ΑΣΚΗΣΗ 10

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΣΤΙΑΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΦΑΚΟΥ

<u>ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ</u>

ΒΑΣΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ

1.1 Γεωμετρική οπτική

Η Γεωμετρική οπτική είναι ένας τρόπος μελέτης των κυμάτων και χρησιμοποιείται για την εξέταση μερικών φαινομένων (ανάκλαση, διάθλαση) που παρουσιάζονται όταν ένα κύμα περνάει από ένα μέσο σε ένα άλλο, στο οποίο διαδίδεται με διαφορετικό τρόπο. Για την περιγραφή των διαδικασιών, που συμβαίνουν στις επιφάνειες ασυνέχειας, χρησιμοποιείταιως μέσο η έννοια της ακτίνας.

Ακτίνα του κύματος ονομάζεται κάθε γραμμή, που έχει σαν αρχή την "πηγή" του κύματος και εμφανίζει σε κάθε της σημείο την ιδιότητα η ταχύτητα του κύματος να είναι εφαπτόμενη. Οι ακτίνες των σφαιρικών και επιπέδων αρμονικών κυμάτων είναι ευθείες κάθετες στις ισοφασικές επιφάνειες.

Θεωρούμε κύμα ο,τιδήποτε διαδίδεται σε διαφορετικά ομογενή και ισότροπα μέσα Κατά τη διάδοση του αυτή ισχύει το θεώρημα του Malus:

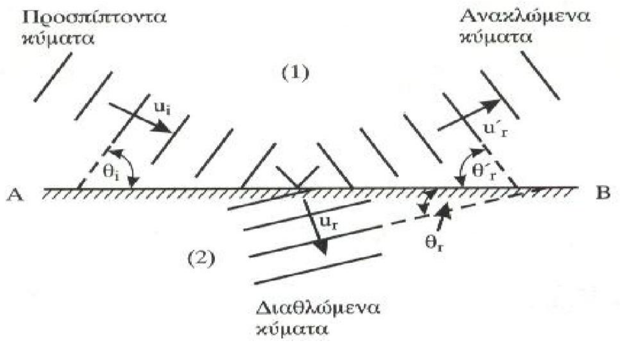
"Η ορθογωνιότητα μεταξύ ακτίνων και μετώπων κύματος διατηρείται σε όλη τη διάρκεια διάδοσης του κύματος".

Το θεώρημα Malus αποτελεί πολύ σημαντικό βοήθημα για την παρακολούθηση Της διάδοσης του κύματος μέσα σε ένα υλικό.

Η γεωμετρική περιγραφή της διάδοσης ενός κύματος είναι ικανοποιητική μόνον όταν οι επιφάνειες από τις οποίες περνά το κύμα κατά τη διάδοση του είναι πολύ πιο μεγάλες από το μήκος κύματος.

1.2 Ανάκλαση και διάθλαση των επίπεδων κυμάτων

Θεωρούμε επίπεδο κύμα, το οποίο κατά τη διάδοση τουσε ένα μέσο (1), με τη διεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος $\mathbf{u}_i$,προσπίπτει στην επιφάνεια διαχωρισμού ΑΒ των μέσων (1) και (2).Είναι γνωστό ότι ένα μέρος του κύματος διαδίδεται στο μέσο (2) και ένα μέρος ανακλάται πίσω στο μέσο (1), δηλ. το αρχικό κύμα διαχωρίζεται σε διαθλώμενο και αντίστοιχα ανακλώμενο κύμα, το οποίο διαδίδεται κατά τη διεύθυνση του μοναδιαίου διανύσματος $\mathbf{u_r}$ και αντίστοιχα $\mathbf{u'_r}$.(Σχ. 10.1)



Σχήμα 10.1

Το (σχ. 10.2) περιγράφει το ίδιο φαινόμενο με τις ακτίνες. Οι γωνίες θ_i , θ_r και θ_t Ονομάζονται αντίστοιχα γωνίες πρόσπτωσης, διάθλασης και ανάκλασης.

Οι διευθύνσεις των $\mathbf{u_i}$, $\mathbf{u_r}$ και $\mathbf{u_t}$ σχετίζονται με τρόπο που να ισχύουν οι νόμοι που ακολουθούν:

1. Οι διευθύνσεις πρόσπτωσης, ανάκλασης και διάθλασης ανήκοθν σε επίπεδο κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων.

2. Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης δηλαδή

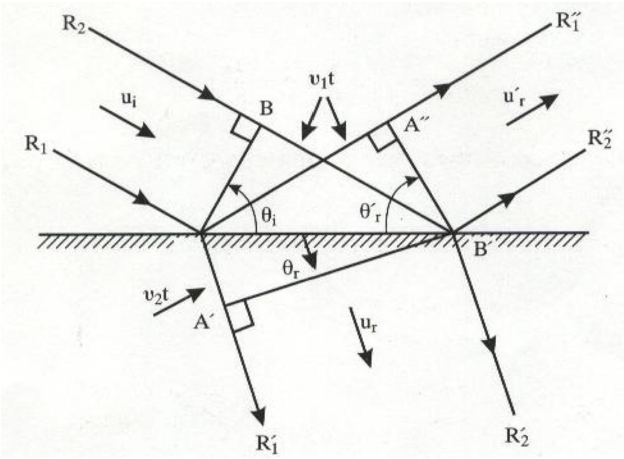
$$\theta_i = \theta_r'$$

3. Ο λόγος των ημιτόνων της γωνίας πρόσπτωσης και διάθλασης είναι σταθερός δηλαδή

$$\frac{\eta\mu\theta_i}{\eta\mu\theta_r} = n_{21} \qquad \textbf{Νόμος του Snell} \qquad (10.1)$$

Η σταθερά n_{21} ονομάζεται δείκτης διάθλασης του μέσου (2) ως προς το μέσο (1), Η δε αριθμητική της τιμή εξαρτάται από το είδος του κύματος και από τις ιδιότητες των δύο μέσων.

