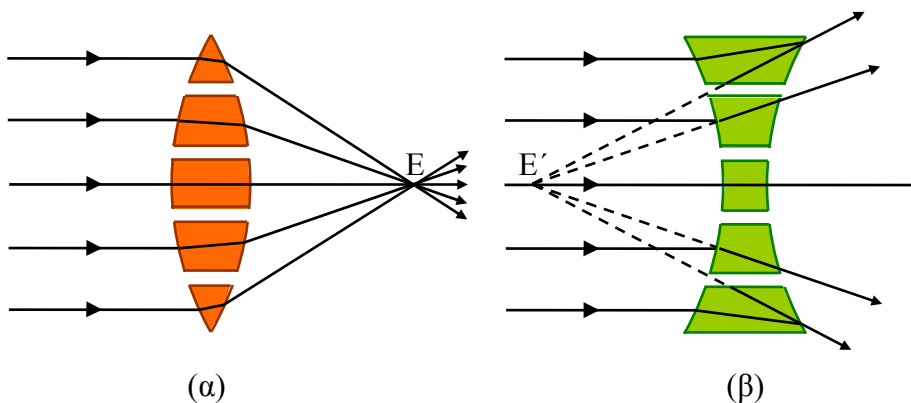


## 1. Γενικά

Φακός ονομάζεται κάθε ομογενές, ισότροπο και διαφανές οπτικό μέσο που διαμορφώνεται από δυο σφαιρικές επιφάνειες (ή από μια σφαιρική και μια επίπεδη). Βασική



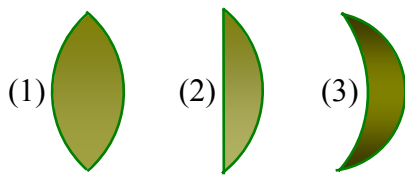
Σχήμα 1. Διατάξεις πρισμάτων που προσομοιώνουν τη λειτουργία των φακών.  
(α) Συγκλίνων. (β) Αποκλίνων

του λειτουργία είναι ο σχηματισμός του ειδώλου ενός πραγματικού αντικειμένου. Τέτοιας μορφής είδωλα είναι συνήθως μεγαλύτερα από τα αντικείμενα. Αν και οι πλειοψηφία των φακών είναι κατασκευασμένη από απλό γυαλί, ειδικές κατηγορίες φακών κατασκευάζονται από άλλα διαφανή υλικά, όπως για παράδειγμα πλαστικό ή quartz.

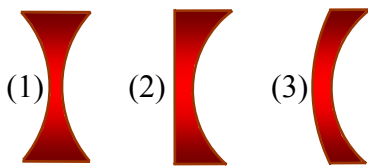
Για να γίνει κατανοητή η αρχή βάσει της οποίας λειτουργεί ένας φακός, φανταστείτε μια σειρά από πρίσματα τοποθετημένα όπως στο Σχήμα 1. Στην πρώτη περίπτωση τα πρίσματα διαθλούν τις προσπίπτουσες παράλληλες ακτίνες και τις συγκλίνουν έτσι που να εστιάζουν στο σημείο E. Στη δεύτερη περίπτωση οι ακτίνες αποκλίνουν και εμφανίζονται ως να προέρχονται από ένα κοινό σημείο (E'). Και στις δυο περιπτώσεις η μέγιστη εκτροπή των ακτίνων εμφανίζεται στα πρίσματα που βρίσκονται στα άκρα των διατάξεων, ενώ δεν παρατηρείται εκτροπή των κεντρικών ακτίνων λόγω του ότι το κεντρικό πρίσμα έχει τις έδρες του παράλληλες.

Στην πραγματικότητα ο φακός δεν αποτελείται από ομάδα πρισμάτων, αλλά από συμπαγές κομμάτι γυαλιού του οποίου οι επιφάνειες έχουν σχήμα σφαιρικό. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται σε τομή οι δυο βασικοί τύποι φακών. Οι τρεις πρώτοι φακοί που είναι πιο παχείς στο κέντρο και λεπτότεροι στα άκρα καλούνται **συγκλίνοντες** ή **θετικοί φακοί**, ενώ οι υπόλοιποι τρεις που είναι πιο λεπτοί στο κέντρο και παχύτεροι στα άκρα καλούνται **αποκλίνοντες** ή **αρνητικοί φακοί**. Συνήθως οι χρησιμοποιούμενοι φακοί είναι **λεπτοί**, δηλ. το πάχος τους είναι μικρό σχετικά με το άνοιγμά τους, ή

ισοδύναμα, οι προσπίπτουσες στον φακό ακτίνες βρίσκονται κοντά στον κύριο άξονά του.

