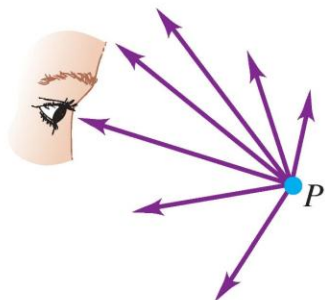


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 34

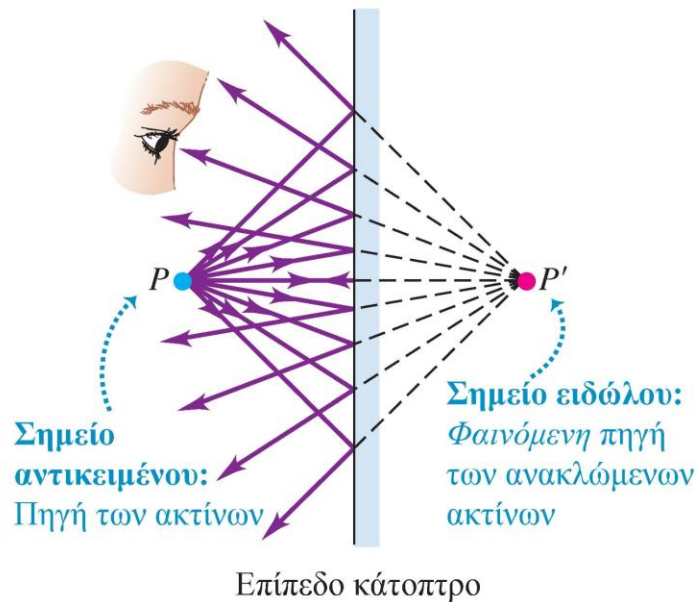
ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

34.1 Φωτεινές ακτίνες από ένα σημειακό αντικείμενο P εκπέμπονται προς κάθε κατεύθυνση. Για να δει απευθείας ένας παρατηρητής το αντικείμενο αυτό, δεν πρέπει να υπάρχει κανένα εμπόδιο μεταξύ του αντικειμένου και των ματιών του παρατηρητή.

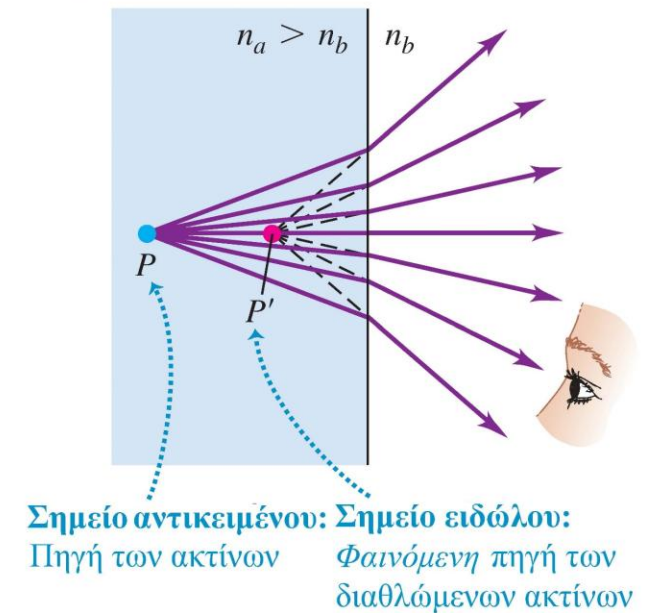


34.2 Φωτεινές ακτίνες από το αντικείμενο στο σημείο P ανακλώνται από ένα επίπεδο κάτοπτρο. Οι ανακλώμενες ακτίνες που εισέρχονται στο μάτι φαίνονται σαν να έχουν προέλθει από το σημείο ειδώλου P' .



34.3 Φωτεινές ακτίνες από το αντικείμενο στο σημείο P διαθλώνται στην επίπεδη διεπιφάνεια. Οι διαθλώμενες ακτίνες που εισέρχονται στο μάτι δείχνουν σαν να έχουν προέλθει από το σημείο ειδώλου P' .

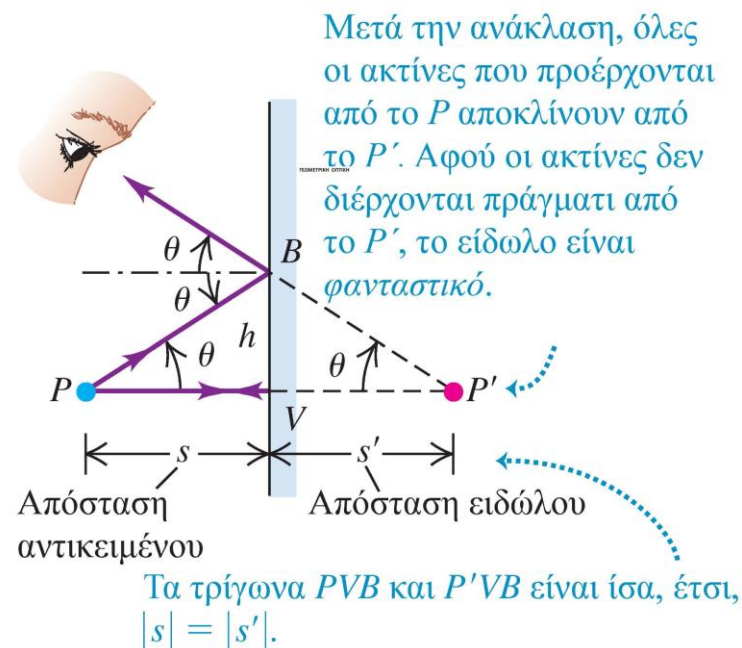
Όταν $n_a > n_b$, το P' είναι πλησιέστερα στην επιφάνεια από το P . για $n_a < n_b$ συμβαίνει το αντίθετο.



ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΣΕ ΕΠΙΠΕΔΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Αν οι εξερχόμενες ακτίνες δεν διέρχονται πράγματι από το σημείο ειδώλου, ονομάζουμε το είδωλο **φανταστικό είδωλο**. Θα αντιμετωπίσουμε αργότερα περιπτώσεις όπου οι εξερχόμενες ακτίνες διέρχονται πράγματι από ένα σημείο ειδώλου και θα ονομάσουμε τότε το προκύπτον είδωλο **πραγματικό είδωλο**. Τα είδωλα που σχηματίζονται σε μια οθόνη προβολής, στον ηλεκτρονικό ανιχνευτή μιας φωτογραφικής μηχανής και στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού σας είναι πραγματικά είδωλα.

34.4 Σχεδιάγραμμα για τον καθορισμό της θέσης του ειδώλου που σχηματίζεται από επίπεδο κάτοπτρο. Το σημείο ειδώλου P' είναι τόσο μακριά πίσω από το κάτοπτρο όσο το σημείο αντικειμένου P απέχει από την εμπρόσθια επιφάνειά του.



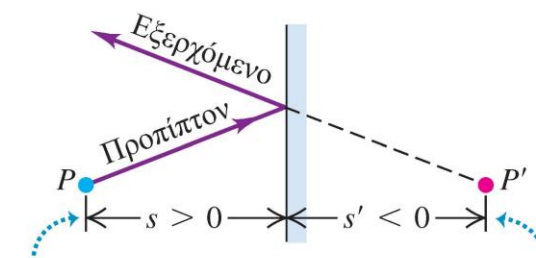
Κανόνες Προσέμου

Θα εισαγάγουμε μερικούς γενικούς κανόνες για τα πρόσημα σε μορφή εφαρμόσιμη για όλες τις περιπτώσεις που θα συναντήσουμε αργότερα. Αυτές περιλαμβάνουν τον σχηματισμό ειδώλου από επίπεδη ή σφαιρική ανακλαστική ή διαθλαστική επιφάνεια, ή ακόμη και από ένα ζεύγος διαθλαστικών επιφανειών που σχηματίζουν έναν φακό. Οι κανόνες αυτοί είναι:

1. **Κανόνας προσέμου για την απόσταση αντικειμένου:** Όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην ίδια πλευρά της ανακλαστικής ή διαθλαστικής επιφάνειας με το προσπίπτον φως, η απόσταση αντικειμένου s είναι θετική· διαφορετικά, είναι αρνητική.
2. **Κανόνας προσέμου για την απόσταση ειδώλου:** Όταν το είδωλο βρίσκεται στην ίδια πλευρά της ανακλαστικής ή διαθλαστικής επιφάνειας με το εξερχόμενο φως, η απόσταση ειδώλου s' είναι θετική· διαφορετικά, είναι αρνητική.
3. **Κανόνας προσέμου για την ακτίνα καμπυλότητας μιας σφαιρικής επιφάνειας:** Όταν το κέντρο καμπυλότητας C βρίσκεται στην ίδια πλευρά με το εξερχόμενο φως, η ακτίνα καμπυλότητας είναι θετική· διαφορετικά, είναι αρνητική.

34.5 Και για τις δύο αυτές περιπτώσεις η απόσταση αντικειμένου s είναι θετική (κανόνας 1) και η απόσταση ειδώλου s' είναι αρνητική (κανόνας 2).

(a) Επίπεδο κάτοπτρο

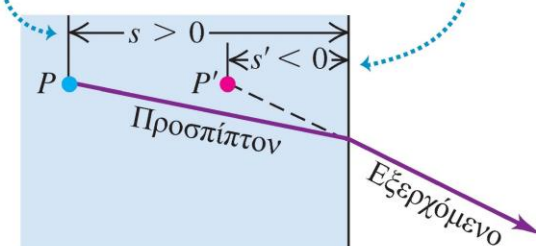


Και για τις δύο αυτές περιπτώσεις:

Η απόσταση αντικειμένου s είναι θετική καθώς το αντικείμενο βρίσκεται στην ίδια πλευρά με το προσπίπτον φως.

Η απόσταση ειδώλου s' είναι αρνητική καθώς το είδωλο $\Delta\epsilon\Nu$ βρίσκεται στην ίδια πλευρά με το εξερχόμενο φως.

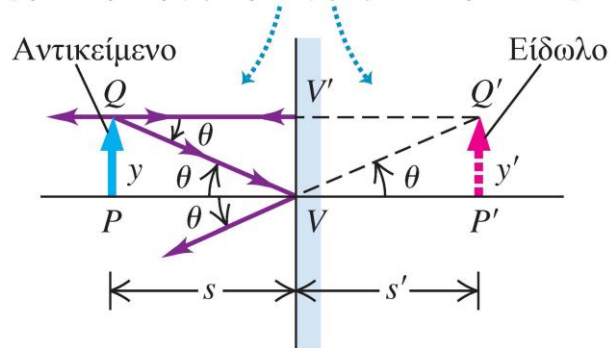
(b) Επίπεδη διαθλαστική επιφάνεια



Είδωλο Ενός Εκτεταμένου Αντικειμένου: Επίπεδο Κάτοπτρο

34.6 Σχεδιάγραμμα για τον προσδιορισμό του ύψους ενός ειδώλου που σχηματίζεται από ανάκλαση σε μια επίπεδη ανακλαστική επιφάνεια.

Για ένα επίπεδο κάτοπτρο, τα τρίγωνα PQV και $P'Q'V$ είναι ίσα, έτσι $y = y'$, επομένως το αντικείμενο και το είδωλο είναι ισομεγέθη [η πλευρική (εγκάρσια) μεγέθυνση είναι 1].



Το είδωλο που σχηματίζεται από ένα τέτοιο εκτεταμένο αντικείμενο είναι ένα εκτεταμένο είδωλο· σε κάθε σημείο του αντικειμένου αντιστοιχεί ένα σημείο του ειδώλου. Δύο από τις ακτίνες που εκπορεύονται από το Q φαίνονται στο σχήμα· όλες οι ακτίνες που προέρχονται από το Q μοιάζουν να αποκλίνουν από το σημείο ειδώλου του Q' μετά την ανάκλασή τους. Το είδωλο του βέλους είναι το ευθύγραμμο τμήμα $P'Q'$, που έχει ύψος y' . Τα άλλα σημεία του αντικειμένου PQ έχουν σημεία ειδώλου μεταξύ των P' και Q' .

Σε κάθε περίπτωση σχηματισμού ειδώλου, ο λόγος των υψών του ειδώλου προς του αντικειμένου, y'/y , ονομάζεται **πλευρική (εγκάρσια) μεγέθυνση m** , δηλαδή

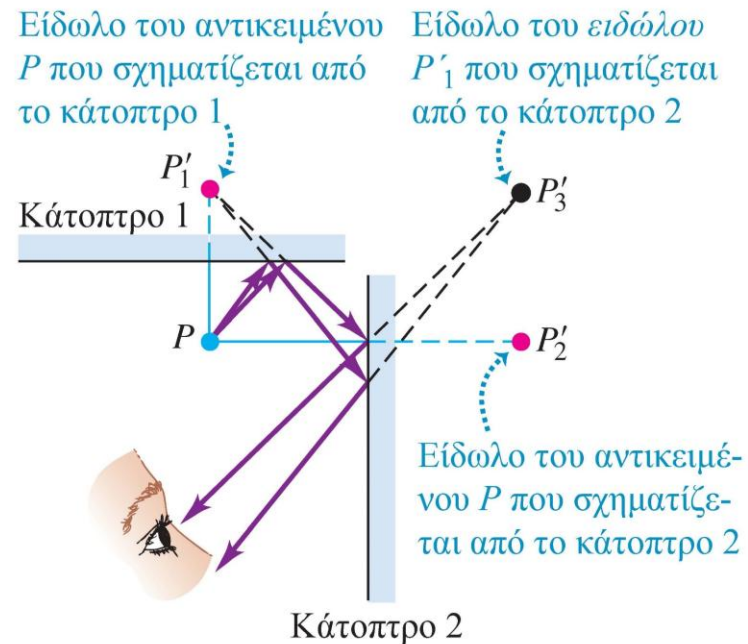
$$\text{Πλευρική (εγκάρσια) μεγέθυνση στην περίπτωση σχηματισμού ειδώλου} \quad m = \frac{y'}{y} = \frac{\text{Ύψος αντικειμένου}}{\text{Ύψος ειδώλου}} \quad (34.2)$$

Στο Σχ. 34.6 το είδωλο του βέλους δείχνει προς την *ίδια* κατεύθυνση με το αντικείμενο· λέμε ότι το είδωλο είναι **ορθό**. Στην περίπτωση αυτή τα y' και y έχουν το ίδιο πρόσημο και η πλευρική μεγέθυνση m είναι θετική.

Είδωλο Ενός Εκτεταμένου Αντικειμένου: Επίπεδο Κάτοπτρο

34.9 Τα είδωλα P'_1 και P'_2 σχηματίζονται από μία μόνη ανάκλαση κάθε ακτίνας από το αντικείμενο στο P . Το είδωλο P'_3 , που εντοπίζεται με τη χρήση του καθενός από τα άλλα δύο είδωλα ως αντικείμενου, σχηματίζεται από διπλή ανάκλαση κάθε ακτίνας.

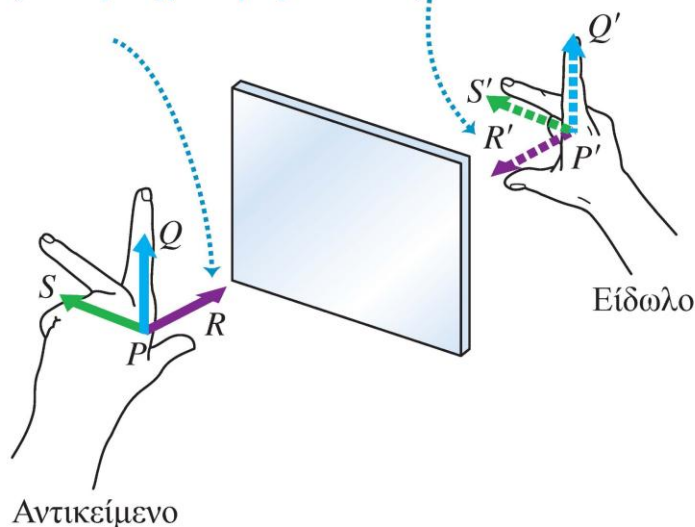
Μια σημαντική ιδιότητα όλων των ειδώλων που σχηματίζονται από ανακλαστικές ή διαθλαστικές επιφάνειες είναι ότι το είδωλο που σχηματίζεται από μια επιφάνεια ή οπτική διάταξη μπορεί να παίξει τον ρόλο του αντικειμένου για μια δεύτερη επιφάνεια ή διάταξη.



Είδωλο Ενός Εκτεταμένου Αντικειμένου: Επίπεδο Κάτοπτρο

34.7 Το είδωλο που σχηματίζεται από ένα επίπεδο κάτοπτρο είναι φανταστικό, ορθό και ανεστραμμένο. Έχει το ίδιο μέγεθος με το αντικείμενο.

Ένα είδωλο που σχηματίζεται από ένα επίπεδο κάτοπτρο είναι ανεστραμμένο εμπρός-πίσω: το αντικείμενο αντίχειρας PR και το είδωλό του $P'R'$ δείχνουν προς αντίθετες κατευθύνσεις (ο ένας δείχνει προς τον άλλο).



