσφαιρικού αέρα μεταξύ των δύο σφαιριδίων.



Μηχανή Wimshurst.  
Εικόνα 1.5-51.

## Σ' αυτή την ενότητα μάθαμε

Ο νόμος του Coulomb εκφράζει τη δύναμη μεταξύ των φορτίων  $Q_1$  και  $Q_2$  που βρίσκονται σε απόσταση  $r$ . Η διεύθυνση της δύναμης είναι συγγραμμική με την ευθεία που ενώνει τα σημειακά φορτία και είναι ελκτική αν τα φορτία είναι αντίθετα.

Μονάδα μέτρησης του φορτίου (S.I.): 1C.

**Νόμος του Coulomb**

$$F = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$$

Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου είναι το διανυσματικό μέγεθος που δείχνει τη δύναμη που ασκείται στη μονάδα του ηλεκτρικού φορτίου, σε κάθε σημείο του πεδίου.

Μονάδα μέτρησης της έντασης (S.I.): 1N/C.

**Ένταση ηλεκτρικού πεδίου**

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

Ομογενές ονομάζεται το πεδίο που σε κάθε σημείο του η έντασή του είναι σταθερή.

**Ομογενές ηλεκτρικό πεδίο**

Δυναμικές γραμμές είναι οι νοητές γραμμές με τις οποίες σχεδιάζουμε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Σε κάθε σημείο τους η ένταση είναι εφαπτόμενη.

Όσο πιο πυκνές είναι οι δυναμικές γραμμές τόσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο της έντασης  $E$  στη συγκεκριμένη περιοχή.

**Δυναμικές γραμμές**

Δυναμικό είναι το μέγεθος που εκφράζει ενέργεια ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου σε συγκεκριμένη θέση του πεδίου.

**Δυναμικό ηλεκτρικού πεδίου**

Μονάδα μέτρησης δυναμικού (S.I.): 1V.

$$V_A = U_A/q$$

Η διαφορά δυναμικού δύο σημείων A και B είναι ίση με το έργο της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου, κατά τη μεταφορά του από το σημείο A στο σημείο B ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από ακίνητο και σημειακό ηλεκτρικό φορτίο.

**Διαφορά δυναμικού**

$$V_{AB} = U_{AB}/q$$

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εκφράζει το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αποκτήσει ο πυκνωτής για συγκεκριμένη τάση μεταξύ των οπλισμών του (χωρίς να ξεσπά σπινθήρας). Στο εσωτερικό του πυκνωτή δημιουργείται ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

**Χωρητικότητα πυκνωτή**

$$C = Q/V$$

## Στρατηγική επίλυσης προβλημάτων

Για τον υπολογισμό των διανυσματικών μεγεθών δύναμης, έντασης δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι πρέπει να υπολογίζονται: Μέτρο - Διεύθυνση - Φορά.

### (I) Δύναμη Coulomb

**(α)** Αν ζητείται σε ένα πρόβλημα ο υπολογισμός της δύναμης που ασκείται από ένα φορτίο σε ένα άλλο φορτίο, εργαζόμαστε όπως επιβάλλει ο νόμος του Coulomb, προσδιορίζοντας τα διανυσματικά χαρακτηριστικά της.

**(β)** Αν ζητείται ο υπολογισμός της δύναμης που δέχεται ηλεκτρικό φορτίο από σύστημα δύο ή περισσότερων φορτίων, θα υπολογίσουμε τη δύναμη που οφείλεται σε κάθε ένα από τα φορτία αυτά και στη συνέχεια θα προσθέσουμε τις δυνάμεις διανυσματικά για να προσδιορίσουμε τελικά το μέτρο, τη διεύθυνση και τη φορά της συνισταμένης.

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \dots$$

### (II) Ένταση σε σημείο ηλεκτρικού πεδίου

**(α)** Αν ζητείται σε ένα πρόβλημα ο υπολογισμός της έντασης σε σημείο ηλεκτρικού πεδίου, τη βρίσκουμε απλά εφαρμόζοντας τη σχέση ορισμού της  $\vec{E} = \vec{F}/q$  ή αν πρόκειται για πεδίο που οφείλεται σε σημειακό φορτίο, πεδίο Coulomb, από τη σχέση:

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

Η διεύθυνση και η φορά της προσδιορίζεται από το είδος του φορτίου  $Q$ .

**(β)** Αν ζητείται ο υπολογισμός της έντασης σε σημείο (A) ηλεκτρικού πεδίου που οφείλεται σε δύο ή περισσότερα σημειακά φορτία, προσδιορίζουμε την ένταση του πεδίου που προκαλεί κάθε ένα φορτίο πηγή στο σημείο (A) και στη συνέχεια θα προσθέσουμε τις εντάσεις διανυσματικά για να προσδιορίσουμε τελικά το μέτρο, τη διεύθυνση και τη φορά της συνισταμένης.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

### (III) Δυναμικό

Το δυναμικό είναι μονόμετρο μέγεθος. Επομένως για τον υπολογισμό του αρκεί ο προσδιορισμός της αλγεβρικής του τιμής.

**(α)** Εάν ζητείται σε ένα πρόβλημα να γίνει ο υπολογισμός του δυναμικού σε σημείο (A) ηλεκτρικού πεδίου, υπολογίζεται από τη σχέση ορισμού  $V_A = U_A/q$  ή αν πρόκειται για πεδίο σημειακού ηλεκτρικού

## 38 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

φορτίου υπολογίζεται και από τη σχέση:

$$V_A = k \frac{Q}{r}$$

και η αλγεβρική τιμή του αποτελέσματος είναι η ζητούμενη.

(Το φορτίο  $Q$  το αντικαθιστούμε με το πρόσημό του.)

**(β)** Εάν ζητείται το δυναμικό σε σημείο πεδίου που οφείλεται σε δύο ή περισσότερα σημειακά φορτία-πηγές, προσδιορίζουμε το δυναμικό που προκαλεί στο σημείο κάθε φορτίο πηγή και στη συνέχεια προσθέτουμε αλγεβρικά τα δυναμικά αυτά.

$$V_{\text{ολ}} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

## Λυμένα προβλήματα

### Πρόβλημα 1

Επίπεδος πυκνωτής έχει τετραγωνικούς οπλισμούς, πλευράς 10cm. Η απόσταση μεταξύ των οπλισμών του είναι  $\ell = 1\text{mm}$ . Να υπολογιστεί:

(α) Η χωρητικότητά του.

(β) Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σ' αυτόν αν έχει φορτισθεί με φορτίο  $Q = 1\mu\text{C}$ .

$$\text{Δίνεται } \varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2.$$

### Αύση

(α) Από τη σχέση (16) για τη χωρητικότητα έχουμε:

$$C = \varepsilon_0 \frac{s}{\ell} = \left( 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2} \right) \frac{(0,1\text{m})^2}{0,001\text{m}} = 8,85 \cdot 10^{-11} \text{F}$$

(β) Η ενέργεια του πυκνωτή από τη σχέση (17) είναι:

$$U = \frac{Q \cdot V}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(10^{-6}\text{C})^2}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-11} \text{F}} = 0,0056 \text{J}$$

### Πρόβλημα 2

Ένας πυκνωτής  $90\mu\text{F}$  συνδέεται με μπαταρία  $12\text{V}$  και φορτίζεται μέχρις ότου η τάση του να γίνει  $12\text{V}$ . Πόσα ηλεκτρόνια μεταφέρθηκαν από τη μία πλάκα στην άλλη;

$$\text{Δίνεται } q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{C.}$$

### Αύση

Από τη σχέση ορισμού της χωρητικότητας, σχέση (15), έχουμε:

$$Q = CV = (90 \cdot 10^{-6}\text{F}) \cdot (12\text{V}) = 108 \cdot 10^{-5}\text{C}$$

Αυτό είναι το φορτίο σε κάθε έναν οπλισμό κατά απόλυτη τιμή. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που συναποτελούν το φορτίο  $Q$  είναι:

$$n = \frac{Q}{|q_e|} = \frac{108 \cdot 10^{-5}\text{C}}{1,6 \cdot 10^{-19}\text{C}} = 67,5 \cdot 10^{14} \text{ ηλεκτρόνια}$$

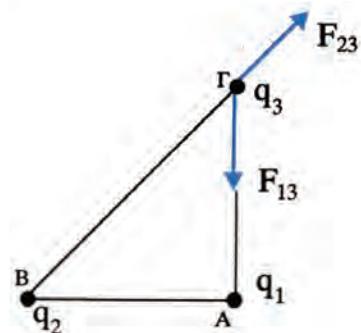
### Πρόβλημα 3

Τρία φορτία  $q_1 = -15\text{ }\mu\text{C}$ ,  $q_2 = +15\text{ }\mu\text{C}$  και  $q_3 = +20\text{ }\mu\text{C}$  βρίσκονται στις κορυφές A, B, Γ αντίστοιχα ενός ισοπλεύρου ορθογωνίου τριγώνου.

Να υπολογισθούν:

- (α) Η συνισταμένη δύναμη που δέχεται το φορτίο  $q_3$ .
- (β) Η ένταση του πεδίου στο μέσο της M υποτείνουσας (ΒΓ).

Δίνονται  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$  και  $(AB) = (AG) = 2\text{ m}$ .



### Ανση

Για τον υπολογισμό της δύναμης  $F$ , που δέχεται το φορτίο  $q_3$ , θα υπολογίσουμε τη δύναμη  $F_{1,3}$  που ασκεί το φορτίο  $q_1$  στο φορτίο  $q_3$  και τη δύναμη  $F_{2,3}$  που ασκεί το φορτίο  $q_2$  στο φορτίο  $q_3$ .

Επειδή τα φορτία  $q_1$  και  $q_3$  είναι ετερώνυμα ενώ τα  $q_2$ ,  $q_3$  ομώνυμα, οι δυνάμεις  $F_{1,3}$  και  $F_{2,3}$  έχουν τις κατευθύνσεις που φαίνονται στο σχήμα.

Τα μέτρα των δυνάμεων είναι:

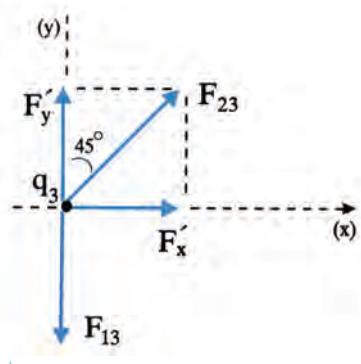
$$F_{1,3} = k \frac{|q_1 \cdot q_3|}{AG^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \frac{15 \cdot 10^{-6}\text{C} \cdot 20 \cdot 10^{-6}\text{C}}{(2\text{m})^2} \text{ ή}$$

$$F_{1,3} = 675 \cdot 10^{-3}\text{N}$$

Από το ορθογώνιο τρίγωνο προκύπτει:  $BG^2 = AB^2 + AG^2 = 8\text{m}^2$

$$F_{2,3} = k \frac{|q_2 \cdot q_3|}{BG^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{15 \cdot 10^{-6}\text{C} \cdot 20 \cdot 10^{-6}\text{C}}{8\text{m}^2} \text{ ή}$$

$$F_{2,3} = 337,5 \cdot 10^{-3}\text{N}$$



Αναλύουμε την  $F_{2,3}$  σε δύο συνιστώσες  $F'_x$  και  $F'_y$  οι οποίες έχουν ίσα μέτρα, επειδή η δύναμη  $F_{2,3}$  σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με την  $(AG)$ .

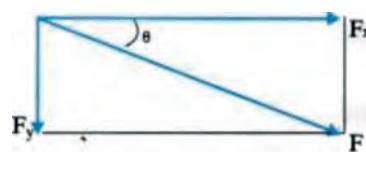
$$F'_x = F'_y = F_{2,3} \sin 45^\circ = 337,5 \cdot 10^{-3}\text{N} \frac{\sqrt{2}}{2} \approx 475 \cdot 10^{-3}\text{N}$$

Στη συνέχεια υπολογίζουμε τη συνισταμένη των δυνάμεων στους άξονες x και y,  $F_x$  και  $F_y$  αντίστοιχα.

$$F_x = F'_x = 475 \cdot 10^{-3}\text{N} \text{ και}$$

$$F_y = F_{1,3} - F'_y = 675 \cdot 10^{-3}\text{N} - 475 \cdot 10^{-3}\text{N} \text{ ή}$$

$$F_y = 200 \cdot 10^{-3}\text{N}$$



Η συνισταμένη των δυνάμεων  $F$  έχει μέτρο:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(475 \cdot 10^{-3}\text{N})^2 + (200 \cdot 10^{-3}\text{N})^2}$$

$$F = 515,4 \cdot 10^{-3}\text{N}$$

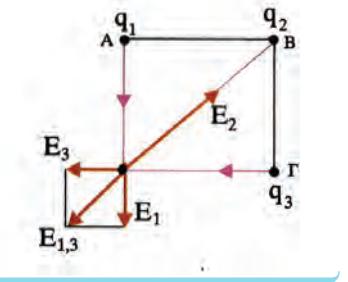
$$\text{Η διεύθυνση της δύναμης } F \text{ είναι: } \frac{F_y}{F_x} = \frac{200 \cdot 10^{-3} \text{ N}}{475 \cdot 10^{-3} \text{ N}} = 0,42$$

### Πρόβλημα 4

Τρία ηλεκτρικά φορτία  $q_1 = q_3 = \sqrt{2} \cdot 10^{-8} \text{ C}$  και  $q_2 = -10^{-7} \text{ C}$  βρίσκονται στις τρεις κορυφές ενός τετραγώνου πλευράς  $d = 3 \text{ m}$ . Να βρεθούν:

(α) Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται στην τέταρτη κορυφή.

(β) Το δυναμικό του πεδίου στην τέταρτη κορυφή.



### Λύση

(α) Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην κορυφή Δ θα είναι ίση με τη συνισταμένη των εντάσεων που οφείλονται στα  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ . Σχεδιάζουμε τις εντάσεις  $\vec{E}_1$ ,  $\vec{E}_2$ ,  $\vec{E}_3$  που δημιουργούν τα φορτία  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$  αντίστοιχα. Η κατεύθυνσή τους είναι η κατεύθυνση που προσδιορίζεται από τη φορά της αντίστοιχης δυναμικής γραμμής.

(Α→Δ, Δ→Β, Γ→Δ αντίστοιχα).

$$\text{Όπως γνωρίζουμε: } E_1 = k \frac{|q_1|}{d^2}, E_3 = k \frac{|q_3|}{d^2}$$

και επειδή  $(B\Delta)^2 = 2d^2$

$$E_2 = k \frac{|q_2|}{2d^2}$$

Πρώτα βρίσκουμε τη συνισταμένη των  $\vec{E}_1$  και  $\vec{E}_3$ ,

$$E_{1,3} = \sqrt{E_1^2 + E_3^2} = \sqrt{2E_1^2} = E_1\sqrt{2} = k \frac{|q_1|}{d^2}\sqrt{2} \quad \text{ή}$$

$$E_{1,3} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8} \text{ C}}{(3\text{m})^2} \sqrt{2} = 20 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Η διεύθυνση είναι ίδια με τη διεύθυνση της διαγώνιου ΒΔ, δηλαδή σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με τις  $E_1$  και  $E_3$ .

Η  $E_2$  είναι:

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \cdot \frac{10^{-7} \text{ C}}{2(3\text{m})^2} = 50 \frac{\text{N}}{\text{C}}$$

Η διεύθυνση της  $E_2$  είναι ίδια με την  $E_{1,3}$  και η φορά αντίθετη. Επομένως, η συνισταμένη τους θα είναι:  $\vec{E}_{\text{oλ}} = \vec{E}_{1,3} + \vec{E}_2$

Η αλγεβρική τιμή της  $\vec{E}_{\text{oλ}}$  είναι:

$$E_{o\lambda} = E_{1,3} - E_2 = 20 \frac{N}{C} - 50 \frac{N}{C} = -30 \frac{N}{C}$$

Δηλαδή η  $\vec{E}_{o\lambda}$  θα έχει τη διεύθυνση και τη φορά της  $\vec{E}_2$ .

(β) Το δυναμικό ως μονόμετρο μέγεθος στη θέση ( $\Delta$ ) υπολογίζεται άμεσα από το άθροισμα των δυναμικών που δημιουργούν τα τρία φορτία στη θέση  $\Delta$ :  $V_\Delta = V_1 + V_2 + V_3$ .

$$\text{Τα δυναμικά είναι: } V_1 = V_3 = k \frac{q_1}{d} = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 10^{-8} C}{3m} = 42,3V$$

και επειδή  $(B\Delta) = d\sqrt{2}$  το  $V_2$  είναι:

$$V_2 = k \frac{q_2}{(B\Delta)} = k \frac{q_2}{d\sqrt{2}} = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{(-10^{-7} C)}{3\sqrt{2}m} = -213,8V$$

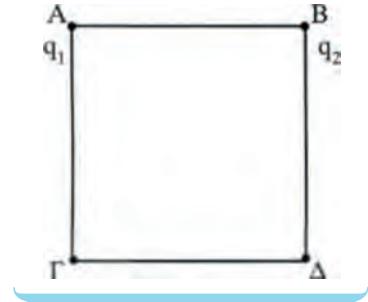
Επομένως, το δυναμικό  $V_\Delta = 42,3V + (-213,8)V + 42,3V \approx -129,2V$

### Πρόβλημα 5

Δίδονται δύο φορτία στις κορυφές A και B ενός τετραγώνου ΑΒΓΔ,  $q_1 = 2 \cdot 10^{-7} C$  και  $q_2 = -10^{-7} C$ , πλευράς  $d = 3m$ . Να βρεθεί:

(α) Η διαφορά δυναμικού  $V_{\Gamma\Delta}$  μεταξύ των σημείων Γ και Δ.

(β) Αν φορτίο  $q = -10^{-6} C$  μετακινηθεί από τη θέση ( $\Gamma$ ) στη θέση ( $\Delta$ ), πόσο είναι το έργο της δύναμης του πεδίου κατά τη μετακίνηση αυτή;



### Αύση

(α) Η διαφορά δυναμικού  $V_{\Gamma\Delta}$  είναι:  $V_{\Gamma\Delta} = V_\Gamma - V_\Delta$

Υπολογίζουμε τα δυναμικά  $V_\Gamma$  και  $V_\Delta$ .

$V_\Gamma = V_1 + V_2$ , επομένως:

$$V_\Gamma = k \frac{q_1}{(A\Gamma)} + k \frac{q_2}{(B\Gamma)} \text{ και } (A\Gamma) = d\sqrt{2}, (B\Gamma) = d. \text{ Επομένως:}$$

$$V_\Gamma = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{2 \cdot 10^{-7} C}{3\sqrt{2}m} + 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{(-10^{-7} C)}{3m} \approx 125V$$

Όμοια  $V_\Delta = V_1 + V_2 = k \frac{q_1}{d} + k \frac{q_2}{B\Delta}$  ή

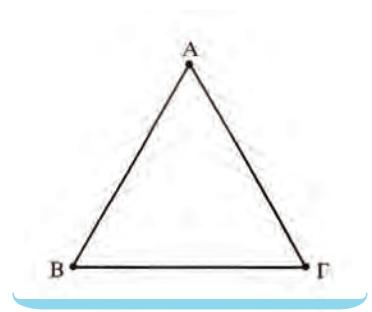
$$V_\Delta = 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{(2 \cdot 10^{-7} C)}{3m} + 9 \cdot 10^9 \frac{Nm^2}{C^2} \cdot \frac{(-10^{-7} C)}{3\sqrt{2}m} \approx 387V$$

Επομένως:  $V_{\Gamma\Delta} = V_\Gamma - V_\Delta \approx 125V + (-387)V \approx -262V$

(β) Όπως μάθαμε  $V_{\Gamma\Delta} = \frac{W_{\Gamma\rightarrow\Delta}}{q}$  ή  $W_{\Gamma\rightarrow\Delta} = V_{\Gamma\Delta} \cdot q$

$$W_{\Gamma\rightarrow\Delta} = (-262V) \cdot (-10^{-6} C) = -262 \cdot 10^{-6} \text{ Joule}$$

## Ερωτήσεις - Δραστηριότητες

1. Τρίψτε ένα φουσκωμένο μπαλόνι σε ένα ύφασμα. Στη συνέχεια φέρτε σε επαφή το μπαλόνι με τον τοίχο. Το μπαλόνι «κολλά» στον τοίχο. Γιατί;
2. Τρίψτε το πλαστικό μέρος ενός στυλό στο πουκάμισό σας, για να το φορτίσετε. Στη συνέχεια ανοίξτε τη βρύση του νερού και πλησιάστε τη «φλέβα». Τι παρατηρείτε; Εξηγήστε το φαινόμενο.
3. Ένα ηλεκτροσκόπιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, για να ανιχνεύει ηλεκτρικό φορτίο. Πλησιάζουμε μία αρνητικά φορτισμένη ράβδο στο σφαιρίδιο του ηλεκτροσκοπίου.
  - A. Τι παρατηρείτε;
  - B. Τι είδους φορτίο εμφανίζεται στο σφαιρίδιο;
  - Γ. Ποιο είναι το συνολικό φορτίο του ηλεκτροσκοπίου; (εξηγήστε)
4. A. Να διατυπώσετε το νόμο του Coulomb και να γράψετε την αντίστοιχη σχέση.
  - B. Ποιες οι μονάδες των μεγεθών που εμφανίζονται στη σχέση;
5. Ποιες οι ομοιότητες και ποιες οι διαφορές ανάμεσα στο νόμο του Coulomb και το νόμο της παγκόσμιας έλξης;
6. Δύο όμοια ηλεκτρικά φορτία απέχουν σταθερή απόσταση. Ποιο θα είναι το αποτέλεσμα στη δύναμη Coulomb εάν:
  - A. Ένα από τα δύο φορτία διπλασιαστεί.
  - B. Ένα φορτίο διπλασιαστεί και το άλλο υποδιπλασιαστεί.
  - Γ. Διπλασιαστούν και τα δύο φορτία.
7. Δύο ετερώνυμα ηλεκτρικά φορτία  $q_1$  και  $q_2$  έλκονται με δύναμη  $F$ , όταν η απόστασή τους είναι  $r$ . Να βρεθεί η απόσταση στην οποία πρέπει να τοποθετηθούν, ώστε η ελκτική δύναμη να γίνει:
  - A.  $4F$
  - B.  $F/4$
8. Δίνονται τρία όμοια ηλεκτρικά φορτία που βρίσκονται στις κορυφές A, B, Γ ισοπλεύρου τριγώνου. Ποια είναι η κατεύθυνση της δύναμης που δέχεται το φορτίο της κορυφής (A);
 
9. Δύο όμοια ηλεκτρικά φορτία είναι ακίνητα στις δύο διαγώνια απέναντι κορυφές τετραγώνου. Πού δέχεται μεγαλύτερη δύναμη ένα τρίτο φορτίο, στις δύο ελεύθερες κορυφές ή στο κέντρο του τετραγώνου;

**10.** Τι ονομάζουμε ένταση ηλεκτρικού πεδίου;

Να γράψετε την αντίστοιχη σχέση.

**11.** Η μονάδα μέτρησης της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου είναι:

A. C    B. N/m    C. N/C    D. J/C

**12.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Η ένταση  $\vec{E}$  σε σημείο «Σ» ηλεκτρικού πεδίου που οφείλεται σε ηλεκτρικό φορτίο  $Q$  έχει μέτρο που είναι ..... του φορτίου  $Q$  και ..... ανάλογο της απόστασης του «Σ» από το ..... πηγή. Η κατεύθυνση της έντασης στο «Σ» εξαρτάται από το ..... του φορτίου  $Q$ .

**13.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με (Σ) αν είναι σωστή, με (Λ) αν είναι λανθασμένη.

Η κατεύθυνση της έντασης  $\vec{E}$  σε ένα σημείο «Σ» ηλεκτρικού πεδίου:

A. Είναι ανεξάρτητη της θέσης του σημείου «Σ».

B. Είναι ανεξάρτητη της θέσης του σημείου «Σ» αν το πεδίο είναι ομογενές.

C. Είναι ανεξάρτητη από δοκιμαστικό φορτίο που τοποθετείται στο σημείο «Σ».

**14.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με (Σ) αν είναι σωστή, με (Λ) αν είναι λανθασμένη.

Δοκιμαστικό φορτίο  $q$  τοποθετείται σε πεδίο που δημιουργεί σημειακό ηλεκτρικό φορτίο  $Q$ .

Η δύναμη που δέχεται το φορτίο  $q$ :

A. Έχει μέτρο που εξαρτάται από τη θέση του φορτίου  $q$  μέσα στο πεδίο.

B. Έχει τη διεύθυνση της αντίστοιχης δυναμικής γραμμής.

C. Έχει μέτρο που παραμένει σταθερό, για κάθε σημείο που βρίσκεται πάνω σε (νοητή) σφαιρική επιφάνεια, με κέντρο το σημειακό φορτίο  $Q$ .

D. Έχει φορά που δεν εξαρτάται από τη φορά της έντασης του πεδίου.

**15.** Δίνονται δύο ομώνυμα ηλεκτρικά φορτία  $Q_1 = 2Q_2$ , στις θέσεις (A) και (B) όπως στο σχήμα.

(I) Το ηλεκτρικό πεδίο μηδενίζεται σε σημείο που βρίσκεται:

A. Αριστερά του A.

B. Δεξιά του B.

C. Μεταξύ A και B.



- (II) Αν  $r_1$  και  $r_2$  είναι οι αποστάσεις του σημείου μηδενισμού της έντασης από τα φορτία  $Q_1$  και  $Q_2$  αντίστοιχα, ο λόγος  $\frac{r_1}{r_2}$  είναι:  
 A.  $1/2$    B.  $2/1$    C.  $1/\sqrt{2}$    D.  $\sqrt{2}$

**16.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Κάθε ηλεκτροστατικό πεδίο μπορεί να απεικονίζεται μέσω των ..... γραμμών.

Οι δυναμικές γραμμές είναι οι νοητές γραμμές που σε κάθε σημείο τους η ..... του πεδίου είναι εφαπτόμενη.

Οι δυναμικές γραμμές δεν ..... στο χώρο γύρω από τα φορτία. Όπου οι δυναμικές γραμμές είναι πιο πυκνές η ένταση του πεδίου είναι .....

**17.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με (Σ) αν είναι σωστή, με (Λ) αν είναι λανθασμένη.

Κάθε ηλεκτροστατικό πεδίο παριστάνεται από ένα πλήθος (νοητών) γραμμών οι οποίες:

- A. Δεν τέμνονται έξω από τα φορτία.
- B. Είναι πάντοτε ευθύγραμμες.
- C. Έχουν πάντοτε φορά από τα θετικά προς τα αρνητικά φορτία.

**18.** Να σχεδιάσετε τις δυναμικές γραμμές ηλεκτροστατικού πεδίου που οφείλεται:

- A. Σε ένα αρνητικό φορτίο.
- B. Σε δύο ίσα κατά απόλυτη τιμή και ετερώνυμα ηλεκτρικά φορτία.

**19.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με (Σ) αν είναι σωστή, με (Λ) αν είναι λανθασμένη.

Ηλεκτρικό φορτίο q τοποθετείται μέσα σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο, που δημιουργείται μεταξύ δύο όμοιων παράλληλων και ετερώνυμα φορτισμένων πλακών.

Η δύναμη που δέχεται το φορτίο q:

- A. Εξαρτάται από τη θέση του φορτίου μέσα στο πεδίο.
- B. Έχει κατεύθυνση που εξαρτάται από το είδος του φορτίου q.
- C. Έχει μέτρο σταθερό.
- D. Έχει διεύθυνση παράλληλη προς τις πλάκες.
- E. Έχει πάντοτε φορά από τη θετική πλάκα στην αρνητική.

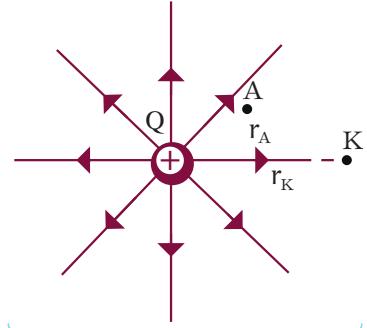
**20.** Να σχεδιάσετε τις δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται ανάμεσα σε δύο όμοιες παράλληλες μεταλλικές πλάκες, φορτισμένες με αντίθετα φορτία.

**21.** Αν το ομογενές ηλεκτρικό πεδίο της προηγούμενης δραστηριότητας είναι κατακόρυφο και αρνητικά φορτισμένη σταγόνα λαδιού ισορροπεί μέσα σ' αυτό:

- A. Να σχεδιάσετε τις δυνάμεις που δέχεται η σταγόνα.
- B. Να προσδιορίσετε το είδος του φορτίου κάθε πλάκας.

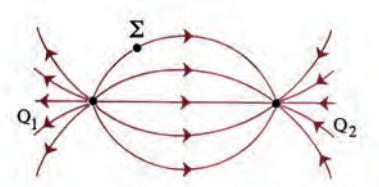
**22.** Θετικό σημειακό φορτίο  $Q$  προκαλεί τη δημιουργία ηλεκτροστατικού πεδίου.

- A. Να σημειώσετε τη φορά των δυναμικών γραμμών.
- B. Να σχεδιάσετε το διάνυσμα της έντασης  $\vec{E}$  του πεδίου στα σημεία « $K$ » και « $\Lambda$ ».
- Γ. Να βρεθεί ο λόγος των μέτρων εντάσεων του πεδίου  $\frac{E_K}{E_\Lambda}$ , αν:  $r_K = 2r_\Lambda$ .



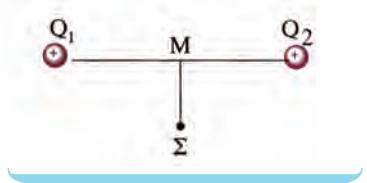
**23.** Δίνεται το πεδίο του σχήματος που οφείλεται στα σημειακά φορτία  $Q_1$ ,  $Q_2$ .

- A. Ποιο είναι το είδος των φορτίων  $Q_1$ ,  $Q_2$ ;
- B. Σχεδιάστε το διάνυσμα της έντασης του πεδίου στο σημείο  $\Sigma$ .



**24.** Δίδονται δύο ίσα θετικά φορτία ( $Q_1 = Q_2$ ) και σημείο « $\Sigma$ » της κάθετης στο μέσο « $M$ » της απόστασής τους.

- A. Να υποδείξετε μέθοδο για τη γραφική απεικόνιση της έντασης του πεδίου στη θέση « $\Sigma$ ».
- Β. Ποια είναι η κατεύθυνση του διανύσματος  $\vec{E}$ ;
- Γ. Ποια η κατεύθυνση της δύναμης που θα ασκηθεί, αν στη θέση « $\Sigma$ » τοποθετήσουμε αρνητικό δοκιμαστικό φορτίο  $q$ ;



**25.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Η δυναμική ενέργεια αποτελεί κοινή ιδιότητα ενός .....ηλεκτρικών φορτίων. Για την περίπτωση αλληλεπίδρασης δύο ηλεκτρικών φορτίων  $q_1$  και  $q_2$ , υπολογίζεται από τη σχέση  $U = \dots$ . Η μονάδα μέτρησης της δυναμικής ενέργειας είναι το ..... . Εάν το πρόσημο του αποτελέσματος είναι ..... αυτό σημαίνει ότι οι δυνάμεις Coulomb μεταξύ των φορτίων είναι .....

**26.** Ποια από τις παρακάτω σχέσεις δίνει τη δυναμική ενέργεια συστήματος δύο σημειακών φορτίων  $Q_1$ ,  $Q_2$ ;

- A.  $k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$
- Β.  $k \frac{Q_1}{r^2}$
- Γ.  $k \frac{Q_1 Q_2}{r}$
- Δ.  $k \frac{Q_2}{r^2}$

**27.** Να γίνουν οι αντιστοιχίσεις:

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΥΟ ΦΟΡΤΙΩΝ	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
• Θετική δυναμική ενέργεια	• δυνάμεις ελκτικές
• Αρνητική δυναμική ενέργεια	• άπειρη απόσταση
• Δυναμική ενέργεια ίση με το μηδέν	• μηδενική απόσταση
	• ομόσημα φορτία

**28.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με Σ αν είναι σωστή, με (Λ) αν είναι λανθασμένη.

Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια δύο σημειακών φορτίων είναι:

- A. Αντίστροφα ανάλογη της μεταξύ τους απόστασης.
- B. Είναι μέγεθος διανυσματικό.
- C. Είναι πάντοτε θετική.
- D. Η μονάδα μέτρησής της είναι: 1J/C.

**29.** Δοκιμαστικό φορτίο  $+q$  τοποθετείται στη θέση «Σ» πεδίου, που δημιουργείται από ακίνητο ηλεκτρικό φορτίο  $Q$ . Το έργο της δύναμης του πεδίου κατά τη μετακίνηση του φορτίου  $q$  από το  $(\Sigma)$  στο άπειρο είναι:

- A. Ανάλογο του φορτίου  $q$ .
- B. Ίσο με τη δυναμική ενέργεια του φορτίου  $q$  στη θέση «Σ».
- C. Ανεξάρτητο της διαδρομής που θα ακολουθήσει το φορτίο  $q$ .
- D. Είναι άπειρο αφού η διαδρομή έχει άπειρο μήκος.

**30.** Ακίνητο θετικό ηλεκτρικό φορτίο  $Q$  δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Τοποθετούμε δοκιμαστικό φορτίο  $q$  σε σημείο  $(\Sigma)$  του πεδίου. Αν η δυναμική ενέργεια του φορτίου  $q$  είναι αρνητική αυτό σημαίνει ότι:

- A. Το φορτίο  $q$  είναι ομόσημο του  $Q$ .
- B. Οι δυνάμεις μεταξύ των φορτίων είναι ελκτικές.
- C. Για να μεταφερθεί το φορτίο  $q$  από μεγάλη απόσταση στη θέση  $(\Sigma)$  απαιτείται να του προσφέρουμε ενέργεια.

**31.** Να δώσετε τον ορισμό και την αντίστοιχη σχέση για το δυναμικό σε σημείο ηλεκτροστατικού πεδίου.

**32.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Το δυναμικό είναι ..... φυσικό μέγεθος που μας δεί-

χνει την ..... ενέργεια που έχει η ..... του ηλεκτρικού φορτίου στη συγκεκριμένη θέση του πεδίου.

**33.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Η μονάδα μέτρησης του δυναμικού στο S.I. είναι το ..... Θα λέμε ότι το δυναμικό σε μια θέση του πεδίου είναι ίσο με 1 ....., αν φορτίο ίσο με ..... στη θέση αυτή έχει δυναμική ενέργεια ίση με 1 .....

**34.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με Σ αν είναι σωστή, με Λ αν είναι λανθασμένη.

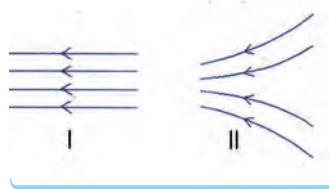
Φορτίο πηγή Q παράγει ηλεκτροστατικό πεδίο. Όταν δίνεται η πληροφορία ότι «Το δυναμικό σε μια θέση «Σ» του ηλεκτρικού πεδίου είναι  $V_{\Sigma} = +10V$ », αυτό σημαίνει ότι:

- A. Η δυναμική ενέργεια δοκιμαστικού φορτίου είναι +10 Joule.
- B. Δοκιμαστικό φορτίο -1C στη θέση «Σ» περιέχει δυναμική  ενέργεια -10J.
- C. Δοκιμαστικό φορτίο +1C στη θέση «Σ» θα μετακινηθεί στο  άπειρο από τη δύναμη του πεδίου.
- D. Το φορτίο πηγή είναι αρνητικό.

**35.** Δίνεται ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Τοποθετούμε δοκιμαστικό φορτίο  $+q$  σε μία θέση του πεδίου. Να αποδειχτεί ότι το φορτίο θα κινηθεί από σημεία υψηλότερου δυναμικού σε σημεία χαμηλότερου δυναμικού.

**36.** Τα σχήματα I και II αντιστοιχούν στις δυναμικές γραμμές δύο ηλεκτρικών πεδίων. Να δικαιολογήσετε τη συμφωνία ή τη διαφωνία σας με κάθε μία από τις παρακάτω απόψεις σημειώνοντας (X) αν συμφωνείτε:

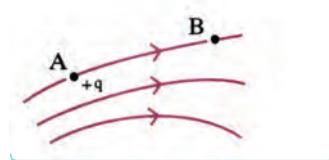
- A. Σε όλες τις θέσεις καθενός πεδίου, η ένταση είναι σταθερή.
- B. Καθώς κινούμαστε από αριστερά προς τα δεξιά η ένταση  και των δύο πεδίων μειώνεται.
- C. Η ένταση του πεδίου (I) είναι σταθερή, ενώ η ένταση του πεδίου (II) αυξάνεται καθώς κινούμαστε προς τα αριστερά.
- D. Και τα δύο πεδία προκύπτουν από αρνητικά φορτία στ'  αριστερά και θετικά στα δεξιά.
- E. Το δυναμικό καθώς κινούμαστε προς τα αριστερά ελαττώνεται και στα δύο πεδία.



**37.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με Σ αν είναι σωστή, με Λ αν είναι λανθασμένη.

Θετικό φορτίο  $+q$  μετακινείται από τη θέση «A» στη «B».

- A. Η κίνηση γίνεται κάτω από την επίδραση της δύναμης του πεδίου.



## 49 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

B. Το φορτίο στη θέση B έχει μικρότερη δυναμική ενέργεια σε  σχέση με την A.

Γ. Η δύναμη που του ασκείται στη θέση B είναι μικρότερη  από τη δύναμη στη θέση A.

Δ. Το δυναμικό στη θέση A είναι μικρότερο από το δυναμικό  στη θέση B.

**38.** Να δώσετε τον ορισμό και την αντίστοιχη σχέση για τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων ηλεκτρικού πεδίου.

**39.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο ..... ηλεκτρικού πεδίου μας δείχνει την ..... της δυναμικής ενέργειας ανά ..... ηλεκτρικού φορτίου.

**40.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Η διαφορά δυναμικού είναι ..... φυσικό μέγεθος και έχει μονάδα μέτρησης το 1 ..... . Διαφορά δυναμικού ίση με 1 ..... μας δείχνει ότι η μεταβολή της δυναμικής ενέργειας φορτίου +1C μεταξύ των δύο θέσεων είναι ίση με 1 .....

**41.** Χαρακτηρίστε καθεμία από τις παρακάτω προτάσεις με Σ αν είναι σωστή ή Λ αν είναι λανθασμένη.

Η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A και B ηλεκτρικού πεδίου είναι  $V_{AB} = -10V$ . Αυτό σημαίνει ότι:

A. Αν αφήσουμε φορτίο +q στη θέση «A», αυτό θα μετακινηθεί από τη θέση «A» στη «B».

B. Η διαφορά των δυναμικών  $V_A - V_B$  είναι ίση με -10V.

Γ. Το δυναμικό  $V_B > V_A$ .

Δ. Αν μετακινήσουμε φορτίο q = 1C από το «A» στο «B» η δυναμική του ενέργεια θα ελαττωθεί κατά 10 Joule.

**42.** Τι ονομάζουμε χωρητικότητα ενός πυκνωτή;

**43.** Αν διπλασιάσουμε το φορτίο Q ενός φορτισμένου πυκνωτή, πόση θα γίνει η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο οπλισμών του;

**44.** Συμπληρώστε τα κενά του κειμένου:

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι ένα φυσικό ..... μέγεθος. Λέμε ότι η χωρητικότητα ενός πυκνωτή είναι ίση με 1 ..... όταν ο πυκνωτής έχει φορτίο ίσο με 1 ..... και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του είναι ίση με 1 ..... . Εάν πυκνωτή χωρητικότητας C τον φορτίσουμε με φορτίο Q (χωρίς να ξεσπάσει σπινθήρας) τότε η ενέργεια που έχει αποκτήσει είναι ίση με .....

**45.** Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

Ο πυκνωτής είναι:

- A. Μία συσκευή που αποθηκεύει ηλεκτρικά φορτία.
- B. Μία συσκευή που παράγει ηλεκτρικά φορτία.
- C. Σύστημα δύο αγωγών σε επαφή.

**46.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με Σ αν είναι σωστή, με Λ αν είναι λανθασμένη.

Η χωρητικότητα πυκνωτή:

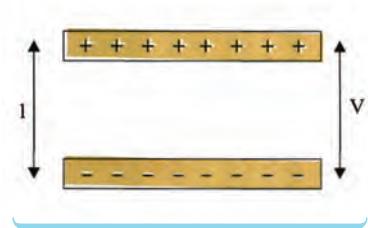
- A. Είναι ανάλογη του ηλεκτρικού του φορτίου.
- B. Είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των οπλισμών του.
- C. Είναι ίση με το σταθερό πηλίκο του φορτίου του  $Q$  προς  $\square$  τη διαφορά δυναμικού  $V$  των οπλισμών του.

**47.** Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις παρακάτω προτάσεις με Σ αν είναι σωστή, με Λ αν είναι λανθασμένη.

Η χωρητικότητα επίπεδου πυκνωτή μεγαλώνει αν:

- A. Αυξήσουμε την απόσταση μεταξύ των οπλισμών του.
- B. Αυξήσουμε το εμβαδόν των οπλισμών του.
- C. Αυξήσουμε το εμβαδόν των οπλισμών του και ελαττώ-  
σουμε την απόστασή τους.

**48.** Δίνεται ο επίπεδος φορτισμένος πυκνωτής του σχήματος.



- A. Να σχεδιαστούν οι δυναμικές γραμμές του πεδίου του.
- B. Αν διπλασιάσουμε το φορτίο του, τι θα συμβεί με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου;
- C. Αν φορτίο  $+q$  μετακινηθεί από τη θετική πλάκα στην αρνητική, πότε θα είναι μεγαλύτερο το έργο ηλεκτρικής δύναμης, όταν ο πυκνωτής έχει φορτίο  $Q$  ή  $2Q$ ;
- D. Πότε το φορτίο  $q$  έχει μεγαλύτερη δυναμική ενέργεια; Κοντά στη θετική πλάκα, στην αρνητική πλάκα ή στο μέσο της από-  
στασης  $l$ ;

**49.** Να αποδειχτεί γραφικά (κατά ελεύθερη εκτίμηση) η σχέση τά-  
σης-φορτίου σε άξονες  $V-Q$  για έναν πυκνωτή. Τι συμπέρασμα  
προκύπτει από το διάγραμμα, σχετικά με τη χωρητικότητα του  
πυκνωτή;

## Προβλήματα

(α) Οι παρακάτω φυσικές ποσότητες, όπου χρειάζονται, θα θεωρούνται γνωστές;

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}, q_p = |q_e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}, m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{kg},$$

$$m_p = m_n = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{kg}$$

$$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}, g = 9,81 \text{m/s}^2$$

(β) Τα φορτία των προβλημάτων θα θεωρούνται σημειακά και ακίνητα (εκτός αν αναφέρεται διαφορετικά).

1. Να υπολογίσετε τον αριθμό των ηλεκτρονίων που συναποτελούν φορτίο ίσο με:

A. -1,6C    B. -1,6mC    C. -1,6μC    D. -1,6nC    E. -1,6pC

2. Δίνονται δύο σημειακά φορτία -0,04μC.

Να υπολογίσετε τη δύναμη που ασκείται από το ένα φορτίο στο άλλο, αν η απόστασή τους είναι:

A. 3cm    B. 6cm

3. Δύο μικρές φορτισμένες σφαίρες έχουν ίσα ηλεκτρικά φορτία -0,02μC. Αν η δύναμη που ασκείται από τη μια σφαίρα στην άλλη έχει μέτρο  $9 \cdot 10^{-3} \text{N}$ , να υπολογιστεί η απόσταση μεταξύ των σφαιρών.

4. Φορτίο  $3 \cdot 10^{-9} \text{C}$  βρίσκεται σε απόσταση 2cm από φορτίο q. Το φορτίο q δέχεται ελεκτική δύναμη μέτρου  $27 \cdot 10^{-5} \text{N}$ . Να βρεθεί το είδος και η ποσότητα του φορτίου q. Τα φορτία θεωρούνται σημειακά

5. Δοκιμαστικό φορτίο +2μC τοποθετείται στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο φορτίων  $Q_1 = +6\mu\text{C}$  και  $Q_2 = +4\mu\text{C}$ , τα οποία απέχουν απόσταση 10cm. Να βρεθεί η δύναμη που ασκείται στο δοκιμαστικό φορτίο.

6. Τρία φορτία +2μC, -3μC και -5μC τοποθετούνται πάνω σε ευθεία και στις θέσεις A, B, Γ αντίστοιχα. Αν οι αποστάσεις μεταξύ των φορτίων είναι (AB) = 0,4m και (AG) = 1,2m, να βρεθεί η δύναμη που ασκείται στο φορτίο -3μC.

7. Να βρεθεί το μέτρο της έντασης ηλεκτροστατικού πεδίου, που δημιουργεί φορτίο Q = -2μC, σε απόσταση 3cm από αυτό.

8. Φορτίο  $+4 \cdot 10^{-9} \text{C}$  δημιουργεί πεδίο έντασης μέτρου  $3,6 \cdot 10^3 \text{N/C}$  σε απόσταση r από αυτό. Να βρεθεί η απόσταση r.

9. Η ένταση ηλεκτρικού πεδίου σε απόσταση 1cm από ηλεκτρικό φορτίο-πηγή έχει μέτρο  $36 \cdot 10^9 \text{N/C}$ . Να βρεθεί η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου.

- 10.** Φορτίο  $+9\mu C$  απέχει απόσταση  $30\text{cm}$  από άλλο φορτίο  $+4\mu C$ . Να βρεθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο μέσο της μεταξύ τους απόστασης.
- 11.** Δοκιμαστικό ηλεκτρικό φορτίο  $q_1 = 2\mu C$  βρίσκεται στη θέση ( $\Sigma$ ) ηλεκτρικού πεδίου και δέχεται  $2 \cdot 10^{-3}\text{N}$ , κατά τη θετική κατεύθυνση του άξονα  $x$ . Να βρεθούν:
- Η ένταση του πεδίου στη θέση ( $\Sigma$ ).
  - Β. Η δύναμη που θα δεχτεί φορτίο  $q_2 = -4\mu C$  στη θέση ( $\Sigma$ ).
- 12.** Στα σημεία  $A$  και  $B$  ευθείας ( $\varepsilon$ ), που απέχουν απόσταση  $d = 0,3\text{m}$ , τοποθετούμε φορτία  $+2\mu C$  και  $+8\mu C$  αντίστοιχα.
- Σε ποιο σημείο της ευθείας η ένταση του πεδίου είναι μηδέν;
  - Β. Σε ποιο σημείο της ευθείας η ένταση μηδενίζεται αν το φορτίο  $+8\mu C$  αντικατασταθεί από φορτίο  $-8\mu C$ ;
- 13.** Δύο ηλεκτρικά φορτία βρίσκονται σε απόσταση  $d = 6\text{m}$ . Αν τα φορτία είναι ίσα με:
- $+4\mu C$ ,
  - $-4\mu C$ ,
- να υπολογιστεί η ένταση του πεδίου σε σημείο ( $\Sigma$ ) της μεσοκάθετης στην απόσταση  $d$ , που απέχει  $3\text{m}$  από το μέσο της απόστασης  $d$ .
- 14.** Μικρός μεταλλικός δίσκος έχει βάρος  $32 \cdot 10^{-3}\text{N}$  και ισορροπεί σε μικρό ύψος από την επιφάνεια της Γης. Κοντά στην επιφάνεια της Γης εμφανίζεται ηλεκτροστατικό πεδίο, έντασης  $E = 100\text{N/C}$ , κατακόρυφο και με φορά προς τα κάτω. Να βρεθεί το είδος και η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που έχει ο δίσκος.
- 15.** Δύο όμοια μεταλλικά σφαιρίδια έχουν το καθένα βάρος  $0,45\text{N}$  και είναι στερεωμένα στις άκρες δύο, ίσου μήκους, μεταξωτών νημάτων. Τα νήματα έχουν μήκος  $0,20\text{m}$ . Αν τα δύο σφαιρίδια έχουν ίσα φορτία, να βρεθεί το φορτίο καθενός, ώστε να ισορροπούν, με τα νήματα κάθετα μεταξύ τους.
- 16.** Στις κορυφές  $ABGD$  τετραγώνου, πλευράς  $0,1\text{m}$ , τοποθετούνται αντίστοιχα τα φορτία:  $+100\mu C$ ,  $-200\mu C$ ,  $+97\mu C$ ,  $-196\mu C$ . Να υπολογίσετε την ένταση του πεδίου στο κέντρο του τετραγώνου.
- 17.** Σωματίδιο με μάζα  $1,0 \cdot 10^{-5}\text{kg}$  και φορτίο  $+1\mu C$  αφήνεται να κινηθεί σε ένα ομογενές ηλεκτρικό πεδίο έντασης  $12\text{N/C}$ . Να βρεθούν:
- Η μετατόπισή του μετά από χρόνο  $1\text{s}$ .
  - Β. Η κινητική του ενέργεια στο τέλος του πρώτου δευτερολέπτου της κίνησης.
  - Γ. Ποιες μετατροπές ενέργειας συνέβησαν;
- 18.** Με βάση το προηγούμενο πρόβλημα και μετά από  $1\text{s}$  κίνησης, εφαρμόζουμε συγχρόνως και ένα αντίρροπο ομογενές ηλεκτρικό

πεδίο. Να βρεθεί ποια θα έπρεπε να είναι η έντασή του, ώστε να μηδενιστεί η ταχύτητα του σωματιδίου μετά από 1s.

19. Δύο ηλεκτρικά φορτία  $+4\mu C$  και  $-6\mu C$  βρίσκονται σε απόσταση  $0,4m$ . Να υπολογιστεί η δυναμική ενέργεια του συστήματος των φορτίων.
20. Το σύστημα δύο ηλεκτρικών φορτίων  $+3\mu C$  και  $+4\mu C$  περιέχει ενέργεια  $0,27$  Joule. Να βρεθεί η απόσταση μεταξύ των δύο φορτίων.
21. Φορτίο-πηγή  $+6\mu C$  δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο. Σε θέση που απέχει  $0,3m$  από το φορτίο τοποθετείται δοκιμαστικό φορτίο  $-6nC$ . Πόση είναι η δυναμική ενέργεια του δοκιμαστικού φορτίου;  
 $(1nC = 10^{-9}C)$
22. Να βρεθεί το δυναμικό σε απόσταση  $0,9m$  από φορτίο  $+6\mu C$ .
23. Σε ποια απόσταση από φορτίο  $+2\mu C$  το δυναμικό έχει τιμή  $4 \cdot 10^4$  Volt;
24. Δοκιμαστικό φορτίο  $+2\mu C$  τοποθετείται σε σημείο  $(\Sigma)$  ηλεκτρικού πεδίου. Αν το δυναμικό στη θέση  $(\Sigma)$  είναι  $-10V$  να βρείτε:
  - A. Τη δυναμική ενέργεια του δοκιμαστικού φορτίου.
  - B. Πόσο έργο πρέπει να προσφερθεί στο δοκιμαστικό φορτίο για να φθάσει στο άπειρο χωρίς ταχύτητα;
25. Δύο σημειακά φορτία  $+2\mu C$  και  $+18\mu C$  απέχουν απόσταση  $16cm$ . Να βρεθεί:
  - A. Σε ποιο σημείο μηδενίζεται η ένταση του πεδίου.
  - B. Το δυναμικό στη θέση μηδενισμού της έντασης.
26. Ακίνητο σημειακό φορτίο  $+2\mu C$  βρίσκεται σε σημείο « $\Sigma$ ».
  - A. Να υπολογιστεί το δυναμικό σε απόσταση  $r_1 = 2m$  και  $r_2 = 4m$  από το  $(\Sigma)$ .
  - B. Αν σημειακό φορτίο  $q = 1\mu C$  τοποθετηθεί σε απόσταση  $r_1$  ποια η δυναμική του ενέργεια;
  - C. Αν το φορτίο  $q = 2\mu C$  μετακινηθεί από τη θέση  $r_1$  στη θέση  $r_2$ , ποιο είναι το έργο της δύναμης του πεδίου; Το έργο αυτό εξαρτάται από τη διαδρομή που θα ακολουθήσει το φορτίο  $q$ ;
27. Στο μοντέλο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια μπορούν να περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα (πρωτόνιο) σε (επιτρεπόμενες) κυκλικές τροχιές. Αν μία τροχιά έχει ακτίνα  $r = 8 \cdot 10^{-10}m$ , να υπολογιστούν:

- A. Η δυναμική
  - B. Η κινητική
  - C. Η μηχανική ενέργεια του ηλεκτρονίου στην τροχιά ακτίνας r.
- 28.** Τέσσερα ηλεκτρικά φορτία  $+30\mu C$ ,  $-60\mu C$ ,  $+90\mu C$  και  $-120\mu C$  βρίσκονται αντίστοιχα στις κορυφές A, B, Γ, Δ τετραγώνου, πλευράς  $5\sqrt{2}$  m. Να υπολογίσετε:
- A. Το δυναμικό στο μέσο «M» της πλευράς (AB).
  - B. Το δυναμικό στο κέντρο του τετραγώνου «K».
  - C. Το έργο της δύναμης του πεδίου κατά τη μεταφορά φορτίου  $q = 10^{-9}C$  από τη θέση «M» στη θέση «K». Ποιο είναι το φυσικό περιεχόμενο του έργου αυτού;
- 29.** Στο πρόβλημα 28 να υπολογιστεί το έργο της δύναμης του ηλεκτρικού πεδίου κατά τη μετακίνηση φορτίου  $+1\mu C$ .
- A. Από τη θέση M στο άπειρο.
  - B. Από τη θέση K στο άπειρο.
- Ποιο συμπέρασμα βγάζετε σε κάθε μία περίπτωση;
- 30.** Το σωματίδιο «α» έχει τη δομή του  $^4_2He^{++}$ , δηλαδή αποτελείται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια ( $m_p = m_n$ ). Το σωματίδιο «α» επιταχύνεται σε ομογενές ηλεκτρικό πεδίο. Εάν το αφήσουμε ( $v_0 = 0$ ), να επιταχυνθεί μεταξύ δύο σημείων AB που έχουν διαφορά δυναμικού ίση με 12.000V, να βρεθεί ποια είναι η ταχύτητά του στο σημείο B.
- 31.** Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας, νέφος στην επιφάνειά του προς τη Γη εμφανίζει φορτίο  $-25C$ . Στην επιφάνεια της Γης, δημιουργούνται από επαγγηγή θετικά φορτία. Όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ νέφους - Γης φθάσει τα  $5 \cdot 10^7 V$ , ο ατμοσφαιρικός αέρας παύει για λίγο να λειτουργεί ως μονωτής και ξεσπά ηλεκτρική εκκένωση, κατά την οποία ηλεκτρόνια του νέφους κατευθύνονται προς τη Γη (κεραυνός).
- A. Πόση ηλεκτρική ενέργεια απελευθερώθηκε;
  - B. Πόση είναι η μέση ισχύς που αποδίδεται, αν η διάρκεια του φαινομένου είναι  $10^{-3}s$ ;
- 32.** Πυκνωτής έχει χωρητικότητα  $C = 50\mu F$ . Πόση διαφορά δυναμικού πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ των δύο οπλισμών του πυκνωτή, για να αποκτήσει ηλεκτρικό φορτίο  $10^{-3}C$ ? Πόση ενέργεια έχει τότε ο πυκνωτής;
- 33.** Δύο φύλλα αργιλίου έχουν διαστάσεις  $10cm \times 20cm$  και απέχουν απόσταση  $0,5mm$ . Πόση είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή;

- 34.** Επίπεδος πυκνωτής έχει οπλισμούς με εμβαδόν  $200\text{cm}^2$  ο καθένας. Εάν η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι  $17,7 \cdot 10^{-11}\text{F}$ , πόση είναι η απόσταση μεταξύ των δύο οπλισμών του;
- 35.** Ο κάθε οπλισμός ενός επίπεδου πυκνωτή έχει εμβαδόν  $0,2\text{m}^2$ , ενώ οι οπλισμοί του απέχουν  $4\text{mm}$ . Να υπολογίσετε:
- Τη χωρητικότητα του πυκνωτή.
  - Το φορτίο που αποκτά ο πυκνωτής, αν φορτισθεί με τάση  $200\text{V}$ .
- 36.** Ένας επίπεδος πυκνωτής έχει χωρητικότητα  $2\mu\text{F}$ , απόσταση οπλισμών  $2\text{cm}$  και έχει φορτιστεί με τάση  $150\text{V}$ . Στη συνέχεια απομακρύνουμε την πηγή φόρτισης και διπλασιάζουμε την απόσταση των οπλισμών του. Να υπολογιστούν οι τιμές πριν και μετά το διπλασιασμό:
- Της χωρητικότητας του πυκνωτή.
  - Της τάσης μεταξύ των οπλισμών του.
  - Της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.
  - Της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου.
- Πώς εξηγείται η μεταβολή της ενέργειας του πυκνωτή;
- 37.** Δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες απέχουν απόσταση  $0,5\text{cm}$  και είναι συνδεδεμένες με διαφορά δυναμικού  $80\text{V}$ . Να βρεθεί η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ αυτών.
- 38.** Διαφορά δυναμικού  $120\text{V}$  εφαρμόζεται σε δύο παράλληλες μεταλλικές πλάκες. Εάν το πεδίο που παράγεται μεταξύ των πλακών είναι  $600\text{V/m}$ , πόσο απέχουν οι δύο πλάκες;
- 39.** Δύο μεταλλικές πλάκες συνδέθηκαν με μπαταρία  $4,5\text{V}$ . Πόσο έργο απαιτείται για να μεταφερθεί φορτίο  $+4\mu\text{C}$ :
- Από την αρνητική στη θετική πλάκα;
  - Από τη θετική στην αρνητική πλάκα;
- Θεωρήστε την κινητική ενέργεια του φορτίου σταθερή.
- 40.** Η ηλεκτρονική δέσμη στο σωλήνα μιας τηλεόρασης αποτελείται από ηλεκτρόνια που επιταχύνονται από την κατάσταση ηρεμίας, μέσω διαφοράς δυναμικού περίπου  $20.000\text{V}$ .
- Ποια είναι η κινητική ενέργεια που αποκτούν τα ηλεκτρόνια;
  - Ποια είναι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων;
- 41.** Η διαφορά δυναμικού μεταξύ των οπλισμών ενός επίπεδου πυκνωτή είναι  $5 \cdot 10^5\text{V/m}$ . Στο χώρο μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή αιωρείται σταγόνα λαδιού που έχει βάρος  $3,2 \cdot 10^{-13}\text{N}$ . Ποιο είναι το ηλεκτρικό φορτίο της σταγόνας;

## 56 Δυνάμεις μεταξύ ηλεκτρικών φορτίων

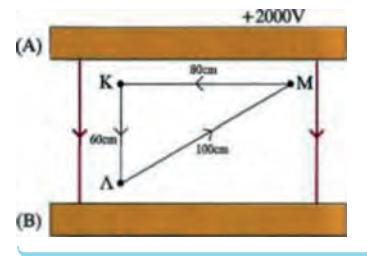
**42.** Μικρή αγώγιμη σφαίρα, που έχει μάζα  $2 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$  και φορτίο  $+6 \mu\text{C}$ , βρίσκεται στην άκρη κατακόρυφου μεταξωτού νήματος ανάμεσα στους κατακόρυφους οπλισμούς ενός πυκνωτή. Οι οπλισμοί του πυκνωτή απέχουν απόσταση 5cm. Με ποια τάση πρέπει να φορτιστεί ο πυκνωτής ώστε η σφαίρα να ισορροπεί σχηματίζοντας με την κατακόρυφη, γωνία  $30^\circ$  (χωρίς να εφάπτεται στους οπλισμούς);

**43.** Δίνονται δύο σημεία K και Λ ενός ομοιγενούς ηλεκτρικού πεδίου. Η διαφορά δυναμικού  $V_{KL} = 1000\text{V}$ . Εάν η απόσταση των KL είναι 50cm, να υπολογισθούν:

- A. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.
- B. Το δυναμικό σημείο «Λ», εάν το δυναμικό στο «K» είναι  $+200\text{V}$ .

**44.** Οι οπλισμοί A και B του πυκνωτή του σχήματος απέχουν απόσταση 100cm και η διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο οπλισμών είναι 2.000V. Σημειακό φορτίο  $+1\mu\text{C}$  τοποθετείται στη θέση «K» που απέχει απόσταση 20cm από τον οπλισμό (A). Να βρείτε το έργο της δύναμης του πεδίου για τη μετακίνηση του φορτίου:

- A.  $W_{K \rightarrow \Lambda}$
- B.  $W_{M \rightarrow K}$
- C.  $W_{K \rightarrow \Lambda \rightarrow M \rightarrow K}$



# Ένθετα

## Κεραυνός

Κάθε ένας μας έχει γίνει μάρτυρας των βίαιων φωτεινών φαινομένων που παράγονται κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας.

Έχουμε παρατηρήσει τις λάμψεις που εμφανίζονται στο συννεφιασμένο ουρανό ή λάμψεις που «ταξιδεύουν» προς τη Γη.

Τα φαινόμενα αυτά είναι ηλεκτροστατικά φαινόμενα.



*Η συσσώρευση φορτίου στην επιφάνεια του νέφους επάγει θετικό φορτίο στην επιφάνεια της Γης.  
Εικόνα (Α)*

Κατά τη διάρκεια μιας καταιγίδας τα νέφη εμφανίζουν ηλεκτρικά φορτία με το κάτω μέρος τους φορτισμένο συνήθως αρνητικά και το επάνω θετικά (Εικ. Α).

Το αρνητικό φορτίο που βρίσκεται στη βάση του νέφους δημιουργεί με επαγωγή θετικά φορτία στην επιφάνεια της Γης.

Επομένως, εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ νέφους-Γης.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ένας μονωτής (διηλεκτρικό) που εμποδίζει την κίνηση του ηλεκτρικού φορτίου. Εάν όμως η ένταση του πεδίου μεταξύ νέφους-Γης αποκτήσει μεγάλη τιμή (κοντά στα  $5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ ) ο ατμοσφαιρικός αέρας γίνεται αγώγιμος (για μερικά μs), με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη βάση του νέφους να τον διαπερνούν και να δημιουργείται ηλεκτρική εκκένωση.

Τα ηλεκτρόνια σχηματίζουν μια σφήνα, που ονομάζεται «οδηγός», και η οποία ακολουθώντας στρεβλή τροχιά κατευθύνεται προς τη γη, δημιουργώντας ισχυρότατα πεδία.

Όταν η μύτη του οδηγού φθάσει σε ύψος μερικών δεκάδων μέτρων από το έδαφος, η εκκένωση που κατεβαίνει συναντά την ανερχόμενη και κλείνει το κύκλωμα νέφους - εδάφους.

Η ανερχόμενη προς το νέφος εκκένωση δημιουργεί ρεύμα μεγάλης έντασης, 10.000 έως 20.000Α, το οποίο διαρκεί έως 0,01ms. Το ανερχόμενο ρεύμα είναι εκείνο που δίνει τη φωτεινή αναλαμπή που βλέπουμε σαν κεραυνό.

Η διαδρομή που ακολούθησε η ηλεκτρική εκκένωση έχει εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία που φθάνει τα 30.000Κ. Η πίεση που επικρατεί στην περιοχή της εκκένωσης δημιουργεί αρχικά ένα κρουστικό κύμα το οποίο σταδιακά μετατρέπεται στο ηχητικό, που ακούμε μετά τη φωτεινή λάμψη.

## Αλεξικέραυνο

Είναι ράβδοι αγώγιμες από χαλκό, οι οποίες τοποθετούνται σε υψηλά κτίρια και σε κατάλληλες θέσεις, εξέχουν σε ύψος της κατασκευής, και μέσω αγωγού συνδέονται με τη Γη.

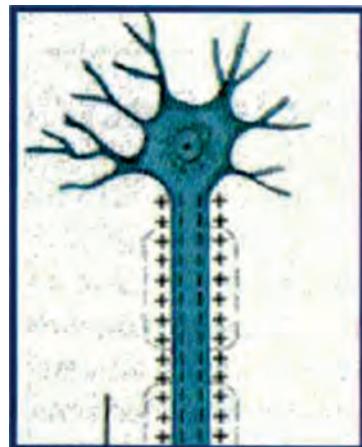
Κατά τη διάρκεια ενός κεραυνού οι ακίδες των αλεξικέραυνων «έλκουν», λόγω του σχήματός τους και της θέσης όπου βρίσκονται, την ηλεκτρική εκκένωση και «οδηγούν» τα αρνητικά φορτία στο έδαφος, προστατεύοντας τη γύρω περιοχή από τον κεραυνό.

## Πυκνωτές και ανθρώπινο σώμα

Το ανθρώπινο σώμα περιέχει εκατομμύρια επίπεδων πυκνωτών. Στα νευρικά κύτταρα οι μεμβράνες λειτουργούν ως μονωτικό υλικό, ξεχωρίζοντας θετικά και αρνητικά ηλεκτρικά φορτία.

Οι νευρικές ωθήσεις ταξιδεύουν μεταξύ του εγκεφάλου μας και του υπολοίπου σώματός μας μέσω φόρτισης και εκφόρτισης αυτών των μικροσκοπικών πυκνωτών.

Οι τυπικές τιμές της χωρητικότητας και της διαφοράς δυναμικού ενός από τους μικροπυκνωτές ενός νευρικού κυττάρου αντιστοιχεί στη χωρητικότητα ενός επίπεδου πυκνωτή με εμβαδόν οπλισμού  $1\text{m}^2$  και χωρητικότητα  $0,01\text{F}$  που είναι τεράστια, ενώ η τιμή της έντασης του πεδίου ενός νευρικού κυττάρου είναι της τάξης των  $10^7\text{N/C}!!$



«Πυκνωτές» νευρικού κυττάρου.

## Βενιαμίν Φραγκλίνος

Ο Βενιαμίν Φραγκλίνος (1706-1790) ήταν ο πρώτος Αμερικανός επιστήμονας που αναγνωρίστηκε διεθνώς. Το έργο του περιλαμβάνει, μεταξύ των άλλων, τη διατύπωση μιας θεωρίας για την ηλεκτρική δράση στην οποία εξηγεί την παραγωγή και μετακίνηση φορτίου καθώς και τη φόρτιση με επαγωγή. Ασχολήθηκε επίσης με την ιδέα της ύπαρξης ενός ηλεκτρικού ρευστού και την αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου. Ήταν ο πρώτος που πρότεινε τους όρους θετικό και αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο.

Το βασικό του όμως επίτευγμα ήταν η εφεύρεση του αλεξικέραυνου.

Το 1749 ο Φραγκλίνος έκανε την υπόθεση ότι τα σύννεφα είναι ηλεκτρισμένα και ότι η αστραπή είναι μια ταχύτατη απελευθέρωση



ηλεκτρικού ρευστού από τα σύννεφα. Καθώς μάλιστα ήταν απόλυτα πεισμένος ότι η αστραπή ήταν ένα ηλεκτρικό φαινόμενο, προειδοποιούσε στα κείμενά του τους αναγνώστες του ότι οι ψηλοί λόφοι, τα δένδρα και οι καμινάδες ήταν ιδιαίτερα επικίνδυνα, διότι δρούσαν σαν προεξοχές –σαν ακίδες– και μπορούσαν να προκαλέσουν εκφόρτιση των νεφών. Η δράση αυτή των ακίδων ήταν μία από τις πρώτες ανακαλύψεις του Φραγκλίνου, ο οποίος αν και αδυνατούσε να την εξηγήσει πίστευε ότι θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη στην ανθρωπότητα.

Εκτελώντας ο ίδιος μια σειρά πειραμάτων παρατήρησε και μια άλλη λειτουργία της ακίδας με τη χρήση του αλεξικέραυνου. Το αλεξικέραυνο, εκτός του ότι προκαλούσε εκφόρτιση ενός νέφους, μπορούσε να οδηγήσει την αστραπή με ασφάλεια στο έδαφος.

Ο Φραγκλίνος προσπάθησε να εξηγήσει και την απώθηση ανάμεσα σε φορτισμένα σώματα. Για το σκοπό αυτό πρότεινε την ιδέα της «ηλεκτρικής ύλης» την οποία θεωρούσε ότι αποτελείται από μικρά σωματίδια ικανά να διεισδύσουν στην κοινή ύλη, ακόμη και στα μέταλλα, χωρίς καμία αισθητή αντίσταση. Η διαφορά ανάμεσα στην κοινή και στην ηλεκτρική ύλη οφείλεται στην αμοιβαία έλξη των σωματιδίων της πρώτης και στην αμοιβαία άπωση των σωματιδίων της δεύτερης. Τα σωματίδια της ηλεκτρικής ύλης όμως έλκονται από την κοινή ύλη και σκορπίζονται μέσα σ' αυτή. Μ' άλλα λόγια η κοινή ύλη είναι ένα σφουγγάρι για το ηλεκτρικό ρευστό. Όταν όμως προστίθεται συνεχώς ηλεκτρική ύλη σ' ένα σώμα, τότε αυτή δεν μπορεί να μπει μέσα στο σώμα και συγκεντρώνεται στην επιφάνειά του, όπου και σχηματίζει μια ηλεκτρική «ατμόσφαιρα». Το σώμα τότε ηλεκτρίζεται. Ο Φραγκλίνος με τη θεωρία αυτή της «ηλεκτρικής ατμόσφαιρας» κατάφερε να εξηγήσει την άπωση ανάμεσα στα θετικά φορτισμένα σώματα. Η θεωρία του όμως δεν μπορούσε να ερμηνεύσει την άπωση ανάμεσα στα αρνητικά φορτισμένα σώματα.

Γενικώς, με τα πειράματά του ο Φραγκλίνος απέδειξε ότι τα ηλεκτρικά φαινόμενα δεν είναι αποτελέσματα ανθρώπινων τεχνασμάτων στο εργαστήριο, αλλά αποτελούν μέρος των δραστηριοτήτων της φύσης.



