

Άσκηση 17

Φαινόμενα διάθλασης. Ιδιότητες και σφάλματα φακών

17.1. Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι η μελέτη του φαινομένου της διάθλασης και των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των λεπτών φακών, καθώς και η παρατήρηση του σχηματισμού ειδώλων από φακούς κάτω από διάφορες συνθήκες. Αναφέρονται επίσης ορισμένα στοιχεία για τα σφάλματα των φακών.

17.2. Γενικά

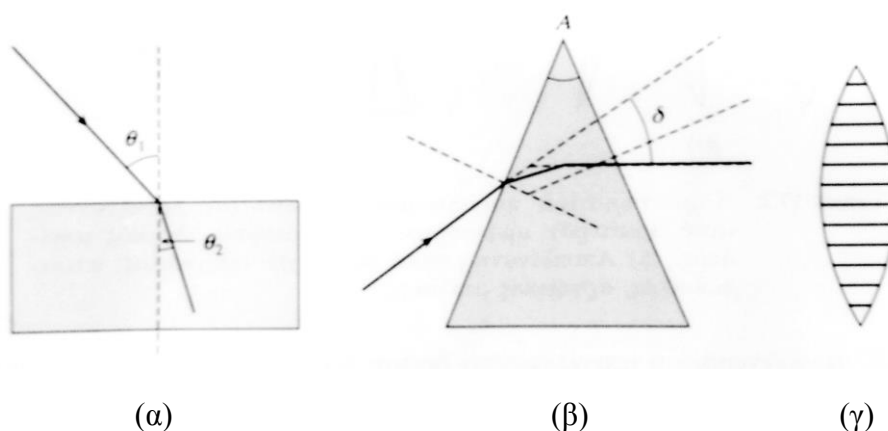
Όπως αποδεικνύεται, οι ιδιότητες των φακών είναι το τελικό αποτέλεσμα επιμέρους διαθλάσεων του φωτός κατά τη διέλευσή του μέσα από τις επιφάνειες που ορίζουν τους φακούς. Πριν ασχοληθούμε επομένως με το πιο σύνθετο αυτό φαινόμενο, ας αρχίσουμε από το απλούστερο φαινόμενο της διάθλασης του φωτός κατά τη διέλευσή του από επίπεδες διαχωριστικές επιφάνειες, ανάμεσα σε διαφορετικά οπτικά μέσα.

17.2.1. Διάθλαση φωτός

Γνωρίζουμε ότι μια φωτεινή ακτίνα (ένα ηλεκτρομαγνητικό κυματομέτωπο), όταν διασχίζει μια επιφάνεια που διαχωρίζει δύο διαφορετικά μέσα, αλλάζει γενικά πορεία. Η αλλαγή πορείας μιας φωτεινής δέσμης γίνεται σύμφωνα με τον **νόμο του Snell**:

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (17.1)$$

όπου οι γωνίες θ_1 και θ_2 είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης αντιστοίχως, όπως φαίνονται στο Σχ.17.1(α). Τα n_1, n_2 είναι οι λεγόμενοι **δείκτες διάθλασης** των αντίστοιχων οπτικών μέσων και ορίζονται ως το πηλίκο c/c_i της ταχύτητας του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα του φωτός στο αντίστοιχο οπτικό μέσο.



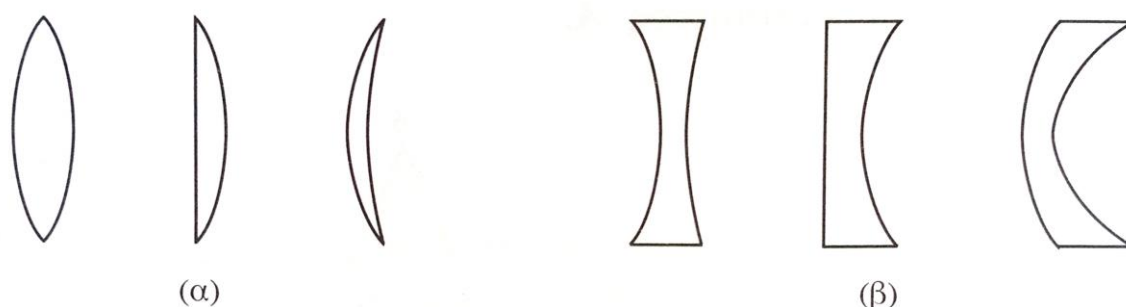
Σχήμα 17.1. (α) Γραφική παράσταση του νόμου της διάθλασης του Snell. (β) Εκτροπή φωτός διερχόμενου μέσα από πρίσμα. Η γωνία εκτροπής δ , ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της προέκτασης της εισερχόμενης στο πρίσμα ακτίνας και της εξερχόμενης από αυτό. (γ) Ένας αμφίκυρτος φακός μπορεί να παρασταθεί ως μια επαλληλία ενός πολύ μεγάλου αριθμού πρισμάτων με μεταβαλλόμενη γωνία κορυφής A .

Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού εξαρτάται, γενικά, από το μήκος κύματος λ (χρώμα) του φωτός. Όταν ένα οπτικό μέσον έχει τη μορφή πρίσματος, μια δέσμη φωτός που διέρχεται μέσα από αυτό υφίσταται εκτροπή, όπως στο Σχ. 17.1(β). Η **γωνία εκτροπής** δ , δηλαδή η γωνία μεταξύ της προέκτασης της εισερχόμενης στο πρίσμα ακτίνας και της εξερχόμενης από αυτό, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία του πρίσματος A .