34.8 Το είδωλο που σχηματίζεται από ένα επίπεδο κάτοπτρο είναι ανεστραμμένο: το είδωλο ενός δεξιού χεριού είναι ένα αριστερό χέρι κ.ο.κ. (το χέρι στηρίζεται πάνω σε οριζόντιο κάτοπτρο). Τα είδωλα των γραμμάτων I, H και T είναι ανεστραμμένα;



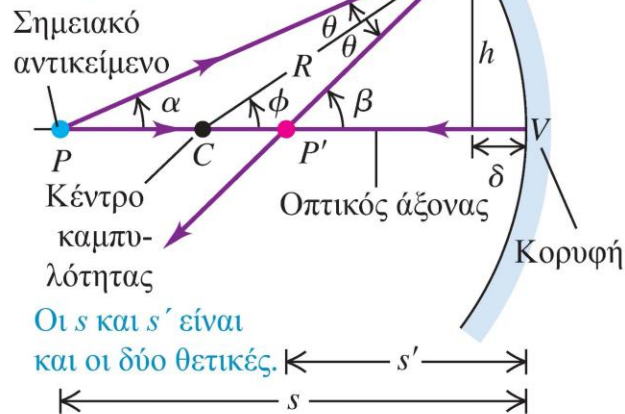
ΠΡΟΣΟΧΗ Ανακλάσεις σε ένα επίπεδο κάτοπτρο Στο σημείο αυτό ίσως να αναρωτηθείτε: «Γιατί ένα επίπεδο κάτοπτρο αναστρέφει τα είδωλα δεξιά και αριστερά, αλλά όχι πάνω και κάτω;». Η ερώτηση αυτή είναι αρκετά παραπλανητική! Όπως δείχνει το Σχ. 34.7, το πάνω-κάτω είδωλο $P'Q'$ και το δεξιά-αριστερά είδωλο $P'S'$ είναι παράλληλα προς τα αντικείμενά τους και δεν είναι καθόλου ανεστραμμένα. Μόνο το εμπρός-πίσω είδωλο $P'R'$ είναι ανεστραμμένο σε σχέση με το PR . Ως εκ τούτου, είναι σωστότερο να λέμε ότι ένα επίπεδο κάτοπτρο αναστρέφει *εμπρός-πίσω*. Όταν το αντικείμενο και το είδωλό του σχετίζονται με τον τρόπο αυτό, το είδωλο λέγεται **ανεστραμμένο**: αυτό σημαίνει ότι αναστρέφεται *μόνο* η διάσταση εμπρός-πίσω.

ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΣΕ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ: Είδωλο Ενός Σημειακού Αντικειμένου: Σφαιρικό Κάτοπτρο

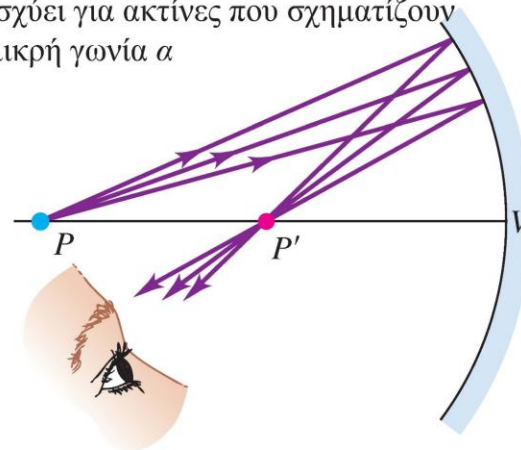
34.10 (α) Ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλο ενός σημειακού αντικειμένου P επάνω στον οπτικό άξονα του κατόπτρου. (β) Το μάτι βλέπει κάποιες από τις εξερχόμενες ακτίνες, αντιλαμβανόμενο ότι προέρχονται από το σημείο P' .

(α) Σχεδιάγραμμα για τον προσδιορισμό της θέσης P' ενός ειδώλου που σχηματίζεται από ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο

Για ένα σφαιρικό κάτοπτρο,
 $\alpha + \beta = 2\phi$.



(β) Η παραξονική προσέγγιση, η οποία ισχύει για ακτίνες που σχηματίζουν μικρή γωνία α

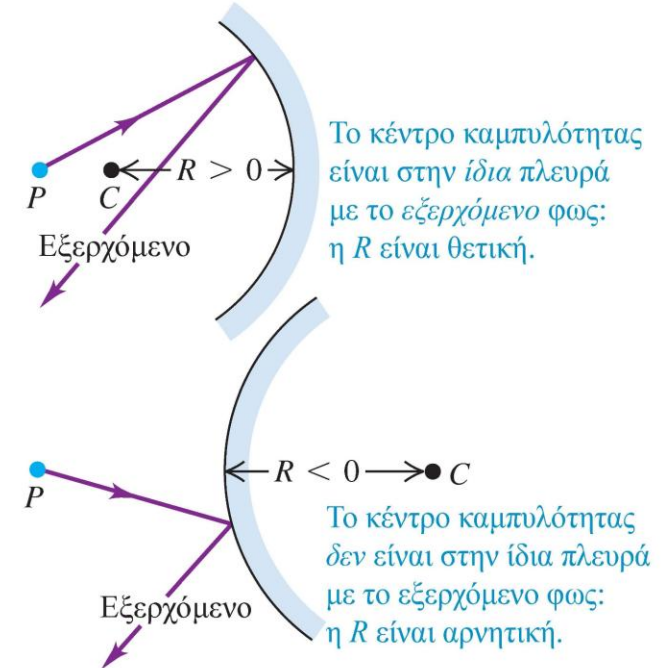


Όλες οι ακτίνες από το P που έχουν μικρή γωνία α με τον οπτικό άξονα διέρχονται από το P' , σχηματίζοντας ένα πραγματικό είδωλο.

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R}$$

(σχέση αντικειμένου - ειδώλου, σφαιρικό κάτοπτρο)

34.11 Ο κανόνας προσήμου για την ακτίνα ενός σφαιρικού κατόπτρου.



(34.4)

ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΣΕ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Είδωλο Ενός Σημειακού Αντικειμένου: Σφαιρικό Κάτοπτρο, συνέχεια

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \quad \begin{array}{l} \text{(σχέση αντικειμένου - ειδώλου,} \\ \text{σφαιρικό κάτοπτρο)} \end{array} \quad (34.4)$$

Η εξίσωση αυτή δεν περιέχει τη μικρή γωνία α . Αυτό σημαίνει ότι *όλες* οι ακτίνες που εκκινούν από το P και σχηματίζουν αρκετά μικρές γωνίες με τον οπτικό άξονα τέμνονται μετά την ανάκλασή τους στο P' .

Τέτοιες ακτίνες, σχεδόν παράλληλες προς τον άξονα και κοντά σε αυτόν, ονομάζονται **παραξονικές ακτίνες**.

Καθώς όλες αυτές οι ανακλώμενες φωτεινές ακτίνες συγκλίνουν στο σημείο ειδώλου, ένα κοίλο κάτοπτρο ονομάζεται επίσης *συγκλίνον κάτοπτρο*.

Η Εξ. (34.4) είναι μόνο *κατά προσέγγιση* σωστή.

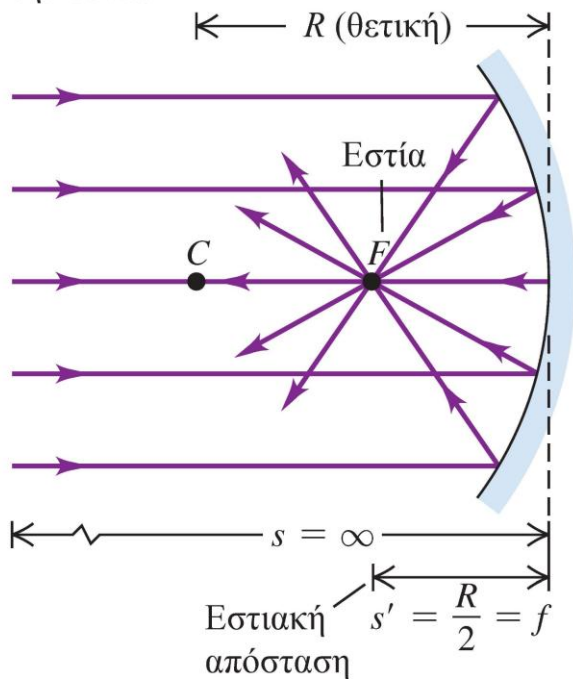
Εάν αυξηθεί η γωνία α , το είδωλο «απλώνεται» χάνοντας σε ευκρίνεια. Αυτή η ιδιότητα των σφαιρικών κατόπτρων λέγεται **σφαιρική εκτροπή**.

Εστία (Εστιακό Σημείο) και Εστιακή Απόσταση

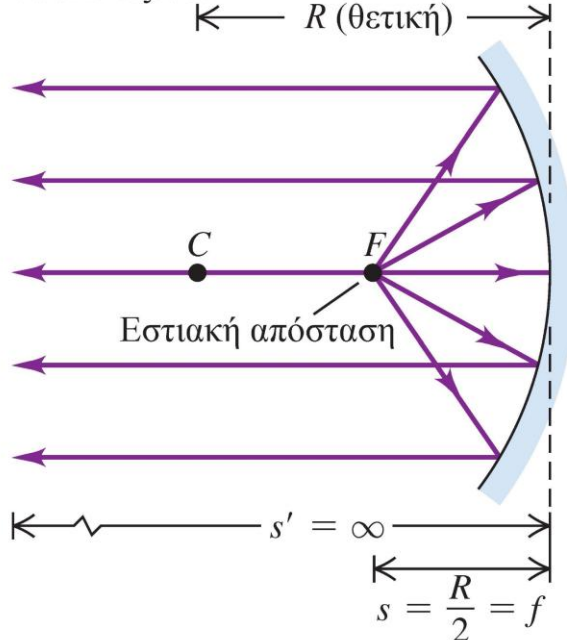
Όταν το σημειακό αντικείμενο P βρίσκεται πολύ μακριά από το σφαιρικό κάτοπτρο ($s = \infty$), οι προσπίπτουσες ακτίνες είναι παράλληλες.

34.13 Εστία και εστιακή απόσταση ενός κοίλου κατόπτρου.

(a) Όλες οι ακτίνες που προσπίπτουν παράλληλα προς τον οπτικό άξονα κοίλου κατόπτρου διέρχονται από την εστία.



(b) Οι ακτίνες που αποκλίνουν από την εστία μετά την ανάκλασή τους καθίστανται παράλληλες προς τον οπτικό άξονα.



$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \quad s' = \frac{R}{2}$$

Το σημείο F στο οποίο συγκλίνουν οι προσπίπτουσες παράλληλες ακτίνες ονομάζεται **εστία (εστιακό σημείο)**· λέμε ότι οι ακτίνες αυτές εστιάζονται.

$$f = \frac{R}{2} \quad (\text{εστιακή απόσταση ενός σφαιρικού κατόπτρου}) \quad (34.5)$$

Όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην εστία, οι ανακλώμενες ακτίνες στο Σχ. 34.13b είναι παράλληλες με τον οπτικό άξονα· τέμνονται σε σημείο που απέχει άπειρη απόσταση από το κάτοπτρο, επομένως το είδωλο είναι στο άπειρο.

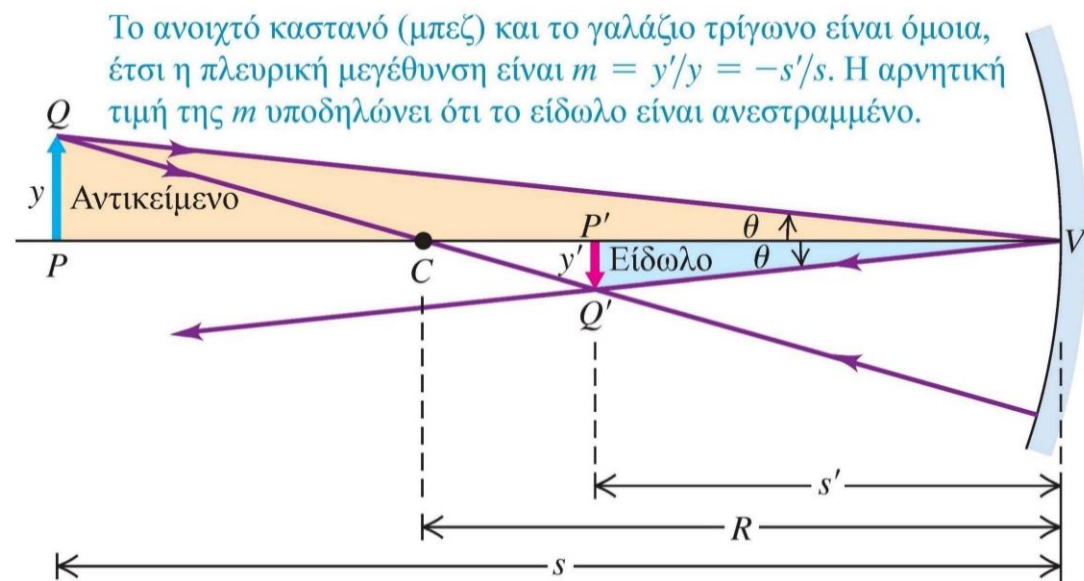
Για σφαιρικά κοίλα κάτοπτρα οι διαπιστώσεις αυτές είναι αληθείς μόνον αν πρόκειται για παραξονικές ακτίνες. Για παραβολικά κάτοπτρα οι διαπιστώσεις αυτές είναι *ακριβώς* αληθείς.

Θα εκφράσουμε συχνά τη σχέση μεταξύ των αποστάσεων αντικειμένου και ειδώλου για ένα κάτοπτρο, Εξ. (34.4), συναρτήσας της εστιακής απόστασης f :

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (\text{σχέση αντικειμένου - ειδώλου, σφαιρικό κάτοπτρο}) \quad (34.6)$$

Είδωλο Εκτεταμένου Αντικειμένου – Σφαιρικό Κάτοπτρο

34.14 Σχεδιάγραμμα για τον καθορισμό της θέσης, του προσανατολισμού και του ύψους ενός ειδώλου που σχηματίζεται από ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο.



$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \quad (\text{πλευρική μεγέθυνση, σφαιρικό κάτοπτρο}) \quad (34.7)$$

Το αρνητικό πρόσημο είναι αναγκαίο γιατί το αντικείμενο και το είδωλο εκτείνονται προς αντίθετες πλευρές του οπτικού άξονα· αν το y είναι θετικό, το y' θα είναι αρνητικό. Αν η m είναι θετική, το είδωλο είναι ορθό σε σχέση με το αντικείμενο· αν η m είναι αρνητική, το είδωλο είναι *ανεστραμμένο* σε σχέση με το αντικείμενο.

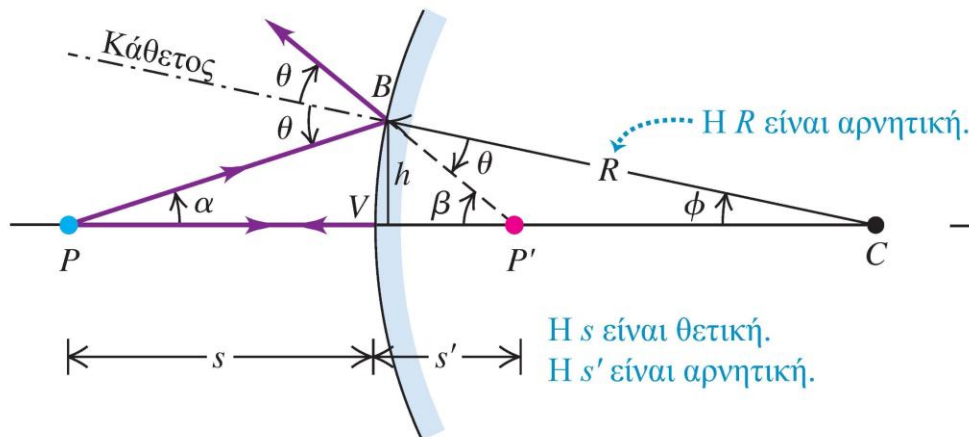
Αν ένα αντικείμενο τοποθετηθεί *εντός* της περιοχής που ορίζει η εστία ενός κοίλου κατόπτρου, έτσι ώστε η $s < f$, το προκύπτον είδωλο είναι *φανταστικό* (δηλαδή το σημείο ειδώλου βρίσκεται στην αντίθετη πλευρά του κατόπτρου, σε σχέση με το αντικείμενο), *ορθό* και *μεγαλύτερο* από το αντικείμενο.