# (2 ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΣ Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα )



- 2.1 Ηλεκτρικές πηγές
- 2.2 Ηλεκτρικό ρεύμα
- 2.3 Κανόνες του Kirchhoff
- 2.4 Αντίσταση (ωμική) - Αντιστάτης
- 2.5 Συνδεσμολογία αντιστατών (αντιστάσεων)
- 2.6 Ρυθμιστική (μεταβλητή) αντίσταση
- 2.7 Ενέργεια και ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος
- 2.8 Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) πηγής
- 2.9 Νόμος του Ohm για κλειστό κύκλωμα
- 2.10 Αποδέκτες
- 2.11 Δίοδος

**Σε όλες τις οικιακές συσκευές, στους ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς πομπούς και δέκτες, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές, στα βιομηχανικά συστήματα διανομής ενέργειας υπάρχουν ηλεκτρικά κυκλώματα. Στα κυκλώματα αυτά τα ηλεκτρικά φορτία κινούνται προσανατολισμένα. Η προσανατολισμένη αυτή κίνηση των φορτίων λέγεται ηλεκτρικό ρεύμα.**

**Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετήσουμε το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, το αίτιο και τα αποτελέσματά του, καθώς και τους νόμους που ισχύουν στα ηλεκτρικά κυκλώματα. Τέλος, θα αναφερθούμε σε χρήσιμες συμβουλές για την προστασία από τους κινδύνους του ηλεκτρικού ρεύματος.**

## (2.1) Ηλεκτρικές πηγές

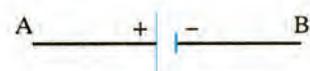
Στην καθημερινή ζωή χρησιμοποιούμε ηλεκτρικές στήλες (στοιχεία) για τη λειτουργία φορητών ραδιοφώνων, ρολογιών και φακών, χρησιμοποιούμε ηλεκτρικούς συσσωρευτές (μπαταρίες) για τη λειτουργία των ηλεκτρικών οργάνων του αυτοκινήτου, χρησιμοποιούμε φωτοστοιχεία για τη λειτουργία των μικρών αριθμομηχανών, χρησιμοποιούμε ηλεκτρικές γεννήτριες για το φωτισμό των εξοχικών σπιτιών. Όλες αυτές οι συσκευές είναι **ηλεκτρικές πηγές**.

Ποιος είναι ο ρόλος της ηλεκτρικής πηγής στις παραπάνω λειτουργίες; Η ηλεκτρική πηγή δημιουργεί στα άκρα της διαφορά δυναμικού (τάση) και προσφέρει στο κύκλωμα την ενέργειά της.

Τα άκρα της πηγής ονομάζονται **πόλοι** της πηγής. Ο πόλος που βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό λέγεται **θετικός πόλος (+)** και ο πόλος που βρίσκεται σε χαμηλότερο δυναμικό λέγεται **αρνητικός πόλος (-)**.

Έχουμε δύο είδη ηλεκτρικών πηγών:

α) **πηγές συνεχούς τάσης**, στις οποίες ο θετικός και ο αρνητικός πόλος είναι καθορισμένοι. Στην εικόνα 1 φαίνεται ο συμβολισμός μιας πηγής συνεχούς τάσης.



Συμβολισμός πηγής συνεχούς τάσης.  
Εικόνα 2.1-1.

β) **πηγές εναλλασσόμενης τάσης**, στις οποίες ο θετικός και ο αρνητικός πόλος εναλλάσσονται. Στην εικόνα 2 φαίνεται ο συμβολισμός μιας πηγής εναλλασσόμενης τάσης.



Συμβολισμός πηγής εναλλασσόμενης τάσης.

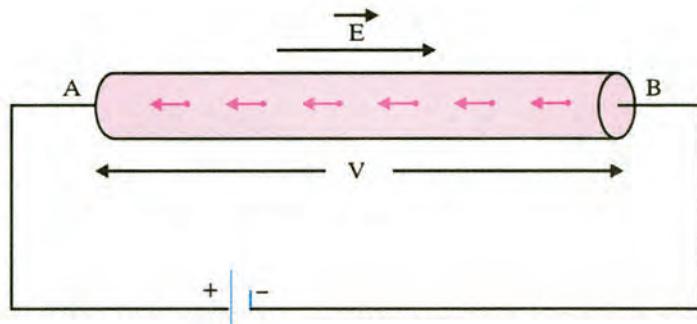
Εικόνα 2.1-2.

## (2.2) Ηλεκτρικό ρεύμα

### Το ηλεκτρικό ρεύμα στους μεταλλικούς αγωγούς

Τι συμβαίνει σ' ένα μεταλλικό αγωγό, αν συνδέσουμε τα άκρα του με μια πηγή συνεχούς τάσης; Τώρα, στα άκρα του υπάρχει διαφορά δυναμικού και στο εσωτερικό του ηλεκτρικό πεδίο. Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί δύναμη στα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Με την επίδραση αυτής της δύναμης τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προσανατολισμένα, με φορά από τον αρνητικό πόλο της πηγής (χαμηλότερο δυναμικό) προς το θετικό πόλο της πηγής (υψηλότερο δυναμικό), δηλαδή με φορά αντίθετη της φοράς της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (εικ. 3).

## 64 Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα



Ηλεκτρικό ρεύμα σε μεταλλικό αγωγό.

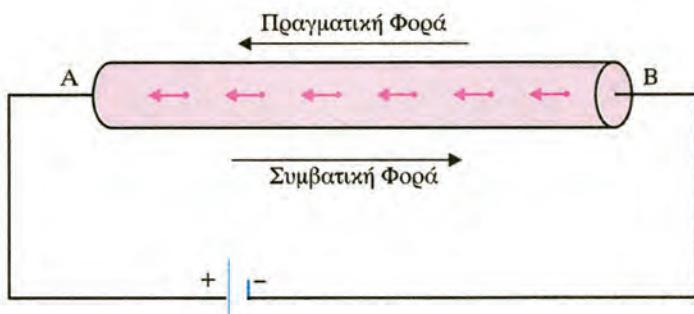
Εικόνα 2.2-3.

Η προσανατολισμένη αυτή κίνηση των ηλεκτρονίων στο μεταλλικό αγωγό ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα.

Γενικά, ηλεκτρικό ρεύμα ονομάζεται η προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων.

### Η φορά του ηλεκτρικού ρεύματος

Η φορά κίνησης των ηλεκτρονίων λέγεται **πραγματική φορά** του ηλεκτρικού ρεύματος. Ωστόσο, έχει επικρατήσει να θεωρούμε ως **φορά** του ηλεκτρικού ρεύματος την αντίθετη από τη φορά κίνησης των ηλεκτρονίων, που λέγεται **συμβατική φορά** του ηλεκτρικού ρεύματος (εικ. 4).



Φορά του ηλεκτρικού ρεύματος.

Εικόνα 2.2-4.

Η σύμβαση αυτή υπάρχει, γιατί οι μεγάλοι πειραματικοί φυσικοί του προηγούμενου αιώνα, που μελετούσαν τα ηλεκτρικά φαινόμενα, δε γνώριζαν τη σημερινή δομή του ατόμου και χρησιμοποιούσαν ως φορά του ηλεκτρικού ρεύματος τη φορά κίνησης του θετικού φορτίου, δηλαδή αυτή που εμείς σήμερα θεωρούμε ως συμβατική. Απλά εμείς διατηρήσαμε την παράδοση. Βέβαια, αυτό μας βολεύει γιατί οι περισσότεροι άνθρωποι ευκολότερα αντιλαμβάνονται ότι μια ροή συμβαίνει «απ' τα ψηλά στα χαμηλά», παρά αντίθετα. Έτσι, τα περισσότερα ηλεκτρικά κυκλώματα χρησιμοποιούν τον αρνητικό πόλο ως γείωση (δηλαδή ως σημείο αναφοράς, όπου το δυναμικό

ισούται με μηδέν,  $V = 0$ ). Έτσι, ο θετικός πόλος έχει θετικό δυναμικό, δηλαδή «βρίσκεται πιο ψηλά» από τον αρνητικό.

### Αναλυτική περιγραφή του ηλεκτρικού ρεύματος στους μεταλλικούς αγωγούς

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δέχονται συνεχώς τη δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι επιταχύνονται συνεχώς, γιατί συγκρούονται με τα θετικά ιόντα του μεταλλικού αγωγού, οπότε χάνουν μέρος της κινητικής ενέργειας που είχαν τη στιγμή της σύγκρουσης. Μετά ξαναεπιταχύνονται μέχρι να ξανασυγκρουστούν με τα θετικά ιόντα. Η σύνθετη αυτή κίνηση μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ευθύγραμμη ομαλή, με σταθερή ταχύτητα της τάξης των  $\text{mm/s}$ , η οποία λέγεται **ταχύτητα διολίσθησης** και συμβολίζεται με  $u_d$ .

Η μείωση της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων, λόγω των συγκρούσεων με τα θετικά ιόντα, έχει ως συνέπεια την αύξηση της ενέργειας ταλάντωσης (άρα και το πλάτος ταλάντωσης) των θετικών ιόντων, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του μεταλλικού αγωγού. Συνέπεια αυτού είναι να μεταφέρεται θερμότητα από τον αγωγό στο περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό λέγεται **φαινόμενο Joule**. Φυσικά, η ηλεκτρική πηγή πρέπει να προσφέρει συνεχώς ενέργεια για τη συντήρηση του φαινομένου.

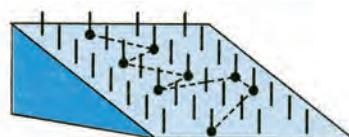
Η κίνηση όμως των ηλεκτρονίων δεν είναι τόσο απλή. Πριν από τη σύνδεση με την πηγή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται άτακτα χωρίς προτίμηση προς κάποια κατεύθυνση με ταχύτητα της τάξης των  $\text{Km/s}$ . Ωστόσο, αυτή η άτακτη κίνησή τους, δε θεωρείται ηλεκτρικό ρεύμα.

Μετά τη σύνδεση με την πηγή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δε χάνουν την προηγούμενη άτακτη κίνησή τους, αλλά στην ταχύτητά τους προστίθεται και η μικρή ταχύτητα διολίσθησής τους. Έτσι, όλο το ηλεκτρονικό αέριο μετακινείται με μικρή ταχύτητα προς ορισμένη κατεύθυνση. Αυτό είναι το ηλεκτρικό ρεύμα. Στην εικ. 5, φαίνεται η τροχιά της άτακτης κίνησης ενός ελευθέρου ηλεκτρονίου σ' ένα μεταλλικό αγωγό χωρίς την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου και η τροχιά του ίδιου ελευθέρου ηλεκτρονίου με την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου.

Ένα μηχανικό ανάλογο της κίνησης του ηλεκτρονίου είναι η κίνηση ενός σφαιριδίου, που κυλιέται σε κεκλιμένο επίπεδο μέσω μιας πυκνής διάταξης καρφιών (εικ. 6). Το σφαιρίδιο αντιστοιχεί σε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, τα καρφιά αντιστοιχούν στα θετικά ιόντα και η συνιστώσα του βάρους του σφαιριδίου στη δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο.

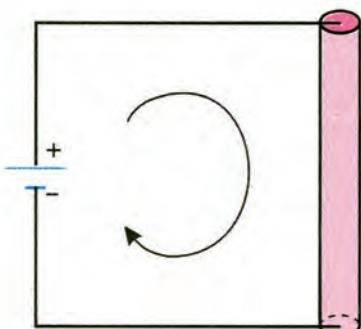


Τροχιές ελεύθερου ηλεκτρονίου.  
Εικόνα 2.2-5.



Μηχανικό ανάλογο κίνησης ελευθέρου ηλεκτρονίου σε ρευματοφόρο αγωγό.  
Εικόνα 2.2-6.

## Μηχανικό ανάλογο και υδραυλικό ανάλογο της ηλεκτρικής πηγής και του ηλεκτρικού ρεύματος

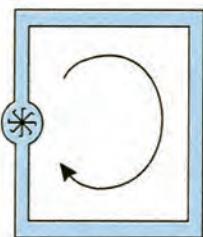


Ηλεκτρική πηγή - αγωγός.  
Εικόνα 2.2-7.

Όπως είδαμε, η ηλεκτρική πηγή δεν παράγει ηλεκτρικά φορτία, αλλά δημιουργεί διαφορά δυναμικού, λόγω της οποίας γίνεται η ροή των ήδη υπαρχόντων ηλεκτρικών φορτίων. Φυσικά, είναι απαραίτητη η συνεχής προσφορά ενέργειας από την ηλεκτρική πηγή (εικ. 7).

Παρόμοιο είναι το φαινόμενο της εικόνας 8 (**υδραυλικό ανάλογο**), όπου η αντλία δεν παράγει νερό, αλλά δημιουργεί διαφορά πίεσης, λόγω της οποίας γίνεται η ροή του ήδη υπάρχοντος νερού. Φυσικά, είναι απαραίτητη η συνεχής προσφορά ενέργειας από την αντλία.

Αντίστοιχο είναι το φαινόμενο της εικ. 9 (**μηχανικό ανάλογο**), όπου ο άνθρωπος δεν παράγει σφαιρίδια, αλλά δημιουργεί διαφορά δυναμικού, λόγω της οποίας γίνεται η ροή των ήδη υπαρχόντων σφαιριδίων. Φυσικά, είναι απαραίτητη η συνεχής προσφορά ενέργειας από τον άνθρωπο.



Υδραυλικό ανάλογο ηλεκτρικής πηγής.  
Εικόνα 2.2-8.

## Αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος

Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει τους αγωγούς, προκαλεί κάποια φαινόμενα, τα οποία ονομάζουμε **αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος** και είναι τα παρακάτω:

### α) Θερμικά

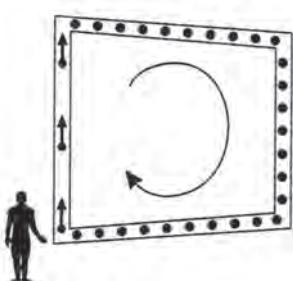
Παρατηρούνται κατά τη λειτουργία του θερμοσίφωνα, της ηλεκτρικής κουζίνας, του λαμπτήρα πυρακτώσεως κ.ά. Σ' αυτά τα φαινόμενα συμβαίνει αύξηση της θερμοκρασίας σε μεταλλικούς αγωγούς.

### β) Χημικά

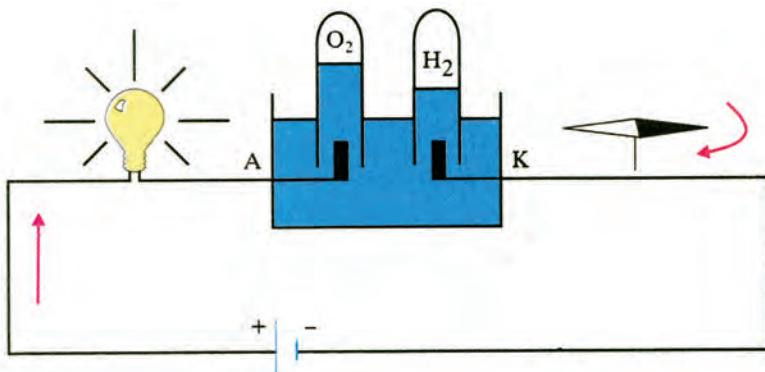
Παρατηρούνται κατά το άδειασμα μιας μπαταρίας, την ηλεκτρόλυση διαλύματος θειικού οξέος, την ηλεκτροπληξία κ.ά. Σ' αυτά συμβαίνουν χημικές αντιδράσεις.

### γ) Μαγνητικά

Παρατηρούνται κατά τη λειτουργία κινητήρων π.χ. του πλυντηρίου, του ασανσέρ, του τρόλεϊ, κατά την έκτροπη μιας μαγνητικής βελόνας από τη θέση ισορροπίας της κ.ά. Σ' αυτά συμβαίνει αλληλεπίδραση ηλεκτρικών ρευμάτων και μαγνητών.



Μηχανικό ανάλογο ηλεκτρικής πηγής.  
Εικόνα 2.2-9.



Αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος.

Εικόνα 2.2-10.

### Ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος

Ακούμε στις ειδήσεις ότι το Σάββατο από τις 8:00 π.μ. έως τις 11:00 π.μ., δηλαδή σε χρονική διάρκεια 3 ωρών, πέρασαν από τα διόδια της Ελευσίνας 2.100 αυτοκίνητα. Είναι φανερό ότι δε μας ενδιαφέρει μόνο το πλήθος των αυτοκινήτων που πέρασαν, αλλά και σε πόσο χρόνο πέρασαν, δηλαδή ο ρυθμός διέλευσης των αυτοκινήτων.

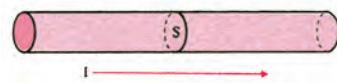
Έτσι και στους αγωγούς δε μας ενδιαφέρει μόνο η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που περνά από μια διατομή του αγωγού, αλλά και σε πόσο χρόνο περνά δηλαδή ο ρυθμός διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου.

Θεωρούμε έναν αγωγό, ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα που έχει πάντα την ίδια φορά (συνεχές ρεύμα) και από μια διατομή του αγωγού περνά ίδια ποσότητα φορτίου σε ίσους χρόνους (χρονικά σταθερό ρεύμα) (εικ. 11).

Στην περίπτωση αυτή (του συνεχούς και χρονικά σταθερού ηλεκτρικού ρεύματος) ορίζουμε ως **ένταση I του ηλεκτρικού ρεύματος**, που διαρρέει έναν αγωγό, το μονόμετρο μέγεθος που έχει μέτρο ίσο με το πηλίκο του φορτίου  $q$ , που περνά από μια διατομή του αγωγού σε χρόνο  $t$ , προς το χρόνο  $t$ .

Δηλαδή:

$$I = \frac{q}{t} \quad (1)$$



Αγωγός που διαρρέεται από συνεχές και χρονικά σταθερό ηλεκτρικό ρεύμα.

Εικόνα 2.2-11.

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) η ένταση του ρεύματος είναι θεμελιώδες μέγεθος με μονάδα το **1A (Ampère)**, που είναι θεμελιώδης μονάδα.

$$\text{Είναι: } 1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}} \text{ ή } (1 \text{ Ampere} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ second}})$$

Από τη σχέση (1) ορίζεται η μονάδα φορτίου 1 Coulomb (1C = 1A·1s). Δηλαδή 1C είναι το φορτίο, που περνά σε χρόνο 1s από μια διατομή ενός αγωγού, ο οποίος διαρρέεται από ρεύμα έντασης 1A.

Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος εκφράζει το ρυθμό διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου από μια διατομή ενός αγωγού.

### Παράδειγμα 1

Ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I = 4\text{A}$ . Να βρεθούν:

α) το φορτίο που πέρνα από μια διατομή του αγωγού σε χρόνο  $t = 4\text{s}$ ,

β) ο αριθμός των ηλεκτρονίων που περνά από μια διατομή του αγωγού σε χρόνο  $t = 4\text{s}$ .

$$\text{Δίνεται } |q_e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

**Λύση**

α) Από τον ορισμό της έντασης  $I$  του ρεύματος έχουμε:

$$I = \frac{q}{t} \Rightarrow q = It \Rightarrow q = 16\text{C}$$

β) Έστω  $N$  ο αριθμός των ηλεκτρονίων. Είναι:

$$q = N|q_e| \Rightarrow N = \frac{q}{|q_e|} \Rightarrow N = 10^{20} \text{ ηλεκτρόνια}$$

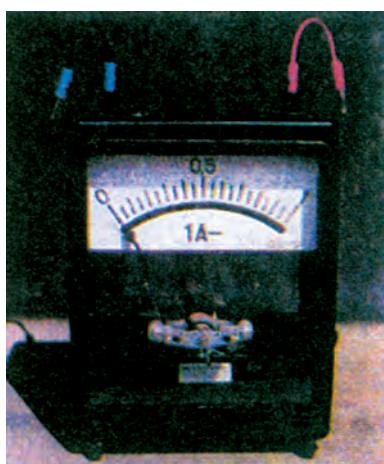
## (2.3) Κανόνες του Kirchhoff (Κίρχοφ)

### Αμπερόμετρο

Αμπερόμετρο είναι το όργανο που χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος (εικ. 12). Το αμπερόμετρο λειτουργεί με βάση τα θερμικά ή τα μαγνητικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος. Έχει δύο ακροδέκτες Κ και Λ, που αντιστοιχούν στα σημεία εισόδου και εξόδου του ηλεκτρικού ρεύματος (εικ. 13).

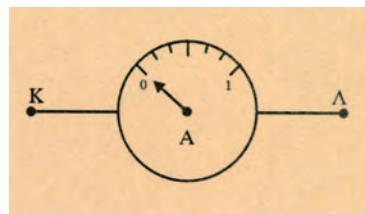
Για να μετρήσουμε την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σ' ένα κύκλωμα (εικ. 14α), παρεμβάλλουμε το αμπερόμετρο στο σημείο ακριβώς που θέλουμε να τη μετρήσουμε. Δηλαδή, κόβουμε τον αγωγό του κυκλώματος στο σημείο Μ και στα δύο άκρα που δημιουργούνται, συνδέουμε τους δύο ακροδέκτες του αμπερομέτρου (εικ. 14β). Η σύνδεση αυτή του αμπερομέτρου λέγεται **σύνδεση σε σειρά**.

Αν το αμπερόμετρο θεωρηθεί ιδανικό (μηδενική εσωτερική αντίσταση), η σύνδεσή του δεν επηρεάζει την ένταση του ρεύματος, που διέρρεε το κύκλωμα, πριν τη σύνδεσή του.

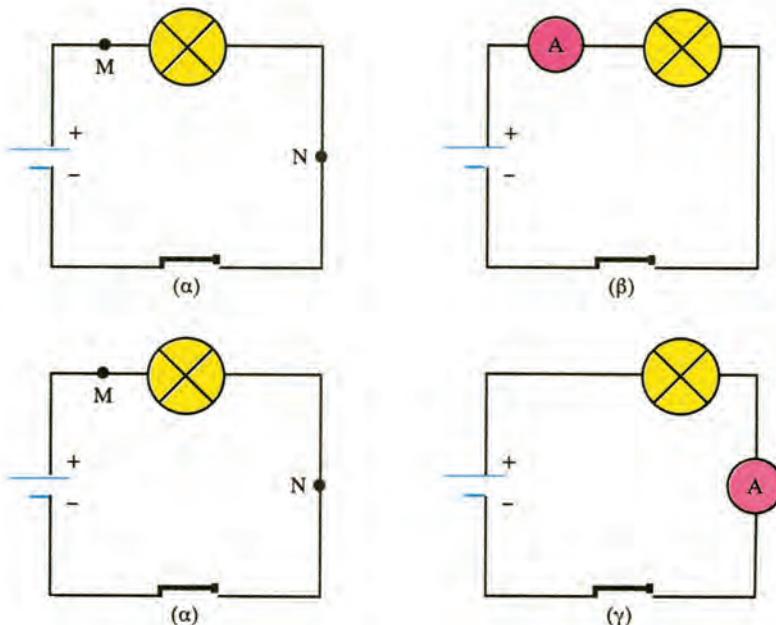


Αμπερόμετρο.  
Εικόνα 2.3-12.

Αν στο κύκλωμα της εικ. 14α παρεμβάλλουμε το αμπερόμετρο στο σημείο N, τότε παίρνουμε το κύκλωμα της εικ. 14γ και παρατηρούμε ότι η ένδειξη του αμπερομέτρου είναι ίδια με την προηγούμενη. Αυτό σημαίνει ότι η στιγμιαία ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι ίδια σε όλα τα σημεία ενός αγωγού. Αυτό είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου. Όσο φορτίο διέρχεται από κάποια διατομή του αγωγού ανά μονάδα χρόνου, τόσο φορτίο διέρχεται από οποιαδήποτε άλλη διατομή ενός αγωγού ανά μονάδα χρόνου. Επομένως, κατά μήκος ενός ρευματοφόρου αγωγού δεν υπάρχουν ούτε «πηγές», ούτε «καταβόθρες» ηλεκτρικών φορτίων.



Αμπερόμετρο.  
Εικόνα 2.3-13.



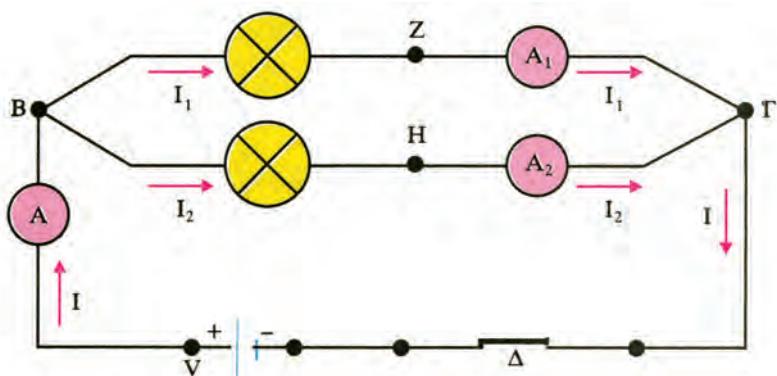
Σύνδεση αμπερομέτρου σε κύκλωμα.  
Εικόνα 2.3-14.

### 1ος Κανόνας του Kirchhoff (Κίρχοφ)

Ας αναφερθούμε στο κύκλωμα που φαίνεται στην εικ. 15. Κόμβος λέγεται το σημείο ενός κυκλώματος, στο οποίο συναντιούνται τουλάχιστον τρεις ρευματοφόροι αγωγοί. Τα σημεία Β και Γ είναι κόμβοι του κυκλώματος. Κλάδος λέγεται το τμήμα του κυκλώματος που βρίσκεται μεταξύ δύο κόμβων. Οι αγωγοί ΒΖΓ, ΒΗΓ και ΓΔΒ είναι κλάδοι του κυκλώματος. Όλα τα στοιχεία ενός κλάδου διαρρέονται από την ίδια ένταση ηλεκτρικού ρεύματος.

Το αμπερόμετρο Α δείχνει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κλάδο ΓΔΒ. Είναι  $I = 20\text{mA}$ . Το αμπερόμετρο  $A_1$  δείχνει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κλάδο ΒΖΓ. Είναι  $I_1 = 8\text{mA}$ . Το αμπερόμετρο  $A_2$  δείχνει την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον κλάδο ΒΗΓ.

## 70 Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα



Πειραματική επαλήθευση 1ου κανόνα Kirchhoff.  
Εικόνα 2.3-15.

Είναι  $I_2 = 12\text{mA}$ . Παρατηρούμε ότι:

$$I = I_1 + I_2 \quad (2)$$

Δηλαδή, το άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων, που «εισέρχονται» σ' ένα κόμβο, ισούται με το άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων, που «εξέρχονται» απ' αυτόν.

$$\Sigma(I_{\text{εισ}}) = \Sigma(I_{\text{εξ}})$$

Η προηγούμενη πρόταση είναι η διατύπωση του **1ου κανόνα του Kirchhoff**, οποίος είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου. Όσο φορτίο «φτάνει» στον κόμβο ανά μονάδα χρόνου, τόσο φορτίο «φεύγει» απ' αυτόν ανά μονάδα χρόνου. Οι κόμβοι δεν είναι ούτε «πηγές», ούτε «καταβόθρες» φορτίων.

Αν αυθαίρετα θεωρήσουμε τις εντάσεις των ρευμάτων, που φτάνουν στον κόμβο ως θετικές και τις εντάσεις των ρευμάτων, που φεύγουν από τον κόμβο ως αρνητικές, η σχέση (2) γράφεται:

$$I - I_1 - I_2 = 0$$

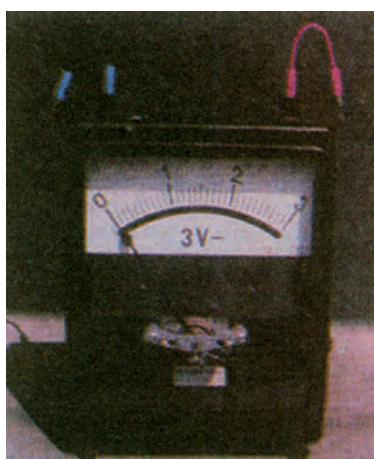
οπότε ο 1ος κανόνας του Kirchhoff διατυπώνεται και ως εξής:

**Σ' ένα κόμβο το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων ισούται με μηδέν, δηλαδή:**

$$\Sigma I = 0$$

### Βολτόμετρο

Βολτόμετρο είναι το όργανο που χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ δύο σημείων ενός κυκλώματος (εικ. 16). Το βολτόμετρο λειτουργεί με βάση τα θερμικά ή τα μαγνητικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού ρεύματος. Το βολτόμετρο (εικ. 17) έχει δύο ακροδέκτες Κ και Λ, που συνδέονται με τα σημεία του κυκλώματος, μεταξύ



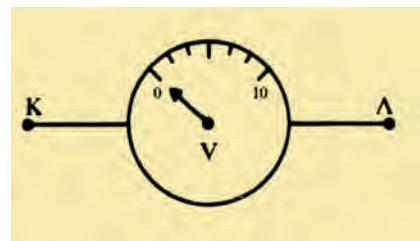
Βολτόμετρο.  
Εικόνα 2.3-16.

των οποίων θέλουμε να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού (τάση).

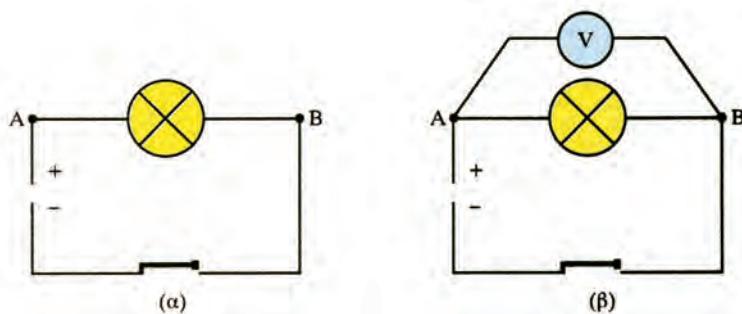
Για να μετρήσουμε τη διαφορά δυναμικού (τάση) μεταξύ δύο σημείων A και B ενός κυκλώματος (εικ. 18α), συνδέουμε αγώγιμα τους ακροδέκτες του βολτόμετρου με τα σημεία αυτά (εικ. 18β).

Το βολτόμετρο συνδέεται χωρίς να διακοπεί το κύκλωμα. Η σύνδεση αυτή του βολτομέτρου λέγεται **σύνδεση σε διακλάδωση ή παράλληλη σύνδεση**.

Αν το βολτόμετρο θεωρηθεί ιδανικό (άπειρη εσωτερική αντίσταση), η σύνδεσή του δεν επηρεάζει το κύκλωμα, οπότε το βολτόμετρο δείχνει την τάση μεταξύ των σημείων A και B πριν τη σύνδεσή του.



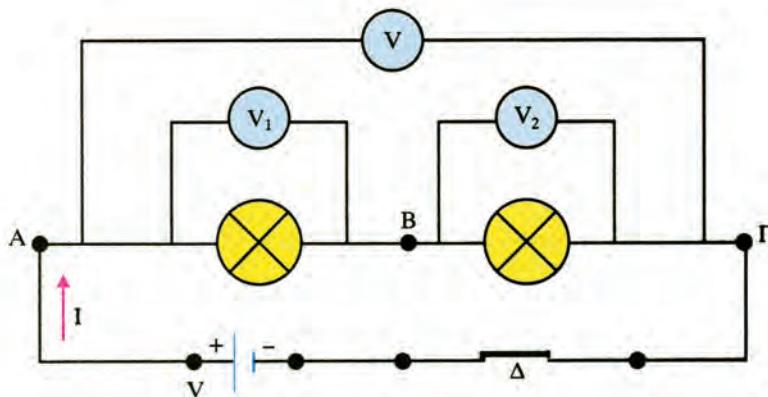
Βολτόμετρο.  
Εικόνα 2.3-17.



Σύνδεση βολτομέτρου σε κύκλωμα.

Εικόνα 2.3-18.

## 2ος Κανόνας του Kirchhoff (Κίρχοφ)



Πειραματική επαλήθευση 2ου κανόνα Kirchhoff.

Εικόνα 2.3-19.

Ας αναφερθούμε στο κύκλωμα που φαίνεται στην εικ. 19. Το βολτόμετρο V δείχνει την τάχη  $V_{ΔΓ}$ , που είναι και η τάση στους πόλους της πηγής. Είναι  $V_{ΔΓ} = 12V$ . Το βολτόμετρο  $V_1$

δείχνει την τάση  $V_{AB}$ . Είναι  $V_{AB} = 9V$ . Το βολτόμετρο  $V_2$  δείχνει την τάση  $V_{BG}$ . Είναι  $V_{BG} = 3V$ . Παρατηρούμε ότι:

$$\begin{aligned} V_{AG} &= V_{AB} + V_{BG} \Leftrightarrow \\ V_{AB} + V_{BG} - V_{AG} &= 0 \stackrel{V_{AG} = -V_{GA}}{\Leftrightarrow} \\ V_{AB} + V_{BG} + V_{GA} &= 0 \end{aligned}$$

Δηλαδή, κατά μήκος μιας κλειστής διαδρομής σ' ένα κύκλωμα το αλγεβρικό άθροισμά των διαφορών δυναμικού ισούται με μηδέν.

$$\Sigma(\Delta V) = 0$$

Η προηγούμενη πρόταση είναι η διατύπωση του **2ου κανόνα του Kirchhoff**, ο οποίος είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας.

Κάθε κλειστή διαδρομή σ' ένα κύκλωμα λέγεται **βρόχος**.

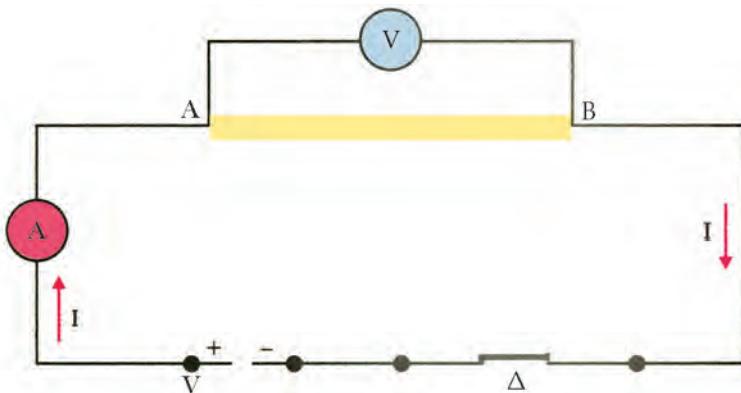
### Δίπολο και χαρακτηριστική καμπύλη διπόλου

Ένα κύκλωμα μπορεί να περιέχει λαμπτήρες, αντιστάτες, πυκνωτές, πηνία, ηλεκτρικές πηγές και άλλα στοιχεία. Το κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι καθένα έχει δύο άκρα, που λέγονται **πόλοι**. Γι' αυτό τα στοιχεία αυτά λέγονται **δίπολα**.

Η λειτουργία ενός διπόλου εξαρτάται από τις τιμές της τάσης που υπάρχει στα άκρα του. Αυτή καθορίζει τις τιμές της έντασης του ρεύματος που το διαρρέει. Γενικά, για κάθε δίπολο υπάρχει μια συνάρτηση  $I = f(V)$ . Η γραφική της παράσταση λέγεται **χαρακτηριστική καμπύλη του διπόλου**. Η γνώση της μας βοηθάει στη διάκριση των διπόλων μεταξύ τους και στην πρόβλεψη της λειτουργίας τους, όταν τα συνδέσουμε σε κάποιο κύκλωμα.

## (2.4) Αντίσταση - Αντιστάτης

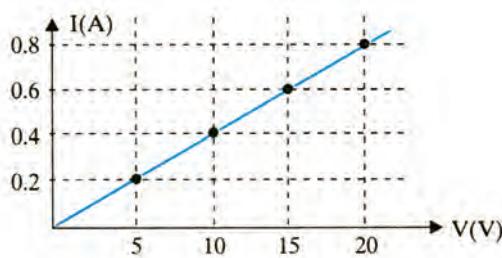
### Αντίσταση αγωγή



Ηλεκτρικό κύκλωμα με πηγή διακόπτη και μεταλλικό αγωγό.  
Εικόνα 2.4-20.

Θεωρούμε το κύκλωμα της εικόνας 20. Με το βολτόμετρο μετράμε την τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του μεταλλικού αγωγού AB και με το αμπερόμετρο μετράμε την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει. Τα όργανα θεωρούνται ιδανικά. Μεταβάλλοντας την τιμή της τάσης V, παρατηρούμε ότι μεταβάλλεται η τιμή της έντασης I. Φροντίζουμε οι τιμές να είναι τέτοιες, ώστε να μη μεταβάλλεται η θερμοκρασία του αγωγού. Έτσι, έχουμε τον παρακάτω πίνακα τιμών και την αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη του αγωγού (εικ. 21).

V(V)	I(A)	V/I
0	0	-
5	0,2	25
10	0,4	25
15	0,6	25
20	0,8	25



Χαρακτηριστική καμπύλη μεταλλικού αγωγού.

Εικόνα 2.4-21.

Παρατηρούμε ότι το πηλίκο  $V/I$  έχει σταθερή τιμή για τον αγωγό και ίση με 25. Επαναλαμβάνουμε το πείραμα και με άλλους μεταλλικούς αγωγούς και καταλήγουμε πάντα στο ίδιο συμπέρασμα, ότι το πηλίκο  $V/I$  έχει σταθερή τιμή, χαρακτηριστική για τον κάθε αγωγό. Το πηλίκο αυτό το ονομάζουμε αντίσταση του αγωγού.

**Αντίσταση R ενός αγωγού ονομάζουμε το μονόμετρο μέγεθος, που ισούται με το πηλίκο της τάσης V, που εφαρμόζεται στα άκρα του, προς την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει. Δηλαδή:**

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) μονάδα μέτρησης της αντίστασης είναι το  $1\Omega$  (Ohm).

$$\text{Είναι: } 1\Omega = \frac{1V}{1A} \text{ ή } \left( 1 \text{ Ohm} = \frac{1 \text{ Volt}}{1 \text{ Ampère}} \right)$$

**1Ω (Ohm)** είναι η αντίσταση ενός αγωγού, ο οποίος διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης 1A, όταν στα άκρα του εφαρμόζεται τάση 1V.

Τι εκφράζει η αντίσταση ενός αγωγού;

**Η αντίσταση ενός αγωγού εκφράζει τη δυσκολία που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν διέρχεται μέσα απ' αυτόν.**

Πού οφείλεται η αντίσταση των μεταλλικών αγωγών;

**Η αντίσταση των μεταλλικών αγωγών οφείλεται στις «συγκρούσεις» των ελεύθερων ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα.**

Εδώ, πρέπει να τονίσουμε ότι με τον όρο **αντίσταση ή ωμική αντίσταση** εκφράζουμε τη δυσκολία που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν διέρχεται μέσα από τον μεταλλικό αγωγό. Ο ίδιος ο μεταλλικός αγωγός λέγεται **αντιστάτης**. Όμως, πολλές φορές, για χάρη συντομίας, χρησιμοποιούμε τον όρο αντίσταση ή ωμική αντίσταση και εννοούμε τον ίδιο το μεταλλικό αγωγό. Παραδείγματος χάρη, λέμε «στα άκρα μιας αντίστασης  $5\Omega$ » και εννοούμε «στα άκρα ενός αντιστάτη, που έχει αντίσταση  $5\Omega$ ».

### Νόμος του Ohm για αντιστάτη

Για τον αντιστάτη της εικόνας 20 διαπιστώσαμε πειραματικά ότι ισχύει:

$$R = \frac{V}{I} = \text{σταθερό}$$

Η σχέση αυτή γράφεται ως εξής:

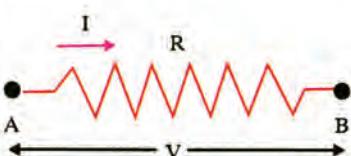
$$I = \frac{V}{R} \quad \text{με } R = \text{σταθερό} \quad (4)$$

Η παραπάνω σχέση αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του **νόμου του Ohm για αντιστάτη (μεταλλικό αγωγό)** ο οποίος διατυπώνεται ως εξής:

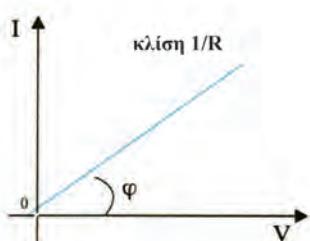
**Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει έναν αντιστάτη (μεταλλικό αγωγό) σταθερής θερμοκρασίας είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του.**

Η χαρακτηριστική καμπύλη του αντιστάτη, δηλαδή η γραφική παράσταση της έντασης του ρεύματος ως συνάρτηση της τάσης, φαίνεται στην εικ. 23.

Πρέπει να τονίσουμε ότι ο νόμος του Ohm δεν είναι γενικός νόμος για όλους τους αγωγούς. Στις λυχνίες αερίου, στις λυχνίες κενού, στα τρανζίστορ, στους ηλεκτρικούς κινητήρες και σε άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία **δεν** ισχύει ο νόμος του Ohm.



Αντιστάτης.  
Εικόνα 2.4-22.



Χαρακτηριστική καμπύλη αντιστάτη.  
Εικόνα 2.4-23.

## Παράδειγμα 2

Η τάση στα άκρα ενός μεταλλικού αγωγού είναι  $V = 100V$  και η αντίσταση του  $R = 10\Omega$ . Να βρεθεί η ένταση  $I$  του ρεύματος που τον διαρρέει.

### Λύση

Από το νόμο του Ohm έχουμε:

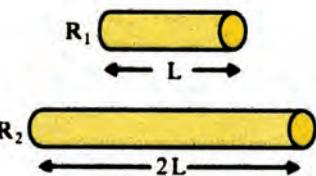
$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow I = \frac{100V}{10\Omega} \Rightarrow I = 10A$$

## Παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η αντίσταση ενός αντιστάτη

α) Στο κύκλωμα της εικόνας 20, στη θέση του μεταλλικού αγωγού AB συνδέουμε διαδοχικά δύο χάλκινους αγωγούς, ίδιου εμβαδού διατομής S, με μήκη  $\ell$  και  $2\ell$  αντίστοιχα (εικ. 24). Μετράμε τις αντιστάσεις τους και διαπιστώνουμε ότι ο δεύτερος έχει διπλάσια αντίσταση από τον πρώτο. Άρα, η αντίσταση είναι ανάλογη του μήκους  $\ell$  του αγωγού. Η διαπίστωση αυτή είναι αναμενόμενη, γιατί όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού, τόσο περισσότερες είναι οι συγκρούσεις των ελευθέρων ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα, άρα τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του αγωγού.

β) Στο κύκλωμα της εικόνας 20, στη θέση του μεταλλικού αγωγού AB συνδέουμε διαδοχικά δύο χάλκινους αγωγούς, ίδιου μήκους, με εμβαδά διατομής S και  $2S$  αντίστοιχα (εικ. 25). Μετράμε τις αντιστάσεις τους και διαπιστώνουμε ότι ο δεύτερος έχει τη μισή αντίσταση από τον πρώτο. Άρα, η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού S της διατομής του αγωγού. Η διαπίστωση αυτή είναι αναμενόμενη, γιατί όσο μεγαλύτερο είναι το εμβαδό διατομής του αγωγού, τόσο λιγότερες είναι οι συγκρούσεις των ελευθέρων ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα, άρα τόσο μικρότερη είναι η αντίσταση του αγωγού.

γ) Στο κύκλωμα της εικόνας 20 στη θέση του μεταλλικού αγωγού AB συνδέουμε διαδοχικά δύο αγωγούς ίδιου μήκους  $\ell$  και ίδιου εμβαδού διατομής S, ένα χάλκινο και ένα σιδερένιο (εικ. 26). Μετράμε τις αντιστάσεις τους και διαπιστώνουμε ότι ο σιδερένιος έχει μεγαλύτερη αντίσταση από τον χάλκινο. Άρα, η αντίσταση εξαρτάται από το υλικό του αγωγού. Αυτό συμβαίνει γιατί το μεταλλικό πλέγμα του χάλκινου αγωγού είναι διαφορετικό από το μεταλλικό πλέγμα του σιδερένιου αγωγού, άρα και ο αριθμός των συγκρούσεων των ελευθέρων ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα είναι διαφορετικός, άρα και η αντίσταση του αγωγού είναι διαφορετική.



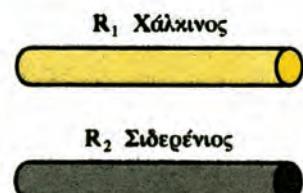
Η αντίσταση είναι ανάλογη των μήκων του αγωγού.

Εικόνα 2.4-24.



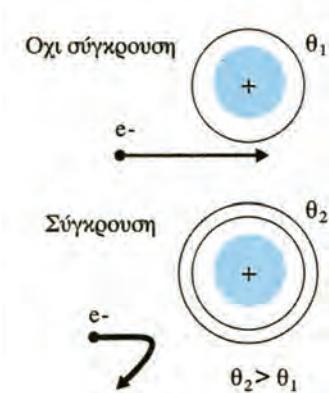
Η αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη των εμβαδών διατομής του αγωγού.

Εικόνα 2.4-25.



Η αντίσταση εξαρτάται από το υλικό του αγωγού.

Εικόνα 2.4-26.



Η αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αγωγού.

Εικόνα 2.4-27.

δ) Στο κύκλωμα της εικόνας 20, θερμαίνουμε το μεταλλικό αγωγό AB, μετράμε την αντίστασή του και διαπιστώνουμε ότι αυτή αυξάνεται. Άρα, η αντίσταση εξαρτάται από τη θερμοκρασία του αγωγού. Είναι λογικό, γιατί, όπως έχουμε πει, τα θετικά ιόντα δεν είναι ακίνητα, αλλά ταλαντώνονται γύρω από καθορισμένες θέσεις προς όλες τις κατευθύνσεις, με πλάτος που αυξάνεται με τη θερμοκρασία. Η αύξηση του πλάτους με τη θερμοκρασία αυξάνει τον αριθμό των συγκρούσεων των ελευθέρων ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα, άρα και την αντίσταση του μεταλλικού αγωγού (εικ. 27).

Το μέγεθος που εκφράζει ποσοτικά την εξάρτηση της αντίστασης ενός αγωγού από το υλικό του αγωγού και τη θερμοκρασία συμβολίζεται με  $\rho$  και ονομάζεται **ειδική αντίσταση του υλικού**. Η μονάδα μέτρησής της στο S.I. είναι το  $\Omega \cdot m$ .

Συνεπώς, η αντίσταση  $R$  ενός αγωγού, που έχει τη μορφή κυλινδρικού σύρματος,

- α) είναι ανάλογη του μήκους  $\ell$  του αγωγού,
- β) είναι αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού  $S$  της διατομής του αγωγού,
- γ) εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και τη θερμοκρασία του.

Η σχέση που συνδέει όλες τις παραπάνω πειραματικές διαπιστώσεις είναι:

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \quad (27)$$

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές των ειδικών αντιστάσεων διαφόρων υλικών σε  $\Omega \cdot m$ .

Ειδική αντίσταση ( $\rho$ ) μερικών υλικών	
Υλικό	Ειδική αντίσταση ( $\rho$ ) σε $\Omega \cdot m$ στους $20^\circ C$
<b>Μέταλλα</b>	
Άργυρος	$1,6 \cdot 10^{-8}$
Χαλκός	$1,7 \cdot 10^{-8}$
Σίδηρος	$9,5 \cdot 10^{-8}$
Υδράργυρος	$96 \cdot 10^{-8}$
<b>Κράματα</b>	
Κονσταντάνη (Cu, Ni)	$50 \cdot 10^{-8}$

Χρωμονικελίνη (Ni, Fe, Cr, Mn)	$100 \cdot 10^{-8}$
Μαγγανίνη (Cu, Mn, Ni)	$42 \cdot 10^{-8}$
<b>Ημιαγωγοί</b>	
Πυρίτιο	περίπου 1000
Γερμάνιο	περίπου 0,5
<b>Διηλεκτρικά</b>	
Γυαλί	$10^{12}$ ως $10^{15}$
Ξύλο	$10^8$ ως $10^{12}$
<b>Ανθρώπινο σώμα</b>	
Πνεύμονας	20
Λίπος	25
Σκελετός	5

Με κριτήριο την τιμή της ειδικής αντίστασης τα υλικά κατατάσσονται σε αγωγούς, ημιαγωγούς και μονωτές.

Από τον πίνακα φαίνεται ότι τη μικρότερη ειδική αντίσταση την έχει ο άργυρος και ο χαλκός. Γι' αυτό, τα σύρματα που χρησιμοποιούμε συνήθως είναι χάλκινα, αφού ο άργυρος είναι ακριβός.

Η ειδική αντίσταση ως συνάρτηση της θερμοκρασίας δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{\theta} = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \theta) \quad (6)$$

όπου  $\rho_0$  η ειδική αντίσταση σε θερμοκρασία  $0^\circ\text{C}$ ,  $\rho_{\theta}$  η ειδική αντίσταση σε  $\theta^\circ\text{C}$  και  $\alpha$  μια σταθερά που λέγεται **θερμικός συντελεστής ειδικής αντίστασης**. Η σταθερά αυτή εξαρτάται από το υλικό του αγωγού και μετριέται σε  $\text{grad}^{-1}$ .

Για τα καθαρά μέταλλα (π.χ. Fe, Al, Cu, Ag)  $\alpha > 0$ , συνεπώς η ειδική αντίσταση αυξάνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.

Για το γραφίτη (C), τους ημιαγωγούς (Ge, Si) και τους ηλεκτρολύτες είναι  $\alpha < 0$ , συνεπώς, η ειδική αντίσταση μειώνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.

Για ορισμένα κράματα, όπως η κονσταντάνη (Cu, Ni), η μαγγανίνη (Cu, Mn, Ni) και η χρωμονικελίνη (Ni, Fe, Cr, Mn) είναι  $\alpha = 0$ , συνεπώς η ειδική αντίσταση είναι ανεξάρτητη της θερμοκρασίας.

Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι τιμές του θερμικού συντελεστή ειδικής αντίστασης διαφόρων υλικών.

Υλικό	Θερμικός συντελεστής $\alpha$ (grad $^{-1}$ )
άργυρος	$3,8 \cdot 10^{-3}$
χαλκός	$3,9 \cdot 10^{-3}$
σίδηρος	$5 \cdot 10^{-3}$
κράματα	0
γραφίτης	$-0,5 \cdot 10^{-3}$

Αν θεωρήσουμε αμελητέα τη μεταβολή των γεωμετρικών διαστάσεων ενός αγωγού λόγω της θερμικής διαστολής, τότε η μεταβολή της αντίστασης του αγωγού με τη θερμοκρασία οφείλεται αποκλειστικά στη μεταβολή της ειδικής του αντίστασης. Άρα, ισχύει:

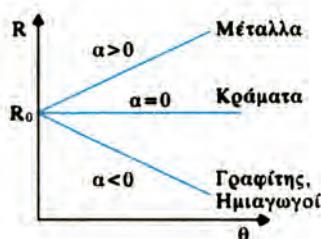
$$\text{στους } 0^\circ\text{C: } R_o = \rho_o \frac{l}{s}$$

$$\text{στους } \theta^\circ\text{C: } R_\theta = \rho_\theta \frac{l}{s}$$

και επειδή  $\rho_\theta = \rho_o \cdot (1 + \alpha \theta)$  έχουμε:

$$R_\theta = \rho_\theta \frac{l}{s} R = \rho_o (1 + \alpha \theta) \frac{l}{s} \Rightarrow$$

$$R_\theta = R_o (1 + \alpha \cdot \theta) \quad (7)$$



Εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία.

Εικόνα 2.4-28.

Έτσι, ανάλογα με την τιμή του θερμικού συντελεστή η αντίσταση αυξάνεται, μειώνεται ή παραμένει σταθερή με την αύξηση της θερμοκρασίας (εικ. 28).

### Παράδειγμα 3

Ένας αγωγός έχει αντίσταση  $R = 20\Omega$  σε θερμοκρασία  $\theta = 20^\circ\text{C}$ . Όταν ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα, η θερμοκρασία του σύρματος αυξάνεται σε  $\theta' = 50^\circ\text{C}$ . Να βρεθεί η ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει, αν η τάση στα άκρα του είναι  $V = 222,2\text{V}$ . Δίνεται ο θερμικός συντελεστής αντίστασης του αγωγού  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1}$ .

#### Λύση

Έστω  $R_o$  η αντίσταση του σύρματος στους  $0^\circ\text{C}$  και  $R'$  η αντίσταση του σύρματος στους  $50^\circ\text{C}$ . Άρα, ισχύουν οι σχέσεις:

$$R = R_o (1 + \alpha \theta) \quad (1)$$

$$R' = R_o (1 + \alpha \theta') \quad (2)$$

Διαιρούμε τις (1) και (2) κατά μέλη και έχουμε:

$$\frac{R'}{R} = \frac{1 + \alpha\theta'}{1 + \alpha\theta} \Rightarrow R' = \frac{R(1 + \alpha\theta')}{1 + \alpha\theta} \Rightarrow \\ R' = \frac{20\Omega(1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 50)}{1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \Rightarrow R' = 22,22\Omega$$

Άρα, η ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει είναι:

$$I = \frac{V}{R'} = 10A$$

#### Παράδειγμα 4

Ένα κυλινδρικό σύρμα έχει διάμετρο  $\delta = 1mm$  και ειδική αντίσταση  $\rho = 10^{-8}\Omega m$ . Πόσο μήκος του σύρματος πρέπει να χρησιμοποιήσουμε για να έχουμε αντίσταση  $R = 10\Omega$ ;

#### Λύση

Η αντίσταση  $R$  δίνεται από τη σχέση

$$R = \rho \frac{\ell}{S} \Rightarrow \ell = \frac{RS}{\rho} \\ \text{Αλλά } S = \pi r^2 = \pi \left(\frac{\delta}{2}\right)^2 \Rightarrow S = \frac{\pi \delta^2}{4} \Rightarrow S = 7,85 \cdot 10^{-7} m^2.$$

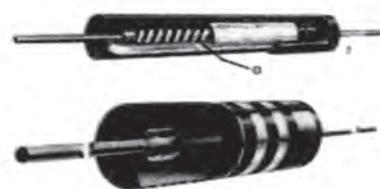
$$\text{Άρα: } \ell = \frac{10\Omega \cdot 7,85 \cdot 10^{-7} m^2}{10^{-8} \Omega m} \Rightarrow \ell = 785m.$$

#### Τύποι αντιστατών (αντιστάσεων)

Στο εμπόριο κυκλοφορούν διάφοροι τύποι αντιστατών (αντιστάσεων). Ο πιο συνηθισμένος τύπος είναι οι αντιστάσεις άνθρακα, οι αντιστάσεις μεταλλικής επίστρωσης, οι αντιστάσεις επίστρωσης άνθρακα, οι αντιστάσεις μετάλλουγυαλιού και οι αντιστάσεις σύρματος (εικ. 29).

#### Χρωματικός κώδικας

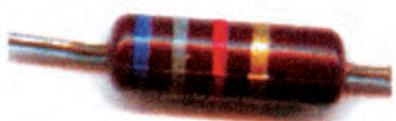
Οι τιμές των αντιστάσεων συνήθως προσδιορίζονται από κάποιο χρωματικό κώδικα. Πολλοί αντιστάτες έχουν έγχρωμες λωρίδες για τον προσδιορισμό της τιμής της αντίστασης και της ανοχής. (Η ανοχή εκφράζει τα όρια της απόκλισης της αντίστασης από την ονομαστική της τιμή.) **Οι έγχρωμες λωρίδες αντιστοιχούν σε αριθμούς.** Στο διπλανό πίνακα αναγράφονται οι αριθμητικές τιμές κάθε χρώματος. Οι περισσότεροι αντιστάτες φέρουν τέσσερις λωρίδες. Οι δύο πρώτες αντιπροσωπεύουν αριθμητικές τιμές. Η τρίτη λέγεται πολλαπλασιαστής και τοποθετεί μετά το διψήφιο αριθμό, που



Αντιστάτης.

Εικόνα 2.4-29.

Χρώμα	Αριθμό
Μαύρο	0
Καφέ	1
Κόκκινο	2
Πορτοκαλί	3
Κίτρινο	4
Πράσινο	5
Μπλε	6
Μωβ	7
Γκρι	8
Άσπρο	9



Αντιστάτης.  
Εικόνα 2.4-30.

προκύπτει από τις δύο πρώτες λωρίδες, τόσα μηδενικά, όσα αντιπροσωπεύει η τιμή της. Η τέταρτη εκφράζει την ανοχή. Ασημί χρώμα σημαίνει ανοχή  $\pm 10\%$ , χρυσαφί  $\pm 5\%$ , καφέ  $\pm 1\%$ .

### Παράδειγμα υπολογισμού αντίστασης

Έστω ότι έχουμε μία αντίσταση με τα χρώματα μπλε, γκρι, κόκκινο και χρυσαφί (εικ. 30). Το μπλε αντιστοιχεί στο 6, το γκρι στο 8 και το κόκκινο στο 2. Άρα, η τιμή της αντίστασης είναι:

$$R = 6800 \Omega$$

μπλε γκρι κόκκινο

Το χρυσαφί σημαίνει ότι έχουμε ανοχή  $\pm 5\%$ . Το 5% του 6800 είναι 340. Άρα, η τιμή της αντίστασης αυτής μπορεί να κυμαίνεται από  $6800 - 340 = 6460\Omega$  έως  $6800 + 340 = 7140\Omega$ .

## (2.5) Συνδεσμολογία αντιστατών (αντιστάσεων)

Πολλές φορές στα ηλεκτρονικά κυκλώματα πρέπει μεταξύ δύο σημείων A και B να παρεμβάλλουμε αντίσταση συγκεκριμένης τιμής, που δεν υπάρχει στο εμπόριο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιες από αυτές που υπάρχουν στο εμπόριο και να τις συνδέσουμε κατάλληλα. Επίσης, πολλές φορές στα ηλεκτρονικά κυκλώματα πρέπει να αντικαταστήσουμε πολλές αντιστάσεις με μία, η οποία να προκαλεί το ίδιο αποτέλεσμα με τις άλλες.

Είναι λοιπόν αναγκαία η μελέτη της **συνδεσμολογίας των αντιστατών** (αντιστάσεων).

Οι αντιστάσεις μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με διάφορους τρόπους. Έτσι δημιουργούνται τα λεγόμενα **συστήματα αντιστάσεων**.

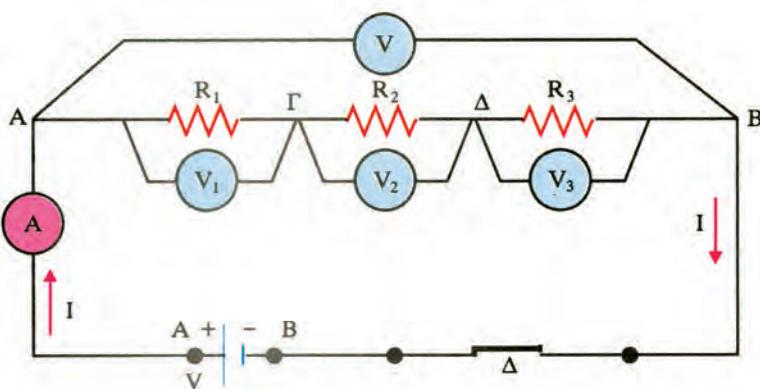
Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, που μπαίνει και βγαίνει από τα άκρα ενός τέτοιου συστήματος ονομάζεται **ολική ένταση  $I_{ολ}$** . Η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του ονομάζεται **ολική τάση  $V_{ολ}$** . Επίσης, ονομάζουμε **ισοδύναμη** ή **ολική αντίσταση  $R_{ολ}$**  ενός τέτοιου συστήματος, την αντίσταση, στα άκρα της οποίας, αν εφαρμόσουμε τάση  $V_{ολ}$ , θα διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I_{ολ}$ . Δηλαδή:

$$R_{ολ} = \frac{V_{ολ}}{I_{ολ}} \quad (8)$$

Είναι φανερό ότι, αν αντικαταστήσουμε ένα σύστημα αντιστάσεων με την ολική αντίστασή του, προκύπτει συνδεσμολογία ηλεκτρικά ισοδύναμη με την αρχική.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τους δύο πιο απλούς, αλλά πιο βασικούς τρόπους σύνδεσης αντιστάσεων: **α) σε σειρά** και **β) παράλληλα**. Με το συνδυασμό τους προκύπτουν «μικτοί» τρόποι σύνδεσης.

### Σύνδεση σε σειρά



Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά.

Εικόνα 2.5-31.

Θεωρούμε το κύκλωμα της εικ. 31. Τα όργανα θεωρούνται ιδανικά. Οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  είναι γνωστές ( $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ ,  $R_3 = 30\Omega$ ). Με το βολτόμετρο  $V$  μετράμε την τάση στα άκρα του συστήματος  $V_{ολ}$  και με το αμπερόμετρο την ένταση του ρεύματος  $I_{ολ}$ . Είναι:  $V_{ολ} = 12V$  και  $I_{ολ} = 0,2A$ .

Άρα:

$$R_{ολ} = \frac{V_{ολ}}{I_{ολ}} = \frac{12V}{0,2A} = 60\Omega$$

Η σχέση που συνδέει τις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  με το  $R_{ολ}$  είναι:

$$R_{ολ} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (9)$$

Ακόμη, με τα βολτόμετρα  $V_1$ ,  $V_2$  και  $V_3$  μετράμε τις τάσεις στα άκρα των  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  αντίστοιχα. Είναι:  $V_1 = 2V$ ,  $V_2 = 4V$  και  $V_3 = 6V$ .

Παρατηρούμε ότι:

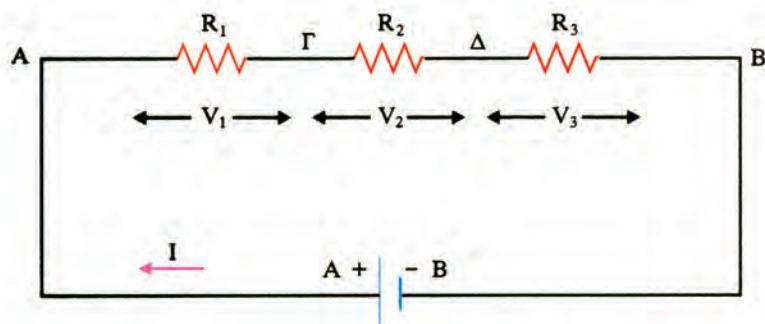
$$V_{ολ} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (10)$$

## 82 Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα

Χαρακτηριστικό της συνδεσμολογίας αυτής είναι ότι **όλες οι αντιστάσεις διαρρέονται από την ίδια ένταση ρεύματος  $I$ , που είναι ίση με την ολική ένταση  $I_{ολ}$** . Δηλαδή:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I = I_{ολ} \quad (11)$$

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποδεικνύονται και **θεωρητικά**.



Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά.

**Εικόνα 2.5-32.**

Στο κύκλωμα της εικόνας 32 η τάση της  $R_1$  είναι:  $V_1 = V_A - V_\Gamma$ , της  $R_2$ :  $V_2 = V_\Gamma - V_\Delta$  και της  $R_3$ :  $V_3 = V_\Delta - V_B$ . Προσθέτουμε κατά μέλη και έχουμε:

$$V_1 + V_2 + V_3 = V_A - V_B$$

Όμως,  $V_A - V_B = V_{ολ}$  είναι η τάση στα άκρα της συνδεσμολογίας.

$$\text{Άρα: } V_{ολ} = V_1 + V_2 + V_3$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$V_{ολ} = I \cdot R_{ολ}, \quad V_1 = I \cdot R_1, \quad V_2 = I \cdot R_2, \quad V_3 = I \cdot R_3$$

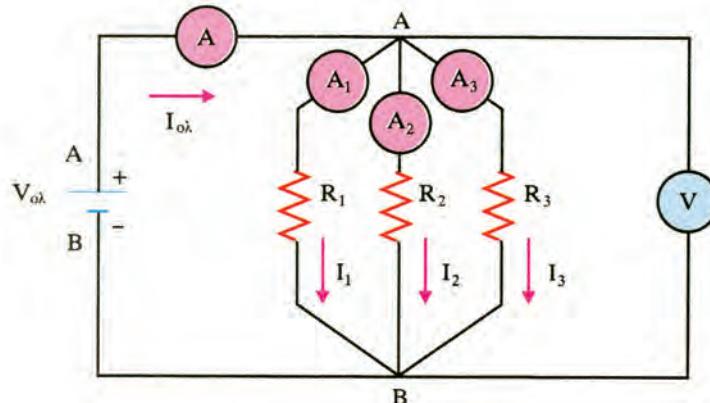
Έτσι έχουμε:

$$V_{ολ} = V_1 + V_2 + V_3 \Rightarrow I \cdot R_{ολ} = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 \Rightarrow \\ R_{ολ} = R_1 + R_2 + R_3$$

Η σύνδεση δυο αντιστάσεων σε σειρά ισοδυναμεί με αύξηση του μήκους ενός αγωγού, άρα η ολική αντίσταση είναι μεγαλύτερη και από τη μεγαλύτερη αντίσταση του συστήματος.

Το πρακτικό αποτέλεσμα είναι ότι με τη συνδεσμολογία αντιστάσεων σε σειρά επιτυγχάνουμε αντιστάσεις μεγαλύτερες από τις αντιστάσεις που διαθέτουμε.

## Σύνδεση παράλληλα



Σύνδεση αντιστάσεων παράλληλα.

Εικόνα 2.5-33.

Θεωρούμε το κύκλωμα της εικόνας 33. Οι αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  είναι γνωστές ( $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ ,  $R_3 = 30\Omega$ ). Με το βολτόμετρο μετράμε την τάση στα άκρα του συστήματος  $V_{oλ}$  και με το αμπερόμετρο την ένταση του ρεύματος  $I_{oλ}$ . Είναι:  $V_{oλ} = 6V$  και  $I_{oλ} = 1,1A$ .

Άρα:

$$R_{oλ} = \frac{V_{oλ}}{I_{oλ}} = \frac{6V}{1,1A} = \frac{60}{11} \Omega = 5,45\Omega$$

Η σχέση που συνδέει τις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  με το  $R_{oλ}$  είναι:

$$\frac{1}{R_{oλ}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (12)$$

Ακόμη, με τα αμπερόμετρα  $A_1$ ,  $A_2$  και  $A_3$  μετράμε τις εντάσεις που διαρρέουν τις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  αντίστοιχα. Είναι:  $I_1 = 0,6A$ ,  $I_2 = 0,3A$  και  $I_3 = 0,2A$ .

Παρατηρούμε ότι:

$$I_{oλ} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (13)$$

Χαρακτηριστικό της συνδεσμολογίας αυτής είναι ότι όλες οι αντιστάσεις έχουν την ίδια τάση  $V$ , που είναι ίση με την ολική τάση  $V_{oλ}$ . Δηλαδή:

$$V_1 = V_2 = V_3 = V = V_{oλ} \quad (14)$$

Τα παραπάνω συμπεράσματα αποδεικνύονται και **θεωρητικά**.

Στο κύκλωμα της εικόνας 33 είναι  $I_1$ ,  $I_2$  και  $I_3$  οι εντάσεις των ρευμάτων στις αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και  $R_3$  αντίστοιχα. Στον κόμβο A (και στον κόμβο B) ισχύει:

$$I_{oλ} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (\text{1ος Κανόνας Kirchhoff})$$

## 84 Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$I_{\text{ολ}} = \frac{V}{R_{\text{ολ}}} , \quad I_1 = \frac{V}{R_1} , \quad I_2 = \frac{V}{R_2} , \quad I_3 = \frac{V}{R_3}$$

Έτσι έχουμε:

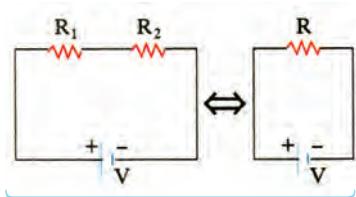
$$I_{\text{ολ}} = I_1 + I_2 + I_3 \Rightarrow \frac{V}{R_{\text{ολ}}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{R_{\text{ολ}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Η σύνδεση αντιστάσεων παράλληλα ισοδυναμεί με αύξηση της διατομής ενός αγωγού, άρα η ολική αντίσταση είναι μικρότερη και από τη μικρότερη αντίσταση του συστήματος.

Το πρακτικό αποτέλεσμα είναι ότι με τη συνδεσμολογία αντιστάσεων παράλληλα επιτυγχάνουμε αντιστάσεις μικρότερες από τις αντιστάσεις που διαθέτουμε.

### Παράδειγμα 5



Δύο αντιστάσεις  $R_1 = 4\Omega$  και  $R_2 = 6\Omega$  συνδέονται σε σειρά και στα άκρα της συνδεσμολογίας εφαρμόζεται τάση  $V = 100$  V. Να βρεθούν:

- α) Η ισοδύναμη αντίσταση
- β) Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει κάθε αντίσταση
- γ) Η τάση στα άκρα κάθε αντίστασης.

### Λύση

α) Η ισοδύναμη αντίσταση της συνδεσμολογίας είναι:

$$R = R_1 + R_2 \Rightarrow R = 10\Omega$$

β) Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις και την πηγή τροφοδοσίας υπολογίζεται από το νόμο του Ohm:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} \Rightarrow I = 10A . \quad \text{Είναι: } I = I_1 = I_2 = 10A$$

γ) Οι τάσεις στις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  υπολογίζονται από το νόμο του Ohm:

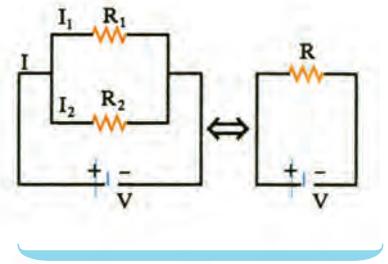
$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \Rightarrow V_1 = I_1 R_1 \Rightarrow V_1 = 40V$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow V_2 = I_2 R_2 \Rightarrow V_2 = 60V$$

## Παράδειγμα 6

Δύο αντιστάσεις  $R_1 = 10\Omega$  και  $R_2 = 15\Omega$  συνδέονται παράλληλα και στις άκρες του συστήματος εφαρμόζεται τάση  $V = 90V$ . Να βρεθούν:

- α) Η ισοδύναμη αντίσταση.
- β) Οι τάσεις στα άκρα των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$ .
- γ) Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει κάθε αντίσταση και την πηγή τροφοδοσίας.