17.2.2. Οπτικοί φακοί

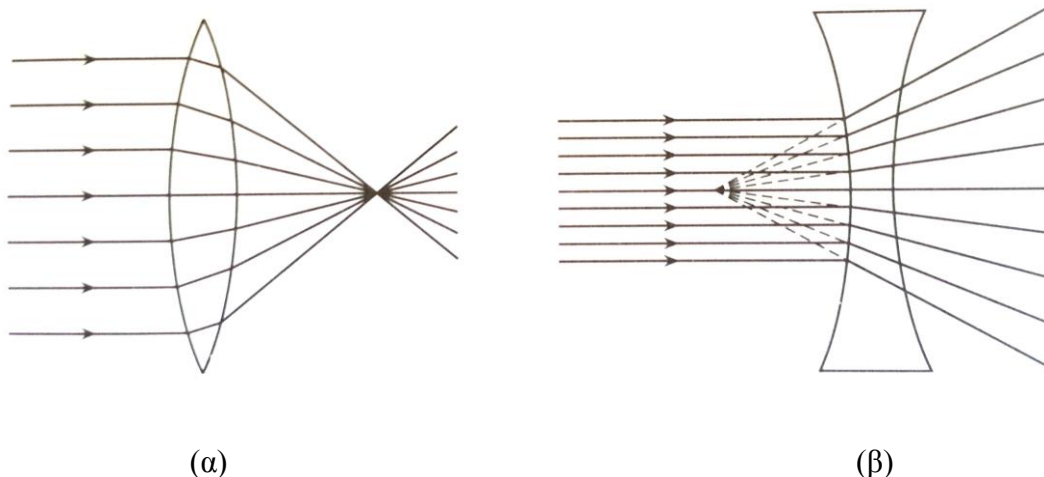
Φακό ονομάζουμε, γενικά, κάθε οπτικό μέσο με συγκεκριμένο δείκτη διάθλασης, με δύο καμπύλες επιφάνειες, από τις οποίες η μία τουλάχιστον έχει μη μηδενική καμπυλότητα (η επίπεδη επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως σφαιρική με μηδενική καμπυλότητα ή άπειρη ακτίνα καμπυλότητας). Οι φακοί κατασκευάζονται συνήθως από γυαλί, αλλά και από υλικά όπως ο χαλαζίας, ο φθορίτης ή και πλαστικά.

Από άποψη λειτουργικότητας (και γεωμετρικών χαρακτηριστικών), οι φακοί κατατάσσονται κατ' αρχήν σε δύο κατηγορίες: τους **συγκλίνοντες** ή θετικούς, που είναι παχύτεροι στο κέντρο από ό,τι στα άκρα και συγκεντρώνουν το φως, και τους **αποκλίνοντες** ή αρνητικούς, που είναι παχύτεροι στα άκρα και δημιουργούν το αντίθετο οπτικό αποτέλεσμα. Οι συγκλίνοντες φακοί μπορεί να είναι αμφίκυρτοι, επιπεδόκυρτοι ή θετικοί μηνίσκοι, και οι αποκλίνοντες, αντίστοιχα, αμφικόιλοι, επιπεδόκοιλοι ή αρνητικοί μηνίσκοι. Στο Σχ. 17.2 φαίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα των φακών που προαναφέραμε.



Σχήμα 17.2. Χαρακτηριστικά παραδείγματα φακών: (α) Συγκλίνοντες (από αριστερά): αμφίκυρτος, επιπεδόκυρτος, θετικός μηνίσκος. (β) Αποκλίνοντες (από αριστερά): αμφικόιλος, επιπεδόκοιλος, αρνητικός μηνίσκος.

Η συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα δράση των φακών που αναφέραμε αποτελεί το τελικό αποτέλεσμα επιμέρους διαθλάσεων. Μπορούμε δηλαδή να δούμε ένα φακό ως μια επαλληλία ενός πολύ μεγάλου αριθμού πρισμάτων με μεταβαλλόμενη γωνία κορυφής A , όπως στο Σχ. 17.1γ για έναν αμφίκυρτο φακό. Λόγω μεταβολής της γωνίας κορυφής A , από πρίσμα σε πρίσμα, η γωνία εκτροπής είναι μεγαλύτερη για τα ακραία από ό,τι για τα κεντρικά τμήματα του φακού. Έτσι, όταν μία παράλληλη δέσμη φωτός περάσει μέσα από έναν τέτοιο φακό, η εκτροπή των περιφερειακών ακτινών αυτής της δέσμης είναι μεγαλύτερη και μειώνεται σταδιακά προς το μηδέν για τις κεντρικές ακτίνες. Το αποτέλεσμα είναι ότι όλες οι ακτίνες τείνουν να συγκεντρωθούν σε μία μικρή περιοχή, μετά τον φακό, η γεωμετρία και οι διαστάσεις της οποίας εξαρτώνται από τη μορφή του φακού, όπως φαίνεται στο Σχ. 17.3α για έναν συγκλίνοντα φακό. Για αποκλίνοντα φακό μια παράλληλη δέσμη φωτός φαίνεται, μετά τη διέλευσή της από το φακό, να αποτελείται από ακτίνες που αποκλίνουν, ξεκινώντας από μια περιοχή πριν από το φακό (Σχ. 17.3β).



Σχήμα 17.3. (α) Οι παράλληλες ακτίνες συγκλίνουν μετά τη διέλευσή τους από συγκλίνοντα φακό. (β) Οι παράλληλες ακτίνες αποκλίνουν μετά τη διέλευσή τους από αποκλίνοντα φακό.

17.2.3. Ιδιότητες των φακών

Κάθε φακός παρουσιάζει αξονική συμμετρία ως προς μια ευθεία που περνάει από το γεωμετρικό κέντρο του και είναι κάθετη στις δύο επιφάνειες του φακού στα σημεία διέλευσης της ευθείας. Η χαρακτηριστική αυτή ευθεία λέγεται **άξονας του φακού**. Για τους σφαιρικούς φακούς (φακούς δηλαδή που ορίζονται από σφαιρικές επιφάνειες), ο άξονας περνάει από τα κέντρα καμπυλότητας των σφαιρικών επιφανειών που ορίζουν τον φακό. Πάνω στον άξονα ορίζουμε ως **κύρια εστία** (F , Σχ. 17.4) ένα σημείο που έχει την ακόλουθη ιδιότητα: κάθε ακτίνα που διέρχεται από αυτό ταξιδεύει μετά τη διάθλαση, παράλληλα στον άξονα του φακού. Αντίστοιχα, **δευτερεύουσα εστία** είναι ένα σημείο προς το οποίο κατευθύνονται, μετά τη διάθλαση, οι ακτίνες που πριν ταξίδευαν παράλληλα στον άξονα.

