ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ
1954

ΦΥΣΙΚΗ

Αργ. Κ. Μαυρομματάκου
Δ^{ΡΟΣ} ΦΥΣΙΚΗΣ

Τεχνικών - Επαγγελματικών Εκπαιδευτηρίων

1954

ΙΔΡΥΜΑ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

ΧΡΥΣΟΥΝ ΜΕΤΑΛΛΙΟΝ ΑΚΑΔΗΜΙΑΣ ΑΘΗΝΩΝ

ΦΥΣΙΚΗ

ΑΡΓΥΡΗ Κ. ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΑΚΟΥ

Δ^{ΡΟΣ} ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΟΣ Β΄

ΑΘΗΝΑ
1999

Α΄ ΕΚΔΟΣΗ 1999

ISBN 960–337–028–2

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΙΔΡΥΜΑΤΟΣ ΕΥΓΕΝΙΔΟΥ

Ο Ευγένιος Ευγενίδης, ο ιδρυτής και χορηγός του «Ιδρύματος Ευγενίδου», πολύ νωρίς προέβλεψε και σχημάτισε την πεποίθηση ότι η άρτια κατάρτιση των τεχνικών μας, σε συνδυασμό με την εθνική αγωγή, θα ήταν αναγκαίος και αποφασιστικός παράγων για την πρόοδο του Έθνους μας.

Την πεποίθησή του αυτή ο Ευγενίδης εκδήλωσε με τη γενναιόφρονα πράξη ευεργεσίας, να κληροδοτήσει σεβαστό ποσό για τη σύσταση Ιδρύματος, που θα είχε ως σκοπό να συμβάλλει στην τεχνική εκπαίδευση των νέων της Ελλάδας.

Έτσι το Φεβρουάριο του 1956 συστήθηκε το «Ίδρυμα Ευγενίδου», του οποίου τη διοίκηση ανέλαβε η αδελφή του Μαρ. Σίμου, σύμφωνα με την επιθυμία του διαθέτη. Το έργο του Ιδρύματος συνεχίζει από το 1981 ο κ. Νικόλαος Βερνίκος - Ευγενίδης.

Από το 1956 έως σήμερα η συμβολή του Ιδρύματος στην τεχνική εκπαίδευση πραγματοποιείται με διάφορες δραστηριότητες. Όμως απ' αυτές η σημαντικότερη, που κρίθηκε από την αρχή ως πρώτης ανάγκης, είναι η έκδοση βιβλίων για τους μαθητές των Τεχνικών και Επαγγελματικών Σχολών και Λυκείων.

Μέχρι σήμερα, με τη συνεργασία με τα Υπουργεία Εθνικής Παιδείας και Θρησκευμάτων και Εμπορικής Ναυτιλίας, εκδόθηκαν εκατοντάδες τόμοι βιβλίων, που έχουν διατεθεί σε πολλά εκατομμύρια αντίτυπα. Τα βιβλία αυτά κάλυπταν ή καλύπτουν ανάγκες των Κατωτέρων και Μέσων Τεχνικών Σχολών του Υπ. Παιδείας, των Σχολών του Οργανισμού Απασχολήσεως Εργατικού Δυναμικού (ΟΑΕΔ), των Τεχνικών και Επαγγελματικών Λυκείων, των Τεχνικών Σχολών και των Δημοσίων Σχολών Εμπορικού Ναυτικού.

Μοναδική φροντίδα του Ιδρύματος σ' αυτή την εκδοτική του προσπάθεια ήταν και είναι η συγγραφή και έκδοση βιβλίων ποιότητας, από άποψη όχι μόνον επιστημονική, παιδαγωγική και γλωσσική, αλλά και ως προς την εμφάνιση, ώστε το βιβλίο να αγαπηθεί από τους μαθητές.

Για την επιστημονική και παιδαγωγική αρτιότητα των βιβλίων τα κείμενα υποβάλλονται σε πολλές επεξεργασίες και βελτιώνονται πριν από κάθε νέα έκδοση συμπληρούμενα καταλλήλως.

Ιδιαίτερη σημασία απέδωσε το Ίδρυμα από την αρχή στη γλωσσική διατύπωση των βιβλίων, γιατί πιστεύει ότι και τα τεχνικά βιβλία, όταν είναι γραμμένα σε γλώσσα σωστή και ομοιόμορφη αλλά και κατάλληλη για τη στάθμη των μαθητών, μπορούν να συμβάλλουν στη γλωσσική κατάρτιση των μαθητών.

Έτσι, με απόφαση που ίσχυσε ήδη από το 1956, όλα τα βιβλία της Βιβλιο-

θήκης του Τεχνίτη, δηλαδή τα βιβλία για τις τότε Κατώτερες Τεχνικές Σχολές, όπως αργότερα και για τις Σχολές του ΟΑΕΔ, ήταν γραμμένα σε γλώσσα δημοτική, με βάση τη γραμματική του Τριανταφυλλίδη, ενώ όλα τα άλλα βιβλία ήταν γραμμένα στην απλή καθαρεύουσα. Σήμερα ακολουθείται η γραμματική που διδάσκεται στα σχολεία της δευτεροβάθμιας εκπαιδεύσεως. Η γλωσσική επεξεργασία των βιβλίων ανατίθεται σε φιλολόγους του Ιδρύματος και έτσι εξασφαλίζεται η ενιαία σύνταξη και ορολογία κάθε κατηγορίας βιβλίων.

Η ποιότητα του χαρτιού, το είδος των τυπογραφικών στοιχείων, τα σωστά σχήματα, η καλαίσθητη σελιδοποίηση, το εξώφυλλο και το μέγεθος του βιβλίου, περιλαμβάνονται και αυτά στις φροντίδες του Ιδρύματος και συμβάλλουν στη σωστή «λειτουργικότητα» των βιβλίων.

Το Ίδρυμα θεώρησε ότι είναι υποχρέωσή του, σύμφωνα με το πνεύμα του ιδρυτή του, να θέσει στη διάθεση τού Κράτους όλη αυτή την πείρα των 20 ετών, αναλαμβάνοντας το 1978 και την έκδοση των βιβλίων για τις νέες Τεχνικές Επαγγελματικές Σχολές και τα Τεχνικά και Επαγγελματικά Λύκεια, σύμφωνα πάντοτε με τα εγκεκριμένα Αναλυτικά Προγράμματα του Π.Ι. και του ΥΠΕΠΘ.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η επιστήμη δεν φοβάται τα άλματα και η επιτάχυνση της εξελίξεώς της είναι πολύ μεγάλη· όπως δε φαίνεται συνεχώς θα αυξάνεται.

Το διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στην ανάπτυξη της επιστήμης και των εφαρμογών της στην τεχνική τον τελευταίο καιρό έχει πάρα πολύ μικρύνει και θα τείνει, όπως προβλέπεται, να καταστεί αμελητέο.

Από μελέτες που έχουν εκπονηθεί φαίνεται ότι το άτομο θα αλλάζει κύρια επαγγελματική απασχόληση 5-6 φορές κατά τη διάρκεια της ενεργού ζωής του. Επομένως ο μαθητής πρέπει να διδαχθεί και να κατανοήσει τις γενικές και βασικές αρχές του περιεχομένου των σπουδών του και όχι τις πολύ εξειδικευμένες γνώσεις.

Έτσι θα μπορεί πιο εύκολα να προσαρμοσθεί ο σημερινός νέος στις αλλαγές που θα συναντήσει στη σταδιοδρομία του. Είναι γνωστό ότι η εκάστοτε τεχνολογία και τεχνική σε γενικές γραμμές δεν είναι τίποτα άλλο παρά ευρεία, ευέλικτη και έξυπνη εφαρμογή των φυσικών νόμων.

Οι φυσικοί νόμοι κατά κανόνα δεν μεταβάλλονται. Γι' αυτό, όποις τεχνικός τους κατέχει, εύκολα θα προσαρμόζεται στις εξελίξεις του επαγγέλματός του ή άλλου συγγενικού επαγγέλματος και έτσι δεν θα περάσει ποτέ στο περιθώριο όσον αφορά στην εργασιακή του απασχόληση.

Το περιεχόμενο του βιβλίου είναι σύμφωνο με το Πρόγραμμα Σπουδών (Curiculum) του Παιδαγωγικού Ινστιτούτου και με το Εθνικό Πλαίσιο Προγράμματος Σπουδών (ΕΠΠΣ).

Χρόνια τώρα ως δάσκαλος όλων των βαθμίδων της Τεχνικής-Επαγγελματικής Εκπαιδεύσεως πιστεύω ότι κάθε σχολικό εγχειρίδιο Φυσικής, όταν προορίζεται για μελλοντικούς τεχνικούς, πρέπει να είναι αυτοτελές και να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις πολλών τεχνολογικών μαθημάτων. Γι' αυτό σε ορισμένες ενότητες παρέθεσα μερικές "υποενότητες" και συμπεριέλαβα ορισμένες άλλες ενότητες που δεν περιέχονται στο Πρόγραμμα Σπουδών του ΥΠ.Ε.Π.Θ.

Η διδασκαλία των προσθηκών δεν είναι υποχρεωτική. Προς διάκριση οι κεφαλίδες των σχετικών παραγράφων έχουν εκτυπωθεί με κόκκινα γράμματα. Η παράλειψή τους δεν επηρεάζει την ομαλή ροή της διδασκαλίας της ύλης που προβλέπεται από το Πρόγραμμα Σπουδών του ΥΠ.Ε.Π.Θ., ούτε κωλύει την εκμάθησή της.

Μετά τη συγγραφή του βιβλίου όλα τα κεφάλαια τα έλεγξαν οι κ. Εμμανουήλ Δρης, καθηγητής του Ε.Μ.Π. και ο Δρ. Απόστολος Παπαζής, Διευθυντής των Εργαστηρίων Φυσικής της ΑΣΕΤΕΜ/ΣΕΛΕΤΕ. Για τη βοήθειά τους τους ευχαρι-

στώ.

Επίσης ευχαριστώ θερμά την Επιτροπή Εκδόσεων του Ιδρύματος Ευγενίδου για τις υποδείξεις της και το Τμήμα Εκδόσεών του για τις προσπάθειες που κατέβαλαν για την αρτιότερη έκδοση του βιβλίου.

Ο συγγραφέας

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

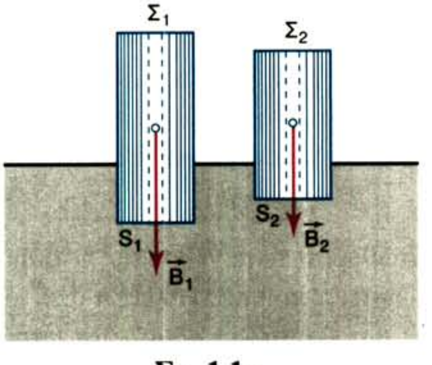
ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗ

1.1 Έννοια της πιέσεως.

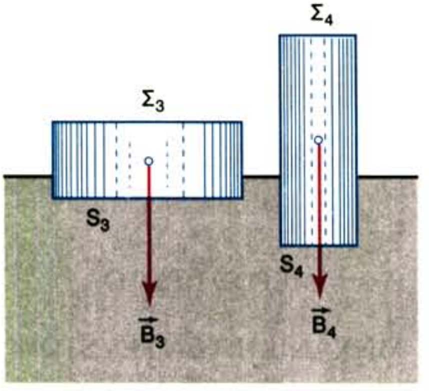
1.1.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Όταν δύναμη ασκείται σε επιφάνεια στερεού σώματος μπορεί να της προκαλέσει παραμόρφωση. Η παραμόρφωση επιφάνειας, την οποία προκαλεί δύναμη που ασκείται ***κάθετα*** επάνω σε αυτήν εξαρτάται: α) Από το μέτρο της δυνάμεως αυτής και β) από το εμβαδόν της επιφάνειας στο οποίο κατανέμεται η συγκεκριμένη δύναμη. Για παράδειγμα αναφέρομε τις παρακάτω περιπτώσεις:

1) Αν τοποθετήσομε στην οριζόντια επιφάνεια ψιλής άμμου (σχ. 1.1α),



Σχ. 1.1α.



Σχ. 1.1β.

δύο σώματα Σ_1 και Σ_2 που έχουν ίσες βάσεις στηρίξεως $S_1 = S_2$ και βάρη $B_1 > B_2$, τότε θα παρατηρήσομε ότι το Σ_1 θα εισχωρήσει περισσότερο μέσα στην άμμο, δηλαδή το Σ_1 θα προκαλέσει μεγαλύτερη παραμόρφωση στη μάζα της άμμου.

Επομένως, δυνάμεις διαφορετικών μέτρων, όταν ασκούνται κάθετα σε ίσες επιφάνειες, εννοείται του ίδιου σώματος, προκαλούν σε αυτές διαφορετικές παραμορφώσεις, δηλαδή η παραμόρφωση μιας επιφάνειας ενός σώματος, που προκαλείται από μία δύναμη που εξασκείται κάθετα πάνω σε αυτή, εξαρτάται από το μέτρο της δυνάμεως αυτής.

2) Αν τοποθετήσομε στην επιφάνεια ψιλής άμμου (σχ. 1.1β), δύο σώματα Σ_3 και Σ_4 που έχουν βάσεις στηρίξεως S_3 και S_4 τέτοιες ώστε να ισχύει η σχέση $S_3 > S_4$, αλλά τα βάρη τους B_3 και B_4 να είναι ίσα ($B_3 = B_4$) τότε θα παρατηρήσομε ότι το Σ_3 με τη μεγαλύτερη βάση θα εισχωρήσει λιγότερο μέσα στην άμμο.

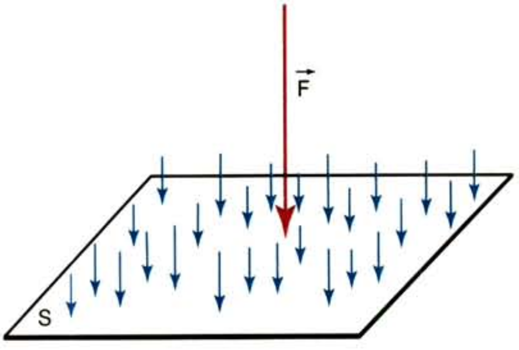
Άρα, η παραμόρφωση μιας επιφάνειας ενός σώματος, την οποία προκαλεί δύναμη ορισμένου μέτρου που ασκείται κάθετα πάνω σε αυτήν εξαρτάται από το εμβαδόν της επιφάνειας. Δηλαδή δυνάμεις που έχουν ίσα μέτρα, όταν ασκούνται κάθετα σε άνισες επιφάνειες σώματος προκαλούν διαφορετικές παραμορφώσεις των επιφανειών αυτών.

Προσοχή:

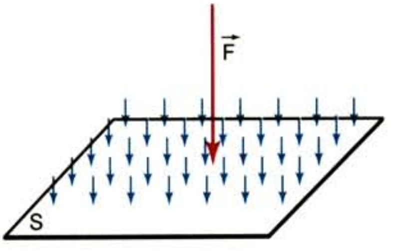
Γενικά έχει διαπιστωθεί ότι το μέγεθος της παραμορφώσεως της επιφάνειας ενός στερεού σώματος, που προκαλείται από μία δύναμη που ασκείται κάθετα σε αυτήν καθορίζεται και εξαρτάται από το μέτρο της δυνάμεως αυτής και το εμβαδόν της επιφάνειας.

1.1.2 Μέση πίεση επιφάνειας.

Έστω ότι πολλές μικρές (στοιχειώδεις) δυνάμεις $\vec{F}_1, \vec{F}_2, ...\vec{F}_\nu$ ασκούνται κάθετα στα διάφορα στοιχειώδη τμήματα επίπεδης επιφάνειας με εμβαδόν S και ότι $\vec{F}$ είναι η συνισταμένη των δυνάμεων αυτών (σχ. 1.1γ).



Σχ. 1.1γ.



Σχ. 1.1δ.

Ονομάζομε μέση πίεση P_μ της επιφάνειας (S), το πηλίκον του μέτρου F της συνισταμένης $\vec{F}$ των δυνάμεων που ασκούνται κάθετα στα διάφορα στοιχειώδη τμήματα της επιφάνειας, διά του εμβαδού της επιφάνειας.

Επομένως, θα είναι:

$$P_\mu = \frac{F}{S}$$

1.1.3 Πίεση επιφάνειας.

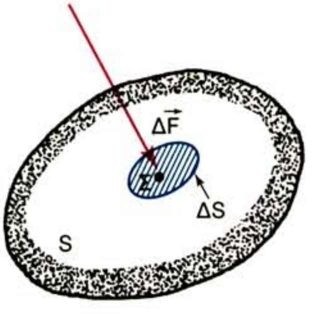
Αν σε κάθε στοιχειώδες τμήμα μιας επίπεδης επιφάνειας S, ασκείται η ίδια στοιχειώδης κάθετη δύναμη $\vec{F}_1 = \vec{F}_2 = \vec{F}_3 = ... = \vec{F}_\nu$, τότε λέμε ότι η κάθετη δύναμη $\vec{F}$, που είναι η συνισταμένη τους, είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη (μοιρασμένη) σε όλη την έκταση της S (σχ. 1.1δ).

Ονομάζομε πίεση P στην επιφάνεια S το πηλίκο του μέτρου F της δυνάμεως $\vec{F}$, η οποία ασκείται κάθετα και είναι ομοιόμορφα κατανεμημένη στην επιφάνεια S, διά του εμβαδού της επιφάνειας. Δηλαδή:

$$\boxed{P = \frac{F}{S}} \quad \text{(εξίσωση ορισμού)}$$

1.1.4 Πίεση σε σημείο επιφάνειας.

Γύρω από το σημείο Σ της επιφάνειας S (σχ. 1.1ε) θεωρούμε μια πολύ μικρή (στοιχειώδη) επιφάνεια ΔS. Αν επάνω στην επιφάνεια ΔS ασκείται



Σχ. 1.1ε.

κάθετα μια δύναμη $\overrightarrow{\Delta F}$, τότε:

Ονομάζομε πίεση P_Σ στο σημείο Σ της επιφάνειας S, το πηλίκο του μέτρου ΔF της δυνάμεως $\overrightarrow{\Delta F}$, η οποία ασκείται κάθετα επάνω στην πολύ μικρή (στοιχειώδη) επιφάνεια ΔS, γύρω από το σημείο Σ, διά του εμβαδού της επιφάνειας ΔS. Δηλαδή: $\boxed{P_\Sigma = \frac{\Delta F}{\Delta S}}$ ή ακριβέστερα:

$$P_\Sigma = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad \text{(εξίσωση ορισμού)}$$

Προσοχή:

1) Η πίεση σε μία επιφάνεια είναι αριθμητικά ίση με την κάθετη δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Επομένως, όταν μας ζητηθεί να βρούμε την πίεση που εξασκείται σε μία επιφάνεια, αυτό θα σημαίνει ότι πρέπει να βρούμε την κάθετη δύναμη που εξασκείται σε κάθε μονάδα της επιφάνειάς της.

2) Η πίεση είναι μονόμετρο μέγεθος.

3) Επειδή η πίεση είναι μονόμετρο μέγεθος, δεν έχει έννοια να λέμε ότι η πίεση ασκείται κάθετα σε μια επιφάνεια.

4) Δεν πρέπει να συγχέεται το μέγεθος «δύναμη» με το μέγεθος «πίεση», γιατί είναι δύο διαφορετικά μεγέθη.

5) Το αποτέλεσμα μιας δυνάμεως που ασκείται κάθετα επάνω σε μία επιφάνεια, εξαρτάται από την πίεση που προκαλεί στην επιφάνεια αυτή.

Για παράδειγμα στην περίπτωση του σχήματος 1.1β ισχύουν τα εξής:

Οι προκαλούμενες από τις δυνάμεις $\vec{B}_3$ και $\vec{B}_4$ πιέσεις P_3 και P_4 στις επιφάνειες επαφής (S_3 και S_4) των σωμάτων Σ_3 και Σ_4 με την άμμο, δίνονται από τις σχέσεις:

$$P_3 = \frac{B_3}{S_3} \quad (1) \quad \text{και} \quad P_4 = \frac{B_4}{S_4} \quad (2)$$

Επίσης ισχύουν οι σχέσεις:

$$B_3 = B_4 \quad (3) \qquad \text{και} \qquad S_3 > S_4 \quad (4)$$

Από τις σχέσεις (1), (2), (3) και (4) προκύπτει:

$$P_4 > P_3 \quad (5)$$

Παρατηρούμε λοιπόν ότι το Σ_4, που εισχωρεί περισσότερο μέσα στην άμμο από το Σ_3 ασκεί με το βάρος του επάνω στην άμμο μεγαλύτερη πίεση, P_4 από την πίεση P_3 την οποία ασκεί το Σ_3, ενώ οι δυνάμεις $\vec{B}_3$ και $\vec{B}_4$ είναι ίσες. Άρα τα αποτελέσματα των δυνάμεων $\vec{B}_3$ και $\vec{B}_4$ που ασκούνται επάνω στις επιφάνειες S_3 και S_4 εξαρτώνται από τις πιέσεις P_3 και P_4.

6) Για να ελαττώσομε την πίεση την οποία προκαλεί μία ορισμένη δύναμη, αυξάνομε το εμβαδόν της επιφάνειας επάνω στην οποία ασκείται. Πράγματι, αν αυξήσομε το εμβαδόν S μιας επιφάνειας Ε επάνω στην οποία εξασκείται κάθετα η δύναμη $\vec{F}$, τότε θα ελαττωθεί η πίεση που θα προκαλεί η $\vec{F}$ επάνω στην Ε, γιατί το εμβαδόν S της επιφάνειας είναι στον παρονομαστή της εξισώσεως ορισμού της πιέσεως ($P = F/S$).

Στις θεμελιώσεις των οικοδομών κατασκευάζονται τα πέδιλα με μεγάλη επιφάνεια, ώστε να ελαττώνεται η πίεση που προκαλεί το βάρος τους επάνω στο έδαφος.

Οι τροχιές των σιδηροδρόμων στηρίζονται επάνω σε δοκούς, για να αυξηθεί η επιφάνεια στηρίξεώς τους στο έδαφος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ελαττώνεται η πίεση, την οποία προκαλεί το βάρος των οχημάτων, επάνω στο έδαφος.

7) Για να αυξήσομε την πίεση που προκαλεί μια ορισμένη δύναμη, ελαττώνομε το εμβαδόν της επιφάνειας επάνω στην οποία ασκείται ($P = F/S$).

Με τα τέμνοντα εργαλεία επιτυγχάνεται, με μικρή δύναμη, η κοπή, γιατί η επιφάνεια επαφής είναι πολύ μικρή και, επομένως, η πίεση είναι πολύ μεγάλη.

1.1.5 Μονάδες πιέσεως.

Η μονάδα πιέσεως στο S.I. είναι το 1 N/m^2. Σε αυτήν δίνεται το ειδικό όνομα Pascal:

$$1 \text{ pascal} = 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Παρατήρηση:

Χρησιμοποιούνται και οι παρακάτω μονάδες.

Το bar και το millibar.

1 bar = 10^5 Pa, 1 millibar = 100 Pa.

Η τεχνική ατμόσφαιρα 1 at = 1 kgf/cm^2.

Η κανονική ατμόσφαιρα: 1 atm = 1,033 kgf/cm^2.

Η μονάδα αυτή ισούται με την πίεση, την οποία, κατά μέσο όρο, έχει ο ατμοσφαιρικός αέρας στο υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας.

Το torr, το οποίο ισούται με την πίεση, η οποία προκαλείται στη βάση της στήλης υδραργύρου ύψους 1 mm. Αυτή ονομάζεται και 1 χιλιοστόμετρο στήλης υδραργύρου (1 mmHg), δηλαδή 1 Torr = 1 mmHg.

Πολλαπλάσιο αυτής είναι το: 1 cmHg = 10 mmHg = 10 torr.

Σημείωση:

Μία ατμόσφαιρα αντιστοιχεί σε 76 cmHg = 760 torr.

1.2 Δυνάμεις που εξασκούν τα υγρά όταν ισορροπούν.

Ένα υγρό όταν βρίσκεται σε ισορροπία εξασκεί επάνω σε κάθε επιφάνεια με την οποία βρίσκεται σε επαφή, δύναμη κάθετη επάνω σε αυτή.

Οι δυνάμεις που εξασκούν τα υγρά στις επιφάνειες, με τις οποίες βρίσκονται σε επαφή, όταν αυτά ισορροπούν, διακρίνονται σε:

– Υδροστατικές δυνάμεις και

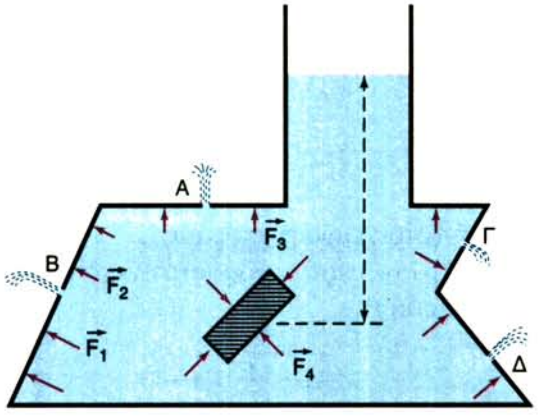
– δυνάμεις εμβόλου ή εξωτερικές δυνάμεις.

α) Υδροστατικές δυνάμεις.

1) Υδροστατικές δυνάμεις ονομάζονται οι δυνάμεις που εξασκεί το υγρό, λόγω του βάρους του, στις επιφάνειες με τις οποίες βρίσκεται σε επαφή. Δηλαδή οι δυνάμεις αυτές οφείλονται στο βάρος του υγρού.

2) Οι υδροστατικές δυνάμεις είναι κάθετες στις επιφάνειες επάνω στις οποίες εξασκούνται.

Πράγματι, αν ανοίξομε τις οπές Α, Β, Γ, Δ (σχ. 1.2α), θα παρατηρήσομε ότι οι υγρές φλέβες, που σχηματίζονται, είναι κάθετες κοντά στη βάση τους προς στις επιφάνειες των οπών.



Σχ. 1.2α.

β) Δυνάμεις εμβόλου ή εξωτερικές δυνάμεις.

1) Έτσι ονομάζονται οι δυνάμεις, τις οποίες εξασκεί ένα υγρό στις επιφάνειες με τις οποίες βρίσκεται σε επαφή, όταν το υγρό ωθείται (πιέζεται) με έμβολο.

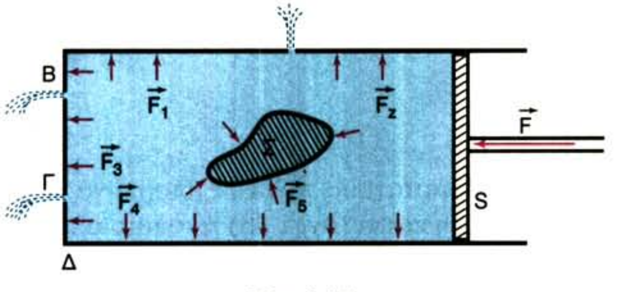
Αν υποθέσομε ότι το υγρό του δοχείου Δ (σχ. 1.2β) δεν έχει βάρος, τότε:

Όταν ωθούμε το έμβολο S με μία δύναμη $\vec{F}$, εξασκούνται από το υγρό στα τοιχώματα του δοχείου Δ και στην επιφάνεια του σώματος Σ δυνάμεις:

$$\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4, \vec{F}_5, ...$$

Οι δυνάμεις $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{F}_4, \vec{F}_5, ...$ είναι δυνάμεις εμβόλου, που προκύπτουν επειδή ασκείται στο υγρό η δύναμη $\vec{F}$.

2) Οι δυνάμεις εμβόλου είναι κάθετες επάνω στις επιφάνειες που ασκούνται.



Σχ. 1.2β.

Πράγματι αν ανοίξομε τις οπές Α, Β, Γ θα παρατηρήσομε ότι οι βάσεις των υγρών φλεβών που σχηματίζονται είναι κάθετες στις επιφάνειες των οπών.

1.3 Υδροστατική πίεση.

Αν στην πολύ μικρή (στοιχειώδη) επιφάνεια ΔS γύρω από το σημείο Α (σχ. 1.3α) εξασκείται από το υγρό η υδροστατική δύναμη $\vec{F}$, τότε στο σημείο Α προκαλείται η πίεση P:

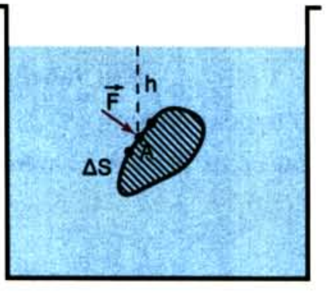
$$\boxed{P = \frac{F}{\Delta S}}$$

Η πίεση P, η οποία προκαλείται στο σημείο Α από την υδροστατική δύναμη $\vec{F}$, ονομάζεται ***υδροστατική πίεση στο σημείο αυτό***.

Γενικά, ***υδροστατική πίεση*** σε ένα σημείο υγρού ονομάζεται η πίεση που προκαλείται σε αυτό από την υδροστατική δύναμη που εξασκείται στο σημείο αυτό.

Παρατήρηση:

Οι υδροστατικές δυνάμεις, που προκαλούν τις υδροστατικές πιέσεις οφείλονται στο βάρος του υγρού. Επομένως, αν το υγρό δεν είχε βάρος, δεν θα προκαλούσε υδροστατικές πιέσεις.

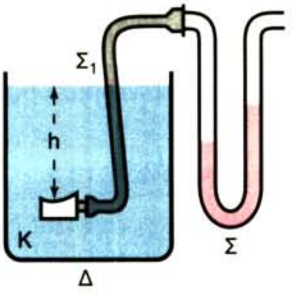


Σχ. 1.3α.

1.3.1 Μανομετρική κάψα.

Για τη μέτρηση της υδροστατικής πιέσεως μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μανόμετρο με μανομετρική κάψα (σχ. 1.3β) το οποίο αποτελείται από:

– Την κυλινδρική κάψα Κ. Η μία βάση της Κ αποτελείται από ελαστική μεμβράνη.



Σχ. 1.3β.

– Το γυάλινο ωοειδή σωλήνα Σ, που περιέχει έγχρωμο υγρό και
– τον ελαστικό σωλήνα $Σ_1$, ο οποίος συγκοινωνεί με την κάψα Κ και το σωλήνα Σ.

Όταν η κάψα Κ βρίσκεται έξω από το υγρό του δοχείου τότε το έγχρωμο υγρό βρίσκεται στο ίδιο ύψος και στα δύο σκέλη του σωλήνα Σ.

Όταν βυθίσομε την κάψα μέσα στο υγρό του δοχείου Δ σε βάθος h τότε εξασκείται δύναμη από το υγρό επάνω στην ελαστική μεμβράνη της κάψας, η οποία γι' αυτό το λόγο παραμορφώνεται και συμπιέζει τον αέρα που περιέχεται μέσα σε αυτήν.

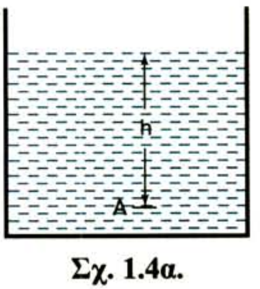
Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το έγχρωμο υγρό να κατεβαίνει στο ένα σκέλος του σωλήνα Σ και να ανεβαίνει στο άλλο.

Από την απόσταση των επιφανειών του έγχρωμου υγρού στα δύο σκέλη του σωλήνα Σ, μπορούμε να υπολογίσομε την υδροστατική πίεση, που προκαλείται στο βάθος h του υγρού του δοχείου, όπου τοποθετήσαμε την ελαστική μεμβράνη της κάψας.

1.4 Θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής.

Ο θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής ορίζει τα εξής:

Η υδροστατική πίεση (P) σε ένα σημείο Α μέσα στο υγρό που ισορροπεί (σχ. 1.4α), ισούται με το γινόμενο της πυκνότητας (ρ) του υγρού επί την ένταση της βαρύτητας (g) και επί την κατακόρυφη απόσταση (h) του σημείου από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, δηλαδή:



Σχ. 1.4α.

$$P = \varrho \cdot g \cdot h \quad \text{(θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής)} \qquad (1)$$

Μεταξύ της πυκνότητας (ρ) και του ειδικού βάρους (ε) του υγρού ισχύει η σχέση:

$$\varepsilon = \varrho \cdot g \qquad (2)$$

Με βάση τη σχέση (2) η σχέση (1) γράφεται:

$$P = \varepsilon \cdot h \qquad (3)$$

Προσοχή:

Η σχέση (3) στην πράξη αναφέρεται και χρησιμοποιείται ως θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής.

Γι' αυτό τα επόμενα θέματα θα τα εξετάσομε με βάση τη σχέση (3) αντί της σχέσεως (1).

Είναι φανερό ότι όπου χρησιμοποιείται το (ε) αυτό θα μπορεί να αντικαθίσταται από το (ρ · g) και αντίστροφα.

Παρατήρηση:

Αν εκφράσομε το ειδικό βάρος γενικά ενός υλικού σε gf/cm^3 και την πυκνότητα σε g/cm^3, τότε οι αριθμητικές τους τιμές συμπίπτουν. Για παράδειγμα το ειδικό βάρος του υδραργύρου είναι ίσο προς 13,6 gf/cm^3 και η πυκνότητά του ίση προς 13,6 g/cm^3.

Εξαιτίας αυτής της ισότητας όμως προκαλείται σύγχυση μεταξύ ειδικού βάρους και πυκνότητας. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται, συνήθως, το ειδικό βάρος εκεί, όπου πρέπει να χρησιμοποιηθεί η πυκνότητα και αντίστροφα.

Αυτό βέβαια απαγορεύεται γιατί τα δύο μεγέθη είναι διαφορετικά:

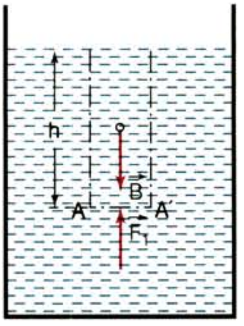
$$\varrho = \frac{m}{V} \quad \text{και} \quad \varepsilon = \frac{B}{V}$$

Επαναλαμβάνομε ότι εκεί όπου χρησιμοποιείται το (ε) μπορεί να χρησιμοποιείται το (ρ · g) και αντίστροφα.

1.4.1 Απόδειξη της σχέσεως P = ε . h.

Θεωρούμε την κατακόρυφη στήλη του υγρού, της οποίας η βάση ΑΑ΄ έχει εμβαδόν S και απέχει από την ελεύθερη επιφάνειά του απόσταση h (σχ. 1.4β).

Επάνω στην οριζόντια επιφάνεια ΑΑ΄, ασκείται κάθετα το βάρος του υ-



Σχ. 1.4β.

γρού που βρίσκεται επάνω από αυτήν. Δηλαδή το βάρος $\vec{B}$ της στήλης, που έχει βάση εμβαδού S και ύψος h.

Επομένως το βάρος $\vec{B}$ του υγρού, που βρίσκεται επάνω από την ΑΑ΄, προκαλεί στην επιφάνεια αυτήν την ***υδροστατική πίεση***:

$$P = \frac{B}{S} \tag{1}$$

Εάν το ειδικό βάρος του υγρού είναι ε και ο όγκος της στήλης V, τότε ισχύουν οι σχέσεις:

$$B = \varepsilon \cdot V \tag{2}$$

$$V = S \cdot h \tag{3}$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) έχομε:

$$P = \frac{B}{S} = \frac{\varepsilon \cdot V}{S} = \frac{\varepsilon \cdot S \cdot h}{S} = \varepsilon \cdot h \qquad \text{και}$$

$$P = \varepsilon \cdot h \quad (\varepsilon = \varrho \cdot g) \tag{4}$$

1.4.2 Διερεύνηση της εξισώσεως $P = \varepsilon \cdot h$ *(1).*

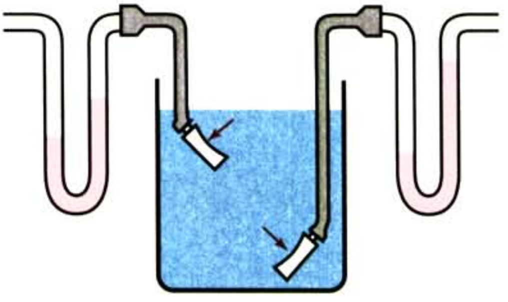
1) Εάν ε = σταθερό, τότε από τη σχέση (1) έχομε:

$$P = (\text{σταθερό}) \cdot h$$

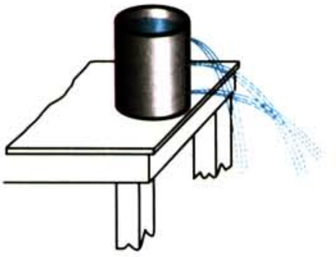
Δηλαδή:

Η υδροστατική πίεση (P), που ασκείται σε ένα σημείο μέσα στο υγρό, είναι ανάλογη με το βάθος (h) του σημείου.

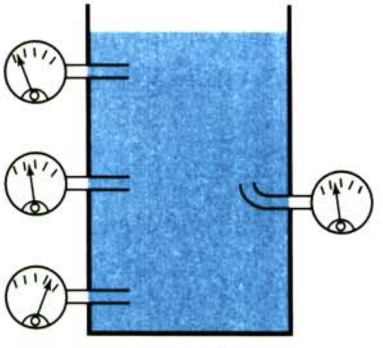
Αν τοποθετήσομε τη μανομετρική κάψα σε διάφορα βάθη μέσα σε ένα



Σχ. 1.4γ.



Σχ. 1.4δ.



Σχ. 1.4ε.

δοχείο με υγρό (σχ. 1.4γ), θα διαπιστώσομε ότι οι ενδείξεις του μανομέτρου αυξάνουν ανάλογα με το βάθος, στο οποίο τοποθετούμε την κάψα. Επίσης στο σχήμα (1.4δ) παρατηρούμε ότι, όσο πιο βαθιά βρίσκεται η οπή, τόσο πιο μακριά εκτοξεύεται το υγρό. Αυτό σημαίνει ότι στις οπές που βρίσκονται πιο κάτω η πίεση είναι μεγαλύτερη.

Στο σχήμα 1.4ε φαίνεται ότι οι ενδείξεις των μανομέτρων εξαρτώνται από το βάθος.

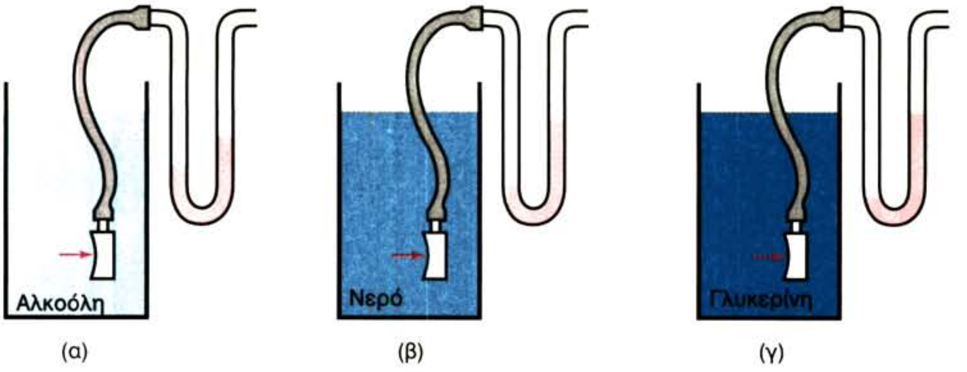
2) Εάν h = σταθερό, τότε από τη σχέση $P = \varepsilon \cdot h$ έχομε:

$$P = (\text{σταθερό}) \cdot \varepsilon$$

Δηλαδή:

Η υδροστατική πίεση σε ένα σημείο μέσα στο υγρό είναι ανάλογη με το ειδικό βάρος του υγρού.

Αν τοποθετήσομε τη μανομετρική κάψα στο ίδιο βάθος στα δοχεία α, β και γ (σχ. 1.4στ), που περιέχουν αντίστοιχα αλκοόλη ($\varepsilon_1 = 0{,}79$ gf/cm^3), νε-



Σχ. 1.4στ.

ρό (ε_2 = 1gf/cm^3) και γλυκερίνη (ε_3 = 1,26 gf/cm^3), θα διαπιστώσομε ότι:

Οι ενδείξεις του μανομέτρου αυξάνουν ανάλογα με τα ειδικά βάρη των υγρών.

Χρησιμοποιούμε το gf/cm^3 για καλύτερη εποπτεία.

3) Η υδροστατική πίεση σε ένα σημείο μέσα στο υγρό δεν εξαρτάται από τη συνολική μάζα του υγρού.

1.4.3 Γενικότερη διατύπωση του θεμελιώδους νόμου της υδροστατικής (ολική πίεση).

Ο γενικός θεμελιώδης νόμος της υδροστατικής ορίζει τα εξής:

Η ολική πίεση ($P_{ολ}$) σε ένα σημείο μέσα σε υγρό που ισορροπεί, ισούται με το άθροισμα της εξωτερικής πιέσεως ($P_{εξ}$) που εξασκείται στο υγρό και της υδροστατικής πιέσεως ($P_{υδ}$) στο σημείο αυτό.

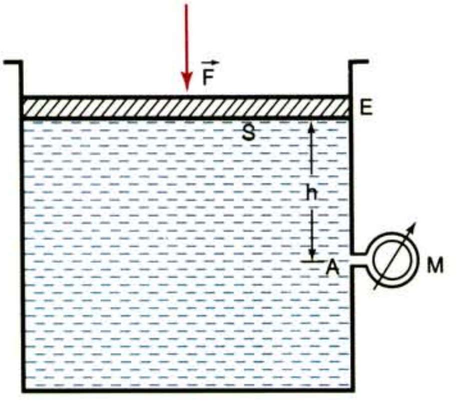
Η ολική πίεση στο Α (σχ. 1.4ζ) είναι το άθροισμα της πιέσεως που προκαλεί η δύναμη $\vec{F}$ και της υδροστατικής πιέσεως. Δηλαδή:

$$P_{ολ} = P_{εξ} + P_{υδ} = \frac{F}{S} + \varepsilon \cdot h \ \ (\varepsilon = \rho \cdot g)$$

Πράγματι, το μανόμετρο Μ του σχήματος 1.4ζ δείχνει ότι η συνολική πίεση στο Α είναι ίση με το άθροισμα της υδροστατικής πιέσεως στο Α και της πιέσεως που προκαλεί η δύναμη $\vec{F}$.

Σημείωση:

Η πίεση $P_{εξ}$ = F/S είναι η εξωτερική πίεση ή πίεση εμβόλου.



Σχ. 1.4ζ.

1.5 Θεμελιώδες θεώρημα της υδροστατικής (διαφορά πιέσεως μεταξύ δύο σημείων).

Το θεμελιώδες θεώρημα της υδροστατικής ορίζει τα εξής:

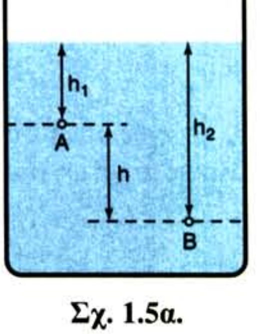
Η διαφορά των ολικών πιέσεων (ΔP) δύο σημείων Α και Β υγρού (σχ. 1.5α) που ισορροπεί, είναι ίση με το γινόμενο του ειδικού βάρους ε του υγρού, επί την κατακόρυφη απόσταση των δύο σημείων.

Δηλαδή:

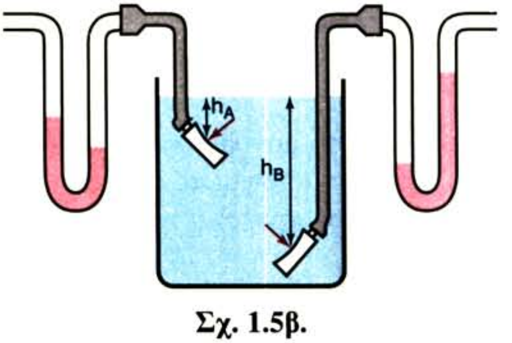
$$\boxed{\Delta P = P_B - P_A = \varepsilon \cdot h}\ \boxed{\text{Θεμελιώδες θεώρημα της υδροστατικής}}\ (\varepsilon = \rho \cdot g) \quad (1)$$

όπου: P_B η ολική πίεση στο σημείο Β,
P_A η ολική πίεση στο σημείο Α και
h η κατακόρυφη απόσταση των σημείων Α και Β ($h = h_2 - h_1$).

Εάν φέρομε την κάψα του μανομέτρου στα σημεία Α και Β (σχ. 1.5β), των οποίων οι αποστάσεις από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού είναι h_A



Σχ. 1.5α.



Σχ. 1.5β.

και h_B, θα διαπιστώσομε ότι: $P_B - P_A = (h_B - h_A) \cdot \varepsilon$.

Σημείωση:

Υπενθυμίζομε ότι το (ε) μπορεί να αντικατασταθεί από το ($\rho \cdot g$) και α-ντίστροφα.

1.5.1 Απόδειξη της σχέσεως $\Delta P = \varepsilon \cdot h$.

Η πίεση P_A στο σημείο Α (σχ. 1.5α) είναι:

$$P_A = \varepsilon \cdot h_1 + P_{\varepsilon\xi}$$

όπου: $\varepsilon \cdot h_1$ η υδροστατική πίεση στο Α και
$P_{\varepsilon\xi}$ η εξωτερική πίεση στο υγρό.

Η πίεση P_B στο σημείο Β είναι:

$$P_B = \varepsilon \cdot h_2 + P_{\varepsilon\xi}$$

όπου: $\varepsilon \cdot h_2$ η υδροστατική πίεση στο Β.

Η διαφορά των πιέσεων μεταξύ των σημείων Α και Β είναι:

$$\Delta P = P_B - P_A = \varepsilon \cdot h_2 + P_{\varepsilon\xi} - (\varepsilon \cdot h_1 + P_{\varepsilon\xi})$$
$$\Delta P = \varepsilon \cdot h_2 - \varepsilon \cdot h_1$$
$$\Delta P = \varepsilon\,(h_2 - h_1)$$
$$\Delta P = \varepsilon \cdot h$$

***Παρατηρήσεις*:**

Από αυτή τη σχέση προκύπτουν:

1) Η διαφορά των πιέσεων δύο σημείων υγρού που ισορροπεί δεν ε-ξαρτάται από την εξωτερική πίεση.

2) Η διαφορά των πιέσεων δύο σημείων υγρού που ισορροπεί ισούται με τη διαφορά των υδροστατικών τους πιέσεων.

3) Όλα τα σημεία του υγρού, που έχουν την ίδια πίεση, βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο.

Έχομε:

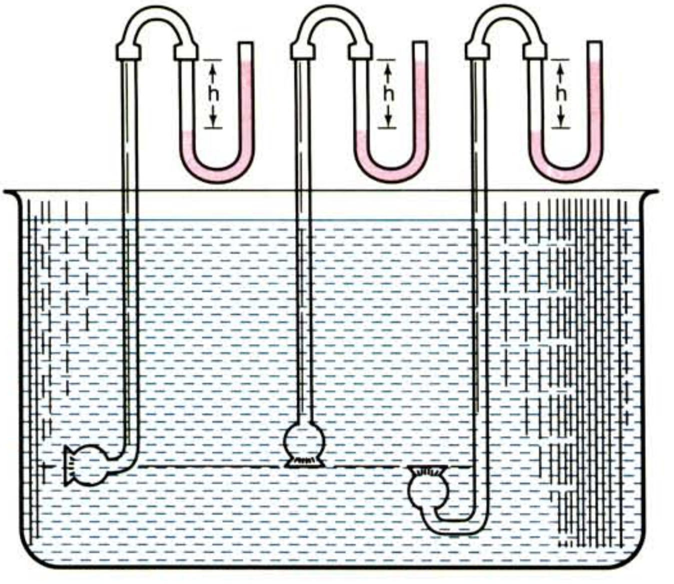
$$\Delta P = P_B - P_A = \varepsilon\,(h_2 - h_1) \qquad (\alpha)$$

Εάν $P_B = P_A$, θα έχομε:

$$P_B - P_A = 0 \qquad (\beta)$$

Από τις σχέσεις (α) και (β) παίρνομε:

$$0 = \varepsilon\,(h_2 - h_1) \qquad (\gamma)$$



Σχ. 1.5γ.

Επειδή $\varepsilon \neq 0$, από τη σχέση (γ) παίρνομε:

$$h_2 - h_1 = 0 \quad \text{και} \quad h_2 = h_1$$

4) Σε όλα τα σημεία ενός οριζόντιου επιπέδου μέσα σε ένα υγρό που ισορροπεί, προκαλείται η ίδια πίεση (σχ. 1.5γ).

Έχομε:

$$\Delta P = P_B - P_A = \varepsilon \, (h_2 - h_1) \qquad (\delta)$$

Εάν τα Α και Β είναι σημεία του ίδιου οριζόντιου επιπέδου, τότε θα έχομε:

$$h_2 = h_1 \text{ και } (h_2 - h_1) = 0 \qquad (\varepsilon)$$

Επειδή $\varepsilon \neq 0$, από τις σχέσεις (δ) και (ε) παίρνομε:

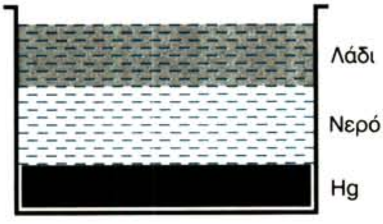
$$P_B - P_A = 0 \quad \text{και} \quad P_B = P_A$$

1.6 Ισορροπία υγρών που δεν αναμειγνύονται και περιέχονται στο ίδιο δοχείο.

Εάν βάλομε σε ένα δοχείο υγρά, τα οποία δεν αναμειγνύονται (υδροχόνο, νερό, λάδι), όταν τα υγρά ισορροπήσουν θα διαπιστώσομε ότι:

1) Τα υγρά (σχ. 1.6) παίρνουν τέτοια θέση μέσα στο δοχείο, ώστε εκείνο που το ειδικό του βάρος είναι μεγαλύτερο βρίσκεται από κάτω.

2) Οι διαχωριστικές επιφάνειες των υγρών είναι οριζόντια επίπεδα.



Σχ. 1.6.

1.7 Ισορροπία σε συγκοινωνούντα δοχεία δύο υγρών που δεν αναμειγνύονται.

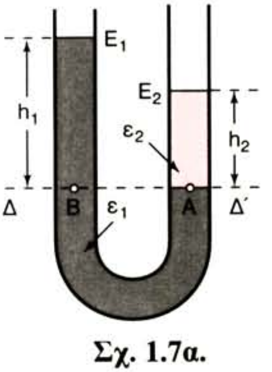
Ισχύει η εξής πρόταση:

Όταν μέσα σε δύο συγκοινωνούντα δοχεία (σχ. 1.7α) ισορροπούν δύο υγρά, που δεν αναμειγνύονται, τότε τα ύψη h_1 και h_2 των υγρών πάνω από την επιφάνεια διαχωρισμού (ΔΑΒΔ΄) είναι αντιστρόφως ανάλογα προς τα ειδικά βάρη τους ε_1 και ε_2 με την προϋπόθεση, βέβαια, ότι οι εξωτερικές πιέσεις στις δύο ελεύθερες επιφάνειες των υγρών (E_1 και E_2) είναι ίδιες.

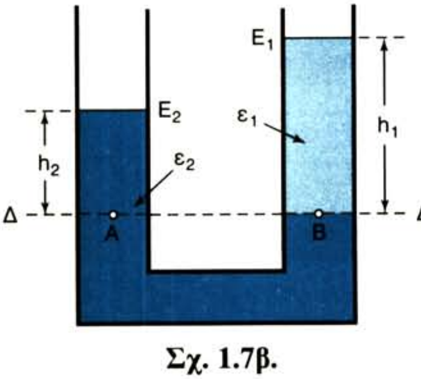
Δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$\boxed{\frac{h_1}{h_2}=\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}} \qquad (1)$$

Πράγματι μέσα σε δύο συγκοινωνούντα δοχεία (σχ. 1.7β) ρίχνομε δύο υγρά με ειδικά βάρη ε_1, ε_2 ($\varepsilon_1<\varepsilon_2$), τα οποία δεν αναμειγνύονται. Εάν μετρήσομε, αφού τα υγρά ισορροπήσουν, τα ύψη h_1 και h_2 των δύο ελευθέρων επιφανειών (E_1 και E_2) από την επιφάνεια διαχωρισμού των υγρών (ΔΑΒΔ΄), θα διαπιστώσομε ότι: ***ο λόγος των υψών αυτών είναι ίσος με τον αντίστροφο λόγο των ειδικών βαρών***.



Σχ. 1.7α.



Σχ. 1.7β.

Δηλαδή:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

Θεωρητική απόδειξη της σχέσεως (1).

Παίρνομε το σημείο Β το οποίο βρίσκεται στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο υγρών (σχ. 1.7β) και το σημείο Α το οποίο βρίσκεται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο με το Β. Επομένως οι πιέσεις στα σημεία Α και Β θα είναι ίσες. Δηλαδή θα ισχύει η σχέση:

$$P_A = P_B \tag{2}$$

Αν η εξωτερική πίεση στις δύο ελεύθερες επιφάνειες (E_1 και E_2) είναι ίδια, τότε θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_A = P_{\varepsilon\xi} + \varepsilon_2 \cdot h_2 \tag{3}$$

$$P_B = P_{\varepsilon\xi} + \varepsilon_1 \cdot h_1 \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (2), (3) και (4) παίρνομε:

$$P_{\varepsilon\xi} + \varepsilon_2 \cdot h_2 = P_{\varepsilon\xi} + \varepsilon_1 \cdot h_1$$

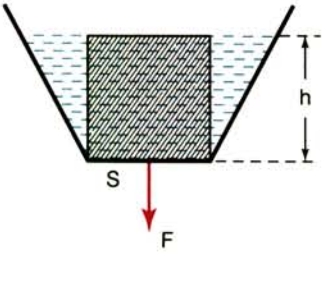
$$\varepsilon_2 \cdot h_2 = \varepsilon_1 \cdot h_1$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

1.8 Δυνάμεις που ασκούνται από υγρό.

α) Δύναμη που ασκείται στον οριζόντιο πυθμένα δοχείου από υγρό που ισορροπεί μέσα σε αυτό.

Εφ' όσον ο πυθμένας του δοχείου (σχ. 1.8α) είναι οριζόντιος, σε κάθε



Σχ. 1.8α.

σημείο του εξασκείται η ίδια υδροστατική πίεση:

$$P = \varepsilon \cdot h \quad (\varepsilon = \rho \cdot g) \tag{1}$$

όπου: ε το ειδικό βάρος του υγρού και
h η απόσταση του οριζόντιου πυθμένα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Επειδή η υδροστατική πίεση στα διάφορα σημεία του οριζόντιου πυθμένα είναι η ίδια, γι' αυτό η δύναμη $\vec{F}$ την οποία εξασκεί το υγρό κάθετα στον οριζόντιο πυθμένα είναι:

$$F = P \cdot S \tag{2}$$

όπου: S το εμβαδόν του οριζόντιου πυθμένα.

Από τις σχέσεις (2) και (1) προκύπτει η σχέση:

$$F = P \cdot S = \varepsilon \cdot h \cdot S$$

$$\boxed{F = \varepsilon \cdot h \cdot S} \tag{3}$$

Η σχέση (3) δίνει το μέτρο της εξασκούμενης από το υγρό δυνάμεως στον οριζόντιο πυθμένα του δοχείου.

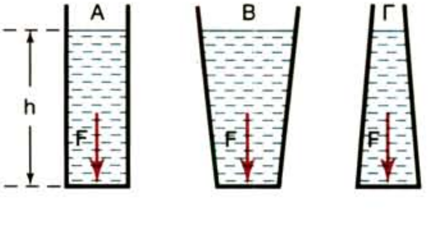
Από την εξίσωση (3) προκύπτει ότι η δύναμη F δεν εξαρτάται από το σχήμα του δοχείου και από το ολικό βάρος του υγρού που περιέχει, αλλά από τη φύση (ε) του υγρού, από το εμβαδόν (S) του οριζόντιου πυθμένα και από την απόσταση (h) του πυθμένα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Εάν τα τρία δοχεία Α, Β και Γ (σχ. 1.8β), που έχουν ίσους πυθμένες (S: το ίδιο) περιέχουν το ίδιο υγρό (ε: το ίδιο) και μέχρι το ίδιο ύψος (h: το ίδιο), τότε διαπιστώνομε ότι στους πυθμένες τους εξασκούνται από το υγρό ίσες δυνάμεις F ($F = \varepsilon \cdot h \cdot S$), ενώ τα βάρη του υγρού B_A, B_B και B_Γ που περιέχουν είναι διαφορετικά.

Προσοχή:

Το $(h \cdot S)$ παριστάνει τον όγκο (V) μιας στήλης που έχει ύψος h και εμβαδόν (S) (σχ. 1.8γ).

Δηλαδή:



Σχ. 1.8β.

$$V = h \cdot S \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (3) και (4) προκύπτει:

$$F = \varepsilon \cdot h \cdot S = \varepsilon \cdot V \tag{5}$$

Το βάρος Β΄ της στήλης υγρού που έχει ειδικό βάρος (ε) και όγκο (V) είναι:

$$B' = \varepsilon \cdot V \tag{6}$$

Από τις σχέσεις (5) και (6) προκύπτει:

$$F = B' \tag{7}$$

Η σχέση (7) μας λέει ότι:

Η δύναμη $\vec{F}$ που εξασκεί (σχ. 1.8γ) το υγρό στον οριζόντιο πυθμένα του δοχείου, μέσα στο οποίο ισορροπεί, είναι ίση με το βάρος $\vec{B'}$ μιας κατακόρυφης στήλης του υγρού, που έχει ως βάση (S) τον πυθμένα και ύψος (h) την απόσταση του πυθμένα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

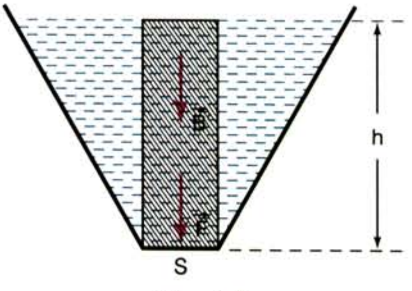
Υδροστατικό παράδοξο.

Με βάση τα πιο πάνω η δύναμη που εξασκείται από το υγρό στον πυθμένα του δοχείου Γ (σχ. 1.8β) που το περιέχει είναι μεγαλύτερη από το βάρος του υγρού.

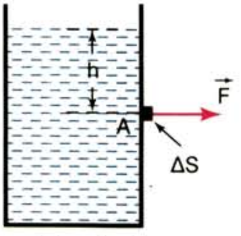
Το γεγονός ότι η δύναμη η οποία εξασκείται από το υγρό στον πυθμένα του δοχείου Γ που το περιέχει είναι μεγαλύτερη από το βάρος του υγρού αποτελεί το υδροστατικό παράδοξο.

β) Δύναμη που ασκείται σε επίπεδο πλευρικό τοίχωμα δοχείου από υγρό που ισορροπεί μέσα σε αυτό.

Σε κάθε σημείο Α του επίπεδου πλευρικού τοιχώματος δοχείου (σχ. 1.8δ) ασκείται υδροστατική πίεση



Σχ. 1.8γ.



Σχ. 1.8δ.

$$P = \varepsilon \cdot h \quad (1)$$

όπου: ε το ειδικό βάρος του υγρού και
h η απόσταση του σημείου Α από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Επομένως σε κάθε σημείο Α (σε στοιχειώδη επιφάνεια ΔS) του επίπεδου τοιχώματος το υγρό εξασκεί δύναμη $\vec{F}$ κάθετη στο τοίχωμα.

Το μέτρο αυτής της δυνάμεως είναι:

$$\boxed{F = P \cdot \Delta S = \varepsilon \cdot h \cdot \Delta S} \quad (2)$$

όπου: ΔS το εμβαδόν της πολύ μικρής επιφάνειας του τοιχώματος γύρω από το σημείο Α.

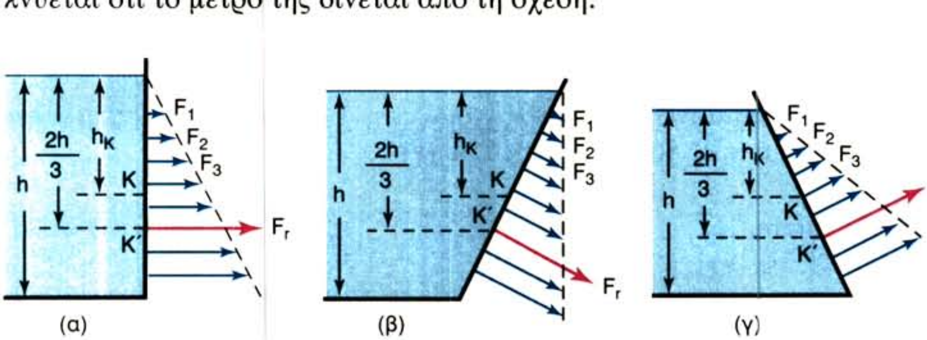
Από τη σχέση (2) προκύπτει ότι το μέτρο των δυνάμεων που ασκούνται από το υγρό στα διάφορα σημεία του επίπεδου πλευρικού τοιχώματος, αυξάνει, όταν αυξάνει η απόσταση των σημείων από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Βέβαια, οι δυνάμεις που εξασκεί το υγρό στα διάφορα σημεία του επίπεδου τοιχώματος είναι παράλληλες μεταξύ τους, γιατί είναι όλες κάθετες σε αυτό.

Επομένως για να βρούμε τη δύναμη $\vec{F}_r$ που εξασκεί το υγρό σε ολόκληρο το επίπεδο τοίχωμα των δοχείων (σχ. 1.8ε), πρέπει να συνθέσομε τις δυνάμεις $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3...$, που εξασκούνται από το υγρό σε όλα τα σημεία του επίπεδου τοιχώματος.

1.8.1 Μέτρο της $\boxed{\vec{F}_r}$.

Η συνισταμένη των δυνάμεων, δηλαδή η δύναμη $\vec{F}_r$ που εξασκεί το υγρό σε ολόκληρο το επίπεδο τοίχωμα, είναι κάθετη σε αυτό και αποδεικνύεται ότι το μέτρο της δίνεται από τη σχέση:



Σχ. 1.8ε.

$$\boxed{\vec{F}_r = \varepsilon \cdot h_K \cdot S} \qquad (3)$$

όπου: S το εμβαδόν της επιφάνειας του επίπεδου τοιχώματος που διαβρέχεται από το υγρό και
h_K η απόσταση του κέντρου βάρους της από την ελεύθερη επιφάνεια.

1.8.2 Σημείο εφαρμογής της $\boxed{\vec{F}_r}$

Το σημείο εφαρμογής Κ΄ της δυνάμεως $\vec{F}_r$ ονομάζεται ***κέντρο των πιέσεων***. Βρίσκεται γενικά κάτω από το κέντρο βάρους Κ της επιφάνειας του τοιχώματος που διαβρέχεται από το υγρό.

Η θέση του κέντρου των πιέσεων Κ΄ εξαρτάται από το ***σχήμα*** της επιφάνειας του τοιχώματος που διαβρέχεται.

Αν η επιφάνεια του τοιχώματος έχει σχήμα ***ορθογωνίου παραλληλογράμμου***, τότε το κέντρο των πιέσεων Κ΄ απέχει από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού απόσταση $h_{K'}$:

$$h_{K'} = \frac{2}{3} \cdot h$$

όπου: h η απόσταση της επιφάνειας του πυθμένα από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού.

Στην περίπτωση αυτή το κέντρο βάρους Κ της επιφάνειας του τοιχώματος που διαβρέχεται απέχει από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού απόσταση:

$$h_K = \frac{h}{2}$$

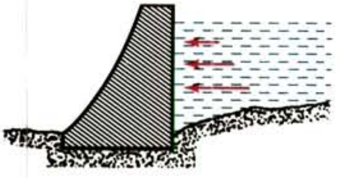
Παρατήρηση:

Αν το επίπεδο τοίχωμα είναι κατακόρυφο, τότε η $\vec{F}_r$ είναι οριζόντια [(σχ. 1.8ε (α)].

Αν το επίπεδο τοίχωμα είναι πλάγιο, τότε η $\vec{F}_r$ έχει φορά προς τα κάτω [(σχ. 1.8ε (β)] ή προς τα πάνω [(σχ. 1.8ε (γ)].

1.8.3 Φράγματα.

Το φράγμα κατασκευάζεται έτσι, ώστε το πάχος του να ευρύνεται ανάλογα με το βάθος, γιατί μεγαλώνει αντίστοιχα και η δύναμη που εξασκεί το νερό στα τοιχώματα (σχ. 1.8στ).



Σχ. 1.8στ.

1.8.4 Ολική δύναμη που ασκείται στο δοχείο από το υγρό.

Η ολική δύναμη που εξασκείται από το υγρό στο δοχείο είναι η συνισταμένη $\vec{F}_{ολ}$ όλων των δυνάμεων, οι οποίες εξασκούνται από το υγρό στον πυθμένα και στα πλευρικά τοιχώματα του δοχείου.

Η $\vec{F}_{ολ}$ είναι ανεξάρτητη από το σχήμα του δοχείου και πάντοτε ίση με το βάρος $\vec{B}$ του υγρού ($\vec{B} = \vec{F}_{ολ}$).

1.9 Μετάδοση των πιέσεων. Αρχή του Pascal.

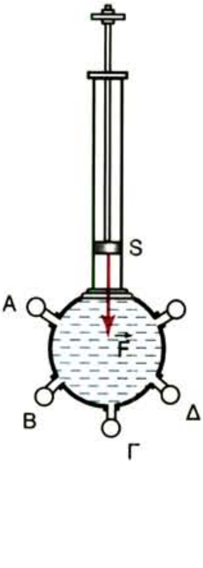
Ο τρόπος μεταδόσεως της εξωτερικής πιέσεως μέσα σε υγρό καθορίζεται από την αρχή του Pascal.

Η αρχή του Pascal ορίζει τα εξής:

Όταν σε ένα οποιοδήποτε σημείο υγρού, που βρίσκεται σε ισορροπία, προκαλείται μια εξωτερική πίεση, το υγρό μεταβιβάζει την πίεση αυτή αμετάβλητη σε όλα τα σημεία του.

α) Πειραματική απόδειξη της αρχής του Pascal.

Παίρνομε τη συσκευή που φαίνεται στο σχήμα 1.9α. Τα μανόμετρα Α, Β,



Σχ. 1.9α.

Γ, Δ, προτού εξασκήσομε δύναμη πάνω στο έμβολο S, έστω ότι δείχνουν αντίστοιχα τις πιέσεις P_A, P_B, $P_Γ$ και $P_Δ$.

Όταν εξασκούμε στο έμβολο (S) δύναμη που προκαλεί πίεση μιας ατμόσφαιρας (1 atm), τότε τα μανόμετρα Α, Β, Γ και Δ δείχνουν αντίστοιχα τις πιέσεις:

$$P_A + 1\ \text{atm},\ P_B + 1\ \text{atm},\ P_Γ + 1\ \text{atm και } P_Δ + 1\ \text{atm}$$

Όταν εξασκήσομε στο έμβολο πίεση δύο ατμοσφαιρών (2 atm), τότε τα μανόμετρα Α, Β, Γ και Δ δείχνουν αντίστοιχα τις πιέσεις:

$$P_A + 2\ \text{atm},\ P_B + 2\ \text{atm},\ P_Γ + 2\ \text{atm και } P_Δ + 2\ \text{atm}$$

Όταν προκαλούμε στο έμβολο πίεση x ατμοσφαιρών (x atm), τότε τα μανόμετρα Α, Β, Γ και Δ δείχνουν αντίστοιχα τις πιέσεις:

$$P_A + x\ \text{atm},\ P_B + x\ \text{atm},\ P_Γ + x\ \text{atm} \quad \text{και} \quad P_Δ + x\ \text{atm}$$

Διαπιστώνομε δηλαδή ότι οποιαδήποτε εξωτερική πίεση και αν προκληθεί σε ένα σημείο του υγρού, το υγρό τη μεταβιβάζει αμετάβλητη σε όλα τα άλλα σημεία του.

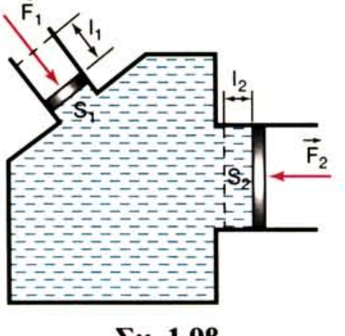
β) Θεωρητική απόδειξη της αρχής του Pascal.

Εάν εξασκούσαμε στο έμβολο S_1 της διατάξεως του σχήματος 1.9β τη δύναμη $\vec{F}_1$, τότε αυτό θα μετακινούνταν έστω κατά την απόσταση l_1 και το έμβολο S_2 κατά την απόσταση l_2.

Βέβαια, συγχρόνως θα εξασκούσαμε στο έμβολο S_2 τη δύναμη $\vec{F}_2$ τέτοια, ώστε οι μετακινήσεις των εμβόλων S_1 και S_2 να ήταν ομαλές.

Επειδή το υγρό θεωρείται ασυμπίεστο, θα ισχύει η σχέση:

$$S_1 \cdot l_1 = S_2 \cdot l_2 \tag{1}$$



Σχ. 1.9β.

όπου: S_1 το εμβαδόν του εμβόλου S_1 και
S_2 το εμβαδόν του εμβόλου S_2.

Το έργο που παράγει η δύναμη $\vec{F}_1$ κατά τη μετακίνησή της l_1 είναι:

$$A_1 = F_1 \cdot l_1 \tag{2}$$

ενώ το έργο που καταναλώνει η δύναμη $\vec{F}_2$ κατά τη μετακίνησή της l_2 είναι:

$$A_2 = F_2 \cdot l_2 \tag{3}$$

Αν θεωρήσομε ότι δεν έχομε απώλειες ενέργειας τότε θα ισχύει η σχέση:

$$A_1 = A_2 \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (4), (3) και (2) παίρνομε:

$$F_1 \cdot l_1 = F_2 \cdot l_2 \tag{5}$$

Από τις σχέσεις (5) και (1) παίρνομε:

$$\boxed{\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}} \tag{6}$$

Οι πιέσεις στα έμβολα S_1 και S_2 είναι:

$$P_1 = \frac{F_1}{S_1} \quad (7) \quad \text{και} \quad P_2 = \frac{F_2}{S_2} \tag{8}$$

Από τις σχέσεις (6), (7) και (8) προκύπτει:

$$\boxed{P_1 = P_2}$$

1.9.1 Εφαρμογές της αρχής του Pascal.

α) Υδραυλικό πιεστήριο.

Κάθε υδραυλικό πιεστήριο αποτελείται από:

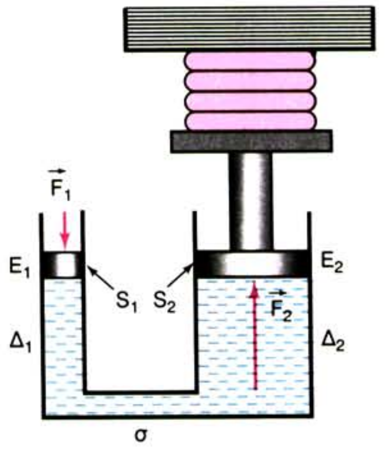
– Δύο κυλινδρικά δοχεία Δ_1 και Δ_2 με διαφορετική διάμετρο (σχ. 1.9γ).

– Ένα λεπτό σωλήνα σ με τον οποίο συγκοινωνούν τα δύο δοχεία.

– Δύο έμβολα E_1 και E_2.

Στο χώρο που περιορίζεται από τα δύο έμβολα E_1 και E_2 περιέχεται ένα υγρό, π.χ. νερό ή λάδι.

Αν στο έμβολο E_1, που έχει εμβαδόν S_1, εξασκήσομε μία κάθετη δύνα-



Σχ. 1.9γ.

μη $\vec{F}_1$, τότε προκαλείται σε αυτό, επομένως και στο υγρό, η πίεση:

$$P = \frac{F_1}{S_1} \qquad (1)$$

Σύμφωνα με την αρχή του Pascal η πίεση P μεταφέρεται η ίδια παντού μέσα στο υγρό, επομένως και στο έμβολο E_2.

Άρα, όταν προκαλούμε στο υγρό με το έμβολο E_1 μια πίεση P, τότε το υγρό προκαλεί στο έμβολο E_2 την ίδια πίεση P και συνεπώς τη δύναμη:

$$F_2 = P \cdot S_2 \qquad (2)$$

όπου: S_2 το εμβαδόν της επιφάνειας του E_2.

Από τη σχέση (2) παίρνομε:

$$P = \frac{F_2}{S_2} \qquad (3)$$

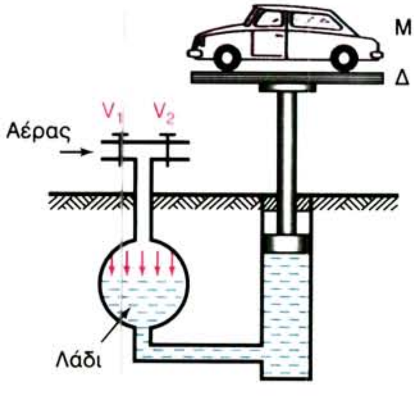
Από τις σχέσεις (1) και (3) προκύπτει:

$$\frac{F_2}{S_2} = \frac{F_1}{S_1} \quad \text{και} \quad \boxed{F_2 = \frac{S_2}{S_1} \cdot F_1} \qquad (4)$$

Από τη σχέση (4) προκύπτει ότι αν το εμβαδόν S_2 του εμβόλου E_2 είναι πολλαπλάσιο του εμβαδού S_1 του εμβόλου E_1, τότε το μέτρο F_2 της δυνάμεως $\vec{F}_2$ είναι πολλαπλάσιο του μέτρου F_1 της $\vec{F}_1$.

Επομένως με το υδραυλικό πιεστήριο κατορθώνομε, αν $S_2>S_1$, να εξασκείται στο έμβολο E_2 από το υγρό μία δύναμη F_2 μεγαλύτερη από την F_1, την οποία εμείς εξασκούμε στο έμβολο E_1.

Συνεπώς το υδραυλικό πιεστήριο είναι ένα σύστημα που πολλαπλασιάζει τη δύναμη που ασκούμε στο μικρό έμβολο, δηλαδή είναι ένα είδος «υδραυλικού μοχλού» (είναι μια απλή μηχανή).



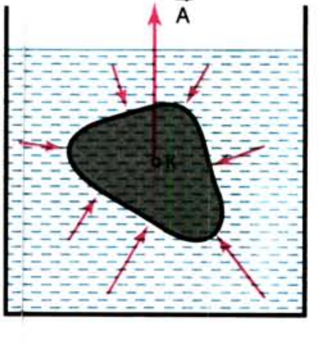
Σχ. 1.9δ.

β) Υδραυλικός ανυψωτήρας.

Η διάταξη του σχήματος 1.9δ δείχνει έναν υδραυλικό ανυψωτήρα. Η λειτουργία του στηρίζεται στην αρχή του Pascal.

1.10 Άνωση. Αρχή του Αρχιμήδη.

Όταν στερεό σώμα είναι ολόκληρο ή εν μέρει βυθισμένο μέσα σε υγρό που ισορροπεί, τότε σε κάθε στοιχειώδες τμήμα (σημείο) της επιφάνειας του σώματος, το οποίο είναι σε επαφή με το υγρό, ασκείται από το υγρό μια κάθετη δύναμη (σχ. 1.10α).



Σχ. 1.10α.

Άνωση ενός σώματος που είναι ολόκληρο ή εν μέρει βυθισμένο μέσα σε υγρό που ισορροπεί, ονομάζεται η συνισταμένη $\vec{A}$ όλων των δυνάμεων που εξασκεί το υγρό επάνω στο σώμα.

Η αρχή του Αρχιμήδη ορίζει τα εξής:

Η άνωση $\vec{A}$, που εξασκείται σε κάθε σώμα βυθισμένο ολόκληρο ή εν μέρει, μέσα σε υγρό που ισορροπεί, είναι δύναμη κατακόρυφη, με φορά από κάτω προς τα επάνω. Το μέτρο της δυνάμεως αυτής είναι ίσο με το μέτρο του βάρους $\vec{B}'$ του εκτοπιζόμενου υγρού και με σημείο εφαρμογής το κέντρο βάρους του εκτοπιζόμενου υγρού.

Δηλαδή:

$$\boxed{\vec{A} = -\vec{B}'} \qquad \text{και} \qquad \boxed{A = B'} \tag{1}$$

Εάν ο όγκος του εκτοπιζόμενου υγρού είναι V και το ειδικό βάρος του ε, τότε ισχύει η σχέση:

$$A = B' = \varepsilon \cdot V$$

$$\boxed{A = \varepsilon \cdot V}\boxed{\text{Αρχή του Αρχιμήδη}}$$

Παρατήρηση:

Η σχέση του Αρχιμήδη αποδεικνύεται, επομένως είναι νόμος, επικράτησε, όμως, να λέγεται αρχή του Αρχιμήδη.

Σημείωση:

Κέντρο ανώσεως ενός σώματος ονομάζεται το σημείο εφαρμογής της ανώσεως του σώματος και συμπίπτει με το κέντρο βάρους του υγρού που εκτοπίζεται από το σώμα.

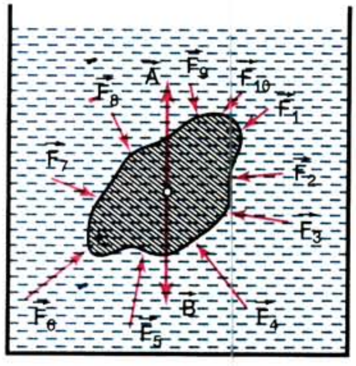
Το κέντρο ανώσεως συμπίπτει με το κέντρο βάρους του σώματος μόνο όταν το σώμα είναι ομογενές και βυθισμένο ολόκληρο στο υγρό.

1.10.1 Απόδειξη του νόμου (της αρχής) του Αρχιμήδη.

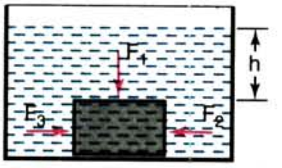
Θεωρούμε μια κλειστή επιφάνεια Ε μέσα σε ένα υγρό (σχ. 1.10β). Το βάρος $\vec{B}$ της μάζας του υγρού που περικλείεται μέσα στην επιφάνεια Ε, ισορροπείται από τη συνισταμένη των δυνάμεων $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3$... οι οποίες εξασκούνται στην επιφάνεια Ε από το υγρό που την περιβάλλει. Δηλαδή ισορροπείται από την άνωση του $\vec{A}$.

Επομένως:

$$\vec{A} = -\vec{B} \qquad \text{και} \qquad A = B = V \cdot \varepsilon$$



Σχ. 1.10β.



Σχ. 1.10γ.

όπου: V ο όγκος της μάζας του υγρού που περικλείεται από την Ε και
ε το ειδικό βάρος του υγρού.

Η συνισταμένη των $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3...$, δηλαδή η άνωση $\vec{A}$, που ασκείται στην επιφάνεια Ε, δεν αλλάζει, οποιοδήποτε σώμα και αν περικλείεται μέσα της. Επομένως σε κάθε σώμα του ίδιου όγκου V εξασκείται η ίδια άνωση Α:

$$\boxed{A = V \cdot \varepsilon}$$

Παρατηρήσεις:

1) Η διεύθυνση της ανώσεως είναι κατακόρυφη αφού αυτή είναι η διεύθυνση του βάρους του υγρού, που θα εκτόπιζε το σώμα αν περικλεινόταν από την επιφάνεια Ε.

2) Η φορά της ανώσεως είναι από κάτω προς τα επάνω αφού είναι αντίθετη της φοράς του βάρους του υγρού που θα εκτόπιζε το σώμα, αν περικλεινόταν από την επιφάνεια Ε.

3) Το μέτρο της ανώσεως θα είναι ίσο με το μέτρο του βάρους του υγρού που θα εκτόπιζε το σώμα, αν περικλεινόταν από την επιφάνεια Ε.

1.10.2 Συνθήκη ισχύος της αρχής του Αρχιμήδη.

Η συνθήκη ισχύος της αρχής του Αρχιμήδη ορίζει τα εξής: Η αρχή του Αρχιμήδη ***ισχύει μόνο όταν όλη η επιφάνεια του βυθισμένου τμήματος του σώματος είναι σε επαφή με το υγρό***.

Ο κύλινδρος από φελλό (σχ. 1.10γ), του οποίου η βάση ακουμπά επάνω στη βάση του δοχείου που περιέχει νερό, παραμένει μέσα στο νερό. Ο κύλινδρος όχι μόνο δεν δέχεται άνωση, αλλά ωθείται προς τον πυθμένα με μια δύναμη $\vec{F}_1$, την οποία ασκεί το νερό στην επάνω βάση του κυλίνδρου.

(Οι δυνάμεις $\vec{F}_2, \vec{F}_3$ τις οποίες εξασκεί το νερό στην πλευρική επιφάνεια του κυλίνδρου αλληλοαναιρούνται).

$$F_1 = \varepsilon_\upsilon \cdot S \cdot h$$

όπου: ε_υ το ειδικό βάρος νερού,
S το εμβαδόν της βάσεως του κυλίνδρου και
h η κατακόρυφη απόσταση της επάνω βάσεως του κυλίνδρου από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

Εάν ο κύλινδρος μετακινηθεί λίγο από τη θέση του ώστε να εισχωρήσει νερό μεταξύ της κάτω βάσεώς του και της βάσεως του δοχείου, τότε εμφανίζεται η άνωση, η οποία, επειδή είναι μεγαλύτερη από το βάρος του κυλίνδρου, προκαλεί την άνοδό του.

1.10.3 Αντίστροφο της αρχής του Αρχιμήδη.

Εφ' όσον ένα στερεό σώμα, βυθισμένο ολόκληρο ή εν μέρει μέσα σε υγρό που ισορροπεί, δέχεται από το υγρό άνωση, πρέπει, σύμφωνα με το αξίωμα δράσεως και αντιδράσεως, να εξασκεί και το σώμα επάνω στο υγρό μία δύναμη αντίθετη με την άνωσή του. Δηλαδή ισχύει το αντίστροφο της αρχής του Αρχιμήδη κατά το οποίο:

Κάθε σώμα βυθισμένο ολόκληρο ή μέρος του μέσα σε υγρό που ισορροπεί, εξασκεί στο υγρό μια κατακόρυφη δύναμη $\vec{F}$. Η δύναμη $\vec{F}$ έχει φορά προς τα κάτω και μέτρο F ίσο με το μέτρο A της ανώσεως A που δέχεται το σώμα από το υγρό. Δηλαδή:

$$\vec{F} = -\vec{A}$$

$$F = A = \varepsilon_\upsilon \, . \, V = B$$

όπου: ε_υ το ειδικό βάρος του υγρού,
V ο όγκος του εκτοπιζόμενου υγρού και
B το βάρος του εκτοπιζόμενου υγρού.

1.11 Πλεύση.

Εάν μέρος μόνο του σώματος είναι βυθισμένο μέσα στο υγρό και το σώμα ισορροπεί, τότε λέμε ότι το σώμα επιπλέει. Ένα σώμα επιπλέει όταν:

- Το μέτρο A της ανώσεως $\vec{A}$ του σώματος είναι ίσο με το μέτρο B του βάρους του $\vec{B}$ και
- το κέντρο βάρους του σώματος και το κέντρο της ανώσεώς του βρίσκονται στην ίδια κατακόρυφο.

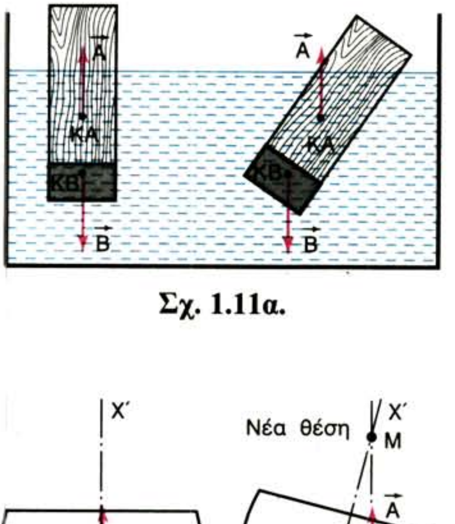
Διακρίνομε τις εξής περιπτώσεις ισορροπίας σώματος που επιπλέει:

1) Όταν το κέντρο βάρους του σώματος είναι κάτω από το κέντρο ανώσεώς του, τότε η ισορροπία του σώματος είναι πάντα ευσταθής (σχ. 1.11α).

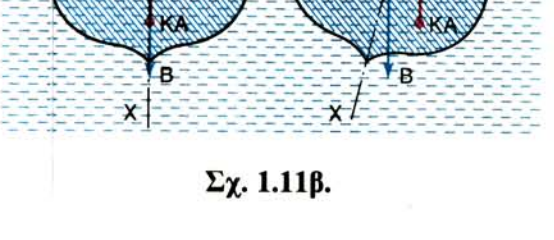
Πράγματι, αν το κέντρο βάρους του σώματος είναι κάτω από το κέντρο ανώσεως και εκτρέψομε το σώμα λίγο από τη θέση ισορροπίας του, τότε οι δύο δυνάμεις $\vec{A}$ και $\vec{B}$ σχηματίζουν ζεύγος, που επαναφέρει το σώμα στην αρχική θέση ισορροπίας, δηλαδή η ισορροπία (πλεύση) αυτή είναι σταθερή (ευσταθής) (σχ. 1.11α).

2) Εάν το κέντρο βάρους του σώματος βρίσκεται (σχ. 1.11β) επάνω από το κέντρο ανώσεως, τότε η ισορροπία του είναι ευσταθής, ***εάν κατά κάποια εκτροπή του σώματος από αυτή, το μετάκεντρο βρίσκεται και πάλι επάνω από το κέντρο βάρους του σώματος***.

Πράγματι, όταν η εκτροπή του σώματος από τη θέση ισορροπίας είναι τόση, ώστε το μετάκεντρο να βρίσκεται επάνω από το κέντρο βάρους του σώματος, τότε οι δυνάμεις $\vec{A}$ και $\vec{B}$ (σχ. 1.11β) σχηματίζουν ζεύγος που επαναφέρει το σώμα στην αρχική θέση ισορροπίας, δηλαδή η ισορροπία αυτή είναι σταθερή.



Σχ. 1.11α.



Σχ. 1.11β.

Σημείωση:

1) Άξονας ισορροπίας ενός σώματος που επιπλέει, ονομάζεται η ευθεία XX΄ (σχ. 1.11β) που περνάει από το κέντρο βάρους και το κέντρο ανώσεως του σώματος.

2) Όταν το σώμα εκτραπεί, κατά διάφορες γωνίες, από τη θέση ισορροπίας του, το κέντρο της ανώσεώς του παίρνει διάφορες θέσεις.

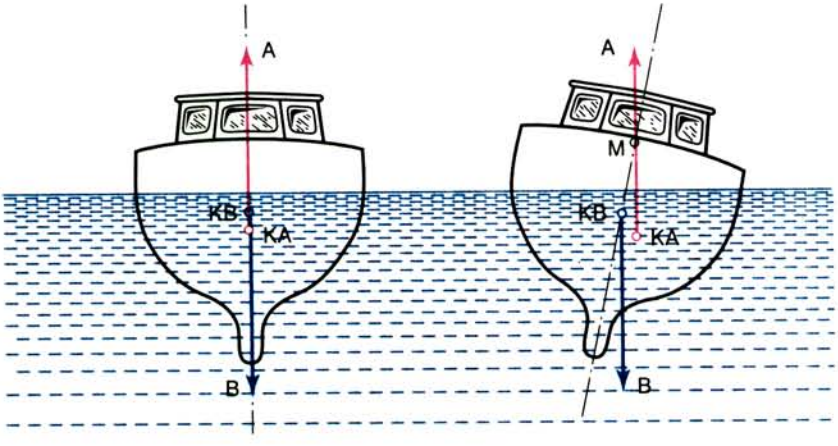
3) Μετάκεντρο Μ (σχ. 1.11β) σώματος, σε μία θέση του, ονομάζεται το σημείο τομής του άξονα ισορροπίας XX΄ του σώματος και της κατακόρυφης που περνά από το κέντρο ανώσεως του σώματος για τη θέση αυτή.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η θέση του μετάκεντρου είναι διαφορετική για διαφορετικές γωνίες εκτροπής του σώματος από τη θέση ισορροπίας του.

4) Ο άξονας ισορροπίας του σώματος τέμνεται από την κατακόρυφο που περνάει από τις διαφορετικές θέσεις του κέντρου ανώσεως σε διαφορετικά σημεία, ανάλογα με τη γωνία εκτροπής του σώματος από τη θέση ισορροπίας του.

1.12 Ισορροπία των πλοίων.

Το κέντρο βάρους στα πλοία βρίσκεται πάντοτε επάνω από το κέντρο ανώσεως [(σχ. 1.12 (α)]. Έχουν όμως τέτοιο σχήμα, ώστε το μετάκεντρό τους βρίσκεται, για αρκετά μεγάλη κλίση, επάνω από το κέντρο βάρους [σχ. 1.12 (β)]. Επομένως υπάρχει ευστάθεια και η πλεύση των πλοίων είναι σταθερή.



Σχ. 1.12.

Σημείωση:

Η θέση του μετάκεντρου είναι διαφορετική για τις διαφορετικές γωνίες κλίσεως του πλοίου. Εάν η κλίση του πλοίου γίνει μεγαλύτερη από μία ορισμένη (κρίσιμη) τιμή, τότε το μετάκεντρο βρίσκεται κάτω από το κέντρο βάρους του σώματος και το πλοίο ανατρέπεται.

Η πλεύση του πλοίου είναι περισσότερο σταθερή όσο το κέντρο βάρους του είναι πιο χαμηλά.

Για να αυξηθεί η σταθερότητα των πλοίων, δίνεται σε αυτά τέτοιο σχήμα, ώστε όταν γέρνουν, το κέντρο ανώσεως να μετατοπίζεται πολύ σχετικά με το κέντρο βάρους. Έτσι οι θέσεις του μετακέντρου είναι πιο ψηλά και επομένως η θέση ισορροπίας (πλεύσεως) πιο σταθερή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΑΕΡΟΣΤΑΤΙΚΗ

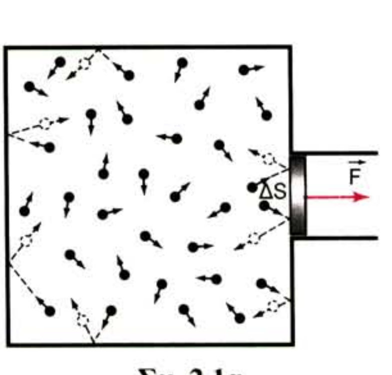
2.1 Πιέσεις των αερίων.

2.1.1 Πίεση που οφείλεται στη συνεχή και άτακτη κίνηση των μορίων του αερίου.

Τα μόρια κάθε αερίου, που περιέχονται σε ένα δοχείο, κινούνται συνεχώς και ατάκτως.

Καθώς κινούνται προς όλες τις διευθύνσεις, συναντούν τις επιφάνειες των τοιχωμάτων του δοχείου που περιέχει το αέριο και συγκρούονται ελαστικά με αυτές (σχ. 2.1α).

Λόγω των συγκρούσεων των μορίων του αερίου με τα τοιχώματα του δοχείου, εξασκείται από το αέριο σε κάθε στοιχειώδες τμήμα των τοιχωμάτων του δοχείου μια κάθετη δύναμη. Αυτό προκαλεί και μία πίεση. Δηλαδή κάθε αέριο προκαλεί στα τοιχώματα του δοχείου πιέσεις που προκύπτουν από δυνάμεις, οι οποίες οφείλονται στις συγκρούσεις των ατάκτως κινουμένων μορίων του με τα τοιχώματα. Οι δυνάμεις π.χ. τις οποίες εξασκούν τα μόρια όταν προσκρούουν στη στοιχειώδη επιφάνεια



Σχ. 2.1α.

ΔS (σχ. 2.1α), δίνουν συνισταμένη $\vec{F}$, κάθετη στην ΔS. Η $\vec{F}$ προκαλεί στην ΔS πίεση, που δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{P = \frac{F}{\Delta S}} \qquad (1)$$

Παρατήρηση:

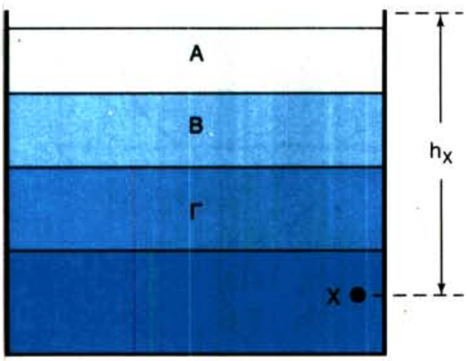
Αποδεικνύεται ότι:

Αν ένα αέριο που περιέχεται σε ένα δοχείο έχει την ίδια πυκνότητα σε όλη του την έκταση, τότε η πίεση του αερίου, που οφείλεται στη σύγκρουση των μορίων του, έχει σε όλα του τα σημεία την ίδια τιμή.

2.1.2 Πίεση που οφείλεται στο βάρος του αερίου.

Κάθε στρώμα ενός αερίου, λόγω του βάρους του, πιέζει το αμέσως επόμενο στρώμα του. Έτσι:

Το στρώμα Α (σχ. 2.1β) του αερίου, πιέζει το αμέσως επόμενό του στρώμα Β.



Σχ. 2.1β.

Το στρώμα Β μεταδίδει την πίεση αυτή στο αμέσως επόμενο στρώμα Γ και προκαλεί επί πλέον σε αυτό την προερχόμενη από το δικό του βάρος πίεση κ.ο.κ.

Έτσι μία ποσότητα αερίου προκαλεί σε όλα του τα σημεία πίεση που οφείλεται στο βάρος του. Η πίεση αυτή είναι παρόμοια με την υδροστατική πίεση. Εάν το ειδικό βάρος ενός αερίου είναι το ίδιο σε όλη την έκτασή του, τότε η πίεσή του σε ένα σημείο X (σχ. 2.1β) που οφείλεται στο βάρος του, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_X = \varepsilon \cdot h_X \qquad (2)$$

Παρατηρήσεις:

1) Επειδή το ειδικό βάρος των αερίων είναι μικρό, γι' αυτό η πίεση των αερίων που οφείλεται στο βάρος τους θεωρείται αμελητέα και στην πράξη δεν υπολογίζεται όταν πρόκειται για μικρούς όγκους αερίων.

2) Στην πράξη όταν λέμε πίεση ενός αερίου εννοούμε την πίεση του αερίου που οφείλεται στην άτακτη και συνεχή κίνηση των μορίων του. Δηλαδή στην πράξη δεν λαμβάνομε υπόψη την πίεση που οφείλεται στο βάρος του αερίου, γιατί είναι πάρα πολύ μικρή.

3) Στην πράξη η πίεση του αερίου που βρίσκεται σε δοχείο συνηθισμένων διαστάσεων έχει σε όλα του τα σημεία την ίδια τιμή.

Αν σε διαφορετικά σημεία ενός δοχείου (σχ. 2.1γ) που περιέχει αέριο, τοποθετήσομε μανόμετρα, θα παρατηρήσομε ότι οι ενδείξεις τους είναι ίδιες. Η πίεση δηλαδή του αερίου σε όλα τα σημεία του έχει την ίδια τιμή.

Σχ. 2.1γ.

Σημείωση:

Αν η αέρια στήλη έχει αρκετά μεγάλο ύψος, όπως στον ατμοσφαιρικό αέρα, τότε η πίεση, που οφείλεται στο βάρος του αερίου, είναι αρκετά μεγάλη και πρέπει να υπολογίζεται.

2.2 Ατμόσφαιρα και ζώνες της ατμόσφαιρας.

Ατμόσφαιρα ονομάζεται το αέριο περίβλημα της γης, το οποίο την ακολουθεί σε όλες τις κινήσεις της.

Το αέριο, το οποίο αποτελεί την ατμόσφαιρα, ονομάζεται ατμοσφαιρικός αέρας και είναι ένα μείγμα, κυρίως αζώτου και οξυγόνου. Τα μόρια του αέρα έλκονται από τη γη και γι' αυτό συγκρατούνται γύρω της.

Το ύψος της ατμόσφαιρας δεν έχει προσδιορισθεί με ακρίβεια. Από μερικά φαινόμενα βγάζομε το συμπέρασμα ότι το ύψος στο οποίο φθάνει η ατμόσφαιρα είναι περίπου 1000 km.

Οι μεγάλες ζώνες της ατμόσφαιρας είναι οι ακόλουθες:

α) Η τροπόσφαιρα.

Φθάνει σε ύψος περίπου 20 km. Στη ζώνη αυτή συμβαίνουν όλα τα μετεωρολογικά φαινόμενα (βροχή, χαλάζι κλπ.).

Η θερμοκρασία στην τροπόσφαιρα ελαττώνεται όσο ανερχόμαστε από την επιφάνεια της θάλασσας.

β) Η στρατόσφαιρα.

Είναι πάνω από την τροπόσφαιρα και φθάνει μέχρι τα 50 km. Στη στρατόσφαιρα η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή.

γ) Η ιονόσφαιρα.

Αυτή είναι πάνω από τη στρατόσφαιρα και φθάνει μέχρι τα 500 km. Χαρακτηριστικό στη ζώνη αυτή είναι ότι υπάρχουν πολλά ιόντα.

Η ιονόσφαιρα παίζει σπουδαίο ρόλο στη διάδοση των βραχέων ραδιοφωνικών κυμάτων. Ο ιονισμός (ιοντισμός) της οφείλεται στην ηλιακή και κοσμική ακτινοβολία.

δ) Η εξώσφαιρα.

Είναι η ανώτατη ζώνη της ατμόσφαιρας και το ύψος της δεν είναι γνωστό. Υπολογίζεται ότι είναι 1000 km περίπου.

Σημείωση:

Το κυριότερο χαρακτηριστικό της ατμόσφαιρας είναι ότι η ατμοσφαιρική πίεση και η πυκνότητα του αέρα ελαττώνονται όσο αυξάνεται το ύψος.

2.3 Ατμοσφαιρική πίεση.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει βάρος. Γι' αυτό η ατμόσφαιρα εξασκεί μία κάθετη δύναμη σε κάθε μικρό τμήμα μιας επιφάνειας, με το οποίο βρίσκεται σε επαφή. Η δύναμη που εξασκεί η ατμόσφαιρα, λόγω του βάρους του αέρα, σε κάθε τμήμα μιας επιφάνειας με το οποίο βρίσκεται σε επαφή προκαλεί σε αυτό μία πίεση που την ονομάζομε ατμοσφαιρική πίεση.

Σημείωση:

1) Έστω ότι μία μικρή επιφάνεια έχει εμβαδόν ΔS και επάνω της εξασκείται από την ατμόσφαιρα κάθετα η δύναμη $\vec{F}$. Τότε στην επιφάνεια αυτή ασκείται η ατμοσφαιρική πίεση P:

$$\boxed{P = \frac{F}{\Delta S}}$$

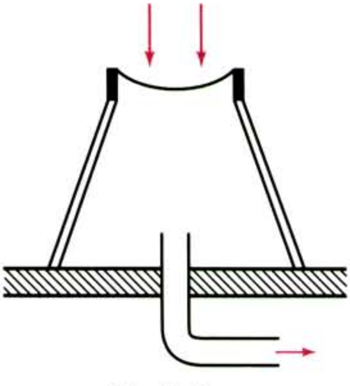
2) Αν μια μικρή επιφάνεια έχει εμβαδόν ΔS και επάνω της ασκείται η α-

τμοσφαιρική πίεση P, τότε σε αυτή την επιφάνεια εξασκείται από την ατμόσφαιρα μια δύναμη $\vec{F}$, που είναι κάθετη στην επιφάνεια και έχει μέτρο:

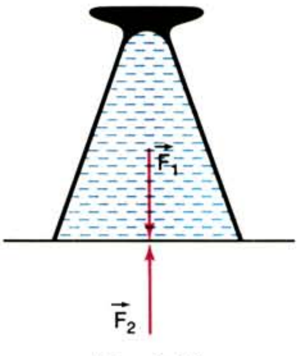
$$\boxed{F = P \cdot \Delta S}$$

2.3.1 Πειραματική απόδειξη της υπάρξεως ατμοσφαιρικής πιέσεως.

Κλείνομε το στόμιο ενός δοχείου (σχ. 2.3α) με μία ελαστική μεμβράνη, την οποία δένομε καλά, ώστε να μην περνά ο αέρας. Συνδέομε το δοχείο με ένα σωλήνα και φέρομε το σωλήνα σε μία αεραντλία. Όταν αφαιρέσομε τον αέρα από το δοχείο, θα παρατηρήσομε ότι η μεβράνη θα καμπυλω-



Σχ. 2.3α.



Σχ. 2.3β.

θεί προς το εσωτερικό του δοχείου και, αν η αντοχή της είναι μικρή, θα σπάσει.

Συμπέρασμα:

Αφού όταν αφαιρούμε τον αέρα μέσα από το δοχείο η μεμβράνη καμπυλώνεται προς το εσωτερικό του δοχείου, πρέπει στην επάνω επιφάνεια της μεμβράνης να προκαλείται κάποια πίεση. Την πίεση αυτή την προκαλεί ο αέρας.

Σημείωση:

Προτού αφαιρέσομε τον αέρα από το δοχείο, η μεμβράνη ήταν οριζόντια, γιατί αυτή δεχόταν ίδια πίεση και από μέσα και από έξω.

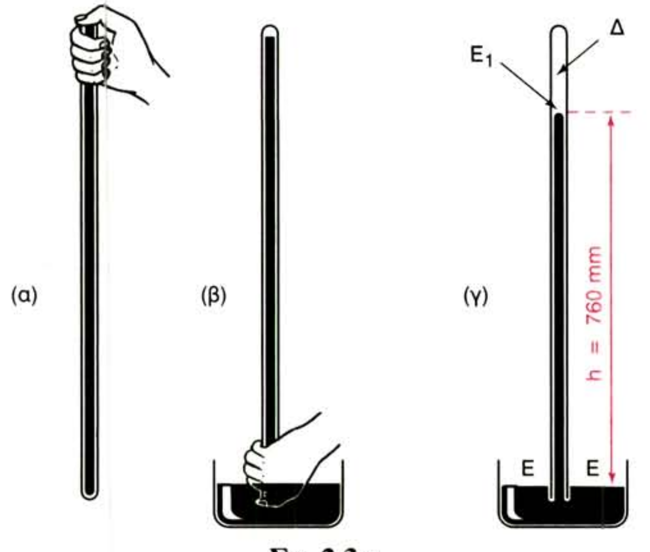
Γεμίζομε εντελώς με νερό ένα ποτήρι (σχ. 2.3β), το σκεπάζομε με ένα φύλλο χαρτιού και το αναστρέφομε. Θα παρατηρήσομε ότι το νερό δε χύνεται.

Συμπέρασμα:

Στην εσωτερική όψη του χαρτιού εξασκεί το νερό την υδροστατική δύναμη $\vec{F}_1$. Επομένως, για να μη χύνεται το νερό, πρέπει η ατμόσφαιρα να εξασκεί στην εξωτερική όψη του χαρτιού μια δύναμη $\vec{F}_2$. Η $\vec{F}_2$ προκαλεί στο χαρτί μία πίεση, την ατμοσφαιρική.

2.3.2 Πείραμα Torricelli (Τορρικέλλι).

Με το πείραμα Torricelli μπορούμε όχι μόνο να αποδείξομε την ύπαρξη της ατμοσφαιρικής πιέσεως, αλλά και να την υπολογίσομε. Παίρνομε ένα



Σχ. 2.3γ.

γυάλινο σωλήνα [σχ. 2.3γ (α)] μήκους 1 m κλειστό στο ένα άκρο του.

Γεμίζομε τελείως το σωλήνα με υδράργυρο. Κλείνομε το ανοικτό άκρο του με το δάκτυλό μας, τον γυρίζομε ανάποδα και τοποθετούμε το άκρο αυτό μέσα σε λεκάνη με υδράργυρο [σχ. 2.3γ (β)]. Όταν απομακρύνομε το δάκτυλό μας, θα παρατηρήσομε ότι ο υδράργυρος μέσα στο σωλήνα δε θα κατέβει μέχρι την ελεύθερη επιφάνεια ΕΕ του υδραργύρου στη λεκάνη, αλλά θα σταματήσει σε κάποιο ύψος h [σχ. 2.3γ (γ)].

***Συμπέρασμα*:**

Ο χώρος Δ [σχ. 2.3γ (γ)] επάνω από την υδραργυρική στήλη είναι σχεδόν κενός, επομένως στο χώρο αυτόν η πίεση είναι πρακτικά ίση με μηδέν. Άρα η πίεση επάνω στην επιφάνεια E_1 του υδραργύρου είναι ίση με μηδέν. Εάν η πίεση επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια Ε του υδραργύρου της λεκάνης ήταν επίσης ίση με μηδέν, θα έπρεπε, σύμφωνα με την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων, οι δύο επιφάνειες Ε και E_1 του υδραργύρου να βρίσκονται στο ίδιο ύψος. Επομένως επάνω στην ελεύθερη επιφάνεια Ε του υδραργύρου της λεκάνης προκαλείται κάποια πίεση, η οποία, αφού δεν προέρχεται από πουθενά αλλού, προκαλείται από την ατμόσφαιρα.

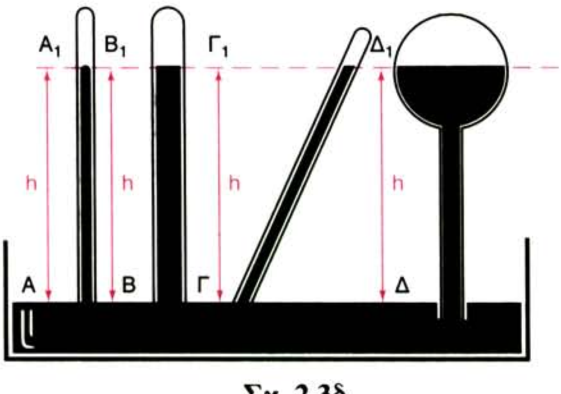
Σημείωση:

Ο χώρος Δ επάνω από τη στήλη του υδραργύρου ονομάζεται βαρομετρικός χώρος ή βαρομετρικός θάλαμος.