### Λύση

α) Η ισοδύναμη αντίσταση της συνδεσμολογίας δίνεται:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R = 6\Omega$$

β) Η τάση κάθε αντίστασης είναι ίση με  $V = 90V$

$$V_1 = V_2 = V = 90V$$

γ) Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τις αντιστάσεις  $R_1$ ,  $R_2$  και την πηγή τροφοδοσίας υπολογίζονται από το νόμο του Ohm:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \Rightarrow I_1 = \frac{90V}{10\Omega} = 9A$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow I_2 = \frac{90V}{15\Omega} = 6A$$

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow I = \frac{90V}{6\Omega} = 15A$$

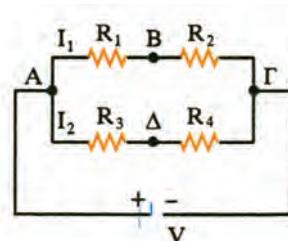
Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει την πηγή μπορεί να υπολογιστεί και από τον 1ο κανόνα του Kirchhoff:

$$I = I_1 + I_2 \Rightarrow I = 9A + 6A = 15A$$

## Παράδειγμα 7

Δίνεται η συνδεσμολογία των αντιστάσεων του διπλανού σχήματος και ότι  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $R_3 = 10\Omega$ ,  $R_4 = 5\Omega$  και  $V = 30V$ . Να βρεθούν:

- α) η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τις  $R_1$ ,  $R_2$  και τις  $R_3$ ,  $R_4$ .
- β) η διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων Β και Δ.



### Λύση

α) Οι  $R_1$ ,  $R_2$  συνδέονται σε σειρά και στα άκρα τους Α, Γ έχουμε διαφορά δυναμικού  $V$ . Άρα, η ένταση  $I_1$  του ρεύματος που διαρρέει τις  $R_1$ ,  $R_2$  είναι:

$$I_1 = \frac{V}{R_1 + R_2} \Rightarrow I_1 = \frac{30V}{(2+3)\Omega} \Rightarrow I_1 = 6A \quad (1)$$

Οι  $R_3$ ,  $R_4$  συνδέονται σε σειρά και στα άκρα τους A, Γ έχουμε επίσης τάση V. Άρα η ένταση  $I_2$  του ρεύματος που διαρρέει τις  $R_1$ ,  $R_2$  είναι:

$$I_2 = \frac{V}{R_3 + R_4} \Rightarrow I_2 = \frac{30V}{(10+5)\Omega} \Rightarrow I_2 = 2A \quad (2)$$

### β) 1ος τρόπος

Αν «κινούμαστε» κατά μήκος μιας αντίστασης και κατά τη φορά του ρεύματος, το δυναμικό μειώνεται κατά  $IR$ , ενώ αν «κινούμαστε» αντίθετα με τη φορά του ρεύματος το δυναμικό αυξάνεται κατά  $IR$ .

Ξεκινάμε από το σημείο B και «πηγαίνουμε» στο Δ μέσω του κόμβου A. Από το B στο A, «πηγαίνουμε» αντίθετα με το ρεύμα, επομένως το δυναμικό αυξάνεται κατά  $I_1 R_1$ , ενώ από το A στο Δ, πηγαίνουμε ομόρροπα με το ρεύμα, οπότε το δυναμικό μειώνεται κατά  $I_2 R_3$ . Άρα:

$$\begin{aligned} V_B + I_1 R_1 - I_2 R_3 &= V_\Delta \Rightarrow V_B - V_\Delta = I_2 R_3 - I_1 R_1 \Rightarrow \\ V_B - V_\Delta &= 20V - 12V = 8V \end{aligned} \quad (1),(2)$$

### 2ος τρόπος

Η τάση στα άκρα της  $R_1$  είναι:  $V_1 - V_B = I_1 R_1$  (3)

και η τάση στα άκρα της  $R_3$  είναι:  $V_A - V_\Delta = I_2 R_3$  (4)

Αφαιρούμε τις (3) και (4) κατά μέλη, οπότε έχουμε:

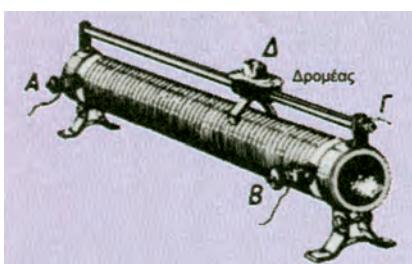
$$\begin{aligned} V_A - V_B - (V_A - V_\Delta) &= I_1 R_1 - I_2 R_3 \Rightarrow V_A - V_B - V_A + \\ V_\Delta &= I_1 R_1 - I_2 R_3 \\ \text{ή } V_B - V_\Delta &= I_2 R_3 - I_1 R_1 = 8V \end{aligned}$$

## (2.6) Ρυθμιστική (μεταβλητή) αντίσταση

Όλοι έχουμε αυξομειώσει την ένταση του ήχου ενός ραδιοφώνου χρησιμοποιώντας το αντίστοιχο κουμπί. Το κουμπί αυτό ρυθμίζει τη λειτουργία μιας ρυθμιστικής αντίστασης.

Η ρυθμιστική αντίσταση είναι ένας τύπος ωμικής αντίστασης, που μπορεί να μεταβάλλεται μέσα σ' ένα συγκεκριμένο εύρος τιμών.

Η ρυθμιστική αντίσταση, που συνήθως χρησιμοποιούν στο σχολικό εργαστήριο, κατασκευάζεται από ισοπαχές ομογενές σύρμα τυλιγμένο ομοιόμορφα πάνω σε κύλινδρο από μονωτικό υλικό (εικ. 34). Επειδή η αντίσταση αυτού του σύρματος είναι ανάλογη του μήκους του, η αντίσταση που παρεμβάλλε-

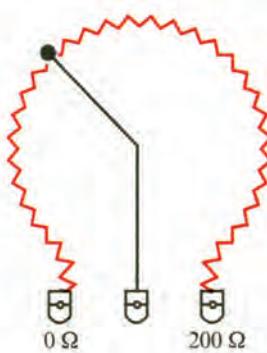


Ρυθμιστική (μεταβλητή) αντίσταση.  
Εικόνα 2.6-34.

ται μεταξύ του δρομέα  $\Delta$  και του ενός άκρου Α της συσκευής είναι ανάλογη με την απόσταση του δρομέα από το άκρο αυτό.

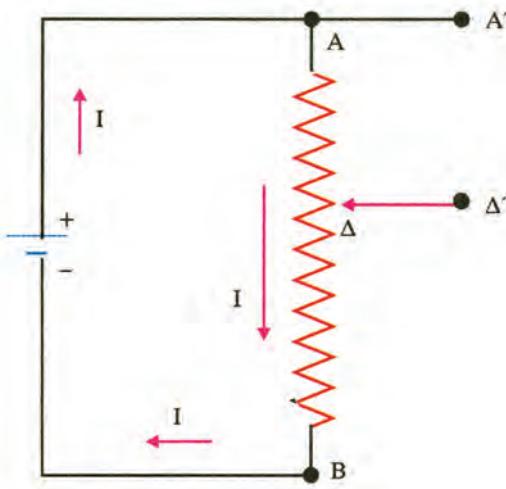
Όπως φαίνεται στην εικ. 35 η θέση του δρομέα μας δίνει τη δυνατότητα να πάρουμε οποιαδήποτε τιμή αντίστασης μεταξύ 0 και  $200\Omega$ .

Ανάλογα με τον τρόπο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα η ρυθμιστική αντίσταση, λειτουργεί είτε ως ρυθμιστής της τάσης και λέγεται **ποτενσιόμετρο**, είτε ως ρυθμιστής της έντασης του ρεύματος και λέγεται **ροοστάτης**.



Ρυθμιστική (μεταβλητή) αντίσταση.  
Εικόνα 2.6-35.

## Ποτενσιόμετρο



Ποτενσιόμετρο.  
Εικόνα 2.6-36.

Ο τρόπος σύνδεσης της ρυθμιστικής αντίστασης  $R_{AB}$  ως ποτενσιόμετρο φαίνεται στην εικόνα 36. Η κινητή επαφή  $\Delta$ , που λέγεται δρομέας, μπορεί να μετακινείται από το Α μέχρι το Β.

Αν το κύκλωμα  $AA'\Delta'\Delta$  είναι ανοικτό, δηλαδή το ρεύμα  $I$  δε διακλαδίζεται, τότε ισχύουν:

$$V_{AD} = I \cdot R_{AD}$$

και

$$V_{AB} = I \cdot R_{AB}$$

$$\text{Άρα: } \frac{V_{AD}}{V_{AB}} = \frac{R_{AD}}{R_{AB}}$$

$$\text{και επειδή: } \frac{R_{AD}}{R_{AB}} = \frac{\rho A\Delta/s}{\rho AB/s} = \frac{A\Delta}{AB}$$

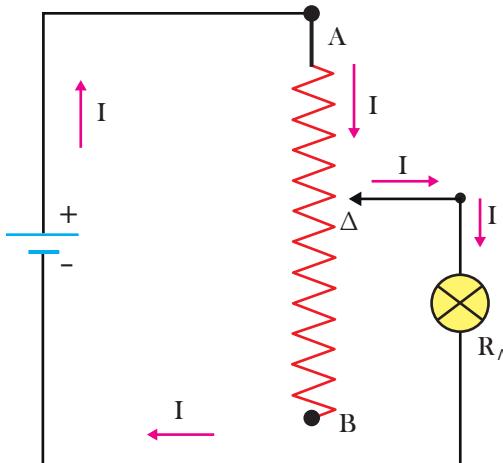
$$\text{έχουμε: } \frac{V_{AD}}{V_{AB}} = \frac{A\Delta}{AB} \Rightarrow V_{AD} = V_{AB} \frac{A\Delta}{AB}$$

Αν θέσουμε το σταθερό μήκος  $AB = \ell$  και το μεταβλητό μήκος  $AD = x$ , έχουμε:

$$V_{AD} = V_{AB} \frac{x}{\ell} \quad (15)$$

Δηλαδή, μετακινώντας το δρομέα  $\Delta$  από το  $A$  μέχρι το  $B$  μπορούμε να πάρουμε τιμές τάσης από  $0$  έως  $V_{AB}$ .

### Ροοστάτης



Ροοστάτης.  
Εικόνα 2.6-37.

Ο τρόπος σύνδεσης της ρυθμιστικής αντίστασης  $R_{AB}$  ως ροοστάτη φαίνεται στην εικόνα 37. Η κινητή επαφή  $\Delta$ , που λέγεται δρομέας μπορεί να μετακινείται από το  $A$  μέχρι το  $B$ . Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα είναι:

$$I = \frac{V}{R_{AD} + R_A} \quad (16)$$

Μετακινώντας το δρομέα  $\Delta$  από το  $A$  μέχρι το  $B$ , μεταβάλλουμε την αντίσταση  $R_{AD}$  που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα, άρα και την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει.

## (2.7) Ενέργεια και ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος

### Ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος

Για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών απαιτείται ενέργεια, η οποία προσφέρεται από την πηγή. Η ενέργεια αυτή λέγεται **ηλεκτρική ενέργεια** ή **ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος**.

## 89 Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα

Θεωρούμε ένα τμήμα κυκλώματος ΑΒ (εικ. 38), το οποίο περιλαμβάνει μια συσκευή, που μπορεί να είναι αντιστάτης, ηλεκτρικός λαμπτήρας, ανεμιστήρας, ραδιόφωνο κ.ά.

Στα άκρα της συσκευής ΑΒ υπάρχει τάση  $V = V_A - V_B$  και η συσκευή διαρρέεται από συνεχές ρεύμα σταθερής έντασης I.

Έστω ότι σε χρόνο t μετακινείται ηλεκτρικό φορτίο q από το A στο B. Στην πραγματικότητα, όπως ξέρουμε, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται αντίθετα. Από τον ορισμό της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος έχουμε:

$$I = \frac{q}{t} \Rightarrow q = I \cdot t$$

Αν  $V_A$  είναι το δυναμικό του άκρου A και  $V_B$  το δυναμικό του άκρου B, τότε το φορτίο q έχει στο άκρο A δυναμική ενέργεια  $U_A = q \cdot V_A$  και στο άκρο B δυναμική ενέργεια  $U_B = q \cdot V_B$ . Επειδή είναι  $V_A > V_B$  θα είναι και  $U_A > U_B$ , δηλαδή **η δυναμική ενέργεια του φορτίου q ελαττώνεται καθώς περνά μέσα από τη συσκευή**.

Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας συμπεραίνουμε ότι **η μείωση της δυναμικής ενέργειας του φορτίου q αποδίδεται στη συσκευή και μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας**, όπως κινητική (αν η συσκευή είναι κινητήρας), χημική (αν η συσκευή είναι βολτάμετρο (συσκευή ηλεκτρόλυσης)), θερμική (αν η συσκευή είναι αντιστάτης), κ.ά.

Η μείωση της δυναμικής ενέργειας του φορτίου q είναι ίση με την ηλεκτρική ενέργεια που προσφέρεται από την πηγή.

Άρα, η ενέργεια που αποδίδεται στη συσκευή σε χρόνο t, είναι:

$$W = U_A - U_B \Rightarrow W = qV_A - qV_B$$

$$\text{ή } W = q(V_A - V_B) \Rightarrow W = q \cdot V \Rightarrow$$

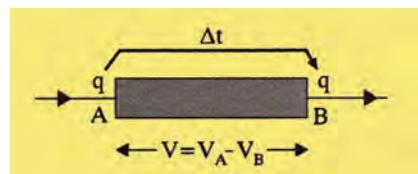
$$W = V \cdot I \cdot t \quad (17)$$

**Ο παραπάνω τύπος είναι γενικός και ισχύει για κάθε συσκευή** (κινητήρας, βολτάμετρο αντιστάτης κ.ά.).

Αν η συσκευή είναι αντιστάτης (ωμική αντίσταση), τότε ισχύει ο νόμος του Ohm ( $I = V/R$ ) και μπορούμε να γράψουμε ισοδύναμα ότι:

$$\xrightarrow{V=IR} W = I^2 \cdot R \cdot t \quad (18)$$

$$W = V \cdot I \cdot t \quad \xrightarrow{I=V/R} W = \frac{V^2}{R} t \quad (19)$$



Συσκευή.  
Εικόνα 2.7-38.

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι το 1J (Joule).

### Ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος

Τις περισσότερες φορές για τη λειτουργία των συσκευών δε μας ενδιαφέρει μόνο η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρεται, αλλά και σε πόσο χρόνο γίνεται αυτό, δηλαδή ο ρυθμός προσφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Θεωρούμε την περίπτωση μιας συσκευής (εικ. 39), στην οποία προσφέρεται ίδια ποσότητα ενέργειας σε ίσους χρόνους. Στην περίπτωση αυτή ορίζουμε ως **ισχύ του ηλεκτρικού ρεύματος** ή **ηλεκτρική ισχύ** το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που προσφέρεται σε χρόνο  $t$ , προς το χρόνο  $t$ .

Δηλαδή:

$$P = \frac{W}{t} \quad (20)$$

Στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.) η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρικής ισχύος είναι το 1W (Watt).

$$\text{Είναι: } 1W = 1\frac{J}{s} \quad \text{ή} \quad \left( 1\text{Watt} = \frac{1\text{Joule}}{1\text{second}} \right)$$

**1W είναι η ηλεκτρική ισχύς, όταν η προσφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι 1J, σε χρόνο 1s.**

Με βάση τον ορισμό της ηλεκτρικής ισχύος ( $P = W/t$ ) και τους τύπους που δίνουν την ηλεκτρική ενέργεια, **για κάθε συσκευή ισχύει:**

$$P = V \cdot I \quad (21)$$

**Αν η συσκευή είναι αντιστάτης** (ωμική αντίσταση), τότε ισχύει ο νόμος του Ohm, οπότε έχουμε:

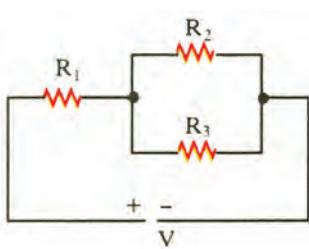
$$\xrightarrow{V=IR} P = I^2 \cdot R \quad (22)$$

$$\xrightarrow{I=V/R} P = \frac{V^2}{R} \quad (23)$$

### Παράδειγμα 8

Η ισχύς στην αντίσταση  $R_2$  είναι  $P_2 = 300W$ . Αν  $R_1 = 3\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$  και  $R_3 = 6\Omega$  να βρεθούν:

- α) Η ισχύς σε κάθε αντίσταση
- β) Η ισχύς στο σύστημα
- γ) Η τάση  $V$



Λύση

α) Είναι:  $P_2 = I_2^2 R_2 \Rightarrow I_2 = \sqrt{\frac{P_2}{R_2}} \Rightarrow I_2 = 10A$

Επίσης:  $V_{2,3} = V_2 = I_2 R_2 = 30V$

Άρα:  $I_3 = \frac{V_{2,3}}{R_3} = 5A$  και  $I_1 = I_2 + I_3 = 15A$

Οπότε:  $P_1 = I_1^2 R_1 = 675W,$

$P_3 = I_3^2 R_3 = 150W$

β) Η ισχύς στο σύστημα είναι:

$$\begin{aligned} P_{\text{ολ}} &= P_1 + P_2 + P_3 = 1.125W \\ \text{ή } (P_{\text{ολ}} &= I_2 R_{\text{ολ}} = (15A)^2 \cdot 5\Omega = 1.125W) \end{aligned}$$

γ) Η τάση V είναι:  $V = I_1 R_{\text{ολ}} = I_1 \left( R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \right) \Rightarrow$

$V = 75V$

**Κόστος λειτουργίας συσκευής**

Από τον ορισμό της ισχύος μιας συσκευής έχουμε:

$$P = \frac{W}{t} \Rightarrow W = P \cdot t$$

Αν στον προηγούμενο τύπο εκφράσουμε την ισχύ P σε W(Watt) και το χρόνο t σε s (sec), τότε βρίσκουμε την ενέργεια W σε J (Joule).

Αν στον προηγούμενο τύπο εκφράσουμε την ισχύ P σε W (Watt) το χρόνο t σε h (ώρες), τότε βρίσκουμε την ενέργεια W σε Wh (βατώρες).

**1Wh είναι η ενέργεια που «καταναλώνει» μια συσκευή ισχύος 1W, όταν λειτουργήσει για χρόνο 1h.**

Είναι:  $1Wh = 1W \cdot 1h = 1W \cdot 3600s = 3600J.$

Αν στον προηγούμενο τύπο εκφράσουμε την ισχύ P σε KW (Κιλοβατ) και το χρόνο t σε h (ώρες), τότε βρίσκουμε την ενέργεια W σε KWh (κιλοβατώρες).

**1KWh είναι η ενέργεια που «καταναλώνει» μια συσκευή ισχύος 1KW, όταν λειτουργήσει για χρόνο 1h.**

Είναι:  $1KWh = 1KW \cdot 1h = 1000W \cdot 3600s = 3.600.000J.$

Η Δ.Ε.Η. μετρά την ενέργεια που μας δίνει σε KWh, με κόστος περίπου 0,1 €/KWh.

Άρα, μια ηλεκτρική κουζίνα ισχύος P = 3000W, που λειτουργεί για χρόνο t = 2h, «καταναλώνει» ενέργεια:

$$W = P \cdot t = 3KW \cdot 2h = 6KWh$$

με κόστος:  $\Lambda = 6KWh \cdot 0,1 \frac{\epsilon}{KWh} = 0,6 \epsilon.$

### Νόμος του Joule

Όπως έχουμε πει, σ' ένα μεταλλικό αγωγό η μείωση της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων, λόγω των συγκρούσεων με τα θετικά ιόντα, έχει ως συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας του μεταλλικού αγωγού. Συνέπεια αυτού είναι να μεταφέρεται θερμότητα από τον αγωγό στο περιβάλλον. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **φαινόμενο Joule**.

Αν υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία του μεταλλικού αγωγού παραμένει σταθερή, τότε η προσφερόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο μεταλλικό αγωγό είναι ίση με τη θερμότητα που μεταφέρεται από τον αγωγό στο περιβάλλον.

$$\text{Δηλαδή: } W = Q$$

$$\text{Όμως: } W = I^2 R t$$

$$\text{Άρα: } Q = I^2 \cdot R \cdot t \quad (21)$$

Ο Joule απέδειξε πειραματικά την τελευταία σχέση, που εκφράζει το **νόμο του Joule**, ο οποίος διατυπώνεται ως εξής:

**Το ποσό θερμότητας  $Q$  που εκλύεται σ' ένα μεταλλικό αγωγό σταθερής θερμοκρασίας είναι ανάλογο του τετραγώνου της έντασης  $I$  του ρεύματος που τον διαρρέει, ανάλογο της αντίστασής του  $R$  και ανάλογο του χρόνου  $t$  διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος.**

Αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση  $Q = I^2 \cdot R \cdot t$  και εκφράσουμε τα μεγέθη  $I$  σε A,  $R$  σε  $\Omega$  και  $t$  σε s, τότε βρίσκουμε τη θερμότητα  $Q$  σε J.

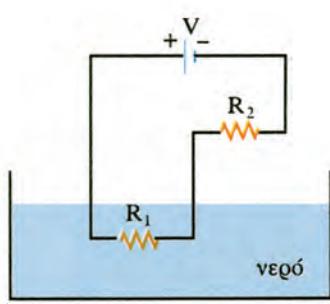
Αν χρησιμοποιήσουμε τη σχέση  $Q = \alpha \cdot I^2 \cdot R t$  και εκφράσουμε τα μεγέθη  $I$  σε A,  $R$  σε  $\Omega$  και  $t$  σε s, τότε βρίσκουμε τη θερμότητα  $Q$  σε cal. Ο συντελεστής  $\alpha$  ονομάζεται **ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας** και ισούται με  $\alpha = 0,24 \frac{\text{cal}}{\text{J}}$ .

### Παράδειγμα 9

Η αντίσταση  $R_1$  του σχήματος είναι βυθισμένη σε νερό μάζας  $m = 0,5\text{Kg}$ . Η θερμοκρασία του νερού αυξάνεται σε χρόνο  $t = 52\text{s}$  από  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$  σε  $\theta_2 = 70^\circ\text{C}$ . Να βρεθεί η τιμή της  $R_2$ , αν  $V = 2000\text{V}$  και  $R_1 = 100\Omega$ .

Δίνεται η ειδική θερμότητα του νερού:

$$c = \frac{1\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{grad}} = \frac{4200\text{J}}{\text{Kg} \cdot \text{grad}}$$



### Λύση

Το ποσό της θερμότητας που εκλύεται από την  $R_1$  και θερμαίνει το νερό είναι:

$$Q_1 = I^2 \cdot R_1 \cdot t$$

Από το θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας έχουμε:

$$Q_1 = m \cdot c \cdot \Delta\theta$$

Άρα:

$$I^2 \cdot R_1 \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta\theta \Rightarrow I = \sqrt{\frac{m \cdot c \cdot \Delta\theta}{R_1 \cdot t}} \Rightarrow I = 5A$$

Η αντίσταση  $R_2$  υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm:

$$V = I(R_1 + R_2) \Rightarrow R_2 = \frac{V - IR_1}{I} \Rightarrow R_2 = 300\Omega$$

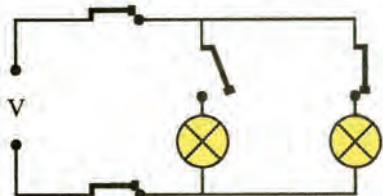
### **Εφαρμογές φαινομένου Joule**

#### **α) Ηλεκτρικός λαμπτήρας πυράκτωσης**

Ο ηλεκτρικός λαμπτήρας πυρακτώσεως (εικ. 40) αποτελείται από ένα γυάλινο δοχείο, μέσα στο οποίο υπάρχει ένα λεπτό σύρμα από πολύ δύστηκτο μέταλλο (βολφράμιο, ταντάλιο, όσμιο), το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης πάνω από 2700°C. Μέσα στο δοχείο δεν υπάρχει οξυγόνο για να μη γίνει οξείδωση του μετάλλου, υπάρχει όμως ένα αδρανές αέριο (αργό, κρυπτό, άζωτο), που εμποδίζει την εξάχνωσή του. Όταν το σύρμα φωτοβολεί, η θερμοκρασία του είναι πάνω από 2000°C. Όλοι οι λαμπτήρες μιας οικιακής εγκατάστασης συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα (εικ. 41) για να λειτουργούν με την ίδια τάση (π.χ. του δικτύου, 220V) και ανεξάρτητα από τους άλλους.



Ηλεκτρικός λαμπτήρας πυράκτωσης.  
Εικόνα 2.7-40.



Σύνδεση λαμπτήρων σε οικιακή εγκατάσταση.  
Εικόνα 2.7-41.

### **Ενδείξεις κανονικής λειτουργίας συσκευής**

Σε ηλεκτρικό λαμπτήρα πυρακτώσεως σημειώνονται οι ενδείξεις: 220V, 100W.

Ποια είναι η σημασία των ενδείξεων αυτών;

Τι πληροφορίες μπορούμε να πάρουμε από αυτές;

Η ένδειξη 220V σημαίνει ότι, για να λειτουργεί κανονικά ο λαμπτήρας, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του εργοστασίου κατασκευής, πρέπει στα άκρα του να εφαρμόζεται τάση  $V_k = 220V$ , που λέγεται **κανονική τάση λειτουργίας**.

Η ένδειξη 100W σημαίνει ότι, όταν ο λαμπτήρας λειτουργεί κανονικά, «καταναλώνει» ισχύ  $P_k = 100W$ , που λέγεται **κανονική ισχύς λειτουργίας**.

Από τις ενδείξεις αυτές μπορούμε να βρούμε:

- 1) την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το λαμπτήρα, όταν λειτουργεί κανονικά, ως εξής:

$$P_K = V_K \cdot I_K \Rightarrow I_K = \frac{P_K}{V_K} \Rightarrow I_K \simeq 0,45\text{A}$$

- 2) την αντίσταση του λαμπτήρα, ως εξής:

$$P_K = \frac{V_K^2}{R} \Rightarrow R = \frac{V_K^2}{P} \Rightarrow R = 484\Omega$$

**Σημείωση:** Αν στα άκρα του λαμπτήρα εφαρμοστεί τάση μικρότερη από την  $V_K$ , ο λαμπτήρας υπολειτουργεί χωρίς να κινδυνεύει να καταστραφεί, ενώ, αν εφαρμοστεί τάση μεγαλύτερη από τη  $V_K$ , ο λαμπτήρας υπερλειτουργεί με κίνδυνο καταστροφής του.

### β) Ηλεκτρικές συσκευές παραγωγής θερμότητας

Πολύ συνηθισμένες ηλεκτρικές συσκευές παραγωγής θερμότητας είναι οι ηλεκτρικές θερμάστρες, τα ηλεκτρικά σίδερα, οι ηλεκτρικές κουζίνες, οι ηλεκτρικοί βραστήρες, οι ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες κ.τ.λ. Στις συσκευές αυτές εκλύεται θερμότητα σε συρμάτινο αγωγό από χρωμονικελίνη (δύστηκτο κράμα Fe, Ni, Cr, Mn). Σε μερικές συσκευές η θερμότητα ακτινοβολείται απευθείας από το σύρμα (π.χ. στη θερμάστρα), ενώ σε άλλες συσκευές η θερμότητα συγκεντρώνεται πάνω σε μια μεταλλική πλάκα (π.χ. στην κουζίνα).

### γ) Ασφάλειες

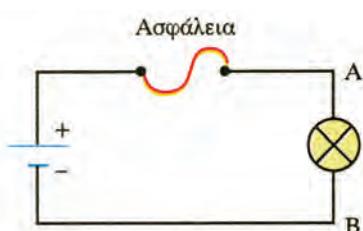
Για την προφύλαξη των κυκλωμάτων από υπέρμετρη αύξηση της έντασης του ρεύματος, που μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο κύκλωμα ή ακόμα και πυρκαγιά χρησιμοποιούνται οι ασφάλειες, που παρεμβάλλονται στο κύκλωμα σε σειρά (εικ. 42).

Κάθε ασφάλεια χαρακτηρίζεται από μια τιμή έντασης ρεύματος, πάνω από την οποία προκαλείται διακοπή της λειτουργίας του κυκλώματος.

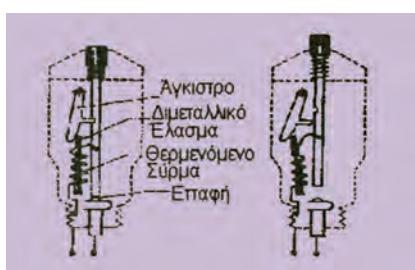
Ένας τύπος είναι η τηκόμενη ασφάλεια, που αποτελείται από ένα εύτηκτο μέταλλο. Μόλις η ένταση του ρεύματος γίνει μεγαλύτερη από μια καθορισμένη τιμή, αμέσως συμβαίνει τήξη του μετάλλου και διακοπή του ρεύματος.

Επίσης, χρησιμοποιείται και η αυτόματη ασφάλεια (εικ. 43), που ουσιαστικά είναι αυτόματος διακόπτης και αποτελείται κυρίως από ένα διμεταλλικό έλασμα. Μόλις η ένταση του ρεύματος γίνει μεγαλύτερη από μια καθορισμένη τιμή, αμέσως το διμεταλλικό έλασμα λυγίζει και προκαλεί διακοπή του ρεύματος.

Για την εκλογή της κατάλληλης ασφάλειας σ' ένα κύκλωμα λαμβάνουμε υπόψη την ένταση του ρεύματος  $I_K$  της κανονικής



Κύκλωμα με ασφάλεια.  
Εικόνα 2.7-42.



Αυτόματη ασφάλεια.  
Εικόνα 2.7-43.

λειτουργίας των συσκευών που τροφοδοτούμε (π.χ. 14Α), την οποία βρίσκουμε από τις ενδείξεις των συσκευών. Επειδή στο εμπόριο κυκλοφορούν ορισμένοι τύποι ασφαλειών (π.χ. 6Α, 10Α, 15Α, 20Α, 25Α) επιλέγουμε την ασφάλεια, που αναγράφει την αμέσως μεγαλύτερη ένδειξη από αυτή που είχαμε υπολογίσει. Στο παράδειγμά μας επιλέγουμε την ασφάλεια των 15Α.

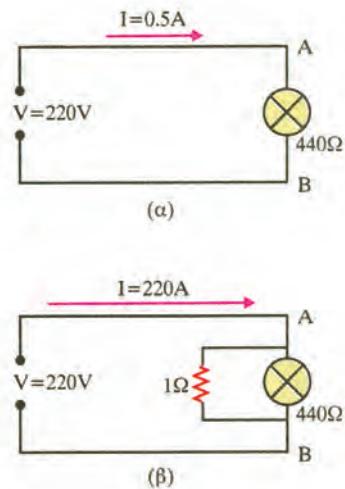
### δ) Βραχυκύκλωμα

**Βραχυκύκλωμα ονομάζεται η σύνδεση δύο σημείων ενός κυκλώματος με αγωγό αμελητέας αντίστασης.**

Βραχυκύκλωμα μπορεί να προκληθεί μεταξύ των σημείων A και B, αν τα συνδέσουμε με έναν αγωγό αμελητέας αντίστασης ή αν σ' αυτά φθαρεί η μόνωση και τυχαία έρθουν σε επαφή. Στο κύκλωμα της εικ. 44α είναι  $R_{\text{ολ}} = 440\Omega$ , άρα αυτό διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I = 0,5\text{A}$ . Στο κύκλωμα της εικ. 44β είναι

$$R_{\text{ολ}} = \frac{440 \cdot 1}{440 + 1} \Omega \approx 1\Omega,$$

άρα αυτό διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I = 220\text{A}$  και έτσι κινδυνεύει το τμήμα του κυκλώματος, που βρίσκεται μεταξύ της πηγής και του σημείου βραχυκυκλώσεως.

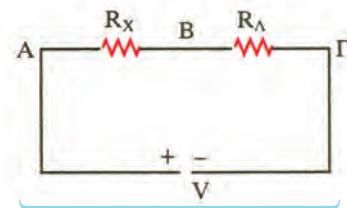


Βραχυκύκλωμα.  
Εικόνα 2.7-44.

### Παράδειγμα 10

Ηλεκτρικός λαμπτήρας έχει χαρακτηριστικά κανονικής λειτουργίας  $P_K = 100\text{W}$  και  $V_K = 100\text{V}$ .

- α) Ποια είναι η αντίσταση του λαμπτήρα;
- β) Θέλουμε να συνδέσουμε τον λαμπτήρα με τάση  $V = 200\text{V}$ . Τι αντίσταση πρέπει να συνδέσουμε σε σειρά με τον λαμπτήρα, ώστε να λειτουργεί κανονικά;



### Λύση

α) Έχουμε:

$$P_K = \frac{V_K^2}{R_A} \Rightarrow R_A = \frac{V_K^2}{P_K} \Rightarrow R_A = 100\Omega \quad (1)$$

β) Επειδή  $V > V_K$  η απευθείας σύνδεση του λαμπτήρα με την τάση V θα τον καταστρέψει. Γι' αυτό συνδέουμε μια αντίσταση  $R_X$  σε σειρά με το λαμπτήρα. Εφόσον ο λαμπτήρας λειτουργεί κανονικά, η τάση στα άκρα του  $V_{BG}$  είναι ίση με  $V_K$ . Επομένως, η ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει είναι:

$$P_K = V_K \cdot I_K \Rightarrow I_K = \frac{P_K}{V_K} \stackrel{(1)}{\Rightarrow} I_K = 1\text{A}$$

Άρα, η ένταση I του ρεύματος στο κύκλωμα είναι:

$$I = I_K = 1\text{A}$$

Από το νόμο του Ohm έχουμε:

$$V = IR_{\text{ολ}} \Rightarrow V = I(R + R_x) \Rightarrow \frac{V}{I} = R + R_x \Rightarrow \\ R_x = \frac{V}{I} - R \Rightarrow R_x = 100\Omega$$

### Παράδειγμα 11

Σε μια οικιακή εγκατάσταση η ασφάλεια είναι 30A. Στο σπίτι λειτουργούν μια ηλεκτρική κουζίνα ισχύος 2KW, ένα ψυγείο ισχύος 1KW, μία ηλεκτρική σόμπα ισχύος 2KW και 50 λαμπτήρες των 100W ο καθένας.

α) Αν λειτουργήσουν ταυτόχρονα όλες οι συσκευές, να εξετάσετε αν θα λιώσει η ασφάλεια. β) Αν ναι, πόσοι το πολύ λαμπτήρες μπορεί να είναι αναμμένοι, ώστε να λειτουργούν ταυτόχρονα όλες οι υπόλοιπες συσκευές;

Δίνεται ότι η τάση του δικτύου είναι  $V = 220V$ .

### Λύση

α) Η ολική ισχύς του κυκλώματος είναι:

$$P_{\text{ολ}} = 2\text{KW} + 1\text{KW} + 2\text{KW} + 50 \cdot 0,1\text{KW} = 10\text{KW}$$

Άρα:

$$P_{\text{ολ}} = V \cdot I \Rightarrow I = \frac{P_{\text{ολ}}}{V} \Rightarrow I = 10.000\text{W} / 220\text{V} = 45,45\text{A}$$

Αφού  $I > 30\text{A}$ , η ασφάλεια λιώνει.

β) Πρέπει να είναι:  $P'_{\text{ολ}} = V \cdot I \Rightarrow P'_{\text{ολ}} = 220\text{V} \cdot 30\text{A}$   
 $\Rightarrow P'_{\text{ολ}} = 6600\text{W}$ .

Έστω  $x$  ο αριθμός των ζητούμενων λαμπτήρων.

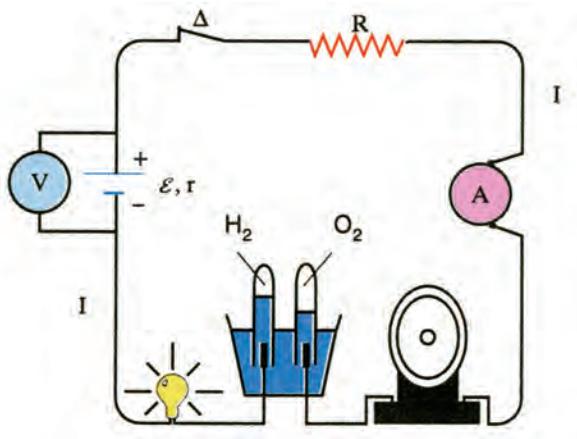
$$\begin{aligned} \text{Έχουμε: } P_{\text{ολ}} &= 2000\text{W} + 1000\text{W} + 2000\text{W} + x \cdot 100\text{W} \Rightarrow \\ P_{\text{ολ}} &= 5000 + x \cdot 100\text{W}. \end{aligned}$$

Άρα:  $5000 + x \cdot 100 = 6600 \Rightarrow x = 16$  λαμπτήρες.

## (2.8) Ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) πηγής

Το κύκλωμα της εικόνας 45 αποτελείται από μία πηγή, ένα διακόπτη, έναν αντιστάτη, ένα λαμπτήρα, ένα βολτόμετρο και ένα ανεμιστήρα. Όταν ο διακόπτης είναι **ανοιχτός** το κύκλωμα δε διαρρέεται από ρεύμα, ενώ όταν ο διακόπτης είναι **κλειστός** το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα και η πηγή προσφέρει ενέργεια στο κύκλωμα

Όταν θετικό φορτίο ο φτάνει στον αρνητικό πόλο, όπου έχει την ελάχιστη ηλεκτρική δυναμική ενέργεια, «αναγκάζεται» από την πηγή να μετακινηθεί μέσω αυτής προς το θετικό πόλο της, όπου έχει τη μέγιστη ηλεκτρική δυναμική ενέργεια.



Ηλεκτρικό κύκλωμα.

Εικόνα 2.8-45.

Το φορτίο παίρνει την ενέργεια  $W$  από την πηγή, την αποδίδει στο κύκλωμα και επιστρέφει στον αρνητικό πόλο για να επαναληφθεί η διαδικασία.

Όπως γνωρίζουμε η ενέργεια  $W$  είναι ανάλογη του φορτίου  $q$ . Το πηλίκο της ενέργειας  $W$  προς το φορτίο  $q$  είναι ένα μέγεθος, που χαρακτηρίζει την πηγή και ονομάζεται **ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής (ΗΕΔ)**.

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} \quad (22)$$

Η μονάδα της ΗΕΔ στο S.I. είναι το:

$$1 \frac{J}{C} = 1V \quad \text{ή} \quad \left( 1 \frac{\text{Joule}}{\text{Coulomb}} = 1 \text{Volt} \right)$$

**Ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  μιας πηγής εκφράζει την ενέργεια ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου που προσφέρει η πηγή στο κύκλωμα.**

Ο όρος ηλεκτρεγερτική δύναμη δεν είναι ικανοποιητικός, γιατί **η ΗΕΔ δεν είναι δύναμη**, αλλά, όπως φαίνεται από την προηγούμενη σχέση, έχει μονάδα μέτρησης ίδια με τη διαφορά δυναμικού.

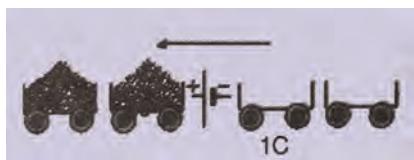
Αν διαιρέσουμε αριθμητή και παρονομαστή της σχέσης (22) με το χρόνο  $t$ , έχουμε:

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q} \Rightarrow \mathcal{E} = \frac{W/t}{q/t} \Rightarrow \mathcal{E} = \frac{P}{I}$$

Έτσι, η **ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  μιας πηγής** δίνεται και από το πηλίκο της ισχύος  $P$ , που παρέχει η πηγή στο κύκλωμα,

προς την ένταση του ρεύματος  $I$  που διαρρέει το κύκλωμα.  
Δηλαδή:

$$\mathcal{E} = \frac{P}{I} \quad (23)$$



Η ηλεκτρεγερτική δύναμη εκφράζει την ενέργεια ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου που προσφέρει πηγή στο κύκλωμα.

Εικόνα 2.8-46.



Μπαταρία.

Εικόνα 2.8-47.

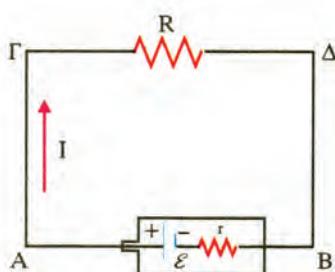
Η ηλεκτρική πηγή είναι ουσιαστικά ένας **ενεργειακός μετατροπέας**, δηλαδή μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια, μιας άλλης μορφής ενέργεια, που μπορεί να είναι χημική, μηχανική, θερμική, ακτινοβολίας. Στην εικ. 46 κάθε βαγονάκι παριστάνει φορτίο 1C. Η ηλεκτρική πηγή δεν παράγει ηλεκτρικό φορτίο, αλλά αποδίδει σε κάθε 1C ορισμένη ποσότητα ενέργειας, που καθορίζεται από την ΗΕΔ της. Αν π.χ. η πηγή έχει ΗΕΔ 3V, τότε σε κάθε 1C αποδίδει ενέργεια 3J.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας πηγής αναγράφεται στο περίβλημά της (εικ. 47).

### Εσωτερική αντίσταση πηγής

Όταν μια ηλεκτρική πηγή διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, διαπιστώνουμε ότι θερμαίνεται. Η θερμότητα που αναπτύσσεται μέσα στην πηγή, οφείλεται στην **αντίσταση**, που αυτή παρεμβάλλει. Η αντίσταση αυτή αποτελεί χαρακτηριστικό μέγεθος της πηγής και ονομάζεται **εσωτερική αντίσταση** της πηγής και συμβολίζεται με  $r$ . Η εσωτερική αντίσταση της πηγής εκφράζει τη δυσκολία, που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν διέρχεται μέσα από την πηγή.

## (2.9) Νόμος του Ohm για κλειστό κύκλωμα



Κλειστό κύκλωμα με πηγή και αντιστάτη.

Εικόνα 2.9-48.

Σε ένα κλειστό κύκλωμα (εικ. 48) υπάρχει γεννήτρια, που έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  και εσωτερική αντίσταση  $r$ . Το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται από μια αντίσταση  $R$ . Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται για τη συνδεσμολογία έχουν ασήμαντη αντίσταση. Το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I$ .

Σε χρονικό διάστημα  $t$ , η πηγή δίνει ενέργεια:

$$W = P \cdot t \Rightarrow W = \mathcal{E} \cdot I \cdot t$$

η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα

στην αντίσταση  $R$ :  $Q_R = I^2 \cdot R \cdot t$  και

στην αντίσταση  $r$ :  $Q_r = I^2 \cdot r \cdot t$

Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχουμε:

$$W = Q_R + Q_r \Rightarrow \mathcal{E} \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t + I^2 \cdot r \cdot t \Rightarrow$$

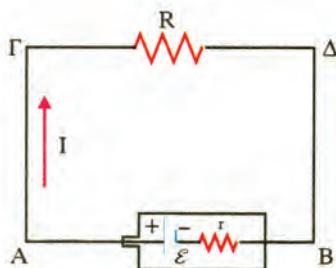
$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r \Rightarrow \mathcal{E} = I(R + r) \Rightarrow \mathcal{E} = I \cdot R_{\text{ολ}}$$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{ολ}}}$$

Η τελευταία σχέση αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του νόμου του Ohm για κλειστό κύκλωμα, και διατυπώνεται ως εξής:

**Σε κλειστό κύκλωμα, που αποτελείται από ηλεκτρική πηγή και ωμικές αντιστάσεις, η ένταση του ρεύματος  $I$  που διαρρέει το κύκλωμα είναι ίση με το πηλίκο της ΗΕΔ της πηγής  $\mathcal{E}$  προς την ολική αντίσταση  $R_{\text{ολ}}$  του κυκλώματος.**

### Τάση στους πόλους πηγής (πολική τάση)



Κλειστό κύκλωμα με πηγή και αντιστάτη.

Εικόνα 2.9-49.

Θεωρούμε το κύκλωμα της εικ. 49. Επειδή οι αγωγοί της συνδεσμολογίας ΑΓ και ΒΔ έχουν ασήμαντη αντίσταση, τα άκρα Γ και Δ της αντίστασης  $R$  έχουν το ίδιο δυναμικό με τους πόλους Α και Β της πηγής αντίστοιχα, δηλαδή

$$V_A = V_\Gamma \text{ και } V_B = V_\Delta.$$

Άρα:  $V_A - V_B = V_\Gamma - V_\Delta$ .

Η τάση στα άκρα της πηγής  $V_A - V_B$  λέγεται **πολική τάση της πηγής** και συμβολίζεται με  $V_\pi$ .

$$\text{Επομένως: } V_\pi = V_R$$

δηλαδή η τάση στους πόλους της πηγής είναι ίση με την τάση στα άκρα της αντίστασης  $R$ .

Είναι όμως:  $V_R = I \cdot R$  (από το νόμο του Ohm για τμήμα αγωγού).

$$\text{Άρα: } V_\pi = I \cdot R$$

Από την αρχή διατήρησης της ενέργειας έχουμε:

$$W = Q_R + Q_r \Rightarrow \mathcal{E} \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t + I^2 \cdot r \cdot t \Rightarrow$$

$$\mathcal{E} = I \cdot R + I \cdot r \Rightarrow \mathcal{E} = V_\pi + I \cdot r \Rightarrow$$

$$V_\pi = \mathcal{E} - I \cdot r \quad (25)$$

Παρατηρούμε ότι σ' αυτό το κλειστό κύκλωμα η τάση  $V_\pi$  στους πόλους της πηγής είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  της πηγής ελαττωμένη κατά τον παράγοντα  $Ir$ , που λέγεται **πτώση τάσης μέσα στην πηγή**.

Αν το κύκλωμα είναι ανοιχτό, τότε η πηγή δε διαρρέεται από ρεύμα, δηλαδή είναι  $I = 0$ .

$$\text{Άρα: } V_\pi = \mathcal{E} - I \cdot r \stackrel{I=0}{\Rightarrow} V_\pi = \mathcal{E}.$$

Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι:

**Η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  της πηγής είναι ίση με την τάση  $V_\pi$  στους πόλους της πηγής, όταν η πηγή δε διαρρέεται από ρεύμα ( $I = 0$ ).**

Αν η πηγή είναι ιδανική, τότε έχει αμελητέα εσωτερική αντίσταση, δηλαδή είναι  $r = 0$ .

$$\text{Άρα: } V_\pi = \mathcal{E} - I \cdot r \stackrel{r=0}{\Rightarrow} V_\pi = \mathcal{E}.$$

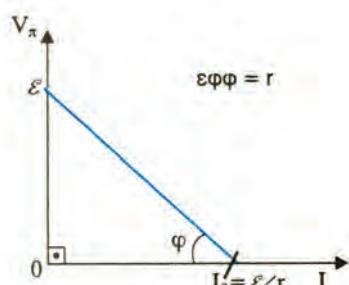
Έτσι μπορούμε να πούμε ότι:

**Η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  της πηγής είναι ίση με την τάση  $V_\pi$  στους πόλους της πηγής, όταν η πηγή είναι ιδανική ( $r = 0$ ).**

Αν συνδέσουμε τους πόλους της πηγής με αγωγό αμελητέας αντίστασης, δηλαδή  $R = 0$ , τότε λέμε ότι **η πηγή είναι βραχυκυκλωμένη**.

Από το νόμο του Ohm για κλειστό κύκλωμα έχουμε:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{oλ}}} \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{R} + r \stackrel{R=0}{\Rightarrow} I_\beta = \frac{\mathcal{E}}{r}$$



Χαρακτηριστική καμπύλη πηγής.  
Εικόνα 2.9-50.

Το ρεύμα αυτό είναι το μέγιστο που μπορεί να διαρρέει την πηγή και λέγεται **ρεύμα βραχυκύκλωσης**.

Από τη σχέση  $V_\pi = E - Ir$  κατασκευάζουμε τη χαρακτηριστική καμπύλη της πηγής, που φαίνεται στην εικ. 50.

### Παράδειγμα 12

Δύο αντιστάσεις  $R_1 = 5\Omega$  και  $R_2 = 3\Omega$  συνδέονται σε σειρά και τα άκρα του συστήματος συνδέονται με γεννήτρια ΗΕΔ  $E = 10V$  και εσωτερικής αντίστασης  $r = 2\Omega$ .

Να βρεθούν:

- α) η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα
- β) η τάση στους πόλους της γεννήτριας και η τάση στα άκρα της  $R_1$  και της  $R_2$
- γ) η ισχύς της πηγής και η ισχύς που αποδίδει η πηγή στο εξωτερικό κύκλωμα.

Λύση

α) Η ένταση  $I$  του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα είναι:

$$I = \frac{E}{R_{\text{ολ}}} \Rightarrow I = \frac{E}{r + R_1 + R_2} \Rightarrow I = 1A$$

β) Η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι:

$$V_\pi = E - I \cdot r \Rightarrow V_\pi = 10V - 1A \cdot 2\Omega \Rightarrow V_\pi = 8V$$

Η τάση στα άκρα της  $R_1$  είναι:

$$V_1 = IR_1 \Rightarrow V_1 = 1A \cdot 5\Omega \Rightarrow V_1 = 5V$$

Η τάση στα άκρα της  $R_2$  είναι:

$$V_2 = IR_2 \Rightarrow V_2 = 1A \cdot 3\Omega \Rightarrow V_2 = 3V$$

γ) Η ισχύς της πηγής είναι:

$$P_{\pi\eta\gamma} = EI \Rightarrow P_{\pi\eta\gamma} = 10W$$

Η ισχύς που αποδίδει η πηγή στο εξωτερικό κύκλωμα είναι:

$$P_{e\xi} = I^2(R_1 + R_2) \Rightarrow P_{e\xi} = 8W$$

$$(ή P_{e\xi} = P_{\pi\eta\gamma} - P_r = EI - I^2r \Rightarrow P_{e\xi} = 8W)$$

## (2.10) Αποδέκτες

**Αποδέκτες** είναι οι συσκευές στις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται κατά το μεγαλύτερο μέρος της σε ενέργεια άλλης μορφής διαφορετικής από θερμότητα.

Για παράδειγμα, ο ανεμιστήρας ως αποδέκτης μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική (το μεγαλύτερο μέρος) και σε θερμότητα (το μικρότερο μέρος).

**Συντελεστής απόδοσης αποδέκτη** ονομάζεται το πηλίκο της ωφέλιμης ισχύος (που δίνει ο αποδέκτης), προς τη δαπανόμενη ισχύ (που δίνουμε στον αποδέκτη). Δηλαδή:

$$\alpha = \frac{P_{\omega\phi}}{P_{\delta\alpha\pi}} \quad (26)$$

Απόδοση αποδέκτη ονομάζεται το:

$$\alpha\% = \alpha \cdot 100\% = \frac{P_{\omega\phi}}{P_{\delta\alpha\pi}} \cdot 100\% \quad (27)$$

### Παράδειγμα 13

Η δαπανόμενη ηλεκτρική ισχύς σ' έναν ανεμιστήρα είναι  $P_{\delta\alpha\pi} = 200W$  και η ωφέλιμη μηχανική ισχύς είναι  $P_{\omega\phi} = 160W$ . Να βρεθεί ο συντελεστής απόδοσης και η απόδοση του ανεμιστήρα.

#### Λύση

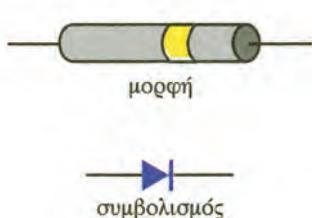
Ο συντελεστής απόδοσης είναι:

$$\alpha = \frac{P_{\omega\phi}}{P_{\delta\alpha\pi}} \Rightarrow \alpha = \frac{160}{200} \Rightarrow \alpha = 0,8$$

και η απόδοση είναι:

$$\alpha(\%) = 0,8 \cdot 100\% = 80\%$$

## (2.11) Δίοδος

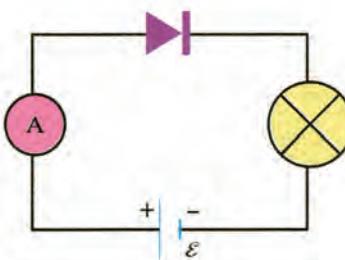


Μορφή και συμβολισμός διόδου.  
Εικόνα 2.11-51.

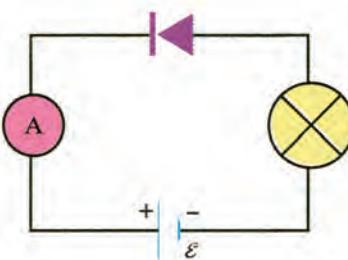
Ένα βασικό εξάρτημα που χρησιμοποιείται στην τηλεόραση, στο ραδιόφωνο, στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και σε άλλα ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι η **δίοδος**. Στην εικ. 51 φαίνεται η μορφή της και ο συμβολισμός της. Αποτελείται από δύο διαφορετικούς ημιαγωγούς που βρίσκονται σε επαφή. Το χαρακτηριστικό της είναι ότι:

**α)** Η δίοδος είναι καλός αγωγός (άγει εύκολα), όταν η τάση στα άκρα της έχει συγκεκριμένη πολικότητα. Η τάση αυτή λέγεται **τάση ορθής φοράς** και λέμε ότι η δίοδος είναι **ορθά πολω-**

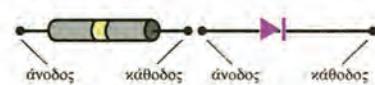
**μένη.** Στην εικόνα 53 η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη και δεν άγει. Ο λαμπτήρας δε φωτοβολεί.



Δίοδος ορθά πολωμένη.  
Εικόνα 2.11-52.



Δίοδος ανάστροφα πολωμένη.  
Εικόνα 2.11-53.

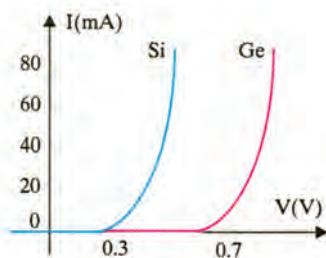


Ανοδος και κάθοδος διόδου.  
Εικόνα 2.11-54.

Όταν η δίοδος είναι ορθά πολωμένη, το άκρο της διόδου που συνδέεται με το θετικό πόλο μιας πηγής λέγεται **άνοδος** και το άλλο άκρο λέγεται **κάθοδος** (εικ. 54). Στις διόδους με κυλινδρικό περίβλημα, μια ταινία διαφορετικού χρώματος από το χρώμα του περιβλήματος χρησιμοποιείται για να δείξει την κάθοδο.

Οι δίοδοι μπορούν να καταστραφούν εύκολα όταν διαρρέονται από μεγάλες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος. Γ' αυτό τοποθετούνται στα κυκλώματα συνδεμένες με κατάλληλη αντίσταση σε σειρά.

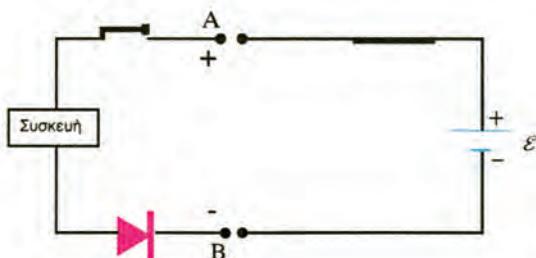
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες μιας διόδου πυριτίου (Si) και μιας διόδου γερμανίου (Ge) φαίνονται στην εικ. 55. Από αυτές φαίνεται ότι, όταν η δίοδος είναι ανάστροφα πολωμένη δε διαρρέεται από ρεύμα. Η δίοδος Si άγει, όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από 0,3V και η δίοδος Ge άγει, όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μεγαλύτερη από 0,7V. Επίσης, φαίνεται ότι, όταν οι δίοδοι Si και Ge άγουν, η πτώση τάσης στα άκρα τους παραμένει σταθερή και περίπου ίση με 0,3V και 0,7V αντίστοιχα.



Χαρακτηριστικές καμπύλες διόδων Si και Ge.  
Εικόνα 2.11-55.

## Εφαρμογές της διόδου

### α) Προστασία συσκευής από λανθασμένη σύνδεση

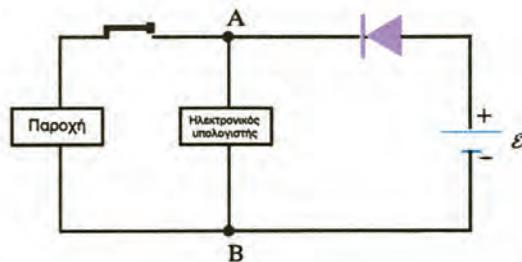


Η δίοδος προστατεύει τη συσκευή από λανθασμένη σύνδεση.  
Εικόνα 2.11-56.

Η δίοδος χρησιμοποιείται για να προστατεύσει μια συσκευή από λανθασμένη σύνδεση της πηγής. Στο κύκλωμα της εικόνας 56 ο θετικός πόλος της πηγής πρέπει να συνδεθεί στο A και ο αρνητικός στο B. Αν κατά λάθος η πηγή συνδεθεί ανάποδα, τότε το κύκλωμα δε διαρρέεται από ρεύμα και δεν καταστρέφεται η συσκευή.

### β) Προστασία συσκευής από «διακοπή ρεύματος»

Το κύκλωμα της εικόνας 57 χρησιμοποιείται για την προστασία ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή από τη διακοπή του ηλεκτρικού ρεύματος.



Η δίοδος προστατεύει τη συσκευή από «διακοπή ρεύματος».

Εικόνα 2.11-57.

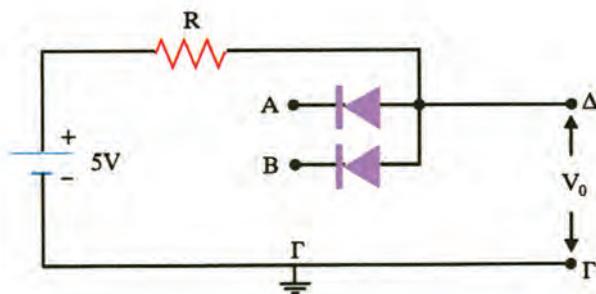
Όταν υπάρχει παροχή, λειτουργεί το αριστερό κύκλωμα κάνοντας εξοικονόμηση της μπαταρίας. Αν συμβεί διακοπή της παροχής, τότε λειτουργεί το δεξί κύκλωμα και η μπαταρία τροφοδοτεί τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

### γ) Η πύλη AND

Η πύλη AND (εικ. 58) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα με δύο εισόδους (ΑΓ και ΒΓ) και μια έξοδο (ΔΓ). Χρησιμοποιείται, όταν θέλουμε να υπάρχει τάση (π.χ.  $V_o = 5V$ ) στην έξοδο ΔΓ, εφόσον υπάρχει τάση (π.χ. μεγαλύτερη από  $V_o = 5V$ ) και στην είσοδο ΑΓ και στην είσοδο ΒΓ.

Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να κάνουμε τον έλεγχο άλλων κυκλωμάτων.

### Λειτουργία της πύλης AND



Πύλη AND.

Εικόνα 2.11-58.

i) Στο κύκλωμα της εικόνας 58 η πηγή τροφοδοσίας είναι 5 V. Αν οι τάσεις  $V_{A\Gamma}$  και  $V_{B\Gamma}$  είναι μεγαλύτερες ή ίσες από 5V, τότε οι δίοδοι δεν άγουν. Άρα, και τα δύο άκρα του αντιστάτη R έχουν το ίδιο δυναμικό, οπότε η τάση εξόδου είναι  $V_{\Delta\Gamma} = V_o = 5V$ .

ii) Αν η τάση  $V_{A\Gamma}$  είναι μεγαλύτερη ή ίση από 5V και η τάση  $V_{B\Gamma} = 0$  (το B είναι αγώγιμα συνδεμένο με το Γ), τότε η δίοδος A δεν άγει, ενώ η δίοδος B άγει. Αν οι δίοδοι είναι από πυρίτιο (Si), η τάση στα άκρα της διόδου B είναι 0,7V, δηλαδή περίπου 0V. Έτσι, η τάση εξόδου είναι  $V_{\Delta\Gamma} = V_o = 0V$ .

iii) Παρόμοια, αν η τάση  $V_{B\Gamma}$  είναι μεγαλύτερη ή ίση από 5V και η τάση  $V_{A\Gamma} = 0$  (το A είναι αγώγιμα συνδεμένο με το Γ), η τάση εξόδου  $V_{\Delta\Gamma}$  είναι  $V_{\Delta\Gamma} = V_o = 0V$ .

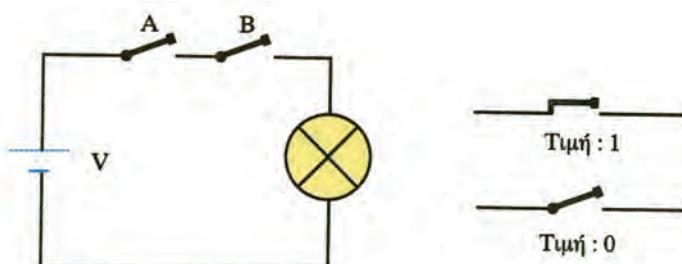
iv) Παρόμοια, αν οι τάσεις  $V_{A\Gamma} = 0$  και  $V_{B\Gamma} = 0$  (και το A και το B είναι αγώγιμα συνδεμένα με το Γ), η τάση εξόδου είναι  $V_{\Delta\Gamma} = V_o = 0V$ .

### Πίνακας αληθείας για την πράξη AND

Αν αντιστοιχίσουμε τάση 0V στο 0 και τάση μεγαλύτερη ή ίση από 5V στο 1, κατασκευάζουμε τον παρακάτω πίνακα, που λέγεται **πίνακας αληθείας για την πράξη AND**.

A	B	Γ
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Από αυτόν φαίνεται ότι η τάση εξόδου είναι μεγαλύτερη ή ίση από 5V ( $\Gamma = 1$ ), αν και η τάση  $V_{A\Gamma}$  και η τάση  $V_{B\Gamma}$  είναι μεγαλύτερες ή ίσες από 5V ( $A = 1$  και  $B = 1$ ).



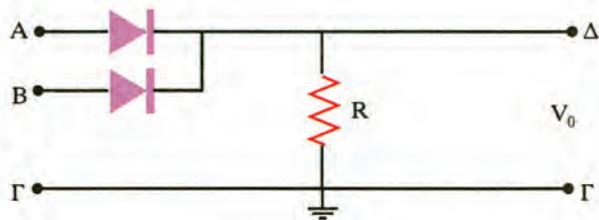
Ισοδύναμο κύκλωμα πράξης AND.

Εικόνα 2.11-59.

Τον ίδιο πίνακα έχουμε και για το κύκλωμα της εικόνας 59, όπου, για να ανάψει η λάμπα ( $\Gamma = 1$ ), πρέπει και ο διακόπτης A να είναι κλειστός ( $A = 1$ ) και ο διακόπτης B να είναι κλειστός ( $B = 1$ ).

### δ) Η πύλη OR

Η πύλη OR (εικ. 60) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα με δύο εισόδους (ΑΓ και ΒΓ) και μια έξοδο (ΔΓ). Χρησιμοποιείται, όταν θέλουμε να υπάρχει τάση στην έξοδο ΔΓ, εφόσον υπάρχει τάση ή στην είσοδο ΑΓ ή στην είσοδο ΒΓ. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να κάνουμε τον έλεγχο άλλων κυκλωμάτων.



Πύλη OR.  
Εικόνα 2.11-60.

### Λειτουργία της πύλης OR

i) Στο κύκλωμα της εικόνας 60, αν οι τάσεις είναι  $V_{AG} = 0$  και  $V_{BG} = 0$  (και το Α και το Β είναι αριθμοί συνδεμένα με το Γ), τότε δεν υπάρχει ρεύμα. Άρα, η τάση εξόδου είναι  $V_{DG} = V_o = 0$ .

ii) Αν η τάση  $V_{AG}$  είναι θετική (π.χ. 5V) και η τάση  $V_{BG} = 0$  η διόδος Α άγει, ενώ η διόδος Β δεν άγει. Αν οι διόδοι είναι από πυρίτιο (Si), η τάση στα άκρα της διόδου Α είναι 0,7V. Άρα, η τάση εξόδου είναι  $V_{DG} = V_o = 4,3V$ . Θεωρώντας την τάση της διόδου Α περίπου μηδέν, η τάση εξόδου είναι  $V_{DG} = V_o = 5V$ .

iii) Παρόμοια, αν η τάση  $V_{AG} = 0$  (το Α είναι αριθμός συνδεμένο με το Γ) και η τάση  $V_{BG}$  είναι θετική (π.χ. 5V), τότε  $V_{DG} = V_o = 5V$ .

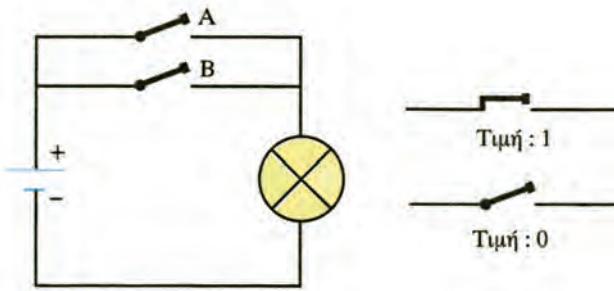
iv) Παρόμοια, αν οι τάσεις  $V_{AG}$  και  $V_{BG}$  είναι θετικές (π.χ. 5V), τότε  $V_{DG} = V_o = 5V$ .

### Πίνακας αληθείας για την πράξη OR

Αν αντιστοιχίσουμε τάση 0V στο 0 και την τάση 5V στο 1, κατασκευάζουμε τον παρακάτω πίνακα, που λέγεται **πίνακας αληθείας για την πράξη OR**.

A	B	Γ
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Από αυτόν φαίνεται ότι η τάση εξόδου είναι θετική ( $\Gamma = 1$ ), αν **τουλάχιστον μία** από τις τάσεις  $V_{A\Gamma}$  και  $V_{B\Gamma}$  είναι θετική ( $A = 1$  ή  $B = 1$  ή  $A = 1, B = 1$ ).



*Ισοδύναμο κύκλωμα πράξης OR.*

Εικόνα 2.11-61.

Τον ίδιο πίνακα έχουμε και για το κύκλωμα της εικόνας 61, όπου, για να ανάψει η λάμπα ( $\Gamma = 1$ ) πρέπει **τουλάχιστον ένας** από τους διακόπτες A και B να είναι κλειστός ( $A = 1$  ή  $B = 1$  ή  $A = 1, B = 1$ ).

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

### Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος

Η ένταση  $I$  του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό ισούται με το πηλίκο του φορτίου  $q$ , που περνά από μια διατομή του αγωγού σε χρόνο  $t$ , προς το χρόνο  $t$ .

$$I = \frac{q}{t}$$

Στο S.I. μετριέται σε A (Ampére).

### Τάση ή διαφορά δυναμικού

Η αιτία του ηλεκτρικού ρεύματος.

Στο S.I. μετριέται σε V (Volt).

### 1ος κανόνας του Kirchhoff

Σ' ένα κόμβο το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων ισούται με μηδέν.

$$\Sigma I = 0$$

### 2ος Κανόνας του Kirchhoff

Σ' ένα βρόχο το αλγεβρικό άθροισμα των διαφορών δυναμικού ισούται με μηδέν.

$$\Sigma(\Delta V) = 0$$

### Αντίσταση αγωγού

Η αντίσταση  $R$  ενός αγωγού ισούται με το πηλίκο της τάσης  $V$  που εφαρμόζεται στα άκρα του προς την ένταση  $I$  του ρεύματος που τον διαρρέει.

$$R = \frac{V}{I}$$

Στο S.I. μετριέται σε  $\Omega$  (Ohm).

### Νόμος του Ohm για αντιστάτη

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει έναν αντιστάτη (μεταλλικό αγωγό) σταθερής θερμοκρασίας είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του.

$$I = \frac{V}{R}$$

### Από τι εξαρτάται η αντίσταση αγωγού

Η αντίσταση  $R$  ενός αγωγού που έχει τη μορφή κυλινδρικού σύρματος είναι ανάλογη του μήκους του αγωγού, αντιστρόφως ανάλογη του εμβαδού διατομής του και εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του.

$$R_\theta = \rho_\theta \frac{\ell}{s}$$

$$\rho_\theta = \rho_0 (1 + \alpha \theta)$$

**Σύνδεση αντιστάσεων σε σειρά**

$$I = I_1 = I_2 = \dots$$

$$V = V_1 + V_2 + \dots$$

$$R = R_1 + R_2 + \dots$$

**Σύνδεση αντιστάσεων παράλληλα**

$$V = V_1 = V_2 = \dots$$

$$I = I_1 + I_2 + \dots$$

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$$

**Ενέργεια του ηλεκτρικού ρεύματος**

$$W = V \cdot I \cdot t$$

Γενικά:  $W = V \cdot I \cdot t$

$$\text{Σε αντιστάτη: } W = V \cdot I \cdot t = I^2 \cdot R \cdot t = \frac{V^2}{R} \cdot t$$

Στο S.I. μετριέται σε J (Joule)

**Ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος**

Η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος ισούται με το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που προφέρεται σε χρόνο  $t$ , προς το χρόνο  $t$ .

$$P = \frac{W}{t}$$

Στο S.I. μετριέται σε W (Watt)

Γενικά:  $P = V \cdot I$

$$\text{Σε αντιστάτη: } P = V \cdot I = I^2 \cdot R = V^2/R$$

**Νόμος του Joule**

Το ποσό θερμότητας που εκλύεται σ' ένα μεταλλικό αγωγό σταθερής θερμοκρασίας είναι ανάλογο του τετραγώνου της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει, ανάλογο της αντίστασής του και ανάλογο του χρόνου διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος.

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t$$

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \text{ (σε Joule)}$$

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ (σε cal)}$$

### Ηλεκτρεγερτική δύναμη πηγής (ΗΕΔ)

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας πηγής είναι η ενέργεια ανά μονάδα ηλεκτρικού φορτίου που προσφέρει η πηγή στο κύκλωμα. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη μιας πηγής ισούται με το πηλίκο της ισχύος που παρέχει η πηγή στο κύκλωμα, προς την ένταση του ρεύματος που το διαρρέει.

$$\mathcal{E} = \frac{W}{q}$$

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

Στο S.I. μετριέται σε V (Volt).