Στην περίπτωση των λεπτών σφαιρικών φακών (δηλαδή φακών το πάχος των οποίων είναι μικρό σε σχέση με τη διάμετρό τους) οι αποστάσεις της κύριας και της δευτερεύουσας εστίας από το κέντρο του φακού είναι ίσες, ανεξάρτητα από το αν ο φακός είναι συμμετρικός ή όχι. Η απόσταση αυτή λέγεται **εστιακή απόσταση** και συμβολίζεται με f . Η εστιακή απόσταση εξαρτάται από το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένος ο φακός και από τη γεωμετρία των επιφανειών που τον ορίζουν.

Στην περίπτωση των σφαιρικών φακών ισχύει η λεγόμενη **σχέση των κατασκευαστών των φακών**:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (17.2)$$

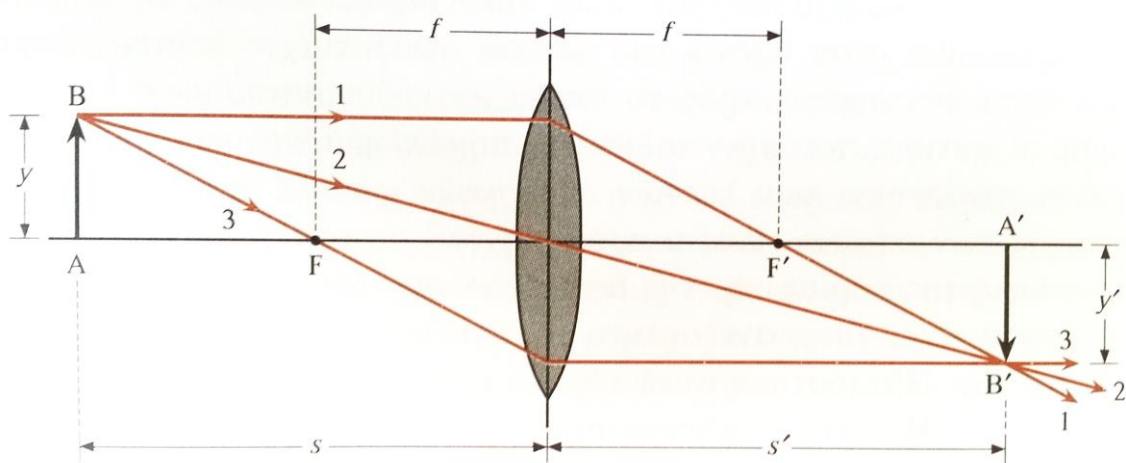
Στην Εξ. (17.2), n είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού, ο οποίος προσδιορίζεται συνήθως στο κίτρινο χρώμα των γραμμών D του νατρίου ($\lambda_1 = 588,995 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 589,592 \text{ nm}$), και r_1, r_2 είναι οι ακτίνες καμπυλότητας των σφαιρικών επιφανειών που ορίζουν τον φακό. Για τις ακτίνες καμπυλότητας ισχύει η σύμβαση ότι καθώς οι φωτεινές ακτίνες ταξιδεύουν από τα αριστερά προς τα δεξιά μέσα από το φακό, όλες οι κυρτές επιφάνειες έχουν θετική ακτίνα καμπυλότητας και όλες οι κοίλες αρνητική. Γνωρίζοντας τον δείκτη διάθλασης (n) του υλικού και τη γεωμετρία (r_1, r_2) ενός φακού, μπορούμε να υπολογίσουμε την εστιακή του απόσταση.

Αποδεικνύεται ότι οι σφαιρικοί φακοί συγκεντρώνουν, με πολύ καλή προσέγγιση, τις παράλληλες ακτίνες που διέρχονται από αυτούς σε ένα σημείο, δηλαδή στην εστία του

φακού, με την προϋπόθεση ότι η απόσταση των ακτινών από το κέντρο του φακού είναι μικρή σε σχέση με την αντίστοιχη εστιακή απόσταση (προσέγγιση μικρών γωνιών).

Έχοντας υπόψη μας όλα τα παραπάνω, μπορούμε να προσδιορίσουμε γραφικά την εικόνα στην οποία, σημείο προς σημείο (βλ. Σχ. 17.4):

- οι ακτίνες οι οποίες, πριν τη διέλευσή τους από το φακό, είναι παράλληλες προς τον άξονα (ακτίνα 1) περνούν, μετά τη διέλευσή τους από το φακό, από την εστία (F') του φακού
- οι ακτίνες οι διερχόμενες από την κυρία εστία (F) γίνονται, μετά τη διέλευσή τους από το φακό, παράλληλες προς τον άξονα (ακτίνα 2).



Σχήμα 17.4. Κατασκευή του πραγματικού ειδώλου, $A'B'$, ενός αντικειμένου, AB , τοποθετημένου σε απόσταση s , μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση, f , ενός συγκλίνοντα φακού.

Μπορούμε μάλιστα για τον έλεγχο της γραφικής κατασκευής, να χρησιμοποιήσουμε και μία τρίτη κατηγορία ακτινών, αυτών που διέρχονται από το κέντρο (ακτίνα 3), οι οποίες μετά ακολουθούν την ίδια ακριβώς κατεύθυνση. Μια τέτοια κατασκευή της εικόνας, με τη λεγόμενη μέθοδο των παράλληλων ακτινών, φαίνεται στο Σχ. 17.4. Αν s και s' είναι οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου, αντίστοιχα, από το κέντρο του φακού, και y και y' τα αντίστοιχα μεγέθη τους, αποδεικνύεται ότι ισχύουν, για όλες τις περιπτώσεις, οι λεγόμενες **θεμελιώδεις εξισώσεις των φακών**:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (17.3\alpha)$$