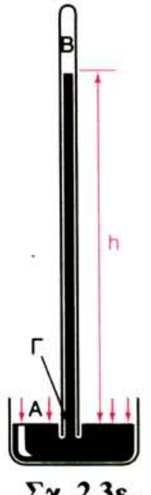
Στο βαρομετρικό χώρο υπάρχουν μόνο ατμοί υδραργύρου, οι οποίοι στη συνηθισμένη θερμοκρασία (20°C έως 30°C) προκαλούν ελάχιστη πίεση, τόση, ώστε πρακτικά ο χώρος αυτός να μπορεί να θεωρηθεί κενός αέρα. Το κενό του χώρου αυτού ονομάζεται βαρομετρικό κενό.

Παρατήρηση:

Εάν επαναλάβομε το πείραμα με σωλήνες διαφορετικών διατομών (σχ. 2.3δ) και σχημάτων τοποθετώντας τους στη λεκάνη με διαφορετικές κλί-



Σχ. 2.3δ.



Σχ. 2.3ε.

σεις, θα παρατηρήσομε ότι οι κατακόρυφες αποστάσεις AA_1, BB_1, $\Gamma\Gamma_1$, και $\Delta\Delta_1$ είναι ίσες, δηλαδή $AA_1 = BB_1 = \Gamma\Gamma_1 = \Delta\Delta_1$.

Δηλαδή το ύψος των στηλών του υδραργύρου μέσα στους σωλήνες είναι ανεξάρτητο από το εμβαδόν της τομής, το σχήμα και την κλίση των σωλήνων.

2.3.3 Υπολογισμός της ατμοσφαιρικής πιέσεως.

Εάν μετρήσομε την κατακόρυφη απόσταση h μεταξύ των επιφανειών του υδραργύρου (σχ. 2.3ε) μέσα στο σωλήνα και μέσα στη λεκάνη, τότε η ατμοσφαιρική πίεση $P_{ατμ}$ βρίσκεται από τη σχέση:

$$P_{ατμ} = h \cdot ε \tag{1}$$

όπου: ε το ειδικό βάρος του Hg.

Απόδειξη της σχέσεως $P_{ατμ} = h \cdot ε$.

Στο σημείο Β της επιφάνειας του υδραργύρου (σχ. 2.3ε) η πίεση είναι μηδέν, γιατί επάνω από τον υδράργυρο υπάρχει βαρομετρικό κενό. Στο σημείο Γ του υδραργύρου, αφού η πίεση στο Β είναι μηδέν, προκαλείται πίεση $P_Γ$, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$P_Γ = h \cdot ε \tag{2}$$

Στο σημείο Α της επιφάνειας του υδραργύρου της λεκάνης προκαλείται η ατμοσφαιρική πίεση: $P_A = P_{ατμ}$.

Επειδή τα σημεία Α και Γ, που είναι σημεία του υδραργύρου, βρίσκονται στο ίδιο οριζόντιο επίπεδο, πρέπει οι πιέσεις τους $P_Γ$ και $P_A = P_{ατμ}$ να είναι ίσες. Δηλαδή:

$$P_A = P_{ατμ} = P_Γ \tag{3}$$

Από τις σχέσεις (2) και (3) προκύπτει:

$$P_{ατμ} = h \cdot ε$$

Παρατηρήσεις:

1) Αν το πείραμα γίνεται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και η θερμοκρασία είναι 0°C, τότε το ύψος h της στήλης του υδραργύρου είναι περίπου 76 cm και επομένως η ατμοσφαιρική πίεση θα είναι:

$P_{ατμ} = h \cdot ε$

$P_{ατμ} = 76\ \text{cm} \cdot 13{,}6\ \text{gf/cm}^3 = 1033\ \text{gf/cm}^2$

$P_{ατμ} = 1033\ \text{gf/cm}^2$ ή

$P_{ατμ} = 1{,}033\ \text{kgf/cm}^2$

2) Όταν η θερμοκρασία είναι 0°C τότε η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια της θάλασσας είναι περίπου ίση με αυτήν που ονομάζομε κανονική ατμοσφαιρική πίεση και είναι σύμφωνα με τα παραπάνω:

$$\boxed{P_{ατμ} = 1033\ \text{gf/cm}^2 = 1{,}033\ \text{kgf/cm}^2}$$

Δηλαδή η κανονική ατμοσφαιρική πίεση είναι ίση με την υδροστατική πίεση που εξασκεί στη βάση της στήλη υδραργύρου ύψους 76 cm και θερμοκρασίας 0°C.

3) Πολλές φορές οι πιέσεις εκφράζονται σε ύψος στήλης υδραργύρου. Όταν λέμε πίεση στήλης υδραργύρου XmmHg, εννοούμε την υδροστατική πίεση, την οποία προκαλεί στη βάση της στήλη υδραργύρου ύψους Xmm και θερμοκρασίας 0°C.

1 atm = 76 cmHg = 760 mmHg
1 mm Hg = 1 Torr
1 atm = 760 Torr

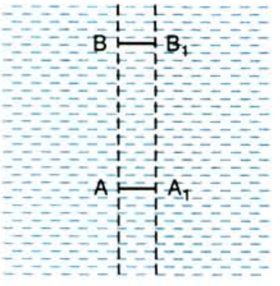
4) Η ατμοσφαιρική πίεση μεταβάλλεται με το ύψος: όσο πιο ψηλά ανεβαίνομε στην ατμόσφαιρα, τόσο πιο μικρή είναι η ατμοσφαιρική πίεση.

Τούτο συμβαίνει γιατί όσο:

1) Ανεβαίνομε πιο ψηλά, τόσο η πυκνότητα του αέρα ελαττώνεται, και

2) τόσο ελαττώνεται η στήλη του υπερκείμενου αέρα, η οποία προκαλεί την ατμοσφαιρική πίεση.

Η ατμοσφαιρική πίεση στην επιφάνεια AA_1 (σχ. 2.3στ) είναι μεγαλύτερη από εκείνη που εξασκείται στην επιφάνεια BB_1. Γιατί στην AA_1 εξασκείται και το βάρος του αέρα της στήλης AB το οποίο δεν εξασκείται στη BB_1.



Σχ. 2.3στ.

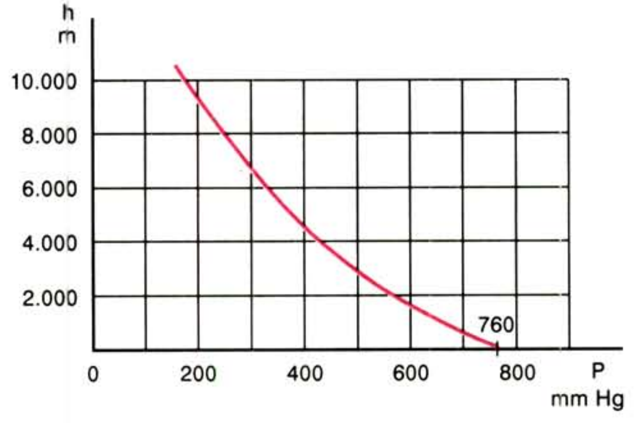
Πειραματικά βρήκαμε ότι, όταν ανεβαίνομε κατά 10,5 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η ατμοσφαιρική πίεση ελαττώνεται περίπου 1 mmHg.

Η ελάττωση αυτή της ατμοσφαιρικής πιέσεως κατά 1 mmHg σε υψομετρική διαφορά 10,5 m ισχύει για μικρά ύψη, δηλαδή για ύψη που η πυκνότητα του αέρα μπορεί να θεωρηθεί σταθερή και όση είναι στην επιφάνεια της θάλασσας.

Για μεγάλα ύψη το πιο πάνω εξαγόμενο δεν ισχύει, γιατί η πυκνότητα του αέρα σε μεγάλα ύψη ελαττώνεται σημαντικά όσο αυξάνεται το ύψος.

Ο νόμος που μας δίνει τη μεταβολή της ατμοσφαιρικής πιέσεως με το ύψος δεν είναι απλός.

Στο σχήμα 2.3ζ φαίνεται η γραφική παράσταση της μεταβολής της ατμοσφαιρικής πιέσεως με το ύψος.



Σχ. 2.3ζ.

Έτσι λοιπόν σε κάθε υψόμετρο αντιστοιχεί μια τιμή της ατμοσφαιρικής πιέσεως.

Εάν με ένα βαρόμετρο μετρήσομε την ατμοσφαιρική πίεση σε ένα σημείο της ατμόσφαιρας, τότε με τη βοήθεια του διαγράμματος (σχ. 2.3ζ) βρίσκομε σε ποιο ύψος αντιστοιχεί η πίεση αυτή, δηλαδή βρίσκομε το υψόμετρο του σημείου.

2.4 Άνωση. Νόμος (αρχή) του Αρχιμήδη για τα αέρια.

Όταν ένα σώμα βρίσκεται μέσα σε αέριο που ισορροπεί, τότε σε κάθε πολύ μικρό τμήμα (σημείο) της επιφάνειας του σώματος εξασκείται από το αέριο μια κάθετη δύναμη.

Η συνισταμένη όλων των δυνάμεων που εξασκεί ένα αέριο, επάνω σε σώμα βυθισμένο μέσα σε αυτό, ονομάζεται ***άνωση*** του σώματος.

Η άνωση είναι κατακόρυφη, με φορά προς τα επάνω και εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους του εκτοπιζόμενου, από το σώμα, αερίου.

***Προσοχή*:**

Η άνωση είναι η συνισταμένη των δυνάμεων που εξασκεί το αέριο στο σώμα λόγω του βάρους του.

Άρα, αν ένα αέριο δεν είχε βάρος, δε θα εξασκούσε άνωση σε σώμα που θα ήταν βυθισμένο σε αυτό.

Η αρχή του Αρχιμήδη για τα αέρια ορίζει τα εξής:

Η άνωση $\vec{A}$***, που εξασκείται σε κάθε σώμα, βυθισμένο μέσα σε αέριο που ισορροπεί, είναι δύναμη κατακόρυφη, με φορά από κάτω προς τα πάνω, με μέτρο ίσο με το μέτρο του βάρους*** $\vec{B}$ ***του εκτοπιζόμενου αερίου και με σημείο***

εφαρμογής το κέντρο βάρους του εκτοπιζόμενου αερίου. Δηλαδή:

$$\vec{A} = -\vec{B}$$

$A = B$	Νόμος (αρχή) του Αρχιμήδη	(1)

Σημείωση:

Εάν ο όγκος του εκτοπιζόμενου αερίου είναι V και το ειδικό βάρος του ε, τότε ισχύει η σχέση:

$$B = \varepsilon \cdot V \tag{2}$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) παίρνομε:

$$A = B = \varepsilon \cdot V \qquad \text{και} \qquad \boxed{A = \varepsilon \cdot V}$$

Παρατηρήσεις:

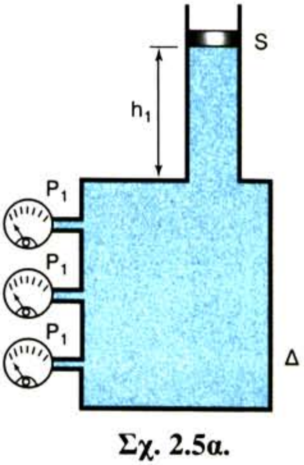
1) Η άνωση, που δέχονται ογκώδη σώματα (αερόστατο κ.ά.), είναι αρκετά μεγάλη.

2) Η άνωση στα αέρια είναι γενικά πολύ μικρή, σε σύγκριση με την άνωση στα υγρά, γιατί τα αέρια, γενικά, έχουν πολύ πιο μικρό ειδικό βάρος από τα υγρά.

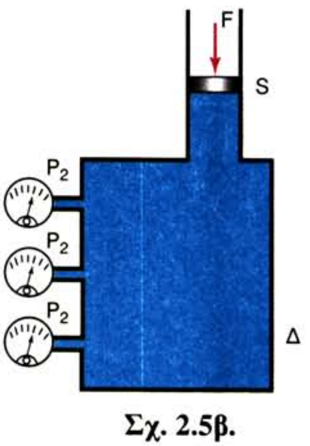
2.5 Αρχή του Pascal για τα αέρια.

Η αρχή του Pascal για τα αέρια ορίζει τα εξής:

Κάθε εξωτερική πίεση που προκαλείται σε ένα αέριο βρισκόμενο σε ηρεμία, μεταβιβάζεται η ίδια σε όλα του τα σημεία.



Σχ. 2.5α.



Σχ. 2.5β.

Το δοχείο Δ (σχ. 2.5α) περιέχει αέριο και τα μανόμετρα δείχνουν την ίδια πίεση P_1.

Αν προκαλέσομε μια πίεση (σχ. 2.5β) στο αέριο, έστω την $F/S = P$, τότε θα παρατηρήσομε ότι όλα τα μανόμετρα δείχνουν την ίδια ένδειξη P_2 που είναι τέτοια, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$P_2 = P_1 + P = P_1 + \frac{F}{S}$$

2.6 Μεταβολή της πιέσεως ενός αερίου με τον όγκο. Νόμος Boule - Mariotte (Μπόυλ - Μαριότ).

Μια ορισμένη μάζα αερίου μπορεί να έχει διάφορους όγκους. Όταν όμως αλλάζει ο όγκος μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου αλλάζει και η πίεσή του.

Τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της πιέσεως, που αποκτά μια μάζα ενός αερίου, όταν καταλάβει έναν όγκο, και του όγκου, την εκφράζει ο νόμος των Boyle - Mariotte.

Ο νόμος αυτός ορίζει τα εξής:

Υπό σταθερή θερμοκρασία το γινόμενο της πιέσεως (P) επί τον όγκο (V) μιας ορισμένης μάζας (m) αερίου διατηρείται σταθερό. Δηλαδή:

$$\boxed{P \cdot V = \text{σταθερό}}\ \boxed{\text{Νόμος Boyle-Mariotte}} \qquad (1)$$

Σημείωση:

Εάν η πίεση μιας μάζας (m) ενός αερίου είναι P_1, όταν ο όγκος της είναι V_1, και P_2 αν ο όγκος της γίνει V_2, τότε, εφόσον η θερμοκρασία της διατηρείται σταθερή, θα ισχύει η σχέση:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = \text{σταθερό} \qquad (2)$$

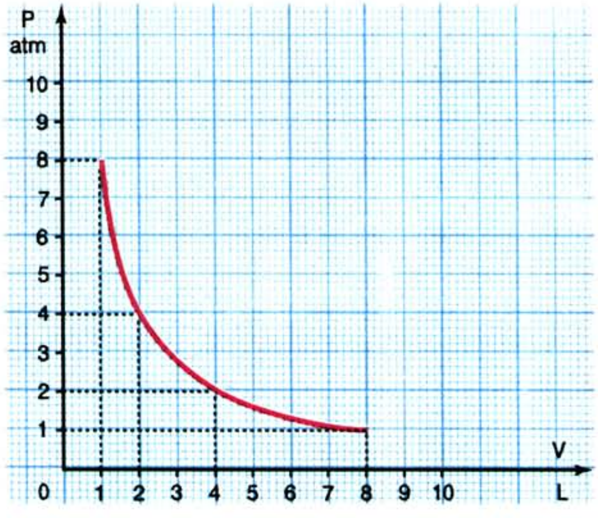
Παρατήρηση:

1) Όταν μεταβάλλεται ο όγκος και η πίεση ενός αερίου, ενώ η θερμοκρασία του διατηρείται σταθερή, τότε λέμε ότι έχομε ισόθερμες μεταβολές.

2) Στο νόμο αυτόν θα επανέλθομε στο τέταρτο κεφάλαιο που αφορά στη θερμότητα.

2.6.1 Γραφική παράσταση του νόμου Boyle - Mariotte.

Η γραφική παράσταση της σχέσεως $P \cdot V =$ σταθερό, δηλαδή η γραφική παράσταση του νόμου Boyle - Mariotte, είναι η καμπύλη του σχήματος



Σχ. 2.6.

2.6. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται ***ισόθερμη καμπύλη***, γιατί παριστάνει ισόθερμες μεταβολές της πιέσεως και του όγκου ενός αερίου.

2.6.2 Άλλη διατύπωση του νόμου Boyle - Mariotte.

Από τις σχέσεις (1) και (2) παίρνομε:

$$P = \frac{\text{σταθ.}}{V} \tag{3}$$

$$\boxed{\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}} \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (3) και (4) προκύπτει και η εξής διατύπωση του νόμου Boyle - Mariotte:

Οι πιέσεις μιας ορισμένης μάζας (m) αερίου, κάτω από σταθερή θερμοκρασία, είναι αντιστρόφως ανάλογες με τους όγκους της.

Έτσι, αν ο όγκος μιας μάζας (m) αερίου διπλασιασθεί, η πίεσή της υποδιπλασιάζεται. Αν ο όγκος υποδιπλασιασθεί, η πίεση διπλασιάζεται κ.ο.κ.

2.7 Νόμος του Dalton (πίεση μείγματος αερίου).

Ο νόμος του Dalton με τον οποίο υπολογίζομε την ολική πίεση ενός μείγματος αερίων ορίζει τα εξής:

Η ολική πίεση P_μ ενός μείγματος αερίων, τα οποία δεν αντιδρούν χημικά μεταξύ τους, ισούται με το άθροισμα των μερικών πιέσεων των αερίων που συνιστούν το μείγμα.

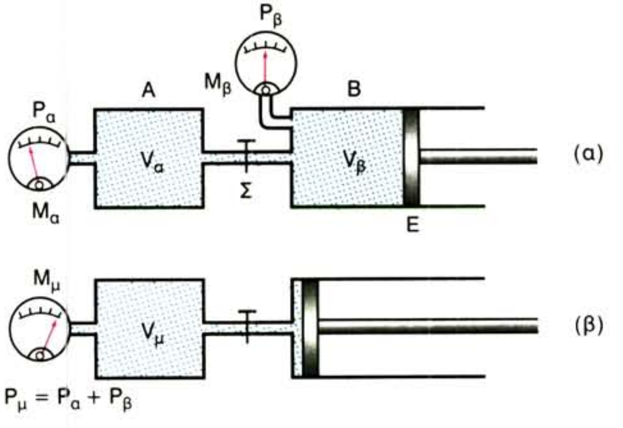
Σημείωση:

Μερική πίεση ενός αερίου, το οποίο είναι συστατικό ενός μείγματος αερίων, ονομάζεται η πίεση που θα είχε, εάν καταλάμβανε μόνο του ολόκληρο τον όγκο, που καταλαμβάνει το μείγμα, υπό θερμοκρασία ίση με τη θερμοκρασία του μείγματος.

Εάν P_μ η ολική πίεση ενός μείγματος αερίων και P_1, P_2, ... P_n οι μερικές πιέσεις των αερίων, που αποτελούν το μείγμα, τότε ο νόμος του Dalton αποδίδεται από την εξίσωση:

$P_\mu = P_1 + P_2 + P_3 ... P_n$	Νόμος του Dalton

Παίρνομε [σχ. 2.7 (α)] δύο συγκοινωνούντα δοχεία Α και Β, των οποίων ο σωλήνας κλείνει με στρόφιγγα Σ.



Σχ. 2.7.

Βάζομε μέσα στα δοχεία αυτά, δύο αέρια α και β και ρυθμίζομε τη διάταξη [σχ. 2.7 (α)] έτσι, ώστε οι όγκοι τους V_α και V_β να γίνουν ίσοι ($V_\alpha = V_\beta$).

Μετράμε τώρα με τα μανόμετρα M_α και M_β τις πιέσεις των αερίων α και β, τα οποία έχουν την ίδια θερμοκρασία. Ας πούμε ότι οι πιέσεις που μετρήσαμε είναι P_α και P_β αντίστοιχα. Ανοίγομε τη στρόφιγγα Σ και κινούμε το έμβολο προς τα αριστερά μέχρι να μεταφέρομε όλο το αέριο β στο δοχείο Α [σχ. 2.7 (β)].

Εάν η θερμοκρασία του μείγματος (α + β) είναι ίδια με τη θερμοκρασία που είχαν τα αέρια στους χώρους Α και Β, τότε με το μανόμετρο M_μ διαπιστώνομε ότι ισχύει η σχέση:

$$P_\mu = P_\alpha + P_\beta$$

Δηλαδή διαπιστώνομε ότι η πίεση P_μ του μείγματος που έχει όγκο V_μ είναι ίση με το άθροισμα των πιέσεων, τις οποίες είχαν όταν το καθένα είχε όγκο V_μ ($V_\mu = V_A = V_B$), δηλαδή είναι ίση με το άθροισμα των μερικών πιέσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

3.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Η εξέταση των φαινομένων, τα οποία παρατηρούνται κατά την κίνηση των υγρών και αερίων, μπορεί να γίνει από κοινού γιατί οι κινήσεις τους διέπονται από τους ίδιους νόμους, όταν η ταχύτητά τους δεν υπερβαίνει (περίπου) τα 150 m/s.

Τα υγρά και τα αέρια μπορούν να ρέουν από ένα δοχείο σε άλλο γι' αυτό λέγονται με μία λέξη ***ρευστά***. Την κίνηση ενός ρευστού προς μία κατεύθυνση την ονομάζομε ***ροή***.

Πεδίο ροής ενός ρευστού ονομάζεται ο χώρος μέσα στον οποίο κινείται (ρέει).

Ένα πεδίο ροής είναι εντελώς καθορισμένο, όταν σε κάθε χρονική στιγμή είναι γνωστή η ταχύτητα που έχει το ρευστό σε κάθε σημείο του πεδίου. Επομένως το χαρακτηριστικό μέγεθος ενός πεδίου ροής είναι η ταχύτητα $\vec{\upsilon}$ των μορίων του ρευστού σε κάθε σημείο του πεδίου.

Τα πεδία ροής διακρίνονται σε: μόνιμα ή στρωτά πεδία ροής και μη μόνιμα πεδία ροής.

Μόνιμο ή ***στρωτό πεδίο ροής*** ονομάζεται το πεδίο, όταν όλα τα μόρια του ρευστού, που διέρχονται από το ίδιο σημείο του πεδίου, διέρχονται με την ίδια ταχύτητα. Δηλαδή στο μόνιμο πεδίο ροής οι ταχύτητες των μορίων του ρευστού στα διάφορα σημεία του πεδίου είναι ανεξάρτητες από το χρόνο και εξαρτώνται μόνο από τις θέσεις των σημείων στο πεδίο ροής.

Στρωτή ή ***μόνιμη ροή*** ονομάζεται η ροή της οποίας το πεδίο είναι στρωτό.

Στη στρωτή ροή η ταχύτητα ενός μορίου δεν είναι, γενικά, η ίδια κατά μήκος της τροχιάς του, δηλαδή μπορεί να είναι διαφορετική στα διάφορα σημεία της τροχιάς του. Πάντως όλα τα μόρια του ρευστού, όταν διέρχονται από το ίδιο σημείο του διέρχονται με την ίδια ταχύτητα.

Μη μόνιμο πεδίο ροής ονομάζεται το πεδίο, όταν τα μόρια του ρευστού, που διέρχονται από το ίδιο σημείο του πεδίου, δεν διέρχονται με την ίδια ταχύτητα. Δηλαδή σε ένα μη μόνιμο πεδίο ροής η ταχύτητα του ρευστού σε κάθε σημείο του μεταβάλλεται με το χρόνο.

Μη μόνιμη ροή ονομάζεται η ροή, της οποίας το πεδίο είναι μη μόνιμο.

Παρατηρήσεις:

1) Κατά τη μελέτη της κινήσεως ενός ρευστού μελετούμε την κίνηση στοιχειωδών τμημάτων του ρευστού.

2) Όταν λέμε ταχύτητα του ρευστού σε ένα σημείο του πεδίου ροής του, εννοούμε την ταχύτητα που έχει ένα στοιχειώδες τμήμα του στο σημείο αυτό.

3.2 Ιδανικά ρευστά.

Η μελέτη της κινήσεως των ρευστών παρουσιάζει πολλές δυσκολίες. Για να απλοποιήσομε τη μελέτη της κινήσεως των ρευστών δεχόμαστε γι' αυτά κυρίως τις πιο κάτω παραδοχές.

Θεωρούμε ότι τα ρευστά:

1) Είναι ασυμπίεστα.

2) Δεν παρουσιάζουν συνάφεια με τα τοιχώματα του δοχείου μέσα στο οποίο κινούνται.

3) Δεν παρουσιάζουν εσωτερική τριβή κατά την κίνηση των μορίων τους.

Τα ρευστά, για τα οποία θεωρούμε ότι ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις (παραδοχές), ονομάζονται ***ιδανικά ρευστά***.

Προσοχή:

Τα πραγματικά ρευστά παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα ιδανικά ρευστά. Όμως, πολλά από τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη μελέτη των ιδανικών ρευστών, ισχύουν κατά προσέγγιση και για τα πραγματικά ρευστά, άλλωστε και γι' αυτό τα μελετάμε.

3.3 Γενικά περί στρωτής ροής.

Η ροή ενός ρευστού ονομάζεται στρωτή ροή, εφ' όσον η ταχύτητα του ρευστού σε ένα σημείο του πεδίου της εξαρτάται μόνο από τη θέση του σημείου αυτού και είναι ανεξάρτητη του χρόνου.

Ρευματική γραμμή είναι μία γραμμή, σε κάθε σημείο της οποίας η εφαπτόμενη συμπίπτει με τη διεύθυνση της ταχύτητας του ρευστού στο σημείο αυτό.

Στη στρωτή ροή ενός ρευστού μία ρευματική γραμμή συμπίπτει με την τροχιά την οποία διαγράφει κατά την κίνησή του ένα ορισμένο στοιχειώδες τμήμα του ρευστού.

Φλέβα ή ***ρευματικός σωλήνας*** ή ***σωλήνας ροής***.

Θεωρούμε μια στοιχειώδη επιφάνεια μέσα στο πεδίο στρωτής ροής και φέρνομε όλες τις ρευματικές γραμμές που περνούν από την περίμετρό (το χείλος) της. Αυτές σχηματίζουν σωλήνα που ονομάζεται ***φλέβα***.

Προσοχή:

Ένα πεδίο ροής απεικονίζεται με ρευματικές γραμμές. Αυτές έχουν κυρίως τα εξής χαρακτηριστικά:

1) Η ταχύτητα ενός στοιχειώδους τμήματος του ρευστού, σε οποιοδήποτε σημείο του πεδίου ροής και αν βρίσκεται, είναι εφαπτόμενη της ρευματικής γραμμής που περνάει από το σημείο αυτό (σχ. 3.3α).

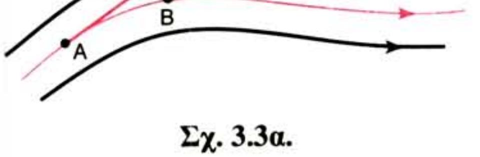
2) Οι ρευματικές γραμμές δείχνουν τις τροχιές των στοιχειωδών τμημάτων του ρευστού.

3) Η πυκνότητα των ρευματικών γραμμών σε μία περιοχή του πεδίου ροής παρέχει το μέτρο της ταχύτητας, που έχει το ρευστό σε αυτήν την περιοχή. Επομένως, όσο πυκνότερες είναι οι ρευματικές γραμμές σε μία περιοχή του πεδίου ροής, τόσο και το μέτρο της ταχύτητας του ρευστού στην περιοχή αυτή είναι μεγαλύτερο.

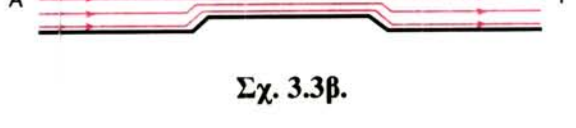
Επειδή η ταχύτητα του ρευστού στην περιοχή Β (σχ. 3.3β) είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα που έχει στις περιοχές Α και Γ, γι' αυτό στην περιοχή Β η πυκνότητα των ρευματικών γραμμών είναι μεγαλύτερη από όσο στις περιοχές Α και Γ.

4) Η μία ρευματική γραμμή δεν κόβει την άλλη.

5) Οι ρευματικές γραμμές μιας φλέβας παραμένουν στην ίδια φλέβα.



Σχ. 3.3α.



Σχ. 3.3β.

Με άλλα λόγια, δεν μπορεί να γίνει ανάμειξη ρευστών διαφορετικών φλεβών.

3.4 Παροχή φλέβας (σωλήνα).

Παροχή Π μιας φλέβας ονομάζομε το πηλίκον του όγκου ΔV του ρευστού που περνά από μία κάθετη τομή φλέβας μέσα σε χρόνο Δt, διά του χρόνου αυτού. Δηλαδή:

$$\boxed{\Pi = \frac{\Delta V}{\Delta t}} \quad \text{εξίσωση ορισμού} \qquad (1)$$

Μονάδες παροχής.

Στο I.S μονάδα παροχής είναι το 1 m^3/s.

Στην πράξη χρησιμοποιούνται και οι εξής μονάδες:

1 cm^3/s, 1 lt/s και 1 m^3/h

Προσοχή:

Η παροχή Π μιας φλέβας ισούται με το γινόμενο του εμβαδού S μιας κάθετης τομής της επί την ταχύτητα υ που έχει το ρευστό, όταν περνάει από την τομή αυτή. Δηλαδή:

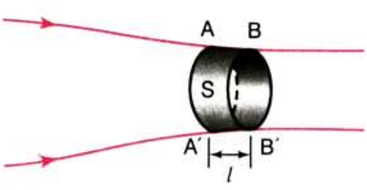
$$\boxed{\Pi = S \cdot \upsilon} \qquad (2)$$

Απόδειξη.

Τα μόρια του ρευστού που περνούν τη χρονική στιγμή t_1 από την τομή ΑΑ΄ της φλέβας (σχ. 3.4) με ταχύτητα υ φθάνουν στην τομή ΒΒ΄ έστω τη χρονική στιγμή t_2, δηλαδή σε χρόνο $t_2 - t_1 = \Delta t$ και διανύουν το διάστημα l, το οποίο είναι:

$$l = \upsilon \cdot \Delta t \qquad (3)$$

Επομένως ο όγκος ΔV του ρευστού που περνάει από την τομή ΑΑ΄ της



Σχ. 3.4.

φλέβας μέσα στο στοιχειώδη χρόνο Δt είναι:

$$\Delta V = S \cdot l \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (1), (3) και (4) έχομε:

$$\Pi = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{S \cdot l}{\Delta t} = \frac{S \cdot \upsilon \cdot \Delta t}{\Delta t} = S \cdot \upsilon \qquad \boxed{\Pi = S \cdot \upsilon}$$

Σημείωση:

Η απόσταση l θεωρείται πάρα πολύ μικρή και έτσι το σχήμα, το οποίο περιορίζεται μεταξύ των δύο διατομών ΑΑ΄ και ΒΒ΄, μπορεί να θεωρηθεί κύλινδρος, οποιαδήποτε μορφή και αν έχει η φλέβα.

3.5 Εξισώσεις της στρωτής ροής.

Η στρωτή ροή ιδανικού ρευστού διέπεται από δύο εξισώσεις: την εξίσωση της συνέχειας και την εξίσωση του Bernoulli. Οι εξισώσεις αυτές, συνήθως αναφέρονται ως νόμοι: νόμος της συνέχειας και νόμος του Bernoulli.

Για τις ροές πραγματικών ρευστών οι νόμοι αυτοί ισχύουν κατά προσέγγιση και μόνο όταν οι ταχύτητες ροής είναι μικρές. Οι νόμοι αυτοί έστω και κατά προσέγγιση εξηγούν πολλά φαινόμενα και βρίσκουν στην πράξη πολλές εφαρμογές, γι' αυτό άλλωστε τους μελετάμε.

3.6 Νόμος της συνέχειας.

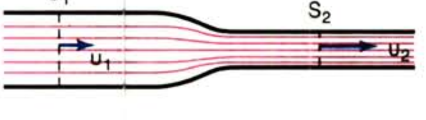
Ο νόμος της συνέχειας, ο οποίος ισχύει για στρωτή ροή ενός ιδανικού ρευστού ορίζει τα εξής:

Όταν μέσα σε σωλήνα ρέει ιδανικό ρευστό, η παροχή είναι σταθερή σε κάθε τομή του σωλήνα.

Πραγματικά, αν από την τομή S_1 (σχ. 3.6α) μέσα σε χρόνο Δt περάσει όγκος ρευστού ΔV, τότε από την τομή S_2 στον ίδιο χρόνο Δt θα περάσει ίσος όγκος ρευστού ΔV γιατί το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο.

Επομένως:

$$\Pi_1 = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1) \qquad \text{και} \qquad \Pi_2 = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2)$$



Σχ. 3.6α.

όπου: Π_1 και Π_2 οι παροχές στις τομές S_1 και S_2 αντίστοιχα.

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει η σχέση:

$\Pi_1 = \Pi_2$	Νόμος της συνέχειας

(3)

Προσοχή:

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\Pi_1 = S_1 \cdot \upsilon_1 \quad (4) \quad \text{και} \quad \Pi_2 = S_2 \cdot \upsilon_2 \qquad (5)$$

Από τις σχέσεις (3), (4) και (5) προκύπτει η εξίσωση:

$$S_1 \cdot \upsilon_1 = S_2 \cdot \upsilon_2 = S \cdot \upsilon = \text{σταθ.} \qquad (6)$$

όπου: S_1 το εμβαδόν μιας τυχαίας τομής του σωλήνα (της φλέβας),
υ_1 η ταχύτητα που έχει το ρευστό τη στιγμή που περνάει από την τομή S_1,
S_2 το εμβαδόν μιας άλλης τυχαίας τομής του σωλήνα και
υ_2 η ταχύτητα την οποία έχει το ρευστό τη στιγμή που περνάει από την τομή S_2.

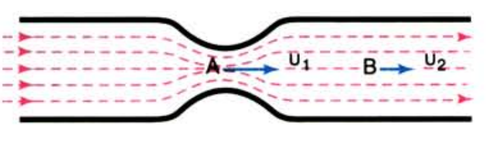
Η εξίσωση (6) εκφράζει το νόμο της συνέχειας και λέγεται εξίσωση της συνέχειας.

Παρατήρηση:

Από την εξίσωση: $S_1 \cdot \upsilon_1 = S_2 \cdot \upsilon_2$ προκύπτει η σχέση:

$$\frac{\upsilon_1}{\upsilon_2} = \frac{S_2}{S_1}$$

Η σχέση αυτή εκφράζει τα εξής: αν μέσα σε ένα σωλήνα, ο οποίος δεν έχει παντού ίση τομή, ρέει ιδανικό ρευστό, τότε οι ταχύτητες που έχει το ρευστό στις διάφορες τομές του σωλήνα είναι αντιστρόφως ανάλογες με τα εμβαδά των τομών στις οποίες οι ταχύτητες αντιστοιχούν. Με άλλα λόγια το ρευστό έχει μικρότερες ταχύτητες στις μεγαλύτερες τομές της φλέβας και μεγαλύτερες ταχύτητες στις μικρότερες τομές. Στην περιοχή Α η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα που έχει στην περιοχή Β (σχ. 3.6β).



Σχ. 3.6β.

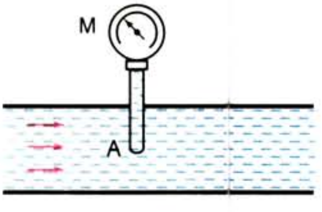
3.7 Εξίσωση του Bernoulli. (Νόμος του Bernoulli).

Η πίεση, που επικρατεί σε ένα σημείο ρευστού, ονομάζεται ***στατική πίεση*** του ρευστού στο σημείο αυτό.

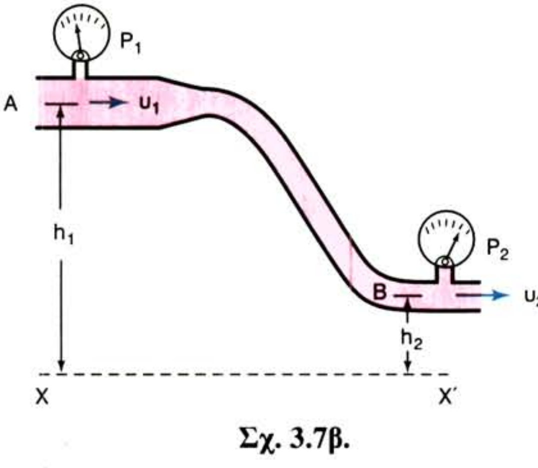
Τη στατική πίεση του ρευστού σε ένα σημείο του τη δείχνει ένα μανόμετρο, αν τοποθετηθεί στο σημείο αυτό έτσι, που να μην εμποδίζει τη ροή του. Το μανόμετρο Μ (σχ. 3.7α) δεν μεταβάλει τη ροή του ρευστού και επομένως μετράει τη στατική πίεση του ρευστού στο σημείο Α.

Εφ' όσον στο κινούμενο ρευστό η ταχύτητά του σε ένα σημείο είναι υ και η πυκνότητά του ϱ, το μονώνυμο $\boxed{1/2\,\varrho\cdot\upsilon^2}$ ονομάζεται ***δυναμική πίεση*** του ρευστού στο σημείο αυτό.

Αν η κατακόρυφη απόσταση ενός σημείου του ρευστού από ένα οριζόντιο επίπεδο, το οποίο λαμβάνεται ως επίπεδο αναφοράς, είναι h και η πυκνότητά του στο σημείο αυτό είναι ϱ, τότε το μονώνυμο $\boxed{\varrho\cdot g\cdot h}$ ονομάζεται ***υψομετρική πίεση*** του ρευστού στο σημείο αυτό ως προς το επίπεδο αυτό.



Σχ. 3.7α.



Σχ. 3.7β.

Σημείωση:

Τα μονώνυμα ($\frac{1}{2}\,\varrho\cdot\upsilon^2$) και ($\varrho\cdot g\cdot h$) έχουν διαστάσεις πιέσεως.

Η εξίσωση Bernoulli, η οποία ισχύει για στρωτή ροή ενός ιδανικού ρευστού, εκφράζει τα εξής:

Κατά μήκος σωλήνα, μέσα στον οποίο ένα ιδανικό ρευστό κινείται με στρωτή ροή, το άθροισμα της στατικής, της δυναμικής και της υψομετρικής πιέσεως του ρευστού ως προς το ίδιο επίπεδο αναφοράς, είναι σταθερό.

Επομένως για τα σημεία Α και Β του σωλήνα (σχ. 3.7β), στον οποίο κινείται με στρωτή ροή ένα ιδανικό ρευστό, ισχύει η σχέση:

$$P_1 + \frac{1}{2}\varrho\cdot\upsilon_1^2 + \varrho\cdot g\cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\varrho\cdot\upsilon_2^2 + \varrho\cdot g\cdot h_2 \qquad (1)$$

όπου: P_1 η στατική πίεση του ρευστού στο σημείο Α,
ρ η πυκνότητα του ρευστού,
υ_1 η ταχύτητα του ρευστού στο σημείο Α,
$1/2\,\rho \cdot \upsilon_1^2$ η δυναμική πίεση του ρευστού στο σημείο Α,
h_1 η κατακόρυφη απόσταση του σημείου Α από το οριζόντιο επίπεδο ΧΧ΄,
$\rho \cdot g \cdot h_1$ η υψομετρική πίεση του ρευστού στο σημείο Α ως προς το ΧΧ΄,
P_2 η στατική πίεση του ρευστού στο σημείο Β,
υ_2 η ταχύτητα του ρευστού στο σημείο Β,
$1/2\,\rho \cdot \upsilon_2^2$ η δυναμική πίεση του ρευστού στο σημείο Β,
h_2 η κατακόρυφη απόσταση του σημείου Β από το οριζόντιο επίπεδο ΧΧ΄ και
$\rho \cdot g \cdot h_2$ η υψομετρική πίεση του ρευστού στο σημείο Β ως προς το ΧΧ΄.

***Προσοχή*:**

Το άθροισμα της στατικής, της δυναμικής και της υψομετρικής πιέσεως σε ένα σημείο του ρευστού ονομάζεται ολική πίεση του ρευστού στο σημείο αυτό.

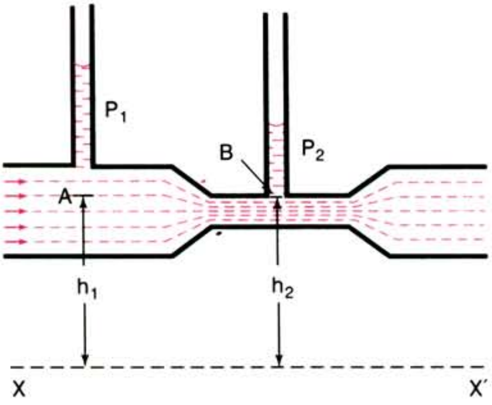
Επομένως ο νόμος του Bernoulli μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

***Κατά μήκος σωλήνα, μέσα στον οποίο ιδανικό ρευστό κινείται με στρωτή ροή η ολική πίεση του ρευστού είναι σταθερή*.**

***Παρατήρηση*:**

Στην περίπτωση που ο σωλήνας είναι οριζόντιος (σχ. 3.7γ) έχομε: $h_1 = h_2$.

Άρα η υψομετρική πίεση κατά μήκος οριζόντιου σωλήνα είναι σταθερή.



Σχ. 3.7γ.

Δηλαδή:

$$\varrho \cdot g \cdot h_1 = \varrho \cdot g \cdot h_2 \tag{2}$$

Η σχέση (1) με βάση τη σχέση (2) γίνεται:

$$P_1 + \frac{1}{2}\varrho \cdot \upsilon_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\varrho \cdot \upsilon_2^2 = \text{σταθερή} \tag{3}$$

(Νόμος του Bernoulli για οριζόντιο σωλήνα)

όπου: P_1, υ_1 η πίεση και η ταχύτητα ροής στο Α και
P_2, υ_2 η πίεση και η ταχύτητα ροής στο Β.

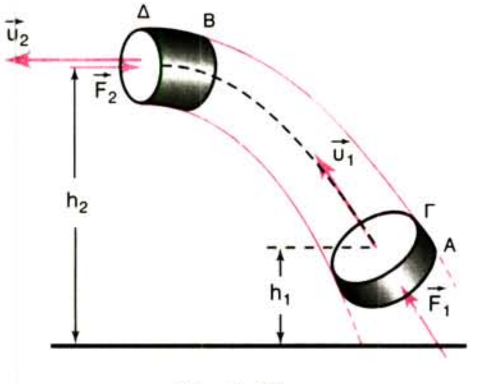
Η σχέση (3) εκφράζει το νόμο του Bernoulli για οριζόντιο σωλήνα ο οποίος ορίζει τα εξής:

Κατά μήκος οριζόντιου σωλήνα, μέσα στον οποίο ιδανικό ρευστό ρέει με στρωτή ροή, το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής πιέσεως του ρευστού είναι σταθερό.

3.7.1 Απόδειξη της εξισώσεως του Bernoulli (νόμου Bernoulli).

Η εξίσωση του Bernoulli αποτελεί συνέπεια της αρχής της διατηρήσεως της ενέργειας.

Το σχήμα 3.7δ δείχνει ένα τμήμα ΑΒ μιας φλέβας στρωτής ροής ιδανικού ρευστού. Στο τμήμα αυτό εξασκούνται από το υπόλοιπο ρευστό και κατά την εφαπτόμενη ρευματικής γραμμής, οι δυνάμεις $\vec{F}_1$ και $\vec{F}_2$ που τα μέτρα τους είναι:



Σχ. 3.7δ.

$$F_1 = P_1 \cdot S_1 \quad (4) \qquad \text{και} \qquad F_2 = P_2 \cdot S_2 \qquad (5)$$

όπου: P_1 και P_2 είναι αντίστοιχα, οι πιέσεις του ρευστού στις διατομές Α, Β και S_1, S_2 τα εμβαδά αυτών των διατομών.

Αν θεωρήσομε στοιχειώδη μετατόπιση του ρευστού κατά την οποία το τμήμα ΑΒ της φλέβας παίρνει θέση ΓΔ, τότε οι δυνάμεις $\vec{F}_1$ και $\vec{F}_2$ εκτελούν έργο, το οποίο μεταβάλλει τη μηχανική ενέργεια της μάζας του τμήματος ΑΒ.

Το έργο αυτό το βρίσκομε ως εξής:

$$W = F_1 \cdot (A\Gamma) - F_2\,(B\Delta) \Rightarrow W = P_1 \cdot S_1 \cdot (A\Gamma) - P_2 \cdot S_2 \cdot (B\Delta) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow W = P_1 \cdot \Delta V_1 - P_2 \cdot \Delta V_2 \qquad (6)$$

όπου: $\Delta V_1 = \Delta V_2 = \Delta V$ είναι οι ίσοι όγκοι ρευστού, οι οποίοι διέρχονται διά των διατομών Α και Β στο χρόνο Δt.

Η μεταβολή της μηχανικής ενέργειας του τμήματος ΑΒ της φλέβας το οποίο εξετάζομε υπολογίζεται ως εξής:

Το τμήμα ΒΓ, εξαιτίας της «μονιμότητας» της ροής, έχει την ίδια δυναμική και κινητική ενέργεια μετά από χρόνο Δt.

Επομένως, η μεταβολή ΔΕ της μηχανικής ενέργειας της μάζας του τμήματος ΑΒ βρίσκεται, αν θεωρήσομε ότι μόνο η μάζα Δm του τμήματος ΑΓ λαμβάνει μετά χρόνο Δt τη θέση ΒΔ και μεταβάλλει την ταχύτητά της από $\vec{\upsilon}_1$ σε $\vec{\upsilon}_2$. Συνεπώς θα έχομε:

$$\Delta E = (1/2\ \Delta m \cdot \upsilon_2^2 - 1/2\ \Delta m \cdot \upsilon_1^2) + (\Delta m \cdot g \cdot h_2 - \Delta m \cdot g \cdot h_1)$$
$$\Delta m = \varrho \cdot \Delta V_1 = \varrho \cdot \Delta V_2$$
$$\Delta E = (1/2 \cdot \varrho \cdot \Delta V_2 \cdot \upsilon_2^2 - 1/2 \cdot \varrho \cdot \Delta V_1 \cdot \upsilon_1^2 + \varrho \cdot \Delta V_2 \cdot g \cdot h_2 - \varrho \cdot \Delta V_1 \cdot g \cdot h_1 \qquad (7)$$

όπου: ϱ η πυκνότητα του ρευστού.

Βέβαια ισχύουν οι σχέσεις:

$$W = \Delta E \qquad (8)$$
$$\Delta V_1 = \Delta V_2 \qquad (9)$$

Από τις σχέσεις (6), (7), (8) και (9) προκύπτει η σχέση:

$$P_1 \Delta V_1 - P_2 \Delta V_2 = 1/2\ \varrho \cdot \Delta V_2 \cdot \upsilon_2^2 - 1/2\ \varrho \cdot \Delta V_1 \cdot \upsilon_1^2 + \varrho \cdot \Delta V_2 \cdot g \cdot h_2 - \varrho \cdot \Delta V_1 \cdot g \cdot h_1$$
$$P_1 - P_2 = 1/2 \cdot \varrho \cdot \upsilon_2^2 - 1/2\ \varrho \cdot \upsilon_1^2 + \varrho \cdot g \cdot h_2 - \varrho \cdot g \cdot h_1$$
$$\boxed{P_1 + 1/2\,\varrho \cdot \upsilon_1^2 + \varrho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + 1/2\,\varrho \cdot \upsilon_2^2 + \varrho \cdot g \cdot h_2} \qquad (10)$$

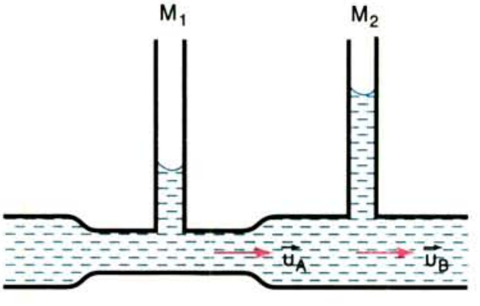
Παρατηρήσεις:

1) Από την εξίσωση (3) προκύπτει ότι στα σημεία οριζόντιου σωλήνα, ό-

που η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγάλη, η στατική πίεση είναι μικρή και αντίστροφα.

2) Επειδή στις στενώσεις η ταχύτητα του ρευστού είναι μεγάλη ($S_1 \cdot \upsilon_1 = S_2 \cdot \upsilon_2$) γι' αυτό από τη σχέση (3) προκύπτει ότι στις στενώσεις οριζόντιου σωλήνα η στατική πίεση του ρευστού είναι μικρή. Τα μανόμετρα M_1 και M_2 (σχ. 3.7ε) δείχνουν τη στατική πίεση στο Α και Β αντίστοιχα.

Παρατηρούμε ότι η στατική πίεση στο Α είναι μικρότερη από τη στατική πίεση του ρευστού στο Β.



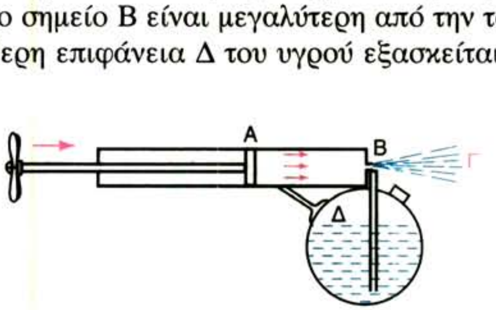
Σχ. 3.7ε.

3.7.2 Εφαρμογές της εξισώσεως Bernoulli.

α) Ψεκαστήρας.

Ο ψεκαστήρας (σχ. 3.7στ) χρησιμεύει για την εκτόξευση ενός υγρού σε μορφή σταγονιδίων. Πιέζοντας το έμβολο Α απότομα, σχηματίζεται ρεύμα αέρα το οποίο βγαίνει από το στενό άνοιγμα Β με μεγάλη ταχύτητα. Στη συνέχεια όμως η φλέβα του αέρα πλαταίνει απότομα και στο σημείο Γ η ταχύτητα μικραίνει.

Η πίεση του αέρα της φλέβας στο σημείο Γ γίνεται ίση με την ατμοσφαιρική, ενώ στο σημείο Β είναι μικρότερη από την ατμοσφαιρική, γιατί η ταχύτητά του στο σημείο Β είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα που έχει στο Γ. Στην ελεύθερη επιφάνεια Δ του υγρού εξασκείται η ατμοσφαιρική



Σχ. 3.7στ.

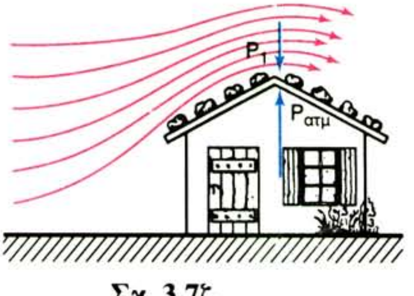
πίεση.

Επειδή λοιπόν στο σημείο Β εξασκείται μικρότερη πίεση από την ατμοσφαιρική, ενώ στην ελεύθερη επιφάνεια του υγρού εξασκείται η ατμοσφαιρική, γι' αυτό το υγρό ανεβαίνει στο σημείο Β, αναμειγνύεται με τον αέρα και εκτοξεύεται σε μορφή σταγονιδίων.

β) Ανύψωση στέγης από ισχυρό άνεμο (αρπαγή στέγης).

Επάνω από τη στέγη (σχ. 3.7ζ) προκαλείται συμπύκνωση των ρευματικών γραμμών. Δηλαδή επάνω από τη στέγη αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα και επομένως η πίεσή του επάνω από τη στέγη γίνεται μικρότερη από την ατμοσφαιρική ($P_1 < P_{ατμ}$).

Επειδή κάτω από τη στέγη (στο εσωτερικό της οικίας) επικρατεί η ατμοσφαιρική πίεση $P_{ατμ}$, ενώ επάνω από τη στέγη εξασκείται πίεση P_1 πολύ μικρότερη από την ατμοσφαιρική, όταν ο άνεμος είναι ισχυρός, γι' αυτό κάτω από τη στέγη εξασκούνται μεγαλύτερες δυνάμεις προς τα επάνω, από εκείνες που εξασκούνται πάνω από τη στέγη προς τα κάτω, με αποτέλεσμα η στέγη να εξαρθρώνεται προς τα επάνω (αρπαγή στέγης).



Σχ. 3.7ζ.

Σχ. 3.7η.

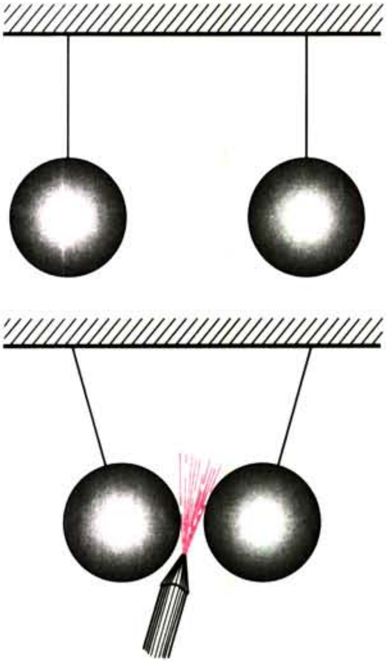
γ) Κίνδυνος συγκρούσεως πλοίων.

Όταν δύο πλοία (σχ. 3.7η) κινούνται το ένα κοντά στο άλλο, τότε η ταχύτητα του νερού που βρίσκεται μεταξύ τους γίνεται πολύ πιο μεγάλη από την ταχύτητα του νερού στα άλλα σημεία. Επομένως οι στατικές πιέσεις του νερού, που βρίσκεται μεταξύ των πλοίων, όταν αυτά κινούνται το ένα κοντά στο άλλο, είναι μικρότερες από τις στατικές πιέσεις του υπόλοιπου νερού και γι' αυτό υπάρχει κίνδυνος να συγκρουσθούν.

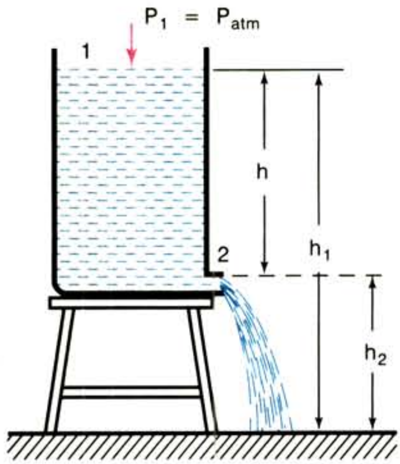
Επίσης για τους ίδιους λόγους, αν εμφυσήσομε ρεύμα αέρα μεταξύ δύο σφαιρών (σχ. 3.7θ) αυτές πλησιάζουν μεταξύ τους.

δ) Εκροή υγρού από οπή (***θεώρημα Torricelli***).

Το θεώρημα του Torricelli απορρέει από την εξίσωση του Bernoulli και εκφράζει τα εξής:



Σχ. 3.7θ.



Σχ. 3.7ι.

Η ταχύτητα υ εκροής μιας μάζας υγρού, που περιέχεται σε δοχείο ευρείας επιφάνειας από μία οπή του (μικρό άνοιγμα), η οποία βρίσκεται σε βάθος h από την ελεύθερη επιφάνειά του, είναι ίση με την ταχύτητα, που θα αποκτούσε η μάζα αυτή του υγρού αν έπεφτε από το ύψος h.

Με άλλα λόγια:

Η ταχύτητα υ εκροής ενός υγρού, που περιέχεται σε δοχείο ευρείας επιφάνειας, από μία οπή σε βάθος h από την ελεύθερη επιφάνειά του είναι ίση με την ταχύτητα της ελεύθερης πτώσεως ενός σώματος, αν αυτό έπεφτε από τη στάθμη του υγρού μέχρι του σημείου εκροής. Δηλαδή:

$$\boxed{υ = \sqrt{2g \cdot h}}$$

Πραγματικά, έστω ότι το δοχείο του σχήματος 3.7ι, που έχει την οπή (2), περιέχει υγρό μέχρι το υψόμετρο h_1. Στη διατομή (1) (ελεύθερη επιφάνεια) η ταχύτητα του υγρού έστω ότι είναι $υ_1$ κ P_1 ίση με την ατμοσφαιρική:

$$P_1 = P_{ατμ} \tag{1}$$

Στη διατομή (2) (εμβαδόν της οπής) η ταχύτητα του υγρού (ταχύτητα εκροής) έστω ότι είναι υ_2 και η πίεσή του P_2, ίση με την ατμοσφαιρική:

$$P_2 = P_{\alpha\tau\mu} \tag{2}$$

Ο νόμος του Bernoulli δίνει:

$$P_1 + 1/2\,\varrho\cdot\upsilon_1^2 + \varrho\cdot g\cdot h_1 = P_2 + 1/2\,\varrho\cdot\upsilon_2^2 + \varrho\cdot g\cdot h_2 \tag{3}$$

Αν το εμβαδόν της ελεύθερης επιφάνειας του υγρού είναι πολύ μεγάλο, συγκριτικά με το εμβαδόν της οπής, τότε η ταχύτητα υ_1 μπορεί να θεωρηθεί ίση με μηδέν:

$$\upsilon_1 = 0 \tag{4}$$

Η σχέση (3) με τη βοήθεια των σχέσεων (1), (2) και (4) μας δίνει:

$$\begin{gathered} P_{\alpha\tau\mu} + 1/2\,\varrho\cdot O + \varrho\cdot g\cdot h_1 = P_{\alpha\tau\mu} + 1/2\,\varrho\cdot\upsilon_2^2 + \varrho\cdot g\cdot h_2 \\ \varrho\cdot g\cdot h_1 = 1/2\,\varrho\cdot\upsilon_2^2 + \varrho\cdot g\cdot h_2 \\ g\cdot h_1 = 1/2\,\upsilon_2^2 + g\cdot h_2 \\ 1/2\,\upsilon_2{}^2 = g\cdot h_1 - g\cdot h_2 \\ \upsilon_2^2 = 2g\,(h_1 - h_2) \end{gathered}$$

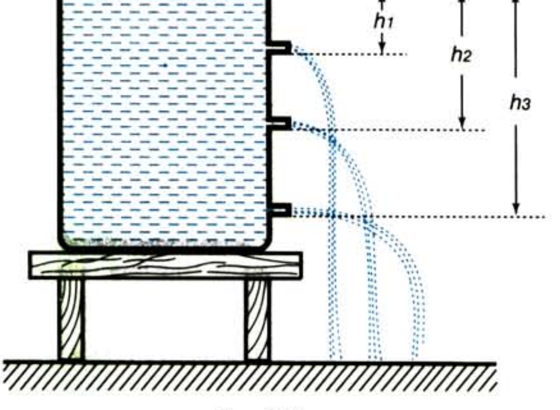
$$\upsilon_2 = \sqrt{2g\,(h_1 - h_2)} \tag{5}$$

Αν στη σχέση (5) θέσομε $\upsilon_2 = \upsilon$ και $h_1 - h_2 = h$ θα έχομε:

$$\upsilon = \sqrt{2g\cdot h}$$

Σημείωση:

Από το σχήμα 3.7ια και τη σχέση (6) προκύπτει ότι όσο περισσότερο α-

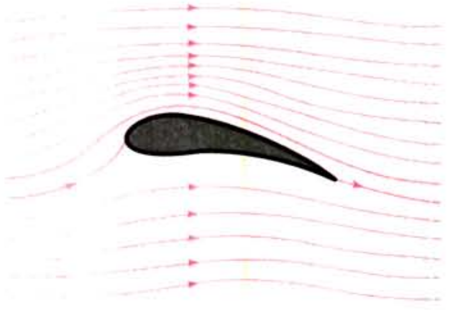


Σχ. 3.7ια.

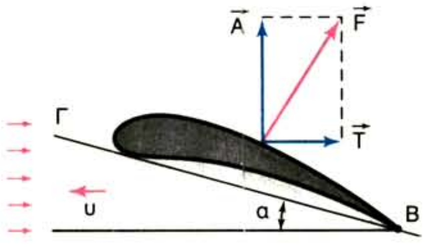
πέχει η οπή εκροής από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα εκροής του.

ε) Πτέρυγα αεροπλάνου.

Η στήριξη του αεροπλάνου στον αέρα εξασφαλίζεται με τις πτέρυγες. Η πτέρυγα του αεροπλάνου διαμορφώνεται έτσι, ώστε η εγκάρσια τομή της να έχει αεροδυναμικό σχήμα. Επίσης τοποθετείται έτσι, ώστε, όταν κινείται μέσα στον αέρα, η ταχύτητα του αέρα επάνω από αυτήν να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του αέρα κάτω από αυτήν (σχ. 3.7ιβ).



Σχ. 3.7ιβ.



Σχ. 3.7ιγ.

Επομένως, σύμφωνα με το νόμο του Bernoulli, οι στατικές πιέσεις του αέρα στα σημεία επάνω από την πτέρυγα, θα είναι μικρότερες από τις στατικές πιέσεις του αέρα στα σημεία κάτω από την πτέρυγα. Έτσι, όταν η πτέρυγα κινείται μέσα στον αέρα, ο αέρας εξασκεί στα σημεία τής επάνω επιφάνειάς της πιέσεις, οι οποίες είναι μικρότερες από τις πιέσεις που εξασκεί στα σημεία της κάτω επιφάνειας.

Γι' αυτό το λόγο οι δυνάμεις, που εξασκεί ο αέρας στα διάφορα σημεία της πτέρυγας, όταν το αεροπλάνο κινείται μέσα σε αυτόν, δίνουν μία συνισταμένη δύναμη $\vec{F}$, η οποία είναι ***σχεδόν κάθετη*** στη χορδή της πτέρυγας ΒΓ (σχ. 3.7ιγ).

Η ***συνισταμένη*** όλων των δυνάμεων, που εξασκεί ο αέρας στην πτέρυγα, είναι σχεδόν κάθετη στη χορδή της και την ονομάζομε ***αεροδύναμη της πτέρυγας*** $\vec{F}$.

Δυναμική άνωση $\vec{A}$ της πτέρυγας ονομάζεται η συνιστώσα της αεροδυνάμεως $\vec{F}$, η οποία είναι κάθετη στην τροχιά της πτέρυγας (κάθετη στη διεύθυνση της ροής του αέρα).

Δυναμική αντίσταση $\vec{T}$ της πτέρυγας ονομάζεται η συνιστώσα της αεροδυνάμεως $\vec{F}$, που είναι ***παράλληλη*** με την τροχιά της πτέρυγας (παράλληλη προς τη διεύθυνση της ροής).

Γωνία προσβολής α ονομάζεται η γωνία που σχηματίζει η χορδή της πτέρυγας με τη διεύθυνση της ροής του αέρα.

Παρατηρήσεις:

1) Η δυναμική άνωση $\vec{A}$ και η δυναμική αντίσταση $\vec{T}$ εξαρτώνται από τη γωνία προσβολής α.

2) Η δυναμική άνωση $\vec{A}$ έχει τη μεγαλύτερη τιμή, όταν η γωνία προσβολής α είναι περίπου 15°.

3) Το μέτρο F της αεροδυνάμεως $\vec{F}$ εξαρτάται από τη γωνία προσβολής α.

Το μέτρο της αεροδυνάμεως αρχικά αυξάνει όσο αυξάνει η γωνία προσβολής.

Υπάρχει, όμως, μία οριακή τιμή της γωνίας προσβολής, μετά την οποία η αεροδύναμη μικραίνει και το αεροπλάνο αρχίζει να βυθίζεται.

Η οριακή αυτή τιμή ονομάζεται ***γωνία απώλειας στηρίξεως.***

3.8 Εσωτερική τριβή υγρών.

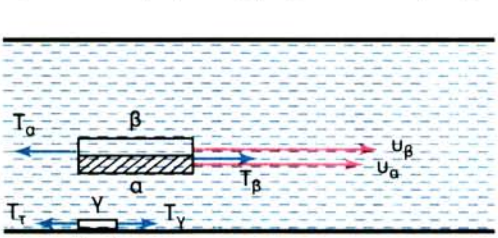
Όταν, κατά τη ροή ενός πραγματικού υγρού, δύο γειτονικά του στρώματα κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες το ένα εξασκεί στο άλλο δύναμη που είναι παράλληλη προς την επιφάνεια «επαφής» των δύο στρωμάτων. Κάθε δύναμη από αυτές έχει τέτοια φορά, ώστε να τείνει να εξισώσει τις ταχύτητες των στρωμάτων αυτών.

Τη δύναμη αυτή την ονομάζομε ***εσωτερική τριβή του υγρού.***

Αν το στρώμα (β) του υγρού (σχ. 3.8α) κινείται με ταχύτητα $\vec{\upsilon}_\beta$ και το στρώμα (α) με ταχύτητα $\vec{\upsilon}_\alpha$ $(\upsilon_\beta > \upsilon_\alpha)$ τότε διαπιστώνεται ότι:

Το στρώμα (α) εξασκεί στο στρώμα (β) μια δύναμη $\vec{T}_\alpha$ που τείνει να ελαττώσει την ταχύτητα του στρώματος (β) και να την εξισώσει με την ταχύτητα του στρώματος (α).

Το στρώμα (β) εξασκεί στο στρώμα (α) μία δύναμη $\vec{T}_\beta$, που τείνει να μεγαλώσει την ταχύτητα του στρώματος (α), και να την εξισώσει με την ταχύ-



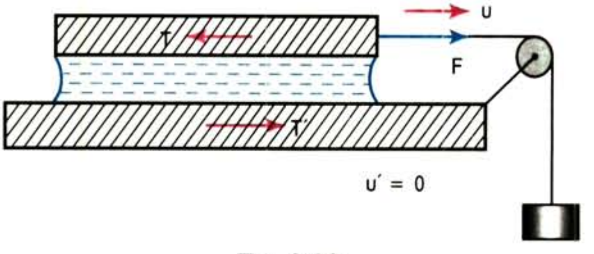
Σχ. 3.8α.

τητα του στρώματος (β) (οι δυνάμεις $\vec{T}_\alpha$ και $\vec{T}_\beta$ είναι αντίθετες).

Η δύναμη $\vec{T}_\alpha$ είναι η εσωτερική τριβή του στρώματος (α) ως προς το (β). Η δύναμη $\vec{T}_\beta$ είναι η εσωτερική τριβή του στρώματος (β) ως προς το (α).

Οι δυνάμεις $\vec{T}_\alpha$ και $\vec{T}_\beta$ αποκαλούνται εσωτερική τριβή του υγρού. Οι εσωτερικές τριβές, δηλαδή οι δυνάμεις που εξασκούν τα στρώματα του υγρού μεταξύ τους και οι οποίες τείνουν να εξισώσουν τις ταχύτητές τους, οφείλονται στις δυνάμεις συνοχής του υγρού, δηλαδή στις δυνάμεις με τις οποίες αλληλοέλκονται τα μόριά του (μοριακές δυνάμεις).

Μπορούμε να μελετήσομε πειραματικά την εσωτερική τριβή ενός υγρού αν ανάμεσα σε δύο οριζόντιες πλάκες τοποθετήσομε ποσότητα του υγρού (σχ. 3.8β). Για να μετακινηθεί η επάνω πλάκα με σταθερή ταχύτητα υ, πρέπει να ασκείται σε αυτήν σταθερή δύναμη $\vec{F}$. Η δύναμη αυτή είναι αντίθετη με την εσωτερική τριβή του υγρού ($\vec{F} = -\vec{T}$).



Σχ. 3.8β.

Η δύναμη τριβής στο υγρό αναπτύσσεται γιατί τα μόρια, τα οποία έρχονται σε επαφή με την κάτω πλάκα, συνιστούν στρώμα ακίνητο (εξαιτίας των δυνάμεων συνάφειας), ενώ εκείνα που έρχονται σε επαφή με την επάνω πλάκα σχηματίζουν στρώμα, το οποίο κινείται με την ταχύτητα υ της πλάκας αυτής.

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι στην περίπτωση των πλακών η δύναμη εσωτερικής τριβής είναι ανάλογη με τη σχετική ταχύτητα υ των δύο πλακών, ανάλογη του εμβαδού S της πλάκας που κινείται και αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος l του υγρού.

$$\boxed{T = n \cdot \frac{S \cdot \upsilon}{l}}$$

Ο συντελεστής αναλογίας n ονομάζεται συντελεστής εσωτερικής τριβής του υγρού και εξαρτάται από τη φύση του υγρού και τη θερμοκρασία του.

Παρατηρήσεις:

1) Η εσωτερική τριβή ενός υγρού ονομάζεται και ιξώδες του υγρού και ο συντελεστής εσωτερικής του τριβής ονομάζεται συντελεστής του ιξώδους του.

Το ιξώδες ενός υγρού χαρακτηρίζει το αν το υγρό είναι παχύρρευστο ή αραιό.

Το ιξώδες δεν πρέπει να συγχέεται με την πυκνότητα του υγρού (βαρύ ή ελαφρό υγρό), μια και πάντοτε δεν συμβαίνει τα παχύρρευστα υγρά να είναι και βαρύτερα. Έτσι τα λάδια είναι παχύρρευστα, αλλά ελαφρά σε σύγκριση με το νερό. Το μέλι είναι παχύρρευστο και βαρύ, το οινόπνευμα είναι λεπτόρρευστο υγρό, αραιό και ελαφρό. Συνεπώς, ό,τι έχει μεγάλο ιξώδες, δηλαδή είναι παχύρρευστο, δεν έχει οπωσδήποτε και μεγάλη πυκνότητα.

2) Όταν η θερμοκρασία ενός υγρού ελαττώνεται, η εσωτερική του τριβή αυξάνεται.

3.8.1 Εσωτερική τριβή αερίων.

Εσωτερική τριβή παρουσιάζουν και τα αέρια. Η εμφάνιση της εσωτερικής τριβής στα αέρια οφείλεται, στο ότι μόρια, τα οποία προέρχονται από στρώμα μεγάλης ταχύτητας, εισέρχονται σε γειτονικά στρώματα μικρότερης ταχύτητας και μεταδίδουν σε αυτά την ορμή τους προκαλώντας έτσι επιτάχυνσή τους.

Αντίθετα, η μετάβαση μορίων από στρώματα μικρής ταχύτητας, σε στρώματα μεγάλης ταχύτητας, προκαλεί επιβράδυνσή τους.

Οι μεταβολές αυτές της ορμής πρέπει, κατά το θεμελιώδη νόμο της Μηχανικής, να συνοδεύονται από εμφάνιση δυνάμεων ακριβώς ίδιων με αυτές της εσωτερικής τριβής.

Σημείωση:

Στα υγρά το αίτιο της εσωτερικής τριβής είναι το ίδιο, αλλά στην περίπτωση αυτή το φαινόμενο δεν παρουσιάζεται τόσο απλό.

Προσοχή:

Όταν η θερμοκρασία ενός αερίου αυξάνεται, αυξάνει και η εσωτερική του τριβή.

3.9 Στρωτή ροή πραγματικών ρευστών.

Στη ροή των πραγματικών ρευστών δεν ισχύει απόλυτα η εξίσωση του Bernoulli.

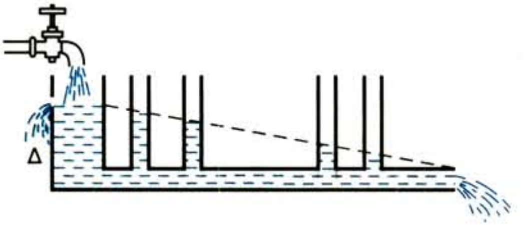
Αυτό για τα πραγματικά αέρια οφείλεται κυρίως στις μεταβολές του όγκου του κινούμενου αερίου.

Η επίδραση στη ροή των πραγματικών αερίων της εσωτερικής τους τριβής δεν είναι σημαντική.

Πρέπει να σημειώσομε ότι στα πραγματικά αέρια η εξίσωση του Bernoulli ισχύει με αρκετή ακρίβεια, εφ' όσον η ταχύτητα ροής δεν υπερβαίνει περίπου τα 150 m/s και δεν ισχύει, ούτε κατά προσέγγιση, για ταχύτητες ροής που πλησιάζουν την ταχύτητα του ήχου (340 m/s περίπου).

Ως προς τα πραγματικά υγρά, το ότι δεν ισχύει απόλυτα ο νόμος του Bernoulli οφείλεται στις δυνάμεις τριβής με τα τοιχώματα του δοχείου και κυρίως στην εσωτερική τους τριβή. Το γεγονός ότι στα πραγματικά υγρά δεν ισχύει η εξίσωση του Bernoulli μπορούμε να το δείξομε με τις παρακάτω διατάξεις:

Στο σχήμα 3.9α φαίνεται η ροή νερού σε οριζόντιο σωλήνα σταθερής το-

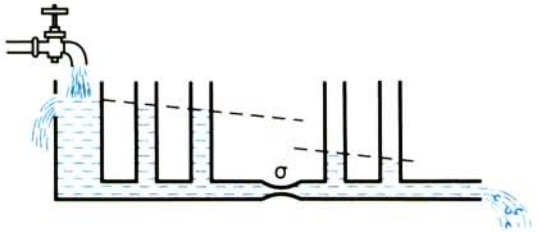


Σχ. 3.9α.

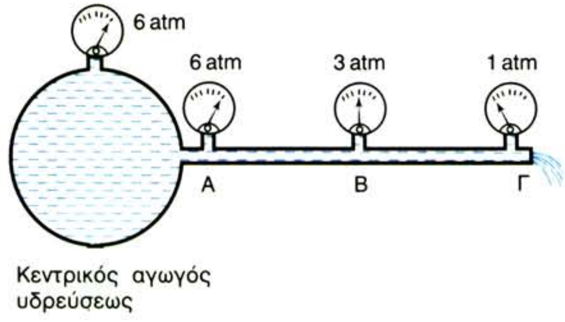
μής, κατά μήκος του οποίου έχουν προσαρμοσθεί μανόμετρα που μετρούν τη στατική πίεση. Τη στάθμη του ύδατος στο δοχείο Δ, το οποίο χρησιμεύει ως δεξαμενή, τηρούμε σταθερή. Παρατηρούμε ότι η πίεση πέφτει κατά μήκος του σωλήνα ροής και, εφ' όσον ο σωλήνας έχει σταθερή τομή, η πίεση ελαττώνεται γραμμικά κατά μήκος της ροής, δηλαδή η διαφορά πιέσεως σε δύο σημεία είναι ανάλογη προς το μήκος του σωλήνα, που περιλαμβάνεται μεταξύ των σημείων αυτών.

Επομένως, για να συμβαίνει ροή σε οριζόντιο σωλήνα σταθερής τομής, πρέπει κατά μήκος του να υπάρχουν διαφορές πιέσεων ενώ, σύμφωνα με την εξίσωση του Bernoulli, κατά τη ροή ιδανικού ρευστού σε οριζόντιο σωλήνα σταθερής τομής, η πίεση κατά μήκος του είναι σταθερή. Όταν ο σωλήνας στη θέση (σ) παρουσιάζει στένωση (σχ. 3.9β) η πτώση της πιέσεως στη στένωση είναι μεγαλύτερη από την πίεση που αντιστοιχεί στα υπόλοιπα τμήματα του σωλήνα και εξαιτίας αυτού μετά τη στένωση η πίεση παρουσιάζεται δυσανάλογα ελαττούμενη.

Στο σχήμα 3.9γ φαίνεται επίσης ότι η πίεση ελαττώνεται κατά μήκος οριζόντιου σωλήνα σταθερής διατομής.



Σχ. 3.9β.



Σχ. 3.9γ.

Παρατηρήσεις:

1) Διαπιστώσαμε ότι κατά μήκος σωλήνα, στον οποίο ρέει πραγματικό υγρό, η πίεση ελαττώνεται. Η πίεση ελαττώνεται γιατί ένα τμήμα της ενέργειας του υγρού καταναλώνεται για την υπερνίκηση της εσωτερικής τριβής του υγρού και της τριβής του υγρού με τα τοιχώματα του σωλήνα.

2) Για να κινείται ένα πραγματικό υγρό μέσα σε ένα σωλήνα πρέπει μεταξύ των σημείων του να υπάρχουν διαφορές πιέσεων (η πίεση να ελαττώνεται κατά μήκος του σωλήνα).

3) Στο σχήμα 3.9α παρατηρούμε ότι η πίεση ελαττώνεται κατά μήκος του σωλήνα ροής και, εφ' όσον ο σωλήνας έχει σταθερή διατομή, η πίεση ελαττώνεται γραμμικά κατά μήκος της ροής, δηλαδή η διαφορά των πιέσεων σε δύο σημεία είναι ανάλογη προς το μήκος του σωλήνα μεταξύ των σημείων αυτών.

4) Στο σχήμα 3.9β παρατηρούμε ότι στη θέση (σ) όπου ο σωλήνας παρουσιάζει στένωση, η πτώση της πιέσεως είναι μεγαλύτερη από εκείνη που αντιστοιχεί στα υπόλοιπα τμήματα του σωλήνα.

Τούτο δικαιολογείται από το ό,τι στη στένωση το ρευστό πρέπει να κινηθεί ταχύτερα, δηλαδή πρέπει να επιταχύνει και γι' αυτό είναι ανάγκη η πτώση της πιέσεως να είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα υπήρχε αν ο σωλήνας δεν είχε την ανωμαλία της στενώσεως.

5) Οι πτώσεις των πιέσεων κατά μήκος αγωγού εξαρτώνται από τις τριβές που πρέπει να υπερνικήσει το υγρό κατά την κίνησή του μέσα στον αγωγό.

6) Οι τριβές μέσα σε έναν αγωγό επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες. Αυτοί είναι:

- Το μήκος του αγωγού. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του αγωγού τόσο μεγαλύτερες είναι οι τριβές.
- Η διατομή του αγωγού. Αγωγοί με μεγάλη διατομή έχουν μικρές τριβές, ενώ αγωγοί με μικρή διατομή έχουν μεγάλες.
- Η εσωτερική επιφάνεια του αγωγού. Όταν αυτή είναι τραχεία, οι τριβές είναι μεγάλες, ενώ όταν είναι λεία μικρές.
- Το σχήμα του αγωγού. Όταν ο αγωγός έχει πολλές και απότομες καμπύλες ή απότομα στενώματα και ανοίγματα, οι τριβές είναι μεγάλες, ενώ αντίθετα αν οι καμπύλες, τα στενώματα και τα ανοίγματα είναι λίγα και ομαλά, τότε οι τριβές είναι μικρές.
- Το είδος του υγρού. Αν το υγρό είναι παχύρρευστο (π.χ. λάδι ή μέλι) οι τριβές είναι μεγαλύτερες, παρά αν το υγρό είναι λεπτόρρευστο (π.χ. νερό, οινόπνευμα, βενζίνη).

3.9.1 Παροχή οριζόντιου κυλινδρικού σωλήνα. Νόμος του Poiseuille.

Σε οριζόντιο κυλινδρικό σωλήνα κινείται ένα πραγματικό υγρό με ταχύτητα τέτοια, ώστε η ροή του να είναι στρωτή. Αν είναι l το μήκος του σωλήνα, P_1 και P_2 οι πιέσεις του υγρού στα άκρα του, R η ακτίνα του και n ο συντελεστής ιξώδους του υγρού, τότε η παροχή αυτού του σωλήνα δίνεται από τη σχέση:

$$\Pi = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{R^4}{n} \cdot \frac{P_1 - P_2}{l}$$

Αυτή η σχέση βρέθηκε πρώτα από τον Poiseuille και ονομάζεται νόμος του Poiseuille. Ισχύει για ομαλή ροή πραγματικού υγρού σε οριζόντιο κυλινδρικό σωλήνα και εκφράζει ότι η παροχή όγκου:

1) Είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το συντελεστή ιξώδους του υγρού.

2) Είναι ανάλογη προς τη βαθμίδα πιέσεως $(P_1 - P_2)/l$.

3) Μεταβάλλεται ανάλογα προς την τέταρτη δύναμη της ακτίνας του οριζόντιου κυλινδρικού σωλήνα.

***Σημείωση*:**

Αν διπλασιάσομε την ακτίνα του σωλήνα, η παροχή αυξάνεται κατά έναν παράγοντα 16. Αυτή η σχέση παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό υδραυλικών συστημάτων.

3.10 Κίνηση σώματος μέσα στο ρευστό.

Όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ακίνητο πραγματικό ρευστό, τότε στο σώμα εξασκείται από το ρευστό μια δύναμη, η οποία αντιστέκεται στην κίνηση του σώματος.

Τη δύναμη αυτή την ονομάζομε ***αντίσταση του ρευστού***. Όταν ένα σώμα βρίσκεται ακίνητο μέσα σε ένα ρευστό που κινείται, τότε στο σώμα εξασκείται από το ρευστό μια δύναμη, η οποία τείνει να συμπαρασύρει το σώμα. Τη δύναμη αυτή την ονομάζομε πάλι αντίσταση του ρευστού και είναι αντίθετη προς την αντίσταση, την οποία προβάλλει το σώμα στην κίνηση του ρευστού.

Γενικά, όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό και η ταχύτητά του είναι διαφορετική από την ταχύτητα του ρευστού, τότε, πάνω στο σώμα εξασκείται από το ρευστό μία δύναμη, που αντιστέκεται στη σχετική του κίνηση ως προς το ρευστό και που την ονομάζομε ***αντίσταση***.

Στο σώμα που παρουσιάζει, κατά τη διεύθυνση της κινήσεως, άξονα συμμετρίας, η αντίσταση του ρευστού είναι αντίρροπη προς τη σχετική ταχύτητα του σώματος ως προς το ρευστό.

Με την προϋπόθεση αυτή και συνήθως για ταχύτητες 1 m/s έως 200 m/s έχει βρεθεί ότι:

Η αντίσταση του ρευστού είναι ανάλογη με το τετράγωνο της σχετικής ταχύτητας του σώματος, ανάλογη με το εμβαδόν της μετωπικής επιφάνειας του σώματος και ανάλογη με την πυκνότητα του ρευστού.

Η μαθηματική διατύπωση αυτών είναι:

$$T = G \cdot S_{\mu} \cdot \frac{\varrho}{2} \upsilon^2$$

όπου: T το μέτρο της αντιστάσεως την οποία υφίσταται το σώμα,

G ο συντελεστής αντιστάσεως, ο οποίος είναι καθαρός αριθμός και εξαρτάται μόνο από το σχήμα του σώματος και κυρίως του σχήματος του οπίσθιου τμήματός του,

S_{μ} το εμβαδόν της μετωπικής επιφάνειας του σώματος, δηλαδή το εμβαδόν της μεγαλύτερης διατομής του σώματος, η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της κινήσεως,

ϱ η πυκνότητα του ρευστού και

υ το μέτρο της σχετικής ταχύτητας του σώματος ως προς το ρευστό.

***Προσοχή*:**

Όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό με σχετικά μεγάλη ταχύτητα ως προς αυτό, τότε στο πίσω του μέρος σχηματίζονται στρόβιλοι. Οι στρόβιλοι (στροβιλισμοί) είναι γρήγορες περιστροφικές κινήσεις των μορίων του ρευστού, όπως περίπου εικονίζει το σχήμα 3.10α (α, β):

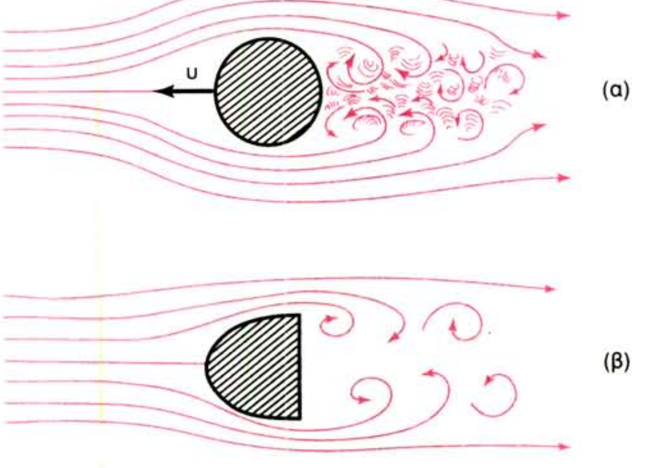
Αποτέλεσμα αυτών των στροβιλισμών, δηλαδή αυτών των γρήγορων κινήσεων του ρευστού, είναι να πέφτει η πίεση του ρευστού όπου αυτοί παρουσιάζονται. Έτσι στο πίσω μέρος του σώματος, που κινείται, έχομε μικρότερη πίεση από ό,τι στο εμπρός, αφού η ταχύτητα των μορίων του ρευστού εκεί είναι μεγαλύτερη (περιοχή στροβιλισμών) από την ταχύτητά τους στο εμπρός μέρος του σώματος.

Λόγω αυτής της διαφοράς των πιέσεων ασκείται επάνω στο σώμα μια δύναμη αντίθετη προς τη φορά της κινήσεως (αντίσταση), η οποία τείνει να το εμποδίσει στην κίνησή του.

Όταν λοιπόν ένα σώμα κινείται μέσα σε ένα ρευστό, εκτός από την αντίσταση, που οφείλεται στις τριβές μεταξύ του ρευστού και του σώματος, συναντά και μία άλλη αντίσταση, που οφείλεται στους στροβιλισμούς του ρευστού στο πίσω μέρος του σώματος.

Και οι δύο αυτές αντιστάσεις είναι τόσο μεγαλύτερες, όσο μεγαλύτερες είναι οι ταχύτητες του σώματος.

Ο σχηματισμός στροβίλων δεν εξαρτάται μόνο από την ταχύτητα με την οποία κινείται το σώμα, αλλά και από τη μορφή του σώματος. Επειδή οι στρόβιλοι σχηματίζονται στο πίσω μέρος του σώματος, γι' αυτό και έχει μεγάλη σημασία η μορφή του πίσω μέρους του σώματος.



Σχ. 3.10α.

Για την ελάττωση του συντελεστή αντιστάσεως (C), επομένως και της αντιστάσεως, δίνονται τέτοια σχήματα στα πίσω τμήματα των σχημάτων (αεροδυναμικά σχήματα), ώστε να αποφεύγεται ο σχηματισμός στροβίλων.

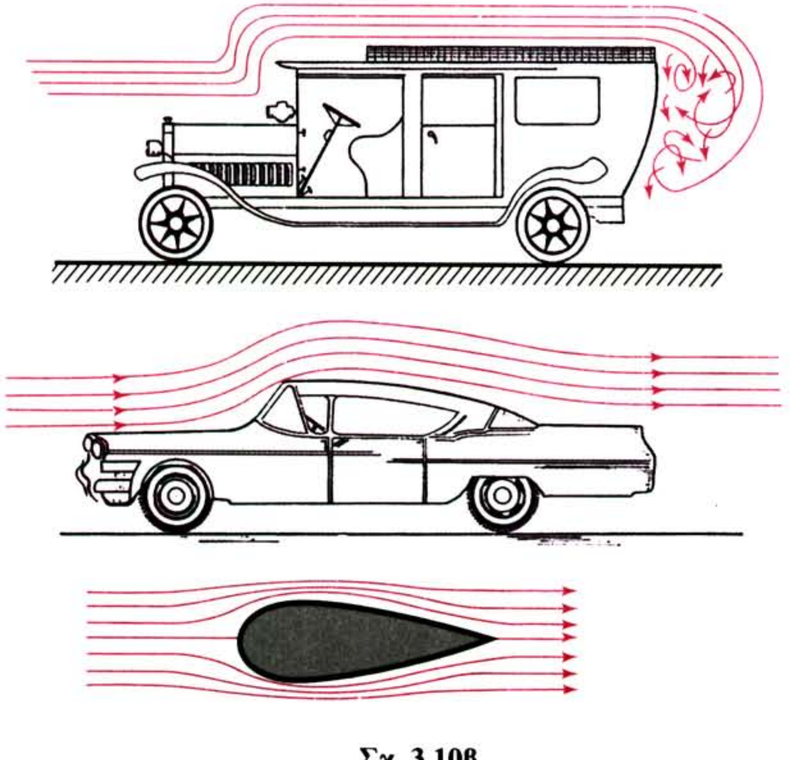
Το σχήμα 3.10β (α) παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση γιατί πίσω του σχηματίζονται πολλοί στρόβιλοι. Ενώ τα αεροδυναμικά σχήματα 3.10β (β, γ) παρουσιάζουν μικρή αντίσταση γιατί πίσω τους δεν σχηματίζονται στρόβιλοι.

Παρατηρήσεις:

1) Η αντίσταση έχει μέτρο ανάλογο του τετραγώνου του μέτρου της σχετικής ταχύτητας όταν η ταχύτητα αυτή είναι μικρότερη από την ταχύτητα του ήχου στον αέρα.

2) Για μικρές τιμές ταχύτητας (οπότε δεν σχηματίζονται στρόβιλοι), το μέτρο της αντιστάσεως είναι ανάλογο προς το μέτρο της σχετικής ταχύτητας του σώματος ως προς το ρευστό.

3) Για τιμές ταχύτητας μεγαλύτερες από την ταχύτητα του ήχου στον αέρα, η σχέση μεταξύ Τ και υ είναι τρίτης ή και ανώτερης δυνάμεως.



(α)

(β)

(γ)

Σχ. 3.10β.

Σημείωση:

Είναι φανερό ότι στα ιδανικά ρευστά δεν δημιουργούνται στρόβιλοι (αν όμως δημιουργηθούν με κάποιο εξαναγκασμό διατηρούνται επ' άπειρο).

3.11 Πτώση των σωμάτων μέσα στον αέρα.

Όταν ένα σώμα πέφτει κατακόρυφα μέσα στον αέρα (ή άλλο ρευστό), τότε σε κάθε στιγμή στο σώμα εξασκούνται οι εξής κατακόρυφες δυνάμεις:

- Το βάρος του $\vec{B}$
- Η άνωσή του $\vec{A}$ και
- η αντίσταση του αέρα (ή του ρευστού) $\vec{T}$, η οποία έχει φορά προς τα επάνω.

Επομένως το σώμα πέφτει κάτω από την επίδραση της συνισταμένης $\vec{F}$ των $\vec{B}$, $\vec{A}$ και $\vec{T}\,[\vec{F} = \vec{B} + (\vec{A} + \vec{T})]$. Άρα το σώμα σε κάθε στιγμή θα έχει επιτάχυνση $\vec{\gamma}$ της οποίας το μέτρο (γ) δίνεται από τη σχέση:

$$\gamma = \frac{F}{m} = \frac{B-(A+T)}{m} \tag{1}$$

Επομένως, όταν το σώμα πέφτει, η ταχύτητά του μεγαλώνει. Επειδή, όταν η ταχύτητα ενός σώματος που κινείται μέσα σε ένα ρευστό μεγαλώνει, μεγαλώνει και η αντίσταση T, γι' αυτό σύμφωνα με τη σχέση (1) η επιτάχυνση του σώματος συνεχώς μικραίνει.

Αν το ύψος από το οποίο πέφτει το σώμα είναι αρκετά μεγάλο, είναι δυνατό η $\vec{T}$ να γίνει τόση, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$B - (A + T) = 0 \tag{2}$$

Την τιμή της αντιστάσεως, η οποία εκπληρώνει τη σχέση (2), την ονομάζομε οριακή τιμή της και την παριστάνομε με $T_{ορ}$.

Οπότε η σχέση (2) μας δίνει:

$$B - (A + T_{ορ}) = 0 \tag{3}$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει:

$$\gamma = \frac{B-(A+T_{ορ})}{m} = \frac{0}{m} = 0$$

$$\gamma = 0 \tag{4}$$

Δηλαδή από τη στιγμή που η $\vec{T}$ γίνεται τόση, ώστε να ισχύει η σχέση: $\gamma = 0$, το σώμα θα πέφτει με ταχύτητα σταθερή ($\vec{\upsilon}_{ορ}$) (η πτώση του σώματος θα είναι κατακόρυφη ομαλή κίνηση).

Η σταθερή αυτή ταχύτητα $\vec{\upsilon}_{o\varrho}$ ονομάζεται ***ορική ταχύτητα***.

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$B - A - T_{o\varrho} = 0$$

$$T_{o\varrho} = B - A \quad (5)$$

$$T_{o\varrho} = G \cdot S_{\mu} \frac{\varrho}{2} \upsilon_{o\varrho}^{2} \quad (6)$$

Από τις σχέσεις (5) και (6) παίρνομε τη σχέση (7), με την οποία μπορούμε να βρούμε την $\upsilon_{o\varrho}$:

$$\boxed{G \cdot S_{\mu} \cdot \frac{\varrho}{2} \cdot \upsilon_{o\varrho}^{2} = B - A} \quad (7)$$

Παρατήρηση:

Για τα περισσότερα σώματα που πέφτουν στον αέρα, η άνωσή τους είναι πάρα πολύ μικρή, συγκριτικά με το βάρος τους $\vec{B}$ και την αντίσταση $\vec{T}$

Γι' αυτό η σχέση (7) στις περιπτώσεις αυτές γράφεται:

$$G \cdot S_{\mu} \cdot \frac{\varrho}{2} \cdot \upsilon_{o\varrho}^{2} = B - 0$$

$$G \cdot S_{\mu} \cdot \frac{\varrho}{2} \cdot \upsilon_{o\varrho}^{2} = B \quad (8)$$

Ισχύει η σχέση:

$$B = m \cdot g \quad (9)$$

Από τις σχέσεις (8) και (9) βρίσκομε την ορική ταχύτητα των σωμάτων, όταν η άνωση μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα (A = 0). Δηλαδή:

$$\boxed{\upsilon_{o\varrho} = \sqrt{\frac{2m \cdot g}{\varrho G S_{\mu}}}} \quad (10)$$

Σημειώσεις:

1) Η πτώση των σωμάτων μέσα στον αέρα (σε ρευστό) δεν είναι ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση.

2) Όταν ένα σώμα πέφτει μέσα στον αέρα (σε ρευστό) από αρκετό ύ-

ψος, τότε η ταχύτητά του στην αρχή αυξάνεται, κατόπιν λόγω τριβών το σώμα αποκτά την οριακή ταχύτητα ($υ_{ορ}$) και με αυτήν εξακολουθεί να πέφτει κινούμενο ομαλά.

3) Η χρήση των αλεξιπτώτων στηρίζεται στο ότι αυτά αποκτούν γρήγορα την οριακή τους ταχύτητα, η οποία και γι' αυτό ακριβώς είναι σχετικά μικρή κατά την πτώση στο έδαφος.

Πράγματι, επειδή το αλεξίπτωτο έχει πολύ μεγάλη επιφάνεια, όταν είναι ανοικτό, μόλις ο αλεξιπτωτιστής βρεθεί στον αέρα η αντίσταση, η οποία δημιουργείται στο αλεξίπτωτο, είναι πολύ μεγάλη. Έτσι σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα εξουδετερώνεται σχεδόν το βάρος του αλεξιπτωτιστή, χωρίς αυτός να προλάβει να αποκτήσει μεγάλη ταχύτητα λόγω επιταχύνσεως. Η οριακή ταχύτητα, με την οποία φθάνει ο αλεξιπτωτιστής στο έδαφος, είναι συνήθως ίση με την ταχύτητα, που θα αποκτούσε, αν πηδούσε από ύψος περίπου 4 m.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Α΄ ΜΕΡΟΥΣ

1. Το πέλμα ενός ανθρώπου, βάρους 80 kgf, έχει επιφάνεια $S = 40\ cm^2$. Να υπολογισθεί η πίεση που προκαλείται στο δάπεδο, όταν ο άνθρωπος στηρίζεται με το ένα πόδι του.

2. Ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο έχει διαστάσεις 100 cm x 50 cm x 25 cm και βάρος $B = 10$ kgf. Να βρείτε την πίεση που θα προκαλεί στο οριζόντιο έδαφος όταν αυτό στηρίζεται διαδοχικά με όλες τις δυνατές περιπτώσεις.

3. Πόση δύναμη εξασκεί το νερό σε επιφάνεια 100 cm^2 όταν αυτή βρίσκεται σε βάθος 20 m ($\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}\ kgf/cm^3$);

4. Ένα σημείο Α βρίσκεται σε βάθος $h = 10$ cm μέσα σε υγρό που έχει ειδικό βάρος $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}\ kgf/cm^3$. Πόση πίεση υπάρχει στο σημείο Α; Η ατμοσφαιρική πίεση είναι: $P = 1033{,}6 \cdot 10^{-3}\ kgf/cm^2$.

5. Ένας δύτης βρίσκεται σε βάθος 30 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Αν το ειδικό βάρος του θαλασσινού νερού και η ατμοσφαιρική πίεση είναι 1010 kgf/m^3 και 1 atm, να υπολογισθεί η πίεση που δέχεται ο δύτης.

6. Πόση είναι η πίεση P στήλης υδραργύρου ύψους $h = 736$ mm αν το ειδικό βάρος του υδραργύρου είναι $\varepsilon = 13{,}6 \cdot 10^{-3}\ kgf/cm^3$;

7. Σε σωλήνα, που έχει σχήμα U βάζομε υδράργυρο και κατόπιν, στο ένα από τα δύο του σκέλη, ένα άλλο υγρό. Οι ελεύθερες επιφάνειες του υδραργύρου και του υγρού απέχουν από το οριζόντιο επίπεδο που τα διαχωρίζει αποστάσεις 20 και 40 cm αντίστοιχα. Πόσο είναι το ειδικό βάρος του υγρού αν το ειδικό βάρος του υδραργύρου είναι $13{,}6 \cdot 10^{-3}$ kgf/cm^3;

8. Ένα δοχείο με οριζόντιο πυθμένα, που έχει εμβαδόν 100 cm^2, περιέχει νερό. Πόση είναι η δύναμη που εξασκεί το νερό στον πυθμένα, αν η ελεύθερη επιφάνειά του απέχει από τον πυθμένα 30 cm;

9. Στο πλευρικό τοίχωμα δοχείου που περιέχει νερό ανοίγεται κυκλική οπή εμβαδού 1 cm^2 και σε απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού 50 cm. Ζητείται η δύναμη, που πρέπει να εξασκηθεί σε πώμα το οποίο θα κλείνει την οπή για να μην εξέρχεται το νερό.

10. Το εμβαδόν του μεγάλου εμβόλου ενός υδραυλικού πιεστηρίου είναι $S_2 = 100 \ cm^2$ και του μικρού $S_1 = 50 \ cm^2$. Αν πάνω στο μικρό έμβολο εξασκηθεί κάθετα μία δύναμη $F_1 = 2$ kgf πόση θα είναι η δύναμη που θα εξασκηθεί στο μεγάλο έμβολο;

11. Σε υδραυλικό πιεστήριο το μεγάλο έμβολο έχει διάμετρο 1 m και το μικρό 10 cm. Με το πιεστήριο θέλομε να αναπτύξομε δύναμη 1.000 kgf. Πόση δύναμη πρέπει να εφαρμόσομε στο μικρό έμβολο και πόση θα είναι τότε η πίεση μέσα στο πιεστήριο;

12. Μέσα σε ένα υγρό και σε διάφορα βάθη κρεμάμε ένα σιδερένιο κύλινδρο που έχει όγκο 25 cm^3, μία χάλκινη σφαίρα που έχει όγκο 25 cm^3 και μία νικέλινη ράβδο που έχει όγκο 25 cm^3. Πόση άνωση εξασκείται σε κάθε ένα από αυτά τα σώματα αν το ειδικό βάρος του υγρού είναι $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-3}$ kgf/cm^3;

13. Μία σιδερένια σφαίρα που έχει όγκο 25 cm^3 την κρεμάμε διαδοχικά μέσα σε δύο υγρά που έχουν ειδικό βάρος $\varepsilon_1 = 1 \cdot 10^{-3}$ kgf/cm^3 και $\varepsilon_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ kgf/cm^3 αντίστοιχα. Πόση άνωση εξασκείται στη σφαίρα όταν είναι βυθισμένη μέσα στο πρώτο υγρό και πόση όταν είναι στο δεύτερο;

14. Μία επίπεδη επιφάνεια έχει εμβαδόν $S = 4 \ cm^2$. Πόση δύναμη εξασκεί η ατμόσφαιρα στην επιφάνεια αυτή, όταν η ατμοσφαιρική πίεση είναι $P_{atm} = 1{,}033$ kgf/cm^2;

15. Η υψηλότερη κορυφή της Πάρνηθας έχει υψόμετρο $h_\Pi = 1407$ m. Πόση είναι εκεί η ατμοσφαιρική πίεση P_Π αν στην επιφάνεια της θάλασσας είναι $P_\Theta = 760$ mmHg;

16. Αερόστατο έχει όγκο $V = 50 \ m^3$ και βάρος $700 \cdot 10^{-3}$ kgf. Το αερόστατο είναι γεμάτο με υδρογόνο. Ο εξωτερικός αέρας και το υδρογόνο έχουν θερμοκρασία 0°C και πίεση $P = 76$ cmHg. Τότε τα ειδικά βάρη του αέρα και του υδρογόνου είναι $\varepsilon_A = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$ kgf/lt, $\varepsilon_H = 0{,}09 \cdot 10^{-3}$ kgf/lt αντίστοιχα. Πόση είναι η ανυψωτική δύναμη, τη στιγμή που το αερόστατο απογειώνεται;

17. Μάζα m ενός αερίου έχει θερμοκρασία $\Theta = 20°C$, όγκο $V_1 = 10 \ cm^3$ και πίεση $P_1 = 4$ atm. Πόση θα είναι η πίεσή της P_2, αν ο όγκος της γίνει $V_2 = 20 \ cm^3$, ενώ η θερμοκρασία της παραμένει σταθερή ($\Theta = 20°C$);

18. Μία φυσαλίδα αέρα, που έχει όγκο $V_1 = 0{,}03 \ cm^3$, είναι προσκολλημένη στο τοίχωμα ενός δοχείου το οποίο περιέχει νερό. Η φυσαλίδα βρίσκεται 12 cm κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Η ατμοσφαιρική πίεση είναι P = 74 cmHg. Πόσος θα γίνει ο όγκος της φυσαλίδας, αν η ατμοσφαιρική πίεση γίνει P′ = 76 cmHg, ενώ η θερμοκρασία της παραμένει σταθερή;

19. Κρουνός, του οποίου η διατομή έχει εμβαδόν $S = 20\ cm^2$, γεμίζει δεξαμενή νερού, χωρητικότητας $V = 48\ m^3$, μέσα σε 24 ώρες. Πόση είναι η παροχή Π του κρουνού και πόση η ταχύτητα υ εκροής του νερού από τον κρουνό;

20. Από σωλήνα του οποίου η διατομή έχει εμβαδόν $S = 400\ cm^2$ ρέει νερό με ταχύτητα υ = 4 km/h. Πόσος είναι ο όγκος του νερού που θα δώσει ο σωλήνας μέσα σε 24 ώρες;

21. Δοχείο το οποίο περιέχει νερό μέχρις ύψους h = 125 cm, φέρει στον πυθμένα του κυκλική οπή της οποίας το εμβαδόν είναι $S = 2\ cm^2$. Πόση είναι η παροχή Π της οπής αν διατηρούμε την ελεύθερη επιφάνεια διαρκώς στο ίδιο ύψος;

22. Αλεξίπτωτο πέφτει με σταθερή ταχύτητα 3,5 m/sec. Πόση είναι η αντίσταση την οποία συναντά, όταν το ολικό βάρος του είναι Β = 950 Ν; Η άνωσή του θεωρείται ασήμαντη.

23. Για ένα αλεξίπτωτο το μονώνυμο $G\frac{\varrho}{2}$ είναι ίσο με $1{,}23\ N\cdot m^{-4}\cdot sec^2$. Η μετωπική επιφάνεια του αλεξιπτώτου είναι $S = 63{,}33\ m^2$ και το ολικό βάρος που κρέμεται από αυτό είναι Β = 950 Ν. Πόση είναι η οριακή ταχύτητα $υ_{ορ}$ που αποκτά το αλεξίπτωτο, αν η άνωση και το βάρος του θεωρούνται ασήμαντα;

24. Νερό ρέει με ταχύτητα $25\ cm\cdot sec^{-1}$ μέσα σε οριζόντιο σωλήνα ακτίνας $α_1 = 2$ cm. Ο σωλήνας φέρει πιο πέρα στένωση ακτίνας $α_2 = 0{,}5$ cm. Υπολογίστε την πτώση της πιέσεως όταν το νερό περνάει από τη στένωση.

25. Νερό ποταμού ρέει με οριζόντια ταχύτητα 1,5 m/sec και παρασύρει ένα σώμα. Αν με μία εξωτερική δύναμη ακινητοποιήσομε το σώμα, πόσο θα αυξηθεί η πίεση την οποία προκαλεί το νερό σε αυτό;

26. Με ποια ταχύτητα εκρέει νερό από μία οπή διαμέτρου 1,5 cm η οποία βρίσκεται σε βάθος 3,5 m από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού; Ποια η παροχή της οπής;

27. Κυλινδρικό δοχείο, ύψους 4 m και διαμέτρου 10 cm έχει στον πυθμένα του κυκλική οπή, διαμέτρου 5 mm. Πόσο νερό πρέπει να ρίχνομε στο δοχείο σε κάθε δευτερόλεπτο, αν θέλομε το δοχείο να παραμένει γεμάτο, χωρίς να υπερχειλίζει;

28. Αλεξίπτωτο, βάρους Β, πέφτει με σταθερή ταχύτητα 4 m/sec. Αν το βάρος του αλεξιπτώτου ήταν 2 Β με ποια σταθερή ταχύτητα θα έπεφτε αυτό;

29. Νερό εκρέει από δεξαμενή με παροχή 2 lt/sec από οπή που βρίσκεται στο πυθμένα της δεξαμενής, της οποίας το βάθος είναι 360 cm. Να υπολογίσετε τη νέα παροχή, όταν στην επιφάνεια του νερού ασκείται πρόσθετη πίεση 8 kgf/cm^2.