Έστω ΑΒ, Α'Β' ΚΑΙ Β'Α'' τα μέτωπα αντίστοιχα του προσπίπτοντος,διαθλώμενου και ανακλώμενου κύματος κατά την πρόσπτωση κύματος στην επιφάνεια διαχωρισμού δύο μέσων (σχ. 10.2). Εάν t είναι ο χρόνος που χρειάζεται το προσπίπτον κύμα για να διανύσει την απόσταση ΒΒ' με ταχύτητα u_1 ,το διαθλώμενο κύμα, στον ίδιο χρόνο διανύει την απόσταση ΑΑ' με ταχυτητα u_2 και το ανακλώμενο την απόσταση ΑΑ'' με ταχύτητα u_1 . Θα είναι:



Σχήμα 10.2

$$\eta\mu\theta_i = \frac{BB'}{AB'} = \frac{u_1 t}{AB'}$$

$$\eta\mu\theta_r = \frac{AA'}{AB'} = \frac{u_2 t}{AB'}$$

$$\eta\mu\theta_r' = \frac{AA''}{AB'} = \frac{u_1 t}{AB'}$$

Η πρώτη και η τρίτη εξίσωση δίνουν:

$$\theta_i = \theta_r'$$

Από την πρώτη και δεύτερη εξίσωση συμπεραίνουμε:

$$\frac{\eta\mu\theta_i}{\eta\mu\theta_r} = \frac{u_1}{u_2}$$

Συγκρίνοντας με τον νόμο του Snell (εξ. 10.1) θα πάρουμε:

$$n_{21} = \frac{u_1}{u_2}$$

Έστω c η ταχύτητα διάδοσης του κύματος σε συγκεκριμένο πρότυπο μέσο ή μέσο αναφοράς. Ονομάζουμε απόλυτο δείκτη διάθλασης κάθε άλλου μέσου το λόγο:

$$n = \frac{c}{u}$$

Στην περίπτωση ηλεκτομαγνητικών κύματων ως μέσο αναφοράς λαμβάνεται το κενό και συνεπώς $c \approx 3 \times 10^8\ ms^{-1}$.

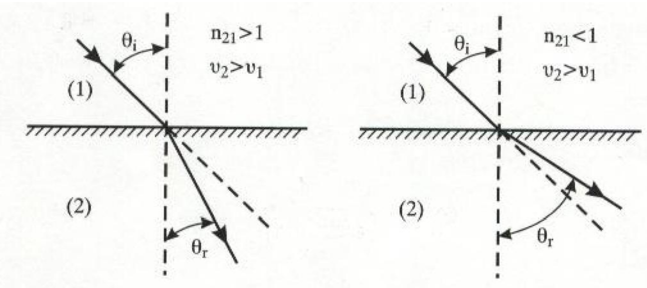
Θα είναι:

$$n_{21} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{c}{u_2}\frac{u_1}{c} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (10.2)$$

δηλαδή ο σχετικός δείκτης διάθλασης δύο μέσων ισούται με το λόγο των απόλυτων δεικτών διάθλασης.

Από τις εξισώσεις (10.1) και (10.2) συνεπάγεται:

$$n_1 \eta\mu\theta_i = n_2 \eta\mu\theta_r \qquad (10.3)$$



Σχήμα 10.3

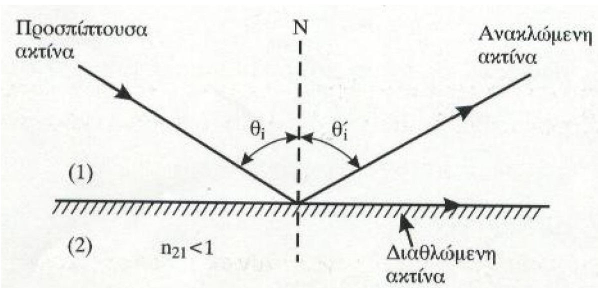
Όταν $u_2 > u_1$ τότε $n_2 < n_1$ και $\theta_i < \theta_r$ (σχ.10.3)

Όταν $n_{21} < 1$ και ημ $\theta_i = n_{21}$ (σχ.10.4) θα είναι και :

ημ $\theta_r = 1$ ή $\theta_r = \pi/2$ δηλαδή η διαθλώμενη ακτίνα θα είναι παράλληλη στην επιφάνεια.

Η γωνία πρόσπτωσης θ που αντιστοιχεί στη γωνία διάθλασης $\theta_r = \pi/2$ ονομάζεται **Οριακή γωνία** και συμβολίζεται με θ_{op}.

Όταν $n_{21} < 1$ και $\theta_i > \theta_{op}$ ή ισοδύναμα ημ $\theta_i > n_{21}$ τότε και ημ $\theta_r > 1$ που είναι αδύνατο. Δηλαδή στην περίπτωση αυτή που έχουμε όπως λέγεται **ολική ανάκλαση** δεν υπάρχει διαθλώμενο κύμα.