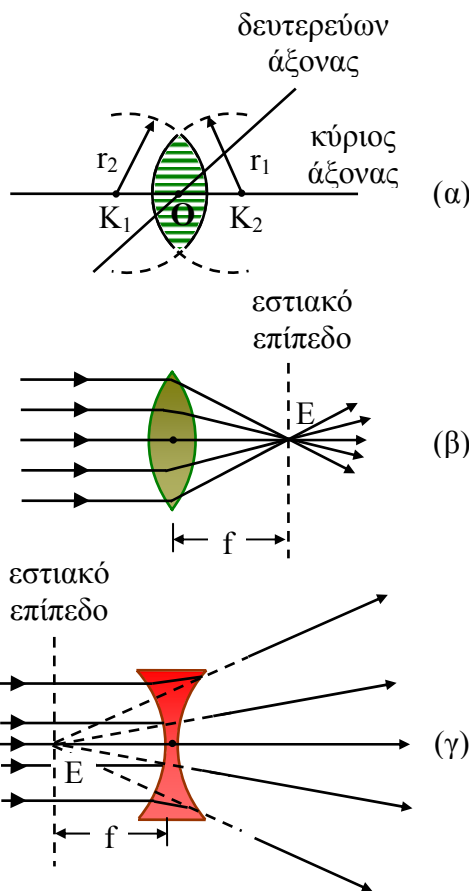


(α) συγκλίνοντες φακοί



(β) αποκλίνοντες φακοί

Σχήμα 2. Οι δυο βασικοί τύποι φακών



Σχήμα 3. Βασικά στοιχεία του φακού

Τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα απλό λεπτό φακό είναι τα παρακάτω (Σχήμα 3):

**Οι ακτίνες καμπυλότητάς του  $r_1$  και  $r_2$** , που είναι οι ακτίνες των σφαιρικών επιφανειών του φακού. Στην περίπτωση που η μια επιφάνεια είναι επίπεδη, η σχετική ακτίνα καμπυλότητας είναι  $\infty$ .

**Ο κύριος άξονας** που είναι η ευθεία που διέρχεται από το κέντρο του φακού και είναι κάθετη προς τις δυο πλευρές του στα σημεία που τις συναντά (ενώνει δηλαδή τα δυο κέντρα  $K_1, K_2$  καμπυλότητας του φακού).

**Το οπτικό κέντρο  $O$**  από το οποίο διέρχεται ο κύριος άξονας (κάθε άλλη ευθεία που διέρχεται από το οπτικό κέντρο χωρίς να είναι κάθετη προς τις πλευρές του φακού αποτελεί το δευτερεύοντα άξονα).

**Η κύρια εστία  $E$**  που βρίσκεται επάνω στον κύριο άξονα και ορίζεται, για μεν το συγκλίνοντα φακό, ως το σημείο εκείνο που θα συγκλίνει μια δέσμη παράλληλων προς τον κύριο άξονα ακτίνων, για δε τον αποκλίνοντα φακό ως το σημείο από το οποίο φαίνεται να ξεκινά μια δέσμη παράλληλων προς τον κύριο άξονα ακτίνων. Λόγω συμμετρίας, κάθε φακός παρουσιάζει δυο εστίες, μια σε κάθε πλευρά του και στην ίδια απόσταση από το οπτικό του κέντρο.

**Το εστιακό επίπεδο** που είναι κάθετο προς τον κύριο άξονα του φακού και διέρχεται από την κύρια εστία. Παράλληλες ακτίνες φωτός που προσπίπτουν στο φακό και δεν είναι παράλληλες προς τον κύριο άξονα, θα εστιασούν σε κάποιο σημείο (δευτερεύουσα εστία) που βρίσκεται επάνω στο εστιακό επίπεδο. Επίσης, λόγω συμμετρίας, υπάρχουν δυο εστιακά επίπεδα: ένα εμπρός και ένα πίσω από το φακό.