Κυρτά Κάτοπτρα

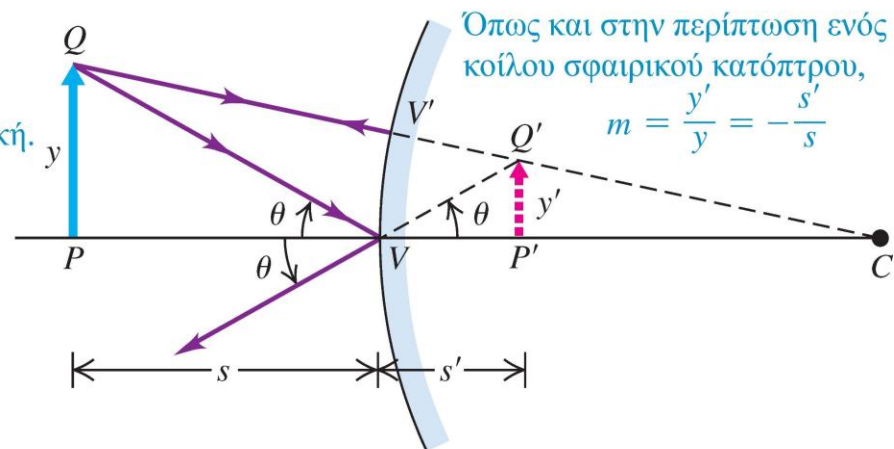
Στο Σχ. 34.16α η *κυρτή* πλευρά ενός σφαιρικού κατόπτρου αντικρίζει το προσπίπτον φως. Το κέντρο καμπυλότητας βρίσκεται σε αντίθετη πλευρά από αυτήν των εξερχόμενων ακτίνων· σύμφωνα με τον κανόνα προσήμου 3, η R είναι αρνητική.

34.16 Σχηματισμός ειδώλου από ένα κυρτό κάτοπτρο.

(α) Σχεδιάγραμμα για τον προσδιορισμό της θέσης ενός ειδώλου που σχηματίζεται από ένα κυρτό κάτοπτρο



(β) Σχεδιάγραμμα για τον προσδιορισμό της μεγέθυνσης ενός ειδώλου που σχηματίζεται από ένα κυρτό κάτοπτρο



Όλες οι ακτίνες που εκκινούν από το P και ανακλώνται στο κάτοπτρο αποκλίνουν από το ίδιο σημείο P' , υπό την προϋπόθεση ότι η γωνία α είναι μικρή. Συνεπώς το P' είναι το είδωλο του P . Η απόσταση αντικειμένου s είναι θετική, η απόσταση ειδώλου s' είναι αρνητική και η ακτίνα καμπυλότητας R είναι *αρνητική* για ένα *κυρτό* κάτοπτρο.

Για ένα κυρτό κάτοπτρο ισχύουν οι σχέσεις αντικειμένου - ειδώλου και πλευρικής μεγέθυνσης, που ισχύουν για ένα κοίλο κάτοπτρο.

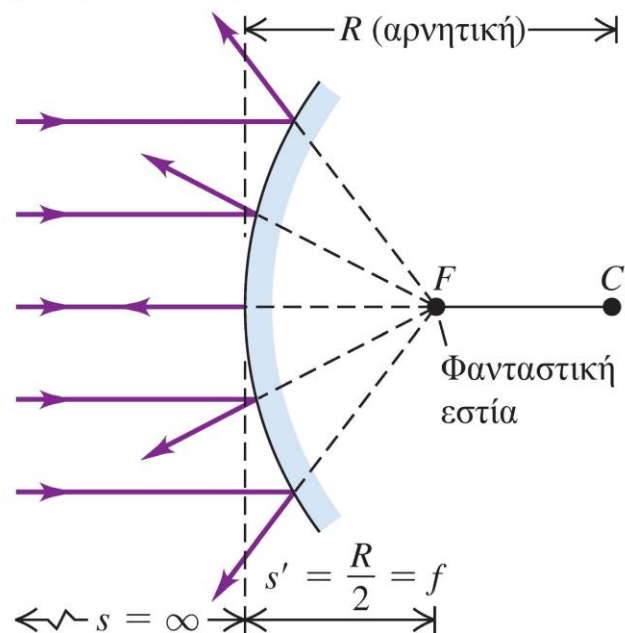
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \quad \text{και} \quad m = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

Κυρτά Κάτοπτρα

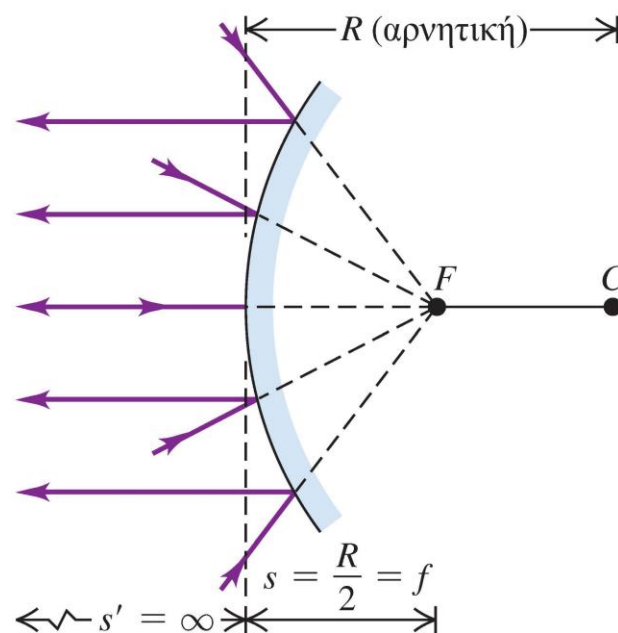
Όταν η R είναι αρνητική (κυρτό κάτοπτρο), οι ακτίνες που προσπίπτουν παράλληλα προς τον οπτικό άξονα δεν διέρχονται μετά την ανάκλασή τους από την εστία F . Αντ' αυτού, αποκλίνουν σαν να προέρχονταν από το σημείο F σε απόσταση f πίσω από το κάτοπτρο, όπως φαίνεται στο Σχ. 34.17a. Σε αυτήν την περίπτωση, η f είναι η εστιακή απόσταση και το σημείο F ονομάζεται *φανταστική εστία*. Η αντίστοιχη απόσταση ειδώλου s' είναι αρνητική, οπότε η f και η R είναι αμφότερες αρνητικές και η Εξ. (34.5), $f = R/2$, ισχύει τόσο για κυρτά όσο και για κοίλα κάτοπτρα.

34.17 Εστία και εστιακή απόσταση ενός κυρτού κατόπτρου.

(a) Παραξονικές ακτίνες προσπίπτουσες επί ενός κυρτού σφαιρικού κατόπτρου αποκλίνουν από μια φανταστική εστία.



(b) Ακτίνες κατευθυνόμενες προς τη φανταστική εστία καθίστανται παράλληλες προς τον άξονα μετά την ανάκλασή τους.



Συνοψίζοντας, οι Εξ. (34.4) ως (34.7), που αποτελούν τις βασικές σχέσεις σχηματισμού ειδώλου από σφαιρικό κάτοπτρο, ισχύουν τόσο για κοίλα όσο και για κυρτά κάτοπτρα, αρκεί να χρησιμοποιούμε με συνέπεια τους κανόνες προσήμου.

Γραφικές Μέθοδοι για Κάτοπτρα

Μπορούμε να βρούμε τις ιδιότητες του ειδώλου που σχηματίζεται από ένα κάτοπτρο με μια απλή *γραφική* μέθοδο. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, προσδιορίζεται το σημείο τομής μερικών χαρακτηριστικών ακτίνων που αποκλίνουν από ένα σημείο του αντικειμένου (όπως το σημείο Q στο Σχ. 34.19) και ανακλώνται από το κάτοπτρο. Στη συνέχεια (αμελώντας τα σφάλματα) όλες οι ακτίνες από αυτό το σημείο αντικειμένου που προσκρούουν στο κάτοπτρο τέμνονται στο ίδιο σημείο.

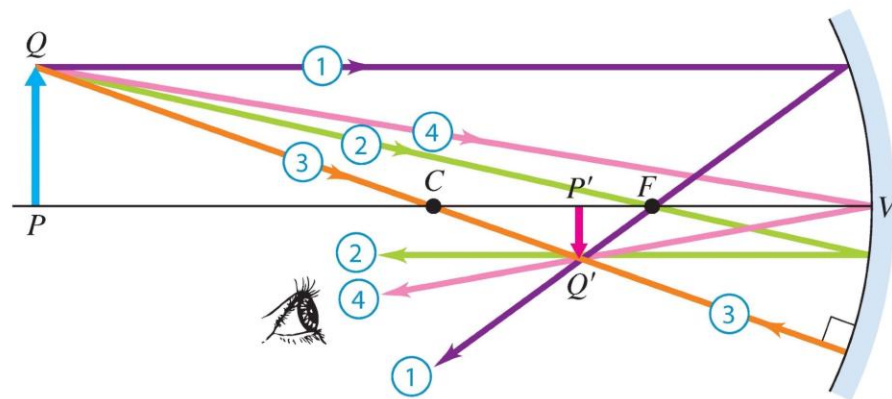
Για ένα τέτοιο σχεδιάγραμμα επιλέγουμε πάντα ένα σημείο αντικειμένου που δεν βρίσκεται πάνω στον οπτικό άξονα.

Μπορούμε συνήθως να σχεδιάσουμε εύκολα τέσσερις χαρακτηριστικές ακτίνες, οι οποίες φαίνονται στο Σχ. 34.19. Οι ακτίνες αυτές λέγονται **κύριες ακτίνες**.

Αφού προσδιορίσουμε τη θέση του σημείου ειδώλου μέσω της τομής δύο οποιωνδήποτε από τις τέσσερις αυτές κύριες ακτίνες (1, 2, 3, 4), μπορούμε να σχεδιάσουμε την πορεία οποιασδήποτε άλλης ακτίνας από το σημείο αντικειμένου στο ίδιο σημείο ειδώλου.

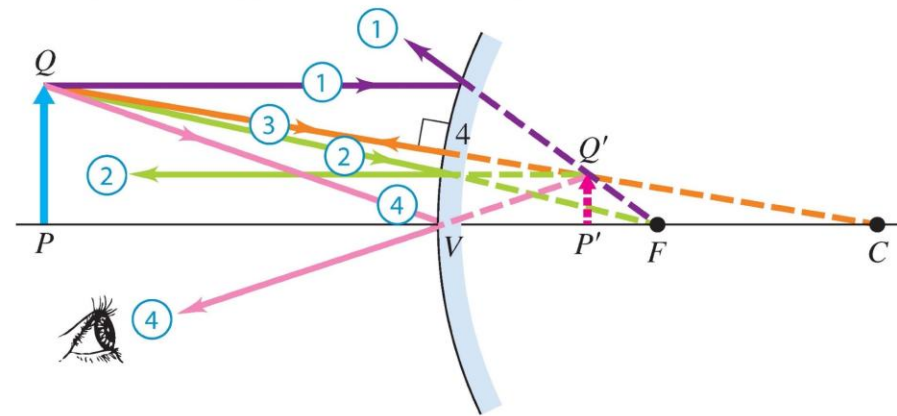
34.19 Η γραφική μέθοδος του εντοπισμού ενός ειδώλου που σχηματίζεται από ένα σφαιρικό κάτοπτρο. Ο χρωματισμός των ακτίνων έγινε μόνο για λόγους ταυτοποίησης· δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένα χρώματα του φωτός.

(a) Κύριες ακτίνες για ένα κοίλο κάτοπτρο



- ① Ακτίνα παράλληλη με τον άξονα ανακλάται διερχόμενη από την εστία.
- ② Ακτίνα διερχόμενη από την εστία ανακλάται παράλληλα προς τον άξονα.
- ③ Ακτίνα διερχόμενη από το κέντρο καμπυλότητας τέμνει κάθετα την επιφάνεια και ανακλάται κατά μήκος της αρχικής της πορείας.
- ④ Ακτίνα προς την κορυφή ανακλάται συμμετρικά ως προς τον οπτικό άξονα.

(b) Κύριες ακτίνες για ένα κυρτό κάτοπτρο



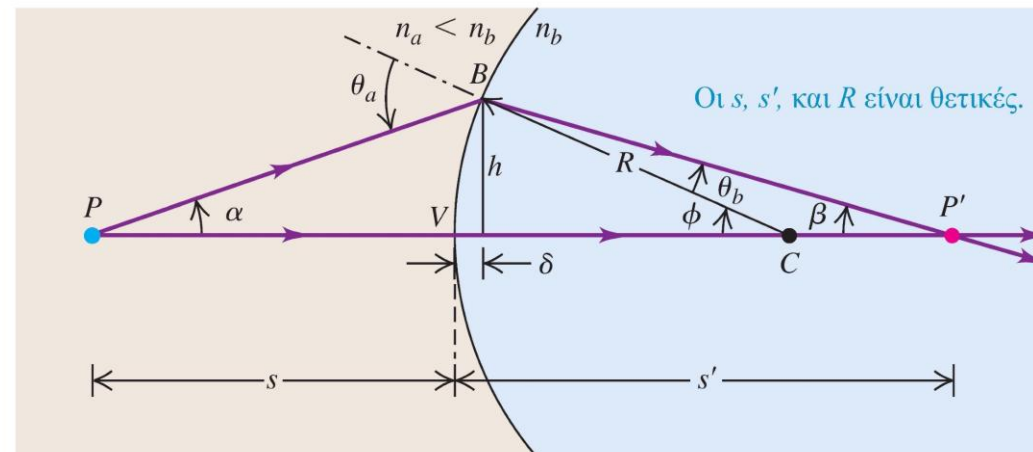
- ① Ακτίνα παράλληλη του άξονα μετά την ανάκλασή της φαίνεται να προέρχεται από την εστία.
- ② Ακτίνα κατευθυνόμενη προς την εστία ανακλάται παράλληλα με τον άξονα.
- ③ Όπως και στο κοίλο κάτοπτρο: Ακτίνα κατευθυνόμενη προς το κέντρο καμπυλότητας τέμνει κάθετα την επιφάνεια και ανακλάται κατά μήκος της αρχικής της πορείας.
- ④ Όπως και στο κοίλο κάτοπτρο: Ακτίνα προς την κορυφή ανακλάται συμμετρικά ως προς τον οπτικό άξονα.

ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Η ανάλυση αυτή είναι άμεσα εφαρμόσιμη σε ορισμένα πραγματικά οπτικά συστήματα, όπως είναι το ανθρώπινο μάτι. Παρέχει επίσης τη βάση για την ανάλυση των φακών, που έχουν συνήθως δύο σφαιρικές (ή σχεδόν σφαιρικές) επιφάνειες.

Είδωλο Ενός Σημειακού Αντικειμένου: Σφαιρική Διαθλαστική Επιφάνεια

34.21 Σχεδιάγραμμα για την εύρεση της θέσης του σημειακού ειδώλου P' ενός σημειακού αντικειμένου P , που σχηματίζεται μέσω διάθλασης σε μια σφαιρική επιφάνεια. Τα υλικά αριστερά και δεξιά από τη διεπιφάνεια έχουν δείκτες διάθλασης n_a και n_b , αντίστοιχα. Στην περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ, $n_a < n_b$.



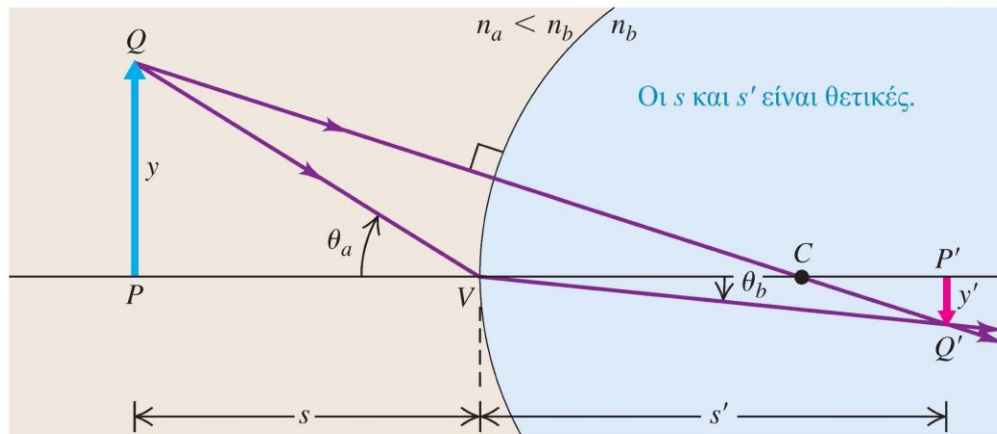
Στο Σχ. 34.21 μια σφαιρική επιφάνεια ακτίνας R σχηματίζει μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο υλικών με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης n_a και n_b . Η επιφάνεια σχηματίζει το είδωλο P' ενός σημειακού αντικειμένου P . Θέλουμε να βρούμε πώς σχετίζονται οι αποστάσεις αντικειμένου και ειδώλου (s και s').

$$\frac{n_a}{s} + \frac{n_b}{s'} = \frac{n_b - n_a}{R} \quad (\text{σχέση αντικειμένου - ειδώλου, σφαιρική διαθλαστική επιφάνεια}) \quad (34.11)$$

Αυτή η εξίσωση δεν περιέχει τη (μικρή) γωνία α , άρα η απόσταση του ειδώλου είναι ίδια για όλες τις παραξονικές ακτίνες που εκπηγάζουν από το P . Αυτό αποδεικνύει ότι το P' είναι το είδωλο του P .