### Νόμος του Ohm για κλειστό κύκλωμα

Σε κλειστό κύκλωμα, που αποτελείται από ηλεκτρική πηγή και ωμικές αντιστάσεις, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα είναι ίση με το πηλίκο της ΗΕΔ της πηγής προς την ολική αντίσταση του κυκλώματος.

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{ολ}}}$$

### Πολική τάση πηγής

Η τάση στους πόλους μιας πηγής είναι ίση με την ηλεκτρεγερτική δύναμη της πηγής μείον την πτώση τάσης μέσα στην πηγή.

$$V_\pi = \mathcal{E} - I \cdot r$$

### Δίοδος

Ορθά πολωμένη: Καλός αγωγός.

Ανάστροφα πολωμένη: Κακός αγωγός.

### Πίνακας αληθείας της πράξης AND

A	B	G
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

$\Gamma = 1$  αν και  $A = 1$  και  $B = 1$

### Πίνακας αληθείας της πράξης OR

A	B	G
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

$\Gamma = 1$  αν ή  $A = 1$  ή  $B = 1$  ή  $A = 1, B = 1$

## Στρατηγική επίλυσης προβλημάτων

### A. Μεθοδολογία για ασκήσεις με συνδεσμολογία αντιστάσεων

Βρίσκουμε ομάδες αντιστάσεων (δύο ή περισσότερες) που συνδέονται μεταξύ τους, είτε σε σειρά, είτε παράλληλα. Βρίσκουμε την ισοδύναμη αντίσταση της ομάδας αυτών των αντιστάσεων και σχεδιάζουμε τη νέα κύκλωμα. Προχωράμε μέχρι να καταλήξουμε σε μια αντίσταση, την  $R_{\text{ol}}$ .

Αν δύο ή περισσότερες αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά, πρέπει να βρούμε την ένταση του ρεύματος που τις διαρρέει, ενώ αν δύο ή περισσότερες αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα, πρέπει να βρούμε την κοινή τους τάση.

### B. Μεθοδολογία για επίλυση κυκλώματος με τους κανόνες Kirchhoff

1. Σε κάθε κλάδο του κυκλώματος σημειώνουμε αυθαίρετα μια φορά έντασης ρεύματος. Ο αριθμός των ρευμάτων ισούται με τον αριθμό των κλάδων, έστω λ.

2. Αν στο κύκλωμα υπάρχουν κ κόμβοι εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα Kirchhoff ( $k - 1$ ) φορές και τον 2ο κανόνα Kirchhoff  $\lambda - (k - 1) = \lambda - k + 1$  φορές.

Αν κινούμενοι κατά τη φορά διαγραφής που διαλέξαμε, συναντάμε πρώτα τον αρνητικό πόλο της γεννήτριας, στην Η.Ε.Δ. της γεννήτριας θέτουμε πρόσημο θετικό, ενώ θέτουμε πρόσημο αρνητικό στην αντίθετη περίπτωση.

Αν κινούμενοι κατά τη φορά διαγραφής που διαλέξαμε, συναντάμε αντίσταση και κινούμαστε ομόρροπα με το ρεύμα, στο γινόμενο IR θέτουμε πρόσημο αρνητικό, ενώ θέτουμε πρόσημο θετικό στην αντίθετη περίπτωση.

3. Λύνουμε το σύστημα των λ εξισώσεων που προκύπτει. Αν κατά τη λύση, κάποια τιμή έντασης ρεύματος προκύψει αρνητική, αυτό σημαίνει ότι η φορά, που σημειώσαμε αρχικά, είναι αντίθετη της πραγματικής.

### C. Μεθοδολογία για εύρεση διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο σημείων

Για να βρούμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο σημείων A, B εφαρμόζουμε τη σχέση:

$$V_A + \Sigma(\Delta V) = V_B \quad (1)$$

Ξεκινάμε από το σημείο A και «πηγαίνουμε» στο σημείο B.

**Προσοχή:** Πριν εφαρμόσουμε τη σχέση (1) πρέπει να έχουμε επιλύσει το κύκλωμα και να έχουμε σημειώσει τις σωστές φορές των ρευμάτων.

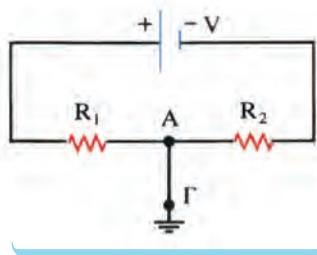
### D. Μεθοδολογία για ασκήσεις με πυκνωτές σε κύκλωμα συνεχούς ρεύματος

Σε κύκλωμα συνεχούς ρεύματος, όταν ο πυκνωτής είναι φορτισμένος δε διαρρέεται από ρεύμα, επομένως λειτουργεί ως ανοικτός διακόπτης. Για να βρούμε το φορτίο του πυκνωτή:

1. Επιλύουμε το κύκλωμα, δηλαδή βρίσκουμε τις εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν κάθε αντίσταση.
2. Βρίσκουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των σημείων, που ο πυκνωτής συνδέεται στο κύκλωμα.
3. Βρίσκουμε το φορτίο του πυκνωτή από τη σχέση  $q = C \cdot V$ .

#### E. Μεθοδολογία για ασκήσεις με γειώσεις

Η σύνδεση ενός σημείου ενός κυκλώματος με τη γη ονομάζεται **γείωση**.



**α)** Στο κύκλωμα έχουμε μια γείωση.

1. Το σημείο του κυκλώματος που γειώνεται (π.χ. το A) αποκτά δυναμικό μηδέν.
2. Ο κλάδος της γείωσης π.χ. ο ΑΓ δε διαρρέεται από ρεύμα, αφού δεν αποτελεί τμήμα κλειστού κυκλώματος.
3. Η μία γείωση δε μεταβάλλει τις εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν το κύκλωμα, ούτε τις διαφορές δυναμικού (ο ΑΓ δε διαρρέεται από ρεύμα). Τα δυναμικά όμως των διαφόρων σημείων εξαρτώνται από το σημείο της γείωσης.

**β)** Στο κύκλωμα έχουμε δύο η περισσότερες γειώσεις.

Οι γειώσεις κλείνουν κύκλωμα μέσω της γης, δεδομένου ότι η γη θεωρείται αγωγός με αμελητέα αντίσταση. Έτσι, αν έχουμε δύο ή περισσότερες γειώσεις, τις συνδέουμε με τον αγωγό και αφήνουμε μια γείωση. Οι δύο γειώσεις, γενικά, μεταβάλλουν το κύκλωμα και τις εντάσεις των ρευμάτων που το διαρρέουν.

#### ΣΤ. Μεθοδολογία για ασκήσεις με κινητήρες

1. Όταν ένας κινητήρας είναι συνδεμένος στο κύκλωμα και δε στρέφεται, τότε συμμετέχει στο κύκλωμα μόνο με την εσωτερική του αντίσταση  $r'$ . Ο νόμος του Ohm για κλειστό κύκλωμα ισχύει και γράφεται ως εξής:

$$\mathcal{E} = I \cdot R_{\text{ext}} = I(R + r + r') \quad (1)$$

όπου  $I$  η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα, όταν ο κινητήρας δε στρέφεται.

2. Όταν ο κινητήρας στρέφεται, τότε αποδίδει μηχανική ισχύ  $P_{\text{mech}}$ . Αν  $P_{\text{el}}$  η ισχύς που προσφέρεται στον κινητήρα,  $P_{\text{mech}}$  η μηχανική ισχύς που αποδίδει ο κινητήρας και  $P_{\theta}$  η θερμική ισχύς στον κινητήρα, ισχύει:

$$P_{\text{el}} = P_{\text{mech}} + P_{\theta} \Rightarrow VI = P_{\text{mech}} + I^2r'$$

Ο συντελεστής απόδοσης του κινητήρα είναι:

$$\alpha = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} = \frac{P_{\text{mech}}}{VI} \quad (2).$$

## Λυμένα προβλήματα

### Πρόβλημα 1

Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό δίνεται από τη σχέση  $I = 10 + 2t$  ( $t$  σε s,  $I$  σε A).

- α) Να γίνει η γραφική παράσταση  $I = f(t)$ .
- β) Να βρείτε το φορτίο που περνά από μια διατομή του αγωγού σε χρόνο 5s.

#### Αύση

α) Η εξίσωση  $I = f(t)$  είναι εξίσωση πρώτου βαθμού ως προς  $t$ . Επομένως, η γραφική της παράσταση είναι ευθεία.

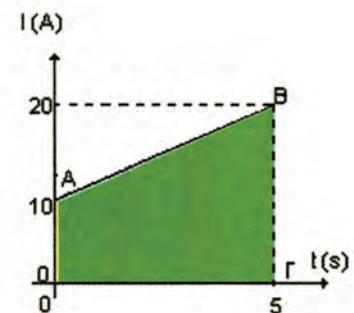
Για  $t = 0$  είναι  $I = 10A$ .

Για  $t = 5s$  είναι  $I = (10 + 2 \cdot 5)A = 20A$ .

Η γραφική της παράσταση φαίνεται στο διπλανό σχήμα.

β) Η ένταση  $I$  του ρεύματος δεν είναι σταθερή. Επομένως, δε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση  $q = I \cdot t$ . Το φορτίο  $q$  που περνά από μια διατομή του αγωγού από  $t = 0$  ως  $t = 5s$  είναι ίσο αριθμητικά με το γραμμοσκιασμένο εμβαδό στη γραφική παράσταση  $I = f(t)$ .

$$\text{Άρα: } q = \frac{1}{2}(10 + 20)5 \Rightarrow q = 75C$$



### Πρόβλημα 2

Δύο αντιστάσεις  $R_1 = 6\Omega$  και  $R_2 = 3\Omega$  συνδέονται παράλληλα. Σε σειρά με το συνδυασμό των αντιστάσεων συνδέεται αντίσταση  $R_3 = 10\Omega$  και παράλληλα με το σύστημα των τριών πρώτων αντιστάσεων συνδέεται αντίσταση  $R_4 = 4\Omega$ . Στα άκρα της συνδεσμολογίας εφαρμόζεται τάση  $V = 36V$ . Να βρεθούν:

- α) Η ισοδύναμη αντίσταση της συνδεσμολογίας.
- β) Η τάση στα άκρα κάθε αντίστασης, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει κάθε αντίσταση και η ένταση που διαρρέει την πηγή τροφοδοσίας.

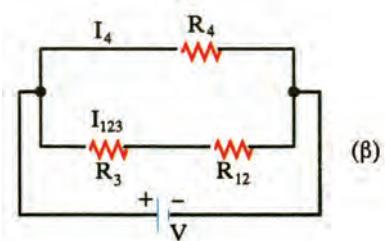
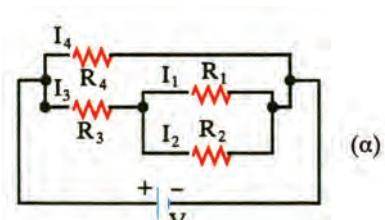
#### Αύση

α) Οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  συνδέονται παράλληλα (σχ. α). Η ισοδύναμη αντίσταση  $R_{12}$  δίνεται από τη σχέση:

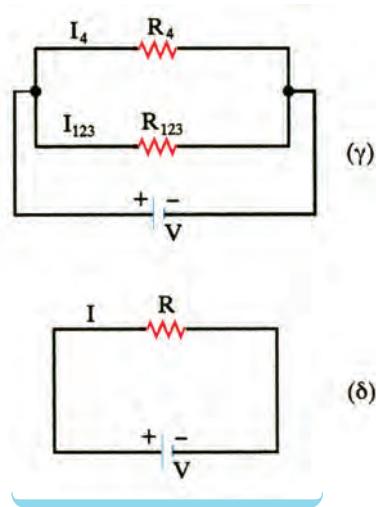
$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \Rightarrow R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow R_{12} = 2\Omega$$

Οι αντιστάσεις  $R_{12}$  και  $R_3$  συνδέονται σε σειρά (σχ. β). Η ισοδύναμη αντίσταση  $R_{123}$  είναι:

$$R_{123} = R_{12} + R_3 \Rightarrow R_{123} = 12\Omega$$



## 114 Συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα



Οι αντιστάσεις  $R_{123}$  και  $R_4$  συνδέονται παράλληλα (σχ. γ) οπότε η ισοδύναμη αντίσταση  $R$  δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{123}} + \frac{1}{R_4} \Rightarrow R = \frac{R_{123}R_4}{R_{123} + R_4} \Rightarrow R = 3\Omega$$

β) Η ένταση  $I$  του ρεύματος που διαρρέει την πηγή τροφοδοσίας και την ισοδύναμη αντίσταση  $R$  υπολογίζεται με τη βοήθεια του νόμου του Ohm στο κύκλωμα (δ).

$$I = \frac{V}{R} \Rightarrow I = \frac{36}{3} A = 12A$$

Οι αντιστάσεις  $R_{123}$  και  $R_4$  έχουν κοινή τάση, που είναι ίση με την τάση τροφοδοσίας  $V$ . Από το νόμο του Ohm υπολογίζουμε τις εντάσεις  $I_4$  και  $I_{123}$  (σχ. γ):

$$I_4 = \frac{V_4}{R_4} = \frac{V}{R_4} \Rightarrow I_4 = \frac{36}{4} A = 9A$$

$$\text{και } I_{123} = \frac{V_{123}}{R_{123}} = \frac{V}{R_{123}} \Rightarrow I_{123} = \frac{36}{12} A = 3A$$

Οι αντιστάσεις  $R_3$  και  $R_{12}$  συνδέονται σε σειρά, οπότε διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα, που είναι ίσο με το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση  $R_{123}$  (σχ. β). Δηλαδή:

$$I_{123} = I_{12} = I_3 = 3A$$

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm για τις αντιστάσεις  $R_3$  και  $R_{12}$  βρίσκουμε:

$$I_3 = \frac{V_3}{R_3} \Rightarrow V_3 = I_3 R_3 \Rightarrow V_3 = 3 \cdot 10V \Rightarrow V_3 = 30V$$

$$\text{και } I_{12} = \frac{V_{12}}{R_{12}} \Rightarrow V_{12} = I_{12} R_{12} \Rightarrow V_{12} = 3 \cdot 2V \Rightarrow V_{12} = 6V$$

Οι αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  συνδέονται παράλληλα, οπότε έχουν κοινή τάση, που είναι ίση με την τάση  $V_{12}$  (σχ. α):

$$V_1 = V_2 = V_{12} = 6V$$

Εφαρμόζοντας το νόμο του Ohm για τις αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  βρίσκουμε:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_1} \Rightarrow I_1 = \frac{6}{6} A \Rightarrow I_1 = 1A$$

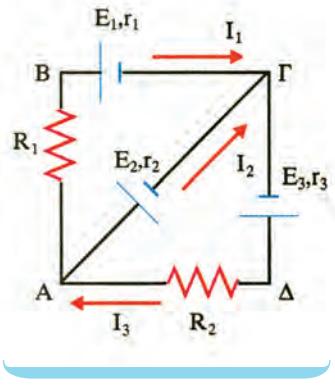
$$I_2 = \frac{V_2}{R_2} \Rightarrow I_2 = \frac{6}{3} A \Rightarrow I_2 = 2A$$

### Πρόβλημα 3

Δίνεται το διπλανό κύκλωμα. Οι τιμές των ΗΕΔ και των εσωτερικών αντιστάσεων των πηγών είναι  $\mathcal{E}_1 = 1V$ ,  $\mathcal{E}_2 = 2V$ ,  $\mathcal{E}_3 = 3V$  και  $r_1 = 1\Omega$ ,  $r_2 = 0,5\Omega$ ,  $r_3 = 0,33\Omega$ . Να βρεθούν τα ρεύματα που διαρρέουν κάθε κλάδο του κυκλώματος και η διαφορά δυναμικού  $V_{AG}$ .

#### Λύση

Βρίσκουμε τους κόμβους και τους κλάδους στο κύκλωμα. Έχουμε τους κόμβους Α και Γ και τους κλάδους ΑΒΓ, ΑΓ και ΑΔΓ.



1) Σε κάθε κλάδο του κυκλώματος σημειώνουμε αυθαίρετα μια φορά έντασης ρεύματος.

2) Εφαρμόζουμε τον 1ο κανόνα του Kirchhoff για τον κόμβο Α. Έχουμε:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0 \quad (1)$$

3) Εφαρμόζουμε το 2ο κανόνα του Kirchhoff στους βρόχους ΑΒΓΑ και ΑΒΔΑ. Για το βρόχο ΓΒΑΓ:

$$\mathcal{E}_1 + I_1 r_1 + I_1 R_1 - \mathcal{E}_2 - I_2 r_2 = 0 \quad (2)$$

Για το βρόχο ΑΓΔΑ:

$$-\mathcal{E}_2 - I_2 r_2 + \mathcal{E}_3 - I_3 r_3 - I_3 R_2 = 0 \quad (3)$$

Λύνουμε το σύστημα των εξισώσεων (1), (2), (3) οπότε προκύπτουν οι τιμές

$$I_1 = \frac{5}{8}A, \quad I_2 = 0,5A, \quad I_3 = \frac{8}{9}A$$

Οι τρεις εντάσεις είναι θετικές. Αυτό σημαίνει ότι οι φορείς που εκλέξαμε αυθαίρετα αρχικά είναι οι σωστές.

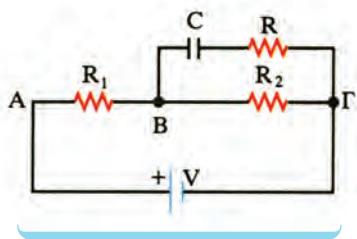
β) Η διαφορά δυναμικού  $V_{AG}$  βρίσκεται ως εξής:

$$V_A - \mathcal{E}_2 - I_2 r_2 = V_\Gamma \Rightarrow V_A - V_\Gamma = \mathcal{E}_2 + I_2 r_2$$

$$V_A - V_\Gamma = 2V + 0,5A \cdot 0,5\Omega \Rightarrow V_{AG} = 2,25V$$

### Πρόβλημα 4

Στο κύκλωμα του διπλανού σχήματος δίνονται  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 3\Omega$ ,  $V = 10V$  και  $C = 1\mu F$ . Να βρεθεί το φορτίο του πυκνωτή.



### Λύση

Σε κύκλωμα συνεχούς ρεύματος, ο πυκνωτής λειτουργεί ως διακόπτης. Επομένως, το ρεύμα  $I$  δε διακλαδίζεται στο σημείο  $B$ , διαρρέει τις  $R_1$  και  $R_2$  που συνδέονται σε σειρά, ενώ η  $R$  δε διαρρέεται από ρεύμα. Από το νόμο του Ohm έχουμε:

$$I = \frac{V}{R_{\text{ολ}}} \Rightarrow I = \frac{V}{R_1 + R_2} \Rightarrow I = 2A$$

Η τάση  $V_c$  στα άκρα του πυκνωτή είναι

$$V_c = V_{B\Gamma} = IR_2 \Rightarrow V_c = 6V$$

$$\text{Άρα } q = CV_c \Rightarrow q = 6\mu Cb.$$

### **Πρόβλημα 5**

Γεννήτρια με ΗΕΔ  $\mathcal{E} = 100V$  και εσωτερική αντίσταση  $r = 2\Omega$  συνδέεται μέσω αντίστασης  $R = 5\Omega$  με κινητήρα εσωτερικής αντίστασης  $r' = 3\Omega$ . Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα, όταν ο κινητήρας στρέφεται είναι  $I = 5A$ .

α) Να βρεθεί η ένταση  $I_1$  του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα, όταν ο κινητήρας δε στρέφεται.

β) Όταν ο κινητήρας στρέφεται, να βρεθούν:

1. η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια
2. η ισχύς που προσφέρεται στον κινητήρα
3. η θερμική ισχύς στον κινητήρα και στο κύκλωμα
4. η μηχανική ισχύς του κινητήρα

γ) Να βρεθεί ο συντελεστής απόδοσης του κινητήρα.

### Λύση

α) Όταν ο κινητήρας δε στρέφεται, συμμετέχει στο κύκλωμα ως ωμική αντίσταση. Από το νόμο του Ohm έχουμε:

$$\mathcal{E} = I_1 \cdot R_{\text{ολ}} \Rightarrow \mathcal{E} = I_1(R + r + r') \Rightarrow I_1 = 10A \quad (1)$$

β) 1. Η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια είναι:

$$P_{\text{γεν}} = \mathcal{E}I = 500W$$

2. Η ισχύς που προσφέρεται στον κινητήρα είναι:

$$P_k = V \cdot I = [\mathcal{E} - I(R + r)]I \Rightarrow P_k = 325W$$

3. Η θερμική ισχύς στον κινητήρα είναι:

$$P_{\theta, \text{κτν}} = I^2 r' = 75W$$

Η θερμική ισχύς στο κύκλωμα είναι:

$$P_{\theta,o\lambda} = I^2 R_{o\lambda} = I^2 (r + r' + R) = 250W$$

4. Η μηχανική ισχύς του κινητήρα βρίσκεται ως εξής:

$$P_{\gamma\epsilon\nu} = P_{\theta,o\lambda} + P_{\mu\eta\chi} \Rightarrow P_{\mu\eta\chi} = 500W - 250W = 250W$$

$$(ή P_{\kappa} = P_{\mu\eta\chi} + P_{\theta,\kappa} \Rightarrow P_{\mu\eta\chi} = P_{\kappa} - P_{\theta,\kappa} = 325W - 75W = 250W)$$

γ) Ο συντελεστής απόδοσης του κινητήρα είναι:

$$\alpha = \frac{P_{\omega\phi}}{P_{\delta\alpha\pi}} \Rightarrow \alpha = \frac{P_{\mu\eta\chi}}{P_{\kappa}} \Rightarrow \alpha = \frac{250W}{325W} \Rightarrow \alpha = \frac{10}{13}$$



## Ερωτήσεις - Δραστηριότητες

1. Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση. Ένα μηχανικό ανάλογο της ηλεκτρικής πηγής είναι:

- α)** ο άνθρωπος που δημιουργεί ροή σφαιριδίων σε σωλήνα
- β)** η αντλία
- γ)** η διαφορά πίεσης
- δ)** η ροή υγρού μέσα σε σωλήνα

2. Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση. Αν ένα χάλκινο σύρμα διπλωθεί στα δύο, τότε η ειδική του αντίσταση:

- α)** παραμένει σταθερή
- β)** διπλασιάζεται
- γ)** υποδιπλασιάζεται
- δ)** υποτετραπλασιάζεται

3. Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση. Ο νόμος του Ohm για αντιστάτη ισχύει όταν:

- α)** η τάση του είναι σταθερή
- β)** η θερμοκρασία του είναι σταθερή
- γ)** ο θερμικός συντελεστής αντίστασης είναι σταθερός
- δ)** η θερμοκρασία αυξάνεται

4. Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση. Αν μειώσουμε την αντίσταση μιας ηλεκτρικής θερμάστρας, τότε η ισχύς της:

- α)** μειώνεται
- β)** αυξάνεται
- γ)** παραμένει σταθερή
- δ)** μηδενίζεται

5. Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση. Αν η τάση στα άκρα μιας αντίστασης διπλασιάζεται, τότε η θερμότητα που εκλύεται στον ίδιο χρόνο, μεταβάλλεται:

- α)** 100%
- β)** 200%
- γ)** 300%
- δ)** 400%

6. Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)** Η πραγματική φορά του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η φορά κίνησης των ελευθέρων ηλεκτρονίων

**β)** Η ηλεκτρική πηγή παράγει ηλεκτρικά φορτία

**γ)** Η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος δίνεται από τον τύπο  $I = q \cdot t$  και στο S.I. μετριέται σε A

**δ)** Η ταχύτητα διολίσθησης ισούται με την ταχύτητα του φωτός

7. Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)** Το βολτόμετρο έχει μεγαλύτερη αντίσταση από το αμπερόμετρο

**β)** Ο 1ος κανόνας του Kirchhoff είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης της ενέργειας

**γ)** Το βολτόμετρο συνδέεται στο κύκλωμα παράλληλα, ενώ το αμπερόμετρο σε σειρά

**δ)** Ο 2ος Κανόνας του Kirchhoff είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης του φορτίου

8. Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)** Οι όροι «αντιστάτης» και «αντίσταση» ταυτίζονται

**β)** Η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τη θερμοκρασία του

**γ)** Η ειδική αντίσταση εξαρτάται από τα γεωμετρικά στοιχεία του αγωγού

**δ)** Ένας αντιστάτης έχει αντίσταση  $10\Omega$

9. Να κάνετε τις αντιστοιχίσεις των φυσικών μεγεθών και των μονάδων μέτρησης.

**1)** φορτίο q • • **α)** W

**2)** ένταση I • • **β)** C

**3)** τάση V • • **γ)** J

**4)** ενέργεια W • • **δ)** A

**5)** ισχύς P • • **ε)** V

**6)** ΗΕΔ Ε •

10. Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις:

**α)** Η μεταβλητή αντίσταση μπορεί να λειτουργήσει και ως ποτενσιόμετρο και ως ροοστάτης

**β)** Το ποντενσιόμετρο είναι ρυθμιστής τάσης

**γ)** Ο ροοστάτης είναι ρυθμιστής ηλεκτρικού ρεύματος

**δ)** Στο ροοστάτη όλη η μεταβλητή αντίσταση διαρρέεται από ρεύμα

11. Ποια αντίσταση είναι μεγαλύτερη, της ηλεκτρικής κουζίνας ή του ηλεκτρικού λαμπτήρα φωτισμού; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

12. Ένας αντιστάτης διαρρέεται από ρεύμα. Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)**  $R = \frac{1}{V}$

**β)**  $P = V \cdot I$

**γ)**  $P = \frac{V \cdot I}{t}$

**δ)**  $W = V \cdot I \cdot t$

13. Μια ηλεκτρική θερμάστρα διαρρέεται από ρεύμα.

Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)** το ποσό θερμότητας που εκλύει η θερμάστρα στο περιβάλλον ισούται με το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που απορροφά

**β)** το ποσό θερμότητας που εκλύει η θερμάστρα στο περιβάλλον είναι ανάλογο με την ένταση του ρεύματος που τη διαρρέει

**γ)** η ισχύς της θερμάστρας είναι ανάλογη της αντίστασής της

14. Μια ηλεκτρική κουζίνα αναγράφει τα στοιχεία «2KW, 220V». Ποια τιμή πρέπει να έχει η ασφάλειά της, αν στο εμπόριο υπάρχουν ασφάλειες 1,2,4,6,8,10,15,25,35A;

Σημειώστε με X τη σωστή απάντηση.

**α)** 1A

**β)** 6A

**γ)** 10A

**δ)** 25A

15. Να κάνετε τις αντιστοιχίσεις μεταξύ των μεγεθών και των τύπων που αναφέρονται σ' έναν αντιστάτη:

1) τάση . . . α) VI

2) ένταση . . . β)  $I^2R\Delta t$

3) ενέργεια . . . γ)  $V/I$

4) ισχύς . . . δ)  $V/R$

. . . ε)  $I \cdot R$

16. Οι λάμπες του σπιτιού μας συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

17. Δύο αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά.

Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)**  $R_{\text{ολ}} = R_1 + R_2$

**β)**  $V = V_1 \cdot V_2$

**γ)**  $I = I_1 + I_2$

**δ)**  $V = V_1 + V_2$

18. Δύο αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα.

Να συμπληρώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

**α)**  $R_{\text{ολ}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$

**β)**  $V = V_1 \cdot V_2$

**γ)**  $I = I_1 + I_2$

**δ)**  $V = V_1 + V_2$

19. Έχουμε τέσσερις ίδιους αντιστάτες με αντιστάσεις 10Ω. Πώς πρέπει να τους συνδέσουμε, ώστε η ολική αντίσταση της συνδεσμολογίας να είναι:

**α)** 40Ω

**β)** 2,5Ω

**γ)** 10Ω

**δ)** 25Ω

20. Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση.

Τα χαρακτηριστικά μιας ηλεκτρικής πηγής είναι:

**α)** η ηλεκτρεγερτική δύναμη και η ισχύς

- β)** η ηλεκτρεγερτική δύναμη και η  πολική τάση  
**γ)** η πολική τάση και η εσωτερική αντίσταση  
**δ)** η ηλεκτρεγερτική δύναμη και η  εσωτερική αντίσταση

**21.** Σημειώστε με (X) τη σωστή απάντηση: Ηλεκτρική πηγή με ΗΕΔ 10V συνδέεται με εξωτερική αντίσταση  $8\Omega$ , οπότε η πολική τάση της είναι 8V. Η εσωτερική της αντίσταση είναι:

- α)**  $1\Omega$    
**β)**  $2\Omega$    
**γ)**  $3\Omega$    
**δ)**  $4\Omega$

**22.** Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

- α)** Όταν μια ηλεκτρική πηγή συνδέεται σε ηλεκτρικό κύκλωμα έχουμε παραγωγή ενέργειας από το μηδέν  
**β)** Η τιμή της ΗΕΔ μιας ηλεκτρικής πηγής εξαρτάται από τα στοιχεία του κυκλώματος, που τροφοδοτεί<sup>ε</sup>  
**γ)** Το γινόμενο  $\mathcal{E} \cdot I$  δίνει την ισχύ της πηγής  
**δ)** Μέσα από την πηγή διέρχονται ηλεκτρικά φορτία

**23.** Να σημειώσετε (Σ) στις σωστές και (Λ) στις λανθασμένες προτάσεις.

- Η πολική τάση μιας πηγής είναι ίση με την ΗΕΔ της πηγής, όταν:  
**α)** Η πηγή δε διαρρέεται από ρεύμα   
**β)** Η εσωτερική αντίσταση της πηγής  είναι αμελητέα  
**γ)** Οι πόλοι της πηγής είναι βραχυκοκλωμένοι  
**δ)** Η πηγή συνδέεται με αμπερόμετρο

**24.** Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα:

	Ψυγείο	Σίδερο	Τηλεόραση
Τάση (V)	220	220	220
Ένταση (I)			1

Αντίσταση ( $\Omega$ )		110	
Ισχύς (W)	110		

**25.** Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα:

	P(W)	P(KW)	t(h)	W(KWh)
Θερμοσίφωνο	3000		1	
Κουζίνα	2000		1	
Λαμπτήρας	60		1	
Ψυγείο	100		1	

**26.** Συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα:

R	$\Omega$	$\frac{V}{I}$
	A	
		$\frac{W}{q}$
W		

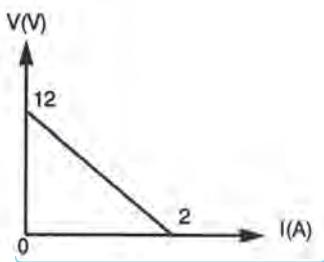
**27.** Να σημειώσετε με (X) τη σωστή απάντηση. Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει έναν αγωγό δίνεται από τη σχέση:  $I = 1 + 2t$  (S.I.). Το φορτίο που διέρχεται από μια διατομή του αγωγού σε χρόνο  $\Delta t = 3s$  είναι:

- α)**  $7C$    
**β)**  $21C$    
**γ)**  $3C$    
**δ)**  $12C$

**28.** Διαθέτουμε τέσσερις αντιστάσεις  $R_1 = 60\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ ,  $R_3 = 20\Omega$  και  $R_4 = 35\Omega$ . Να βρείτε πώς πρέπει να τις συνδέσουμε για να πετύχουμε ολική αντίσταση  $R_{\text{ολ}} = 59\Omega$ .

**29.** Η χαρακτηριστική καμπύλη μιας ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος  $V = f(I)$  φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Να βρείτε την ηλεκτρε-

γερτική δύναμη της πηγής και την εσωτερική της αντίσταση.



- 30.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Τα ελεύθερα ..... ξέφυγαν από την έλξη του ..... και κινούνται ..... προς όλες τις κατευθύνσεις. Τα θετικά ιόντα ..... γύρω από καθορισμένες θέσεις προς όλες τις κατευθύνσεις με πλάτος που ..... με τη θερμοκρασία. Η ..... των μετάλλων οφείλεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια.

- 31.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Η ..... κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων στον ..... αγωγό ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα. Αιτία είναι η ..... Η φορά κίνησης των ηλεκτρονίων λέγεται ..... φορά του ηλεκτρικού ρεύματος.

- 32.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Η ένταση του ρεύματος ορίζεται από τον τύπο .....

Στο S.I. η ένταση του ρεύματος μετριέται σε .....

Η ένταση του ρεύματος εκφράζει το ..... διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου από μια κάθετη διατομή ενός αγωγού.

- 33.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Ο 1ος κανόνας του Kirchhoff διατυπώνεται ως εξής: Το αλγεβρικό άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων που ..... σ' ένα κόμβο ισούται με το άθροισμα των εντάσεων των ρευμάτων που ..... απ' αυτόν.

Είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης του .....

Ο 2ος κανόνας του Kirchhoff διατυπώνεται

ως εξής: Το άθροισμα των διαφορών δυναμικού κατά μήκος μιας ..... διαδρομής σ' ένα κύκλωμα ισούται με .....

Είναι συνέπεια της αρχής διατήρησης της .....

- 34.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Η αντίσταση ενός αγωγού ορίζεται από τον τύπο ..... Στο S.I. η μονάδα μέτρησης της αντίστασης είναι το .....

Η αντίσταση ενός αγωγού εκφράζει τη ..... που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα όταν διέρχεται μέσα από αυτόν.

Ο ίδιος ο μεταλλικός αγωγός λέγεται .....

Η αντίσταση των μεταλλικών αγωγών οφείλεται στις ..... των ελευθέρων ηλεκτρονίων με τα θετικά ιόντα.

- 35.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Όταν τρεις αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά ισχύουν:

α)  $I_{\text{ol}} = \dots$

β)  $V_{\text{ol}} = \dots$

γ)  $R_{\text{ol}} = \dots$

δ) Η ολική αντίσταση είναι ..... και από τη .....

Όταν τρεις αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα ισχύουν:

α)  $I_{\text{ol}} = \dots$

β)  $V_{\text{ol}} = \dots$

γ)  $R_{\text{ol}} = \dots$

δ) Η ολική αντίσταση είναι ..... και από τη .....

- 36.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Ανάλογα με τον τρόπο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα η ρυθμιστική (μεταβλητή) αντίσταση λειτουργεί είτε ως ρυθμιστής της τάσης και λέγεται ....., είτε ως ρυθμιστής του ηλεκτρικού ρεύματος και λέγεται .....

- 37.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Η ισχύς του ηλεκτρικού ρεύματος ορίζεται

από τον τύπο .....

Στο S.I. η μονάδα μέτρησης της ισχύος είναι το ..... . Για κάθε συσκευή ισχύει ο τύπος ..... . Αν η συσκευή είναι αντιστάτης (ωμική αντίσταση) τότε ισχύουν ακόμη και οι ..... και .....

1Kwh είναι η ..... που «καταναλώνει» μια συσκευή ισχύος 1Kw όταν λειτουργήσει .....

**38.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη **Ε** μιας πηγής δίνεται από τον τύπο ..... και από τον τύπο ..... Εκφράζει την ανά μονάδα ..... ηλεκτρική ενέργεια, που προσφέρει η πηγή στο ..... ή την ανά μονάδα ..... ηλεκτρική ισχύ, που προσφέρει η πηγή στο ..... . Η ..... αντίσταση της πηγής εκφράζει τη ..... που συναντά το ηλεκτρικό ρεύμα, όταν διέρχεται μέσα από την πηγή.

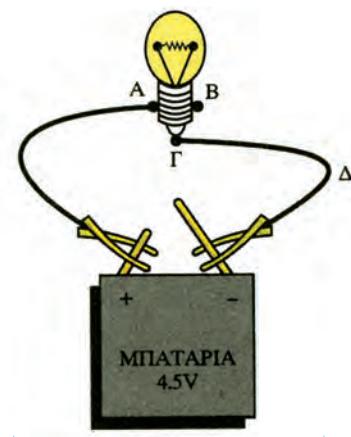
**39.** Συμπληρώστε τα κενά στις παρακάτω προτάσεις.

Όταν η δίοδος είναι καλός αγωγός, τότε λέμε ότι είναι ..... πολωμένη. Όταν η δίοδος είναι κακός αγωγός, τότε λέμε ότι είναι ..... πολωμένη. Η δίοδος αποτελείται από δύο διαφορετικούς ..... που βρίσκονται σε στενή επαφή.

**40.** Μπορείτε να κατασκευάσετε ένα απλό κύκλωμα, χρησιμοποιώντας μία μπαταρία «πλακέ» 4,5V, ένα λαμπάκι κανονικής λειτουργίας 4,5V και καλώδια, που στα άκρα τους έχουν κροκοδειλάκια. Πάνω σε ένα κοντραπλακέ διαστάσεων 30cm x 30cm περίπου, καρφώνετε τρία καρφάκια A, B και για να στερεώσετε το λαμπάκι, όπως φαίνεται στο κύκλωμα της διπλανής εικόνας.

Το ένα καλώδιο συνδέει το θετικό πόλο της πηγής με το καρφάκι A ή B και το άλλο συνδέει το αρνητικό πόλο της πηγής με το καρφάκι Γ. Μπορείτε να ανοίγετε ή να κλείνετε το κύκλωμα βγάζοντας ένα κροκοδειλάκι από τον αντίστοιχο πόλο της μπαταρίας. Μπορείτε επίσης να παρεμβάλλετε ένα δι-

ακοπτάκι στο σημείο Δ του καλωδίου και με αυτό να ανοίγετε ή να κλείνετε το κύκλωμα.



**41.** Με ένα βολτόμετρο, μετρήστε την τάση  $V_1$ , στα άκρα της μπαταρίας, που χρησιμοποιήσατε στην προηγούμενη δραστηριότητα, πριν τη συνδέσετε με το λαμπάκι και καταγράψτε την ένδειξη. Μετά μετρήστε την τάση  $V_2$ , στα άκρα της μπαταρίας, ενώ το κύκλωμα είναι κλειστό (το λαμπάκι ανάβει) και σημειώστε την ένδειξη. Τι παρατηρείτε; Δικαιολογήστε την απάντησή σας.

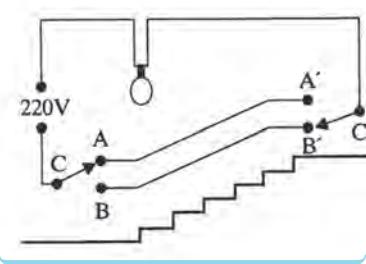
**42.** Από το εργαστήριο πάρτε τρεις αντιστάσεις που έχουν διάφορες χρωματικές λωρίδες στην επιφάνειά τους. Με βάση το χρωματικό κώδικα υπολογίστε την αντίσταση τους. Με το πολύμετρο μετρήστε την αντίστασή τους. Τι παρατηρείτε;

**43.** Τι τιμή έχουν οι αντιστάσεις που τα χρώματά τους είναι:

- α)** καφέ, μαύρο, κόκκινο, ασήμι
- β)** πορτοκαλί, πορτοκαλί, πράσινο, ασήμι
- γ)** κίτρινο, μωβ, καφέ, ασήμι

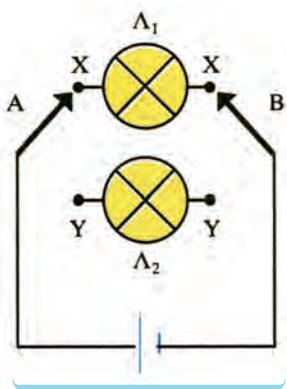
**44.** Στη διπλανή εικόνα φαίνεται η καλωδίωση ενός διαδρόμου.

- α)** Να εξετάσετε αν η λάμπα ανάβει.
- β)** Σε ποιους συνδυασμούς θέσεων των διακοπών ανάβει η λάμπα;

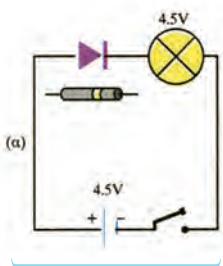


45. Χρησιμοποιώντας μία μπαταρία, δύο λαμπάκια και δύο διακόπτες δύο δρόμων κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα και συμπληρώστε τον αντίστοιχο πίνακα, θέτοντας 1, όταν το λαμπάκι φωτιζολεί και 0, όταν το λαμπάκι είναι σβηστό.

ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ		ΛΑΜΠΑΚΙΑ	
A	B	Λ1	Λ2
X	X		
X	Y		
Y	X		
Y	Y		



46. Χρησιμοποιώντας μία μπαταρία, ένα διακόπτη, μια δίοδο και ένα λαμπάκι κατασκευάστε το κύκλωμα (a). Τι παρατηρείτε; Τι θα παρατηρήσετε αν αντιστρέψετε τη σύνδεση της διόδου;

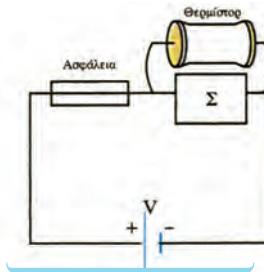


47. Το θερμίστορ (thermistor) είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται έντονα με τη θερμοκρασία. Χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ως αισθητήρας αύξησης της θερμοκρασίας. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος μ' ένα θερμίστορ.

Θ (°C)	23	37	47	57	65	76	85	90	100
V (V)	5	5	5	5	5	5	5	5	5
I (mA)	15	24	31	37	45	56	67	73	87
R (Ω)									



- α) Υπολογίστε την αντίσταση για κάθε θερμοκρασία και σχεδιάστε τη χαρακτηριστική καμπύλη  $I = f(V)$  για το θερμίστορ.
- β) Πώς μεταβάλλεται η αντίσταση του θερμίστορ με τη θερμοκρασία;
- γ) Κατασκευάστε το παρακάτω κύκλωμα, το οποίο χρησιμεύει για την προστασία της συσκευής Σ από υπερθέρμανση. Να εξηγήσετε γιατί μία ασυνήθιστη αύξηση της θερμοκρασίας θα κάψει την ασφάλεια και θα διακοπεί η κυκλοφορία του ρεύματος στο κύκλωμα.



48. Το φωτοστοιχείο (photocell) είναι ένα ηλεκτρονικό στοιχείο, του οποίου η αντίσταση μεταβάλλεται με την αύξηση της έντασης του φωτός. Χρησιμοποιείται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα ως αισθητήρας αύξησης της θερμοκρασίας. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα αποτελέσματα ενός πειράματος με ένα φωτοστοιχείο.

Επίπεδο έντασης φωτός	1	2	3	4	5	6	7	8
V (V)	5	5	5	5	5	5	5	5
I (mA)	2	2,8	3,3	3,7	3,9	4,1	4,3	4,4
R (Ω)								

- α) Υπολογίστε την αντίσταση για κάθε επίπεδο έντασης φωτός και σχεδι-

άστε τη χαρακτηριστική καμπύλη  $I = f(V)$  για το φωτοστοιχείο.

β) Πώς μεταβάλλεται η αντίσταση του φωτοστοιχείου με το επίπεδο έντασης φωτός;

γ) Σχεδιάστε και υλοποιήστε ένα απλό κύκλωμα, στο οποίο θα χρησιμοποιήσετε το φωτοστοιχείο ως αισθητήρα φωτός.

#### 49. Εργαστηριακή δραστηριότητα - Ηλεκτρική ασφάλεια

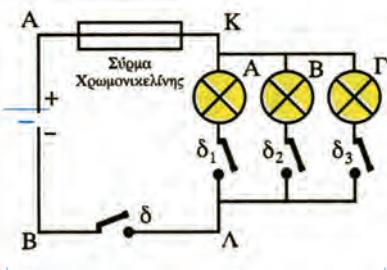
##### A. Απαιτούμενα όργανα και υλικά:

- Ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και μεταβλητής τάσης.
- Τέσσερις διακόπτες.
- Σύρμα από χρωμονικελίνη διαμέτρου  $d = 0,15\text{mm}$ .
- Δύο λαμπτήρες Β και Γ με χαρακτηριστικά λειτουργίας  $42V/60W$ .
- Καλώδια σύνδεσης.
- Ηλεκτρική ασφάλεια.

##### B. Εκτέλεση πειράματος

###### B<sub>1</sub>.

- Κατασκευάζουμε το κύκλωμα του παρακάτω σχήματος.



- Κλείνουμε τους διακόπτες  $\delta$  και  $\delta_1$  και ρυθμίζουμε την τάση της πηγής, ώστε ο λαμπτήρας Α των  $40W$  να λειτουργεί κανονικά.

- Κλείνοντας τους διακόπτες  $\delta_2$  και  $\delta_3$ , συνδέουμε παράλληλα στο λαμπτήρα Α τους άλλους δύο λαμπτήρες Β και Γ των  $60W$ , οπότε έχουμε υπερφόρτιση του κύκλωματος.

Παρατηρούμε ότι .....

- Αποκαθιστούμε το κύκλωμα συνδέοντας νέο σύρμα χρωμονικελίνης, με τους διακόπτες  $\delta_2$  και  $\delta_3$  ανοικτούς και τους  $\delta$  και

$\delta_1$  κλειστούς. Συνδέουμε τα σημεία Κ και Λ του κύκλωματος με ένα καλώδιο, που είναι αγωγός αμελητέας αντίστασης, οπότε έχουμε βραχυκύκλωμα.

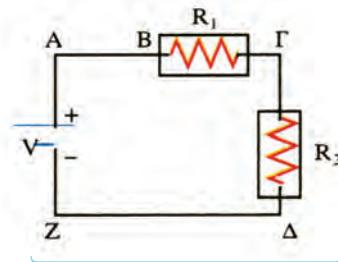
Παρατηρούμε ότι .....

- Αποκαθιστούμε το κύκλωμα, συνδέοντας στη θέση του σύρματος χρωμονικελίνης μία ασφάλεια των  $2A$ . Συνδέουμε τα σημεία Κ και Λ του κύκλωματος με ένα καλώδιο, που είναι αγωγός αμελητέας αντίστασης, οπότε έχουμε βραχυκύκλωμα.

Παρατηρούμε ότι .....

##### Γ. Εργασίες

- Γιατί χρησιμοποιούνται οι ασφάλειες;
- Τι σημαίνει η ένδειξη  $20A$  πάνω σε μία ασφάλεια;
- Πώς συνδέονται οι ασφάλειες στην οικιακή εγκατάσταση και γιατί;
- Γιατί δεν πρέπει να επισκευάζονται οι τηκόμενες ασφάλειες;
- Στο κύκλωμα του σχήματος είναι  $V = 120V$ ,  $R_1 = 10\Omega$  και  $R_2 = 40\Omega$ .



- Να βρείτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα και την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης.

- Αν παράλληλα στην  $R_2$  συνδέουμε αντίσταση  $R = 120\Omega$ , να βρείτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα και την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης.

- Αν παράλληλα στην  $R_2$  συνδέουμε αντίστασης  $R' = 40\Omega$ , να βρείτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα και την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης.

- Αν παράλληλα στην  $R$  συνδέουμε αγωγό αμελητέας αντίστασης  $R = 0$  (βραχυκύκλωμα), να βρείτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα και την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης.

- Αν μεταξύ των σημείων Α και Β υπάρχει ασφάλεια  $10A$ , σε ποια από τις προηγούμενες περιπτώσεις η ασφάλεια «καίγεται»;

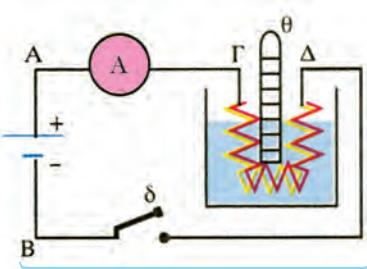
## 50. Εργαστηριακή δραστηριότητα - Νόμος Joule

### A. Απαιτούμενα όργανα και υλικά

1. Ένα τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και μεταβλητής τάσης.
2. Ένας διακόπτης.
3. Ένα αμπερόμετρο κλίμακας 2,5A.
4. Δύο σύρματα χρωμονικελίνης με μήκη 30cm και 60cm σε σχήμα ελατηρίου.
5. Ένα ογκομετρικό ποτήρι 150 ml.
6. 150 ml αποσταγμένο νερό.
7. Ένα χρονόμετρο.
9. Καλώδια σύνδεσης.
10. Αναδευτήρας.

### B. Εκτέλεση πειράματος

1. Κατασκευάζουμε το κύκλωμα του διπλανού σχήματος συνδέοντας στους πόλους A και B του τροφοδοτικού το σύρμα των 30cm, το αμπερόμετρο και το διακόπτη σε σειρά.



2. Συμπληρώνουμε 150 ml αποσταγμένο νερό στο ποτήρι και τοποθετούμε το σύρμα, το θερμόμετρο και τον αναδευτήρα μέσα στο ποτήρι, προσέχοντας να μην αγγίζουν οι σπείρες του σύρματος μεταξύ τους.
3. Κλείνουμε το διακόπτη και ρυθμίζουμε την τάση της πηγής, έτσι ώστε να περνά ρεύμα έντασης 1A από το κύκλωμα. Ανοίγουμε το διακόπτη.
4. Ανακατεύουμε με προσοχή το νερό με τον αναδευτήρα και σημειώνουμε τη θερμοκρασία του. Είναι:  $\theta_1 = \dots$
5. Κλείνουμε το διακόπτη και πατάμε το χρονόμετρο.
6. Μετά από χρόνο  $\Delta t = 4\text{min} = 240\text{s}$  ανοίγουμε το διακόπτη, ανακατεύουμε το νερό και σημειώνουμε τη νέα θερμοκρασία του.

Είναι:  $\theta_2 = \dots$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι:  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \dots$

7. Κλείνουμε το διακόπτη και ξαναπατάμε το χρονόμετρο.

8. Μετά από χρόνο  $\Delta t = 4\text{min} = 240\text{s}$  ανοίγουμε το διακόπτη, ανακατεύουμε το νερό και σημειώνουμε τη νέα θερμοκρασία του.  
Είναι:  $\theta_3 = \dots$   
Η συνολική μεταβολή της θερμοκρασίας είναι:  $\Delta\theta = \theta_3 - \theta_1 = \dots$

B<sub>2</sub>.

1. Επαναλαμβάνουμε από την αρχή το πείραμα, με την ίδια ποσότητα νερού (150 ml), το ίδιο σύρμα (χρωμονικελίνη), τον ίδιο χρόνο (240s), αλλά με ρεύμα έντασης 2A.  
Είναι:  $\theta_1 = \dots$   
και:  $\theta_2 = \dots$   
Η μεταβολή θερμοκρασίας είναι:  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \dots$

B<sub>3</sub>.

1. Επαναλαμβάνουμε από την αρχή το πείραμα, με την ίδια ποσότητα νερού (150 ml), τον ίδιο χρόνο (240s), την ίδια ένταση ρεύματος (1A), αλλά με το σύρμα των 60cm.

Είναι:  $\theta_1 = \dots$   
και:  $\theta_2 = \dots$

Η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι:  $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = \dots$

### Γ. Υπολογισμοί

Από το θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας

$Q = mc\Delta\theta$ , όπου m η μάζα του νερού, Δθ η μεταβολή της θερμοκρασίας και Q η θερμότητα σε cal, να υπολογίσετε τα ποσά θερμότητας  $Q_1$  και  $Q_2$  που εκλύθηκαν από το σύρμα και προσφέρθηκαν στο νερό. Να συμπληρώσετε τους παρακάτω πίνακες.

$\Delta t$	$\Delta\theta$	Q
240s		
480s		

Παρατηρούμε ότι .....

.....

I	$\Delta\theta$	Q
1A		
2A		

Παρατηρούμε ότι .....

$\ell$	R	$\Delta\theta$	Q
30cm	R		
60cm	2R		

Παρατηρούμε ότι .....

#### Δ. Εργασίες

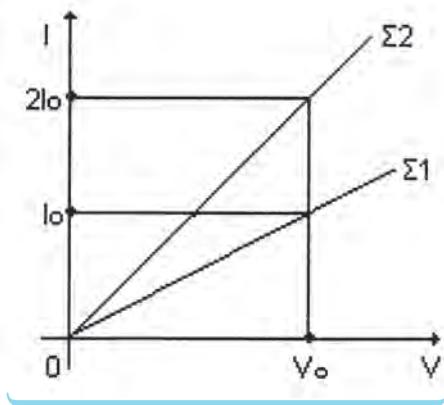
- Πόσο τοις εκατό (%) μεταβάλλεται το ποσό θερμότητας που εκλύεται από έναν αντιστάτη, όταν η τάση στα άκρα του διπλασιαστεί;
  - Πού οφείλεται το φαινόμενο Joule, δηλαδή η έκλυση θερμότητας σε μια ωμική αντίσταση που διαρρέεται από ρεύμα;
  - Ποια συσκευή έχει μεγαλύτερη αντίσταση, η ηλεκτρική κουζίνα ή η λάμπα φωτισμού του δωματίου μας;
- Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

- Θέλουμε να θερμάνουμε μια ποσότητα νερού από θερμοκρασία  $\theta_1$  σε θερμοκρασία  $\theta_2$  ( $\theta_2 > \theta_1$ ). Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούμε αντιστάτη αντίστασης  $R_1$  και στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούμε αντιστάτη αντίστασης  $R_2$ , με  $R_1 > R_2$ . Η τάση του δικτύου είναι σταθερή.
  - Σε ποια περίπτωση έχουμε μεγαλύτερο κόστος;
  - Σε ποια περίπτωση η θέρμανση θα διαρκέσει περισσότερο;
- Γιατί οι αγωγοί που τροφοδοτούν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα παραμένουν ψυχρότεροι από τις ηλεκτρικές συσκευές θέρμανσης που συνδέονται στο κύκλωμα, αν και οι αγωγοί αυτοί διαρρέονται από ίσης έντασης ηλεκτρικό ρεύμα;
- Να κάνετε τη γραφική παράσταση της θερμότητας που εκλύεται σ' έναν αντιστάτη, ως συνάρτηση:
  - της έντασης του ρεύματος που τον διαρρέει
  - της αντίστασής του
  - του χρόνου λειτουργίας.
- Σε ποιους παράγοντες οφείλονται τα σφάλματα κατά τη διεξαγωγή του πειράματος;



## Προβλήματα

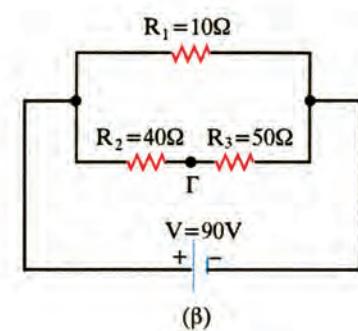
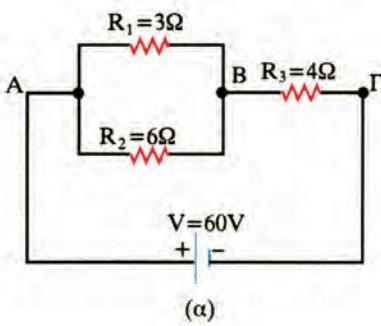
- Ένας πυκνωτής χωρητικότητας  $C = 20\mu F$  συνδέεται με πηγή τάσης  $V = 24V$ . Αποσυνδέουμε την πηγή και συνδέουμε τους οπλισμούς με σύρμα, οπότε ο πυκνωτής εκφορτίζεται σε χρόνο  $\Delta t = 0,02s$ . Να βρείτε τον αριθμό των ηλεκτρονίων, που περνάνε από μια διατομή του αγωγού και τη μέση ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος. Δίνεται:  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ .
- Να βρείτε την ένταση του ρεύματος, λόγω της κίνησης του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου, αν η συχνότητα περιστροφής του είναι  $v = 5,8 \cdot 10^{15} Hz$ . Δίνεται:  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ .
- Να βρείτε τη μέση ταχύτητα (ταχύτητα διολίσθησης), με την οποία κινούνται τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα σ' ένα μεταλλικό αγωγό, σε συνάρτηση με τα εξής μεγέθη: α) I: ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό, β) n: ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου του αγωγού, γ) S: εμβαδό διατομής του αγωγού, δ)  $q_e$ : φορτίο του ηλεκτρονίου.  
Αριθμητική εφαρμογή: I = 16A,  $n = 8 \cdot 10^{23} \text{ ήλ/cm}^3$ ,  $S = 1mm^2$ ,  $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$ .
- Στο παρακάτω διάγραμμα έχει παρασταθεί γραφικά η ένταση του ρεύματος I σε συνάρτηση με τη διαφορά δυναμικού V για δύο χάλκινα σύρματα  $\Sigma_1$  και  $\Sigma_2$ , που έχουν το ίδιο μήκος. Αν το εμβαδό διατομής του  $\Sigma_1$  είναι  $S_1 = 0,2mm^2$ , να βρείτε το εμβαδό διατομής του  $\Sigma_2$ .



- Να κάνετε τη γραφική παράσταση της αντίστασης ενός αγωγού σε συνάρτηση με:
  - το μήκος του
  - το εμβαδό διατομής τους
  - την τάση στα άκρα του
  - την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει.
- Ένα σύρμα από λευκόχρυσο έχει μήκος  $\ell = 10m$  και μάζα  $m = 3,6g$ . Να βρείτε την αντίσταση του σύρματος, αν η πυκνότητα του λευκόχρυσου είναι  $d = 21g/cm^3$  και η ειδική του αντίσταση  $\rho = 9 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ .
- Ένα σύρμα από σίδηρο έχει αντίσταση  $R = 40\Omega$  και μήκος  $\ell = 2m$ . Λιώνουμε το σύρμα και φτιάχνουμε ένα άλλο, που θέλουμε να έχει αντίσταση  $R' = 160\Omega$ . Να βρείτε το μήκος του  $\ell'$ .
- Σε ποια θερμοκρασία θ η τιμή της ειδικής αντίστασης του χαλκού γίνεται διπλάσια από την τιμή, που έχει σε  $0^\circ C$ ? Ισχύει το ίδιο για όλους τους χάλκινους αγωγούς, ανεξάρτητα από τη μορφή και το μέγεθός τους; Ισχύει το ίδιο για αγωγούς, που είναι από διαφορετικό υλικό? Δίνεται ο θερμικός συντελεστής αντίστασης  $\alpha_{Cu} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ grad}^{-1}$ .
- Στα άκρα ενός σύρματος εφαρμόζουμε σταθερή συνεχή τάση και διαπιστώνουμε ότι σε θερμοκρασία  $\theta_1 = 20^\circ C$  η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το σύρμα είναι  $I_1 = 2A$ , ενώ σε θερμοκρασία  $\theta_2 = 2520^\circ C$  η ένταση του ρεύματος είναι  $I_2 = 1A$ . Να βρεθεί ο θερμικός συντελεστής αντίστασης του υλικού του σύρματος.
- Δύο αντιστάσεις συνδέονται σε σειρά και στις άκρες του συστήματος συνδέεται πηγή τάσης  $V = 100V$ . Αν είναι  $R_1 = 5\Omega$  και  $R_2 = 15\Omega$ , να βρείτε την ολική αντίσταση του συστήματος, την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το κύκλωμα και την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης.

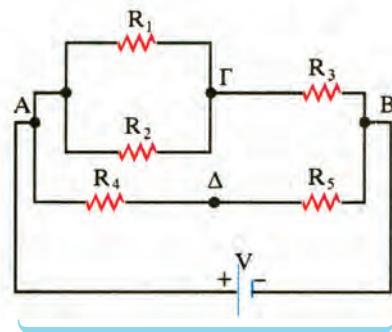
11. Δύο αντιστάσεις συνδέονται παράλληλα και στις άκρες του συστήματος εφαρμόζεται τάση  $V = 120V$ . Αν είναι  $R_1 = 30\Omega$  και  $R_2 = 60\Omega$ , να βρείτε την ολική αντίσταση του συστήματος και την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το κύκλωμα καθε αντίσταση.

12. Στα παρακάτω κύκλωμα να βρείτε:  
 α) την ολική αντίσταση του συστήματος,  
 β) την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης,  
 γ) την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει κάθε αντίσταση.

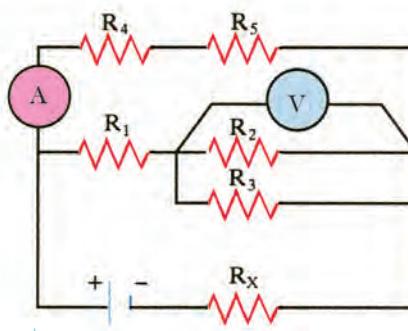


13. Στο παρακάτω κύκλωμα δίνονται:  
 $R_1 = 3\Omega$ ,  $R_2 = 6\Omega$ ,  $R_3 = 8\Omega$ ,  $R_4 = 7\Omega$ ,  $R_5 = 3\Omega$ ,  $V = 60V$ .  
 Να βρείτε:

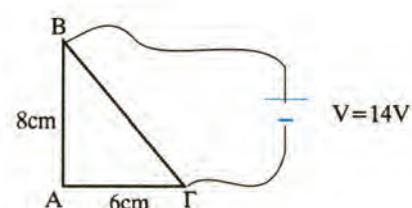
- α) την ολική αντίσταση του συστήματος,  
 β) την τάση στα άκρα κάθε αντίστασης,  
 γ) την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει κάθε αντίσταση.



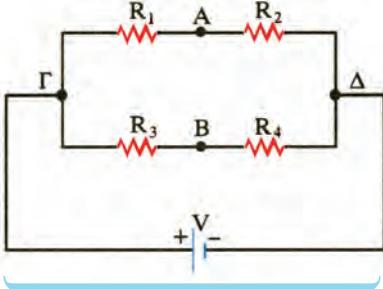
14. Στο παρακάτω κύκλωμα η ένδειξη του βολτόμετρου είναι  $4V$ , η τάση της πηγής είναι  $V = 10V$  και οι αντιστάσεις  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 4\Omega$ ,  $R_3 = 4\Omega$ ,  $R_4 = 5\Omega$  και  $R_5 = 11\Omega$ . Να βρείτε την ένδειξη του αμπερομέτρου και την αντίσταση  $R_x$ . Το βολτόμετρο έχει άπειρη αντίσταση, ενώ το αμπερόμετρο έχει μηδενική αντίσταση, δηλαδή θεωρούνται ιδανικά όργανα.



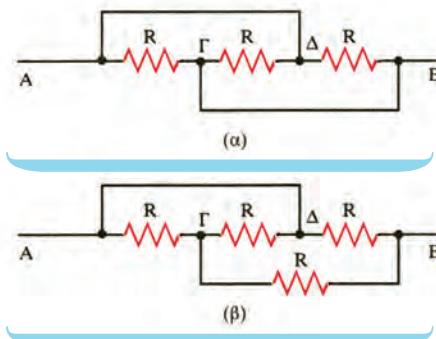
15. Στο παρακάτω κύκλωμα η αντίσταση ανά μονάδα μήκους του σύρματος του τριγώνου είναι  $R^* = 5\Omega/cm$ . Να βρείτε την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει κάθε πλευρά του τριγώνου.



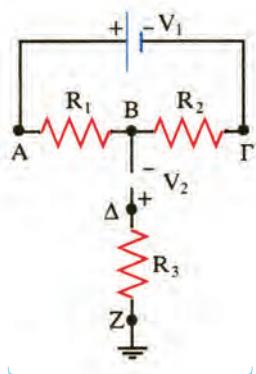
16. Στο παρακάτω κύκλωμα δίνονται  $V = 30V$ ,  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 1\Omega$ ,  $R_3 = 5\Omega$  και  $R_4 = 10\Omega$ .  
 α) Να βρείτε την τάση  $V_{AB}$ .  
 β) Να βρείτε την αντίσταση  $R$  που πρέπει να συνδέσουμε παράλληλα με την  $R_4$ , ώστε  $V_{AB} = 0$ .



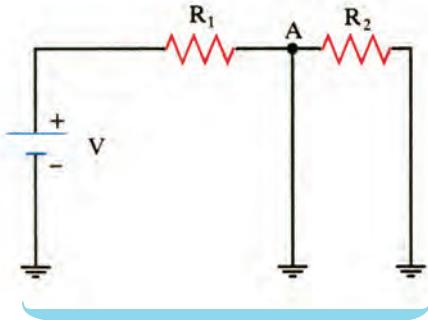
17. Να βρείτε την ολική αντίσταση μεταξύ των Α και Β στις παρακάτω συνδεσμολογίες, αν  $R = 30\Omega$ .



18. Στο παρακάτω κύκλωμα δίνονται:  $R_1 = R_2 = R_3 = 10\Omega$ ,  $V_1 = 20V$ ,  $V_2 = 10V$ . Να βρείτε τα δυναμικά των σημείων A, B, Γ και Δ.



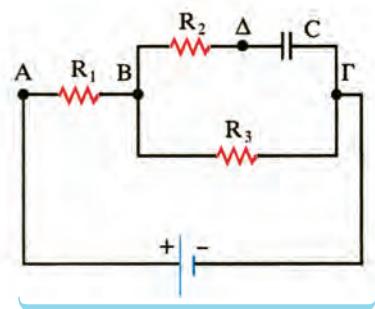
19. Στο παρακάτω κύκλωμα δίνονται:  $V = 10V$ ,  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 20\Omega$ . Να βρείτε την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει τη  $R_1$ . Αν μεταξύ του σημείου A και της γης αντικαταστήσουμε το καλώδιο με αντιστάτη αντίστασης  $R_3 = 20\Omega$ , να βρείτε τις εντάσεις των ρευμάτων που διαρρέουν τους κλάδους του κυκλώματος.



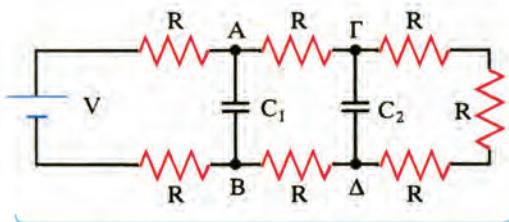
20. Θεωρούμε ένα ισοπαχύ και ομογενή κυκλικό αγωγό κέντρου K και τέσσερα σημεία του A, B, Γ, Δ τέτοια ώστε,  $AB = BG = \Gamma D = \Delta A = 90^\circ$ . Τα σημεία A και B συνδέονται με τάση  $V_{AB} = 60V$ .  
 α) Να βρείτε τη διαφορά δυναμικού  $V_{AG}$ .  
 β) Αν γειώσουμε το Δ, να βρείτε το δυναμικό του σημείου Γ.

21. Δίνονται τέσσερις αντιστάτες με αντιστάσεις  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 4\Omega$ ,  $R_3 = 6\Omega$ ,  $R_4 = 8\Omega$ . Πώς πρέπει να τους συνδέσουμε για να έχουμε ολική αντίσταση  $R_{\text{ol}} = 5\Omega$ ? Αν τότε τροφοδοτήσουμε τη διάταξη με πηγή, ο αντιστάτης  $R_3$  διαρρέεται από ρεύμα έντασης  $I_3 = 2A$ . Να βρείτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αντιστάτη  $R_4$ .

22. Στο παρακάτω κύκλωμα, αν  $C = 20\mu F$ ,  $V = 100V$  και  $R_1 = 40\Omega$ ,  $R_3 = 10\Omega$ , να βρείτε το φορτίο του πυκνωτή.



23. Στο παρακάτω κύκλωμα, να βρείτε το λόγο  $C_1/C_2$  για να έχουν οι πυκνωτές ίσα φορτία.



- 24.** Δύο ίσες αντιστάσεις συνδέονται: α) σε σειρά και β) παράλληλα. Στα άκρα του συστήματος και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζεται η ίδια τάση  $V$ . Σε ποια περίπτωση η ισχύς είναι μεγαλύτερη;
- 25.** Δύο αντιστάσεις  $R_1$  και  $R_2$  ( $R_1 > R_2$ ) συνδέονται α) σε σειρά και β) παράλληλα. Στα άκρα του συστήματος και στις δύο περιπτώσεις εφαρμόζεται η ίδια τάση  $V$ . Σε ποια από τις δύο αντιστάσεις η ισχύς είναι μεγαλύτερη, σε κάθε περίπτωση;
- 26.** Στο παρακάτω κύκλωμα, να βρείτε σε  $J$  τη θερμότητα που εκλύεται σε κάθε αντίσταση σε χρόνο  $t = 1 \text{ min}$ .
- 
- 27.** Ένας θερμοσίφωνας έχει όγκο  $20\ell$  και είναι γεμάτος με νερό θερμοκρασίας  $10^\circ\text{C}$ . Η αντίσταση του θερμοσίφωνα είναι  $10\Omega$  και αυτός συνδέεται με δίκτυο τάσης  $220\text{V}$ . Αν το  $20\%$  της παραγόμενης θερμότητας εκλύεται στο περιβάλλον, να βρείτε σε πόσο χρόνο η θερμοκρασία του νερού θα ανέβει στους  $80^\circ\text{C}$  και πόσο θα στοιχίσει αυτό. Δίνονται: Πυκνότητα νερού:  $d_{\text{νερ}} = 1\text{g/cm}^3$ , Ειδική θερμότητα νερού:  $c_{\text{νερ}} = 1\text{cal/g}\cdot\text{grad}$ , Κόστος =  $0,1\text{€}/\text{KWh}$ .
- 28.** Σε μια ηλεκτρική οικιακή εγκατάσταση λειτουργούν ταυτόχρονα: α) Ηλεκτρική κουζίνα ισχύος  $1,5\text{KW}$ , β) θερμοσίφωνας ισχύος  $2\text{KW}$ , γ) ηλεκτρικό ψυγείο ισχύος  $1\text{KW}$ , δ)  $5$  λαμπτήρες ισχύος  $100\text{W}$  καθένας. Να βρείτε πόσα  $\text{A}$  πρέπει να είναι η γενική ασφάλεια του πίνακα εγκατάστασης και πόσο θα στοιχίσει η λειτουργία τους για  $10\text{h}$ . Δίνεται ότι η τάση λειτουργίας των συσκευών είναι ίση με την τάση του δικτύου, δηλ.  $220\text{V}$  και ότι το  $1\text{KWh}$  κοστίζει  $0,1\text{€}$ .
- 29.** Λαμπτήρας αντίστασης  $R_1 = 40\Omega$  συνδέεται σε σειρά με αντίσταση  $R_2 = 20\Omega$  και στα άκρα του συστήματος εφαρμόζεται τάση  $V = 120\text{V}$ .  
α) Πόση είναι η ισχύς του λαμπτήρα;  
β) Αν παράλληλα με το λαμπτήρα συνδεθεί αντίσταση  $R_3 = 40\Omega$ , πόση είναι η επί τοις εκατό (%) μεταβολή της ισχύος του;
- 30.** Τέσσερις αντιστάτες με αντιστάσεις  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 4\Omega$ ,  $R_3 = 6\Omega$ ,  $R_4 = 8\Omega$  συνδέονται έτσι ώστε, η ολική αντίσταση να είναι  $R_{\text{ολ}} = 11\Omega$ . Αν τροφοδοτήσουμε τη διάταξη με πηγή, η ισχύς του αντιστάτη  $R_3$  είναι  $P_3 = 24\text{W}$ . Να βρείτε την ισχύ του αντιστάτη  $R_4$ .
- 31.** Για τη μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος  $720\text{KW}$  σε απόσταση  $50\text{Km}$  το ποσοστό απώλειας ισχύος στη γραμμή μεταφοράς είναι  $10\%$ . Να βρεθούν οι τάσεις στην είσοδο και την έξοδο της γραμμής, αν η διατομή των χάλκινων αγωγών είναι  $10\text{mm}^2$  και η ειδική αντίσταση του χαλκού  $1,8 \cdot 10^{-8}\Omega \cdot \text{m}$ .
- 32.** Μία ηλεκτρική θερμάστρα αναγράφει τα στοιχεία « $2000\text{W}-200\text{V}$ ». Να βρείτε την αντίστασή της και το ρεύμα κανονικής λειτουργίας της. Πόση θα είναι η ισχύς της, αν συνδεθεί σε δίκτυο τάσης  $160\text{V}$  και ποια ένταση ρεύματος τη διαρρέει τότε;
- 33.** Μια ηλεκτρική θερμάστρα αναγράφει τα στοιχεία « $1000\text{W}-100\text{V}$ ». Να βρείτε την αντίσταση που πρέπει να συνδέσουμε σε σειρά με τη θερμάστρα για να λειτουργήσει σε δίκτυο τάσης  $220\text{V}$ .
- 34.** Μια ηλεκτρική θερμάστρα αναγράφει τα στοιχεία « $100\text{W}-200\text{V}$ ». Η θερμάστρα συνδέεται σε σειρά με λαμπτήρα, που αναγράφει τα στοιχεία « $24\text{W}-12\text{V}$ ». Το σύστημα τροφοδοτείται από δίκτυο τάσης  $200\text{V}$ . Να εξετάσετε αν ο λαμπτήρας λειτουργεί κανονικά.
- 35.** Δύο αντιστάτες με αντιστάσεις  $R_1 = R_2 = 40\Omega$  συνδέονται σε σειρά. Στα άκρα του συστήματος εφαρμόζουμε τάση  $V = 120\text{V}$ . Παράλ-

ληλα στον αντιστάτη  $R_2$  συνδέουμε μια θερμική συσκευή με χαρακτηριστικά κανονικής λειτουργίας  $V_K = 60V$  και  $P_K = 90W$ .