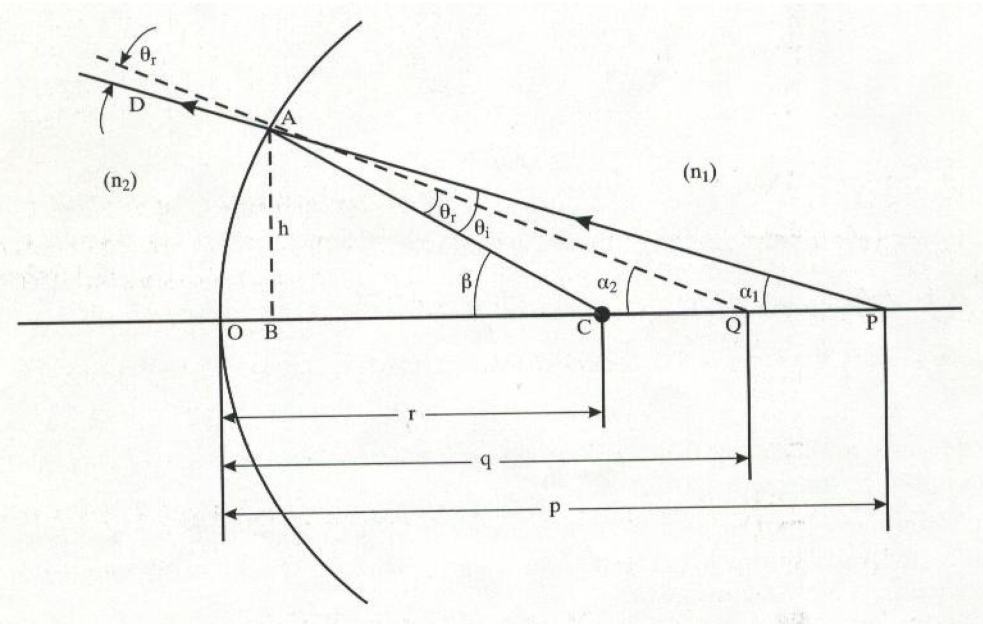
Σχήμα 10.4

1.3 Διάθλαση σε σφαιρική επιφάνεια

Θεωρούμε σφαιρική επιφάνεια που διαχωρίζει δύο μέσα με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 (σχ. 10.2).

Το κέντρο καμπυλότητας C είναι το κέντρο της σφαιρικής επιφάνειας και η κορυφή O και ο πόλος της σφαιρικής επιφάνειας. Η γραμμή που περνάει από τα σημεία O και C λέγεται κύριος άξονας. Αν πάρουμε ως αρχή των συντεταγμένων το σημείο O, όλες οι ποσότητες που μετριούνται προς τα δεξιά του O λαμβάνονται θετικές και όλες προς τα αριστερά αρνητικές. Μια ακτίνα PA προσπίπτει στη σφαιρική επιφάνεια, διαθλάται στη διεύθυνση AD και προεκτεινόμενη πίσω στο πρώτο μέσο τέμνει τον κύριο άξονα στο Q. Από το (σχ. 10.5) φαίνεται ότι: $\beta = \theta_i + \alpha_1$ και $\beta = \theta_r + \alpha_2$. Επίσης ο νόμος του Snell (εξ. 10.3) δίνει:

$$n_1 \eta\mu\theta_i = n_2 \eta\mu\theta_r$$



Σχήμα 10.5

Υποθέτουμε ότι οι γωνίες θ_i, θ_r, α_1, α_2 και β είναι πολύ μικρές. Συνεπώς η τελευταία σχέση γίνεται: $n_1\ \theta_i = n_2\ \theta_r$ ή

$$n_1\ (\beta - \alpha_1) = n_2\ (\beta - \alpha_2) \qquad (10.4)$$

Επίσης στο (σχ. 10.5) θα είναι:

$$\varepsilon\varphi\alpha_1 \approx \alpha_1 \approx h/p\,, \quad \varepsilon\varphi\alpha_2 \approx \alpha_2 \approx h/\alpha\,, \quad \varepsilon\varphi\beta \approx \beta \approx h/r$$

Με αντικατάσταση στην εξίσωση (10.4) θα πάρουμε:

$$\frac{n_1}{p}-\frac{n_2}{q}=\frac{n_1-n_2}{r} \qquad (10.5)$$

Η σχέση (10.5) είναι ο τύπος του Descartes (Καρτέσιου) για διάθλαση σε σφαιρική επιφάνεια και δείχνει ότι για κάθε σημειακό αντικείμενο P υπάρχει ένα και μόνο σημειακό είδωλο Q. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν η σφαιρική επιφάνεια έχει μικρό άνοιγμα και δέχεται ακτίνες με πολύ μικρή κλίση, ώστε να ισχύουν οι προσεγγίσεις που έγιναν.

Κύρια εστία F_o σφαιρικής διαθλαστικής επιφάνειας είναι η θέση σημειακού αντικειμένου πάνω στον κύριο άξονα τέτοια, ώστε οι διαθλώμενες ακτίνες να είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα δηλαδή το είδωλο του σημειακού αντικειμένου να σχηματίζεται στο άπειρο $(q=\infty)$. Η απόσταση της κύριας εστίας F_o από τη σφαιρική επιφάνεια λέγεται εστιακή απόσταση αντικειμένου f_o.