ΔΙΑΘΛΑΣΗ ΣΕ ΜΙΑ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Πλευρική μεγένθυση m



34.22 Σχεδιάγραμμα για τον προσδιορισμό του ύψους ενός ειδώλου που σχηματίζεται από διάθλαση σε μια σφαιρική επιφάνεια. Στην περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ, $n_a < n_b$.

$$m = \frac{y'}{y} = -\frac{n_a s'}{n_b s} \quad \begin{array}{l} \text{(πλευρική μεγέθυνση} \\ \text{σφαιρική διαθλαστική επιφάνεια)} \end{array} \quad (34.12)$$

Οι Εξ. (34.11) και (34.12) εφαρμόζονται τόσο σε κυρτές όσο και σε κοίλες διαθλαστικές επιφάνειες, υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούνται με συνέπεια οι κανόνες προσήμου. Δεν έχει σημασία αν ο n_b είναι μεγαλύτερος ή μικρότερος από τον n_a .

ΛΕΠΤΟΙ ΦΑΚΟΙ

Φακός είναι ένα οπτικό σύστημα με δύο διαθλαστικές επιφάνειες. Ο απλούστερος φακός έχει δύο *σφαιρικές* επιφάνειες αρκετά κοντά τη μία με την άλλη, ώστε να μπορούμε να αγνοήσουμε την απόστασή τους (δηλαδή το πάχος του φακού)· αυτός ο φακός ονομάζεται **λεπτός φακός**.

Οι Ιδιότητες Ενός Φακού

Ένας φακός της μορφής που παρουσιάζεται στο Σχ. 34.28 έχει μια σημαντική ιδιότητα: Όταν διέρχεται μέσα από αυτόν μια δέσμη παράλληλων προς τον άξονα ακτίνων, οι ακτίνες συγκλίνουν προς ένα σημείο F_2 (Σχ. 34.28a) και σχηματίζουν ένα πραγματικό είδωλο στο σημείο αυτό. Ένας τέτοιος φακός ονομάζεται **συγκλίνων φακός**.

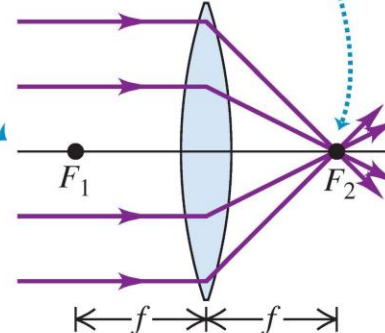
Όπως και στην περίπτωση ενός κοίλου κατόπτρου, η εστιακή απόσταση ενός συγκλίνοντα φακού ορίζεται ως μια *θετική* ποσότητα και ένας τέτοιος φακός ονομάζεται επίσης *θετικός φακός*.

34.28 Τα σημεία F_1 και F_2 ονομάζονται πρωτεύουσα και δευτερεύουσα εστία ενός συγκλίνοντα φακού. Η αριθμητική τιμή της f είναι θετική.

(a)

Οπτικός άξονας (διέρχεται από τα κέντρα καμπυλότητας και των δύο επιφανειών του φακού)

Δευτερεύουσα εστία: το σημείο στο οποίο συγκλίνουν προσπίπτουσες παράλληλες ακτίνες

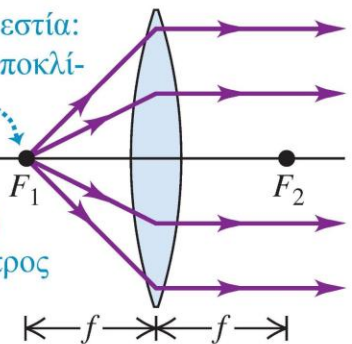


Εστιακή απόσταση

- Μετρείται από το κέντρο του φακού
- Είναι πάντα ίδια και για τις δύο πλευρές του φακού
- Θετική για έναν συγκλίνοντα φακό

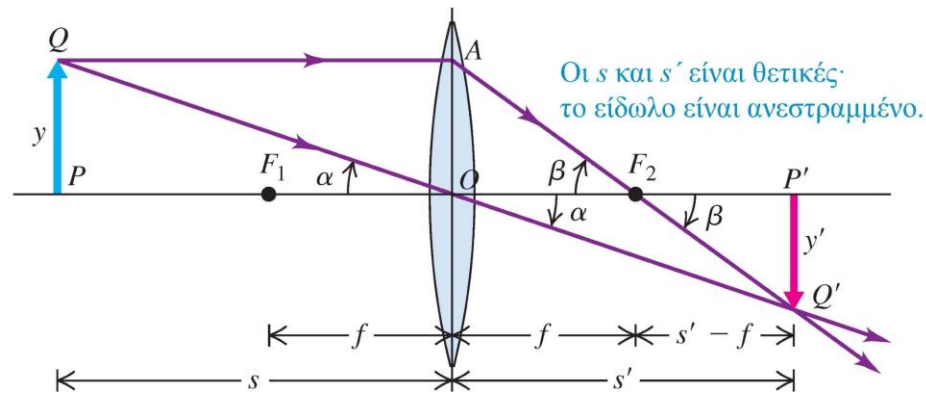
(b)

Πρωτεύουσα εστία: ακτίνες που αποκλίνουν από το σημείο αυτό εξέρχονται από τον φακό παράλληλες προς τον άξονα.



Είδωλο Ενός Εκτεταμένου Αντικειμένου: Συγκλίνων Φακός

Όπως συμβαίνει με ένα κοίλο κάτοπτρο, ένας συγκλίνων φακός μπορεί να σχηματίσει το είδωλο ενός εκτεταμένου αντικειμένου. Το Σχ. 34.29 δείχνει πώς μπορεί να βρεθεί η θέση και η πλευρική μεγέθυνση ενός ειδώλου που σχηματίζεται από έναν λεπτό συγκλίνοντα φακό.



34.29 Σχεδιάγραμμα για τον προσδιορισμό της θέσης ειδώλου, σχηματιζόμενου από έναν λεπτό φακό. Για να δοθεί έμφαση στο ότι ο φακός θεωρείται πολύ λεπτός, η ακτίνα QAQ' εμφανίζεται ότι κάμπτεται στο μέσο επίπεδο του φακού και όχι στις δύο επιφάνειές του, ενώ η ακτίνα QOQ' εμφανίζεται ως ευθεία γραμμή.

Το αρνητικό πρόσημο μας λέει ότι όταν οι s και s' είναι αμφότερες θετικές, όπως στο Σχ. 34.29, το είδωλο είναι *ανεστραμμένο* και τα y και y' έχουν αντίθετα πρόσημα.

Οι Εξ. (34.16) και (34.17) είναι οι βασικές εξισώσεις που ισχύουν για λεπτούς φακούς. Είναι *ακριβώς* ίδιες με τις αντίστοιχες εξισώσεις για σφαιρικά κάτοπτρα, δηλαδή με τις Εξ. (34.6) και (34.7). Όπως θα δούμε, οι ίδιοι κανόνες προσήμου που χρησιμοποιήσαμε στα σφαιρικά κάτοπτρα εφαρμόζονται και στους φακούς.

$$\frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s} \quad m = -\frac{s'}{s} \quad (\text{πλευρική μεγέθυνση, λεπτός φακός}) \quad (34.17)$$

Σχέση αντικειμένου - ειδώλου, λεπτός φακός

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

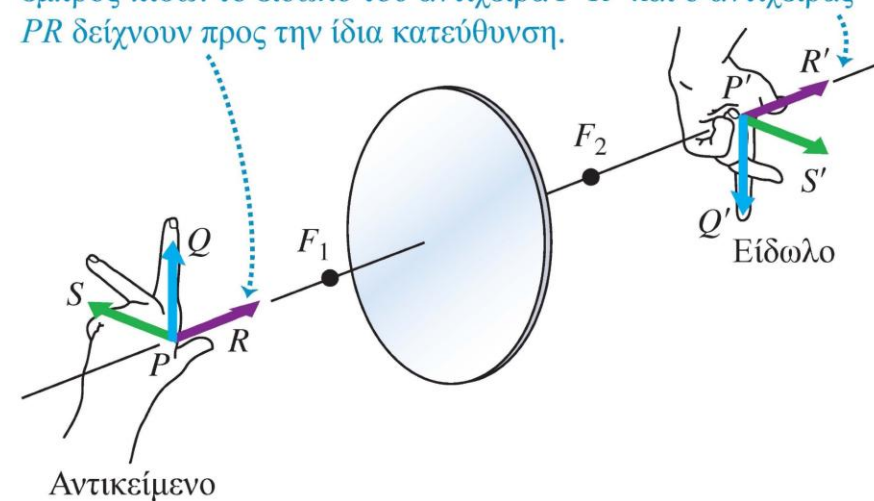
Απόσταση αντικειμένου Απόσταση ειδώλου Εστιακή απόσταση του φακού

(34.16)

Είδωλο Ενός Εκτεταμένου Αντικειμένου: Συγκλίνων Φακός

34.30 Το είδωλο $S'P'Q'R'$ ενός τρισδιάστατου αντικειμένου $SPQR$ δεν υφίσταται κατοπτρική αναστροφή από έναν φακό.

Ένα πραγματικό είδωλο που σχηματίζεται από έναν συγκλίνοντα φακό είναι ανεστραμμένο αλλά όχι ανάστροφο εμπρός-πίσω: το είδωλο του αντίχειρα $P'R'$ και ο αντίχειρας PR δείχνουν προς την ίδια κατεύθυνση.

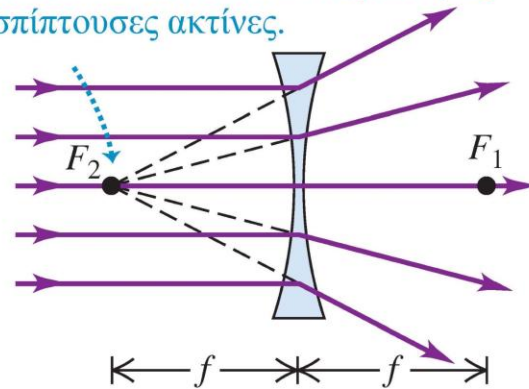


Αποκλίνοντες Φακοί

34.31 Οι F_2 και F_1 είναι η δευτερεύουσα και η πρωτεύουσα εστία, αντίστοιχα, ενός αποκλίνοντα λεπτού φακού. Η αριθμητική τιμή της f είναι αρνητική.

(a)

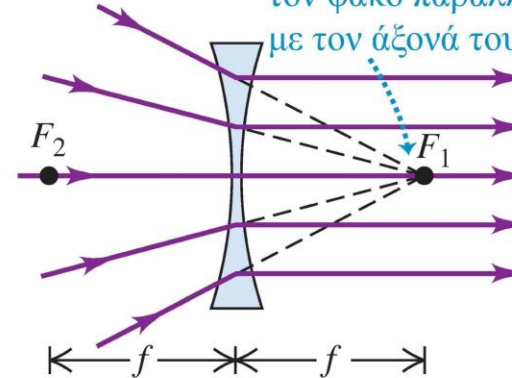
Δευτερεύουσα εστία: Το σημείο από το οποίο φαίνονται να αποκλίνουν παράλληλες προσπίπτουσες ακτίνες.



Για έναν αποκλίνοντα λεπτό φακό, η f είναι αρνητική.

(b)

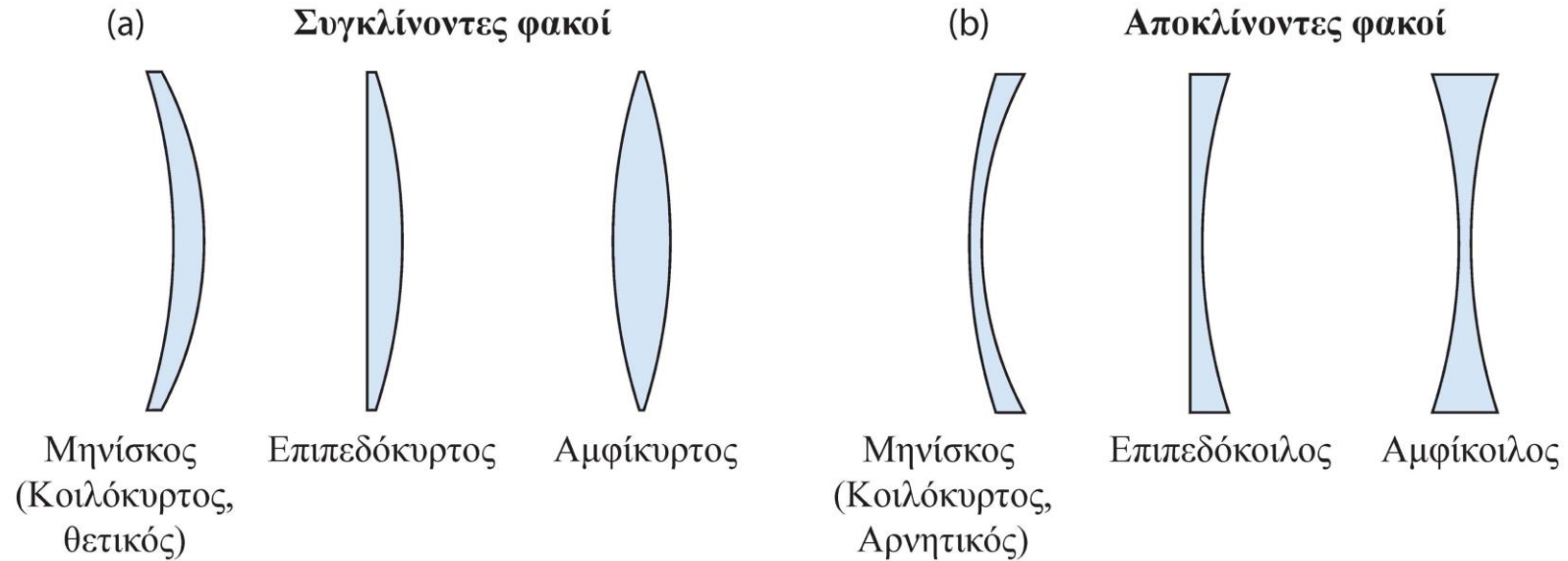
Πρωτεύουσα εστία: Ακτίνες που συγκλίνουν προς αυτό το σημείο αναδύονται από τον φακό παράλληλες με τον άξονά του.



Η δέσμη παράλληλων ακτίνων που προσπίπτει στον φακό *αποκλίνει* μετά τη διάθλασή της. Η εστιακή απόσταση ενός αποκλίνοντα φακού είναι μια αρνητική ποσότητα και ο φακός αυτός ονομάζεται επίσης και *αρνητικός φακός*. Οι εστίες ενός αρνητικού φακού έχουν ανάποδη διάταξη σε σύγκριση με αυτές ενός θετικού φακού. Η δευτερεύουσα εστία, F_2 , ενός αρνητικού φακού είναι το σημείο από το οποίο ακτίνες αρχικά παράλληλες προς τον άξονα *δείχνουν να αποκλίνουν*.

Αποκλίνοντες Φακοί

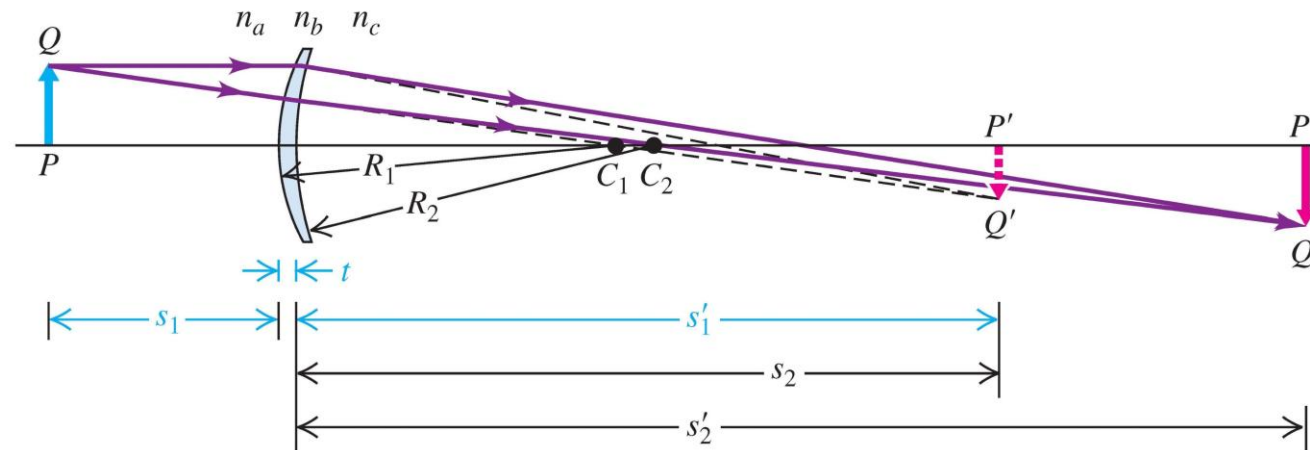
34.32 Διάφοροι τύποι φακών.