**Η εστιακή απόσταση  $f$**  που είναι η από-

σταση μεταξύ της κύριας εστίας και του οπτικού κέντρου και εξαρτάται από την καμυλότητα των επιφανειών του φακού και από το δείκτη διάθλασης του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η καμυλότητα των σφαιρικών επιφανειών του φακού, τόσο μικρότερη θα είναι η εστιακή του απόσταση. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι μεγαλύτερη καμυλότητα των επιφανειών προκαλεί μεγαλύτερη εκτροπή των ακτίνων που διέρχονται από το φακό κοντά στα άκρα του.

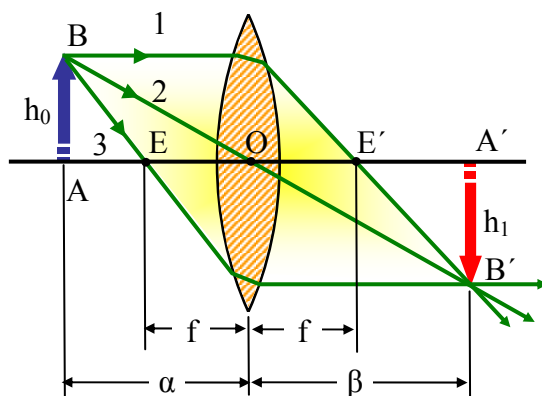
**Η οπτική ισχύς  $D$**  που είναι το αντίστροφο της εστιακής απόστασης  $f$ . Στην τεχνολογία της φωτογραφίας καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ένας φακός χαρακτηρίζεται από την οπτική του ισχύ παρά από την εστιακή του απόσταση. Είναι κατανοητό ότι όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση, τόσο ισχυρότερος είναι ο φακός ως προς την ικανότητα σύγκλισης των ακτίνων. **Όταν η  $f$  εκφράζεται σε  $m$  η ισχύς δίνεται σε διοπτρίες, δηλ.  $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$**

Μια πολύ βασική αρχή αναφορικά με τους φακούς είναι η αντιστροφή των ακτίνων. Αν μια σημειακή πηγή φωτός τοποθετηθεί στο σημείο  $E$  (Σχήμα 3β), οι φωτεινές ακτίνες που προσπίπτουν στο φακό θα διαθλαστούν σε μια δέσμη παράλληλων ακτίνων που διαδίδεται προς τ' αριστερά. Κατά παρόμοιο τρόπο, στο Σχήμα 3γ, αν οι ακτίνες συγκλίνουν προς την εστία  $E$  θα διαθλαστούν από το φακό σε μια δέσμη παράλληλων ακτίνων.

Στα παρακάτω θ' αναφερθούμε στους λεπτούς φακούς, θεωρώντας τις προσπίπτουσες ακτίνες αξονικές (δηλαδή ότι σχηματίζουν μικρή γωνία σε σχέση με τον κύριο άξονα).

## 2. Σχηματισμός πραγματικού ειδώλου

Όταν ένα αντικείμενο τοποθετηθεί από τη μια πλευρά ενός συγκλίνοντα φακού και πίσω από την κύρια εστία του  $E$  τότε από την άλλη πλευρά του φακού θα σχηματιστεί



Σχήμα 4. Γραφικός προσδιορισμός της θέσης και του μεγέθους ειδώλου

ένα πραγματικό είδωλο (Σχήμα 4). Να σημειώσουμε εδώ ότι όσο το αντικείμενο πλησιάζει προς την εστία τόσο το είδωλό του θα μεγαλώνει (μεγέθυνση) και τόσο πιο μακριά θα σχηματίζεται από το φακό. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το αντικείμενο απομακρύνεται από την εστία, δηλαδή το είδωλο μικραίνει και σχηματίζεται πιο κοντά στο φακό.

Γενικά, ο προσδιορισμός της θέσης του ειδώλου γίνεται με δυο τρόπους: από τη **γραφική σύνθεση των ακτίνων** και αριθμητικά από τον **τύπο των λεπτών φακών**

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  οι αποστάσεις του αντικειμένου και ειδώλου αντίστοιχα από το φακό

**Η γραφική μέθοδος** παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Θεωρούμε το φωτεινό αντικείμενο AB τοποθετημένο επάνω στον κύριο άξονα ενός συγκλίνοντα φακού και πίσω από την εστία του E. Από το σημείο B του αντικειμένου ξεκινά άπειρο πλήθος ακτίνων, όμως εδώ θα ασχοληθούμε με τις τρεις κύριες ακτίνες, όπως αποκαλούνται, των οποίων οι διαδρομή είναι γνωστή. Πιο συγκεκριμένα:

1. Η ακτίνα (1) που οδηγείται παράλληλα προς τον κύριο άξονα θα διαθλαστεί από το φακό και θα περάσει από την κύρια εστία E' του φακού.
2. Η ακτίνα (2) που περνάει από το κέντρο του φακού δεν θα διαθλαστεί, λόγω του ότι οι πλευρές του φακού στην περιοχή αυτή είναι παράλληλες και θα συνεχίσει χωρίς να μεταβάλλει την πορεία της.
3. Η ακτίνα (3) που διέρχεται από την εστία E, λόγω της αρχής της αντιστροφής των ακτίνων θα διαθλαστεί παράλληλα προς τον κύριο άξονα του φακού.

Οι παραπάνω ακτίνες συναντώνται στο σημείο B' που αποτελεί την κορυφή του ειδώλου A'B'. Όλες οι υπόλοιπες ακτίνες που ξεκινούν από το B θα εστιάσουν στο ίδιο σημείο B'. Το A'B' αποτελεί το πραγματικό είδωλο του αντικειμένου AB. Σε αντίθεση με το φανταστικό είδωλο, το πραγματικό προκύπτει από την τομή των φωτεινών ακτίνων (και όχι των προεκτάσεών τους) και μπορεί να απεικονιστεί σε πέτασμα.

**Η χρήση του τύπου των λεπτών φακών** για τον προσδιορισμό της θέσης του ειδώλου περιγράφεται με το παρακάτω παράδειγμα:

Τοποθετούμε αντικείμενο 60 cm εμπρός από συγκλίνοντα φακό εστιακής απόστασης  $f = 20$  cm. Αν επιλύσουμε τη Σχέση (1) ως προς  $\beta$  θα έχουμε

$$\beta = \frac{\alpha \times f}{\alpha - f} \text{ και αντικαθιστώντας τις γνωστές ποσότητες: } \beta = \frac{60 \times 20}{60 - 20} = 30 \text{ cm}$$

Το είδωλο επομένως θα σχηματιστεί σε απόσταση 30 cm από το φακό, ενώ το μέγεθός του μπορεί να υπολογιστεί από την απλή σχέση:

$$\frac{\text{μέγεθος ειδώλου}}{\text{μέγεθος αντικειμένου}} = \frac{\text{απόσταση ειδώλου}}{\text{απόσταση αντικειμένου}} \quad \text{ή}$$

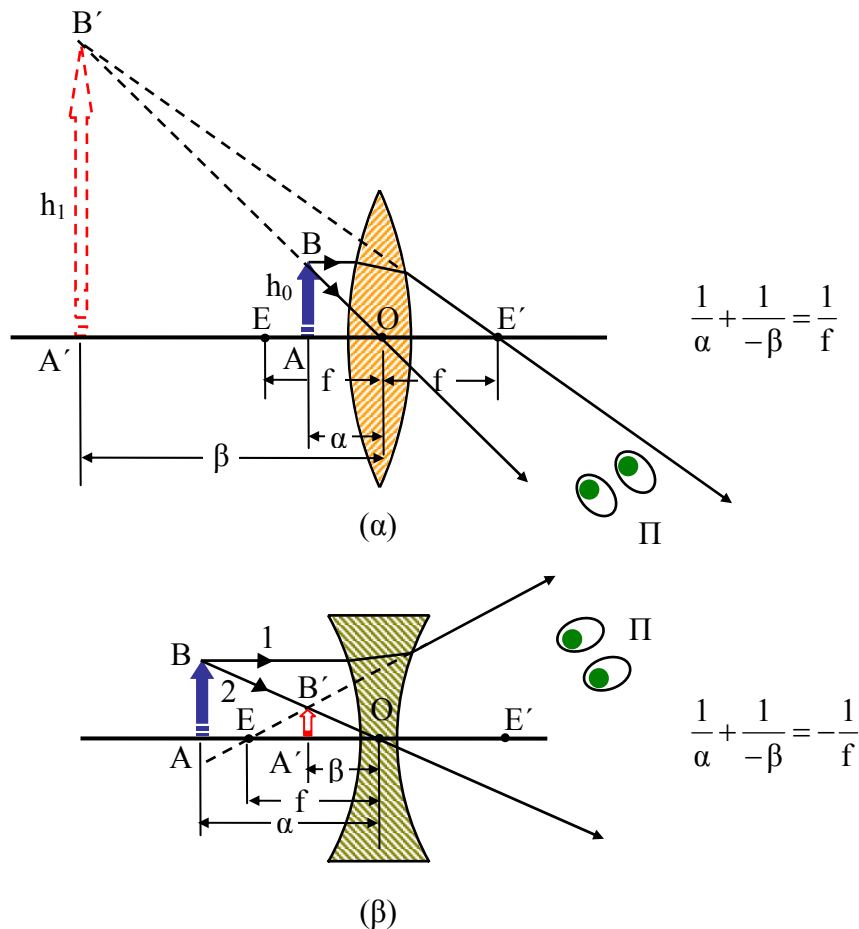
$$M = \frac{h_1}{h_0} = -\frac{\beta}{\alpha} \tag{2}$$