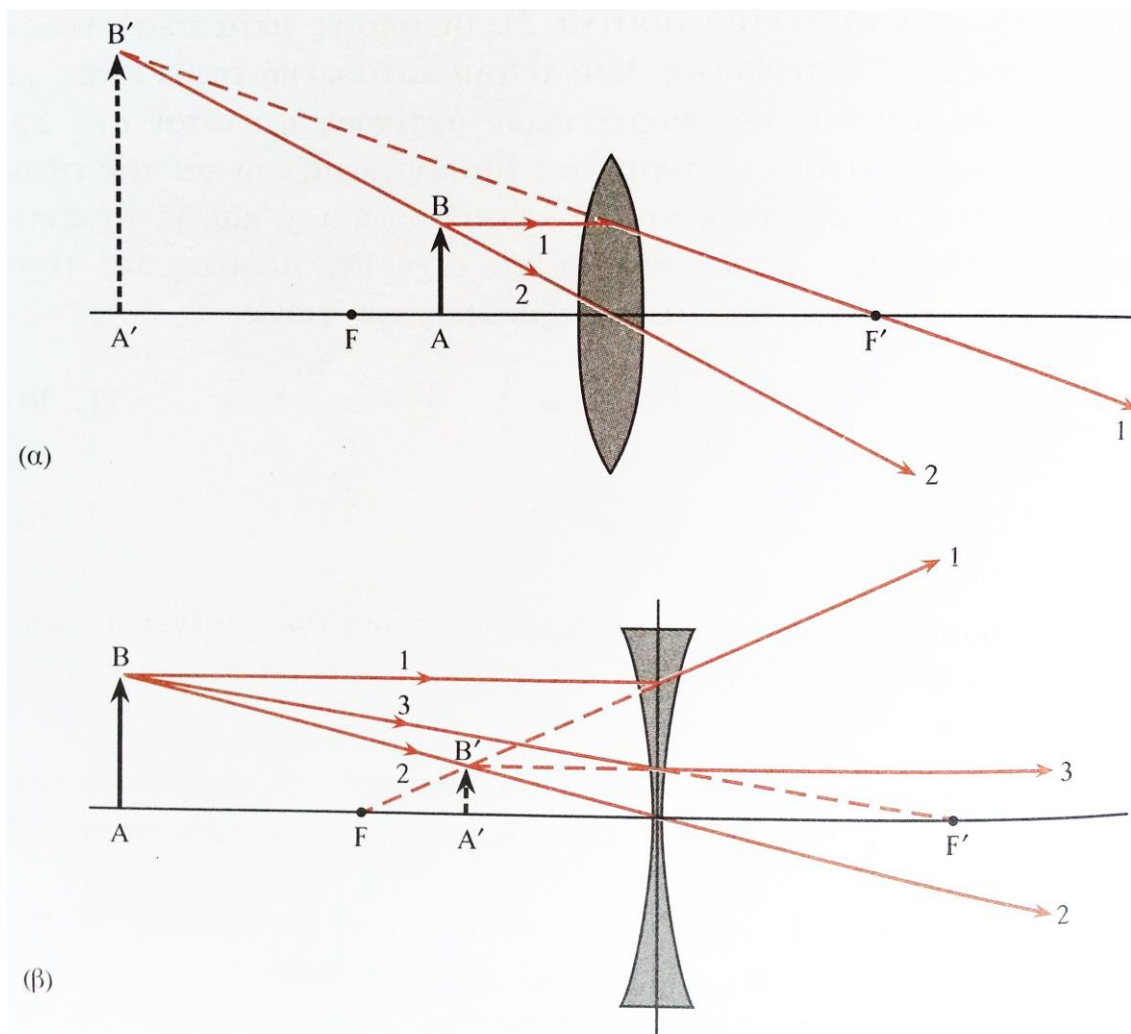
$$\frac{y}{y'} = -\frac{s}{s'} \quad (17.3\beta)$$

Η σύμβαση που ισχύει για τα πρόσημα των μεγεθών έχει συμφωνηθεί με βάση την πορεία των ακτινών από αριστερά προς τα δεξιά. Συγκεκριμένα:

- το s είναι θετικό όταν μετράται αριστερά από το κέντρο του φακού, ενώ το s' είναι θετικό όταν μετράται δεξιά από το κέντρο του φακού
- και οι δύο εστιακές αποστάσεις είναι θετικές για τους συγκλίνοντες και αρνητικές για τους αποκλίνοντες φακούς

- οι διαστάσεις αντικειμένου και ειδώλου είναι θετικές όταν μετρώνται προς τα πάνω σε σχέση με τον άξονα του φακού, και αρνητικές στην αντίθετη περίπτωση.

Όταν ένα αντικείμενο τοποθετηθεί μπροστά από ένα φακό, τότε οι ακτίνες που ξεκινάνε από κάθε σημείο του αντικειμένου και διέρχονται από το φακό ακολουθούν, ανάλογα με το είδος του φακού και την απόσταση φακού-αντικειμένου, διαφορετική πορεία. Άλλοτε συγκεντρώνονται σ' ένα σημείο, το οποίο και ονομάζουμε **πραγματικό είδωλο** (του αντίστοιχου σημείου του αντικειμένου), και άλλοτε αποκλίνουν, δίνοντας την εντύπωση ότι προέρχονται από κάποιο άλλο σημείο, το οποίο και ονομάζουμε **φανταστικό είδωλο** του αντίστοιχου σημείου του αντικειμένου.



Σχήμα 17.5. (α) Κατασκευή φανταστικού ειδώλου $A'B'$ ενός αντικειμένου AB , τοποθετημένου σε απόσταση, s , μικρότερη από την εστιακή απόσταση f , ενός συγκλίνοντα φακού. (β) Κατασκευή φανταστικού ειδώλου $A'B'$ ενός αντικειμένου AB , τοποθετημένου μπροστά από έναν αποκλίνοντα φακό.

Πραγματικά είδωλα παίρνουμε από αντικείμενα τοποθετημένα μπροστά σε συγκλίνοντες φακούς, σε απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή τους απόσταση (Σχ. 17.4). Φανταστικά είδωλα παίρνουμε από αντικείμενα τοποθετημένα μπροστά από συγκλίνοντες φακούς σε απόσταση μικρότερη της εστιακής (Σχ. 17.5α) και από αντικείμενα τοποθετημένα σε οποιοδήποτε σημείο μπροστά από αποκλίνοντες φακούς (Σχ. 17.5β).

Ορίζουμε ως οπτική ισχύ P ενός φακού το αντίστροφο της εστιακής του απόστασης, δηλαδή $P = 1/f$. Η μονάδα οπτικής ισχύος είναι η διοπτρία D , και αντιστοιχεί σε εστιακή απόσταση ενός μέτρου, $1 D = 1 \text{ m}^{-1}$.