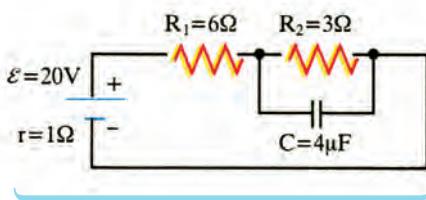
α) Να αποδείξετε ότι η συσκευή δε λειτουργεί κανονικά.

β) Να βρείτε την αντίσταση  $R_3$ , ενός άλλου αντιστάτη που πρέπει να αντικαταστήσει τον αντιστάτη  $R_1$ , ώστε η συσκευή να λειτουργεί κανονικά.

36. Όταν το εξωτερικό κύκλωμα έχει αντίσταση  $R_1 = 1\Omega$ , μια γεννήτρια δίνει ρεύμα έντασης  $I_1 = 5A$ , ενώ, όταν το εξωτερικό κύκλωμα έχει αντίσταση  $R_2 = 4\Omega$ , η γεννήτρια δίνει ρεύμα έντασης  $I_2 = 2A$ . Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  και η εσωτερική αντίσταση  $r$  της γεννήτριας;

37. Όταν οι πόλοι μίας γεννήτριας συνδέονται με εξωτερική αντίσταση  $R_1 = 8\Omega$ , η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι  $V_1 = 24V$ , ενώ όταν οι πόλοι της γεννήτριας συνδέονται με εξωτερική αντίσταση  $R_2 = 13\Omega$ , η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι  $V_2 = 26V$ . Πόση είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E}$  και η εσωτερική αντίσταση  $r$  της γεννήτριας;

38. Στο παραπάνω κύκλωμα να βρείτε το φορτίο του πυκνωτή.



39. Δίνεται πηγή με  $\mathcal{E} = 12V$  και  $r = 1\Omega$ . Η πηγή τροφοδοτεί δύο αντιστάσεις  $R_1 = 2\Omega$  και  $R_2 = 3\Omega$  συνδεμένες σε σειρά. Να βρείτε:

α) την ένταση του ρεύματος, που διαρρέει το κύκλωμα,

β) την πολική τάση της πηγής,

γ) την ισχύ, που παρέχει η πηγή σε όλο το κύκλωμα,

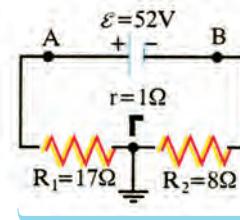
δ) την ισχύ στην εσωτερική αντίσταση της πηγής,

ε) την ισχύ που παρέχει η πηγή στο εξωτερικό κύκλωμα,

στ) την ισχύ σε κάθε μια από τις αντιστάσεις.

40. Σε ένα κύκλωμα συνδέονται κατά σειρά πηγή ηλεκτρικού ρεύματος, διακόπτης, αμπερόμετρο και ωμική αντίσταση  $R$ . Στους πόλους της πηγής συνδέεται βολτόμετρο. Όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός, η ένδειξη του βολτομέτρου είναι 24V. Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός, η ένδειξη του βολτομέτρου είναι 20V και του αμπερομέτρου 2A. Να βρεθεί η ΗΕΔ και η εσωτερική αντίσταση της πηγής. Τα όργανα να θεωρηθούν ιδανικά.

41. Στο παραπάνω κύκλωμα να βρεθούν τα δυναμικά των πόλων της πηγής.



42. Με σύρμα αντίστασης  $16\Omega$  σχηματίζουμε κλειστή περιφέρεια. Δύο σημεία του σύρματος, που απέχουν ένα τέταρτο της περιφέρειας, συνδέονται με ηλεκτρική πηγή ηλεκτρεγερτικής δύναμης 4V και εσωτερικής αντίστασης  $1\Omega$ . Να βρείτε την ένταση του ρεύματος που διαρρέει κάθε κλάδο του κυκλώματος.

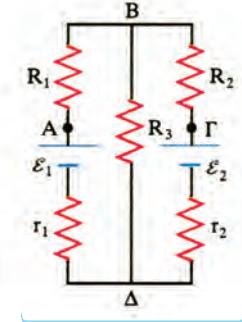
43. Μια γεννήτρια έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E} = 24V$  και εσωτερική αντίσταση  $r = 1\Omega$ . Το εξωτερικό κύκλωμα αποτελείται από μια αντίσταση  $R = 3\Omega$  και έναν ανεμιστήρα. Όταν ο ανεμιστήρας δε στρέφεται, το ρεύμα έχει ένταση  $I_1 = 4A$ , ενώ όταν ο ανεμιστήρας στρέφεται, το ρεύμα έχει ένταση  $I_2 = 2A$ . Να βρεθεί: α) η εσωτερική αντίσταση  $r'$  του ανεμιστήρα, β) η θερμική ισχύς σε όλο το κύκλωμα, όταν ο ανεμιστήρας στρέφεται, γ) η μηχανική ισχύς του ανεμιστήρα, δ) η απόδοση του ανεμιστήρα.

44. Μια γεννήτρια έχει ηλεκτρεγερτική δύναμη  $\mathcal{E} = 12V$  και εσωτερική αντίσταση  $r = 1\Omega$ . Οι

πόλοι της γεννήτριας συνδέονται με ανεμιστήρα. Όταν ο ανεμιστήρας δε στρέφεται, η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι  $V_1 = 8V$ .

Όταν ο ανεμιστήρας στρέφεται η τάση στους πόλους της γεννήτριας είναι  $V_2 = 10V$ . Να βρεθεί: α) η εσωτερική αντίσταση  $r'$  του ανεμιστήρα, β) η θερμική ισχύς σε όλο το κύκλωμα, όταν ο ανεμιστήρας στρέφεται, γ) η μηχανική ισχύς του ανεμιστήρα, δ) η απόδοση του κυκλώματος.

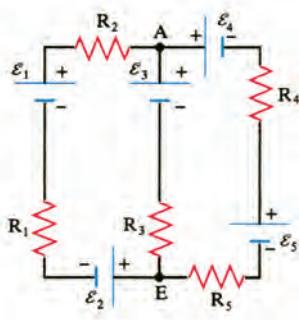
45. Στο κύκλωμα της παραπάνω εικόνας δίνεται ότι:  $\mathcal{E}_1 = 9V$ ,  $\mathcal{E}_2 = 2V$ ,  $r_1 = r_2 = 2\Omega$ ,  $R_1 = R_3 = 4\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ . Να βρεθούν οι εντάσεις των ρευμάτων, που διαρρέουν τους κλάδους του κυκλώματος και η διαφορά δυναμικού  $V_{AB}$ .



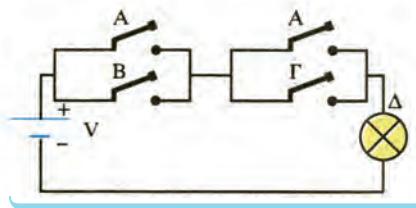
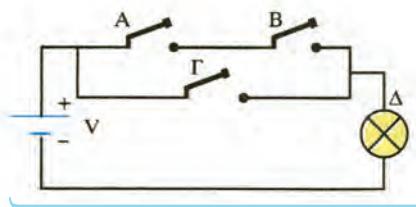
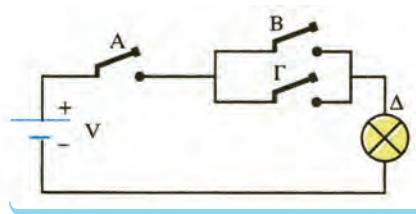
46. Στο κύκλωμα της παραπάνω εικόνας δίνεται ότι:

$$\mathcal{E}_1 = 21V, \mathcal{E}_2 = 3V, \mathcal{E}_3 = 6V, \mathcal{E}_4 = 6V, \mathcal{E}_5 = 11V, R_1 = 4\Omega, R_2 = 2\Omega, R_3 = 3\Omega, R_4 = 1\Omega, R_5 = 4\Omega.$$

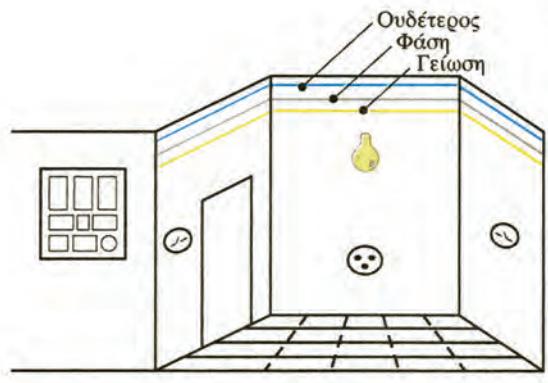
- Να υπολογιστούν οι τιμές των ρευμάτων που διαρρέουν το κύκλωμα και η διαφορά δυναμικού  $V_{AB}$ .



47. Να κατασκευάσετε τον πίνακα αληθείας των παρακάτω κυκλωμάτων.



48. Συμπλήρωσε το κύκλωμα του παρακάτω σχεδιασμένου δωματίου χρησιμοποιώντας κατάλληλα χρώματα.



## Ένθετο

### A. Ηλεκτρική εγκατάσταση σπιτιού ηλεκτρικές συσκευές

Μια μέρα με διακοπή ρεύματος στο σπίτι σου, καταλαβαίνεις πόσο πολύ εξαρτάται η ποιότητα ζωής σου από την ηλεκτρική ενέργεια. Στις επόμενες σελίδες θα περιγράψουμε την ηλεκτρική εγκατάσταση του σπιτιού μας και τις ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιούμε σ' αυτό, όχι για να αντικαταστήσεις τον ηλεκτρολόγο, αλλά για να προστατεύσεις τη ζωή σου και την περιουσία σου από κινδύνους, μιας και δε γνωρίζεις τους κανόνες που ισχύουν στις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις.

Οι ηλεκτρικές συσκευές χαρακτηρίζονται από:

- την τάση λειτουργίας,
- την ισχύ λειτουργίας.

Πολύ λίγες ηλεκτρικές συσκευές του σπιτιού μας λειτουργούν με χαμηλή τάση, όπως τα κουδούνια, τα θυροτηλέφωνα, τα φώτα του κήπου. Χαμηλή τάση θεωρείται η τάση που είναι μικρότερη ή ίση των 42V. Μέχρι 42V θεωρείται ακίνδυνη η τάση. Οι περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν τάση 220V και είναι όλες αυτόνομες, δηλαδή ανεξάρτητες από τη χρήση άλλων συσκευών.

Η σύνδεση που εξασφαλίζει σταθερή τάση και αυτονομία είναι η παράλληλη. Επομένως, τα φώτα, το μαγειρείο, ο θερμοσίφωνας και οι μικροσυσκευές, συνδέονται όλα παράλληλα.

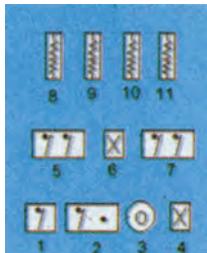
Επειδή η τάση που χρησιμοποιούμε είναι εναλλασσόμενη 220V και συχνότητας 50Hz, πρέπει, προτού συνδέσουμε μια συσκευή, να έχουμε βεβαιωθεί ότι είναι κατάλληλη για αυτό το δίκτυο.

Η ισχύς μιας συσκευής καθορίζει την προσφερόμενη σ' αυτήν ενέργεια στη μονάδα του χρόνου. Αυτό δε σημαίνει ότι μια συσκευή μεγαλύτερης ισχύος έχει καλύτερη απόδοση. Η απόδοση εξαρτάται κατά ένα μέρος από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της συσκευής. Η ισχύς, όμως, καθορίζει το ρεύμα που τη διαρρέει, όταν λειτουργεί και το κόστος ανά ώρα λειτουργίας.

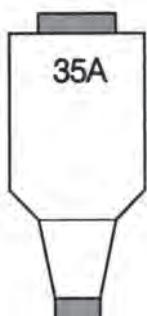
Όπως είπαμε στο σπίτι μας φτάνει εναλλασσόμενη τάση 220V, συχνότητας 50Hz. Η διανομή γίνεται από την ηλεκτρική εταιρεία με εναέρια ή υπόγεια δίκτυα, μέχρι το μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας (ή γνώμονα). Εκεί, ο ένας αγωγός συνδέεται με τη γη και θα τον ονομάζουμε «ουδέτερο», ενώ τον άλλον αγωγό τον ονομάζουμε «φάση». Σε πολλά



Εικόνα 1



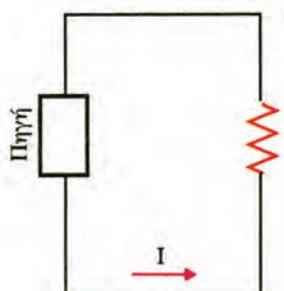
Εικόνα 2



Εικόνα 3



Εικόνα 4



Εικόνα 5

σπίτια, όπου χρειάζεται μεγαλύτερη ενέργεια, αντί για μια φάση (μονοφασική παροχή) συνδέονται τρεις φάσεις (τριφασική παροχή). Επειδή, όμως, ελάχιστες οικιακές συσκευές έχουν τριφασική σύνδεση, αλλά και όσες έχουν λειτουργούν σαν τρεις μονοφασικές συσκευές, δε θα επεκταθούμε σε περιγραφή τριφασικών συνδέσεων.

Στο σπίτι μας επομένων φθάνουν τουλάχιστον 3 αγωγοί (εικ. 1).

Η φάση και ο ουδέτερος είναι ενεργοί αγωγοί, ενώ η γείωση είναι αγωγός προστασίας. Οι αγωγοί από το γνώμονα φτάνουν στο γενικό πίνακα του σπιτιού μας (εικ. 2) ο οποίος πρέπει να περιέχει (με σειρά λειτουργίας) το γενικό διακόπτη (1), τον αυτόματο διακόπτη διαφυγής (2), τη γενική ασφάλεια (3), την ενδεικτική λάμπα (4). Από τη γενική ασφάλεια το ρεύμα διακλαδίζεται σε διάφορα κυκλώματα: 1) στον ηλεκτρικό θερμοσίφωνα (διακόπτης 5, ενδεικτική λάμπα 6, ασφάλεια 9), 2) στο ηλεκτρικό μαγειρέο (διακόπτης 7, ασφάλεια 10), στα κυκλώματα φωτισμού (ασφάλειες 8 και 11).

Ο πίνακας που περιγράφεται είναι ένας τυπικός πίνακας ενός μέσου ελληνικού σπιτιού. Σε μεγαλύτερα σπίτια οι πίνακες είναι πιθανότατα τριφασικοί (με τρεις γενικές ασφάλειες) και περισσότερα κυκλώματα.

Δείτε το γενικό πίνακα του σπιτιού σας και προσδιορίστε τη λειτουργία κάθε εξαρτήματός του.

**Ο Γενικός Διακόπτης** ελέγχει τη λειτουργία όλης της ηλεκτρικής εγκατάστασης του σπιτιού.

Τον διακόπτουμε:

- όταν υπάρχει κίνδυνος ηλεκτροπληξίας,
- όταν υπάρχει πυρκαγιά,
- όταν αλλάζουμε λάμπα,
- όταν ο ηλεκτρολόγος επισκευάζει ή τροποποιεί την εγκατάσταση.

Οι **Ασφάλειες** επιτρέπουν να περάσει μέχρι μια αυστηρά καθορισμένη τιμή έντασης από τους διάφορους αγωγούς. Κάθε αγωγός έχει ορισμένη διατομή. Εάν η ένταση που τον διαρρέει ξεπεράσει ορισμένη τιμή, εμφανίζεται έντονο το φαινόμενο Joule με αποτέλεσμα να υπερθερμανθεί ο αγωγός, να λιώσει η μόνωσή του, να γίνει βραχυκύκλωμα και πιθανά πυρκαγιά.

Η γενική ασφάλεια (εικ. 3) είναι τηκτή, γιατί έχει φυσίγγι που περιέχει ένα λεπτό νήμα και έναν δείκτη. Όταν η ένταση του ρεύματος υπερβεί ορισμένη τιμή (που γράφεται πάνω στην ασφάλεια) τότε το νήμα λιώνει και το κύκλωμα διακόπτεται. Ο δείκτης κρατιέται στη θέση του, όσο το νήμα δεν έχει κοπεί. Σε περίπτωση που καεί η ασφάλεια, πρέπει να **διακόψεις το ρεύμα** με το γενικό διακόπτη και να αντικαταστήσεις το φυσίγγι με άλλο **ίδιας** έντασης. Πριν ξανασυνδέσεις το ρεύμα, μείωσε την κατανάλωσή σου προτιμώντας τις ηλεκτροβόρες συσκευές (μαγειρείο - θερμοσίφωνας). Ο δείκτης κάθε φυσιγγίου έχει χαρακτηριστικό χρώμα ανάλογα με την ένταση.

### Δεν πρέπει ποτέ να επισκευάζουμε το φυσίγγι.

Οι επί μέρους ασφάλειες παλαιότερα ήταν και αυτές τηκτές, σήμερα όμως είναι αυτόματες (εικ. 4). Σε περίπτωση που πέσει μια αυτόματη ασφάλεια, σκέψου πριν αποκαταστήσεις το κύκλωμα.

– Αν υπήρξε βλάβη ή βραχυκύκλωμα, τότε αποσύνδεσε πρώτα τη χαλασμένη συσκευή.

Αν υπήρξε υπερένταση (πολλές ή μεγάλες καταναλώσεις), τότε αποσύνδεσε μέχρι η ένταση να φθάσει σε επιθυμητά όρια.

**Ο αυτόματος διακόπτης διαφυγής** έχει ως στόχο την προστασία μας από διαρροή. Όπως είναι γνωστό ένα κύκλωμα αποτελείται από δύο αγωγούς, έναν προσαγωγής και έναν απαγωγής του ρεύματος (εικ. 5). Εάν ακουμπήσουμε ένα οποιοδήποτε σημείο του κυκλώματος, δε θα έχουμε συνέπειες, διότι δε θα κλείνουμε κύκλωμα. Δεν ισχύει όμως το ίδιο στο δίκτυο της πόλης μας. Έχουμε δει ότι, οι αγωγοί είναι αφενός η φάση και αφετέρου ο ουδέτερος, που είναι ενωμένος με τη Γη (εικ. 6). Έτσι, η τάση μεταξύ φάσης και ουδέτερου είναι 220V, μεταξύ φάσης και γης 220V και μεταξύ ουδέτερου και Γης σχεδόν δεν υπάρχει τάση (εικ. 7).

Έτσι, αν έρθει σε αγώγιμη επαφή κάποιος μ' ένα κύκλωμα του ρεύματος πόλεως, μπορεί να δεχθεί τάση από 0 έως 220V, οπότε ένα δευτερεύον ρεύμα  $I_2$  θα περάσει από το σώμα του, με κίνδυνο την ηλεκτροπληξία. Το ρεύμα αυτό το λέμε ρεύμα διαφυγής (εικ. 8).

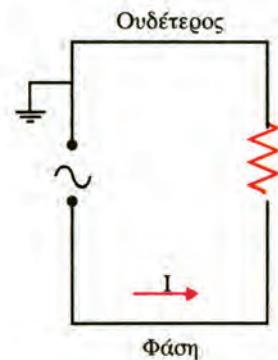
Ο αυτόματος διακόπτης διαφυγής συγκρίνει το  $I_2$  με το  $I_1$ . Κανονικά πρέπει να είναι ίσα. Όταν όμως  $I_2 - I_1 > 30mA$  (καθόσον 30mA θεωρείται το όριο της επικίνδυνης έντασης για τον άνθρωπο) λειτουργεί η προστασία του και διακόπτεται το κύκλωμα σε κλάσμα του δευτερολέπτου (εικ. 8).

**Προσοχή:** Η λειτουργία κάθε αυτόματου διακόπτη διαφυγής πρέπει να ελέγχεται κάθε μήνα. Για τον έλεγχο, πιέζουμε το κουμπί ΤΕΣΤ που έχει, οπότε πρέπει να διακόπτεται το κύκλωμα. Ο έλεγχος πρέπει να γίνεται πάντοτε, αφού έχουμε διακόψει τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών.

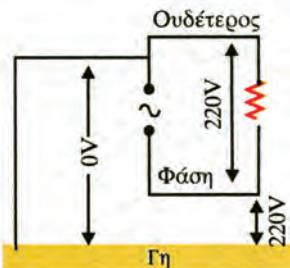
Η **γείωση** μάς προστατεύει από τη διαφυγή ρεύματος με διαφορετικό τρόπο. Το κύκλωμα (εικ. 9) κλείνει μέσω της γης, ένα αξιόλογο ρεύμα περνά από την ασφάλεια, που λιώνει και διακόπτει το κύκλωμα. Γείωση χρειάζονται όλες οι συσκευές που έχουν μεταλλικό περίβλημα.

**Προσοχή!!** Ο ουδέτερος, ενώ είναι συνδεδεμένος με τη γη, είναι **επικίνδυνο** να χρησιμοποιηθεί ως γείωση.

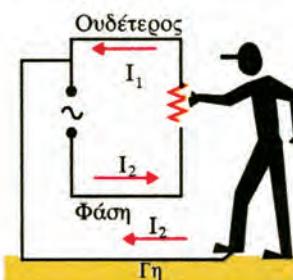
Στις διτλανές εικόνες 10α, 10β, 10γ, φαίνονται οι τρόποι σύνδεσης διαφόρων συσκευών της οικιακής μας εγκατάστασης.



Εικόνα 6



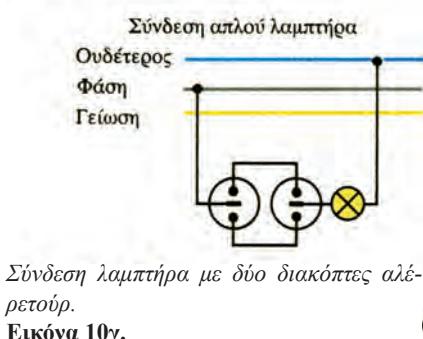
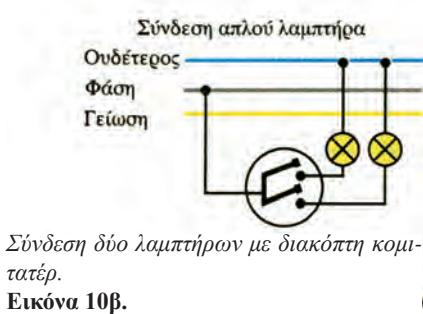
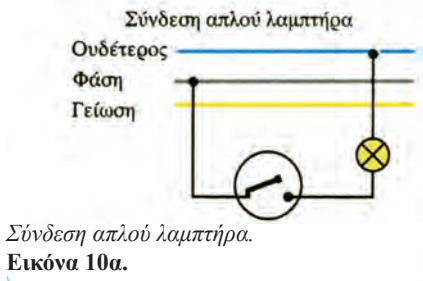
Εικόνα 7



Εικόνα 8



Εικόνα 9



## Ο ηλεκτρισμός χωρίς κινδύνους

### Τι απαγορεύεται να κάνετε:

- 1) Μην αφαιρείτε ή καταστρέφετε τις πινακίδες των ηλεκτρικών συσκευών με τα στοιχεία λειτουργίας και το όνομα του κατασκευαστή.
- 2) Μη χρησιμοποιείτε τις συνηθισμένες ηλεκτρικές συσκευές στο δωμάτιο του λουτρού. Υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.
- 3) Μη συνδέετε πολλές ηλεκτρικές συσκευές στην ίδια πρίζα. Οι αγωγοί υπερθερμαίνονται και υπάρχει φόβος πυρκαγιάς.
- 4) Μην ξεχνάτε το σίδερο στην πρίζα. Υπάρχει φόβος να κάψετε τα ρούχα και να προκαλέσετε πυρκαγιές.
- 5) Μην αποσυνδέετε το φις από την πρίζα, τραβώντας το κορδόνι. Θα φθαρεί και θα προκύψει μεγάλος κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.
- 6) Μη χρησιμοποιείτε συσκευές με φθαρμένα καλώδια. Η μόνωση των καλωδίων καταστρέφεται με την πάροδο του χρόνου και τα καλώδια απαιτούν αντικατάσταση.
- 7) Μην πιάνετε διακόπτες, πρίζες και γενικά ηλεκτρικές συσκευές με βρεγμένα χέρια. Υπάρχει μεγάλος κίνδυνος ηλεκτροπληξίας.
- 8) Μην περνάτε ηλεκτρικά καλώδια από το άνοιγμα θυρών, παραθύρων ή στο δάπεδο, ή κάτω από χαλιά. Θα φθαρούν εύκολα.
- 9) Μην επεμβαίνετε στο εσωτερικό των ηλεκτρικών συσκευών ακόμα και όταν δεν είναι συνδεδεμένες στο ρεύμα, γιατί μπορεί να προκαλέσετε βλάβη, που θα καταστήσει επικίνδυνη τη χρήση της συσκευής.
- 10) Μην περνάτε ηλεκτρικά καλώδια πάνω ή δίπλα από θερμάστρες, καλοριφέρ ή σωλήνες θερμού νερού. Η μόνωσή τους δεν αντέχει συνήθως σε μεγάλες θερμοκρασίες.
- 11) Μην πιάνετε ποτέ τις βιδωτές λάμπες από τον κάλυκα, όταν πρόκειται να τις βιδώσετε ή να τις ξεβιδώσετε. Κινδυνεύετε από ηλεκτροπληξία.
- 12) Μην αφαιρείτε τα καλύμματα και τους προφυλακτήρες του ραδιοφώνου και των άλλων ηλεκτρικών συσκευών σας, προτού τις αποσυνδέσετε από την πρίζα, γιατί τα στοιχεία τους έχουν τάση.
- 13) Μη χρησιμοποιείτε πρόχειρες μπαλαντέζες. Αγοράστε μία μπαλαντέζα ασφαλή, με μονωμένη λαβή, η οποία έχει το λαμπτήρα και την υποδοχή του προφυλαγμένα.
- 14) Μην αφήνετε τα παιδιά να σκαρφαλώνουν σε στύλους ηλεκτρικών δικτύων ή να πετάνε χαρταετούς κοντά στις γραμμές. Ο κίνδυνος ηλεκτροπληξίας είναι σοβαρός.

**15) Αν κυνηγάτε, μη χτυπάτε πουλιά που κάθονται σε καλώδια ή μονωτήρες.**

**Τι επιβάλλεται να κάνετε;**

- 1) Ζητάτε** μόνο από αδειούχο εγκαταστάτη ηλεκτρολόγο να επιθεωρήσει την ηλεκτρική εγκατάσταση, όταν αλλάζετε σπίτι ή γραφείο. Ο ίδιος πρέπει να επιθεωρεί και να επισκευάζει κάθε συσκευή που παρουσιάζει ανωμαλία.
- 2) Διαβάζετε** προσεκτικά τις οδηγίες χρήσης των ηλεκτρικών συσκευών που αγοράζετε.
- 3) Αγοράζετε** σκεύη και μηχανήματα εγκεκριμένα από την αρμόδια υπηρεσία Κρατικού Ελέγχου του Υπουργείου Βιομηχανίας, τα οποία έχουν γραμμένο επάνω τον αριθμό έγκρισης, ή το σήμα έγκρισης από αναγνωρισμένους οργανισμούς. Τα μη εγκεκριμένα μπορεί να είναι ελαττωματικά και επικίνδυνα.
- 4) Βγάζετε** τις ηλεκτρικές συσκευές από την πρίζα, πριν από το καθάρισμα, το ξεσκόνισμα ή τη μετατόπισή τους.
- 5) Εάν** έχετε μικρά παιδιά στο σπίτι, υπάρχει πάντα κίνδυνος να βάλουν μεταλλικά αντικείμενα στους πόλους των πριζών. Χρησιμοποιείτε ή τα ειδικά πλαστικά βύσματα που σφραγίζουν τις ελεύθερες πρίζες ή ειδικές πρίζες ασφαλείας.
- 6) Διακόπτετε** το ρεύμα από το γενικό διακόπτη, πριν αντικαταστήσετε μία λάμπα ή μία ασφάλεια.
- 7) Φωνάζετε** αμέσως έναν αδειούχο εγκαταστάτη ηλεκτρολόγο για την αποκατάσταση οποιασδήποτε ανωμαλίας ή βλάβης. Στο μεταξύ διακόπτετε το ρεύμα από τον κεντρικό ή τον τοπικό διακόπτη.
- 8) Αν** δείτε ηλεκτροφόρο σύρμα κάτω στο δρόμο, μη το πλησιάσετε. Κινδυνεύετε. Ειδοποιήστε αμέσως το πλησιέστερο γραφείο της ΔΕΗ ή το Αστυνομικό Τμήμα.
- 9) Εάν** οδηγείτε όχημα υψηλό, γερανό, εκσκαφέα κ.τ.λ., πρέπει να προσέχετε ιδιαίτερα όταν πλησιάζετε τις ηλεκτροφόρες γραμμές. Πολλές φορές και η απλή προσέγγιση μπορεί να προκαλέσει ηλεκτρικό ατύχημα με τραγικές συνέπειες.

**Αν συμβεί ηλεκτροπληξία, τότε...**

- 1) Διακόψτε** αμέσως την παροχή του ηλεκτρικού ρεύματος από το γενικό διακόπτη.
- 2) Σε** περίπτωση που η ηλεκτροπληξία έχει γίνει σε υπαίθριο χώρο, από βλάβη του δικτύου, αφού απομακρύνετε με ένα στεγνό ξύλο το ηλεκτροφόρο καλώδιο από το θύμα, φροντίστε να ειδοποιηθεί το γρηγορότερο η ΔΕΗ.
- 3) Αποφύγετε** κάθε μεταφορά ή μεγάλη μετακίνηση του θύματος χωρίς πρώτες βοήθειες.
- 4) Αρχίστε** αμέσως εφαρμογή τεχνητής αναπνοής. Αν το θύμα έχει χάσει τις αισθήσεις του, μην προσπαθείτε να του δώσετε να πιει τίποτα.

- 5) Φροντίστε ώστε κάποιος άλλος να ειδοποιήσει αμέσως τον πλησιέστερο γιατρό ή το Σταθμό Πρώτων Βοηθειών.

## B. Οι ημιαγωγοί στη ζωή μας

Στις αρχές τον 1940 ο Μάρβιν Κέλυ, που ήταν δ/ντής έρευνας στα εργαστήρια της Bell, και ο Ράσελ Ολ, που ήταν μέλος του προσωπικού της εταιρείας, έκαναν μία πολύ σημαντική επίδειξη-παρουσίαση. Αυτή αφορούσε το πυρίτιο, έναν ημιαγωγό που τότε μόλις γνώριζαν.

Ο Ολ έδειξε τη συσκευή που ήταν ένα μικρό ορθογώνιο με δύο μεταλλικές επαφές. Χρησιμοποιούσε ένα φλας για να φωτίζει μια μικρή επιφάνεια στο κέντρο. Τότε έπαιρνε στις μεταλλικές επαφές μια φωτοηλεκτρική τάση 0,5V. Βλέπανε το πείραμα και δεν το πιστεύανε. Κι αυτό γιατί η ηλεκτρεγερτική δύναμη που έπαιρνε στις μεταλλικές επαφές ήταν δέκα φορές μεγαλύτερη από αυτή που περιμένανε αφού το πυρίτιο ήταν μαύρο και αδιαπέραστο από το φως. Άρχισαν να πιστεύουν το γεγονός, μόνον αφού έκαναν το πείραμα στο δικό τους εργαστήριο μ' ένα κομμάτι πυριτίου. Αυτό το κομμάτι ήταν η πρώτη επαφή ρ-η.

Τον Ιανουάριο τον 1946, τα εργαστήρια Bell δείχνουν ενδιαφέρον για τη χρήση ημιαγωγών σε κυκλώματα και την κατασκευή στερεάς κατάστασης.

Η έρευνα λοιπόν που θα οδηγούσε στην κατανόηση των ημιαγωγών άρχιζε πάλι. Η ερευνητική ομάδα είχε επικεφαλής τους Γουίλιαμ Σόκλεϋ και Στάνλεϋ Μόργκαν που ήταν θεωρητικοί φυσικοί. Από την πρώτη στιγμή κοινή συνείδηση ήταν ότι βρίσκονται ακόμη μακριά από την πλήρη κατανόηση του φαινομένου. Ένας από τους λόγους ήταν το γεγονός ότι το οξείδιο του χαλκού και άλλοι ημιαγωγοί ήταν πολύ σύνθετα υλικά. Το πυρίτιο και το γερμάνιο ήταν τα πιο απλά. Μετά από πολύ δουλειά στις 23 Δεκεμβρίου 1947 δυο χρυσές επαφές πάχους λιγότερο από ένα χιλιοστό της ίντσας η κάθε μια κατασκευάστηκαν στο ίδιο κομμάτι γερμανίου. Το πρώτο τρανζίστορ ήταν πλέον γεγονός.

Το τρανζίστορ ανακαλύφτηκε μόνον όταν βασικές γνώσεις είχαν αναπτυχτεί σε τέτοιο βαθμό, ώστε ο ανθρώπινος νους να μπορεί να κατανοήσει και να συνθέσει τα φαινόμενα που είχαν παρατηρηθεί. Στην περίπτωση μιας συσκευής με τόσο σημαντικές επιπτώσεις στην τεχνολογία, αξίζει να σημειώσουμε ότι η ανακάλυψή της έγινε από εργασία αφιερωμένη στην κατανόηση των βασικών αρχών των φυσικών φαινομένων, πιο πολύ, παρά σε μια πειραματική μέθοδο παραγωγής χρήσιμων συσκευών.

Πολλές συσκευές που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή περιέχουν ημιαγωγούς και τρανζίστορ και ολοκληρωμένα κυκλώματα. Τέτοιες είναι: τηλεοράσεις και ραδιόφωνα, θερμοστάτες που ελέγχουν τη θέρμανση και την ψύξη, συστήματα

συναγερμού, βίντεο, φούρνοι μικροκυμάτων, ιατρικά μηχανή-  
ματα, συστήματα πλοήγησης αεροπλάνων, ηλεκτρονικές γρα-  
φομηχανές, τηλέφωνα κ.ά.

Ημιαγωγούς περιέχουν και οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές  
(Η/Υ) που τόσο πολύ χρήσιμοι είναι πλέον στη ζωή μας. Οι Η/Υ  
είναι εργαλεία. Στα εργαλεία οι άνθρωποι δίνουν οδηγίες για  
να κάνουν κάτι. Έτσι, στα λογιστικά γραφεία και στις εταιρείες  
χρησιμοποιούνται οι Η/Υ για την ταχύτερη επεξεργασία δεδο-  
μένων. Η ταχύτητα με την οποία κάνουν οι Η/Υ αριθμητικούς  
υπολογισμούς οδήγησε στη χρησιμοποίησή τους στη στατιστική  
και στα εφαρμοσμένα μαθηματικά.

Επίσης, χρησιμοποιούνται σε χημικά εργαστήρια για να αξι-  
ολογούν τις επιθυμητές ιδιότητες μιας νέας υποθετικής χημικής  
ένωσης και να καθορίζει μεθόδους παρασκευής της. Οι Η/Υ χρη-  
σιμοποιούνται στη μηχανική για να υπολογίσουν τάσεις υλικών,  
κραδασμούς, τριβές κ.λπ. Μπορούν να κάνουν υπολογισμούς  
για τη συμπεριφορά σωμάτων μέσα σε υγρά ή αέρια. Ακόμη,  
χρησιμοποιούνται και στην κατασκευή ρομπότ. Επιπλέον, χρη-  
σιμοποιούνται ευρύτατα από την επιστήμη της Ιατρικής στον  
τομέα διάγνωσης των ασθενειών.

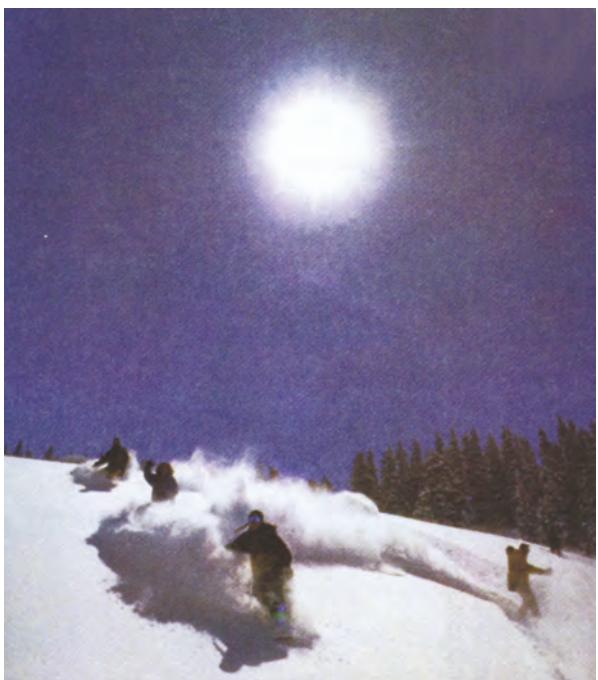
Επίσης, χρησιμοποιούνται στην κοινωνιολογία και στη γλωσ-  
σολογία. Ακόμη ένας Η/Υ μπορεί να υπολογίσει τις αποστάσεις,  
τις ταχύτητες των αστεριών, καθώς και να προβλέψει ουράνια  
φαινόμενα.



# (3 ΦΩΣ)



Το φως κατά το σούρουπο διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.



Ένας πολωτής τύπου polaroid, που έχει προσαρτηθεί στο φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, επιλέγει τα κύματα με μία συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης και εμποδίζει όλα τα άλλα κύματα. Έτσι ο φωτογράφος κατάφερε να αποτυπώσει το στιγμιότυπο της διπλανής εικόνας και φωτογράφισε ακόμα και τον Ήλιο.

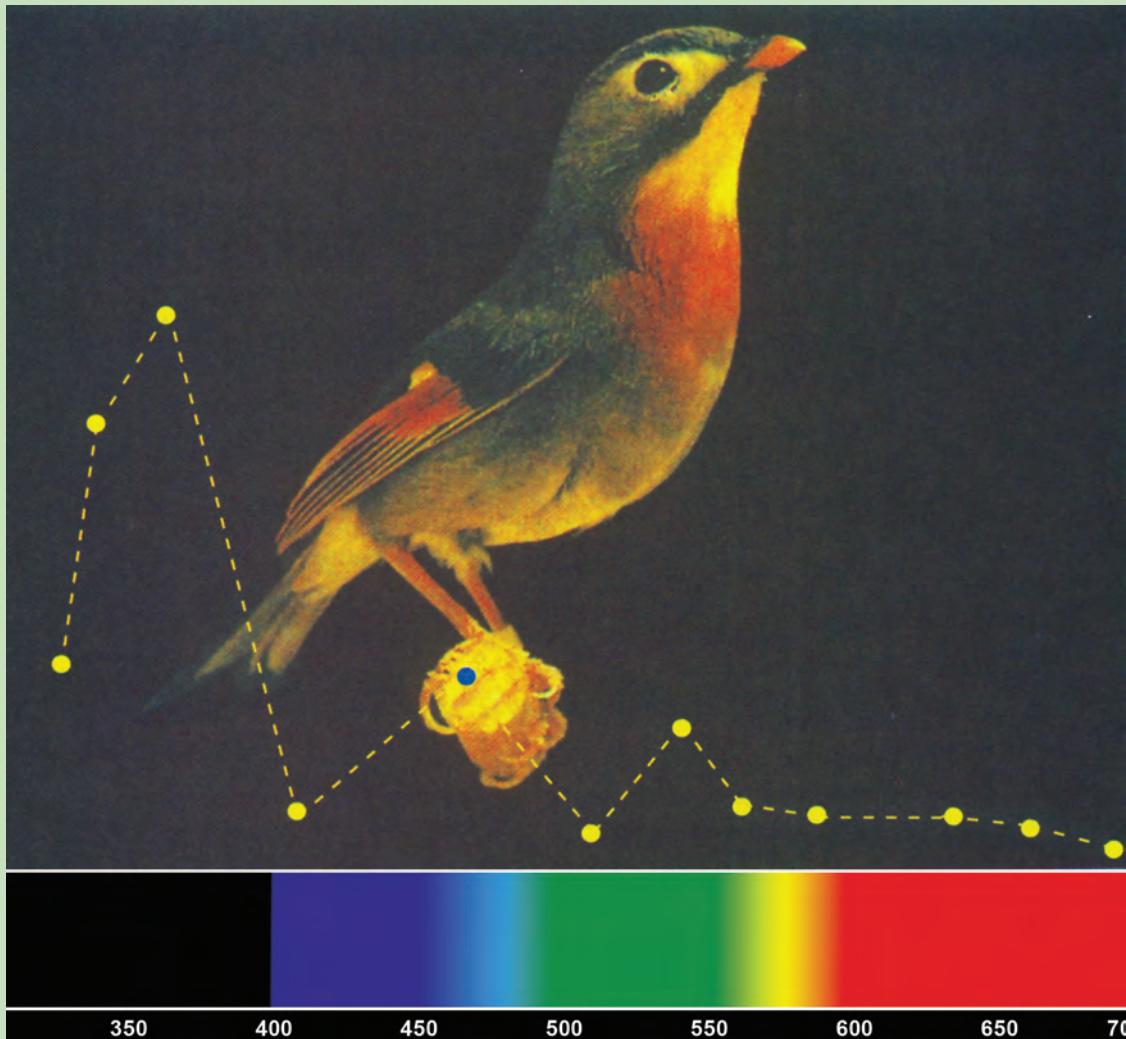
## 3.1 Η φύση του φωτός

## 3.2 Η ταχύτητα του φωτός

## 3.3 Μήκος κύματος και συχνότητα φωτός κατά τη διαδοσή του

## 3.4 Ανάλυση λευκού φωτός και χρώματα

## 3.5 Πόλωση του φωτός

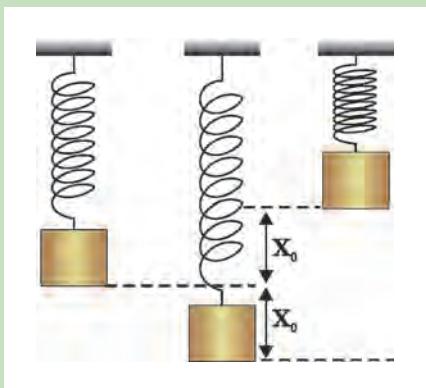


Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού όσον αφορά την αντίληψη των χρωμάτων κυμαίνεται από τα 400nm περίπου (ιώδες φως) έως τα 700nm περίπου (ερυθρό φως). Αυτή η ευαισθησία καθορίζεται κυρίως από τους υποδοχείς που υπάρχουν στα αισθητήρια όργανα της όρασης του ανθρώπου.

Το ερώτημα είναι αν και τα άλλα ζωικά είδη υπόκεινται σε παρόμοιους περιορισμούς της όρασής τους. Πιστεύεται πάντως ότι τα ημερόβια πουλιά διαθέτουν μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να βλέπουν το υπεριώδες φως. Συγκεκριμένα, το «πουλί του Ήλιου» της παραπάνω εικόνας έχει ευαισθησία από τα 330nm (υπεριώδες φως) έως τα 680nm (ερυθρό φως).

# Εισαγωγικό ένθετο

## Ταλάντωση



Το σώμα του διπλανού σχήματος είναι εξαρτημένο από το άκρο του ελατηρίου σταθεράς  $k$ . Αν το απομακρύνουμε από τη θέση ισορροπίας του κατά  $x_0$  και ύστερα το αφήσουμε ελεύθερο, θα εκτελέσει μια κίνηση η οποία θα επαναλαμβάνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα. Μια τέτοια κίνηση, όπως αυτή του συστήματος ελατηρίου - μάζας, ονομάζεται **απλή αρμονική ταλάντωση**.

- Η μέγιστη απομάκρυνση  $x_0$  του σώματος από τη θέση ισορροπίας του ονομάζεται **πλάτος** της ταλάντωσης.
- Ο χρόνος που χρειάζεται το σώμα, για να περάσει διαδοχικά δύο φορές από το ίδιο σημείο της τροχιάς του και με την ίδια φορά, ονομάζεται **περίοδος  $T$** . Είναι φανερό ότι σε χρόνο μιας περιόδου το σώμα εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση.

- Το πηλίκο του αριθμού των ταλαντώσεων ( $N$ ), που κάνει το σώμα σε χρόνο  $t$ , προς το χρόνο  $t$  ονομάζεται **συχνότητα  $f$** . Δηλαδή:

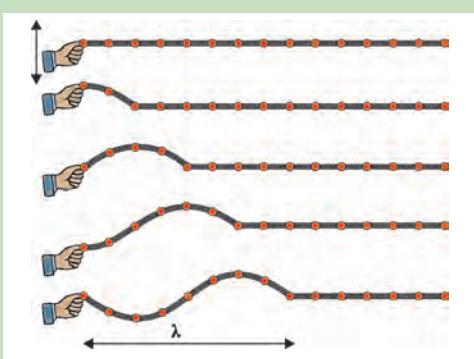
$$f = N/t, \text{ για } t=T \text{ και } N=1, \text{ παίρνουμε: } f=1/T$$

- Επίσης εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι η **ενέργεια** του ταλαντωτή εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} k x_0^2$$

## Κύμα

Ονομάζουμε **μηχανικό κύμα** κάθε διαταραχή που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα σε ένα υλικό ελαστικό μέσο. Το ελαστικό υλικό μέσο φανταζόμαστε ότι αποτελείται από στοιχειώδεις δομικές μονάδες που έχουν ελαστική σύζευξη μεταξύ τους, δηλαδή συνδέονται με ελαστικές δυνάμεις. Αν προκαλέσουμε μια διαταραχή σε ένα σημείο του ελαστικού μέσου, αυτή μεταδίδεται στην επόμενη, στη μεθεπόμενη κ.ο.κ. δομική μονάδα με πεπερασμένη ταχύτητα, η οποία ονομάζεται **ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής**.



Στο διπλανό σχήμα το χέρι μας κρατάει το ένα άκρο οριζόντιου σχοινιού και εκτελεί αρμονική ταλάντωση σε κατακόρυφη διεύθυνση με συχνότητα  $f$ . Παρατηρούμε ότι αυτή η ταλάντωση διαδίδεται από το χέρι μας σε κάθε δομική μονάδα του σχοινιού προς τα δεξιά. Τέτοια κύματα στα οποία τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ονομάζονται **εγκάρσια κύματα**.

Η συχνότητα ταλάντωσης των μορίων του μέσου είναι ίδια με τη συχνότητα ταλάντωσης του χεριού μας, που στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί την πηγή του κύματος. Η συχνότητα αυτή είναι η συχνότητα του κύματος.

- **Ταχύτητα διάδοσης ( $c$ )** του κύματος σε κάποιο μέσο ονομάζουμε το πηλίκο της απόστασης  $x$ , που διανύει το κύμα (διαταραχή) κατά μήκος μιας διεύθυνσης διάδοσης, σε χρόνο  $t$  προς το χρόνο αυτό. Δηλαδή ισχύει:

$$c = x / t \quad (1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης c εξαρτάται από τη φύση του ελαστικού μέσου διάδοσης.

- **Μήκος κύματος (λ)** ονομάζουμε την απόσταση που διατρέχει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Αν στην (1) θέσουμε όπου  $x=\lambda$  και  $t=T$ , παίρνουμε:

$$c = \lambda / T \text{ και, αν θέσουμε όπου } T = 1/f, \text{ παίρνουμε: } c = \lambda f$$

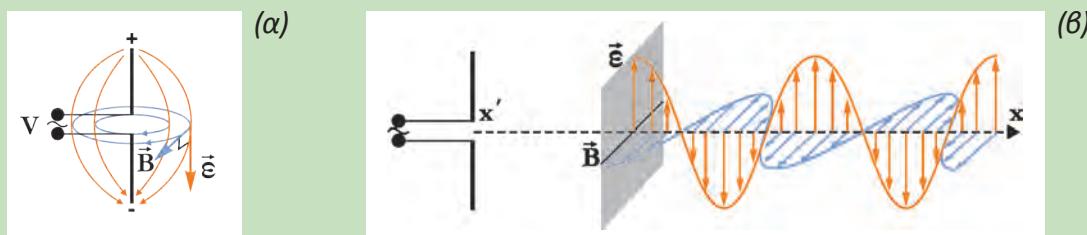
Η σχέση  $c = \lambda f$  ισχύει για οποιοδήποτε αρμονικό κύμα και ονομάζεται **θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής**. Τονίζουμε εδώ ότι η συχνότητα f καθορίζεται από την πηγή και ότι με τη συχνότητα αυτή ταλαντώνονται όλα τα σωματίδια του ελαστικού μέσου κατά τη διάδοση του κύματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ένα ορισμένο κύμα, που διαδίδεται σε διαφορετικά ελαστικά μέσα, θα έχει την ίδια συχνότητα σε όλα τα μέσα, αλλά διαφορετικές τιμές μήκους κύματος και ταχύτητας διάδοσής του.

## Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ο ήχος στο ραδιόφωνο και ο ήχος και η εικόνα στην τηλεόραση λαμβάνονται από αυτές τις συσκευές χάρη στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που στέλνονται από τις κεραίες των ραδιοφωνικών και των τηλεοπτικών σταθμών αντίστοιχα.

Όμως τι είναι και πώς παράγονται αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

Ας θεωρήσουμε μια κεραία, δηλαδή ένα συρμάτινο αγωγό, η οποία τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση V. Η κεραία διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα σ' αυτήν εκτελούν αρμονική ταλάντωση. Γύρω από την κεραία δημιουργείται ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, των οποίων οι δυναμικές γραμμές, κάποια χρονική στιγμή, εικονίζονται στο σχήμα (α).



Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αυτή η μεταβολή διαδίδεται, απομακρυνόμενη από την κεραία, κατά μήκος της ευθείας x', που αποτελεί και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διαδιδόμενη αυτή διαταραχή ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δε χρειάζεται κάποιο ελαστικό μέσο για να διαδοθεί. Διαδίδεται ακόμα και στο κενό με ταχύτητα  $c_0$ , γνωστή ως ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό. Σε κάθε θέση της ευθείας x' οι εντάσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους, καθώς επίσης και προς τη διεύθυνση διάδοσης (σχήμα β). Γ' αυτό λέμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο κύμα.

Όπως στο μηχανικό κύμα τα μόρια του μέσου εκτελούν αρμονικές ταλαντώσεις, έτσι και στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα η ένταση ε του ηλεκτρικού και η ένταση B του μαγνητικού πεδίου, σε κάθε σημείο, ταλαντώνονται αρμονικά.

Τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;

### 3.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Από πολύ παλιά, στους αρχαιότατους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνων συζητήσεων, διαφωνιών, επιχειρημάτων και αντεπιχειρημάτων.

Το φως ήταν και είναι μια βασική αιτία της ύπαρξης ζωής στον πλανήτη μας. Ας μην ξεχνάμε ότι τα φυτά, με τη φωτοσύνθεση, μετατρέπουν την ενέργεια που παρέχει το φως του Ήλιου σε χημική ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούν στη συνέχεια για την ανάπτυξή τους. Το φως είναι αυτό που κάνει ορατά τα αντικείμενα που βρίσκονται στον πλανήτη μας, τη Γη, και στο Σύμπαν. Με τη βοήθεια του φωτός «επικοινωνούμε» με τα άστρα και τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος αντλώντας χιλιάδες πληροφορίες για τη σύστασή τους (φασματοσκοπική μέθοδος).

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβιολόσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης.

Σ' αυτή ακριβώς τη σκέψη, δηλαδή τη σωματιδιακή φύση του φωτός, στηρίχτηκε, πολύ μεταγενέστερα, ο Newton (Νεύτωνας), για να διατυπώσει, με βάση τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός, δηλαδή:

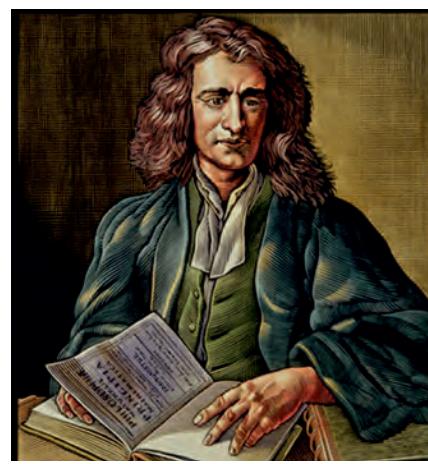
$$\text{γωνία πρόσπτωσης } (\pi) = \text{γωνία ανάκλασης } (\alpha)$$

Δύο σημαντικά φαινόμενα, η περίθλαση και η συμβολή του φωτός, απασχόλησαν τους φυσικούς Christian Huygens (Κρίστιαν Χόυγκενς, 1629-1695) και Thomas Young (Τόμας Γιανγκ, 1773-1829) το 1670 και 1803 αντίστοιχα. Οι Huygens και Young, μέσα από πειραματικές διαδικασίες πάνω στα φαινόμενα αυτά, απέδειξαν ότι το φως έχει κυματική φύση και συγκεκριμένα ότι είναι εγκάρσια κύματα.

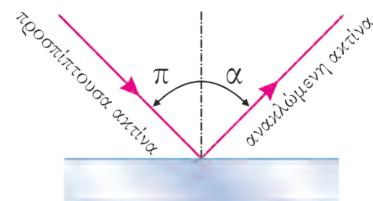
Το αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865, όταν ο Maxwell (Μάξγουελ), αναπτύσσοντας τη μεγαλειώδη θεωρία του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή συναντάμε στις αρχές του 20ού αιώνα το Max Planck (Μαξ Πλανκ, 1858-1947), ο οποίος χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα.

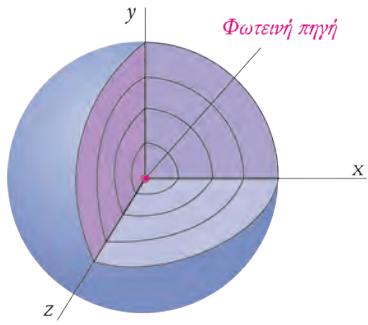
Ο Αριστοτέλης αναφέρει: Ο Εμπεδοκλής ... έλεγε ότι το φως, όντας κάτι το σωματιδιακό, που απορρέει από το φωτίζον σώμα, φθάνει πρώτα στο μεταξύ της Γης και του ουρανού χώρο και ύστερα σε μας. Μας διαφεύγει όμως η κίνησή του αυτή λόγω της ταχύτητάς του.



Isaac Newton



James Clark Maxwell  
Το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

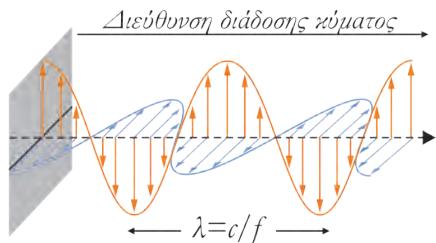


Σφαιρικά μέτωπα κύματος διαδίδονται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις ξεκινώντας από μία πηγή φωτός. **Εικόνα 3.1-1**

Στην πιο σύγχρονη εποχή ο Einstein (Αϊνστάιν) χρησιμοποιώντας τη σωματιδιακή φύση του φωτός ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (εκπομπή ηλεκτρονίων από μέταλλα, όταν πάνω σ' αυτά προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Σήμερα πιστεύουμε στη διπλή φύση του φωτός, δηλαδή ότι το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

Η ερώτηση λοιπόν «τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;» είναι εσφαλμένη, γιατί **το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο**.



Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος μακριά από την πηγή, που διαδίδεται οριζόντια. Οι εντάσεις  $E$  και  $B$  των πεδίων είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και γι' αυτό τα κύματα αντά ονομάζονται εγκάρσια. **Εικόνα 3.1-2**

### Η κυματική φύση του φωτός.

#### Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell

Η πιο σημαντική εξέλιξη του 19ου αιώνα στη μελέτη παραγωγής και διάδοσης του φωτός υπήρξε το έργο του Maxwell, ο οποίος το 1873 διατύπωσε τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, **το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις**.

Ο Maxwell απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα. Δηλαδή είναι ένα πεδίο με δύο χαρακτηριστικά, την ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση  $B$  του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται από θέση σε θέση και από στιγμή σε στιγμή. Γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως δύο τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη ( $E$  και  $B$ ). Οι εντάσεις των πεδίων  $E$  και  $B$  παίρνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή, δηλαδή έχουν την ίδια φάση και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα (σχήμα 3.1-2).

Οι συνηθισμένες πηγές ορατού φωτός δίνουν τέτοιες συχνότητες (ή μήκη κύματος) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ώστε να γίνονται αντιληπτά από το μάτι. Το μήκος κύματος των κυμάτων αυτών κυμαίνεται από 400nm έως και 700nm περίπου.

Επίσης εύκολα διαπιστώνουμε ότι το φως μεταφέρει ενέργεια (π.χ. ένα οποιοδήποτε σώμα, όταν εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία, θερμαίνεται). Η ενέργεια αυτή είναι ενέργεια ηλεκτρικού και ενέργεια μαγνητικού πεδίου, η οποία παράγεται από τις πηγές και μεταφέρεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Την ορθότητα της θεωρίας του Maxwell απέδειξε πειραματικά ο Hertz (Χερτς) το 1887, ο οποίος παρήγαγε, μέσω ταχέων

ηλεκτρικών ταλαντώσεων, κύματα της ίδιας φύσης με αυτήν του φωτός αλλά με μικρότερη συχνότητα.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ( $c$ ), η συχνότητα ( $f$ ) και το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) συνδέονται με τη σχέση  $c = \lambda f$  η οποία ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής.

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής} \quad (3.1)$$

### Η σωματιδιακή φύση του φωτός

#### Θεωρία των κβάντων

Παρ' όλο που η κλασική θεωρία (αυτή που αναπτύχθηκε πριν από το 1922) του ηλεκτρομαγνητισμού ερμήνευσε ορισμένα φαινόμενα του φωτός, όπως η συμβολή, η περίθλαση, η πόλωση κ.ά., δεν κατόρθωσε να ερμηνεύσει κάποια άλλα φαινόμενα που σχετίζονται με την **αλληλεπίδραση της φωτεινής ακτινοβολίας με την ύλη**.

Πολλά πειραματικά δεδομένα δεν μπορούσαν να ερμηνευτούν με την παραδοχή ότι το φως είναι μόνο κύμα. Το πιο σημαντικό από τα πειράματα αυτά ήταν εκείνο της μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Για την ερμηνεία της εκπομπής και της απορρόφησης του φωτός δεν αρκούσαν μόνο κάποιες επεκτάσεις της κλασικής θεωρίας. Στην πραγματικότητα χρειάστηκε κάτι πιο ριζικό από μια απλή επέκταση.

Το 1900 ο Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε τη θεωρία των κβάντων φωτός, την οποία εφάρμοσε αργότερα ο Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

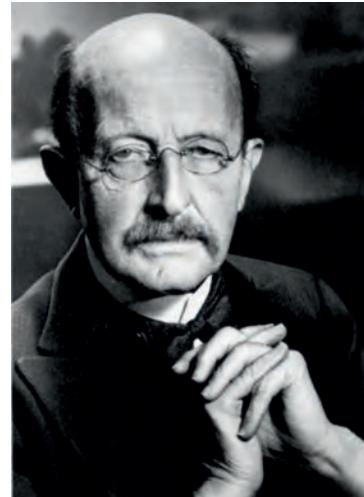
Σύμφωνα με την **κβαντική θεωρία του Planck**, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά **ασυνεχώς**. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός ή φωτόνια**. Από το άτομο λοιπόν δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα αλλά φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας  $E$ .

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση  $E = hf$ .

$$E = hf \quad \text{Ενέργεια φωτονίου} \quad (3.2)$$

Το  $h$  είναι μια σταθερά, που ονομάζεται **σταθερά του Planck**, και έχει τιμή  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$  και  $f$  η συχνότητα.

Όταν προσπίπτει φως πάνω στα μέταλλα, τότε μεταφέρεται ενέργεια από ένα φωτόνιο σε ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου του με-



Max Planck (1858-1947).

Μία δέσμη φωτός αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός ή φωτόνια**.

Με τον όρο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφουμε την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια των μετάλλων, όταν προσπίπτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ορατή ή υπεριώδης, κτλ.

Ο όρος **κβάντα** προέρχεται από τη λατινική λέξη **quantum** = ποσό

Όταν μια ποσότητα είναι κβαντωμένη, σημαίνει ότι παίρνει μόνο διακριτές (ορισμένες) τιμές, δηλαδή το σύνολο τιμών δεν είναι συνεχές. Ας θυμηθούμε το ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό είναι κβαντωμένο, διότι δεν παίρνει οποιεσδήποτε τιμές, αλλά μόνο ακέραια πολλαπλάσια της τιμής του φορτίου ή ηλεκτρονίου:  $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ .

τάλλου. Δηλαδή το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα από τα φωτόνια του φωτός σαν να είναι το φωτόνιο σωματίδιο.

Η θεωρία των κβάντα δεν αναιρεί την κυματική φύση του φωτός. Το φωτόνιο έχει και κυματικές ιδιότητες, για παράδειγμα η ενέργειά του εξαρτάται από τη συχνότητά του, που είναι κατ' εξοχήν κυματική ιδιότητα.

### 3.2 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Επειδή το φως διαδίδεται στο κενό και στον αέρα με πολύ μεγάλη ταχύτητα, περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , οι πρώτες προσπάθειες για τη μέτρησή της απέτυχαν. Ο Γαλιλαίος ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός χρησιμοποιώντας απλά μέσα για την εποχή εκείνη. Έτσι τοποθέτησε δύο παρατηρητές πάνω σε δύο πύργους των τειχών της Πίζας, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 5 μίλια. Κάθε παρατηρητής κρατούσε από ένα φανάρι που ήταν κλειστό και, όποτε χρειαζόταν, άνοιγε το παραθυράκι. Όταν ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι του φαναριού του, ο δεύτερος ήταν συνεννοημένος να ανοίξει το δικό του αμέσως μόλις έβλεπε το φως του πρώτου.

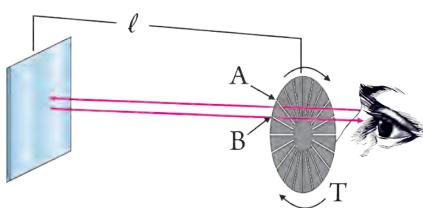
Αν λοιπόν μετρούσε κανείς το χρόνο που περνούσε από τη στιγμή που ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι έως τη στιγμή που έβλεπε το φως του δεύτερου παρατηρητή (και με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση), με μια απλή διαίρεση θα μπορούσε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Όμως ο χρόνος αντίδρασης των δύο παρατηρητών ήταν πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειαζόταν το φως για να διανύσει τη μεταξύ τους απόσταση και έτσι η μέθοδος αυτή δεν ήταν εφαρμόσιμη και οδήγησε σε αποτυχία. Έδειξε όμως ότι η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη, ώστε είναι αδύνατο να μετρηθεί με τέτοια χονδροειδή μηχανικά μέσα.

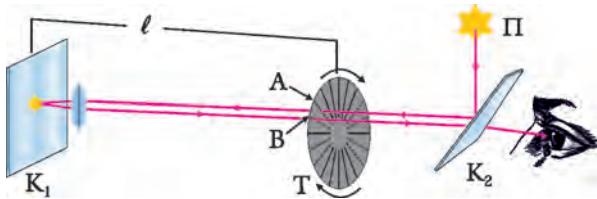
Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Πρώτος μέτρησε χονδρικά την ταχύτητα του φωτός ο Δανός αστρονόμος Ole Roemer (Όλε Ρέμερ, 1644-1710). Ο Roemer υπολόγισε ότι η τιμή της ταχύτητας του φωτός είναι περίπου  $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Η μέτρηση αυτή έχει ιστορική αξία, διότι, εκτός του ότι προσέγγιζε αρκετά την πραγματική τιμή της ταχύτητας, έδειξε για πρώτη φορά ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πεπερασμένη τιμή.

#### Η μέθοδος του Fizeau

Το 1849 ο H.L. Fizeau (Φιζέ), ένας Γάλλος φυσικός, κατάφερε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με απλά μηχανικά μέσα. Στο διπλανό σχήμα παριστάνεται μια απλουστευμένη μορφή της διάταξης που χρησιμοποίησε. Η βασική ιδέα της μεθόδου ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το φως, για να διανύσει την απόσταση «πήγαινε - έλα» μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π και ενός κατόπτρου  $K_1$ , που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (σχήμα 3.2-3).

Η ακτίνα που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή Π ανακλάται στο «ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο»  $K_2$  και, αφού διανύσει την απόσταση  $\ell$ , προσπίπτει στο κάτοπτρο  $K_1$ . Η ανακλώμενη ακτίνα επιστρέφει από την ίδια διαδρομή, μεταφέροντας το είδωλο της πηγής Π, οπότε γίνεται αντιληπτή από κάποιο παρατηρητή που βρίσκεται πίσω από το  $K_2$ . Μεταξύ του παρατηρητή και του κατόπτρου  $K_1$  παρεμβάλλεται οδοντωτός τροχός  $T$ , ο οποίος περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε η ακτίνα φωτός να





Στο πείραμα Fizeau, που εικονίζεται δίπλα, η απόσταση  $\ell$  μεταξύ του οδοντωτού τροχού  $T$  και του κατόπτρου  $K_1$  ήταν περίπου 8630m ή 5,36 miles. Απλοποιήσαμε τη διάταξη παραλείποντας τη σειρά των φακών και κατόπτρων που χρησιμοποίησε ο Fizeau. **Εικόνα 3.2-3**

διακόπτεται και άλλοτε όχι. Όταν ο τροχός περιστρέφεται αργά, ο παρατηρητής θα βλέπει φως και σκοτάδι. Αυξάνοντας διαρκώς την ταχύτητα του τροχού θα έλθει η στιγμή που ο παρατηρητής δε θα βλέπει φως. Αυτό θα συμβεί, όταν το φως, που θα διέλθει από το διάκενο  $A$  του τροχού, αφού ανακλαστεί στο κάτοπτρο  $K_1$ , συναντήσει το επόμενο δόντι του τροχού.

Αν αυξήσουμε ακόμα περισσότερο την ταχύτητα του τροχού, το φως θα γίνει πάλι ορατό, γιατί θα διέλθει από το επόμενο διάκενο  $B$ . Ας υποθέσουμε τώρα ότι ο τροχός έχει  $N$  δόντια και περιστρέφεται με συχνότητα  $f$  (στροφές ανά δευτερόλεπτο). Τότε ο χρόνος  $t$ , για να περιστραφεί ο τροχός κατά ένα δόντι, είναι:

$$t = \frac{\text{χρόνος μιας περιστροφής}}{\text{αριθμός δοντιών}} = \frac{T}{N} = \frac{f}{N} = \frac{1}{f \cdot N} \quad (1)$$

Στο χρόνο αυτό το φως έχει διανύσει την απόσταση  $2\ell$  «πήγαινε - έλα». Άρα η ταχύτητα του φωτός θα είναι:

$$c = \frac{\text{απόσταση}}{\text{χρόνος}} = \frac{2\ell}{t} \text{ και λόγω της (1)} c = 2\ell \cdot f \cdot N \quad (3.3)$$

Με γνωστά τα μεγέθη  $\ell, f, N$  υπολογίζουμε την ταχύτητα  $c$ .