Οι Εξ. (34.16) και (34.17) εφαρμόζονται τόσο στους αρνητικούς όσο και στους θετικούς φακούς.

Η Εξίσωση του Κατασκευαστή Φακών

34.33 Το είδωλο που σχηματίζεται από την πρώτη επιφάνεια ενός φακού παίζει τον ρόλο του αντικειμένου για τη δεύτερη επιφάνεια. Οι αποστάσεις s'_1 και s_2 θεωρούνται εδώ ίσες· πρόκειται για μια καλή προσέγγιση αν το πάχος t του φακού είναι μικρό.



Εξίσωση του κατα-
σκευαστή φακών
για έναν λεπτό φακό

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

(34.19)

Εστιακή
απόσταση

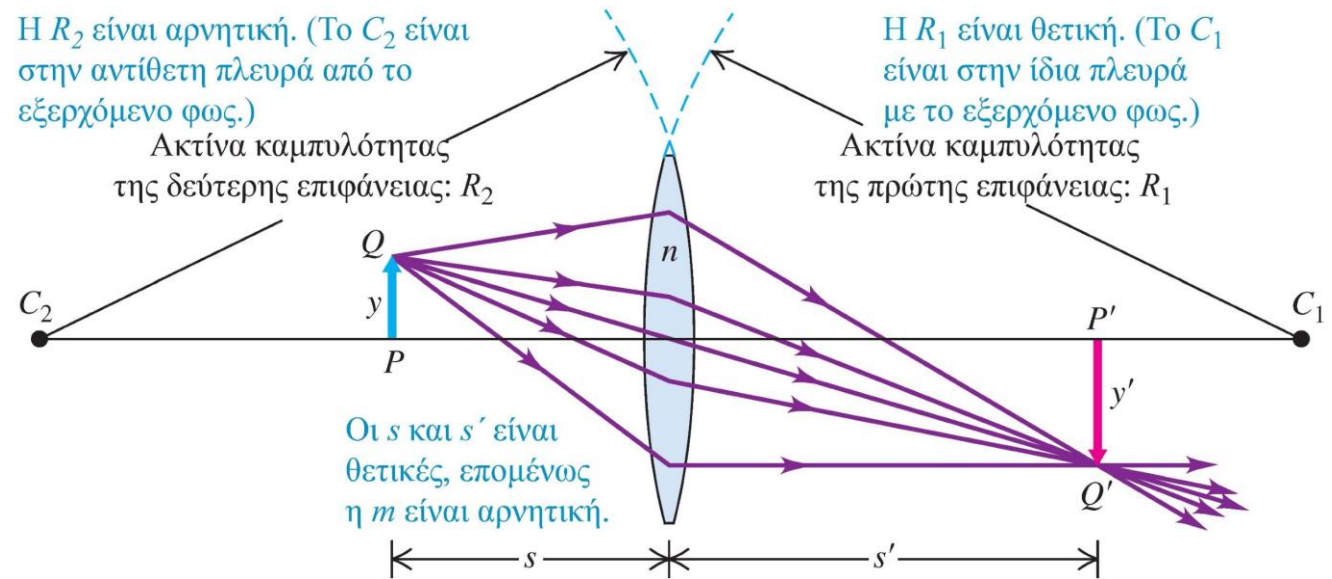
Δείκτης διάθλασης του υλικού του φακού

Ακτίνα καμπυλότητας
της πρώτης επιφάνειας

Ακτίνα καμπυλότητας
της δεύτερης επιφάνειας

Η Εξίσωση του Κατασκευαστή Φακών

34.35 Συγκλίνων φακός με θετική εστιακή απόσταση f .



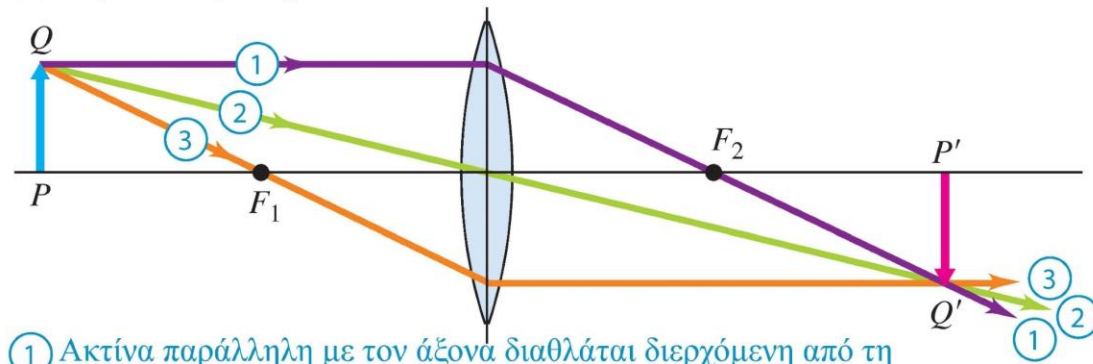
Στο Σχ. 34.35 οι s , s' και R_1 είναι θετικές, όμως η R_2 είναι αρνητική.

Γραφικές Μέθοδοι για Φακούς

Σχεδιάζουμε και πάλι μερικές χαρακτηριστικές ακτίνες που ονομάζονται *κύριες ακτίνες*, οι οποίες αποκλίνουν από σημείο του αντικειμένου που δεν βρίσκεται επί του οπτικού άξονα. Η τομή αυτών των ακτίνων, αφού διαπεράσουν τον φακό, προσδιορίζει τη θέση και το μέγεθος του ειδώλου.

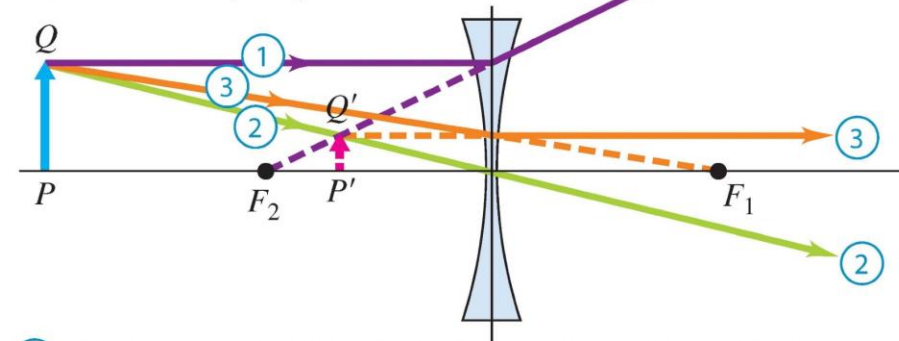
34.36 Η γραφική μέθοδος του εντοπισμού ενός ειδώλου που σχηματίζεται από έναν λεπτό φακό. Ο χρωματισμός των ακτίνων έγινε μόνο για λόγους ταυτοποίησης· δεν αναφέρεται σε συγκεκριμένα χρώματα του φωτός. (Συγκρίνετε με το Σχ. 34.19 για σφαιρικά κάτοπτρα.)

(a) Συγκλίνων φακός



- ① Ακτίνα παράλληλη με τον άξονα διαθλάται διερχόμενη από τη δευτερεύουσα εστία F_2 .
- ② Ακτίνα διερχόμενη από το κέντρο του φακού δεν παρεκκλίνει σημαντικά.
- ③ Ακτίνα διερχόμενη από την πρωτεύουσα εστία F_1 αναδύεται παράλληλα με τον άξονα.

(b) Αποκλίνων φακός



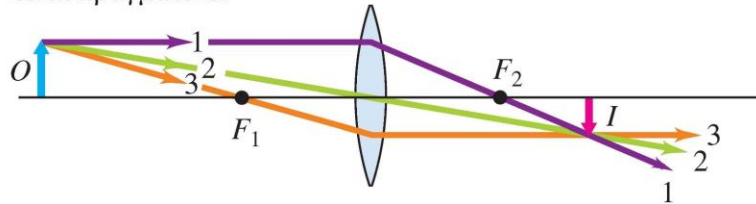
- ① Ακτίνα παράλληλη με τον άξονα φαίνεται μετά τη διάθλασή της να προέρχεται από τη δευτερεύουσα εστία F_2 .
- ② Ακτίνα διερχόμενη από το κέντρο του φακού δεν παρεκκλίνει σημαντικά.
- ③ Ακτίνα κατευθυνόμενη προς την πρωτεύουσα εστία F_1 αναδύεται παράλληλα με τον άξονα.

Όταν το είδωλο είναι πραγματικό, η θέση του σημείου ειδώλου προσδιορίζεται από την τομή δύο οποιωνδήποτε από τις κύριες ακτίνες 1, 2 και 3 (Σχ. 34.36a). Όταν το είδωλο είναι φανταστικό, για την εύρεση του σημείου ειδώλου προεκτείνουμε τις εξερχόμενες αποκλίνουσες ακτίνες προς τα πίσω ως το σημείο τομής τους (Σχ. 34.36b).

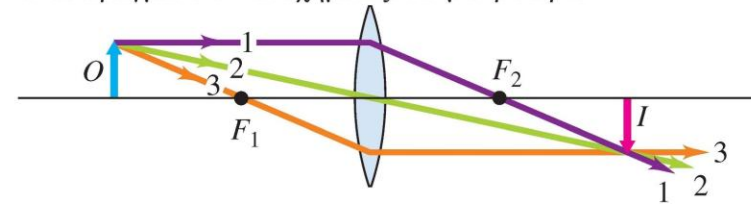
Γραφικές Μέθοδοι για Φακούς

34.37 Σχηματισμός ειδώλων από έναν λεπτό συγκλίνοντα φακό για διάφορες αποστάσεις αντικειμένου. Οι κύριες ακτίνες είναι αριθμημένες. (Συγκρίνετε με το Σχ. 34.20 για ένα κοίλο σφαιρικό κάτοπτρο.)

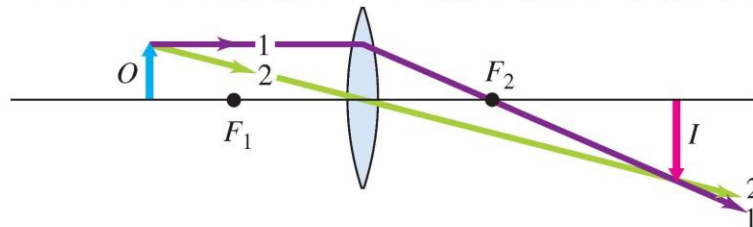
(a) Το αντικείμενο O είναι πέραν της εστίας: Το είδωλο I είναι πραγματικό.



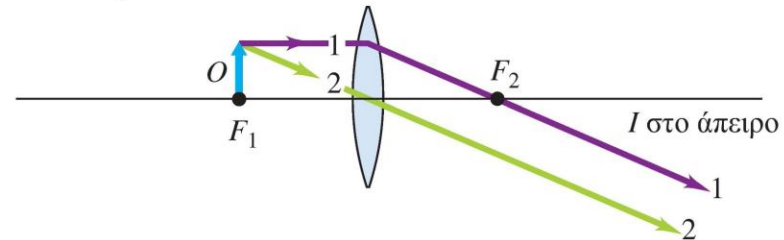
(b) Το αντικείμενο O είναι πιο κοντά στην εστία: Το είδωλο I είναι πραγματικό και σχηματίζεται μακρύτερα.



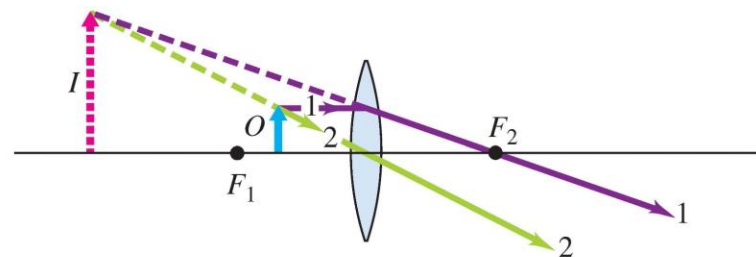
(c) Το αντικείμενο O είναι ακόμη πιο κοντά στην εστία: Το είδωλο I είναι πραγματικό και σχηματίζεται ακόμη μακρύτερα.



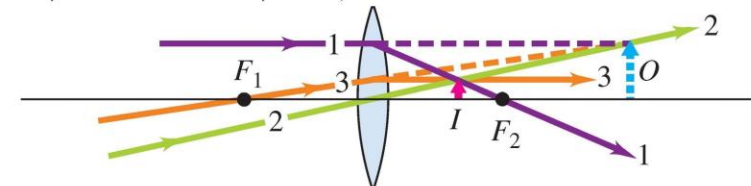
(d) Το αντικείμενο O είναι επί της εστίας: Το είδωλο I είναι στο άπειρο.



(e) Το αντικείμενο O βρίσκεται εσωτερικά της εστίας: το είδωλο I είναι φανταστικό και μεγαλύτερο του αντικειμένου.



(f) Ένα φανταστικό αντικείμενο O (οι φωτεινές ακτίνες συγκλίνουν επί του φακού.)

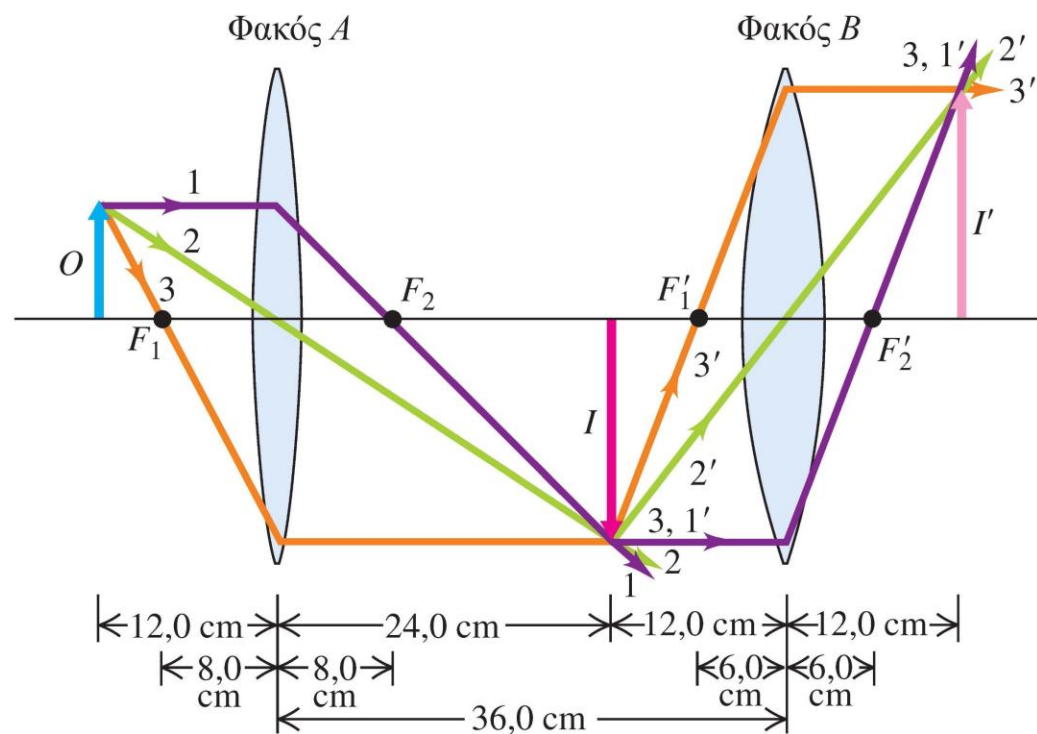


ΤΟ ΕΙΔΩΛΟ ΕΝΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ

Οι συγκλίνοντες φακοί A και B , με εστιακές αποστάσεις $8,0\text{ cm}$ και $6,0\text{ cm}$, αντίστοιχα, τοποθετούνται σε απόσταση $36,0\text{ cm}$ μεταξύ τους. Αμφότεροι οι φακοί έχουν τον ίδιο οπτικό άξονα. Ένα αντικείμενο ύψους $8,0\text{ cm}$ τοποθετείται $12,0\text{ cm}$ αριστερά από τον φακό A . Να βρείτε τη θέση, το μέγεθος και τον προσανατολισμό του ειδώλου που σχηματίζεται από τον συνδυασμό των δύο φακών. (Τέτοιοι συνδυασμοί χρησιμοποιούνται στα τηλεσκόπια και στα μικροσκόπια, τα οποία θα περιγραφούν στο Εδ. 34.7.)

ΛΥΣΗ, ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗ και ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ: Το σχεδιάγραμμα του προβλήματος παρουσιάζεται στο Σχ. 34.39. Το αντικείμενο O βρίσκεται πέραν της εστίας F_1 του φακού A , έτσι ο φακός αυτός παράγει ένα πραγματικό είδωλο I . Οι φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στον φακό B αποκλίνουν από το πραγματικό είδωλο, ακριβώς όπως θα απέκλιναν αν το I ήταν ένα υλικό αντικείμενο· συνεπώς, το είδωλο I δρα ως ένα αντικείμενο για τον φακό B . Σκοπός μας είναι να προσδιορίσουμε τις ιδιότητες του ειδώλου I' που σχηματίζεται από τον φακό B . Για να το πετύχουμε, χρησιμοποιούμε τόσο το διάγραμμα ακτίνων όσο και υπολογιστικές μεθόδους.