30. Σωλήνας διοχετεύσεως αεριόφωτος έχει στην αρχή του διάμετρο 10 mm και ακολούθως ο σωλήνας αποστενούται, ώστε η διάμετρός του να γίνει 5 mm. Από το στενό σωλήνα το φωταέριο εκρέει με ταχύτητα 25,1 m/sec. Ζητούνται: α) Πόση είναι η ταχύτητα του φωταερίου στον ευρύ σωλήνα, β) πόση η παροχή φωταερίου από το στενό σωλήνα σε cm^3/sec και γ) σε πόσο χρόνο εκρέει μέσα από το σωλήνα 1 m^3 φωταερίου;

31. Να καθορισθεί η δύναμη η οποία εξασκείται σε κυκλικό δίσκο επιφάνειας 16 cm^2, όταν αυτός προσβάλλεται κάθετα από ρεύμα αέρα πυκνότητας 0,00125 g/cm^3 και ταχύτητας 1.000 cm/sec. (Για το δίσκο είναι: Gαντ = 1,2).

32. Να προσδιορισθεί ο λόγος των οριακών ταχυτήτων δύο σφαιρών από ξύλο δρυός πυκνότητας 0,7 g/cm^3 και από μόλυβδο πυκνότητας 11,3 g/cm^3 της ίδιας διαμέτρου, όταν πέφτουν μέσα στον αέρα.

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ

4.1 Εσωτερική ενέργεια.

4.1.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Τα δομικά στοιχεία (μόρια, άτομα, ιόντα) όλων των σωμάτων βρίσκονται σε συνεχή κίνηση, που λέγεται ***θερμική κίνηση***.

Συγκεκριμένα κάθε μόριο αερίου εκτελεί συνεχώς μία άτακτη και προς όλες τις κατευθύνσεις μεταφορική κίνηση, διαγράφοντας μια τεθλασμένη τροχιά. Εξαιτίας της κινήσεως αυτής κάθε μόριο του αερίου έχει κινητική ενέργεια.

Κάθε μόριο των πολυατομικών αερίων εκτός της μεταφορικής κινήσεως εκτελεί και περιστροφική κίνηση περί το κέντρο μάζας του. Εξαιτίας της κινήσεως αυτής έχει πρόσθετη κινητική ενέργεια. Επίσης τα άτομα των πολυατομικών αερίων εκτελούν ταλάντωση ως προς το κέντρο μάζας του μορίου. Εξαιτίας της ταλαντώσεως αυτής το μόριο ενός πολυατομικού αερίου έχει κινητική και δυναμική ενέργεια.

Κάθε μόριο των στερεών σωμάτων ταλαντώνεται συνεχώς γύρω από μία μέση θέση ισορροπίας του. Εξαιτίας της ταλαντώσεως αυτής κάθε μόριο στερεού σώματος έχει κινητική και δυναμική ενέργεια.

Τα μόρια των υγρών ολισθαίνουν συνεχώς άτακτα το ένα επάνω στο άλλο και εξαιτίας αυτού του γεγονότος έχουν κινητική και δυναμική ενέργεια.

2) Τα δομικά στοιχεία ενός σώματος εξασκούν δυνάμεις μεταξύ τους (αλληλεπιδράσεις).

Οι δυνάμεις αυτές είναι:

– Μεγάλες, στα στερεά σώματα.
– Μικρές, στα υγρά.
– Σχεδόν αμελητέες, στα αέρια.

Εξαιτίας των δυνάμεων αυτών κάθε δομικό στοιχείο ενός σώματος έχει δυναμική ενέργεια. Σημειώνομε ότι οι δυνάμεις αλληλεπιδράσεως μεταξύ των δομικών λίθων ενός σώματος είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως.

3) Από τα παραπάνω προκύπτουν ότι κάθε δομικό στοιχείο ενός σώματος μπορεί να έχει: κινητική ενέργεια ή δυναμική ενέργεια ή κινητική και δυναμική ενέργεια.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι κάθε δομικό στοιχείο ενός σώματος, εκτός από τις παραπάνω ενέργειες, έχει και τις ενέργειες των ηλεκτρονίων που περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα του, καθώς και τις ενέργειες του πυρήνα του.

4.1.2 Ορισμός της εσωτερικής ενέργειας.

Εσωτερική ενέργεια U ενός σώματος ονομάζομε το άθροισμα των πάσης φύσεως ενεργειών όλων των δομικών στοιχείων (μορίων-ατόμων) του σώματος που περιγράψαμε παραπάνω. Δηλαδή:

$$\boxed{U = E_K + E_\delta + E_{\eta\lambda} + E_\pi + \ldots \quad \text{Εξίσωση ορισμού}} \qquad (1)$$

όπου: E_K το άθροισμα των κινητικών ενεργειών όλων των δομικών στοιχείων του σώματος,
E_δ το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών όλων των δομικών στοιχείων του σώματος,
$E_{\eta\lambda}$ το άθροισμα των ενεργειών των ηλεκτρονίων που περιφέρονται γύρω από τους πυρήνες όλων των δομικών στοιχείων του σώματος,
E_π το άθροισμα των ενεργειών των πυρήνων όλων των δομικών στοιχείων του σώματος.

***Παρατήρηση*:**

Στα φαινόμενα, τα οποία θα μελετήσομε, δε θα μας ενδιαφέρει η τιμή της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος αλλά μόνο οι μεταβολές της.

Οι προσθετέοι της εσωτερικής ενέργειας που θα μεταβάλλονται στα φαινόμενα αυτά, είναι η E_K και η E_δ.

Οι άλλοι προσθετέοι μένουν σταθεροί και γι' αυτό θα παραλείπονται αφού δεν επηρεάζουν τις μεταβολές της εσωτερικής ενέργειας.

***Προσοχή*:**

Πρέπει να σημειωθεί ότι στην εσωτερική ενέργεια, η οποία λέγεται σήμερα και θερμοδυναμική ενέργεια, δεν περιλαμβάνεται η ενέργεια που οφείλεται σε τυχόν κίνηση του σώματος ως συνόλου ή μακροσκοπικών (μεγάλων) τμημάτων του σώματος ως συνόλων.

Σημείωση:

Την εσωτερική ενέργεια ενός σώματος και τις μεταβολές της θα τις μελετήσομε λεπτομερώς στο πέμπτο κεφάλαιο της θερμοδυναμικής.

4.1.3 Θερμοκρασία.

α) Γνώσεις στηρίξεως.

Η έννοια της θερμοκρασίας είναι γνωστή από την καθημερινή μας εμπειρία και προέρχεται από την εντύπωση του «ζεστού» και του «κρύου» που προσδιορίζεται (δημιουργείται) από την αίσθηση της αφής.

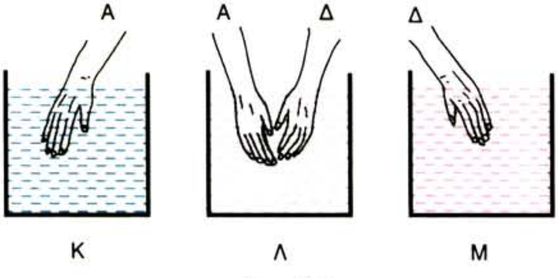
Ένα σώμα που μας φαίνεται ζεστό συνήθως έχει μεγαλύτερη θερμοκρασία παρά κάποιο που μας φαίνεται κρύο. Με την αφή μπορούμε βέβαια να διαπιστώσομε, αν ένα σώμα είναι ζεστό ή κρύο ή σωστότερα αν ένα σώμα είναι πιο ζεστό ή πιο κρύο από ένα άλλο. Είναι όμως δύσκολο με την αφή να εκτιμήσομε σωστά τη θερμική κατάσταση ενός σώματος γιατί μία τέτοια εκτίμηση είναι υποκειμενική και εξαρτάται από την κατάσταση που βρίσκεται το χέρι μας.

Τα δοχεία Κ, Λ, Μ (σχ. 4.1α) περιέχουν κρύο, χλιαρό και ζεστό νερό αντίστοιχα.

Βυθίζομε το αριστερό μας χέρι Α στο δοχείο Κ και το δεξί μας Δ στο δοχείο Μ και κατόπιν και τα δύο στο δοχείο Λ. Διαπιστώνομε ότι για το αριστερό μας χέρι, που ήταν βυθισμένο στο κρύο νερό (Κ) το χλιαρό νερό (Λ) φαίνεται ζεστό, ενώ για το δεξί μας χέρι που ήταν βυθισμένο στο ζεστό νερό (Μ) φαίνεται κρύο.

β) Ορισμός της θερμοκρασίας.

Γενικά, όταν λέμε ότι ένα σώμα είναι θερμό ή ψυχρό χαρακτηρίζομε τη



Σχ. 4.1α.

θερμική κατάσταση του σώματος.

Η θερμική κατάσταση ενός σώματος δύναται να μεταβάλλεται συνεχώς από το ψυχρό στο θερμό και αντίστροφα. Για παράδειγμα όταν θερμαίνεται ψυχρό νερό ή όταν θερμό νερό αφήνεται να κρυώσει. Για να παρακολουθήσομε τις μεταβολές της θερμικής καταστάσεως των σωμάτων, πρέπει κάθε θερμική κατάσταση να εκφράζεται ως φυσικό μέγεθος με έναν αριθμό και μονάδα μετρήσεως. Έτσι έχομε τον ακόλουθο ορισμό της θερμοκρασίας:

Θερμοκρασία ενός σώματος ονομάζεται το φυσικό μέγεθος, το οποίο χαρακτηρίζει τη θερμική κατάσταση του σώματος, δηλαδή το βαθμό θερμάνσεως του σώματος. Με άλλα λόγια η θερμοκρασία είναι ένας δείκτης της θερμικής καταστάσεως των σωμάτων με τον οποίο μπορούμε να κρίνομε αν ένα σώμα είναι εξίσου θερμό, ή θερμότερο ή ψυχρότερο από ένα άλλο.

Επειδή η αφή δεν μας οδηγεί σε σωστές και ακριβείς εκτιμήσεις, γι' αυτό για τη σωστή και αντικειμενική εκτίμηση της ισότητας ή των διαφορών θερμοκρασίας χρησιμοποιούμε τα θερμόμετρα (θερμοκρασιόμετρα). Η λειτουργία των θερμομέτρων στηρίζεται ***στις μεταβολές τις οποίες παρουσιάζουν διάφορες ιδιότητες των σωμάτων*** (π.χ. θερμική διαστολή του υδραργύρου, μεταβολή της πιέσεως ενός αερίου κλπ.) ***όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους***.

***Παρατήρηση*:**

Έχει αποδειχθεί ότι η θερμοκρασία ενός σώματος εξαρτάται από την κινητική ενέργεια των δομικών στοιχείων του (μορίων-ατόμων-ιόντων), η οποία οφείλεται στη θερμική τους κίνηση και συγκεκριμένα:

Αν η κινητική ενέργεια των δομικών στοιχείων αυξηθεί τότε θα αυξηθεί και η θερμοκρασία του σώματος.

Γι' αυτό η θερμοκρασία ορίζεται και ως εξής:

Θερμοκρασία ενός σώματος ονομάζεται το φυσικό μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζει την κινητική ενέργεια των δομικών στοιχείων του σώματος.

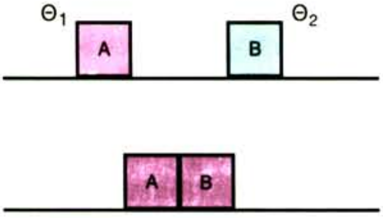
***Προσοχή*:**

1) Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία ενός σώματος αυξάνεται και η εσωτερική του ενέργεια, ενώ όταν ελαττώνεται η θερμοκρασία του ελαττώνεται και η εσωτερική του ενέργεια.

2) Το αντίστροφο δεν ισχύει πάντοτε γιατί υπάρχουν περιπτώσεις που μεταβάλλεται η εσωτερική ενέργεια (τήξη-πήξη-βρασμός) ενός σώματος, ενώ η θερμοκρασία του δεν μεταβάλλεται.

4.1.4 Θερμότητα.

Παίρνομε δύο σώματα Α και Β (σχ. 4.1β) τα οποία έχουν αντίστοιχα



Σχ. 4.1β.

θερμοκρασία Θ_1 και Θ_2 έτσι, ώστε να ισχύει η σχέση $\Theta_1 > \Theta_2$. Αν φέρομε τα σώματα αυτά σε θερμική επαφή θα παρατηρήσομε ότι:

Η θερμοκρασία Θ_1 του θερμότερου σώματος θα αρχίσει να ελαττώνεται, ενώ η θερμοκρασία Θ_2 του ψυχρότερου θα αρχίσει να αυξάνεται.

Επειδή όταν ελαττώνεται η θερμοκρασία ενός σώματος, ελαττώνεται και η εσωτερική του ενέργεια, ενώ όταν αυξάνεται, αυξάνεται και η εσωτερική του ενέργεια, από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

Κατά τη θερμική επαφή δύο σωμάτων η εσωτερική ενέργεια του Α, στο οποίο παρατηρείται ελάττωση της θερμοκρασίας, ελαττώνεται, ενώ η εσωτερική ενέργεια του Β, στο οποίο παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται.

Επομένως κατά τη θερμική επαφή των σωμάτων Α και Β, που έχουν θερμοκρασίες διαφορετικές ($\Theta_1 > \Theta_2$), ***πρέπει να ρέει*** κάποια μορφή ενέργειας από το θερμότερο Α στο ψυχρότερο Β.

Η ενέργεια αυτή ***προέρχεται*** από την εσωτερική ενέργεια του θερμότερου Α γιατί σε αυτό παρατηρείται ελάττωση της εσωτερικής ενέργειας. Όταν αυτή φθάνει στο ψυχρότερο σώμα Β ***γίνεται*** εσωτερική ενέργεια του Β γιατί σε αυτό παρατηρείται αύξηση της εσωτερικής ενέργειας.

Αν μεταξύ ενός σώματος Γ θερμοκρασίας Θ_Γ και ενός σώματος Δ θερμοκρασίας Θ_Δ υπάρχει κενό και οι θερμοκρασίες τους είναι τέτοιες ώστε $\Theta_\Gamma > \Theta_\Delta$. Τότε παρατηρείται το εξής:

Το θερμότερο σώμα Γ ψύχεται, ενώ το ψυχρότερο Δ θερμαίνεται. Η ενέργεια στην περίπτωση αυτή δεν μεταβιβάζεται αμέσως από το ένα σώμα στο άλλο.

Εσωτερική ενέργεια του σώματος που ψύχεται (Γ) μετατρέπεται σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία διαδίδονται στο χώρο. Η ενέργεια των κυμάτων αυτών απορροφάται από το ψυχρότερο σώμα (Δ) και συντελεί στην αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας.

Επομένως και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε ροή ενέργειας από ένα θερμό σώμα σε ένα ψυχρότερο που προέρχεται από την εσωτερική ενέργεια του θερμού και μετατρέπεται σε εσωτερική ενέργεια του ψυχρού.

Η παραπάνω ροή ενέργειας από ένα σώμα σε ένα άλλο χαμηλότερης θερμοκρασίας είναι μια φυσική ροή ενέργειας η οποία οφείλεται στη διαφορά των θερμοκρασιών των δύο σωμάτων.

Η μορφή ενέργειας η οποία ρέει από ένα σώμα σε ένα άλλο εξαιτίας της διαφοράς των θερμοκρασιών τους ονομάζεται ***θερμότητα***.

Παρατηρήσεις:

1) Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι η θερμότητα είναι μία μορφή ενέργειας και έχει έννοια μόνο εφ' όσον διαρκεί η ροή της ενέργειας. Όταν σταματήσει η ροή αυτή δεν πρέπει να μιλάμε περί θερμότητας. Φανερό είναι ότι δεν έχει νόημα να μιλάμε περί θερμότητας που περιέχεται σε ένα σώμα αλλά μόνο για θερμότητα που προσφέρεται σε ένα σώμα ή που απάγεται από αυτό.

2) Δεν πρέπει να λέμε ότι το σώμα έχει θερμότητα ή ότι η θερμότητα του σώματος αυξήθηκε ή ελαττώθηκε. Το πιο σωστό είναι να λέμε ότι προσφέρεται θερμότητα στο σώμα ή απάγεται θερμότητα από αυτό.

Βέβαια πολλές φορές στην πράξη γίνεται χρήση του όρου «θερμότητα» χωρίς την απαιτούμενη ακριβολογία.

Όπου, σε βιβλία και στην πράξη αναφέρονται οι εκφράσεις «το σώμα έχει θερμότητα», «η θερμότητα του σώματος αυξήθηκε», «η θερμότητα του σώματος ελαττώθηκε» κ.ά. εννοούνται αντίστοιχα οι εκφράσεις «το σώμα έχει εσωτερική ενέργεια», «η εσωτερική ενέργεια του σώματος αυξήθηκε», «η εσωτερική ενέργεια του σώματος ελαττώθηκε» κ.ά.

3) Για να εμφανίζεται θερμότητα πρέπει τα σώματα να έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες.

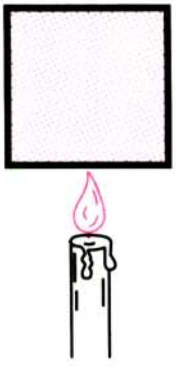
4) Η θερμοκρασία και η θερμότητα είναι δύο διαφορετικά μεγέθη.

5) Η φυσική ροή της θερμότητας είναι από το θερμότερο στο ψυχρότερο σώμα.

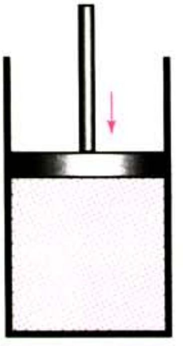
4.1.5 Τρόποι αυξήσεως θερμοκρασίας.

Η αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος, επομένως και της εσωτερικής του ενέργειας, δεν επιτυγχάνεται μόνο με την προσφορά σε αυτό θερμότητας, αλλά και με την προσφορά σε αυτό έργου. Το σχήμα 4.1γ παριστάνει δοχείο, με αέριο που το θερμαίνομε. Θα παρατηρήσομε ότι η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται, συνεπώς και η εσωτερική του ενέργεια.

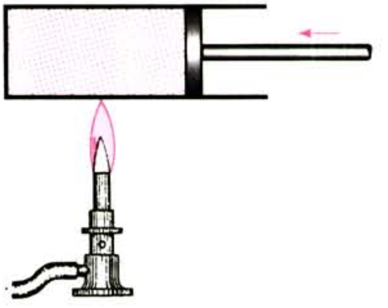
Το σχήμα 4.1δ εικονίζει δοχείο που περιέχει αέριο το οποίο συμπιέζομε επομένως του προσφέρομε έργο. Παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία του αερίου αυξάνεται, συνεπώς αυξάνεται και η εσωτερική του ενέργεια. Άρα η προσφορά έργου σε ένα σώμα μπορεί να αυξήσει τη θερμοκρασία του



Σχ. 4.1γ.



Σχ. 4.1δ.



Σχ. 4.1ε.

και κατά συνέπεια και την εσωτερική του ενέργεια.

Φανερό είναι ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, επομένως και της εσωτερικής ενέργειας ενός σώματος μπορεί να επιτευχθεί όταν εφαρμόζονται ταυτόχρονα και οι δύο παραπάνω τρόποι (σχ. 4.1ε).

***Σημείωση*:**

Δεν πρέπει να μας διαφεύγει ότι κατά τη διάρκεια της αλλαγής καταστάσεως σώματος (τήξη-πήξη-βρασμός) η θερμοκρασία του σώματος δεν μεταβάλλεται ενώ το σώμα προσλαμβάνει ή αποβάλλει θερμότητα.

4.1.6 Μονάδες θερμότητας.

Η θερμότητα, όπως είπαμε, είναι μία μορφή ενέργειας και γι' αυτό μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση της όλες οι μονάδες έργου (erg, Joule, kgfm, kWh κλπ.).

Μονάδα έργου στο S.I. είναι το 1 J, επομένως μονάδα θερμότητας στο S.I. είναι το 1 J.

***Παρατήρηση*:**

Στην πράξη έχουν επικρατήσει ιδιαίτερες μονάδες θερμότητας μεταξύ των οποίων είναι:

1) Η θερμίδα (calorie, 1 cal): θερμότητα μιας θερμίδας (1 cal) ονομάζεται η ποσότητα της θερμότητας που χρειάζεται να δοθεί σε 1 g αποσταγμένου νερού, για να ανέβει η θερμοκρασία του από 14,5°C σε 15,5 °C.

2) Η χιλιοθερμίδα (1 kcal): θερμότητα μιας χιλιοθερμίδας (1 kcal) ονομάζεται η ποσότητα της θερμότητας που χρειάζεται να δοθεί σε 1 kg απεσταγμένου νερού, για να ανυψωθεί η θερμοκρασία του από 14,5 °C σε 15,5 °C (1 kcal = 1000 cal).

***Προσοχή*:**

Ποσότητα θερμότητας μιας θερμίδας είναι ίση με 4,184 joule. Δηλαδή:

$$\boxed{1\,\text{cal} = 4{,}184\,\text{J}}$$

4.2 Θερμόμετρα. Θερμομετρικές κλίμακες.

4.2.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Δύο σώματα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία, αν και μόνο αν, έχουν την ίδια θερμοκρασία.

Επομένως:

- Όταν δύο σώματα θα έχουν ίσες θερμοκρασίες θα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία.
- Όταν δύο σώματα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία θα έχουν ίσες θερμοκρασίες.

2) Η φυσική ροή της θερμότητας είναι από το θερμότερο στο ψυχρότερο σώμα.

3) Αν δύο σώματα τα φέρομε σε θερμική επαφή μεταξύ τους για αρκετό χρόνο αποκτάνε, τελικά, ίσες θερμοκρασίες.

4) Δύο σώματα που το καθένα τους είναι σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο είναι και μεταξύ τους σε θερμική ισορροπία.

Αν το σώμα Α βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το σώμα Γ και το σώμα Β με το Γ, τότε και τα Α και Β βρίσκονται σε θερμική ισορροπία.

Η πρόταση αυτή ονομάζεται ***μηδενικός νόμος της θερμοδυναμικής***.

***Σημείωση*:**

Η σημασία του νόμου αυτού αναγνωρίστηκε μετά το χαρακτηρισμό των νόμων της θερμοδυναμικής ως πρώτου, δεύτερου και τρίτου. Επειδή ο μηδενικός νόμος είναι θεμελιώδης σε σχέση με τους υπόλοιπους έπρεπε να του δοθεί «νούμερο» μικρότερο του πρώτου, δεύτερου, τρίτου. Επομένως ο χαρακτηρισμός του ως «μηδενικός» δικαιολογείται απόλυτα.

5) Όταν αυξάνεται η θερμοκρασία των αερίων, αυξάνονται οι ταχύτητες των μορίων τους και, συνεπώς, οι κινητικές ενέργειές τους. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών προκαλεί αύξηση της κινητικής ενέργειας των ταλαντώσεων των δομικών λίθων.

6) Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός σώματος απαιτείται μέτρηση μεγεθών του που εξαρτώνται από αυτή.

Εφ' όσον όπως θα ξαναδούμε στη θερμοδυναμική, η θερμοκρασία ενός σώματος είναι μέτρο της μέσης τιμής της κινητικής ενέργειας των δομικών του λίθων (μορίων-ατόμων), θα μπορούσαμε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός αερίου, να καταφύγομε στη μέτρηση της ταχύτητας των μορίων του, ενώ για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός στερεού στη μέτρηση του πλάτους της ταλαντώσεως των δομικών λίθων του (μορίων, ατόμων, ιόντων). Αυτό όμως για πρακτικούς λόγους είναι σχεδόν αδύνατον και γι' αυτό καταφεύγομε για τη μέτρηση της θερμοκρασίας ενός σώματος στη μέτρηση άλλων μεγεθών του σώματος που εύκολα μετρώνται και των οποίων οι τιμές εξαρτώνται από τη θερμοκρασία του σώματος.

4.2.2 Θερμόμετρα.

Θερμόμετρα ονομάζομε τα όργανα με τα οποία μετρούμε τη θερμοκρασία των σωμάτων.

Η ***λειτουργία*** των θερμομέτρων στηρίζεται στο φαινόμενο, ότι ορισμένα ***φυσικά μεγέθη των σωμάτων***, όπως οι διαστάσεις ενός σώματος, η ηλεκτρική αντίσταση ενός υλικού, η πίεση ενός αερίου κ.ά. μεταβάλλονται, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους.

Επομένως για να κατασκευάσομε ένα θερμόμετρο, πρέπει να πάρομε ένα υλικό (***θερμομετρικό υλικό***), και να προσδιορίσομε ένα μέγεθός του που να μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία του. Στη συνέχεια να καθορίσομε τη σχέση που συνδέει τις τιμές του μεγέθους αυτού με τη θερμοκρασία.

Επειδή τα φυσικά μεγέθη που μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία είναι πολλά και το καθένα από αυτά μπορεί να αποτελέσει τη βάση λειτουργίας ενός τύπου θερμομέτρου, γι' αυτό και ***υπάρχουν πολλοί τύποι θερμομέτρων***, όπως για παράδειγμα θερμόμετρα διαστολής, αντιστάσεως, αερικά θερμόμετρα πιέσεως κ.ά.

Η λειτουργία των θερμομέτρων διαστολής, που είναι και ο πιο συνηθισμένος τύπος θερμομέτρων, στηρίζεται στο φαινόμενο της διαστολής ή συστολής των σωμάτων, δηλαδή στην αύξηση ή ελάττωση των διαστάσεων των σωμάτων, όταν αυξάνεται ή ελαττώνεται η θερμοκρασία τους. Η λειτουργία των θερμομέτρων αντιστάσεως στηρίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντιστάσεως των συρμάτων, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους.

Η λειτουργία των αερικών θερμομέτρων πιέσεως στηρίζεται στο φαινόμενο ότι η πίεση μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου αυξάνεται ή ελαττώνεται όταν η θερμοκρασία της αυξάνεται ή ελαττώνεται αντίστοιχα, με την προϋπόθεση βέβαια ***ότι ο όγκος του αερίου παραμένει σταθερός***.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας με τα θερμόμετρα στηρίζεται επάνω στην εξής γενική αρχή:

Η θερμότητα αυτόματα πηγαίνει πάντοτε από το θερμότερο στο ψυχρότερο σώμα, ώστε τα δύο σώματα να αποκτήσουν την ίδια θερμοκρασία (θερμική ισορροπία).

Για να μετρήσομε τη θερμοκρασία ενός σώματος, φέρνομε το θερμόμετρο σε θερμική επαφή με το σώμα, οπότε το θερμόμετρο και το σώμα γρήγορα ή αργά αποκτούν την ίδια θερμοκρασία.

Ευνόητο είναι ότι τα θερμόμετρα πρέπει να κατασκευάζονται έτσι, ώστε να απορροφούν όσο το δυνατόν μικρότερη ποσότητα θερμότητας από το σώμα εκείνου που μετράμε τη θερμοκρασία και αυτό για να μην προκαλούν αισθητή μεταβολή της θερμοκρασίας του.

***Παρατήρηση*:**

Δεν πρέπει να μας διαφεύγει ότι η θερμοκρασία ενός σώματος είναι ένας ***δείκτης*** της θερμικής καταστάσεώς του με τον οποίο μπορούμε να κρίνομε αν το σώμα αυτό είναι εξίσου θερμό ή θερμότερο ή ψυχρότερο από ένα άλλο (ότι έχει την ίδια ή μεγαλύτερη ή μικρότερη θερμοκρασία από ένα άλλο).

Επομένως δεν μπορούμε να πούμε για παράδειγμα ότι το σώμα που έχει θερμοκρασία 20 βαθμούς σε μία κλίμακα είναι δύο φορές θερμότερο από ένα άλλο που έχει θερμοκρασία 10 βαθμούς στην ίδια κλίμακα.

4.2.3 Θερμομετρικές κλίμακες.

Για να μπορούμε να μετράμε τη θερμοκρασία ενός σώματος με θερμόμετρο, πρέπει το θερμόμετρο να έχει βαθμονομημένη κλίμακα επάνω στην οποία θα διαβάζομε τη θερμοκρασία του σώματος.

Για τον καθορισμό μιας κλίμακας θερμοκρασιών εκλέγομε αυθαίρετα δύο σταθερές θερμοκρασίες και χαρακτηρίζομε την κάθε μία με έναν αριθμό.

– Κλίμακα Celsius (Κελσίου) ή εκατονταβάθμια κλίμακα.

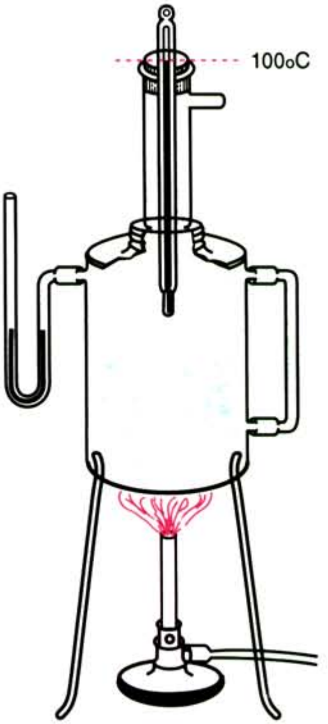
Ως σταθερές θερμοκρασίες της κλίμακας αυτής εκλέγονται οι εξής:

1) Η θερμοκρασία που έχει ο τηκόμενος πάγος (πάγος + νερό) υπό πίεση 76 cmHg και την οποία χαρακτηρίζομε ως ***θερμοκρασία μηδέν βαθμών Κελσίου*** (0°C).

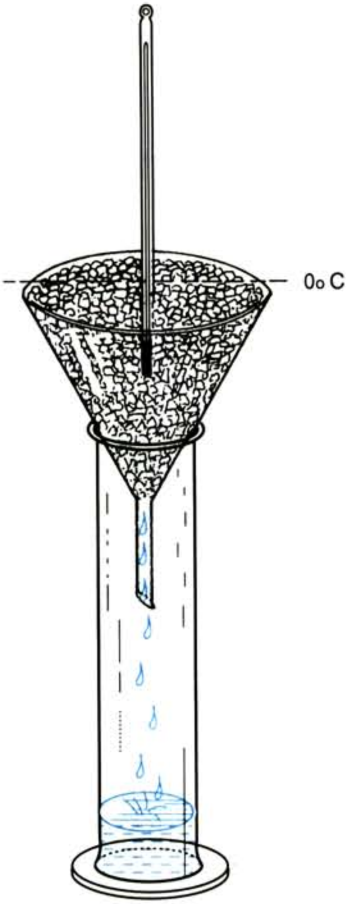
2) Η θερμοκρασία που έχουν οι ατμοί αποσταγμένου νερού, που βρίσκονται λίγο πάνω από αυτό, όταν αυτό βράζει υπό πίεση 76 cmHg και την οποία χαρακτηρίζομε ως ***θερμοκρασία εκατό βαθμών Κελσίου*** (100°C).

Σύμφωνα με αυτά η βαθμονόμηση ενός υδραργυρικού θερμομέτρου γίνεται ως εξής:

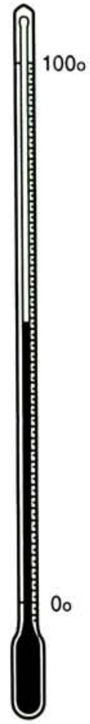
Τοποθετούμε (σχ. 4.2α) το θερμόμετρο στους ατμούς νερού που βράζει υπό πίεση 76 cmHg και σημειώνομε τον αριθμό 100 στο σημείο της κλίμακας, στο οποίο έχει φθάσει η στάθμη του υδραργύρου στο σωλήνα.



Σχ. 4.2α.



Σχ. 4.2β.



Σχ. 4.2γ.

Κατόπιν τοποθετούμε (σχ. 4.2β) το θερμόμετρο μέσα σε ένα δοχείο με πάγο που λειώνει (τηκόμενος πάγος) (ή μέσα σε δοχείο που περιέχει νερό και πάγο σε θερμική ισορροπία) υπό πίεση 76 cmHg. Η στήλη του υδραργύρου κατεβαίνει μέσα στο σωλήνα και σε κάποιο σημείο σταματά.

Σημειώνομε τον αριθμό 0 στο σημείο της κλίμακας, στο οποίο έχει φθάσει η στάθμη του υδραργύρου στο σωλήνα. Διαιρούμε (σχ. 4.2γ) το διάστημα από 0 μέχρι 100 σε 100 ίσα μέρη και έτσι έχομε την κλίμακα Κελσίου. Το καθένα από αυτά το ονομάζομε ***βαθμό Κελσίου*** (1°C).

Η κλίμακα του θερμομέτρου επεκτείνεται και κάτω από το 0 και πάνω από το 100. Οι θερμοκρασίες κάτω από το μηδέν θεωρούνται αρνητικές.

Όταν λέμε επί παραδείγματι ότι ο υδράργυρος στερεοποιείται στους −39°C, εννοούμε ότι ο υδράργυρος στερεοποιείται όταν η θερμοκρασία του γίνει 39 βαθμούς Κελσίου ***κάτω*** από το μηδέν. Όταν λέμε ότι η θερμοκρασία ενός σώματος είναι $-10\,^\circ C$, σημαίνει ότι η θερμοκρασία του σώματος είναι 10 βαθμούς Κελσίου κάτω από το μηδέν.

– Κλίμακα Fahrenheit (Φαρενάιτ).

Ως σταθερές θερμοκρασίες της κλίμακας αυτής εκλέγονται οι εξής:

1) Η θερμοκρασία που έχει ο τηκόμενος πάγος (πάγος + νερό) υπό πίεση 76 cmHg και την οποία χαρακτηρίζομε ως ***θερμοκρασία 32 βαθμών Fahrenheit*** ($32\,^\circ F$).

2) Η θερμοκρασία που έχουν οι ατμοί νερού, που βρίσκονται λίγο πάνω από αυτό, όταν αυτό βράζει υπό πίεση 76 cmHg και την οποία χαρακτηρίζομε ως ***θερμοκρασία 212 βαθμών Fahrenheit*** ($212\,^\circ F$).

Σύμφωνα με αυτά η βαθμονόμηση ενός υδραργυρικού θερμομέτρου γίνεται ως εξής:

Τοποθετούμε το θερμόμετρο στους ατμούς νερού που βράζει υπό πίεση 76 cmHg και σημειώνομε τον αριθμό 212 στο σημείο της κλίμακας, στο οποίο έχει φθάσει η στάθμη του υδραργύρου στο σωλήνα. Κατόπιν τοποθετούμε το θερμόμετρο μέσα σε ένα δοχείο με τηκόμενο πάγο ή μέσα σε δοχείο που περιέχει νερό και πάγο σε θερμική ισορροπία υπό πίεση 76 cmHg. Η στήλη του υδραργύρου κατεβαίνει μέσα στο σωλήνα και σε κάποιο σημείο σταματά.

Σημειώνομε τον αριθμό 32 στο σημείο της κλίμακας όπου έχει φθάσει η στάθμη του υδραργύρου στο σωλήνα.

Διαιρούμε το διάστημα από 32 μέχρι 212 σε 180 ίσα μέρη και έτσι έχομε την κλίμακα Fahrenheit (σχ. 4.2δ). Το κάθε ένα από αυτά τα ονομάζομε βαθμό Fahrenheit ($1\,^\circ F$). Η κλίμακα Fahrenheit χρησιμοποιείται κυρίως στη μεγάλη Βρετανία και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

– Κλίμακα Kelvin (Κέλβιν) (ή απόλυτη κλίμακα).

Ως σταθερές θερμοκρασίες της κλίμακας αυτής εκλέγονται οι εξής:

1) Η θερμοκρασία που έχει ο τηκόμενος πάγος (πάγος + νερό) υπό πίεση 76 cmHg και την οποία χαρακτηρίζομε ως θερμοκρασία 273 Kelvin (273 K).

2) Η θερμοκρασία που έχουν οι ατμοί νερού, που βρίσκονται λίγο πάνω από αυτό, όταν αυτό βράζει υπό πίεση 76 cmHg και την οποία χαρακτηρίζομε ως θερμοκρασία 373 Kelvin (373 K).

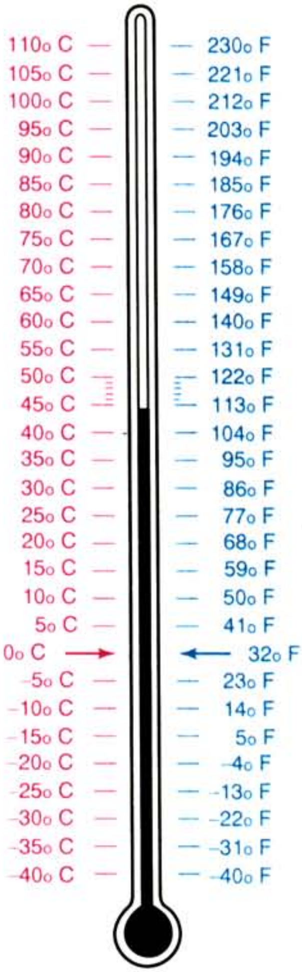
***Παρατήρηση*:**

Ένα Kelvin είναι ίσο με ένα βαθμό της κλίμακας Kelsius (σχ. 4.2ε).

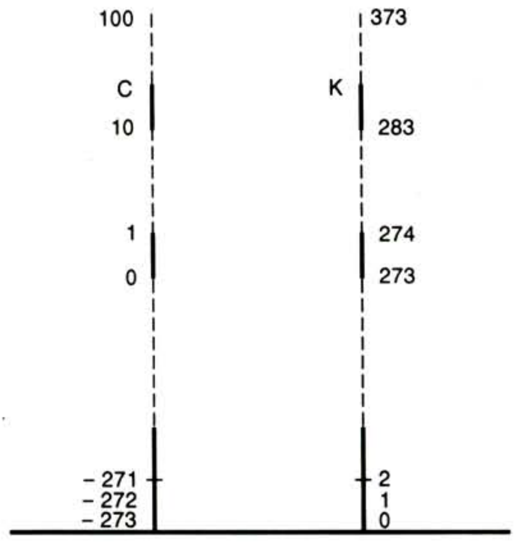
Η κλίμακα Kelvin έχει:

– Την ένδειξη 0, στη θερμοκρασία $-273\,^\circ C$.

– Την ένδειξη 273, στη θερμοκρασία $0\,^\circ C$.



Σχ. 4.2δ.



Σχ. 4.2ε.

– Την ένδειξη 373, στη θερμοκρασία 100°C.

Σύμφωνα με αυτά η θερμοκρασία T ενός σώματος στην κλίμακα αυτή συνδέεται με τη θερμοκρασία του Θ στην κλίμακα Κελσίου με τη σχέση:

$$\boxed{T = \Theta + 273}$$

Προσοχή:

1) Η θερμοκρασία ενός σώματος στην κλίμακα Kelvin (T) ονομάζεται απόλυτη θερμοκρασία του σώματος.

Η απόλυτη θερμοκρασία ενός σώματος συμβολίζεται με Τ.

2) Το μηδέν της κλίμακας Kelvin, δηλαδή η θερμοκρασία $-273^\circ C$, ονομάζεται απόλυτο μηδέν.

3) Η θερμοκρασία $-273^\circ C$ είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία που θεωρητικά μπορούμε να πετύχομε.

Στην πράξη η πιο χαμηλή θερμοκρασία, που πετύχαμε μέχρι σήμερα στα εργαστήρια, είναι 0,0044 K.

4.2.4 Μονάδες θερμοκρασίας.

Ως μονάδα μετρήσεως της θερμοκρασίας σε όλα τα συστήματα χρησιμοποιείται ο ένας βαθμός Κελσίου.

Ένας βαθμός Κελσίου ($1^\circ C$) είναι η θερμοκρασία, η οποία είναι ίση με το ένα εκατοστό της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σταθερών θερμοκρασιών ($0^\circ C$ και $100^\circ C$). Τονίζομε ότι 1 Kelvin είναι ίσο με ένα βαθμό της κλίμακας Kelsius.

– Αντιστοιχία θερμομετρικών κλιμάκων.

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\boxed{\frac{C}{5}=\frac{F-32}{9}} \quad \boxed{T=\Theta+273} \qquad (1)$$

4.3 Θερμική διαστολή των στερεών.

4.3.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Πειραματικά έχει βρεθεί ότι οι διαστάσεις σχεδόν όλων των στερεών σωμάτων μεταβάλλονται όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους.

Αυτό ερμηνεύεται ως εξής:

Κάθε άτομο ενός στερεού σώματος ταλαντώνεται γύρω από μία θέση (τη θέση ισορροπίας του).

Όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία ενός στερεού σώματος μεταβάλλεται το πλάτος των ταλαντώσεων των ατόμων του καθώς και η μέση απόσταση μεταξύ τους.

Η μεταβολή της μέσης αποστάσεως μεταξύ των ατόμων στερεού σώματος που προκαλείται όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του έχει ως επακόλουθο τη μεταβολή των διαστάσεών του.

Η μεταβολή των διαστάσεων ενός στερεού σώματος εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του, ονομάζεται ***θερμική διαστολή*** του.

Η θερμική διαστολή χαρακτηρίζεται θετική, όταν οι διαστάσεις του σώματος αυξάνουν όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Η θερμική διαστολή χαρακτηρίζεται αρνητική αν οι διαστάσεις του σώματος ελαττώνονται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του.

Προσοχή:

Όταν η θερμική διαστολή ενός σώματος είναι ομοιόμορφη προς όλες τις κατευθύνσεις του, το σώμα ονομάζεται ***θερμικά ισότροπο***.

Θα εξετάσομε τη θερμική διαστολή των σωμάτων που είναι θερμικά ισότροπα.

4.3.2 Θερμική γραμμική διαστολή στερεών.

α) Γενικά.

Η μεταβολή (αύξηση ή ελάττωση) μιας διαστάσεως ενός σώματος εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του ονομάζεται ***θερμική γραμμική διαστολή του σώματος***. Στη γραμμική διαστολή εξετάζομε συνήθως τη μεταβολή του μήκους ενός σώματος, του οποίου οι άλλες διαστάσεις είναι, σε σχέση με αυτό, μικρές, όπως για παράδειγμα μιας ράβδου, ενός σύρματος κλπ.

Έστω ότι μία ράβδος από κάποιο υλικό στη θερμοκρασία Θ_1 έχει μήκος L_1. Όταν η θερμοκρασία της ράβδου μεταβληθεί κατά $\Delta\Theta$ τότε το μήκος της μεταβάλλεται κατά ΔL.

Πειραματικά διαπιστώνομε ότι για μεταβολές $\Delta\Theta$ που δεν είναι πολύ μεγάλες, η γραμμική διαστολή ΔL της ράβδου είναι ανάλογη προς τη μεταβολή $\Delta\Theta$ της θερμοκρασίας της και ανάλογη προς το αρχικό μήκος της L_1. Δηλαδή:

$$\boxed{\Delta L = \alpha L_1 \cdot \Delta\Theta} \tag{1}$$

όπου: α μία σταθερά αναλογίας που εξαρτάται από το υλικό της ράβδου και ονομάζεται ***θερμικός συντελεστής γραμμικής διαστολής του υλικού της ράβδου***.

Επομένως αν το μήκος μιας ράβδου (γενικά ενός σώματος) σε θερμοκρασία Θ_1 είναι L_1 τότε σε θερμοκρασία $\Theta_2 = \Theta_1 + \Delta\Theta$ το μήκος της L_2 θα είναι:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_1 \Delta\Theta$$
$$L_2 - L_1 = \alpha \cdot L_1 (\Theta_2 - \Theta_1)$$
$$L_2 = L_1 + \alpha \cdot L_1 (\Theta_2 - \Theta_1)$$

$$\boxed{L_2 = L_1[1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)]} \tag{2}$$

Προσοχή:

Οι εξισώσεις (1) και (2) δεν είναι απόλυτα ακριβείς. Χρησιμοποιούνται στην πράξη γιατί είναι ακριβείς κατά μεγάλη προσέγγιση για μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας ($\Delta\Theta < 100^\circ C$).

Παρατήρηση:

Για τα θερμικά ισότροπα υλικά οι εξισώσεις (1) και (2) περιγράφουν τη μεταβολή οποιασδήποτε γραμμικής διαστάσεως.

*β) **Συντελεστής γραμμικής διαστολής**.*

Συντελεστής γραμμικής διαστολής (α) του υλικού μιας ράβδου ονομάζεται το πηλίκο της ΔL που παθαίνει η ράβδος η οποία έχει μήκος L, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία της κατά ΔΘ προς το γινόμενο του μήκους L επί τη μεταβολή της θερμοκρασίας ΔΘ η οποία την προκάλεσε. Δηλαδή:

$$\boxed{\alpha = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta\Theta}} \text{ (εξίσωση ορισμού)}$$

Σε όλα τα συστήματα μετρήσεως, η μονάδα μετρήσεως του συντελεστή γραμμικής διαστολής είναι το $1\ K^{-1}$.

*γ) **Φυσική σημασία του συντελεστή γραμμικής διαστολής**.*

΄Εχομε τη σχέση:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta\Theta} \tag{3}$$

Αντικαθιστώντας στη σχέση (3): L = 1 m και ΔΘ = 1 K θα έχομε:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{1\,m \cdot 1\,K} \tag{4}$$

Από τη σχέση (4) προκύπτει ότι ο συντελεστής (α) γραμμικής διαστολής υλικού είναι ίσος ***αριθμητικά*** με την επιμήκυνση ΔL μιας ράβδου από το υλικό αυτό, η οποία έχει μήκος 1 m (L = 1 m), όταν η θερμοκρασία της αυξηθεί κατά 1 K.

Αν αντικαταστήσομε στη σχέση (3) : L = 1 cm και ΔΘ = 1 K θα έχομε:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{1\,cm \cdot 1\,K} \tag{5}$$

Από τη σχέση (5) προκύπτει ότι ο συντελεστής (α) γραμμικής διαστολής υλικού είναι ίσος ***αριθμητικά*** με την επιμήκυνση ΔL μιας ράβδου από το υλικό αυτό, η οποία έχει μήκος 1 cm (L = 1 cm), όταν η θερμοκρασία της αυξηθεί κατά 1 K ($\Delta\Theta$ = 1 K).

Γενικά ο συντελεστής της γραμμικής διαστολής ενός υλικού ***είναι ίσος αριθμητικά με την επιμήκυνση την οποία παθαίνει ράβδος από το υλικό αυτό που έχει μήκος ίσο με τη μονάδα μήκους, όταν η θερμοκρασία της αυξηθεί κατά 1°C*** ή ***1 K***.

Όταν για παράδειγμα λέμε ότι ο συντελεστής της γραμμικής διαστολής του σιδήρου είναι $\alpha = 12 \times 10^{-6}\ K^{-1}$, εννοούμε ότι αν η θερμοκρασία μιας ράβδου από σίδηρο που έχει μήκος 1 cm (L = 1 cm) αυξηθεί κατά 1 K ($\Delta\Theta$ = 1 K) η επιμήκυνσή της θα είναι ίση με 12×10^{-6} cm ($\Delta L = 12 \times 10^{-6}$ cm). Εάν το μήκος της σιδερένιας ράβδου είναι 1 m (L = 1 m), η επιμήκυνσή της θα είναι ίση με 12×10^{-6} m ($\Delta L = 12 \times 10^{-6}$ m) όταν η θερμοκρασία της αυξηθεί κατά 1 K.

δ) Γενικές παρατηρήσεις.

1) Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής ενός σώματος εξαρτάται από το υλικό του σώματος (πίνακας 4.3.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.3.1
Γραμμικοί συντελεστές διαφόρων υλικών

Υλικό	**Γραμ. Συντ. Διασ. K^{-1}**
Ψευδάργυρος	$36 . 10^{-6}$
Μόλυβδος	$29 . 10^{-6}$
Αργίλιο	$23 . 10^{-6}$
Άργυρος	$19 . 10^{-6}$
Ορείχαλκος	$19 . 10^{-6}$
Χαλκός	$16 . 10^{-6}$
Σίδηρος	$12 . 10^{-6}$
Μπετόν	$12 . 10^{-6}$
Χάλυβας	$11 . 10^{-6}$
Λευκόχρυσος	$9 . 10^{-6}$
Γυαλί	$9 . 10^{-6}$
Πορσελάνη	$4 . 10^{-6}$
Κράμα Invar	$0{,}9 . 10^{-6}$
Χαλαζίας	$0{,}5 . 10^{-6}$

2) Για κάθε υλικό, η τιμή του (α) εξαρτάται και από την αρχική θερμοκρασία του (Θ_1) και από το εύρος ($\Delta\Theta$) της μεταβολής της θερμοκρασίας.

Σημειώνομε επίσης ότι το (α) είναι συνήθως πολύ μικρός αριθμός, ακόμη και για μια θερμοκρασιακή μεταβολή 100°C. Γενικά στην πράξη ο συντελεστής γραμμικής διαστολής (α) ενός υλικού θεωρείται σταθερός για μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Οι εξισώσεις (1) και (3) ισχύουν με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του υλικού δεν μεταβάλλεται κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας.

3) Σχεδόν όλα τα μέταλλα έχουν θετικό ($\alpha > 0$) συντελεστή γραμμικής διαστολής γι' αυτό το μήκος των μεταλλικών ράβδων αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους.

4) Μερικά υλικά όπως το καουτσούκ έχουν αρνητικό ($\alpha < 0$) συντελεστή γραμμικής διαστολής, γι' αυτό συστέλλονται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους.

5) Επίσης ορισμένα υλικά έχουν συντελεστή γραμμικής διαστολής πρακτικά μηδέν ($\alpha = 0$) γι' αυτό οι διαστάσεις τους δεν μεταβάλλονται, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία τους. Για παράδειγμα το κράμα χάλυβα και νικελίου το οποίο ονομάζεται Invar (64% F_2 και 36% Ni) έχει συντελεστή γραμμικής διαστολής πρακτικά μηδέν.

Επίσης ο χαλαζίας (Quartz) και το γυαλί Pyrex έχουν πάρα πολύ μικρό συντελεστή γραμμικής διαστολής.

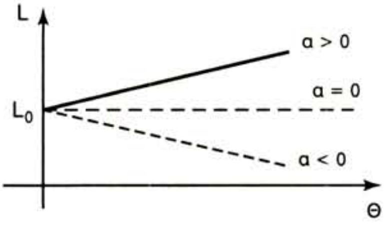
6) Αν το μήκος ράβδου στη θερμοκρασία $0\,^\circ C$ είναι L_0, τότε στη θερμοκρασία Θ το μήκος της L θα γίνει:

$$\boxed{L = L_0(1+\alpha\Theta)} \qquad (6)$$

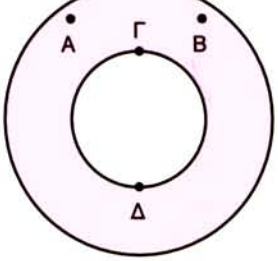
Η παράσταση ($1 + \alpha\Theta$) ονομάζεται ***διώνυμο της γραμμικής διαστολής*** της ράβδου.

Στην περίπτωση που ο συντελεστής γραμμικής διαστολής (α) θεωρηθεί ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία, η γραφική παράσταση της σχέσεως $L = L_0\,(1 + \alpha\Theta)$ θα είναι ευθεία γραμμή (σχ. 4.3α) γιατί η εξίσωση είναι πρώτου βαθμού.

7) Οι σχέσεις (1) και (6) ισχύουν και για τη μεταβολή της αποστάσεως



Σχ. 4.3α.



Σχ. 4.3β.

δύο οποιωνδήποτε σημείων ενός στερεού σώματος, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του, οποιοδήποτε σχήμα και αν έχει το σώμα. Για παράδειγμα κατά τη θέρμανση της επιφάνειας του σχήματος 4.3β αυξάνεται ***σύμφωνα*** με τη σχέση (1) όχι μόνο η απόσταση των σημείων Α και Β αλλά και η απόσταση των σημείων Γ και Δ, δηλαδή και η διάμετρος της οπής.

8) Μερικά υλικά έχουν τον ίδιο συντελεστή γραμμικής διαστολής. Αυτό έχει μεγάλη σημασία στις διάφορες κατασκευές. Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του σιδήρου είναι ίσος με το συντελεστή γραμμικής διαστολής του σκυροκονιάματος. Γι' αυτό το σιδηροπαγές σκυροκονίαμα (μπετόν αρμέ) συστέλλεται και διαστέλλεται ως ένα συμπαγές σύνολο, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες.

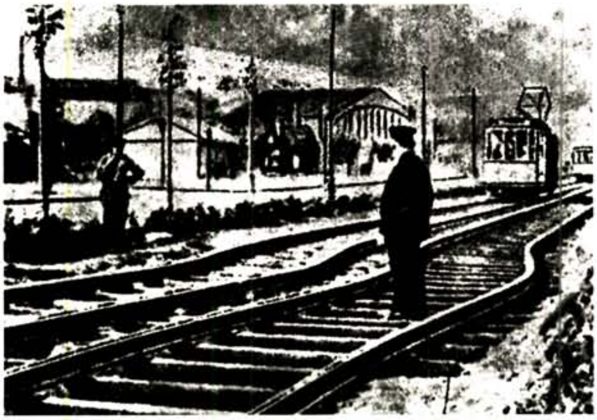
Το γυαλί και ο λευκόχρυσος έχουν τον ίδιο συντελεστή γραμμικής διαστολής. Αυτό επιτρέπει τη συγκόλληση συρμάτων λευκοχρύσου στο γυαλί, γιατί δεν ξεκολλάνε όταν το σύνολο διαστέλλεται ή συστέλλεται.

ε) Εφαρμογές της γραμμικής διαστολής.

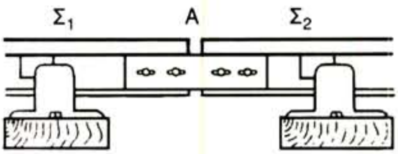
Αναπτυσσόμενες δυνάμεις λόγω θερμικής διαστολής και συστολής. Οι δυνάμεις, που αναπτύσσονται κατά τις διαστολές και συστολές των σωμάτων, όταν θερμαίνονται ή ψύχονται, είναι ίσες με εκείνες τις οποίες θα έπρεπε να εξασκηθούν επάνω τους για να επιφέρουν ***μηχανικά τις ίδιες διαστολές ή συστολές τους (με έλξη ή θλίψη)***.

Όπως είναι γνωστό, οι δυνάμεις που χρειάζονται για να προκαλέσομε μηχανικά διαστολές και συστολές των στερεών σωμάτων είναι πολύ μεγάλες. Επομένως και οι δυνάμεις τις οποίες προκαλούν τα σώματα κατά τις θερμικές τους διαστολές και συστολές είναι επίσης πολύ μεγάλες.

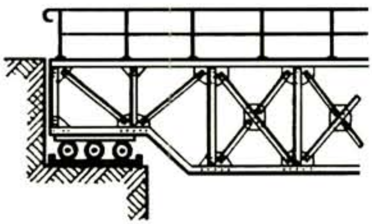
Για να αποφύγομε τις παραμορφώσεις (σχ. 4.3γ) των σιδηροτροχιών, επάνω στις οποίες κινούνται τα τρένα, δεν τις κατασκευάζομε συνεχείς, αλλά τις χωρίζομε σε τμήματα με ενδιάμεσα κενά Α (σχ. 4.3δ). Με αυτά εξουδετερώνονται τα δυσάρεστα αποτελέσματα της διαστολής η οποία προ-



Σχ. 4.3γ.



Σχ. 4.3δ.



Σχ. 4.3ε.

καλείται στις υψηλές θερμοκρασίες του καλοκαιριού. Τις σιδερένιες γέφυρες δεν τις στερεώνομε και στα δύο άκρα τους, αλλά το ένα άκρο τους κινείται ελεύθερα επάνω σε τροχούς (σχ. 4.3ε).

Η ανομοιόμορφη θέρμανση εύθραυστου σώματος προκαλεί άνισες διαστολές και από τις δυνάμεις που προκύπτουν το σώμα σπάζει. Αν μέσα σε γυάλινο ποτήρι ρίξομε ζεστό νερό, μπορεί να σπάσει.

Αυτό οφείλεται στο ό,τι ***το γυαλί είναι κακός αγωγός της θερμότητας*** και τα άμεσα θερμαινόμενα μέρη του θερμαίνονται πιο γρήγορα και λόγω διαστολής, τείνουν να αυξηθούν περισσότερο από τα γειτονικά τους που θερμαίνονται πιο αργά.

Δοχείο από χαλαζία ή Pyrex δεν σπάζει κατά τη μεταβολή της θερμοκρασίας του, γιατί έχει μικρό συντελεστή διαστολής.

***Σημείωση*:**

Σε πολλές περιπτώσεις οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τις θερμικές διαστολές και συστολές χρησιμοποιούνται επωφελώς.

Τα σιδερένια στεφάνια των τροχών των αμαξών όταν θερμαίνονται διαστέλλονται, οπότε μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα γύρω από τους τροχούς. Κατόπιν, όταν συσταλούν με ψύξη, συσφίγγουν τα διάφορα ξύλινα τμήματα από τα οποία αποτελείται ο τροχός.

Επίσης με θέρμανση σιδερένιων δοκών μπορούμε, με τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τη διαστολή τους, να επαναφέρομε στην κατακόρυφη θέση τους εκτοπισμένους τοίχους οικοδομών.

4.3.3 Θερμική επιφανειακή διαστολή στερεών.

Η μεταβολή (αύξηση ή ελάττωση) δύο διαστάσεων ενός σώματος εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του ονομάζεται ***θερμική επιφανειακή διαστολή του σώματος***. Με άλλα λόγια θερμική επιφανειακή διαστολή ενός στερεού σώματος ονομάζεται η μεταβολή (αύξηση ή ελάττωση) της επιφάνειας του σώματος εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του.

Στην επιφανειακή διαστολή εξετάζομε συνήθως τη μεταβολή της επιφάνειας ενός σώματος που έχει μικρό πάχος, π.χ. μιας πλάκας.

Έστω ότι μία πλάκα από κάποιο υλικό στη θερμοκρασία Θ_1 έχει εμβαδόν S_1. Όταν η θερμοκρασία της πλάκας μεταβληθεί κατά $\Delta\Theta$ τότε το εμβαδόν της μεταβάλλεται κατά ΔS.

Πειραματικά διαπιστώνεται ότι για μεταβολές $\Delta\Theta$ που δεν είναι πολύ μεγάλες ($\Delta\theta < 100\,^\circ C$) πρακτικώς η επιφανειακή διαστολή ΔS της πλάκας είναι ανάλογη προς τη μεταβολή $\Delta\Theta$ της θερμοκρασίας και ανάλογη προς το αρχικό εμβαδόν της S_1. Δηλαδή:

$$\boxed{\Delta S = \beta \cdot S_1 \cdot \Delta\Theta}$$

όπου: β μία σταθερά αναλογίας που εξαρτάται κυρίως από το υλικό της πλάκας και ονομάζεται ***συντελεστής επιφανειακής διαστολής του υλικού της***.

Επομένως αν το εμβαδόν μιας πλάκας σε θερμοκρασία Θ_1 είναι S_1, τότε σε θερμοκρασία $\Theta_2 = \Theta_1 + \Delta\Theta$ το εμβαδόν της S_2 θα είναι:

$$\boxed{S_2 = S_1\,[1 + \beta\,(\Theta_2 - \Theta_1)]}$$

Προσοχή:

1) Σε όλα τα συστήματα μετρήσεως η μονάδα μετρήσεως του συντελεστή (β) της επιφανειακής διαστολής είναι το $1\ K^{-1}$.

2) Ο συντελεστής (β) της επιφανειακής διαστολής ενός υλικού είναι διπλάσιος του συντελεστή (α) της γραμμικής διαστολής του.

$$\boxed{\beta = 2\alpha}$$

3) Ό,τι ισχύει για το συντελεστή (α) ενός υλικού ισχύει και για τον (β).

4) Ό,τι ισχύουν για τις εξισώσεις:

$$\Delta L = \alpha L_1 \Delta\Theta \quad \text{και} \quad L_2 = L_1 [1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)]$$

Ισχύουν και για τις εξισώσεις:

$$\Delta S = \beta \cdot S_1 \cdot \Delta\Theta \quad \text{και} \quad S_2 = S_1 [1 + \beta(\Theta_2 - \Theta_1)]$$

4.3.4 Θερμική κυβική διαστολή στερεών (διαστολή όγκου).

Η μεταβολή (αύξηση ή ελάττωση) των τριών διαστάσεων ενός στερεού σώματος εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του ονομάζεται ***θερμική κυβική διαστολή του σώματος***. Με άλλα λόγια θερμική κυβική διαστολή ενός στερεού σώματος ονομάζεται η μεταβολή (αύξηση ή ελάττωση) του όγκου του σώματος εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας του.

Έστω ότι ένα σώμα από κάποιο υλικό στη θερμοκρασία Θ_1 έχει όγκο V_1. Όταν η θερμοκρασία του σώματος μεταβληθεί κατά $\Delta\Theta$, τότε ο όγκος του μεταβάλλεται κατά ΔV. Πειραματικά διαπιστώνεται ότι για μεταβολές $\Delta\Theta$ που δεν είναι πολύ μεγάλες ($\Delta\Theta < 100^\circ C$) η διαστολή ΔV του σώματος είναι ανάλογη προς τη μεταβολή $\Delta\Theta$ της θερμοκρασίας του και ανάλογη προς τον αρχικό όγκο του V_1. Δηλαδή:

$$\boxed{\Delta V = \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta\Theta}$$

όπου: γ μία σταθερά αναλογίας που εξαρτάται κυρίως από το υλικό του σώματος και ονομάζεται ***συντελεστής κυβικής διαστολής του υλικού του***.

Επομένως αν ο όγκος ενός σώματος σε θερμοκρασία Θ_1 είναι V_1, τότε σε θερμοκρασία $\Theta_2 = \Theta_1 + \Delta\Theta$ ο όγκος του V_2 θα είναι:

$$\boxed{V_2 = V_1[1 + \gamma(\Theta_2 - \Theta_1)]}$$

Προσοχή:

1) Σε όλα τα συστήματα μετρήσεως η μονάδα μετρήσεως του συντελεστή (γ) της κυβικής διαστολής είναι το $1\ K^{-1}$.

2) Ο συντελεστής (γ) της κυβικής διαστολής υλικού είναι τριπλάσιος του συντελεστή (α) της γραμμικής διαστολής του:

$$\boxed{\gamma = 3\alpha}$$

3) Ό,τι ισχύει για το συντελεστή (α) ενός υλικού ισχύει και για τον (γ).

δ) Ότι ισχύουν για τις εξισώσεις:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_1 \cdot \Delta\Theta \quad \text{και} \quad L_2 = L_1 \, [1 + \alpha \, (\Theta_2 - \Theta_1)]$$

Ισχύουν και για τις εξισώσεις:

$$\Delta V = \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta\Theta \quad \text{και} \quad V_2 = V_1 \, [1 + \gamma \, (\Theta_2 - \Theta_1)]$$

Παρατήρηση:

Κατά την εφαρμογή των εξισώσεων $\Delta V = \gamma \cdot V_1 \Delta\Theta$ και $V_2 = V_1 [1+\gamma(\Theta_2-\Theta_1)]$ δεν λαμβάνεται υπόψη αν το σώμα στο εσωτερικό του έχει κοιλότητα. Με άλλα λόγια η μεταβολή του όγκου ενός στερεού, είτε αυτό περιέχει στο εσωτερικό του κάποια κοιλότητα είτε όχι είναι η ίδια σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Επομένως κατά τη διαστολή ενός δοχείου, ο όγκος της κοιλότητας αυτού αυξάνεται τόσο, όσο εάν ο χώρος της κοιλότητας ήτανε πλήρης από το υλικό του δοχείου.

4.4 Κυβική διαστολή των υγρών.

4.4.1 Πραγματική και φαινόμενη διαστολή των υγρών.

Κυβική διαστολή ενός υγρού ονομάζεται γενικά η μεταβολή (αύξηση ή ελάττωση) του όγκου του εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας.

Σημειώνομε και εδώ ότι κάθε δοχείο διαστέλλεται κατά τέτοιο τρόπο όπως όταν ολόκληρη «η χωρητικότητά» του ήταν πλήρης από το υλικό από το οποίο αποτελείται.

Όταν θερμαίνομε ένα υγρό, κατ' ανάγκη θερμαίνεται και το δοχείο που το περιέχει.

Επομένως όταν θερμαίνομε ένα υγρό, εκτός από τη διαστολή του έχομε και διαστολή του δοχείου που το περιέχει.

Μέσα στο γυάλινο δοχείο Δ (σχ. 4.4α) που έχει το σωλήνα Σ, ρίχνομε ένα χρωματιστό υγρό, για παράδειγμα πράσινο οινόπνευμα, μέχρι τη θέση Α. Αν θερμάνομε το γυάλινο δοχείο Δ, θα παρατηρήσομε στην αρχή ότι το υγρό στο σωλήνα Σ κατεβαίνει από τη θέση Α στη θέση Β και κατόπιν ανεβαίνει στη θέση Γ.

Αυτά ερμηνεύονται ως εξής:

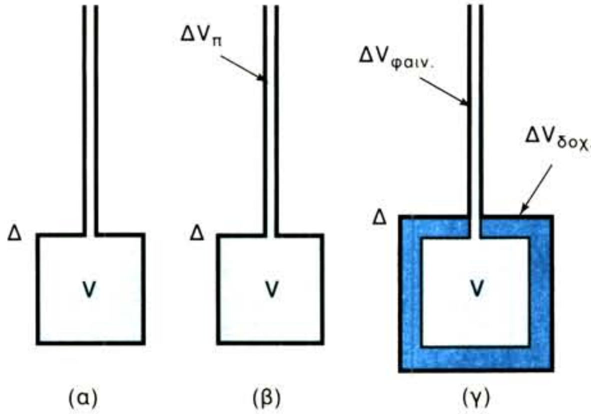
Αρχικά θερμαίνεται το δοχείο και διαστέλλεται.

Δηλαδή αρχικά μεγαλώνει ο όγκος του δοχείου, επομένως και η χωρητικότητά του. Γι' αυτό αρχικά κατεβαίνει η στάθμη του υγρού από τη θέση Α στη θέση Β.

Στη συνέχεια θερμαίνεται το υγρό το οποίο διαστέλλεται ***περισσότερο*** από το δοχείο. Τότε η στάθμη του υγρού ανεβαίνει στο σημείο Γ.

Επειδή όταν ένα υγρό θερμαίνεται κατ' ανάγκη θερμαίνεται και το δο-

Σχ. 4.4α.



Σχ. 4.4β.

χείο που το περιέχει, στο θερμαινόμενο υγρό παρατηρούμε δύο διαστολές:

1) Την πραγματική ή απόλυτη και

2) τη φαινόμενη ή σχετική.

Πραγματική (ή απόλυτη) διαστολή ενός υγρού ονομάζομε τη διαστολή την οποία υφίσταται το υγρό υπολογίζοντας ***και*** τη διαστολή που δημιουργείται στο δοχείο όπου αυτό περιέχεται.

Φαινόμενη (ή σχετική) διαστολή ενός υγρού ονομάζομε τη διαστολή την οποία υφίσταται το υγρό όταν δεν υπολογίζομε τη διαστολή του δοχείου στο οποίο περιέχεται.

Το υγρό που περιέχεται [σχ. 4.4β (α)] στο δοχείο Δ στη θερμοκρασία Θ έχει όγκο V. Επίσης V είναι και ο όγκος (η χωρητικότητα) του δοχείου στη θερμοκρασία αυτή.

Αν αυξήσομε τη θερμοκρασία Θ κατά ΔΘ και υποθέσομε ότι το δοχείο [σχ. 4.4β (β)] δεν διαστέλλεται, τότε ο όγκος V του υγρού αυξάνεται, έστω κατά $\Delta V_{\pi\rho}$.

Η αύξηση αυτή $\Delta V_{\pi\rho}$ του όγκου του υγρού είναι η πραγματική ή απόλυτη διαστολή την οποία υπέστη το υγρό που είχε όγκο V στη θερμοκρασία Θ_1 όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά ΔΘ.

Στην πραγματικότητα όμως κατά τη θέρμανση του δοχείου Δ και του υγρού κατά $\Delta\Theta$, διαστέλλεται [σχ. 4.4β (γ)] και το δοχείο κατά $\Delta V_{\delta o\chi}$ και γι' αυτό φαίνεται ότι ο όγκος V του υγρού αυξήθηκε κατά $\Delta V_{\varphi\alpha\iota\nu}$.

Η αύξηση αυτή ($\Delta V_{\varphi\alpha\iota\nu}$) του όγκου του υγρού είναι η φαινομενική διαστολή την οποία υπέστη το υγρό που είχε όγκο V στη θερμοκρασία Θ, όταν η θερμοκρασία αυξήθηκε κατά ΔΘ.

4.4.2 Σχέσεις που ισχύουν στην πραγματική (ή απόλυτη) διαστολή των υγρών.

Αν στη θερμοκρασία Θ_1 ένα υγρό έχει όγκο V_1 και αυξήσομε τη θερμοκρασία του κατά ΔΘ, τότε η πραγματική αύξηση του όγκου του $\Delta V_{\pi\rho}$ είναι τέτοια, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\boxed{\Delta V_{\pi\rho} = K_{\pi\rho} \cdot V_1 \cdot \Delta\Theta} \qquad (1)$$

όπου: $K_{\pi\rho}$ ένας συντελεστής αναλογίας ο οποίος ονομάζεται ***απόλυτος συντελεστής κυβικής διαστολής*** του υγρού και εξαρτάται κυρίως από τη φύση του υγρού.

Επομένως αν ο πραγματικός όγκος ενός υγρού σε θερμοκρασία Θ_1 είναι V_1, τότε σε θερμοκρασία $\Theta_2 = \Theta_1 + \Delta\Theta$ ο πραγματικός όγκος του $V_{2,\pi\rho}$ θα είναι:

$$\boxed{V_{2,\pi\rho} = V_1[1 + K_\pi(\Theta_2 - \Theta_1)]} \cdot \qquad (2)$$

Παρατηρήσεις:

1) Σε όλα τα συστήματα μετρήσεως η μονάδα μετρήσεως του απόλυτου συντελεστή κυβικής διαστολής των υγρών είναι το 1 K^{-1}.

2) Η σχέση (2) ισχύει με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής $K_{\pi\rho}$ ενός υγρού είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία, δηλαδή είναι ο ίδιος για όλες τις θερμοκρασίες.

Στην πραγματικότητα όμως ο $K_{\pi\rho}$ ενός υγρού δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Στην πράξη συνήθως οι μεταβολές της θερμοκρασίας ενός υγρού είναι τέτοιες ώστε ο $K_{\pi\rho}$ του υγρού να θεωρείται σταθερός, δηλαδή ανεξάρτητος της θερμοκρασίας.

4.4.3 Σχέσεις που ισχύουν στη φαινόμενη (ή σχετική) διαστολή των υγρών.

Αν στη θερμοκρασία Θ ένα υγρό έχει όγκο V και αυξήσομε τη θερμοκρασία του κατά ΔΘ, τότε η φαινόμενη (ή σχετική) αύξηση του όγκου του

ΔV_φ, είναι τέτοια ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\boxed{\Delta V_\varphi = K_\varphi \cdot V \cdot \Delta\Theta} \tag{1}$$

όπου: K_φ ένας συντελεστής αναλογίας ο οποίος ονομάζεται ***φαινόμενος (ή σχετικός) συντελεστής κυβικής διαστολής τοὺ υγρού***.

Επομένως αν ο φαινόμενος όγκος ενός υγρού σε θερμοκρασία Θ_1 είναι V_1 τότε σε θερμοκρασία $\Theta_2 = \Theta_1 + \Delta\Theta$ ο φαινόμενος όγκος του $V_{2,\varphi}$ θα είναι:

$$\boxed{V_{2,\varphi} = V_1[1 + K_\varphi(\Theta_2 - \Theta_1)]} \tag{2}$$

Παρατηρήσεις:

1) Σε όλα τα συστήματα μετρήσεως η μονάδα μετρήσεως του φαινόμενου συντελεστή κυβικής διαστολής των υγρών είναι το 1 K^{-1}.

2) Η σχέση (2) ισχύει με την προϋπόθεση ότι ο συντελεστής K_φ ενός υγρού είναι ανεξάρτητος από τη θερμοκρασία, δηλαδή είναι ο ίδιος για όλες τις θερμοκρασίες.

Στην πραγματικότητα όμως ο K_φ ενός υγρού δεν είναι σταθερός, αλλά μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία. Στην πράξη συνήθως οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι τέτοιες, ώστε ο K_φ ενός υγρού να θεωρείται σταθερός.

4.4.4 Σχέση συντελεστών.

Είναι ευνόητο ότι η πραγματική (απόλυτη) αύξηση $\Delta V_{\pi\varrho}$ του όγκου του υγρού θα είναι ίση με το άθροισμα της σχετικής αυξήσεως ΔV_φ του όγκου του υγρού και της αυξήσεως $\Delta V_{\delta o\chi}$ του όγκου του δοχείου που το περιέχει. Δηλαδή:

$$\boxed{\Delta V_{\pi\varrho} = \Delta V_\varphi + \Delta V_{\delta o\chi}} \tag{1}$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\Delta V_{\pi\varrho} = K_{\pi\varrho} V \cdot \Delta\Theta \tag{2}$$

$$\Delta V_\varphi = K_\varphi \cdot V \cdot \Delta\Theta \tag{3}$$

$$\Delta V_{\delta o\chi} = K_{\delta o\chi} \cdot V \cdot \Delta\Theta \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (1), (2), (3) και (4) προκύπτει:

$$\boxed{K_{\pi\varrho} = K_{\varphi} + K_{\delta o\chi}} \qquad (5)$$

Παρατηρήσεις:

1) Με τη σχέση (5) μπορούμε να υπολογίσομε τον απόλυτο συντελεστή διαστολής ($K_{\pi\varrho}$) ενός υγρού, αν είναι γνωστός ο συντελεστής φαινόμενης διαστολής του (K_{φ}) και ο συντελεστής κυβικής διαστολής του δοχείου ($K_{\delta o\chi}$), που το περιέχει.

2) Ο απόλυτος συντελεστής διαστολής ενός υγρού είναι συνήθως μεγαλύτερος από τους κυβικούς συντελεστές διαστολής πολλών στερεών σωμάτων.

4.5 Διαστολή του νερού (ανώμαλη διαστολή του νερού).

Το νερό παρουσιάζει ανωμαλία κατά τη διαστολή του και συγκεκριμένα: ***μία μάζα νερού συστέλλεται συνεχώς όταν θερμαίνεται από 0°C έως 4°C*** ενώ όταν θερμαίνεται από τους 4°C και πάνω ***διαστέλλεται*** κανονικά. Επομένως μία μάζα m νερού ***αποκτά τον πιο μικρό όγκο της, όταν η θερμοκρασία της είναι 4°C***.

Επειδή:

1) Η πυκνότητα της μάζας m του νερού δίνεται από τη σχέση:

$\varrho = \dfrac{m}{V}$ και

2) ο όγκος V της μάζας m παίρνει την πιο μικρή τιμή, όταν η θερμοκρασία της είναι 4°C, γι' αυτό η πυκνότητα ρ του νερού παίρνει την πιο μεγάλη τιμή της, όταν η θερμοκρασία του είναι 4°C.

Δηλαδή ***το νερό έχει την πιο μεγάλη πυκνότητα στους 4°C***.

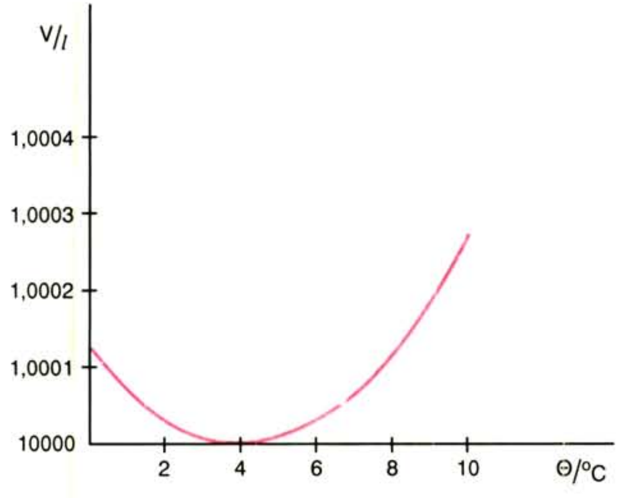
Η μεταβολή του όγκου ποσότητας νερού 1 kg (m = 1 kg) σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία φαίνεται στο διάγραμμα του σχήματος 4.5α ενώ της πυκνότητας στο σχήμα 4.5β.

Παρατηρήσεις:

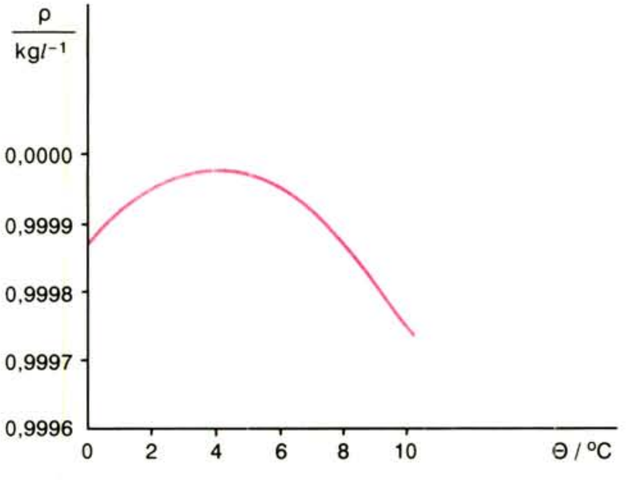
1) Ο όγκος μιας μάζας m του νερού ελαττώνεται συνεχώς, όταν αυτή θερμαίνεται από 0°C ως 4°C, και αυξάνεται όταν θερμαίνεται από τους 4°C και πάνω.

Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής κυβικής διαστολής του νερού είναι αρνητικός μεταξύ των θερμοκρασιών 0°C και 4°C και θετικός από τους +4°C και πάνω.

Στη θερμοκρασία των 4°C ο συντελεστής κυβικής διαστολής του νερού



Σχ. 4.5α.



Σχ. 4.5β.

μηδενίζεται. Αυτό σημαίνει ότι για μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας μιας μάζας m νερού, γύρω από τη θερμοκρασία των 4°C, ο όγκος της δεν μεταβάλλεται.

2) Η ανωμαλία διαστολής του νερού έχει μεγάλη βιολογική σημασία. Επειδή το νερό στη θερμοκρασία των 4°C έχει τη μέγιστη πυκνότητά του, γι' αυτό κοντά στον πυθμένα των θαλασσών και των λιμνών αυτό διατηρείται σε θερμοκρασία 4°C και όταν ακόμη το νερό της επιφάνειάς τους έχει γί-

νει πάγος. Αυτό έχει ως με αποτέλεσμα να μην καταστρέφεται η υδρόβια ζωή.

4.6 Νόμοι των ιδανικών αερίων.

4.6.1 Γνώσεις στηρίξεως.

α) Παράμετροι καταστάσεως αερίου (ή χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη ενός αερίου).

Όταν η πίεση (P), η πυκνότητα (ρ) και η θερμοκρασία (T) μιας ορισμένης ποσότητας (m) αερίου έχουν η κάθε μία σταθερή τιμή σε όλη την έκταση του όγκου του, τότε λέμε ότι το αέριο βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας.

Επομένως μια κατάσταση ισορροπίας μιας ορισμένης μάζας (m) ενός αερίου καθορίζεται από τη θερμοκρασία (T) του αερίου, την πίεσή του (P) και τον όγκο (V) του αερίου.

Η θερμοκρασία T, η πίεση P και ο όγκος V ορισμένης μάζας m ενός αερίου ονομάζονται παράμετροι καταστάσεως του αερίου (ή καταστατικές μεταβλητές ή καταστατικές συντεταγμένες).

Σημειώνομε ότι όταν λέμε κατάσταση ενός αερίου εννοούμε μια κατάσταση ισορροπίας του.

Όταν μια από τις πιο πάνω παραμέτρους ενός αερίου μεταβληθεί, τότε παρατηρείται μεταβολή της μιας ή και των δύο άλλων παραμέτρων του. Και τότε λέμε ότι άλλαξε η κατάσταση του αερίου.

Κατά τη μελέτη των αερίων θα εξετάσομε τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στις παράμετρες καταστάσεως ενός αερίου, δηλαδή τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα στα χαρακτηριστικά φυσικά μεγέθη ενός αερίου (P, V, T).

Προσοχή:

Μία κατάσταση ισορροπίας ενός αερίου παριστάνεται σε ένα διάγραμμα P – V (σχ. 4.6α) με ένα σημείο και αντίστροφα ένα σημείο πάνω στο επίπεδο P – V παριστάνει ορισμένη κατάσταση ισορροπίας του αερίου.

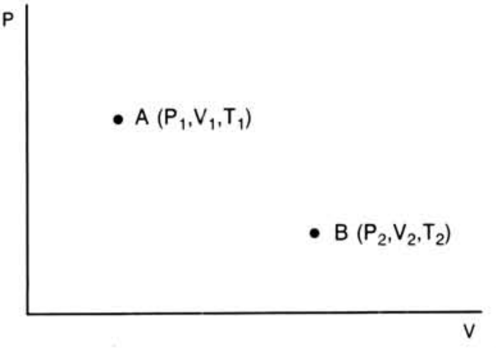
Η κατάσταση ισορροπίας (P_1, V_1, T_1) του αερίου παρίσταται με το σημείο A, ενώ η κατάσταση ισορροπίας (P_2, V_2, T_2) με το σημείο B.

β) Ιδανικά ή τέλεια αέρια.

Ένα αέριο θεωρείται ***ιδανικό*** όταν έχει τις εξής ιδιότητες:

– Τα μόριά του είναι σφαιρικά.

– Οι κρούσεις μεταξύ των μορίων του, καθώς και των μορίων του με τα τοιχώματα του δοχείου που το περιέχει είναι εντελώς ελαστικές.



Σχ. 4.6α.

– Τα μόριά του δεν εξασκούν ούτε μεταξύ τους δυνάμεις ούτε με τα τοιχώματα του δοχείου στο οποίο περιέχεται εκτός από τη στιγμή των συγκρούσεών τους και
– η διάμετρος των μορίων του είναι τόσο μικρή, ώστε ο συνολικός όγκος των μορίων του είναι πάρα πολύ μικρός σε σχέση με τον όγκο του δοχείου στο οποίο περιέχεται.

Προσοχή:

Τις παραπάνω ιδιότητες δεν τις πληροί κανένα από τα αέρια τα οποία υπάρχουν στη φύση.

Τα πραγματικά αέρια συμπεριφέρονται με ικανοποιητική προσέγγιση όπως τα ιδανικά, όταν οι συνθήκες κάτω υπό τις οποίες βρίσκονται απέχουν πολύ από τις συνθήκες υγροποιήσεώς τους.

Πολλά αέρια στην πράξη βρίσκονται υπό συνθήκες οι οποίες απέχουν πολύ από τις συνθήκες υγροποιήσεώς τους και εξαιτίας αυτού συμπεριφέρονται σχεδόν σαν τέλεια αέρια. ***Γι' αυτό άλλωστε μελετάμε τους νόμους των ιδανικών αερίων***.

Σημείωση:

Εμείς στην πράξη θα εφαρμόζομε τους νόμους των ιδανικών αερίων και για τα πραγματικά, γιατί στους υπολογισμούς μας δεν θα μας χρειάζεται μεγάλη ακρίβεια.

γ) ***Πίεση που οφείλεται στην κίνηση των μορίων***.

Τα μόρια ενός αερίου κινούνται ατάκτως και διαρκώς προς όλες τις διευθύνσεις και κατά την κίνησή τους αυτή συγκρούονται συνεχώς τόσο μεταξύ τους όσο και με τα τοιχώματα των δοχείων μέσα στα οποία περιέχονται.

Κατά τις συνεχείς συγκρούσεις των μορίων ενός αερίου με τα τοιχώματα του δοχείου στο οποίο περιέχεται, εξασκούν πάνω στα τοιχώματα δυνάμεις. Αποτέλεσμα των δυνάμεων αυτών είναι η πίεση του αερίου.

– ***Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζουν οι πιο κάτω μεταβολές μιας ορισμένης μάζας αερίου***:

1) Η ισόθερμη, κατά την οποία η θερμοκρασία του αερίου παραμένει σταθερή, ενώ η πίεση και ο όγκος του μεταβάλλονται.

2) Η ισοβαρής, κατά την οποία η πίεση του αερίου παραμένει σταθερή, ενώ ο όγκος και η θερμοκρασία του μεταβάλλονται και

3) η ισόχωρη, κατά την οποία ο όγκος του αερίου παραμένει σταθερός, ενώ η πίεση και η θερμοκρασία του μεταβάλλονται.

4.6.2 Ισόθερμη μεταβολή – Νόμος των Boyle-Mariotte.

Την ισόθερμη μεταβολή την εξετάσαμε στην παράγραφο 2.7. Εδώ αναφέρομε συμπληρωματικά τα εξής:

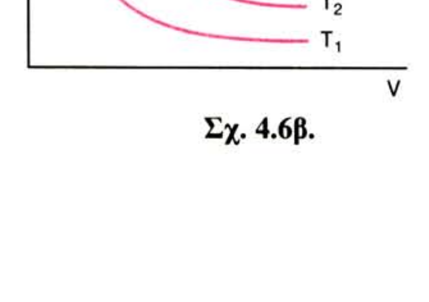
Υποθέτομε ότι ορισμένη μάζα ενός ιδανικού αερίου βρίσκεται σε ένα χώρο σταθερής θερμοκρασίας (Τ = σταθ.). Αν μεταβληθεί ο όγκος του αερίου, θα μεταβληθεί και η πίεση του αερίου, ενώ η θερμοκρασία του θα μένει σταθερή. Μια τέτοια μεταβολή της καταστάσεως ενός ιδανικού αερίου ονομάζεται ισόθερμη μεταβολή.

Η ισόθερμη μεταβολή καθορίζεται από το νόμο των Boyle-Mariotte.

Επομένως θα είναι:

$$\boxed{P \cdot V = \text{σταθ.}} \; \boxed{T = \text{σταθ.}} \quad \text{Νόμος των Boyle-Mariotte}$$

Η ισόθερμη μεταβολή παριστάνεται σε άξονες P – V με μία ισοσκελή υπερβολή, που ονομάζεται ισόθερμη καμπύλη. Η ισόθερμη καμπύλη είναι διαφορετική σε κάθε θερμοκρασία (σχ. 4.6β).



Σχ. 4.6β.

4.6.3 Μεταβολή του όγκου αερίου, υπό σταθερή πίεση. Νόμος του Gay-Lussac (Γκέϋ-Λουσάκ).

Όταν διατηρούμε σταθερή την πίεση μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου και μεταβάλλομε τη θερμοκρασία της, τότε μεταβάλλεται ο όγκος της.

Τη μεταβολή του όγκου μιας ορισμένης μάζας m ενός αερίου, που γίνεται εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας της, ενώ κατά τη μεταβολή αυτή η πίεσή της παραμένει σταθερή, την ονομάζομε ισοβαρή μεταβολή της.

Στη γυάλινη φιάλη του σχήματος 4.6γ βάζομε αέριο. Μια σταγόνα υδραργύρου ισορροπεί στη θέση Α και διαχωρίζει το αέριο από τον ατμοσφαιρικό αέρα.

Είναι φανερό ότι στις δύο πλευρές της σταγόνας η πίεση είναι η ίδια, δηλαδή η πίεση του αερίου μέσα στη φιάλη είναι ίση με την ατμοσφαιρική.

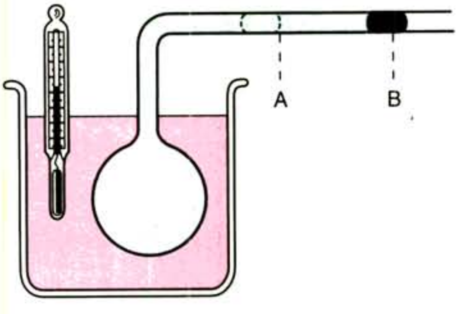
Αν θερμάνομε το αέριο, τοποθετώντας π.χ. τη φιάλη μέσα σε λουτρό νερού, παρατηρούμε ότι η σταγόνα του υδραργύρου μετατοπίζεται και έρχεται στη θέση Β όπου και ισορροπεί.

Αυτό σημαίνει ότι, όταν το αέριο θερμάνθηκε, ο όγκος του αυξήθηκε, ενώ η πίεσή του παρέμεινε σταθερή (ίση με την ατμοσφαιρική). Δηλαδή έγινε μεταβολή του όγκου του αερίου της φιάλης υπό σταθερή πίεση, δηλαδή ισοβαρής μεταβολή του αερίου της φιάλης.

Πειραματικά αποδεικνύεται ότι, αν διατηρούμε την πίεση μιας ορισμένης μάζας m ενός αερίου σταθερή και μεταβάλλομε τη θερμοκρασία της κατά ΔΘ τότε η μεταβολή ΔV του όγκου της που θα προκύψει θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = \alpha \cdot V_o \cdot \Delta\Theta \quad \text{ισοβαρής μεταβολή – Νόμος Gay-Lussac} \qquad (1)$$

όπου: V_o ο όγκος που έχει η μάζα m του αερίου στη θερμοκρασία $0^\circ C$ και



Σχ. 4.6γ.

α μία σταθερά, η οποία ονομάζεται θερμικός συντελεστής όγκου του αερίου υπό σταθερή πίεση. Αυτός είναι ο ίδιος για όλα τα αέρια και η τιμή του είναι ίση προς: $\boxed{\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}}$

Η σχέση (1) αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του Νόμου Cay-Lussac που διατυπώνεται ως εξής:

Η μεταβολή ΔV του όγκου μιας ορισμένης μάζας m ενός αερίου όταν μεταβληθεί η θερμοκρασία της κατά ΔΘ, ενώ η πίεσή της παραμένει σταθερή, είναι ανάλογη του όγκου V_o τον οποίο έχει αυτή στη θερμοκρασία $0^\circ C$ και ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας της ΔΘ.

Παρατηρήσεις:

Αν ο όγκος μιας μάζας m ενός αερίου στη θερμοκρασία Θ_1 είναι V_1 και φέρομε τη μάζα αυτή υπό σταθερή πίεση στη θερμοκρασία Θ_2, τότε με βάση τη σχέση (1) ο όγκος της V_2 στη θερμοκρασία Θ_2 θα είναι τέτοιος, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\boxed{V_2 - V_1 = \alpha \cdot V_o(\Theta_2 - \Theta_1)} \tag{2}$$

Αν ο όγκος που έχει μία μάζα m ενός αερίου στη θερμοκρασία $0^\circ C$ είναι V_o και τη φέρομε στη θερμοκρασία Θ υπό σταθερή πίεση, τότε με βάση τη σχέση (1) ο όγκος της V στη θερμοκρασία Θ θα είναι τέτοιος, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\boxed{V = V_o\,(1 + \alpha\Theta)}\ \boxed{\text{Νόμος Gay - Lussac}} \tag{3}$$

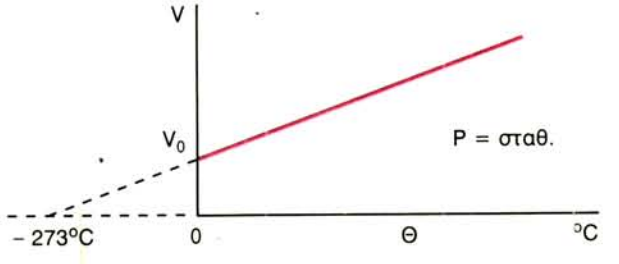
Φανερό είναι ότι η σχέση (3) αποτελεί μία μορφή του νόμου Gay-Lussac. Στην πράξη και σε πολλά βιβλία αναφέρεται ως μαθηματική διατύπωση του νόμου Gay-Lussac μόνο η σχέση (3).

Αν παραστήσομε γραφικά τη σχέση (3) (η οποία είναι εξίσωση πρώτου βαθμού) παίρνομε την ευθεία του σχήματος 4.6δ, δηλαδή τη γραφική παράσταση του νόμου Gay-Lussac.

Προσοχή:

1) Πειράματα, που γίνονται με διάφορα αέρια, δείχνουν ότι η σταθερά α είναι η ίδια για όλα τα αέρια και ότι η τιμή της είναι ίση προς: $\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$.

2) Η τιμή $\frac{1}{273} K^{-1}$ του θερμικού συντελεστή όγκου υπό σταθερή πίεση σημαίνει ότι, αν αυξηθεί η θερμοκρασία ενός αερίου κατά $1^\circ C$ ο όγκος του



Σχ. 4.6δ.

θα αυξηθεί κατά το $\frac{1}{273}$ του όγκου, τον οποίο είχε το αέριο σε θερμοκρασία 0°C, υπό την προϋπόθεση ότι η πίεσή του διατηρήθηκε σταθερή κατά τη διάρκεια της θερμάνσεως.

3) Ο θερμικός συντελεστής του όγκου υπό σταθερή πίεση είναι ανεξάρτητος της φύσεως του αερίου, της πιέσεως και της θερμοκρασίας του.

Άλλη έκφραση (μορφή) του νόμου Gay-Lussac.

Αν στη σχέση (3) βάλομε $\alpha = \frac{1}{273}$, τότε θα μας δώσει:

$$V = V_o\left(1 + \frac{\Theta}{273}\right)$$

$$V = V_o\left(\frac{273 + \Theta}{273}\right) \tag{4}$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$T = 273 + \Theta \tag{5}$$

$$T_o = 273 \text{ K} \tag{6}$$

όπου: T η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου όταν η θερμοκρασία του σε βαθμούς Κελσίου είναι Θ και
T_o η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου όταν η θερμοκρασία του είναι 0°C.

Επομένως η εξίσωση (4) με τη βοήθεια των (5) και (6) γίνεται:

$$V = V_o \frac{T}{T_o} \quad \text{ή}$$

$$\frac{V}{T} = \frac{V_o}{T_o} = \text{σταθ.} \tag{7}$$

Από τη σχέση (7) προκύπτει η γενικότερη σχέση:

$$\boxed{\frac{V_o}{T_o}=\frac{V_1}{T_1}=\frac{V_2}{T_2}=\text{σταθ.}}\ \text{Νόμος Gay-Lussac} \tag{8}$$

Η σχέση (8) εκφράζει το νόμο του Gay-Lussac. Δηλαδή:

Κατά τις μεταβολές μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου υπό σταθερή πίεση το πηλίκο του όγκου της προς την απόλυτη θερμοκρασία της είναι σταθερό.

Παρατήρηση:

Επίσης από τη σχέση (7) προκύπτει η σχέση:

$$\frac{V_1}{V_2}=\frac{T_1}{T_2} \tag{9}$$

Δηλαδή: Οι όγκοι μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου, υπό σταθερή πίεση, είναι ανάλογοι των απολύτων θερμοκρασιών της.

Σημείωση:

Το πλεονέκτημα της σχέσεως (8) του νόμου Gay-Lussac είναι η ταχύτητα με την οποία μπορούμε να υπολογίσομε τον όγκον ενός αερίου σε μια θερμοκρασία, όταν γνωρίζομε τον όγκο του σε άλλη θερμοκρασία.

Συνοπτικά:

Ο νόμος του Gay-Lussac προσδιορίζει ότι ο όγκος V ενός αερίου μεταβάλλεται ανάλογα με την απόλυτη θερμοκρασία του T, όταν η μάζα και η πίεσή του παραμένουν σταθερές. Μαθηματικά ο νόμος περιγράφεται από την εξίσωση $\boxed{V=\text{σταθ.}T}$ και αποδίδεται στο σχήμα 4.6ε.

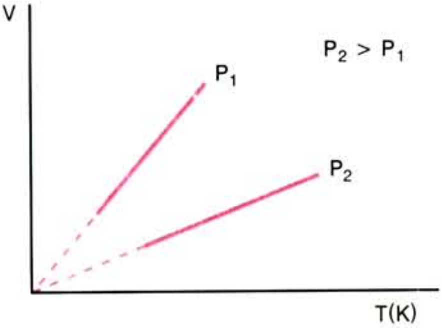
Παρατήρηση:

Ο νόμος του Gay-Lussac δεν ισχύει κοντά στο απόλυτο μηδέν και για το λόγο αυτό οι γραμμές στο σχήμα 4.6ε σχεδιάστηκαν διακεκομμένες κοντά στο μηδέν.

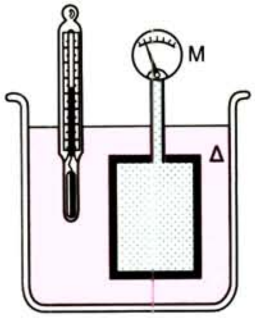
4.6.4 Μεταβολή της πιέσεως αερίου υπό σταθερό όγκο. Νόμος του Charles (Σάρλ).

Όταν διατηρούμε σταθερό τον όγκο μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου και μεταβάλλομε τη θερμοκρασία της, τότε μεταβάλλεται η πίεσή της.

Τη μεταβολή της πιέσεως μιας ορισμένης μάζας m ενός αερίου, που γίνεται εξαιτίας της μεταβολής της θερμοκρασίας της, ενώ κατά τη μεταβολή



Σχ. 4.6ε.



Σχ. 4.6στ.

αυτή ο όγκος της παραμένει σταθερός, την ονομάζομε ισόχωρη μεταβολή της.

Το δοχείο Δ (σχ. 4.6στ) έχει σταθερά τοιχώματα και περιέχει ένα αέριο. Το μανόμετρο Μ δείχνει την πίεση του αερίου. Το δοχείο Δ βρίκεται μέσα σε λουτρό νερού, για να μπορούμε εύκολα να του αλλάζομε τη θερμοκρασία.

Όταν αυξήσομε τη θερμοκρασία του λουτρού, επομένως και του αερίου που περιέχεται στο δοχείο Δ, θα παρατηρήσομε ότι αυξάνεται η ένδειξη του μανομέτρου Μ, δηλαδή η πίεση του αερίου.

Ο όγκος όμως του αερίου παραμένει ο ίδιος αφού το δοχείο έχει σταθερά τοιχώματα.

Αυτό σημαίνει ότι, όταν το αέριο θερμάνθηκε, η πίεσή του αυξήθηκε, ενώ ο όγκος του παρέμεινε σταθερός και ίσος με τη χωρητικότητα του δοχείου. Δηλαδή έγινε μεταβολή της πιέσεως του αερίου του δοχείου υπό σταθερό όγκο, δηλαδή ισόχωρη μεταβολή του αερίου του δοχείου.

Πειραματικά αποδεικνύεται ότι αν διατηρούμε τον όγκο μιας ορισμένης μάζας m ενός αερίου σταθερό και μεταβάλλομε τη θερμοκρασία της κατά ΔΘ τότε η μεταβολή ΔP της πιέσεώς της που θα προκύψει θα δίδεται από τη σχέση:

$$\boxed{\Delta P = \beta \cdot P_o \cdot \Delta\Theta} \text{ ισόχωρη μεταβολή – Νόμος Charles} \qquad (1)$$

όπου: P_o η πίεση που έχει η μάζα m του αερίου στη θερμοκρασία 0°C και β μία σταθερά η οποία ονομάζεται θερμικός συντελεστής μεταβολής της πιέσεως του αερίου υπό σταθερό όγκο.

Αυτός είναι για όλα τα αέρια ίδιος και η τιμή του είναι ίση προς:

$$\boxed{\beta = \frac{1}{273}\,K^{-1}}$$

Η σχέση (1) αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του Νόμου Charles που διατυπώνεται ως εξής:

Η μεταβολή ΔΡ της πιέσεως μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου, όταν μεταβληθεί η θερμοκρασία της κατά ΔΘ, ενώ ο όγκος της παραμένει σταθερός, είναι ανάλογη της πιέσεως P_o την οποία έχει αυτή στη θερμοκρασία 0°C και ανάλογη της μεταβολής της θερμοκρασίας της ΔΘ.

Παρατηρήσεις:

Αν η πίεση μιας μάζας m ενός αερίου στη θερμοκρασία Θ_1 είναι P_1 και φέρομε τη μάζα αυτή υπό σταθερό όγκο στη θερμοκρασία Θ_2 τότε με βάση τη σχέση (1) η πίεσή της P_2 στη θερμοκρασία Θ_2 θα είναι τέτοια, ώστε να ισχύει η σχέση:

$$\boxed{P_2 - P_1 = \beta \cdot P_o(\Theta_2 - \Theta_1)} \qquad (2)$$

Αν η πίεση μιας μάζας m ενός αερίου στη θερμοκρασία 0°C είναι P_o και τη φέρομε στη θερμοκρασία Θ υπό σταθερό όγκο τότε με βάση τη σχέση (1) η πίεση της P στη θερμοκρασία Θ θα είναι τέτοια, ώστε να ισχύει η σχέση:

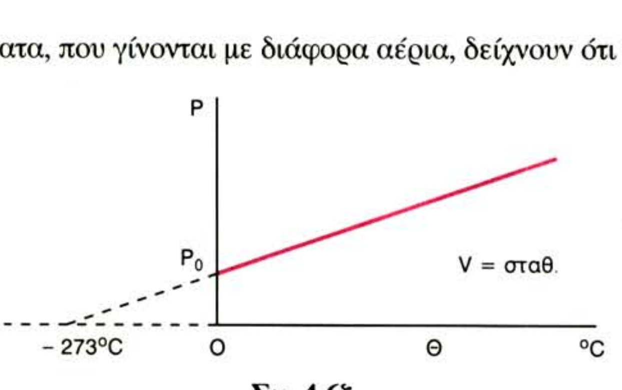
$$\boxed{P = P_o(1 + \beta \cdot \Theta)} \qquad (3)$$

Φανερό είναι ότι η σχέση (3) αποτελεί μια μορφή του νόμου Charles. Στην πράξη και σε πολλά βιβλία αναφέρεται ως μαθηματική διατύπωση του νόμου του Charles μόνο η σχέση (3).

Αν παραστήσομε γραφικά τη σχέση (3) (η οποία είναι εξίσωση πρώτου βαθμού) παίρνομε την ευθεία του σχήματος 4.6ζ, δηλαδή τη γραφική παράσταση του νόμου Charles.

Σημείωση:

1) Πειράματα, που γίνονται με διάφορα αέρια, δείχνουν ότι η σταθερά β



Σχ. 4.6ζ.

είναι η ίδια για όλα τα αέρια και ότι η τιμή της είναι ίση προς $\beta = \frac{1}{273} K^{-1}$.

2) Η τιμή $\frac{1}{273} K^{-1}$ του θερμικού συντελεστή της πιέσεως υπό σταθερό όγκο σημαίνει ότι, αν αυξηθεί η θερμοκρασία ενός αερίου κατά 1°C η πίεσή του θα αυξηθεί κατά το $\frac{1}{273}$ της πιέσεως, την οποία είχε το αέριο σε θερμοκρασία 0°C, με την προϋπόθεση ότι ο όγκος του διατηρήθηκε σταθερός κατά τη διάρκεια της θερμάνσεως.

3) Ο θερμικός συντελεστής της πιέσεως υπό σταθερό όγκο είναι ανεξάρτητος της φύσεως του αερίου, της πιέσεως και της θερμοκρασίας του.

Προσοχή:

Ο θερμικός συντελεστής (α) των αερίων υπό σταθερή πίεση έχει την αυτήν ακριβώς τιμή με το θερμικό συντελεστή τους (β) υπό σταθερό όγκο, δηλαδή: $\boxed{\alpha = \beta = \frac{1}{273} K^{-1}}$.

Γι' αυτό παριστάνονται συνήθως με το ίδιο σύμβολο και κυρίως με (α).

Άλλη μορφή του Ν. Charles.

Αν στην εξίσωση (3) βάλομε $\beta = \frac{1}{273}$ τότε αυτή μας δίνει:

$$P = P_o(1 + \frac{\Theta}{273})$$

$$P = P_o(\frac{273 + \Theta}{273}) \qquad (4)$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$T = 273 + \Theta \qquad (5)$$

$$T_o = 273 \text{ K} \qquad (6)$$

όπου: T η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου όταν η θερμοκρασία του είναι Θ σε βαθμούς Κελσίου και

T_o η απόλυτη θερμοκρασία του αερίου όταν η θερμοκρασία του είναι 0°C.

Επομένως η εξίσωση (4) με τη βοήθεια των (5) και (6) γίνεται:

$$P = P_o \frac{T}{T_o} \qquad ή$$

$$\frac{P}{T} = \frac{P_o}{T_o} = σταθερ. \text{ Νόμος Charles} \tag{7}$$

Από τη σχέση (7) προκύπτει, γενικότερα, η σχέση:

$$\boxed{\frac{P_o}{T_o} = \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = σταθ.} \text{ Νόμος Charles} \tag{8}$$

Η σχέση (8) εκφράζει το νόμο του Chalres. Δηλαδή κατά τις μεταβολές μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου υπό σταθερό όγκο, το πηλίκο της πιέσεώς της προς την απόλυτη θερμοκρασία της είναι σταθερό.

Παρατήρηση:

Επίσης από τη σχέση (7) προκύπτει:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

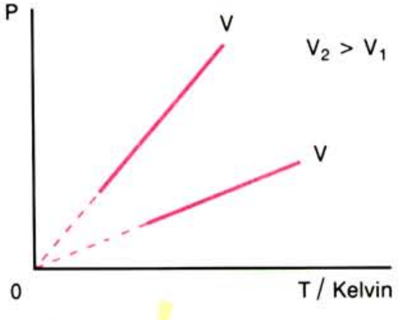
Δηλαδή: Οι πιέσεις ενός αερίου, υπό σταθερό όγκο, είναι ανάλογες των απολύτων θερμοκρασιών του.

Σημείωση:

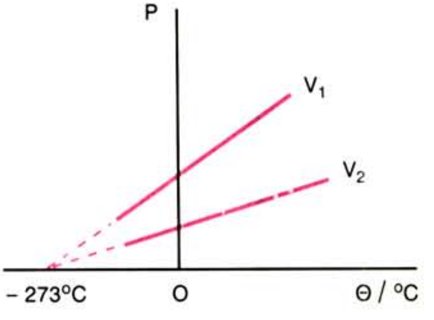
Το πλεονέκτημα της σχέσεως (8) του νόμου Charles είναι η ταχύτητα με την οποία μπορούμε να υπολογίσομε την πίεση ενός αερίου σε μία θερμοκρασία, όταν γνωρίζομε την πίεσή του σε άλλη θερμοκρασία.