Η εξ. (10.5) με $p = f_o$ και $q=\infty$ γίνεται:

$$\frac{n_1}{f_o}=\frac{n_1-n_2}{r} \qquad \text{ή}$$

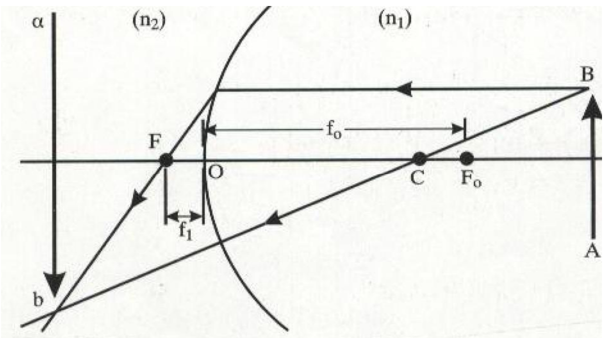
$$f_o=\frac{n_1}{n_1-n_2}r \qquad (10.6)$$

Όταν αντίθετα οι προσπίπτουσες ακτίνες είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα ($p = \infty$) οι διαθλώμενες ακτίνες περνούν από σημείο F_i του κύριου άξονα που λέγεται εστία ειδώλου. Η απόσταση της f_i από τη σφαιρική επιφάνεια λέγεται εστιακή απόσταση ειδώλου.

Η εξ. (10.5) με $p = \infty$ και $q = f_i$ δίνει:

$$f_i=-\frac{n_2}{n_1-n_2}r \qquad (10.7)$$

Προσθέτοντας τις εξισώσεις (10.6) και (10.7) έχουμε: $f_o+f_i=r$



Σχήμα 10.6

Στο (σχ. 10.6) φαίνεται η κατασκευή, με τη βοήθεια των κυρίων ακτίνων, του ειδώλου ab ενός αντικειμένου AB όταν $r > 0$ (βλέπε πίνακα σύμβασης προσήμων 10.1) και $n_1 > n_2$.

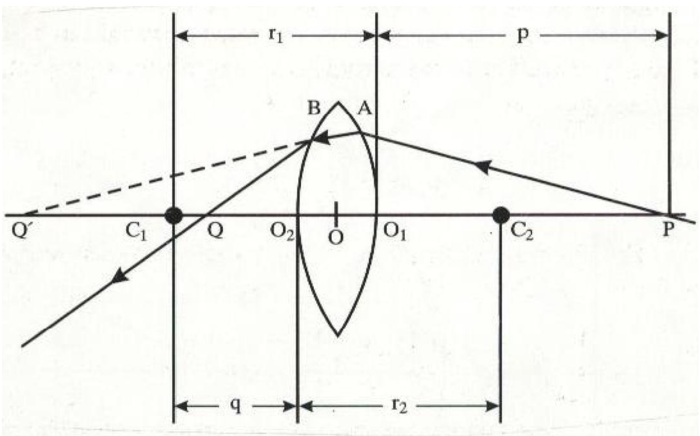
ΠΙΝΑΚΑΣ 10.1

Μεγέθη	+	-
Ακτίνα r	Κοίλη επιφάνεια	Κυρτή επιφάνεια
Εστιακή απόσταση f_o	Συγκλίνουσα	Αποκλίνουσα
Απόσταση αντικειμένου p	Πραγματικό αντικείμενο	Φανταστικό αντικείμενο
Απόσταση ειδώλου q	Φανταστικό είδωλο	Πραγματικό είδωλο

1.4 Φακοί

Ο φακός είναι ένα διαφανές μέσο που περιορίζεται από δύο καμπύλες και συνήθως σφαιρικές επιφάνειες ή από μια σφαιρική και μια επίπεδη επιφάνεια.Θα εξετάσουμε τους **λεπτούς** φακούς δηλαδή φακούς **με πάχος πολύ μικρότερο της ακτίνας τους.**

Υποθέτουμε ότι ο φακός, με δείκτη διάθλασης n, ευρίσκεται μέσα σε μέσο με δείκτη διάθλασης ίσο με τη μονάδα (όπως ο αέρας).



Σχήμα 10.7

Στο (σχ. 10.7) φαίνεται ο σχηματισμός του ειδώλου Q' ενός σημείου P του κυρίου άξονα, όπως παράγεται από την πρώτη επιφάνεια διάθλασης. Η εξ. (10.5) δίνει:

$$\frac{1}{p}-\frac{n}{q'}=\frac{1-n}{r_1} \qquad (10.8)$$

Στο σημείο Β η ακτίνα επαναδιαθλάται και ορίζει το Q ως το τελικό είδωλο του P , όπως παράγεται από το φακό συνολικά. Για τη δεύτερη διάθλαση το αντικείμενο (φανταστικό) είναι το Q' και το είδωλο το Q. Η εξ. (10.5) γίνεται στην περίπτωση αυτή:

$$\frac{n}{q'}-\frac{1}{q}=\frac{n-1}{r_2} \qquad (10.9)$$

Από τις εξ. (10.8) και (10.9) θα έχουμε :

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{q}=(n-1)(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{r_1}) \qquad (10.10)$$

Η εξίσωση (10.10) είναι ο τύπος του Descartes για λεπτούς φακούς.

Οι αποστάσεις που περιλαμβάνονται στις πιο πάνω εξισώσεις μετριούνται από το σημείο Ο του φακού και όχι από τα σημεία O_1 ή O_2, όπως θα έπρεπε. Αυτό συμβαίνει γιατί το πάχος του φακού μπορεί να αμεληθεί επειδή ο φακός είναι πολύ λεπτός.