17.2.4. Σφάλματα των φακών

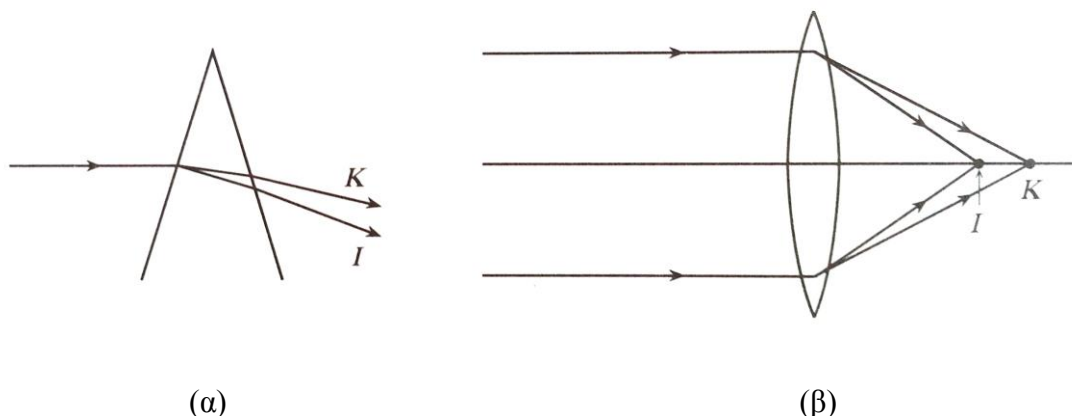
Η συζήτηση για τους φακούς, ως αυτό το σημείο, υπέθετε σιωπηρά δύο συνθήκες:

- το φως είναι μονοχρωματικό
- ο φακός έχει μικρό άνοιγμα, και το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στον άξονα (προσέγγιση μικρών γωνιών).

Η πρώτη συνθήκη εξασφαλίζει σταθερότητα του δείκτη διάθλασης, n , για όλες τις φωτεινές ακτίνες που έρχονται από το αντικείμενο, ενώ η δεύτερη εξασφαλίζει μικρές κλίσεις των ακτινών και μικρές γωνίες εισόδου. Η παραβίαση της πρώτης συνθήκης οδηγεί στα λεγόμενα **χρωματικά σφάλματα των φακών** ενώ η παραβίαση της δεύτερης οδηγεί στα λεγόμενα **μονοχρωματικά σφάλματα**.

17.2.4.1. Χρωματικά σφάλματα

Τα χρωματικά σφάλματα των φακών οφείλονται στις ιδιότητες διασποράς των οπτικών υλικών. Η εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης του φωτός σε ένα οπτικό μέσο από τη συχνότητά του, που εκφράζεται ως εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το χρώμα, κάνει αμέσως φανερή την πηγή των χρωματικών σφαλμάτων. Μία πρώτη ποιοτική αντίληψη αυτής της συμπεριφοράς μπορεί να έχει κανείς μέσα από την αντιμετώπιση ενός φακού ως επαλληλία πρισμάτων, όπως στο Σχ.17.6.



Σχήμα 17.6. (α) Μια πολυχρωματική ακτίνα, διερχόμενη μέσα από πρίσμα, αναλύεται στις χρωματικές συνιστώσες της. (β) Οι επιμέρους χρωματικές συνιστώσες παράλληλων πολυχρωματικών ακτινών συγκεντρώνονται σε διαφορετικά εστιακά σημεία.

Στο Σχ. 17.6α, μία παράλληλη πολυχρωματική δέσμη, που πέφτει σε ένα πρίσμα, αναλύεται σε όλα τα χρώματα από τα οποία αποτελείται, από το κόκκινο (K) μέχρι το ιώδες (I). Όταν έχουμε λοιπόν πολυχρωματικό φως, η συνδυασμένη δράση της επαλληλίας των πρισμάτων που συνιστούν τον φακό έχει ως αποτέλεσμα τη συγκέντρωση των επιμέρους χρωματικών συνιστωσών σε διαφορετικά εστιακά σημεία (Σχ. 17.6β).

Από τη σχέση των κατασκευαστών των φακών (Εξ. 17.2) βλέπουμε ότι για σταθερά γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός φακού, η εστιακή απόσταση, αλλάζει με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας, με τον ίδιο τρόπο που αλλάζει ο παράγοντας $(n-1)$. Για να δοθεί ένα μέτρο της διασποράς ενός υλικού, συνήθως δίνεται ο δείκτης διάθλασης του υλικού για τρεις χαρακτηριστικές γραμμές εκπομπής: τη φασματική γραμμή C του υδρογόνου ($\lambda = 656,28 \text{ nm}$) στο κόκκινο, την κίτρινη διπλή γραμμή D του νατρίου ($\lambda = 589,59 \text{ nm}$, $588,99$

nm), και την κυανή γραμμή F ($\lambda = 486,13$ nm) του υδρογόνου. Οι τρεις παραπάνω γραμμές καλύπτουν το 70% περίπου της ορατής περιοχής του φωτός και είναι διατεταγμένες γύρω από το μέγιστο της ευαισθησίας του ανθρώπινου ματιού. Το πηλίκο

$$\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (17.4)$$

όπου n_D , n_F και n_C είναι οι δείκτες διάθλασης για τις γραμμές D , F , και C αντίστοιχα, αποτελεί ένα **μέτρο της διασποράς του υλικού**.

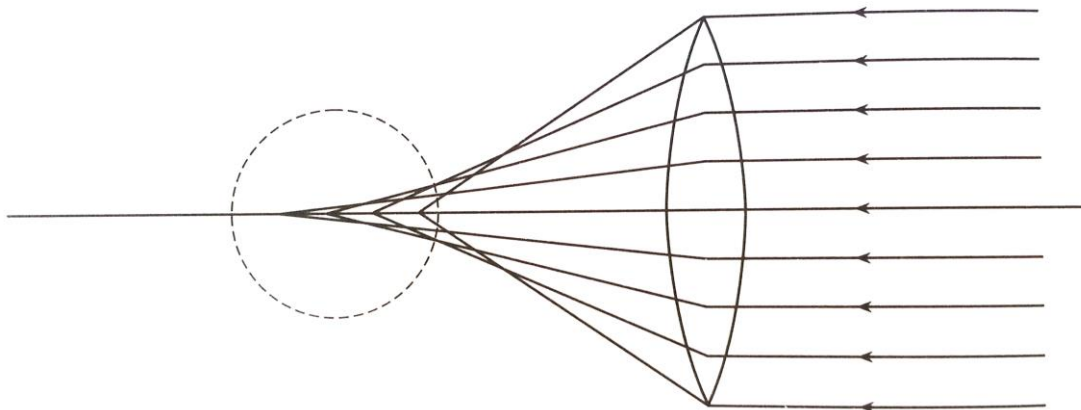
Ως παράδειγμα του μονοχρωματικού σφάλματος αναφέρουμε ότι ένας φακός από τηγμένο χαλαζία, με μέση εστιακή απόσταση 1 m και δείκτες διάθλασης $n_C = 1,45640$, $n_D = 1,45845$ και $n_F = 1,46318$, έχει μια μεταβολή της εστιακής απόστασης από το κόκκινο στο μπλε ίση με 1,5 cm περίπου.