34.39 Διάγραμμα κύριων ακτίνων για τον συνδυασμό δύο συγκλινόντων φακών. Ο πρώτος φακός (A) σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλο του αντικειμένου. Αυτό το πραγματικό είδωλο δρα ως αντικείμενο για τον δεύτερο φακό (B).

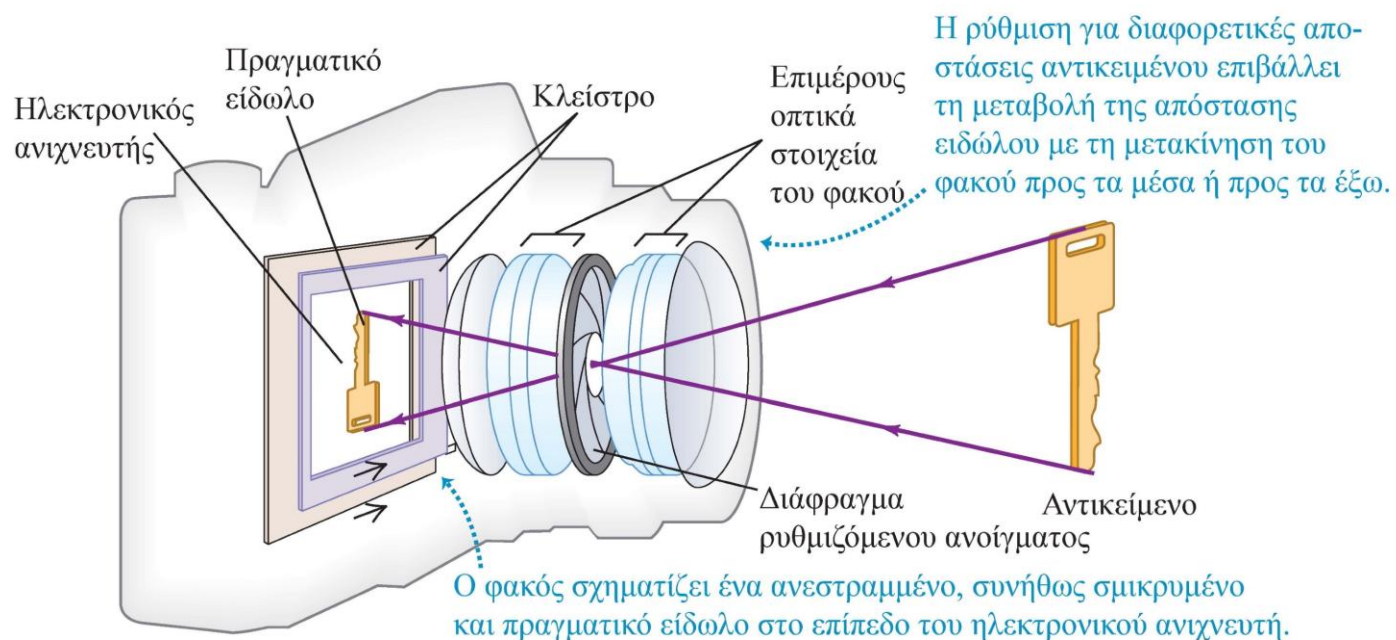


ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

Τα βασικά στοιχεία μιας **φωτογραφικής μηχανής** είναι ένας θάλαμος αδιαπέραστος από το φως (η λέξη «camera» έχει λατινική προέλευση και σημαίνει «ένα δωμάτιο ή ένας περικλειστος χώρος»), ένας συγκλίνων φακός, ένα κλείστρο (φωτοφράκτης) για να ανοίγει τον φακό για ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα και ένα φωτοευαίσθητο μέσο καταγραφής (Σχ. 34.40).

Στις ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές (συμπεριλαμβανομένων αυτών των κινητών τηλεφώνων), το μέσο αυτό είναι ένας ηλεκτρονικός ανιχνευτής· στις παλαιότερες φωτογραφικές μηχανές είναι ένα φωτογραφικό φιλμ. Ο φακός σχηματίζει ένα ανεστραμμένο, πραγματικό είδωλο του φωτογραφιζόμενου αντικειμένου πάνω στο μέσο καταγραφής. Οι φωτογραφικοί φακοί υψηλής ποιότητας αποτελούνται από αρκετά οπτικά στοιχεία, που επιτρέπουν τη μερική διόρθωση των ποικίλων *σφαλμάτων* απεικόνισης, στα οποία συμπεριλαμβάνονται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος και οι περιορισμοί που επιβάλλονται από την παραξονική προσέγγιση.

34.40 Κύρια στοιχεία μιας ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής.



Φακοί Φωτογραφικών Μηχανών: Εστιακή Απόσταση

34.41 (a), (b), (c) Τρεις φωτογραφίες που ελήφθησαν με την ίδια φωτογραφική μηχανή και από την ίδια θέση, με χρήση φακών εστιακής απόστασης $f = 28$ mm, 70 mm και 300 mm. Αυξανόμενης της εστιακής απόστασης, αυξάνεται αναλόγως και το μέγεθος του ειδώλου. (d) Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της f τόσο μικρότερη γίνεται η γωνία παρατήρησης. Οι γωνίες που φαίνονται εδώ αφορούν φωτογραφική μηχανή με επιφάνεια ειδώλου 24 mm $\times$ 36 mm (αντιστοιχεί σε φιλμ των 35 mm) και αναφέρονται στις γωνίες παρατήρησης κατά μήκος των 36 mm του πλάτους του φιλμ.

(a) $f = 28$ mm



(b) $f = 70$ mm

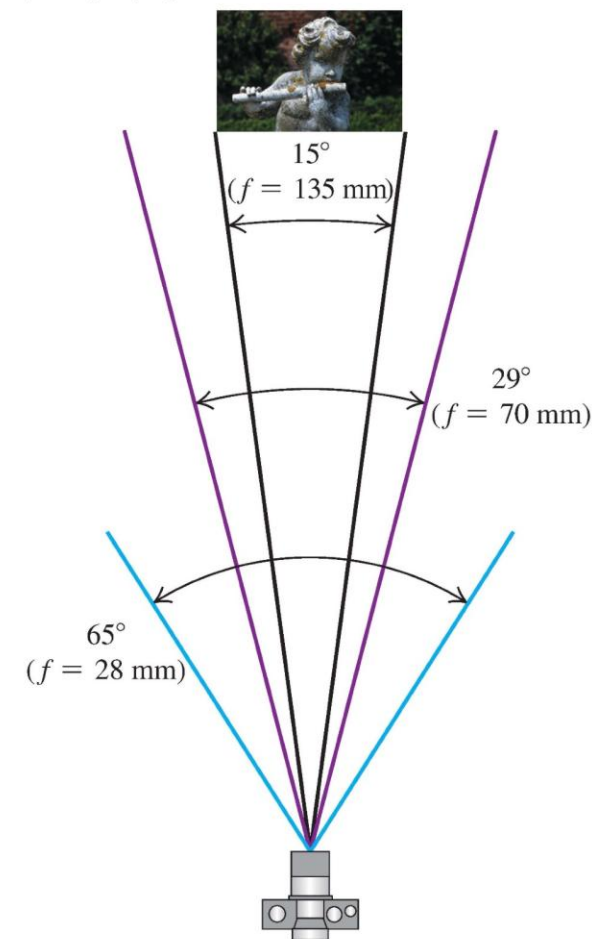


(c) $f = 135$ mm



Η επιλογή της εστιακής απόστασης f για τον φακό μιας φωτογραφικής μηχανής εξαρτάται από το μέγεθος του ηλεκτρονικού ανιχνευτή ή του φιλμ και από την επιθυμητή γωνία παρατήρησης.

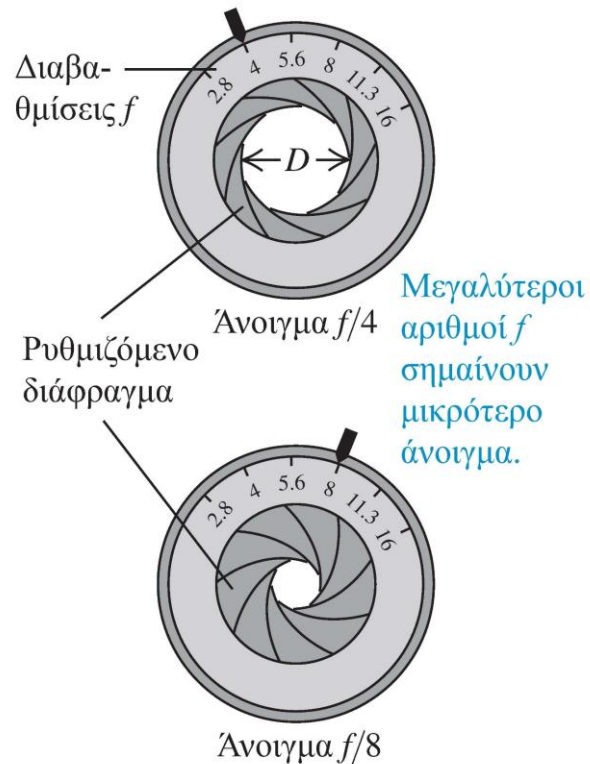
(d) Οι γωνίες παρατήρησης για τις φωτογραφίες (a)-(c)



Φακοί Φωτογραφικών Μηχανών: Αριθμός f

34.42 Ένας φωτογραφικός φακός με ρυθμιζόμενο διάφραγμα.

Μεταβάλλοντας τη διάμετρο κατά έναν παράγοντα $\sqrt{2}$ μεταβάλλουμε την ένταση κατά έναν παράγοντα 2.



Για να καταγράψει σωστά μια φωτογραφική μηχανή ένα είδωλο, η ολική φωτεινή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που φθάνει στον ηλεκτρονικό ανιχνευτή ή το φιλμ (η «έκθεση» στο φως) πρέπει να εμπίπτει εντός ορισμένων ορίων. Αυτή ελέγχεται από το *κλείστρο* (ή *φωτοφράκτη*) και από το *άνοιγμα του φακού*. Το κλείστρο ελέγχει το διάστημα του χρόνου εντός του οποίου το φως εισέρχεται στον φακό.

Οι φωτογράφοι εκφράζουν συνήθως την ικανότητα συγκέντρωσης φωτός ενός φακού συναρτήσει του λόγου f/D , που ονομάζεται **αριθμός f** του φακού:

$$\text{Αριθμός } f \text{ ενός φακού} = \frac{f}{D} \quad (34.20)$$

Εστιακή απόσταση του φακού
Διάμετρος ανοίγματος

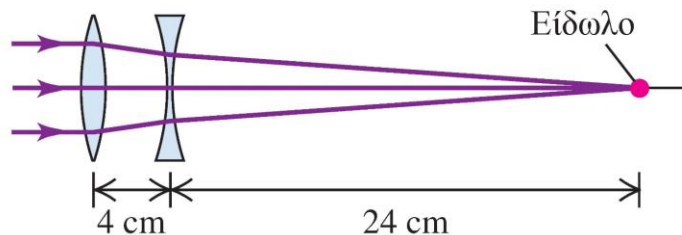
Η πραγματική έκθεση (δηλαδή η συνολική φωτεινή ενέργεια που φθάνει στον ανιχνευτή ή το φιλμ) είναι ανάλογη προς την επιφάνεια του ανοίγματος και προς τη χρονική διάρκεια της έκθεσης. Συνεπώς, το διάφραγμα $f/4$ με χρόνο $\frac{1}{500}$ s, το διάφραγμα $f/5,6$ με χρόνο $\frac{1}{250}$ s και το διάφραγμα $f/8$ με χρόνο $\frac{1}{125}$ s αντιστοιχούν όλα στην ίδια έκθεση.

Φακοί Ζουμ και Προβολείς

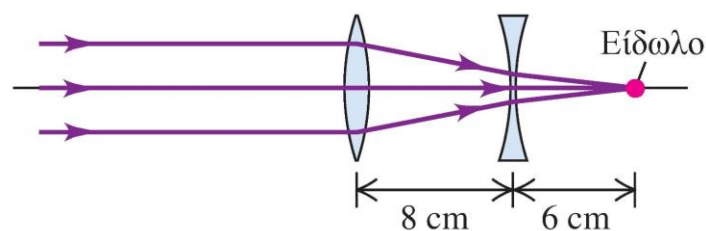
Μια σύνθετη συλλογή αρκετών φακών που δίνουν μια συνεχώς μεταβαλλόμενη εστιακή απόσταση, συχνά σε μια ευρεία περιοχή, όπως π.χ. από 10 έως 1. Οι φακοί ζουμ δίνουν ένα ευρύ φάσμα μεγεθών του ειδώλου για ένα δεδομένο αντικείμενο.

34.43 Ένας απλός φακός ζουμ (μεταβλητής εστιακής απόστασης) χρησιμοποιεί έναν συνδυασμό ενός συγκλίνοντα και ενός αποκλίνοντα φακού. (a) Όταν οι δύο φακοί είναι τοποθετημένοι κοντά, ο συνδυασμός συμπεριφέρεται σαν ένας μόνος φακός μεγάλης εστιακής απόστασης. (b) Εάν οι δύο φακοί απομακρυνθούν, ο συνδυασμός συμπεριφέρεται σαν ένας φακός μικρής εστιακής απόστασης. (c) Αυτός ο φακός ζουμ περιλαμβάνει δώδεκα οπτικά στοιχεία διευθετημένα σε τέσσερις ομάδες.

(a) Σειτ φακού ζουμ μεγάλης εστιακής απόστασης



(b) Σειτ φακού ζουμ μικρής εστιακής απόστασης



(c) Τυπικός φακός ζουμ



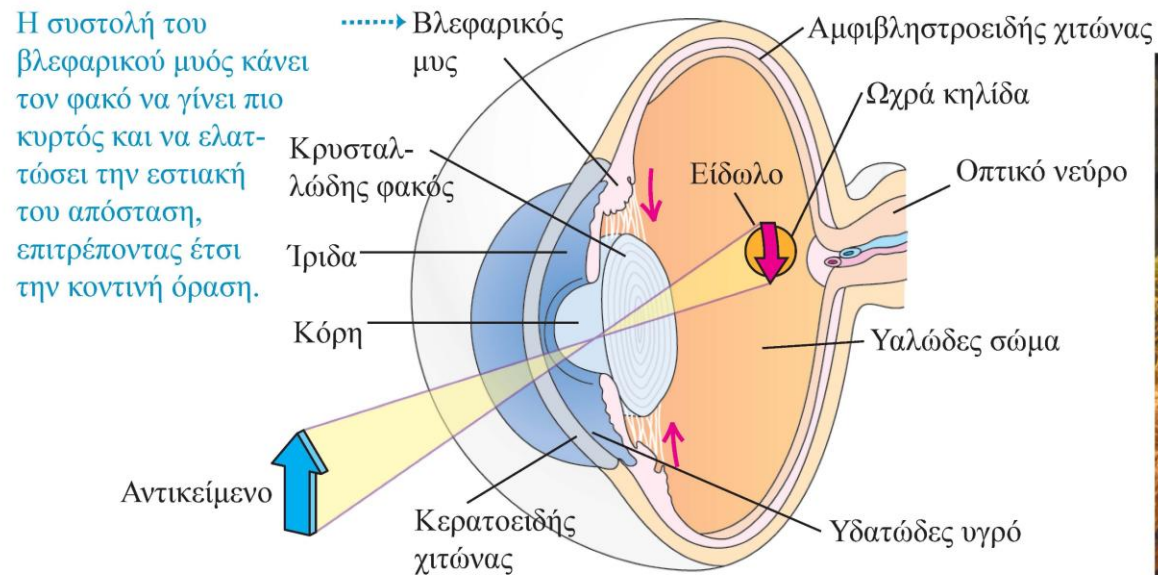
Ένας ψηφιακός προβολέας για τη θέαση των διαφανειών ενός μαθήματος, καθώς και φωτογραφιών ή κινηματογραφικών ταινιών λειτουργεί με τρόπο πολύ παρόμοιο με μια ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, αλλά αντίστροφα.

ΤΟ ΜΑΤΙ

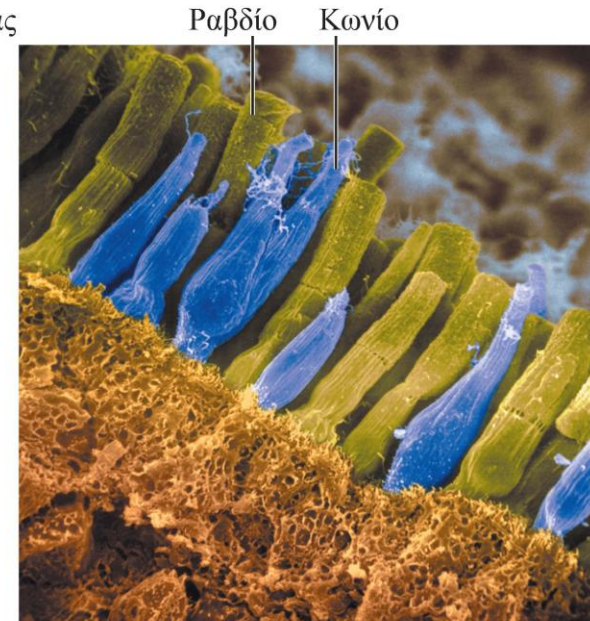
Η οπτική συμπεριφορά του ματιού είναι παρόμοια με αυτή μιας φωτογραφικής μηχανής. Το Σχ. 34.44 δείχνει τα βασικά μέρη του ανθρώπινου ματιού, θεωρούμενου ως οπτικού συστήματος. Το μάτι είναι σχεδόν σφαιρικού σχήματος, με διάμετρο περίπου 2,5 cm.