Το σημείο Ο του φακού είναι το **οπτικό κέντρο του φακού**, δηλαδή ένα τέτοιο σημείο, ώστε **κάθε ακτίνα που περνάει από αυτό να βγαίνει από το φακό με διεύθυνση παράλληλη πρός τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας.**

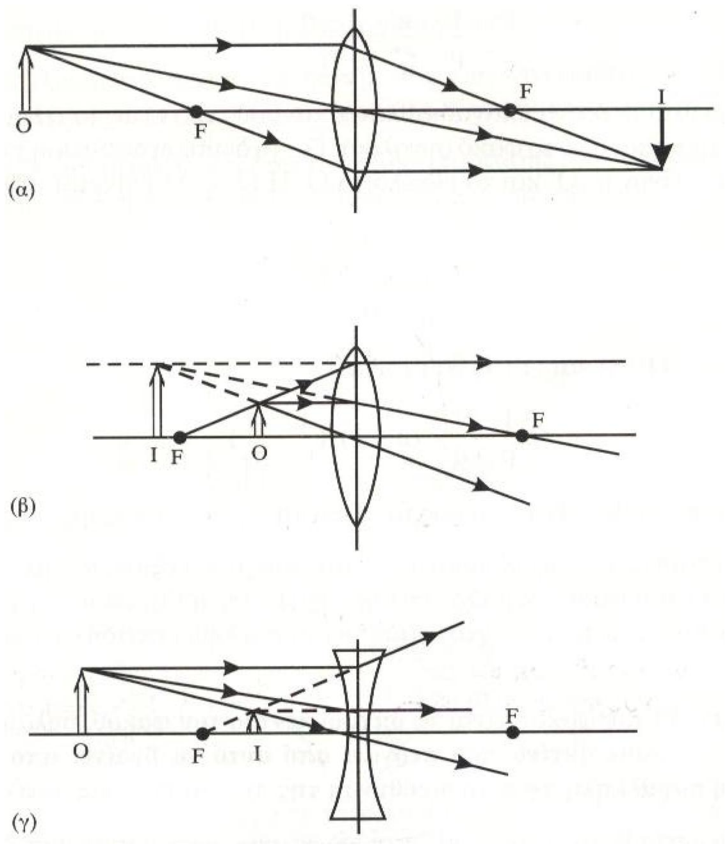
Η **κύρια εστία** F_o του φακού ορίζεται, όπως ακριβώς και αυτή μιας διαθλαστικής επιφάνειας, ως **η** ***θέση πάνω στο κύριο άξονα σημειακού αντικειμένου για την οποία οι διαθλώμενες ακτίνες εξέρχονται του φακού παράλληλα προς τον κύριο*** **άξονα.** Αν f είναι η εστιακή απόσταση αντικειμένου, θέτοντας στην εξίσωση (10.10) $p = f$ και $q = \infty$ θα έχουμε :

$$\frac{1}{f}=(n-1)(\frac{1}{r_2}-\frac{1}{r_1}) \qquad (10.11)$$

Η εξίσωση (10.11) λέγεται και εξίσωση των **κατασκευαστών φακών.** Συνδιάζο-ντας τις εξισώσεις (10.10) και (10.11) θα πάρουμε :

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{q}=\frac{1}{f} \qquad (10.12)$$

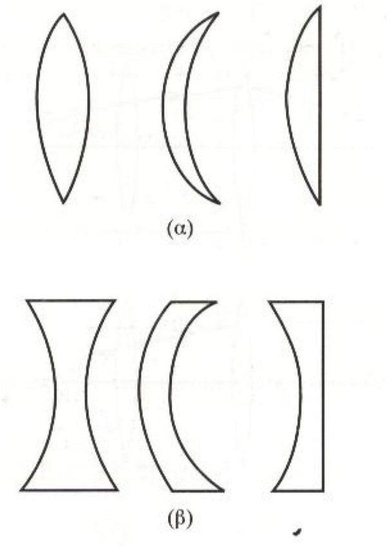
Αντίθετα, ακτίνες προσπίπτουσες παράλληλα προς τον κύριο άξονα ($p = \infty$) περνούν από σημείο F_i του κύριου άξονα, την εστία ειδώλου του φακού. Για την εστία ειδώλου ισχύει q = -f δηλ. οι δύο εστίες είναι συμμετρικές ως προς το οπτικό κέντρο του φακού. Στα πρόσημα των πιο πάνωσχέσεων διατηρούμε τις ίδιες παραδόχες με αυτές του πίνακα (10.1).



Σχήμα 10.8

Στο (σχ. 10.8) φαίνεται ο τρόπος κατασκεύης του ειδώλου I ενός αντικειμένου O στην περίπτωση συγκλίνοντος και αποκλίνοντος φακού με τη βοήθεια των κύριων ακτίνων. Στο (σχ. 10.8α) φαίνεται ότι όταν το αντικείμενο τοποθετείται πέραν της εστίας αντικειμένου F του συγκλίνοντος φακού ($p > f$) το είδωλο είναι πραγματικό και ανεστραμμένο. Όταν το αντικείμενο τοποθετείται μεταξύ του συγκλίνοντος φακού και της εστίας αντικειμένου ($p < f$, σχ.10.8β) το είδωλο είναι φανταστικό, ορθό και μεγαλύτερο από το αντικείμενο. Τέλος για αποκλίνοντα φακό (σχ. 10.8γ) το είδωλο είναι πάντα φανταστικό και ορθό.