17.2.4.2. Μονοχρωματικά σφάλματα λεπτών φακών

Όταν το φως που διέρχεται από ένα φακό είναι μονοχρωματικό, τότε αυτός εξακολουθεί γενικά να παρουσιάζει κάποια σφάλματα, λόγω της μη ικανοποίησης των συνθηκών μικρού ανοίγματος και παραλληλίας των ακτίνων προς τον άξονα.

Υπάρχουν πέντε είδη μονοχρωματικών σφαλμάτων: (α) σφαιρική εκτροπή, (β) κόμη, (γ) αστιγματισμός, (δ) καμπυλότητα πεδίου και (ε) παραμόρφωση (Βλ. [4] Κεφ.9). Θα επιχειρήσουμε να περιγράψουμε συνοπτικά το πρώτο από αυτά, με το οποίο και θα ασχοληθούμε στα πλαίσια της άσκησης.

Με τον όρο **σφαιρική εκτροπή** περιγράφουμε την εξάρτηση της εστιακής απόστασης ενός σφαιρικού φακού από την απόσταση των ακτίνων από τον κύριο άξονά του, όπως φαίνεται στο Σχ. 17.7. Όσο πιο απομακρυσμένες είναι οι ακτίνες από τον κύριο άξονα του φακού, τόσο πιο κοντά στον φακό συναντώνται (μικρότερη εστιακή απόσταση).



Σχήμα 17.7 Η εστιακή απόσταση ενός φακού μεταβάλλεται ανάλογα με την απόσταση μιας ακτίνας από τον κύριο άξονα του φακού. Η εξάρτηση αυτή είναι η αιτία του σφάλματος σφαιρικής εκτροπής ενός φακού.

Η σφαιρική εκτροπή είναι και το πιο σημαντικό από τα μονοχρωματικά σφάλματα, μπορεί δε η μεταβολή της εστιακής απόστασης ως συνάρτηση της απόστασης των ακτίνων από τον άξονα του φακού, σε έναν παχύ φακό να φτάσει, μέχρι και 50%. Πρέπει να σημειωθεί ότι και στους λεπτούς φακούς, η σφαιρική εκτροπή μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές. Συγκεκριμένα, για λεπτό φακό σταθερής εστιακής απόστασης, η τιμή της σφαιρικής εκτροπής

κυμαίνεται από 5% μέχρι και πάνω από 50%, ανάλογα με το συνδυασμό των ακτίνων r_1 , r_2 που δίνουν τη συγκεκριμένη εστιακή απόσταση.

Ελαχιστοποίηση των σφαιρικών σφαλμάτων επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός διαφράγματος πριν από το φακό, ώστε να χρησιμοποιούνται μόνον οι κεντρικές περιοχές ενός φακού (προσέγγιση μικρών γωνιών).

17.2.4.3. Βάθος Πεδίου

Το **βάθος πεδίου** είναι το εύρος των αποστάσεων του αντικειμένου από το φακό για το οποίο ο βαθμός εστίασης του ειδώλου παραμένει πρακτικά αμετάβλητος δηλαδή, με άλλα λόγια, το είδωλο παραμένει πρακτικά ευκρινές (Βλ. Βιβλιογραφία, Παραπομπή 2, Παρ. 3.2.4). Το βάθος πεδίου εξαρτάται από την εστιακή απόσταση και το άνοιγμα του διαφράγματος του φακού.

17.3 Μέθοδος

Για τον προσδιορισμό του δείκτη διάθλασης ενός υλικού θα παρατηρήσουμε τα φαινόμενα διάθλασης, για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης και θα χρησιμοποιήσουμε την Εξ. (17.1), υποθέτοντας ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι, σε καλή προσέγγιση, ίσος με τη μονάδα.

Στη συνέχεια θα μελετήσουμε τις ιδιότητες ενός συγκλίνοντος φακού. Ένας τρόπος υπολογισμού της εστιακής απόστασης ενός φακού μπορεί να στηριχθεί στον προσδιορισμό των αποστάσεων, s και s' , ενός αντικειμένου και του ειδώλου του από τον φακό και τη χρήση της Εξ. (17.3α).

Μία ισοδύναμη μέτρηση της εστιακής απόστασης μπορεί να γίνει με τη χρήση παράλληλης δέσμης ακτίνων. Γνωρίζοντας ότι η εστία ενός φακού είναι το σημείο στο οποίο συγκεντρώνονται οι ακτίνες που εισέρχονται στον φακό παράλληλα στον άξονά του, μπορούμε να μετρήσουμε την εστιακή απόσταση ενός λεπτού φακού, προσδιορίζοντας το σημείο αυτό.

Όσον αφορά την παρατήρηση των σφαλμάτων, μπορεί κανείς να χρησιμοποιήσει, για μεν τα χρωματικά σφάλματα, φίλτρα διαφορετικών χρωμάτων, για δε τη σφαιρική εκτροπή, διάφραγμα μεταβλητού ανοίγματος πριν από τον φακό.

17.4. Πειραματική Διάταξη

Για τη μέτρηση του δείκτη διάθλασης θα χρησιμοποιηθούν :

- Μια πηγή λευκού φωτός
- Μια μεταλλική σχισμή
- Ένα οπτικό μέσο ημικυλινδρικού σχήματος, και
- Ένα γωνιόμετρο.