Ο Fizeau γνώριζε την απόσταση  $\ell$ , τον αριθμό των δοντιών του τροχού και τη συχνότητα περιστροφής και έτσι υπολόγισε ότι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός είναι  $3,1 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Ακριβέστερα πειράματα που έγιναν αργότερα, έδωσαν την τιμή  $2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Για την ταχύτητα του φωτός γνωρίζουμε σήμερα ότι:

- Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.
- Η ταχύτητα του φωτός έχει την ίδια τιμή σε όλα τα συστήματα αναφοράς και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής (αξίωμα του Einstein).

Το τέχνασμα της «διακοπτόμενης δέσμης», τροποποιούμενο κατάλληλα, χρησιμοποιείται σήμερα για τη μέτρηση της ταχύτητας των νετρονίων και άλλων σωμάτιδίων.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 1

Υποθέτουμε ότι ο οδοντωτός τροχός του πειράματος Fizeau έχει 360 δόντια. Αυξάνοντας διαρκώς (έχουμε αρχίσει από το μηδέν) τη συχνότητα περιστροφής του τροχού, ο παρατηρητής βλέπει συνεχώς, για κάποια τιμή συχνότητας,

το είδωλο της φωτεινής πηγής. Υπολογίστε τη συχνότητα και την περίοδο περιστροφής του τροχού.

#### ΛΥΣΗ

Χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.3 υπολογίζουμε πρώτα τη συχνότητα περιστροφής. Έχουμε:

$$c = 2\ell \cdot f \cdot N, \text{ οπότε } f = \frac{c}{2\ell \cdot N} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 8630 \text{ m} \cdot 360}$$

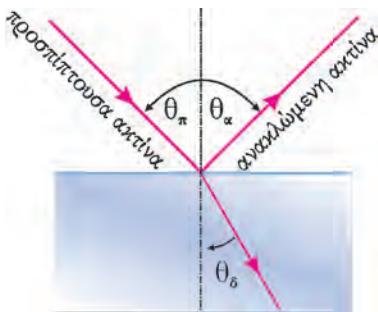
$$\text{ή } f = 48,28 \text{ Hz.}$$

Η περίοδος δίνεται από τη σχέση

$$T = 1/f.$$

$$\text{Άρα } T = \frac{1}{48,28} \text{ s} = 0,0207 \text{ s}$$

### 3.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ



Ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο.  $\theta_\pi$  είναι η γωνία πρόσπτωσης,  $\theta_\delta$  η γωνία διάθλασης και  $\theta_\alpha$  η γωνία ανάκλασης. Ισχύει:  $\theta_\delta < \theta_\pi$

Εικόνα 3.3-4α

#### Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός

Όταν μία φωτεινή δέσμη, που διαδίδεται σε ένα μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια που χωρίζει το αρχικό μέσο διάδοσης από ένα άλλο οπτικό μέσο, τότε ένα μέρος της ανακλάται προς το αρχικό μέσο διάδοσης, ενώ ένα άλλο μέρος συνεχίζει να διαδίδεται στο δεύτερο μέσο. Στο σχήμα 3.3-4α βλέπουμε πώς ανακλώνται οι ακτίνες, όταν προσπίπτουν σε μια λεία επιφάνεια, για παράδειγμα από τον αέρα στην επιφάνεια ενός γυαλιού. Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν, στο σημείο ανάκλασης, γωνίες  $\theta_\pi$  και  $\theta_\alpha$ , αντίστοιχα, με την κάθετο προς την ανακλώσα επιφάνεια. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι  $\theta_\pi = \theta_\alpha$ .

Οι ακτίνες που εισέρχονται στο γυαλί αλλάζουν διεύθυνση διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάθλαση. Όταν οι ακτίνες εισέρχονται από τον αέρα στο γυαλί, τότε οι διαθλώμενες ακτίνες πλησιάζουν την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια (σχήμα 3.3-4α), ενώ, όταν εισέρχονται από το γυαλί στον αέρα, απομακρύνονται από την κάθετο.

Στο πείραμα του 3.3-4β βλέπουμε ότι οι ακτίνες φωτός που εκπέμπονται από μία φωτεινή πηγή η οποία βρίσκεται στον πυθμένα της πισίνας, όταν εξέρχονται από το νερό στον αέρα, εκτρέπονται από την πορεία τους και μας κάνουν να βλέπουμε τη φωτεινή πηγή πιο ψηλά από ότι πραγματικά βρίσκεται.

#### Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη

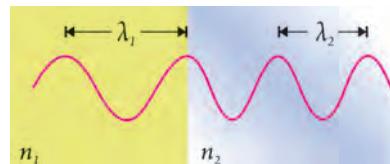
Ο λόγος για τον οποίο το φως διαθλάται, καθώς διέρχεται από το ένα υλικό μέσο στο άλλο, είναι ότι η ταχύτητά του έχει διαφορετικές τιμές στα δύο μέσα.

Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα  $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Μέσα όμως σε κάποιο υλικό η ταχύτητα του φωτός είναι πάντα μικρότερη από τη  $c_0$ . Για διευκόλυνσή μας ορίζουμε ένα συντελεστή που ισούται με το πηλίκο της ταχύτητας  $c_0$  του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα  $n$  μέσα σε κάποιο υλικό και ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** ή του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο}} = \frac{c_0}{c} \quad (3.4)$$

Επειδή η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό, από τον ορισμό προκύπτει ότι ο δείκτης διάθλασης για οποιοδήποτε υλικό είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα, ενώ για το κενό ισχύει  $n = 1$ .

Όταν το φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων (π.χ. από τον αέρα στο γυαλί), η συχνότητα  $f$  παραμένει αμετάβλητη. Τούτο γίνεται σαφές, αν σκεφτούμε το εξής: το φως είναι κύμα, άρα ο αριθμός των μηκών κύματος που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου, είναι ίσος με τον αριθμό των μηκών κύματος που διέρχονται από αυτήν ανά μονάδα χρόνου. Αν δε συνέβαινε αυτό, η διαχωριστική επιφάνεια έπρεπε να δημιουργεί νέα κύματα ή να εξαφανίζει τα ήδη υπάρχοντα. Δεν έχει παρατηρηθεί όμως τέτοιος μηχανισμός, που σημαίνει ότι



η συχνότητα παραμένει σταθερή, καθώς το φως διέρχεται από τη διαχωριστική επιφάνεια.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε διαδοχικά:  $c_0 = \lambda_0 \cdot f$  για το κενό και  $c = \lambda \cdot f$  για οπτικό μέσο διαφορετικό του κενού. Διαιρώντας τις δύο σχέσεις κατά μέλη προκύπτει:  $\frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$  και, λόγω της 3.4, είναι:  $n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ . Τελικά ισχύει:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad (3.5)$$

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος  $\lambda_0$  στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματός του, όταν εισέρχεται σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$ .

Ας δούμε τι συμβαίνει, όταν το φως διαδίδεται σε δύο διαφορετικά υλικά με δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$ , αντίστοιχα, με  $n_2 > n_1$ . Εφαρμόζοντας την 3.5 για τα δύο οπτικά μέσα, έχουμε:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (1) \quad \text{και} \quad \lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (2)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{και, επειδή } n_2 > n_1, \text{ προκύπτει } \lambda_1 > \lambda_2$$

Η τελευταία ανισότητα μας πληροφορεί ότι το μήκος κύματος στο οπτικά πυκνότερο μέσο, δηλαδή στο μέσο που έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, έχει μικρότερη τιμή από αυτή στο οπτικά αραιότερο. Επειδή για το κενό είναι εξ ορισμού  $n=1$ , γίνεται κατανοητό ότι το μήκος κύματος θα έχει τη μεγαλύτερη τιμή  $\lambda_0$  στο κενό. Ως μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος για το ορατό φως χρησιμοποιείται υποπολλαπλάσιο του 1m, το 1νανόμετρο ( $1nm=10^{-9}m$ ).

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι: όταν το φως διαδίδεται σε ένα οπτικό μέσο, διατηρεί αμετάβλητα την ταχύτητα ( $c$ ), το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) και τη συχνότητα ( $f$ ), ενώ, όταν αλλάζει οπτικό μέσο, τότε αλλάζουν τα μεγέθη  $c$  και  $\lambda$ , αλλά διατηρείται σταθερό το  $f$ , που είναι και η συχνότητα της πηγής που παράγει το φως.

Εικόνα που δείχνει τη μείωση του μήκους κύματος, όταν το φως διέρχεται από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο. Ισχύει στην περίπτωση αυτή  $n_2 > n_1$  και  $\lambda_2 < \lambda_1$ . Το οπτικά πυκνότερο μέσο είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης. **Εικόνα 3.3-4γ**

Δείκτες διάθλασης διάφορων υλικών που έχουν υπολογιστεί με φως μήκους κύματος  $\lambda_0=589nm$  (κίτρινο χρώμα του νατρίου στο κενό) **Πίνακας 3.1**.

Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρια ( $0^{\circ}\text{C}$ , 1Atm)	
Αέρας	1,000293
Διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ )	1,00045
<b>Στερεά</b>	
Πάγος ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,309
Ορυκτό άλας ( $\text{NaCl}$ )	1,544
Χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ )	1,544
Φθορίτης ( $\text{CaF}_2$ )	1,434
Ορυκτό ζιρκόνιο ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ )	1,923
Αδάμας (C)	2,417
<b>γαλοί (τυπικές τιμές)</b>	
Υγρά σε θερμοκρασία $20^{\circ}\text{C}$	
Μεθανόλη ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )	1,329
Νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,333
Αιθανόλη ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	1,360
Τετραχλωράνθρακας ( $\text{CCl}_4$ )	1,460
Γλυκερίνη	1,473
Βενζόλιο	1,501

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 2

**Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης στο εσωτερικό του ανθρώπινου ματιού:** Φωτεινή ακτίνα μήκους κύματος  $\lambda_0=589nm$ , που παράγεται από λυχνία νατρίου, προσπίπτει από τον αέρα σε ανθρώπινο μάτι. Στο υδατοειδές υγρό μέσα στο βολβό του ματιού το μήκος κύματος έχει τιμή  $\lambda=439nm$ . Να υπολογίσετε το δείκτη δι-

άθλασης του υδατοειδούς υγρού, καθώς και την ταχύτητα και τη συχνότητα της φωτεινής ακτίνας στο υγρό αυτό.

### ΛΥΣΗ

Χρησιμοποιούμε τη σχέση 3.5. Με το σκεπτικό ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι περίπου ένα, τα μήκη κύματος στον αέρα και στο κενό έχουν την ίδια τιμή  $\lambda_0$ . Άρα:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \Rightarrow n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow n = \frac{589 \text{ nm}}{439 \text{ nm}} \Rightarrow n = 1,34$$

Βλέποντας τον πίνακα 3.1 διαπιστώνουμε ότι ο δείκτης διάθλασης η έχει περίπου την ίδια τιμή με το νερό.

Ας βρούμε την ταχύτητα τώρα. Ισχύει:

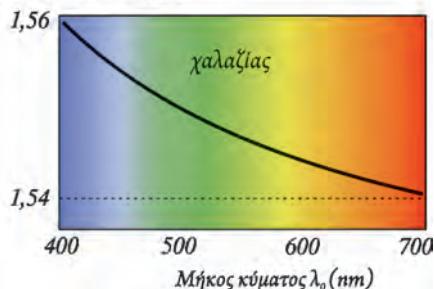
$$n = \frac{c_0}{c} \Rightarrow$$

$$c = \frac{c_0}{n} \Rightarrow c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,34} \Rightarrow c = 2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Τέλος, από τη σχέση  $c=\lambda f$ , έχουμε διαδοχικά:

$$c = \lambda \cdot f \Rightarrow f = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{439 \text{ nm}} \Rightarrow f = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

### 3.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ

Δείκτης διάθλασης ( $n$ )

Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος. Εικόνα 3.4-5

#### Διασκεδασμός και πρίσμα

Στην προηγούμενη υποενότητα είδαμε ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος. Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός.

Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός. Στο σχήμα 3.4-5 απεικονίζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης ενός οπτικού υλικού (χαλαζία) από το μήκος κύματος  $\lambda_0$  στο κενό. Η τιμή του  $n$ , όπως βλέπουμε, μειώνεται, καθώς αυξάνεται η τιμή του μήκους κύματος. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος.

#### Ανάλυση του λευκού φωτός

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο ανάλυσης του λευκού φωτός, ας δούμε αρχικά πώς προκαλείται η εκτροπή (αλλαγή κατεύθυνσης) μιας μονοχρωματικής ακτίνας φωτός από ένα πρίσμα. Στο σχήμα 3.4-6 έχουμε μία τέτοια ακτίνα φωτός, που προσπίπτει πλάγια στην αριστερή επιφάνεια ενός πρίσματος. Επειδή ο δείκτης διάθλασης του πρίσματος είναι μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του οπτικού μέσου που τον περιβάλλει, η ακτίνα διαθλάται προσεγγίζοντας την κάθετη  $xx'$ , ενώ, όταν η ακτίνα εξέρχεται από το πρίσμα, απομακρύνεται από την κάθετη. Βλέπουμε ότι η εξερχόμενη ακτίνα έχει εκτραπεί τελικά από την αρχική της πορεία κατά γωνία  $\phi$ . Η γωνία  $\phi$  ονομάζεται γωνία εκτροπής.

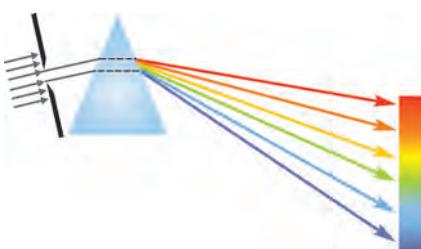
Έστω τώρα ότι έχουμε μία δέσμη λευκού φωτός που προσπίπτει πάνω σε ένα πρίσμα (σχήμα 3.4-7α). Οι ακτίνες που εξέρχονται από το πρίσμα εκτρέπονται και διασκορπίζονται στο χώρο εξόδου, ενώ ταυτόχρονα το λευκό φως αναλύεται σε μία πολύχρωμη συνεχή ταινία, που περιλαμβάνει γνωστά χρώματα. Η ταινία αυτή ονομάζεται φάσμα του λευκού φωτός.

Τα χρώματα του φάσματος, κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος, είναι: ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό

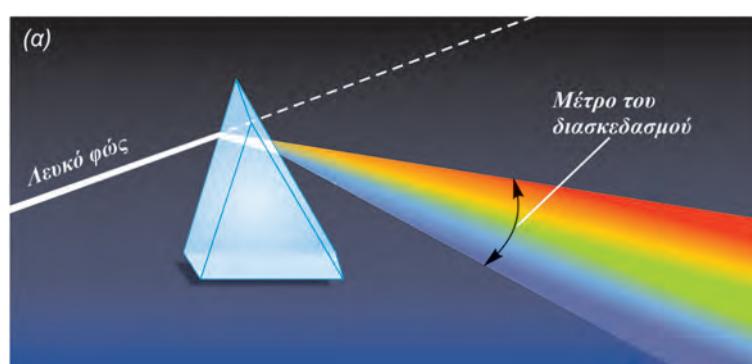
Ακτίνα φωτός που διαθλάται από πρίσμα εκτρέπεται κατά γωνία  $\phi$ . Εικόνα 3.4-6

Το φαινόμενο «διασκεδασμός» μελετήθηκε για πρώτη φορά το 17ο αιώνα από το Ρενέ Ντεκάρτ και το Νεύτωνα. Ο Νεύτωνας προσπάθησε να αναλύσει περαιτέρω τις μονοχρωματικές ακτίνες του φάσματος σε άλλες απλούστερες, αλλά δεν τα κατάφερε. Το μόνο που παρατήρησε ήταν ότι το χρώμα διαχεύταν περισσότερο, αλλά παρέμενε ως έχει.

(β)



(α) Απεικόνιση του διασκεδασμού που προκαλείται σε δέσμη λευκού φωτός από ένα πρίσμα. Η ταινία των εξερχόμενων χρωμάτων ονομάζεται φάσμα. (β) Τα βασικά χρώματα του φάσματος. Εικόνα 3.4-7



και ιώδες (σχήμα 3.4-7β). Τα χρώματα αυτά δεν αναλύονται σε άλλα απλούστερα και, αν τα ανασυνθέσουμε, θα αναπαραγάγουμε το λευκό φως.

Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 3.4-7β βλέπουμε ότι οι ιώδεις ακτίνες εκτρέπονται περισσότερο, ενώ οι ερυθρές λιγότερο από τις άλλες που βρίσκονται ανάμεσά τους. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε χρώματος. Συμπερασματικά, το φως εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα:

- **Κάθε μονοχρωματική ακτίνα φωτός, όταν διαδίδεται σε ένα συγκεκριμένο οπτικό μέσο, χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό μήκος κύματος, που είναι η ταυτότητα του χρώματος για το μέσο αυτό.**
- **Ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου έχει διαφορετική τιμή για κάθε χρώμα (πίνακας 3.2).**
- **Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής.**

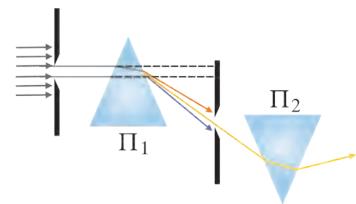
Η Αντίληψη ενός χρώματος παραμένει η ίδια σε οποιοδήποτε μέσο διάδοσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η συχνότητα, η οποία είναι υπεύθυνη για το ερεθίσμα στο μάτι, είναι αμετάβλητη σε όλα τα μέσα διάδοσης του φωτός. Δηλαδή το κόκκινο χρώμα φαίνεται κόκκινο απ' όσα οπτικά μέσα και αν περάσει το φως πριν φθάσει στο μάτι.

### Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης

Έχουμε παρατηρήσει πολλές φορές, τις βροχερές μέρες με λίγο Ήλιο, να εμφανίζεται στον ουρανό το ουράνιο τόξο. Εκείνη τη στιγμή η φύση συνδυάζει δύο φαινόμενα, το διασκεδασμό και την ολική ανάκλαση, και μας δίνει την ευκαιρία να χαρούμε την ωραιότητα των αποτελεσμάτων του συνδυασμού αυτού. Το φως, όπως έρχεται πίσω από τον παρατηρητή, αφού διαθλαστεί και υποστεί ολική ανάκλαση στις μικρές σταγόνες της βροχής, εξέρχεται από αυτές και κατευθύνεται προς τα μάτια του. Ο διασκεδασμός προκαλεί τη διάθλαση των χρωμάτων σε διαφορετικές γωνίες και έτσι έχουμε την ανάλυση του φωτός στα χρώματα της ίριδας.



Η Ισμήνη με το Φαίδωνα στο Μυστρά με φόντο το ουράνιο τόξο και την κοιλάδα των Ενρώτα. Εικόνα 3.4-10



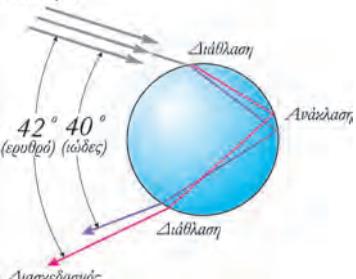
Το μονοχρωματικό φως δεν αναλύεται σε άλλες απλούστερες ακτινοβολίες. Το πρίσμα  $\Pi_1$  αναλύει το λευκό φως, όμως το  $\Pi_2$  απλώς εκτρέπει την κίτρινη ακτίνα. Εικόνα 3.4-8

### Πίνακας 3.2

Δείκτης διάθλασης στεφανύαλου

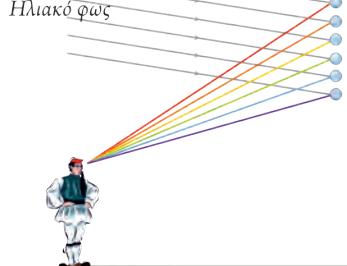
Χρώμα	Δείκτης διάθλασης
Ιώδες	1,532
Μπλε	1,528
Πράσινο	1,519
Κίτρινο	1,517
Πορτοκαλί	1,514
Κόκκινο	1,513

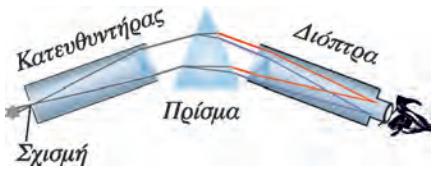
Ηλιακό φως



Διάθλαση ηλιακού φωτός σε σταγόνα βροχής. Εικόνα 3.4-9

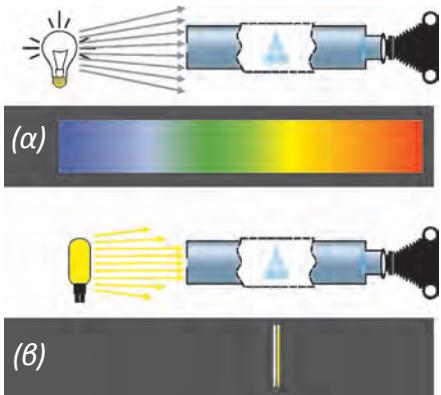
Ηλιακό φως





**Αρχή λειτουργίας των φασματοσκοπίου.** Με τη διόπτρα παρατηρούμε τα διάφορα χρώματα του φάσματος. Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε το φάσμα, υπάρχουν ειδικές φωτογραφικές μηχανές που προσαρμόζονται στο προσοφθάλμιο σύστημα της διόπτρας.

Εικόνα 3.4-11



Φάσματα εκπομπής που αποτυπώνονται στο φίλμ των φασματογράφων: (α) λαμπτήρα πυρακτώσειως, (β) λαμπτήρα νατρίου. Εικόνα 3.4-12

Στις αρχές του 19ου αιώνα είχε ανακαλυφθεί ότι κάθε στοιχείο παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο σύνολο μηκών κύματος στο γραμμικό του φάσμα. Με την πάροδο του χρόνου η αναγνώριση στοιχείων από τα φάσματά τους εξελίχθηκε σε μια χρήσιμη τεχνική ανάλυσης. Το χαρακτηριστικό φάσμα ενός ατόμου φαινόταν να σχετίζεται με την εσωτερική του δομή, αλλά οι προσπάθειες να εξηγηθεί αυτό με την κλασική μηχανική και την ηλεκτροδυναμική δεν ήταν επιτυχείς. Τη λύση την έδωσε η εισαγωγή της κβαντομηχανικής στο παιχνίδι της έρευνας, η οποία οδήγησε σε δραστικές αλλαγές των απόψεων για τη φύση της ακτινοβολίας και την αλληλεπίδρασή της με την ύλη.

## Το φασματοσκόπιο

Το **φασματοσκόπιο** (ή **φασματογράφος**) πρίσματος είναι ένα όργανο με το οποίο γίνεται η ανάλυση μίας δέσμης φωτός και η μελέτη του φάσματός της. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη, τον **κατευθυντήρα**, το **πρίσμα** και τη **διόπτρα**. Το φως μίας πηγής εισέρχεται στον κατευθυντήρα, εξέρχεται από αυτόν, έτσι ώστε οι ακτίνες να είναι μεταξύ τους παράλληλες, προσπίπτει στο πρίσμα και αναλύεται στο φάσμα του. Οι εξερχόμενες ακτίνες παρατηρούνται από τη διόπτρα. Περιστρέφοντας το πρίσμα ή τη διόπτρα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα μήκη κύματος.

Αν στη διόπτρα προσαρμόσουμε το φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, το φάσμα αποτυπώνεται στο φίλμ (**φασματογράφος**) και έτσι μπορούμε να μελετάμε τα μήκη κύματος του φωτός που εκπέμπει μία πηγή, λόγου χάρη το πυρακτωμένο νήμα ενός λαμπτήρα φωτισμού (λαμπτήρας πυρακτώσεως), ή μία λυχνία ατμών νατρίου.

## Φάσματα εκπομπής

Το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή ονομάζεται **φάσμα εκπομπής** της πηγής αυτής. Τα φάσματα εκπομπής των διάφορων πηγών διακρίνονται σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

**(α) Συνεχή φάσματα εκπομπής.** Συνεχή φάσματα παίρνουμε, όταν εξετάζουμε με το φασματογράφο το φως που εκπέμπουν στερεά και υγρά σώματα τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη θερμοκρασία (διάπυρα σώματα). Αν η πηγή του φωτός είναι, για παράδειγμα, ο λαμπτήρας πυρακτώσεως, τότε το φάσμα είναι μία συνεχής ταινία χρωμάτων, ακριβώς όπως την περιγράφαμε προηγουμένως. Επίσης συνεχές φάσμα εκπέμπουν ο λιωμένος σίδηρος, ο λιωμένος χαλκός κτλ.

Επειδή τα συνεχή φάσματα, που εκπέμπονται από διάφορα διάπυρα σώματα, δε διαφέρουν μεταξύ τους, η μελέτη τέτοιων φασμάτων δεν μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη φύση του σώματος, αν δηλαδή το σώμα αποτελείται από κάποιο συγκεκριμένο υλικό, όπως π.χ. σίδηρο, χαλκό κτλ. Η μοναδική πληροφορία που παίρνουμε είναι για τη θερμοκρασία του υλικού.

**(β) Γραμμικά φάσματα εκπομπής.** Αν εξετάζουμε με το φασματοσκόπιο το φως που εκπέμπουν θερμά αέρια ή ατμοί, τότε διαπιστώνουμε ότι το φάσμα τους, που αποτυπώνεται στο φίλμ, αποτελείται από διακριτές χρωματιστές γραμμές, χαρακτηριστικές για το είδος των αερίων ή των ατμών. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ή συχνότητα. Αν κάνουμε, λόγου χάρη, φασματοσκοπική ανάλυση του φωτός που εκπέμπει η λυχνία ατμών νατρίου, θα παρατηρήσουμε ότι το φάσμα του αποτελείται από δύο κίτρινες γραμμές πολύ κοντά μεταξύ τους (σχήμα 3.4-12).

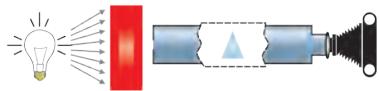
## Φάσματα απορρόφησης

Αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα υλικό μέσο, λόγου χάρη ένα δοχείο που να περιέχει έγχρωμο υγρό ή μια έγχρωμη γυάλινη πλάκα (σχήμα 3.4-13), θα διαπιστώσουμε ότι ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος λείπουν και στη

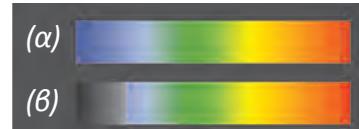
Θέση τους εμφανίζονται σκοτεινές περιοχές. Τα φάσματα αυτά τα ονομάζουμε **φάσματα απορρόφησης**, γιατί οι σκοτεινές περιοχές οφείλονται στο ότι οι ακτίνες ορισμένων χρωμάτων έχουν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους από το υλικό μέσο. Τα φάσματα απορρόφησης τα διακρίνουμε σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

**(α) Συνεχή φάσματα απορρόφησης** δίνουν τα έγχρωμα διαφανή στερεά και υγρά. Αν το υλικό που φωτίζουμε είναι γυάλινη κόκκινη πλάκα, τότε παίρνοντας το φάσμα θα παρατηρήσουμε ότι έχουν απορροφηθεί ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος εκπομπής. Συγκεκριμένα, από την κόκκινη πλάκα διέρχονται μόνο οι ακτίνες που βρίσκονται στην περιοχή του ερυθρού (σχήμα 3.4-13β).

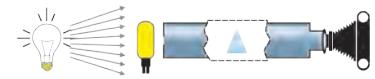
**(β) Γραμμικά φάσματα απορρόφησης** δίνουν τα αέρια ή οι ατμοί. Αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές. Έτσι, αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα διαφανές δοχείο με ατμούς νατρίου (σχήμα 3.4-13γ), τότε στο συνεχές φάσμα του λευκού φωτός του λαμπτήρα θα παρατηρήσουμε σκοτεινές γραμμές, στις θέσεις ακριβώς εκείνες που θα εμφανίζονταν οι κίτρινες γραμμές του φάσματος εκπομπής των ατμών του νατρίου. Δηλαδή οι ατμοί του νατρίου έχουν απορροφήσει τις κίτρινες ακτινοβολίες που εκπέμπουν, όταν ακτινοβολούν.



Τυπική διάταξη για την αποτύπωση των φάσματος απορρόφησης. Το κόκκινο γναλί επιτρέπει τη διέλευση ακτίνων με μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του ερυθρού. **Εικόνα 3.4-13**



(α) Συνεχές φάσμα εκπομπής λευκού φωτός. (β) Συνεχές φάσμα απορρόφησης κόκκινου γναλιού.



(γ) Γραμμικό φάσμα απορρόφησης ατμών Na.



Φάσμα υπεριώδους - γκρίζα περιοχή στο φύλμα πέρα από το ιώδες. **Εικόνα 3.4-14**



Δύο φωτογραφίες του ίδιου αγαλματίδιου τραβηγμένες η (α) στο ορατό φως και η (β) στο υπεριώδες.

**Εικόνα 3.4-15**

## Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία

### Υπεριώδης ακτινοβολία

Το συνεχές φάσμα που παίρνουμε, όταν αναλύουμε με το φασματοσκόπιο το λευκό φως, τελειώνει στο ένα άκρο με ιώδες φως, ενώ στο άλλο με ερυθρό. Όπως φαίνεται από το σχήμα 3.4-14, το ορατό φως, δηλαδή τα μήκη κύματος που αντιλαμβάνεται το μάτι μας, έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι το φάσμα του λευκού φωτός, που εκπέμπει η φωτεινή πηγή, περιορίζεται σε αυτά τα όρια.

Αν παρατηρήσουμε με ειδικό φασματογράφο τη φωτογραφική πλάκα στην οποία αποτυπώνεται το φάσμα, θα διαπιστώσουμε ότι πέρα από το όριο της ιώδους περιοχής η πλάκα έχει αμαυρωθεί. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος, υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπεριώδης ακτινοβολία**.

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελείται από ακτινοβολίες που έχουν μήκη κύματος μικρότερα των 400nm και μεγαλύτερα του 1nm περίπου.

Αν και η υπεριώδης ακτινοβολία δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, μερικές από τις ιδιότητές της μας πληροφορούν για την ύπαρξή της:

1. Προκαλεί αμαύρωση των φωτογραφικών πλακών.
2. Προκαλεί το φθορισμό σε διάφορα σώματα, όταν δηλαδή προσπίπτει σε ορισμένα σώματα, τότε αυτά εκπέμπουν χαρακτηριστικές ορατές ακτινοβολίες.
3. Συμμετέχει στη μετατροπή του οξυγόνου της ατμόσφαιρας σε οζον.



Η φωτογραφία έχει ληφθεί με φίλμ εναίσθητο στο υπέρυθρο φως. Η αντίστοιχη του ορατού φωτός δεν ήταν δυνατό να ληφθεί, γιατί τη στιγμή της λήψης επικρατούσε σκοτάδι.

Εικόνα 3.4-16

- Όταν απορροφάται από υλικά σώματα (όπως άλλωστε και οι ακτίνες οποιουδήποτε χρώματος), προκαλεί τη θέρμανσή τους.
- Υπεριώδης ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος προκαλεί βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, οι οποίες μπορεί να είναι τέτοιες, ώστε να οδηγήσουν και στην εμφάνιση καρκίνου. Κατά τη διάρκεια της ηλιοθεραπείας το μαύρισμα του δέρματος οφείλεται στη μελανίνη που παράγει ο οργανισμός, για να προστατευθεί από την υπεριώδη ακτινοβολία.
- Χρησιμοποιείται στην Ιατρική για πλήρη αποστείρωση διάφορων εργαλείων.

### Υπέρυθρη ακτινοβολία

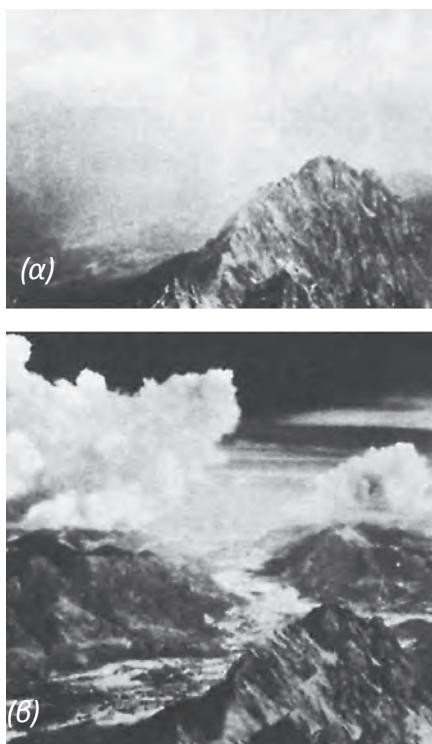
Αναλύοντας το λευκό φως ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως πάνω σε πέτασμα παίρνουμε το φάσμα του. Αν τοποθετήσουμε ένα ευαίσθητο θερμόμετρο πάνω στο πέτασμα και το μετακινήσουμε από το ιώδες προς το ερυθρό, θα παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία του να αυξάνεται. Πιο πέρα από το ερυθρό η ένδειξη είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία, που προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπέρυθρη ακτινοβολία**.

Επειδή η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αόρατη, για την ανίχνευσή της υπάρχουν ειδικά όργανα, οι **φωρατές υπερύθρου**. Η αρχή λειτουργίας των φωρατών βασίζεται στην απορρόφηση ενέργειας των υπέρυθρων ακτινοβολιών και στη συνέχεια στη μετατροπή της σε άλλες μορφές. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 700nm και 10<sup>6</sup>nm. Μερικές από τις ιδιότητες των υπερύθρων είναι οι εξής:

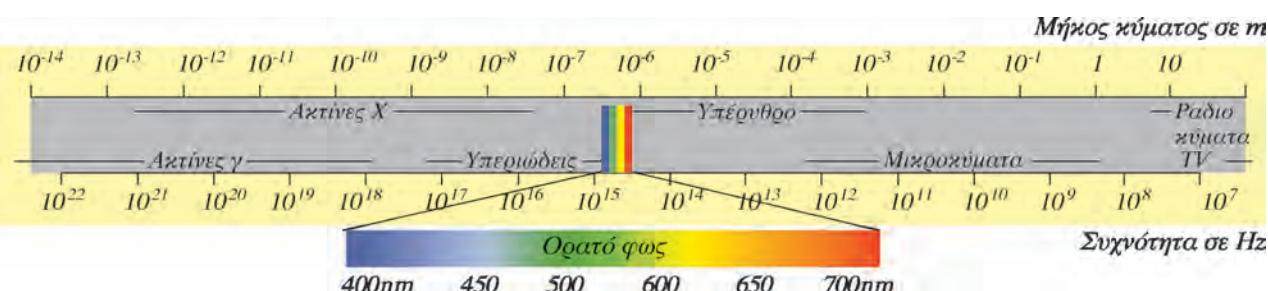
- Απορροφώνται επιλεκτικά από διάφορα σώματα και προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας τους.
- Διέρχονται μέσα από την ομίχλη και τα σύννεφα (δεν απορροφώνται από αέρια, σχήμα 3.4-17).
- Δεν έχουν χημική δράση και δεν προκαλούν φωσφορισμό.

**Εφαρμογές:** Η χρήση των υπερύθρων βασίζεται στην εκλεκτικότητά τους να απορροφώνται από την ύλη. Στην Ιατρική, για παράδειγμα, δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταδίδει θερμότητα σε ορισμένη περιοχή του σώματος. Επίσης με ειδικές φωτογραφικές μηχανές πετυχαίνεται φωτογράφιση ακόμη και όταν υπάρχει συννεφιά ή ομίχλη (σχήμα 3.4-17).



Δύο φωτογραφίες του ίδιου τοπίου, την ίδια στιγμή. Η (α) έχει ληφθεί με φίλμ των εμπορίου, ενώ η (β) με φίλμ εναίσθητο στην υπέρυθρη ακτινοβολία και με χρήση φίλτρου που επιτρέπει μόνο τη διέλευση υπέρυθρου φωτός. Εικόνα 3.4-17

**Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.** Τα όρια μεταξύ των ζωνών είναι κάπως ανθαίρετα.



### 3.5 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

#### Φυσικό φως και γραμμικά πολωμένο φως

Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, το φως (όπως άλλωστε ολόκληρη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από μία φωτεινή πηγή και κινούνται ευθύγραμμα προς όλες τις κατευθύνσεις.

Οι συνήθεις φωτεινές πηγές (π.χ. λαμπτήρας πυρακτώσεως, Ήλιος κτλ.) αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ατόμων ή μορίων. Τα φωτεινά κύματα παράγονται από όλα τα άτομα και μόρια του υλικού που εκπέμπει το φως. Κάθε άτομο ή μόριο εκπέμπει ένα μεμονωμένο κύμα.

Σε κάθε τέτοιο κύμα το ηλεκτρικό πεδίο έχει διεύθυνση ταλάντωσης κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διεύθυνση ταλάντωσης και η διεύθυνση διάδοσης καθορίζουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο ταλάντωσης για κάθε μεμονωμένο κύμα (σχήμα 3.5-18). Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι:

**Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης.**

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της πόλωσης, αρκεί να περιοριστούμε στη μελέτη μόνο του ηλεκτρικού κύματος. Αν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σταθερό με το χρόνο, τότε το κύμα ονομάζεται **γραμμικά πολωμένο**. Άρα:

**Το φως είναι γραμμικά πολωμένο, όταν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού του πεδίου έχει έναν καθορισμένο προσανατολισμό στο χώρο και μία καθορισμένη διεύθυνση διάδοσης.**

Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μια φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

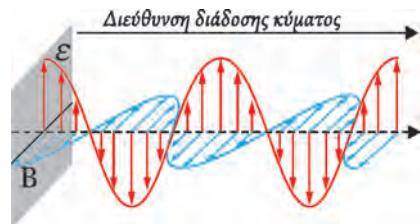
Το φυσικό φως απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 3.5-19α, ενώ το γραμμικά πολωμένο φως στο σχήμα 3.5-19β, γ.

#### Πολωτικό φίλτρο - Πολωτής

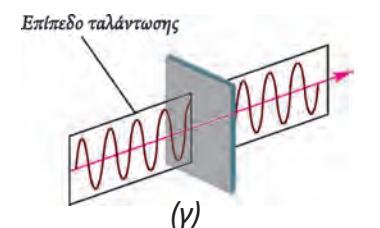
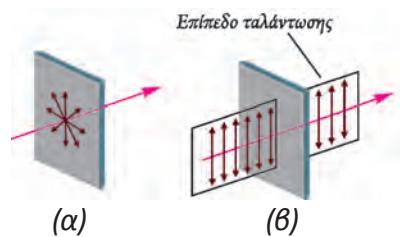
Το φυσικό φως είναι δυνατόν, περνώντας από κατάλληλα φίλτρα (πολωτές) ή παθαίνοντας κατάλληλη ανάκλαση, να μετατραπεί σε γραμμικά πολωμένο φως.

Για να κατανοήσουμε τι είναι ακριβώς το πολωτικό φίλτρο, ας παρακολουθήσουμε τη διαδικασία πόλωσης ενός μηχανικού κύματος. Θυμίζουμε ότι ένα από τα μηχανικά κύματα είναι και αυτό που παράγεται, όταν αναγκάζουμε την άκρη ενός σχοινιού να πάλλεται. Δημιουργούμε έτσι ένα εγκάρσιο κύμα (σχήμα 3.5-20α), το οποίο διαδίδεται ακανόνιστα. Δηλαδή κάθε στοιχειώδες κομμάτι του σχοινιού πάλλεται σε διαφορετικά επίπεδα.

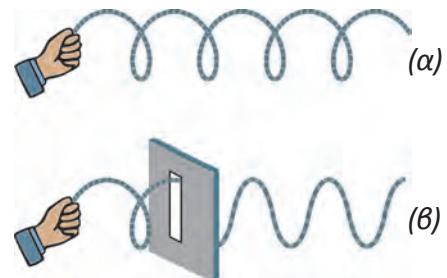
Αν παρεμβάλουμε ένα πέτασμα με κατακόρυφη σχισμή στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 3.5-20β), έτσι ώστε το



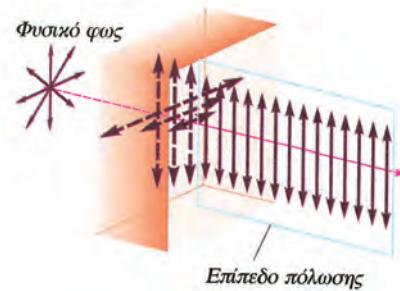
Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όπως γνωρίζουμε, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από δύο εγκάρσια κύματα κάθετα μεταξύ τους, ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό. Εικόνα 3.5-18



(a) Το φυσικό φως και (β), (γ) το γραμμικά πολωμένο φως. Εικόνα 3.5-19



Πίσω από τη σχισμή το κύμα είναι πολωμένο. Εικόνα 3.5-20



Φυσικό φως  
Επίπεδο πόλωσης  
Φυσικό φως διέρχεται από πολωτικό φίλτρο. Οι οριζόντιες ταλαντώσεις έχουν απορροφηθεί ολοσχερώς, ενώ οι κατακόρυφες μερικώς. Εικόνα 3.5-21

σχοινί να διέρχεται από αυτό, τότε τα στοιχειώδη κομμάτια του σχοινιού που βρίσκονται μετά το πέτασμα πάλλονται σε ένα και μόνο επίπεδο, το χαρακτηριστικό επίπεδο που ορίζει η σχισμή με τη διεύθυνση διάδοσης. Η σχισμή στην παραπάνω διαδικασία αποτέλεσε το **πολωτικό φίλτρο**. Το φαινόμενο ονομάζεται **πόλωση του μηχανικού κύματος**.

Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Όταν το φως προσέσει σε πολωτικό φίλτρο, τότε το φως που εξέρχεται από αυτό είναι πολωμένο. Το επίπεδο ταλάντωσης είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Τα κύματα με επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που καθορίζει το φίλτρο ανακόπτονται κατά μεγάλο ποσοστό (σχήμα 3.5-21). Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται **πολωτής**. Είναι μια διάταξη κατασκευασμένη έτσι, ώστε να μπορούμε να στρέφουμε το πολωτικό φίλτρο, που έχει μορφή πλακιδίου, γύρω από άξονα κάθετο προς το επίπεδο του (σχήμα 3.5-22).

Για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης το φωτοκύτταρο μετράει την ίδια ένταση φωτός και τη βρίσκει ίση ακριβώς με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος στο πλακίδιο του πολωτή.

Εικόνα 3.5-22

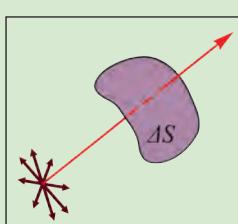
**3.5-23 Με τον όρο «ένταση του προσπίπτοντος φωτός» εννοούμε την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας. Ας το δούμε αναλυτικά:**

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ενέργεια, όπως για παράδειγμα η ακτινοβολία του Ήλιου και η ακτινοβολία των φούρνων μικροκυμάτων. Έστω λοιπόν ότι έχουμε μια στοιχειώδη επιφάνεια  $\Delta S$ , κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, που δέχεται συνεχώς ενέργεια  $\Delta W$  σε χρόνο  $\Delta t$ . Το πλήριο  $\Delta W/\Delta t$  ονομάζεται ισχύς.

Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως **ένταση του κύματος**. Δηλαδή:

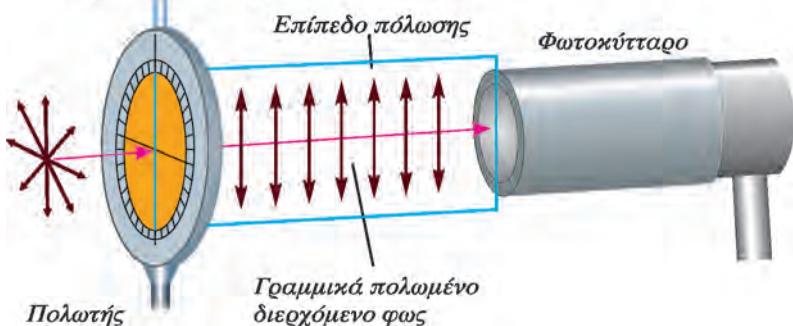
$$I = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{P}{\Delta S}$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης στο S.I. είναι το  $1W/m^2$ .



Αποδεικνύεται ότι η ένταση του κύματος είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους  $\varepsilon_0$  του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

Περιστροφική λαβή



Ένας **τέλειος** πολωτής επιτρέπει τη διέλευση κατά 100% του προσπίπτοντος φωτός, όταν αυτό είναι πολωμένο στο επίπεδο πόλωσης του φίλτρου, και ανακόπτει τελείως τα κύματα φωτός που είναι πολωμένα σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο αυτό.

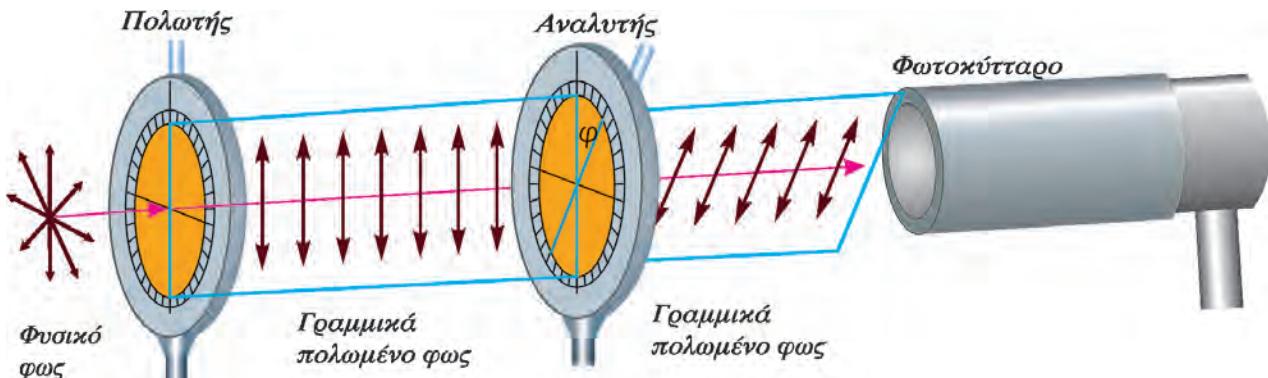
Το επίπεδο πόλωσης του πολωτή είναι **χαρακτηριστικό του πλακιδίου** και η διεύθυνσή του καθορίζεται κάθε φορά από την περιστροφική λαβή, που βρίσκεται στην κορυφή του. Άρα, περιστρέφοντας τη λαβή, καθορίζουμε τη θέση του χαρακτηριστικού επιπέδου πόλωσης του πολωτή.

Έτσι, στο σχήμα 3.5-22, φυσικό φως προερχόμενο από λαμπτήρα πυρακτώσεως προσπίπτει σε έναν πολωτή. Το επίπεδο πόλωσης και η περιστροφική λαβή είναι σημειωμένα με μπλε χρώμα. Ο πολωτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο των κυμάτων φωτός που έχουν ένταση ηλεκτρικού πεδίου παράλληλη προς το επίπεδο πόλωσης του πλακιδίου. Έτσι το φως που βγαίνει από τον πολωτή είναι γραμμικά πολωμένο παράλληλα προς το επίπεδο πόλωσης.

Αν τώρα επιχειρήσουμε να μετρήσουμε την ένταση του εξερχόμενου φωτός με ένα φωτοκύτταρο, θα παρατηρήσουμε ότι, για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης, η ένταση του φωτός έχει την ίδια τιμή, η οποία μάλιστα είναι ίση με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.

### Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων - Αναλύτης

Ας υποθέσουμε ότι μεταξύ του φωτοκύτταρου και του πρώτου πολωτή τοποθετούμε ένα δεύτερο, όμοιο κατασκευαστικά. Το επίπεδο πόλωσης του πρώτου πολωτή έστω ότι παραμένει κατακόρυφο, ενώ του δεύτερου, τον οποίο ονομάζουμε **αναλύτη**, σχηματίζει γωνία φ με την κατακόρυφο (σχήμα 3.5-24).



Αυτό σημαίνει ότι η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων πόλωσης είναι  $\phi$ . Το τι θα συμβεί κατά τη διέλευση του πολωμένου φωτός από τον αναλύτη εξαρτάται από τη γωνία  $\phi$ .

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη συμπίπτουν ( $\phi=0$ ), το πολωμένο φως θα διέλθει από τον αναλύτη χωρίς να υποστεί μεταβολή.

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη είναι κάθετα ( $\phi=90^\circ$ ), το πολωμένο φως θα ανακοπεί εντελώς από τον αναλύτη. Το φωτοκύτταρο τότε δεν ανιχνεύει φως.

Για οποιαδήποτε άλλη γωνία  $\phi$  μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέδων του πολωτή και του αναλύτη το πολωμένο φως θα διέρχεται εν μέρει.

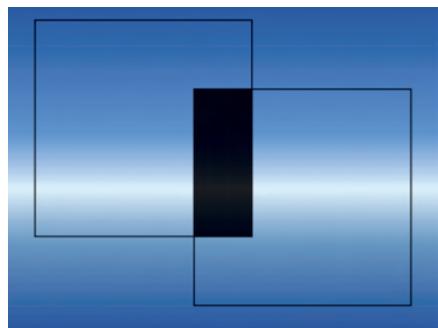
Παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη εντοπίζεται μόνο στους σκοπούς τους οποίους αυτοί εξυπηρετούν, δηλαδή σε ένα πείραμα ο πολωτής μπορεί να παίξει το ρόλο του αναλύτη και αντίστροφα.

Χρησιμοποιώντας τον αναλύτη μπορούμε να διαπιστώσουμε αν μία δέσμη φωτός είναι πολωμένη ή όχι.

Αφήνουμε τη δέσμη να πέσει στον αναλύτη κάθετα προς αυτόν. Με την περιστροφική λαβή καθορίζουμε διάφορες γωνίες στο επίπεδο πόλωσης του αναλύτη. Αν παρατηρήσουμε ότι δεν υπάρχει γωνία για την οποία ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε αυτό είναι φυσικό. Αν όμως συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή υπάρχουν γωνίες για τις οποίες ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε το φως είναι γραμμικά πολωμένο.

Ο τέλειος αναλύτης επιτρέπει τη διέλευση μόνο της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη προς το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής του. **Εικόνα 3.5-24**

Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να αφήνουν να τα διαπερνά μόνο το φως του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση λέγονται **διχροϊκά**. Το 1938 ο E.H. Land ανακάλυψε ένα υλικό που ονόμασε **polaroid**. Το polaroid πολώνει το φως, γιατί τα προσανατολισμένα μόρια του έχουν την ιδιότητα να απορροφούν επιλεκτικά τη διερχόμενη ακτινοβολία από μέσα του.



Ένας πολωτής και ένας αναλύτης με επίπεδα πόλωσης κάθετα μεταξύ τους ανακόπτουν το φως (σκοτεινή περιοχή). **Εικόνα 3.5-25**

### Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση

Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει πάνω σε διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων με δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$ , τότε εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται.

Αν εξετάσουμε με αναλύτη την ανακλώμενη δέσμη, θα παρατηρήσουμε ότι, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου  $0^\circ$  ή περίπου  $90^\circ$ , το ανακλώμενο φως δεν είναι πολωμένο. Για ενδιάμεσες γωνίες πρόσπτωσης το ανακλώμενο φως είναι μερικώς πολωμένο, δηλαδή αποτελείται από γραμμικά πολωμένο φως και μη πολωμένο φως. Υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται **γωνία ολικής πόλωσης ( $\theta_p$ )**, για την οποία το ανακλώμενο φως είναι πλήρως πολωμένο.

Ας προσπαθήσουμε να παραστήσουμε γραφικά το φαινόμενο χρησιμοποιώντας δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, μία παράλληλη προς την ανακλώσα επιφάνεια (με τελείες) και μία κάθετη προς την πρώτη και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (με βέλη). Έτσι στο σχήμα 3.5-26α έχουμε μερική πόλωση του προσπίπτοντος φωτός, δηλαδή η ανακλώμενη δέσμη και η διαθλωμένη είναι μερικώς πολωμένες.

Υποθέτουμε τώρα ότι μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης, ώσπου η ανακλώμενη και η διαθλωμένη δέσμη να σχηματίζουν γωνία  $90^\circ$ , δηλαδή να ισχύει  $\theta_2 + \theta_p = 90^\circ$ . Τότε η ανακλώμενη δέσμη είναι πλήρως πολωμένη, ενώ η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένη (σχήμα 3.5-26β).

Η γωνία ολικής πόλωσης  $\theta_p$  συνδέεται με τους δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  των δύο οπτικών υλικών. Η σύνδεση αυτή προκύπτει από το νόμο του Snell (Σνελ), σύμφωνα με τον οποίο ο λόγος  $n_2/n_1$ , των δεικτών διάθλασης είναι αντιστρόφως ανάλογος των ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης  $\theta_1$  και διάθλασης  $\theta_2$ , δηλαδή:

$$\text{Νόμος του Snell} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta \mu \theta_1}{\eta \mu \theta_2} \quad (3.6)$$

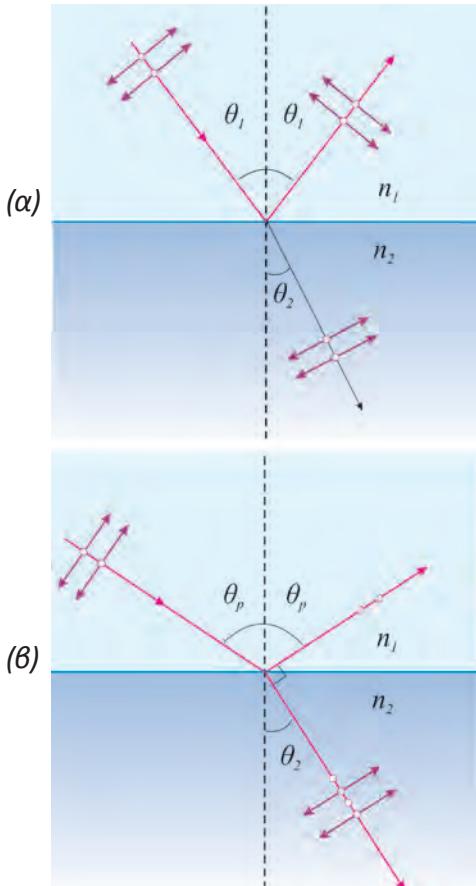
Εφαρμόζοντας λοιπόν την παραπάνω σχέση για  $\theta_1 = \theta_p$  και για  $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$  έχουμε:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta \mu \theta_p}{\eta \mu (90^\circ - \theta_p)}$$

Όμως από την τριγωνομετρία ισχύει:  $\eta \mu (90^\circ - \theta_p) = \sin \theta_p$ . Άρα τελικά προκύπτει:

$$\text{Νόμος του Brewster} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta \mu \theta_p}{\sin \theta_p} \quad \text{ή} \quad \frac{n_2}{n_1} = \epsilon \phi \theta_p \quad (3.7)$$

Η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Brewster (Μπρούστερ) και η γωνία ολικής πόλωσης ονομάζεται **γωνία του Brewster**.



(α) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι μερικώς πολωμένες. (β) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε ανακλώσα επιφάνεια υπό γωνία ίση με τη γωνία ολικής πόλωσης, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους. **Εικόνα 3.5-26**

Άρα: Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους.

Αν τώρα το ένα οπτικό υλικό είναι το κενό ή ο ξηρός αέρας, οπότε  $n_1 = 1$ , τότε  $n_2 = n$  και η σχέση παίρνει τη μορφή:  $n = \epsilon \theta_p$ .

### Πόλωση και πολωτικά φίλτρα στην καθημερινή μας ζωή

Η πόλωση από ανάκλαση είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στη φύση. Το φως που ανακλάται από επιφάνειες λιμνών και θαλασσών, καθώς και από το χιόνι, είναι μερικώς πολωμένο. Όταν λοιπόν η ανάκλαση προέρχεται από μια τέτοια επιφάνεια, προκαλεί στα μάτια μας μια ανεπιθύμητη δυνατή «αντηλιά».

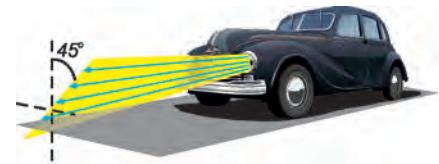
Επειδή οι ανακλώσεις επιφάνειες που αναφέραμε είναι συνήθως οριζόντιες, το διάνυσμα του ανακλώμενου ηλεκτρικού πεδίου θα έχει μεγάλη οριζόντια συνιστώσα, δηλαδή το ανακλώμενο φως θα περιέχει περίσσεια πολωμένου φωτός στην οριζόντια διεύθυνση.

Τα γυαλιά ηλίου λοιπόν που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

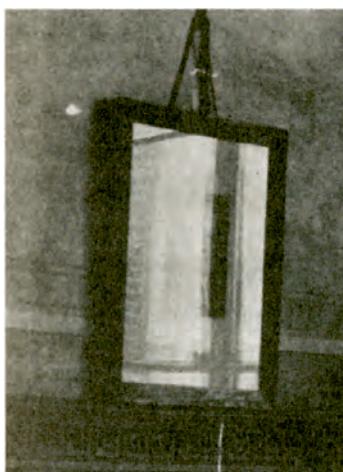
Μία άλλη συνηθισμένη χρήση των πολωτικών φίλτρων είναι στα κρύσταλλα που καλύπτουν τα φώτα των αυτοκινήτων και στα παρμπρίζ. Και στα κρύσταλλα των φώτων και στα παρμπρίζ υπάρχουν πολωτικά φίλτρα των οποίων το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης σχηματίζει γωνία  $45^\circ$  με το οριζόντιο επίπεδο και έχει τον ίδιο προσανατολισμό σε όλα τα αυτοκίνητα. Όταν δύο αυτοκίνητα διασταυρώνονται τη νύχτα, το παρμπρίζ του ενός λειτουργεί ως αναλύτης για το φως των φαναριών του άλλου αυτοκινήτου, που είναι πολωμένο. Έτσι μειώνεται η ένταση του φωτός που δέχεται ο οδηγός και αποφεύγεται αισθητά η ενόχληση.

Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά φίλτρα, που είναι γνωστά με την εμπορική τους ονομασία ως polaroid (πολαρόιντ). Στην καθημερινότητα είναι γνωστά για τη χρήση τους στα γυαλιά ηλίου και στους φακούς φωτογραφικών μηχανών.

Ένα τέτοιο φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση φωτεινών κυμάτων έντασης μέχρι και ποσοστό 80%, μόνο αυτών που είναι γραμμικά πολωμένα με το καθορισμένο από το υλικό επίπεδο πόλωσης, και απορροφά περίπου το 99% της έντασης των κυμάτων που είναι πολωμένα κάθετα προς το επίπεδο αυτό.



**Σημείωση:** Η πόλωση του φωτός κατά την ανάκλαση παρουσιάζεται μόνο, όταν ταντόχρονα γίνεται και διάθλαση του φωτός. Για να εμφανίζεται επομένως κατά την ανάκλαση το φαινόμενο της πόλωσης, δεν πρέπει η ανάκλαση να γίνεται σε μεταλλικές επιφάνειες και σε επιφάνειες που παρουσιάζουν μεταλλική στιλπνότητα.



Πολωτικό φίλτρο έχει χρησιμοποιηθεί στη φωτογράφηση των διπλανών εικόνων, που προφυλάσσονται από γναλί. Η πρώτη έχει φωτογραφηθεί χωρίς φίλτρο και εμφανίζει έντονο φως από ανάκλαση. Με την παρεμβολή πολωτικού φίλτρου, στη δεύτερη φωτογραφία, το ανακλώμενο φως ανακόπτεται και εμφανίζεται η εικόνα.

**Εικόνα 3.5-27**

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 3

**Υπολογισμός γωνίας ολικής πόλωσης από ανάκλαση στην ήρεμη επιφάνεια μιας πισίνας:** Το ηλιακό φως εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται από την ήρεμη επιφάνεια του νερού μιας πισίνας. Το χλωριωμένο νερό της πισίνας έχει δείκτη διάθλασης  $n_2 = 1,35$ , ενώ ο αέρας  $n_1 = 1$ .

(α) Για ποια γωνία πρόσπτωσης το φως από ανάκλαση είναι ολικώς πολωμένο;

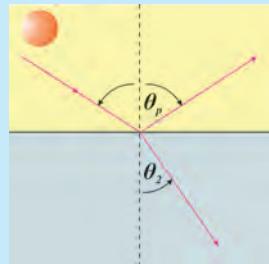
(β) Ποια είναι η γωνία διάθλασης του φωτός σ' αυτή την περίπτωση;

(γ) Αν το βράδυ η πισίνα φωτίζεται με προβολείς που είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα της, ποιες είναι τότε οι τιμές των γωνιών των ερωτημάτων (α) και (β);

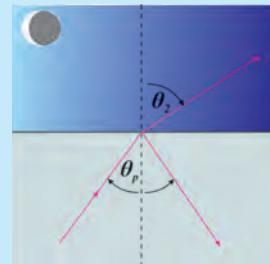
#### ΛΥΣΗ

(α) Το φως προσπίπτει από τον αέρα στην επιφάνεια του νερού. Η γωνία ολικής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta \mu \theta_p}{\sin \theta_p} = \varepsilon \varphi \theta_p \Rightarrow 1,35 = \varepsilon \varphi \theta_p \Rightarrow \theta_p = 53,5^\circ$$



Ηλιακό φως την ημέρα



Φως προβολέων τη νύχτα

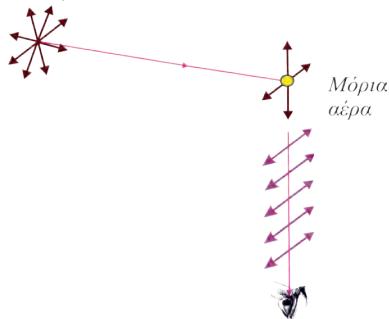
$$(\beta) \quad \theta_2 + \theta_p = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 + 53,5^\circ = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 = 36,5^\circ$$

$$(\gamma) \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta \mu \theta_p}{\sin \theta_p} = \varepsilon \varphi \theta_p \Rightarrow \frac{1}{1,35} = \varepsilon \varphi \theta_p \Rightarrow \theta_p = 36,5^\circ$$

$$\theta_2 + \theta_p = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 + 36,5^\circ = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 = 53,5^\circ$$

Παρατηρούμε ότι οι δύο γωνίες πόλωσης για τη διαχωριστική επιφάνεια νερού - αέρα είναι συμπληρωματικές.

#### Φυσικό φως



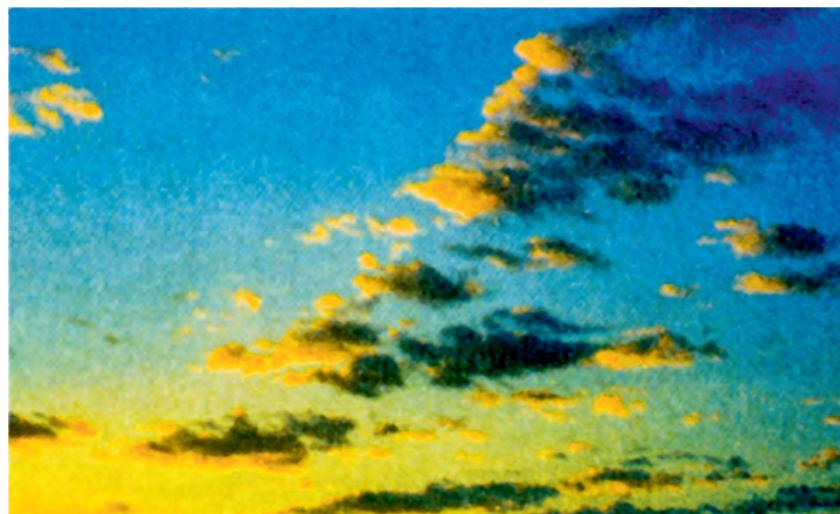
Το φως που σκεδάζεται από μόρια του αέρα είναι μερικώς πολωμένο.

Εικόνα 3.5-28

#### Πόλωση από σκέδαση - Κυανό χρώμα του ουρανού

Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται **σκέδαση**.

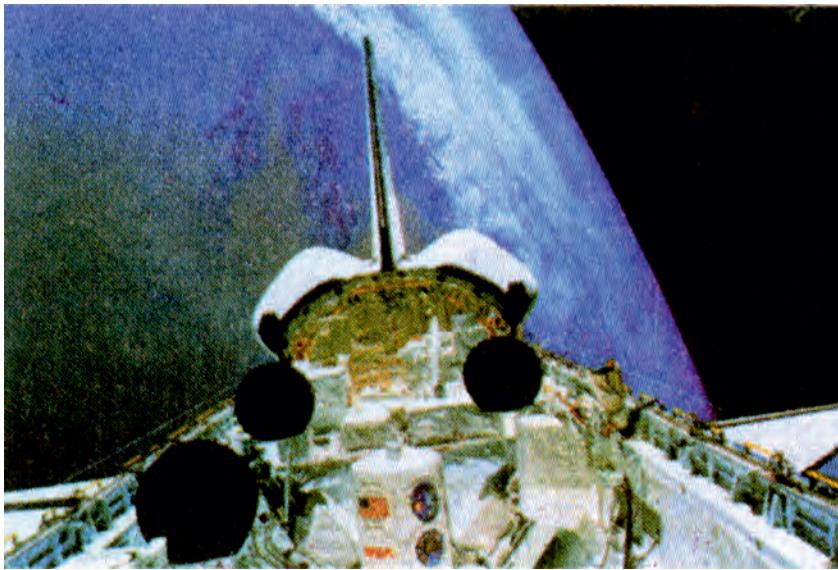
Επειδή το σκεδαζόμενο φως εκπέμπεται προς όλες τις κατευ-



To σκεδαζόμενο φως περιέχει κατά προσέγγιση εννιά φορές περισσότερο κυανό χρώμα από το αντίστοιχο ερυθρό.

Τα σύννεφα όπως φαίνονται κατά την ανατολή και τη δύση του Ήλιου.

Εικόνα 3.5-29



*Η Γη και ο μαύρος ουρανός όπως φαίνονται από το διαστημικό λεωφορείο Columbia. Φωτογραφία της NASA.*

**Εικόνα 3.5-30**

θύνσεις, βλέπουμε φως στον ουρανό, έστω κι αν δεν κοιτάμε κατευθείαν τον ήλιακό δίσκο. Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι το φως αυτό είναι μερικώς πολωμένο (σχήμα 3.5-28).

Αν πάρουμε ένα πλακίδιο τύπου polaroid και το τοποθετήσουμε έτσι, ώστε το επίπεδό του να είναι οριζόντιο, θα διαπιστώσουμε ότι για διαφορετικές γωνίες του επιπέδου πόλωσής του περνάει φως διαφορετικής έντασης.

Το πολωμένο φως που προέρχεται από σκέδαση έχει επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που ορίζεται από την αρχική ακτίνα και τη σκεδασθείσα ακτίνα.

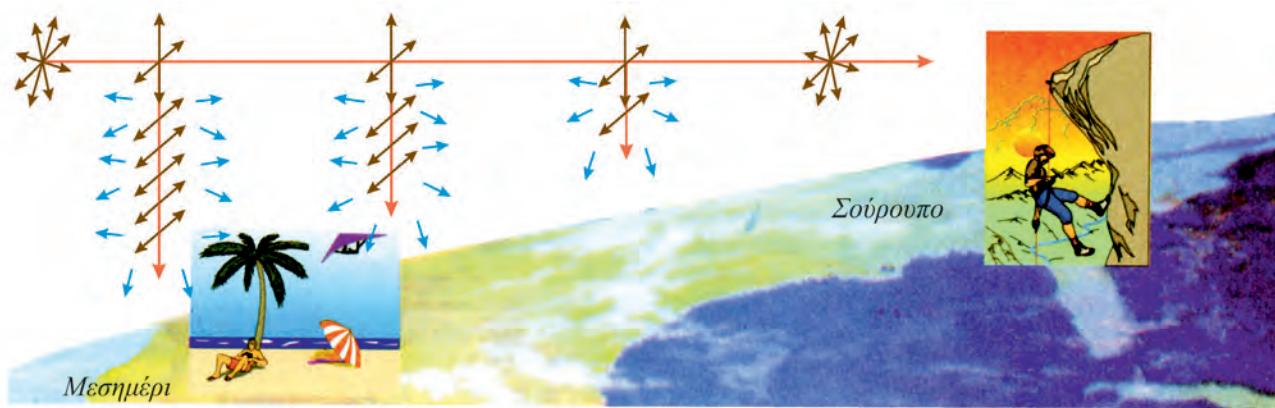
Το πόσο ισχυρό θα είναι το σκεδαζόμενο φως εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Δηλαδή οι ακτινοβολίες που έχουν μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο. Επομένως τα μικρότερα μήκη κύματος του ορατού φάσματος του φωτός (κυανό) σκεδάζονται περισσότερο από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (ερυθρό). Σ' αυτό το φαινόμενο οφείλεται το κυανό χρώμα του ουρανού.

Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, χωρίς το κυανό χρώμα, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.

Κατά το σούρουπο το φως διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Έτσι το φως που φθάνει κατευθείαν στα μάτια μας από τον ορίζοντα είναι φτωχό σε κυανό χρώμα.

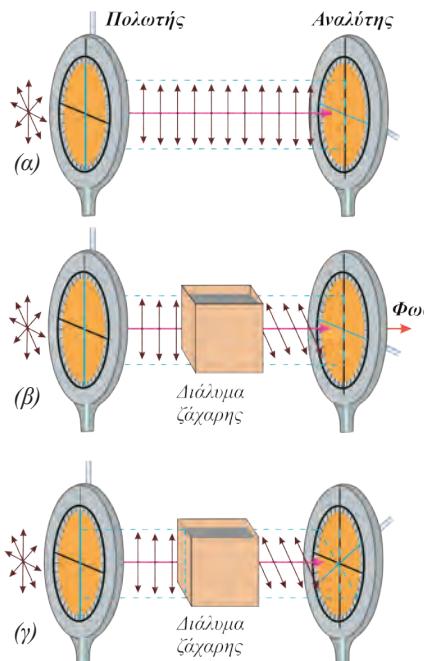
Επίσης, όταν η ατμόσφαιρα είναι πλούσια σε υδρατμούς, αυτοί απορροφούν κυρίως το κυανό χρώμα. Έτσι έχουμε ενίσχυση της ερυθρής απόχρωσης του ουρανού.