Συνοπτικά:

Ο νόμος του Charles λέει ότι η πίεση P ενός αερίου, που έχει ορισμένη



Σχ. 4.6η.



Σχ. 4.6θ.

μάζα και βρίσκεται περιορισμένο υπό σταθερό όγκο, μεταβάλλεται ανάλογα με την απόλυτη θερμοκρασία Τ του αερίου. Η αναλογία αυτή περιγράφεται μαθηματικά από την εξίσωση $\boxed{P = \text{σταθ.} T}$ και αποδίδεται στα σχήματα 4.6η και 4.6θ.

Παρατήρηση:

Ο νόμος του Charles δεν ισχύει κοντά στο απόλυτο μηδέν και για το λόγο αυτό οι γραμμές στα σχήματα σχεδιάστηκαν διακεκομμένες κοντά στο απόλυτο μηδέν.

4.7 Μεταβολή πιέσεως, όγκου και θερμοκρασίας αερίου.

4.7.1 Εξίσωση των ιδανικών αερίων.

Έχομε μελετήσει τις εξής μεταβολές των ιδανικών αερίων:

1) Την ισόθερμη μεταβολή, δηλαδή τη μεταβολή της πιέσεως P ορισμένης μάζας m ιδανικού αερίου με τον όγκο της V, υπό σταθερή θερμοκρασία (νόμος Boyle-Mariotte).

2) Την ισόχωρη μεταβολή, δηλαδή τη μεταβολή της πιέσεως P ορισμένης μάζας m ιδανικού αερίου με τη θερμοκρασία T, υπό σταθερό όγκο (νόμος Charles) και

3) την ισόβαρη μεταβολή, δηλαδή τη μεταβολή του όγκου V ορισμένης μάζας m ιδανικού αερίου με τη θερμοκρασία T, υπό σταθερή πίεση (νόμος Gay-Lussac).

Δηλαδή έχομε εξετάσει τις μεταβολές μιας ορισμένης μάζας ιδανικού αερίου κατά τις οποίες ένα από τα μεγέθη T, V και P της μάζας αυτής παρέμενε σταθερό. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις κατά τις οποίες μεταβάλλονται ταυτόχρονα η πίεση P, ο όγκος V και η θερμοκρασία T μιας ορισμένης μάζας m ιδανικού αερίου.

Σε μια τέτοια περίπτωση αποδεικνύεται ότι:

Αν P_1, V_1, T_1 είναι η πίεση, ο όγκος και η θερμοκρασία μιας ορισμένης μάζας m ιδανικού αερίου σε μια κατάστασή της και P_2, V_2, T_2 η πίεση, ο όγκος και η θερμοκρασία της σε μια άλλη κατάστασή της, τότε τα μεγέθη αυτά συνδέονται με τη σχέση:

$$\boxed{\frac{P_o \cdot V_o}{T_o} = \frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2} = \text{σταθ.}} \quad \text{εξίσωση των ιδανικών αερίων} \qquad (1)$$

όπου: P_o και V_o η πίεση και ο όγκος που έχει η μάζα m όταν η θερμοκρασία της είναι $T_o = 273$ K.

Η εξίσωση (1) εκφράζει τον συνδυαστικό νόμο των Charles και Boyle-Mariotte.

Δηλαδή: ***Σε μια ορισμένη μάζα ενός ιδανικού αερίου, το πηλίκο του γινομένου της πιέσεώς της επί τον όγκο της, διά της απόλυτης θερμοκρασίας της είναι σταθερό.***

Προσοχή:

Η σχέση (1) ισχύει επακριβώς για τα ιδανικά αέρια ενώ για τα πραγματικά αέρια ισχύει κατά προσέγγιση και μόνο όταν αυτά βρίσκονται σε συνθήκες που απέχουν πολύ από τις συνθήκες υγροποιήσεώς τους.

Παρατηρήσεις:

1) Την εξίσωση (1) των ιδανικών αερίων τη χρησιμοποιούμε όταν πρόκειται να λύσομε προβλήματα, στα οποία μεταβάλλονται και τα τρία μεγέθη P, V, T, ορισμένης μάζας τους.

2) Με την εξίσωση (1) των ιδανικών αερίων λύνονται και προβλήματα στα οποία μεταβάλλονται δύο μόνο από τα μεγέθη P, V και T ορισμένης μάζας τους, δηλαδή είναι γενική εξίσωση.

Πράγματι:

1) Εάν η μεταβολή είναι ισόθερμη, δηλαδή $T_1 = T_2$, τότε από την εξίσωση (1) παίρνομε:

$P_1V_1 = P_2V_2$	Νόμος Boyle - Mariotte

2) Εάν η μεταβολή είναι ισοβαρής, δηλαδή $P_1 = P_2$, τότε από την εξίσωση (1) παίρνομε:

$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$	Νόμος Gay - Lussac

3) Αν η μεταβολή είναι ισόχωρη, δηλαδή $V_1 = V_2$, τότε από την εξίσωση (1) παίρνομε:

$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$	Νόμος Charles

4.7.2 Καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων.

Ένα γραμμομόριο (1 mol) ενός αερίου ισούται με τόση ποσότητα του αερίου σε γραμμάρια, όση η σχετική μοριακή του μάζα. Όταν βρίσκεται υπό κανονικές συνθήκες (T_o = 273 K και P = 76 cmHg) καταλαμβάνει όγκο, τον οποίο συνήθως τον συμβολίζομε με $V_{o,\, mole}$, ίσο προς 22,4 *l*.

Η μάζα m ενός αερίου συνίσταται από (n) γραμμομόρια, όπου n = m/m_{mole}, (m_{mole} = η μάζα του 1 mol σε μονάδα ίδια με αυτή της m).

Επομένως ο όγκος V_o του αερίου υπό κανονικές συνθήκες είναι:

$$V_o = n \cdot V_{o,\ mole}.$$

Με βάση τα πιο πάνω έχομε:

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_o V_o}{T_o} = \frac{P_o \cdot n \cdot (V_{o,mole})}{T_o} \quad ή \quad P \cdot V = n \cdot \frac{P_o(V_{o,mole})}{T_o} \cdot T \qquad (1)$$

Η ποσότητα $(P_o \cdot V_{o,\ mole}/T_o)$ είναι σταθερή για κάθε αέριο, δηλαδή ανεξάρτητη της φύσεως του αερίου και γι' αυτό ονομάζεται παγκόσμια σταθερά των αερίων.

$$\frac{P_o\,(V_{o,mole})}{T_o} = R \qquad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$\boxed{P \cdot V = n \cdot R \cdot T} \quad \text{καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων} \qquad (3)$$

Η εξίσωση (3) είναι η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, η οποία ισχύει επακριβώς για όλα τα ιδανικά αέρια και κατά προσέγγιση για τα πραγματικά αέρια όταν αυτά βρίσκονται υπό συνθήκες θερμοκρασίας και πιέσεως πολύ μακριά εκείνων στις οποίες υγροποιούνται.

Παρατηρήσεις:

1) Την παγκόσμια σταθερά των αερίων R την υπολογίζομε από τη σχέση $R = \frac{P_o(V_{o,mole})}{T_o}$.

2) Η παγκόσμια σταθερά R των ιδανικών αερίων ή απλά σταθερά των ιδανικών αερίων είναι ανεξάρτητη της φύσεως του αερίου, η αριθμητική της τιμή όμως εξαρτάται από τις μονάδες των P, V και T.

Στο σύστημα μονάδων S.I., όπου η μονάδα της P είναι το N/m^2 και η μονάδα του V είναι το m^3, η αριθμητική τιμή της R είναι:

$$R = 8{,}3145\ J/(mol \cdot K)$$

Αν εκφράζομε τους όγκους σε λίτρα (*l*) και τις πιέσεις σε ατμόσφαιρες (atm) τότε η αριθμητική τιμή της R είναι: $R = 0{,}08206\ L \cdot atm/(mol{\cdot}K)$.

3) Σε πολλές περιπτώσεις είναι γνωστά η μάζα m του αερίου και η σχετική μοριακή μάζα του οπότε η εξίσωση (3) πρέπει να μετασχηματισθεί.

Εφόσον είναι γνωστό το μοριακό βάρος του αερίου, είναι γνωστή και η μάζα m_{mol} του ενός γραμμομορίου του.

Διαιρούμε τη μάζα m του αερίου με τη μάζα m_{mol} του ενός γραμμομορίου του και βρίσκομε τον αριθμό n των γραμμορίων, δηλαδή:

$$n = \frac{m}{m_{mole}} \qquad (4)$$

Από τις σχέσεις (3) και (4) προκύπτει:

$$P \cdot V = \frac{m}{m_{mole}} \cdot R \cdot T$$

Προσοχή:

Τονίζομε και πάλι ότι τους νόμους των ιδανικών αερίων τους ακολουθούν με προσέγγιση και τα πραγματικά αέρια μόνο όταν βρίσκονται υπό συνθήκες οι οποίες απέχουν πολύ από τις συνθήκες κάτω από τις οποίες υγροποιούνται.

4.8 Θερμιδόμετρα.

4.8.1 Βασικές αρχές της θερμιδομετρίας.

Θερμιδομετρία σημαίνει «μέτρηση θερμότητας». Η θερμιδομετρία ασχολείται βασικά με τη μέτρηση ποσοτήτων θερμότητας.

Η μέτρηση ποσοτήτων θερμότητας στηρίζεται κυρίως στις βασικές αρχές της θερμιδομετρίας που είναι οι εξής:

1) Η ποσότητα της θερμότητας που προσφέρεται σε ένα σώμα (ή όπως συνήθως λέμε απορροφάται από ένα σώμα) κατά μία μεταβολή του αποβάλλεται (αποδίδεται) ολόκληρη από το σώμα όταν πάθει την αντίστροφη μεταβολή.

Σε δύο γραμμάρια νερού όταν θερμαίνονται από 20°C σε 50°C προσφέρεται ποσότητα θερμότητας 60 cal, και όταν αυτά ψύχονται από 50°C σε 20°C αποβάλλουν (αποδίδουν) ποσότητα θερμότητας 60 cal.

2) Με την προϋπόθεση ότι η διάδοση ενός ποσού θερμότητας από ένα σώμα, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία $Θ_1$, σε σώμα που βρίσκεται σε θερμοκρασία $Θ_2 < Θ_1$, δεν συνοδεύεται από παραγωγή έργου, τότε το ποσό της θερμότητας το οποίο παρεχώρησε το πρώτο σώμα στο δεύτερο είναι ίσο προς εκείνο το οποίο απορρόφησε το δεύτερο.

4.8.2 Θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας.

Το ποσό της θερμότητας Q το οποίο απαιτείται να προσφερθεί σε μία συγκεκριμένη μάζα m ενός σώματος για να ανυψωθεί η θερμοκρασία του από μια τιμή $\Theta_{\alpha\rho\chi.}$ σε μία άλλη $\Theta_{\tau\varepsilon\lambda.} > \Theta_{\alpha\rho\chi.}$ είναι ανάλογο προς τη μεταβολή της θερμοκρασίας $\Delta\Theta = \Theta_{\tau\varepsilon\lambda.} - \Theta_{\alpha\rho\chi.}$, ανάλογο της μάζας m του σώματος και εξαρτάται από τη φύση του υλικού του σώματος.

Αυτά εκφράζονται με την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$\boxed{Q = c \cdot m \cdot (\Theta_{\tau\varepsilon\lambda.} - \Theta_{\alpha\rho\chi.}) = c \cdot m \cdot \Delta\Theta} \quad \text{Θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας} \qquad (1)$$

όπου: c είναι μία σταθερά που εξαρτάται κυρίως από τη φύση του υλικού του σώματος. Επομένως διαφορετική για κάθε υλικό και ονομάζεται ειδική θερμότητα του σώματος ή πιο εύστοχα ειδική θερμότητα του υλικού του σώματος.

Σημείωση:

Αντί του όρου «ειδική θερμότητα σώματος» χρησιμοποιείται συχνά ο όρος «ειδική θερμοχωρητικότητα του σώματος».

Γενικά ο όρος «θερμοχωρητικότητα» δεν είναι εύστοχος γιατί δίνει τη λαθεμένη εντύπωση ότι το σώμα περιέχει κάποιο ποσό θερμότητας.

Παρατήρηση:

Όταν η θερμοκρασία ενός σώματος κατέρχεται από $\Theta_{\alpha\rho\chi.}$ σε $\Theta_{\tau\varepsilon\lambda.}$ ($\Theta_{\alpha\rho\chi.} > \Theta_{\tau\varepsilon\lambda.}$) τότε το σώμα αποβάλλει (παραχωρεί) ποσότητα θερμότητας Q τόση ώστε να ισχύει η σχέση:

$$Q = c \cdot (\Theta_{\tau\varepsilon\lambda.} - \Theta_{\alpha\rho\chi.}) \qquad (2)$$

Προσοχή:

1) Εφόσον $\Theta_{\tau\varepsilon\lambda.} > \Theta_{\alpha\rho\chi.}$ θα είναι και $Q > 0$, ενώ αν $\Theta_{\tau\varepsilon\lambda.} < \Theta_{\alpha\rho\chi.}$ τότε $Q < 0$. Δηλαδή: το σύμβολο Q αποτελεί μια ποσότητα θετική εφόσον παριστάνει θερμότητα που «απορροφάται». Το σύμβολο Q αποτελεί μία ποσότητα αρνητική εφ' όσον παριστάνει θερμότητα που «παραχωρείται».

2) Οι σχέσεις (1) και (2) ισχύουν με την προϋπόθεση ότι το σώμα κατά τη θέρμανση ή κατά την ψύξη του δεν αλλάζει κατάσταση.

4.8.3 Ειδική θερμότητα στερεών και υγρών σωμάτων.

Από τη σχέση: $Q = c \cdot m \cdot \Delta\Theta$ παίρνομε:

$$\boxed{c = \frac{Q}{m\Delta\Theta}} \qquad (3)$$

Τη σταθερά c την ονομάσαμε ειδική θερμότητα του υλικού του σώματος ή απλά ειδική θερμότητα του σώματος. Επομένως από τη σχέση (3) προκύπτει ότι η ειδική θερμότητα ενός σώματος είναι το πηλίκο της ποσότητας της θερμότητας Q που χρειάζεται να προσφερθεί σε μία συγκεκριμένη μάζα m του υλικού του σώματος για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της κατά ΔΘ, προς το γινόμενο της μάζας m επί την αύξηση ΔΘ της θερμοκρασίας της.

Επίσης από τη σχέση (3) προκύπτει, ότι η ειδική θερμότητα c ενός σώματος είναι αριθμητικά ίση προς το ποσό της θερμότητας, το οποίο απαιτείται να προσφερθεί στη μονάδα μάζας του υλικού του σώματος, για να αυξηθεί η θερμοκρασία της κατά 1 grad.

Η ειδική θερμότητα του μολύβδου Pb είναι:

$$c_{pb} = 0{,}031 \frac{\text{cal}}{\text{gK}}$$

Αυτό σημαίνει ότι, για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 g μολύβδου κατά 1°K πρέπει να προσφερθεί σε αυτό ποσό θερμότητας 0,031 cal.

Επίσης η ειδική θερμότητα του μολύβδου Pb είναι:

$$c_{pb} = 0{,}031 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Αυτό σημαίνει ότι, για να αυξηθεί η θερμοκρασία 1 kg μολύβδου κατά 1°K πρέπει να προσφερθεί σε αυτό ποσό θερμότητας 0,031 kcal. Η ειδική θερμότητα του μολύβδου είναι 130 J/kg·K. Αυτό σημαίνει ότι για να ανυψωθεί η θερμοκρασία 1 kg μολύβδου κατά 1 K πρέπει να προσφερθεί σε αυτό ποσό θερμότητας 130 J.

Παρατηρήσεις:

1) Η ειδική θερμότητα ενός σώματος εξαρτάται:

α) Από το υλικό του σώματος (πίνακας 4.8.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8.1

Ειδικές θερμότητες σε cal · g^{-1} · K^{-1}

Μόλυβδος	0,031	Αργίλιο	0,214
Υδράργυρος	0,033	Έδαφος	0,22
Κασσίτερος	0,054	Πάγος	0,50
Χαλκός	0,092	Πετρέλαιο	0,51
Ορείχαλκος	0,092	Οινόπνευμα	0,58
Σίδηρος	0,107	Νερό	1.00

β) Από την κατάσταση του σώματος.

Η ειδική θερμότητα του πάγου είναι:

$$c_\pi = 0{,}5\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

Η ειδική θερμότητα του (υγρού) νερού είναι:

$$c_N = 1\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$$

γ) Από τη θερμοκρασία.

Η ειδική θερμότητα ενός υλικού δεν είναι σταθερή για οποιαδήποτε περιοχή θερμοκρασιών.

Άλλη ποσότητα θερμότητας χρειάζεται 1 g του σώματος για να ανέβει η θερμοκρασία του, π.χ. από 1°C σε 2°C και άλλη, π.χ. από 400°C σε 401°C.

Σημείωση:

Η μεταβολή όμως της c με τη θερμοκρασία είναι πολύ μικρή και ***γι' αυτό στις εφαρμογές τη θεωρούμε ανεξάρτητη της θερμοκρασίας***.

2) Από τα διάφορα στερεά και υγρά σώματα τη μεγαλύτερη ειδική θερμότητα έχει το υγρό υδρογόνο c = 3,4 kcal/kg·K. Μετά το υδρογόνο ακολουθεί το νερό του οποίου η ειδική θερμότητα είναι μεγαλύτερη από όλα σχεδόν τα άλλα υλικά. Η σχετικά μεγάλη ειδική θερμότητα του νερού έχει σαν αποτέλεσμα τη βραδεία αύξηση ή ελάττωση της θερμοκρασίας του σε σχέση με τα άλλα σώματα.

Η θάλασσα θερμαίνεται και ψύχεται πιο αργά σχετικά με το έδαφος, γιατί η ειδική θερμότητα του εδάφους είναι πολύ μικρότερη από την ειδική θερμότητα της θάλασσας. Γι' αυτό άλλωστε σε σχέση με την άμμο, το πρωί η θάλασσα καθυστερεί να ζεσταθεί ενώ το απόγευμα αργεί να κρυώσει.

4.8.4 Θερμοχωρητικότητα σώματος.

Θερμοχωρητικότητα σώματος ονομάζεται το γινόμενο της ειδικής θερμότητας c του υλικού του σώματος επί τη μάζα m ολόκληρου του σώματος. Δηλαδή:

$$K = c \cdot m \qquad (1)$$

Ισχύει η σχέση:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\Theta \qquad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) παίρνομε:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta\Theta = K \cdot \Delta\Theta$$

$$Q = K \cdot \Delta\Theta$$

$$K = \frac{Q}{\Delta\Theta} \qquad (3)$$

Από τη σχέση (3) προκύπτει ότι η θερμοχωρητικότητα (K) ενός σώματος ισούται αριθμητικά με το ποσό της θερμότητας που χρειάζεται το σώμα, για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά 1°C.

Όταν μια συσκευή έχει θερμοχωρητικότητα K = 400 cal/grad, τότε πρέπει να προσφέρομε στη συσκευή αυτή 400 cal, για να αυξηθεί η θερμοκρασία της κατά 1°C.

Σημείωση:

1) Η θερμοχωρητικότητα 400 cal/grad διαβάζεται ως εξής: 400 θερμίδες ανά βαθμό.

2) Όσο πιο μεγάλη είναι η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος, τόσο πιο πολλή θερμότητα χρειάζεται να απορροφήσει ή να αποβάλει το σώμα, για να αυξηθεί ή να ελαττωθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό.

3) Η θερμοχωρητικότητα ενός συστήματος σωμάτων ισούται με το άθροισμα των θερμοχωρητικοτήτων των σωμάτων από τα οποία αποτελείται το σύστημα.

Προσοχή:

Η θερμοχωρητικότητα ενός σώματος αναφέρεται σε ολόκληρο το σώμα, ενώ η ειδική θερμότητα στο υλικό του σώματος.

4.8.5 Μονάδες ειδικής θερμότητας.

Όταν στην εξίσωση ορισμού: $c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\Theta}$ της ειδικής θερμότητας βάλομε: Q = 1 J, m = 1 kg και ΔΘ = 1 K θα βρούμε τη μονάδα ειδικής θερμότητας στο S.I. Δηλαδή:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\Theta} = \frac{1\,J}{1\,kg \cdot 1\,K} = 1\,J/kg \cdot K = 1\,Jkg^{-1}K^{-1} \quad (1\,K = 1\,grad)$$

Επομένως μονάδα ειδικής θερμότητας στο S.I. είναι η ειδική θερμότητα του σώματος εκείνου, που, για να ανεβεί η θερμοκρασία ενός χιλιογράμμου του κατά ένα Kelvin πρέπει (το 1 kg) να απορροφήσει ποσότητα θερμότητας ίση με 1 J.

Παρατήρηση:

Συνήθως, στην πράξη χρησιμοποιούνται και οι εξής μονάδες:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta\Theta} = \frac{1\,\text{cal}}{1\,\text{g} \cdot 1\,\text{K}} = 1\,\text{cal/g} \cdot \text{K}, \qquad c = 1\,\text{kcal/kg} \cdot \text{K}$$

4.8.6 Μονάδες θερμοχωρητικότητας.

Αν στη σχέση $K = \frac{Q}{\Delta\Theta}$ θέσομε Q = 1 J και ΔΘ = 1 °C θα έχομε τη μονάδα θερμοχωρητικότητας στο S.I. Δηλαδή:

$$K = \frac{Q}{\Delta\Theta} = \frac{1\,\text{J}}{1\,\text{grad}} = 1\,\text{J/grad}$$

Επομένως μονάδα θερμοχωρητικότητας στο S.I. είναι η θερμοχωρητικότητα του σώματος εκείνου του οποίου, για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά 1 K χρειάζεται να προσλάβει (να του προσφερθεί) ποσότητα θερμότητας ίση με 1 J.

Συνήθως στην πράξη χρησιμοποιούνται και οι εξής μονάδες:

$$K = \frac{Q}{\Delta\Theta} = \frac{1\,\text{cal}}{1\,\text{grad}} = 1\,\text{cal/grad} \quad \text{και} \quad K = \frac{Q}{\Delta\Theta} = \frac{1\,\text{kcal}}{1\,\text{grad}} = 1\,\text{kcal/grad}$$

4.8.7 Ειδική θερμότητα καύσεως (ή απλά: θερμότητα καύσεως ή θερμαντική ικανότητα).

Ειδική θερμότητα καύσεως c_{κ} μιας ουσίας ονομάζεται το πηλίκο της θερμότητας Q, η οποία εκλύεται όταν καίγεται τελείως μια ποσότητα m της ουσίας αυτής, προς την ποσότητα m. Δηλαδή:

$$\boxed{c_{\kappa} = \frac{Q}{m}} \quad \text{εξίσωση ορισμού} \qquad (1)$$

Η θερμότητα καύσεως ουσίας εκφράζει το ποσό θερμότητας, που δίνει μια μάζα της ουσίας αυτής, η οποία είναι ίση με μία μονάδα μάζας, κατά την τέλεια καύση της.

Πλήρης καύση ενός kg βενζίνης εκλύει περίπου 11.000 kcal, άρα η θερμότητα καύσεως της βενζίνης είναι:

$$c_K = \frac{Q}{m} = 11.000\,\text{kcal/kg}$$

Συνήθως η θερμότητα καύσεως μετριέται σε cal/kg ή προκειμένου για αέρια σε kcal/n m^3. Το σύμβολο nm^3 σημαίνει «κυβικό μέτρο υπό κανονική (normal) κατάσταση».

Παρατηρήσεις:

1) Η ποιότητα ενός καυσίμου καθορίζεται από τη θερμότητα καύσεώς του. Ένα καύσιμο είναι τόσο καλύτερης ποιότητας όσο μεγαλύτερη είναι η θερμότητα καύσεώς του.

2) Για να αρχίσει η ανάφλεξη ενός σώματος πρέπει η θερμοκρασία του να πάρει μια ορισμένη τιμή που λέγεται θερμοκρασία αναφλέξεώς του. Τη θερμότητα που χρειάζεται για να θερμανθεί ένα καύσιμο ως τη θερμοκρασία αναφλέξεώς του, του τη δίνει συνήθως η φλόγα ενός σπίρτου ή ένας σπινθήρας.

4.8.8 Θερμότητα καύσεως τροφών.

Οι τροφές μέσα στους ζωικούς οργανισμούς παθαίνουν βραδεία καύση και από την καύση τους εκλύεται θερμότητα, η οποία είναι απαραίτητη για τις διάφορες βιολογικές λειτουργίες. Σε κάθε είδος τροφής αντιστοιχεί ορισμένη ειδική θερμότητα καύσεως (πίνακας 4.8.2).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.8.2
Θερμότητα καύσεως τροφών σε kcal/kg

Βούτυρο φρέσκο	7.600	Ρύζι	3.400	Κρέας	1.500 – 3.000
Ζάχαρη	4.100	Ψωμί	2.580	Πατάτες	950
Τυρί	3.900	Φασόλια	2.570	Λαχανικά	150 - 350

Προσοχή:

Όταν λέμε μία διαιτητική θερμίδα εννοούμε μία χιλιοθερμίδα, δηλαδή 1 kcal (= 1000 cal) ή 4186 J. Όταν λέμε ότι ένα γραμμάριο φυστικοβούτυρου «περιέχει 6 θερμίδες» εννοούμε ότι κατά την οξείδωσή του μέσα στον οργανισμό εκλύεται θερμότητα 6 kcal (6.000 cal ή 25.000 J).

4.9 Ειδικές θερμότητες αερίου.

4.9.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Όσα έχομε αναφέρει για την ειδική θερμότητα και θερμοχωρητικότητα είναι επαρκή προκειμένου περί στερεών και υγρών σωμάτων. Για τα αέρια, όμως, δεν είναι ικανοποιητικά, αφού η θέρμανση μιας ορισμένης μάζας ενός αερίου κατά ένα Kelvin δεν απαιτεί πάντοτε το ίδιο ποσό θερμότητας, γιατί αυτό εξαρτάται και από τις συνθήκες υπό τις οποίες θερμαίνεται το αέριο.

Σε ένα γραμμάριο οξυγόνου όταν θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση για να ανυψωθεί η θερμοκρασία του κατά 1 K πρέπει να του προσφερθεί ποσότητα θερμότητας 0,218 cal, ενώ όταν θερμαίνεται υπό σταθερό όγκο πρέπει να του προσφερθεί ποσότητα θερμότητας 0,155 cal.

Θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν κυρίως η ισόχωρη και η ισοβαρής μεταβολή της καταστάσεως ενός αερίου. Σε κάθε μία από τις δύο αυτές περιπτώσεις κάθε αέριο έχει και διαφορετική ειδική θερμότητα, δηλαδή την ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο (c_V) και την ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση (c_p).

4.9.2 Ειδική θερμότητα αερίου υπό σταθερό όγκο (c_V).

Η θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας για την περίπτωση αυτή είναι:

$$Q_V = c_V \cdot m \cdot \Delta\Theta \qquad (1)$$

Από την εξίσωση (1) παίρνομε:

$$c_V = \left(\frac{Q}{m \cdot \Delta\Theta} \right)_V \qquad (2)$$

Από την εξίσωση (2) προκύπτει ότι:

Η ειδική θερμότητα ενός αερίου υπό σταθερό όγκο είναι το πηλίκο της ποσότητας της θερμότητας Q_V που πρέπει να προσφερθεί σε μάζα (m) του αερίου, για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της κατά ΔΘ προς το γινόμενο της μάζας (m) και της αυξήσεως ΔΘ, με την προϋπόθεση ότι ο όγκος της μάζας (m) του αερίου παραμένει σταθερός κατά τη θέρμανση αυτή.

Από την εξίσωση (2) συνάγεται επίσης ότι η ειδική θερμότητα ενός αερίου υπό σταθερό όγκο ισούται αριθμητικά με το ποσό της θερμότητας που χρειάζεται να προσφερθεί σε μάζα του αερίου ίση προς τη μονάδα της για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της κατά ένα K, όταν αυτή θερμαίνεται υπό σταθερό όγκο.

Σημείωση:

Η ειδική θερμότητα ενός αερίου υπό σταθερό όγκο (c_V) στην πράξη, θεωρείται ότι δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και πιο συγκεκριμένα θεωρείται σταθερή για μεγάλες περιοχές θερμοκρασίας.

4.9.3 Ειδική θερμότητα αερίου υπό σταθερή πίεση.

Η θεμελιώδης εξίσωση της θερμιδομετρίας για την περίπτωση αυτή είναι:

$$Q = c_p \cdot m \cdot \Delta\Theta \tag{1}$$

Από την εξίσωση (1) παίρνομε:

$$c_p = \left(\frac{Q}{m \cdot \Delta\Theta} \right)_p \tag{2}$$

Από την εξίσωση (2) προκύπτει ότι:

Η ειδική θερμότητα ενός αερίου υπό σταθερή πίεση είναι το πηλίκο της ποσότητας της θερμότητας Q_p που πρέπει να προσφερθεί σε μάζα (m) του αερίου για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της κατά ΔΘ προς το γινόμενο της μάζας (m) και της αυξήσεως ΔΘ, με την προϋπόθεση ότι η πίεση της μάζας (m) του αερίου παραμένει σταθερή κατά τη θέρμανση αυτή.

Από την εξίσωση (2) συνάγεται επίσης ότι η ειδική θερμότητα ενός αερίου που θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση ισούται αριθμητικά με το ποσό της θερμότητας που χρειάζεται να προσφερθεί σε μάζα του αερίου ίση προς τη μονάδα της για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της κατά ένα Kelvin, όταν αυτή θερμαίνεται υπό σταθερή πίεση.

Σημείωση:

Η ειδική θερμότητα ενός αερίου υπό σταθερή πίεση (c_p) στην πράξη, θεωρείται ότι δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία και πιο συγκεκριμένα θεωρείται σταθερή για μεγάλες περιοχές θερμοκρασίας.

Προσοχή:

Γενικά για κάθε αέριο ισχύει η σχέση: $\boxed{c_p > c_V}$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

5.1 Ολική ενέργεια μονωμένου συστήματος.

Μία μορφή ενέργειας δύναται να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας.

Όταν μηδενίζεται (εξαφανίζεται) ένα ποσό ενέργειας μιας μορφής, εμφανίζεται ίσο ποσό ενέργειας άλλης μορφής.

Για παράδειγμα όταν έργο 5 J μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε θερμότητα, το ποσό της θερμότητας που εμφανίζεται είναι 5 J.

Όταν θερμότητα 5 J μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε μηχανική ενέργεια, το ποσό της μηχανικής ενέργειας που εμφανίζει είναι 5 J.

Γενικά καμιά μορφή ενέργειας δεν «δημιουργείται» αλλά προκύπτει από μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας στη μορφή αυτή.

Στις μετατροπές των μορφών ενέργειας ισχύει η αρχή διατηρήσεως της ενέργειας, η οποία διατυπώνεται ως εξής:

Η ολική ενέργεια (δηλ. το άθροισμα όλων των μορφών ενέργειας) ενός μονωμένου συστήματος σωμάτων είναι σταθερή.

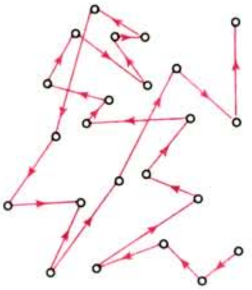
Με τον όρο μονωμένο σύστημα εννοούμε ένα σύνολο σωμάτων το οποίο δεν ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του.

Σημείωση:

Βέβαια η παραπάνω αρχή ισχύει με την προϋπόθεση ότι κατά τις μετατροπές των μορφών ενέργειας δεν γίνονται πυρηνικές αντιδράσεις. Αν γίνονται πρέπει να συμπεριλάβομε και την πυρηνική ενέργεια στην εσωτερική (θερμοδυναμική) ενέργεια του συστήματος.

5.2 Έργο που παράγεται από αέριο, όταν αυξάνεται ο όγκος του, ενώ η πίεσή του παραμένει σταθερή.

Έστω ότι μία μάζα m ενός αερίου η οποία έχει πίεση P_1, όγκο V_1 και



Σχ. 5.3.

– Κινούνται μέσα στο υγρό ή στο αέριο διαρκώς και ατάκτως προς όλες τις διευθύνσεις και
– η τροχιά την οποία διαγράφει το καθένα από αυτά είναι μία ακανόνιστη τεθλασμένη γραμμή (σχ. 5.3).

Την κίνηση αυτή, δηλαδή την άτακτη κίνηση που κάνουν συνεχώς τα πολύ μικρά σωματίδια όταν βρίσκονται μέσα σε ένα υγρό ή αέριο, την ονομάζομε ***κίνηση Brown***.

Αν παρατηρήσομε με μικροσκόπιο σταγόνα νερού μέσα στην οποία υπάρχει λεπτή σκόνη από γραφίτη, θα διαπιστώσομε ότι τα μικρά σωματίδια του γραφίτη κινούνται διαρκώς και ατάκτως προς όλες τις διευθύνσεις (κίνηση Brown).

Όταν μία ακτίνα φωτός μπαίνει μέσα σε σκοτεινό δωμάτιο, παρατηρούμε ότι τα πολύ ελαφρά και μικρά σωματίδια, που αιωρούνται μέσα στον αέρα, βρίσκονται σε αδιάκοπη και άτακτη κίνηση (κίνηση Brown).

Η κίνηση του Brown εξηγείται ως εξής:

Τα μόρια ενός υγρού ή ενός αερίου κινούνται διαρκώς και ατάκτως προς όλες τις κατευθύνσεις, επομένως τα μόρια κτυπούν διαρκώς και προς όλες τις κατευθύνσεις κάθε σωματίδιο που βρίσκεται μέσα στο υγρό ή στο αέριο.

Οι κρούσεις όμως αυτές δεν είναι το ίδιο «δυνατές» από όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι κάθε στιγμή οι κρούσεις κατά μία τυχαία διεύθυνση είναι πιο «δυνατές» και επομένως η κίνηση του σωματιδίου είναι τελείως ακανόνιστη.

Σημείωση:

Αν το σωματίδιο είναι μεγάλο, τότε ή δεν εκτελεί κίνηση Brown ή και αν εκτελεί, αυτή είναι πολύ «αδύνατη». Αυτό συμβαίνει γιατί αν οι διαστάσεις του σωματιδίου είναι σχετικά μεγάλες, ο αριθμός των κρούσεων κατά μονάδα χρόνου είναι μεγάλος και γι' αυτό πάνω σε όλες τις πλευρές του σωματίου πέφτει ο ίδιος, κατά μέσο όρο, αριθμός μορίων, οπότε τα αποτελέσματά τους αλληλοαναιρούνται (οι κρούσεις είναι εξίσου «δυνατές» από όλες τις κατευθύνσεις).

Παρατήρηση:

Η κίνηση του Brown είναι η ωραιότερη επιβεβαίωση της κινητικής θεωρίας της ύλης.

5.3.2 Κινητική θεωρία των ιδανικών αερίων.

Οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η κινητική θεωρία των ιδανικών αερίων είναι οι εξής:

1) Τα μόρια των ιδανικών αερίων κινούνται σαν υλικά σημεία (μικρές σφαίρες) άτακτα προς όλες τις διευθύνσεις και κατά τέτοιο τρόπο ώστε όσα μόρια κινούνται, κατά μέσο όρο, προς μία διεύθυνση, τόσα να κινούνται και προς οποιαδήποτε άλλη διεύθυνση.

2) Τα μόρια των ιδανικών αερίων δεν εξασκούν δυνάμεις μεταξύ τους ούτε με τα τοιχώματα των δοχείων στα οποία περιέχονται παρά μόνο κατά τη στιγμή που συγκρούονται μεταξύ τους και κατά τη στιγμή που συγκρούονται με τα τοιχώματα. Συνεπώς, η κίνηση κάθε μορίου, μεταξύ δύο συγκρούσεων, θα είναι ευθύγραμμη και ισοταχής.

3) Οι συγκρούσεις των μορίων, τόσο μεταξύ τους όσο και με τα τοιχώματα, θεωρούνται ελαστικές.

4) Το άθροισμα των όγκων όλων των μορίων ενός ιδανικού αερίου θεωρείται αμελητέο σχετικά με τον όγκο του δοχείου που το περιέχει.

5.3.3 Βασικές αρχές της κινητικής θεωρίας της ύλης.

Η ύλη αποτελείται από στοιχειώδη σωματίδια, που μπορεί να είναι άτομα, μόρια ή ιόντα.

Τα στοιχειώδη σωματίδια της ύλης, σε οποιαδήποτε κατάσταση κι αν βρίσκεται αυτή, βρίσκονται σε μία συνεχή κίνηση, που ονομάζεται ***θερμική κίνηση***. Η θερμική κίνηση των στοιχειωδών σωματιδίων της ύλης εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την επίδραση των στοιχειωδών σωματιδίων μεταξύ τους και μεταβάλλεται όταν αλλάζει η φυσική κατάσταση του σώματος.

5.3.4 Θερμοδυναμική ενέργεια σώματος.

Γνωρίζομε ότι η εσωτερική ενέργεια u ενός σώματος αποτελείται από τους προσθετέους:

1) Το άθροισμα των ενεργειών, όλων των ατόμων (ή μορίων) του, λόγω της κινήσεώς τους u_K.

2) Το άθροισμα των δυναμικών ενεργειών όλων των ατόμων (ή μορίων) του, λόγω της αλληλεπιδράσεώς τους u_Δ.

3) Το άθροισμα των ενεργειών των ηλεκτρονίων και των συστατικών των πυρήνων όλων των ατόμων του σώματος.

Δηλαδή:

$$\boxed{u = u_K + u_\Delta + u_n + u_\pi + \dots}$$

Την ενέργεια u_K του σώματος, δηλαδή το άθροισμα όλων των κινητικών ενεργειών όλων των σωματιδίων (ατόμων-μορίων-ιόντων) του, λόγω της θερμικής κινήσεώς τους, την ονομάζομε ***θερμοδυναμική*** ενέργεια του σώματος.

5.4 Θεώρημα ισοκατανομής της ενέργειας.

5.4.1 Γνώσεις στηρίξεως.

΄Εστω ένα σώμα, που έχει θερμοκρασία Τ, αποτελείται από σωματίδια, τα οποία εκτελούν θερμική κίνηση. Επίσης έστω ότι u_1, u_2, u_3, ...u_z είναι οι τιμές της ολικής κινητικής ενέργειας που έχει το κάθε ένα σε κάποια χρονική στιγμή, λόγω της θερμικής του κινήσεως.

Οι τιμές u_1, u_2, u_3, ... u_z όχι μόνο δεν είναι ίσες μεταξύ τους, λόγω της πλήρους αταξίας που επικρατεί στη θερμική κίνηση, αλλά μεταβάλλονται χρονικά. Αν όμως υπολογίσομε τη μέση τιμή $\overline{u}$ αυτών θα βρούμε ότι αυτή είναι χρονικά σταθερή.

5.4.2 Διατύπωση του θεωρήματος.

Το θεώρημα της ισοκατανομής της ενέργειας εκφράζει τα εξής:

Η μέση κινητική ενέργεια $\overline{u}$ κάθε σωματιδίου ενός σώματος λόγω της θερμικής κινήσεώς του κατανέμεται εξίσου σε κάθε θερμοδυναμικό βαθμό ελευθερίας του σωματιδίου αυτού.

Αποδεικνύεται ότι για κάθε ένα βαθμό ελευθερίας κάθε σωματιδίου ενός σώματος ισχύει η σχέση:

$$\overline{u}_i = \frac{K}{2} \cdot T \tag{1}$$

όπου: Τ η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος και

K είναι μία παγκόσμια σταθερά, που έχει την ίδια τιμή για οιονδήποτε βαθμό ελευθερίας του σωματιδίου και είναι ανεξάρτητη από το είδος του σωματιδίου.

Η σταθερά K καλείται σταθερά του Boltzmann και έχει τιμή:

$$K = 1{,}38 \cdot 10^{-23}\ \text{J/grad}$$

Ένα άτομο ενός μονοατομικού ιδανικού αερίου έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας (κάνει μόνο μεταφορική κίνηση). Επομένως η μέση κινητική του ενέργεια είναι:

$$\boxed{\bar{u} = 3 \cdot \frac{K}{2} \cdot T}$$

Αν ένα σωματίδιο (άτομο-μόριο-ιόν) ενός σώματος έχει f θερμοδυναμικούς βαθμούς ελευθερίας τότε η μέση κινητική ενέργεια του σωματιδίου αυτού, λόγω θερμικής κινήσεως, θα είναι:

$$\boxed{\bar{u} = f \cdot \frac{K}{2} \cdot T} \qquad (2)$$

Προσοχή:

Από τη σχέση (2) μπορούμε να υπολογίσομε τη θερμοδυναμική ενέργεια ενός σώματος αρκεί να πολλαπλασιάσομε τη μέση ενέργεια $\bar{u}$ ενός σωματιδίου του επί τον αριθμό των σωματιδίων τα οποία αποτελούν το σώμα.

Έτσι η θερμοδυναμική ενέργεια ενός γραμμομορίου ενός σώματος θα είναι:

$$U_{mole} = \bar{u} \cdot N \qquad \text{ή} \qquad U_{mole} = f \cdot \frac{N \cdot K \cdot T}{2} \qquad (3)$$

όπου: N η γνωστή μας από τη χημεία σταθερά του Avogadro.

Σημείωση:

Αποδεικνύεται ότι ισχύει η σχέση:

$$N \cdot K = R \qquad (4)$$

όπου: R η παγκόσμια σταθερά των ιδανικών αερίων.

Από τις σχέσεις (3) και (4) παίρνομε:

$$U_{mole} = f \cdot \frac{R \cdot T}{2} \qquad (5)$$

5.5 Μηδενικός νόμος της θερμοδυναμικής.

Ο μηδενικός νόμος της θερμοδυναμικής εκφράζει τα εξής:
Δύο σώματα που το καθένα τους είναι σε θερμική ισορροπία με ένα τρίτο είναι και μεταξύ τους σε θερμική ισορροπία.

Αν ένα σώμα (Α) είναι σε θερμική ισορροπία με ένα σώμα (Γ) και ένα άλλο σώμα (Β) είναι επίσης σε θερμική ισορροπία με το σώμα (Γ) τότε τα (Α) και (Β) θα βρίσκονται και μεταξύ τους σε θερμική ισορροπία.

Σημείωση:
Υπενθυμίζομε ότι: δύο σώματα βρίσκονται σε θερμική ισορροπία, αν και μόνο αν, έχουν την ίδια θερμοκρασία.

5.6 Πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής (ή πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα).

Έστω ότι ένα θερμοδυναμικό σύστημα (π.χ. μία ορισμένη μάζα ενός αερίου) μεταβαίνει από μία κατάσταση ισορροπίας (1) στην οποία η εσωτερική του ενέργεια είναι U_1, σε άλλη κατάσταση ισορροπίας του (2) στην οποία η εσωτερική του ενέργεια γίνεται U_2.

Διαπιστώνεται ότι:

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ($U_2 - U_1$) του συστήματος αυτού (όπως και κάθε θερμοδυναμικού συστήματος) που γίνεται κατά τη μετάβασή του από την κατάσταση της ισορροπίας του (1) στην κατάσταση ισορροπίας (2) δίνεται από τη σχέση:

$$U_2 - U_1 = \Delta U = Q - W \tag{1}$$

Με ανακατάταξη της σχέσεως (1) προκύπτει:

$$Q = \Delta U + W \tag{2}$$

όπου: Q το ποσό της θερμότητας που προσφέρθηκε στο σύστημα από το περιβάλλον του ή αποβλήθηκε από αυτό στο περιβάλλον του κατά τη διαδικασία της μεταβάσεώς του από την κατάσταση της ισορροπίας του (1) στην κατάσταση ισορροπίας (2) και

W το έργο που παράγει (προσφέρει) το σύστημα στο περιβάλλον του ή το έργο που καταναλώνει (προσλαμβάνει) το σύστημα από το περιβάλλον του κατά τη διαδικασία της μεταβάσεώς του από την κατάσταση της ισορροπίας του (1) στην κατάσταση ισορροπίας (2).

Η εξίσωση (2) είναι η μαθηματική διατύπωση του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής.

Προσοχή:

Είναι αναγκαία η διευκρίνιση των συμβόλων Q και W των εξισώσεων (1) και (2).

1) Το Q θα θεωρείται θετικό ($Q>0$) όταν προσφέρεται στο σύστημα από το περιβάλλον του.

Το Q θα θεωρείται αρνητικό ($Q<0$) όταν αποβάλλεται από το σύστημα προς το περιβάλλον του.

2) Το W θα θεωρείται θετικό όταν παράγεται από το σύστημα (το σύστημα παρέχει έργο στο περιβάλλον του). Το W θα θεωρείται αρνητικό όταν καταναλίσκεται από το σύστημα (δηλ. όταν το περιβάλλον του συστήματος παρέχει έργο στο σύστημα).

3) Επειδή τα Q και W είναι δυνατό να είναι θετικά ή αρνητικά και η μεταβολή $(U_2-U_1) = \Delta U$ μπορεί να είναι θετική ή αρνητική.

4) Θετικό $\Delta U = U_2-U_1$ θα σημαίνει ότι κατά τη μετάβαση του θερμοδυναμικού συστήματος από την κατάσταση ισορροπίας του (1) στην κατάσταση ισορροπίας (2) αυξήθηκε η εσωτερική του ενέργεια ($U_2>U_1$).

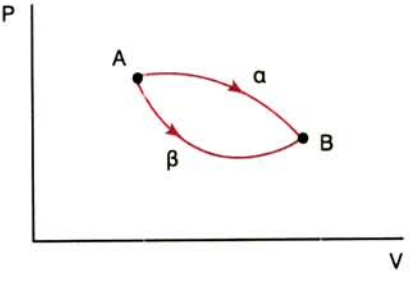
5) Αρνητικό $\Delta U = (U_2-U_1)<0$ θα σημαίνει ότι κατά τη μετάβαση του συστήματος από την κατάσταση ισορροπίας (1) στην κατάσταση ισορροπίας του (2) ελαττώθηκε η εσωτερική του ενέργεια.

Παρατηρήσεις:

1) Η εσωτερική ενέργεια U την οποία έχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα όταν βρίσκεται σε μία συγκεκριμένη κατάσταση ισορροπίας είναι συγκεκριμένη. Με άλλα λόγια η εσωτερική ενέργεια την οποία έχει ένα θερμοδυναμικό σύστημα σε μία κατάσταση ισορροπίας του εξαρτάται μόνο από την κατάσταση αυτή και είναι ανεξάρτητη του τρόπου που έφθασε το σύστημα στην κατάσταση αυτή.

Επομένως:

α) Αν ένα σύστημα βρίσκεται σε μία κατάσταση ισορροπίας A (σχ. 5.6α) και το υποβάλομε σε μία μεταβολή που το φέρνει στην κατάσταση ισορρο-



Σχ. 5.6α.

πίας του Β, η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειάς του (U_B–U_A) είναι η ίδια είτε η μεταβολή ακολουθήσει τη διαδρομή ΑαΒ είτε τη διαδρομή ΑβΒ.

β) Αν ένα σύστημα βρίσκεται σε μία κατάσταση ισορροπίας Α (σχ. 5.6β) και το υποβάλομε σε μία μεταβολή που τελικά φέρνει το σύστημα στην αρχική του κατάσταση Α (κυκλική μεταβολή), η ολική μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας του συστήματος πρέπει να είναι μηδέν (U_A–U_A = 0).

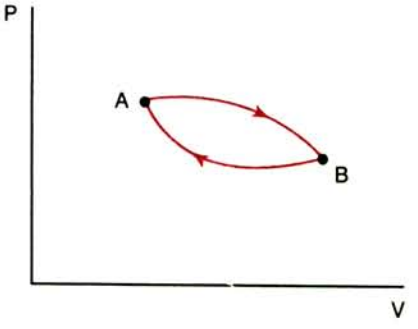
Σημείωση:

Συνοπτικά τα παραπάνω τα εκφράζομε λέγοντας ότι ***η εσωτερική ενέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος (ενός σώματος) είναι μονότιμη συνάρτηση της καταστάσεώς του***.

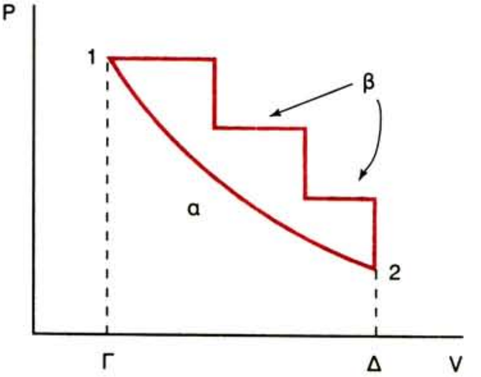
2) Κατά τη μετάβαση από μία ορισμένη αρχική κατάσταση (1) ενός θερμοδυναμικού συστήματος (σχ. 5.6γ) σε άλλη ορισμένη τελική κατάσταση (2) το έργο που παράγεται ή καταναλώνεται αποδεικνύεται ότι εξαρτάται από τον τρόπο μεταβάσεώς του από την κατάσταση (1) στην κατάσταση (2). Με άλλα λόγια το έργο που παράγεται ή καταναλώνεται κατά τη μετάβαση ενός θερμοδυναμικού συστήματος (ενός σώματος) από μία κατάσταση σε άλλη δεν εξαρτάται μόνο από την αρχική και τελική κατάστασή του αλλά και από τις ενδιάμεσες καταστάσεις του.

Το σώμα ξεκινάει από την κατάσταση (1) και καταλήγει στην κατάσταση (2) ακολουθώντας διαφορετικές πορείες (σχ. 5.6γ). Μία ισόθερμη (1α2) και μία (1β2) που αποτελείται από διαδοχικές ισοβαρείς και ισόχωρες μεταβολές. Τα έργα που παράγονται στις δύο αυτές περιπτώσεις δεν είναι ίσα γιατί τα εμβαδά, τα οποία περικλείουν οι καμπύλες (1α2) και 1β2) και εστιγμένες κατακόρυφες (Γ1) και (Δ2) δεν είναι ίσα.

3) Επίσης αποδεικνύεται ότι η ποσότητα της θερμότητας η οποία προσφέρεται σε ένα θερμοδυναμικό σύστημα ή αποβάλλεται από αυτό κατά



Σχ. 5.6β.



Σχ. 5.6γ.

μία μεταβολή του δεν εξαρτάται μόνο από την αρχική και την τελική του κατάσταση αλλά και από τις ενδιάμεσες καταστάσεις, δηλαδή εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μεταβολή αυτή.

Συνοπτικά η εσωτερική ενέργεια ενός θερμοδυναμικού συστήματος (π.χ. ενός αερίου) είναι μέγεθος, το οποίο αναφέρεται στην κατάστασή του, ενώ η θερμότητα και το έργο είναι μεγέθη, τα οποία αναφέρονται σε μεταβολές της καταστάσεώς του.

5.6.1 Εφαρμογές του πρώτου νόμου της θερμοδυναμικής.

Τόσο για την καλύτερη κατανόηση του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου όσο και για τη χρησιμότητά τους αναφέρομε τις παρακάτω περιπτώσεις.

α) Ισόθερμη εκτόνωση αερίου.

Ένα αέριο βρίσκεται μέσα σε ένα κυλινδρικό δοχείο (σχ. 5.6δ) που έχει στο ανοιχτό άκρο του ένα έμβολο το οποίο μπορεί να ολισθαίνει χωρίς τριβές κατά μήκος των τοιχωμάτων του δοχείου. Το κυλινδρικό δοχείο είναι βυθισμένο σε μεγάλη ποσότητα νερού, ώστε το νερό να προσφέρει θερμότητα στο αέριο χωρίς να αυξάνεται η θερμοκρασία του, δηλαδή το αέριο υφίσταται ισόθερμη εκτόνωση. (Η θερμοκρασία του αερίου παραμένει σταθερή και ίση με τη θερμοκρασία του νερού που περιβάλλει το κυλινδρικό δοχείο).

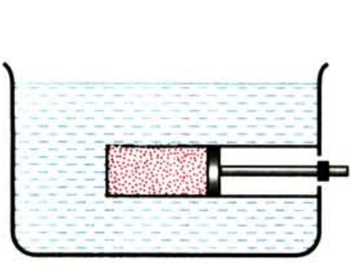
Μια τέτοια μεταβολή, από την αρχική κατάσταση ισορροπίας του αερίου A (P_A, V_A, T_A) στην τελική κατάσταση ισορροπίας του B (P_B, V_B, T_B) όπου $T_A = T_B = T$ εικονίζεται στο σχήμα 5.6ε.

Εφαρμόζομε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής:

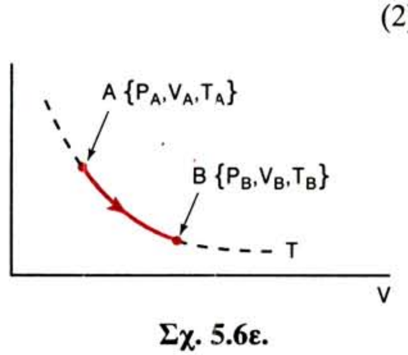
$$Q = (U_B - U_A) + W \qquad (1)$$

Επειδή η θερμοκρασία του αερίου παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της μεταβολής A→B γι' αυτό ισχύει η σχέση:

$$U_B - U_A = 0 \qquad (2)$$



Σχ. 5.6δ.



Σχ. 5.6ε.

Σημείωση:

Υπενθυμίζομε ότι η εσωτερική ενέργεια ορισμένης μάζας αερίου εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$\boxed{Q = W} \tag{3}$$

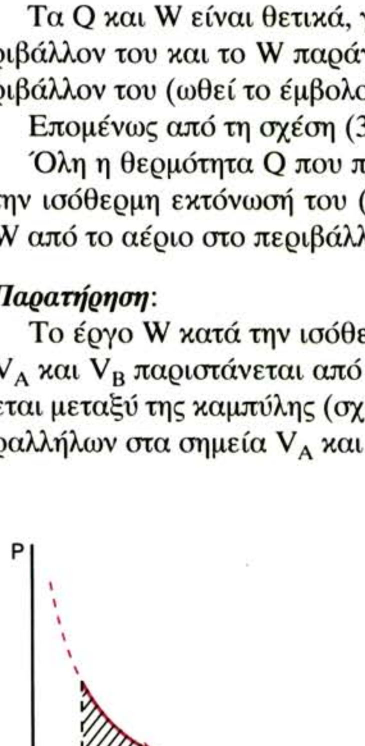
Τα Q και W είναι θετικά, γιατί το Q προσφέρεται στο αέριο από το περιβάλλον του και το W παράγεται (αποδίδεται) από το αέριο προς το περιβάλλον του (ωθεί το έμβολο).

Επομένως από τη σχέση (3) προκύπτει ότι:

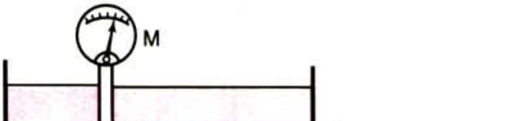
Όλη η θερμότητα Q που προσφέρεται στο αέριο (από το λουτρό) κατά την ισόθερμη εκτόνωσή του (Α→Β), μεταφέρεται μέσω μηχανικού έργου W από το αέριο στο περιβάλλον.

Παρατήρηση:

Το έργο W κατά την ισόθερμη εκτόνωση του αερίου μεταξύ των όγκων V_A και V_B παριστάνεται από το γραμμοσκιασμένο εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της καμπύλης (σχ. 5.6στ) του άξονα των όγκων και των δύο παραλλήλων στα σημεία V_A και V_B προς τον άξονα των πιέσεων.



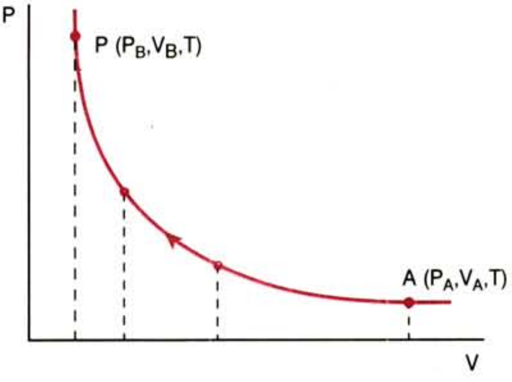
Σχ. 5.6στ.



Σχ. 5.6ζ.

β) Ισόθερμη συμπίεση αερίου.

Ένα αέριο βρίσκεται μέσα σε ένα μεταλλικό κυλινδρικό δοχείο (σχ. 5.6ζ) που έχει στο ανοιχτό άκρο του ένα έμβολο το οποίο μπορεί να ολισθαίνει χωρίς τριβές κατά μήκος των τοιχωμάτων του δοχείου. Το κυλινδρικό δοχείο είναι βυθισμένο σε μεγάλη ποσότητα νερού ώστε η θερμοκρασία T του αερίου να διατηρείται σταθερή.



Σχ. 5.6η.

Ωθούμε το έμβολο προς τα αριστερά κατά τέτοιο τρόπο ώστε η θερμοκρασία του αερίου να παραμένει σταθερή (ίση με τη θερμοκρασία του νερού).

Επομένως το αέριο υφίσταται ισόθερμη συμπίεση. Μία τέτοια μεταβολή, από την αρχική κατάσταση ισορροπίας του αερίου A (P_A, V_A, T) στην τελική κατάσταση ισορροπίας B (P_B, V_B, T) εικονίζεται στο σχήμα 5.6η.

Εφαρμόζομε τον πρώτο νόμο της θερμοδυναμικής:

$$Q = (U_B - U_A) + W \qquad (1)$$

όπου: W το έργο που προσφέρεται στο αέριο διά ωθήσεως του εμβόλου και το οποίο καταναλώνεται από το αέριο, άρα $W < 0$ (2),
Q η θερμότητα που αποβάλλεται από το αέριο (την παίρνει το νερό), άρα $Q < 0$ (3) και
$U_B - U_A = 0$ (4) (T = σταθ.).

Με βάση τις (2), (3) και (4) η σχέση (1) παίρνει τη μορφή:

$$\boxed{-W = -Q}$$

Το έργο που προσφέρεται (–W) στο αέριο (με την ώθηση του εμβόλου) είναι ίσο με τη θερμότητα που αποβάλλεται (–Q) από αυτό (την παίρνει το νερό).

*γ) **Ισόχωρη μεταβολή** (**θέρμανση αερίου υπό σταθερό όγκο**).*

Το αέριο θερμαίνεται σε κλειστό δοχείο του οποίου τα τοιχώματα μένουν ακίνητα (σχ. 5.6θ), συνεπώς ο όγκος του αερίου παραμένει σταθερός και επομένως δεν παράγεται έργο (W = 0).

Μια τέτοια μεταβολή, από την αρχική κατάσταση ισορροπίας A (P_A, V_A, T_A) στην τελική κατάσταση ισορροπίας B (P_B, V_B, T_B) με V_A=V_B εικονίζεται στο σχήμα 5.6ι.

Η ισόχωρη αυτή μεταβολή παριστάνεται στο διάγραμμα P–V με ένα ευθύγραμμο τμήμα AB κάθετο στον άξονα των όγκων (V = σταθ.).

Έχομε τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο:

$$Q = (U_B - U_A) + W \tag{1}$$

Αφού ο όγκος του αερίου παραμένει σταθερός το έργο είναι:

$$W = 0 \tag{2}$$

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

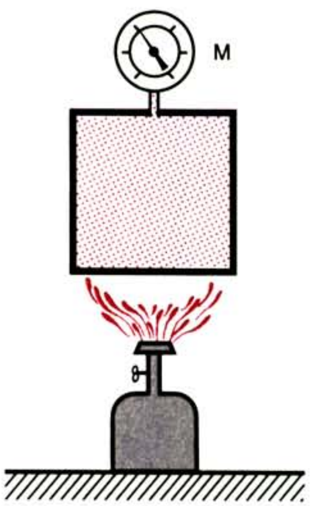
$$Q = (U_B - U_A) \tag{3}$$

Επομένως όλη η προσφερόμενη θερμότητα στο αέριο μετατρέπεται σε εσωτερική του ενέργεια.

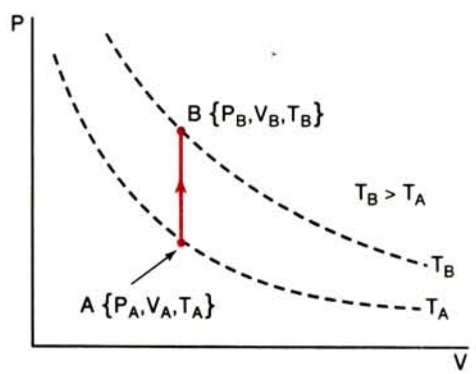
δ) Ισοβαρής μεταβολή (***θέρμανση αερίου υπό σταθερή πίεση***).

Μία ισοβαρής μεταβολή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη διάταξη του σχήματος 5.6ια.

Μία τέτοια μεταβολή από την κατάσταση ισορροπίας A (P_A, V_A, T_A) ενός αερίου στην κατάσταση ισορροπίας του B (P_B, V_B, T_B) με $P_A = P_B$ εικονίζεται στο σχήμα 5.6ιβ. Προσφέροντας θερμότητα αυξάνεται η θερμοκρασία και ο όγκος του αερίου (το έμβολο ανυψώνεται). Η ισοβαρής μεταβολή παριστάνεται στο διάγραμμα P–V με ένα ευθύγραμμο τμήμα κάθετο στον άξονα των πιέσεων (P = σταθ.).



Σχ. 5.6θ.



Σχ. 5.6ι.

Η θερμότητα Q που προσφέρεται στο αέριο κατά τη μεταβολή αυτή κατά ένα μέρος της καταναλώνεται στην αύξηση της εσωτερικής ενέργειας (ΔU) του αερίου και το υπόλοιπό της μεταφέρεται υπό μορφή μηχανικού έργου (W) από το αέριο στο περιβάλλον του.

Επομένως η εξίσωση: $\boxed{Q = \Delta U + W}$ ισχύει χωρίς καμιά απλούστευση.

Προσοχή:

Το Q προσφέρεται στο αέριο, άρα $Q > 0$. [Το W προσφέρεται από το αέριο στο περιβάλλον του (μετακινεί το έμβολο), άρα $W > 0$. Τα Q και W θετικά σημαίνει ΔU θετικό ($\Delta U > 0$)].

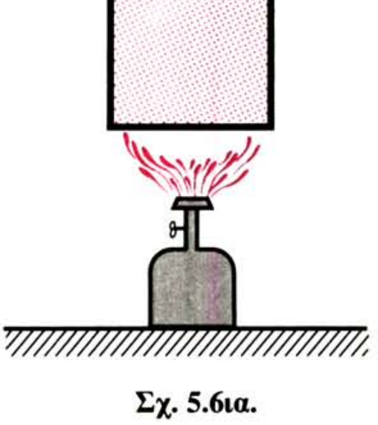
ε) Αδιαβατική μεταβολή αερίου.

Κατά την αδιαβατική μεταβολή το αέριο δεν παίρνει από το περιβάλλον του θερμότητα ούτε δίνει σε αυτό, οπότε θα είναι: $\boxed{Q = 0}$.

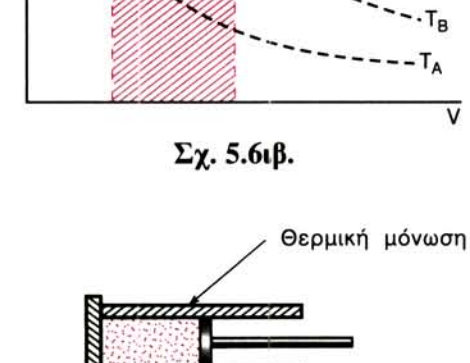
1) ***Αδιαβατική εκτόνωση αερίου.***

Αδιαβατική εκτόνωση ενός αερίου μπορεί να πραγματοποιείται με βάση τη διάταξη του σχήματος 5.6ιγ.

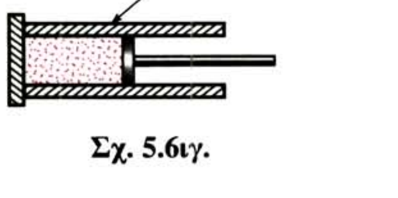
Η αδιαβατική εκτόνωση μεταξύ των καταστάσεων 1 (P_1, V_1, T_1) και 2 (P_2, V_2, T_2) φαίνεται στο σχήμα 5.6ιδ και γίνεται με κίνηση του εμβόλου προς τα δεξιά (το σπρώχνει το αέριο). Κατά τη μεταβολή αυτή ισχύει η σχέση $Q = 0$, οπότε έχομε:



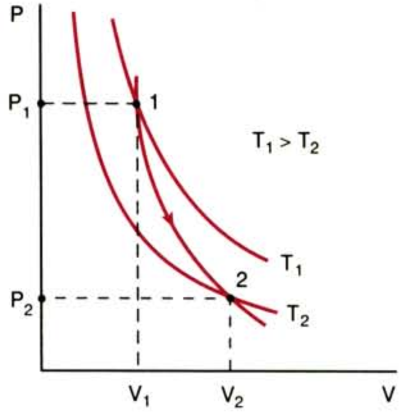
Σχ. 5.6ια.



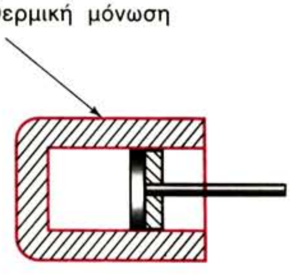
Σχ. 5.6ιβ.



Σχ. 5.6ιγ.



Σχ. 5.6ιδ.



Σχ. 5.6ιε.

$$Q = (U_2 - U_1) + W, \quad 0 = (U_2 - U_1) + W \quad \text{και}$$

$$\boxed{W = -(U_2 - U_1) = -\Delta U}$$

Δηλαδή το αέριο παράγει έργο W σε βάρος ($-\Delta U$) της εσωτερικής ενέργειάς του (ψύξη) και ισούται προς την ελάττωση αυτής.

Σημείωση:

Υπενθυμίζομε τα εξής:

α) Όταν ελαττώνεται η εσωτερική ενέργεια ενός αερίου ελαττώνεται και η θερμοκρασία του.

β) Αρνητικό ΔU σημαίνει ελάττωση της εσωτερικής ενέργειας του αερίου.

2) ***Αδιαβατική συμπίεση του αερίου***.

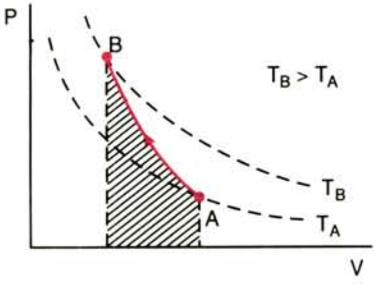
Αδιαβατική συμπίεση του αερίου μπορεί να πραγματοποιείται με τη διάταξη του σχήματος 5.6ιε διά ωθήσεως του εμβόλου προς τα αριστερά.

Η αδιαβατική συμπίεση μεταξύ των καταστάσεων Α (P_A, V_A, T_A) και Β (P_B, V_B, T_B) διά ωθήσεως του εμβόλου προς τα αριστερά φαίνεται στο σχήμα 5.6ιστ.

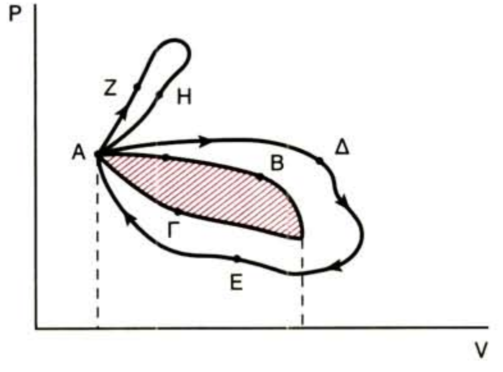
Κατά τη μεταβολή αυτή ισχύει $Q = 0$, οπότε με εφαρμογή του πρώτου θερμοδυναμικού νόμου παίρνομε:

$$0 = (U_B - U_A) + W \qquad (1)$$

Το W καταναλίσκεται από το αέριο (αυτό προσφέρεται στο αέριο κατά τη μετακίνηση του εμβόλου προς τα αριστερά), επομένως είναι αρνητικό, οπότε η σχέση (1) διατυπώνεται ως εξής:



Σχ. 5.6ιστ.



Σχ. 5.6ιζ.

$$0 = (U_B - U_A) - W \qquad \boxed{W = (U_B - U_A) = +\Delta U}$$

Δηλαδή το έργο W που προσφέρεται από το περιβάλλον του στο αέριο αυξάνει ($+\Delta U$) την εσωτερική ενέργεια του αερίου (θέρμανση αερίου) κατά $\Delta U = W$.

στ) Κυκλική μεταβολή.

Η μεταβολή αερίου που ξεκινάει από μία κατάσταση Α και τερματίζεται στην ίδια κατάσταση Α λέγεται κυκλική μεταβολή ή απλός κύκλος (σχ. 5.6ιζ).

Οι μεταβολές ΑΒΓΑ, ΑΔΕΑ, ΑΖΗΑ που εικονίζονται στο σχήμα 5.6ιζ είναι κυκλικές μεταβολές.

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας, όπως έχομε πει, ενός αερίου (όπως και κάθε συστήματος) δεν εξαρτάται από τον ακολουθούμενο δρόμο, αλλά από την αρχική και την τελική κατάσταση του αερίου.

Επειδή σε μία κυκλική μεταβολή ενός αερίου η αρχική και η τελική κατάστασή του είναι η ίδια (το αέριο επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση) γι' αυτό η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας ενός αερίου κατά μία κυκλική μεταβολή του είναι μηδέν ($\Delta U = 0$).

Δηλαδή για τις κυκλικές μεταβολές ενός αερίου (γενικά ενός συστήματος) ισχύει η σχέση:

$$\Delta U = 0 \tag{1}$$

Επομένως ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος για μια κυκλική μεταβολή δίνει:

$$Q = W + \Delta U, \qquad Q = W + 0$$

$$\boxed{Q = W} \tag{2}$$

Η σχέση (2) εκφράζει ότι η προσφερόμενη στο αέριο θερμότητα κατά μία κυκλική μεταβολή του μεταφέρεται μέσω έργου από το αέριο στο περιβάλλον.

5.7 Δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής (ή δεύτερο θερμοδυναμικό αξίωμα).

5.7.1 Γνώσεις στηρίξεως.

α) Αρχή λειτουργίας των θερμικών μηχανών.

Οι μηχανές στις οποίες προσφέρεται θερμότητα και αυτές μετατρέπουν ένα μέρος της σε ωφέλιμο μηχανικό έργο ονομάζονται θερμικές μηχανές.

Για να λειτουργήσει μια θερμική μηχανή χρειάζονται τα εξής:

1) Μία πηγή θερμότητας σε υψηλή θερμοκρασία T_1.

2) Ένα μέσο Μ (ενεργό υλικό της μηχανής-φορέα) υγρό ή συνηθέστερα αέριο που παίρνοντας θερμότητα Q_1 από την πηγή θερμοκρασίας T_1 εκτελεί μία κυκλική μεταβολή.

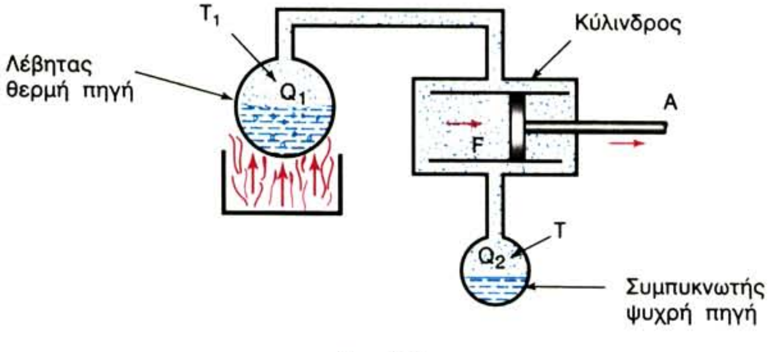
3) Μία πηγή θερμότητας χαμηλής θερμοκρασίας T_2 ($T_2 < T_1$) και η οποία σε κάθε κύκλο δέχεται θερμότητα Q_2 από το μέσο Μ ($Q_2 < Q_1$).

Τέτοιες θερμικές μηχανές είναι π.χ. οι μηχανές εσωτερικής καύσεως και οι ατμομηχανές.

Στο σχήμα 5.7 φαίνεται ενδεικτικά μια ατμομηχανή. Σε αυτή θερμή πηγή είναι ο βραστήρας που ζεσταίνει το νερό και το κάνει ατμό. Μέσο Μ είναι ο θερμός ατμός που εκτονώνεται στον κύλινδρο και έτσι μέρος της Q_1 μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια.

Σημείωση:

Με άλλα λόγια η όλη διαδικασία είναι η εξής:



Σχ. 5.7.

Το μέσο Μ (το ενεργό υλικό) παίρνει (απάγει) από τη θερμή πηγή ποσότητα θερμικής ενέργειας Q_1.

Το μέσο Μ διαστέλλεται μετατρέποντας ένα μέρος της ποσότητας Q_1 σε μηχανική ενέργεια W, την οποία αποδίδει στο περιβάλλον του (ωθεί το έμβολο του κυλίνδρου).

Τέλος το μέσο Μ προσφέρει στην ψυχρή πηγή ποσότητα θερμικής ενέργειας Q_2, που είναι το υπόλοιπο μέρος της ποσότητας Q_1, που δεν μετατράπηκε σε μηχανική ενέργεια κατά τη διαστολή του.

Προσοχή:

Φανερό είναι ότι ισχύει η σχέση: $Q_1 - Q_2 = W$ με την προϋπόθεση βέβαια ότι όλο το ποσό θερμότητας $(Q_1 - Q_2)$ μετατρέπεται από τη μηχανή σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια W.

β) Θερμοδυναμικός συντελεστής αποδόσεως (ή θεωρητική απόδοση) θερμικής μηχανής.

Αν θεωρήσομε ότι όλο το ποσό της θερμότητας $(Q_1 - Q_2)$ μετατρέπεται από τη μηχανή σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια W, δηλαδή θεωρήσομε ότι ισχύει η σχέση: $Q_1 - Q_2 = W$ (1), τότε ο συντελεστής αποδόσεως της θερμικής μηχανής ονομάζεται θερμοδυναμικός συντελεστής αποδόσεως (ή θεωρητική απόδοση) της θερμικής μηχανής και ορίζεται με τη σχέση:

$$\alpha_\Theta = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \qquad (2)$$

γ) Σχέση θεωρητικής αποδόσεως και θερμοκρασιών T_1 και T_2 θερμής και ψυχρής πηγής.

Γνωρίζομε ότι η θερμική ενέργεια που έχει μία μάζα ενός αερίου (όπως και κάθε σύστημα) είναι ανάλογη με την απόλυτη θερμοκρασία της. Δηλαδή:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (3)$$

Από τη σχέση (3) παίρνομε:

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (4)$$

Από τις σχέσεις (2) και (4) παίρνομε:

$$\boxed{\alpha_\Theta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}} \qquad (5)$$

Παρατηρήσεις:

Από τη σχέση (5) προκύπτει:

1) Η θεωρητική απόδοση θερμικής μηχανής εξαρτάται μόνο από τις απόλυτες θερμοκρασίες T_1 και T_2 της θερμής και της ψυχρής πηγής της μηχανής.

2) Η θεωρητική απόδοση θερμικής μηχανής είναι ανεξάρτητη από τη φύση του ρευστού με το οποίο λειτουργεί η μηχανή.

3) Επειδή πάντοτε είναι $T_2 < T_1$, γι' αυτό από τη σχέση (5) προκύπτει:

Η θεωρητική απόδοση (α_Θ) θερμικής μηχανής είναι πάντοτε μικρότερη από τη μονάδα. Δηλαδή: $\alpha_\Theta < 1$.

4) Αν ήταν δυνατό να είναι $T_2 = 0^\circ K$, τότε η θεωρητική απόδοση της θερμικής μηχανής θα ήταν ίση με τη μονάδα.

Πράγματι:

$$\alpha_\Theta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{T_1 - 0}{T_1} = \frac{T_1}{T_1} = 1$$

Προσοχή:

Δεν πρέπει να μας διαφεύγει ότι ο μέγιστος συντελεστής αποδόσεως μιας θερμικής μηχανής είναι ο θερμοδυναμικός συντελεστής αποδόσεως.

5.7.2 Διατυπώσεις του δεύτερου νόμου της θερμοδυναμικής (ή του δεύτερου θερμοδυναμικού αξιώματος).

Ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής καθορίζει τα εξής:

1) Τη διαδικασία μετατροπής της θερμότητας σε μηχανικό έργο και

2) Τη διαδικασία μεταφοράς της θερμότητας από ένα θερμό σώμα σε άλλο θερμότερο (από ψυχρό σε θερμό).

Γι' αυτό ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος εμφανίζεται με τις ακόλουθες διατυπώσεις:

α) ***Διατύπωση των Kelvin-Plank***: ***Είναι αδύνατο να κατασκευάσομε μηχανή που να μετασχηματίζει τη θερμική ενέργεια σε έργο κατά 100%*** ή με άλλα λόγια: ***Μία θερμική μηχανή μπορεί να παράγει έργο μόνο και τότε μόνο όταν ένας φορέας (ενεργό υλικό της μηχανής) παίρνει από μία θερμή δεξαμενή θερμότητα Q_1, περνάει από τη μηχανή και κατόπιν δίνει θερμότητα Q_2 σε μία άλλη λιγότερο θερμή δεξαμενή***.

β) ***Διατύπωση του Glausius***: ***Είναι αδύνατο να κατασκευάσομε μηχανή***

που μεταφέρει θερμότητα από ένα κρύο σώμα σε ένα ζεστό χωρίς να προσφερθεί ενέργεια με τη μορφή μηχανικού έργου πάνω στη μηχανή από το εξωτερικό περιβάλλον. Με άλλα λόγια: ***Είναι αδύνατο να μεταφερθεί θερμότητα από ένα σώμα σε άλλο μεγαλύτερης θερμοκρασίας χωρίς να καταναλωθεί έργο.***

Η διατύπωση αυτή κάνει αδύνατη π.χ. την κατασκευή ενός ψυγείου που θα λειτουργούσε χωρίς δαπάνη κάποιας μορφής ενέργειας.

Προσοχή:

1) Οι δύο αυτές διατυπώσεις είναι ισοδύναμες. Φαινόμενα που αποκλείονται από τη μία αποκλείονται και από την άλλη.

2) Όταν λέμε αεικίνητο δεύτερου είδους, εννοούμε μία θερμική μηχανή (που λειτουργεί κυκλικά) η οποία θα μετέτρεπε τη θερμότητα την οποία θα έπαιρνε από μία θερμή δεξαμενή, σε μηχανική ενέργεια, χωρίς όμως να παρέχει θερμότητα σε δεξαμενή χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Είναι φανερό ότι την κατασκευή μιας τέτοιας μηχανής την αποκλείει ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος.

5.8 Τρίτος νόμος της θερμοδυναμικής (ή τρίτο θερμοδυναμικό αξίωμα).

Έχει διαπιστωθεί ότι όταν ένα θερμοδυναμικό σύστημα βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία, η επίτευξη μιας θερμοκρασίας του, ακόμη χαμηλότερης, είναι τόσο δυσκολότερη, όσο χαμηλότερη είναι αυτή η νέα θερμοκρασία. Κατά συνέπεια, όσο πλησιάζομε στο απόλυτο μηδέν, τόσο δυσκολότερα επιτυγχάνομε θερμοκρασίες πλησιέστερες σε αυτό. Πρακτικά θεωρείται ακατόρθωτο να βρεθεί ένα θερμοδυναμικό σύστημα σε θερμική ισορροπία στο απόλυτο μηδέν. Τα παραπάνω εκφράζονται από το τρίτο θερμοδυναμικό αξίωμα το οποίο ορίζει τα εξής: ***Όσο τέλειο κι αν είναι ένα σύστημα είναι αδύνατο να ελαττωθεί η θερμοκρασία του μέχρι το απόλυτο μηδέν*** ή με άλλα λόγια ***είναι αδύνατο να πετύχομε το απόλυτο μηδέν.*** Από το αξίωμα αυτό γίνεται φανερό ότι ***ο συντελεστής αποδόσεως μιας θερμικής μηχανής δεν μπορεί ποτέ να γίνει ίσος με τη μονάδα γιατί αυτό προϋποθέτει*** $T_2 = 0$.

5.9 Αρχή υποβαθμίσεως της ενέργειας.

5.9.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Οι διάφορες μορφές ενέργειας είναι ποσοτικά ισοδύναμες (πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής), αλλά όχι το ίδιο πολύτιμες (χρήσιμες).

Η χρησιμότητα (πολυτιμότητα-ποιότητα) μιας μορφής ενέργειας αξιολογείται σύμφωνα με το ποσοστό της που μπορεί να μετατραπεί σε άλλη μορφή ενέργειας.

Από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής προκύπτει ότι η θερμότητα δεν μπορεί να μετατραπεί πλήρως (εξ ολοκλήρου) σε άλλες μορφές ενέργειας. Είναι όμως γνωστό ότι οι άλλες μορφές ενέργειας μπορούν να μετατραπούν πλήρως σε θερμότητα (σωστότερα σε εσωτερική ενέργεια). Για το λόγο αυτό η θερμότητα χαρακτηρίζεται σαν ενέργεια κατώτερης ποιότητας σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας, που χαρακτηρίζονται σαν ενέργειες ανώτερης ποιότητας. Επομένως η θερμότητα (σωστότερα η εσωτερική ενέργεια) ποσοτικά είναι ισοδύναμη με τις άλλες μορφές ενέργειας, ποιοτικά όμως είναι κατώτερη.

Σημείωση:

Γενικά μία μορφή ενέργειας θα χαρακτηρίζεται ως ενέργεια ανώτερης ποιότητας εάν μπορεί κάθε ποσότητά της να μετατραπεί πλήρως (εξ ολοκλήρου) σε άλλες μορφές ενέργειας.

Ενώ μία μορφή ενέργειας θα χαρακτηρίζεται γενικά ως ενέργεια κατώτερης ποιότητας, αν δεν μπορεί κάθε ποσότητά της να μετατραπεί πλήρως (εξ ολοκλήρου) σε άλλες μορφές ενέργειας.

Όλες οι μορφές ενέργειας εκτός από τη θερμότητα (σωστότερα την εσωτερική ενέργεια) είναι μορφές ενέργειας ανώτερης ποιότητας.

Η θερμοδυναμική ενέργεια είναι τόσο χαμηλότερης ποιότητας, όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία του σώματος που την περιέχει.

Αν θεωρήσομε μία θερμική μηχανή στην οποία προσφέρεται ποσό θερμότητας μεταξύ των θερμοκρασιών T_1 και T_2 ($T_1 > T_2$), τότε η απόδοση (α) της μηχανής θα είναι:

$$\alpha = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1)$$

Αν τώρα το ίδιο ποσόν θερμότητας προσφέρεται στη μηχανή μεταξύ των θερμοκρασιών T'_1 και T_2 ($T'_1 > T_2$), όπου $T'_1 > T_1$ (2) η απόδοση της μηχανής θα είναι:

$$\alpha' = 1 - \frac{T_2}{T'_1} \quad (3)$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει:

$$\alpha < \alpha' \quad (4)$$

Από την (4) συνάγεται ότι:

Ίσα ποσά θερμότητας σε διαφορετικές θερμοκρασίες έχουν διαφορετική ικανότητα παραγωγής έργου και όσο πιο χαμηλή είναι η θερμοκρασία υπό την οποία βρίσκεται ένα ποσό θερμότητας, τόσο πιο υποβαθμισμένη από πλευράς αποδόσεως είναι η ποσότητα θερμότητας που μεταφέρεται.

5.9.2 Διατύπωση της αρχής υποβαθμίσεως της ενέργειας.

Έχει διαπιστωθεί ότι αν εντός θερμικά μονωμένου χώρου τεθούν σώματα, τα οποία έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες τότε τα θερμότερα σώματα αποβάλλουν «αυτομάτως» ποσότητες θερμότητας (τις οποίες προσλαμβάνουν τα ψυχρότερα σώματα) και επομένως η θερμοκρασία τους «αυτομάτως» πέφτει. Με βάση τα παραπάνω η θερμοκρασία των σωμάτων γενικά τείνει «αυτομάτως» να πέφτει και η εσωτερική τους ενέργεια τείνει «αυτομάτως» να υποβιβασθεί.

Επίσης έχει διαπιστωθεί ότι:

Σε κάθε μετατροπή οποιασδήποτε μορφής ενέργειας ένα μέρος της μετατρέπεται πάντοτε αυτομάτως σε θερμότητα (σωστότερα σε θερμοδυναμική ενέργεια). Δηλαδή όλες οι μορφές ενέργειας παρουσιάζουν την τάση από μορφές ενέργειας ανώτερης ποιότητας να μετατραπούν σε μορφή κατώτερης ποιότητας, επομένως να υποβαθμισθούν.

Από όλα τα πιο πάνω και από τη μελέτη των διαφόρων φαινομένων έχει διαπιστωθεί ότι στη φύση ισχύει η ακόλουθη αρχή της υποβαθμίσεως της ενέργειας:

1) Όλες οι ανώτερες μορφές ενέργειας, κατά τις μετατροπές τους, τείνουν αυτομάτως να υποβαθμισθούν μετατρεπόμενες σε θερμότητα (σωστότερα σε εσωτερική ενέργεια).

2) Κάθε ποσό θερμοδυναμικής ενέργειας τείνει αυτομάτως να υποβαθμισθεί «αποκτώντας» χαμηλότερη θερμοκρασία.

Προσοχή:

Η αρχή της υποβαθμίσεως της ενέργειας είναι γενικότατος ποιοτικός νόμος της φύσεως, ο οποίος συμπληρώνει τον άλλον γενικότατο ποσοτικό νόμο της διατηρήσεως της ενέργειας.

Η αρχή της υποβαθμίσεως της ενέργειας διατυπώνεται ως εξής:

Στη φύση όλα τα φαινόμενα συμβαίνουν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να προκύπτει τελικά μη εκμεταλλεύσιμη εσωτερική ενέργεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΣ ΤΩΝ ΣΩΜΑΤΩΝ

6.1 Τήξη.

6.1.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Τήξη ενός στερεού υλικού ονομάζεται η μετάβαση του υλικού από τη στερεή κατάσταση στην υγρή ***όταν σε αυτό προσφερθεί θερμότητα***.

α) Πλαστική τήξη.

Πλαστική τήξη ονομάζεται η τήξη ενός υλικού κατά την οποία το υλικό μεταβαίνει από τη στερεή στην υγρή του κατάσταση ***σιγά-σιγά***, περνώντας από μία ενδιάμεση κατάσταση που έχει πλαστικότητα.

Το γυαλί ή το κερί όταν θερμαίνονται δεν μεταβαίνουν απότομα από τη στερεή στην υγρή τους κατάσταση, αλλά σιγά-σιγά, περνώντας από μία ενδιάμεση κατάσταση που έχει πλαστικότητα. Γενικά η μετάβαση των άμορφων υλικών από τη στερεή στην υγρή κατάστασή τους, ***δεν γίνεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία***, δηλαδή δεν γίνεται απότομα, αλλά σε μία περιοχή θερμοκρασιών, μέσα στην οποία το στερεό μετατρέπεται σε υγρό.

β) Κρυσταλλική τήξη.

Κρυσταλλική τήξη ονομάζεται η τήξη ενός υλικού κατά την οποία αυτό μεταβαίνει ***απότομα*** από τη στερεή στην υγρή του κατάσταση. Δηλαδή η μετάβαση του υλικού από τη στερεή στην υγρή του κατάσταση γίνεται σε μία ***συγκεκριμένη*** θερμοκρασία. Κρυσταλλική τήξη παθαίνουν τα κρυσταλλικά σώματα.

Θερμοκρασία τήξεως ή ***σημείο τήξεως*** ενός κρυσταλλικού υλικού υπό μία ορισμένη εξωτερική πίεση, ονομάζεται η θερμοκρασία εκείνη κατά την οποία αρχίζει να τήκεται το υλικό, όταν σε αυτό εξασκείται η πίεση αυτή.

Κανονική θερμοκρασία τήξεως ή ***κανονικό σημείο τήξεως*** ενός υλικού, ονομάζεται η θερμοκρασία κατά την οποία αρχίζει να τήκεται το υλικό όταν εξασκείται σε αυτό εξωτερική πίεση ίση με 76 cmHg.

Προσοχή:

Κάθε υλικό υπό ορισμένη εξωτερική πίεση έχει δική του θερμοκρασία τήξεως, δηλαδή η θερμοκρασία τήξεως ενός υλικού είναι μία σταθερά που το χαρακτηρίζει.

6.1.2 Νόμοι της κρυσταλλικής τήξεως.

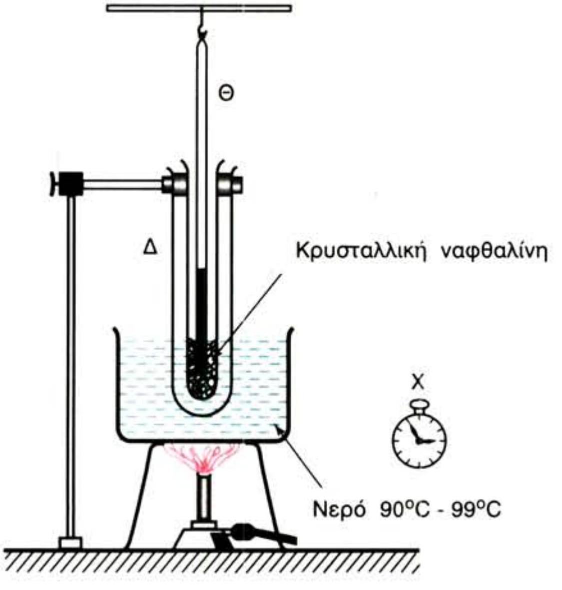
1ος. Υπό την ίδια εξωτερική πίεση, η τήξη ενός υλικού αρχίζει στην ίδια πάντοτε θερμοκρασία.

2ος. Κατά τη διάρκεια της τήξεως παρόλο που στο υλικό προσφέρεται θερμότητα, η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή (ίση με το σημείο τήξεώς του).

3ος. Κατά τη διάρκεια της τήξεως συνυπάρχουν η στερεή και υγρή κατάσταση του υλικού.

Στο σωλήνα Δ (σχ. 6.1α) βάζομε κρυσταλλική ναφθαλίνη και τον τοποθετούμε σε ζεστό νερό 98°C.

Με τη βοήθεια του θερμομέτρου Θ και του χρονομέτρου Χ, βρίσκομε τις θερμοκρασίες της ναφθαλίνης ανά ίσα χρονικά διαστήματα. Τα αποτελέ-



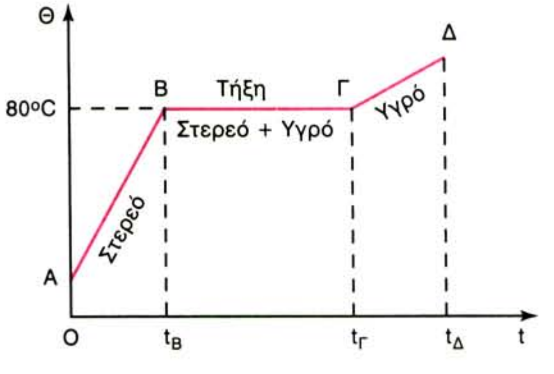
Σχ. 6.1α.

σματα των παρατηρήσεων τα παριστάνομε γραφικά στο σχήμα 6.1β.

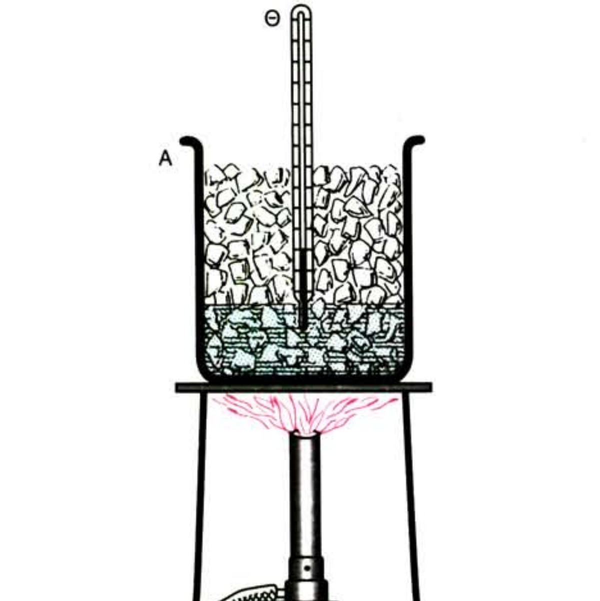
Παρατηρούμε ότι:

1) Κατά τη διάρκεια του χρόνου Ot_B, που η ναφθαλίνη βρίσκεται στη στερεή κατάσταση, η θερμοκρασία της αυξάνεται (τμήμα ΑΒ). Πράγματι το ζεστό νερό προσφέρει στην κρυσταλλική ναφθαλίνη θερμότητα, η οποία της ανεβάζει τη θερμοκρασία, σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας:

$$\boxed{Q_\Sigma = m \cdot c_\Sigma \cdot \Delta\Theta}$$



Σχ. 6.1β.



Σχ. 6.1γ.

2) Όταν η θερμοκρασία της ναφθαλίνης φθάσει τους 80°C (σημείο τήξεώς της), αρχίζει η τήξη της (*1ος νόμος*).

3) Κατά το χρόνο t_B $t_Γ$ συνεχίζεται η τήξη της ναφθαλίνης (μικραίνει η μάζα της στερεής καταστάσεως και μεγαλώνει η μάζα της υγρής). Η θερμοκρασία της όμως παραμένει σταθερή (τμήμα ΒΓ) στους 80°C (*2ος νόμος*) παρόλο που το ζεστό νερό συνεχίζει να δίνει θερμότητα στη ναφθαλίνη.

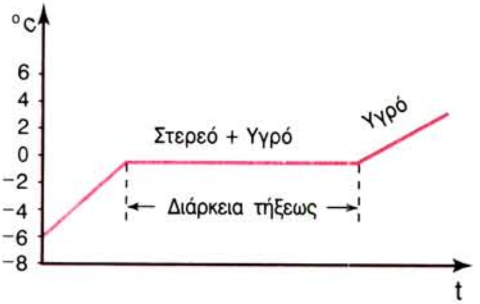
4) Κατά το χρόνο t_B $t_Γ$ που συνεχίζεται η τήξη της ναφθαλίνης (δηλαδή κατά τη διάρκεια της τήξεως) συνυπάρχουν η στερεή και η υγρή κατάσταση της ναφθαλίνης (*3ος νόμος*).

5) Μετά τη χρονική στιγμή $t_Γ$, όταν δηλαδή έχει λειώσει όλη η κρυσταλλική ναφθαλίνη, η θερμοκρασία της υγρής ναφθαλίνης αρχίζει να ανεβαίνει (τμήμα ΓΔ), σύμφωνα με τη σχέση:

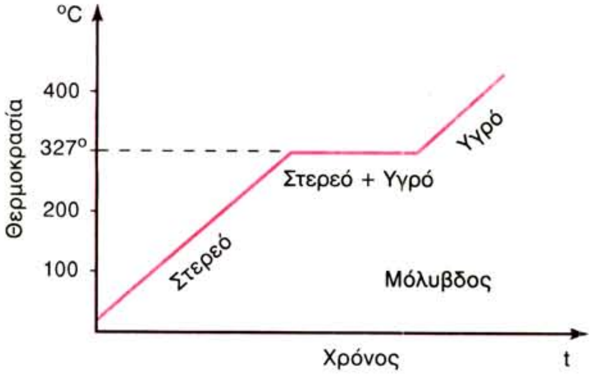
$$\boxed{Q_υ = m \cdot c_υ \cdot ΔΘ}$$

Αν μέσα στο δοχείο Α (σχ. 6.1γ) βάλομε πάγο, π.χ. θερμοκρασίας −6°C και το θερμάνομε, τότε θα πάρομε τη γραφική παράσταση του σχήματος 6.1δ η οποία είναι όμοια με τη γραφική παράσταση του σχήματος 6.1β (η θερμοκρασία τήξεως του πάγου 0°C).

Όμοια γραφική παράσταση (σχ. 6.1ε) θα πάρομε αν στο δοχείο Α βάλομε αντί για πάγο μόλυβδο (η θερμοκρασία τήξεως 327°C).



Σχ. 6.1δ.



Σχ. 6.1ε.

6.1.3 Θερμότητα τήξεως υλικού (ή ειδική θερμότητα τήξεως σώματος).

Θερμότητα τήξεως (L) ενός υλικού ονομάζεται το πηλίκο του ποσού της θερμότητας (Q) που πρέπει να απορροφήσει μια στερεή μάζα (m) από το υλικό αυτό, όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία τήξεώς του (υπό πίεση 76 cmHg) για να γίνει αυτή υγρό της ίδιας θερμοκρασίας, ήτοι:

$$\boxed{L = \frac{Q}{m}} \quad \text{εξίσωση ορισμού} \qquad (1)$$

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι η θερμότητα τήξεως ενός υλικού ***ισούται αριθμητικώς*** με το ποσό της θερμότητας που πρέπει να προσλάβει για να τακεί μάζα από το υλικό αυτό ίση προς μία μονάδα μάζας, όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία τήξεώς του.

Η θερμότητα τήξεως του πάγου είναι:

$$L = 80\frac{\text{cal}}{\text{g}}$$

Αυτό σημαίνει ότι για να λειώσει 1 g πάγου, θερμοκρασίας 0°C (θερμοκρασία τήξεως του πάγου 0°C), δηλαδή για να γίνει υγρό (νερό) θερμοκρασίας 0°C, πρέπει να πάρει θερμότητα Q ίση με 80 cal.

Παρατηρήσεις:

Αν λύσομε τη σχέση ορισμού (1) της θερμότητας τήξεως ως προς Q θα προκύψει η σχέση:

$$\boxed{Q = L \cdot m}$$

όπου: Q το ποσό της θερμότητας το οποίο πρέπει να απορροφήσει μάζα m, ενός στερεού υλικού, όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία τήξεώς του, για να γίνει υγρό της ίδιας θερμοκρασίας και
L η θερμότητα τήξεως του υλικού.

6.2 Πήξη.

6.2.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Πήξη ενός υγρού ονομάζεται η μετάβαση του υλικού από την υγρή του κατάσταση στη στερεή όταν το υγρό αποβάλλει θερμότητα.

α) Πλαστική πήξη.

Πλαστική πήξη ονομάζεται η πήξη ενός υλικού κατά την οποία το υλικό μεταβαίνει σιγά-σιγά, από την υγρή στη στερεή του κατάσταση, περνώντας από μία ενδιάμεση που έχει πλαστικότητα. Π.χ. το γυαλί ή το κερί όταν βρεθούν σε υγρή κατάσταση και ψυχθούν, δεν μεταβαίνουν απότομα από την υγρή στη στερεή τους κατάσταση, αλλά σιγά-σιγά, περνώντας από μία ενδιάμεση κατάσταση που έχει πλαστικότητα.

Γενικά κατά την πλαστική πήξη ενός υλικού, η μετάβαση του υλικού από την υγρή στη στερεή κατάσταση ***δεν γίνεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία*** (δηλαδή δεν γίνεται απότομα), αλλά σε μία περιοχή θερμοκρασιών, μέσα στην οποία το υγρό μετατρέπεται σιγά-σιγά σε στερεό.

β) Κρυσταλλική πήξη.

Κρυσταλλική πήξη ονομάζεται η πήξη ενός υλικού κατά την οποία αυτό μεταβαίνει ***απότομα*** από την υγρή στη στερεή του κατάσταση, δηλαδή η μετάβαση του υλικού από την υγρή στη στερεή του κατάσταση ***γίνεται σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία***.

Θερμοκρασία πήξεως ή ***σημείο πήξεως*** ενός υλικού υπό μία ορισμένη εξωτερική πίεση, ονομάζεται η θερμοκρασία εκείνη κατά την οποία το υλικό αρχίζει να πήξει όταν σε αυτό εξασκείται η πίεση αυτή.

Κανονική θερμοκρασία πήξεως ή ***κανονικό σημείο πήξεως*** ενός υλικού ονομάζεται η θερμοκρασία κατά την οποία το υλικό αρχίζει να πήζει όταν εξασκείται σε αυτό εξωτερική πίεση ίση με 76 cmHg.

Όταν δεν γίνεται λόγος για πίεση, εννοείται ότι η πίεση είναι ίση με την κανονική πίεση, δηλαδή 76 cmHg.

Η θερμοκρασία τήξεως και η θερμοκρασία πήξεως ενός υλικού υπό την αυτή εξωτερική πίεση είναι η αυτή, δηλαδή ένα υλικό αρχίζει να πήζει ή να λειώνει στην ίδια θερμοκρασία αν επάνω του εξασκείται η ίδια πίεση.

Προσοχή:

Κάθε υλικό υπό ορισμένη εξωτερική πίεση έχει δική του θερμοκρασία πήξεως, δηλαδή η θερμοκρασία πήξεως ενός υλικού είναι μία σταθερά που το χαρακτηρίζει.

6.2.2 Νόμοι της κρυσταλλικής πήξεως.

1ος. Υπό την ίδια εξωτερική πίεση, η πήξη ενός υγρού αρχίζει στην ίδια πάντοτε θερμοκρασία.

2ος. Κατά τη διάρκεια της πήξεως, παρόλο που το υλικό αποβάλλει θερμότητα, η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή (ίση με το σημείο πήξεώς του).

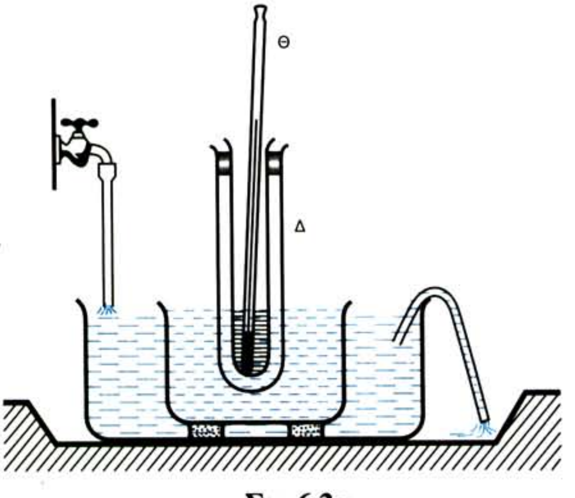
3ος. Κατά τη διάρκεια της πήξεως συνυπάρχουν η υγρή και στερεή κατάσταση του υλικού.

Στο σωλήνα Δ (σχ. 6.2α) βάζομε υγρή ναφθαλίνη θερμοκρασίας 100°C και τον τοποθετούμε σε νερό θερμοκρασίας του δικτύου. Με τη βοήθεια θερμομέτρου και χρονομέτρου, βρίσκομε τις θερμοκρασίες της ναφθαλίνης ανά ίσα χρονικά διαστήματα.

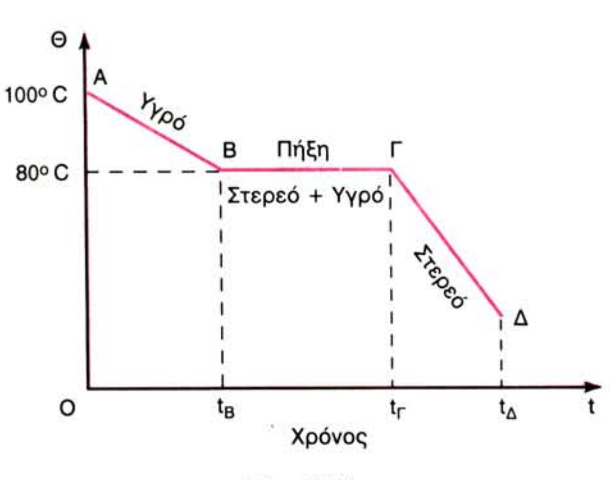
Τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων τα παριστάνομε γραφικά στο σχήμα 6.2β.

Παρατηρούμε ότι:

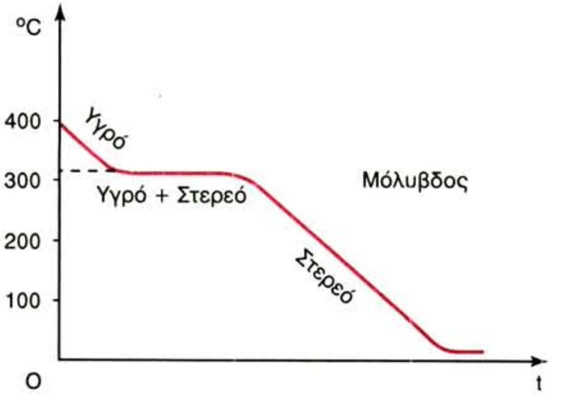
1) Κατά τη διάρκεια του χρόνου Ot_{β} που η ναφθαλίνη βρίσκεται στην υγρή κατάσταση, η θερμοκρασία της ελαττώνεται (τμήμα ΑΒ). Πράγματι η ζεστή υγρή ναφθαλίνη προσφέρει στο νερό θερμότητα και η θερμοκρασία



Σχ. 6.2α.



Σχ. 6.2β.



Σχ. 6.2γ.

της πέφτει, σύμφωνα με το θεμελιώδη νόμο της θερμιδομετρίας.

$$\boxed{Q_\upsilon = m \cdot c_\upsilon \cdot \Delta\Theta}$$

2) Όταν η θερμοκρασία της ναφθαλίνης φθάσει τους 80°C (σημείο πήξεώς της) αρχίζει η πήξη της (***1ος νόμος***).

3) Κατά το χρόνο $t_B t_\Gamma$ η πήξη της ναφθαλίνης συνεχίζεται (μικραίνει η μάζα της υγρής καταστάσεως και μεγαλώνει η μάζα της στερεής). Η θερμοκρασία της όμως παραμένει σταθερή (τμήμα ΒΓ) στους 80°C (***2ος νόμος***) παρόλο που η ναφθαλίνη συνεχίζει να δίνει θερμότητα στο νερό.