Οι συγκλίνοντες και αποκλίνοντες φακοί διακρίνονται από το σχήμα τους. Οι συγκλίνοντες φακοί είναι παχύτεροι στο μέσο απ' ότι στα άκρα, όπως φαίνεται στο (σχ. 10.9α). Το αντίθετο συμβαίνει με τους αποκλίνοντες φακούς (σχ. 10.9β). Για το συγκλίνοντα φακό ισχύει $f > 0$ ενώ για τον αποκλίνοντα $f < 0$ (βλέπε πίνακα 10.1).



Σχήμα 10.9

Η **μεγέθυνση** ενός οπτικού συστήματος ορίζεται ως ο **λόγος του μεγέθους του ειδώλου προς το μέγεθος του αντικειμένου.** Από το (σχ. 10.8), φαίνεται ότι :

$$M = \frac{ab}{AB}$$

Αποδεικνύεται εύκολα ότι $M = \frac{ab}{AB} = \frac{q}{p}$

Η μεγέθυνση είναι **θετική ή αρνητική** αντίστοιχα όταν το είδωλο είναι **ορθό** ή **ανεστραμμένο.**.

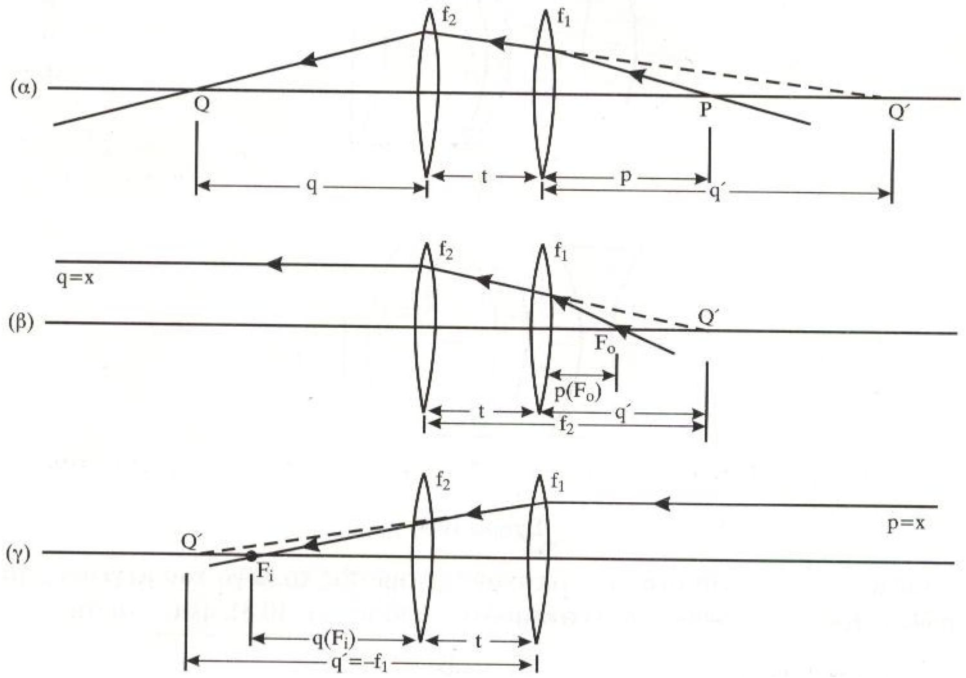
Ισχύς φακού P ονομάζεται **το αντίστροφο της εστιακής του απόστασης** δηλαδή $P = \frac{1}{f}$.

Η ισχύς φακού μετριέται σε διοπτρίες ($1\ D = 1\ m^{-1}$).

1.4.1 Οπτικό σύστημα δύο λεπτών φακών

Στο (σχ. 10.10) φαίνεται η διαδρομή μιας ακτίνας μέσω συστήματος δύο φακών, που απέχουν απόσταση t. Ο πρώτος φακός, εστιακής απόστασης f_1 ,δέχεται αρχικά την ακτίνα που περνάει από το σημείο P του κυρίου άξονα και παράγει το είδωλο του P το Q'. Η θέση του Q' προσδιορίζεται από την εξίσωση :

$$\frac{1}{p}-\frac{1}{q'}=\frac{1}{f_1} \qquad (10.13)$$



Σχήμα 10.10

Το είδωλο Q' αποτελεί αντικείμενο για το δεύτερο φακό που δίνει το τελίκο είδωλο Q. Επειδή απόσταση του ειδώλου Q' από το δεύτερο φακό είναι q' + t θα είναι επίσης :

$$\frac{1}{q'+t}-\frac{1}{q}=\frac{1}{f_2} \qquad (10.14)$$

όπου f_2 η εστιακή απόσταση του δεύτερου φακού.

Το σύστημα των πιο πάνω εξισώσεων προσδιορίζει τη θέση του ειδώλου για οποιαδήποτε θέση του αντικειμένου. Επίσης βοηθά στον προσδιορισμό της εστίας αντικειμένου ή πρώτου εστιακού σημείου F_o καθώς και του δεύτερου εστιάκου σημείου ή εστίας ειδώλου F_i.