Αν η Γη δεν είχε ατμόσφαιρα, δε θα μπορούσαμε να δούμε το χρώμα του ουρανού. Μαύρος θα ήταν την ημέρα, μαύρος και τη νύχτα. Οι αστροναύτες που βρίσκονται στο διάστημα βλέπουν μαύρο ουρανό, γιατί δεν υπάρχουν μόρια να σκεδάσουν το φως.



Δύο εικόνες την ίδια στιγμή σε δύο τόπους με διαφορά 8 ωρών. Στην πρώτη το φως που φθάνει στους λουόμενους από σκέδαση είναι πολωμένο και περιέχει περίσσεια κυανού χρώματος. Στη δεύτερη το αρχικά λευκό φως υφίσταται την απόλεια αυτού του κυανού χρώματος, καθώς διατρέχει την ατμόσφαιρα, και στον ορειβάτη φθάνει τελικά φως από το ερυθρό φάσμα του ορατού φωτός.

Εικόνα 3.5-31



- (α) Ο αναλύτης ανακόπτει το πολωμένο φως.
- (β) Το διάλυμα ζάχαρης προκαλεί στροφή τον επιπέδου ταλάντωσης του πολωμένου φωτός. Από τον αναλύτη περνάει φως.
- (γ) Με στροφή τον αναλύτη ανακόπτουμε πάλι το φως.

Εικόνα 3.5-32

### Οπτικώς ενεργά σώματα.

#### Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός

Υπάρχουν ορισμένα διαφανή σώματα που έχουν την ιδιότητα να στρέφουν το επίπεδο του πολωμένου φωτός, όταν αυτό περάσει από μέσα τους. Τα σώματα αυτά λέγονται **οπτικώς ενεργά**. Τέτοια είναι, για παράδειγμα, οι κρύσταλλοι χαλαζία, το διάλυμα ζάχαρης, το διάλυμα γαλακτικού οξέος κτλ.

Θεωρούμε πολωτή και αναλύτη (δεύτερο όμοιο πολωτή με τον πρώτο) διασταυρωμένους, ώστε η μονοχρωματική ακτίνα που προσπίπτει στον πολωτή να ανακόπτεται από τον αναλύτη (σχήμα 3.5-32α). Αν μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη παρεμβάλουμε κρύσταλλο χαλαζία ή διάλυμα ζάχαρης, θα παρατηρήσουμε ότι από τον αναλύτη περνάει φως (3.5-32β). Αν στρίψουμε τον αναλύτη, τότε για ορισμένη γωνία το φως ανακόπτεται και πάλι (3.5-32γ).

Γίνεται φανερό ότι η παρεμβολή ενός οπτικά ενεργού σώματος έστρεψε το επίπεδο πόλωσης του πολωμένου φωτός κατά ορισμένη γωνία δεξιά ή αριστερά.

Διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνίας στρέψης του πολωμένου φωτός ονομάζονται **πολωσίμετρα**.

# Ελεύθερο ανάγνωσμα

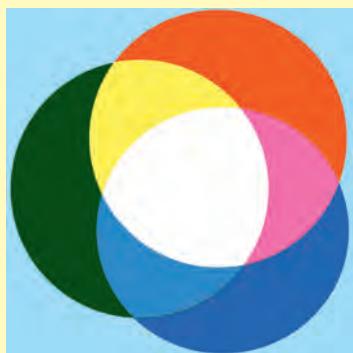
«Κατά βάθος τα πάντα είναι ζήτημα φωτός»...

**Το φως και οι μεγάλοι ζωγράφοι.** Το φως «ζωγραφίζεται» από τους ιμπρεσιονιστές ζωγράφους παράλληλα με τις πρώτες επιστημονικές παρατηρήσεις για τη φύση του (Γαλλία, μέσα του 18ου αιώνα). Στο πέρασμά του τα υλικά αντικείμενα διαλύονται και καταγράφεται η στιγμιαία εντύπωση (impression). Το φως αναλύεται στα χρωματικά συστατικά του. Έτσι το ίδιο θέμα μπορεί να ξαναζωγραφιστεί, αφού αλλάζει η χρωματικότητά του στο πέρασμα της ημέρας.



Κλοντ Μονέ (1840-1926), «Ο καθεδρικός ναός της Ρονέν» (1892-1893).

Ο ζωγράφος Ζορζ Σερά (1859-1891), φοιτητής ακόμα, διαβάζει τις παρατηρήσεις πάνω στα οπτικά φαινόμενα του φυσικού Σαρλ Ανρύ. Στη ζωγραφική του η εικόνα συντίθεται από πολλές μικρές χρωματικές κουκκίδες (point). Σε κάθε περιοχή βρίσκονται κουκκίδες διαφορετικών καθαρών χρωμάτων. Από ορισμένη απόσταση τα χρωματικά συστατικά αναμειγνύονται οπτικά στον αμφιβληστροειδή, διατηρώντας την ένταση και τη λάμψη που έχει το φως εκείνη τη στιγμή. Ο ζωγραφικός αυτός τρόπος ονομάστηκε «πουαντιγισμός».



Το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε ονομάζονται κύρια προσθετικά χρώματα του φωτός. Όταν συνδυάζονται κατάλληλα, μπορούν να δημιουργήσουν όλα τα χρώματα. Όταν συνδυάζονται ίδιες ποσότητες του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε, το αποτέλεσμα είναι λευκό φως.



Ζορζ Σερά, «Κυριακάτικος περίπατος στην Γκραντ Ζατ» (1884-1886).

## ΓΙΑΤΙ Ο ΟΥΡΑΝΟΣ ΕΙΝΑΙ ΓΑΛΑΝΟΣ;

... η κβαντική θεωρία δεν είναι καθόλου απομακρυσμένη από τις ενασχολήσεις μας, αγγίζει τον ίδιο τον κόσμο όπου ζούμε και επιτρέπει να κατανοήσουμε τις πιο λεπτές δομές της ύλης. Καλώς ή κακώς, μας έχει παράσχει τη δυνατότητα ελέγχου μερικών ενεργειακών διαδικασιών από τις πιο ισχυρές του σύμπαντος.

Εντούτοις θα ήθελα να προσθέσω στην επιχειρηματολογία μου ένα επιπλέον στοιχείο, το οποίο είμαι βέβαιος ότι θα δείξει πως η κβαντική θεωρία της αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη επιτρέπει να απαντήσουμε σε ερωτήσεις πολύ συνηθισμένες, του τύπου:

Γιατί ο ουρανός είναι γαλανός;

Γιατί το νερό είναι διαφανές;

Τι είναι αυτό που κάνει το αντικείμενο να φαίνεται χρωματιστό;

Ή ακόμη, γιατί το μέταλλο είναι στιλπνό;

Ο αναγνώστης θα μου επιτρέψει να μη θίξω παρά μόνο την περίπτωση του γαλανού ουρανού, για να αποφύγω μια περίπλοκη παρουσίαση, που, ακόμη και στη μοναδική αυτή περίπτωση, θα παραμείνει σχηματική. Πώς η κβαντική θεωρία εξηγεί την απορρόφηση του φωτός από ένα σώμα, με άλλα λόγια, από ένα άτομο ή ένα μόριο;

Ας φανταστούμε ένα άτομο ή ένα μόριο βυθισμένο στο πεδίο ενός φωτεινού κύματος σαφώς καθορισμένου χρώματος. Με κβαντικούς όρους, ένα τέτοιο κύμα περιγράφεται ως ένα σύνολο φωτονίων που έχουν όλα την ίδια ενέργεια  $hf$ , η συχνότητα  $f$  αντιστοιχεί στο χρώμα του εν λόγω φωτός. Όσο για το άτομο, η κβαντική θεωρία το περιγράφει ως ένα σύστημα του οποίου η ενέργεια είναι κβαντωμένη, δηλαδή παρουσιάζει μια αλληλουχία ενεργειακών επιπέδων, διαχωρισμένων μεταξύ τους: η ενέργεια ενός ατόμου δεν μπορεί να λάβει παρά ορισμένες τιμές, τις τιμές αυτών των επιπέδων, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές γι' αυτό το άτομο ή, ακριβέστερα, για το είδος στο οποίο ανήκει (άνθρακας, άζωτο κτλ.).

Στην κανονική κατάσταση, που ονομάζεται μη διεγερμένη, το άτομο βρίσκεται σ' αυτήν από τις επιτρεπόμενες καταστάσεις που χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη ενέργεια. Λέμε ότι βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάστασή του. Όταν δέχεται φωτεινή ενέργεια, που μεταφέρουν τα φωτόνια συχνότητας  $f$ , μπορεί να περάσει σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση, υπό τον όρο πάντοτε η ενέργεια των φωτονίων  $hf$  να είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά μεταξύ ενός από τα επιτρεπόμενα ενεργειακά επίπεδα και του θεμελιώδους.

Αν είναι έτσι τα πράγματα, το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο, το οποίο εξαφανίζεται από την προσπίπτουσα δέσμη, και οδηγείται σε μια ανώτερη ενεργειακή

κατάσταση. Ονομάζουμε αυτές τις απορροφήσεις «συντονισμένες απορροφήσεις» ή απλώς «συντονισμούς».

Θα εισαγάγω τώρα, για άλλη μία φορά, ένα μοντέλο εύχρηστο για την περιγραφή του ατόμου. Ας φανταστούμε τα ηλεκτρόνια του ως μικρούς ταλαντωτές, ικανούς να πάλλονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος και των οποίων οι ιδιοσυχνότητες (δηλαδή οι συχνότητες για τις οποίες το ηλεκτρόνιο συντονίζεται παλλόμενο με μέγιστο πλάτος) αντιστοιχούν σε μεταβάσεις του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση σε μια από τις διεγερμένες. Με άλλα λόγια, οι ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή, που μας χρησιμεύει ως μοντέλο του ατόμου, είναι ίσες με τις συχνότητες του κβαντικού συντονισμού.

Ας εξετάσουμε την επίδραση του φωτός στα άτομα μέσω του παραπάνω μοντέλου. Μπορούμε στο εξής να αγνοήσουμε τα φωτόνια και τις κβαντικές καταστάσεις του ατόμου: αυτό το μοντέλο επιτρέπει πράγματι να θεωρήσουμε το φως ως ένα κλασικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που επιδρά σε κλασικούς ταλαντωτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από τις ιδιοσυχνότητές τους. Υπό την επίδραση ενός φωτεινού κύματος ο ταλαντωτής αρχίζει να πάλλεται. Η απόκριση του ταλαντωτή είναι ασήμαντη (αλλά μη μηδενική), όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος είναι διαφορετική από τις ιδιοσυχνότητές του, ενώ αντίθετα γίνεται πολύ σημαντική, όταν οι συχνότητες του κύματος και του ταλαντωτή συμπίπτουν, όταν έχουμε συντονισμό.

Ποιες είναι λοιπόν οι συχνότητες συντονισμού των διάφορων ατόμων και μορίων; Για την πλειονότητα των απλών ατόμων ( $O$ ,  $N$ ,  $H$ ) είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που χαρακτηρίζουν το ορατό φως. Ανήκουν στην περιοχή του φάσματος η οποία ονομάζεται υπεριώδης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένα αέριο είναι διαφανές.

Για τα μόρια ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ ) οι συχνότητες συντονισμού είναι χαμηλότερες από τις ορατές συχνότητες του υπερύθρου και μέσα στο υπεριώδες, άρα, και σ' αυτή την περίπτωση, βρίσκονται έξω από το ορατό φάσμα. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά: στην περίπτωση των ατόμων οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των μορίων, οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ατόμων και συνεπώς είναι πολύ βαρύτερες από ό,τι στην πρώτη περίπτωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα και το αυτό κύμα να θέτει πολύ ευκολότερα σε κίνηση τους ταλαντωτές που αντιστοιχούν σε άτομα από ό,τι εκείνους που αντιστοιχούν σε μόρια (\*).

Τώρα λοιπόν μπορούμε να κατανοήσουμε ένα από τα ωραιότερα χρώματα της φύσης: το γαλανό του ου-

ρανού. Το ηλιακό φως αποτελείται, όπως είναι γνωστό, από ένα σύνολο ακτινοβολιών που περιλαμβάνει όλες τις δυνατές συχνότητες του φάσματος, από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο, μέσω του ορατού. Ας εξετάσουμε την επίδραση αυτών των ποικίλων ακτινοβολιών στους ταλαντωτές που απαρτίζουν τα άτομα και τα μόρια μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των μορίων, αλλά τα αντίστοιχα πλάτη είναι μικρά, όπως μόλις αναφέρθηκε. Αντίθετα οι υπεριώδεις ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των ατόμων και τα αντίστοιχα πλάτη είναι σημαντικά. Όσο για το ορατό φως, θέτει σε κίνηση τους ταλαντωτές με ένα πλάτος ταλάντωσης σχετικά μικρό, αλλά το ίδιο για όλους, αφού οι ταλαντωτές που περιλαμβάνονται δε συντονίζονται στο ορατό. Συνολικά, το ηλιακό φως προκαλεί ταλάντωσεις μέσου ή μικρού πλάτους στο ορατό, αμελητέου στο υπέρυθρο και πολύ μεγάλου στο υπεριώδες.

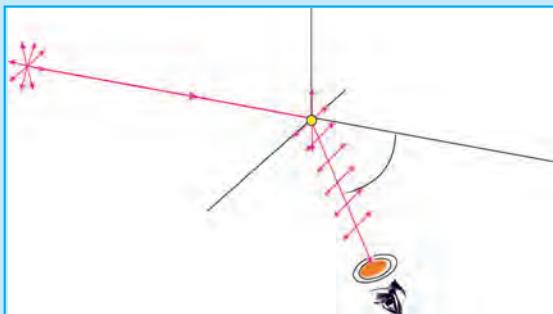
Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι ένα

(\*) Σημείωση συγγραφέων: Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος ταλάντωσης των δομικών μονάδων των μορίων (άτομα) είναι μικρότερο από το πλάτος ταλάντωσης των ατομικών ταλαντωτών (ηλεκτρόνια) στην περίπτωση του συντονισμού.

ταλαντούμενο φορτίο, όπως συμβαίνει να είναι το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου που εξαναγκάζεται σε ταλάντωση, είναι επίσης πομπός φωτός. Εδώ έχουμε ένα από τα θεμελιώδη συμπεράσματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell. Ένα ταλαντούμενο ηλεκτρόνιο εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (με άλλα λόγια, φως), του οποίου η συχνότητα είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσής του, αυτό που ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Εξάλλου αποδεικνύεται ότι η ένταση της εν λόγω εκπομπής είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη αυτής της συχνότητας.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι τα μόρια του αέρα που φωτίζονται από τον Ήλιο εκπέμπουν φως και ακόμη ότι αυτή η εκπομπή είναι εντονότερη στο κυανό από ότι στο ερυθρό, αφού η συχνότητα του κυανού φωτός είναι περίπου διπλάσια από εκείνη του ερυθρού. Έτσι, όταν βλέπουμε τον ουρανό, χωρίς να κοιτάμε τον ηλιακό δίσκο, τον βλέπουμε γαλανό: είναι το αποτέλεσμα της δύναμης του 4.

## Δραστηριότητα



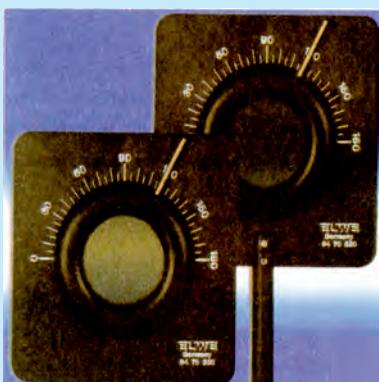
### ΠΟΛΩΣΗ ΑΠΟ ΣΚΕΔΑΣΗ

Ο σκοπός της δραστηριότητας αυτής είναι να διαπιστώσουμε ότι το φως που προέρχεται από τον ουρανό είναι μερικώς πολωμένο.

Μια ηλιόλουστη, ανέφελη μέρα κοιτάξτε το γαλανό ουρανό πίσω από ένα φύλλο polaroid, που το κρατάτε κοντά στο μάτι, ώστε να βλέπετε ένα μεγάλο τμήμα του ουρανού. Κατευθύνετε στη συνέχεια το polaroid, ώστε να βλέπετε μια περιοχή του ουρανού με ένα ελάχιστο της

έντασης του φωτός. Το φως που φτάνει στο μάτι σας από αυτό το τμήμα του ουρανού είναι ισχυρά πολωμένο.

Μετρήστε στο περίπου τη γωνία που σχηματίζεται από τη γραμμή που συνδέει το κεφάλι σας και την περιοχή του ουρανού με το φως μέγιστης πόλωσης, καθώς και τη γραμμή που συνδέει τον Ήλιο με την ίδια περιοχή του ουρανού, δηλαδή τη γωνία θ. Θα πρέπει να βρείτε γωνία κοντά στις 90°.



Μπορείτε να μετρήσετε επίσης την κατεύθυνση του άξονα της πόλωσης του φωτός που φτάνει στα μάτια σας από την περιοχή του ουρανού με μέγιστη πόλωση. Αυτή την κατεύθυνση σας τη φανερώνει ο οπτικός άξονας του φύλλου Polaroid που χρησιμοποιείτε. Αρκεί επομένως να γνωρίζετε τον οπτικό άξονα του polaroid σας.

Αν δεν τη γνωρίζετε, μπορείτε να τη βρείτε κοιτάζοντας μία φωτεινή πηγή γνωστής πόλωσης, π.χ. το φως που ανακλάται από ένα τζάμι ή από ένα γυαλιστερό πάτωμα. Όπως γνωρίζουμε, το ανακλώμενο φως είναι πολωμένο παράλληλα προς την επιφάνεια ανάκλασης, π.χ. το γυαλιστερό μαρμάρινο πάτωμα.

## Σύνοψη 3ου κεφαλαίου

- Το φως έχει διπλή φύση. Συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωμάτιο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτο-ηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.
- Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία του Planck, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά **ασυνεχώς**. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια.
- Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Η τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.
- Το πηλίκο της ταχύτητας  $c_0$  του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα  $c$  μέσα σε κάποιο υλικό ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** ή του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}} = \frac{c_0}{c}$$

- Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας του κύματος και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός.
- Το ορατό φως έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ

400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή, με μήκη κύματος μικρότερα των 400nm. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπεριώδης ακτινοβολία. Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 700nm, η οποία προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπέρυθρη ακτινοβολία.

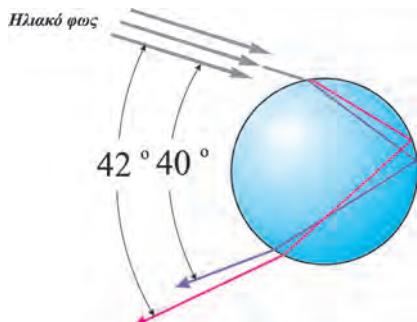
- Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης. Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μία φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.
- Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Μετά τη χρήση του φίλτρου το επίπεδο ταλάντωσης του κύματος είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται πολωτής.
- Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους. Τα γυαλιά ηλίου που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.
- Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται σκέδαση.

## Ερωτήσεις

- 1.** Οι αστρονόμοι ισχυρίζονται ότι η σημερινή εικόνα ενός γαλαξία στο τηλεσκόπιο αφορά κάποια στιγμή του παρελθόντος του. Πώς εξηγείτε αυτό τον ισχυρισμό;
- 2.** Τι είναι το φως σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell;
- 3.** Πώς ερμηνεύει η κβαντική θεωρία του Planck την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός;
- 4.** Εξηγήστε γιατί, όταν φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών μέσων, η συχνότητά του παραμένει αμετάβλητη.
- 5.** Εξηγήστε γιατί το μήκος κύματος μίας μονοχρωματικής ακτινοβολίας, που διαδίδεται σε δύο οπτικά υλικά μέσα, έχει μικρότερη τιμή στο πυκνότερο μέσο σε σχέση με αυτήν που έχει στο αραιότερο.
- 6.** Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο σε κάποιο άλλο δεν μεταβάλλονται:
- α. το μήκος κύματος και η ταχύτητά του.
  - β. η συχνότητα και το μήκος κύματός του.
  - γ. η ταχύτητά του και η ενέργεια των φωτονίων.
  - δ. η ενέργεια των φωτονίων και η συχνότητά του.
- 7.** Σημειώστε με  $\Sigma$  ή  $\Lambda$  όποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές ή λάθος αντίστοιχα:
- α. Το φως διαδίδεται σε όλα τα οπτικά υλικά μέσα με ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
  - β. Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
  - γ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από πυκνότερο σε αραιότερο οπτικό υλικό μέσο.
  - δ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από αραιότερο σε πυκνότερο οπτικό υλικό μέσο.
- 8.** Ποιο φαινόμενο ονομάζεται διασκεδασμός του φωτός;
- 9.** Κατά την ανάλυση του λευκού φωτός παίρνουμε μία ταινία με διάφορα χρώματα. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό;
- 10.** Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος (ερυθρό)
- έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος (ιώδες); Να εξηγήσετε πως διαπιστώνουμε αυτό το γεγονός.
- 11.** Δύο μονοχρωματικές ακτίνες φωτός, η κόκκινη και η κίτρινη, εκτρέπονται από γυάλινο πρίσμα. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές;
- α. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.
  - β. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.
  - γ. Η κόκκινη ακτίνα διαδίδεται στο γυαλί με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι η κίτρινη.
  - δ. Η κόκκινη και η κίτρινη ακτίνα διαδίδονται στο γυαλί με την ίδια ταχύτητα.
- 12.** Οι δείκτες διάθλασης ενός τυπικού γυαλιού, που ακολουθούν, αντιστοιχούν σε καθένα από τα χρώματα. Να κάνετε την αντίστοιχα χρώματος - δείκτη διάθλασης.
- |           |       |
|-----------|-------|
| Ιώδης     | 1,530 |
| Μπλε      | 1,520 |
| Πράσινο   | 1,517 |
| Κίτρινο   | 1,512 |
| Πορτοκαλί | 1,525 |
| Κόκκινο   | 1,508 |
- 13.** Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του φωτός σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα;
- 14.** Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από πρίσμα:
- α. είναι τόσο μικρότερη, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του χρώματος.
  - β. είναι τόσο μικρότερη όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του χρώματος.
  - γ. δεν εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος.
  - δ. είναι ίδια για όλα τα χρώματα.
- 15.** Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου:
- α. είναι ίδιος για όλα τα χρώματα.
  - β. αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος του χρώματος.
  - γ. ελαττώνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος του χρώματος.

δ. είναι χαρακτηριστικό μόνο του υλικού του οπτικού μέσου.

**16.** Στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε το ηλιακό φως να προσπίπτει σε σταγόνα βροχής. Ποια φαινόμενα παρατηρούνται κατά την πορεία των ακτίνων;



**17.** Το χρώμα του ουρανού είναι μπλε, γιατί...

- α. τα μόρια του αέρα είναι μπλε.
- β. η ίριδα των ματιών μας είναι μπλε.
- γ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μικρά μήκη κύματος.
- δ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μεγάλα μήκη κύματος.

Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι η σωστή;

**18.** Τι είναι τα πολωτικά φίλτρα ή πολωτές;

**19.** Χρησιμοποιούμε γυαλιά τύπου polaroid, για να «κόψουμε», όσο το δυνατόν, την αντηλιά (έντονη ανάκλαση) του φωτός που προκαλούν λείες επιφάνειες, όταν το φως προσπίπτει σ' αυτές (λόγου χάρη στην επιφάνεια της θάλασσας, όταν επικρατεί μπονάτσα).

Ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού polaroid, για να είναι τα γυαλιά αποτελεσματικά;

**20.** Να αναφέρετε τρεις τουλάχιστον ιδιότητες της υπεριώδους ακτινοβολίας οι οποίες μας πληροφορούν για την ύπαρξή της.

**21.** Με ποιο τρόπο αντιλαμβανόμαστε ότι πέρα από την ερυθρή περιοχή του φάσματος του ορατού φωτός υπάρχει αόρατη υπέρυθρη ακτινοβολία;

**22.** Πώς ονομάζονται τα όργανα με τα οποία αντιχεύεται η υπέρυθρη ακτινοβολία και σε ποια αρχή βασίζεται η λειτουργία τους;

**23.** Τι ονομάζουμε φυσικό και τι γραμμικά πολωμένο φως;

**24.** Γιατί οι αστροναύτες, όταν βρίσκονται στη Σελήνη, βλέπουν μαύρο τον ουρανό;

**25.** Μπορούμε με έναν πολωτή να αντιληφθούμε ότι το φως κάποιας πηγής που φθάνει στα μάτια μας είναι πολωμένο ή όχι; Μήπως είναι απαραίτητο να έχουμε δύο όμοιους πολωτές; Εξηγήστε γιατί.

**26.** Τι ονομάζουμε γωνία ολικής πόλωσης; Να γράψετε το νόμο του Brewster.

**27.** Το φως του ουρανού είναι:

- α. μερικώς πολωμένο,
- β. μόνο γραμμικά πολωμένο,
- γ. μη πολωμένο.

## Ασκήσεις και προβλήματα

Για την επίλυση των προβλημάτων να θεωρηθούν γνωστά: σταθερά του Planck  $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , ταχύτητα του φωτός στον αέρα  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

- 1.** Σε ένα πείραμα μέτρησης της ταχύτητας του φωτός με τη μέθοδο του Fizeau η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του κατόπτρου είναι  $12945\text{m}$  και ο τροχός έχει  $720$  διάκενα.

Να υπολογίσετε την ελάχιστη συχνότητα περιστροφής του τροχού αυτού, αν η πειραματική ταχύτητα του φωτός που προέκυψε ήταν  $2,982 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

- 2.** Μία δέσμη φωτός που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος  $600\text{nm}$ :

- α. Να υπολογίσετε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της δέσμης σε γυαλί με δείκτη διάθλασης  $1,6$ .  
 β. Ποια τιμή έχει το μήκος κύματος της δέσμης, όταν αυτή διαδίδεται στο γυαλί; Δίνεται ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι  $300000 \text{ km/s}$ .

- 3.** Μονοχρωματική ακτίνα φωτός ορισμένης συχνότητας έχει μήκος κύματος  $500\text{nm}$ , όταν διαδίδεται στο νερό. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτού του φωτός, όταν διαδίδεται στο βενζόλιο. Οι δείκτες διάθλασης του νερού και του βενζολίου είναι αντίστοιχα  $1,333$  και  $1,501$ .

- 4.** Φως έχει μήκος κύματος  $560\text{nm}$  στο κενό. Όταν διαδίδεται στο νερό, έχει ταχύτητα  $2,25 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

Αν το φως αυτό διαδιδόταν στο νερό, ποιο θα ήταν τότε το μήκος κύματός του;

- 5.** Φως που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Όταν το ίδιο φως διαδίδεται στην αιθανόλη, έχει μήκος κύματος  $440\text{nm}$  και στη γλυκερίνη  $405\text{nm}$ . Ποιος είναι ο λόγος του δείκτη διάθλασης της αιθανόλης προς το δείκτη διάθλασης της γλυκερίνης σε μήκος κύματος  $\lambda_0$ ;

- 6.** Φυσικό φως που διαδίδεται στον αέρα συναντά λεία επιφάνεια πάγου. Η ανακλώμενη ακτίνα βρέθηκε ολικώς πολωμένη. Να προσδιορίσετε τη γωνία πρόσπτωσης. Ο δείκτης διάθλασης του πάγου είναι  $1,309$ .

- 7.** Μονοχρωματική δέσμη φωτός που διαδίδεται στο νερό προσπίπτει σε γυάλινο κύβο, ο οποίος είναι βυθισμένος εξ ολοκλήρου στο νερό, υπό γωνία πρόσπτωσης  $50^\circ$ . Ένα μέρος της δέσμης ανακλάται, ενώ το άλλο διαθλάται. Αν η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα  $90^\circ$ , να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του γυάλινου κύβου για το φως αυτό, αν ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι  $1,333$ .

- 8.** Μονοχρωματική δέσμη φυσικού φωτός που διαδίδεται στον αέρα προσπίπτει στη λεία επιφάνεια ενός κρυστάλλου χαλαζία υπό γωνία  $57^\circ$  (ως προς την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης). Η ανακλώμενη δέσμη βρέθηκε ότι είναι ολικώς πολωμένη:

- α. Πόσος είναι ο δείκτης διάθλασης του χαλαζία;  
 β. Πόση είναι η γωνία διάθλασης;

- 9.** Ένας ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας  $100\text{MHz}$ .

- α. Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου αυτής της ακτινοβολίας;  
 β. Να συγκρίνετε το αποτέλεσμα με την ενέργεια κάποιας ορατής ακτινοβολίας π.χ. του κίτρινου φωτός, μήκους κύματος  $600\text{nm}$  στο κενό.  
 γ. Να βρείτε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπονται ανά δευτερόλεπτο, αν η ισχύς που ακτινοβολείται είναι  $6,63 \text{ kW}$ .

- 10.** Αν υποθέσουμε ότι το ανθρώπινο μάτι μπορεί να αισθανθεί φως μήκους κύματος  $\lambda=600\text{nm}$  όταν προσπίπτουν σ' αυτό τουλάχιστον  $100$  φωτόνια ανά δευτερόλεπτο, να υπολογίσετε:

- α. τη συχνότητα του κύματος.  
 β. την ολική ενέργεια ανά δευτερόλεπτο που δέχεται το μάτι.

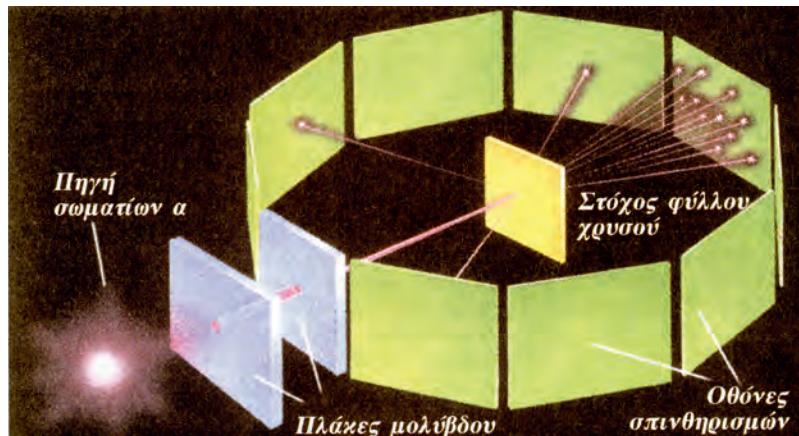
- 11.** Μονοχρωματικό φως μήκους κύματος  $\lambda_0=600\text{nm}$ , που διαδίδεται στον αέρα εισέρχεται ταυτόχρονα σε δύο οπτικά υλικά πάχους  $1\text{m}$ , κάθετα στην διαχωριστική επιφάνεια του κάθε υλικού με τον αέρα. Οι δείκτες διάθλασης των δύο υλικών είναι  $n_1=1,5$  και  $n_2=1,2$ . Να βρείτε:

- α. τη χρονική διαφορά εξόδου του φωτός από τα δύο οπτικά υλικά.
- β. τον αριθμό των μηκών κύματος του φωτός σε κάθε οπτικό υλικό.

**12.** Ακτινοβολία συχνότητας  $10^{12}$  Hz απορρο-

φάται πλήρως από μία ποσότητα νερού, οπότε αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού κατά  $2^{\circ}\text{C}$ . Αν γνωρίζετε ότι για να αυξηθεί η θερμοκρασία της παραπάνω ποσότητας κατά  $1^{\circ}\text{C}$  απαιτείται ενέργεια  $21216\text{J}$ , πόσα φωτόνια της ακτινοβολίας απορροφώνται;

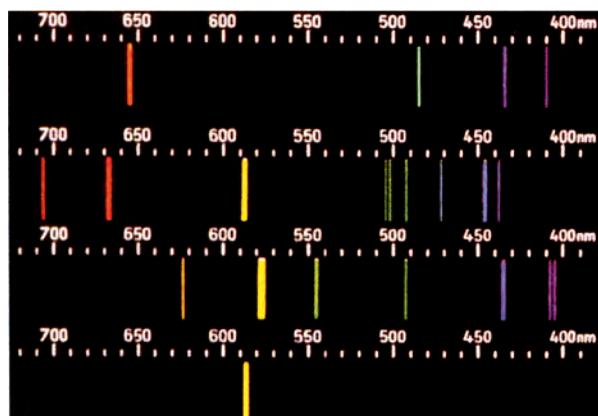
# (4 ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ)



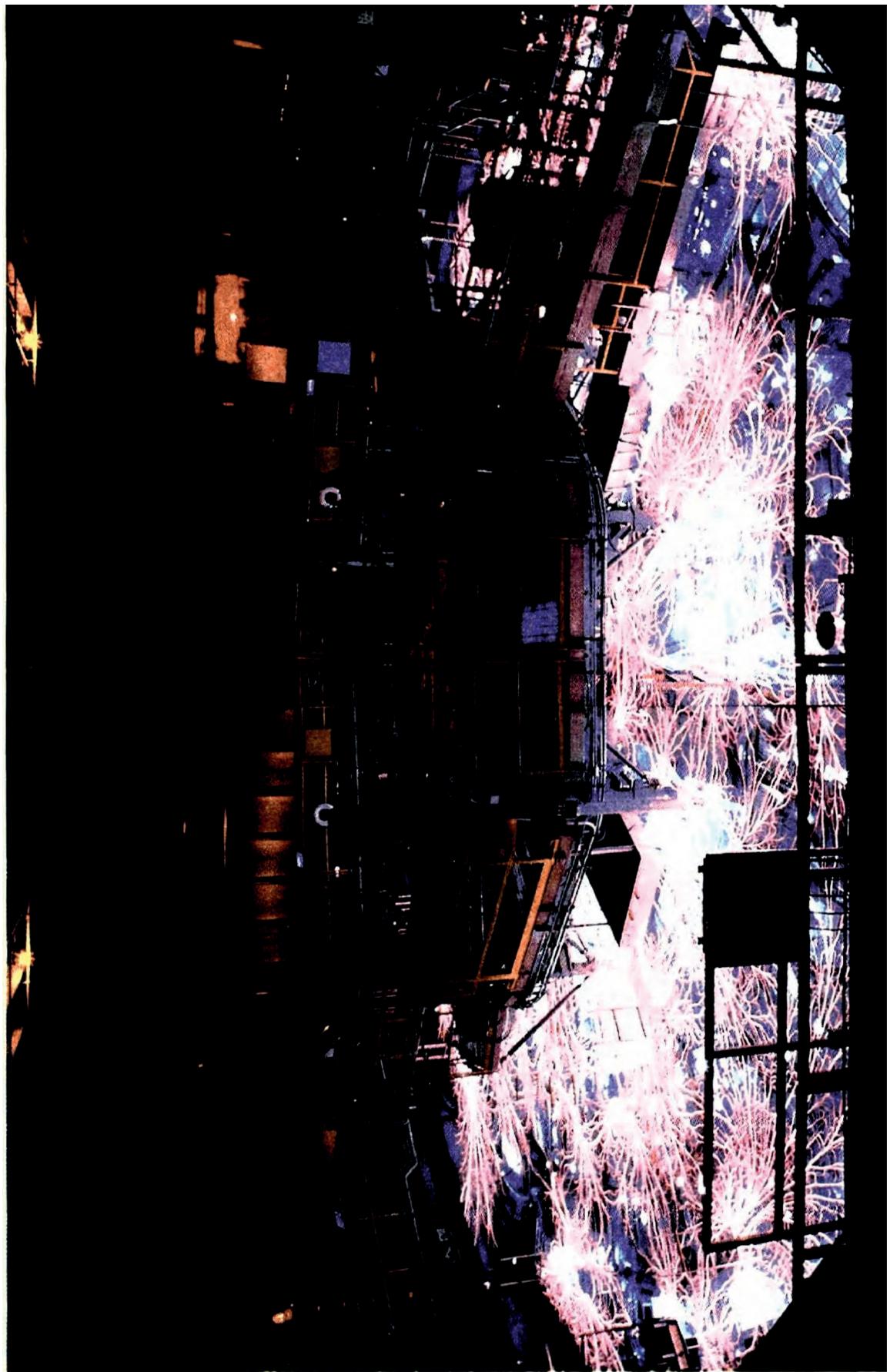
**Πείραμα του Rutherford**

Σκέδαση σωματίων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Το πείραμα αυτό έδειξε ότι το θετικό φορτίο και το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ενός ατόμου είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή περιοχή του ατόμου, που ονομάστηκε πυρήνας.

Φάσματα εκπομπής ατόμων  
Υδρογόνου H



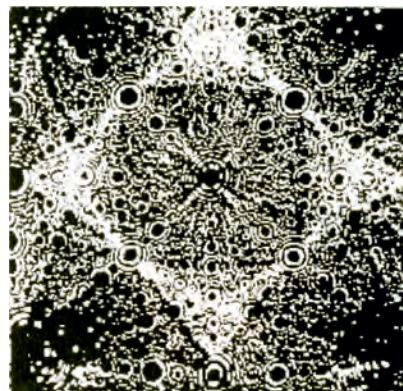
- 4.1 Ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου
- 4.2 Διακριτές ενεργειακές στάθμες
- 4.3 Μηχανισμός παραγωγής και απορρόφησης φωτονίων
- 4.4 Ακτίνες X



Στο πυρηνικό εργαστήριο Sandia στο Nέο Μεξικό ένας επιπλανής φορτισμένων σφραγιδίων (μηχανή Z) παράγει μέσα σε ελάχιστο χρόνο δύκα φορές περισσότερη ενέργεια από όλους μαζί τους σταθμούς πρεκτροπαραγωγής στον κόσμο. Η ενέργεια παράγεται υπό μορφή ακτίνων X. Η παραγόμενη ισχύς είναι 210 τρισεκατομμύρια Watt.



Ένας φύλακας των ατομικού ρολογιού και σίσιον στο Γραφείο Μέτρων και Σταθμών της Ουάσιγκτον. Εικόνα 4.1-1



Ατόμα στην επιφάνεια μιας μάτης βελόνας όπως φαίνονται με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο πεδίου. Εικόνα 4.1-2

## 4.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι ασχολήθηκαν με το πρόβλημα των συστατικών της ύλης. Ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος υποστήριζαν ότι η ύλη αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια, τα οποία δεν μπορούν να διαιρούνται απεριόριστα και γι' αυτό ονομάστηκαν άτομα (δηλαδή άτμητα). Διατύπωσαν λοιπόν μια φιλοσοφική θεωρία, για να ερμηνεύσουν τις ιδιότητες των υλικών σωμάτων. Υποστήριξαν ότι η ύλη αποτελείται από άτομα που διαφέρουν μεταξύ τους κατά το σχήμα και κατά το μέγεθος. Τα άτομα δε δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται και επομένως είναι άφθαρτα και αιώνια. Τα άτομα είναι πάρα πολλά και βρίσκονται σε διαρκή κίνηση μέσα στο κενό. Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα οφείλονται στην κίνηση των ατόμων. Ο σχηματισμός των υλικών σωμάτων οφείλεται στις ενώσεις των ατόμων με άλλα άτομα, ενώ αντίθετα η καταστροφή των σωμάτων οφείλεται στο διαχωρισμό των ατόμων.

Ο Επίκουρος επηρεάστηκε από τη θεωρία του Δημόκριτου. Ένα μέρος της θεωρίας αυτής βρίσκεται σε ένα ποίημα του Ρωμαίου ποιητή Λουκρήτιου, όπου περιγράφεται, με βάση τις ατομικές αντιλήψεις του Δημόκριτου, η πίεση που ασκούν τα αέρια, η διάχυση των οσμών και το σχήμα των κρυστάλλων.

Η ατομική θεωρία του Δημόκριτου ήταν μία από τις φιλοσοφικές θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων. Δεν υπήρχε καμία πειραματική παρατήρηση για την υποστήριξή της. Η θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τον Πλάτωνα, τον Αριστοτέλη και τους μαθητές τους και έπεισε σε αφάνεια μέχρι το 19ο αιώνα.

Στις αρχές του 19ου αιώνα ο Dalton (Ντάλτον) επανέφερε την ατομική θεωρία, για να εξηγήσει τους νόμους της Χημείας που ανακάλυψε πειραματικά.

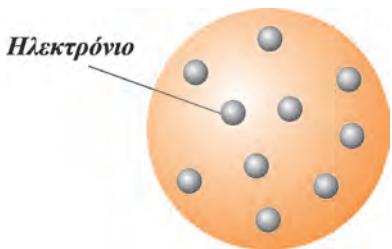
Σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη των επιστημονικών ιδεών για το άτομο αποτέλεσε η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου από τον Thomson (Τόμσον) κατά το τέλος του 19ου αιώνα.



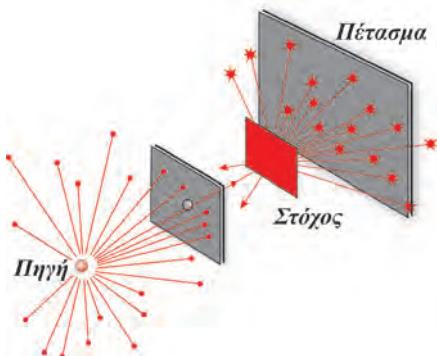
Δημόκριτος ο Αβδηρίτης (470-360 π.Χ.). Αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος, ιδρυτής της ατομικής θεωρίας. Εικόνα 4.1-3



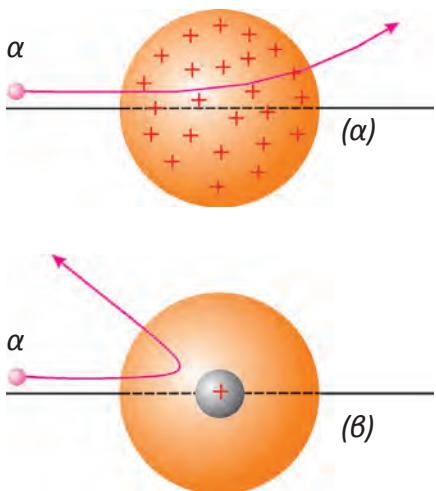
Αριστερά ο Αγγλος φυσικός J. J. Thomson (1856-1940) και δεξιά ο Ernest Rutherford (1871-1937). Εικόνα 4.1-4



Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. Εικόνα 4.1-5



Πείραμα του Rutherford. Σκέδαση σωμάτων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Περίπου ένα στα 8000 σωμάτων αποκλίνει κατά γωνία μεγαλύτερη των  $90^\circ$ . Τα σωμάτων α είναι πυρήνες ηλίου. Εικόνα 4.1-6



(a) Τα σωμάτων α αποκλίνουν κατά μικρή γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. (β) Τα σωμάτων α αποκλίνουν κατά μεγάλη γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford. Εικόνα 4.1-7

Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου ως συστατικό του ατόμου έδειξε ότι το άτομο έχει εσωτερική δομή και επομένως δεν είναι άτμητο. Επειδή η ύλη είναι ηλεκτρικά ουδέτερη, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και τα άτομα της ύλης είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και επομένως το άτομο θα έχει ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου.

Επίσης τα πειράματα έδειξαν ότι η μάζα του τμήματος που είναι θετικά φορτισμένο είναι μεγαλύτερη από τη μάζα των ηλεκτρονίων του ατόμου.

Το ερώτημα που τέθηκε στη συνέχεια ήταν: «πώς η μάζα και το φορτίο κατανέμονται στο εσωτερικό του ατόμου;»

### Πρότυπο του Thomson

Ο Thomson (Τόμσον) πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο το άτομο αποτελείται από μια σφαίρα θετικού φορτίου, ομοιόμορφα κατανεμημένου, μέσα στο οποίο είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια, όπως οι σταφίδες μέσα σε ένα σφαιρικό σταφιδόψωμο.

### Πρότυπο του Rutherford

Ο Rutherford (Ράδερφορντ) και οι μαθητές του πραγματοποίησαν τα πρώτα πειράματα, για να διερευνήσουν την εσωτερική δομή του ατόμου, τα αποτελέσματα των οποίων ήλθαν σε αντίθεση με το πρότυπο του Thomson. Στα πειράματα αυτά μια δέσμη θετικά φορτισμένων σωμάτων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο χρυσού (στόχος). Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, η δέσμη των σωμάτων α δε θα πρέπει να αποκλίνει σημαντικά για τους εξής λόγους:

- Το ολικό ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι μηδέν και επομένως δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη στα σωμάτια α, όσο αυτά βρίσκονται στο εξωτερικό του ατόμου.
- Επειδή το θετικό ηλεκτρικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, δεν μπορεί να ασκεί σημαντική απωστική δύναμη στα σωμάτια α, όσο αυτά βρίσκονται στο εξωτερικό του ατόμου.
- Η σύγκρουση των σωμάτων α με τα ηλεκτρόνια δεν επηρεάζει σημαντικά την κίνησή τους, γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρότερη μάζα. Με τον ίδιο τρόπο δεν επηρεάζεται σημαντικά η κίνηση μιας βαριάς πέτρας μέσα στη βροχή.

Ο Rutherford παρατήρησε ότι τα περισσότερα από τα σωμάτια α διέρχονται μέσα από το στόχο σχεδόν ανεπηρέαστα, σαν να κινούνται μέσα σε σχεδόν κενό χώρο. **Αρκετά αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες. Λίγα όμως αποκλίνουν κατά  $180^\circ$ .** Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο, αν το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε μικρό χώρο, ώστε να ασκεί στα σωμάτια α μεγάλες απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις.

Για να ερμηνεύσει ο Rutherford τις πειραματικές παρατηρήσεις του, πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο:

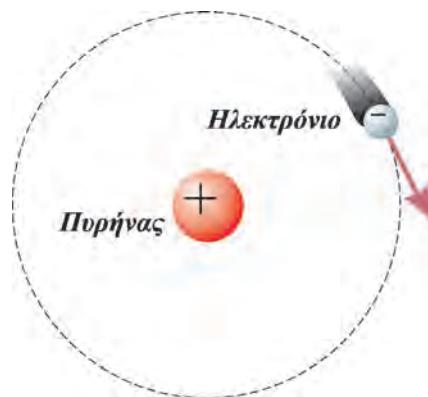
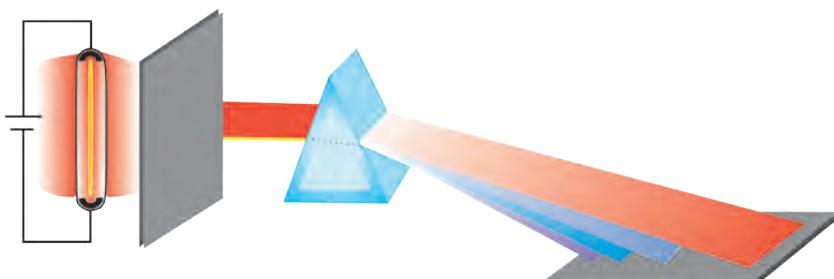
Το άτομο αποτελείται από μία πολύ μικρή περιοχή στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλικές τροχιές, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, γιατί, αν ήταν ακίνητα, θα έπεφταν πάνω στον πυρήνα εξαιτίας της ηλεκτρικής έλξης που δέχονται από αυτόν.

Το πρότυπο του Rutherford ονομάζεται και **πλανητικό μοντέλο** του ατόμου, γιατί αποτελεί μικρογραφία του ηλιακού πλανητικού συστήματος. Αποτελεί ένα μεγάλο βήμα, που πλησιάζει στην εικόνα του ατόμου όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Όμως το μοντέλο αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, παρουσιάζει ορισμένες σημαντικές αδυναμίες.

### Ατομικά φάσματα

Όταν εφαρμόσουμε ορισμένη τάση σε γυάλινο σωλήνα που περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση (όπως στις διαφημιστικές λυχνίες νέου), τότε θα παρατηρήσουμε ότι το αέριο εκπέμπει φως. Αν το φως αυτό αναλυθεί, όταν, για παράδειγμα, περάσει μέσα από ένα πρίσμα, τότε θα παρατηρήσουμε μια σειρά από φωτεινές γραμμές. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος ή χρώμα. Όπως γνωρίζουμε, η σειρά των γραμμών που παρατηρούνται ονομάζεται **γραμμικό φάσμα εκπομπής** του αερίου.

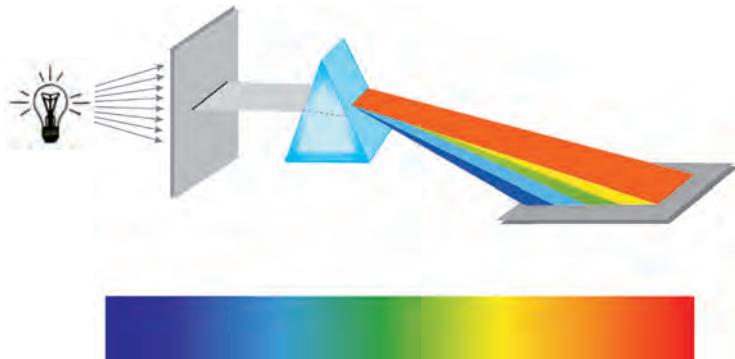
Τα μήκη κύματος που περιέχει το γραμμικό φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικά του στοιχείου που εκπέμπει το φως. Δεν υπάρχουν δύο διαφορετικά στοιχεία που να έχουν το ίδιο φάσμα εκπομπής. Το δεδομένο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται σε μια ουσία. Δηλαδή το γραμμικό φάσμα παίζει το ρόλο των δακτυλικών αποτυπωμάτων. Όπως από τα δακτυλικά αποτυπώματα μπορούμε να βρούμε τον άνθρωπο στον οποίο ανήκουν, έτσι και από το γραμμικό φάσμα μπορούμε να βρούμε το στοιχείο στο οποίο ανήκει.



Μοντέλο του Rutherford για το άτομο (πλανητικό μοντέλο). Εικόνα 4.1-8

Γραμμικό φάσμα εκπομπής του νεδρόγονου. Το φως που εκπέμπει το αέριο περνάει μέσα από ένα πρίσμα και το φάσμα αποτυπώνεται σε εναίσθητο φίλμ. Εικόνα 4.1-9

Ένα αέριο μπορεί όχι μόνο να εκπέμπει φως, αλλά μπορεί και να απορροφά φως. Αν φωτίσουμε με πηγή που εκπέμπει λευκό φως ένα πρίσμα, πίσω από το οποίο έχει τοποθετηθεί πέτασμα, τότε θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα μια συνεχή χρωματιστή ταινία. Η ταινία αυτή των χρωμάτων, όπως γνωρίζουμε, ονομάζεται **συνεχές φάσμα** του λευκού φωτός.

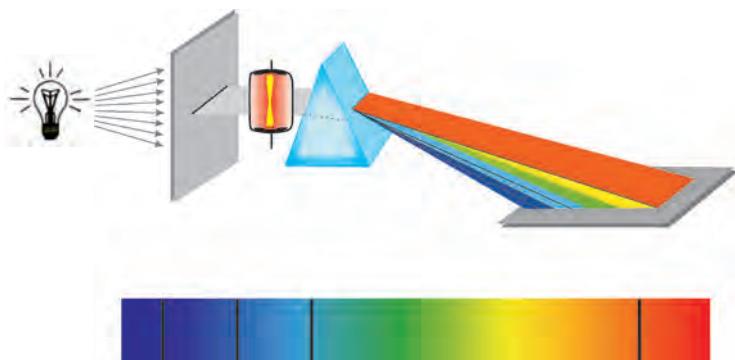


Συνεχές φάσμα του λευκού φωτός.

Εικόνα 4.1-10



Αν τώρα ανάμεσα στην πηγή του λευκού φωτός και στο πρίσμα τοποθετηθεί γυάλινο δοχείο που περιέχει κάποιο αέριο, τότε θα παρατηρήσουμε ότι η χρωματιστή ταινία διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές. Η ταινία αυτή των χρωμάτων ονομάζεται **γραμμικό φάσμα** απορρόφησης του αερίου. Οι σκοτεινές γραμμές εμφανίζονται σε εκείνες ακριβώς τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής του ίδιου αερίου.



Γραμμικό φάσμα απορρόφησης του υδρογόνου. Εικόνα 4.1-11



Επομένως το πείραμα δείχνει ότι:

- To φάσμα εκπομπής ή απορρόφησης ενός αερίου αποτελείται από ορισμένες φασματικές γραμμές που είναι χαρακτηριστικές του αερίου. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ορισμένη συχνότητα (ή μήκος κύματος).**
- Κάθε γραμμή του φάσματος απορρόφησης του αερίου συμπίπτει με μια γραμμή του φάσματος εκπομπής του. Δηλαδή κάθε αέριο απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.**

Τα γραμμικά φάσματα των αερίων αποτέλεσαν **το κλειδί** για την έρευνα της δομής του ατόμου. Κάθε θεωρία για τη δομή του ατόμου πρέπει να εξηγεί γιατί τα άτομα εκπέμπουν ή απορροφούν μόνο ορισμένες ακτινοβολίες και γιατί απορροφούν μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες που μπορούν να εκπέμπουν.

Το μοντέλο του Rutherford αδυνατούσε να εξηγήσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων για τους παρακάτω λόγους:

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλική τροχιά. Το μέτρο της ταχύτητάς του είναι σταθερό, αλλά η κατεύθυνσή της συνεχώς μεταβάλλεται και επομένως το ηλεκτρόνιο έχει επιτάχυνση. Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, το ηλεκτρόνιο, όπως και κάθε επιταχυνόμενο φορτίο, εκπέμπει ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολεί ενέργεια. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα πρέπει να μειώνεται συνεχώς. Επομένως θα πρέπει να κινείται σε σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και με διαρκώς μεταβαλλόμενη συχνότητα, μέχρις ότου πέσει στον πυρήνα.

Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι ίση με τη συχνότητα περιφοράς του ηλεκτρονίου, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς.

Άρα, σύμφωνα με το μοντέλο του Rutherford, τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές φάσμα και όχι γραμμικό, όπως παρατηρείται στην πράξη.

Για να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου, ο Bohr πρότεινε ένα νέο πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου.

### Το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο

Στις αρχές του 20ού αιώνα οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι η κλασική Φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων. Δεν μπορούσε να εξηγήσει:

- Γιατί το υδρογόνο εκπέμπει μόνο ορισμένα μήκη κύματος ακτινοβολίας;

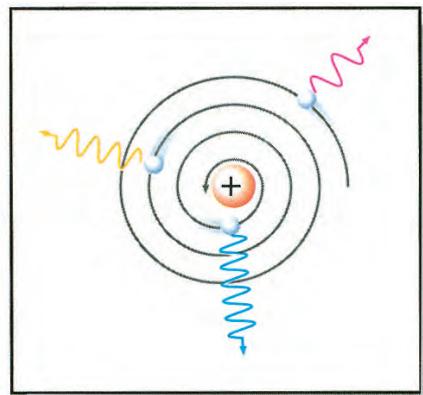
- Γιατί απορροφά μόνο τα μήκη κύματος που εκπέμπει;

Για να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, ο Δανός φυσικός Bohr (Μπορ) πρότεινε ένα πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου, που στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

**α.** Το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου περιφέρεται γύρω από το θετικά φορτισμένο πυρήνα με την επίδραση της δύναμης Coulomb που δέχεται από αυτόν (σχήμα 4.1-14).

**β.** Το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές, οι οποίες ονομάζονται **επιτρεπόμενες τροχιές**. Οι επιτρεπόμενες τροχιές είναι εκείνες για τις οποίες ισχύει ότι η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη και ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας  $\hbar = h / 2\pi$ , όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck. Το μέτρο της στροφορμής του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

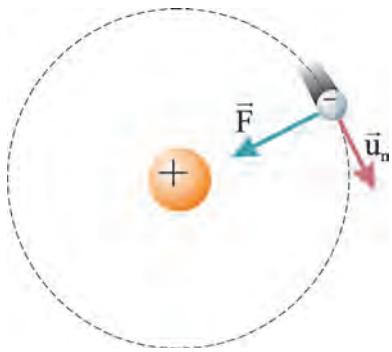
$$L = mv r$$



Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο του ατόμου. Σύμφωνα με την κλασική Φυσική, το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο έπρεπε να εκπέμπει συνεχές φάσμα και ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά να πέφτει στον πυρήνα.  
Εικόνα 4.1-12

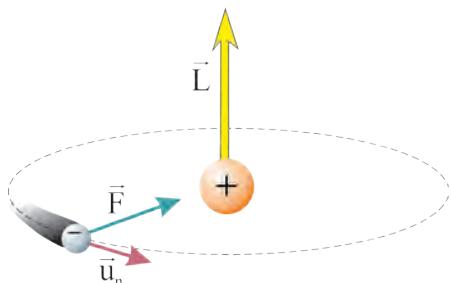


Ο Δανός φυσικός Niels Bohr (1885-1962). Τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1922 για την έρευνά του στη δομή των ατόμων.  
Εικόνα 4.1-13



**Άτομο του υδρογόνου.** Το πρωτόνιο θεωρείται ακίνητο. Η δύναμη Coulomb  $F$  προκαλεί την απαιτούμενη κεντρομόλος επιτάχυνση. Το ηλεκτρόνιο λοιπόν περιφέρεται με ταχύτητα  $v_n$  σε επιτρεπόμενη τροχιά ακτίνας  $r_n$ , ώστε να ισχύει:  $m v r = n \hbar$

Εικόνα 4.1-14



Το διάνυσμα της στροφορμής  $L$  του ηλεκτρονίου στο πρώτυπο του Bohr.  
Εικόνα 4.1-14α

όπου  $m$  είναι η μάζα του ηλεκτρονίου,  $v$  είναι το μέτρο της ταχύτητάς του και  $r$  η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του. Εφαρμόζοντας τη συνθήκη σύμφωνα με την οποία η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη, έχουμε :

$$m v r = n \frac{\hbar}{2\pi} = n \hbar, \quad n=1, 2, 3, \dots, \infty \quad (4.1)$$

γ. Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται σε ορισμένη επιτρεπόμενη τροχιά, δεν εκπέμπει ακτινοβολία. Η παραδοχή αυτή έρχεται σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια, να διαγράφει σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και τελικά να πέφτει στον πυρήνα.

δ. Όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά σε άλλη μικρότερης ενέργειας, τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής του ενέργειας. Αν  $E_\alpha$  είναι η ενέργεια του ατόμου πριν από τη μετάβαση,  $E_\tau$  η ενέργεια μετά τη μετάβαση και  $hf$  η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τότε ισχύει:

$$E_\alpha - E_\tau = hf \quad (4.2)$$

### Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου

Θα υπολογίσουμε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον ακίνητο πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από ένα πρωτόνιο. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η ηλεκτρική ελκτική δύναμη  $F = ke^2 / r^2$ , που ασκεί ο πυρήνας στο ηλεκτρόνιο, πρέπει να είναι ίση με  $F = ma_k$ , όπου  $a_k = v^2 / r$  είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση του ηλεκτρονίου:

$$F = m a_k \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad \text{ή} \quad v = e \sqrt{\frac{k}{m r}}$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην εξίσωση

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{βρίσκουμε:}$$

$$K = k \frac{e^2}{2r}$$

Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$U = -k \frac{e^2}{r}$$

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας:

$$E = K + U = k \frac{e^2}{2r} + (-k \frac{e^2}{r}) \quad \text{ή} \quad E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \quad (4.3)$$

Όταν αναφερόμαστε στην ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου, εννοούμε την ενέργεια του συστήματος που αποτελείται από το ηλεκτρόνιο και τον ακίνητο πυρήνα του ατόμου. Η ενέργεια αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και του πυρήνα.

### Επιτρεπόμενες τροχιές και τιμές ενέργειας

Η μικρότερη ακτίνα επιτρεπόμενης τροχιάς του ηλεκτρονίου ονομάζεται **ακτίνα του Bohr** και είναι ίση με  $r_1 = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Οι ακτίνες των άλλων επιτρεπόμενων τροχιών του ηλεκτρονίου δίνονται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{Επιτρεπόμενες τροχιές} \quad (4.4)$$

#### Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV)

Το ηλεκτρονιοβόλτ είναι η ενέργεια που μεταβιβάζεται σε ένα ηλεκτρόνιο, όταν αυτό επιταχύνεται μέσω διαφοράς δυναμικού  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

όπου  $n$  είναι ακέραιος θετικός αριθμός, ο οποίος ονομάζεται **κύριος κβαντικός αριθμός**, και μπορεί να πάρει τιμές από ένα μέχρι άπειρο:

$$n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

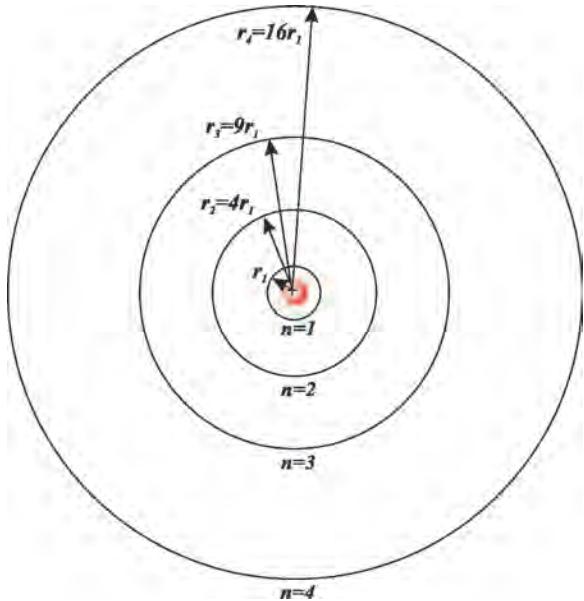
Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται στην τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα ( $n = 1$ ), τότε έχει την ελάχιστη ενέργεια, που είναι ίση με  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ . Όταν κινείται στις άλλες επιτρεπόμενες τροχιές, τότε έχει ολική ενέργεια που δίνεται από την εξίσωση:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{Επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας} \quad (4.5)$$

Γνωρίζοντας τις τιμές των  $r_1$  και  $E_1$  και αντικαθιστώντας  $n=1,2,3,\dots$  στις εξισώσεις 4.4 και 4.5, υπολογίζουμε τις επιτρεπόμενες τιμές της ακτίνας και της ενέργειας. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Κύριος κβαντικός αριθμός	$n=1$	$n=2$	$n=3$	...	$n \rightarrow \infty$
Ακτίνα	$r_1$	$4r_1$	$9r_1$	...	$\infty$
Ολική ενέργεια	$E_1$	$E_1/4$	$E_1/9$	...	0

Οι τιμές της ενέργειας είναι αρνητικές. Η μεγαλύτερη τιμή της ενέργειας είναι  $E=0$ . Αντιστοιχεί σε  $n \rightarrow \infty$  και  $r \rightarrow \infty$  και περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία το ηλεκτρόνιο έχει απομακρυνθεί από το άτομο (ιονισμός). Η φυσική σημασία του αρνητικού προσήμου της ολικής ενέργειας είναι ότι απαιτείται προσφορά ενέργειας, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα.



Επιτρεπόμενες τροχιές του ηλεκτρονίου στο πρώτυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.

Εικόνα 4.1-15

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 1

Ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ . Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι  $r_1 = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Να υπολογιστούν οι ακτίνες της τροχιάς και οι ενέργειες του ηλεκτρονίου στις δύο πρώτες διεγερμένες καταστάσεις, που αντιστοιχούν σε κβαντικούς αριθμούς  $n=2$  και  $n=3$ .

#### ΛΥΣΗ

Η ακτίνα της τροχιάς δίνεται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 \cdot r_1$$

Αντικαθιστώντας  $n=2$  και  $n=3$ , βρίσκουμε:

$$r_2 = 2^2 r_1 = 4 r_1 = 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$r_3 = 3^2 r_1 = 9 r_1 = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Η ολική ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από την εξίσωση:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας  $n=2$  και  $n=3$ , βρίσκουμε:

$$E_2 = \frac{E_1}{2^2} = \frac{E_1}{4} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{4} = -3,4 \text{ eV}$$

$$E_3 = \frac{E_1}{3^2} = \frac{E_1}{9} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{9} = -1,51 \text{ eV}$$

### Απόδειξη των τύπων (4.4) και (4.5)

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση που περιγράφει την κβάντωση της στροφορμής:  $m\omega = n\hbar$  (1) και το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου:

$$F = ma \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{\omega^2}{r} \quad \text{ή} \quad m\omega^2 r = ke^2 \quad (2)$$

Λύνουμε την (1) ως προς  $\omega$  και αντικαθιστούμε το αποτέλεσμα στη (2):

$$m \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 r^2} r = k e^2 \quad \text{ή} \quad r = n^2 \frac{\hbar^2}{m k e^2}$$

Αντικαθιστώντας το  $r$  με  $r_n$ , έχουμε:

$r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{mk e^2}$ , $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$	Ακτίνες επιτρεπόμενων τροχιών (4.6)
---	--

Αντικαθιστώντας  $n=1$ , βρίσκουμε την τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα  $r_1$ :

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{mk e^2}$$

Αντικαθιστώντας την τελευταία εξίσωση στη 4.6, παίρνουμε:

$$r_n = n^2 r_1$$

Αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση 4.3 το  $E$  με  $E_n$  και το  $r$  με  $r_n$ , παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για την ενέργεια του ατόμου:

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{ή} \quad E_n = -k \frac{e^2}{2r_n} \quad \text{ή λόγω της 4.6}$$

$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2}$ $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$	Επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας (4.7)
--	--

Η μικρότερη τιμή της ενέργειας αντιστοιχεί σε  $n=1$ . Αντικαθιστώντας  $n=1$  στην εξίσωση 4.7, βρίσκουμε:

$$E_1 = -\frac{mk^2 e^4}{2\hbar^2} \quad \text{και} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών  $m$ ,  $k$ ,  $e$  και  $\hbar = h/2\pi$ , υπολογίζουμε τη μικρότερη επιτρεπόμενη ακτίνα  $r_1$  και τη μικρότερη επιτρεπόμενη ενέργεια  $E_1$ . Είναι:

$$r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad \text{και} \quad E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

## 4.2 ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

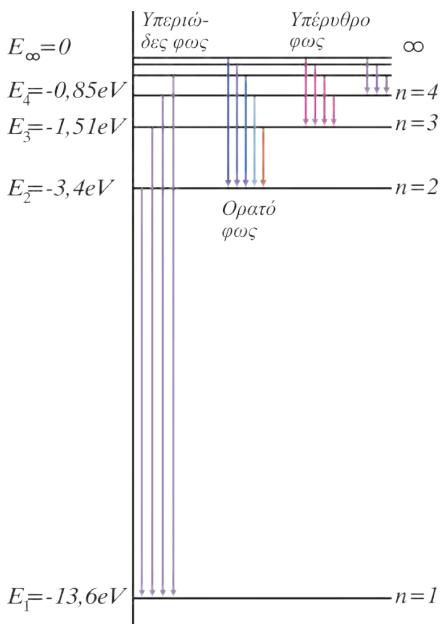
### Ενεργειακές στάθμες

Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του υδρογόνου και κάθε ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές στάθμες**. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές καταστάσεις**. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια  $E_1$  ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις  $E_2$ ,  $E_3$ , ... ονομάζονται **διεγερμένες καταστάσεις**.

### Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών

Παίρνουμε κατακόρυφο άξονα βαθμολογημένο σε τιμές ενέργειας και σχεδιάζουμε οριζόντιες ευθείες γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,

Η έννοια της κβάντωσης της ενέργειας είναι σημαντική, γιατί εξηγεί ότι το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές καθορισμένης ενέργειας και δεν κινείται σπειροειδώς πλησιάζοντας συνεχώς προς τον πυρήνα. Επίσης η κβάντωση της ενέργειας έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής. Όμως η κβάντωση της στροφορμής, σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, έχει ιστορική μόνο σημασία.



Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών των ατόμων του υδρογόνου. Οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζονται με κατακόρυφα βέλη.  
Εικόνα 4.2-16

... του ηλεκτρονίου. Το σχήμα που προκύπτει είναι το **διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών**.

Η απόσταση μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών αντιστοιχεί στη διαφορά των αντίστοιχων ολικών ενεργειών του ηλεκτρονίου. Η μετάβαση του ηλεκτρονίου από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζεται με κατακόρυφο βέλος, που έχει αρχή την αρχική στάθμη και τέλος την τελική στάθμη.

### Διέγερση του ατόμου

Αν το άτομο του υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση απορροφήσει ενέργεια, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά υψηλότερης ενέργειας.

**Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται διέγερση του ατόμου.** Η ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση του ατόμου ονομάζεται **ενέργεια διέγερσης**.

Το διεγερμένο άτομο παραμένει στην κατάσταση διέγερσης για ελάχιστο χρονικό διάστημα (της τάξης του  $10^{-8}s$ ) και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση μπορεί να γίνει είτε απευθείας με ένα άλμα, οπότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο, είτε με περισσότερα διαδοχικά άλματα, οπότε εκπέμπονται τόσα φωτόνια όσα και τα άλματα που πραγματοποιεί.

### Ιονισμός του ατόμου

Μερικές φορές το άτομο μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλη ενέργεια, ώστε είναι δυνατό το ηλεκτρόνιο του να απομακρυνθεί από τον πυρήνα, σε περιοχή που ο πυρήνας δεν ασκεί ηλεκτρική δύναμη στο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται οριστικά από τον πυρήνα και το άτομο μετατρέπεται σε θετικό ιόν. **Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται ιονισμός του ατόμου.** Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη τροχιά σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα, ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού**.