4) Κατά το χρόνο $t_B t_\Gamma$ που συνεχίζεται η πήξη της ναφθαλίνης (δηλαδή κατά τη διάρκεια της πήξεως), συνυπάρχουν η υγρή και η στερεή κατάσταση της ναφθαλίνης (***3ος νόμος***).

5) Μετά τη χρονική στιγμή t_Γ, όταν δηλαδή έχει πήξει όλη η ναφθαλίνη, η θερμοκρασία της στερεής ναφθαλίνης αρχίζει να πέφτει (τμήμα ΓΔ), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\boxed{Q_\Sigma = m \cdot c_\Sigma \cdot \Delta\Theta}$$

Αν μέσα σε ένα δοχείο έχομε λειωμένο μολύβι, π.χ. 400°C και το αφήσομε να ψυχθεί στον περιβάλλοντα χώρο, θα πάρομε τη γραφική παράσταση του σχήματος 6.2γ η οποία είναι όμοια με τη γραφική παράσταση του σχήματος 6.2β.

6.2.3 Θερμότητα πήξεως υλικού (ή ειδική θερμότητα πήξεως σώματος).

Θερμότητα πήξεως (L) ενός υλικού ονομάζεται το πηλίκο του ποσού της θερμότητας (Q), που πρέπει να αποβάλει μια υγρή μάζα (m) από το υλικό αυτό, όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία πήξεώς του, για να γίνει αυτή στερεό με την ίδια θερμοκρασία. Δηλαδή:

$L = \dfrac{Q}{m}$	εξίσωση ορισμού

(1)

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι η θερμότητα πήξεως ενός υλικού ***ισούται αριθμητικώς*** με το ποσό της θερμότητας που πρέπει να αποβάλει, για να πήξει μάζα από το υλικό αυτό ίση προς μία μονάδα μάζας, όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία πήξεώς του. Η θερμότητα πήξεως του νερού είναι 80 cal/g. Αυτό σημαίνει ότι για να πήξει 1 g νερού θερμοκρασίας 0°C (θερμοκρασία πήξεως νερού 0°C), δηλαδή για να γίνει πάγος θερμοκρασίας 0°C, πρέπει να αποβάλει θερμότητα (Q) ίση με 80 cal.

Η θερμότητα πήξεως ενός υλικού είναι ίση με τη θερμότητα τήξεώς του.

6.2.4 Μονάδες ειδικής θερμότητας πήξεως.

Μονάδα θερμότητας στο S.I. είναι το 1 J και μάζας το 1 kg. Αν στην εξίσωση ορισμού (1) της ειδικής θερμότητας πήξεως βάλομε: Q = 1 J και m = 1 kg θα βρούμε ότι μονάδα ειδικής θερμότητας πήξεως στο S.I. είναι το 1 J κατά 1 kg. Δηλαδή: $L = \dfrac{Q}{m} = \dfrac{1\,T}{1\,kg} = 1\,J/kg$.

Προσοχή:

Συχνά στην πράξη χρησιμοποιείται ως μονάδα ειδικής θερμότητας πήξεως η μία θερμίδα κατά γραμμάριο. Δηλαδή: $L = \dfrac{Q}{m} = \dfrac{1\,cal}{1\,g} = 1\,cal/g$.

Παρατήρηση:

Αν λύσομε τη σχέση ορισμού (1) της θερμότητας πήξεως ως προς Q θα έχομε τη σχέση:

$$\boxed{Q = L \cdot m}$$

όπου: Q το ποσό της θερμότητας το οποίο πρέπει να αποβάλει μάζα m ενός υγρού υλικού όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία πήξεώς του, για να γίνει στερεό της ίδιας θερμοκρασίας και
L η θερμότητα πήξεως του υλικού.

Σημείωση:

Το ποσό της θερμότητας το οποίο πρέπει να αποβάλει μάζα m ενός υλικού όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία πήξεώς του (Θ_{Π}) για να γίνει στερεό της ίδιας θερμοκρασίας, είναι ίσο με το ποσό της θερμότητας το οποίο πρέπει να προσλάβει η μάζα αυτή m του υλικού, όταν βρίσκεται στη θερμοκρασία τήξεώς του Θ_T ($\Theta_T = \Theta_\Pi$) για να γίνει υγρό της ίδιας θερμοκρασίας.

6.2.5 Υστέρηση πήξεως ή υπέρτηξη.

Υστέρηση πήξεως ή υπέρτηξη ονομάζεται το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο ένα υλικό διατηρεί την υγρή κατάστασή του, ενώ η θερμοκρασία του είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία πήξεώς του. Το αποσταγμένο νερό, π.χ. όταν ψύχεται πολύ αργά, μπορεί να έχει θερμοκρασία μέχρι $-10^\circ C$, χωρίς να στερεοποιηθεί, δηλαδή παρουσιάζει το φαινόμενο της υπερτήξεως.

Όταν ένα υλικό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση, ενώ η θερμοκρασία του είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία πήξεώς του, τότε λέμε ότι βρίσκεται σε κατάσταση υπερτήξεως.

Η κατάσταση της υπερτήξεως ενός υλικού δεν είναι σταθερή γιατί ελάχιστη μετακίνηση του υγρού που βρίσκεται σε υπέρτηξη ή προσθήκη ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, το μετατρέπει σε στερεό.

Παρατήρηση:

Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν μπορεί ένα υλικό σώμα να βρίσκεται σε στερεή κατάσταση, ενώ η θερμοκρασία του να είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία τήξεώς του. (Δηλαδή δεν παρατηρείται ποτέ υστέρηση τήξεως).

6.2.6 Επίδραση της πιέσεως στη θερμοκρασία τήξεως.

Το σημείο τήξεως ενός υλικού μεταβάλλεται, όταν μεταβάλλεται η πίεση που εξασκείται στο υλικό.

Οι μεταβολές όμως του σημείου τήξεως ενός υλικού, που οφείλονται στις μεταβολές της πιέσεως που εξασκείται στο υλικό, είναι σχετικά μικρές.

Γι' αυτό στην πράξη, για μικρές μεταβολές της πιέσεως, που εξασκείται στο υλικό, το σημείο τήξεώς του θεωρείται σταθερό.

Γενικά διαπιστώνεται ότι:

1) Για τα σώματα που ο όγκος τους αυξάνεται κατά την τήξη τους, η θερμοκρασία τήξεώς τους ανεβαίνει, όταν αυξάνεται η πίεση που εξασκείται σε αυτά.

2) Για τα σώματα που ο όγκος τους ελαττώνεται κατά την τήξη τους (π.χ. πάγος), η θερμοκρασία τήξεώς τους κατεβαίνει, όταν αυξάνεται η πίεση που εξασκείται σε αυτά.

6.3 Μεταβολή του όγκου κατά την πήξη και τήξη.

Από τη μεταβολή που παθαίνει ο όγκος ορισμένης μάζας ενός υλικού κατά την τήξη της, διακρίνομε τα υλικά σε δύο κατηγορίες:

1η κατηγορία.

Σε αυτή ανήκουν τα υλικά εκείνα που ο όγκος ορισμένης μάζας τους μεγαλώνει όταν η μάζα αυτή τήκεται. Επομένως η πυκνότητα των υλικών αυτών είναι μεγαλύτερη, όταν αυτά βρίσκονται στη στερεή κατάσταση, από την πυκνότητα που έχουν, όταν βρίσκονται στην υγρή κατάσταση.

Γι' αυτό παρατηρούμε ότι όταν λειώσομε ένα τέτοιο υλικό μέσα σε ένα δοχείο, τα κομμάτια του υλικού που βρίσκονται ακόμη στη στερεή κατάσταση παραμένουν στον πυθμένα του δοχείου.

Σημείωση:

Ευνόητο είναι ότι ο όγκος ορισμένης μάζας των υλικών που ανήκουν στην κατηγορία αυτή, μικραίνει όταν η μάζα αυτή πήξει.

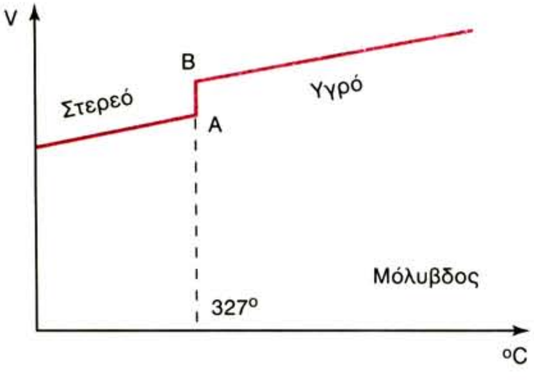
Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα περισσότερα υλικά. Ο μόλυβδος είναι ένα από τα υλικά αυτής της κατηγορίας.

Γι' αυτό όταν τήκομε μόλυβδο μέσα σε δοχείο παρατηρούμε ότι τα τεμάχια του μολύβδου τα οποία βρίσκονται ακόμα σε στερεή κατάσταση επειδή έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα παραμένουν στον πυθμένα του δοχείου.

Το σχήμα 6.3α μας δίνει τη γραφική παράσταση της μεταβολής του όγκου μιας μάζας μολύβδου με τη θερμοκρασία.

Η θερμοκρασία τήξεως του μολύβδου, υπό πίεση 760 Torr είναι 327°C.

Το τμήμα ΑΒ στο σχήμα 6.3α παριστά την απότομη αύξηση του όγκου στη θερμοκρασία τήξεως του μολύβδου, όπου, ενώ η θερμοκρασία παραμένει σταθερή ο όγκος του μολύβδου αυξάνεται. Όταν λειώσει ολόκληρη η



Σχ. 6.3α.

ποσότητα του μολύβδου, ο όγκος αυξάνεται και πάλι σε σχέση με τη θερμοκρασία.

2η κατηγορία.

Σε αυτή ανήκουν τα υλικά εκείνα που ο όγκος ορισμένης μάζας τους ελαττώνεται όταν η μάζα αυτή τήκεται. Επομένως η πυκνότητα των υλικών αυτών είναι μεγαλύτερη όταν αυτά βρίσκονται στην υγρή κατάσταση.

Γι' αυτό παρατηρούμε ότι όταν τήκομε ένα τέτοιο υλικό μέσα σε ένα δοχείο, τα κομμάτια του υλικού που βρίσκονται ακόμη στη στερεή κατάσταση επιπλέουν.

Ο πάγος ανήκει σε αυτή την κατηγορία. Η πυκνότητα του πάγου στους 0°C είναι 0,917 g/cm^3 ενώ του νερού στους 0°C είναι 0,999 g/cm^3. Γι' αυτό ο πάγος επιπλέει στο νερό.

Σημείωση:

1) Ευνόητο είναι ότι ο όγκος ορισμένης μάζας των υλικών που ανήκουν στην κατηγορία αυτή αυξάνεται όταν η μάζα αυτή πήξει.

2) Το σχήμα 6.3β μας δίνει τη γραφική παράσταση της μεταβολής του όγκου μιας μάζας ενός υλικού της κατηγορίας αυτής, με τη θερμοκρασία.

3) Στην κατηγορία αυτή ανήκουν πολύ λίγα υλικά (π.χ. ο σίδηρος, το βισμούθιο και μερικά άλλα).

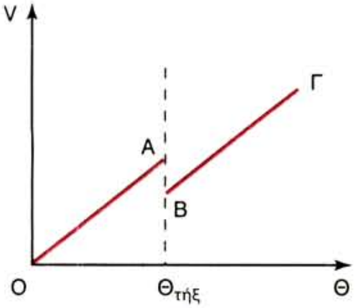
6.3.1 Ειδικά για την τήξη του πάγου.

Όταν τήκεται μια μάζα m πάγου, ο όγκος της μικραίνει ενώ όταν πήξει μια μάζα m νερού ο όγκος της μεγαλώνει.

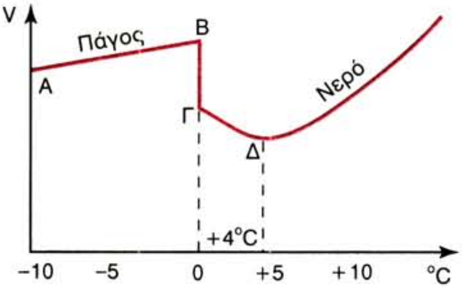
Δηλαδή η πυκνότητα του πάγου είναι μικρότερη από την πυκνότητα του νερού και συγκεκριμένα:

Η πυκνότητα του πάγου στους 0°C είναι 0,917 g/cm^3 και του νερού στους 0°C είναι 0,999 g/cm^3.

Η γραφική παράσταση του σχήματος 6.3γ μας δίνει μία εικόνα του τρό-



Σχ. 6.3β.



Σχ. 6.3γ.

που που μεταβάλλεται ο όγκος πάγου-νερού σε σχέση με τη θερμοκρασία.

Παρατηρούμε ότι, αν έχομε πάγο θερμοκρασίας π.χ. $-10^\circ C$ και τον θερμάνομε, ο όγκος του αυξάνεται (τμήμα ΑΒ). Κατά τη διάρκεια όμως της μεταβολής του πάγου σε νερό (της τήξεως του πάγου) ο όγκος του ελαττώνεται (τμήμα ΒΓ), δηλαδή το νερό που προκύπτει από την τήξη μιας μάζας m πάγου έχει μικρότερο όγκο από εκείνο που είχε όταν ήταν πάγος.

Αν συνεχίσομε να θερμαίνομε το νερό, θα παρατηρήσομε ότι κατά τη θέρμανσή του από τους $0^\circ C$ μέχρι $+4^\circ C$ ο όγκος του μικραίνει, δηλαδή το νερό συστέλλεται (τμήμα καμπύλης ΓΔ). Πέραν όμως από τους $+4^\circ C$, το νερό διαστέλλεται σύμφωνα με τα γνωστά.

Αν μέσα σε ένα δοχείο, που έχει νερό, ρίξομε κομμάτια πάγου, θα παρατηρήσομε ότι αυτά επιπλέουν. Επίσης τα παγόβουνα επιπλέουν στη θάλασσα.

Αυτά συμβαίνουν, γιατί η πυκνότητα του πάγου είναι μικρότερη από την πυκνότητα του νερού.

Οι σωλήνες υδρεύσεως σπάζουν στις πολύ κρύες νύχτες του χειμώνα, αν το νερό, που περιέχουν, στερεοποιηθεί (πήξει).

Τα ψυγεία των αυτοκινήτων καταστρέφονται, όταν το χειμώνα πήξει το νερό που περιέχουν (γι' αυτό πρέπει να λαμβάνονται σχετικά μέτρα, π.χ. αντιπηκτικά υγρά).

Τα διάφορα πετρώματα θρυμματίζονται όταν το χειμώνα πήξει το νερό, που υπάρχει στις διάφορες ρωγμές τους.

Αυτά συμβαίνουν γιατί, ***όταν το νερό πήξει, ο όγκος του αυξάνεται και κατά την αύξηση αυτή, όταν γίνεται σε περιορισμένο χώρο, αναπτύσσονται μεγάλες δυνάμεις***.

Παρατήρηση:

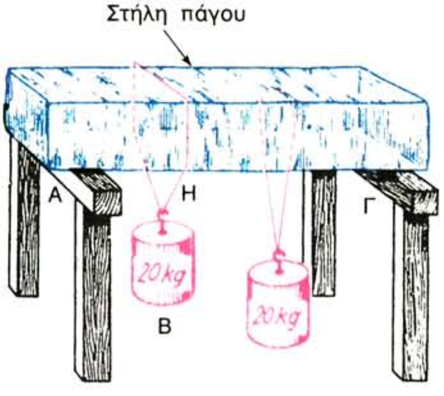
Το σημείο τήξεως του πάγου, όπως και όλων των σωμάτων που ο όγκος τους ελαττώνεται όταν τήκονται, κατεβαίνει όταν αυξάνεται η πίεση που εξασκείται πάνω τους.

Παίρνομε μία κολώνα πάγου και τη στηρίζομε στα υποστηρίγματα Α και Γ (σχ. 6.3δ). Δένομε στις δύο άκρες του λεπτού σύρματος Η το βάρος Β και τοποθετούμε το σύρμα και το βάρος, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.3δ. Παρατηρούμε ότι μετά από ορισμένο χρόνο, το σύρμα θα έχει περάσει μέσα από την κολώνα του πάγου, χωρίς η κολώνα να κοπεί.

Δικαιολογήστε το φαινόμενο.

6.3.2 Σημείο πήξεως διαλυμάτων.

Αν σε ένα υγρό ***διαλύσομε κάποια ουσία, τότε το σημείο πήξεώς του ελαττώνεται***.



Σχ. 6.3δ.

Η ελάττωση του σημείου πήξεως ενός υγρού είναι τόσο πιο μεγάλη, όσο πιο μεγάλη είναι η ποσότητα της ουσίας που είναι διαλυμένη σε αυτό.

Ένα πυκνό διάλυμα, π.χ. μαγειρικό αλάτι (NaCl) μέσα σε νερό στερεοποιείται στους –20°C, ενώ το καθαρό νερό στερεοποιείται στους 0°C. Το συνηθισμένο θαλάσσιο νερό στερεοποιείται στους –2,5°C.

6.3.3 Ψυκτικά μείγματα.

Για τη διάλυση ενός υλικού μέσα σε ένα άλλο, πρέπει να δαπανηθεί θερμότητα, η οποία προκαλεί τον αποχωρισμό των μορίων του.

Αν αναμείξομε πάγο 0°C με μαγειρικό αλάτι (3:1), θα πάρομε διάλυμα μαγειρικού άλατος και νερού, θερμοκρασίας –22°C. Για την τήξη του πάγου χρειάσθηκε ποσότητα θερμότητας. Επίσης για τη διάλυση του άλατος χρειάσθηκε ποσότητα θερμότητας. Οι ποσότητες αυτές προσφέρθηκαν από τα δύο σώματα (πάγο και αλάτι), και γι' αυτό η θερμοκρασία του διαλύματος κατέβηκε στους –22°C.

Γενικά τα μείγματα, τα οποία προκαλούν πτώση της θερμοκρασίας, ονομάζονται ***ψυκτικά μείγματα***.

Τα ψυκτικά μείγματα χρησιμοποιούνται στην τεχνική, για τη δημιουργία χαμηλών θερμοκρασιών.

6.4 Εξαέρωση.

6.4.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Εξαέρωση, γενικά, ονομάζεται η μετάβαση ενός σώματος από την υγρή στην αέρια φάση (κατάσταση).

Το αέριο που προκύπτει από τη μετατροπή ενός υγρού σε αέριο ονομάζεται ατμός.

Όταν κατά την εξαέρωση ο ατμός παράγεται μόνο από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού, τότε την ονομάζομε εξάτμιση, ενώ όταν παράγεται και στο εσωτερικό του υγρού σε μορφή φυσαλλίδων την ονομάζομε βρασμό.

6.4.2 Εξαέρωση στο κενό. Κορεσμένοι και ακόρεστοι ατμοί.

Αν μέσα στο αερόκενο δοχείο Δ (σχ. 6.4α) με τη βοήθεια της βαλβίδας Β ρίξομε σταγόνες κατά δόσεις υγρού αιθέρα, τότε θα παρατηρήσομε:

Οι πρώτες σταγόνες εξαερώνονται σχεδόν αμέσως και το μανόμετρο Μ αρχίζει να δείχνει κάποια πίεση. Οι άλλες σταγόνες του υγρού αιθέρα εξαερώνονται και αυτές πάρα πολύ γρήγορα, αλλά όχι τόσο γρήγορα όσο οι πρώτες και οι ενδείξεις του μανομέτρου Μ αυξάνουν. Θα έλθει στιγμή που οι σταγόνες του αιθέρα που θα ρίχνομε στο δοχείο Δ, δεν θα εξαερώνονται, αλλά θα παραμένουν σε υγρή κατάσταση στον πυθμένα του δοχείου και η ένδειξη του μανομέτρου Μ θα παραμένει σταθερή.

Από τα παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

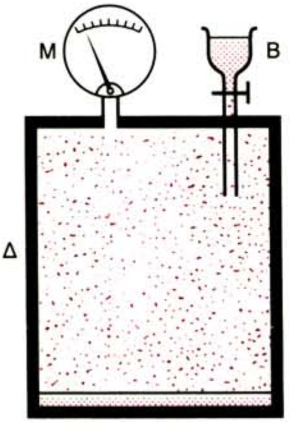
1) Η εξαέρωση ενός υγρού στο κενό γίνεται σχεδόν αμέσως.

2) Η πίεση των ατμών ενός υγρού (ένδειξη του Μ) όταν ο χώρος που κατέχουν είναι «πλήρης» από αυτούς, δηλαδή όταν δεν μπορεί να χωρέσει και άλλους ατμούς, είναι μεγαλύτερη από όλες τις πιέσεις των ατμών, όταν ο χώρος δεν είναι «πλήρης» από αυτούς.

3) Όταν ένας χώρος είναι «πλήρης» από ατμούς ενός υγρού, τότε συνυπάρχουν η υγρή και η αέρια κατάσταση του υγρού, δηλαδή συνυπάρχουν στρώμα υγρού και ατμός.

Προσοχή:

1) Ένας χώρος που είναι «πλήρης» από ατμούς ενός υγρού, δηλαδή δεν



Σχ. 6.4α.

μπορεί να χωρέσει και άλλους ατμούς του υγρού, ονομάζεται ***κορεσμένος***.

2) Οι ατμοί ενός υγρού που βρίσκονται σε ένα χώρο, που δεν μπορεί να χωρέσει και άλλους ατμούς του υγρού, ονομάζονται ***κορεσμένοι***.

3) Ο χώρος στον οποίο υπάρχουν ατμοί ενός υγρού λιγότεροι από εκείνους που χρειάζονται, για να είναι ο χώρος αυτός «πλήρης» (κορεσμένος) από αυτούς, ονομάζεται ***ακόρεστος***.

4) Όταν σε ένα χώρο υπάρχουν ατμοί λιγότεροι από εκείνους που χρειάζονται, για να είναι ο χώρος κορεσμένος, τότε οι ατμοί αυτοί ονομάζονται ***ακόρεστοι*** ή ***ξηροί***.

5) Η πίεση που εξασκούν οι ατμοί υγρού, ονομάζεται ***τάση των ατμών του***.

6) Η πίεση που εξασκούν οι ακόρεστοι ατμοί ενός υγρού, ονομάζεται ***τάση των ακορέστων ατμών του***.

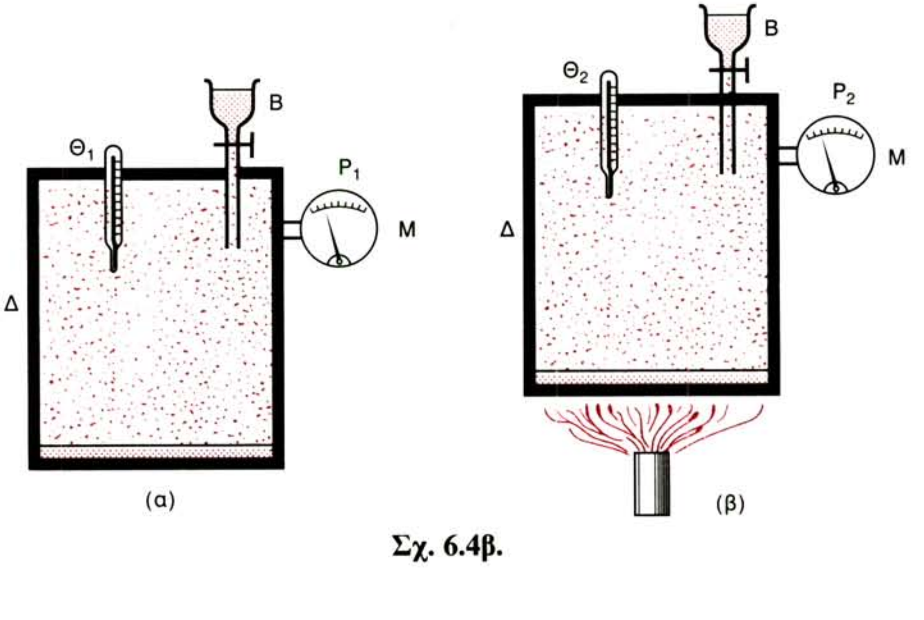
7) Η πίεση την οποία εξασκούν οι κορεσμένοι ατμοί ενός υγρού, ονομάζεται ***τάση των κορεσμένων ατμών του***.

8) Η τάση των κορεσμένων ατμών ενός υγρού ονομάζεται και ***μέγιστη τάση*** των ατμών του υγρού, γιατί είναι η μεγαλύτερη (πίεση) τάση που μπορεί να έχουν οι ατμοί σε μια ορισμένη θερμοκρασία τους.

6.4.3 Ιδιότητες των κορεσμένων ατμών (νόμοι των κορεσμένων ατμών).

1η. Η τάση των κορεσμένων ατμών αυξάνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους.

Το δοχείο Δ [σχ. 6.4β (α)] περιέχει κορεσμένους ατμούς αιθέρα και το



Σχ. 6.4β.

μανόμετρο Μ δείχνει πίεση P_1, ενώ το θερμόμετρο δείχνει θερμοκρασία Θ_1.

Αν αυξήσομε τη θερμοκρασία [σχ. 6.4β (β)] των ατμών από Θ_1 σε Θ_2, θα παρατηρήσομε ότι το μανόμετρο θα δείχνει πίεση P_2 μεγαλύτερη από την P_1 ($P_2 > P_1$). Δηλαδή η τάση των κορεσμένων ατμών του αιθέρα αυξάνεται, όταν αυξάνεται η θερμοκρασία τους.

Αυτό συμβαίνει, γιατί όταν αυξάνεται η θερμοκρασία, μια ποσότητα από το υγρό που υπάρχει στο δοχείο, εξαερώνεται και στον ίδιο χώρο υπάρχουν τώρα περισσότεροι ατμοί.

Στο σχήμα 6.4γ φαίνεται η γραφική παράσταση της τάσεως των κορεσμένων υδρατμών σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.

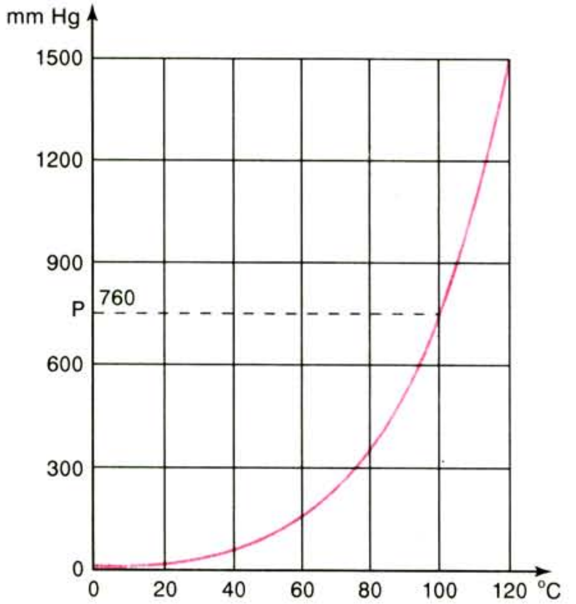
Παρατήρηση:

Τα υγρά τα οποία σε συνηθισμένες θερμοκρασίες έχουν μεγάλη τάση κορεσμένων ατμών ονομάζονται πτητικά, π.χ. ο αιθέρας, το οινόπνευμα.

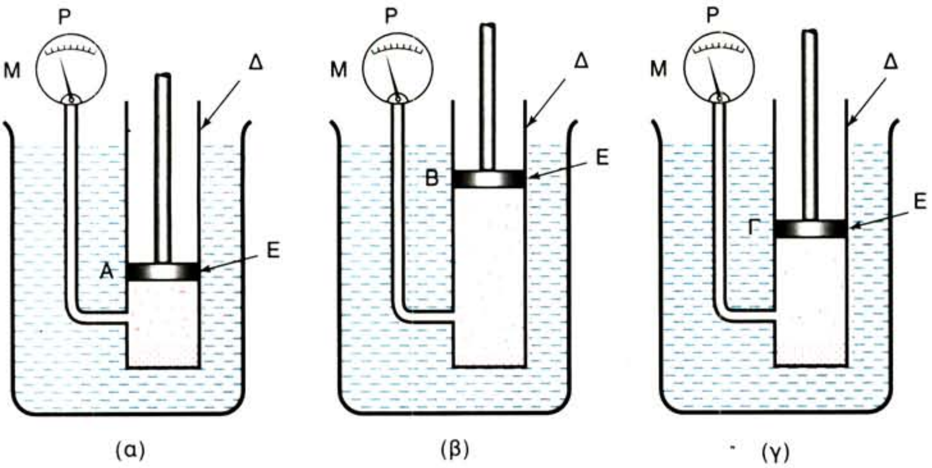
2η. Η τάση των κορεσμένων ατμών στην ίδια θερμοκρασία, εξαρτάται από τη φύση του υγρού, δηλαδή η τάση των κορεσμένων ατμών σε ορισμένη θερμοκρασία δεν είναι η ίδια για όλα τα υγρά.

Η τάση των κορεσμένων ατμών, στη θερμοκρασία 20°C του οινοπνεύματος είναι 4,4 cmHg, του νερού 1,75 cmHg, ενώ του αιθέρα 44 cmHg.

3η. Η τάση των κορεσμένων ατμών ενός υγρού είναι ανεξάρτητη από τον όγκο τους.



Σχ. 6.4γ.



Σχ. 6.4δ.

Το δοχείο Δ [σχ. 6.4δ (α)] περιέχει κορεσμένους ατμούς αιθέρα και το μανόμετρο Μ δείχνει πίεση P.

Έχουν ληφθεί μέτρα, ώστε η θερμοκρασία του δοχείου Δ να διατηρείται σταθερή, για οποιαδήποτε μετακίνηση του εμβόλου Ε.

Τραβάμε το έμβολο Ε προς τα επάνω [σχ. 6.4δ (β)] οπότε ο όγκος των κορεσμένων ατμών αυξάνεται.

Παρατηρούμε ότι μία ποσότητα υγρού εξαερώνεται, ενώ το μανόμετρο δείχνει πάλι την ίδια πίεση P.

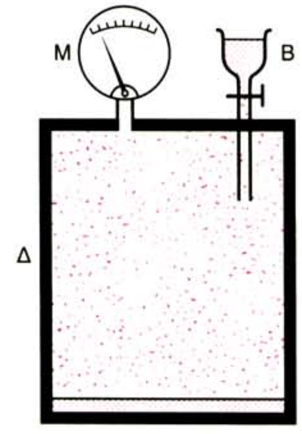
Αν κινήσομε το έμβολο Ε [σχ. 6.4δ (γ)] από τη θέση Β στη θέση Γ, ώστε να ελαττώσομε τον όγκο των ατμών, θα παρατηρήσομε ότι μία ποσότητα ατμών θα υγροποιηθεί, ενώ το μανόμετρο θα δείχνει πάλι την ίδια πίεση P. Με το πείραμα αυτό διαπιστώνομε ότι: η τάση των κορεσμένων ατμών ενός υγρού, όταν η θερμοκρασία τους διατηρείται σταθερή, είναι ανεξάρτητη από τον όγκο του, ***δηλαδή για τους κορεσμένους ατμούς ενός υγρού δεν ισχύει ο νόμος Boyle-Mariotte***.

4η. Η τάση των κορεσμένων ατμών ενός υγρού είναι ανεξάρτητη από την ποσότητα του υγρού με την οποία συνυπάρχουν.

Ρίχνομε στο δοχείο Δ (σχ. 6.4ε) υγρό αιθέρα, οπότε παρατηρούμε:

1) Από τη στιγμή που σχηματίζεται στον πυθμένα του δοχείου υγρό στρώμα αιθέρα, αν και συνεχίζομε να προσθέτομε υγρό αιθέρα, το μανόμετρο δείχνει σταθερή πίεση.

2) Ο υγρός αιθέρας, ο οποίος προστίθεται από τη στιγμή που σχηματίσθηκε στον πυθμένα του δοχείου το πρώτο λεπτό στρώμα υγρού αιθέρα και ύστερα, παραμένει σε υγρή κατάσταση στον πυθμένα του δοχείου.



Σχ. 6.4ε.

6.4.4 Ιδιότητες των ακορέστων ατμών ενός υγρού (νόμοι των ακορέστων ατμών).

1η. Η τάση των ακορέστων ατμών ενός υγρού που έχουν θερμοκρασία Θ, είναι πάντοτε μικρότερη από την τάση των κορεσμένων ατμών του, η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία αυτή Θ ($P_{ακ.} < P_{κορ.}$).

Ρίχνοντας στο αερόκενο δοχείο Δ (σχ. 6.4ε) υγρό αιθέρα παρατηρούμε ότι το μανόμετρο Μ δείχνει συνέχεια μεγαλύτερη πίεση μέχρις ότου σχηματισθεί στον πυθμένα του δοχείου η πρώτη πάρα πολύ λεπτή στοιβάδα αιθέρα, δηλαδή μέχρις ότου οι ατμοί γίνουν κορεσμένοι. Από εκεί και ύστερα δείχνει πίεση σταθερή.

2η. Οι ακόρεστοι ατμοί ακολουθούν (με προσέγγιση) τους νόμους των αερίων και εξομοιώνονται με τα αέρια.

Προσοχή:

Η προσέγγιση αυτή είναι τόσο πιο μεγάλη όσο πιο αραιοί είναι οι ακόρεστοι ατμοί.

6.5 Εξάτμιση.

6.5.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Εξάτμιση ενός υγρού ονομάζεται η εξαέρωση του υγρού η οποία γίνεται ***μόνο*** από την επιφάνειά του και ***μέσα σε χώρο που υπάρχει*** και άλλο αέριο.

Συνθήκη εξατμίσεως.

Για να εξατμίζεται ένα υγρό που έχει θερμοκρασία Θ θα πρέπει να ισχύει η συνθήκη:

$$\boxed{P_{\alpha\tau\mu} < P_K} \quad (1)$$

όπου: $P_{\alpha\tau\mu.}$ η πίεση των ατμών του υγρού που βρίσκονται επάνω από την επιφάνειά του και κοντά σε αυτή (οι ατμοί αυτοί έχουν θερμοκρασία Θ) και

P_K η πίεση την οποία θα είχαν οι ατμοί του υγρού στη θερμοκρασία Θ, αν ο χώρος επάνω από την επιφάνειά του ήταν κορεσμένος από τους ατμούς αυτούς, δηλαδή η P_K είναι η τάση των κορεσμένων ατμών του υγρού στη θερμοκρασία Θ.

Για να γίνεται λοιπόν εξάτμιση ενός υγρού, πρέπει ο χώρος επάνω από την επιφάνειά του και κοντά σε αυτή ***να μην είναι*** κορεσμένος από ατμούς του.

Όταν ισχύει η σχέση $\boxed{P_{\alpha\tau\mu} = P_K}$ (2), δηλαδή όταν ο χώρος επάνω από την επιφάνεια του υγρού και κοντά σε αυτή είναι κορεσμένος από ατμούς του, τότε συμβαίνει το εξής: Όση ποσότητα υγρού εξατμίζεται μέσα σε ένα χρόνο Δt τόση ποσότητα από τον ατμό, που βρίσκεται επάνω από την επιφάνειά του και κοντά σε αυτή, υγροποιείται στον ίδιο χρόνο Δt (δυναμική ισορροπία).

Γι' αυτό λέμε ότι όταν ισχύει η σχέση (2) το υγρό δεν εξατμίζεται.

6.5.2 Εξάτμιση σε περιορισμένο χώρο.

Το υγρό που βρίσκεται μέσα σε περιορισμένο χώρο εξατμίζεται όσο ***η μερική πίεση των ατμών του*** που βρίσκονται επάνω από αυτό είναι μικρότερη από τη μέγιστη τάση των ατμών του, η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία του υγρού, ενώ, όταν γίνεται ίση με αυτή σταματάει να εξατμίζεται (***συνθήκη εξατμίσεως***).

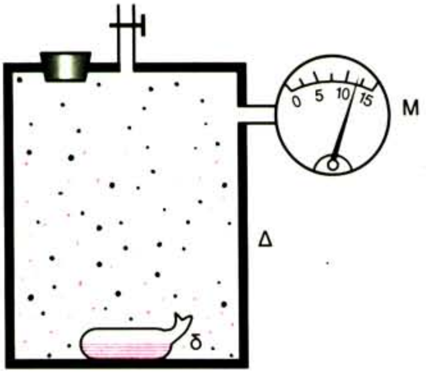
Το δοχείο Δ (σχ. 6.5) περιέχει ξηρό αέρα του οποίου η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική P_α. Την πίεση του αέρα δείχνει το μανόμετρο Μ.

Αν τώρα σπάσομε το δοχείο (δ), το οποίο περιέχει αρκετή ποσότητα ενός υγρού, θα παρατηρήσομε ότι η πίεση που δείχνει το μανόμετρο θα αρχίσει σιγά-σιγά να αυξάνεται, γιατί τώρα εξασκούν πίεση και οι ατμοί του υγρού που προέρχονται από την εξάτμισή του.

Η πίεση, που δείχνει το μανόμετρο Μ κάθε φορά, είναι ίση με το άθροισμα (Νόμος του Dalton) των πιέσεων του αέρα (P_α) και των ατμών του υγρού ($P_{\alpha\tau\mu}$). Δηλαδή:

$$P_M = P_\alpha + P_{\alpha\tau\mu}$$

Ύστερα από αρκετό χρόνο θα παρατηρήσομε ότι η ένδειξη του μανο-



Σχ. 6.5.

μέτρου Μ θα πάψει να αυξάνεται και θα δείχνει πίεση P_T σταθερή. Αυτό σημαίνει ότι δεν παράγονται πια νέοι ατμοί, δηλαδή η εξάτμιση του υγρού σταμάτησε.

Η πίεση P_T που δείχνει το μανόμετρο Μ είναι ίση με το άθροισμα της μερικής πιέσεως P_α του αέρα και της μερικής πιέσεως $P'_{\alpha\tau\mu}$ των ατμών, τώρα που έχει σταματήσει η εξάτμιση του υγρού. Δηλαδή:

$$P_T = P_\alpha + P'_{\alpha\tau\mu}$$

Βρίσκεται ότι η μερική πίεση ($P'_{\alpha\tau\mu}$) των ατμών του υγρού είναι ίση με τη μέγιστη τάση των ατμών του υγρού P_K ($P'_{\alpha\tau\mu} = P_K$), όταν η θερμοκρασία τους είναι ίση με τη θερμοκρασία του υγρού του πειράματος.

6.5.3 Εξάτμιση υγρού μέσα σε απεριόριστο χώρο.

Όταν ένα υγρό εξατμίζεται μέσα σε απεριόριστο χώρο (π.χ. στην ατμόσφαιρα) τότε επάνω από την επιφάνειά του, δεν σχηματίζονται κορεσμένοι ατμοί. Δηλαδή ισχύει συνέχεια η σχέση: $\boxed{P_{\alpha\tau\mu} < P_K}$. Γι' αυτό η εξάτμιση ενός υγρού μέσα σε απεριόριστο χώρο (π.χ. μέσα στην ατμόσφαιρα) συνεχίζεται μέχρι να εξαντληθεί τελείως το υγρό.

6.5.4 Νόμοι της ταχύτητας εξατμίσεως.

Ταχύτητα ή ρυθμός εξατμίσεως υ ενός υγρού ονομάζεται το πηλίκο της μάζας (Δm) του υγρού που εξατμίζεται σε χρόνο Δt, διά του χρόνου αυτού Δt, ήτοι:

$$\boxed{\upsilon = \frac{\Delta m}{\Delta t}}$$

Οι νόμοι της ταχύτητας εξατμίσεως υγρού, οι οποίοι ονομάζονται και νόμοι του Dalton για την εξάτμιση ορίζουν τα εξής:

1ος. Η ταχύτητα εξατμίσεως ενός υγρού είναι ανάλογη με το εμβαδόν (S) της ελεύθερης επιφάνειάς του. Εφαρμογή του νόμου αυτού αποτελεί το άπλωμα βρεγμένων υφασμάτων για να στεγνώσουν κλπ.

2ος. Η ταχύτητα εξατμίσεως ενός υγρού είναι ανάλογη με τη διαφορά της τάσεως των κορεσμένων ατμών του ($P_{κορ}$), η οποία αντιστοιχεί στη θερμοκρασία που γίνεται η εξάτμιση και της τάσεως ($P_{ατμ}$) των ατμών που υπάρχουν εκείνη τη στιγμή πάνω από την επιφάνεια του υγρού και κοντά σε αυτή ($P_{κορ} - P_{ατμ}$).

3ος. Η ταχύτητα εξατμίσεως ενός υγρού είναι αντιστρόφως ανάλογη με την πίεση (Η) που εξασκείται στο υγρό από το αέριο το οποίο βρίσκεται επάνω από αυτό (αν το υγρό εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα τότε: $H = P_{ατμοσφ.}$).

4ος. Η ταχύτητα εξατμίσεως ενός υγρού εξαρτάται από τη φύση του υγρού.

Οι νόμοι της ταχύτητας εξατμίσεως εκφράζονται με τη σχέση:

$$\boxed{υ = α \cdot S \cdot \frac{P_K - P_{ατμ}}{H}} \qquad (1)$$

όπου: α συντελεστής που εξαρτάται από τη φύση του υγρού.

Σημείωση:

1) Η ταχύτητα υ εξατμίσεως ενός υγρού αυξάνεται ανάλογα με τη θερμοκρασία του.

Πράγματι όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του υγρού, αυξάνεται η P_K, επομένως και η διαφορά ($P_K - P_{ατμ}$). Αλλά όταν αυξάνεται η διαφορά ($P_K - P_{ατμ}$) σύμφωνα με τη σχέση (1) αυξάνεται και η υ.

2) Η ταχύτητα εξατμίσεως στην ατμόσφαιρα εξαρτάται και από την κίνηση του αέρα. Πράγματι αν φυσάει αέρας η εξάτμιση γίνεται πιο γρήγορα, γιατί ο αέρας παρασύρει τους ατμούς του υγρού που βρίσκονται επάνω από το υγρό και έτσι ελαττώνεται η $P_{ατμ}$. Αλλά όταν ελαττώνεται η $P_{ατμ}$ αυξάνεται, σύμφωνα με τη σχέση (1) η ταχύτητα υ εξατμίσεως. Γι' αυτό όταν θέλομε να στεγνώσομε γρήγορα βρεγμένα υφάσματα τα απλώνομε σε ρεύματα αέρα.

6.6 Βρασμός.

6.6.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) ***Βρασμός ενός υγρού*** ονομάζεται η εξαέρωση του υγρού ***από όλη*** τη μάζα του.

2) Όταν λέμε ότι γίνεται εξαέρωση ενός υγρού από όλη τη μάζα του, εννοούμε ότι εξαερώνονται όχι μόνο μάζες του υγρού που βρίσκονται στην επιφάνειά του, αλλά και μάζες του που βρίσκονται στο εσωτερικό του.

3) Όταν το υγρό αποκτήσει μια ορισμένη θερμοκρασία, τότε μάζες του υγρού που βρίσκονται στο εσωτερικό του, μετατρέπονται σε αέριο (ατμούς) το οποίο σχηματίζει φυσαλλίδες.

Οι φυσαλλίδες αυτές, που περιέχουν κορεσμένους ατμούς του υγρού, ανεβαίνουν μέσα στο υγρό, φθάνουν στην επιφάνειά του, όπου σπάζουν και οι ατμοί ελευθερώνονται.

6.6.2 Συνθήκη βρασμού.

Η συνθήκη βρασμού ορίζει τα εξής:

Για να βράζει ένα υγρό πρέπει η θερμοκρασία του (Θ) να είναι τόση ώστε η μέγιστη τάση των ατμών του ($P_{κορ}$) στη θερμοκρασία (Θ), να είναι ίση με την ολική πίεση ($P_{εξ}$) που εξασκείται στην επιφάνεια του υγρού, ήτοι:

$P_{κορ} = P_{εξ}$	συνθήκη βρασμού

Αν π.χ. στην επιφάνεια του νερού εξασκείται ολική πίεση 92 mmHg τότε το νερό βράζει στους 50°C, γιατί η μέγιστη τάση των ατμών του νερού στους 50°C είναι $P_{κορ}$ = 92 mmHg.

Πράγματι για να γίνει βρασμός ενός υγρού, δηλαδή για να γίνει εξαέρωση του υγρού από όλη τη μάζα του πρέπει οι φυσαλλίδες που δημιουργούνται στο εσωτερικό του υγρού, να διατηρούνται, δηλαδή να μη σπάζουν στο εσωτερικό του (***αν οι φυσαλλίδες σπάσουν στο εσωτερικό του υγρού, οι ατμοί που περιέχουν υγροποιούνται***).

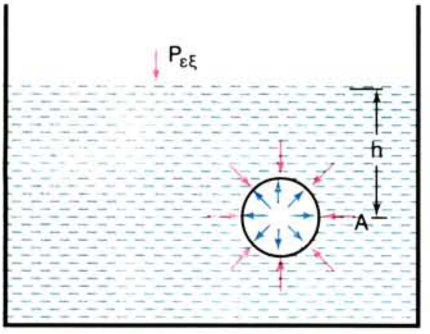
Επειδή η κάθε μία φυσαλλίδα που δημιουργείται στο εσωτερικό του υγρού περιέχει κορεσμένους ατμούς του, για να μη σπάζει στο εσωτερικό του πρέπει ***η πίεση που εξασκείται επάνω της $P_Φ$, να είναι ίση ή ακριβέστερα λίγο μικρότερη από την πίεση των κορεσμένων ατμών $P_{KΦ}$ που περιέχει***.

Η πίεση ($P_Φ$) που εξασκείται στη φυσαλλίδα στο σημείο Α (σχ. 6.6α) είναι:

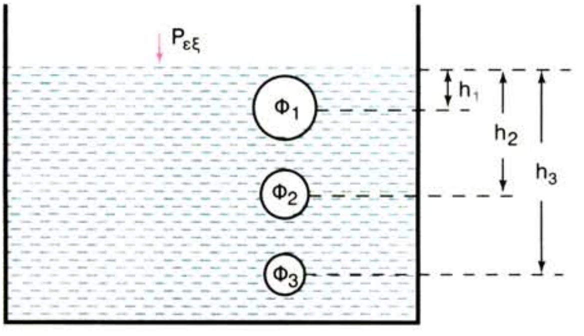
$$P_Φ = P_{εξ} + ρ \cdot g \cdot h \tag{1}$$

Αν η πίεση των κορεσμένων ατμών της φυσαλλίδας είναι $P_{K,Φ}$ τότε για να μη σπάσει αυτή στη θέση Α, όπου δημιουργήθηκε, πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$P_Φ = P_{K,Φ} = P_{εξ} + ρ \cdot g \cdot h \tag{2}$$



Σχ. 6.6α.



Σχ. 6.6β.

Επομένως η σχέση (2) εκφράζει τη συνθήκη διατηρήσεως της φυσαλλίδας που δημιουργήθηκε στο βάθος h μέσα στο υγρό.

Οι συνθήκες διατηρήσεως των φυσαλλίδων $Φ_1$, $Φ_2$, $Φ_3$ (σχ. 6.6β) είναι:

$$P_{K,1} = P_{εξ} + g \cdot ρ \cdot h_1 \tag{3}$$

$$P_{K,2} = P_{εξ} + g \cdot ρ \cdot h_2 \tag{4}$$

$$P_{K,3} = P_{εξ} + g \cdot ρ \cdot h_3 \tag{5}$$

Επειδή στην πράξη τα γινόμενα: $g \cdot ρ \cdot h_1$, $g \cdot ρ \cdot h_2$, $g \cdot ρ \cdot h_3$ ... διαφέρουν λίγο μεταξύ τους, γι' αυτό ως συνθήκη διατηρήσεως των φυσαλλίδων παίρνομε τη συνθήκη διατηρήσεως της φυσαλλίδας που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του υγρού και για την οποία το $g \cdot ρ \cdot h_1$ μπορεί να θεωρηθεί μηδέν. Δηλαδή:

$$P_{K,1} = P_{κορ} = P_{εξ}$$

Σημείωση:

1) Μία φυσαλλίδα μόλις δημιουργηθεί, αρχίζει να ανεβαίνει μέσα στο υγρό εξαιτίας της ανώσεώς της.

2) Από τις σχέσεις (3), (4), (5) προκύπτει ότι όταν το υγρό βράζει, έχει στα χαμηλότερα σημεία του μεγαλύτερη θερμοκρασία, γιατί όσο πιο βαθιά δημιουργείται μια φυσαλλίδα τόσο πιο μεγάλη πρέπει να είναι η τάση των κορεσμένων ατμών για να μη σπάσει, αφού η πίεση που εξασκείται πάνω της είναι πιο μεγάλη.

3) Συνήθως παίρνομε ως θερμοκρασία ενός υγρού τη θερμοκρασία του κοντά στην επιφάνειά του.

6.6.3 Θερμοκρασία βρασμού.

Η θερμοκρασία στην οποία βράζει ένα υγρό όταν στην επιφάνειά του εξασκείται πίεση $P_{εξ}$ ονομάζεται ***θερμοκρασία βρασμού*** ή ***σημείο ζέσεως του υγρού για την πίεση αυτή***.

Κανονική θερμοκρασία βρασμού ή κανονικό σημείο ζέσεως ενός υγρού ονομάζεται η θερμοκρασία στην οποία βράζει το υγρό αυτό όταν η πίεση $P_{εξ}$ που εξασκείται στην επιφάνειά του είναι ίση με την ατμοσφαιρική ($P_{εξ}$ = 76 cmHg).

Σημείωση:

Όταν λέμε «πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια του υγρού» εννοούμε την ολική πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια αυτού.

6.6.4 Νόμοι βρασμού.

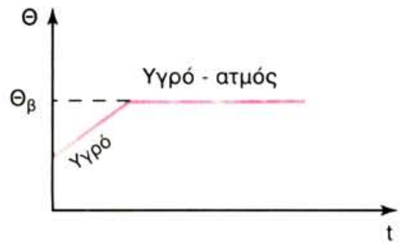
1) ***Όταν στην επιφάνεια ενός υγρού εξασκείται μία ορισμένη πίεση, το υγρό βράζει σε μία ορισμένη θερμοκρασία.***

2) ***Όσο διαρκεί ο βρασμός ενός υγρού η θερμοκρασία του παραμένει σταθερή, παρόλο που στο υγρό προσφέρεται συνεχώς θερμότητα***.

Το ποσό της θερμότητας, που απορροφά το υγρό κατά το βρασμό του, χρειάζεται για τη μετάβασή του από την υγρή στην αέρια κατάσταση. Στο σχήμα 6.6γ φαίνεται η μεταβολή της θερμοκρασίας ενός υγρού σε συνάρτηση με το χρόνο.

3) ***Ένα υγρό βράζει σε εκείνη τη θερμοκρασία (Θ°C), στην οποία η τάση των κορεσμένων ατμών του ($P_{κορ}$) είναι ίση με την πίεση ($P_{εξ}$), που εξασκείται στην επιφάνειά του*** $\boxed{(P_{κορ} = P_{εξ})}$.

Αν π.χ. στην επιφάνεια του νερού εξασκείται πίεση 92 mmHg το νερό βράζει στους 50°C, γιατί η μέγιστη τάση των ατμών του νερού στους 50°C



Σχ. 6.6γ.

είναι $P_{κορ}$ = 92 mmHg.

Ενώ αν στην επιφάνεια του νερού εξασκείται πίεση 760 mmHg το νερό βράζει στους 100°C, γιατί η μέγιστη τάση των ατμών του νερού στους 100°C είναι $P_{κορ}$ = 760 mmHg.

6.6.5 Επίδραση της πιέσεως στη θερμοκρασία βρασμού (μεταβολή του σημείου ζέσεως με την πίεση).

Ένα υγρό βράζει σε εκείνη τη θερμοκρασία (Θ°C) στην οποία η τάση των κορεσμένων ατμών του ($P_{κορ}$) είναι ίση με την πίεση, που εξασκείται στην επιφάνειά του.

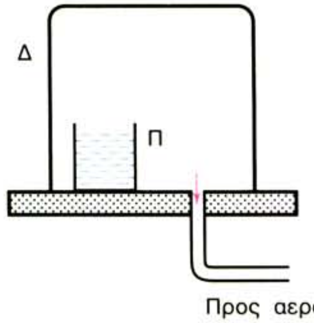
Επομένως, όταν αυξηθεί η πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια του υγρού, για να βράζει το υγρό πρέπει να αυξηθεί και η μέγιστη τάση των ατμών του. Αλλά για να αυξηθεί η μέγιστη τάση των ατμών του, πρέπει να αυξηθεί η θερμοκρασία τους.

Άρα ***όταν αυξάνεται η πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια του υγρού, αυξάνεται και η θερμοκρασία*** βρασμού του. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν η πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια του υγρού ελαττώνεται, δηλαδή όταν η ολική πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια ενός υγρού ελαττώνεται τότε ελαττώνεται και η θερμοκρασία βρασμού του. Την ανύψωση του σημείου ζέσεως με αύξηση της εξωτερικής πιέσεως εκμεταλλευόμασθε στα αυτόκλειστα (μεταλλικά δοχεία με τοιχώματα πολύ ανθεκτικά).

Γεμίζομε μερικώς το δοχείο π.χ. με νερό και κατόπιν το κλείνομε αεροστεγώς, ώστε να μην διαφεύγουν ο αέρας και οι ατμοί του νερού από το δοχείο. Κατόπιν θερμαίνομε το δοχείο. Η πίεση P που εξασκείται πάνω στην επιφάνεια του νερού είναι, κάθε στιγμή, ίση προς το άθροισμα της πιέσεως του αέρα $P_α$ και της τάσεως των κορεσμένων ατμών $P_{K,α}$ που αντιστοιχεί στην εκάστοτε θερμοκρασία του.

Επομένως η πίεση $P = P_{K,α} + P_α$ είναι πάντα μεγαλύτερη της $P_{K,α}$ και το νερό δεν είναι δυνατό να βράσει. Μέσα σε τέτοια δοχεία η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 100°C και το νερό δεν βράζει.

Τα αυτόκλειστα χρησιμοποιούνται για την αποστείρωση χειρουργικών



Σχ. 6.6δ.

εργαλείων, κονσερβών, γρήγορο μαγείρεμα κ.ά.

Μέσα στο δοχείο Δ (σχ. 6.6δ) τοποθετούμε ένα ποτήρι Π με νερό θερμοκρασίας 30°C. Το νερό του ποτηριού δεν βράζει, γιατί η τάση των κορεσμένων ατμών στους 30°C είναι 32 Torr, ενώ στην επιφάνεια του υγρού εξασκείται πίεση ίση με 760 Torr ($P_K = 32$ Torr $< P_{εξ} = 760$ Torr).

Με μία αεραντλία αφαιρούμε αέρα από το δοχείο Δ, οπότε παρατηρούμε ότι όταν η πίεση ($P_{εξ}$) που εξασκείται στην επιφάνεια του νερού που βρίσκεται στο ποτήρι Π, γίνει 32 Torr, δηλαδή όση είναι η τάση P_K των κορεσμένων ατμών του νερού στη θερμοκρασία 30°C, τότε το νερό αρχίζει να βράζει ($P_K = P_{εξ} = 32$ Torr).

Δηλαδή, όταν η πίεση που εξασκείται στην επιφάνεια του νερού μικραίνει (στο πείραμά μας: από 760 Torr σε 32 Torr), τότε μικραίνει και η θερμοκρασία βρασμού του (στο πείραμά μας: από 100°C σε 32°C).

Σημείωση:

Το βρασμό υπό χαμηλή πίεση τον χρησιμοποιούμε στην πράξη για το βράσιμο σωμάτων που αλλοιώνονται σε υψηλές θερμοκρασίες.

6.6.6 Σημείο ζέσεως διαλυμάτων.

Η θερμοκρασία βρασμού $Θ_{β,Δ}$ ενός διαλύματος όταν στην επιφάνειά του εξασκείται πίεση $P_Δ$, είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία βρασμού $Θ_{β,δ}$ του διαλύτη του, όταν στην επιφάνειά του εξασκείται ίση πίεση $P_δ$.

Δηλαδή αν ισχύει η σχέση $P_Δ = P_δ$, τότε έχομε:

$$Θ_{β,Δ} > Θ_{β,δ}$$

Αν στο νερό διαλύσομε π.χ. αλάτι ή ζάχαρη, τότε το διάλυμα, υπό πίεση μιας ατμόσφαιρας, βράζει σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από 100°C.

Η διαφορά των σημείων ζέσεως του διαλύματος και του διαλύτη του, υπό την ίδια πίεση, είναι ανάλογη με την περιεκτικότητα του διαλύματος.

6.7 Ειδική θερμότητα εξαερώσεως.

Ένα υγρό για να εξαερωθεί, πρέπει να προσλάβει θερμότητα, η οποία χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του σε αέριο.

Ειδική θερμότητα εξαερώσεως L ενός υγρού στη θερμοκρασία Θ, ονομάζεται το πηλίκο του ποσού της θερμότητας Q που πρέπει να προσλάβει μάζα m του υγρού θερμοκρασίας Θ, για να γίνει αέριο θερμοκρασίας Θ, προς τη μάζα αυτή m του υγρού. Δηλαδή:

$L=\dfrac{Q}{m}$	εξίσωση ορισμού

(1)

Η ειδική θερμότητα εξαερώσεως ενός υγρού εξαρτάται από:

1) Τη φύση του υγρού, επομένως είναι χαρακτηριστικό του, και

2) τη θερμοκρασία του.

Από την εξίσωση (1) προκύπτει ότι η ειδική θερμότητα εξαερώσεως L ενός υγρού στη θερμοκρασία Θ, ισούται αριθμητικώς με το ποσό της θερμότητας Q που πρέπει να προσλάβει μάζα υγρού ίση με τη μονάδα μάζας θερμοκρασίας Θ, για να μετατραπεί σε αέριο θερμοκρασίας Θ. Η ειδική θερμότητα εξαερώσεως του νερού στη θερμοκρασία 100°C είναι:

$$\boxed{L=500\frac{\text{cal}}{\text{g}}} \quad \text{ή} \quad L = 2{,}25\cdot10^6\ \text{J/kg}$$

Αυτό σημαίνει ότι ένα γραμμάριο νερού θερμοκρασίας 100°C, όταν μετατρέπεται σε ατμό θερμοκρασίας 100°C προσλαμβάνει θερμότητα 540 cal.

Σημείωση:

Η ειδική θερμότητα εξαερώσεως ενός υγρού αναφέρεται και ως λανθάνουσα θερμότητα εξαερώσεως.

6.7.1 Μονάδες ειδικής θερμότητας εξαερώσεως.

Μονάδα θερμότητας στο S.I. είναι το 1 J και μάζας το 1 kg. Αν στην εξίσωση ορισμού (1) της ειδικής θερμότητας εξαερώσεως βάλομε: Q = 1 J και m = 1 kg θα βρούμε ότι μονάδα ειδικής θερμότητας εξαερώσεως στο S.I. είναι το 1 Joule κατά 1 kg. Δηλαδή:

$$L=\frac{Q}{m}=\frac{1\,\text{J}}{1\,\text{kg}}=1\,\text{J/kg}$$

Προσοχή:

Στην πράξη χρησιμοποιείται ως μονάδα ειδικής θερμότητας εξαερώσεως και η μία θερμίδα ανά γραμμάριο. Δηλαδή:

$$L = \frac{Q}{m} = \frac{1\,\text{cal}}{1\,\text{g}} = 1\,\text{cal}/\text{g}$$

Παρατήρηση:

Αν την εξίσωση ορισμού (1) της ειδικής θερμότητας εξαερώσεως ενός υγρού, τη λύσομε ως προς Q θα πάρομε:

$$L = \frac{Q}{m}$$

$$\boxed{Q = L \cdot m} \qquad (3)$$

Με την εξίσωση (3) ***βρίσκομε το ποσό της θερμότητας Q το οποίο πρέπει να απορροφήσει μία μάζα m ενός υγρού θερμοκρασίας Θ, για να γίνει αέριο της ίδιας θερμοκρασίας (Θ), αν γνωρίζομε την ειδική θερμότητα εξαερώσεώς του (L) στη θερμοκρασία αυτή (Θ)***.

6.8 Ψύξη κατά την εξαέρωση.

Όταν ένα υγρό εξαερώνεται, προσλαμβάνει θερμότητα, οποιαδήποτε και αν είναι η θερμοκρασία στην οποία γίνεται η εξαέρωσή του.

Αν το ποσό της θερμότητας, το οποίο πρέπει να προσλάβει ένα υγρό, για να εξαερωθεί, δεν προσφέρεται σε αυτό από μία πηγή θερμότητας, τότε το υγρό παίρνει το ποσό αυτό ή από τα σώματα, με τα οποία βρίσκεται σε επαφή, ή από την ίδια τη μάζα του.

Όταν το υγρό ***παίρνει τη θερμότητα που χρειάζεται για να εξαερωθεί από τα σώματα με τα οποία βρίσκεται σε επαφή, τότε αυτά ψύχονται***.

Διαβρέχομε π.χ. το χέρι μας με αιθέρα. Μετά από λίγο, ο αιθέρας εξαερώνεται και εμείς αισθανόμαστε ψύξη στο μέρος που το είχαμε διαβρέξει με αιθέρα.

Αυτό εξηγείται ως εξής:

Ο αιθέρας για να εξαερωθεί, πρέπει να προσλάβει θερμότητα. Τη θερμότητα την οποία χρειάζεται ο αιθέρας για να εξαερωθεί, την προσλαμβάνει από το χέρι μας, το οποίο γι' αυτό ψύχεται.

Όταν το υγρό παίρνει τη θερμότητα την οποία χρειάζεται για να εξαερωθεί από την ίδια τη μάζα του, τότε αυτό ψύχεται.

6.9 Εξάχνωση

Εξάχνωση ενός σώματος ονομάζεται η μετάβαση του σώματος αυτού από τη στερεή κατάστασή του κατευθείαν στην αέρια, δηλαδή χωρίς προηγουμένως να περάσει από την υγρή.

Τα στερεά σώματα όπως π.χ. η ναφθαλίνη, η καμφορά, το ιώδιο, τα οποία αναδίνουν οσμή, παρουσιάζουν έντονα το φαινόμενο της εξαχνώσεως.

Γενικά σε κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και πιέσεως, σχεδόν όλα τα στερεά σώματα μπορούν να εξαχνώνονται.

Αν μέσα στο αερόκενο δοχείο Δ (σχ. 6.9α) το οποίο φέρει το μανόμετρο Μ, ρίξομε μια ποσότητα ιωδίου τότε θα παρατηρήσομε ότι οι ενδείξεις του μανομέτρου Μ στην αρχή αυξάνουν και κατόπιν η αύξηση αυτή σταματά (ο δείκτης δείχνει μια ορισμένη πίεση). Αυτό σημαίνει ότι οι ατμοί του ιωδίου που δημιουργούνται στο χώρο Χ στην αρχή αυξάνονται (αύξηση των ενδείξεων του μανομέτρου – οι ατμοί του ιωδίου είναι ακόμη ακόρεστοι) και έρχεται στιγμή που ο χώρος Χ δεν μπορεί να χωρέσει άλλη ποσότητα ατμών ιωδίου (η ένδειξη του μανομέτρου Μ παραμένει σταθερή – οι ατμοί του ιωδίου έγιναν κορεσμένοι).

Αν αυξήσομε τη θερμοκρασία του ιωδίου, θα έχομε εξάχνωση νέας ποσότητας ιωδίου και η ένδειξη του μανομέτρου Μ αυξάνει.

Δηλαδή η τάση των κορεσμένων ατμών του στερεού ιωδίου αυξάνεται με τη θερμοκρασία.

Γενικά το φαινόμενο της εξαχνώσεως είναι ανάλογο με το φαινόμενο της εξατμίσεως και ***ακολουθεί τους ίδιους νόμους***:

1) Η τάση των κορεσμένων ατμών ενός στερεού υλικού είναι ορισμένη για ορισμένη θερμοκρασία.

2) Η τάση των κορεσμένων ατμών ενός στερεού υλικού αυξάνει ανάλογα με τη θερμοκρασία.

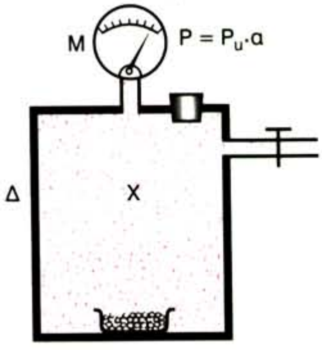
3) Αν οι ατμοί του στερεού σώματος που βρίσκονται πάνω από αυτό, έχουν πίεση μικρότερη από την τάση των κορεσμένων ατμών του της ίδιας θερμοκρασίας η εξάχνωσή του συνεχίζεται μέχρι το στερεό να μετατραπεί εξ ολοκλήρου σε αέριο.

4) Αν οι ατμοί του στερεού σώματος που βρίσκονται πάνω από αυτό, έχουν πίεση ίση με την τάση των κορεσμένων ατμών του της ίδιας θερμοκρασίας τότε το στερεό και οι ατμοί του συνυπάρχουν ***σε ισορροπία***.

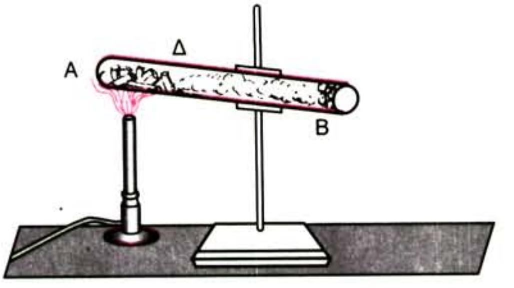
5) Αν οι ατμοί του στερεού σώματος που βρίσκονται πάνω από αυτό, έχουν πίεση έστω και λίγο μεγαλύτερη από την τάση των κορεσμένων ατμών του της ίδιας θερμοκρασίας ***δεν*** γίνεται εξάχνωση.

Σημείωση:

Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσομε το φαινόμενο της εξαχνώσεως με



Σχ. 6.9α.



Σχ. 6.9β.

το εξής πείραμα: Στην περιοχή Α του σωλήνα (σχ. 6.9β) βάζομε κρυστάλλους ιωδίου και τους θερμαίνομε, οπότε παρατηρούμε:

1) Ο σωλήνας παίρνει χρώμα ιώδες, δηλαδή το χρώμα των ατμών του ιωδίου.

2) Οι ατμοί συμπυκνώνονται στην περιοχή Β σε κρυστάλλους ιωδίου. Δηλαδή το ιώδιο γίνεται απευθείας από στερεό αέριο και αντίστροφα.

Παράδειγμα εξαχνώσεως έχομε στους ηλεκτρικούς λαμπτήρες πυρακτώσεως. Το βολφράμιο από το οποίο αποτελείται το σύρμα των λαμπτήρων σε υψηλή θερμοκρασία παράγει ατμούς (εξάχνωση). Οι ατμοί αυτοί όταν έρχονται σε επαφή με το κρύο, σχετικά, γυαλί των λαμπτήρων, ψύχονται και γι' αυτό το εσωτερικό των λαμπτήρων επικαλύπτεται από λεπτότατο στρώμα βολφραμίου. Σε αυτό οφείλεται το μαύρισμα των λαμπτήρων πυρακτώσεως.

6.10 Υγροποίηση.

6.10.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Η μετάβαση ενός αερίου (ή ατμού) από την αέρια στην υγρή κατάστασή του, ***ονομάζεται υγροποίηση του αερίου (ή του ατμού)***.

2) Η υγροποίηση ενός αερίου είναι φαινόμενο αντίστροφο της εξαερώσεώς του.

3) Ένα αέριο μπορεί να υγροποιηθεί:

– Με ψύξη.

– Με συμπίεση και

– με ταυτόχρονη ψύξη και συμπίεσή του.

4) Αν η θερμοκρασία ενός αερίου είναι πάνω από μία ορισμένη τιμή, τότε δεν μπορεί να υγροποιηθεί, όσο και αν συμπιεσθεί. Επομένως αν θέλο-

με να υγροποιήσομε ένα αέριο με συμπίεσή του, πρέπει πρώτα να το ψύξομε κάτω από μία ορισμένη για το αέριο αυτό θερμοκρασία και ύστερα να το συμπιέσομε.

6.10.2 Κρίσιμες σταθερές αερίου.

Οι κρίσιμες σταθερές ενός αερίου είναι:

α) Η κρίσιμη θερμοκρασία του.

β) Η κρίσιμη πίεσή του.

γ) Η κρίσιμη πυκνότητά του.

α) Κρίσιμη θερμοκρασία ενός αερίου.

Κρίσιμη θερμοκρασία ενός αερίου ονομάζεται η θερμοκρασία, πάνω από την οποία το αέριο είναι αδύνατο να υγροποιηθεί, όσο και αν συμπιεσθεί. Η κρίσιμη θερμοκρασία του διοξειδίου του άνθρακα είναι $\Theta_K = +31^\circ C$. Αυτό σημαίνει ότι αν μία μάζα m διοξειδίου του άνθρακα έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από $+31^\circ C$, τότε όσο και αν συμπιεσθεί η μάζα m είναι αδύνατο να υγροποιηθεί.

Δηλαδή, αν θέλομε με συμπίεση να υγροποιήσομε μια μάζα m του διοξειδίου του άνθρακα που έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη από $+31^\circ C$, πρέπει πρώτα να την ψύξομε τόσο, ώστε να αποκτήσει θερμοκρασία $+31^\circ C$ και κάτω και ύστερα να τη συμπιέσομε.

Παρατηρήσεις:

1) Η κρίσιμη θερμοκρασία ενός αερίου εξαρτάται από τη φύση του αερίου, δηλαδή κάθε αέριο έχει δική του κρίσιμη θερμοκρασία (πίνακας 6.10.1).

ΠΙΝΑΚΑΣ 6.10.1

Παραδείγματα κρίσιμης θερμοκρασίας και κρίσιμης πιέσεως.

Αέριο	Κρίσιμη θερμοκρασία σε °C	Κρίσιμη πίεση σε Kgf/cm^2	Αέριο	Κρίσιμη θερμοκρασία σε °C	Κρίσιμη πίεση σε Kgf/cm^2
Ήλιο	−268	2,3	Διοξ. άνθρακα	+ 31	75
Υδρογόνο	−240	13	Αμμωνία	+132	119
Άζωτο	−147	35	Αιθέρας	+194	38
Αέρας	−141	38	Οινόπνευμα	+243	63
Οξυγόνο	−119	51	Νερό	+374	226

2) Η κρίσιμη θερμοκρασία ενός αερίου είναι μία σταθερά του αερίου η οποία το χαρακτηρίζει.

Αν βρούμε ότι η κρίσιμη θερμοκρασία ενός άγνωστου αερίου είναι +31°C, τότε μπορούμε να πούμε ότι το αέριο αυτό μπορεί να είναι διοξείδιο του άνθρακα, οπωσδήποτε όμως δεν είναι π.χ. οξυγόνο, γιατί η κρίσιμη θερμοκρασία του οξυγόνου είναι −119°C.

β) Κρίσιμη πίεση ενός αερίου.

Κρίσιμη πίεση ενός αερίου ονομάζεται η ορισμένη πίεση την οποία πρέπει να έχει το αέριο, για να υγροποιηθεί όταν αυτό έχει θερμοκρασία ίση με την κρίσιμη θερμοκρασία του. Η κρίσιμη πίεση του διοξειδίου του άνθρακα είναι 75 at. Αυτό σημαίνει ότι αν μία μάζα m διοξειδίου του άνθρακα έχει θερμοκρασία +31°C, δηλαδή όση είναι η κρίσιμη θερμοκρασία του διοξειδίου του άνθρακα, τότε για να υγροποιηθεί, πρέπει η πίεσή της να είναι 75 at.

Παρατηρήσεις:

1) Η κρίσιμη πίεση ενός αερίου εξαρτάται από τη φύση του αερίου, δηλαδή κάθε αέριο έχει δική του κρίσιμη πίεση (πίνακας 6.10.1).

2) Η κρίσιμη πίεση ενός αερίου είναι μία σταθερά του αερίου, η οποία το χαρακτηρίζει.

3) Αν η θερμοκρασία ενός αερίου ***είναι μικρότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία του, τότε το αέριο μπορεί να υγροποιηθεί υπό πίεση η οποία είναι μικρότερη από την κρίσιμη πίεσή του***.

Μια μάζα m διοξειδίου του άνθρακα, όταν η θερμοκρασία της είναι +31°C (κρίσιμη θερμοκρασία της), υγροποιείται υπό πίεση 75 at (κρίσιμη πίεσή της) ενώ όταν η θερμοκρασία της είναι 20°C υγροποιείται υπό πίεση 50 at.

γ) Κρίσιμη πυκνότητα ενός αερίου.

Κρίσιμη πυκνότητα ενός αερίου ονομάζεται η πυκνότητα την οποία έχει το αέριο, όταν η θερμοκρασία του είναι ίση με την κρίσιμη θερμοκρασία του, και η πίεσή του ίση με την κρίσιμη πίεσή του.

Η κρίσιμη πυκνότητα του διοξειδίου του άνθρακα είναι 0,46 g/cm^3. Αυτό σημαίνει ότι όταν μία μάζα διοξειδίου του άνθρακα έχει θερμοκρασία +31°C και πίεση 75 at, τότε η πυκνότητά της είναι 0,46 g/cm^3.

Παρατηρήσεις:

1) Η κρίσιμη πυκνότητα ενός αερίου εξαρτάται από τη φύση του αερίου, δηλαδή κάθε αέριο έχει δική του κρίσιμη πυκνότητα.

2) Η κρίσιμη πυκνότητα ενός αερίου είναι μία σταθερά του αερίου η οποία το χαρακτηρίζει.

Σημείωση:

1) Κρίσιμος όγκος V_K μιας μάζας m ενός αερίου ονομάζεται ο όγκος V_K τον οποίο καταλαμβάνει η μάζα αυτή (m), όταν η θερμοκρασία της είναι ίση με την κρίσιμη θερμοκρασία της και η πίεσή της ίση με την κρίσιμη πίεσή της. Βέβαια ισχύει η σχέση:

$$\boxed{\varrho_K = \frac{m}{V_K}}$$

όπου: ϱ_K η κρίσιμη πυκνότητα του αερίου.

2) Η κρίσιμη θερμοκρασία, η κρίσιμη πίεση και η κρίσιμη πυκνότητα ενός αερίου είναι οι τρεις κρίσιμες σταθερές του αερίου, που είναι φυσικά μεγέθη, χαρακτηριστικά του αερίου.

6.10.3 Υγροποίηση με ψύξη.

Έστω ότι σε ένα χώρο θερμοκρασίας Θ_1 βρίσκονται ακόρεστοι ατμοί ενός υγρού και η πίεσή τους είναι P_1. Επίσης έστω ότι η μέγιστη τάση αυτών των ατμών όταν βρεθούν στη θερμοκρασία $\Theta_2 < \Theta_1$ είναι $P_{2\kappa o\varrho} = P_1$.

Αν ψύξομε τους πιο πάνω ατμούς από τη θερμοκρασία Θ_1 στη θερμοκρασία Θ_3 που είναι λίγο μικρότερη από τη Θ_2 τότε οι ατμοί υγροποιούνται.

Φανερό είναι ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$P_1 = P_{2\kappa o\varrho} > P_{3\kappa o\varrho}$$

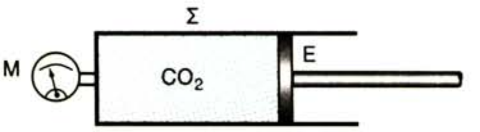
όπου: $P_{3\kappa o\varrho}$ η μέγιστη τάση των ατμών όταν βρεθούν στη θερμοκρασία Θ_3 $(\Theta_1 > \Theta_2 > \Theta_3)$.

Δηλαδή οι ατμοί ενός υγρού υγροποιούνται, αν τους ψύξομε σε τέτοια θερμοκρασία, ώστε η πίεση που θα ασκούν να είναι μεγαλύτερη από την τάση των κορεσμένων ατμών του υγρού για τη θερμοκρασία αυτή (συνθήκη).

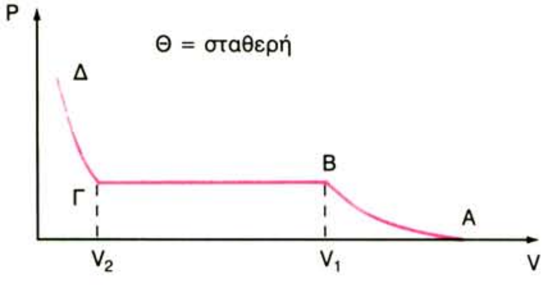
6.10.4 Υγροποίηση με συμπίεση.

Οι ατμοί ενός υγρού, θερμοκρασίας Θ, υγροποιούνται αν τους συμπιέσομε ώστε η πίεση που θα αποκτήσουν να είναι ίση (ή ελάχιστα μεγαλύτερη) με την τάση των κορεσμένων ατμών του υγρού για τη θερμοκρασία Θ.

Ο σωλήνας Σ (σχ. 6.10α) φέρει ένα έμβολο Ε και ένα μανόμετρο Μ. Βάζομε μέσα στο σωλήνα Σ διοξείδιο του άνθρακα και μετακινούμε το έμβολο Ε σιγά-σιγά προς τα αριστερά. Φροντίζομε ώστε η θερμοκρασία του



Σχ. 6.10α.



Σχ. 6.10β.

διοξειδίου του άνθρακα να διατηρείται σταθερή. Η γραφική παράσταση ΑΒΓΔ του σχήματος 6.10β απεικονίζει τα αποτελέσματα των εξής μετρήσεων:

1) Στο τμήμα ΑΒ, η πίεση τού CO_2 αυξάνεται, ενώ ο όγκος του ελαττώνεται σύμφωνα με το νόμο Boyle-Mariotte (όλο το CO_2 παραμένει αέριο).

2) Στο τμήμα ΒΓ, η πίεση τού CO_2 παραμένει σταθερή. Αυτό συμβαίνει γιατί το αέριο κατά την ελάττωση του όγκου του από V_1 σε V_2 συνεχώς υγροποιείται. Στο τμήμα αυτό (ΒΓ) συνυπάρχουν η αέρια και η υγρή κατάσταση του CO_2.

3) Το τμήμα ΓΔ, που το παίρνομε, αφού όλο το διοξείδιο έχει γίνει υγρό, είναι σχεδόν κατακόρυφο. Αυτό συμβαίνει γιατί χρειάζονται μεγάλες πιέσεις για να ελαττώνεται λίγο ο όγκος του υγρού διοξειδίου του άνθρακα (τα υγρά συμπιέζονται πολύ δύσκολα).

6.11 Απόσταξη.

Απόσταξη υγρών ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία εξαερώνομε τα υγρά και στη συνέχεια υγροποιούμε τους ατμούς τους.

Απλή απόσταξη.

Απλή απόσταξη ονομάζεται η απόσταξη με την οποία αποχωρίζομε ένα υγρό από τις μη πτητικές ουσίες που είναι διαλυμένες μέσα σε αυτό.

Βάζομε στο δοχείο Δ για παράδειγμα φυσικό νερό και το θερμαίνομε, ώστε να βράζει (σχ. 6.11). Οι υδρατμοί πηγαίνουν προς το σωλήνα Σ, ο οποίος περιβάλλεται εξωτερικά από το σωλήνα Γ.

Στο σωλήνα Γ κυκλοφορεί κρύο νερό (από το Ε προς το E_1) και έτσι ψύχεται ο σωλήνας Σ. Οι υδρατμοί στο σωλήνα Σ ψύχονται και υγροποιούνται.

Το νερό που σχηματίζεται από την υγροποίηση των υδρατμών, δηλαδή ***το απόσταγμα***, λέγεται αποσταγμένο νερό και συγκεντρώνεται στο δοχείο Ζ.

Έτσι πήραμε νερό (το αποσταγμένο) το οποίο είναι απαλλαγμένο από άλλες ουσίες, όπως άλατα, που ήταν διαλυμένες στο νερό πριν από την απόσταξη.

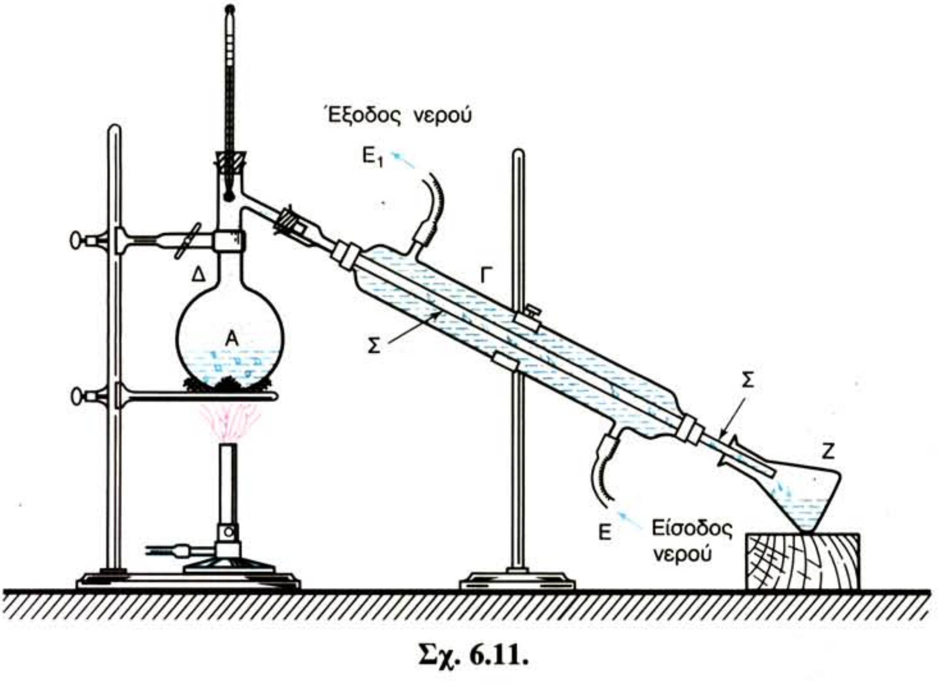
Σημειώσεις:

1) Αν συνεχίσομε την απόσταξη μέχρις ότου όλο το νερό του δοχείου Δ εξαερωθεί, τότε θα παρατηρήσομε ότι στον πυθμένα του δοχείου Δ παραμένει ένα λευκό ίζημα (υπόλοιπο αποστάξεως). Αυτό το ίζημα αποτελείται από διάφορα άλατα που ήταν διαλυμένα στο φυσικό νερό και με το βρασμό αποχωρίστηκαν από αυτό.

2) Οι συσκευές με τις οποίες πραγματοποιούμε την απόσταξη λέγονται γενικά ***αποστακτήρες***.

Κλασματική απόσταξη.

Κλασματική απόσταξη ονομάζεται η απόσταξη με την οποία διαχωρίζο-



Σχ. 6.11.

με ένα υγρό μείγμα στα συστατικά του. Αυτή στηρίζεται στο ότι τα υγρά που αποτελούν το μείγμα, υπό την ίδια πίεση, έχουν διαφορετικά σημεία ζέσεως.

6.12 Μέθοδοι παραγωγής ψύχους.

Για τη δημιουργία χαμηλών θερμοκρασιών, δηλαδή για την παραγωγή ψύχους, εφαρμόζομε διάφορες μεθόδους όπως είναι:
- Τα ψυκτικά μείγματα (παράγρ. 6.3.3).
- Η εξαέρωση υγροποιημένων αερίων και
- η εκτόνωση αερίων.

– Η εξαέρωση υγροποιημένων αερίων.

Κάνομε το εξής:

Υγροποιούμε ένα αέριο και κατόπιν αφήνομε το υγροποιημένο αέριο να εξαερωθεί ***υπό χαμηλή πίεση***, οπότε τα σώματα που βρίσκονται σε επαφή με το υγροποιημένο αέριο ψύχονται πολύ.

Αυτό εξηγείται ως εξής:

Όταν η εξαέρωση ενός υγρού γίνεται ***υπό χαμηλή πίεση***, τότε το υγρό εξαερώνεται πολύ γρήγορα. Αλλά όταν ένα υγρό εξαερώνεται πολύ γρήγορα, τότε προκαλεί μεγάλη ψύξη των σωμάτων με τα οποία βρίσκονται σε επαφή, γιατί απορροφά τη θερμότητα που χρειάζεται για την εξαέρωσή του σε λίγο χρόνο.

Με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται αρκετά χαμηλές θερμοκρασίες. Η εξαέρωση π.χ. υγρού CO_2 στο κενό δίνει θερμοκρασία $-75\,^\circ C$.

– Εκτόνωση.

Εκτόνωση μιας μάζας ενός αερίου ονομάζεται η απότομη αύξηση του όγκου της.

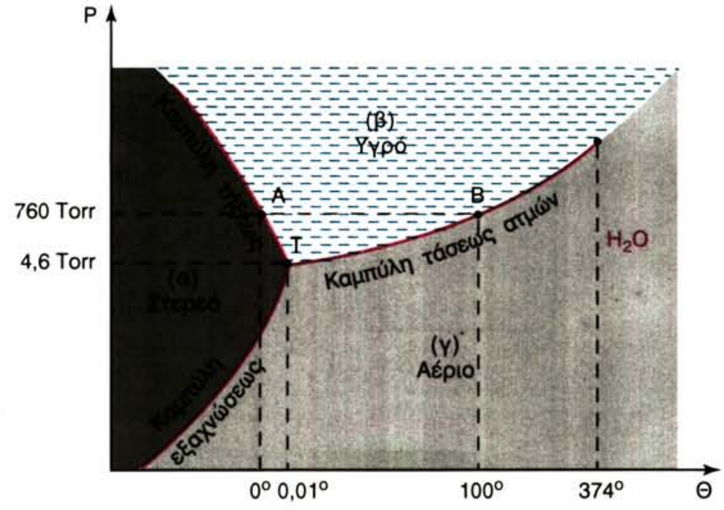
Η εκτόνωση μιας μάζας ενός αερίου συνοδεύεται σχεδόν πάντοτε από μεγάλη ψύξη της μάζας του.

Επομένως με εκτόνωση διαφόρων αερίων επιτυγχάνομε χαμηλές θερμοκρασίες των αερίων.

3 Ισορροπία φάσεων. Τριπλό σημείο.

Το διάγραμμα του σχήματος 6.13α παριστάνει την καμπύλη τήξεως, την καμπύλη τάσεως κορεσμένων ατμών και την καμπύλη εξαχνώσεως του νερού. Παρατηρούμε ότι και οι τρεις αυτές καμπύλες τέμνονται σε ένα σημείο (Τ). Το σημείο αυτό ονομάζεται ***τριπλό σημείο του νερού***.

Οι τρεις καμπύλες διαχωρίζουν το επίπεδο Ρ-Θ σε τρία χωρία α, β, γ.



Σχ. 6.13α.

Ξεκινώντας με πάγο πιέσεως 760 Torr και θερμοκρασία $-10^\circ C$ (χωρίο α) και αυξάνοντας τη θερμοκρασία σε $0^\circ C$, θα φθάσομε στο σημείο τήξεως, πέραν του οποίου θα έχομε υγρό (χωρίο β).

Η συνέχιση της αυξήσεως της θερμοκρασίας οδηγεί σε διαρκώς θερμότερο υγρό και πέραν της θερμοκρασίας των $100^\circ C$ έχομε αέριο (χωρίο γ). Παρατηρούμε ότι, όταν η κατάσταση έχει τέτοια πίεση και θερμοκρασία, ώστε να περιγράφεται με σημείο που βρίσκεται στην καμπύλη τήξεως (π.χ. σημείο Α όπου $P = 760$ Torr και $\Theta = 0^\circ C$), το υγρό και το στερεό μπορούν να συνυπάρχουν.

Επίσης στην καμπύλη των κορεσμένων ατμών συνυπάρχουν υγρό και αέριο. Τέλος στην καμπύλη εξαχνώσεως συνυπάρχουν στερεό και αέριο.

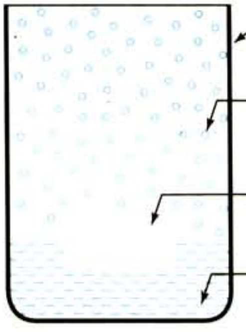
Παρατηρούμε ότι σε οποιοδήποτε σημείο των τριών καμπυλών συνυπάρχουν δύο καταστάσεις. Στο σημείο όμως Τ, στο οποίο τέμνονται οι τρεις καμπύλες δύνανται να συνυπάρχουν και οι τρεις καταστάσεις, γι' αυτό ακριβώς το σημείο Τ ονομάζεται τριπλό σημείο του νερού.

Το υλικό που περιέχεται μέσα στο δοχείο Δ (σχ. 6.13β) βρίσκεται στην κατάσταση του τριπλού σημείου (πίεση 4,6 Torr και θερμοκρασία $0{,}01^\circ C$).

Προσοχή:

Αποδεικνύεται ότι τα παραπάνω δεν ισχύουν μόνο για το νερό αλλά ανάλογα ισχύουν και για οποιοδήποτε υλικό.

Για κάθε υλικό το τριπλό σημείο χαρακτηρίζεται από καθορισμένες τιμές της πιέσεως και της θερμοκρασίας. Για παράδειγμα στο τριπλό σημείο του νερού η θερμοκρασία είναι $\Theta_T = 0{,}01^\circ C$ και η πίεση $P_T = 4{,}5$ Torr, ενώ στο τριπλό σημείο του διοξειδίου του άνθρακα η θερμοκρασία είναι $\Theta_T = -57^\circ C$ και η πίεση $P_T = 338$ Torr.



Σχ. 6.13β.

6.14 Απόλυτη και σχετική υγρασία του αέρα.

Απόλυτη υγρασία (α) του αέρα σε μία ορισμένη χρονική στιγμή, ονομάζομε το πηλίκο της μάζας m των υδρατμών που περιέχονται τη χρονική αυτή στιγμή σε όγκο V ατμοσφαιρικού αέρα, προς τον όγκο αυτό, δηλαδή:

$$\boxed{\alpha = \frac{m}{V}}$$

Η απόλυτη υγρασία μετριέται σε g/m^3 και γι' αυτό πολλές φορές δίνεται ο εξής ορισμός:

Απόλυτη υγρασία (α) του αέρα σε μία ορισμένη χρονική στιγμή, ονομάζεται η μάζα των υδρατμών σε γραμμάρια που περιέχονται σε ***ένα κυβικό μέτρο*** (1 m^3) αέρα τη χρονική αυτή στιγμή.

Σχετική υγρασία (β) του αέρα ονομάζομε το πηλίκο της μάζας m των υδρατμών, που υπάρχουν σε ορισμένο όγκο αέρα, προς τη μάζα m_K των υδρατμών που έπρεπε να υπάρχουν στον ίδιο όγκο αέρα, για να είναι κορεσμένος στην ίδια θερμοκρασία. Δηλαδή:

$$\boxed{\beta = \frac{m}{m_K}}$$

Αν στις 11.05΄ η θερμοκρασία του αέρα είναι 25°C και σε ένα κυβικό μέτρο αέρα περιέχονται 6 g υδρατμοί, τότε στις 11.05΄ και στη θερμοκρασία 25°C η σχετική υγρασία του αέρα, σύμφωνα με τον ορισμό της, θα είναι:

$$\beta = \frac{m_{\upsilon\delta}}{m_K} = \frac{6g}{24g} = \frac{6}{24}$$

όπου: m_K 24 g είναι η ποσότητα των υδρατμών οι οποίοι εάν περιέχονταν μέσα σε 1 m^3 αέρα, θερμοκρασίας 25°C, θα ήταν κορεσμένος.

Ευνόητο είναι ότι η σχετική υγρασία είναι καθαρός αριθμός και ότι είναι ίση με ένα (β = 1), όταν ο αέρας είναι κορεσμένος από υδρατμούς.

Παρατηρήσεις:

1) Η απόλυτη υγρασία (α) του αέρα σε μία ορισμένη στιγμή, εκφράζει την πραγματική ποσότητα των υδρατμών που περιέχονται αυτή τη στιγμή, σε ένα κυβικό μέτρο αέρα. Όταν λέμε ότι στις 11.05΄ ο αέρας έχει θερμοκρασία 25°C και απόλυτη υγρασία α = 6 g/m^3, εννοούμε ότι στις 11.05΄ ένα κυβικό μέτρο αέρα, που έχει θερμοκρασία 25°C περιέχει 6 g υδρατμών. Η απόλυτη υγρασία βρίσκεται, συνήθως, ζυγίζοντας υγροσκοπικές ουσίες, οι οποίες συλλέγουν τους υδρατμούς από χώρο γνωστού όγκου.

2) Η σχετική υγρασία (β) του αέρα σε μία ορισμένη χρονική στιγμή εκφράζει το κατά πόσο ο αέρας τη στιγμή αυτή είναι μακριά ή κοντά στην κατάσταση κορεσμού του από υδρατμούς.

Σε θερμοκρασία 15°C ο αέρας σε κατάσταση κορεσμού του περιέχει 12,8 g/m^3 υδρατμών.

Αν ο αέρας σε θερμοκρασία 15°C περιέχει για παράδειγμα 9,6 g/m^3, τότε η σχετική του υγρασία είναι:

$$\beta = \frac{m}{m_K} = \frac{9{,}6\text{g}}{12{,}8\text{g}} = \frac{3}{4} = 0{,}75 = \frac{75}{100} = 75\%$$

Η σχετική υγρασία (β) εκφράζει ότι ο αέρας περιέχει ποσότητα υδρατμών ίση με τα 3/4 ή 75% από την ποσότητα των υδρατμών που θα περιείχε ο αέρας, αν θα ήταν κορεσμένος.

Η γνώση της σχετικής υγρασίας, δηλαδή του κατά πόσο ο αέρας βρίσκεται κοντά η μακριά από την κατάσταση κορεσμού του από υδρατμούς, έχει μεγάλη σημασία, γιατί από αυτήν εξαρτώνται διάφορα φαινόμενα όπως ο σχηματισμός ομίχλης, η εξάτμιση του νερού των λιμνών, ποταμών κλπ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΔΙΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (Ή ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ)

7.1 Αγωγή θερμότητας στα στερεά.

7.1.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Για να διαδίδεται θερμότητα από ένα σώμα σε ένα άλλο, πρέπει τα σώματα αυτά να έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Επίσης για να διαδίδεται θερμότητα (αυτόματα) από μία περιοχή ενός σώματος σε μία άλλη πρέπει οι δύο περιοχές να έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες.

Δηλαδή το αίτιο της διαδόσεως της θερμότητας από ένα σώμα σε άλλο ή από μία περιοχή ενός σώματος σε άλλη είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο σωμάτων ή μεταξύ των δύο περιοχών του σώματος.

2) Η διάδοση της θερμότητας μπορεί να γίνει με τους εξής τρόπους:
- Με αγωγή.
- Με μεταφορά.
- Με ακτινοβολία.

Σημείωση:

Σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατό η διάδοση της θερμότητας να γίνεται και με τους τρεις τρόπους ταυτόχρονα.

3) ***Διάδοση θερμότητας με αγωγή*** ονομάζεται ο τρόπος κατά τον οποίο θερμότητα διαδίδεται από μία θερμή περιοχή ενός σώματος σε άλλη περιοχή του λιγότερη θερμή ή από ένα θερμό σώμα σε άλλο λιγότερο θερμό (με το οποίο βρίσκεται σε επαφή) χωρίς μεταφορά ύλης.

7.1.2 Μηχανισμός θερμικής αγωγιμότητας στα στερεά.

Αν κρατήσομε το ένα άκρο μιας μεταλλικής ράβδου και βάλομε το άλλο της άκρο σε μία φλόγα τότε θα διαπιστώσομε ότι το άκρο που κρατάμε θα αρχίσει να θερμαίνεται, παρόλο ότι δεν βρίσκεται σε απευθείας επαφή με τη φλόγα. Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα μεταδίδεται από το θερμό άκρο της ράβδου στο ψυχρό της με αγωγή μέσω της ράβδου.

Το γεγονός αυτό αιτιολογείται ως εξής:

Τα μόρια μιας θερμής περιοχής της ράβδου έχουν περισσότερη κινητική ενέργεια κατά μέσο όρο, από εκείνη που έχουν τα μόρια μιας λιγότερο θερμής γειτονικής της περιοχής.

Τα μόρια της θερμής περιοχής δίνουν μέρος της ενέργειάς τους στα μόρια της γειτονικής τους ψυχρότερης περιοχής και αυτά με τη σειρά τους στα μόρια της γειτονικής τους ψυχρότερης περιοχής και η διαδικασία συνεχίζεται κατά μήκος της ράβδου.

Βέβαια τα μόρια της ράβδου δεν μετακινούνται από περιοχή σε περιοχή της, η ενέργειά τους όμως μεταδίδεται.

7.1.3 Νόμος της αγωγής της θερμότητας.

Διάδοση θερμότητας μπορεί να γίνει μόνο μεταξύ περιοχών του σώματος με διαφορετικές θερμοκρασίες. Η «αυτόματη» ροή της θερμότητας γίνεται πάντοτε από περιοχή μιας θερμοκρασίας προς περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας.

Παίρνομε μία ράβδο που έχει μήκος l και διατομή S (σχ. 7.1α). Μονώνομε τη ράβδο έτσι ώστε να μη φεύγει θερμότητα από τη ράβδο στο περιβάλλον ούτε (η ράβδος) να παίρνει θερμότητα από το περιβάλλον.

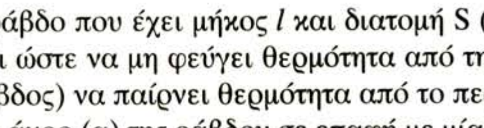
Φέρνομε το ένα άκρο (α) της ράβδου σε επαφή με μία πηγή θερμότητας (Α) θερμοκρασίας Θ_1 και το άλλο άκρο (β) με μία πηγή θερμότητας (Β) θερμοκρασίας Θ_2.

Αν οι θερμοκρασίες είναι τέτοιες, ώστε να ισχύει η σχέση $\Theta_1 > \Theta_2$, τότε θα διαπιστώσομε ότι:

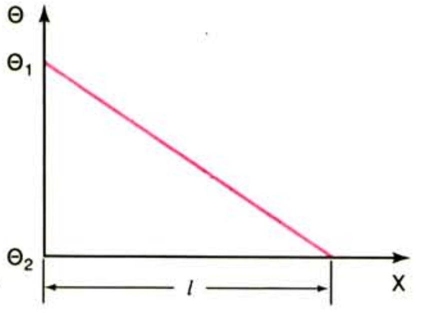
1) Η θερμοκρασία της ράβδου αρχίζει να αυξάνει από το σημείο (α) προς το σημείο (β).

2) Ύστερα από αρκετό χρόνο, κάθε σημείο της ράβδου αποκτά μία σταθερή θερμοκρασία.

Οι θερμοκρασίες των διαφόρων σημείων της ράβδου θα έχουν τιμές εν-



Σχ. 7.1α.



Σχ. 7.1β.

διάμεσες μεταξύ των τιμών Θ_1 και Θ_2 και θα ελαττώνονται συνεχώς από το (α) (θερμότερο) προς το (β) (ψυχρότερο).

Αν Θ_Σ είναι η θερμοκρασία ενός τυχαίου σημείου της ράβδου, θα ισχύει η σχέση $\Theta_1 > \Theta_\Sigma > \Theta_2$.

3) Η πτώση της θερμοκρασίας κατά μήκος της ράβδου είναι γραμμική (σχ. 7.1β).

4) Από τη στιγμή που κάθε σημείο της ράβδου αποκτά μία σταθερή θερμοκρασία ισχύει η σχέση:

$$\boxed{\frac{Q}{t} = \kappa \cdot S \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{l}} \tag{1}$$

όπου: Q το ποσό της θερμότητας που περνά από μία διατομή της ράβδου σε χρόνο t,

S το εμβαδόν της διατομής της ράβδου από την οποία περνά το Q,

l το μήκος της ράβδου και

κ ένας συντελεστής, ο οποίος ονομάζεται ***συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της ράβδου***.

Ο κ εξαρτάται κυρίως από το υλικό της ράβδου και είναι χαρακτηριστική σταθερά του υλικού της.

Η μονάδα του κ στο S.I. είναι το 1 W/m·K.

Προσοχή:

Η σχέση (1) εκφράζει το νόμο της θερμικής αγωγιμότητας.

Παρατηρήσεις:

1) Διά μέσου της ράβδου (σχ. 7.1α) πραγματοποιείται συνεχής ροή ποσοτήτων θερμότητας από την πηγή Α στη Β, δηλαδή η ράβδος διαρρέεται από θερμικό ρεύμα.

2) Το $\frac{Q}{t}$ της σχέσεως (1) που είναι ο ρυθμός διαδόσεως της θερμότητας στη ράβδο πολλές φορές το ονομάζομε και ***ένταση του θερμικού ρεύματος*** που ρέει στη ράβδο και το συμβολίζομε με H, οπότε έχομε:

$$\boxed{H = \frac{Q}{t}} \qquad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$H = \frac{Q}{t} = \varkappa \cdot S \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{l}\,, \qquad \boxed{H = \varkappa \cdot S \cdot \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{l}} \qquad (3)$$

Μονάδα της H στο S.I. είναι το 1 Joule/s ή 1 Watt (W).

3) Από τη σχέση (3) παίρνομε:

$$\frac{l}{\varkappa} = S \frac{\Theta_1 - \Theta_2}{H} \qquad (4)$$

Το πηλίκο $\left(\frac{l}{\varkappa}\right)$ το συμβολίζομε με R και το ονομάζομε θερμική αντίσταση της ράβδου:

$$\boxed{R = \frac{l}{\varkappa}}$$

Η μονάδα του R στο σύστημα S.I. είναι το 1 $m^2 \cdot K/W$.

4) Η ποσότητα $\boxed{(\Theta_1 - \Theta_2)/l}$ είναι η μεταβολή θερμοκρασίας ανά μονάδα μήκους και ονομάζεται ***θερμοβαθμίδα***.

7.2 Καλοί και κακοί αγωγοί θερμότητας.

Ο κ της σχέσεως $\frac{Q}{t} = \varkappa \cdot \frac{S \cdot (\Theta_1 - \Theta_2)}{l}$ είναι μία σταθερά αναλογίας και την ονομάζομε συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του σώματος.

Ο συντελεστής κ εξαρτάται από το υλικό και τη θερμοκρασία του σώματος. Στην πράξη ο κ ενός υλικού θεωρείται σταθερός για μεγάλο «εύρος» θερμοκρασίας.

Υλικά με μεγάλο κ είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας, ενώ υλικά με μικρό κ είναι κακής ποιότητας αγωγοί ή μονωτές (κακοί αγωγοί θερμότητας).

Σημείωση:

Καλούς αγωγούς της θερμότητας ονομάζομε τα υλικά διά των οποίων άγεται εύκολα η θερμότητα (κ μεγάλο), ενώ ***κακούς αγωγούς*** της θερμότητας ονομάζομε τα υλικά διά των οποίων πολύ δύσκολα διαδίδεται η θερμότητα (κ μικρό).

Το καλύτερο αγώγιμο υλικό είναι ο άργυρος, ο οποίος είναι και ο καλύτερος αγωγός του ηλεκτρισμού.

Γενικά όλα τα μέταλλα, είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας.

Μετά τον άργυρο ακολουθεί ο χαλκός και έπειτα τα άλλα μέταλλα. Το μπετόν, το γυαλί κ.ά. είναι μέτριοι αγωγοί θερμότητας, ενώ ο αμίαντος, τα ξύλα, ο φελλός και άλλα είναι κακοί αγωγοί θερμότητας.

Παρατήρηση:

Η καλή θερμική αγωγιμότητα των μετάλλων οφείλεται κατά ένα μέρος και στα ελεύθερα ηλεκτρόνιά τους.

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μιας θερμής περιοχής ενός μετάλλου συγκρούονται με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια γειτονικής της περιοχής χαμηλότερης θερμοκρασίας και τους προσδίδουν μέρος της κινητικής ενέργειάς τους. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέσα σε όλη τη μάζα του μετάλλου.

7.3 Αγωγή θερμότητας στα αέρια.

7.3.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Τα μόρια των αερίων βρίσκονται σε συνεχή κίνηση (θερμική κίνηση των μορίων).

2) Η ταχύτητα ενός μορίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία της περιοχής του αερίου στην οποία βρίσκεται το μόριο αυτό.

3) Τα μόρια ενός αερίου τα οποία βρίσκονται σε μία περιοχή του έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα (άρα και περισσότερη κινητική ενέργεια) από την ταχύτητα (άρα και την κινητική ενέργεια) που έχουν τα μόριά του τα οποία βρίσκονται σε μία άλλη ψυχρότερη περιοχή του.

7.3.2 Μηχανισμός θερμικής αγωγιμότητας στα αέρια.

Τα μόρια μιας θερμής περιοχής ενός αερίου κινούνται προς τη γειτονική της περιοχή που έχει χαμηλότερη θερμοκρασία και συγκρουόμενα με τα μόρια της περιοχής αυτής τους προσδίδουν μέρος της κινητικής τους ενέργειας (θερμικής ενέργειας).

Επομένως και για τα αέρια μπορούμε να μιλάμε για διάδοση θερμότητας από μία περιοχή τους σε άλλη γειτονική της εξαιτίας των διαφορετικών θερμοκρασιών τους χωρίς μεταφορά ύλης.

Σημείωση:

Ο μηχανισμός της θερμικής αγωγιμότητας των υγρών είναι συνδυασμός των μηχανισμών αγωγιμότητας των στερεών και των αερίων.

7.4 Διάδοση θερμότητας με μεταφορά.

Διάδοση θερμότητας με μεταφορά ονομάζεται η διάδοση θερμότητας από μία θερμή περιοχή ενός ρευστού σε άλλη ψυχρότερη, η οποία γίνεται με μετακίνηση μαζών του. Δηλαδή μάζες ρευστού, αφού θερμανθούν (προσλάβουν θερμική ενέργεια) σε μία θερμή περιοχή του, μετακινούνται προς τις ψυχρές περιοχές του, μεταφέροντας μαζί τους τη θερμική ενέργεια που πήραν από τη θερμή περιοχή.