Για τη μέτρηση της εστιακής απόστασης και των χρωματικών και σφαιρικών σφαλμάτων ενός φακού χρειαζόμαστε:

- Τον υπό μελέτη φακό
- Μια πηγή λευκού φωτός
- Μια διαφάνεια που θα χρησιμοποιηθεί ως αντικείμενο
- Ένα ζευγάρι φακών που θα χρησιμοποιηθούν για τη διεύρυνση-παραλληλία της δέσμης φωτός
- Μια σειρά διαφραγμάτων για την επιλογή ακτίνων σε διαφορετικές αποστάσεις από τον άξονα του φακού
- Μια σειρά χρωματικών φίλτρων για την επιλογή διαφορετικών μηκών κύματος της δέσμης.
- Μια οθόνη για την παρατήρηση πραγματικών ειδώλων

- Μια οπτική τράπεζα για την στήριξη των οπτικών και τη μέτρηση των αποστάσεων.

Βιβλιογραφία

1. E. Hecht, *Οπτική*, Schaum's Outline Series, Εκδόσεις ΕΣΠΙ, Αθήνα 1979.
2. M. Young, *Οπτική και Λείζερ*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2008.
3. Ι.Ε. Σπυριδέλη, *Θέματα Οπτικής*, τεύχος α', (Θεσσαλονίκη 1976).
4. F.A. Jenkins και H.E. White, *Fundamentals of Optics*, Mc Graw-Hill, NY 1976.
5. D.R. Khanna και H.R. Gulati, *Fundamentals of Optics*, ed. R. Chand & Co., New Delhi 1985.
6. F.G. Smith - J.H. Thomson, *Optics*, John Wiley 1971.
7. *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος Ι, ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα 2010).

17.5. Εκτέλεση

17.5.1. Προσδιορισμός του δείκτη διάθλασης υλικού

1. Τοποθετήστε την πηγή λευκού φωτός στην οπτική τράπεζα και το γωνιόμετρο στο επικλινές στήριγμά του (πάνω στην οπτική τράπεζα), με τη διεύθυνση $0^\circ-0^\circ$ παράλληλα στον άξονα της τράπεζας.
2. Συνδυάζοντας, σε ένα στήριγμα αμέσως μετά την πηγή λευκού φωτός, τα μεταλλικά διαφράγματα απλής σχισμής και πολλαπλών σχισμών, κατευθύνετε μία λεπτή δέσμη φωτός παράλληλα στη διεύθυνση $0^\circ-0^\circ$ του γωνιομέτρου.
3. Τοποθετήστε τον ημικυλινδρικό φακό στο γωνιόμετρο, με το κέντρο του στον άξονα περιστροφής του γωνιομέτρου και με την επίπεδη πλευρά του προς την πηγή, κατά μήκος της ευθείας "COMPONENT".
4. Για γωνίες πρόσπτωσης από 5° έως 85° και με βήμα $5^\circ - 10^\circ$, σημειώστε τις αντίστοιχες γωνίες διάθλασης. Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στη στήλη $(\theta_2)_A$ του Πίνακα Ι.

Πίνακας Ι

θ_1	$(\theta_2)_A$	$\sin(\theta_2)_A$	$(\theta_2)_B$	$\sin(\theta_2)_B$
0°				
5°				
..				
..				

5. Επαναλάβετε τις μετρήσεις του βήματος 4, για διεύθυνση πρόσπτωσης συμμετρική της προηγούμενης, ως προς την κάθετο στην επίπεδη πλευρά του ημικυλινδρικού φακού, και καταχωρήστε τα αποτελέσματά σας στη στήλη $(\theta_2)_B$ του Πίνακα Ι.

17.5.2. Προσδιορισμός της εστιακής απόστασης συγκλίνοντος φακού

1. Τοποθετήστε την πηγή λευκού φωτός στην αρχή της οπτικής τράπεζας.
2. Τοποθετήστε τη διαφάνεια-αντικείμενο (διασταυρωμένα βέλη-κύκλος) σε ένα στήριγμα επί της οπτικής τράπεζας, αμέσως μετά την πηγή λευκού φωτός.
3. Τοποθετήστε τη λευκή οθόνη παρατήρησης στο τέρμα της οπτικής τράπεζας.
4. Τοποθετήστε τον φακό με την άγνωστη εστιακή απόσταση κάπου ανάμεσα, έτσι ώστε να εστιάσετε τη διαφάνεια-αντικείμενο στην οθόνη παρατήρησης.
5. Σημειώστε τον προσανατολισμό και το μέγεθος του ειδώλου σε σχέση με αυτά του αντικειμένου.
6. Μετρήστε σε αυτή την κατάσταση τις αποστάσεις s και s' .
7. Μετακινώντας το φακό, μεταβάλλετε (αυξάνοντας) την απόσταση s με βήματα 1 cm, 2 cm και στη συνέχεια 3 cm, για τιμές του s από 9 cm έως 39 cm, και μετρήστε τις αντίστοιχες αποστάσεις s' . Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα II.

Πίνακας II

$s(\text{cm})$	$s'(\text{cm})$	$1/s + 1/s'(\text{cm}^{-1})$	$1/f(\text{cm}^{-1})$	$f(\text{cm})$
9				
10				
12				
15				
18				
.....				

17.5.3. Χρωματικά σφάλματα απλού φακού

1. Με την οθόνη παρατήρησης στα 60 cm, μετακινήστε τον φακό ώστε να εστιάσετε το είδωλο του νήματος της λάμπας πάνω στην οθόνη.
2. Τοποθετήστε το διάφραγμα, με ένα άνοιγμα μέχρι 2 mm, σε περιφερειακές περιοχές του φακού (πάνω, κάτω, δεξιά, αριστερά) και παρατηρήστε τον χρωματικό διαχωρισμό του ειδώλου. Σημειώστε τις παρατηρήσεις σας.
3. Επανατοποθετήστε το στήριγμα με τη διαφάνεια-αντικείμενο κοντά στην πηγή του λευκού φωτός, και την οθόνη παρατήρησης γύρω στα 60 cm.
4. Τοποθετήστε, στο στήριγμα με τον φακό, το φίλτρο μπλε (Μ) χρώματος και μετακινήστε τον φακό μέχρις ότου σχηματισθεί ευκρινώς το είδωλο του αντικειμένου στην οθόνη. Μετρήστε και καταγράψτε τις τιμές των αποστάσεων $s_M = \dots\dots$ και $s_M' = \dots\dots$
5. Αντικαταστήστε το φίλτρο μπλε χρώματος με το φίλτρο κόκκινου (Κ) χρώματος και επαναλάβετε τη διαδικασία και τις μετρήσεις του προηγούμενου βήματος, και καταγράψτε τις τιμές των αποστάσεων $s_K = \dots\dots$ και $s_K' = \dots\dots$