34.44 (a) Το μάτι. (b) Υπάρχουν δύο ειδών φωτοευαίσθητα κύτταρα στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Τα ραβδία είναι πιο ευαίσθητα στο φως από τα κωνία, αλλά μόνο τα κωνία είναι ευαίσθητα στις διαφορές μεταξύ χρωμάτων. Ένα τυπικό ανθρώπινο μάτι περιέχει περίπου $1,3 \times 10^8$ ραβδία και περίπου 7×10^6 κωνία.

(a) Διάγραμμα του ματιού



(b) Εικόνα ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης που δείχνει τα ραβδία και τα κωνία του αμφιβληστροειδούς χιτώνα με διαφορετικά χρώματα

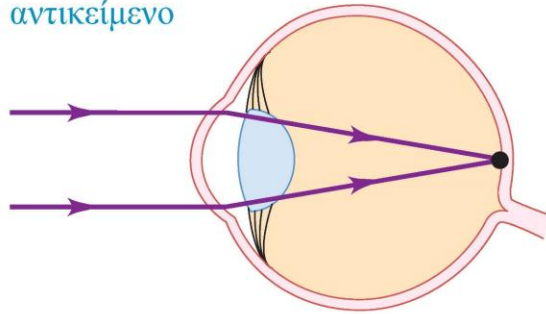


Ατέλειες της Όρασης

34.45 Διαθλαστικά σφάλματα για (a) ένα κανονικό μάτι, (b) ένα μυωπικό μάτι, και (c) ένα υπερμετρωπικό μάτι καθώς παρατηρεί ένα πολύ απομακρυσμένο αντικείμενο. Σε κάθε περίπτωση, το μάτι παρουσιάζεται με χαλαρωμένο τον βλεφαρικό μυ. Η διακεκομμένη γαλάζια καμπύλη υποδεικνύει την απαιτούμενη θέση του αμφιβληστροειδούς.

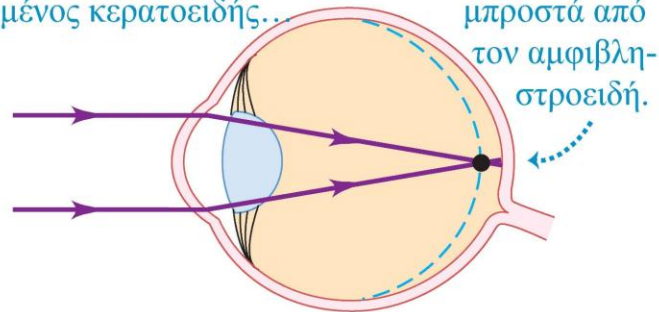
(a) Κανονικό μάτι

Ακτίνες από
ένα μακρινό
αντικείμενο



(b) Μυωπικό μάτι

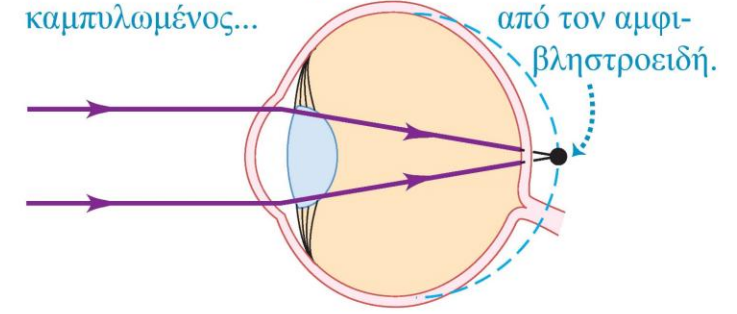
Μάτι πολύ μεγάλου
μήκους ή πολύ καμπυλω-
μένος κερατοειδής...



... οι ακτίνες
εστιάζονται
μπροστά από
τον αμφιβλη-
στροειδή.

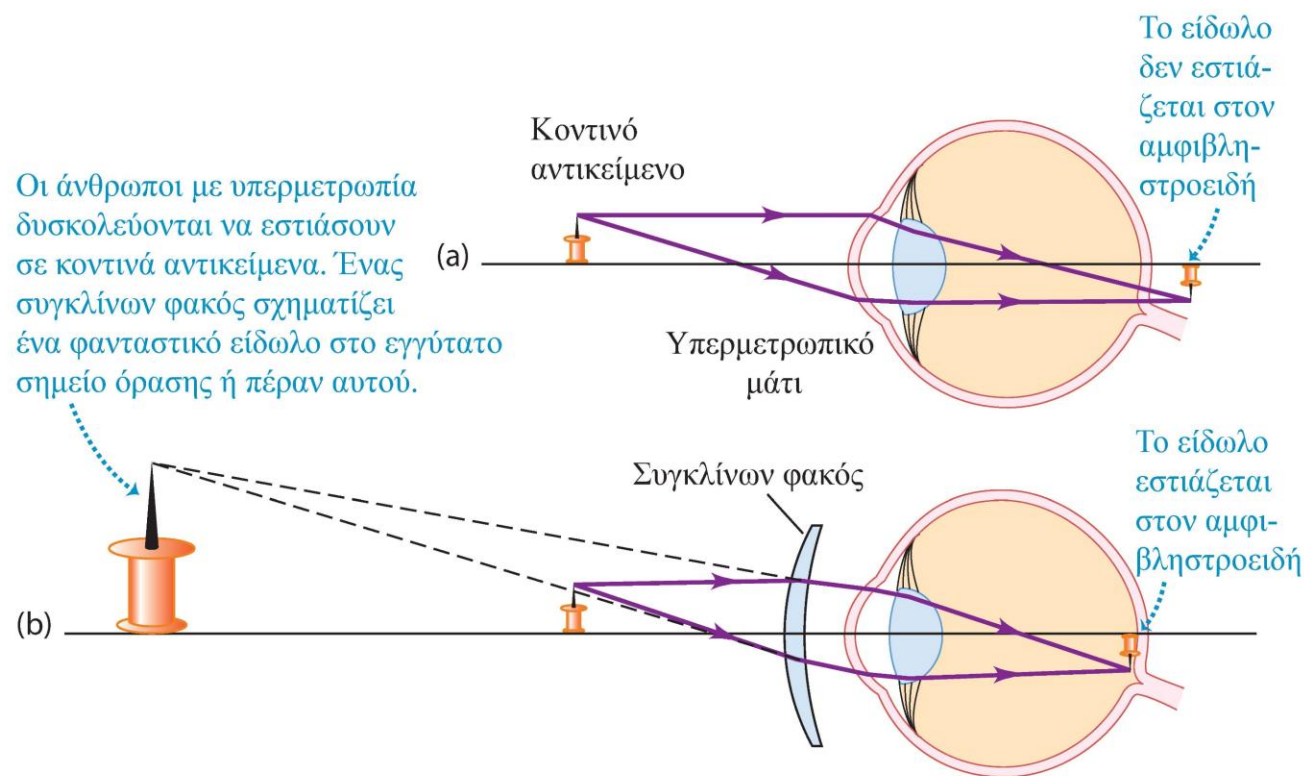
(c) Υπερμετρωπικό μάτι

Μάτι πολύ μικρού μήκους ... οι ακτίνες
ή κερατοειδής ανεπαρκώς καμπυλωμένος... εστιάζονται πίσω
από τον αμφι-
βληστροειδή.



Αρκετές από τις πιο συνηθισμένες ατέλειες της όρασης προέρχονται από τις λανθασμένες σχέσεις των αποστάσεων εντός του ματιού.

Υπερμετρωπικό μάτι



34.46 (a) Ένα μη διορθωμένο υπερμετρωπικό μάτι. (b) Ένας θετικός (συγκλίνων) φακός παρέχει την επιπρόσθετη σύγκλιση των ακτίνων που χρειάζεται ένα υπερμετρωπικό μάτι για να εστιάσει το είδωλο στον αμφιβληστροειδή.

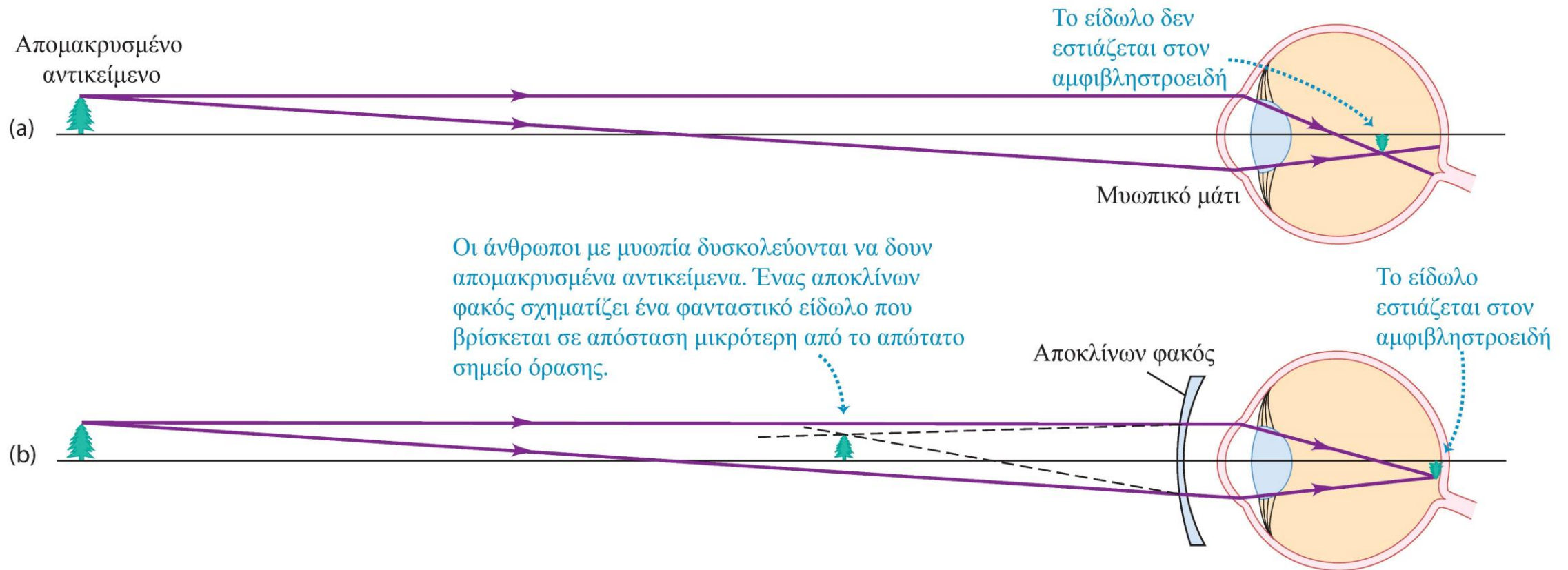
Απομάκρυνση του Εγγύτατου Σημείου Ευκρινούς Όρασης με την Ηλικία

ΠΙΝΑΚΑΣ 34.1

Ηλικία (έτη)	Εγγύτατο Σημείο (cm)
10	7
20	10
30	14
40	22
50	40
60	200

Μυωπικό μάτι

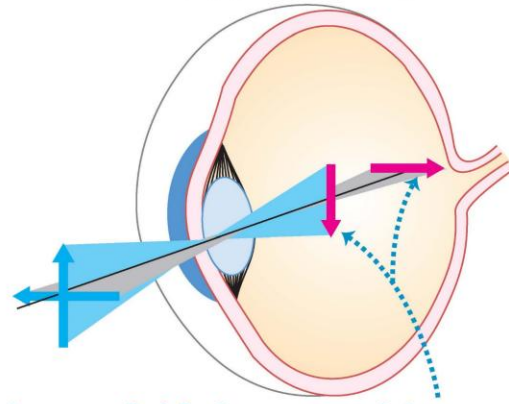
34.47 (a) Ένα μη διορθωμένο μυωπικό μάτι. (b) Ένας αρνητικός (αποκλίνων) φακός διανοίγει τη δέσμη των ακτίνων για να αντισταθμίσει την υπέρμετρη σύγκλιση του μυωπικού ματιού.



Αστιγματικό μάτι

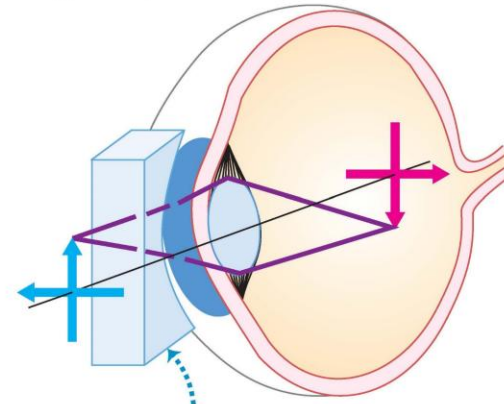
34.48 Ένας τύπος αστιγματισμού και ο τρόπος διόρθωσής του.

(a) Οι κατακόρυφες γραμμές απεικονίζονται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή.



Το σχήμα του βολβού του ματιού ή του φακού προκαλεί την εστίαση σε διαφορετικές αποστάσεις κατακόρυφων και οριζόντιων στοιχείων.

(b) Ένας κυλινδρικός φακός διορθώνει τον αστιγματισμό.



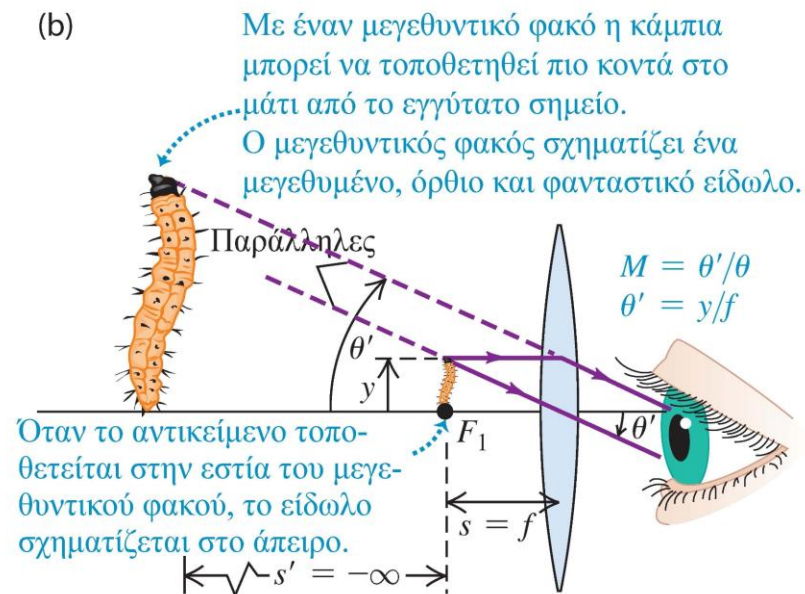
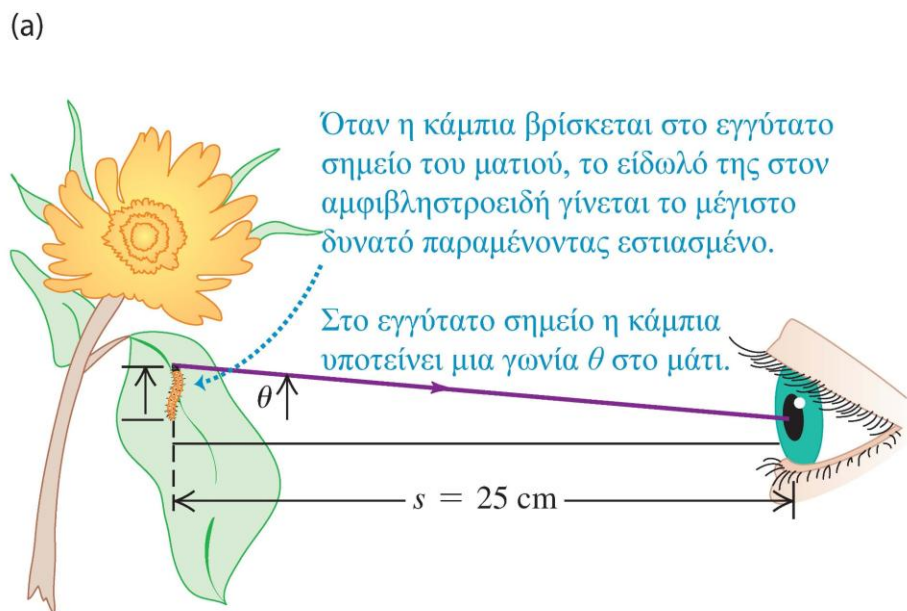
Αυτός ο κυλινδρικός φακός είναι καμπυλωμένος στην κατακόρυφη διεύθυνση, αλλά όχι στην οριζόντια· μεταβάλλει την εστιακή απόσταση των κατακόρυφων στοιχείων.