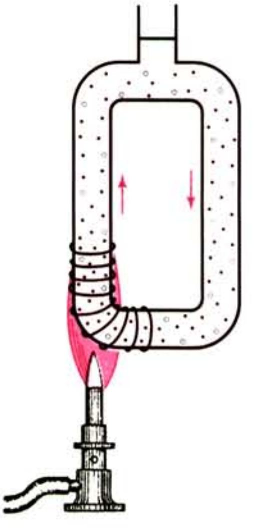
Η μετακίνηση των μαζών ρευστού που έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες πραγματοποιείται λόγω των διαφορετικών τους πυκνοτήτων (διαφορετικές θερμοκρασίες $\Rightarrow$ διαφορετικές πυκνότητες).

Στην περιοχή που το ρευστό θερμαίνεται η πυκνότητά του είναι συνέχεια μικρότερη. Προς την περιοχή αυτή κινείται συνεχώς ρευστό μικρότερης θερμοκρασίας (μεγαλύτερης πυκνότητας) όπου και θερμαίνεται και η διαδικασία συνεχίζεται.

Το μηχανισμό διαδόσεως της θερμότητας με μεταφορά μπορούμε να τον παρακολουθήσομε με τη διάταξη του σχήματος 7.4α.

Μέσα σε γυάλινη φιάλη βάζομε νερό και λίγα ρινίσματα (πριονίδια) ξύλου και τη θερμαίνομε. Αρχικά θερμαίνεται το νερό που βρίσκεται στον πυθμένα της φιάλης, οπότε αυτό εξαιτίας της ελαττώσεως της πυκνότητάς του, ανέρχεται, ενώ το ψυχρό κατέρχεται. Με τον τρόπο αυτό δημιουργού-

Σχ. 7.4α.



Σχ. 7.4β.

νται ρεύματα θερμού νερού προς τα πάνω και ψυχρού προς τα κάτω και έτσι, μετά από λίγο, όλο το νερό θερμαίνεται. Τα ρεύματα τα παρακολουθούμε με την κίνηση των ρινισμάτων του ξύλου.

Το φαινόμενο της διαδόσεως της θερμότητας με μεταφορά το παρακολουθούμε, ευκρινέστερα, με τη διάταξη την οποία παριστά το σχήμα 7.4β.

Σημείωση:

Ο τρόπος διαδόσεως θερμότητας με μεταφορά ονομάζεται και τρόπος διαδόσεως θερμότητας με ρεύματα γιατί κατά τη μετακίνηση των μαζών του ρευστού δημιουργούνται ρεύματα από αυτό. Φανερό είναι ότι ο τρόπος διαδόσεως της θερμότητας με μεταφορά (με ρεύματα) εμφανίζεται μόνο στα ρευστά (υγρά και αέρια).

Προσοχή:

Όταν η μετακίνηση των μαζών του ρευστού γίνεται εξαιτίας των διαφορετικών πυκνοτήτων τους, τότε η μεταφορά των μαζών του ρευστού ονομάζεται ***φυσική*** ή ***αυτόματη***.

Όταν η μεταφορά (μετακίνηση) των μαζών του ρευστού γίνεται με την επίδραση μιας μηχανικής αιτίας (αντλία, ανεμιστήρας κλπ.) τότε η μεταφορά των μαζών του ρευστού ονομάζεται ***εξαναγκασμένη***.

Στην πράξη για την υπερνίκηση των αντιστάσεων στη ροή του νερού μέσα στους σωλήνες, ώστε το νερό να κυκλοφορεί πιο γρήγορα, χρησιμοποιείται συνήθως μια μικρή περιστροφική αντλία που ονομάζεται ***κυκλοφορητής***.

7.5 Διάδοση της θερμότητας με ακτινοβολία.

Κάθε σώμα, οποιαδήποτε θερμοκρασία και αν έχει, εκπέμπει ένα μέρος της εσωτερικής του ενέργειας υπό μορφή ακτινοβολίας.

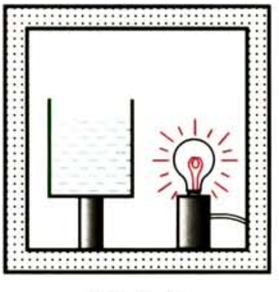
Η ακτινοβολία την οποία εκπέμπει ένα σώμα και η οποία προκύπτει από μετατροπή μέρους της εσωτερικής ενέργειάς του ονομάζεται ***θερμική ακτινοβολία***.

Μία θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα σώμα (πομπό) όταν πέφτει σε ένα άλλο σώμα (δέκτη) μετατρέπεται από αυτό σε θερμοδυναμική του ενέργεια.

Έτσι πραγματοποιείται η διάδοση ενέργειας (θερμότητας) υπό μορφή ακτινοβολίας από ένα σώμα σε άλλο.

Η διάδοση ενέργειας από ένα σώμα σε άλλο υπό μορφή ακτινοβολίας ονομάζεται ***διάδοση θερμότητας με ακτινοβολία***.

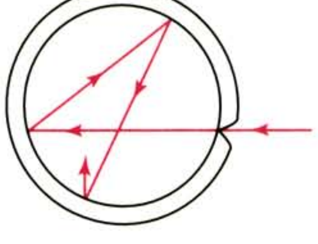
Τονίζομε ότι η θερμική ακτινοβολία είναι μία μορφή ενέργειας, η οποία διαδίδεται διά ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων τα οποία είναι όμοια προς τα φωτεινά κύματα και διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός. Τα θερμικά ηλεκτρομαγνητικά κύματα όπως και όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται όχι μόνο διά μέσου των διαφόρων υλικών αλλά και διά μέσου του κενού. Δηλαδή η θερμότητα μπορεί να διαδοθεί από ένα σώμα σε άλλο με ηλεκτρομαγνητικά κύματα χωρίς να είναι απαραίτητο να υπάρχει μεταξύ τους υλικό μέσο. Αν μέσα σε αεριόκενο δοχείο (σχ. 7.5) με τοιχώματα θερμομονωτικά, τοποθετήσομε άλλο δοχείο που περιέχει νερό και ένα λαμπτήρα παρατηρούμε ανύψωση της θερμοκρασίας του νερού.



Σχ. 7.5.

7.6 Το μελανό (μαύρο) σώμα.

Μελανό σώμα ονομάζεται το σώμα που όταν λειτουργεί ως δέκτης, απορροφά όλη την προσπίπτουσα σε αυτό ακτινοβολία, ενώ όταν λειτουργεί ως πομπός εκπέμπει σε κάθε θερμοκρασία ποσότητα θερμικής ακτινοβο-



Σχ. 7.6.

λίας (θερμότητα) που είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα την οποία μπορεί να εκπέμψει οποιοδήποτε άλλο σώμα της ίδιας θερμοκρασίας.

Στην πραγματικότητα, ιδανικώς μελανό σώμα δεν υπάρχει. Πρακτικά η αιθάλη συμπεριφέρεται ως μελανό σώμα. Έτσι μία επιφάνεια όταν επικαλυφθεί με στρώμα αιθάλης συμπεριφέρεται ως μελανό σώμα.

Με μεγάλη προσέγγιση μπορούμε να πραγματοποιήσομε μελανό σώμα με τη μέθοδο της «παγίδας».

Μία κοιλότητα (παγίδα) φέρει μικρή οπή (σχ. 7.6). Από τα τοιχώματα της κοιλότητας δεν διέρχονται οι ακτινοβολίες. Όταν μία ακτινοβολία εισέλθει από την οπή εντός της κοιλότητας, τότε η ακτινοβολία παθαίνει μέσα σε αυτήν πολλαπλές ανακλάσεις και διαχύσεις. Έτσι η ακτινοβολία απορροφάται εξ ολοκλήρου από την κοιλότητα και συνεπώς η κοιλότητα αυτή συμπεριφέρεται ως ιδανικώς μελανό σώμα.

Αντιστρόφως, όταν η κοιλότητα φέρεται σε ορισμένη θερμοκρασία, τότε από τη μικρή οπή της εκφεύγει ακτινοβολία, που ονομάζεται ***ακτινοβολία του μελανού σώματος***. Η ακτινοβολία αυτή εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία των τοιχωμάτων της κοιλότητας, ενώ η φύση των τοιχωμάτων της κοιλότητας δεν παίζει κανένα ρόλο.

Παρατηρήσεις:

1) Η ακτινοβολία που εξέρχεται από τη θυρίδα ενός κλιβάνου που βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία είναι κατά προσέγγιση ακτινοβολία μελανού σώματος.

2) Φανερό είναι ότι η οπή της κοιλότητας έχει τις ιδιότητες του μελανού σώματος.

7.7 Νόμος των Stefan-Boltzmann.

7.7.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Η θερμική ακτινοβολία (θερμότητα), την οποία εκπέμπει ένα σώμα εξαρτάται:

– Από τη θερμοκρασία του σώματος και
– από τη φύση της επιφάνειας του σώματος.

Ένα ερυθροπυρωμένο τεμάχιο σιδήρου ακτινοβολεί σε χρόνο (t) πολύ περισσότερη θερμότητα, από τη θερμότητα την οποία ακτινοβολεί στον ίδιο χρόνο (t) όμοιο τεμάχιο, που βρίσκεται σε χαμηλότερη θερμοκρασία.

Μία «μέλαινα» (μαύρη) (π.χ. αιθαλωμένη) επιφάνεια ακτινοβολεί περισσότερη θερμότητα, από τη θερμότητα, την οποία ακτινοβολεί μία στιλπνή μεταλλική επιφάνεια που έχει την ίδια θερμοκρασία με τη «μέλαινα» (μαύρη).

2) Τα διάφορα σώματα εκπέμπουν και δέχονται θερμική ακτινοβολία. Όταν ένα σώμα δέχεται περισσότερη ακτινοβολία από αυτήν που εκπέμπει, θερμαίνεται, ενώ, όταν εκπέμπει περισσότερη από όση δέχεται, ψύχεται.

Το χέρι μας ψύχεται, αν το πλησιάσομε κοντά σε πάγο. Το χέρι μας, όπως και ο πάγος εκπέμπουν θερμότητα. Το χέρι μας όμως βρίσκεται σε μεγαλύτερη θερμοκρασία από τον πάγο και εκπέμπει μεγαλύτερο ποσό θερμικής ακτινοβολίας από αυτό που δέχεται.

3) Όταν ένα σώμα θερμοκρασίας Τ΄ βρίσκεται σε περιβάλλον θερμοκρασίας Τ, θα αποκτήσει μετά από ορισμένο χρόνο θερμοκρασία Τ, ώστε το ποσό της θερμικής ακτινοβολίας, που εκπέμπει, να είναι ίσο με το ποσό της ακτινοβολίας που δέχεται.

7.7.2 Διατύπωση του νόμου των Stefan-Boltzmann.

Το ποσό της θερμικής ακτινοβολίας (της θερμότητας) που ακτινοβολεί ένα σώμα κατά μονάδα χρόνου, δηλαδή η εκπεμπόμενη ισχύς Η (ο ρυθμός εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας) από ένα σώμα παρέχεται από τη σχέση:

$$\boxed{H = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T^4} \qquad (1)$$

όπου: Α το εμβαδόν της επιφάνειας του σώματος,
Τ η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος,
σ μία θεμελιώδης φυσική σταθερά που ονομάζεται σταθερά των Stefan-Boltzmann. Η τιμή της σ είναι: $\sigma = 5{,}6705 \cdot 10^{-8}\ W/m^2 \cdot K^4$ και
e ο συντελεστής εκπομπής.

Η σχέση (1) εκφράζει μαθηματικά το νόμο των Stefan-Boltzmann.

Παρατήρηση:

Για το μελανό σώμα ο συντελεστής εκπομπής είναι: e = 1. Επομένως για το μελανό σώμα η μαθηματική διατύπωση του νόμου των Stefan-Boltzmann είναι:

$$\boxed{H_\mu = A \cdot \sigma \cdot T^4} \qquad (2)$$

Προσοχή:

1) Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$e = \frac{H}{A \cdot \sigma \cdot T^4} = \frac{H}{H_\mu}, \quad \boxed{e = \frac{H}{H_\mu}} \qquad (3)$$

Από τη σχέση (3) συνάγεται ότι:

Ο συντελεστής εκπομπής (e) παριστάνει το πηλίκο του ρυθμού εκπομπής από την επιφάνεια του σώματος, προς το ρυθμό εκπομπής από μία επιφάνεια μελανού σώματος ίσου εμβαδού και ίσης θερμοκρασίας.

2) Ο συντελεστής εκπομπής (e) ενός σώματος είναι ένας αδιάστατος αριθμός και παίρνει τιμές:

$$\boxed{0 \leq e \leq 1}$$

3) Ο συντελεστής εκπομπής (e) ενός σώματος εξαρτάται από τη φύση, το χρώμα και τη θερμοκρασία του σώματος [στην πράξη ο (e) θεωρείται ανεξάρτητος της θερμοκρασίας].

Σημείωση:

Κάθε σώμα εκπέμπει ακτινοβολία στο περιβάλλον του και ταυτόχρονα απορροφά ακτινοβολία από αυτό.

Ο ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας σώματος Σ που έχει απόλυτη θερμοκρασία T_Σ είναι:

$$\boxed{H = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T_\Sigma^4}$$

Ο ρυθμός απορροφήσεως ακτινοβολίας του ίδιου σώματος Σ, που το περιβάλλον του έχει απόλυτη θερμοκρασία T_Π είναι:

$$\boxed{H_{\alpha\pi} = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T_\Pi^4}$$

Επομένως ο τελικός ρυθμός εκπομπής ακτινοβολίας από ένα σώμα σε θερμοκρασία T_Σ με το περιβάλλον του σε θερμοκρασία T_Π είναι:

$$H_{\tau\epsilon\lambda} = H - H_{\alpha\pi} = A \cdot e \cdot \sigma \cdot T_\Sigma^4 - A \cdot e \cdot \sigma \cdot T_\Pi^4 = A \cdot e \cdot \sigma \cdot (T_\Sigma^4 - T_\Pi^4) \qquad (4)$$

Θετικό $H_{τελ}$ σε αυτή τη σχέση σημαίνει ότι το τελικό αποτέλεσμα είναι εκροή θερμότητας από το σώμα στο περιβάλλον, ενώ αρνητικό $H_{τελ}$ σημαίνει προσφορά θερμότητας στο σώμα από το περιβάλλον.

7.8 Απορρόφηση της ακτινοβολίας.

Όταν η ακτινοβολία προσπίπτει επάνω στα σώματα ένα μέρος της ανακλάται στην επιφάνειά τους, ενώ ένα μέρος εισέρχεται μέσα σε αυτά.

Η ακτινοβολία που εισέρχεται μέσα σε ένα σώμα, ανάλογα του πάχους και της φύσεως του σώματος, είτε απορροφάται πλήρως είτε διέρχεται πλήρως (ιδανικώς διαφανές) είτε ένα μέρος της απορροφάται και το υπόλοιπο διέρχεται.

Η ακτινοβολία που απορροφάται από ένα σώμα προκαλεί θέρμανση του σώματος (πιο συγκεκριμένα αυξάνει την εσωτερική του ενέργεια).

Συντελεστή απορροφήσεως (α) ενός σώματος ονομάζομε το πηλίκο της ισχύος που απορροφάται από το σώμα διά της ισχύος που προσπίπτει επάνω στο σώμα, δηλαδή:

$$\boxed{α = \frac{H_{απ}}{H_{πρ}}}$$

όπου: $H_{απ}$ η ισχύς που απορροφάται από το σώμα και
$H_{πρ}$ η ισχύς που προσπίπτει σε αυτό.

Ο συντελεστής απορροφήσεως ενός σώματος εξαρτάται από την ποιότητα (φύση-χρώμα) της επιφάνειας του σώματος και από το υλικό του, όπως επίσης και από το πάχος του σώματος.

Ο συντελεστής απορροφήσεως είναι καθαρός αριθμός και έχει τιμή μεταξύ του μηδενός και της μονάδας ($0 \leq α \leq 1$).

Την τιμή $α = 1$ έχει το μελανό σώμα, το οποίο απορροφά πλήρως την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό.

Την τιμή $α = 0$ έχουν σώματα των οποίων η επιφάνεια είναι εντελώς κατοπτρική και ανακλά πλήρως την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτήν.

Την τιμή $α = 0$ έχουν, επίσης, σώματα των οποίων η επιφάνεια καθόλου δεν ανακλά και τα οποία είναι ιδανικώς διαφανή.

Γενικά τα σώματα που συναντώνται στη φύση είναι μη μελανά και μη ιδανικώς διαφανή και γι' αυτό ο συντελεστής απορροφήσεώς τους παίρνει τιμές μεταξύ του μηδενός και της μονάδας ($0<α<1$).

Παρατηρήσεις:

1) Στην ίδια θερμοκρασία οι σκοτεινές και τραχείες επιφάνειες απορ-

ροφούν περισσότερη ακτινοβολία από τις φωτεινές και στιλπνές.

Στην ίδια θερμοκρασία οι σκοτεινές και τραχείες επιφάνειες ακτινοβολούν εντονότερα από τις φωτεινές και λείες. Με άλλα λόγια έχει διαπιστωθεί ότι: ***όσα σώματα απορροφούν πολύ, τα ίδια σώματα όταν θερμανθούν ακτινοβολούν εντόνως.***

2) Τα μαύρα και γκρίζα σώματα είναι καλοί απορροφητές και συγχρόνως καλοί πομποί θερμικής ακτινοβολίας. Αντίθετα, τα λευκά στιλπνά, τα ανοικτόχρωμα σώματα, ούτε θερμαίνονται εύκολα με ακτινοβολία, ούτε ακτινοβολούν εντόνως όταν θερμανθούν.

3) Μία χύτρα με ζεστό νερό και μαυρισμένη από την αιθάλη (καπνιά) ψύχεται εύκολα λόγω απωλειών θερμότητας με ακτινοβολία. Αντίθετα ένα μαύρο ύφασμα μας ζεσταίνει πολύ, όταν είμαστε στον ήλιο, γιατί απορροφά εξαιρετικά καλά την ηλιακή ακτινοβολία.

4) Οι θερινές ενδυμασίες κατασκευάζονται από λευκά και γενικά ανοικτόχρωμα υφάσματα γιατί αυτά ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία.

7.9 Θερμοκρασία σώματος και χρώματα της ακτινοβολίας του.

Αν θερμαίνομε ένα σώμα (π.χ. μία μεταλλική σφαίρα) έτσι ώστε η θερμοκρασία του να αυξάνει συνεχώς τότε θα διαπιστώσομε τα εξής:

- Στην αρχή το σώμα εκπέμπει αόρατες υπέρυθρες ακτινοβολίες και είναι σκοτεινό.
- Όσο συνεχίζεται η θέρμανσή του, αυξάνεται η ένταση των ακτινοβολιών που εξέπεμπε και επί πλέον έρχεται στιγμή κατά την οποία αρχίζει να εκπέμπει και ορατή ερυθρή ακτινοβολία, οπότε λέμε ότι αυτό είναι ερυθροπυρωμένο.

Εφ' όσον συνεχίζεται η ύψωση της θερμοκρασίας του, προχωράει διαδοχικά και η εμφάνιση και άλλων ορατών ακτινοβολιών. Τελικά το σώμα εκπέμπει, εκτός των προηγουμένων ακτινοβολιών, και αόρατες υπεριώδεις ακτινοβολίες.

Γενικά τα διάφορα σώματα στους 500°C εκπέμπουν φως (ακτινοβολία) που έχει χρώμα βαθύ ερυθρό, στους 800°C ερυθρό, στους 2.000°C κίτρινο και όσο υψώνεται η θερμοκρασία τους το χρώμα του φωτός που εκπέμπουν τείνει προς το λευκό. Για να εκπέμψει ένα διάπυρο σώμα λευκό φως (φως της ημέρας) πρέπει να βρίσκεται σε θερμοκρασία 6.000 K, δηλαδή στη θερμοκρασία του ηλίου. Στη θερμοκρασία αυτή το σώμα εκπέμπει, εκτός από το ορατό φως και έντονη υπεριώδη ακτινοβολία.

Υπενθυμίζομε ότι ακτινοβολία, η οποία οφείλεται στη θερμοκρασία σώματος ονομάζεται ***θερμική ακτινοβολία***.

Από τα παραπάνω συμπεραίνομε τα εξής:

1) Το είδος της θερμικής ακτινοβολίας, την οποία εκπέμπει ένα σώμα, προσδιορίζεται από τη θερμοκρασία του σώματος.

2) Ένα διάπυρο σώμα εκπέμπει γενικά ένα μείγμα ακτινοβολιών, οι οποίες έχουν διάφορα μήκη κύματος (διάφορα χρώματα).

7.10 Αφετική ικανότητα σώματος. Προσδιορισμός υψηλών θερμοκρασιών (πυρόμετρα).

7.10.1 Αφετική ικανότητα σώματος.

Κάθε σώμα, που βρίσκεται σε απόλυτη θερμοκρασία T εκπέμπει θερμική ακτινοβολία. Ονομάσαμε ισχύ H της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα όταν βρίσκεται σε μία ορισμένη θερμοκρασία το πηλίκο της ολικής ενέργειας την οποία εκπέμπει το σώμα υπό μορφή ακτινοβολίας διά του χρόνου μέσα στον οποίο την εκπέμπει.

Σε πολλές περιπτώσεις στην πράξη χρησιμοποιείται το μέγεθος αφετική ικανότητα του σώματος.

Αφετική ικανότητα ενός σώματος (R΄) ονομάζομε το πηλίκο της ισχύος (H) που εκπέμπεται από το σώμα διά του εμβαδού (A) της επιφάνειάς του:

$$\boxed{R' = \frac{H}{A}} \qquad (1)$$

Η ισχύς που εκπέμπεται από ένα σώμα είναι ανάλογη της τέταρτης δυνάμεως της απόλυτης θερμοκρασίας του (νόμος των Stefan-Boltzmann). Επομένως από τη σχέση (1) προκύπτει ότι η αφετική ικανότητα ενός σώματος είναι ανάλογη της τέταρτης δυνάμεως της θερμοκρασίας του.

7.10.2 Προσδιορισμός υψηλών θερμοκρασιών (πυρόμετρο).

Ισχύει η εξής αρχή:

Αν δύο σώματα έχουν αφετικές ικανότητες ίσες και αυτές αντιστοιχούν σε ακτινοβολίες τους που έχουν ίσα μήκη κύματος τότε οι θερμοκρασίες των σωμάτων αυτών είναι ίσες.

Επί της αρχής αυτής στηρίζεται η λειτουργία θερμομετρικών οργάνων τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση υψηλών θερμοκρασιών.

Τα πυρόμετρα είναι θερμομετρικά όργανα με τα οποία συγκρίνομε την ακτινοβολία του πυρακτωμένου νήματος ενός ηλεκτρικού λαμπτήρα προς την ακτινοβολία ενός διάπυρου σώματος, για παράδειγμα τετηγμένου σιδήρου σε μεταλλουργικό φούρνο.

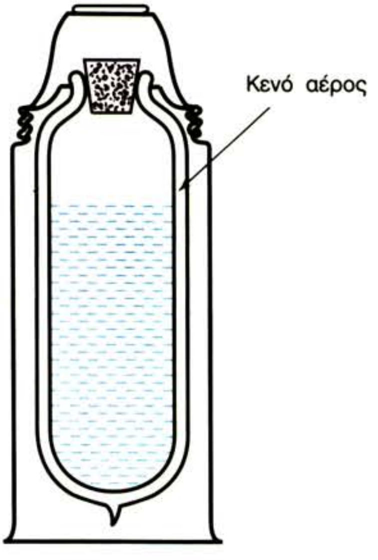
Ρυθμίζοντας το ρεύμα του νήματος, ώστε η ακτινοβολία του λαμπτήρα να μοιάζει με την ακτινοβολία του διάπυρου μετάλλου, μπορούμε να εκτιμήσομε από απόσταση τη θερμοκρασία του μετάλλου.

Σημείωση:
Ευνόητο είναι ότι η θερμοκρασία του νήματος είναι γνωστή.

7.11 Δοχεία Dewar.

Με τα δοχεία αυτά μπορούμε να διατηρήσομε, σχετικά, πολύ χρόνο ένα υγρό σε σταθερή θερμοκρασία είτε υψηλότερη είτε χαμηλότερη της θερμοκρασίας του περιβάλλοντός του.

Τα δοχεία Dewar είναι γυάλινα διπλότοιχα δοχεία (σχ. 7.11) στα οποία



Σχ. 7.11.

ο χώρος μεταξύ των τοιχωμάτων τους είναι αερόκενος και αυτό για να αποφεύγεται η διαρροή θερμότητας, λόγω θερμικής αγωγιμότητας και λόγω μεταφοράς με τον αέρα.

Επίσης για να ελαττώνεται και η απώλεια, λόγω διαδόσεως της θερμότητας με ακτινοβολία, επαργυρώνονται οι εσωτερικές τους επιφάνειες και γίνονται κατοπτρικές.

Δοχεία Dewar είναι και τα θερμοφόρα δοχεία (thermos) μέσα στα οποία βάζομε διάφορα υγρά (ζεστό γάλα, κρύο νερό κλπ.) για να διατηρούν σταθερή τη θερμοκρασία τους.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Β΄ ΜΕΡΟΥΣ

1. Ένας ασθενής έχει θερμοκρασία 39°C. Να υπολογισθεί αυτή στην κλίμακα Φαρενάιτ και στην απόλυτη κλίμακα.

2. Ένα χάλκινο μέτρο έχει βαθμολογηθεί στους 0°C. Αν μετρήσομε μία απόσταση στη θερμοκρασία 30°C και τη βρούμε 0,43 m, ποια είναι η πραγματική απόσταση; Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του χαλκού είναι 16×10^{-6} $grad^{-1}$.

3. Η διάμετρος ενός δακτυλίου μικρού πάχους από χαλκό και η διάμετρος ενός χάλκινου κυκλικού δίσκου στους 0°C είναι $\delta_o = 100$ mm. Πόσο θα αυξηθεί η διάμετρος του δακτυλίου και πόσο του δίσκου όταν θερμανθούν στους 500°C; Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του χαλκού να ληφθεί $\gamma = 14 \times 10^{-6}$ $grad^{-1}$.

4. Μία μεταλλική πλάκα έχει σε 0°C εμβαδόν $S_o = 6400$ cm^2. Πόσο αυξάνει το εμβαδόν της πλάκας, όταν η θερμοκρασία της αυξάνει από 0°C σε 40°C; Ο συντελεστής της γραμμικής διαστολής του μετάλλου της πλάκας είναι $\gamma = 14 \times 10^{-6}$ $grad^{-1}$.

5. Το εμβαδόν μιας λεπτότοιχης σφαίρας Α από χαλκό και το εμβαδόν μιας πλήρους χάλκινης σφαίρας Β στους 0°C είναι $S_o = 6400$ cm^2. Πόσο θα αυξηθεί το εμβαδόν της κάθε μιας σφαίρας, όταν θερμανθούν στους 40°C; Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του χαλκού είναι $\gamma = 16 \times 10^{-6}$ $grad^{-1}$.

6. Ένα κομμάτι χαλαζία έχει σε 0°C όγκο $V_o = 1000$ cm^3. Πόσο αυξάνει ο όγκος του χαλαζία όταν η θερμοκρασία του αυξάνει από 0°C σε 500°C; Ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του χαλαζία είναι $\gamma = 6 \cdot 10^{-7}$ $grad^{-1}$.

7. Ο όγκος ενός λεπτότοιχου δοχείου από ορείχαλκο και ο όγκος πλήρους ορειχάλκινης σφαίρας στους 0°C είναι $V_o = 2000$ cm^3. Ποια η αύξηση του όγκου του δοχείου και της σφαίρας όταν θερμανθούν στους 40°C; Συντελεστής γραμμικής διαστολής του ορείχαλκου είναι $\gamma = 1{,}9 \cdot 10^{-5}$ $grad^{-1}$.

8. Γυάλινη φιάλη έχει σε 20°C χωρητικότητα $V_{10} = 110$ cm^3. Πόση χωρητικότητα έχει σε 100°C; Κυβικός συντελεστής γυαλιού $K = 24 \cdot 10^{-6}$ $grad^{-1}$.

9. Μία μάζα m ενός αερίου έχει όγκο $V_o = 4$ lt υπό πίεση $P_o = 760$ Torr και

θερμοκρασία 0°C. Αν η μάζα αυτή διαστέλλεται κάτω από σταθερή πίεση (760 Torr) ποιο όγκο V_Θ θα κατέχει υπό θερμοκρασία $\Theta = 273°C$;

10. Μία μάζα m ενός αερίου έχει όγκο $V_\Theta = 400\ cm^3$ υπό θερμοκρασία $\Theta = 91°C$. Ποιος είναι ο όγκος της V_o στη θερμοκρασία 0°C, αν η πίεσή της παραμένει σταθερή;

11. Φιάλη πιέσεως περιέχει οξυγόνο, το οποίο σε θερμοκρασία 0°C έχει πίεση $P_o = 80$ atm. Ποια θα είναι η πίεση του P_Θ, όταν θερμανθεί στους $\Theta = 100°C$;

12. Μία μάζα ενός αερίου σε θερμοκρασία 0°C, έχει πίεση $P_o = 4$ atm. Σε ποια θερμοκρασία θα έχει πίεση $P_\Theta = 8$ atm, αν ο όγκος της διατηρείται σταθερός;

13. Μία μάζα ενός αερίου έχει όγκο $V_1 = 800\ cm^3$ υπό πίεση $P_1 = 1{,}5$ atm και θερμοκρασία $\Theta_1 = -20°C$. Να υπολογισθεί η πίεση P_2 της μάζας αυτής, όταν ο όγκος της γίνει $V_2 = 400\ cm^3$ και η θερμοκρασία της $\Theta_2 = 40°C$.

14. Μάζα m = 5 g οξυγόνου βρίσκεται υπό πίεση P = 0,6 atm και θερμοκρασία $\Theta = 47°C$. Να υπολογισθεί ο όγκος V της μάζας αυτής του οξυγόνου. Μοριακό βάρος οξυγόνου 32.

15. Να υπολογισθεί η μάζα m του υδρογόνου που περιέχεται σε φιάλη χωρητικότητας V = 50 lt στη θερμοκρασία $\Theta = 18°C$ και υπό πίεση P = 60 atm. Μοριακό βάρος υδρογόνου 2.

16. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί σε μάζα m = 4 kg χαλκού για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της από $\Theta_1 = 20°C$ σε $\Theta_2 = 120°C$; Ειδική θερμότητα χαλκού $c_x = 0{,}092\ cal\cdot g^{-1}\cdot grad^{-1}$.

17. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί σε μάζα m = 10 kg νερού για να ανυψωθεί η θερμοκρασία της από $\Theta_1 = 68°F$ σε $\Theta_2 = 122°F$;

18. Αναμειγνύομε μία ποσότητα νερού μάζας $m_1 = 800$ g με μία άλλη μάζας $m_2 = 500$ g. Αν οι θερμοκρασίες τους $\Theta_1 = 90°C$ και $\Theta_2 = 10°C$ αντίστοιχα, ποια θα είναι η τελική θερμοκρασία Θ_T των m_1 και m_2; Ειδική θερμότητα του νερού $c = 1\ cal\cdot g^{-1}\cdot grad^{-1}$.

19. Πόση μάζα m_1 νερού θερμοκρασίας $\Theta_1 = 20°C$ και πόση μάζα m_2 νερού θερμοκρασίας $\Theta_2 = 60°C$ πρέπει να αναμείξομε για να πάρομε μάζα m = 100 kg νερού θερμοκρασίας $\Theta_T = 40°C$; Η ειδική θερμότητα του νερού είναι $c = 1\ cal\cdot g^{-1}\cdot grad^{-1}$.

20. Όταν καεί τελείως μία ποσότητα βενζίνης μάζας m = 1,37 kg, ελευθερώνεται θερμότητα Q = 14.400 kg. Πόση είναι η θερμότητα καύσεως c_K της βενζίνης;

21. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί σε ποσότητα πάγου μάζας m = 2 kg και θερμοκρασίας 0°C για να μεταβληθεί σε νερό της ίδιας θερμοκρασίας; Η θερμότητα τήξεως του πάγου είναι λ = 80 cal/g.

22. Πόση θερμότητα Q απάγεται από ποσότητα νερού, μάζας m = 2 kg και θερμοκρασίας 0°C όταν μεταβληθεί σε πάγο της ίδιας θερμοκρασίας; Η θερμότητα πήξεως του νερού είναι λ = 80 cal/g, δηλαδή όση είναι η θερμότητα τήξεως του πάγου.

23. Μία μάζα m = 100 g πάγου έχει θερμοκρασία $\Theta_\Pi = -10°C$. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί στη μάζα αυτή για να μετατραπεί σε νερό θερμοκρασίας $\Theta_N = 20°C$; Δίνονται: Ειδική θερμότητα πάγου: $c_\Pi = 0,58$ cal/g·grad, ειδική θερμότητα νερού $c_N = \frac{1\text{cal}}{\text{g}\cdot\text{grad}}$ και θερμότητα τήξεως του πάγου $\lambda = 80\frac{\text{cal}}{\text{g}}$.

24. Πόση μάζα m πάγου θερμοκρασίας $\Theta_\Pi = -20°C$ μπορεί να τακεί αν αναμειχθεί με νερό που έχει μάζα $m_N = 1$ kg και θερμοκρασία $\Theta_N = 50°C$; Δίνονται: Ειδική θερμότητα πάγου $c_\Pi = 0,58$ cal/g·grad, ειδική θερμότητα νερού $c_N = 1$ cal/g·grad, θερμότητα τήξεως του πάγου λ = 80 cal/g.

25. Μία μάζα m = 10 g νερού έχει θερμοκρασία $\Theta_N = 100°C$. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί στη μάζα αυτή για να γίνει ατμός της ίδιας θερμοκρασίας; Θερμότητα εξαερώσεως νερού στους 100°C είναι: L = 539 cal/g.

26. Μία μάζα m = 10 g υδρατμών έχει θερμοκρασία $\Theta_\alpha = 100°C$. Πόση θερμότητα Q πρέπει να απαχθεί από τη μάζα αυτή για να γίνει νερό της ίδιας θερμοκρασίας; Θερμότητα εξαερώσεως νερού στους 100°C είναι: L = 539 cal/g.

27. Μία μάζα m = 10 g νερού έχει θερμοκρασία $\Theta_N = 80°C$. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί στη μάζα αυτή για να γίνει ατμός θερμοκρασίας $\Theta_\alpha = 100°C$; Θερμότητα εξαερώσεως νερού στους 100°C: L = 539 cal/g. Ειδική θερμότητα νερού $c_N = 1$ cal/g·grad.

28. Πόση θερμότητα Q απάγεται από ποσότητα υδρατμών μάζας m = 10 g και θερμοκρασίας $\Theta_\alpha = 100^\circ C$ όταν μεταβληθεί σε νερό θερμοκρασίας $\Theta_N = 50^\circ C$; Θερμότητα εξαερώσεως του νερού σε $100^\circ C$: $L = 539$ cal/g και ειδική θερμότητα του νερού $c_N = 1$ cal/g·grad.

29. Μία μάζα m = 100 g πάγου έχει θερμοκρασία $\Theta_\Pi = -10^\circ C$. Πόση θερμότητα Q πρέπει να προσφερθεί στη μάζα αυτή για να γίνει υδρατμός θερμοκρασίας $\Theta_\alpha = 100^\circ C$; Δίνονται: Ειδική θερμότητα πάγου $c_\Pi = 0{,}58$ cal/g·grad, ειδική θερμότητα νερού $c_N = 1$ cal/g·rad, θερμότητα τήξεως του πάγου $\lambda = 80$ cal/g και θερμότητα εξαερώσεως του νερού σε $100^\circ C$: $L = 539$ cal/g.

30. Η διατομή κυλινδρικής ράβδου από χαλκό έχει εμβαδόν $S = 1\ cm^2$ και το μήκος της ράβδου είναι $l = 100$ cm. Το ένα άκρο της ράβδου βρίσκεται σε επαφή με λουτρό σταθερής θερμοκρασίας $\Theta_1 = 320^\circ C$, ενώ το άλλο της διατηρείται σε θερμοκρασία $\Theta_2 = 20^\circ C$. Πόση θερμότητα Q απάγεται από το λουτρό μέσα σε χρόνο t = 10 sec, αν ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του χαλκού είναι $K = 0{,}9\ cal\cdot grad^{-1}\cdot cm^{-1}\cdot sec^{-1}$;

31. Η εκπεμπόμενη ισχύς μιας θερμάστρας που έχει απόλυτη θερμοκρασία T_1 είναι N_1. Πόση θα είναι η εκπεμπόμενη ισχύς N_2 της θερμάστρας όταν η απόλυτη θερμοκρασία της διπλασιασθεί, δηλαδή όταν η απόλυτη θερμοκρασία της T_2 είναι $T_2 = 2\cdot T_1$;

32. Πόσο έργο παράγει ένα αέριο, όταν ο όγκος του αυξηθεί από 5 σε 32 λίτρα, υπό σταθερή πίεση 2 ατμοσφαιρών;

33. Ο ατμός μέσα στο λέβητα μιας ατμομηχανής έχει θερμοκρασία $T_1 = 567{,}6$ K και ο συμπυκνωτής της έχει θερμοκρασία $T_2 = 351{,}6$ K. Ποιος είναι ο θερμοδυναμικός συντελεστής n_o της ατμομηχανής;

34. Σε μία ατμομηχανή προσφέρεται θερμότητα $Q = 5\cdot 10^4$ cal σε κάθε δευτερόλεπτο. Υποθέτομε ότι όλη η θερμότητα που προσφέρεται στην ατμομηχανή μετατρέπεται από αυτή σε μηχανική ενέργεια. Πόση μηχανική ενέργεια A θα δίνει σε κάθε δευτερόλεπτο η ατμομηχανή, αν το μηχανικό ισοδύναμο της θερμίδας είναι $j = 4{,}2$ Joule/cal;

35. Θεωρούμε δύο καταστάσεις A, B ενός ιδανικού αερίου που στο διάγραμμα P–V βρίσκονται πάνω στην ίδια ισόθερμη και $V_A < V_B$. Υποθέτομε ότι μεταβαίνομε από την κατάσταση A στη B με μεταβολή που πραγματοποιείται: 1) Με μία ισοβαρή εκτόνωση και στη συνέχεια με μία ισόχωρη ψύξη, οπότε παράγεται έργο W_1. 2) Με μία ισόχωρη ψύξη και στη συνέχεια με μία ισοβαρή εκτόνωση, οπότε παράγεται έργο W_2. Να αποδείξετε ότι $W_1 > W_2$.

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΦΩΤΟΣ – ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

8.1 Φύση του ορατού φωτός.

Όταν λέμε φως, γενικά, εννοούμε ακτινοβολία οποιασδήποτε συχνότητας, δηλαδή ενέργεια, που διαδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Το μάτι μας (ο αμφιβληστροειδής χιτώνας) είναι ευαίσθητο στις ακτινοβολίες των οποίων τα μήκη κύματος περιλαμβάνονται μεταξύ $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ m και $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m.

Από αυτό προκύπτει ότι:

Το ορατό φως είναι ενέργεια που διαδίδεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα των οποίων τα μήκη κύματος περιλαμβάνονται περίπου μεταξύ $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ m και $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m.

Δηλαδή το ορατό φως είναι μία μορφή ενέργειας, την οποία συνήθως την ονομάζομε φωτεινή ενέργεια ή ορατή ακτινοβολία ή και φωτεινή ακτινοβολία.

Η αίσθηση του χρώματος του φωτός εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (του φωτός) που το προκαλεί. Συγκεκριμένα, κάθε ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος αντιστοιχεί σε φως ορισμένου χρώματος.

Για παράδειγμα ακτινοβολία με μήκος κύματος $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m αντιστοιχεί στο ερυθρό χρώμα, με μήκος κύματος $0{,}6 \cdot 10^{-6}$ m αντιστοιχεί στο κίτρινο, με μήκος κύματος $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ m στο ιώδες κλπ.

Προσοχή:

Η ακτινοβολία που αποτελείται από όλες τις ακτινοβολίες που τα μήκη κύματός τους περιλαμβάνονται μεταξύ $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ m και $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m αντιστοιχεί στο λευκό φως.

8.1.1 Προέλευση του ορατού φωτός («παραγωγή» φωτός).

Το ορατό φως είναι μία μορφή ενέργειας, επομένως προέρχεται από μετατροπή άλλων μορφών ενέργειας.

Τα μόρια των σωμάτων, όπως ξέρομε, αποτελούνται από ένα ή περισσότερα άτομα. Κάθε άτομο αποτελείται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια τα οποία περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα σε "καθορισμένες" τροχιές. Κάθε ηλεκτρόνιο έχει σε κάθε τροχιά του μία ορισμένη ενέργεια, η οποία είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η μέση απόστασή του από τον πυρήνα του ατόμου.

Όταν ένα άτομο παίρνει ενέργεια (π.χ. κατά τη σύγκρουσή του με ένα σωματίδιο μεγάλης ταχύτητας) είναι δυνατό ένα ηλεκτρόνιό του από τροχιά μικρότερης ενέργειας να μεταπηδήσει σε άλλη μεγαλύτερης ενέργειας. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διέγερση του ατόμου. Το άτομο δεν μένει για πολύ χρόνο στην κατάσταση διεγέρσεως. Μετά από λίγο το ηλεκτρόνιο επανέρχεται στην αρχική του τροχιά και εκπέμπει την ενέργεια που είχε πάρει υπό μορφή ακτινοβολίας.

Σημείωση:

Για καλύτερη κατανόηση της προελεύσεως του ορατού φωτός αναφέρομε και τα εξής:

Όταν η θερμοκρασία ενός σώματος είναι αρκετά υψηλή τα μόριά του κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και συγκρούονται «βίαια» μεταξύ τους. Από τις συγκρούσεις αυτές τα ηλεκτρόνια των ατόμων του σώματος παίρνουν ενέργεια και μεταπηδούν σε τροχιές μεγαλύτερης ενέργειας. Στις τροχιές αυτές παραμένουν ελάχιστο χρόνο και επιστρέφουν στις «φυσικές» τροχιές τους. Κατά την επιστροφή τους αυτή εκπέμπουν φως. Έτσι ένα μέρος της εσωτερικής ενέργειας του σώματος μετατρέπεται σε φωτεινή ενέργεια.

8.2 Ταχύτητα του φωτός.

Η ταχύτητα διαδόσεως μιας ακτινοβολούμενης ενέργειας (ακτινοβολίας) είναι ίση με την ταχύτητα διαδόσεως του ηλεκτρομαγνητικού κύματος με το οποίο διαδίδεται αυτή. Όλες οι ακτινοβολίες στο κενό διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα: $c_o = 3 \cdot 10^8$ m/s. Δεν μπορεί κανένα σωματίδιο ή σήμα να έχει ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα αυτή. Δηλαδή η ταχύτητα: $c_o = 3 \cdot 10^8$ m/s είναι η μέγιστη δυνατή ταχύτητα σωματιδίων ή σημάτων.

Για κάθε ακτινοβολία, επομένως και για την ορατή, ισχύει η γενική κυματική σχέση:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

όπου: ν η συχνότητα της ακτινοβολίας, η οποία είναι η ίδια είτε η ακτινοβολία διαδίδεται στο κενό είτε σε οποιοδήποτε υλικό (μέσο),
c η ταχύτητα διαδόσεως της ακτινοβολίας σε ένα συγκεκριμένο μέσο και
λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας σε αυτό το μέσο.

Σημείωση:

Η συχνότητα μιας ακτινοβολίας είναι η ίδια σε οποιοδήποτε υλικό και αν διαδίδεται: ν = σταθ. Η ταχύτητα διαδόσεως της ακτινοβολίας είναι διαφορετική σε διαφορετικά υλικά. Επομένως όπως και από τη σχέση $c = \lambda \cdot \nu$ προκύπτει, το μήκος κύματος μιας ακτινοβολίας είναι διαφορετικό όταν αυτή διαδίδεται σε διαφορετικά υλικά. Η ταχύτητα διαδόσεως του φωτός στο κενό είναι $3 \cdot 10^8$ m/s.

8.3 Αυτόφωτα και ετερόφωτα σώματα.

Τα σώματα τα οποία εκπέμπουν φως τα ονομάζομε φωτεινές πηγές. Οι φωτεινές πηγές μπορεί να είναι αυτόφωτα ή ετερόφωτα σώματα.

Αυτόφωτα σώματα ονομάζονται τα σώματα που παράγουν (εκπέμπουν) δικό τους φως, όπως π.χ. ο ήλιος, οι λάμπες φωτισμού κλπ.

Ετερόφωτα σώματα ονομάζονται τα σώματα που δεν παράγουν (εκπέμπουν) δικό τους φως, αλλά εκπέμπουν το φως που δέχονται από άλλα σώματα, π.χ. η σελήνη, μια λευκή επιφάνεια κλπ.

Σημείωση:

Ένα σώμα είναι ορατό, όταν στέλνει φως στο μάτι μας.

Τα αυτόφωτα σώματα μπορούμε πάντα να τα βλέπομε, ενώ τα ετερόφωτα τα βλέπομε μόνο όταν εκπέμπουν το φως που δέχονται από άλλα σώματα (στο σκοτάδι ένα ετερόφωτο σώμα δεν είναι ορατό).

Προσοχή:

Ένα φωτεινό αντικείμενο (μία φωτεινή πηγή) θα το θεωρούμε σαν φωτεινό σημείο όταν οι διαστάσεις του, σε σχέση με τις διαστάσεις των άλλων αντικειμένων του περιβάλλοντός του, είναι πολύ μικρές.

8.4 Διαφανή, αδιαφανή και ημιδιαφανή σώματα.

Το φως όταν διέρχεται μέσα από διάφορα υλικά παθαίνει μερική ή ολική απορρόφηση. Η απορρόφηση αυτή εξαρτάται από τη φύση των υλικών, το πάχος τους κ.ά.

Διαφανή σώματα ονομάζομε εκείνα τα σώματα που αφήνουν το φως να περάσει μέσα από τη μάζα τους και επιπλέον επιτρέπουν να διακρίνομε καθαρά τα διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται πίσω από αυτά (γυαλί, αέρας, νερό σε μικρό πάχος).

Αδιαφανή σώματα ονομάζομε εκείνα τα σώματα που δεν αφήνουν το φως να περάσει μέσα από τη μάζα τους (πλάκα από μέταλλο, ξύλο κλπ.).

Ημιδιαφανή (διαφώτιστα) σώματα ονομάζομε εκείνα τα σώματα που αφήνουν το φως να περάσει μέσα από τη μάζα τους, δεν επιτρέπουν όμως να διακρίνομε καθαρά τα διάφορα αντικείμενα που βρίσκονται πίσω από αυτά (γαλακτόχρουν γυαλί, λαδόχαρτο κλπ.).

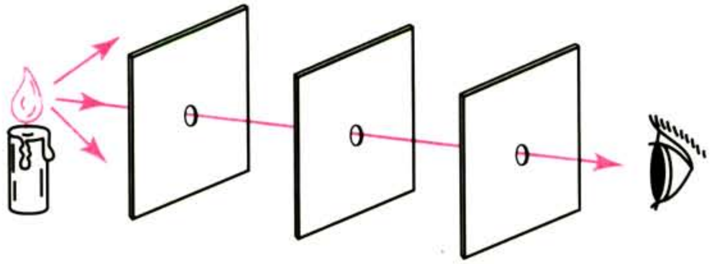
Σημείωση:

Σημειώνομε ότι η διάκριση των σωμάτων σε διαφανή, αδιαφανή και ημιδιαφανή δεν είναι απόλυτη, γιατί π.χ. το νερό, όταν σχηματίζει παχύ στρώμα, είναι αδιαφανές, ενώ αντίθετα ένα πολύ λεπτό φύλλο χρυσού είναι ημιδιαφανές.

8.5 Νόμος της ευθύγραμμης διαδόσεως του φωτός.

Ο νόμος της ευθύγραμμης διαδόσεως του φωτός ορίζει τα εξής: ***Μέσα σε ομογενές και ισότροπο μέσο το φως διαδίδεται ευθύγραμμα***.

Με ευκολία μπορούμε να δείξομε αυτό το νόμο με τη διάταξη του σχήματος 8.5.

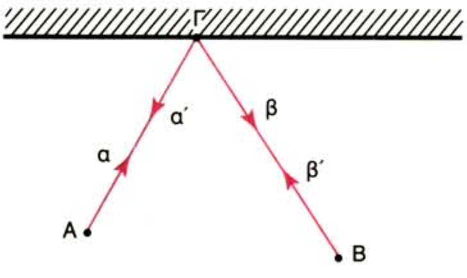


Σχ. 8.5.

8.6 Αρχή της αντίστροφης πορείας του φωτός.

Η αρχή της αντίστροφης πορείας του φωτός εκφράζει τα εξής:

«Το φως όταν διαδίδεται, ακολουθεί μία ορισμένη πορεία για να πάει



Σχ. 8.6.

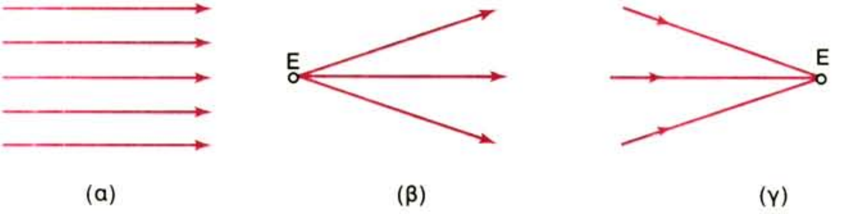
από μία θέση Α σε μία άλλη Β, π.χ. την πορεία ΑαΓβΒ (σχ. 8.6). Για να πάει από το Β στο Α ακολουθεί την εντελώς αντίστροφη πορεία, δηλαδή την Ββ΄Γα΄Α».

8.7 Φωτεινή ακτίνα και φωτεινές δέσμες.

Φωτεινή ακτίνα λέμε την ευθεία τροχιά που ακολουθεί το φως κατά τη διάδοσή του.

Φωτεινή δέσμη λέμε ένα σύνολο από φωτεινές ακτίνες, οι οποίες εκκινούν από την ίδια φωτεινή πηγή.

Τη φωτεινή δέσμη τη λέμε: α) Παράλληλη [σχ. 8.7 (α)], όταν οι ακτίνες που την αποτελούν είναι παράλληλες. β) Αποκλίνουσα [σχ. 8.7 (β)], όταν οι ακτίνες της προέρχονται από ένα σημείο και γ) συγκλίνουσα [σχ. 8.7 (γ)] όταν οι ακτίνες που την αποτελούν κατευθύνονται προς ένα σημείο.



Σχ. 8.7.

Προσοχή:

Δεν πρέπει να μας διαφεύγει ότι: Κατά μήκος μιας φωτεινής ακτίνας γίνεται διάδοση ενέργειας υπό μορφή φωτός.

8.8 Αποτελέσματα της ευθύγραμμης διαδόσεως του φωτός.

α) Σκοτεινός θάλαμος.

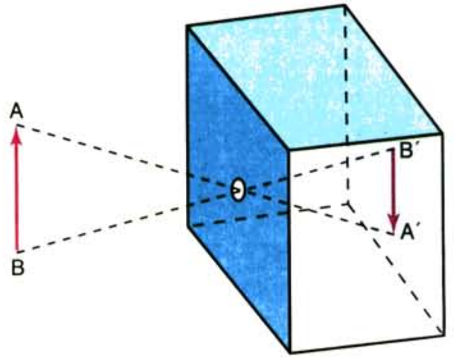
Είναι ένας θάλαμος με σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου που έχει αδιαφανή τοιχώματα (σχ. 8.8α). Στο ένα τοίχωμα του θαλάμου υπάρχει μικρή οπή και στο απέναντι τοίχωμα της οπής μια ημιδιαφανής πλάκα. Αν μπροστά από την οπή τοποθετήσομε μία φωτεινή πηγή που έχει τη μορφή βέλους, στο απέναντι τοίχωμα φαίνεται το φωτεινό βέλος αντεστραμμένο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της ευθύγραμμης διαδόσεως του φωτός.

Σημείωση:

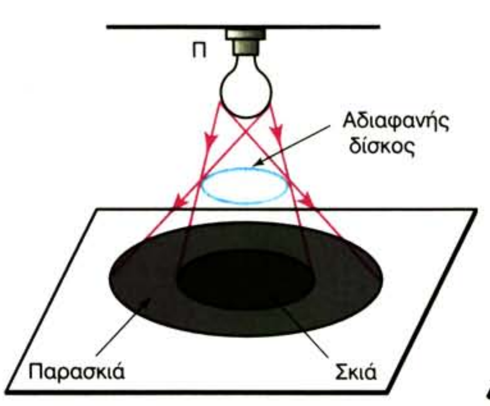
Μπορεί στη θέση της ημιδιαφανούς πλάκας να τοποθετηθεί φωτογραφική πλάκα οπότε θα αποτυπωθεί το βέλος.

β) Σκιά - παρασκιά.

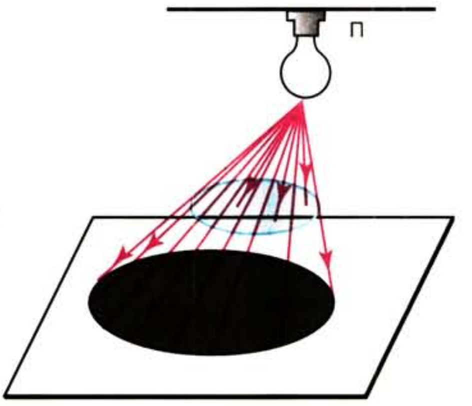
΄Ενα από τα αποτελέσματα της ευθύγραμμης διαδόσεως του φωτός είναι η σκιά και η παρασκιά, που δημιουργούνται πίσω από αδιαφανή αντικείμενα (σχ. 8.8β). Στη σκιά δεν φτάνουν ακτίνες από τη φωτεινή πηγή, ενώ στην παρασκιά φτάνουν ακτίνες από ένα μέρος της πηγής. Αν η πηγή είναι σημειακή, κάτι που στην πράξη δεν συμβαίνει ποτέ, σχηματίζεται μόνο η σκιά (σχ. 8.8γ).



Σχ. 8.8α.



Σχ. 8.8β.



Σχ. 8.8γ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

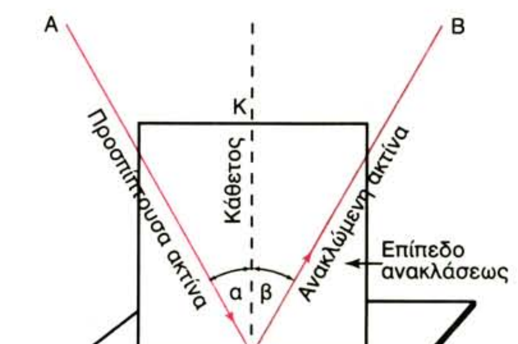
ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ – ΚΑΤΟΠΤΡΑ

9.1 Κανονική ανάκλαση του φωτός (ή απλά ανάκλαση του φωτός).

Κάθε σώμα περιβάλλεται από μία επιφάνεια που το διαχωρίζει από τον αέρα ή από ένα οποιοδήποτε άλλο μέσο που το περιβάλλει. Επομένως η επιφάνεια ενός σώματος αποτελεί τη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Όταν το φως προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων μπορεί να πάθει ανάκλαση.

Ανάκλαση του φωτός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο, όταν το φως συναντάει μία διαχωριστική επιφάνεια αλλάζει πορεία και μετά την πρόσπτωση ακολουθεί ορισμένη κατεύθυνση (πορεία), χωρίς όμως να αλλάζει μέσο διαδόσεως.

Έστω μία διαχωριστική επιφάνεια Ε, επίπεδη, λεία και στιλπνή (ανακλαστική επιφάνεια) (σχ. 9.1α). Επίσης έστω ότι η φωτεινή ακτίνα ΑΟ



Σχ. 9.1α.

προσπίπτει (προσπίπτουσα ακτίνα) στην ανακλαστική επιφάνεια Ε. Μετά την πρόσπτωση στην επιφάνεια, η ακτίνα ΑΟ θα ανακλαστεί και θα ακολουθήσει τη διεύθυνση ΟΒ (ανακλώμενη ακτίνα).

Η γωνία (α) που ορίζεται από την προσπίπτουσα ακτίνα ΑΟ και την κάθετη ΟΚ στο επίπεδο της ανακλαστικής επιφάνειας, ονομάζεται γωνία προσπτώσεως.

Η γωνία (β) που σχηματίζεται από την ανακλώμενη ακτίνα ΟΒ και την κάθετη ΟΚ στην ανακλαστική επιφάνεια Ε, ονομάζεται γωνία ανακλάσεως.

Το επίπεδο που ορίζει η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα ονομάζεται επίπεδο ανακλάσεως.

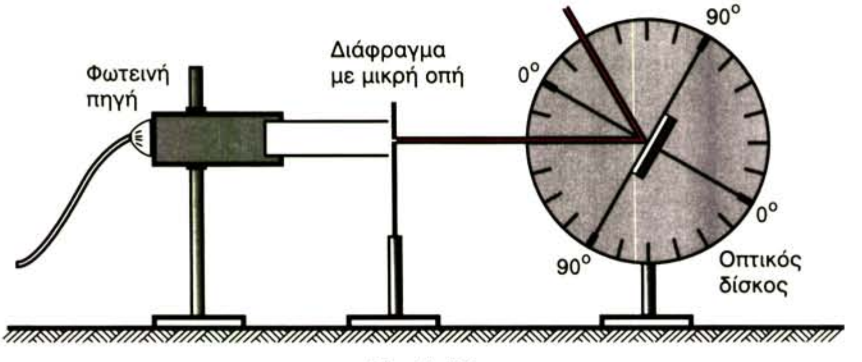
Το φαινόμενο της ανακλάσεως διέπεται από τους παρακάτω νόμους:

1) Η γωνία ανακλάσεως (β) είναι ίση με τη γωνία προσπτώσεως (α). Δηλαδή:

$$\beta = \alpha$$

2) Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη και η ευθεία που είναι κάθετη στην ανακλαστική επιφάνεια στο σημείο προσπτώσεως βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο που είναι κάθετο στην ανακλαστική επιφάνεια.

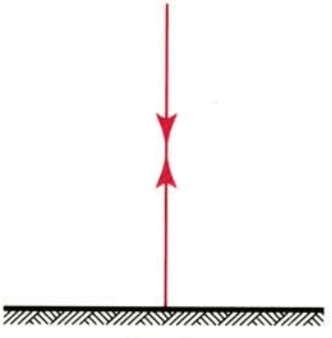
Πειραματική επαλήθευση των νόμων της ανακλάσεως γίνεται με τη συσκευή του σχήματος 9.1β.



Σχ. 9.1β.

Προσοχή:

Όταν μία φωτεινή ακτίνα προσπίπτει κάθετα σε μία ανακλαστική επιφάνεια η γωνία προσπτώσεώς της θα είναι μηδέν. Επομένως μηδέν θα είναι και η γωνία ανακλάσεώς της, οπότε η ανακλώμενη ακτίνα θα έχει την ίδια διεύθυνση και αντίθετη φορά με την προσπίπτουσα (σχ. 9.1γ).



Σχ. 9.1γ.

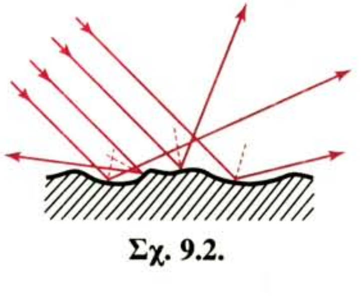
9.2 Διάχυση (ή διάχυτη ανάκλαση).

Όταν μία δέσμη παραλλήλων ακτίνων προσπίπτει σε μία ανακλαστική επιφάνεια που είναι τραχεία και ανώμαλη τότε οι ακτίνες της δέσμης μετά την ανάκλασή τους δεν είναι παράλληλες.

Γενικά, αν η ανακλαστική επιφάνεια είναι τραχεία και ανώμαλη οι ανακλώμενες ακτίνες έχουν τυχαίες διευθύνσεις, σε σχέση προς τη διεύθυνση της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης (σχ. 9.2).

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάχυτη ανάκλαση ή απλά διάχυση.

Η διάχυτη ανάκλαση οφείλεται σε κανονικές ανακλάσεις οι οποίες γίνονται στα στοιχειώδη (πολύ μικρά) επίπεδα της διαχέουσας επιφάνειας τα οποία έχουν ποικίλους προσανατολισμούς.



Σχ. 9.2.

Προσοχή:

1) Στη διάχυτη ανάκλαση ισχύουν οι νόμοι της ανακλάσεως για κάθε ακτίνα χωριστά, όπως φαίνεται στο σχήμα 9.2, αλλά επειδή η επιφάνεια δεν είναι λεία μετά την ανάκλαση η κάθε ακτίνα της δέσμης ακολουθεί τη δική της πορεία.

2) Αποτέλεσμα της διαχύσεως του φωτός είναι το γεγονός ότι βλέπομε τα φωτιζόμενα αντικείμενα. Το κανονικό ανακλώμενο φως σε μια επιφά-

νεια (κάτοπτρα) σχηματίζει το είδωλο του αντικειμένου που εκπέμπει το φώς και όχι του αντικειμένου που το ανακλά.

Εξαιτίας της διαχύσεως που παθαίνει το φως όταν πέσει σε ένα σώμα, σχηματίζεται το είδωλο του σώματος στο μάτι μας.

9.3 Επίπεδα κάτοπτρα.

9.3.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Κάθε επιφάνεια στην οποία όταν προσπίπτει το φως ανακλάται ονομάζεται κάτοπτρο.

Μία επίπεδη επιφάνεια στην οποία όταν προσπίπτει το φως ανακλάται ονομάζεται επίπεδο κάτοπτρο.

Συνήθως τα κάτοπτρα είναι γυάλινες επιφάνειες, οι οποίες από τη μία όψη έχουν επαργυρωθεί ώστε να είναι αδιαφανή και η άλλη τους όψη αποτελεί την ανακλαστική επιφάνεια του κατόπτρου.

2) Το είδωλο φωτεινού σημείου σαν αποτέλεσμα ανακλάσεως ή διαθλάσεως του φωτός είναι φωτεινή αναπαράσταση του φωτεινού σημείου.

3) Συνήθως ένα φωτεινό αντικείμενο το θεωρούμε ως σύνολο φωτεινών σημείων. Επομένως αν φωτεινό αντικείμενο βρεθεί μπροστά σε επίπεδο κάτοπτρο, αυτό θα σχηματίσει τα είδωλα των σημείων του.

4) Αν ακτίνες που εκπέμπονται από μία σημειακή φωτεινή πηγή μετά την ανάκλασή τους πάνω σε ένα κάτοπτρο συγκλίνουν σε ένα (πραγματικό) σημείο τότε στο σημείο αυτό σχηματίζεται το είδωλο (η εικόνα) της, το οποίο είναι πραγματικό και μπορεί να αφήσει την εικόνα του σε φωτογραφική πλάκα που τοποθετείται στη θέση του ειδώλου.

Τονίζομε ότι τα πραγματικά είδωλα σχηματίζονται από «πραγματικές» φωτεινές ακτίνες, δηλαδή από ανακλώμενες και διαθλώμενες ακτίνες που συναντιώνται (συγκλίνουν) σε κάποιο πραγματικό σημείο.

5) Εφόσον οι ακτίνες που εκπέμπονται από μία σημειακή φωτεινή πηγή μετά την ανάκλασή τους επάνω σε ένα κάτοπτρο δεν συγκλίνουν, αλλά όμως συγκλίνουν οι προεκτάσεις τους σε ένα σημείο, τότε στο σημείο αυτό σχηματίζεται (βλέπομε) το είδωλο (την εικόνα) της, το οποίο είναι φανταστικό.

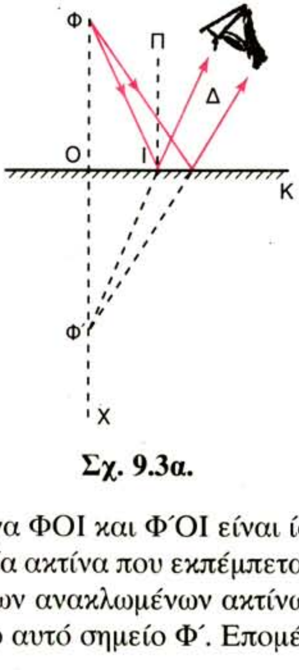
Τονίζομε ότι τα φανταστικά είδωλα δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα, αλλά σχηματίζονται από τις γεωμετρικές προεκτάσεις ανακλωμένων ή διαθλωμένων ακτίνων.

Είναι φανερό ότι τα φανταστικά είδωλα δεν μπορούν να αφήσουν την εικόνα τους σε φωτογραφική πλάκα που τοποθετείται στη θέση που «σχηματίζονται».

9.3.2 Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού σημείου από επίπεδο κάτοπτρο.

Έστω φωτεινό σημείο Φ μπροστά σε ένα κάτοπτρο Κ (σχ. 9.3α). Από τις ακτίνες οι οποίες προσπίπτουν στο Κ θεωρούμε μια τυχαία, π.χ. την ΦΙ. Αυτή θα ανακλασθεί κατά την ΙΔ και θα είναι ΦΙΠ = ΠΙΔ, αν ΙΠ είναι η κάθετη στο επίπεδο (Κ) στο Ι.

Κατά το 2ο νόμο της ανακλάσεως η ΙΔ κείται (βρίσκεται) στο επίπεδο ΦΙΠ, επομένως αν προεκταθεί θα συναντήσει, την από το Φ κάθετη στο κάτοπτρο, δηλαδή την ΦΧ, η οποία βρίσκεται στο επίπεδο ΦΙΠ, σε ένα σημείο Φ΄. Το σημείο Φ΄ είναι συμμετρικό του Φ ως προς το Κ (Φ΄Ο = ΦΟ),



Σχ. 9.3α.

γιατί τα ορθογώνια τρίγωνα ΦΟΙ και Φ΄ΟΙ είναι ίσα.

Επειδή η ΦΙ είναι τυχαία ακτίνα που εκπέμπεται από το φωτεινό σημείο Φ, οι προεκτάσεις όλων των ανακλωμένων ακτίνων που εκπέμπονται από το Φ θα διέρχονται από το αυτό σημείο Φ΄. Επομένως το Φ΄ είναι το είδωλο του Φ.

Αν ο οφθαλμός παρατηρητή τεθεί στην πορεία των ανακλωμένων ακτίνων (σχ. 9.3α), νομίζει ότι το φως προέρχεται από το σημείο Φ΄ (το οποίο είναι το είδωλο του Φ).

Προσοχή:

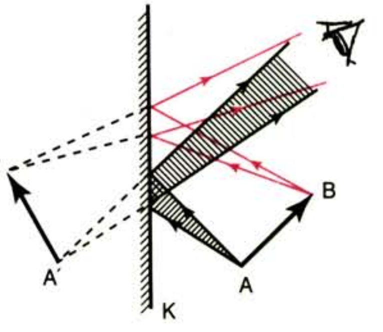
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι:

1) Για να βρούμε τη θέση του ειδώλου φωτεινού σημείου που σχηματίζεται από επίπεδο κάτοπτρο αρκεί να βρούμε το σημείο στο οποίο τέμνονται οι προεκτάσεις δύο ακτίνων που εκπέμπονται από το φωτεινό σημείο μετά την ανάκλασή τους στο επίπεδο κάτοπτρο.

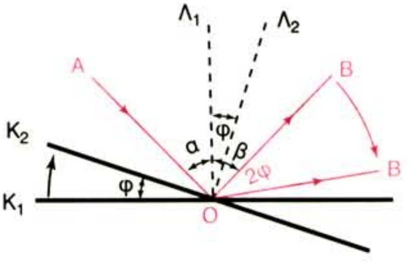
2) Το είδωλο ενός φωτεινού σημείου που σχηματίζεται από ένα επίπεδο κάτοπτρο, βρίσκεται όπισθεν του κατόπτρου, σε θέση συμμετρική ως προς το κάτοπτρο και είναι ***φανταστικό***.

9.3.3 Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού αντικειμένου από επίπεδο κάτοπτρο.

Θεωρούμε ένα φωτεινό αντικείμενο ως σύνολο φωτεινών σημείων. Επομένως αν φωτεινό αντικείμενο βρεθεί μπροστά σε επίπεδο κάτοπτρο, θα σχηματίσει τα είδωλα των σημείων του, σε συμμετρικές ως προς το κάτοπτρο θέσεις. Το σύνολο των ειδώλων αυτών είναι το είδωλο του αντικειμένου (σχ. 9.3β).



Σχ. 9.3β.



Σχ. 9.3γ.

Άρα το είδωλο Α΄Β΄ φωτεινού αντικειμένου ΑΒ σχηματίζεται όπισθεν του κατόπτρου, είναι συμμετρικό του αντικειμένου ως προς το κάτοπτρο, το μέγεθός του είναι ίσο με το μέγεθος του αντικειμένου και είναι φανταστικό.

Το αντικείμενο και το είδωλό του γενικά δεν είναι εφαρμόσιμα. Αν υψώσομε το δεξί μας χέρι μπροστά σε επίπεδο κάτοπτρο το είδωλό μας υψώνει το αριστερό.

9.3.4 Στροφή επιπέδου κατόπτρου.

Η φωτεινή ακτίνα ΑΟ (σχ. 9.3γ) πέφτει πάνω στο επίπεδο κάτοπτρο και δίνει ανακλώμενη την ακτίνα ΟΒ. Τότε η γωνία ΑΟΒ είναι ίση με 2α (γιατί α=β). Θεωρούμε έναν άξονα που είναι κάθετος στο επίπεδο προσπτώσεως στο σημείο Ο. Διατηρώντας σταθερή την προσπίπτουσα ακτίνα ΑΟ στρέφομε το κάτοπτρο κατά γωνία φ γύρω από τον άξονα που πήραμε. Τότε η ανακλώμενη ακτίνα στρέφεται κατά τη γωνία ΒΟΒ΄ που είναι: ΒΟΒ΄ = ΑΟΒ΄ – ΑΟΒ ή ΒΟΒ΄ = 2 (α+φ) – 2α και ΒΟΒ΄ = 2φ.

Ώστε, όταν το επίπεδο κάτοπτρο στρέφεται κατά γωνία φ, η ανακλώμενη ακτίνα στρέφεται κατά διπλάσια γωνία (2φ). Αυτή την ιδιότητα του επιπέδου κατόπτρου την εφαρμόζομε, για να μετράμε πολύ μικρές γωνίες.

9.3.5 *Μέτρηση πολύ μικρής γωνίας.*

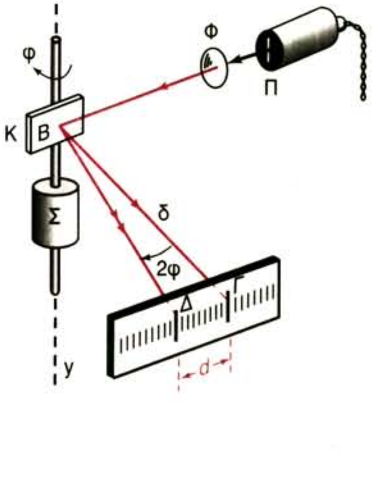
Πολλές φορές είναι απαραίτητο να μετρήσομε μία πολύ μικρή γωνία, π.χ. τη γωνία στρέψεως ενός σύρματος σε ένα ζυγό στρέψεως. Τότε συνήθως εφαρμόζομε την εξής μέθοδο: Το κινητό σύστημα Σ (σχ. 9.3δ) στρέφεται γύρω από τον άξονα χy.

Πάνω στο κινητό σύστημα εφαρμόζεται ένα μικρό επίπεδο κάτοπτρο Κ και εμπρός από αυτό σε απόσταση δ = ΒΓ τοποθετείται ένας κανόνας βαθμολογημένος. Πάνω στο κάτοπτρο πέφτει μία λεπτή δέσμη φωτεινών ακτίνων που προέρχεται από μία πολύ φωτεινή σχισμή (Π). Η ανακλώμενη δέσμη σχηματίζει πάνω στον κανόνα το πραγματικό είδωλο (Γ) της φωτεινής σχισμής. Η ακτίνα ΒΓ είναι ***κάθετη*** στον κανόνα. Όταν το κινητό σύστημα στραφεί κατά μία πολύ μικρή γωνία φ, η ανακλώμενη ακτίνα στρέφεται κατά γωνία 2φ και το είδωλο της φωτεινής σχισμής σχηματίζεται τώρα στη θέση Δ πάνω στον κανόνα. Από το σχηματιζόμενο ορθογώνιο τρίγωνο έχομε τότε τη σχέση:

$$\varepsilon\varphi(2\varphi)=\frac{\Gamma\Delta}{\mathrm{B}\Gamma}=\frac{d}{\delta} \qquad (1)$$

Η σχέση (1), κατά προσέγγιση, γράφεται:

$$\varphi=\frac{d}{2\cdot\delta}\,\mathrm{rad}$$



Σχ. 9.3δ.

γιατί η γωνία 2φ είναι πολύ μικρή και αντί για την εφαπτομένη της παίρνομε τη γωνία μετρημένη σε ακτίνια. Έτσι, αν π.χ. είναι: d = 4 mm και δ = 1 m, τότε το σύστημα στράφηκε κατά γωνία $\varphi = \frac{4}{2000}\,\mathrm{rad} = 0{,}002\,\mathrm{rad}$ ή $\varphi \cong 7'$.

9.3.6 Οπτικό πεδίο επιπέδου κατόπτρου.

Όταν το μάτι μας βρίσκεται σε ορισμένη θέση ως προς ένα κάτοπτρο, ονομάζομε οπτικό πεδίο του κατόπτρου αυτού και για τη θέση αυτή του ματιού μας την περιοχή του χώρου που μπορεί από ανάκλαση να βλέπει το μάτι μας με το κάτοπτρο.

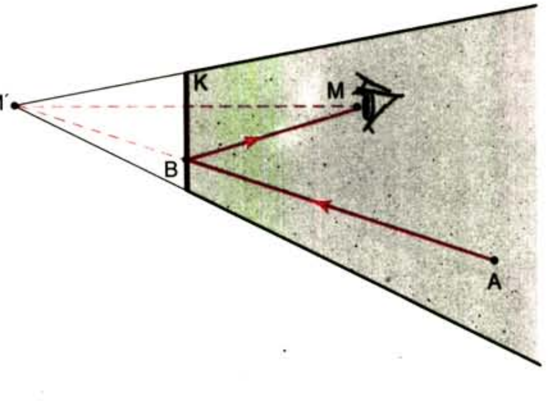
Ας θεωρήσομε ένα φωτεινό σημείο Α (σχ. 9.3ε) και μία ακτίνα που πέφτει επάνω στο κάτοπτρο. Η ανακλώμενη ακτίνα ΒΜ φθάνει στο μάτι μας και έτσι βλέπομε το σημείο Α.

Αν υποθέσομε ότι το φως ακολουθούσε την αντίστροφη πορεία, τότε η ΜΒ θα ήταν προσπίπτουσα και η ΒΑ θα ήταν ανακλώμενη και θα φαινόταν ότι προέρχεται από το σημείο Μ΄ που είναι το είδωλο του ματιού.

Ώστε η προέκταση της αρχικής προσπίπτουσας ακτίνας ΑΒ περνάει από το σημείο Μ΄.

Κάθε λοιπόν ανακλώμενη ακτίνα, που φθάνει στο μάτι μας, αντιστοιχεί σε μία προσπίπτουσα ακτίνα, η οποία συναντά το κάτοπτρο και η προέκτασή της περνάει από το είδωλο Μ΄ του ματιού.

Αυτές όμως οι προσπίπτουσες ακτίνες μπορούν να προέρχονται μόνο από φωτεινά σημεία που βρίσκονται μέσα στην περιοχή, η οποία έχει όρια την επιφάνεια του κατόπτρου και την επιφάνεια που διαγράφει μία ευθεία, η οποία έχει αρχή το σημείο Μ΄ και κινούμενη εφάπτεται πάντοτε στην περιφέρεια του κατόπτρου (το γραμμοσκιασμένο τμήμα στο σχήμα 9.3ε). Κά-



Σχ. 9.3ε.

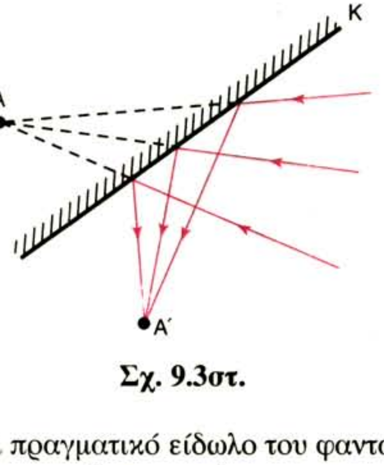
θε άλλο φωτεινό σημείο, του χώρου, που βρίσκεται έξω από αυτή την περιοχή, δεν το βλέπει το μάτι μας.

Προσοχή:

Είναι φανερό ότι το οπτικό πεδίο ενός επιπέδου κατόπτρου εξαρτάται από το σχήμα και τις διαστάσεις του κατόπτρου καθώς και από τη θέση του ματιού σχετικά με το κάτοπτρο. Όταν το μάτι πλησιάζει προς το κάτοπτρο, το οπτικό πεδίο γίνεται μεγαλύτερο. Δηλαδή το οπτικό πεδίο του επιπέδου κατόπτρου είναι μία περιοχή του χώρου, η οποία προσδιορίζεται από το σχήμα του κατόπτρου, τις διαστάσεις του και τη θέση του ματιού σχετικά με το κάτοπτρο.

9.3.7 Σημεία φανταστικά (ή κατ' έμφαση).

Έστω φωτεινή δέσμη συγκλίνουσα στο σημείο Α (σχ. 9.3στ). Αν στην πορεία της παρεντεθεί το επίπεδο κάτοπτρο Κ, ανακλώμενη πάνω σε αυτό θα συγκλίνει στο σημείο Α΄, το οποίο είναι συμμετρικό του Α ως προς το Κ.



Σχ. 9.3στ.

Λέμε ότι το Α΄ είναι πραγματικό είδωλο του φανταστικού φωτεινού σημείου Α γιατί το Α είναι σημείο συναντήσεως των προεκτάσεων φωτεινών ακτίνων. Κατά παρόμοιο τρόπο θα μιλάμε για φανταστικά αντικείμενα, όταν πρόκειται περί συνόλου φανταστικών σημείων.

9.4 Σφαιρικά κάτοπτρα.

9.4.1 Ορισμοί.

Σφαιρικό κάτοπτρο ονομάζεται το κάτοπτρο που η ανακλαστική του επιφάνεια είναι τμήμα επιφάνειας σφαίρας. Το κάτοπτρο είναι κοίλο (σχ. 9.4α και 9.4γ) ή κυρτό (σχ. 9.4β και 9.4δ) αν η ανακλαστική του επιφάνεια είναι το εσωτερικό ή το εξωτερικό της σφαιρικής επιφάνειας, αντίστοιχα.

Κέντρο καμπυλότητας του κατόπτρου (σχ. 9.4α) ονομάζεται το κέντρο Κ της σφαίρας της οποίας το κάτοπτρο είναι μέρος. Κορυφή του κατόπτρου το σημείο Ο το οποίο είναι στη μέση του κατόπτρου.

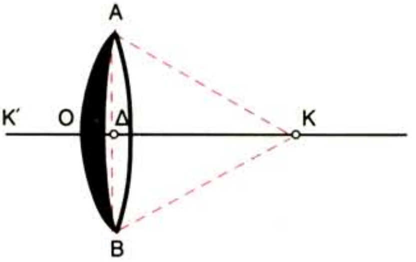
Κύριος άξονας ή οπτικός άξονας ή απλώς άξονας του κατόπτρου λέγεται η ευθεία ΚΟ η οποία ενώνει το κέντρο του με την κορυφή του.

Βοηθητικός άξονας (ή δευτερεύοντας άξονας) του κατόπτρου λέγεται κάθε ευθεία που περνάει από το Κ, όπως οι ΚΑ, ΚΒ, και τέμνει το κάτοπτρο.

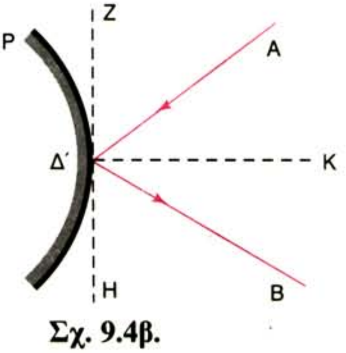
Γωνιακό άνοιγμα του κατόπτρου είναι η γωνία ΑΚΒ ή το τόξο ΑΟΒ. Γραμμικό άνοιγμα λέγεται η χορδή ΑΒ.

Προσοχή:

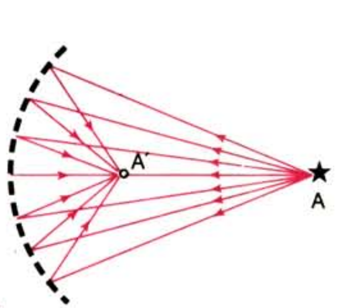
Η ανάκλαση ακτίνας ΑΔ΄ (σχ. 9.4β) η οποία προσπίπτει σε σημείο Δ΄ κα-



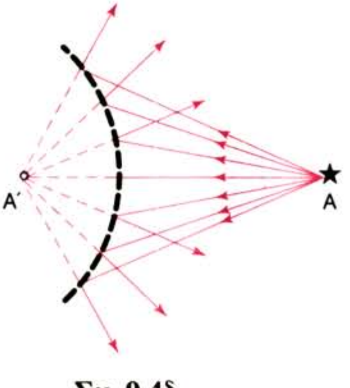
Σχ. 9.4α.



Σχ. 9.4β.



Σχ. 9.4γ.



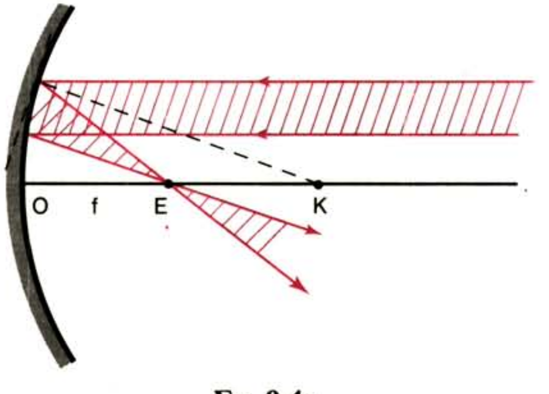
Σχ. 9.4δ.

μπύλης επιφάνειας Ρ γίνεται όπως θα γινόταν αν έπεφτε σε επίπεδο ΖΗ το οποίο θα ήτανε εφαπτόμενο της καμπύλης επιφάνειας Ρ στο σημείο Δ΄ της προσπτώσεως της ακτίνας. Επομένως, τα σφαιρικά κάτοπτρα μπορούν να θεωρηθούν ότι αποτελούνται από μεγάλο αριθμό πολύ μικρών επιπέδων επιφανειών, οι οποίες δρουν σαν μικρά επίπεδα κάτοπτρα (σχήματα 9.4γ και 9.4δ).

9.4.2 Κοίλα σφαιρικά κάτοπτρα.

α) Κύρια εστία. Εστιακό επίπεδο.

Αν φωτεινές ακτίνες, παράλληλες προς τον κύριο άξονα κοίλου κατόπτρου (σχ. 9.4ε) προσπέσουν σε αυτό, τότε μετά την ανάκλασή τους διέρχονται όλες από το ίδιο σημείο Ε του κύριου άξονα, το οποίο ονομάζεται κύρια εστία του κατόπτρου. Αυτή βρίσκεται μεταξύ του κέντρου καμπυλότητας Κ και της κορυφής Ο του κατόπτρου. Η απόσταση f της κύριας εστίας Ε του κατόπτρου από την κορυφή του Ο ονομάζεται εστιακή απόσταση του κατόπτρου και είναι ίση με το μισό της ακτίνας R καμπυλότητάς του.



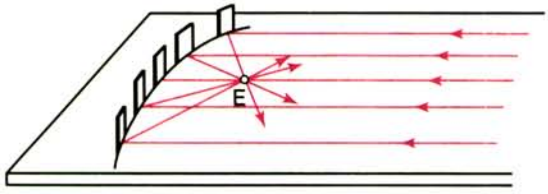
Σχ. 9.4ε.

Επομένως ισχύει η σχέση:

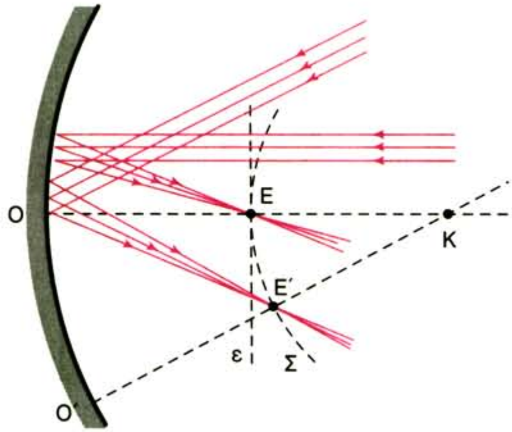
$$OE = \frac{OK}{2} = f = \frac{R}{2}$$

Στο σχήμα 9.4στ το κοίλο κάτοπτρο έχει αντικατασταθεί από πολλά μικρά επίπεδα κάτοπτρα.

Αν φωτεινές ακτίνες παράλληλες προς ένα δευτερεύοντα άξονα κοίλου κατόπτρου, π.χ. τον ΚΟ΄, προσπέσουν σε αυτό τότε μετά την ανάκλασή τους



Σχ. 9.4στ.



Σχ. 9.4ζ.

διέρχονται από το ίδιο σημείο Ε΄ αυτού του άξονα (σχ. 9.4ζ). Το σημείο αυτό (Ε΄) ονομάζεται δευτερεύουσα εστία του κατόπτρου και απέχει απόσταση $\frac{R}{2}$ από το κέντρο καμπυλότητας του κατόπτρου $\left(O'E' = \frac{R}{2}\right)$.

Όλες οι δευτερεύουσες εστίες βρίσκονται στη σφαιρική επιφάνεια (Σ), η οποία έχει κέντρο, το κέντρο καμπυλότητας (Κ) του κατόπτρου και ακτίνα, ίση με το μισό της ακτίνας καμπυλότητάς του (σχ. 9.4ζ):

$$O'E' = f = \frac{R}{2}$$

Αν το κάτοπτρο έχει μικρό άνοιγμα τότε μπορούμε να δεχθούμε ότι όλες οι δευτερεύουσες εστίες βρίσκονται, κατά προσέγγιση, στο επίπεδο (ε) το οποίο διέρχεται από την κύρια εστία και είναι κάθετο στον κύριο άξονα του κατόπτρου. Το επίπεδο αυτό (ε) ονομάζεται εστιακό επίπεδο του κατόπτρου.

Σημείωση:

Όταν λέμε κάτοπτρο μικρού ανοίγματος εννοούμε ένα κάτοπτρο του οποίου το γωνιακό άνοιγμα είναι $\cong 5^o$.

β) Είδωλα φωτεινού σημείου από κοίλο κάτοπτρο.

1) Όταν το φωτεινό σημείο Φ βρίσκεται (σχ. 9.4η) πάνω στο δευτερεύοντα άξονα ΦΚ του κοίλου κατόπτρου.

Θεωρούμε την ακτίνα ΦΑ, παράλληλη προς τον κύριο άξονα ΚΟ. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει την πορεία ΑΔ, δηλαδή θα διέλθει από την κύρια εστία Ε του κατόπτρου.

Επίσης θεωρούμε την ακτίνα ΦΓ που διέρχεται από το κέντρο Κ καμπυλότητας του κατόπτρου (ΦΚΓ = δευτερεύοντας άξονας).

Η ακτίνα ΦΓ μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει τη διεύθυνση της ΦΓ αλλά κατά αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΓΖ.

Οι δύο ανακλώμενες ακτίνες ΑΔ και ΓΖ συναντιώνται στο σημείο Φ΄. Στο σημείο Φ΄ σχηματίζεται το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ, γιατί εκεί συναντιώνται μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο όλες οι ακτίνες που εκπέμπονται από το φωτεινό σημείο Φ.

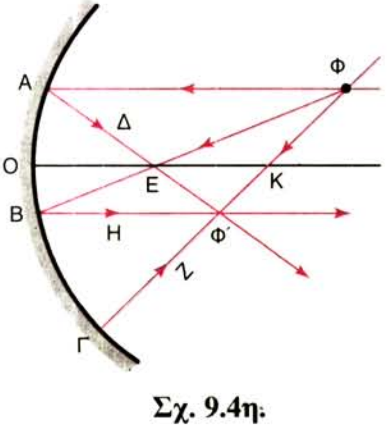
Σημείωση:

Επίσης μπορούμε να βρούμε το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ και ως εξής:

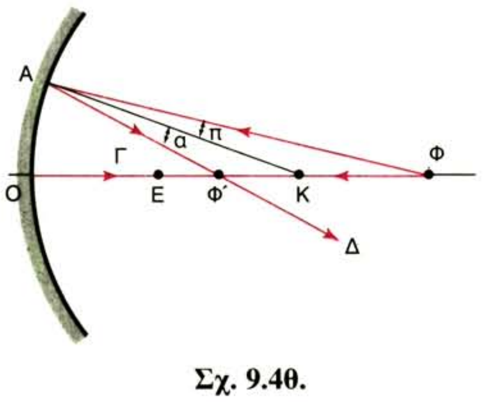
Θεωρούμε την ακτίνα ΦΑ παράλληλη προς τον κύριο άξονα ΚΟ (σχ. 9.4η) και την ΦΒ που διέρχεται από την κύρια εστία Ε του κοίλου κατόπτρου. Η ακτίνα ΦΒ μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει την πορεία ΒΗ που είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα ΚΟ.

Οι δύο ανακλώμενες ακτίνες ΑΔ και ΒΗ συναντιώνται στο σημείο Φ΄. Στο σημείο Φ΄ σχηματίζεται το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ.

2) Όταν το φωτεινό σημείο βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα ΟΚ κοίλου κατόπτρου και στη θέση Φ (σχ. 9.4θ).



Σχ. 9.4η.



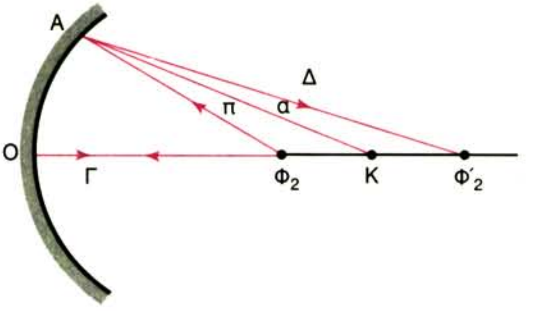
Σχ. 9.4θ.

Θεωρούμε την τυχαία ακτίνα ΦΑ. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει την πορεία ΑΔ τέμνοντας τον κύριο άξονα στο σημείο Φ΄ (π = α).

Επίσης θεωρούμε την ακτίνα ΦΟ. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει τη διεύθυνση της ΦΟ αλλά κατά αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΟΓ.

Οι δύο ανακλώμενες ΑΔ και ΟΓ συναντιώνται στο σημείο Φ΄. Στο σημείο Φ΄ σχηματίζεται το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ, γιατί στο σημείο αυτό συναντιώνται μετά την ανάκλασή τους όλες οι ακτίνες που εκπέμπονται από το φωτεινό σημείο Φ.

3) Όταν το φωτεινό σημείο $Φ_2$ βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα ΟΚ κοίλου κατόπτρου και στη θέση $Φ_2$ (σχ. 9.4ι).



Σχ. 9.4ι.

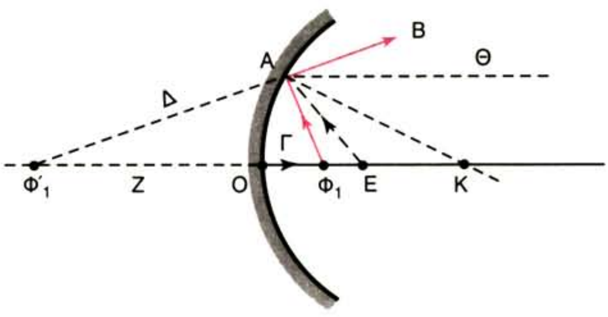
Θεωρούμε την τυχαία ακτίνα $Φ_2$Α. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει την πορεία ΑΔ τέμνοντας τον κύριο άξονα στο σημείο $Φ΄_2$ (π = α).

Επίσης θεωρούμε την ακτίνα $Φ_2$Ο. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει τη διεύθυνσή της $Φ_2$Ο, αλλά κατά αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΟΓ.

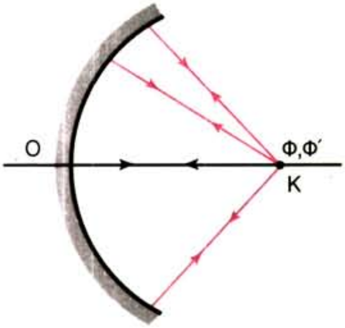
Οι δύο ανακλώμενες ΑΔ και ΟΓ συναντιώνται στο σημείο $Φ΄_2$. Στο σημείο $Φ΄_2$ σχηματίζεται το είδωλο του φωτεινού σημείου $Φ_2$, γιατί στο σημείο αυτό συναντιώνται μετά την ανάκλασή τους όλες οι ακτίνες που εκπέμπονται από το φωτεινό σημείο $Φ_2$.

4) Όταν το φωτεινό σημείο βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα ΟΚ κοίλου κατόπτρου και στη θέση $Φ_1$ (σχ. 9.4ια).

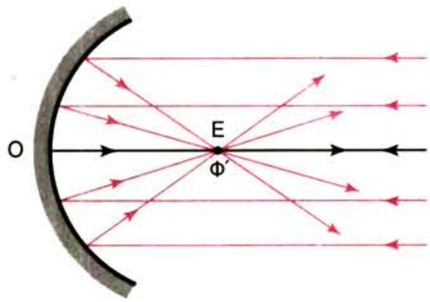
Θεωρούμε την τυχαία ακτίνα $Φ_1$Α (σχ. 9.4ια). Η γωνία $Φ_1$ΑΚ είναι μεγαλύτερη από την ΕΑΚ γι' αυτό θα ανακλασθεί κατά την ΑΒ (η ΑΘ είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα ΟΚ).



Σχ. 9.4ια.



Σχ. 9.4ιβ.



Σχ. 9.4ιγ.

Επομένως η ΑΒ δεν συναντάει τον κύριο άξονα. Η προέκταση της ΑΒ, δηλαδή η ΑΔ, συναντάει τον κύριο άξονα στο σημείο $Φ'_1$.

Επίσης θεωρούμε την ακτίνα $Φ_1$Ο. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει τη διεύθυνση της $Φ_1$Ο αλλά κατά αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΟΓ. Η προέκταση της ΟΓ είναι η ΟΖ. Οι προεκτάσεις των ανακλωμένων ΑΒ και ΟΓ, δηλαδή η ΑΔ και ΟΖ συναντιώνται στο σημείο $Φ_1'$. Άρα από το σημείο αυτό $Φ_1'$ διέρχονται οι προεκτάσεις όλων των ανακλωμένων ακτίνων που προέρχονται από το φωτεινό σημείο $Φ_1$. Επομένως το $Φ_1'$ είναι το φανταστικό είδωλο του φωτεινού σημείου $Φ_1$.

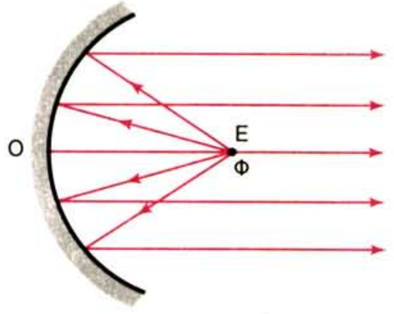
5) Όταν το φωτεινό σημείο Φ βρίσκεται στο κέντρο Κ του κατόπτρου, τότε το φωτεινό σημείο και το είδωλό του συμπίπτουν (σχ. 9.4ιβ) στο Κ.

6) Όταν το φωτεινό σημείο βρίσκεται στο άπειρο, τότε το είδωλό του σχηματίζεται στην κύρια εστία του κατόπτρου (σχ. 9.4ιγ).

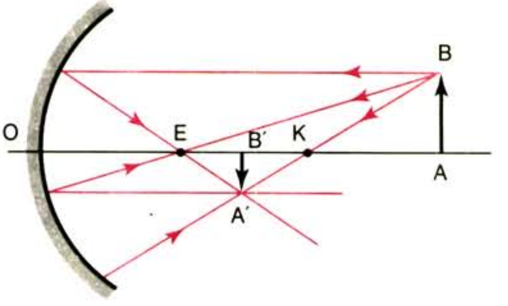
7) Όταν το φωτεινό σημείο βρίσκεται στην κύρια εστία, τότε το είδωλό του σχηματίζεται στο άπειρο (σχ. 9.4ιδ).

γ) Είδωλο φωτεινού αντικειμένου από κοίλο κάτοπτρο.

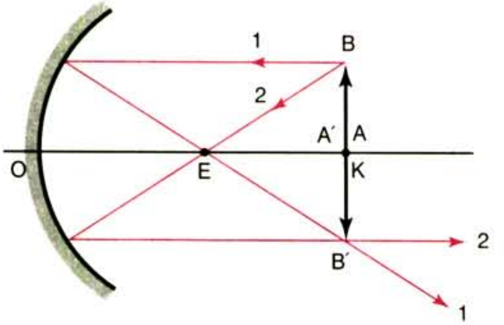
Το είδωλο φωτεινού αντικειμένου θα είναι το σύνολο των ειδώλων των



Σχ. 9.4ιδ.



Σχ. 9.4ιε.



Σχ. 9.4ιστ.

φωτεινών σημείων από τα οποία αποτελείται το αντικείμενο.

Όταν το αντικείμενο είναι μικρό φωτεινό ευθύγραμμο τμήμα, κάθετο στον κύριο άξονα, το είδωλό του είναι επίσης ευθύγραμμο τμήμα κάθετο στον κύριο άξονα.

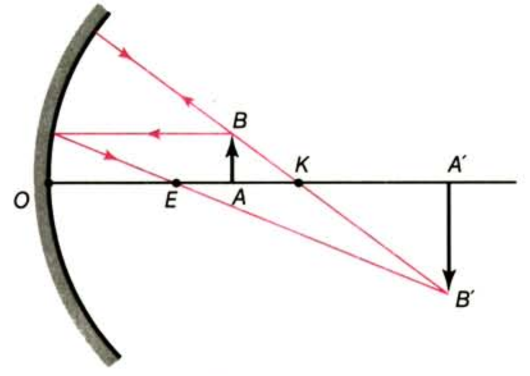
Ώστε για να σχηματίσομε το είδωλο φωτεινού ευθύγραμμου τμήματος ΑΒ που είναι κάθετο στον κύριο άξονα, βρίσκομε κατά τα γνωστά, το είδωλο Β´ του ενός άκρου του Β (το άλλο του υποτίθεται ότι βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα) και φέρνομε το κάθετο τμήμα Β´Α´ στον κύριο άξονα. Το Α´Β´ είναι το είδωλο του ΑΒ.

1) Όταν το αντικείμενο ΑΒ (σχ. 9.4ιε) είναι πέρα του κέντρου καμπυλότητας Κ, τότε το είδωλό του σχηματίζεται μεταξύ της κύριας εστίας Ε και του Κ, είναι μικρότερο του αντικειμένου, αντεστραμμένο και πραγματικό.

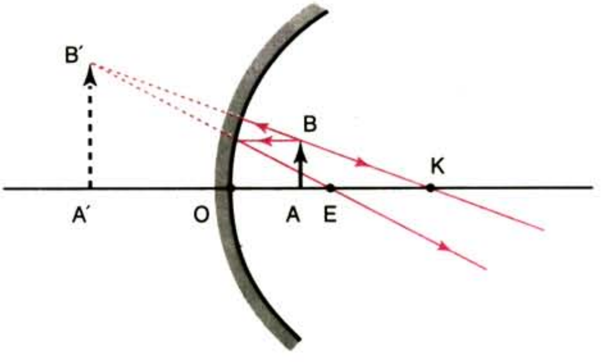
Σημείωση:

Όταν το αντικείμενο πλησιάζει προς το Κ και το είδωλό του πλησιάζει προς το Κ και μεγεθύνεται.

2) Όταν το αντικείμενο βρεθεί στο Κ και το είδωλό του σχηματίζεται στο Κ, είναι ίσο με το αντικείμενο, αντεστραμμένο και πραγματικό (σχ. 9.4ιστ).



Σχ. 9.4ιζ.



Σχ. 9.4ιη.

3) Όταν το αντικείμενο ΑΒ (σχ. 9.4ιζ) βρεθεί μεταξύ κέντρου καμπυλότητας Κ και κύριας εστίας Ε, το είδωλό του Α΄Β΄ που σχηματίζεται πέρα από το κέντρο καμπυλότητας θα είναι πραγματικό, αντεστραμμένο και μεγαλύτερο από το αντικείμενο.

Σημείωση:

Όταν το ΑΒ από το Κ πλησιάζει προς το Ε, το είδωλό του Α΄Β΄, το οποίο είναι μεγαλύτερο από το αντικείμενο, στραμμένο και πραγματικό απομακρύνεται από το Κ, μέχρι το άπειρο συνεχώς μεγεθυνόμενο. Όταν το αντικείμενο τεθεί στο Ε, το είδωλό του έχει άπειρο ύψος και βρίσκεται στο άπειρο.

4) Όταν το αντικείμενο βρεθεί (σχ. 9.4ιη) μεταξύ κύριας εστίας και κορυφής του κατόπτρου, το είδωλό του που σχηματίζεται πίσω από το κάτοπτρο σε απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση του κατόπτρου είναι φανταστικό, όρθιο και μεγαλύτερο από το αντικείμενο.

9.4.3 Κυρτά σφαιρικά κάτοπτρα.

α) Κύρια εστία κυρτού κατόπτρου.

Αν φωτεινές ακτίνες (σχ. 9.4ιθ) παράλληλες προς τον κύριο άξονα προσπέσουν επί κυρτού σφαιρικού κατόπτρου, μετά την ανάκλασή τους αποκλίνουν, οι προεκτάσεις όμως των ανακλωμένων τους διέρχονται από το ίδιο σημείο Ε του κύριου άξονα.

Το σημείο αυτό Ε που απέχει εξίσου από την κορυφή του κατόπτρου Ο και το κέντρο καμπυλότητάς του Κ ονομάζεται κύρια εστία του κατόπτρου.

Επειδή το σημείο Ε είναι η τομή των προεκτάσεων των ανακλωμένων ακτίνων η κύρια εστία Ε είναι φανταστική. Η απόσταση (ΟΕ = f) ονομάζεται εστιακή απόσταση του κατόπτρου.

Ισχύει η σχέση:

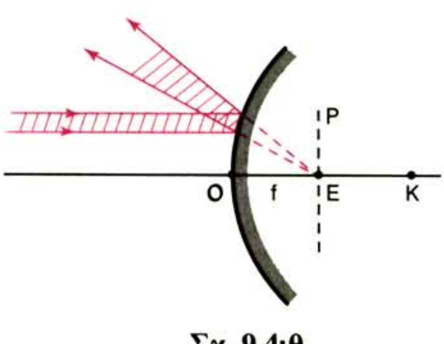
$$f = \frac{OK}{2} = \frac{R}{2}$$

β) Δευτερεύουσες εστίες κυρτού κατόπτρου.

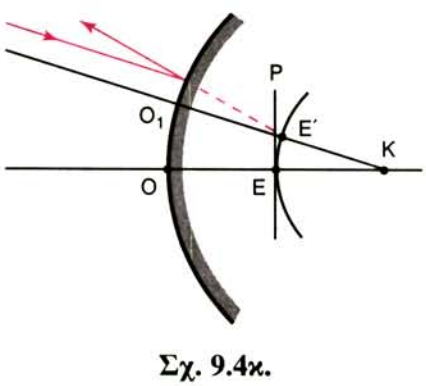
Όταν φωτεινές ακτίνες (σχ. 9.4κ) προσπέσουν παράλληλα προς δευτερεύοντα άξονα KO_1, ανακλώνται έτσι ώστε οι προεκτάσεις των ανακλωμένων τους ακτίνων διέρχονται από το ίδιο σημείο Ε΄ του άξονα αυτού. Το σημείο αυτό ονομάζεται δευτερεύουσα εστία του κατόπτρου και απέχει από το κέντρο καμπυλότητας Κ απόσταση $KE' = f = \frac{R}{2}$ και είναι φανταστικό.

Σημείωση:

Οι δευτερεύουσες εστίες του κατόπτρου βρίσκονται σε σφαιρική επιφάνεια (Κ, ΚΕ). Το επίπεδο Ρ που εφάπτεται με τη σφαίρα αυτή στο Ε το ο-



Σχ. 9.4ιθ.



Σχ. 9.4κ.

νομάζομε εστιακό επίπεδο. Θεωρούμε ότι οι δευτερεύουσες εστίες (κατά προσέγγιση) βρίσκονται πάνω στο εστιακό επίπεδο του κατόπτρου.

γ) Είδωλο φωτεινού σημείου από κυρτό κάτοπτρο.

1) ***Όταν το φωτεινό σημείο Φ βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα.***

Θεωρούμε την τυχαία ακτίνα ΦΙ (σχ. 9.4κα). Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει την πορεία ΙΒ. Η προέκταση της ανακλώμενης ΙΒ, δηλαδή η ΙΓ, διέρχεται από το σημείο Φ΄ του κύριου άξονα ΚΟ του κατόπτρου.

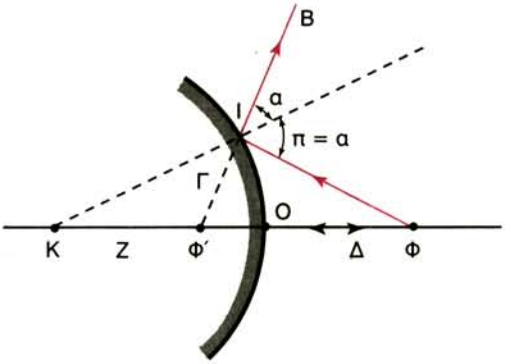
Επίσης θεωρούμε την ακτίνα ΦΟ. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει τη διεύθυνση ΦΟ, αλλά κατά την αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΟΔ.