Ο λόγος  $\frac{h_1}{h_0}$  καλείται **εγκάρσια γραμμική μεγέθυνση**. Το αρνητικό πρόσημο στην τελευταία σχέση σημαίνει ότι το είδωλο είναι ανεστραμμένο.

### 3. Σχηματισμός φανταστικού ειδώλου

Όπως προαναφέραμε, το είδωλο που σχηματίστηκε από το φακό στο Σχήμα 4 είναι πραγματικό. Ως πραγματικά ορίζονται τα είδωλα που μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται από την τομή των ακτίνων. Τα φανταστικά είδωλα δεν είναι πραγματικά, δεν μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται

από τις προεκτάσεις των ακτίνων. **Φανταστικά είδωλα μπορούν να σχηματιστούν: (α) από συγκλίνοντα φακό αν το αντικείμενο τοποθετηθεί κοντά στο φακό και μέσα στην εστία και (β) από αποκλίνοντα φακό με το αντικείμενο τοποθετημένο σε οποιοδήποτε σημείο.** Το γεγονός ότι ένα φανταστικό είδωλο δεν μπορεί να αιπει-



Σχήμα 5. (α) Το αντικείμενο είναι τοποθετημένο μέσα στην εστία ενός συγκλίνοντα φακού. Το είδωλο που σχηματίζεται είναι φανταστικό, ορθό και μεγαλύτερο του αντικειμένου. (β) Το είδωλο που σχηματίζεται από αποκλίνοντα φακό είναι φανταστικό, ορθό και μικρότερο του αντικειμένου

κονιστεί σε πέτασμα δεν σημαίνει ότι είναι και ανύπαρκτο, έχει δηλαδή συγκεκριμένη θέση στην οποία σχηματίζεται καθώς και συγκεκριμένο μέγεθος και μπορεί να παρατηρηθεί με το μάτι, αν κοιτάξουμε μέσα από το φακό.

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ακτίνων των δυο περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 5α) ο φακός χρησιμοποιείται ως μεγεθυντικός φακός. Οι φωτεινές ακτίνες που ξεκινούν από το σημείο B θα διαθλαστούν από το συγκλίνοντα φακό, αλλά όχι αρκετά για να εστιάσουν στο ίδιο σημείο. Στο μάτι του παρατηρητή στο σημείο Π φαίνονται ως να προέρχονται από το σημείο B' πίσω από το φακό. Το σημείο B' αποτελεί την κορυφή ενός φανταστικού ειδώλου, ορθού και μεγαλύτερου του αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή το είδωλο έχει σχηματιστεί στην ίδια πλευρά του φακού που βρίσκεται και το αντικείμενο σε απόσταση β η οποία φέρει αρνητικό πρόσημο (-β). Η Σχέση 1 εξακολουθεί να ισχύει, λαμβάνοντας όμως υπόψη τη μεταβολή του πρόσημου του β, δηλαδή

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{-\beta} = \frac{1}{f} \quad (3)$$