Έτσι, αν $p(F_o)$ είναι η εστιακή απόσταση αντικειμένου του συστήματος,η εξ. (10.14) με $q=\infty$ γίνεται : q' = f_2 - t . Με αντικατάσταση αυτής στην εξ. (10.13) θα πάρουμε :

$$p(F_O) = \frac{f_1(f_2 - t)}{f_1 + f_2 - t} \qquad (10.15)$$

Όμοια αν $q(F_i)$ είναι η εστιακή απόσταση ειδώλου του συστήματος η εξ. (10.13) με $q = \infty$ δίνει: $q' = -f_1$. Με αντικατάσταση στην εξ. (10.14) θα έχουμε :

$$q(F_i) = -\frac{f_2(f_1 - t)}{f_1 + f_2 - t} \qquad (10.16)$$

Υποθέτουμε ότι οι δύο φακοί πλησιάζουν μεταξύ τους μέχρις ότου έρθουν σε επάφη. Τότε η απόσταση t μπορεί να παραληφθεί και η εξ.(10.14) παίρνει τη μορφή:

$$\frac{1}{q'} - \frac{1}{q} = \frac{1}{f_2}$$

Η τελευταία εξίσωση προστιθέμενη στην εξ. (10.13) δίνει:

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

δηλαδή σύστημα δύο λεπτών φακών σε επαφή ισοδυναμεί με φακό εστιακής απόστασης F.

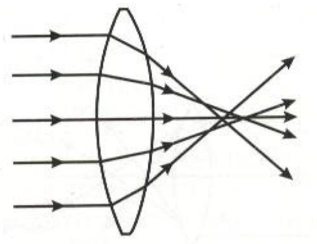
$$\frac{1}{F} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

1.4.2 Σφάλματα φακών

Ένα βασικό πρόβλημα των φακών και των συστημάτων φακών είναι η ατέλεια των ειδώλων τους. Η βασική θεωρία των φακών στηρίζεται στη υπόθεση ότι οι φωτεινές ακτίνες,που προέρχονται από το αντικείμενο, σχηματίζουν μικρές γωνίες με τον κύριο άξονα. Αυτό βεβαίως δεν είναι πάντα αληθές με αποτέλεσμα το είδωλο σημειακού αντικειμένου να μην είναι σημείο αλλά κηλίδα. Συνεπώς το είδωλο εμφανίζεται ασαφές ή και σε άλλες περιπτώσεις παραμορφωμένο.

Οι ατέλειες αυτές των ειδώλων ονομάζονται σφάλματα. Προς αποφυγή των σφαλμάτων τα διάφορα οπτικά συστήματα αποτελούνται από συνδιασμό πολλών φακών.

α) Σφαιρική εκτροπή



Σχήμα 10.11

Στο (σχ. 10.11) φαίνεται ότι οι ακτίνες που προσπίπτουν στην περιοχή κοντά στο κέντρο του φακού υφίστανται μικρότερη εκτροπή απ' ότι οι ακτίνες που προσπίπτουν σε περιφερειακά σημεία του φακού. Συνεπώς οι αξονικές ακτίνες εστιάζουν σε διαφορετικό σημείο απ' ότι οι περιφερειακές ακτίνες. Εάν μετά το φακό τοποθετηθεί πέτασμα με σκοπό το σχηματισμό ειδώλου σημειακού αντικειμένου, θα παρατηρηθείαντί σημείου κηλίδα (σφαιρική εκτροπη ή σφάλμα απο σφαιρικότητα). Το σφάλμα αυτό παρουσιάζεται σε μη λεπτούς φακούς δηλαδή όταν η διάμετρος του φακού είναι μεγάλη σε σύγκριση με την ακτίνα καμπυλότητας.

β) Κόμη

Εάν το σημειακό αντικείμενο τοποθετηθεί πάνω σε δευτερεύοντα άξονα του φακού με μεγάλη κλίση, το είδωλο λαμβάνει τη μορφή κηλίδας με ιδιαίτερο σχήμα και άνιση κατανομή του φωτισμού της. Το σφάλμα αυτό ονομάζεται **κόμη** λόγω του σχήματος της κηλίδας που ομοιάζει με το σχήμα κομήτη. Οι διαστάσεις της κόμης εξαρτώνται από τη γωνία που σχηματίζουν ο κύριος και δευτερεύων άξονας αλλά κυρίως από το γωνιακό άνοιγμα της διάταξης.

γ) Αστιγματισμός

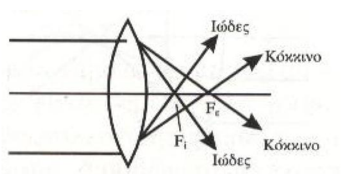
Εκτός της κόμης, για σημείο τοποθετημένο σε δευτερεύοντα άξονα με μεγάλη κλίση, δημιουγείται και δεύτερο σφάλμα που ονομάζεται **αστιγματισμός.** Έτσι οι ακτίνες που προέρχονται από το φωτεινό σημείο μετά την έξοδο τους από το φακό δεν εστιάζουν σε σημείο, αλλά διέρχονται από τμήματα δύο ευθειών καθέτων μεταξύ τους.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το σφάλμα της κόμης υπερτερεί του σφάλματος του αστιγματισμού,όταν η διάταξη παρουσιάζει μεγάλο γωνιακό άνοιγμα, και υπολείπεται αυτού, όταν το γωνιακό άνοιγμα είναι μικρό και η μεταξύ των αξόνων γωνία μεγάλη.

δ) Παραμόρφωση

Το σφάλμα αυτό προκαλείται στην περίπτωση εκτεταμένου αντικειμένου, εφόσον η μεγέθυνση των σημείων που βρίσκονται μακριά από τον κύριο άξονα διαφέρει από τη μεγέθυνση των σημείων, που βρίσκονται κοντά στον κύριο άξονα. Η κατά την απεικόνιση ενός αντικειμένου αλλαγή στο γεωμετρικό σχήμα του,που οφείλεται σε διαφορετικές εγκάρσιες μεγεθύνσεις, λέγεται **παραμόρφωση ειδώλου**.