Οι φακοί για τη διόρθωση της όρασης περιγράφονται συνήθως από την **ισχύ** τους, που ορίζεται ως το αντίστροφο της εστιακής απόστασης εκφρασμένης σε μέτρα. Η μονάδα της ισχύος είναι η **διοπτρία**. Οι αριθμοί σε μια ιατρική συνταγή για διορθωτικά γυαλιά είναι συνήθως ισχείς εκπεφρασμένες σε διοπτρίες. Όταν η διόρθωση περιλαμβάνει τόσο τον αστιγματισμό όσο και τη μυωπία ή την υπερμετρωπία, υπάρχουν τρεις αριθμοί: Ένας για τη σφαιρική ισχύ, ένας για την κυλινδρική ισχύ και μια γωνία που περιγράφει τον προσανατολισμό του άξονα του κυλίνδρου.

Ο ΜΕΓΕΘΥΝΤΙΚΟΣ ΦΑΚΟΣ

Το φαινόμενο μέγεθος ενός αντικειμένου προσδιορίζεται από το μέγεθος του ειδώλου του στον αμφιβληστροειδή. Αν η παρατήρηση γίνεται με γυμνό μάτι, το μέγεθος αυτό εξαρτάται από τη γωνία θ που υποτείνεται από το αντικείμενο στο μάτι, η οποία ονομάζεται **γωνιακό μέγεθος** του αντικειμένου. Όμως το μάτι σας δεν μπορεί να εστιαστεί ευκρινώς σε αντικείμενα που βρίσκονται πιο κοντά από το εγγύτατο σημείο, συνεπώς το γωνιακό μέγεθος ενός αντικειμένου είναι μέγιστο –υποτείνει τη μέγιστη δυνατή γωνία παρατήρησης– όταν τοποθετείται στο εγγύτατο σημείο όρασης. Ένας συγκλίνων φακός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να σχηματίσει ένα φανταστικό είδωλο που είναι μεγαλύτερο και βρίσκεται μακρύτερα από το μάτι από το ίδιο το αντικείμενο,

34.51 (a) Το γωνιακό μέγεθος θ είναι μέγιστο όταν το αντικείμενο είναι στο εγγύτατο σημείο ευκρινούς όρασης. (b) Ο μεγεθυντικός φακός δίνει ένα φανταστικό είδωλο στο άπειρο. Το φανταστικό αυτό είδωλο δίνει την εντύπωση στο μάτι ότι είναι ένα πραγματικό αντικείμενο που υποτείνει μια μεγαλύτερη γωνία θ' στο μάτι.



Ο ΜΕΓΕΘΥΝΤΙΚΟΣ ΦΑΚΟΣ

Γωνιακή μεγέθυνση ενός απλού μεγεθυντικού φακού

Γωνιακό μέγεθος του αντικειμένου με μεγεθυντικό φακό

Γωνιακό μέγεθος του αντικειμένου χωρίς μεγεθυντικό φακό

Υψος αντικειμένου

Εγγύτατο σημείο

Εστιακή απόσταση

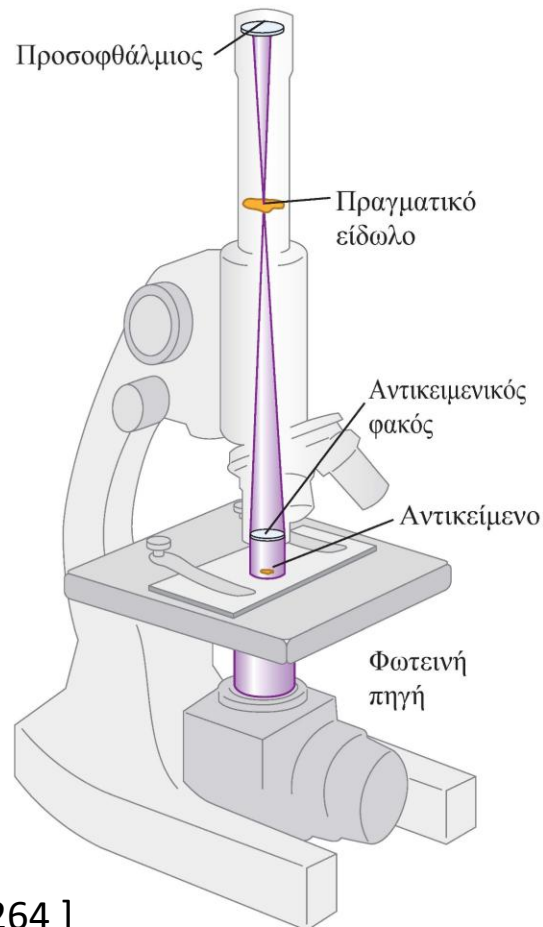
$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{y/f}{y/25 \text{ cm}} = \frac{25 \text{ cm}}{f} \quad (34.22)$$

Θα υποθέσουμε έναν μέσο παρατηρητή για τον οποίο το εγγύτατο σημείο όρασης απέχει 25 cm από το μάτι.

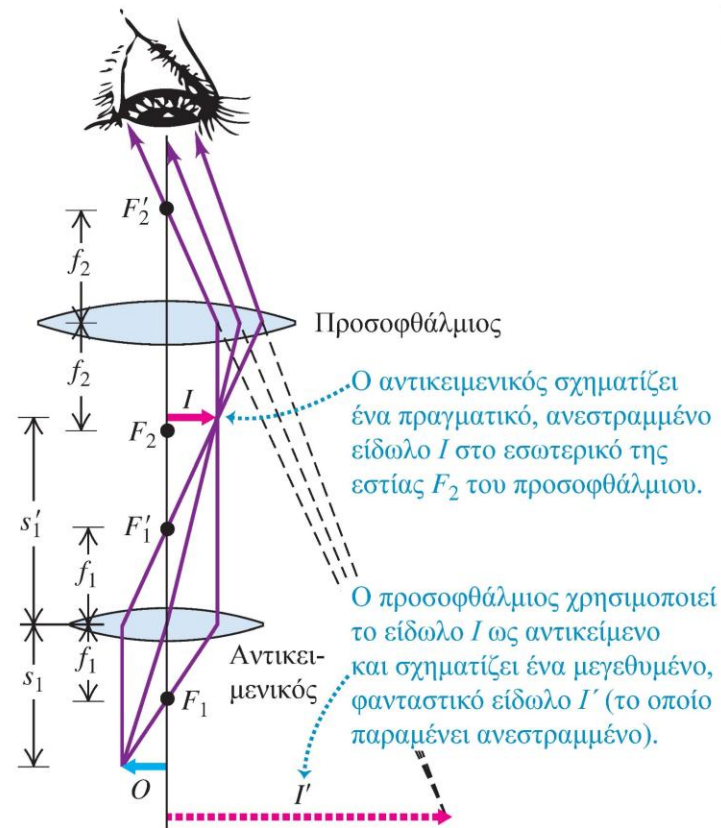
ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΑ

34.52 (a) Τα οπτικά στοιχεία ενός μικροσκοπίου. (b) Το αντικείμενο O τοποθετείται μόλις έξω από την πρωτεύουσα εστία του αντικειμενικού (η απόσταση s_1 έχει υπερβληθεί για λόγους σαφήνειας). (c) Εικόνα μικροσκοπίου που δείχνει μονοκύτταρους οργανισμούς εγκάρσιου μεγέθους περίπου 2×10^{-4} m (0,2 mm). Τυπικά οπτικά μικροσκόπια μπορούν να διακρίνουν μικρά αντικείμενα μεγέθους έως 2×10^{-7} m, συγκρίσιμα δηλαδή με το μήκος κύματος του φωτός.

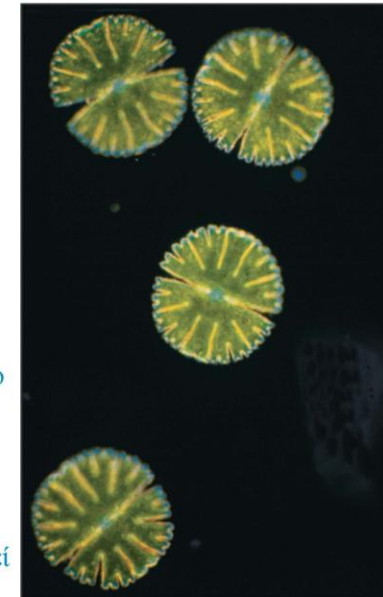
(a) Στοιχεία ενός μικροσκοπίου



(b) Οπτική του μικροσκοπίου



(c) Μονοκύτταρη άλγη γλυκού νερού (*Micrasterias denticulata*)



ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ ΚΑΙ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΑ

Οι φωτογραφικές μηχανές, τα διορθωτικά γυαλιά και οι μεγεθυντικοί φακοί χρησιμοποιούν έναν μόνο φακό για τον σχηματισμό του ειδώλου. Δύο σημαντικές οπτικές διατάξεις που χρησιμοποιούν δύο φακούς είναι το μικροσκόπιο και το τηλεσκόπιο. Σε κάθε διάταξη, ένας πρωτεύων φακός, ή *αντικειμενικός*, σχηματίζει ένα πραγματικό είδωλο, ενώ ένας δεύτερος φακός, ή *προσοφθάλμιος*, χρησιμοποιείται ως μεγεθυντικός φακός για να σχηματίσει ένα μεγεθυμένο φανταστικό είδωλο.

Όπως συμβαίνει και με τον απλό μεγεθυντικό φακό, αυτό που ενδιαφέρει όταν γίνεται παρατήρηση μέσω μικροσκοπίου είναι η *γωνιακή* μεγέθυνση M . Η συνολική γωνιακή μεγέθυνση του σύνθετου μικροσκοπίου είναι το γινόμενο δύο παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι η *πλευρική* μεγέθυνση m_1 του αντικειμενικού, που προσδιορίζει το γραμμικό μέγεθος του πραγματικού ειδώλου I · ο δεύτερος παράγοντας είναι η *γωνιακή* μεγέθυνση M_2 του προσοφθάλμιου, που συσχετίζει το γωνιακό μέγεθος του φανταστικού ειδώλου, παρατηρούμενου μέσω του προσοφθάλμιου, με το γωνιακό μέγεθος που θα είχε το πραγματικό είδωλο I αν το παρατηρούσατε *χωρίς* τον προσοφθάλμιο.

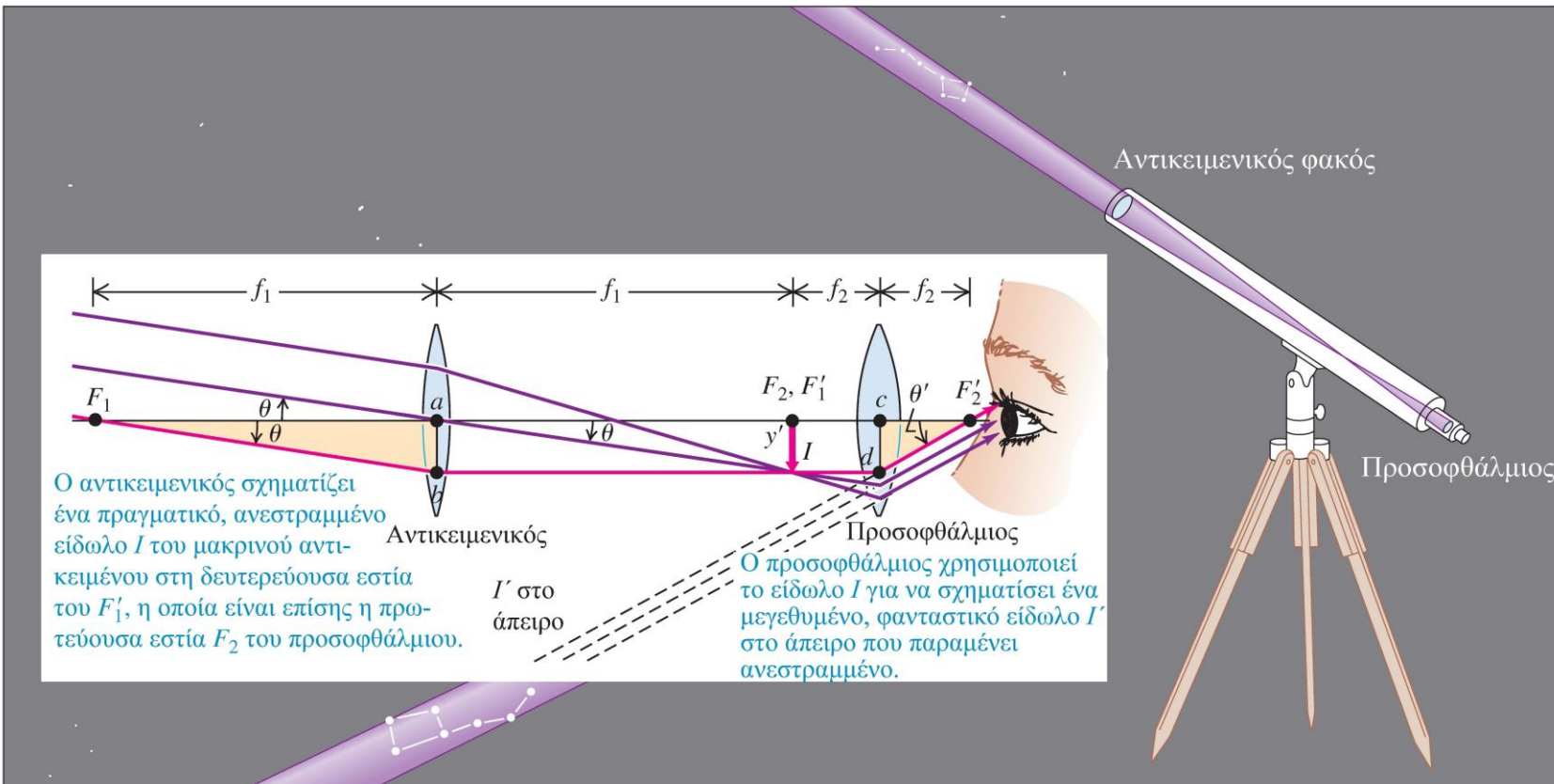
Η συνολική γωνιακή μεγέθυνση M του σύνθετου μικροσκοπίου (εκτός από ένα αρνητικό πρόσημο, το οποίο συνήθως αγνοείται) είναι το γινόμενο των δύο μεγεθύνσεων:

$$M = m_1 M_2 = \frac{(25 \text{ cm})s'_1}{f_1 f_2} \quad \begin{array}{l} \text{(γωνιακή μεγέθυνση} \\ \text{για ένα μικροσκόπιο)} \end{array} \quad (34.24)$$

όπου οι s'_1 , f_1 και f_2 μετρούνται σε εκατοστά. Το τελικό είδωλο είναι ανεστραμμένο σε σχέση με το αντικείμενο. Οι κατασκευαστές μικροσκοπίων καθορίζουν συνήθως τις τιμές των m_1 και M_2 αντί των εστιακών αποστάσεων του αντικειμενικού και του προσοφθάλμιου.

Διαθλαστικά τηλεσκόπια

34.53 Οπτικό σύστημα ενός αστρονομικού διαθλαστικού τηλεσκοπίου.



$$M = \frac{\theta'}{\theta} = -\frac{y'/f_2}{y'/f_1} = -\frac{f_1}{f_2} \quad (\text{γωνιακή μεγέθυνση για ένα τηλεσκόπιο}) \quad (34.25)$$

Η γωνιακή μεγέθυνση M ενός τηλεσκοπίου είναι ίση με τον λόγο της εστιακής απόστασης του αντικειμενικού προς αυτήν του προσοφθάλμιου. Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει ότι το τελικό είδωλο είναι ανεστραμμένο.

Κατοπτρικά τηλεσκόπια

34.54 (a), (b), (c) Τρεις διαφορετικοί σχεδιασμοί ανακλαστικών τηλεσκοπίων. (d) Φωτογραφία του εσωτερικού του τηλεσκοπίου Gemini North, το οποίο χρησιμοποιεί τον σχεδιασμό που φαίνεται στο (c). Το αντικειμενικό κάτοπτρο έχει διάμετρο 8 μέτρα.

Στο ανακλαστικό τηλεσκόπιο (Σχ. 34.54a) ο αντικειμενικός φακός έχει αντικατασταθεί από ένα κοίλο κάτοπτρο. Σε μεγάλα τηλεσκόπια ο σχεδιασμός αυτός έχει πολλά πλεονεκτήματα. Τα κάτοπτρα είναι εγγενώς απαλλαγμένα από χρωματικές εκτροπές (εξάρτηση της εστιακής απόστασης από το μήκος κύματος), ενώ οι σφαιρικές εκτροπές (οι οποίες συσχετίζονται με την παραξονική προσέγγιση) είναι ευκολότερο να διορθωθούν απ' ό,τι στους φακούς.