Κατά τα άλλα, η γραμμική μεγέθυνση εκφράζεται από τη Σχέση 2, η οποία όμως φέρει θετικό πρόσημο λόγω του ότι το είδωλο είναι ορθό, δηλαδή

$$M = \frac{h_1}{h_0} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (4)$$

Στην περίπτωση του αποκλίνοντα φακού (Σχήμα 5β) το είδωλο θα είναι πάντα φανταστικό, πιο κοντά στο φακό και μικρότερο σε μέγεθος από το αντικείμενο. Στο μάτι του παρατηρητή στο σημείο Π οι ακτίνες φαίνονται ως να προέρχονται από το σημείο Β' πίσω από το φακό, αλλά πολύ κοντά του. Για τον προσδιορισμό της θέσης του ειδώλου παρατηρούμε ότι η ακτίνα 1 που είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα του φακού θα πρέπει να διαθλαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εμφανίζεται ως να προέρχεται από το σημείο Ε ενώ η ακτίνα 2 που διέρχεται από το οπτικό κέντρο Ο δεν εκτρέπεται. Επειδή οι δυο αυτές ακτίνες συναντώνται στο Β', το είδωλο θα σχηματιστεί εκεί. Στην περίπτωση του αποκλίνοντα φακού η Σχέση 1 διαμορφώνεται ως

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{-\beta} = -\frac{1}{f} \quad (5)$$

ενώ η γραμμική μεγέθυνση δίνεται από τη Σχέση 4.

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζουμε όλες τις δυνατές περιπτώσεις δημιουργίας ειδώλων

Πίνακας 1

Φακός	f	Θέση αντικειμένου	Είδωλο	Τύπος φακών	Μεγέθυνση
Συγκλίνων	+	$\alpha > f$	πραγματικό ανεστραμμένο	$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$	$M = \frac{h_1}{h_0} = -\frac{\beta}{\alpha}$
Συγκλίνων	+	$\alpha = f$	πραγματικό ανεστραμμένο	$\frac{1}{\beta} = 0$	
Συγκλίνων	+	$\alpha < f$	Φανταστικό ορθό	$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{-\beta} = \frac{1}{f}$	$M = \frac{h_1}{h_0} = \frac{\beta}{\alpha}$
Αποκλίνων	-		Φανταστικό ορθό	$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{-\beta} = -\frac{1}{f}$	$M = \frac{h_1}{h_0} = \frac{\beta}{\alpha}$

#### 4. Τύπος των κατασκευαστών των φακών

Οι παράγοντες που διαμορφώνουν την τιμή της εστιακής απόστασης f, κατά το στάδιο της κατασκευής ενός φακού, είναι οι ακτίνες καμπυλότητας των επιφανειών του καθώς και ο δείκτης διάθλασης του υλικού από το οποίο θα κατασκευαστεί. Όλα αυτά τα μεγέθη συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (6)$$

όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του υλικού και  $r_1, r_2$  (Σχήμα 3α) οι ακτίνες καμπυλότητας της πρώτης επιφάνειας (όπως προσπίπτει το φως) και της πίσω επιφάνειας αντίστοιχα.

Η Σχέση 6 είναι γνωστή ως **τύπος των κατασκευαστών των φακών**.

Τα πρόσημα των  $r_1, r_2$  διαμορφώνονται σύμφωνα με τα παρακάτω:

- Οι φωτεινές ακτίνες προσπίπτουν στο φακό από αριστερά
- Όταν οι ακτίνες προσπίπτουν σε κυρτή επιφάνεια, η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας έχει (+) πρόσημο
- Όταν οι ακτίνες προσπίπτουν σε κοίλη επιφάνεια, η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας έχει (-) πρόσημο

Για παράδειγμα, στην περίπτωση αμφίκυρτου φακού (Σχήμα 2α.1) η  $r_1$  έχει (+) πρόσημο και η  $r_2$  (-) πρόσημο και επομένως η Σχέση 6 γίνεται

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

Επίσης:

Αν η μια επιφάνεια του φακού είναι επίπεδη (περίπτωση επιπεδόκυρτου ή επιπεδόκοιλου φακού – Σχήμα 2α.2 και 2β.2 αντίστοιχα), τότε η ακτίνα καμπυλότητας είναι άπειρη (εν προκειμένω  $r_1 = \infty$ ) και επομένως η Σχέση 6 γίνεται

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{-r_2} \right) \quad (\text{περίπτωση επιπεδόκυρτου φακού})$$

ή

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{+r_2} \right) \quad (\text{περίπτωση επιπεδόκοιλου φακού})$$

Αν και οι δυο επιφάνειες του φακού είναι επίπεδες, ο φακός παρουσιάζει άπειρη εστιακή απόσταση ( $f = \infty$ ).