Η ενέργεια ιονισμού είναι ίση με:

$$E_{\text{ion.}} = E_{\infty} - E_1$$

όπου  $E_{\infty} = 0$  είναι η ενέργεια του ατόμου που αντιστοιχεί σε κατάσταση με  $n \rightarrow \infty$  και  $E_1$  η ενέργειά του στη θεμελιώδη κατάσταση. Επομένως:

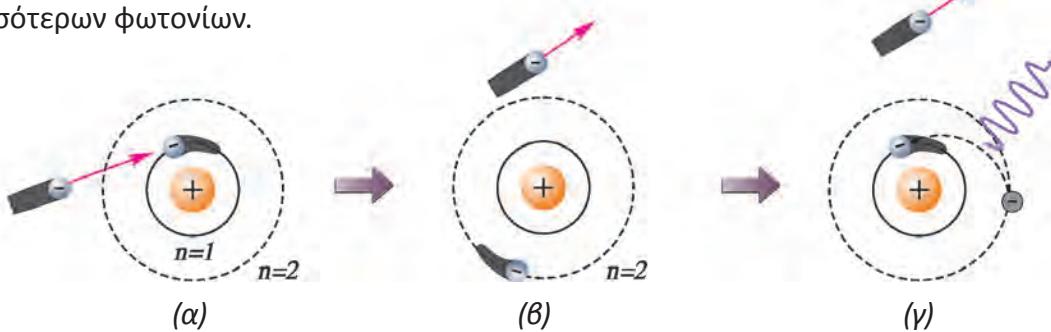
$$E_{\text{ion.}} = -E_1$$

Για το άτομο του υδρογόνου είναι  $E_1 = -13.6eV$ , οπότε η ενέργεια ιονισμού είναι  $E_{\text{ion.}} = 13.6eV$ .

## 4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

### Διέγερση με κρούση

Όταν ένα σωματίδιο (π.χ. ηλεκτρόνιο, ιόν ή άτομο) συγκρουεί με ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται, λόγου χάρη, στη θεμελιώδη κατάσταση, τότε το ηλεκτρόνιο του ατόμου μπορεί να απορροφήσει ικανή ποσότητα ενέργειας και να μεταπηδήσει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, με αποτέλεσμα το άτομο να διεγερθεί. Το διεγερμένο άτομο επανέρχεται μετά από ελάχιστο χρόνο στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος μπορεί να γίνει είτε με ένα άλμα κατευθείαν στη θεμελιώδη κατάσταση, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου, είτε με περισσότερα ενδιάμεσα άλματα από τροχιά σε τροχιά, με ταυτόχρονη εκπομπή περισσότερων φωτονίων.

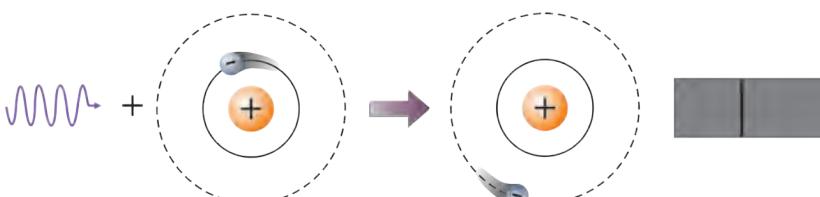


Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό πεδίο σε σωλήνα που περιέχει αέριο χαμηλής πίεσης επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που ήδη βρίσκονται μέσα στο σωλήνα. Όταν η ενέργειά τους γίνει αρκετά μεγάλη, τότε είναι δυνατό να προκαλέσουν διέγερση των ατόμων ή των ιόντων του αερίου με τα οποία συγκρούονται.

### Διέγερση με απορρόφηση ακτινοβολίας

Ας θεωρήσουμε ότι ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση ( $n=1$ ) και απορροφά ένα φωτόνιο, που έχει τόση ενέργεια όση ακριβώς απαιτείται, για να μεταπηδήσει το ηλεκτρόνιο από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n=2$ .

Μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα το διεγερμένο άτομο επανέρχεται στην κατάσταση  $n=1$  εκπέμποντας ένα φωτόνιο, που έχει μήκος κύματος ίσο με το μήκος κύματος του φωτονίου που απορρόφησε (σχήμα 4.3-19). Επομένως και οι ενέργειες των δύο φωτονίων είναι ίσες. Αυτός είναι ο λόγος που το φάσμα εκπομπής παρουσιάζει μία φωτεινή γραμμή στη θέση της σκοτεινής γραμμής του φάσματος απορρόφησης.



(a) Το άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση πριν από την κρούση με το ηλεκτρόνιο.  
 (b) Το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση.  
 (γ) Το άτομο επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.

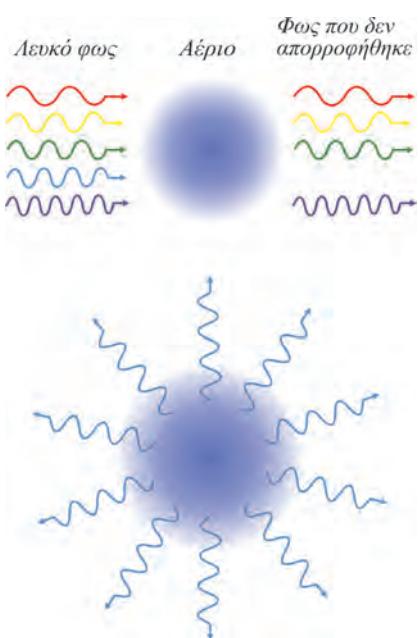
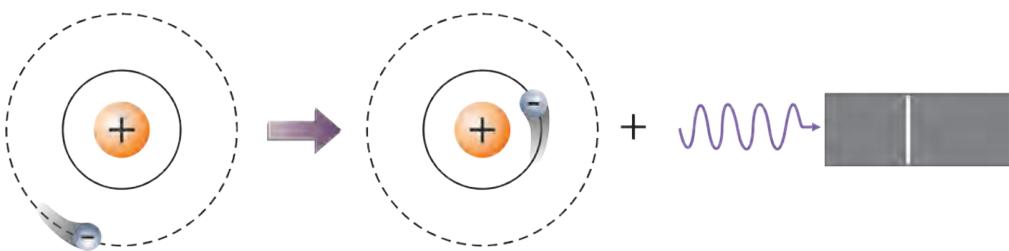
Εικόνα 4.3-17

Ερμηνεία του φάσματος απορρόφησης. Το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη κατάσταση στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση. Η σκοτεινή γραμμή του φάσματος απορρόφησης αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που απορροφήθηκε.

Εικόνα 4.3-18

Ερμηνεία των φάσματος εκπομπής. Το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο και μεταβαίνει στη θεμελιώδη κατάσταση. Η φωτεινή γραμμή αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται.

Εικόνα 4.3-19



Το φως που απορροφήθηκε από το αέριο επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις.

Εικόνα 4.3-20

Όταν λευκό φως, το οποίο, όπως γνωρίζουμε, περιέχει όλα τα μήκη κύματος, διέρχεται μέσα από αέριο υδρογόνο, τότε το αέριο απορροφά μόνο εκείνα τα φωτόνια τα οποία έχουν μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε μεταβάσεις μεταξύ των επιτρέπομενων τιμών ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου. Τα διεγερμένα άτομα του υδρογόνου επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια προς όλες τις κατευθύνσεις.

Συμπέρασμα:

Το αέριο απορροφά και εκπέμπει φωτόνια που έχουν ορισμένα μήκη κύματος. Τα μήκη κύματος των φωτονίων που απορροφά το αέριο είναι ίσα με τα μήκη κύματος των φωτονίων που εκπέμπει. Το φάσμα απορρόφησης του αερίου παρουσιάζει σκοτεινές γραμμές στη θέση των φωτεινών γραμμών του φάσματος εκπομπής.

### Η επιτυχία και η αποτυχία του προτύπου του Bohr

Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, όταν το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου μεταβεί από αρχική τροχιά, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n_{\alpha}$ , σε τελική τροχιά μικρότερης ενέργειας, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n_{\tau}$ , τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο συχνότητας  $f$ , για την οποία ισχύει:

$$E_{\alpha} - E_{\tau} = hf \quad \text{ή} \quad f = \frac{E_{\alpha} - E_{\tau}}{h} \quad (4.8)$$

Το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου υπολογίζεται από την εξίσωση:  $c = \lambda f$ .

Οι τιμές του μήκους κύματος που υπολογίζονται από την παραπάνω εξίσωση συμφωνούν με τις πειραματικές τιμές. Δηλαδή το πρότυπο του Bohr περιγράφει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου.

Το πρότυπο του Bohr μπορεί να επεκταθεί και σε ιόντα που έχουν μόνο ένα ηλεκτρόνιο, όπως το ( $\text{He}^+$ ), το ( $\text{Li}^{2+}$ ) κ.λπ. τα οποία ονομάζονται **υδρογονοειδή**.

Το πρότυπο του Bohr δεν μπορεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των ατόμων που έχουν δύο ή περισσότερα ηλεκτρόνια.

Κατά το 1920 αναπτύχθηκε μια νέα θεωρία, η κβαντομηχανική, η οποία περιγράφει με επιτυχία τα φαινόμενα που αναφέρονται στα σωματίδια του μικρόκοσμου και στο φως.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 2

Να υπολογιστεί το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το άτομο του υδρογόνου, όταν μεταπηδά από την κατάσταση με  $n=6$  στην κατάσταση με  $n=2$ . Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι  $E_1 = -13,6\text{eV}$  ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ )

### ΛΥΣΗ

Το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπει το άτομο προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$E_6 - E_2 = hf. \text{ Αντικαθιστώντας } f = \frac{c}{\lambda}, \text{ βρίσκουμε:}$$

$$E_6 - E_2 = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{ή} \quad \lambda = \frac{hc}{E_6 - E_2} \quad (1)$$

Οι ενέργειες  $E_2$  και  $E_6$  υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$E_2 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{2^2} = -3,4\text{eV} = -3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$$

$$E_6 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{6^2} = -\frac{13,6}{36}\text{eV} = -0,378 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}$$

Αντικαθιστώντας στην (1) τις παραπάνω τιμές, βρίσκουμε:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0,378 + 3,4) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \text{m} = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{m}$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 3

Ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια  $E_1 = -13,6\text{eV}$ :

(α) Να υπολογιστεί το μήκος κύματος ενός φωτονίου που θα προκαλέσει ιονισμό του ατόμου.

(β) Να υπολογιστεί η ελάχιστη ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου που θα προκαλέσει, λόγω κρούσης, ιονισμό του ατόμου.

### ΛΥΣΗ

(α) Η ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση  $n \rightarrow \infty$ , είναι:

$$E = E_\infty - E_1$$

Αντικαθιστώντας  $E_\infty = 0$  και  $E_1 = -13,6\text{eV}$ , βρίσκουμε:

$$E = 13,6\text{eV}$$

Η ενέργεια  $E$  που απαιτείται, για να ιονιστεί το

άτομο, είναι ίση με την ενέργεια  $hf$  του φωτονίου, που προκαλεί τον ιονισμό.

Άρα:  $E = hf$ .

Αντικαθιστώντας  $f = c/\lambda$ , βρίσκουμε:  $E = h \frac{c}{\lambda}$ , οπότε

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s})(3 \cdot 10^8 \text{m/s})}{13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}} = 0,91 \cdot 10^{-7} \text{m}$$

(β) Η ενέργεια που απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο, είναι ίση με την κινητική ενέργεια  $\frac{1}{2}mv^2$  του ηλεκτρονίου:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{ή} \quad v = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad \text{ή}$$

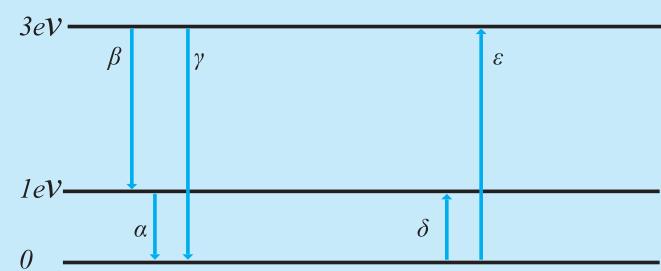
$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 13,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{J}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{kg}}} = 2,19 \cdot 10^6 \text{m/s}$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 4

Ένα υποθετικό άτομο έχει τρεις ενεργειακές στάθμες, τη θεμελιώδη και δύο άλλες διεγερμένες στάθμες με ενέργεια  $1\text{eV}$  και  $3\text{eV}$ , αντίστοιχα, περισσότερη από τη θεμελιώδη: (α) Να υπολογιστούν οι συχνότητες και τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που μπορεί να εκπέμπει το άτομο. (β) Ποια μήκη κύματος της ακτινοβολίας μπορεί να απορροφήσει το άτομο, αν βρίσκεται αρχικά στη θεμελιώδη κατάσταση; ( $h = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$ ,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ .)

### ΛΥΣΗ

(α) Στο σχήμα φαίνεται το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου.



Οι δυνατές ενέργειες των εκπεμπόμενων φωτονίων αντιστοιχούν στις μεταβάσεις  $\alpha$ ,  $\beta$  και  $\gamma$ . Χρη-

σιμοποιούμε την εξίσωση  $E=hf$  για καθεμιά από τις μεταβάσεις.

$$\text{Μετάβαση } \alpha: f_\alpha = \frac{E}{h} = \frac{1\text{eV} - 0}{4,136 \cdot 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}} = 2,42 \cdot 10^{14} \text{Hz}$$

$$\text{Μετάβαση } \beta: f_\beta = \frac{E}{h} = \frac{(3-1)\text{eV}}{4,136 \cdot 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}} = 4,84 \cdot 10^{14} \text{Hz}$$

$$\text{Μετάβαση } \gamma: f_\gamma = \frac{E}{h} = \frac{3\text{eV} - 0}{4,136 \cdot 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}} = 7,26 \cdot 10^{14} \text{Hz}$$

Τα αντίστοιχα μήκη κύματος της ακτινοβολίας είναι:

$$\lambda_\alpha = \frac{c}{f_\alpha} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{2,42 \cdot 10^{14} \text{Hz}} = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{m} = 1240 \text{nm}$$

$$\lambda_\beta = \frac{c}{f_\beta} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{4,84 \cdot 10^{14} \text{Hz}} = 6,20 \cdot 10^{-7} \text{m} = 620 \text{nm}$$

$$\lambda_\gamma = \frac{c}{f_\gamma} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{m/s}}{7,26 \cdot 10^{14} \text{Hz}} = 4,14 \cdot 10^{-7} \text{m} = 414 \text{nm}$$

(β) Από το διάγραμμα προκύπτει ότι, όταν το άτομο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, μπορεί να απορροφήσει μόνο φωτόνια με ενέργεια  $1\text{eV}$  ή  $3\text{eV}$  (μετάβαση  $\delta$  και ε αντίστοιχα).

Δεν μπορεί να απορροφήσει φωτόνια ενέργειας  $2\text{eV}$ , αφού δεν υπάρχει ενεργειακή στάθμη με ενέργεια  $2\text{eV}$  υψηλότερη από τη θεμελιώδη. Από τους υπολογισμούς που έχουν γίνει παρατηρούμε ότι τα αντίστοιχα μήκη κύματος θα είναι  $1240\text{nm}$  και  $414\text{nm}$ .

#### 4.4 ΑΚΤΙΝΕΣ X

Σε πολλές περιπτώσεις ένας γιατρός, προκειμένου να κάνει διάγνωση μιας πάθησης, παραπέμπει τον ασθενή του στον ακτινολόγο, για να βγάλει μια ακτινογραφία. Όσοι έχουμε βγάλει ακτινογραφία θώρακα γνωρίζουμε ότι κατά τη λήψη της ακτινογραφίας στεκόμαστε ακίνητοι, χωρίς να αναπνέουμε, ενώ ο ακτινολόγος βγαίνει έξω από το χώρο λήψης της ακτινογραφίας. Αν στη συνέχεια παρατηρήσουμε προσεκτικά την ακτινογραφία, θα δούμε ότι τα οστά του θώρακα εμφανίζονται ως φωτεινές περιοχές, ενώ οι ιστοί ως σκοτεινές περιοχές.

Κατά τη λήψη της ακτινογραφίας μια αόρατη ακτινοβολία διαπερνά το σώμα μας. Όμως τι είναι αυτή η ακτινοβολία και πώς παράγεται;

Προς το τέλος του 19ου αιώνα ο Γερμανός φυσικός Roentgen (Ρέντγκεν) μελετούσε τις ιδιότητες των ηλεκτρονίων που επιταχύνονταν, μέσα σε σωλήνα χαμηλής πίεσης, από ηλεκτρικό πεδίο και έπεφταν σε μεταλλικό στόχο. Ο Roentgen παρατήρησε ότι, όταν πλησίαζε στο σωλήνα μία φθορίζουσα ουσία, τότε η ουσία, ακτινοβολούσε φως, ενώ, όταν πλησίαζε ένα φωτογραφικό φίλμ, τότε αυτό μαύριζε. Υποστήριξε λοιπόν ότι τα φαινόμενα αυτά οφείλονταν σε ένα νέο άγνωστο και μυστηριώδη τύπο ακτίνων, τις οποίες ονόμασε ακτίνες X. Το σύμβολο X χρησιμοποιήθηκε από το Roentgen για να δηλώσει την άγνωστη μέχρι τότε φύση των ακτίνων, όπως στην Άλγεβρα το σύμβολο X χρησιμοποιείται για να συμβολίσει μία άγνωστη ποσότητα. Οι ακτίνες X ονομάζονται και ακτίνες Roentgen.

#### Παραγωγή ακτίνων X

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε από το Roentgen αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα που είναι εφοδιασμένος με δύο ηλεκτρόδια, την άνοδο και την κάθοδο. Η κάθοδος θερμαίνεται και εκπέμπει ηλεκτρόνια. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία της καθόδου τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου.



Wilhelm Roentgen (1845-1923). Ανακάλυψε το 1895 τις ακτίνες X. Το 1901 τιμήθηκε με το βραβείο Nobel. Εικόνα 4.4-21



Μεταξύ της ανόδου και της καθόδου εφαρμόζεται υψηλή τάση, η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια. Ο σωλήνας περιέχει αέριο σε πολύ χαμηλή πίεση (της τάξης των  $10^{-7}$  atm), ώστε να περιορίζονται οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα μόρια του αερίου. Τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο με μεγάλη ταχύτητα.

Η άνοδος εκπέμπει μια πολύ διεισδυτική ακτινοβολία, που ονομάζεται ακτίνες X. Επειδή αναπτύσσεται πολύ υψηλή θερμοκρασία στην άνοδο, το υλικό της ανόδου είναι δύστηκτο μέταλλο και ψύχεται για να μη λιώνει. Επομένως:

**Οι ακτίνες X παράγονται, όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο.**

### Φύση των ακτίνων X

Τα πειράματα έχουν δείξει ότι οι ακτίνες X είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (φωτόνια), που έχει πολύ μικρό μήκος κύματος. Το μήκος κύματος είναι 10000 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός και είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του ατόμου.

Επομένως:

**Οι ακτίνες X είναι αόρατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ορατών ακτινοβολιών.**

### Φάσμα των ακτίνων X

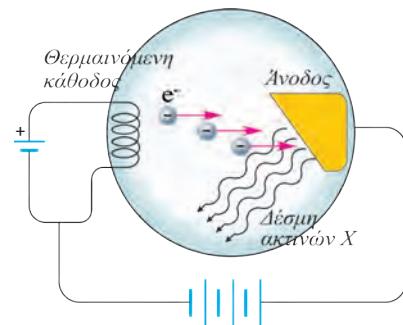
Το φάσμα της ακτινοβολίας X είναι σύνθετο. Αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα). Τα δύο είδη φάσματος οφείλονται σε δύο διαφορετικές διεργασίες παραγωγής και εκπομπής των ακτίνων X.

#### α. Γραμμικό φάσμα

Τα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υλικού της ανόδου. Τα άτομα της ανόδου διεγέρονται. Ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων του ατόμου μεταπηδά σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας. Η κενή θέση του ηλεκτρονίου μπορεί να συμπληρωθεί από ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου που βρίσκεται στις εξωτερικές στιβάδες, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου.

Επειδή οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του ατόμου είναι καθορισμένες, οι συχνότητες των φωτονίων που εκπέμπονται θα είναι καθορισμένες. Το φάσμα του φωτός που εκπέμπει το άτομο θα αποτελείται από γραμμές που είναι χαρακτηριστικές του υλικού της ανόδου.

Επειδή η ενέργεια που απαιτείται, για να εκδιωχθεί ένα ηλεκτρόνιο από μια εσωτερική τροχιά, είναι μεγάλη, θα πρέπει και η ενέργεια του ηλεκτρονίου που προκαλεί τη διέγερση να είναι μεγάλη. Επομένως απαιτείται το ηλεκτρόνιο να έχει επιταχυνθεί από μεγάλη διαφορά δυναμικού.



Συσκευή παραγωγής ακτίνων X. Ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο. Από το μεταλλικό στόχο εκπέμπονται ακτίνες X.

Εικόνα 4.4-22

### β. Συνεχές φάσμα

Ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να επιβραδυνθεί εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με τα άτομα του στόχου. Όπως έχουμε αναφέρει, ένα επιταχυνόμενο (ή επιβραδυνόμενο) φορτίο εκπέμπει ακτινοβολία. Η απώλεια της κινητικής ενέργειας ( $K_{\alpha} - K_{\tau}$ ) του ηλεκτρονίου θα είναι ίση με την ενέργεια του φωτονίου  $hf$  που εκπέμπεται.

Δηλαδή:

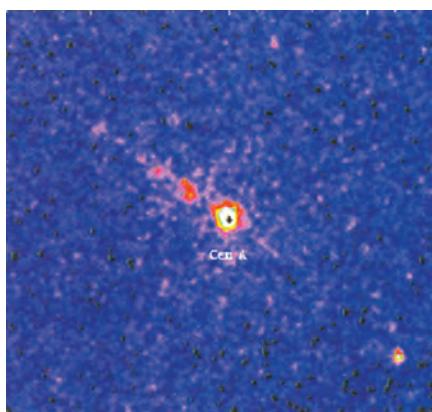
$$hf = K_{\alpha} - K_{\tau} \quad (4.9)$$

Το ηλεκτρόνιο μπορεί να χάσει όλη ή οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς του σε μία κρούση, δηλαδή μπορεί να ακινητοποιηθεί μετά από μία ή περισσότερες κρούσεις. Επειδή κατά τις κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του στόχου τα ηλεκτρόνια μπορεί να χάσουν οποιοδήποτε μέρος της ενέργειάς τους, συμπεραίνουμε ότι τα φωτόνια που εκπέμπονται θα έχουν οποιαδήποτε τιμή ενέργειας, που θα είναι μικρότερη ή ίση της αρχικής ενέργειας του ηλεκτρονίου. Επομένως το φάσμα της ακτινοβολίας αυτής θα είναι συνεχές.

### γ. Το μικρότερο μήκος κύματος

Το μικρότερο μήκος κύματος  $\lambda_{\min}$  της ακτινοβολίας εκπέμπεται, όταν η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου σε μία μόνο κρούση. Αντικαθιστώντας  $K_{\tau} = 0$  στην παραπάνω σχέση 4.9, βρίσκουμε:

$$hf = K_{\alpha} \quad (4.10)$$



Φωτογραφία με ακτίνες  $X$ , επεξεργασμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή, των πυρήνα ενός γαλαξία στον αστερισμό των Κενταύρου, όπου πιστεύουμε ότι υπάρχει μια μαύρη τρύπα. Ακτίνες  $X$  εκπέμπονται, καθός η μαύρη τρύπα έλκει μεγάλες ποσότητες μάζας από τη γύρω περιοχή και αυτές αποκτούν μεγάλες επιταχύνσεις.

Εικόνα 4.4-23

Η κινητική ενέργεια  $K_{\alpha}$  του ηλεκτρονίου είναι ίση με την ενέργεια  $eV$  που αποκτά μέσω της τάσης  $V$  που το επιταχύνει. Αντικαθιστώντας  $K_{\alpha} = eV$  στην παραπάνω σχέση, παίρνουμε:

$$hf = eV \text{ και επειδή } f = \frac{c}{\lambda_{\min}}, \text{ βρίσκουμε:}$$

$$h \frac{c}{\lambda_{\min}} = eV, \text{ οπότε } \lambda_{\min} = \frac{ch}{eV} \quad (4.11)$$

Παρατηρούμε ότι το ελάχιστο μήκος κύματος εξαρτάται μόνο από την τάση  $V$  που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

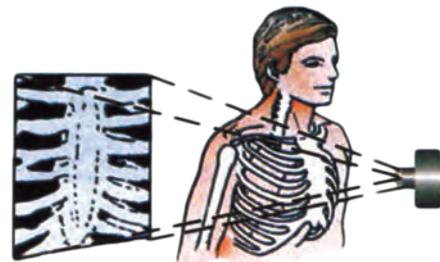
### Απορρόφηση των ακτίνων $X$

Όταν οι ακτίνες  $X$  διαπερνούν οποιοδήποτε υλικό, τότε ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη **φύση** του υλικού, το **μήκος κύματος** της ακτινοβολίας και το **πάχος** του υλικού.

**α.** Όσο μεγαλύτερος είναι ο ατομικός αριθμός Ζ των ατόμων του υλικού που απορροφά την ακτινοβολία τόσο μεγαλύτερη είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Το γεγονός αυτό εξηγεί γιατί στις ακτινογραφίες του ανθρώπινου σώματος τα οστά, τα οποία αποτελούνται από άτομα μεγαλύτερου ατομικού αριθμού, απορροφούν περισσότερη ακτινοβολία, ενώ οι ιστοί απορροφούν πολύ λιγότερη.



**β.** Όταν οι ακτίνες X διαπερνούν μια πλάκα, που έχει ορισμένο πάχος, τότε η απορρόφηση των ακτίνων αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Οι ακτίνες X που έχουν μικρά μήκη κύματος είναι περισσότερο διεισδυτικές και ονομάζονται **σκληρές ακτίνες**, ενώ οι ακτίνες που έχουν μεγάλα μήκη κύματος είναι λιγότερο διεισδυτικές και ονομάζονται **μαλακές ακτίνες**.



**γ.** Όσο το πάχος του υλικού είναι μεγαλύτερο τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορρόφηση της ακτινοβολίας μέσα στο υλικό αυτό.

## Χρήσεις των ακτίνων X

### Στην Ιατρική

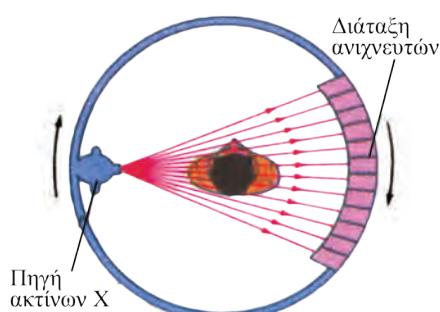
**α. Ακτινογραφία - Ακτινοσκόπηση.** Όπως έχουμε αναφέρει, η απορρόφηση των ακτίνων X εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό των χημικών στοιχείων του υλικού που τις απορροφά. Τα βαριά χημικά στοιχεία έχουν μεγάλο ατομικό αριθμό και απορροφούν περισσότερο την ακτινοβολία από ό,τι τα ελαφρά στοιχεία, τα οποία έχουν μικρό ατομικό αριθμό. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται η χρήση των ακτίνων X στη διάγνωση πολλών παθήσεων. Τα οστά περιέχουν στοιχεία μεγάλου ατομικού αριθμού (ασβέστιο, φώσφορος) και απορροφούν περισσότερο τις ακτίνες από ό,τι οι ιστοί, οι οποίοι αποτελούνται από ελαφρότερα στοιχεία (άνθρακας, οξυγόνο, υδρογόνο, άζωτο και άλλα).

Αν λοιπόν μεταξύ της πηγής των ακτίνων X και μιας φθορίζουσας οθόνης τοποθετηθεί ο προς εξέταση ασθενής, τότε πάνω στην οθόνη θα φανούν οι σκιές των διάφορων οργάνων (ακτινοσκόπηση). Αν στη θέση της φθορίζουσας οθόνης τοποθετηθεί μια φωτογραφική πλάκα, τότε θα πάρουμε πάνω στην πλάκα την ανάλογη φωτογραφία (ακτινογραφία).

**β. Αυτοματοποιημένη αξονική τομογραφία.** Τελευταία χρησιμοποιείται η αυτοματοποιημένη αξονική τομογραφία. Η πηγή των ακτίνων X παράγει μια αποκλίνουσα δέσμη, που έχει μορφή βεντάλιας. Οι ακτίνες της δέσμης διαπερνούν το ανθρώπινο σώμα και, όταν εξέρχονται από την άλλη πλευρά του σώματος, ανιχνεύονται, με διάταξη ανιχνευτών. Κάθε ανιχνευτής μετράει την απορρόφηση μιας λεπτής δέσμης, που διαπερνά το σώμα. Η συσκευή περιστρέφεται γύρω από το ανθρώπινο σώμα και ένας υπολογιστής επεξεργάζεται τις πληροφορίες.

Με αυτό τον τρόπο μπορούν να ανιχνευτούν όγκοι ή άλλες ανωμαλίες που είναι πολύ μικροί και δεν μπορούν να παρατηρηθούν με την ακτινογραφία.

Ακτινογραφία. Τα οστά απορροφούν εντονότερα τις ακτίνες X σε σύγκριση με τον υπόλοιπο ιστό. Έτοι στο φιλμ εμφανίζονται ως φωτεινότερες περιοχές. Εικόνα 4.4-24



Αρχή λειτουργίας αξονικού τομογράφου. Οι ακτίνες X, που περνούν μέσα από το σώμα, μετρούνται συγχρόνως σε κάθε διεύθυνση. Η πηγή και ο ανιχνευτής περιστρέφονται, ώστε να έχουμε μετρήσεις σε διαφορετικές γωνίες. Εικόνα 4.4-25

### Στη βιομηχανία

Οι ακτίνες X χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία, για να διαπιστωθεί η ύπαρξη κοιλοτήτων, ραγισμάτων ή άλλων ελαττωμάτων στο εσωτερικό των μεταλλικών αντικειμένων. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ίδια με τη διαδικασία της ακτινοδιαγνωστικής. Τα ελαττωματικά σημεία εντοπίζονται από το γεγονός ότι προκαλούν μικρότερη απορρόφηση.

### Βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες X

Οι ακτίνες X προκαλούν βλάβες στους οργανισμούς. Όταν απορροφηθούν από τους ιστούς, διασπούν τους μοριακούς δεσμούς και δημιουργούν ενεργές ελεύθερες ρίζες, που με τη σειρά τους μπορεί να διαταράξουν τη μοριακή δομή των πρωτεΐνων και ειδικά του γενετικού υλικού (DNA).

Αν το κύτταρο που έχει υποστεί βλάβη από την ακτινοβολία επιβιώσει, τότε μπορεί να δώσει πολλές γενεές μεταλλαγμένων κυττάρων. Αν οι αλλαγές στο DNA αφορούν γονίδια που ελέγχουν το ρυθμό πολλαπλασιασμού των κυττάρων, οι ακτίνες X μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο. Η υπερβολική έκθεση ενός οργανισμού σε ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στα γενετικά κύτταρα. Σ' αυτή την περίπτωση, ενώ ο ίδιος οργανισμός δε θα εμφανίσει κάποια βλάβη, θα επηρεαστούν οι απόγονοί του.

Η χρήση των ακτίνων X για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς πρέπει να γίνεται με **προσοχή**, εκτιμώντας τόσο τα οφέλη όσο και τους κινδύνους που προέρχονται από την έκθεση του οργανισμού σε ακτινοβολία για μεγάλο χρονικό διάστημα.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 5

Τα ηλεκτρόνια σε ένα σωλήνα ακτίνων X επιταχύνονται με διαφορά δυναμικού 50kV. Αν ένα ηλεκτρόνιο παράγει ένα φωτόνιο κατά την πρόσκρουσή του στο στόχο, να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X που παράγονται.

#### ΛΥΣΗ

Το ελάχιστο μήκος κύματος αντιστοιχεί στη μέγιστη ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου  $hf_{\max}$ . Αυτό συμβαίνει, όταν όλη η κινητική ενέργεια του

ηλεκτρονίου eV χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενός φωτονίου.

Έχουμε λοιπόν:

$$eV = hf_{\max} \text{ και επειδή } c = \lambda_{\min} f_{\max} \text{ ή } f_{\max} = \frac{c}{\lambda_{\min}} \\ \text{βρίσκουμε } eV = h \frac{c}{\lambda_{\min}} \text{ ή}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(50 \cdot 10^3 \text{ V})} = 2,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 4 - 6

Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες X με μήκος κύματος  $\lambda = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ . Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι  $I=40 \text{ mA}$  και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι  $t=0,1 \text{ s}$ .

Να υπολογιστούν:

- Η τάση που πρέπει να εφαρμοστεί μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.
- Η ισχύς και η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων.
- Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο. (Θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου.)

### ΛΥΣΗ

- Κάθε φωτόνιο της ακτινοβολίας έχει ενέργεια  $hf$  ή  $hc/\lambda$ . Η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση με την κινητική ενέργεια που απέκτησε το ηλεκτρόνιο εξαιτίας της επιτάχυνσής του μέσω της τάσης

V. Άρα:

$$eV = h \frac{c}{\lambda} \quad \text{ή} \quad V = \frac{hc}{\lambda e}$$

$$V = \frac{(6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})(1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m})} \quad \text{ή} \quad V = 82500 \text{ V}$$

β. Η ισχύς που μεταφέρει η δέσμη των ηλεκτρονίων είναι:

$$P = V \cdot I = 82500 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ W} = 3300 \text{ W}$$

Η ενέργεια που μεταφέρει η δέσμη είναι:

$$W = P \cdot t = 3300 \cdot 0,1 \text{ J} = 330 \text{ J}$$

γ. Το φορτίο q που προσπίπτει στην άνοδο σε χρόνο t είναι:

$$q = I \cdot t = 40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \text{ C} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ C}$$

και ο αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην άνοδο είναι:

$$N = \frac{q}{e} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ C}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 2,5 \cdot 10^{16} \text{ ηλεκτρόνια}$$

## Σύνοψη 4ου κεφαλαίου

- Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, το άτομο αποτελείται από μία σφαίρα ομοιόμορφα κατανεμημένου θετικού φορτίου, μέσα στην οποία είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια.
- Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford, το άτομο αποτελείται:
  - i. από μια μικρή περιοχή (πυρήνας), στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και όλη σχεδόν η μάζα του ατόμου,
  - ii. από τα ηλεκτρόνια, τα οποία κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα.
- Το υδρογόνο, όπως και όλα τα αέρια, μπορεί να εκπέμπει μόνο ορισμένες ακτινοβολίες και να απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.
- Για να ερμηνεύσει ο Bohr το φάσμα του υδρογόνου, διατύπωσε τις παρακάτω ιδέες:
  - i. Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες επιτρεπόμενες τροχιές, για τις οποίες η στροφορμή του είναι  $mvr = n \cdot (h / 2\pi) = n\hbar$  ( $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$ )
  - ii. Αν το ηλεκτρόνιο του ατόμου μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά ενέργειας  $E_\alpha$  σε άλλη τροχιά μικρότερης ενέργειας  $E_\tau$ , τότε το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο συχνότητας  $f$  και ισχύει:  $E_\alpha - E_\tau = hf$ .
- Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση:
$$E = -k \frac{e^2}{2r}$$
- Οι ακτίνες των επιτρεπόμενων τροχιών και οι αντίστοιχες τιμές της ολικής ενέργειας του ηλεκτρονίου δίνονται από τις σχέσεις:
 
$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{και} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots, \infty)$$
- Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας ονομάζονται ενεργειακές στάθμες. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται ενεργειακές καταστάσεις. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια  $E_1$  ονομάζεται θεμελιώδης κατάσταση. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις  $E_2, E_3, \dots$  ονομάζονται διεγερμένες καταστάσεις.
- Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται ιονισμός του ατόμου.
- Οι ακτίνες X παράγονται, όταν ηλεκτρόνια μεγάλης ταχύτητας, που έχουν επιταχυνθεί από υψηλή τάση, προσπίπτουν σε μεταλλικό στόχο. Είναι αόρατη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που έχει μήκη κύματος πολύ μικρότερα από τα μήκη κύματος των ορατών ακτινοβολιών.
- Το φάσμα των ακτίνων X είναι σύνθετο. Αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα).
- Το μικρότερο μήκος κύματος  $\lambda_{min}$  των ακτίνων X εκπέμπεται, όταν το ηλεκτρόνιο δίνει όλη την κινητική του ενέργεια σε ένα φωτόνιο σε μία μόνο κρούση. Το μικρότερο μήκος κύματος δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda_{min} = \frac{c \hbar}{eV}$$

- Οι ακτίνες X προκαλούν βιολογικές βλάβες.

## Ερωτήσεις

- 1.** Ποιο είναι το πρότυπο του Thomson για το άτομο;
- 2.** Ποιο είναι το πρότυπο του Rutherford για το άτομο;
- 3.** Όταν μία δέσμη σωμάτων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο στόχου, τότε παρατηρούμε ότι:
- I. τα περισσότερα σωμάτια α περνάνε ανεπηρέαστα μέσα από το στόχο.
  - II. αρκετά σωμάτια α αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες, ενώ λίγα αποκλίνουν κατά 180°.
- Ποια από τις παραπάνω παρατηρήσεις δείχνει ότι:
- α. Ο χώρος μέσα στο άτομο είναι σχεδόν κενός.
  - β. Το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου.
  - γ. Το κέντρο του ατόμου είναι θετικά φορτισμένο.
- 4.** Να εξηγήσετε γιατί το πρότυπο του Rutherford αδυνατεί να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων.
- 5.** Να διατυπώσετε το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.
- 6.** Να υπολογίσετε την κυνητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου σε συνάρτηση με την ακτίνα της τροχιάς του.
- 7.** Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών για το άτομο του υδρογόνου.
- 8.** Τι ονομάζεται:
- α. διέγερση,
  - β. ιονισμός,
  - γ. ενέργεια διέγερσης και
  - δ. ενέργεια ιονισμού;
- 9.** Να περιγράψετε το μηχανισμό διέγερσης του ατόμου:
- α. λόγω κρούσης και
  - β. λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας.
- 10.** Ποια γραμμικά φάσματα μπορεί να ερμηνεύσει το πρότυπο του Bohr και ποια δεν μπορεί;
- 11.** Πώς παράγονται οι ακτίνες X;
- 12.** Πώς ερμηνεύεται το γραμμικό φάσμα των ακτίνων X και πώς το συνεχές φάσμα;
- 13.** Να υπολογιστεί το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X.
- 14.** Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απορρόφηση των ακτίνων X και με ποιο τρόπο;
- 15.** Ποια είναι η φύση των ακτίνων X;
- 16.** Πού χρησιμοποιούνται οι ακτίνες X;
- 17.** Ποιες είναι οι βιολογικές βλάβες που προκαλούν οι ακτίνες X;
- 18.** Πώς επηρεάζονται οι ακτίνες X:
- α. από τη θερμοκρασία της καθόδου,
  - β. από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου,
  - γ. από το υλικό της ανόδου;
- (Στις ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής που ακολουθούν να κυκλώσετε το γράμμα που αντιστοιχεί στη σωστή απάντηση.)
- 19.** Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, το οποίο βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση:
- α. έχει απομακρυνθεί από το άτομο.
  - β. ηρεμεί.
  - γ. είναι σε τροχιά με τη χαμηλότερη ενέργεια.
  - δ. είναι σε τροχιά με την υψηλότερη ενέργεια.
- 20.** Ένα άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο, όταν ένα από τα ηλεκτρόνιά του:
- α. απομακρύνεται από το άτομο.
  - β. μεταβαίνει σε τροχιά μικρότερης ενέργειας.
  - γ. μεταβαίνει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας.
  - δ. περιφέρεται σε επιτρεπόμενη τροχιά.
- 21.** Το γραμμικό φάσμα εκπομπής αερίου περιέχει μήκη κύματος που είναι:
- α. ίδια για όλα τα στοιχεία.
  - β. χαρακτηριστικά του στοιχείου που το εκπέμπει.
  - γ. διαφορετικά από τα μήκη κύματος του φάσματος απορρόφησης του ίδιου στοιχείου.
  - δ. στην περιοχή του ορατού.

**22.** Ποιο από τα παρακάτω πειραματικά δεδομένα δείχνει την ύπαρξη διακριτών ενεργειακών σταθμών στα άτομα;

α. Το φάσμα εκπομπής ενός στοιχείου περιέχει φωτεινότερες γραμμές σε μεγαλύτερη θερμοκρασία.

β. Το φάσμα απορρόφησης ενός στοιχείου έχει σκοτεινές γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής.

γ. Το φάσμα των ακτίνων X παρουσιάζει ένα ελάχιστο μήκος κύματος.

**23.** Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

α. Η ενέργεια ιονισμού είναι μικρότερη από την ενέργεια διέγερσης.

β. Η ενέργεια ενός φωτονίου είναι  $h\lambda$ , όπου  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

γ. Ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε διεγερμένη ενεργειακή στάθμη ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια.

δ. Η θεμελιώδης κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου είναι η κατάσταση στην οποία το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στη χαμηλότερη επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη.

**24.** Το σχήμα δείχνει το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Τα μήκη κύματος  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  είναι τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά τις μεταβάσεις του ηλεκτρονίου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών, όπως δείχνουν τα βέλη. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

α.  $\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda_3$       γ.  $f_2 = f_1 + f_3$

β.  $\lambda_2 > \lambda_3$       δ.  $f_2 = \frac{f_1 f_3}{f_1 + f_3}$

**25.** Το φάσμα απορρόφησης ενός αερίου εμφανίζει μια συνεχή χρωματιστή ταινία που διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές:

α. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών είναι χαρακτηριστικές του στοιχείου.

β. Μπορεί δύο διαφορετικά στοιχεία να έχουν το ίδιο φάσμα απορρόφησης.

γ. Οι σκοτεινές γραμμές δημιουργούνται, γιατί το λευκό φως απορροφά την ακτινοβολία που εκπέμπει το αέριο.

δ. Οι θέσεις των σκοτεινών γραμμών εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του αερίου.

**26.** Το γραμμικό φάσμα των ακτίνων X αποτελείται από δύο γραμμές που αντιστοιχούν σε μήκη κύματος  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$  αντίστοιχα. Οι γραμμές αυτές θα μετατοπιστούν, αν αλλάξουμε:

α. το υλικό της ανόδου.

β. την τάση μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

γ. τη θερμοκρασία της καθόδου.

δ. τη θερμοκρασία της ανόδου.

**27.** Το ελάχιστο μήκος κύματος  $\lambda_{min}$  του συνεχούς φάσματος των ακτίνων X θα μεταβληθεί, αν μεταβάλλουμε:

α. το υλικό της ανόδου.

β. τη θερμοκρασία της καθόδου.

γ. τη διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

δ. τη θερμοκρασία της ανόδου.

Θεωρούμε ότι τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα.

**28.** Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:

α. το ηλεκτρόνιο εκπέμπει συνεχώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.

β. η στροφορμή του ηλεκτρονίου μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή.

γ. το άτομο αποτελείται από μία σφαίρα θετικού φορτίου ομοιόμορφα κατανεμημένου.

δ. το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε επιτρεπτές τροχιές.

**29.** Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες λανθασμένες;

α. Σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές και όχι γραμμικό φάσμα.

β. Ο Thomson πρότεινε το λεγόμενο πλανητικό μοντέλο για το άτομο.

γ. Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου, εκπέμπει ακτινοβολία όταν κινείται σε επιτρεπόμενη τροχιά.

δ. Το σωμάτιο α είναι ένας πυρήνας ηλίου ( ${}_2^4\text{He}$ ).

**30.** Ποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές και ποιες λανθασμένες;

Στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου:

α. Η ακτίνα της νιοστής τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι ανάλογη του  $n^2$ .

β. Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στη νιοστή τροχιά είναι αντιστρόφως ανάλογη του κύριου κβαντικού αριθμού  $n$ .

γ. Η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $h/2\pi$ .

δ. Το μέτρο της δυναμικής ενέργειας του ηλεκτρονίου σε μια τροχιά είναι μεγαλύτερο από την κινητική του ενέργεια.

**31.** Στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου ο λόγος της κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου σε μια τροχιά προς την ολική ενέργεια, είναι:

α. -1	β. 1	γ. 1/2	δ. 2
-------	------	--------	------

**32.** Η ενέργεια ιονισμού του ατόμου του υδρογόνου είναι 13,6eV. Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να διεγερθεί το άτομο του υδρογόνου από τη θεμελιώδη κατάσταση είναι:

α. 3,4eV	γ. -13,6eV
----------	------------

β. 13,6eV	δ. 10,2eV
-----------	-----------

**33.** Το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων X εξαρτάται:

α. από την ένταση του ρεύματος.

β. από την τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου.

γ. από τη φύση του αερίου που περιέχεται στο σωλήνα παραγωγής των ακτίνων X.

δ. από το υλικό της ανόδου.

## Ασκήσεις και προβλήματα

Οι παρακάτω φυσικές σταθερές θεωρούνται γνωστές:

Σταθερά του νόμου Coulomb.....  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$

Φορτίο ηλεκτρονίου.....  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Μάζα ηλεκτρονίου.....  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Σταθερά του Planck.....  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Ταχύτητα του φωτός στο κενό.....  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

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

**1.** Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι  $r=5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$ .

Να υπολογιστούν:

α. η ταχύτητα του ηλεκτρονίου,

β. η περίοδος της κίνησης του ηλεκτρονίου,

γ. η κινητική, η δυναμική και η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου.

**2.** Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν αυτό βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι  $-13,6 \text{ eV}$ :

α. Ποια θα είναι η ενέργεια του ατόμου στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση ( $n=2$ ) και ποια στη δεύτερη διεγερμένη κατάσταση ( $n=3$ );

β. Το άτομο διεγίρεται και αποκτά ενέργεια  $-0,85 \text{ eV}$ . Σε ποιο κύριο κβαντικό αριθμό αντιστοιχεί η διεγερμένη αυτή κατάσταση;

**3.** Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, όταν βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση, είναι  $-13,6 \text{ eV}$ . Ηλεκτρόνια συγκρούονται με άτομα του υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Τα άτομα διεγέρονται και εκπέμπουν γραμμικό φάσμα που αποτελείται μόνο από μία γραμμή ορισμένης συχνότητας. Ποια είναι η ελάχιστη και ποια η μέγιστη ενέργεια των ηλεκτρονίων που διεγέρουν τα άτομα του υδρογόνου; (Η ορμή του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση.)

**4.** Διεγερμένα άτομα υδρογόνου βρίσκονται σε κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό  $n=4$ :

α. Να υπολογιστεί το πλήθος των γραμμών του φάσματος εκπομπής του αερίου.

β. Να σχεδιαστεί το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις που πραγματοποιούνται.

**5.** Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση στην οποία η ολική ενέργεια είναι  $-13,6 \text{ eV}$ :

α. Ποια ελάχιστη ενέργεια απαιτείται, για να ιονιστεί το άτομο;

β. Ποια ενέργεια απαιτείται, για να διεγερθεί το άτομο στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση ( $n=2$ );

γ. Το άτομο του υδρογόνου απορροφά, λόγω κρούσης, ενέργεια  $15 \text{ eV}$  και ιονίζεται. Ποια κινητική ενέργεια αποκτά τελικά το ηλεκτρόνιο, αν η κινητική ενέργεια του ατόμου δε μεταβάλλεται κατά την κρούση;

**6.** Ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέσω τάσης  $12,3 \text{ V}$  και περνάνε μέσα από αέριο που αποτελείται από άτομα υδρογόνου τα οποία βρίσκονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Να υπολογιστούν τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το αέριο. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι  $-13,6 \text{ eV}$ .

**7.** Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων  $X$  τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από τάση  $10 \text{ kV}$ . Να υπολογιστεί η μέγιστη συχνότητα και το ελάχιστο μήκος κύματος των ακτίνων  $X$  που παράγονται.

**8.** Σε σωλήνα παραγωγής ακτίνων  $X$  εφαρμόζεται τάση ( $\alpha$ )  $V_1 = 10 \text{ kV}$ , ( $\beta$ )  $V_2 = 40 \text{ kV}$ . Τα αντίστοιχα ελάχιστα μήκη κύματος των ακτίνων  $X$  είναι  $\lambda_1$  και  $\lambda_2$ . Να υπολογιστεί ο λόγος  $\lambda_1/\lambda_2$ .

**9.** Σε μια ακτινογραφία απαιτούνται ακτίνες  $X$  μήκους κύματος  $\lambda = 10^{-10} \text{ m}$ . Η ένταση του ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι  $40 \text{ mA}$  και ο χρόνος λήψης της ακτινογραφίας είναι  $0,1 \text{ s}$ . Θεωρούμε ότι όλη η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου:

α. Ποια τάση εφαρμόζεται στο σωλήνα παραγωγής ακτίνων  $X$ ;

β. Πόση ισχύ και πόση ενέργεια μεταφέρει η ηλεκτρονική δέση;

γ. Ποια είναι η ταχύτητα των ηλεκτρονίων τη στιγμή που προσπίπτουν στην άνοδο;

δ. Πόσα ηλεκτρόνια ανά δευτερόλεπτο προσπίπτουν στην άνοδο;

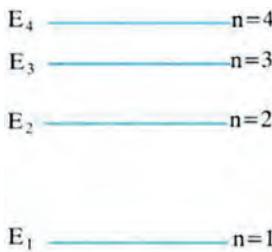
ε. Η ισχύς της ακτινοβολίας  $X$  αν η απόδοση της συσκευής σε ακτίνες  $X$  είναι  $2\%$ .

στ. Η ενέργεια που μεταφέρεται από την ακτινοβολία σε χρονικό διάστημα  $\Delta t = 0,1 \text{ s}$ .

ζ. Η μεταβολή επί τοις % στην τιμή της ανοδικής τάσης, αν θέλουμε το ελάχιστο μήκος κύματος του συνεχούς φάσματος να ελαττωθεί κατά 20%. (Θεωρούμε ότι όλη η ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται σε ενέργεια ενός φωτονίου.)

**10.** Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη του κατάσταση ( $n=1$ ) με ενέργεια  $E_1 = -13,6\text{eV}$ .

Στο σχήμα δίνεται το διάγραμμα των τεσσάρων πρώτων ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου.



α. Να υπολογίσετε την ενέργεια κάθε διεγερμένης κατάστασης ( $n=2, n=3, n=4$ ).

β. Ένα σωματίδιο με κινητική ενέργεια  $K=13\text{eV}$  συγκρούεται με το παραπάνω άτομο υδρογόνου. Το άτομο απορροφά τμήμα της κινητικής ενέργειας του σωματιδίου και διεγείρεται στην ενεργειακή στάθμη με κύριο κβαντικό αριθμό  $n=3$ . Να υπολογίσετε την τελική κινητική ενέργεια του σωματιδίου.

γ. Το διεγερμένο άτομο, μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα, επανέρχεται στη θεμελιώδη του κατάσταση. Να μεταφέρετε το σχήμα των ενεργειακών σταθμών στο τετράδιό σας και να σχεδιάσετε τις δυνατές μεταβάσεις του ηλεκτρονίου από τη διεγερμένη κατάσταση στη θεμελιώδη κατάσταση.

δ. Σε μια από τις παραπάνω μεταβάσεις εκπέμπεται ακτινοβολία με τη μεγαλύτερη συχνότητα. Να υπολογίσετε τη συχνότητα αυτή.

**11.** Διεγερμένα άτομα υδρογόνου αποδιεγείρονται και τα άτομα επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης είναι  $E_1 = -13,6\text{V}$ . Από τη μελέτη των φασματικών γραμμών υπολογίστηκαν τρεις διαφορές ενεργειών μεταξύ των διεγερμένων καταστάσεων και της θεμελιώδους κατάστασης και βρέθηκαν ίσες με  $12,75\text{eV}$ ,  $12,09\text{eV}$  και  $10,2\text{eV}$ .

α. Να υπολογίσετε τις ενέργειες που αντιστοιχούν στις διεγερμένες καταστάσεις των ατόμων υδρογόνου.

β. Να υπολογίσετε τους κβαντικούς αριθμούς στους οποίους αντιστοιχούν οι διεγερμένες καταστάσεις.

γ. Να σχεδιάσετε το διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών, στο οποίο να φαίνονται οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων που πραγματοποιούνται.

δ. Σε ένα από τα άτομα του υδρογόνου, που βρίσκεται πλέον στη θεμελιώδη κατάσταση, προσπίπτει μονοχρωματική ακτινοβολία, με συνέπεια το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου να έχει κινητική ενέργεια  $K=6,29\text{eV}$ , σε περιοχή όπου η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα είναι πρακτικά μηδέν. Να υπολογίσετε τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

**12.** Προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη κοιλότητας στο εσωτερικό ενός μεταλλικού αντικειμένου, χρησιμοποιούνται ακτίνες X. Στη διάταξη παραγωγής των ακτίνων X, η τάση που εφαρμόζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου είναι  $16.575\text{V}$ . Τα ηλεκτρόνια ξεκινούν από την κάθοδο με μηδενική ταχύτητα, επιταχύνονται και προσπίπτουν στην άνοδο. Θεωρούμε ότι η θερμοκρασία της καθόδου είναι σταθερή και ότι η κινητική ενέργεια κάθε ηλεκτρονίου μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε ενέργεια ενός φωτονίου σε μία μόνο κρούση. Να υπολογίσετε:

α. την κινητική ενέργεια που έχει κάθε ηλεκτρόνιο όταν φθάνει στην άνοδο.  
β. το ελάχιστο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το υλικό της ανόδου. Στην παραπάνω διάταξη παραγωγής ακτίνων X, μεταβάλλοντας την τάση της ανόδου και καθόδου, η αρχική ισχύς  $P_1$  της δέσμης των ηλεκτρονίων τετραπλασιάζεται και παίρνει την τιμή  $P_2 = 4P_1$ , ενώ η θερμοκρασία της καθόδου διατηρείται σταθερή και η ένταση του ρεύματος των ηλεκτρονίων παραμένει η ίδια. Να υπολογίσετε:

γ. το λόγο των ταχυτήτων  $u_1/u_2$ , όπου  $u_1$  και  $u_2$  οι ταχύτητες με τις οποίες τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν στην άνοδο πριν και μετά τον τετραπλασιασμό της ισχύος, αντίστοιχα.

δ. το ελάχιστο μήκος κύματος της παραγόμενης ακτινοβολίας, μετά τον τετραπλασιασμό της ισχύος και να δικαιολογήσετε ποια από τις δύο ακτινοβολίες είναι περισσότερο διεισδυτική.

## Αιτιοκρατία και κβαντομηχανική

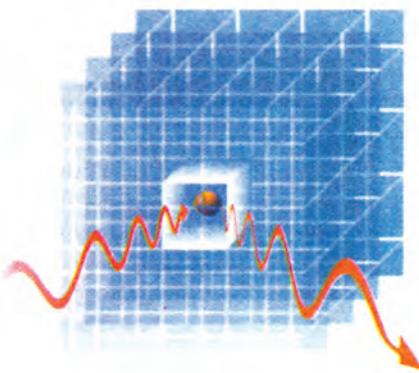
Η επιτυχία των επιστημονικών θεωριών, ιδιαίτερα της θεωρίας του Νεύτωνα για τη βαρύτητα, οδήγησε στις αρχές του 19ου αιώνα το Γάλλο φυσικό Pierre Simon Laplace (Λαπλάς) να υποστηρίξει ότι το Σύμπαν είναι απολύτως ντετερμινιστικό (αιτιοκρατικό). Υπέθεσε ότι πρέπει να υπάρχει ένα σύνολο φυσικών νόμων, που θα μας επέτρεπε να προβλέψουμε οπιδήποτε συμβαίνει στο Σύμπαν, αν γνωρίζαμε απόλυτα την κατάστασή του σε κάποια χρονική στιγμή.

Ο Laplace όμως δεν περιορίστηκε σ' αυτό. Υποστήριξε ότι υπάρχουν παρόμοιοι νόμοι που προσδιορίζουν τα πάντα, ακόμη και την ανθρώπινη συμπεριφορά.

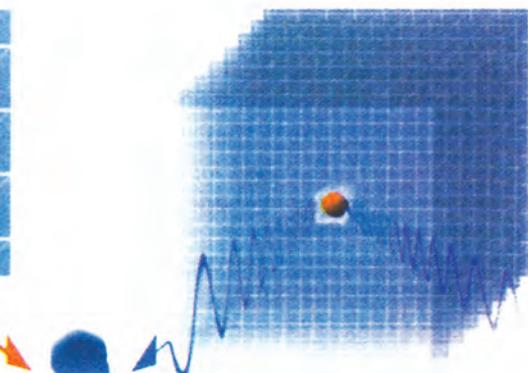
Το δόγμα του επιστημονικού ντετερμινισμού καταπολεμήθηκε από πολλούς που αισθάνονταν ότι περιόριζε την ελευθερία του Θεού να παρεμβαίνει στον κόσμο, παρέμεινε όμως το βασικό αξίωμα της επιστήμης έως και τα πρώτα χρόνια του αιώνα μας. Μία από τις πρώτες ενδείξεις ότι η πεποίθηση αυτή πρέπει να εγκαταλειφθεί παρουσιάστηκε κατά τη μελέτη της ακτινοβολίας των θερμών σωμάτων, όπως τα άστρα. Σύμφωνα με ότι πίστευαν εκείνη την εποχή, ένα θερμό αντικείμενο έπρεπε να ακτινοβολεί στο περιβάλλον του την ίδια ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε όλες τις περιοχές συχνοτήτων. Επειδή όμως οι περιοχές συχνοτήτων είναι άπειρες, έπρεπε να είναι άπει-



Το φως υψηλότερης συχνότητας διαταράσσει την ταχύτητα του σωματίδιου περισσότερο από ό,τι το φως χαμηλότερης συχνότητας.



Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται, για να παρατηρηθεί το σωματίδιο, τόσο μεγαλύτερη είναι η απροσδιοριστία της θέσης του, αλλά επίσης τόσο μεγαλύτερη είναι η βεβαιότητα όσον αφορά την ταχύτητά του.



Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιείται, για να παρατηρηθεί το σωματίδιο, παρατηρητής τόσο μεγαλύτερη είναι η βεβαιότητα της θέσης του, αλλά επίσης τόσο μεγαλύτερη είναι η απροσδιοριστία όσον αφορά την ταχύτητά του.

ρη και η συνολική ποσότητα ακτινοβολούμενης ενέργειας.

Για να αποφύγει αυτό το προφανώς μη αποδεκτό συμπέρασμα, ο Γερμανός φυσικός Max Planck υπέθεσε το 1900 ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται κατά ασυνεχή ποσά, που ονομάστηκαν κβάντα. Επιπλέον κάθε κβάντο μεταφέρει ποσότητα ενέργειας που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα των κυμάτων που εκπέμπονται. Άρα η εκπομπή ακτινοβολίας στις μεγάλες συχνότητες θα περιορίζεται, αφού εκεί η εκπομπή ενός κβάντου απαιτεί μεγαλύτερη ενέργεια από όση είναι διαθέσιμη. Έτσι το συνολικό ποσό ενέργειας που εκπέμπεται θα ήταν περιορισμένο και όχι άπειρο.

Οι επιπτώσεις της θεωρίας των κβάντων για το δόγμα του ντετερμινισμού δεν κατανοήθηκαν παρά μόνο το 1926, όταν ένας άλλος Γερμανός φυσικός, ο Werner Heisenberg (Χάισενμπεργκ), διατύπωσε την περίφημη αρχή του, την αρχή της απροσδιοριστίας.

Για να μπορέσουμε να προβλέψουμε τη μελλοντική θέση και ταχύτητα ενός σωματιδίου, πρέπει να μπορούμε να μετρήσουμε επακριβώς την τωρινή του θέση και ταχύτητα. Ο προφανής τρόπος, για να πετύχουμε κάτι τέτοιο, είναι να φωτίσουμε το σωματίδιο. Κάποια από τα κύματα του φωτός θα ανακλαστούν πάνω του και θα υποδείξουν το σημείο όπου βρίσκεται. Δε θα μπορούμε όμως να προσδιορίσουμε τη θέση του με μεγαλύτερη ακρίβεια από την απόσταση μεταξύ των κορυφών των κυμάτων του φωτός που χρησιμοποιούμε. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι, για να μετρήσουμε με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη θέση ενός σωματιδίου, χρειαζόμαστε φως με πολύ μικρό μήκος κύματος. Άλλα από την υπόθεση των κβάντων του Planck προκύπτει ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οσοδήποτε μικρή ποσότητα φωτός. Πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τουλάχιστον ένα κβάντο. Αυτό το κβάντο θα προκαλέσει μια απρόβλεπτη διαταραχή στη θέση και στην ταχύτητα του σωματιδίου. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η απαιτούμενη ακρίβεια μέτρησης της θέσης του σωματιδίου τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός που χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε, και τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια του κβάντου. Έτσι

η ταχύτητα του σωματιδίου θα υποστεί ακόμη μεγαλύτερη διαταραχή.

Με άλλα λόγια, όσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια με την οποία προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση του σωματιδίου τόσο πιο μικρή είναι η ακρίβεια με την οποία μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητά του και αντίστροφα. Ο Heisenberg έδειξε ότι, αν πολλαπλασιάσουμε την απροσδιοριστία στη θέση του σωματιδίου επί την απροσδιοριστία στην ταχύτητά του, επί τη μάζα του, θα έχουμε έναν αριθμό που δεν μπορεί ποτέ να γίνει πιο μικρός από ορισμένη ποσότητα, τη λεγόμενη σταθερά του Planck.

Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg είναι θεμελιώδης χαρακτηριστική ιδιότητα του κόσμου. Η αρχή της απροσδιοριστίας είχε βαθιά επίπτωση στην εικόνα του ανθρώπου για τον κόσμο. Αν και πέρασαν περισσότερα από πενήντα χρόνια, αυτή η επίπτωση δεν έχει κατανοηθεί εντελώς από πολλούς φιλοσόφους και εξακολουθεί να αποτελεί αντικείμενο διαμάχης.

Η αρχή της απροσδιοριστίας σήμανε το τέλος του ονείρου του Laplace για μία θεωρία της Φυσικής και ένα μοντέλο του Σύμπαντος που θα ήταν απόλυτα ντετερμινιστικά. Η νέα θεωρία, που βασίστηκε στην αρχή της απροσδιοριστίας, ονομάστηκε κβαντική μηχανική. Σύμφωνα με τη νέα θεωρία, ένα σωματίδιο δεν έχει μία θέση και μία ταχύτητα διαχωρισμένες μεταξύ τους, καλά ορισμένες και παρατηρήσιμες. Αντί γ' αυτές περιγράφεται με μία συνάρτηση της θέσης και της ταχύτητάς του, που λέγεται κυματοσυνάρτηση. Η κυματοσυνάρτηση μας μιλά μόνο για τις πιθανότητες να έχει το σωματίδιο διάφορες τιμές θέσης και ταχύτητας.

Η κβαντική μηχανική δεν προβλέπει για ένα πείραμα ένα μοναδικά καθορισμένο αποτέλεσμα, αλλά ένα πλήθος διαφορετικών πιθανών αποτελεσμάτων και μας πληροφορεί για το πόσο πιθανό είναι το καθένα τους. Η κβαντική μηχανική εισάγει λοιπόν στην επιστήμη ένα αναπόφευκτο στοιχείο αδυναμίας πρόβλεψης και τυχαίου.

Απόσπασμα από το βιβλίο  
Το χρονικό του χρόνου του Stephen Hawking  
(Στέφαν Χόκινγκ).

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ (S.I.)**

Ποσότητα	Όνομα μονάδας Θεμελιώδεις μονάδες του S.I.	Σύμβολο	
Μήκος	Meter	m	
Μάζα	Kilogram	Kg	
Χρόνος	Second	s	
Ένταση ηλεκτρικού ρεύματος	Ampere	A	
Θερμοδυναμική θερμοκρασία	Kelvin	K	
Ένταση φωτεινής ακτινοβολίας	Candela	cd	
Ποσότητα ύλης	Mole	mol	
	Παράγωγες μονάδες του S.I.	Σύμβολο	Ισοδύναμες μονάδες
Επιφάνεια	Τετραγωνικό μέτρο	$m^2$	
Όγκος	Κυβικό μέτρο	$m^3$	
Συχνότητα	Hertz	Hz	$s^{-1}$
Πυκνότητα	Kilogram ανά κυβικό μέτρο	$Kg/m^3$	
Ταχύτητα	Meter ανά second	m/s	
Γωνιακή ταχύτητα	Radian ανά second	rad/s	
Επιτάχυνση	Meter ανά second στο τετράγωνο	$m/s^2$	
Δύναμη	Newton	N	$Kg \cdot m/s^2$
Πίεση	Pascal	Pa	$N/m^2$
Έργο, ενέργεια, ποσότητα θερμότητας	Joule	J	N.m
Ισχύς	Watt	W	J/s
Ηλεκτρικό φορτίο	Coulomb	C	A.s
Διαφορά δυναμικού, ηλεκτρεγερτική δύναμη	Volt	V	W/A, J/C
Ένταση ηλεκτρικού πεδίου	Volt ανά μέτρο	V/m	N/C
Ηλεκτρική αντίσταση	Ohm	$\Omega$	V/A
Χωρητικότητα	Farad	F	A.s/V
Μαγνητική ροή	Weber	Wb	V.s
Συντελεστής αυτεπαγωγής, αμοιβαίας επαγωγής	Henry	H	V.s/A
Ένταση μαγνητικού πεδίου	Tesla	T	$Wb/m^2$
Ενεργότητα (ραδιενεργού πηγής)	Becquerel	Bq	$s^{-1}$
Απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας	Gray	Gy	J/Kg
Ισοδύναμη δόση ακτινοβολίας	Sievert	Sv	J/Kg
<b>Ισοδύναμες μονάδες</b>	<b>Συμπληρωματικές μονάδες του S.I.</b>		<b>Σύμβολο</b>
Επίπεδη γωνία	radian	rad	

### ΠΙΝΑΚΑΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ

Όνομα	Σύμβολο	Τιμή
Ακτίνα Bohr	$a_0$	$5,29 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
Γραμμομοριακός όγκος σε Κ.Σ.	$V_m$	$22,4 \text{ l/mol}$
Διηλεκτρική σταθερά του κενού	$\epsilon_0$	$8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$
Ηλεκτρική σταθερά (στο κενό)	$K_C$	$9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$
Μαγνητική διαπερατότητα του κενού	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$
Μάζα ηρεμίας του ηλεκτρονίου	$m_e$	$9,11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$
Μάζα ηρεμίας του νετρονίου	$m_n$	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$
Μάζα ηρεμίας του πρωτονίου	$m_p$	$1,67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$
Παγκόσμια σταθερά των αερίων	$R$	$8,314 \text{ J/mol.K}$
Σταθερά της παγκόσμιας έλξης	$G$	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{Kg}^2$
Σταθερά του Avogadro	$N_A$	$6,023 \cdot 10^{23} \text{ μόρια/mol}$
Σταθερά του Boltzmann	$k$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Σταθερά του Planck	$h$	$6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$
Στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο	$e$	$1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Ταχύτητα ήχου σε ξηρό αέρα	$v_{ηχ}$	$331,4 \text{ m/s}$
Ταχύτητα του φωτός στο κενό	$c_0$	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

### ΠΙΝΑΚΑΣ ΓΗΙΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Ακτίνα σφαίρας με τον ίδιο όγκο	$6,371 \cdot 10^6 \text{ m}$
Γωνιακή ταχύτητα	$7,29 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$
Επιτάχυνση της βαρύτητας $g$ (45°, 0m)	$9,81 \text{ m/s}^2$
Ισημερινή ακτίνα	$6,378 \cdot 10^6 \text{ m}$
Μαγνητικό πεδίο (στην Washington)	$5,7 \cdot 10^{-5} \text{ T}$
Μάζα	$5,983 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$
Μέση απόσταση Γης - Ήλιου	$1,496 \cdot 10^8 \text{ Km}$
Μέση γραμμική ταχύτητα	$29,770 \text{ m/s}$
Μέση πυκνότητα	$5522 \text{ Kg/m}^3$
Όγκος	$1,087 \cdot 10^{21} \text{ m}^3$
Πολική ακτίνα	$6,357 \cdot 10^6 \text{ m}$
Ταχύτητα διαφυγής	$11,2 \text{ Km/s}$

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Ακτίνα	$6,96 \cdot 10^5$ Km
Επιτάχυνση της βαρύτητας $g$	$274 \text{ m/s}^2$
Επιφανειακή θερμοκρασία	600 K
Μάζα	$1,99 \cdot 10^{30}$ Kg
Μέση πυκνότητα	$1,41 \text{ Kg/m}^3$
Ταχύτητα διαφυγής	618 Km/s

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΕΛΗΝΙΑΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Ακτίνα	1738 Km
Επιτάχυνση της βαρύτητας $g$	$1,67 \text{ m/s}^2$
Μάζα	$7,36 \cdot 10^{22}$ Kg
Μέση απόσταση Γης - Σελήνης	$3,8 \cdot 10^5$ Km
Μέση πυκνότητα	$3340 \text{ Kg/m}^3$
Ταχύτητα διαφυγής	2,38 Km/s

**ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΡΟΘΕΜΑΤΩΝ ΣΤΟ S.I.****ΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ**

Σύμβολο	Πρόθεμα	Πολλαπλασιάζω επί
da	deca	$10^1 = 10$
h	hecto	$10^2 = 100$
K	kilo	$10^3 = 1000$
M	mega	$10^6 = 1000000$
G	giga	$10^9 = 1000000000$
T	tera	$10^{12} = 1000000000000$

**ΥΠΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑ**

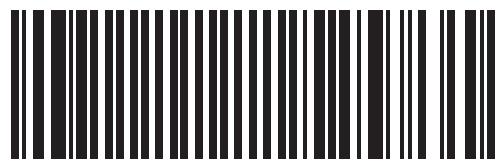
Σύμβολο	Πρόθεμα	Πολλαπλασιάζω επί
d	deci	$10^{-1} = 0,1$
c	centi	$10^{-2} = 0,01$
m	milli	$10^{-3} = 0,001$
$\mu$	micro	$10^{-6} = 0,000001$
n	nano	$10^{-9} = 0,000000001$
p	pico	$10^{-12} = 0,000000000001$



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

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

Κωδικός Βιβλίου: 0-22-0219  
ISBN 978-960-06-4821-8



(01) 000000 0 22 0219 8