Οι προεκτάσεις των δύο ανακλωμένων ακτίνων ΙΒ και ΟΔ, δηλαδή οι ΙΓ και ΟΖ, συναντιώνται στο σημείο Φ΄ του κύριου άξονα του κατόπτρου.

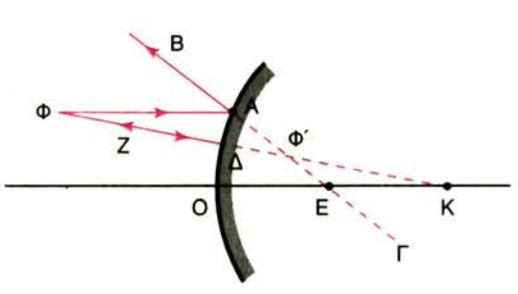
Άρα το Φ΄ είναι το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ και το οποίο είναι φανταστικό.

2) ***Όταν το φωτεινό σημείο Φ δεν βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα.***

Θεωρούμε την ακτίνα ΦΑ (σχ. 9.4κβ) παράλληλη προς τον κύριο άξονα



Σχ. 9.4κα.



Σχ. 9.κβ.

του κυρτού κατόπτρου. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει την πορεία ΑΒ. Η προέκταση της ανακλώμενης ΑΒ, δηλαδή η ΑΓ, διέρχεται από την κύρια εστία Ε του κατόπτρου.

Επίσης θεωρούμε την ακτίνα ΦΔ. Αυτή μετά την ανάκλασή της θα ακολουθήσει τη διεύθυνση της ΦΔ, αλλά κατά την αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΔΖ (ΚΔ ο δευτερεύοντας άξονας στον οποίο βρίσκεται το φωτεινό σημείο Φ). Η προέκταση της ΔΖ είναι η ΔΚ.

Οι προεκτάσεις των δύο ανακλωμένων ακτίνων ΑΓ και ΔΚ συναντώνται στο σημείο Φ΄.

Το Φ΄ είναι το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ και είναι φανταστικό.

δ) Είδωλο φωτεινού αντικειμένου από κυρτό κάτοπτρο.

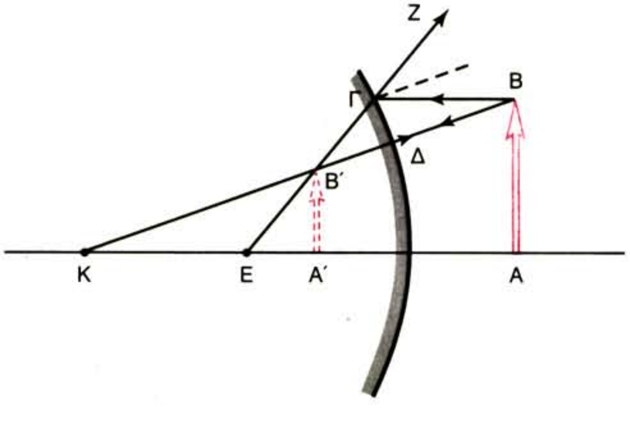
Θεωρούμε ένα φωτεινό αντικείμενο ΑΒ (σχ. 9.4κγ) που έχει τη μορφή βέλους και είναι τοποθετημένο κάθετα στον κύριο άξονα ενός κυρτού σφαιρικού κατόπτρου.

Για να σχηματίσομε το είδωλο του ΑΒ φέρνομε από το άκρο Β δύο χαρακτηριστικές ακτίνες: την ακτίνα ΒΓ, παράλληλη προς τον κύριο άξονα και την ακτίνα ΒΔ. Η διεύθυνση της ΒΔ συμπίπτει με τη διεύθυνση της ΚΒ που είναι ο δευτερεύοντας άξονας του κατόπτρου ο οποίος περνάει από το Β.

Η ακτίνα ΒΓ μετά την ανάκλασή της ακολουθεί την πορεία ΓΖ. Η προέκταση της ΓΖ διέρχεται από την κύρια εστία Ε του κατόπτρου.

Η ακτίνα ΒΔ μετά την ανάκλασή της ακολουθεί την ίδια διεύθυνση (ΒΔ) αλλά κατά την αντίστροφη φορά, δηλαδή θα είναι η ΔΒ. Η προέκταση της ΔΒ διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας Κ.

Το σημείο Β΄ της τομής των δύο προεκτάσεων είναι το φανταστικό είδωλο του σημείου Β. Επομένως, το είδωλο του αντικειμένου ΑΒ θα είναι το



Σχ. 9.4κγ.

Α΄Β΄, το οποίο είναι φανταστικό, όρθιο και μικρότερο του αντικειμένου.

Προσοχή:

1) Το κυρτό σφαιρικό κάτοπτρο σχηματίζει πάντοτε είδωλο φανταστικό, όρθιο και μικρότερο από το αντικείμενο.

2) Το είδωλο που σχηματίζεται από κυρτό κάτοπτρο βρίσκεται πάντοτε μεταξύ της κύριας εστίας του και του κατόπτρου.

9.4.4 Τύποι των σφαιρικών κατόπτρων.

α) Γνώσεις στηρίξεως.

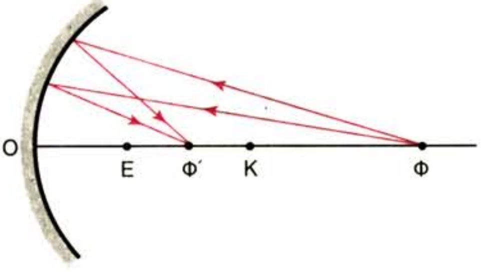
Ως αρχή του κύριου άξονα των σφαιρικών κατόπτρων λαμβάνεται το οπτικό τους κέντρο και ως θετική φορά του ορίζεται πάντα η φορά προς την πλευρά που βρίσκεται η ανακλαστική τους επιφάνεια.

Επομένως η απόσταση για κάθε σημείο που βρίσκεται στο πίσω μέρος του κατόπτρου θα λαμβάνεται σαν αρνητική.

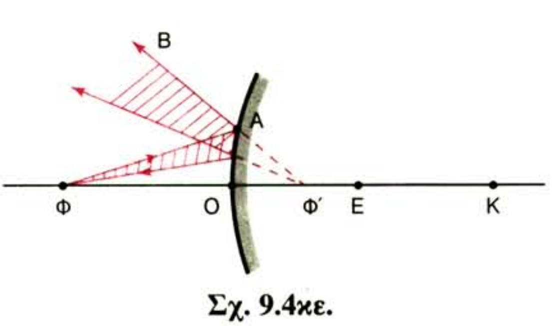
Στο σχήμα 9.4κδ η αρχή για τη μέτρηση των αποστάσεων είναι το σημείο Ο και η θετική φορά από το Ο προς το Κ.

Επομένως οι αποστάσεις ΟΕ, ΟΚ, ΟΦ και ΟΦ΄ είναι θετικές.

Στο σχήμα 9.4κε η αρχή για τη μέτρηση των αποστάσεων είναι το σημείο Ο και η αρνητική φορά από το Ο προς το Κ.



Σχ. 9.4κδ.



Σχ. 9.4κε.

Επομένως οι αποστάσεις ΟΕ, ΟΚ και ΟΦ΄ είναι αρνητικές, ενώ η απόσταση ΟΦ είναι θετική.

β) Τύποι των κοίλων σφαιρικών κατόπτρων.

Παίρνομε τη φωτεινή ακτίνα ΒΟ (σχ. 9.4κστ), που ανακλάται κατά τη διεύθυνση ΟΒ΄. Οι γωνίες ΒΟΑ και Β΄ΟΑ΄ είναι ίσες. Εξαιτίας της ισότητας αυτών των γωνιών, που προκύπτει από το δεύτερο νόμο της ανακλάσεως, τα ορθογώνια τρίγωνα ΑΟΒ και Α΄ΟΒ΄ θα είναι όμοια και γι' αυτό θα ισχύει:

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{OA'}{OA} \quad \text{και} \quad \frac{A'B'}{AB}=\frac{\beta}{\alpha} \tag{1}$$

Τα ορθογώνια τρίγωνα ΑΚΒ και Α΄ΚΒ΄ είναι επίσης όμοια, γιατί έχουν ίσες τις οξείες γωνίες ΑΚΒ και Α΄ΚΒ΄, ως κατά κορυφή γωνίες.

Επομένως θα είναι:

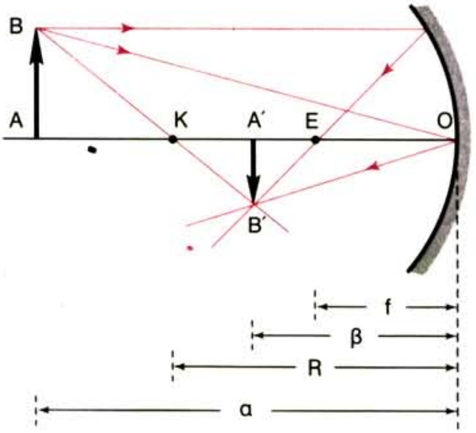
$$\frac{KA'}{KA}=\frac{A'B'}{AB} \tag{2}$$

Επίσης έχομε:

$$AK=\alpha-2f \quad (3) \qquad \text{και} \qquad KA'=2f-\beta \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (1), (2), (3) και (4) προκύπτει:

$$\frac{\beta}{\alpha}=\frac{2f-\beta}{\alpha-2f} \Rightarrow \frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{1}{f} \tag{5}$$



Σχ. 9.4κστ.

Προσοχή:

Οι τύποι: $\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{1}{f}$ (5) και $\frac{A'B'}{AB}=\frac{\beta}{\alpha}$ (1) είναι οι τύποι των κοίλων σφαιρικών κατόπτρων.

γ) Τύποι των κυρτών σφαιρικών κατόπτρων.

Αποδεικνύεται ότι και στα κυρτά σφαιρικά κάτοπτρα (σχήμα 9.4κζ) ισχύουν οι τύποι των κοίλων κατόπτρων, στους οποίους όμως τα β και f πρέπει να λαμβάνονται αρνητικά.

$$\frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{1}{f} \qquad \text{και} \qquad \frac{A'B'}{AB}=\frac{\beta}{\alpha}$$

όπου: $\alpha = OA$, $\beta = OA'$, $f = OE$.

Σημείωση:

Υπενθυμίζομε ότι στα κυρτά κάτοπτρα, η αρνητική φορά του κύριου άξονα είναι από το Ο προς το Κ (σχ. 9.4κζ).

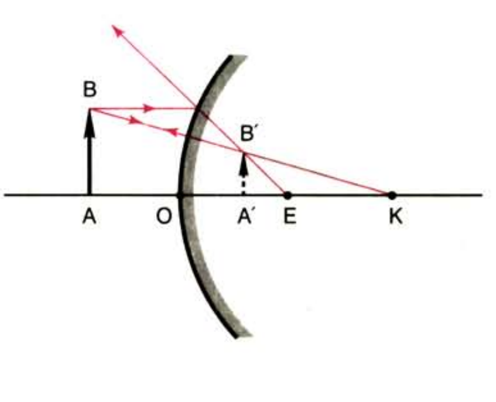
δ) Γενική παρατήρηση:

Σε όλες τις περιπτώσεις των σφαιρικών κατόπτρων ισχύουν οι εξισώσεις:

$$f=\frac{R}{2}, \quad \frac{1}{\alpha}+\frac{1}{\beta}=\frac{1}{f}, \quad \frac{A'B'}{AB}=\frac{\beta}{\alpha}$$ (γενικές εξισώσεις των σφαιρικών κατόπτρων)

Προσοχή:

Κατά τη χρησιμοποίηση αυτών των εξισώσεων πρέπει οπωσδήποτε να λαμβάνονται υπόψη η θετική και αρνητική φορά του κύριου άξονα του χρησιμοποιούμενου κατόπτρου για τον προσδιορισμό των αλγεβρικών τιμών των α, β και f.



Σχ. 9.4κζ.

9.4.5 Γραμμική μεγέθυνση στα σφαιρικά κάτοπτρα.

Στα σφαιρικά κάτοπτρα το πηλίκο του γραμμικού μεγέθους Α΄Β΄ του ειδώλου, διά του γραμμικού μεγέθους ΑΒ του αντικειμένου, το λέμε γραμμική μεγέθυνση (m). Δηλαδή:

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

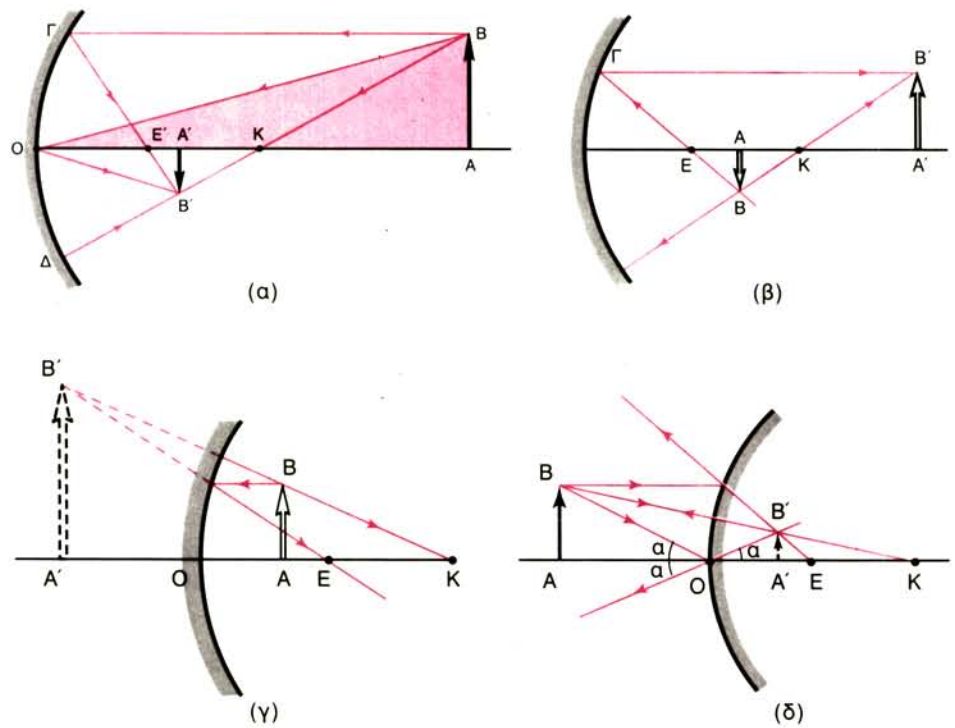
Περιπτώσεις:

1) Όταν το είδωλο είναι μικρότερο από το αντικείμενο, η μεγέθυνση θα είναι μικρότερη της μονάδας: $m<1$, δηλαδή σμίκρυνση [σχ. 9.4κη (α) και (δ)].

2) Όταν το είδωλο είναι μεγαλύτερο από το αντικείμενο, η μεγέθυνση θα είναι μεγαλύτερη από τη μονάδα: $m>1$ [σχ. 9.4κη (β) και (γ)].

3) Όταν το είδωλο είναι πραγματικό η μεγέθυνση θα είναι θετική: $m>0$ [σχ. 9.4κη (α) και (β)].

4) Όταν το είδωλο είναι φανταστικό η μεγέθυνση θα είναι αρνητική: $m<0$ [σχ. 9.4κη (γ) και (δ)].



Σχ. 9.4κη.

Σημείωση:

Η μεγέθυνση που είναι μικρότερη της μονάδας ($m<1$) ονομάζεται και σμίκρυνση.

9.4.6 Οπτικό πεδίο κυρτού σφαιρικού κατόπτρου.

Το κυρτό σφαιρικό κάτοπτρο του σχήματος 9.4κθ δίνει στη θέση O_1 το φανταστικό είδωλο του ματιού O κάποιου παρατηρητή. Αν φέρομε από το O_1 τις ευθείες που περνούν από την περίμετρο του κατόπτρου, καθορίζομε το οπτικό πεδίο του, δηλαδή το μέρος του χώρου που βλέπει μέσα στο κάτοπτρο το μάτι O του παρατηρητή από τη θέση που βρίσκεται (το έγχρωμο στο σχήμα 9.4κθ).

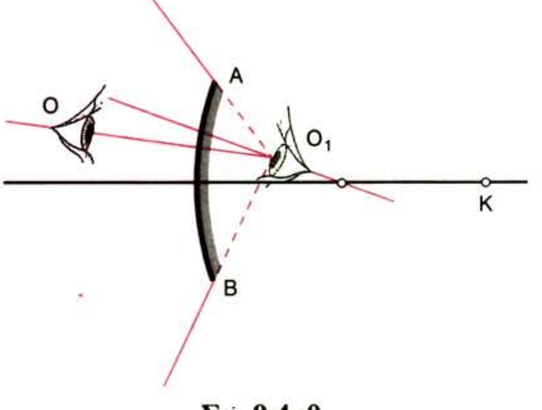
Σημείωση:

Τα κοίλα κάτοπτρα δεν χρησιμοποιούνται ποτέ για να δίνουν οπτικό πεδίο και αυτό γιατί τα είδωλά τους είναι φανταστικά μόνο για τα αντικείμενα που βρίσκονται ανάμεσα στην κορυφή και την εστία τους.

9.4.7 Εφαρμογές των σφαιρικών κατόπτρων.

Τα κοίλα σφαιρικά κάτοπτρα τα χρησιμοποιούμε για να έχομε μεγεθυμένα είδωλα και για να πετύχομε συγκέντρωση του φωτός (προβολείς, μικροσκόπια).

Τα κυρτά κάτοπτρα δίνουν μικρά είδωλα, έχουν όμως μεγάλα οπτικά πεδία και γι' αυτό χρησιμοποιούνται από οδηγούς αυτοκινήτων για την παρακολούθηση της κινήσεως των οχημάτων που έρχονται πίσω από το αυτοκίνητό τους.



Σχ. 9.4κθ.

9.4.8 Σφάλματα των σφαιρικών κατόπτρων.

Όλα όσα έχομε αναφέρει για τα σφαιρικά κάτοπτρα ισχύουν με τις εξής προϋποθέσεις:

1) Όταν το άνοιγμα του κατόπτρου είναι πολύ μικρό.

2) Όταν οι ακτίνες σχηματίζουν μικρή γωνία με τον κύριο άξονα και είναι κοντά του (αξονικές ακτίνες).

Όταν μία από αυτές τις προϋποθέσεις δεν πραγματοποιείται, τότε οι ακτίνες που φεύγουν από ένα φωτεινό σημείο, μετά την ανάκλασή τους πάνω στο σφαιρικό κάτοπτρο, δεν συγκεντρώνονται σε ένα σημείο και επομένως δεν σχηματίζεται σαφές είδωλο του αντικειμένου.

α) Σφαιρική εκτροπή.

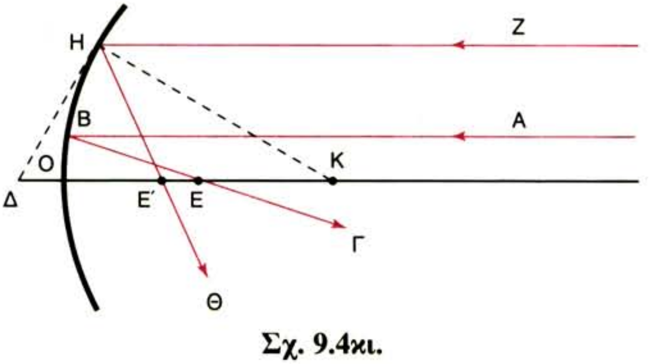
Σε ένα κάτοπτρο μεγάλου ανοίγματος μια ακτίνα ΖΗ (σχ. 9.4κι), που είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα, πέφτει στο κάτοπτρο σε απόσταση από την κορυφή.

Η ανακλώμενη ακτίνα ΗΘ συναντάει τον κύριο άξονα στο σημείο Ε΄, που είναι η μέση της ευθείας ΚΔ. Όσο περισσότερο απομακρύνεται το σημείο Η από την κορυφή, τόσο περισσότερο το σημείο Ε΄ πλησιάζει προς την κορυφή Ο του κατόπτρου.

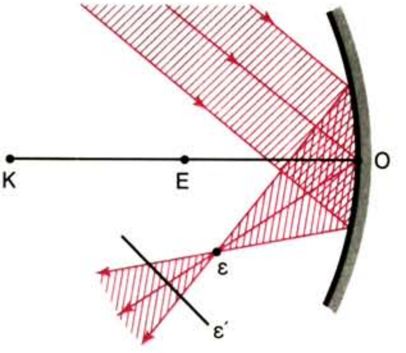
Ώστε για τις ακτίνες, που πέφτουν στο κάτοπτρο μακριά από την κορυφή του, η εστιακή τους απόσταση γενικά είναι μικρότερη από τη μισή ακτίνα καμπυλότητας ($f<R<2$). Αυτό το ελάττωμα των σφαιρικών κατόπτρων που έχουν μεγάλο άνοιγμα ονομάζεται σφαιρική εκτροπή.

β) Αστιγματισμός.

Σε ένα σφαιρικό κάτοπτρο, αδιάφορο αν έχει μικρό ή μεγάλο άνοιγμα, πέφτει μία παράλληλη φωτεινή δέσμη, που σχηματίζει μεγάλη γωνία με τον κύριο άξονα (σχ. 9.4κι).



Σχ. 9.4κι.



Σχ. 9.4κια.

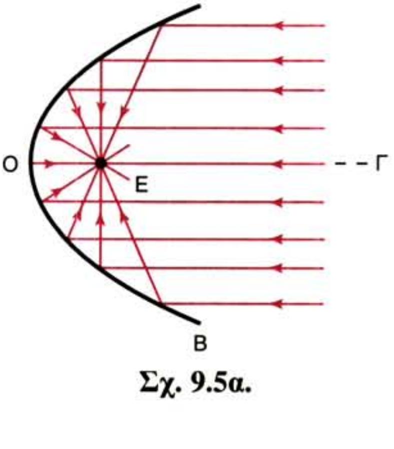
Οι ανακλώμενες ακτίνες δεν περνούν από ένα σημείο, αλλά περνούν από δύο μικρά ευθύγραμμα τμήματα που είναι (ασύμβατα) κάθετα μεταξύ τους και δεν βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Αυτά τα ευθύγραμμα τμήματα τα ονομάζομε εστιακές γραμμές. Το ελάττωμα αυτό των σφαιρικών κατόπτρων το ονομάζομε αστιγματισμό (ή αστιγματική εκτροπή).

Στο σχήμα 9.4κια η εστιακή γραμμή (ε) είναι κάθετη στο επίπεδο του σχήματος, ενώ η εστιακή γραμμή (ε΄) βρίσκεται στο επίπεδο του σχήματος.

9.5 Παραβολικά κάτοπτρα.

Αν η γραμμή ΑΟΒ του σχήματος 9.5α, η οποία ονομάζεται παραβολή, περιστραφεί γύρω από τον άξονά της ΟΓ, τότε αυτή γράφει μία επιφάνεια που λέγεται παραβολοειδές από περιστροφή.

Παραβολικά κάτοπτρα ονομάζονται τα κάτοπτρα των οποίων η ανακλαστική επιφάνεια έχει σχήμα κοίλου παραβολοειδούς από περιστροφή.

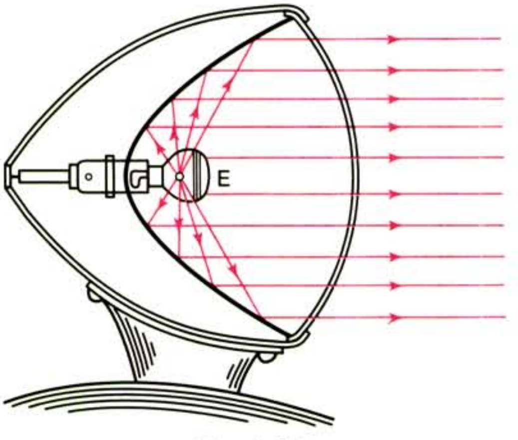


Σχ. 9.5α.

Αν σε ένα τέτοιο κάτοπτρο προσπέσει φωτεινή δέσμη παράλληλη προς τον κύριο άξονά του, οι ακτίνες της μετά την ανάκλασή τους, συνέρχονται όλες στην κύρια εστία του κατόπτρου Ε (σχ. 9.5α). Αν στην κύρια εστία ενός παραβολικού κατόπτρου τοποθετηθεί μία φωτεινή πηγή (σχ. 9.5β), οι ακτίνες της, μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο, γίνονται παράλληλες προς τον κύριο άξονα.

Σημείωση:

Τα παραβολικά κάτοπτρα χρησιμοποιούνται στους φανούς αυτοκινήτων (σχ. 9.5β), στους προβολείς κλπ.



Σχ. 9.5β.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

ΔΙΑΘΛΑΣΗ

10.1 Δείκτης διαθλάσεως.

10.1.1 Γνώσεις στηρίξεως.

1) Η ταχύτητα διαδόσεως μιας οποιασδήποτε μονοχρωματικής ακτινοβολίας στο κενό είναι περίπου $c_o = 3 \cdot 10^8$ m/s, ενώ η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται μία ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ένα διαφανές μέσο είναι μικρότερη από την τιμή c_o.

Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται μία μονοχρωματική (απλή) ακτινοβολία σε ένα διαφανές μέσο εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και από τις ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του μέσου.

Τα παραπάνω σημαίνουν:

α) Ακτινοβολίες με διαφορετικά μήκη κύματος στο ίδιο μέσο διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα.

β) Μία μονοχρωματική ακτινοβολία σε διαφορετικά μέσα διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα.

2) Από δύο διαφορετικά μέσα εκείνο στο οποίο η ταχύτητα μιας ακτινοβολίας έχει μικρότερη τιμή, ονομάζεται οπτικά πυκνότερο ή διαθλαστικότερο. Έτσι το γυαλί και το νερό είναι οπτικά πυκνότερα από τον αέρα.

3) Τα οπτικά πυκνότερα μέσα δεν έχουν πάντα μεγαλύτερη την πυκνότητά τους, δηλαδή η πυκνότητα της ύλης, κάποιου οπτικού μέσου, δεν καθορίζει μονοσήμαντα την οπτική πυκνότητά του.

10.1.2 Απόλυτος και σχετικός δείκτης διαθλάσεως.

Ονομάζεται απόλυτος δείκτης διαθλάσεως ενός διαφανούς μέσου (α) το πηλίκο της ταχύτητας με την οποία διαδίδεται το φως στο κενό c_o, διά της ταχύτητας με την οποία διαδίδεται το φως στο μέσο αυτό c_α. Δηλαδή:

$$n_\alpha = \frac{c_o}{c_\alpha} \qquad (1)$$

Ονομάζεται σχετικός δείκτης διαθλάσεως ενός διαφανούς μέσου (β) ως προς άλλο διαφανές μέσο (α), ο λόγος της ταχύτητας του φωτός c_α στο μέσο (α), διά της ταχύτητας c_β του φωτός στο μέσο (β). Δηλαδή:

$$n_{\alpha,\beta} = \frac{c_\alpha}{c_\beta} \qquad (2)$$

Ο σχετικός δείκτης διαθλάσεως του μέσου (β) ως προς το μέσο (α) είναι ίσος με το πηλίκο των απολύτων δεικτών.

Έχομε: $n_\alpha = \frac{c_o}{c_\alpha}$ και $n_\beta = \frac{c_o}{c_\beta}$

Από αυτές παίρνομε:

$$\frac{n_\beta}{n_\alpha} = \frac{c_o / c_\beta}{c_o / c_\alpha} = \frac{c_\alpha}{c_\beta} = n_{\beta,\alpha}$$

Παρατηρήσεις:

1) Επειδή η ταχύτητα διαδόσεως του φωτός στον αέρα είναι λίγο μικρότερη από την ταχύτητα διαδόσεως του φωτός στο κενό ($c_{\alpha\rho} = c_o$), μπορούμε αντί για το κενό να μιλάμε για τον αέρα.

Ο απόλυτος δείκτης διαθλάσεως του αέρα θεωρείται ότι είναι:

$$n \doteq \frac{c_o}{c_{\alpha\rho.}} = 1$$

2) Όταν θα λέμε δείκτη διαθλάσεως ενός μέσου χωρίς να λέμε ως προς ποιο μέσο αναφέρεται θα εννοούμε το δείκτη διαθλάσεώς του ως προς τον αέρα, δηλαδή τον απόλυτο δείκτη διαθλάσεώς του.

3) Ο απόλυτος δείκτης διαθλάσεως ενός μέσου είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα.

4) Μεταξύ δύο μέσων στο οπτικά πυκνότερο η ταχύτητα διαδόσεως του φωτός είναι μικρότερη και επομένως το οπτικά πυκνότερο μέσο έχει μεγαλύτερο δείκτη διαθλάσεως.

10.2 Νόμοι της διαθλάσεως.

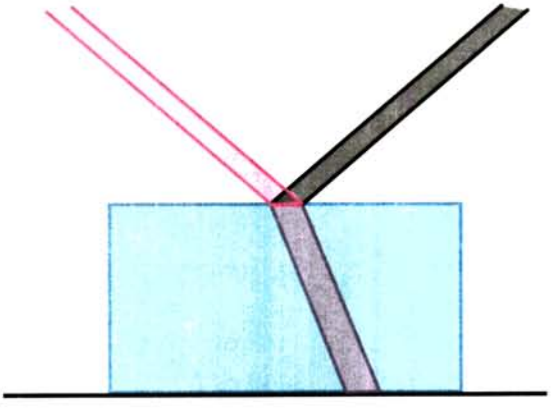
10.2.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Ονομάζεται διάθλαση του φωτός το φαινόμενο κατά το οποίο λεπτή δέσμη φωτός που προσπίπτει πλάγια στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικά διαφορετικών μέσων αλλάζει πορεία (διεύθυνση) κατά τη μετάβασή της α-πό το ένα μέσο στο άλλο.

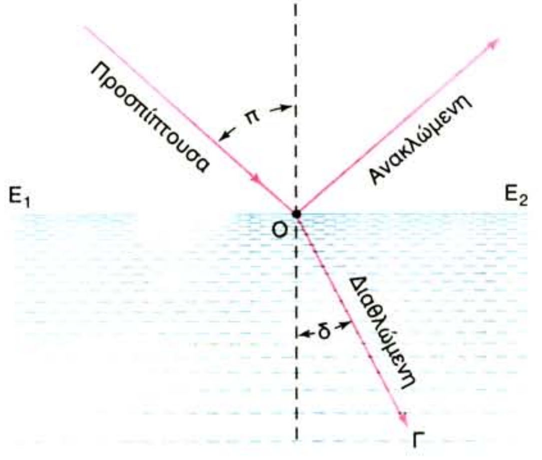
Όταν μία λεπτή δέσμη φωτός (μονοχρωματική) προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων, ένα μέρος της δέσμης θα ανακλαστεί σύμφωνα με τους νόμους της ανακλάσεως.

Ένα άλλο μέρος της δέσμης θα εισχωρήσει στο δεύτερο μέσο με ταυτόχρονη αλλαγή πορείας (διευθύνσεως) (σχ. 10.2α).

Διαθλαστική επιφάνεια ονομάζεται η διαχωριστική επιφάνεια E_1E_2 δύο μέσων που προκαλεί διάθλαση (σχ. 10.2β).



Σχ. 10.2α.



Σχ. 10.2β.

Γωνία προσπτώσεως λέγεται η γωνία (π) που σχηματίζει η προσπίπτουσα ακτίνα με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων.

Γωνία διαθλάσεως ονομάζεται η γωνία (δ) που σχηματίζει η διαθλώμενη ακτίνα με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο προσπτώσεως.

Επίπεδο προσπτώσεως (ή επίπεδο διαθλάσεως) ονομάζεται το επίπεδο που ορίζουν η προσπίπτουσα ακτίνα και η αντίστοιχή της διαθλώμενη (και προφανώς και η κάθετη στο σημείο Ο προσπτώσεως).

Προσοχή:

Αιτία για το φαινόμενο της διαθλάσεως είναι η διαφορετική ταχύτητα που έχει το φως, όταν διαδίδεται μέσα στα δύο οπτικά μέσα.

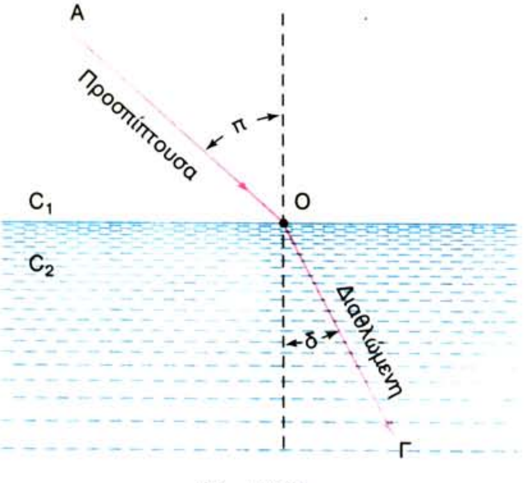
Αν η δέσμη των φωτεινών ακτίνων εισέρχεται σε εκείνο το μέσο, που μέσα σε αυτό η ταχύτητα του φωτός ελαττώνεται, αλλάζοντας πορεία πλησιάζει την κάθετη πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια.

Αν η δέσμη των φωτεινών ακτίνων εισέρχεται μέσα σε μέσο όπου η ταχύτητα του φωτός αυξάνεται αλλάζοντας πορεία απομακρύνεται από την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια.

10.2.2 Διατύπωση των νόμων της διαθλάσεως.

1) Η προσπίπτουσα ακτίνα, η αντίστοιχη διαθλώμενή της και η κάθετη στη διαθλαστική επιφάνεια στο σημείο προσπτώσεως βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο που είναι κάθετο στη διαθλαστική επιφάνεια (σχ. 10.2γ).

2) Ο λόγος του ημιτόνου της γωνίας προσπτώσεως προς το ημίτονο της



Σχ. 10.2γ.

γωνίας διαθλάσεως είναι σταθερός και ίσος με το λόγο των ταχυτήτων διαδόσεως του φωτός, στα αντίστοιχα μέσα που σχηματίζονται οι γωνίες (σχ. 10.2γ).

Η μαθηματική διατύπωση του δεύτερου νόμου είναι:

$$\frac{\eta\mu\pi}{\eta\mu\delta}=\frac{c_1}{c_2}=\frac{n_2}{n_1}=n_{2,1}$$

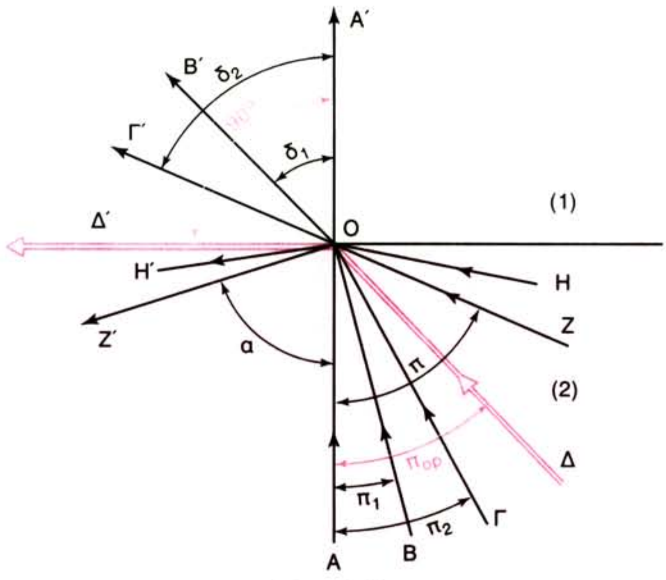
10.3 Οριακή (ορική) γωνία και ολική ανάκλαση.

Όταν μία φωτεινή ακτίνα μπαίνει από οπτικά πυκνότερο (2) σε οπτικά αραιότερο μέσο (1), τότε η γωνία διαθλάσεως είναι μεγαλύτερη από τη γωνία προσπτώσεως και η διαθλώμενη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετο ΟΑ΄ στη διαχωριστική επιφάνεια (σχ. 10.3).

Όταν μεγαλώνει η γωνία προσπτώσεως, μεγαλώνει και η γωνία διαθλάσεως με αποτέλεσμα οι ακτίνες ΒΟ, ΓΟ κλπ. να παρουσιάζουν μετά τη διάθλαση όλο και πιο μεγάλη απόκλιση από την ΑΟΑ΄.

Όταν η γωνία διαθλάσεως πάρει τη μέγιστή της τιμή Δ΄ΟΑ΄ = 90° η διαθλώμενη ακτίνα ΟΔ΄ (σχ. 10.3) θα έχει διεύθυνση παράλληλη με τη διαχωριστική (διαθλαστική) επιφάνεια.

Σε αυτή την περίπτωση η γωνία προσπτώσεως ΔΟΑ είναι εκείνη στην ο-



Σχ. 10.3.

ποία αντιστοιχεί γωνία διαθλάσεως Δ΄ΟΑ΄= 90° και τη λέμε οριακή (ή ορική) γωνία για τα δύο οπτικά μέσα (1) και (2). (ΔΟΑ = η οριακή γωνία).

Έχομε, λοιπόν, τον ακόλουθο ορισμό:

Όταν το φως περνάει από ένα μέσο οπτικά πυκνότερο σε άλλο οπτικά αραιότερο, η γωνία της προσπτώσεως, που σε αυτή αντιστοιχεί γωνία διαθλάσεως 90°, ονομάζεται οριακή γωνία για τα δύο οπτικά μέσα.

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$n_{\sigma\chi} = \frac{\eta\mu 90}{\eta\mu\pi_{o\rho}} \Rightarrow n_{\sigma\chi} = \frac{1}{\eta\mu\pi_{o\rho}} \Rightarrow \eta\mu\pi_{o\rho} = \frac{1}{n_{\sigma\chi}} \quad (1)$$

Δηλαδή: Το ημίτονο της οριακής γωνίας είναι ίσο με το αντίστροφο του δείκτη διαθλάσεως του οπτικά πυκνότερου ως προς το οπτικά αραιότερο.

Οι φωτεινές ακτίνες ΖΟ, ΗΟ κλπ. των οποίων οι γωνίες προσπτώσεως είναι μεγαλύτερες από την οριακή παθαίνουν μόνο ανάκλαση και ξαναγυρίζουν στο οπτικά πυκνότερο μέσο.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να γίνει μόνο, όταν φωτεινές ακτίνες πάνε να περάσουν από ένα οπτικά πυκνότερο σε ένα οπτικά αραιότερο μέσο και το λέμε ***ολική ανάκλαση του φωτός***.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΠΡΙΣΜΑ

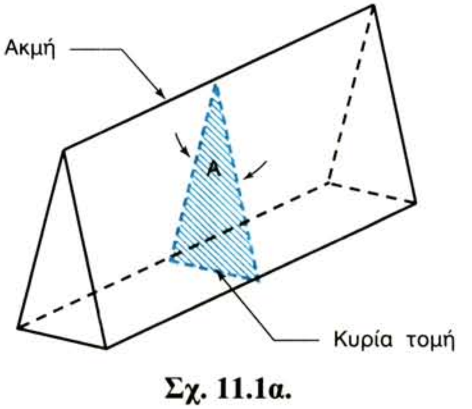
11.1 Εξισώσεις του πρίσματος (τύποι του πρίσματος).

11.1.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Πρίσμα στην οπτική ονομάζομε ένα ομογενές και ισότροπο διαφανές μέσο, που περιορίζεται κυρίως από δύο τεμνόμενες επίπεδες επιφάνειες (σχ. 11.1α).

Οι επιφάνειες αυτές ονομάζονται έδρες του πρίσματος. Συνήθως το πρίσμα έχει και τρίτη έδρα, παράλληλη προς την ακμή του, η οποία ονομάζεται βάση του πρίσματος.

Διαθλαστική γωνία Α του πρίσματος ονομάζεται η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται από τις δύο έδρες του πρίσματος. Ακμή του πρίσματος ονομάζεται η τομή των δύο εδρών του. Κύρια τομή του πρίσματος ονομάζεται κάθε τομή του πρίσματος η οποία γίνεται από επίπεδο κάθετο στην ακμή του.



Σχ. 11.1α.

Σημείωση:

Στα παρακάτω θα εξετάσομε τα πρίσματα με τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1) Οι προσπίπτουσες στο πρίσμα ακτίνες βρίσκονται σε κύρια τομή πρίσματος.

2) Το φως που χρησιμοποιούμε είναι μονοχρωματικό, γιατί αν πάνω στο πρίσμα πέσει λευκό φως, αυτό, καθώς περνάει μέσα από το πρίσμα, αναλύεται σε πολλά απλά χρώματα.

11.1.2 Διατύπωση των εξισώσεων του πρίσματος.

Το σχήμα 11.1β δείχνει μια κύρια τομή πρίσματος, που έχει διαθλαστική γωνία Α και σχετικό δείκτη διαθλάσεως ως προς το περιβάλλον του n.

Μία φωτεινή ακτίνα ΖΗ διαθλάται στα σημεία Η και Θ και βγαίνει από το πρίσμα. Γι' αυτές τις δύο διαθλάσεις ισχύουν οι εξισώσεις:

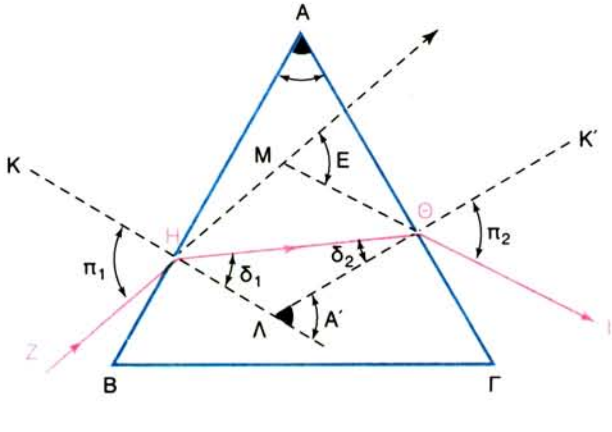
$$\eta\mu\pi_1 = n \cdot \eta\mu\delta_1 \quad \kappa\alpha\iota \quad \eta\mu\pi_2 = n \cdot \eta\mu\delta_2$$

Οι δύο κάθετες στις έδρες του πρίσματος ΚΛ και Κ΄Λ σχηματίζουν την οξεία γωνία Α΄, που είναι ίση με τη διαθλαστική γωνία Α του πρίσματος (Α΄ = Α). Επειδή η γωνία Α΄ είναι εξωτερική γωνία του τριγώνου ΛΗΘ, έχομε τη σχέση:

$$A' = \delta_1 + \delta_2 \qquad \acute{\eta} \qquad A = \delta_1 + \delta_2$$

Η γωνία Ε που σχηματίζουν οι προεκτάσεις της προσπίπτουσας ακτίνας ΖΗ και της εξερχόμενης ΘΙ ονομάζεται γωνία εκτροπής και επειδή είναι εξωτερική γωνία του τριγώνου ΗΜΘ, έχομε τη σχέση:

$$E = (\pi_1 - \delta_1) + (\pi_2 - \delta_2) \quad \acute{\eta} \quad E = \pi_1 + \pi_2 - (\delta_1 + \delta_2)$$



Σχ. 11.1β.

Άρα $$E = \pi_1 + \pi_2 - A$$

Από τα παραπάνω συνάγεται το συμπέρασμα:

Όταν μία φωτεινή ακτίνα περνάει μέσα από πρίσμα, η ακτίνα παθαίνει δύο διαθλάσεις και ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\eta\mu\pi_1 = n \cdot \eta\mu\delta_1 \quad (1), \qquad \eta\mu\pi_2 = n \cdot \eta\mu\delta_2 \qquad (2)$$

$$A = \delta_1 + \delta_2 \quad (3) \quad \text{και} \quad E = \pi_1 + \pi_2 - A \qquad (4)$$

Οι εξισώσεις αυτές είναι οι εξισώσεις του πρίσματος.

11.2 Μεταβολές της γωνίας εκτροπής.

11.2.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Οι εξισώσεις του πρίσματος δείχνουν ότι η γωνία εκτροπής Ε εξαρτάται:

1) Από το δείκτη διαθλάσεως n της ύλης του πρίσματος ως προς το περιβάλλον του.

2) Από τη διαθλαστική γωνία Α του πρίσματος και

3) από τη γωνία προσπτώσεως π_1.

11.2.2 Μεταβολή της γωνίας εκτροπής με το δείκτη διαθλάσεως.

Αν η Α και η π_1 διατηρούνται σταθερές τότε η γωνία εκτροπής (Ε) αυξάνει, όταν αυξάνει ο δείκτης διαθλάσεως (n) του πρίσματος.

Αυτό το αποδεικνύομε με το πολύπρισμα.

Το πολύπρισμα αποτελείται από πρίσματα τα οποία έχουν την ίδια διαθλαστική γωνία (Α = σταθερή), διαφορετικούς όμως δείκτες διαθλάσεως ($n_1<n_2<n_1$) (σχ. 11.2α).

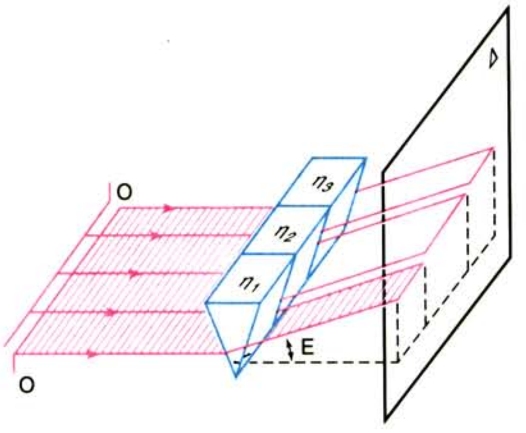
Αν στο πολύπρισμα πέφτει λεπτή παράλληλη μονοχρωματική δέσμη (π_1 = σταθερή) τότε στο πέτασμα Δ παρατηρούμε ότι η γωνία εκτροπής (Ε) αυξάνει, όταν αυξάνει ο δείκτης διαθλάσεως (n) του πρίσματος.

11.2.3 Μεταβολή της γωνίας εκτροπής με τη διαθλαστική γωνία.

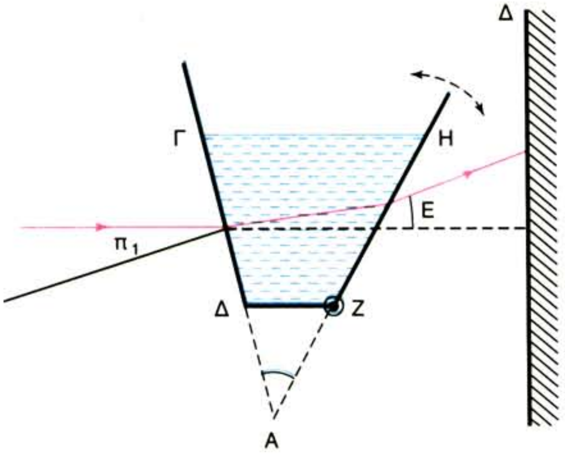
Αν η π_1 και ο δείκτης διαθλάσεως n διατηρούνται σταθερά, τότε η γωνία εκτροπής (Ε) αυξάνει όταν αυξάνει η διαθλαστική γωνία (Α) του πρίσματος.

Αυτό το αποδεικνύομε με ένα πρίσμα (σχ. 11.2β) που αποτελείται από ένα δοχείο με διαφανή τοιχώματα το οποίο περιέχει υγρό.

Η έδρα ΖΗ του δοχείου μπορεί να στρέφεται γύρω από τον Ζ, ώστε να



Σχ. 11.2α.



Σχ. 11.2β.

μικραίνει ή να μεγαλώνει με την περιστροφή η διαθλαστική γωνία Α του πρίσματος.

Αυξάνοντας τη γωνία Α διαπιστώνομε με τη βοήθεια του πετάσματος Δ ότι αυξάνει και η γωνία εκτροπής.

Σημείωση:

Αν συνεχιστεί η αύξηση της διαθλαστικής γωνίας (Α), έρχεται στιγμή που η φωτεινή δέσμη δεν βγαίνει από το πρίσμα, αλλά πάνω στην έδρα ΖΗ παθαίνει ολική ανάκλαση.

11.2.4 Μεταβολή της γωνίας εκτροπής όταν μεταβάλλεται η γωνία προσπτώσεως.

Όταν μεταβάλλεται η γωνία προσπτώσεως μεταβάλλεται και η γωνία εκτροπής.

Το τριγωνικό πρίσμα (σχ. 11.2γ) μπορεί να στρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα που περνάει από την ακμή του. Μία λεπτή οριζόντια δέσμη προσπίπτει στη μια έδρα του πρίσματος και καταλήγει σε κατακόρυφο πέτασμα.

Περιστρέφοντας το πρίσμα γύρω από την ακμή Α, έτσι ώστε να αυξάνεται συνεχώς η γωνία προσπτώσεως της ακτίνας διαπιστώνομε τα εξής:

1) Ενώ αυξάνεται συνεχώς η γωνία προσπτώσεως της ακτίνας στο πρίσμα, η γωνία εκτροπής ελαττώνεται μέχρι μία ορισμένη τιμή και στη συνέχεια αυξάνεται.

Η θέση του πρίσματος για την οποία η εκτροπή είναι ελάχιστη ονομάζεται θέση ελάχιστης εκτροπής.

2) Στη θέση της ελάχιστης εκτροπής (σχ. 11.2δ) ισχύει:

$$\pi_1 = \pi_2 \qquad (1)$$

Επομένως και η σχέση:

$$\delta_1 = \delta_2 \qquad (2)$$

Προσοχή:

Έχομε:

$$A = \delta_1 + \delta_2 \quad (3) \quad \text{και} \quad E = \pi_1 + \pi_2 - A \qquad (4)$$

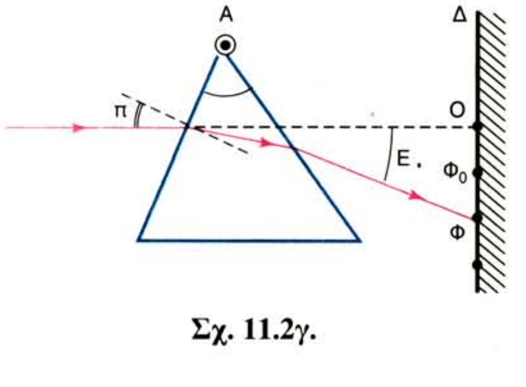
Από τις σχέσεις (1), (2), (3) και (4) προκύπτουν οι τύποι:

$$A = 2\delta_1 \quad (5), \qquad E = 2\pi_1 - A \qquad (6)$$

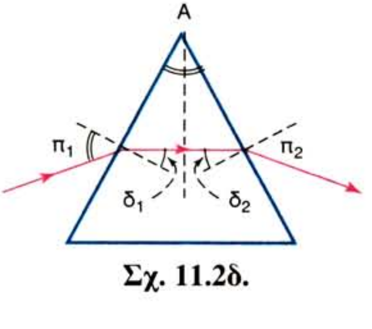
Γενικά για τη θέση της ελάχιστης εκτροπής ισχύουν οι σχέσεις:

$$\pi_1 = \pi_2, \quad \delta_1 = \delta_2, \quad \eta\mu\pi_1 = n \cdot \eta\mu\delta_1$$

$$A = 2\delta_1 \quad \text{και} \quad E_{\varepsilon\lambda} = 2\pi_1 - A$$



Σχ. 11.2γ.



Σχ. 11.2δ.

Σημείωση:

Από την ισότητα $δ_1 = δ_2$ προκύπτει ότι όταν έχομε ελάχιστη εκτροπή, το τμήμα της ακτίνας που βρίσκεται μέσα στο πρίσμα έχει διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο που διχοτομεί τη δίεδρη γωνία του πρίσματος (σχ. 11.2δ).

11.3 Συνθήκη για να βγαίνει φωτεινή ακτίνα από τη δεύτερη έδρα πρίσματος.

Η συνθήκη για να βγαίνει μία φωτεινή ακτίνα από τη δεύτερη έδρα πρίσματος ορίζει τα εξής:

Η φωτεινή ακτίνα βγαίνει από το πρίσμα, για κάθε τιμή της γωνίας προσπτώσεως (π), όταν η διαθλαστική γωνία του (Α) είναι μικρότερη ή ίση με το διπλάσιο της οριακής γωνίας $δ_{ορ}$. Δηλαδή:

$$A \leq 2δ_{ορ} \quad \text{(συνθήκη για την έξοδο ακτίνας)}$$

11.4 Λεπτά πρίσματα (τύποι των λεπτών πρισμάτων).

Αν η διαθλαστική γωνία Α του πρίσματος και η γωνία προσπτώσεως $π_1$ είναι πολύ μικρές (μικρότερες των 5^o), τότε και οι γωνίες $π_2$, $δ_1$ και $δ_2$ θα είναι επίσης πολύ μικρές.

Στην περίπτωση αυτή μπορούμε αντί για τα ημίτονα των γωνιών να πάρομε τις ίδιες τις γωνίες μετρημένες σε ακτίνια, οπότε οι τύποι των πρισμάτων γράφονται:

$$π_1 = n \cdot δ_1 \quad (1) \qquad π_2 = n \cdot δ_2 \quad (2), \qquad δ_1 + δ_2 = A \qquad (3) \qquad \text{και}$$

$$E = π_1 + π_2 - A = n \cdot δ_1 + n \cdot δ_2 - A = n\,(δ_1 + δ_2) - A$$

$$E = n{\cdot}A - A, \qquad E = A\,(n-1) \qquad (4)$$

Οι σχέσεις (1), (2), (3) και (4) λέγονται τύποι των λεπτών πρισμάτων.

Από τον τύπο (4) προκύπτει ότι στα λεπτά πρίσματα η γωνία εκτροπής Ε είναι ανεξάρτητη από τη γωνία προσπτώσεως ($π_1$), αλλά εξαρτάται μόνο από το δείκτη διαθλάσεως n και τη διαθλαστική γωνία Α του πρίσματος.

11.5 Πρίσματα ολικής ανακλάσεως.

Τα πρίσματα ολικής ανακλάσεως είναι γυάλινα πρίσματα, που η κύρια τομή τους είναι ορθογώνιο ισοσκελές τρίγωνο.

Η λειτουργία αυτών των πρισμάτων στηρίζεται στο φαινόμενο της ολικής ανακλάσεως και κατασκευάζονται από γυαλί για το οποίο η οριακή γωνία ως προς τον αέρα είναι περίπου 42°.

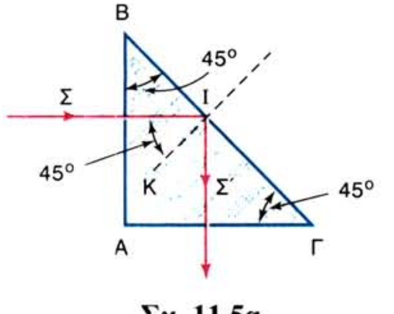
Στο σχήμα 11.5α φαίνεται η πορεία που ακολουθεί μία φωτεινή ακτίνα Σ η οποία προσπίπτει κάθετα στην κάθετη έδρα ΑΒ του πρίσματος. Αυτή εισέρχεται στο πρίσμα χωρίς να διαθλασθεί και προσπίπτει στην υποτείνουσα υπό γωνία ΣΙΚ = 45°. Επειδή η γωνία ΣΙΚ είναι μεγαλύτερη των 42° γι' αυτό η ακτίνα ΣΙ ανακλάται ολικά στην υποτείνουσα και ακολουθεί την πορεία ΙΣ΄ που είναι κάθετη στην έδρα ΑΓ. Αφού η ΙΣ΄ προσπίπτει κάθετα στην ΑΓ εξέρχεται από το πρίσμα χωρίς να διαθλασθεί.

Το σχήμα 11.5β δείχνει την πορεία παραλλήλων ακτίνων 1, 2, 3 που προσπίπτουν κάθετα στην κάθετη έδρα ΑΒ του πρίσματος. Αυτές εξέρχονται κάθετα από την άλλη κάθετη έδρα ΑΓ του πρίσματος.

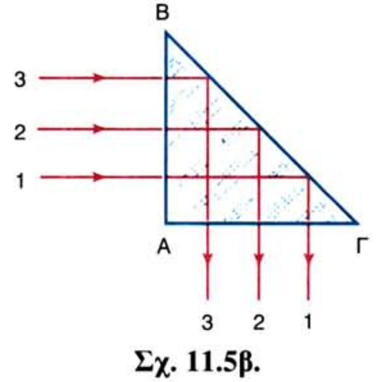
Δηλαδή η δέσμη των παραλλήλων ακτίνων 1, 2, 3 στην περίπτωση αυτή εκτρέπεται κατά 90° σε σχέση με την αρχική της διεύθυνση.

Το σχήμα 11.5γ δείχνει το ίδιο πρίσμα, που σε αυτή την περίπτωση με δύο ολικές ανακλάσεις προκαλείται εκτροπή των ακτίνων κατά 180° και αναστροφή του ειδώλου.

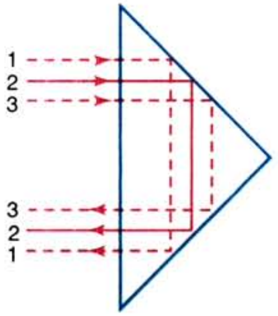
Στο σχήμα 11.5δ φαίνεται η περίπτωση που χρησιμοποιούμε το πρίσμα



Σχ. 11.5α.



Σχ. 11.5β.



Σχ. 11.5γ.

Σχ. 11.5δ.

της ολικής ανακλάσεως για να κάνει αναστροφή του ειδώλου, χωρίς όμως να αλλάζει την κατεύθυνση των φωτεινών ακτίνων.

Τα πρίσματα ολικής ανακλάσεως χρησιμοποιούνται σε πολλά οπτικά όργανα (τηλεσκόπια, περισκόπια κ.ά.) γιατί παρέχουν τη δυνατότητα αναστροφής ειδώλων.

11.6 Ανάλυση και ανασύνθεση του λευκού φωτός.

11.6.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Η ακτινοβολία μιας συχνότητας ονομάζεται απλή ακτινοβολία, ενώ η ακτινοβολία που αποτελείται από δύο ή περισσότερες απλές ακτινοβολίες ονομάζεται σύνθετη ακτινοβολία.

Η ταχύτητα διαδόσεως όλων των ακτινοβολιών στο κενό είναι η ίδια και ίση περίπου με $3 \cdot 10^8$ m/s $= c_o$.

Οι διάφορες ακτινοβολίες στο ίδιο υλικό μέσο διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα.

Μία ακτινοβολία σε διαφορετικά μέσα διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα.

Η αίσθηση του χρώματος του φωτός εξαρτάται από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (του φωτός) που το προκαλεί. Συγκεκριμένα κάθε ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος αντιστοιχεί σε φως ορισμένου χρώματος.

Για παράδειγμα ακτινοβολία με μήκος κύματος $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m αντιστοιχεί στο ερυθρό χρώμα, με μήκος κύματος $0{,}6 \cdot 10^{-6}$ m αντιστοιχεί στο κίτρινο, με μήκος κύματος $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ m στο ιώδες κλπ.

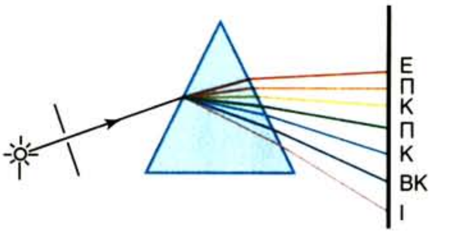
Η ακτινοβολία που αποτελείται από όλες τις ακτινοβολίες που τα μήκη κύματός τους περιλαμβάνονται μεταξύ $0{,}4 \cdot 10^{-6}$ m και $0{,}75 \cdot 10^{-6}$ m αντιστοιχεί στο λευκό φως.

Προσοχή:

Το λευκό φως είναι σύνθετη ακτινοβολία, δηλαδή αποτελείται από πολλές ακτινοβολίες (ακτίνες διαφόρων χρωμάτων) και σε κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί ιδιαίτερος δείκτης διαθλάσεως, όταν αυτές εισέρχονται από τον αέρα στο ίδιο οπτικό μέσο.

11.6.2 Ανάλυση (διασκεδασμός) του λευκού φωτός.

Μία λεπτή δέσμη λευκού φωτός που παράγεται από ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως προσπίπτει στη μία έδρα ενός τριγωνικού πρίσματος. Αν πίσω από την άλλη έδρα του πρίσματος τοποθετήσομε ένα διάφραγμα θα παρα-



Σχ. 11.6α.

τηρήσομε στο διάφραγμα μία έγχρωμη φωτεινή ταινία (σχ. 11.6α).

Η ταινία αυτή αποτελείται από τα εξής χρώματα: ερυθρό, πορτοκαλόχρουν, κίτρινο, πράσινο, κυανό, βαθύ κυανό και ιώδες. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ανάλυση του λευκού φωτός. Δηλαδή ανάλυση του λευκού φωτός ονομάζεται ο διαχωρισμός (διασκεδασμός) μιας δέσμης λευκού φωτός στις ακτινοβολίες από τις οποίες αποτελείται όταν αυτή εισέρχεται από ένα υλικό μέσο σε άλλο.

Η έγχρωμη ταινία που σχηματίζεται στο διάφραγμα ονομάζεται φάσμα του λευκού φωτός ή ορατό φάσμα. Δηλαδή φάσμα του λευκού φωτός ονομάζομε το σύνολο των μηκών κύματος (χρωμάτων) των ακτινοβολιών από τις οποίες αποτελείται το λευκό φως.

Τα πιο πάνω χρώματα (χρώματα της ίριδας) δεν είναι πλήρως διαχωρισμένα και ανάμεσά τους υπάρχουν πολλές αποχρώσεις.

Η ανάλυση του φωτός με πρίσμα εξηγείται ως εξής:

Μία δέσμη λευκού φωτός αποτελείται από ακτίνες όλων των χρωμάτων.

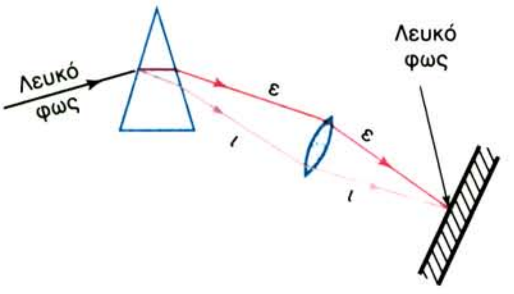
Στο κενό όλες οι ακτίνες μιας δέσμης λευκού φωτός ανεξάρτητα από το χρώμα τους (από το μήκος κύματός τους) διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα ($3 \cdot 10^8$ m/sec), ενώ εντός πρίσματος (π.χ. γυάλινου) διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα.

Επομένως ο δείκτης διαθλάσεως του γυαλιού θα είναι διαφορετικός για τα διάφορα χρώματα της δέσμης του λευκού φωτός.

Αφού ο δείκτης διαθλάσεως του γυαλιού είναι διαφορετικός για τις ακτίνες διαφορετικών χρωμάτων οι ακτίνες του λευκού φωτός περνώντας από το πρίσμα παθαίνουν διαφορετικές εκτροπές, συνεπώς διαχωρίζονται.

11.6.3 Ανασύνθεση του λευκού φωτός.

Αν συγκεντρώσομε τις ακτίνες των διαφόρων χρωμάτων στις οποίες αναλύθηκε το λευκό φως, για παράδειγμα με ένα συγκλίνοντα φακό (σχ. 11.6β), παρατηρούμε ότι αναπαράγεται το λευκό φως, δηλαδή γίνεται ανασύνθεση του λευκού φωτός.

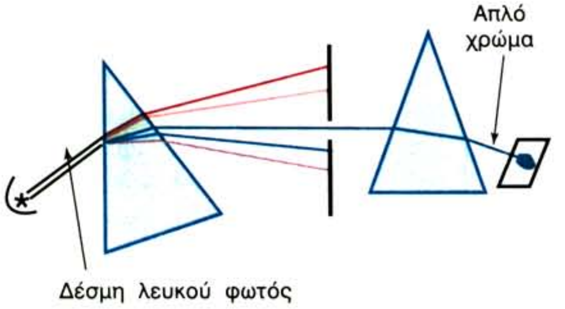


Σχ. 11.6β.

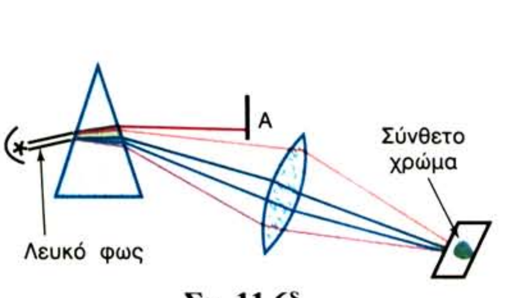
11.6.4 Συμπληρωματικά χρώματα.

Με τη διάταξη του σχήματος 11.6γ αποκόπτομε όλα τα χρώματα του φάσματος του λευκού φωτός εκτός από το πράσινο.

Με τη διάταξη του σχήματος 11.6δ αποκόπτομε μόνο το κόκκινο χρώμα από το φάσμα του λευκού φωτός και συγκεντρώνομε τα υπόλοιπα με ένα φακό, οπότε προκύπτει ένα χρώμα με πράσινη απόχρωση. Αυτό όμως διαφέρει από το απλό (μονοχρωματικό) πράσινο που πήραμε με τη διάταξη του σχήματος 11.6γ.



Σχ. 11.6γ.



Σχ. 11.6δ.

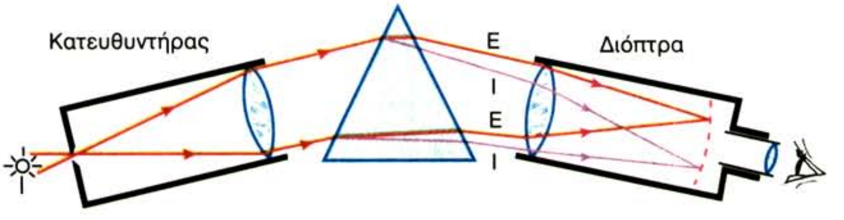
Αν τώρα από τη διάταξη του σχήματος 11.6δ αφαιρέσομε το διάφραγμα Α και αφήσομε να προστεθεί το κόκκινο που είχαμε κόψει με το πράσινο που είχε προκύψει από την ανάμειξη των υπολοίπων χρωμάτων, θα προκύψει λευκό φως. Δύο τέτοια χρώματα που, όταν αναμειγνύονται, δίνουν λευκό χρώμα, λέγονται συμπληρωματικά χρώματα. Είναι φανερό ότι για να παραχθεί λευκό φως, θα πρέπει τα χρώματα που αναμειγνύονται να έχουν συνολικά όλα τα χρώματα που περιέχει το λευκό φως. Αυτό σημαίνει ότι τα συμπληρωματικά χρώματα δεν μπορεί να είναι και τα δύο απλά (μονοχρωματικά). Πρέπει τουλάχιστον το ένα ή και τα δύο να είναι σύνθετα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ

ΦΑΣΜΑΤΑ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΩΣ

12.1 Φασματοσκόπιο.

Το φασματοσκόπιο είναι όργανο με το οποίο μπορούμε να μελετήσομε το φάσμα μιας ακτινοβολίας.



Σχ. 12.1.

Τα κύρια μέρη και η αρχή λειτουργίας ενός φασματοσκοπίου φαίνονται στο σχήμα 12.1.

12.2 Είδη φασμάτων.

Τα φάσματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στα φάσματα εκπομπής και στα φάσματα απορροφήσεως.

12.2.1 Φάσματα εκπομπής.

Φάσμα εκπομπής ονομάζεται το φάσμα το οποίο δίνουν τα διάφορα σώματα (στερεά, υγρά, αέρια ή ατμοί) όταν μετατρέπονται σε φωτεινές πηγές.

Τα φάσματα εκπομπής διακρίνονται σε συνεχή, γραμμικά, ταινιωτά.

α) Συνεχή φάσματα εκπομπής.

Συνεχές φάσμα εκπομπής ονομάζεται το φάσμα που αποτελείται από μία συνεχή σειρά ορατών ακτινοβολιών χωρίς καμιά διακοπή από σκοτεινές γραμμές.

Τα διάπυρα στερεά δίνουν συνεχή φάσματα εκπομπής. Για παράδειγμα το διάπυρο σύρμα του ηλεκτρικού λαμπτήρα, το ηλεκτρικό τόξο, η φλόγα ενός κεριού δίνουν συνεχή φάσματα εκπομπής.

Επίσης τα διάπυρα υγρά δίνουν συνεχή φάσματα εκπομπής. Για παράδειγμα τα διάπυρα μέταλλα σε υγρή κατάσταση, όπως χαλκός, σίδηρος, λευκόχρυσος κλπ. δίνουν συνεχή φάσματα εκπομπής.

Παρατηρήσεις:

1) Επειδή τα συνεχή φάσματα, τα οποία εκπέμπονται από τα διάφορα διάπυρα στερεά και υγρά δεν διαφέρουν μεταξύ τους, το συνεχές φάσμα ενός διάπυρου στερεού ή υγρού δεν μπορεί να μας πληροφορήσει για τη φύση του, δηλαδή αν το σώμα που δίνει το συνεχές φάσμα αποτελείται από σίδηρο, χαλκό, άνθρακα κλπ.

2) Η κατανομή της ενέργειας σε ένα συνεχές φάσμα εκπομπής εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το σώμα που το δίνει.

Επομένως από το συνεχές φάσμα εκπομπής ενός σώματος μπορούμε να προσδιορίσομε με ικανοποιητική προσέγγιση τη θερμοκρασία του.

Αν ένα συνεχές φάσμα εκπομπής αποτελείται μόνο από την ερυθρά ακτινοβολία τότε η θερμοκρασία του σώματος που το δίνει είναι περίπου 500°C.

Γενικά όσο αυξάνεται η θερμοκρασία σώματος εμφανίζονται όλες οι περιοχές του φάσματός του διαδοχικά από την ερυθρά προς την ιώδη.

β) Γραμμικά φάσματα εκπομπής.

Γραμμικό φάσμα εκπομπής ονομάζεται το φάσμα εκπομπής το οποίο αποτελείται από διακριτές φωτεινές γραμμές ορισμένων χρωμάτων.

Γραμμικά φάσματα εκπομπής δίνουν, όταν διεγείρονται, τα αέρια, οι ατμοί των υγρών και οι ατμοί των στερεών σωμάτων.

Τα σώματα που στη συνηθισμένη θερμοκρασία είναι αέρια (π.χ. το υδρογόνο, το οξυγόνο, το ήλιο) τα αναγκάζομε να γίνουν φωτεινές πηγές με το σωλήνα Geissler (σχ. 12.2α). Αυτός είναι γυάλινος σωλήνας, που στις δύο άκρες του έχει δύο ηλεκτρόδια και περιέχει αέριο με μικρή πίεση. Όταν μέσα στο σωλήνα παράγονται ηλεκτρικές εκκενώσεις, τότε το αέριο εκπέμπει φως.

Χρησιμοποιώντας το υδρογόνο βρίσκομε ότι το φάσμα εκπομπής του αποτελείται μόνο από τέσσερις φωτεινές γραμμές, που αντιστοιχούν σε τέσσερις ορισμένες ακτινοβολίες.

Σχ. 12.2α.

Αυτό το φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικό του υδρογόνου.

Όταν θέλομε να πάρομε το γραμμικό φάσμα χημικών στοιχείων, τα οποία, σε συνήθεις συνθήκες, είναι στερεά, τα μετατρέπομε σε ατμούς θερμαίνοντάς τα σε υψηλή θερμοκρασία.

Έτσι αν θερμάνομε μεταλλικό νάτριο (ή και χλωριούχο νάτριο) με φλόγα λύχνου θα παρατηρήσομε εκπομπή έντονου κίτρινου φωτός. Αυτό το φως οφείλεται στη φωτοβολία των ατμών του νατρίου. Το φάσμα αυτού του φωτός αποτελείται από μία κίτρινη γραμμή (ακριβέστερα, από δύο κίτρινες γραμμές, οι οποίες, όμως, βρίσκονται τόσο κοντά η μία με την άλλη, ώστε να φαίνονται σαν μία).

Τα μήκη κύματος των δύο ακτινοβολιών που υπάρχουν στο φάσμα εκπομπής των ατμών νατρίου είναι: $\lambda_1 = 5896$ Å, $\lambda_2 = 5890$ Å. Αυτό το φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικό των ατμών του νατρίου.

Προσοχή:

Ενώ τα συνεχή φάσματα εκπομπής δεν παρέχουν, όπως είδαμε, καμιά πληροφορία για τη φύση του υλικού που τα δίνει, αντίθετα, τα γραμμικά φάσματα είναι χαρακτηριστικά του αερίου ή του ατμού που τα παρέχουν. Έτσι η παρουσία της κίτρινης γραμμής του νατρίου σε ένα φάσμα σημαίνει την ύπαρξη νατρίου στην πηγή που το δίνει.

γ) Ταινιωτά φάσματα εκπομπής.

Ταινιωτό φάσμα εκπομπής ονομάζεται το φάσμα εκπομπής που αποτελείται από μεγάλο αριθμό φωτεινών γραμμών που βρίσκονται η μία κοντά στην άλλη και δίνουν την εντύπωση ταινίας.

Ταινιωτά φάσματα εκπομπής δίνουν τα αέρια που βρίσκονται σε μοριακή κατάσταση όταν διεγείρονται.

Η μορφή των ταινιωτών φασμάτων είναι χαρακτηριστική της φύσεως του αερίου.

12.2.2 Φάσματα απορροφήσεως.

Φάσματα απορροφήσεως είναι τα φάσματα που παίρνομε, όταν μεταξύ μιας φωτεινής πηγής λευκού φωτός και ενός φασματοσκοπίου παρεμβάλομε ένα διαφανές σώμα.

α) Γραμμικά φάσματα απορροφήσεως.

Γραμμικό φάσμα απορροφήσεως είναι το συνεχές φάσμα του λευκού φωτός, στο οποίο υπάρχουν διακριτές σκοτεινές γραμμές.

Γραμμικά φάσματα απορροφήσεως δίνουν τα αέρια ή οι ατμοί, όταν το λευκό φως περνά μέσα από αυτά.

Αν μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π (σχ. 12.2β), η οποία εκπέμπει λευκό φως και της σχισμής Σ του φασματοσκοπίου παρεμβάλομε κλειστό γυάλινο δοχείο, μέσα στο οποίο υπάρχει μικρή ποσότητα νατρίου και θερμάνομε αυτό ελαφρώς, το νάτριο εξατμίζεται και οι ατμοί του νατρίου απορροφούν από το λευκό φως μόνο τις κίτρινες ακτίνες του.

Εξαιτίας αυτού στο συνεχές φάσμα του λαμπτήρα θα παρατηρήσομε μία σκοτεινή γραμμή στη θέση, ακριβώς εκείνη, στην οποία θα εμφανιζόταν η κίτρινη γραμμή του φάσματος εκπομπής του νατρίου.

β) Συνεχή φάσματα απορροφήσεως.

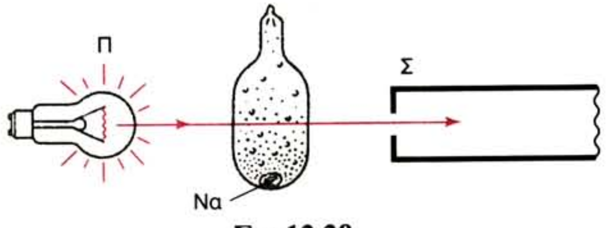
Συνεχές φάσμα απορροφήσεως είναι μία έγχρωμη ταινία (φάσμα του λευκού φωτός) η οποία διακόπτεται από σκοτεινές περιοχές.

Συνεχή φάσματα απορροφήσεως δίνουν τα διαφανή στερεά και υγρά, όταν το λευκό φως περνάει μέσα από αυτά. Αν φωτίσομε τη σχισμή του κατευθυντήρα ενός φασματοσκοπίου με λευκό φως, το οποίο εκπέμπει π.χ. ο ηλεκτρικός λαμπτήρας Π (σχ. 12.2γ), θα πάρομε ένα συνεχές φάσμα.

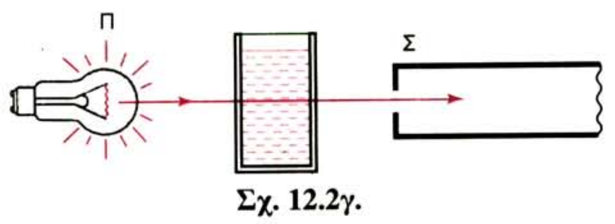
Αν τώρα παρεμβάλομε μία ερυθρή πλάκα, αυτή αφήνει να διέλθουν από αυτή οι ερυθρές ακτίνες ενώ τις άλλες τις απορροφάει.

Άρα, στο φάσμα θα παρουσιάζονται ευρείες σκοτεινές περιοχές πλην της περιοχής του ερυθρού, η οποία θα εξακολουθεί να υπάρχει, αφού οι ερυθρές ακτίνες δεν απορροφήθησαν από την ερυθρή πλάκα.

Αν μεταξύ του λαμπτήρα Π και της σχισμής Σ παρεμβάλομε γυάλινο δοχείο που περιέχει ένα διάλυμα, π.χ. αίματος στο νερό, τότε στο φάσμα παρουσιάζονται δύο ευρείες σκοτεινές περιοχές (μία στην περιοχή του πράσινου και μία στην περιοχή του κίτρινου). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνεύεται το αίμα.



Σχ. 12.2β.



Σχ. 12.2γ.

γ) Ταινιωτά φάσματα απορροφήσεως.

Ταινιωτό φάσμα απορροφήσεως είναι το φάσμα του λευκού φωτός διακοπτόμενο από σκοτεινές ζώνες (ταινίες). Ταινιωτά φάσματα απορροφήσεως δίνουν τα μοριακά αέρια και ορισμένα διαλύματα, όταν το λευκό φως περνάει μέσα από αυτά.

Προσοχή:

Όλα τα φάσματα απορροφήσεως, σε γενικές γραμμές, είναι χαρακτηριστικά των σωμάτων που τα προκαλούν.

12.3 Νόμος του Kirchhoff (Κίρχωφ).

Έχομε διαπιστώσει ότι:

1) Αν θερμάνομε μεταλλικό νάτριο (ή και χλωριούχο νάτριο) με φλόγα λύχνου θα παρατηρήσομε εκπομπή έντονου κίτρινου φωτός. Αυτό το φως οφείλεται στη φωτοβολία των ατμών του νατρίου. Το φάσμα αυτού του φωτός αποτελείται από μία κίτρινη γραμμή (ακριβέστερα, από δύο κίτρινες γραμμές, οι οποίες, όμως βρίσκονται τόσο κοντά η μία με την άλλη, ώστε να φαίνονται σαν μία).

2) Αν μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π (σχ. 12.2β) η οποία εκπέμπει λευκό φως και της σχισμής Σ του φασματοσκοπίου παρεμβάλομε κλειστό γυάλινο δοχείο, μέσα στο οποίο υπάρχει ποσότητα νατρίου και θερμάνομε αυτό ελαφρώς, το νάτριο εξατμίζεται και οι ατμοί του νατρίου απορροφούν από το λευκό φως μόνο τις κίτρινες ακτίνες.

Από αυτά προκύπτει ότι:

Οι ατμοί νατρίου απορροφούν εκείνες τις ακτίνες τις οποίες δύνανται να εκπέμπουν (δηλαδή απορροφούν κίτρινες και κίτρινες εκπέμπουν).

Το φαινόμενο αυτό ισχύει, γενικά, για όλα τα αέρια και τους ατμούς, ονομάζεται αντιστροφή των φασματικών γραμμών και διατυπώνεται με την ονομασία νόμος του Kirchhoff ως εξής:

Οι σκοτεινές γραμμές του φάσματος απορροφήσεως ενός αερίου ή ατμού βρίσκονται ακριβώς, σε εκείνες τις θέσεις, στις οποίες βρίσκονται οι αντίστοιχες φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής του. Ή με άλλα λόγια: ***Κάθε αέριο ή ατμός απορροφάει εκείνες τις φασματικές γραμμές, τις οποίες μπορεί και να εκπέμψει, όταν διεγερθεί σε ακτινοβολία.***

12.4 Το χρώμα των ετερόφωτων σωμάτων.

12.4.1 Το χρώμα των αδιαφανών σωμάτων.

Το χρώμα ενός αδιαφανούς σώματος εξαρτάται από τις ακτίνες που διαχέονται από την επιφάνεια του σώματος. Οι ακτίνες που διαχέονται από την επιφάνεια σώματος όταν εισέλθουν στο μάτι μας, καθορίζουν το χρώμα της επιφάνειάς του. Ένα σώμα, π.χ. ένα ύφασμα που φαίνεται κόκκινο, απορροφάει όλες τις ακτίνες εκτός από τις κόκκινες τις οποίες η επιφάνειά του τις διαχέει.

Αν ένα κόκκινο ύφασμα το φωτίσομε με κίτρινο, πράσινο κλπ. φως θα φαίνεται μελανό γιατί τα χρώματα αυτά απορροφώνται από το ύφασμα αυτό.

Αν ένα ύφασμα το φωτίσομε με λευκό φως και αυτό φαίνεται κίτρινο, σημαίνει ότι το ύφασμα απορροφάει όλες τις ακτίνες του λευκού φωτός εκτός από τις κίτρινες τις οποίες διαχέει.

Σημείωση:

Ένα σώμα χαρακτηρίζεται σαν μελανό, όταν απορροφάει όλα τα χρώματα, χωρίς να διαχέει κανένα.

Ένα σώμα χαρακτηρίζεται σαν λευκό, όταν δεν απορροφάει κανένα χρώμα, αλλά διαχέει εξίσου όλα τα χρώματα.

Σαν φαιά χαρακτηρίζονται τα σώματα που απορροφούν ένα μέρος από όλα τα χρώματα, αλλά κατά το ίδιο ποσοστό.

12.4.2 Το χρώμα των διαφανών σωμάτων.

Το χρώμα ενός διαφανούς σώματος εξαρτάται από τις ακτινοβολίες που απορροφά το σώμα.

Αν ένα διαφανές σώμα απορροφάει όλες τις ακτινοβολίες εκτός από την κόκκινη, το σώμα θα έχει κόκκινο χρώμα. Ή με άλλα λόγια το χρώμα ενός διαφανούς σώματος εξαρτάται από το χρώμα των ακτίνων που διέρχονται (περνάνε) το σώμα.

Ένα τζάμι φαίνεται κόκκινο, γιατί από όλες τις ακτίνες του λευκού φωτός, το οποίο προσπίπτει σε αυτό, αφήνει να διέρχονται μόνο οι κόκκινες.

Στη φλόγα λύχνου θερμαίνομε νάτριο (ή χλωριούχο νάτριο), οπότε παρατηρούμε ότι εκπέμπεται έντονο κίτρινο φως. Αν, τώρα, παρεμβάλομε μεταξύ του λύχνου και των ματιών μας κόκκινη γυάλινη πλάκα, δεν βλέπομε το κίτρινο φως, γιατί η κόκκινη πλάκα απορροφάει το κίτρινο φως.

Τα παραπάνω ισχύουν και για το χρώμα τωύ διαφόρων εγχρώμων υγρών και διαλυμάτων.

Γενικές παρατηρήσεις:

1) Αν σώμα φωτισθεί με λευκό φως, επειδή η απορρόφηση των διαφόρων χρωμάτων από τα οποία αποτελείται γίνεται εκλεκτικά από το σώμα, γι' αυτό το σώμα μπορεί να φαίνεται χρωματισμένο με το χρώμα μείξεως των διερχομένων χρωμάτων (ακτίνων) (χρώμα από διαφάνεια) ή με το

χρώμα μείξεως των ακτίνων που διαχέονται από την επιφάνειά του (χρώμα από διάχυση). Επομένως ένα σώμα μπορεί να έχει ένα χρώμα από διαφάνεια και ένα άλλο από διάχυση. Για παράδειγμα ο χρυσός είναι πράσινος από διαφάνεια και κίτρινος από διάχυση.

2) Τα σώματα τα οποία είναι «άχροα» από διαφάνεια (γυαλί, νερό) επιτρέπουν τη δίοδο σχεδόν όλων των χρωμάτων του λευκού φωτός.

3) Φυσικό χρώμα σώματος είναι το χρώμα μείξεως των ακτίνων που διαχέονται από αυτό, όταν φωτισθεί με λευκό φως.

12.5 Υπεριώδεις και υπέρυθρες ακτινοβολίες.

12.5.1 Υπεριώδεις ακτίνες (υπεριώδης ακτινοβολία).

Υπεριώδεις ακτινοβολίες ονομάζονται οι ακτινοβολίες των οποίων τα μήκη κύματος περιλαμβάνονται μεταξύ 0,4 μ και 0,1 μ και είναι αόρατες. Οι υπεριώδεις ακτινοβολίες παρουσιάζουν τις παρακάτω ιδιότητες:

1) Προκαλούν χημικά φαινόμενα. (Όταν προσπίπτουν σε φωτογραφικές πλάκες προκαλούν αμαύρωσή τους. Μετατρέπουν το οξυγόνο σε όζον).

2) Προκαλούν φθορισμό ορισμένων ουσιών.

3) Προκαλούν ιονισμό (ιοντισμό) ορισμένων αερίων.

4) Έχουν βιολογικές δράσεις. Πολλά βακτηρίδια καταστρέφονται από τις υπεριώδεις ακτίνες (γι' αυτό χρησιμοποιούνται σε πολλές περιπτώσεις για αποστείρωση ουσιών). Προκαλούν μαύρισμα του δέρματος ή ακόμη και εγκαύματα. Προκαλούν στους επιφανειακούς ιστούς τη σύνθεση μιας ουσίας (ανάλογης προς τη βιταμίνη C) η οποία είναι αναγκαία στην ανάπτυξη του σκελετού.

5) Απορροφώνται από το κοινό γυαλί, ενώ δεν απορροφώνται από το χαλαζία.

Σημείωση:

Οι υπεριώδεις ακτίνες προσβάλλουν ιδιαιτέρως τα μάτια και γι' αυτό πρέπει κατά τις εργασίες με υπεριώδη ακτινοβολία να προφυλαγόμαστε με γυαλιά τα οποία απορροφάνε το υπεριώδες φως.

12.5.2 Υπέρυθρες ακτίνες (υπέρυθρη ακτινοβολία).

Υπέρυθρες ακτίνες ονομάζονται οι ακτίνες των οποίων τα μήκη κύματος περιλαμβάνονται μεταξύ 0,75 μ και 2 μ και είναι αόρατες.

Αυτές οι ακτίνες έχουν τις παρακάτω βασικές ιδιότητες:

1) Οποιαδήποτε ακτινοβολία, άρα και η υπέρυθρη, όταν απορροφάται

από τα διάφορα υλικά μετατρέπεται μέσα σε αυτά κυρίως σε εσωτερική ενέργεια.

2) Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες απορροφώνται σχεδόν εξ' ολοκλήρου από το γυαλί, το χαλαζία και το νερό, ενώ δεν απορροφώνται σχεδόν καθόλου από το ορυκτό χλωριούχο νάτριο (γι' αυτό κατά τη σπουδή των υπερύθρων ακτινοβολιών χρησιμοποιούνται πρίσματα και φακοί από ορυκτό χλωριούχο νάτριο).

3) Η απορρόφηση των υπερύθρων ακτίνων από την ομίχλη είναι πολύ μικρή. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη φωτογράφηση αντικειμένων διά μέσου της ομίχλης, αρκεί να χρησιμοποιηθούν ειδικές φωτογραφικές πλάκες, οι οποίες να είναι ευπαθείς στις υπέρυθρες ακτίνες.

Προσοχή:

Οι υπέρυθρες και οι υπεριώδεις ακτίνες έχουν όλες τις ιδιότητες των ορατών ακτίνων: ανακλώνται όταν προσπίπτουν σε κάτοπτρο, διαθλώνται όταν διέρχονται από φακό και αναλύονται σε δέσμες διαφόρων μηκών κύματος όταν διέλθουν από πρίσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΡΙΤΟ

ΦΑΚΟΙ

13.1 Γνώσεις στηρίξεως.

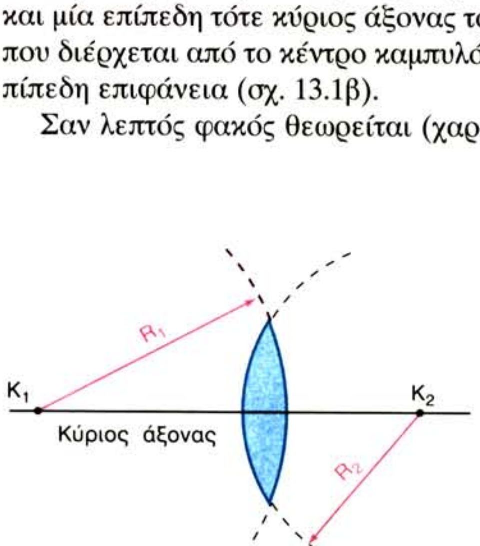
Φακός, ονομάζεται ένα διαφανές μέσο (συνήθως γυαλί), που περιορίζεται από δύο σφαιρικές επιφάνειες ή από μία σφαιρική και μία επίπεδη.

Κέντρα καμπυλότητας K_1, K_2 του φακού ονομάζονται τα κέντρα των δύο σφαιρών στις οποίες ανήκουν οι επιφάνειες του φακού (σχ. 13.1α). Ακτίνες καμπυλότητας R_1, R_2 του φακού ονομάζονται οι ακτίνες των δύο σφαιρών στις οποίες ανήκουν οι επιφάνειες του φακού.

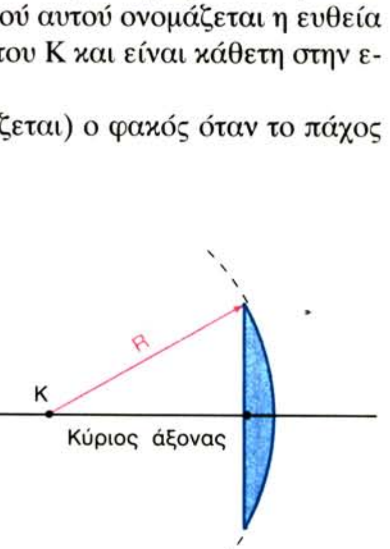
Κύριος άξονας (ή απλός άξονας ή οπτικός άξονας) φακού ονομάζεται η ευθεία K_1K_2 που περνάει από τα δύο κέντρα καμπυλότητας του φακού (σχ. 13.1α).

Στην περίπτωση που ο φακός περιορίζεται από μία σφαιρική επιφάνεια και μία επίπεδη τότε κύριος άξονας του φακού αυτού ονομάζεται η ευθεία που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητάς του Κ και είναι κάθετη στην επίπεδη επιφάνεια (σχ. 13.1β).

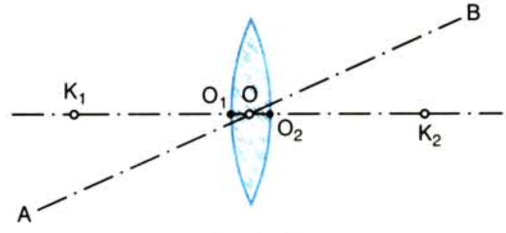
Σαν λεπτός φακός θεωρείται (χαρακτηρίζεται) ο φακός όταν το πάχος



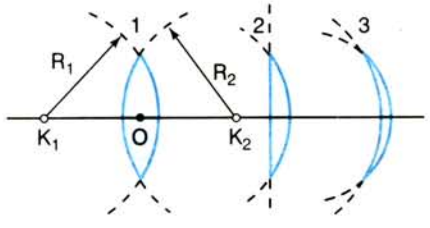
Σχ. 13.1α.



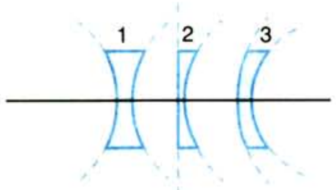
Σχ. 13.1β.



Σχ. 13.1γ.



Σχ. 13.2α.



Σχ. 13.2β.

του που μετριέται κατά μήκος του κύριου άξονα είναι πολύ μικρό σχετικά με το μήκος των ακτίνων καμπυλότητάς του, ώστε να μπορεί σε πρώτη προσέγγιση να θεωρείται αμελητέο.

Οπτικό κέντρο φακού: Ο κύριος άξονας του φακού τέμνει τις δύο σφαιρικές του επιφάνειες σε δύο σημεία O_1 και O_2 (σχ. 13.1γ).

Στους λεπτούς φακούς θεωρούμε ότι αυτά τα δύο σημεία συμπίπτουν σε ένα σημείο Ο του κύριου άξονα. Αυτό το σημείο ονομάζεται οπτικό κέντρο του φακού.

Γενικά οπτικό κέντρο λεπτού φακού ονομάζεται το σημείο στο οποίο ο κύριος άξονας τέμνει το φακό.

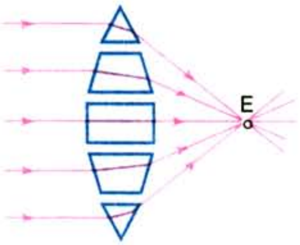
Δευτερεύοντα άξονα φακού ονομάζομε οποιαδήποτε ευθεία ΑΒ που περνάει από το οπτικό κέντρο του φακού (σχ. 13.1γ).

13.2 Είδη φακών.

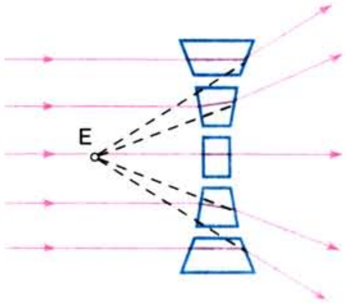
Όλοι οι φακοί μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες: στους συγκλίνοντες ή συγκεντρωτικούς φακούς και στους αποκλίνοντες ή αποκεντρικούς φακούς.

Συγκλίνοντες φακοί ονομάζονται οι φακοί που είναι παχύτεροι στη μέση και λεπτότεροι στις άκρες (σχ. 13.2α).

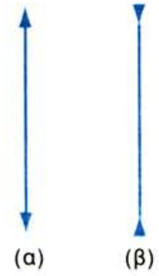
Οι φακοί αυτοί ονομάζονται συγκλίνοντες γιατί μεταβάλλουν σε συγκλίνουσα δέσμη μία παράλληλη δέσμη φωτεινών ακτίνων που πέφτει επάνω τους (σχ. 13.2γ).



Σχ. 13.2γ.



Σχ. 13.2δ.



Σχ. 13.2ε.

Αποκλίνοντες φακοί ονομάζονται οι φακοί που είναι λεπτότεροι στη μέση και παχύτεροι στις άκρες (σχ. 13.2β).

Οι φακοί αυτοί ονομάζονται αποκλίνοντες γιατί μεταβάλλουν σε αποκλίνουσα δέσμη μία παράλληλη δέσμη φωτεινών ακτίνων που πέφτει επάνω τους (σχ. 13.2δ).

Στα σχήματα οι συγκλίνοντες φακοί συμβολίζονται συνήθως με το σύμβολο που δείχνει το σχήμα 13.2ε (α) και οι αποκλίνοντες με το σύμβολο που δείχνει το σχήμα 13.2ε (β).

13.3 Συγκλίνοντες φακοί.

13.3.1 Λειτουργία συγκλινόντων φακών.

Για να κατανοήσομε τη λειτουργία των συγκλινόντων φακών, μπορούμε να θεωρήσομε ότι αποτελούνται από πολλά μικρά πρίσματα (σχ. 13.2γ).

Έστω ότι μία παράλληλη μονοχρωματική δέσμη, προσπίπτει στο φακό κατά τη διεύθυνση του κύριου άξονα (σχ. 13.2γ).

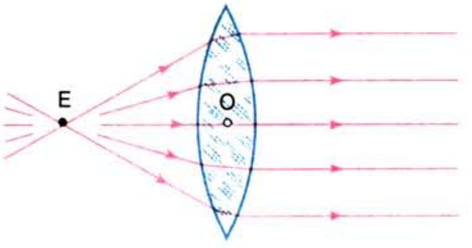
Οι ακτίνες της δέσμης διαθλώνται στα στοιχειώδη πρίσματα και επειδή (εξαιτίας του σφαιρικού σχήματος του φακού) η γωνία προσπτώσεως αυξάνεται προς τα άκρα του φακού, οι διάφορες ακτίνες εκτρέπονται κατά διαφορετικές γωνίες και συγκεντρώνονται σε ένα σημείο Ε.

Παρατήρηση:

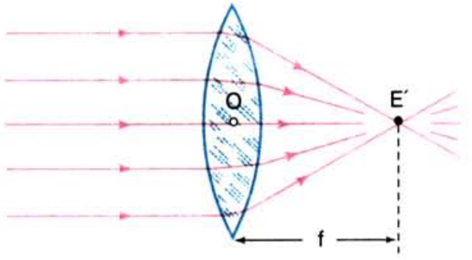
Το σχήμα 13.2δ παριστάνει την αντίστοιχη περίπτωση σε αποκλίνοντα φακό: Οι ακτίνες που προσπίπτουν στο φακό, διαθλώνται στα στοιχειώδη πρίσματα, αλλά βγαίνοντας από αυτά αποκλίνουν έτσι ώστε οι προεκτάσεις τους να συγκεντρώνονται, πάλι, σε ένα σημείο Ε.

13.3.2 Εστίες και εστιακή απόσταση συγκλίνοντα φακού.

Αν αφήσομε την αποκλίνουσα δέσμη (σχ. 13.3α) ακτίνων φωτός που ξε-



Σχ. 13.3α.



Σχ. 13.3β.

κινάει από ένα ορισμένο σημείο Ε του κύριου άξονα του συγκλίνοντα φακού να πέσει στο φακό, οι ακτίνες αυτές μετά την έξοδό τους είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα του φακού. Το σημείο Ε ονομάζεται κύρια εστία του συγκλίνοντα φακού. Η απόσταση ΟΕ της κύριας εστίας από το οπτικό κέντρο του φακού ονομάζεται κύρια εστιακή απόσταση του φακού (f). Αφήνομε μία δέσμη παραλλήλων (σχ. 13.3β) ακτίνων να πέσει παράλληλα προς τον κύριο άξονα ενός συγκλίνοντα φακού. Παρατηρούμε ότι οι ακτίνες μετά την έξοδό τους από το φακό συγκεντρώνονται σε ένα σημείο Ε΄, που βρίσκεται στον κύριο άξονα του φακού.

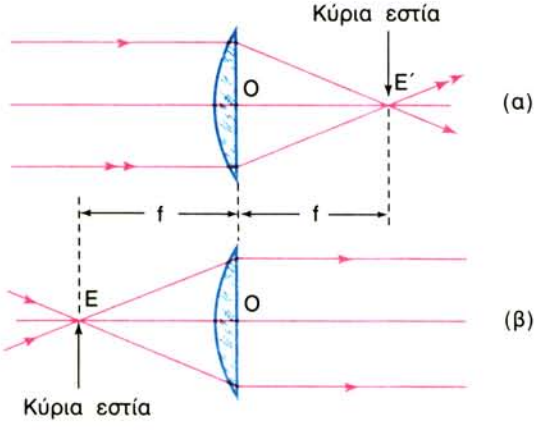
Το σημείο Ε΄ ονομάζεται δευτερεύουσα εστία του φακού. Η απόσταση ΟΕ΄ της εστίας αυτής από το οπτικό κέντρο του φακού ονομάζεται δευτερεύουσα εστιακή απόσταση του φακού και συμβολίζεται με το γράμμα (f΄). Αν και οι δύο πλευρές του φακού είναι στο ίδιο οπτικό μέσο τότε ισχύει η σχέση: $\boxed{f = f'}$.

Προσοχή:

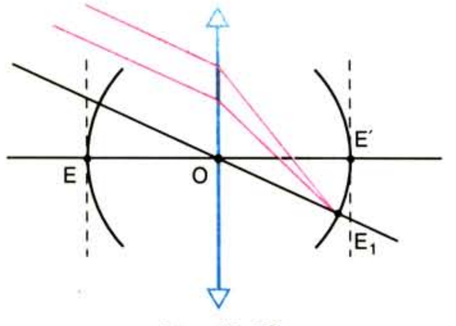
Εμείς από εδώ και στο εξής θα θεωρούμε ότι και οι δύο πλευρές των φακών βρίσκονται στο ίδιο οπτικό μέσο.

Παρατηρήσεις:

1) Η κύρια εστία και η δευτερεύουσα συγκλίνοντα φακού είναι πραγ-



Σχ. 13.3γ.



Σχ. 13.3δ.

ματικές γιατί εκεί συγκεντρώνονται οι ακτίνες που θα περάσουν από το φακό και όχι οι προεκτάσεις τους.

2) Τονίζομε ότι ένας συγκλίνοντας φακός, οποιουδήποτε σχήματος, έχει δύο πραγματικές εστίες, συμμετρικές ως προς το οπτικό του κέντρο. Για καλύτερη κατανόηση δείτε το σχήμα 13.3γ (α, β).

13.3.3 Εστιακά επίπεδα.

Όταν στο φακό (σχ. 13.3δ) προσπίπτει δέσμη παραλλήλων ακτίνων παράλληλα προς ένα δευτερεύοντα άξονα, θα συγκλίνει προς ένα σημείο του E_1. Το σημείο αυτό θα βρίσκεται σχεδόν πάνω σε επίπεδο που είναι κάθετο στον κύριο άξονα του φακού στο σημείο της δευτερεύουσας εστίας Ε΄. Το επίπεδο αυτό ονομάζεται εστιακό επίπεδο του φακού.

Επίσης εστιακό επίπεδο του φακού λέγεται και το επίπεδο που είναι κάθετο στον κύριο άξονά του στο σημείο της κύριας εστίας του Ε.

Προσοχή:

Οι εστίες του φακού είναι σημεία της σφαίρας που έχει κέντρο το οπτικό κέντρο του φακού και ακτίνα ίση με την εστιακή απόστασή του. Επομένως, με άλλα λόγια, εστιακά επίπεδα φακού ονομάζονται τα επίπεδα που εφάπτονται στη σφαίρα αυτή στα σημεία της που είναι εστίες του φακού.

13.3.4 Τύπος προσδιορισμού της εστιακής αποστάσεως συγκλίνοντα φακού (ή τύπος των φακών ή τύπος των κατασκευαστών των φακών).

Η εστιακή απόσταση f ενός συγκλίνοντα φακού (όπως και οποιουδήποτε φακού) εξαρτάται:

1) Από τις ακτίνες καμπυλότητας του φακού (R_1, R_2).

2) Από το δείκτη διαθλάσεως n του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο φακός.

Η εστιακή απόσταση f υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

όπου: n ο δείκτης διαθλάσεως του υλικού του φακού και
R_1, R_2 οι ακτίνες καμπυλότητας του φακού.

Παρατήρηση:

Η σχέση $f = \frac{R}{2}$ ισχύει για κάθε σφαιρικό κάτοπτρο γιατί η εστιακή απόσταση ενός σφαιρικού κατόπτρου εξαρτάται μόνο από την ακτίνα καμπυλότητάς του R.

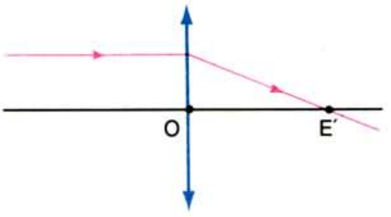
Η σχέση αυτή δεν ισχύει για τους φακούς γιατί η εστιακή απόσταση των φακών εξαρτάται και από το δείκτη διαθλάσεως (προσέξτε την παρατήρηση αυτή γιατί πολλές φορές γίνεται σύγχυση).

13.4 Σχηματισμός ειδώλου από συγκλίνοντα φακό.

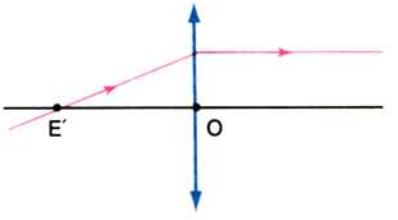
13.4.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Για να βρούμε τη θέση στην οποία σχηματίζεται το είδωλο ενός φωτεινού σημείου ή ενός φωτεινού αντικειμένου μας βοηθάει πολύ το να γνωρίζομε την πορεία ορισμένων χαρακτηριστικών ακτίνων που περνάνε μέσα από το συγκλίνοντα φακό και συγκεκριμένα:

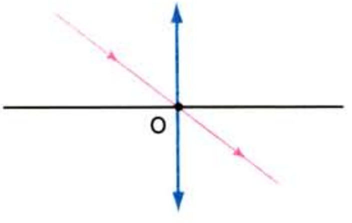
1) Μία ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα, όταν βγει από το φακό περνάει από τη δευτερεύουσα εστία (σχ. 13.4α).



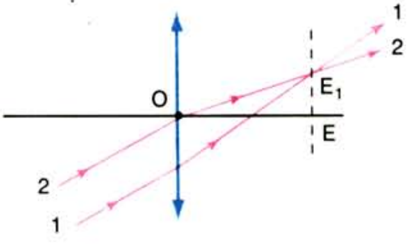
Σχ. 13.4α.



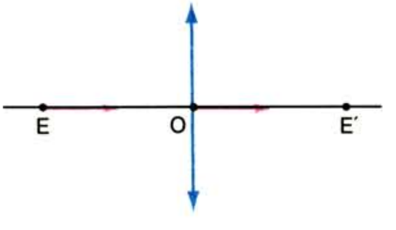
Σχ. 13.4β.



Σχ. 13.4γ.



Σχ. 13.4δ.



Σχ. 13.4ε.

2) Μία ακτίνα που περνάει από την κύρια εστία, όταν βγει από το φακό είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα (σχ. 13.4β).

3) Μία ακτίνα, όταν περνάει από το οπτικό κέντρο, βγαίνει από το φακό χωρίς εκτροπή (σχ. 13.4γ).

4) Μία ακτίνα παράλληλη προς ένα δευτερεύοντα άξονα, όταν βγει από το φακό, περνάει από την αντίστοιχη εστία E_1 (σχ. 13.4δ).