17.5.4. Σφαιρικά σφάλματα απλού φακού

1. Αφαιρέστε το στήριγμα με τη διαφάνεια-αντικείμενο και τοποθετήστε την οθόνη στο άκρο της οπτικής τράπεζας.
2. Μετακινήστε το στήριγμα με το φακό μέχρις ότου εστιαστεί το ερυθροπυρωμένο νήμα της λάμπας πάνω στην οθόνη.
3. Τοποθετήστε στο ίδιο στήριγμα με το φακό, το διάφραγμα μεταβλητού ανοίγματος, με άνοιγμα 2-3 mm, στο κέντρο του φακού.
4. Παρατηρήστε την ποιότητα εστίασης, με και χωρίς το διάφραγμα μικρού ανοίγματος και καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.

17.5.5. Βάθος Πεδίου

1. Αφαιρέστε το στήριγμα με τη διαφάνεια-αντικείμενο και τοποθετήστε τη λευκή οθόνη παρατήρησης στη θέση 55 cm.
2. Μετακινήστε τον φακό κατά μήκος της τράπεζας, μέχρις ότου παρατηρήσετε στην οθόνη το είδωλο του ερυθροπυρωμένου ελικοειδούς νήματος της λάμπας.
3. Προσδιορίστε το βάθος πεδίου μετακινώντας την οθόνη παρατήρησης μπρος-πίσω:

$$D = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots$$

4. Τοποθετήστε, στο ίδιο στήριγμα με το φακό, το διάφραγμα με μικρό άνοιγμα.
5. Προσδιορίστε το νέο βάθος πεδίου $D' = \dots\dots\dots \pm \dots\dots\dots$

17.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

17.6.1. Προσδιορισμός του δείκτη διάθλασης υλικού.

1. Από τις μετρήσεις που πήρατε στην Παράγρ. 17.5.1, υπολογίστε τις τιμές των $\sin(\theta_2)_A$ και $\sin(\theta_2)_B$ για τις διάφορες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης θ_1 , και καταχωρήστε τις στις αντίστοιχες στήλες του Πίνακα I.
2. Σχεδιάστε σε χαρτί μιλλιμετρέ το γράφημα του $\sin\theta_2$ ως συνάρτηση του $\sin\theta_1$, για όλες τις τιμές της γωνίας πρόσπτωσης, θ_1 . Προσοχή: Να γίνει ένα μόνο διάγραμμα, με τετμημένη (άξονα x) το $\sin\theta_1$ και τεταγμένη (άξονα y) το $\sin\theta_2$ και για τις δύο περιπτώσεις [$(\sin\theta_2)_A$ και $(\sin\theta_2)_B$] στο ίδιο διάγραμμα.
3. Προσδιορίστε, γραφικά, την κλίση των ευθειών που χαράξατε για τις δύο περιπτώσεις A και B, και από αυτήν το δείκτη διάθλασης n , για τις δύο περιπτώσεις, και τη μέση τιμή \bar{n} (των δύο περιπτώσεων) του δείκτη διάθλασης του ημικυλινδρικού φακού, και εκτιμήστε το σφάλμα του, δn [βλ. Παράγρ. Γ.5. Εξ. (Γ.30)]. Εκφράστε το αποτέλεσμα ως $n \pm \delta n$.

17.6.2. Προσδιορισμός της εστιακής απόστασης συγκλίνοντος φακού.

1. Το είδωλο που παρατηρήσατε στην οθόνη είναι πραγματικό ή φανταστικό; Πώς βγάξετε το συμπέρασμα αυτό;
2. Το είδωλο που παρατηρείτε είναι ευθύ ή ανάστροφο; Εξηγήστε γραφικά γιατί.
3. Όταν το s αυξάνει, τι συμβαίνει στο s' και γιατί;

4. Το είδωλο μεγαλώνει ή μικραίνει, όταν το s αυξάνει; Εξηγήστε γιατί, με βάση την Εξ. (17.3β) και κάνοντας ένα απλό σχήμα.
5. Με τι θα ισούται το s' όταν το s γίνει πάρα πολύ μεγάλο; Αναφέρετε ένα τέτοιο παράδειγμα από τον φυσικό κόσμο.
6. Με βάση τις μετρήσεις που καταχωρήσατε στον Πίνακα II, υπολογίστε τη μέση εστιακή απόσταση f , του φακού και το σφάλμα της δf [Παρ. Γ.3.5, Εξ. (Γ.10)]. Γράψτε το αποτέλεσμα με τη μορφή $f \pm \delta f$.

17.6.3. Χρωματικά σφάλματα

1. Περιγράψτε το χρωματικό διαχωρισμό του ειδώλου του νήματος της πηγής, καθώς το διάφραγμα μετακινείται μακριά από τον οπτικό άξονα του φακού. Γιατί το χρωματικό σφάλμα γίνεται πιο έντονο, όταν το διάφραγμα βρίσκεται αρκετά μακριά από τον οπτικό άξονα;
2. Από τις μετρήσεις των s και s' που πήρατε, χρησιμοποιώντας δύο φίλτρα με ζώνες διέλευσης στο κόκκινο (K) και στο μπλε (M) αντίστοιχα, προσδιορίστε την εστιακή απόσταση του φακού για τα δύο διαφορετικά χρώματα, καθώς και τα αντίστοιχα σφάλματα, και εκφράστε τα αποτελέσματά σας με τη μορφή $f_K \pm \delta f_K$ και $f_M \pm \delta f_M$.

17.6.4. Σφαιρικά σφάλματα

1. Πώς επιδρά στην ποιότητα του ειδώλου το μέγεθος του διαφράγματος;
2. Ποιο άνοιγμα του διαφράγματος θα έδινε την καλύτερη ποιότητα ειδώλου;

17.6.5. Βάθος Πεδίου

1. Πώς μεταβάλλεται το βάθος πεδίου με το άνοιγμα του διαφράγματος;
2. Γιατί δεν είναι εφικτό ένα βάθος πεδίου απείρου μήκους;