ε) Χρωματικό σφάλμα



Σχήμα 10.12

Όπως δείχνει η εξ. (10.11), εξίσωση των κατασκευαστών των φακών, η εστιακή απόσταση f του φακού εξαρτάται από το δείκτη διάθλασης του υλικού του φακού. Ο δείκτης όμως διάθλασης εξαρτάται από τη συχνότητα του ηλεκτρομαγνιτικού κύματος. Έτσι, επειδή το ιώδες φως έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης απ' ότι το ερυθρό φως, η εστιακή του απόσταση θα είναι μικρότερη της εστιακής απόστασης που αντιστοιχεί στο ερυθρό φως (σχ. 10.12). Συνεπώς αν σημειακό αντικείμενο που εκπέμπει λεύκο φως τοποθετηθεί μπροστά σε φακό θα αποικονισθεί σε έγχρωμη κηλίδα (**χρωματικό σφάλμα**).

ΜΕΡΟΣ ΤΡΙΤΟ

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΗΨΗΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

3.1 Προσδιορισμός της μέσης τιμής της εστιακής απόστασης συγκλίνοντος φακού με την εκτέλεση σειράς επαναλαμβανομένων μετρήσεων.

3.1.1 Τοποθετούμε το λαμπτήρα πυράκτωσης στο ένα άκρο της οπτικής τράπεζας και τον υπό μέτρηση φακό (φακός 1) σε κατάλληλη απόσταση p απ' αυτόν. Μετράμε την απόσταση p.

3.1.2 Μετακινούμε το πέτασμα πάνω στην τράπεζα μέχρις ότου σχηματιστεί πάνω του καθαρό το είδωλο του φωτεινού αντικειμένου.

3.1.3 Μετράμε την απόσταση φακού-πετάσματος q και το μέγεθος του ειδώλου E.

3.1.4 Βρίσκουμε την εστιακή απόσταση f του φακού από την εξίσωση :

$$\frac{1}{p} - \frac{1}{q} = \frac{1}{f} \qquad (10.12)$$

(Υπενθυμίζουμε ότι κατά τον υπολογισμό της εστιακής απόστασης f θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ο πίνακας σύμβασης προσήμων 10.1)

3.1.5 Από τη μεγέθυνση του φακού υπολογίζουμε το μέγεθος του αντικειμένου A.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.2

α/α	p cm	- q cm	$\frac{1}{p}$ cm^{-1}	$-\frac{1}{q}$ cm^{-1}	f cm	$\bar{f}$ cm	E cm	A cm	$\bar{A}$ cm
1									
2									
.									
.									

3.1.6 Εντάσσουμε τις τιμλες των p ,q, E, A και f στον πίνακα μετρήσεων (102).

3.1.7 Μεταβάλλουμε την απόσταση λαμπτήρα φακού και επαναλαμβάνουμε τις εργασίες από 3.1.1 μέχρι 3.1.6, ώστε να γίνουν συνολικά (10) μετρήσεις της f.

3.1.8 Υπολογίζουμετη μέση τιμή $\overline{f}$ της εστιακής απόστασης του φακού και τη μέση τιμή $\overline{A}$ του μεγέθους του αντικειμένου.

3.1.9 Βρίσκουμε το απόλυτο και σχετικό σφάλμα της μέσης τιμής της εστιακής απόστασης f.

3.1.10 Γραφικός υπολογισμός της εστιακής απόστασης.

Θεωρούμε τη συνάρτηση $\frac{1}{p} = F(-\frac{1}{q})$. Η εξίσωση (10.2) δείχνει ότι η γραφική της παράσταση είναι ευθεία. Χρησιμοποιούμε τις τιμές του πίνακα (10.2) και με βάση αυτές τη σχεδιάζουμε. Η τεταγμένη στην αρχή μας επιτρέπει να υπολογίσουμε την εστιακή απόσταση f.

3.1.11 Υπολογίζουμε την ισχύ του φακού σε διόπτρες (D).

3.2 Προσδιορισμός της εστιακής απόστασης του αποκλίνοντος φακού με τη βοήθεια οπτικού συστήματος εφαπτόμενων φακών

3.2.1 Τοποθετούμε το φακό 2 (αποκλίνων φακός) πάνω στην οπτική τράπεζα, έτσι ώστε να εφάπτεται του φακού 1 (η εστιακή του απόσταση έχει ήδη υπολογιστεί) και βρίσκεται πιο κοντά απ΄ αυτόν στο φωτεινό αντικείμενο.

3.2.2 Μετράμε την απόσταση p συστήματος φακών-αντικειμένου.

3.2.3 Μετακινούμε το πέτασμα πάνω στην τράπεζα μέχρις ότου να σχηματιστεί πάνω του καθαρά το είδωλο του αντικειμένου.

3.2.4 Μετράμε την απόσταση q συστήματος-πετάσματος.

3.2.5 Υπολογίζουμε την εστιακή απόσταση f του συστήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10.3

α/α	p cm	-q cm	f cm	$\overline{f}$ cm	f_2 cm
1					
2					
3					
.					

3.2.6 Εντάσσουμε τις τιμές των p, q, f στον πίνακα μετρήσεων (10.3).

3.2.7 Μεταβάλλουμε την απόσταση συστήματος του αντικειμένου και επαναλαμβάνουμε τις εργασίες από 3.2.2 μέχρι 3.2.6 συνολικά 10 φορές.

3.2.8 Υπολογίζουμε τη μέση τιμή $\overline{f}$ της εστιακής απόστασης του συστήματος και την άγνωστη εστιακή απόσταση f, του φακού 2 από την εξίσωση:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$