Μία ακτίνα που συμπίπτει με τον κύριο άξονα βγαίνει από το φακό χωρίς εκτροπή (σχ. 13.4ε).

13.4.2 Βασικός τρόπος σχηματισμού ειδώλων.

Το είδωλο φωτεινού αντικειμένου αποτελείται από τα είδωλα των φωτεινών σημείων του.

Το είδωλο ενός φωτεινού σημείου σχηματίζεται στο σημείο που τέμνονται δύο φωτεινές του ακτίνες όταν περάσουν μέσα από το φακό, οπότε είναι πραγματικό. Αν οι ακτίνες ενός φωτεινού σημείου δεν τέμνονται όταν περάσουν από το φακό, αλλά τέμνονται οι προεκτάσεις τους τότε στο σημείο τομής τους σχηματίζεται το είδωλο του σημείου και είναι φανταστικό.

Εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω βρίσκομε τις θέσεις των ειδώλων φωτεινών σημείων και φωτεινών αντικειμένων.

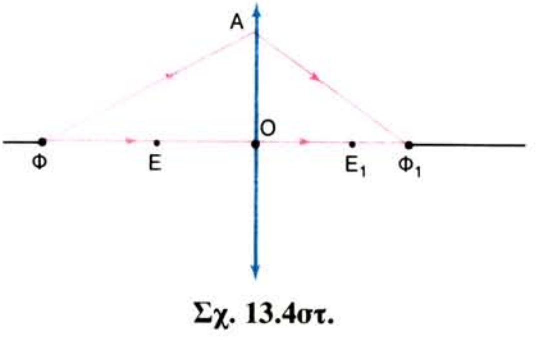
Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού σημείου που βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα (σχ. 13.4στ).

Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού σημείου που δεν βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα (σχ. 13.4ζ).

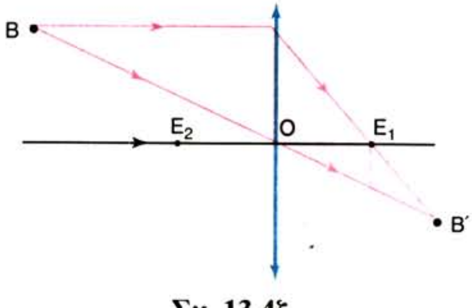
Σχηματισμός ειδώλου Α΄Β΄ φωτεινού αντικειμένου ΑΒ που είναι κάθετο στον κύριο άξονα (σχ. 13.4η).

13.4.3 Τύπος προσδιορισμού της θέσεως ειδώλου σε συγκλίνοντα φακό.

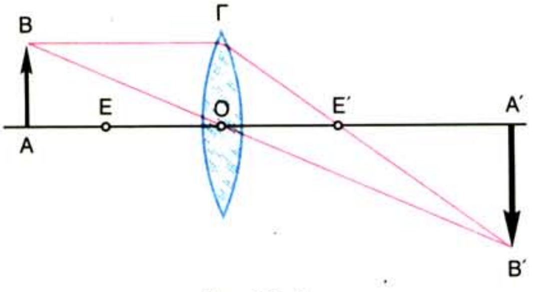
Αν οι αποστάσεις του αντικειμένου ΑΒ και του ειδώλου του Α΄Β΄ από το



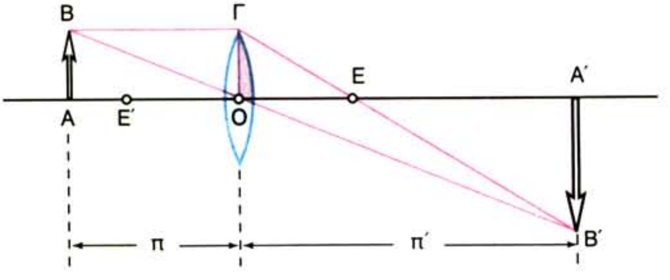
Σχ. 13.4στ.



Σχ. 13.4ζ.



Σχ. 13.4η.



Σχ. 13.4θ.

οπτικό κέντρο συγκλίνοντα φακού είναι π και π΄ αντίστοιχα και f η εστιακή απόσταση του φακού τότε μεταξύ αυτών ισχύει η σχέση (σχ. 13.4θ):

$$\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f} \qquad (1)$$

Με τον τύπο αυτό προσδιορίζεται η θέση (π΄) του ειδώλου ενός αντικειμένου όταν δίνεται η θέση του (π) ως προς το οπτικό κέντρο του συγκλίνοντα φακού και η εστιακή απόσταση του φακού.

Απόδειξη του τύπου (1).

Από τα όμοια τρίγωνα Α΄ΟΒ΄ και ΑΟΒ του σχήματος 13.4θ παίρνομε:

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{O'A'}{OA} \qquad (2)$$

Επίσης από τα τρίγωνα Α΄ΕΒ΄ και ΟΕΓ παίρνομε τη σχέση:

$$\frac{A'B'}{O\Gamma}=\frac{EA'}{OE}$$

Επειδή είναι ΟΓ = ΑΒ και ΕΑ΄ = ΟΑ΄ – ΟΕ έχομε:

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{O'A'-OE}{OE} \tag{3}$$

Από τις εξισώσεις (2) και (3) παίρνομε τη σχέση:

$$\frac{O'A'}{OA}=\frac{OA'-OE}{OE} \quad \text{Þ} \quad \frac{\eth'}{\eth}=\frac{\eth'-f}{f} \tag{4}$$

Από τη σχέση (4) έχομε:

$$\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f} \tag{1}$$

13.4.4 Μεγέθυνση συγκλίνοντα φακού.

Το πηλίκο του ύψους του ειδώλου (σχ. 13.4θ) προς το ύψος του αντικειμένου ονομάζεται γραμμική μεγέθυνση Μ του φακού. Δηλαδή:

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

Από τα όμοια τρίγωνα Α΄ΟΒ΄ και ΑΟΒ του σχήματος 13.4θ έχομε:

$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{OA'}{OA}=\frac{\pi'}{\pi}$$

Δηλαδή:

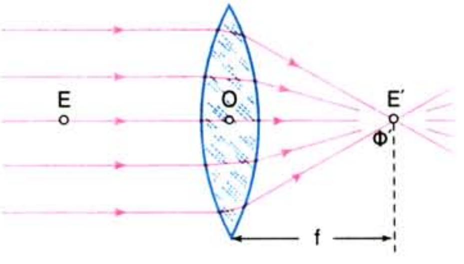
$$M=\frac{A'B'}{AB}=\frac{\pi'}{\pi}$$

Επομένως η μεγέθυνση του φακού είναι ίση με το λόγο των αποστάσεων του ειδώλου π΄ και του αντικειμένου π από το οπτικό κέντρο του φακού.

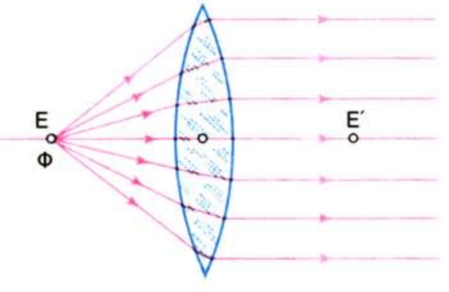
13.5 Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού σημείου από συγκλίνοντα φακό.

13.5.1 Όταν το φωτεινό σημείο Φ βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από το οπτικό κέντρο (Ο) του φακού (σχ. 13.5α).

Όταν ένα φωτεινό σημείο βρίσκεται σε άπειρη απόσταση από το φακό, τότε όσες ακτίνες του φθάνουν στο φακό, τις θεωρούμε ότι προσπίπτουν



Σχ. 13.5α.



Σχ. 13.5β.

παράλληλα προς τον κύριο άξονά του.

Στην περίπτωση αυτή το είδωλό του Φ΄ σχηματίζεται στην εστία Ε΄ και είναι πραγματικό.

Παρατήρηση:

Ισχύει η σχέση: $\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}$. Θέτοντας στη σχέση αυτή $\pi = \infty$ παίρνομε:

$$\frac{1}{\infty}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}, \;\; \pi' = f$$

13.5.2 ΄Οταν το φωτεινό σημείο (Φ) βρίσκεται πάνω σε κύρια εστία (Ε).

Στην περίπτωση αυτή το είδωλο Φ΄ του Φ σχηματίζεται στο άπειρο (σχ. 13.5β).

Παρατήρηση:

΄Εχομε:

$$\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}, \quad \frac{1}{f}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}, \quad \frac{1}{\pi'}=0, \quad \pi'=\infty$$

13.5.3 Όταν το φωτεινό σημείο (Φ) βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα του φακού και σε απόσταση π από αυτόν τέτοια ώστε να ισχύει η σχέση: $f<\pi<\infty$ (σχ. 13.5γ).

Θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΦΑ΄. Αυτή διέρχεται από το φακό χωρίς να αλλάξει πορεία.

Επίσης θεωρούμε την τυχαία φωτεινή ακτίνα ΦΑ και φέρνομε το δευτερεύοντα άξονα Χ΄Χ παράλληλο προς αυτή. Βρίσκομε το σημείο E_1 στο οποίο ο άξονας Χ΄Χ συναντάει το εστιακό επίπεδο Ρ. Το σημείο Φ_1 στο οποίο η ακτίνα AE_1 θα συναντήσει την ΦΑ΄ (δηλαδή τον κύριο άξονα) είναι το είδωλο του Φ. Το Φ_1 σχηματίζεται πέρα από την εστία Ε΄ και είναι πραγματικό.

Παρατήρηση:

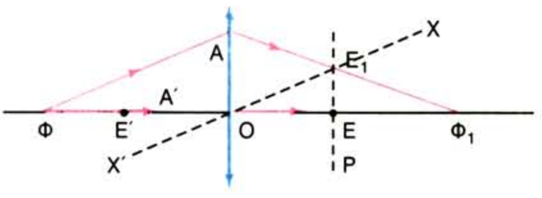
Από τη σχέση $\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}$ (1) προκύπτει: $\pi=\frac{\pi' f}{\pi'-f}$ (2).

Από τη σχέση (2) και υπό την προϋπόθεση $f<\pi<\infty$ παίρνομε:

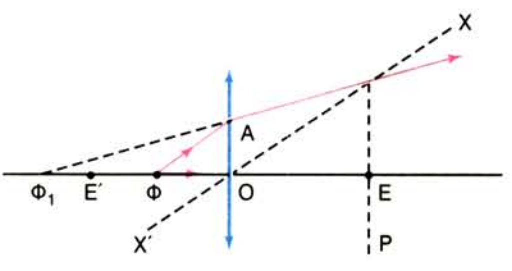
$$\boxed{\pi'>f}$$

13.5.4 Όταν το φωτεινό σημείο Φ βρίσκεται μεταξύ της εστίας Ε και του κέντρου καμπυλότητας (Ο) (σχ. 13.5δ).

Στην περίπτωση αυτή οι φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από το Φ διερχόμενες από το φακό αποκλίνουν. Οι προεκτάσεις τους όμως συνα-



Σχ. 13.5γ.



Σχ. 13.5δ.

ντούν τον κύριο άξονα στο σημείο $Φ_1$. Το σημείο $Φ_1$ είναι το φανταστικό είδωλο του Φ.

Παρατήρηση:

΄Εχομε:

$$\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f},\quad \frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}-\frac{1}{\pi}\quad \text{και}\quad \pi'=\frac{\pi\cdot f}{\pi-f} \qquad (1)$$

Υποθέσαμε ότι

$$\pi<f \Rightarrow \pi-f<0 \qquad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$\pi'<0 \qquad (3)$$

Η σχέση (3) σημαίνει ότι το είδωλο $Φ_1$ είναι φανταστικό. Επίσης από τη σχέση (1) προκύπτει:

$$\frac{\pi'}{f}=\frac{\pi}{\pi-f}\Rightarrow\left|\frac{\pi'}{f}\right|=\left|\frac{\pi}{\pi-f}\right|>1\Rightarrow|\pi'|>f \qquad (4)$$

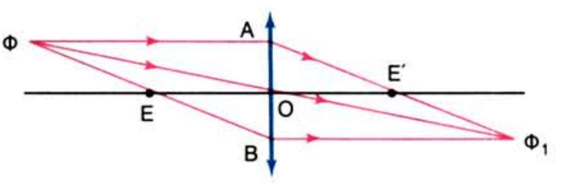
Επομένως έχομε:

΄Οταν το φωτεινό σημείο Φ βρίσκεται μεταξύ κέντρου καμπυλότητας του φακού και εστίας του ($0<\pi<f$) το είδωλό του $Φ_1$ θα σχηματίζεται πέρα από την εστία του φακού ($|\pi'|>f$) και θα είναι φανταστικό ($\pi'<0$).

13.5.5 ΄Οταν το φωτεινό σημείο δεν βρίσκεται επάνω στον κύριο άξονα του φακού (σχ. 13.5ε).

Θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΦΑ η οποία είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα. Αυτή αφού διέλθει από το φακό περνάει από την εστία Ε΄.

Επίσης θεωρούμε την ακτίνα ΦΟ. Αυτή περνάει από το φακό χωρίς να



Σχ. 13.5ε.

αλλάξει πορεία (ΦΟ = ο δευτερεύοντας άξονας). Οι ΑΕ΄ και ΦΟ συναντώνται στο $Φ_1$. Το $Φ_1$ είναι το είδωλο του Φ.

13.6 Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού αντικειμένου από συγκλίνοντα φακό.

13.6.1 Όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται στο άπειρο.

Στην περίπτωση αυτή οι φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από το φωτεινό αντικείμενο είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα του φακού και γι' αυτό όσες διέλθουν από το φακό συναντώνται στην εστία που βρίσκεται στο άλλο μέρος του φακού.

Επομένως το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου το οποίο σχηματίζεται στην εστία η οποία βρίσκεται στο άλλο μέρος του φακού είναι πραγματικό και σημείο.

Έχομε:

$$\frac{1}{\pi}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f}, \quad \frac{1}{\infty}+\frac{1}{\pi'}=\frac{1}{f} \quad \text{και} \quad \pi'=f$$

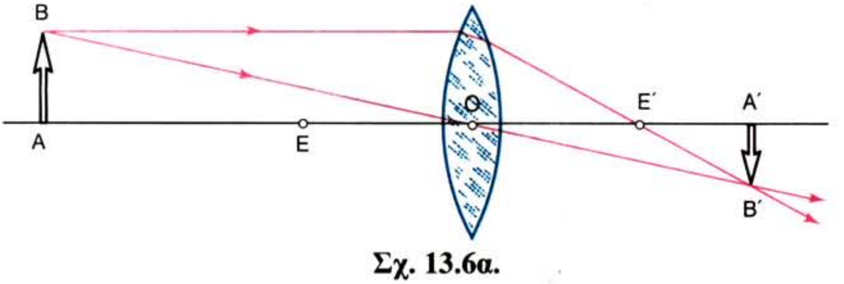
$$\frac{A'B'}{AB}=\frac{\pi'}{\pi}, \quad \frac{A'B'}{AB}=\frac{\pi'}{\infty} \quad \text{και} \quad A'B'=0$$

13.6.2 Όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται πέρα από την κύρια εστία (f<π<∞) (σχ. 13.6α).

Όταν το αντικείμενο ΑΒ βρίσκεται πέρα από την κύρια εστία του φακού ($f<\pi<\infty$), τότε διαπιστώνομε ότι:

1) Το είδωλο θα σχηματίζεται από το άλλο μέρος του φακού πέρα από την εστία Ε΄ ($\pi'>f$), πραγματικό και αντεστραμμένο ως προς το αντικείμενο.

2) Το είδωλο θα είναι μεγαλύτερο ή μικρότερο ή και ίσο με το αντικείμενο, ανάλογα της αποστάσεως του αντικειμένου από το οπτικό κέντρο του φακού.



Σχ. 13.6α.

Προσοχή:

Οι χαρακτηριστικές θέσεις του αντικειμένου από το άπειρο μέχρι την κύρια εστία του φακού είναι οι παρακάτω:

1) Όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση από το φακό μεγαλύτερη του 2f (π>2f).

Στην περίπτωση αυτή το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου σχηματίζεται στο άλλο μέρος του φακού. Σε απόσταση από το φακό μικρότερη του 2f (π΄<2f), είναι μικρότερο του αντικειμένου (Α΄Β΄<ΑΒ) και αντεστραμμένο ως προς το αντικείμενο.

2) Όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση από το φακό ίση με 2f (π=2f).

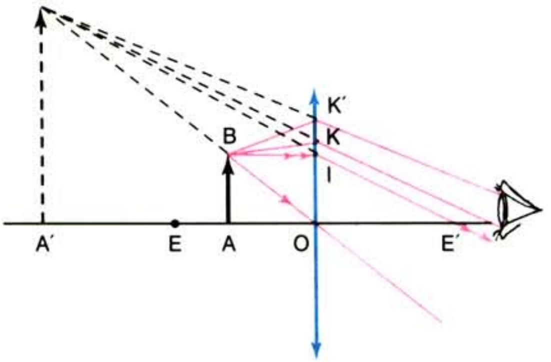
Στην περίπτωση αυτή το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου σχηματίζεται στο άλλο μέρος του φακού σε απόσταση από το φακό ίση με 2f (π΄=2f), είναι ίσο με το αντικείμενο, πραγματικό και αντεστραμμένο Α΄Β΄=ΑΒ.

3) Όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση από το φακό μικρότερη του 2f (π<2f).

Στην περίπτωση αυτή το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου σχηματίζεται στο άλλο μέρος του φακού σε απόσταση από το φακό μεγαλύτερη του 2f (π>2f). Το είδωλο είναι μεγαλύτερο από το αντικείμενο, πραγματικό και αντεστραμμένο ως προς το αντικείμενο.

13.6.3 Όταν το φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται στην εστία του φακού.

Στην περίπτωση αυτή όσες ακτίνες του φωτεινού αντικειμένου διέλθουν από το φακό δεν συναντώνται. Επομένως το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου σχηματίζεται στο άπειρο.



Σχ. 13.6β.

13.6.4 Όταν το αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ οπτικού κέντρου και εστίας του φακού (0<π<f).

Όταν το αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ οπτικού κέντρου και εστίας (0<π<f) (σχ. 13.6β) το είδωλο θα σχηματίζεται πέρα από την εστία (|π′| >f), θα είναι φανταστικό (π′<0) και θα έχει μέγεθος μεγαλύτερο από το αντικείμενο (|m| >1).

13.7 Αποκλίνοντες φακοί.

13.7.1 Εστίες σε αποκλίνοντα φακό.

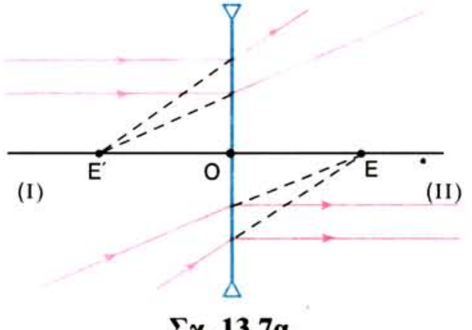
Όπως στους συγκλίνοντες έτσι και στους αποκλίνοντες φακούς διακρίνομε οπτικό κέντρο, κύριο άξονα και δευτερεύοντες άξονες, με τις ίδιες χαρακτηριστικές ιδιότητες.

Όταν πάνω (σχ. 13.7α) σε έναν αποκλίνοντα φακό και από την πλευρά (Ι) πέφτει μία φωτεινή δέσμη παραλλήλων ακτίνων παράλληλα με τον κύριο άξονα τότε η δέσμη που βγαίνει από το φακό είναι αποκλίνουσα και φαίνεται ότι προέρχεται από ένα σημείο Ε′ του κύριου άξονα. Δηλαδή οι προεκτάσεις των ακτίνων που βγαίνουν από το φακό τέμνονται σε ένα σημείο Ε′ του κύριου άξονα. Αυτό το σημείο (Ε′) είναι η δευτερεύουσα εστία του φακού η οποία είναι φανταστική.

Πάνω σε έναν αποκλίνοντα φακό και από την πλευρά του Ι πέφτει μία δέσμη ακτίνων συγκλίνουσα προς το σημείο Ε (σχ. 13.7α). Αν αυτή η δέσμη όταν βγαίνει από το φακό είναι παράλληλη προς τον άξονά του, τότε το σημείο Ε λέγεται κύρια εστία του φακού και είναι φανταστική.

Σημείωση:

Υπενθυμίζομε ότι εμείς μελετάμε τους φακούς υποθέτοντας ότι το υλικό που τους περιβάλλει έχει τον ίδιο δείκτη διαθλάσεως.



Σχ. 13.7α.

Προσοχή:

1) Κάθε αποκλίνοντας φακός έχει δύο εστίες που είναι φανταστικές και βρίσκονται στον κύριο άξονά του.

2) Οι δύο εστίες απέχουν εξίσου από το οπτικό κέντρο του φακού.

3) Η εστιακή απόσταση αποκλίνοντα φακού (f=OE΄=OE) είναι αρνητική.

13.7.2 Εστιακά επίπεδα αποκλίνοντα φακού.

Όταν σε αποκλίνοντα φακό (σχ. 13.7β) προσπίπτει δέσμη παραλλήλων ακτίνων παράλληλα προς ένα δευτερεύοντα άξονα, θα αποκλίνει και οι προεκτάσεις των ακτίνων της δέσμης θα συγκλίνουν σε ένα σημείο E_1. Το σημείο αυτό θα βρίσκεται σχεδόν επάνω στο επίπεδο που είναι κάθετο στον κύριο άξονα του φακού στο σημείο της δευτερεύουσας εστίας Ε΄. Το επίπεδο αυτό ονομάζεται εστιακό επίπεδο του φακού.

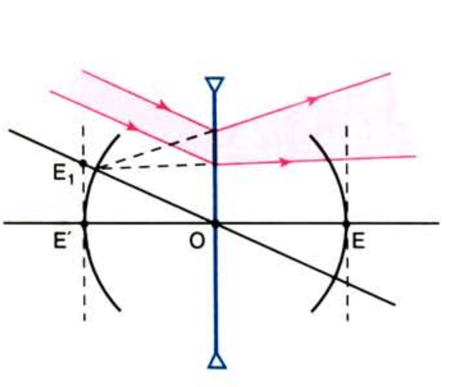
Επίσης εστιακό επίπεδο του φακού λέγεται και το επίπεδο που είναι κάθετο στον κύριο άξονά του στο σημείο της κύριας εστίας του Ε.

Σημείωση:

Οι εστίες του φακού είναι σημεία της σφαίρας που έχει κέντρο το οπτικό κέντρο του φακού και ακτίνα ίση με την εστιακή απόστασή του. Επομένως, με άλλα λόγια, εστιακά επίπεδα φακού ονομάζονται τα επίπεδα που εφάπτονται στη σφαίρα αυτή στα σημεία της που είναι η δευτερεύουσα και η κύρια εστία του φακού.

Παρατήρηση:

Τα είδωλα των φωτεινών σημείων που σχηματίζονται από το φακό δεν βρίσκονται επακριβώς επάνω στα εστιακά επίπεδά του, αλλά στα τμήματα της πιο πάνω σφαίρας τα οποία είναι πολύ κοντά στα επίπεδα αυτά.



Σχ. 13.7β.

13.7.3 Σχηματισμός ειδώλου ενός φωτεινού σημείου από αποκλίνοντα φακό.

α) Το φωτεινό σημείο Φ (σχ. 13.7γ) βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα του φακού.

Θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΦΑ. Αυτή διέρχεται από το φακό χωρίς να αλλάξει πορεία (ΦΟ = ο κύριος άξονας).

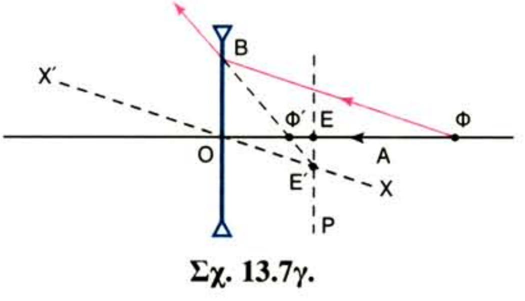
Επίσης θεωρούμε την τυχαία φωτεινή ακτίνα ΦΒ και φέρνομε το δευτερεύοντα άξονα Χ΄Χ παράλληλο προς αυτή. Βρίσκομε το σημείο Ε΄ στο οποίο ο άξονας Χ΄Χ συναντάει το εστιακό επίπεδο Ρ. Το σημείο Φ΄ στο οποίο η ΒΕ΄ θα συναντήσει την ΦΑ (δηλ. τον κύριο άξονα) είναι το είδωλο του Φ.

Το Φ΄ σχηματίζεται πάντοτε μεταξύ της εστίας του φακού και του οπτικού κέντρου του και είναι πάντοτε φανταστικό.

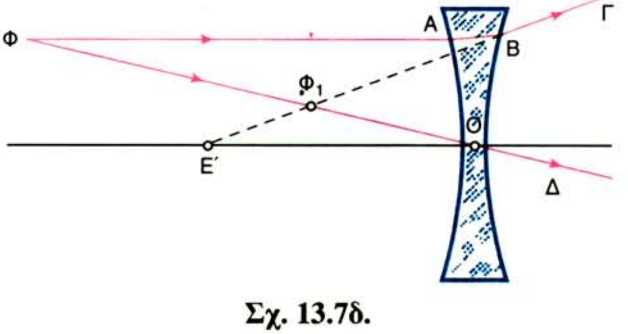
β) Το φωτεινό σημείο Φ (σχ. 13.7δ) δεν βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα του φακού.

Θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΦΑ παράλληλη στον κύριο άξονα του φακού. Αυτή μετά τη διάθλασή της στο φακό αποκτά τέτοια διεύθυνση ΒΓ ώστε η προέκτασή της περνάει από την εστία Ε΄ του φακού.

Επίσης θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΦΟ. Αυτή περνάει από το φακό χωρίς να αλλάξει πορεία (ΦΟ = ο δευτερεύοντας άξονας). Οι προεκτάσεις



Σχ. 13.7γ.



Σχ. 13.7δ.

των ΒΓ και ΟΔ συναντώνται στο $Φ_1$. Το $Φ_1$ είναι το είδωλο του φωτεινού σημείου Φ και είναι φανταστικό.

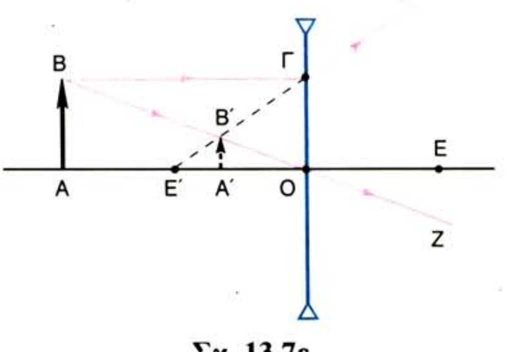
13.7.4 Σχηματισμός ειδώλου φωτεινού αντικειμένου από αποκλίνοντα φακό.

Έστω ένα ευθύγραμμο τμήμα ΑΒ (σχ. 13.7ε) κάθετο στον κύριο άξονα του φακού.

Θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΒΓ παράλληλη στον κύριο άξονα του φακού. Αυτή μετά τη δίοδό της από το φακό αποκτάει τέτοια διεύθυνση και φορά (ΓΔ) ώστε η προέκτασή της περνάει από την εστία Ε΄ του φακού.

Επίσης θεωρούμε τη φωτεινή ακτίνα ΒΟ. Αυτή περνάει από το φακό χωρίς να αλλάξει πορεία (ΒΟ = ο δευτερεύοντας άξονας). Οι προεκτάσεις των ΓΔ και ΟΖ συναντώνται στο Β΄. Το Β΄ είναι το είδωλο του φωτεινού σημείου Β.

Το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου ΑΒ είναι το Α΄Β΄. Αυτό είναι κάθετο στον κύριο άξονα, φανταστικό, όρθιο, μικρότερο του αντικειμένου και σχηματίζεται πάντοτε μεταξύ της εστίας και του φακού.



Σχ. 13.7ε.

Παρατήρηση:

Όταν το αντικείμενο ΑΒ πλησιάζει προς το φακό τότε και το είδωλό του Α΄Β΄ πλησιάζει στο φακό και μεγαλώνει.

13.8 Γενικές εξισώσεις των φακών.

Έστω ότι:

1) π και π΄ είναι αντίστοιχα οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από το οπτικό κέντρο φακού (συγκλίνοντα ή αποκλίνοντα).

2) ΑΒ και Α΄Β΄ είναι αντίστοιχα οι γραμμικές διαστάσεις του ειδώλου και του αντικειμένου (που είναι κάθετο στον κύριο άξονα).

3) R_1 και R_2 είναι οι ακτίνες καμπυλότητας του φακού.

Τότε για όλες τις δυνατές περιπτώσεις ισχύουν οι ακόλουθες γενικές εξισώσεις των φακών:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right), \quad \frac{1}{\pi} + \frac{1}{\pi'} = \frac{1}{f}, \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{\pi'}{\pi}$$

Για τις εξισώσεις αυτές ισχύουν οι εξής συμβάσεις:

1) Θεωρούμε αρνητικά τα μεγέθη π, π΄, f, όταν αντιστοιχούν σε σημεία φανταστικά.

2) Τις ακτίνες καμπυλότητας R_1, R_2 τις θεωρούμε αρνητικές όταν αντιστοιχούν σε κοίλες επιφάνειες.

Παρατήρηση:

Για τους επιπεδόκυρτους και επιπεδόκοιλους φακούς η R_2 θεωρείται άπειρος, δηλαδή $R_2 \to \infty$, επομένως γι' αυτούς είναι: $\frac{1}{R_2} = 0$.

13.9 Ισχύς φακού.

Ισχύς (I) ενός φακού ονομάζεται το αντίστροφο της εστιακής αποστάσεώς του (f). Δηλαδή:

$$I = \frac{1}{f}$$

Η ισχύς είναι θετική στους συγκλίνοντες φακούς και αρνητική στους αποκλίνοντες.

Μονάδα ισχύος.

Στο σύστημα S.I. μονάδα ισχύος είναι η διοπτρία (diopter) (1 D) που ορίζεται ως εξής:

Διοπτρία (1 D) είναι η ισχύς φακού, που έχει εστιακή απόσταση (f) ίση με ένα μέτρο (1 m).

$$1D = \frac{1}{1\,m} \qquad \text{ή} \qquad 1D = 1\,m^{-1}$$

Σημείωση:

Σύμφωνα με τα παραπάνω ένας συγκλίνοντας φακός που έχει εστιακή απόσταση 50 cm θα έχει ισχύ 2 διοπτρίες, ενώ ένας αποκλίνοντας φακός που έχει την ίδια εστιακή απόσταση θα έχει ισχύ −2 διοπτρίες.

13.9.1 Ισχύς συστήματος λεπτών φακών.

Όταν πολλοί λεπτοί φακοί έχουν τον ίδιο κύριο άξονα και βρίσκονται σε επαφή, τότε αυτοί οι φακοί αποτελούν ένα σύστημα φακών που ισοδυναμεί με ένα φακό, του οποίου η ισχύς $I_{ολ}$ είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των ισχύων όλων των φακών του συστήματος, δηλαδή είναι:

$$I_{ολ} = I_1 + I_2 + I_3 + ...$$

Επομένως ισχύουν και οι σχέσεις:

$$I_{ολ} = \frac{1}{f_{ολ}} \qquad \text{και} \qquad \frac{1}{f_{ολ}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + ...$$

13.10 Σφάλματα φακών.

Οι φακοί παρουσιάζουν διάφορα σφάλματα από τα οποία τα συνηθέστερα είναι τα εξής:

α) Σφαιρική εκτροπή.

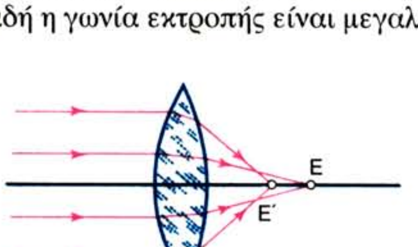
Όταν ο φακός δεν είναι λεπτός, οι ακτίνες που προσπίπτουν στα άκρα του, παράλληλα στον κύριο άξονα, εκτρέπονται περισσότερο από τις κεντρικές ακτίνες, με αποτέλεσμα να μην συγκλίνουν στην εστία του φακού (σχ. 13.10).

Η μεγαλύτερη εκτροπή των ακτίνων που προσπίπτουν στα άκρα του φακού ονομάζεται σφαιρική εκτροπή.

Εξαιτίας της σφαιρικής εκτροπής ο φακός δίνει είδωλα που δεν είναι ευκρινή.

Η σφαιρική εκτροπή οφείλεται στα εξής:

Οι ακτίνες που προσπίπτουν περιφερειακά του φακού παθαίνουν μεγαλύτερη διάθλαση (δηλαδή η γωνία εκτροπής είναι μεγαλύτερη) γιατί η δια-



Σχ. 13.10.

θλαστική γωνία του πρίσματος, το οποίο αντιστοιχεί στα σημεία της περιφέρειας του φακού, είναι μεγάλη. Αντίθετα οι ακτίνες που προσπίπτουν στην περιοχή γύρω στο κέντρο του φακού παθαίνουν μικρότερη διάθλαση, γιατί η διαθλαστική γωνία του πρίσματος, το οποίο αντιστοιχεί στα σημεία αυτής της περιοχής, είναι μικρή.

β) Αστιγματική εκτροπή.

Όταν στο φακό προσπίπτει παράλληλη δέσμη ακτίνων που σχηματίζει μεγάλη γωνία με τον κύριο άξονα, οι ακτίνες της δέσμης δεν συγκεντρώνονται σε ένα σημείο, αλλά σε δύο μικρά ευθύγραμμα τμήματα που είναι ασύμβατα κάθετα μεταξύ τους και ονομάζονται εστιακές γραμμές.

Η εστίαση μιας παράλληλης δέσμης στις εστιακές γραμμές ονομάζεται αστιγματική εκτροπή. Εξαιτίας της αστιγματικής εκτροπής, ο φακός δίνει παραμορφωμένα είδωλα.

γ) Χρωματική εκτροπή.

Ένα διαφανές υλικό έχει διαφορετικό δείκτη διαθλάσεως για κάθε απλή ακτινοβολία. Επομένως η εστιακή απόσταση του φακού είναι διαφορετική για κάθε απλή ακτινοβολία.

Όταν στο φακό προσπίπτει παράλληλα στον κύριο άξονα μια σύνθετη ακτινοβολία (π.χ. λευκό φως) κάθε απλή ακτινοβολία που περιέχεται στη σύνθετη θα συγκεντρώνεται σε διαφορετικό σημείο. Επειδή κάθε απλή ακτινοβολία αντιστοιχεί σε φως ορισμένου χρώματος ο φακός θα παρουσιάζει εστίες με διαφορετικό χρώμα η καθεμία.

Η διαφορετική εκτροπή των διαφόρων μονοχρωματικών ακτινοβολιών ονομάζεται χρωματική εκτροπή.

Εξαιτίας της χρωματικής εκτροπής, το είδωλο φωτεινού αντικειμένου σχηματίζεται ασαφές και έγχρωμο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΟΠΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

Τα οπτικά όργανα είναι συσκευές, τις οποίες χρησιμοποιούμε για να βλέπομε με σαφήνεια περιοχές που δεν είναι ορατές με γυμνό οφθαλμό.

Με κατάλληλα οπτικά όργανα μπορούμε να παρατηρήσομε ένα πολύ μικρό αντικείμενο ή να παρατηρήσομε περιοχές σε πολύ μεγάλη απόσταση.

14.1 Γνώσεις στηρίξεως.

α) Δομή του οφθαλμού από οπτική άποψη.

Όταν προχωρούμε από το εξωτερικό προς το εσωτερικό του οφθαλμού συναντούμε διαδοχικά τα εξής (σχ. 14.1α):

1) Το διαφανή κερατοειδή χιτώνα Α.

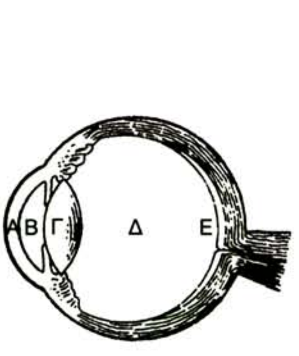
2) Το υδατώδες υγρό Β.

3) Ένα διάφραγμα, που το ονομάζομε ίριδα. Αυτό στη μέση του έχει ένα κυκλικό άνοιγμα, την κόρη. Η διάμετρος της κόρης μπορεί να μεταβάλλεται.

4) Έναν αμφίκυρτο ελαστικό φακό Γ, που ονομάζεται κρυσταλλοειδής φακός.

5) Το υαλώδες υγρό Δ.

6) Τον αμφιβληστροειδή χιτώνα Ε, που απλώνεται στο εσωτερικό τοίχωμα του ματιού.



Σχ. 14.1α.

Σημείωση:

Για να διακρίνομε καθαρά ένα αντικείμενο, πρέπει το είδωλό του να σχηματίζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

β) Μηχανισμός της οράσεως.

Το μάτι μοιάζει με φωτογραφική μηχανή με τις εξής αντιστοιχίες:

1) Ο βολβός αντιστοιχεί στο σκοτεινό θάλαμο της μηχανής.

2) Η ίριδα στο διάφραγμα της μηχανής.

3) Ο κρυσταλλοειδής φακός του ματιού στο φακό της μηχανής.

4) Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας στην ευπαθή φωτογραφική πλάκα.

Φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από ένα φωτεινό αντικείμενο (σχ. 14.1β) όταν προσπίπτουν στο μάτι διέρχονται από τον κερατοειδή χιτώνα, την κόρη, το φακό, το υαλώδες σώμα και συναντάνε τον αμφιβληστροειδή χιτώνα όπου σχηματίζουν το είδωλο του αντικειμένου.

Αυτό είναι πραγματικό, αντεστραμμένο σχετικά με το αντικείμενο και μικρότερο από αυτό.

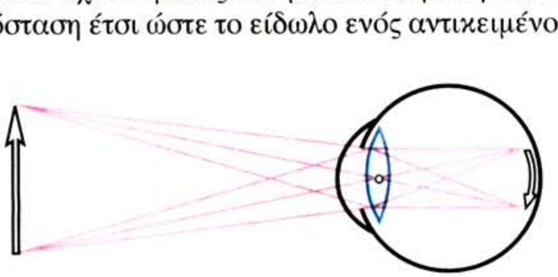
Το είδωλο από τον αμφιβληστροειδή χιτώνα μεταφέρεται με το οπτικό νεύρο στον εγκέφαλο, ο οποίος μας δίνει την εντύπωση του αντικειμένου και μάλιστα όρθιου.

γ) Προσαρμογή του οφθαλμού.

Το μάτι έχει τέτοια δομή έτσι ώστε αν προσπέσει σε αυτό παράλληλη δέσμη (π.χ. μία δέσμη που προέρχεται από φωτεινό σημείο το οποίο βρίσκεται σε πολύ μεγάλη απόσταση, θεωρητικά άπειρη) να συγκεντρώνεται σε ένα σημείο που βρίσκεται, ακριβώς, πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Επομένως θα έπρεπε, όταν το φωτεινό σημείο πλησιάσει προς το μάτι το είδωλό του να σχηματισθεί πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Ο φακός του ματιού, όμως με τη βοήθεια των ινών που τον συγκρατούν έχει την ικανότητα να μεταβάλλει, αυτόματα, την καμπυλότητα των επιφανειών του (συνεπώς και την εστιακή του απόσταση) ώστε το είδωλο να σχηματίζεται πάντοτε ακριβώς πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Η ικανότητα που έχει ο φακός του ματιού να μεταβάλλει αυτόματα την εστιακή του απόσταση έτσι ώστε το είδωλο ενός αντικειμένου το οποίο βρί-



Σχ. 14.1β.

σκεται σε διάφορες αποστάσεις από το μάτι να σχηματίζεται για κάθε θέση του αντικειμένου πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα, ονομάζεται προσαρμογή του οφθαλμού.

δ) Κανονικός οφθαλμός.

Κανονικός οφθαλμός ονομάζεται εκείνος ο οφθαλμός ο οποίος μπορεί να βλέπει ευκρινώς, χωρίς προσαρμογή, αντικείμενα που βρίσκονται σε άπειρη απόσταση από αυτόν και με προσαρμογή αντικείμενα που βρίσκονται από αυτόν σε απόσταση μέχρι 25 cm.

ε) Ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως.

Η πιο μικρή απόσταση, στην οποία μπορεί να πλησιάσει ένα αντικείμενο το μάτι, ώστε το μάτι να το βλέπει καθαρά, ονομάζεται ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως. Αυτή για το κανονικό μάτι είναι περίπου 25 cm.

στ) Φαινόμενη διάμετρος ή γωνία οράσεως.

Φαινόμενη διάμετρος ενός αντικειμένου ονομάζομε τη γωνία που σχηματίζουν οι φωτεινές ακτίνες οι οποίες προσπίπτουν από τα άκρα του αντικειμένου στο οπτικό κέντρο Ο του φακού του οφθαλμού. Η φαινόμενη διάμετρος του αντικειμένου ΑΒ (σχ. 14.1γ) είναι η γωνία ΑΟΒ.

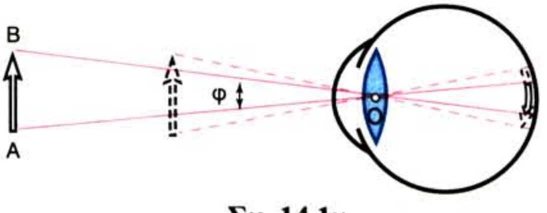
Όπως προκύπτει από το σχήμα όσο πλησιέστερα στον οφθαλμό βρίσκεται το αντικείμενο, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία οράσεως (η φαινόμενη διάμετρος) και επομένως τόσο μεγαλύτερο το είδωλο. Όταν θέλομε να διακρίνομε λεπτομέρειες του αντικειμένου, το πλησιάζομε στον οφθαλμό, γιατί τότε αυξάνεται η γωνία οράσεώς του.

***Προσοχή*:**

Επειδή η απόσταση του αντικειμένου από το μάτι δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από την ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως (25 cm για το κανονικό μάτι), γι' αυτό η φαινόμενη διάμετρος του αντικειμένου έχει τη μεγαλύτερη τιμή της, όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως.

ζ) Διαχωριστική ικανότητα του ματιού.

Ένα κανονικό μάτι ξεχωρίζει καθαρά τα σημεία Α και Β ενός αντικει-



Σχ. 14.1γ.

μένου, μόνο όταν η γωνία οράσεώς τους φ είναι πιο μεγάλη από μία ελάχιστη τιμή, που τη λέμε διαχωριστική ικανότητα του ματιού και είναι περίπου ίση με ένα πρώτο λεπτό της μοίρας (για κανονικό μάτι).

η) Γωνιακή μεγέθυνση οπτικού οργάνου.

Φανερό είναι ότι όσο μεγαλύτερο είναι το είδωλο ενός αντικειμένου που σχηματίζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή, τόσο περισσότερες λεπτομέρειες του αντικειμένου διακρίνομε. Επειδή το μέγεθος του ειδώλου είναι ανάλογο με τη φαινόμενη διάμετρο του αντικειμένου, γι' αυτό διακρίνομε περισσότερες λεπτομέρειες του αντικειμένου όσο μεγαλύτερη είναι η φαινόμενη διάμετρός του.

Γωνιακή μεγέθυνση m, ενός οπτικού οργάνου, ονομάζεται ο λόγος της γωνίας (ω_2) με την οποία βλέπομε μέσω του οργάνου το είδωλο αντικειμένου, προς τη γωνία (ω_1) με την οποία βλέπομε το αντικείμενο με γυμνό μάτι, όταν το είδωλο και το αντικείμενο έχουν κατά την παρατήρηση απόσταση από το μάτι ίση με 25 cm.

Δηλαδή είναι:

$$m = \frac{\omega_2}{\omega_1} \qquad (1)$$

Σημείωση:

Η αξία ενός οπτικού οργάνου κρίνεται από τη γωνιακή μεγέθυνσή του.

θ) Ισχύς οπτικού οργάνου.

Ένα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη των οπτικών οργάνων είναι η ισχύς τους I, που την ορίζομε με τον ακόλουθο τρόπο:

Ισχύ I ενός οπτικού οργάνου ονομάζομε το λόγο της γωνίας οράσεως ω_2, υπό την οποία βλέπομε το είδωλο ενός αντικειμένου AB όταν αυτό σχηματίζεται στην απόσταση της ευκρινούς οράσεως προς το μέγεθος του αντικειμένου AB.

Δηλαδή:

$$I = \frac{\omega_2}{AB} \qquad (2)$$

Σημείωση:

Από τη σχέση (2) βρίσκομε ότι η μονάδα για τη μέτρηση της ισχύος είναι: $1\ m^{-1} = 1$ διοπτρία.

ι) Διακριτική ικανότητα οπτικού οργάνου.

Ονομάζεται διακριτική ικανότητα ενός οπτικού οργάνου η μικρότερη απόσταση στην οποία πρέπει να βρίσκονται δύο σημεία ενός αντικειμένου, για να βλέπει ο οφθαλμός τα είδωλά τους (μέσω του οργάνου) το ένα χωριστά από το άλλο.

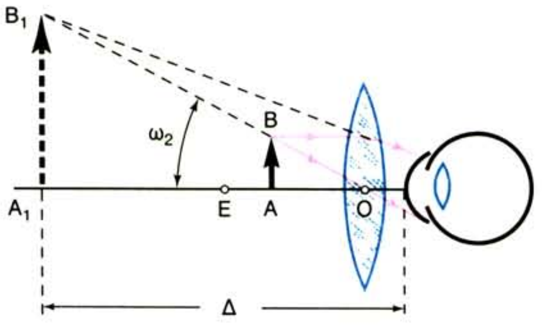
14.2 Ο μεγεθυντικός φακός (απλό μικροσκόπιο).

14.2.1 Μεγέθυνση μεγεθυντικού φακού.

Ο μεγεθυντικός φακός είναι ένας συγκλίνοντας φακός με πολύ μικρή εστιακή απόσταση (f = OE).

Αυτός μπορεί να μας δώσει μεγέθυνση, για κάποιο αντικείμενο όταν το τοποθετήσομε ανάμεσα στο οπτικό κέντρο του και την εστία του (σχ. 14.2α), η οποία παρέχεται από τη σχέση:

$$m = \frac{\Delta}{f} \quad \text{(όπου } \Delta \text{ η ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως)}$$



Σχ. 14.2α.

Απόδειξη:

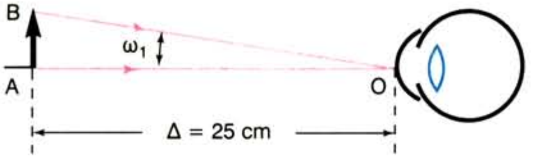
Ξέρομε από τη θεωρία των φακών, ότι στην περίπτωση αυτή το είδωλο του αντικειμένου είναι φανταστικό, όρθιο σε σχέση με το αντικείμενο και το μέγεθός του είναι πιο μεγάλο από το μέγεθος του αντικειμένου.

Αν τοποθετήσομε το αντικείμενο σε θέση τέτοια ώστε (σχ. 14.2α) το είδωλό του να σχηματίζεται στην ελάχιστη απόσταση της ευκρινούς οράσεως από το φακό του ματιού, θα έχομε:

$$m = \frac{\omega_2}{\omega_1} \tag{1}$$

όπου: m η μεγέθυνση του οργάνου,

ω_1 η γωνία οράσεως του αντικειμένου AB όταν βρίσκεται σε απόσταση από το μάτι ίση με την ελάχιστη απόσταση της ευκρινούς ο-



Σχ. 14.2β.

ράσεως: $\Delta = 25$ cm (σχ. 14.2β) και

ω_2 η γωνία οράσεως του ειδώλου A_1B_1 όταν βρίσκεται σε απόσταση από το μάτι ίση με την ελάχιστη απόσταση της ευκρινούς οράσεως: $\Delta = 25$ cm (σχ. 14.2α).

Επειδή οι γωνίες ω_1 και ω_2 είναι πολύ μικρές από τη σχέση (1) παίρνομε:

$$m = \frac{\varepsilon\varphi\omega_2}{\varepsilon\varphi\omega_1} \tag{2}$$

Από τα τρίγωνα ΟΑΒ (σχ. 14.2β) και OA_1B_1 (σχ. 14.2α) έχομε:

$$AB = OA \cdot \varepsilon\varphi\omega_1 \quad (3) \qquad \text{και} \qquad A_1B_1 = OA_1 \cdot \varepsilon\varphi\omega_2 \tag{4}$$

Από τις σχέσεις (2), (3) και (4) παίρνομε:

$$m = \frac{A_1B_1/\Delta}{AB/\Delta} = \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{\pi'}{\pi} \qquad \text{και} \qquad m = \frac{\pi'}{\pi} \tag{5}$$

Επίσης από τον τύπο των φακών βρίσκομε για αυτή την περίπτωση τη σχέση:

$$\frac{1}{\pi} - \frac{1}{\pi} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{\pi'}{\pi} = 1 + \frac{\pi'}{f} \qquad \text{και} \qquad \frac{\pi'}{\pi} = 1 + \frac{\Delta}{f} \tag{6}$$

Από τις σχέσεις (5) και (6) βρίσκομε:

$$\boxed{m = 1 + \frac{\Delta}{f}} \tag{7}$$

Επειδή η εστιακή απόσταση f του μεγεθυντικού φακού είναι πολύ μικρή (1-2 cm συνήθως) μπορούμε να θεωρήσομε αμελητέα τη μονάδα σε σχέση με το λόγο $\frac{\Delta}{f}$, οπότε από τη σχέση (7) έχομε:

$$\boxed{m = \frac{\Delta}{f}} \tag{8}$$

14.2.2 Ισχύς μεγεθυντικού φακού.

Για την ισχύ Ι του μεγεθυντικού φακού θα έχομε:

$$\mathrm{I} = \frac{\omega_2}{\mathrm{AB}} \cong \frac{\varepsilon\varphi\omega_2}{\mathrm{AB}} = \frac{\mathrm{A_1B_1}/\Delta}{\mathrm{AB}} = \frac{\mathrm{A_1B_1}}{\mathrm{AB}\cdot\Delta} = \frac{\pi'}{\pi\cdot\Delta} \quad \text{και} \quad \mathrm{I} = \frac{\pi'}{\pi\cdot\Delta} \tag{9}$$

Από τις σχέσεις (9), (7), (8) βρίσκομε:

$$\boxed{\mathrm{I} = \frac{1}{f} + \frac{1}{\Delta}} \quad (10) \qquad \text{και με προσέγγιση} \qquad \boxed{\mathrm{I} = \frac{1}{f}} \quad (11)$$

Επομένως η ισχύς του μεγεθυντικού φακού θα δίνεται από τις σχέσεις (10) και (11).

14.3 Μικροσκόπιο.

14.3.1 Γνώσεις στηρίξεως.

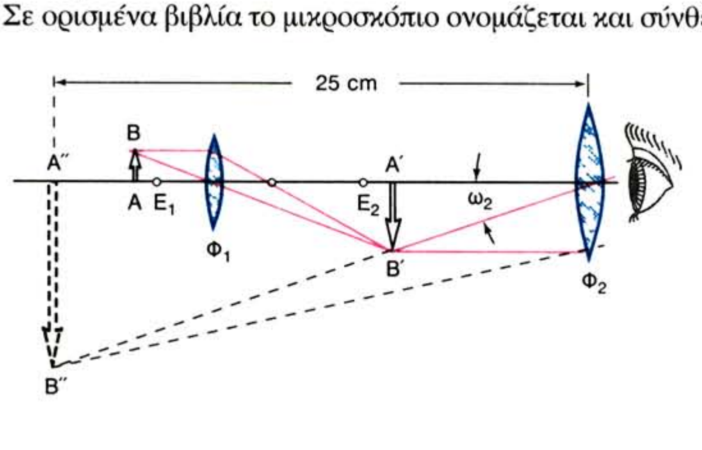
Το χρησιμοποιούμε όταν θέλομε μεγάλες μεγεθύνσεις. Βασικά αποτελείται από δύο συγκλίνοντες φακούς Φ_1 και Φ_2 (σχ. 14.3α).

Ο Φ_1 ο οποίος ονομάζεται αντικειμενικός φακός έχει μικρή εστιακή απόσταση και σχηματίζει πραγματικό είδωλο Α΄Β΄ του αντικειμένου ΑΒ, το οποίο τοποθετείται πέραν της κύριας εστίας του E_1. Το είδωλο Α΄Β΄ σχηματίζεται μεταξύ του φακού Φ_2 και της κύριας εστίας του E_2.

Ο Φ_2 ο οποίος ονομάζεται προσοφθάλμιος φακός, λειτουργεί σαν μεγεθυντικός φακός και δίνει φανταστικό είδωλο Α΄΄Β΄΄, αντεστραμμένο, πολύ μεγαλύτερο του αντικειμένου ΑΒ, σε απόσταση ίση προς την απόσταση ευκρινούς οράσεως (25 cm). Το σχήμα 14.3α δείχνει την πορεία των ακτίνων σε μικροσκόπιο.

Σημείωση:

Σε ορισμένα βιβλία το μικροσκόπιο ονομάζεται και σύνθετο μικροσκόπιο.



Σχ. 14.3α.

14.3.2 Μεγέθυνση μικροσκοπίου.

Η μεγέθυνση (m) μικροσκοπίου δίδεται από τη σχέση:

$$m = \frac{L \cdot \Delta}{f_1 \cdot f_2}$$

όπου: L το μήκος του μικροσκοπίου,
f_1 η εστιακή απόσταση του αντικειμενικού φακού και
f_2 η εστιακή απόσταση του προσοφθάλμιου.

Απόδειξη:

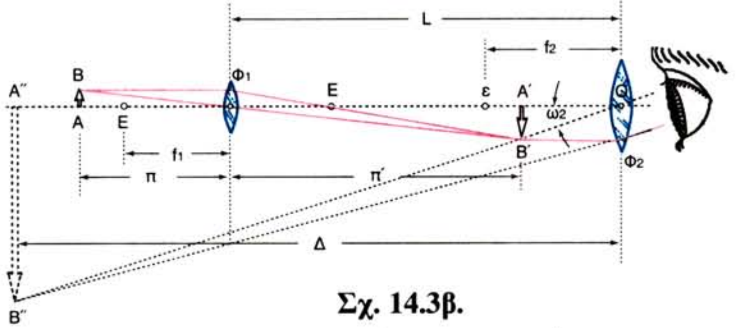
Από τον ορισμό της μεγεθύνσεως οπτικού οργάνου έχομε:

$$m = \frac{\omega_2}{\omega_1} \tag{1}$$

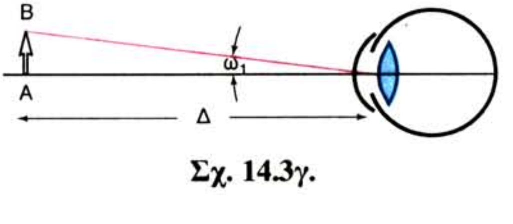
όπου: ω_2 είναι η γωνία οράσεως υπό την οποία βλέπομε (το φανταστικό) είδωλο Α΄΄Β΄΄ με το μικροσκόπιο (σχ. 14.3β) και
ω_1 η γωνία, υπό την οποία θα βλέπαμε το αντικείμενο ΑΒ με γυμνό οφθαλμό αν αυτό βρισκόταν σε απόσταση Δ της ευκρινούς οράσεως (σχ. 14.3γ).

Επειδή οι γωνίες ω_1 και ω_2 είναι μικρές, μπορούμε, αντί των γωνιών, να γράψομε τις εφαπτομένες τους, οπότε η σχέση (1) γράφεται:

$$m = \frac{\varepsilon\varphi\omega_2}{\varepsilon\varphi\omega_1} \tag{2}$$



Σχ. 14.3β.



Σχ. 14.3γ.

Από τα σχήματα 14.3γ και 14.3β παίρνομε τις σχέσεις:

$$\varepsilon\varphi\omega_1 = AB/\Delta \qquad (2) \qquad \text{και} \qquad \varepsilon\varphi\omega_2 = A''B''/\Delta \qquad (3)$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει:

$$m = \frac{A''B''}{AB} \qquad (4)$$

Η σχέση (4) μπορεί να γραφεί και ως εξής:

$$m = \frac{A''B''}{A'B'} \cdot \frac{A'B'}{AB} \qquad (5)$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\frac{A''B''}{A'B'} = m_2 \qquad (6) \qquad \text{και} \qquad \frac{A'B'}{AB} = m_1 \qquad (7)$$

όπου: m_2 η μεγέθυνση του προσοφθαλμίου φακού και
m_1 η μεγέθυνση του αντικειμενικού φακού.

Από τις σχέσεις (5), (6) και (7) προκύπτει:

$$m = m_1 \cdot m_2 \qquad (8)$$

Από το σχήμα 14.3β προκύπτει:

$$m_1 = \frac{A'B'}{AB} = \frac{\pi'}{\pi} \qquad (9)$$

Επειδή κατά προσέγγιση είναι $\pi' = L$ (L το μήκος του μικροσκοπίου) και $\pi = f_1$ η σχέση (9) μας δίνει:

$$m_1 = \frac{L}{f_1} \qquad (10)$$

Η μεγέθυνση m_2 είναι:

$$m_2 = \frac{\Delta}{f_2} \qquad (11)$$

όπου: $f_2 = o\varepsilon$.

Από τις σχέσεις (8), (10) και (11) παίρνομε για τη μεγέθυνση m του μικροσκοπίου τη σχέση:

$$m = \frac{L \cdot \Delta}{f_1 \cdot f_2} \tag{12}$$

14.3.3 Ισχύς μικροσκοπίου.

Η ισχύς του μικροσκοπίου δίνεται από τη σχέση: $I = \dfrac{L}{f_1 \cdot f_2}$

Απόδειξη:

Σύμφωνα με το γενικό ορισμό της ισχύος ενός οπτικού οργάνου, η ισχύς I του μικροσκοπίου (σχ. 14.3β) δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{\omega_2}{AB} \tag{13}$$

όπου: ω_2 η γωνία οράσεως με το όργανο (σχ. 14.3β) και
AB το μήκος του παρατηρούμενου αντικειμένου.

Η σχέση (1) γράφεται και ως εξής:

$$I = \frac{\omega_2}{A'B'} \cdot \frac{A'B'}{AB} \tag{14}$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\frac{\omega_2}{A'B'} = I_2 \quad (15) \qquad \text{και} \qquad \frac{A'B'}{AB} = m_1 \quad (16)$$

όπου: I_2 η ισχύς του προσοφθάλμιου φακού και
m_1 η μεγέθυνση του αντικειμενικού φακού.

Από τις σχέσεις (14), (15) και (16) προκύπτει:

$$I = I_2 \cdot m_1 \tag{17}$$

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$I_2 = \frac{1}{f_2} \tag{18}$$

και κατά προσέγγιση:

$$m_1 = L/f_1 \tag{19}$$

Επομένως από τις σχέσεις (17), (18) και (19) προκύπτει:

$$I = \frac{L}{f_1 \cdot f_2} \tag{20}$$

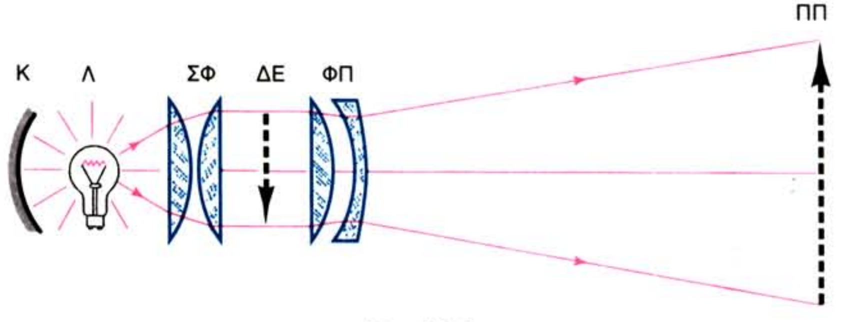
14.4 Προβολέας.

Ο προβολέας είναι μία συσκευή με την οποία επιτυγχάνομε να σχηματίζεται πάνω σε οθόνη (ή σε τοίχο) ένα πραγματικό και μεγάλο είδωλο ενός αντικειμένου, που το βλέπουν ταυτόχρονα πολλοί παρατηρητές.

14.4.1 Διασκόπιο.

Η συσκευή (ο προβολέας) που χρησιμοποιείται για την προβολή διαφανών εικόνων, ονομάζεται διασκόπιο.

Το διασκόπιο (σχ. 14.4α) αποτελείται από τα ακόλουθα μέρη:



Σχ. 14.4α.

1) Από το σύστημα φωτισμού, που είναι συνήθως, λυχνία πυρακτώσεως Λ με μεγάλη ένταση, και πίσω από αυτή είναι ένα κάτοπτρο Κ, έτσι που το φως που εκπέμπεται να κατευθύνεται προς το σύστημα προβολής.

2) Από τους συγκεντρωτικούς φακούς ΣΦ, που χρησιμοποιούνται για να συγκεντρώνουν όσο το δυνατόν περισσότερο φως πάνω στην εικόνα που πρόκειται να προβληθεί.

3) Από το φακό προβολής, που είναι συνήθως ένα σύστημα από δύο φακούς ΦΠ. Το σύστημα αυτό σχηματίζει το είδωλο της διαφανούς εικόνας ΔΕ πάνω σε κατάλληλη οθόνη.

Επειδή το σύστημα των φακών ΦΠ δίνει αντεστραμμένο είδωλο, η εικόνα ΔΕ που πρόκειται να προβληθεί, τοποθετείται στον προβολέα αντεστραμμένη, οπότε το είδωλο της εικόνας σχηματίζεται όρθιο στην οθόνη.

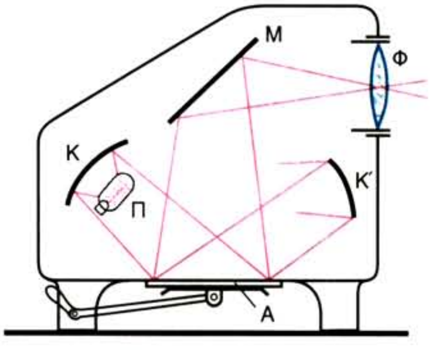
14.4.2 Επισκόπιο.

Η συσκευή (ο προβολέας) που χρησιμοποιείται για την προβολή αδιαφανών αντικειμένων (φωτογραφίες, κείμενα) ονομάζεται επισκόπιο. Το αντικείμενο Α που πρόκειται να προβληθεί (σχ. 14.4β) φωτίζεται από μία ισχυρή πηγή Π με τη βοήθεια δύο κατόπτρων Κ και Κ΄.

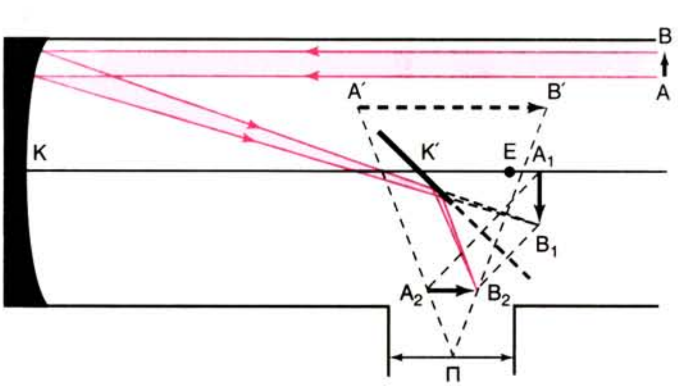
Το φως που εκπέμπεται από το αντικείμενο φέρεται με τη βοήθεια του επίπεδου κατόπτρου Μ στο φακό προβολής Φ, ο οποίος και προβάλλει την εικόνα του αντικειμένου Α πάνω σε κατάλληλη οθόνη.

Παρατήρηση:

Οι συνήθεις διατάξεις προβολής είναι εφοδιασμένες με διάταξη διασκοπικής και επισκοπικής προβολής και ονομάζονται επιδιασκόπια.



Σχ. 14.4β.



Σχ. 14.5.

14.5 Κατοπτρικό τηλεσκόπιο.

΄Ενα κατοπτρικό τηλεσκόπιο (σχ. 14.5) βασικά αποτελείται από τα εξής μέρη:

1) Από ένα κοίλο σφαιρικό (ή παραβολικό) κάτοπτρο Κ που έχει μεγάλη εστιακή απόσταση f_A και μεγάλη διάμετρο.

2) Από ένα συγκλίνοντα φακό Π (προσοφθάλμιο), μικρής εστιακής αποστάσεως $f_Π$ και του οποίου ο άξονας είναι κάθετος στον άξονα του τηλεσκοπίου.

3) Από ένα μικρό επίπεδο κάτοπτρο Κ΄ (ή πρίσμα ολικής ανακλάσεως). Αυτό είναι τοποθετημένο προ της εστίας Ε του κοίλου κατόπτρου και σχηματίζει γωνία περίπου 45° με τον άξονα του κατόπτρου.

Αν δεν υπήρχε το επίπεδο κάτοπτρο Κ΄, τότε το κοίλο κάτοπτρο Κ θα σχημάτιζε το είδωλο A_1B_1 του αντικειμένου ΑΒ, που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από αυτό, πολύ κοντά στην κύρια εστία του Ε. Το είδωλο A_1B_1 θα ήταν πραγματικό, πολύ μικρό και αντεστραμμένο σχετικά με το αντικείμενο ΑΒ.

Τώρα που υπάρχει το επίπεδο κάτοπτρο Κ΄ συμβαίνει το εξής:

Οι ακτίνες που προέρχονται από το αντικείμενο ΑΒ μετά την ανάκλασή τους στο κοίλο κάτοπτρο Κ, ανακλώνται στο επίπεδο κάτοπτρο Κ΄, οπότε σχηματίζεται το είδωλο A_2B_2, του ΑΒ, που είναι πραγματικό. Όταν με τον προσοφθάλμιο παρατηρούμε το είδωλο A_2B_2 βλέπομε το φανταστικό είδωλο Α΄Β΄.

Η μεγέθυνση (m) του κατοπτρικού τηλεσκοπίου είναι ίση με το λόγο της εστιακής αποστάσεως (f_A) του κοίλου κατόπτρου προς την εστιακή απόσταση ($f_Π$) του προσοφθάλμιου φακού:

$$m = \frac{f_A}{f_Π}$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ

15.1 Γνώσεις στηρίξεως.

Το κεφάλαιο της οπτικής που ασχολείται με τον ορισμό των φωτομετρικών μεγεθών, με τις σχέσεις ανάμεσα σε αυτά και με τις μονάδες που χρησιμοποιούμε για τη μέτρησή τους το ονομάζομε φωτομετρία.

α) Στερεά γωνία.

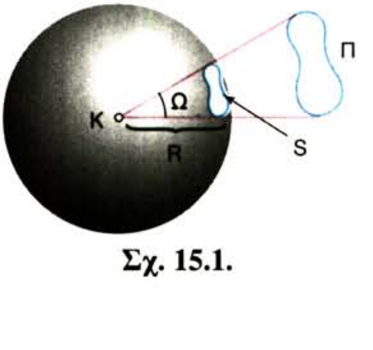
Στην ανάπτυξη της ύλης που θα κάνομε για τα θέματα φωτομετρίας, θα χρειαστούμε την έννοια της στερεάς γωνίας.

Θεωρούμε ένα σημείο Κ και μία επιφάνεια Π (σχ. 15.1). Συνδέομε το σημείο Κ με ευθείες γραμμές με όλα τα σημεία της περιμέτρου της επιφάνειας Π.

Το μέρος του χώρου που περιορίζεται από τις γραμμές αυτές ονομάζεται στερεά γωνία Ω υπό την οποία φαίνεται η επιφάνεια Π από το σημείο Κ. Αν με κέντρο το Κ γράψομε σφαίρα ακτίνας R, ορίζεται στην επιφάνεια της σφαίρας αυτής μια επιφάνεια S.

Το μέτρο της στερεάς γωνίας Ω υπό την οποία φαίνεται από το σημείο Κ η επιφάνεια S (επομένως και η Π) δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{\Omega = \frac{S}{R^2}} \qquad (1)$$



Σχ. 15.1.

Ως μονάδα της στερεάς γωνίας χρησιμοποιούμε σε όλα τα συστήματα μονάδων το 1 στερακτίνιο. Αν το εμβαδόν της επιφάνειας S (σχ. 15.1) είναι ίσο με R^2, τότε η στερεά γωνία Ω θα ονομάζεται γωνία ενός στερακτινίου. Για το S.I. έχομε:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{1\text{m}^2}{(1\text{m})^2} = 1\,\text{steradian}\ \ (1\ \text{στερακτίνιο})$$

Προσοχή:

Επειδή όλη η επιφάνεια μιας σφαίρας (Κ, R) έχει εμβαδόν ίσο με $4\pi R^2$, η στερεά γωνία, που αντιστοιχεί σε όλο το χώρο γύρω από το κέντρο της, ισούται με 4π στερακτίνια.

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi\ \text{steradian (sr)}$$

β) Φωτεινή ενέργεια.

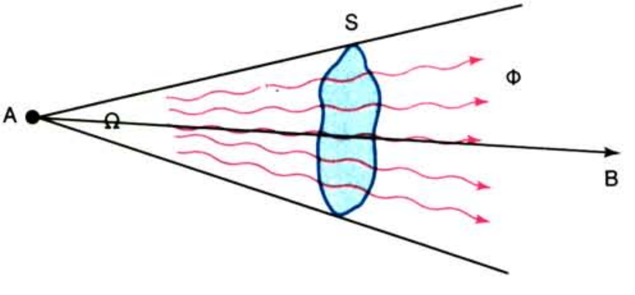
Οι φωτεινές πηγές εκπέμπουν ενέργεια με τη μορφή ορατών και μη ορατών (αοράτων) ακτινοβολιών. Η ενέργεια που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή με τη μορφή ορατής ακτινοβολίας ονομάζεται φωτεινή ενέργεια. Με άλλα λόγια όταν θα λέμε φωτεινή ενέργεια θα εννοούμε μόνο την ενέργεια που μεταφέρεται με τη μορφή ορατών από τον οφθαλμό ακτινοβολιών (δηλ. από εκείνες τις ακτινοβολίες στις οποίες μπορεί να αντιδρά ο οφθαλμός).

15.2 Φωτομετρικά μεγέθη.

15.2.1 Φωτεινή ροή.

α) Φωτεινή ροή που εκπέμπεται από φωτεινή πηγή.

Μία σημειακή φωτεινή πηγή Α βρίσκεται στην κορυφή μιας στερεάς γωνίας Ω (σχ. 15.2).



Σχ. 15.2.

Έστω ότι αυτή σε χρόνο t εκπέμπει μέσα στη στερεά γωνία Ω φωτεινή ενέργεια Ε.

Ονομάζεται φωτεινή ροή Φ που εκπέμπεται από την πηγή Α, μέσα στη στερεά γωνία Ω σε χρόνο t, το πηλίκο της φωτεινής ενέργειας Ε προς το χρόνο t. Δηλαδή:

$$\Phi = \frac{E}{t} \qquad (1)$$

Σημείωση:

Από τη σχέση (1) προκύπτει ότι η φωτεινή ροή που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή παριστάνει την ταχύτητα (ρυθμό) με την οποία η πηγή εκπέμπει φωτεινή ενέργεια.

β) Φωτεινή ροή Φ που περνάει από μία επιφάνεια S.

Η φωτεινή ενέργεια Ε την οποία εκπέμπει μέσα στη στερεά γωνία Ω η φωτεινή πηγή Α που βρίσκεται στην κορυφή της στερεάς γωνίας Ω, θα περνάει από την επιφάνεια S που τέμνει τη γωνία Ω (σχ. 15.2). Ονομάζομε φωτεινή ροή Φ που περνάει από την επιφάνεια S, το πηλίκο της φωτεινής ενέργειας Ε που περνάει από αυτή σε χρόνο t προς το χρόνο t.

15.2.2 Ένταση φωτεινής πηγής (ή φωτεινή ισχύς πηγής ή φωτοβολία πηγής).

Η φωτεινή πηγή Α (σχ. 15.2) εκπέμπει ορισμένη φωτεινή ροή Φ μέσα στη στερεά γωνία Ω.

Ονομάζεται ένταση Ι της πηγής Α κατά την κατεύθυνση ΑΒ το πηλίκο της φωτεινής ροής Φ που εκπέμπει η πηγή Α μέσα στη στερεά γωνία Ω προς τη στερεά γωνία Ω.

Επομένως θα είναι:

$$I = \frac{\Phi}{\Omega} \quad (1) \qquad \text{και} \qquad I = \frac{E}{\Omega \cdot t} \quad (2)$$

Από τη σχέση (2) συμπεραίνομε ότι:

Η ένταση μιας φωτεινής πηγής αποτελεί μέτρο της φωτεινής ενέργειας που εκπέμπεται προς μία κατεύθυνση από την πηγή στη μονάδα του χρόνου και στη μονάδα της στερεάς γωνίας.

Προσοχή:

Αν μία σημειακή φωτεινή πηγή εκπέμπει ομοιόμορφα φωτεινή ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις, η ολική φωτεινή ροή $\Phi_{ολ}$ που εκπέμπει θα ρέει σε στερεά γωνία:

$$\Omega = 4\pi \tag{3}$$

Από τις σχέσεις (1) και (3) προκύπτει:

$$\Phi_{ολ} = 4\pi I \tag{4}$$

15.2.3 Φωτισμός επιφάνειας.

Λέμε ότι μία επιφάνεια φωτίζεται όταν πέφτει πάνω της φωτεινή ροή.

Φωτισμό (Β) μιας επιφάνειας που φωτίζεται ομοιόμορφα, ονομάζομε το πηλίκο της φωτεινής ροής (Φ), που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια, διά του εμβαδού της (S). Δηλαδή είναι:

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

15.2.4 Μονάδες φωτομετρικών μεγεθών.

α) Μονάδα εντάσεως (ισχύος) φωτεινής πηγής.

Ως μονάδα εντάσεως φωτεινής πηγής παίρνομε την 1 candela (καντήλα).

Μία candela (cd) είναι η φωτεινή ένταση, σε μία κατεύθυνση, μιας πηγής που εκπέμπει μονοχρωματική ακτινοβολία συχνότητας 540×10^{12} hertz και έχει ένταση ακτινοβολίας ίση με 1/683 watt ανά steradian.

Η μονάδα εντάσεως φωτεινής πηγής candela (1 cd) είναι θεμελιώδης μονάδα στο διεθνές σύστημα μονάδων (S.I.).

β) Μονάδες φωτεινής ροής.

Ισχύει η σχέση: $\Phi = \Omega \cdot I$

Μονάδα της στερεάς γωνίας είναι το στερακτίνιο και της εντάσεως φωτεινής πηγής είναι η candela.

Έχομε: Φ = 1 cd · 1 sr = 1 lumen = 1 lm.

Επομένως μονάδα φωτεινής ροής στο S.I. είναι το lumen.

Δηλαδή ένα lumen (1 lm) είναι η φωτεινή ροή που παρέχεται από μία πηγή με φωτεινή ένταση 1 candela, σε στερεά γωνία ίση με 1 στερακτίνιο.

Σημείωση:

Η ολική φωτεινή ροή $\Phi_{ολ}$ που εκπέμπει μία σημειακή φωτεινή πηγή, η οποία ακτινοβολεί την ίδια ένταση I cd προς όλες τις κατευθύνσεις είναι: $\Phi_{ολ} = 4\pi I$ lumen (αφού η ολική στερεά γωνία είναι ίση με 4π στερακτίνια).

γ) Μονάδες φωτισμού.

Για τη μέτρηση του φωτισμού χρησιμοποιείται σαν μονάδα το 1 lx, το οποίο ορίζεται από την εξίσωση $B = \Phi/S$ αν θέσομε $\Phi = 1$ lm και $S = 1\ m^2$. Δηλαδή:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{1\,\text{lm}}{1\,\text{m}^2} = 1\,\text{lx}$$

Επομένως, 1 lux είναι ο φωτισμός επιφάνειας, εμβαδού 1 m^2, που φωτίζεται ομοιόμορφα με φωτεινή ροή 1 lumen.

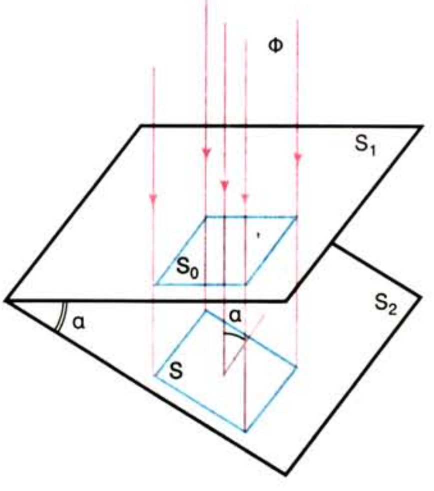
$$1\,\text{lx} = \frac{1\,\text{lm}}{\text{m}^2}$$

15.3 Φωτισμός επιφάνειας από παράλληλες φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν σε αυτή υπό γωνία.

Θεωρούμε μία παράλληλη δέσμη φωτεινής ροής Φ, που προσπίπτει κάθετα σε μία επιφάνεια S_1 και φωτίζει ένα τμήμα της S_o (σχ. 15.3).

Ο φωτισμός της επιφάνειας S_o είναι:

$$B_o = \frac{\Phi}{S_o} \qquad (1)$$



Σχ. 15.3.

Όταν η ίδια φωτεινή ροή Φ προσπίπτει με γωνία α, στην επιφάνεια S_2, θα φωτίζει ένα τμήμα της S.

Ο φωτισμός της επιφάνειας S θα είναι:

$$B = \frac{\Phi}{S} \tag{2}$$

Επειδή η επιφάνεια S_o είναι η προβολή της επιφάνειας S στο επίπεδο S_1 θα είναι:

$$S_o = S \cdot συνα \tag{3}$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει:

$$B = B_o \cdot συνα \tag{4}$$

Η σχέση (4) εκφράζει ότι ο φωτισμός μιας επιφάνειας από μία παράλληλη φωτεινή δέσμη είναι ανάλογος με το συνημίτονο της γωνίας με την οποία προσπίπτουν στην επιφάνεια οι ακτίνες της δέσμης.

15.4 Σχέση φωτισμού επιφάνειας και εντάσεως της φωτεινής πηγής που τον προκαλεί.

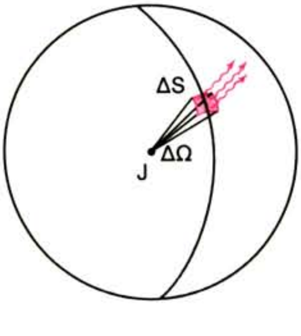
15.4.1 Κάθετος φωτισμός.

Θεωρούμε σημειακή φωτεινή πηγή που έχει ένταση I και βρίσκεται στο κέντρο μιας σφαίρας ακτίνας R (σχ. 15.4α).

Για να βρούμε το φωτισμό σε ένα σημείο της εσωτερικής επιφάνειας της σφαίρας, θεωρούμε στο σημείο αυτό μία στοιχειώδη επιφάνεια ΔS, που ορίζει με το κέντρο της σφαίρας στοιχειώδη στερεά γωνία ΔΩ.

Ο φωτισμός του στοιχειώδους τμήματος ΔS είναι:

$$B_o = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S} \tag{1}$$



Σχ. 15.4α.

Είναι όμως:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{R^2} \qquad (2) \qquad \text{και} \qquad I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega} \qquad (3)$$

Από τις σχέσεις (1), (2) και (3) προκύπτει:

$$B_o = \frac{I}{R^2} \qquad (4)$$

15.4.2 Πλάγιος φωτισμός.

Θεωρούμε μία σημειακή φωτεινή πηγή Π με ένταση I και ένα σημείο A μιας επίπεδης επιφάνειας που απέχει απόσταση R από τη φωτεινή πηγή (σχ. 15.4β). Για να βρούμε το φωτισμό στο σημείο A θεωρούμε στο σημείο αυτό μία στοιχειώδη επιφάνεια ΔS. Επειδή η επιφάνεια ΔS είναι στοιχειώδης, μπορούμε να υποθέσομε ότι δέχεται από την πηγή μια πολύ λεπτή δέσμη παραλλήλων ακτίνων που προσπίπτουν στην επιφάνεια με γωνία α. Επομένως ο φωτισμός της στοιχειώδους επιφάνειας θα είναι:

$$B = B_o \cdot \text{συνα} \qquad (5)$$

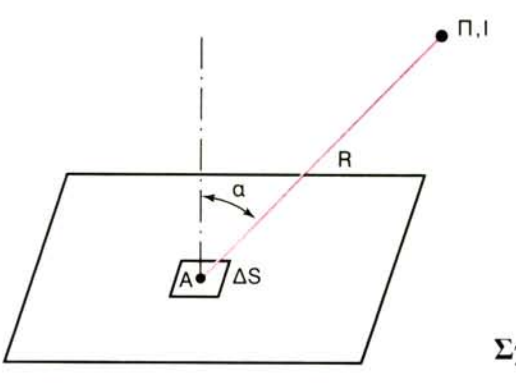
όπου: B_o ο φωτισμός της στοιχειώδους επιφάνειας ΔS που βρίσκεται στο A όταν δέχεται κάθετα την ίδια φωτεινή ροή, με αυτή που δέχεται υπό γωνία (α).

Από τις σχέσεις (4) και (5) προκύπτει:

$$B = \frac{I}{R^2} \cdot \text{συνα} \qquad (6)$$

Προσοχή:

Η σχέση (6) είναι η μαθηματική διατύπωση των νόμων του φωτισμού.



Σχ. 15.4β.

15.5 Νόμοι του φωτισμού.

Ο φωτισμός που προκαλεί μία σημειακή φωτεινή πηγή σε ένα στοιχειώδες τμήμα (σημείο) μιας επιφάνειας ακολουθεί τους παρακάτω νόμους:

1) ***Νόμος των εντάσεων***: Ο φωτισμός επιφάνειας είναι ανάλογος με την ένταση της φωτεινής πηγής που τον προκαλεί.

2) ***Νόμος των αποστάσεων***: Ο φωτισμός που δέχεται επιφάνεια είναι αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου της αποστάσεώς της από την πηγή.

3) ***Νόμος του συνημιτόνου***: Ο φωτισμός επιφάνειας είναι ανάλογος του συνημιτόνου της γωνίας προσπτώσεως των ακτίνων στη στοιχειώδη επιφάνεια.

Παρατηρήσεις:

Αν οι φωτεινές ακτίνες πέφτουν κάθετα πάνω στην επιφάνεια ΔS ($\alpha=0^\circ$), τότε ο φωτισμός της επιφάνειας έχει τη μεγαλύτερη τιμή: $B_K = \frac{I}{R^2}$.

Η μονάδα 1 lux ορίζεται και με τον παρακάτω τρόπο:

Αν στην εξίσωση $B_K = \frac{I}{R^2}$ είναι I = 1 cd και R = 1 m τότε ο κάθετος φωτισμός επιφάνειας είναι:

$$B_K = \frac{I}{R^2} = \frac{1\,\text{cd}}{1\,\text{m}^2} = 1\,\text{lx}$$

Δηλαδή 1 Lux είναι ο φωτισμός μιας επιφάνειας που βρίσκεται σε απόσταση 1 m από φωτεινή πηγή εντάσεως 1 cd, όταν οι φωτεινές ακτίνες πέφτουν κάθετα πάνω στην επιφάνεια.

Σημείωση:

Ο φωτισμός ενός χώρου, στον οποίο πρόκειται να γίνει μία εργασία, εξαρτάται από το είδος της εργασίας. Για να διαβάζομε άνετα, πρέπει ο φωτισμός του κειμένου να είναι ίσος με 25 lx.

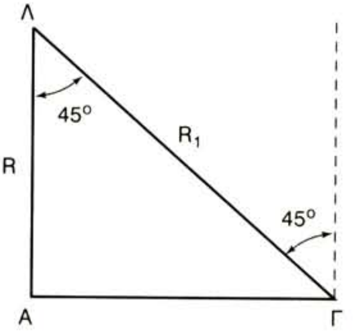
Παράδειγμα:

Για καλύτερη κατανόηση των παραπάνω αναφέρομε το παρακάτω παράδειγμα.

Ένας οριζόντιος δρόμος φωτίζεται από ηλεκτρικό λαμπτήρα Λ, που έχει ένταση I = 500 cd και βρίσκεται σε ύψος R = 5 m από το κατάστρωμα του δρόμου (σχ. 15.5).

Ακριβώς κάτω από το λαμπτήρα (σχ. 15.5) ο φωτισμός του δρόμου είναι:

$$B_K = \frac{I}{R^2} = \frac{500\,\text{cd}}{25\,\text{m}^2} = 20\,\text{lx}$$



Σχ. 15.5.

Σε απόσταση ΑΓ = 5 m από την κατακόρυφη που περνάει από το λαμπτήρα οι φωτεινές ακτίνες πέφτουν με γωνία προσπτώσεως $\alpha = 45^\circ$ και η απόσταση από το λαμπτήρα είναι $R_1 = \sqrt{2R^2}$. Στο σημείο Γ ο φωτισμός του δρόμου είναι:

$$B = \frac{I}{R^2} \cdot \text{συν}\alpha = \frac{500\,\text{cd}}{50\,\text{m}^2} \cdot \text{συν}45^\circ = \frac{500\,\text{cd}}{50\,\text{m}^2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$B = \frac{500\,\text{cd}}{25\,\text{m}^2} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}, \; B \cong 7{,}1\,\text{lx}$$

15.6 Εξίσωση φωτομετρίας (τύπος των ίσων φωτισμών).

Αν πάρομε δύο φωτεινές πηγές με εντάσεις I_2 και I_2 και φωτίσομε διαδοχικά με αυτές μία επιφάνεια, από αποστάσεις R_1 και R_2 τέτοιες ώστε να είναι ίσοι οι φωτισμοί στις δύο περιπτώσεις τότε θα έχομε:

$$B = \frac{I_1}{R_1^2} \cdot \text{συν}\alpha_1 \qquad (1) \qquad \text{και} \qquad A = \frac{I_2}{R_2^2} \cdot \text{συν}\alpha_2 \qquad (2)$$

Από τις σχέσεις (1) και (2) παίρνομε:

$$\frac{I_1}{R_1^2} \cdot \text{συν}\alpha_1 = \frac{I_2}{R_2^2} \cdot \text{συν}\alpha_2 \qquad \text{(τύπος των ίσων φωτισμών)} \qquad (3)$$

Όταν η επιφάνεια έχει θέση κάθετη πάνω στις φωτεινές ακτίνες και στις δύο περιπτώσεις ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0^\circ$) τότε η σχέση (3) γράφεται:

$$\frac{I_1}{R_1^2} = \frac{I_2}{R_2^2} \qquad (4) \qquad \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2} \qquad \text{(εξίσωση της φωτομετρίας)} \qquad (5)$$

Οι σχέσεις (3) και (5) χρησιμοποιούνται για να συγκρίνομε τις εντάσεις δύο φωτεινών πηγών.

Σημείωση:

Η εξίσωση της φωτομετρίας εκφράζει ότι:

Όταν δύο φωτεινές πηγές προκαλούν ίσους φωτισμούς σε μία επιφάνεια με κάθετη πρόσπτωση των φωτεινών ακτίνων, οι εντάσεις τους είναι ανάλογες με τα τετράγωνα των αποστάσεων που έχουν οι πηγές από την επιφάνεια.

15.7 Απόδοση φωτεινής πηγής.

Κάθε φωτεινή πηγή εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ορατών και μη ορατών (αοράτων) ακτινοβολιών. Από όλη όμως την ενέργεια την οποία ακτινοβολεί μία φωτεινή πηγή, η ωφέλιμη ενέργεια της πηγής αυτής είναι μόνο το μέρος της, το οποίο μεταφέρεται με μορφή ορατών ακτινοβολιών, δηλαδή η φωτεινή ενέργεια την οποία εκπέμπει η πηγή (αφού ο σκοπός κάθε φωτεινής πηγής είναι η εκπομπή φωτός).

Βέβαια για να εκπέμπει μία φωτεινή πηγή ενέργεια (ορατής και μη ορατής ακτινοβολίας) πρέπει να καταναλώνει μία άλλη μορφή ενέργειας.

Ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας πυρακτώσεως μετατρέπει (καταναλίσκει) την ενέργεια που του προσφέρεται σε ενέργεια ορατών και μη ορατών ακτινοβολιών.

Ισχύουν οι σχέσεις:

$$\alpha = \frac{E_{\varphi}}{E_K} \quad (1), \qquad \alpha = \frac{E_{\varphi}/t}{E_K/t} \quad (2), \qquad \alpha = \frac{\Phi_{o\lambda}}{P_K} \quad (3)$$

όπου: α η απόδοση φωτεινής πηγής,

E_{φ} η φωτεινή ενέργεια που εκπέμπει η πηγή όταν αυτή καταναλίσκει ενέργεια E_K,

$\Phi_{o\lambda}$ η ολική φωτεινή ροή που εκπέμπει η πηγή,

P_K η ισχύς που καταναλίσκει η πηγή και

t ο χρόνος μέσα στον οποίο η πηγή καταναλίσκει ενέργεια (π.χ. ηλεκτρική) E_K και εκπέμπει φωτεινή ενέργεια E_{φ}.

Με βάση τη σχέση (3) διατυπώνομε τον εξής ορισμό: Ονομάζομε απόδοση (α) μιας φωτεινής πηγής το πηλίκο της ολικής φωτεινής ροής $\Phi_{o\lambda}$ που εκπέμπει η πηγή διά της ισχύος (P_K) που αντιστοιχεί στην ενέργεια την οποία καταναλώνει η πηγή.

Η απόδοση μιας φωτεινής πηγής εκφράζεται σε lm/W.

15.8 Φωτομηχανικό ισοδύναμο του φωτός.

Σε όλες τις φωτεινές πηγές μικρό, μόνο, ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας μετατρέπεται σε φωτεινή ροή.

Στην ιδανική περίπτωση, που μία φωτεινή πηγή θα μετέτρεπε σε φως 100% (δηλ. όλη) την ενέργεια που της παρέχεται, βρίσκεται ότι θα ήταν αποδόσεως περίπου 620 lumen/watt.

Δηλαδή ένα watt, αν μετατρεπόταν όλο σε φως θα έδινε φωτεινή ροή 620 lm.

Η ***ιδανική*** απόδοση α = 650 lm/W ονομάζεται μηχανικό ισοδύναμο του φωτός.

Σημείωση:

1) Το μηχανικό ισοδύναμο του φωτός δεν είναι σταθερό, γιατί εξαρτάται από το χρώμα του φωτός (η τιμή 617 lumen = 1 Watt αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 5576 Å).

2) Και η πιο αποδοτική φωτεινή πηγή απέχει πολύ μιας ιδανικής φωτεινής πηγής (ο λαμπτήρας φθορισμού έχει απόδοση περίπου 50 lm/W).

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Γ΄ ΜΕΡΟΥΣ

1. Σε απόσταση 50 cm από την οπή σκοτεινού θαλάμου, που έχει σχήμα κύβου με πλευρά 20 cm, τοποθετείται κερί. Αν το ύψος της φλόγας είναι 2 cm, ποιο θα είναι το ύψος του ειδώλου της;

2. Φωτεινή ακτίνα ανακλάται επί ενός επιπέδου κατόπτρου και στη συνέχεια επί δευτέρου επιπέδου κατόπτρου, το οποίο σχηματίζει με το πρώτο γωνία 90°. Να δείξετε ότι η ακτίνα εκτρέπεται κατά 180° της αρχικής διευθύνσεως.

3. Σε απόσταση 120 cm από κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο, ακτίνας καμπυλότητας 60 cm, τοποθετείται φωτεινό αντικείμενο, που έχει ύψος 15 cm. Να βρείτε τη θέση και το μέγεθος του ειδώλου.

4. Φλόγα κεριού έχει ύψος 2 cm και βρίσκεται κάθετα στον κύριο άξονα κοίλου σφαιρικού κατόπτρου και σε απόσταση 40 cm από την κορυφή του. Ζητείται: α) Η απόσταση, στην οποία θα σχηματισθεί το είδωλο και β) το μέγεθός του. (Η εστιακή απόσταση του κατόπτρου δίνεται ίση με 30 cm).

5. Προ κυρτού κατόπτρου τοποθετείται αντικείμενο ύψους 6 mm και σε απόσταση 10 cm από αυτό. Σε ποια θέση θα σχηματισθεί το είδωλο και ποιο θα είναι το μέγεθός του; Θα είναι το είδωλο πραγματικό ή φανταστικό; (Η εστιακή απόσταση του κατόπτρου δίνεται ίση με 15 cm).

6. Σε ποια απόσταση από κυρτό κάτοπτρο πρέπει να τοποθετηθεί αντικείμενο, για να έχει το φανταστικό του είδωλο ύψος ίσο προς το μισό του ύψους του; (Η εστιακή απόσταση του κατόπτρου δίνεται ίση με 10 cm).

7. Αντικείμενο, ύψους 8 cm, τοποθετείται σε απόσταση 30 cm από κυρτό σφαιρικό κάτοπτρο. Σε ποια απόσταση θα σχηματισθεί το είδωλο και ποιο θα είναι το ύψος του, αν η ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου είναι ίση με 20 cm;

8. Ποια είναι η εστιακή απόσταση κοίλου σφαιρικού κατόπτρου, προ του οποίου αν τοποθετηθεί αντικείμενο σε απόσταση 50 cm από την κορυφή του, το είδωλό του σχηματίζεται στην αυτή, ακριβώς, απόσταση;

9. Κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο έχει ακτίνα καμπυλότητας 20 cm. Ένα αντικείμενο τοποθετείται σε τέτοια θέση ώστε το σχηματιζόμενο πραγματικό είδωλο να έχει μέγεθος ίσο προς το μισό του μεγέθους του αντικειμένου. Ποια θα είναι η απόσταση του αντικειμένου από το κάτοπτρο;

10. Ποια είναι η ακτίνα καμπυλότητας ενός κοίλου σφαιρικού κατόπτρου, το οποίο μεγεθύνει δύο φορές αντικείμενο, που είναι τοποθετημένο σε απόσταση 15 cm από αυτό;

11. Αντικείμενο ύψους 4 cm, τοποθετείται προ κυρτού κατόπτρου και σε απόσταση 14 cm από αυτό. Αν το φανταστικό είδωλο που σχηματίζεται έχει ύψος 2,5 cm ποια είναι η ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου;

12. Ακτίνα κίτρινου φωτός νατρίου προσπίπτει υπό γωνία 60° σε επιφάνεια νερού. Κατά πόσο θα εκτραπεί η ακτίνα μέσα στο νερό; Ο δείκτης διαθλάσεως του νερού για το κίτρινο φως του νατρίου δίνεται ίσος προς 1,33. (Η απάντηση να συνοδεύεται με σχήμα).

13. Ποια είναι η ταχύτητα μονοχρωματικού φωτός: α) Εντός του γυαλιού και β) εντός του διαμαντιού (δίνονται: $c_o = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec, $n_{γυαλ} = 1{,}5$ και $n_{διαμ.} = 2{,}42$).

14. Ποιος είναι ο λόγος της ταχύτητας του φωτός μέσα στο γυαλί προς την ταχύτητά του στο κενό; Ο δείκτης διαθλάσεως του γυαλιού δίνεται ίσος με 1,5.

15. Η οριακή γωνία μέσα στο νερό για το κίτρινο φως του νατρίου είναι 49°. Ποια είναι η ταχύτητα του φωτός μέσα στο νερό; ($c_o = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sec).

16. Αν ο δείκτης διαθλάσεως ενός γυαλιού είναι 1,6, ποιος θα είναι ο δείκτης διαθλάσεώς του ως προς το νερό;

17. Φωτεινή ακτίνα προσπίπτει υπό γωνία 45° επί διαφανούς μέσου και εκτρέπεται κατά 15°. Ποιος είναι ο δείκτης διαθλάσεως;

18. Στρώμα λαδιού, δείκτη διαθλάσεως 1,47, βρίσκεται πάνω από στρώμα νερού. Φως που προσπίπτει κάθετα, διαπερνά τα δύο στρώματα σε ίσους χρόνους. Ποιος είναι ο λόγος του πάχους των δύο στρωμάτων;

19. Ακτίνα κίτρινου φωτός νατρίου εξέρχεται κάθετα από τη δεύτερη έδρα πρίσματος, θλαστικής γωνίας 30°. Ποιος είναι ο δείκτης διαθλάσεως του πρίσματος, αν η γωνία προσπτώσεως είναι 45°;

20. Υπό ποια γωνία πρέπει να προσπέσει φωτεινή ακτίνα επί πρίσματος, θλαστικής γωνίας 60° και δείκτη διαθλάσεως 1,5, για να εξέρχεται από το πρίσμα υπό γωνία, ίση προς τη γωνία προσπτώσεως;

21. Επί πρίσματος, που η κύριά του τομή είναι ισόπλευρο τρίγωνο, προσπίπτει κάθετα ακτίνα μονοχρωματική επί μιας των εδρών του. Να υπολογίσετε τη γωνία εκτροπής, αν ο δείκτης διαθλάσεως είναι 1,5 και να σχεδιασθεί η πορεία της ακτίνας.

22. Αμφίκυρτος φακός, του οποίου οι επιφάνειες έχουν ίσες ακτίνες καμπυλότητας, είναι κατασκευασμένος από υλικό που ο δείκτης διαθλάσεώς του είναι ίσος προς 1,5. Να δείξετε ότι η εστιακή απόσταση είναι ίση προς την κοινή ακτίνα καμπυλότητας.

23. Ποια είναι η εστιακή απόσταση αμφίκυρτου φακού, που οι ακτίνες καμπυλότητάς του είναι 25 και 35 cm; Ο δείκτης διαθλάσεως του υλικού του φακού είναι ίσος προς 1,6.

24. Συγκλίνοντας φακός, δείκτη διαθλάσεως 1,5 έχει ίσες ακτίνες καμπυλότητας. Αν η εστιακή απόσταση του φακού είναι 33 cm, ποιες είναι οι ακτίνες καμπυλότητας;

25. Προ συγκλίνοντα φακού, εστιακής αποστάσεως 10 cm, τοποθετείται φωτεινό αντικείμενο ύψους 2 cm και σε απόσταση διπλάσια της εστιακής αποστάσεως. Σε ποια θέση θα σχηματισθεί το είδωλο και ποιο θα είναι το μέγεθός του;

26. Συγκλίνοντας φακός σχηματίζει σε διάφραγμα, που απέχει από αυτόν κατά 1,5 m, είδωλο, του οποίου το ύψος είναι 8 φορές μεγαλύτερο του αντικειμένου. Να βρείτε σε ποια απόσταση βρίσκεται το αντικείμενο και ποια είναι η ισχύς του φακού.

27. Προ συγκλίνοντα φακού και σε απόσταση 6 cm από αυτόν τοποθετείται αντικείμενο, που το είδωλό του σχηματίζεται φανταστικό και σε απόσταση 18 cm από το φακό. Να βρείτε την ισχύ του φακού.

28. Ποια είναι η ισχύς ενός αποκλίνοντα φακού που η εστιακή του απόσταση είναι ίση προς −20 cm;

29. Σε απόσταση 55 cm από φακό προβολής, που η ισχύς του είναι 2 διοπτρίες, τοποθετείται λάμπα με νήμα ευθύγραμμο. Σε ποια απόσταση θα σχηματισθεί το είδωλο και ποια θα είναι η μεγέθυνση του φακού;

30. Με συγκλίνοντα φακό σχηματίζομε σε πέτασμα είδωλο, τριπλάσιο του αντικειμένου. Αν η απόσταση του ειδώλου από το φακό είναι 80 cm ποια θα είναι η ισχύς του φακού;

31. Φακός έχει ισχύ 0,5 cm^{-1}. Ποια είναι η ισχύς του φακού σε διοπτρίες;

32. Επιπεδόκυρτος φακός έχει ακτίνα καμπυλότητας 30 cm και δείκτη διαθλάσεως 1,5. Πόσο απέχουν μεταξύ τους οι δύο κύριες εστίες του φακού;

33. Πόση πρέπει να είναι η φωτεινή ένταση μιας λάμπας, που θέλομε να προκαλεί κάθετο φωτισμό 96 Lux, σε απόσταση 1,5 m; Να υπολογίσετε την ολική φωτεινή ροή, που εκπέμπεται από τη λάμπα, αν αυτή θεωρηθεί σαν σημειακή φωτεινή πηγή.

34. Λάμπα πυρακτώσεως εντάσεως 50 cd εκπέμπει προς ορισμένη διεύθυνση. Ζητείται ο φωτισμός επιφάνειας που τοποθετείται κάθετα προς τη διεύθυνση αυτή και σε απόσταση 4 m.

35. Δύο φωτεινές πηγές, οι οποίες έχουν εντάσεις 16 και 9 cd, αντίστοιχα, απέχουν μεταξύ τους κατά 140 cm. Σε ποιο σημείο της ευθείας, που τις ενώνει, πρέπει να τοποθετήσομε διάφραγμα, για να φωτίζονται εξίσου οι δύο όψεις του από τις δύο πηγές;

36. Στο κέντρο σφαίρας, ακτίνας 1 m, βρίσκεται μικρή λάμπα πυρακτώσεως. Ποια είναι η φωτεινή ένταση της λάμπας, αν τμήμα της επιφάνειας της σφαίρας, εμβαδού 50 cm^2, δέχεται φωτεινή ροή 0,01 Lumen;

37. Φωτεινή πηγή προκαλεί, σε επιφάνεια που απέχει από αυτή κατά 2 m, φωτισμό 40 Lux. Πόση πρέπει να είναι η φωτεινή ένταση μιας λάμπας, η οποία να προκαλεί τον αυτό φωτισμό από απόσταση 3 m;

38. Λάμπα πυρακτώσεως, φωτεινής εντάσεως 40 cd βρίσκεται σε ύψος 2 m από τραπέζι. Σε ποιο ύψος πρέπει να τοποθετηθεί λάμπα, φωτεινής εντάσεως 90 cd, ώστε να προκαλεί τον αυτόν φωτισμό του τραπεζιού;

39. Σε ύψος 1 m πάνω από το κέντρο κυκλικού τραπεζιού, ακτίνας 75 cm, αναρτάται λάμπα πυρακτώσεως, φωτεινής εντάσεως 40 cd. Ποιος θα είναι ο φωτισμός στο κέντρο και ποιος στην περιφέρεια του τραπεζιού;

40. Ερυθρό φως, μήκους κύματος στο κενό 6563 Å, διαδίδεται μέσα σε γυαλί, δείκτη διαθλάσεως 1,568. Ζητούνται: α) Η συχνότητα του φωτός και β) η ταχύτητα και το μήκος κύματός του μέσα στο γυαλί (1 Å = 10^{-8} cm).

41. Το μήκος κύματος του φωτός του νατρίου εντός του κενού είναι ίσο προς 5893 Å. Ποια είναι η συχνότητα; Αν η ταχύτητα του φωτός αυτού μέσα στο νερό είναι ίση προς τα 3/4 της ταχύτητας του φωτός μέσα στο κενό, ποιο είναι το μήκος κύματος μέσα στο νερό; (1 Å = 10^{-8} cm).

42. Να δειχθεί ότι κατά τη διάθλαση του φωτός μέσα σε ένα υλικό, ισχύει η σχέση $n = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$ όπου (n) είναι ο δείκτης διαθλάσεως του υλικού και λ_1, λ_2 τα μήκη κύματος του φωτός μέσα στο κενό και μέσα στο υλικό.

43. Το μήκος κύματος μιας ακτινοβολίας μέσα σε διαφανές υλικό είναι δύο φορές μικρότερο του μήκους κύματός της μέσα στο νερό. Ποιος είναι ο δείκτης διαθλάσεως του υλικού;

44. Ποια είναι η ισχύς μεγεθυντικού φακού που παρέχει μεγέθυνση 6;

45. Ένας συγκλίνοντας φακός, με εστιακή απόσταση 2 cm, πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σαν «απλό μικροσκόπιο» από έναν κανονικό παρατηρητή, που βάζει το μάτι του αμέσως μετά το φακό. Σε ποια απόσταση από το φακό πρέπει να τοποθετήσομε το αντικείμενο, για να σχηματιστεί το φανταστικό είδωλο σε απόσταση 25 cm από το φακό; Ποια είναι η μεγέθυνση αυτού του «απλού μικροσκοπίου»;

46. Ένας συγκλίνοντας φακός, με εστιακή απόσταση 2 cm βρίσκεται σε απόσταση 2,5 cm από ένα μάτι, με απόσταση ευκρινούς οράσεως 25 cm. Να βρεθούν η μεγέθυνση και η ισχύς που έχει αυτό το «απλό μικροσκόπιο».

47. Να βρείτε την ισχύ ενός μικροσκοπίου, που το μήκος του είναι 12 cm και οι φακοί του έχουν εστιακές αποστάσεις 2 και 1 cm αντίστοιχα.

48. Μικροσκόπιο έχει αντικειμενικό φακό, εστιακής αποστάσεως 2 mm και προσοφθάλμιο μεγεθύνσεως 10. Ο αντικειμενικός φακός σχηματίζει πραγματικό είδωλο σε απόσταση 16 cm από το κέντρο του. Να βρείτε τη μεγέθυνση του μικροσκοπίου.

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ

Ζ

Θ

Ι

Υ

Φ

Χ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ
ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΤΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ
Υδροστατική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ
Αεροστατική

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ
Δυναμική των ρευστών

ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ
Θερμότητα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ
Στοιχεία θερμοδυναμικής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

Μεταβολές καταστάσεως των σωμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

Διάδοση θερμότητας (ή μετάδοση θερμότητας)

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΠΤΙΚΗΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ
Γενικά περί φωτός – Ευθύγραμμη διάδοση του φωτός

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ
Ανάκλαση του φωτός – Κάτοπτρα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ

Διάθλαση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΔΕΚΑΤΟ

Διάδοση του φωτός μέσα από πρίσμα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΩΔΕΚΑΤΟ
Φάσματα εκπομπής και απορροφήσεως

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΡΙΤΟ
Φακοί

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟ
Οπτικά όργανα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΚΑΤΟ ΠΕΜΠΤΟ
Φωτομετρία