

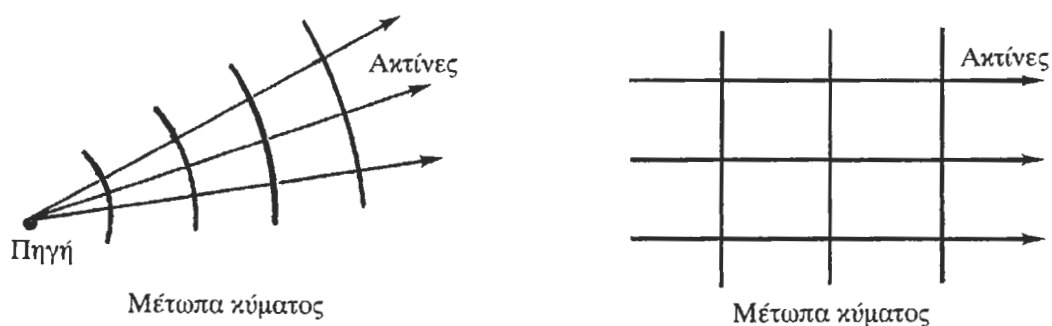
Ε. Οπτική

1 Η φύση του φωτός

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στο χώρο. Δηλαδή, μεταβολές ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που διαδίδονται στο χώρο ως κύμα. Οι συχνότητες αυτών των μεταβολών για το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συνιστούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, μέρος του οποίου αντιστοιχεί στο φως. Πρωτογενείς πηγές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κάθε είδους είναι ηλεκτρικά φορτία σε επιταχυνόμενη κίνηση.

Υπάρχει μια φαινομενικά «διπλή όψη» του φωτός, η σωματιδιακή και η κυματική. Η διάδοση του φωτός περιγράφεται πολύ καλά από το κυματικό μοντέλο, αλλά η κατανόηση της εκπομπής και της απορρόφησης του φωτός επιβάλλει τη σωματιδιακή προσέγγιση για το φως. Η σύγχρονη φυσική (κβαντική ηλεκτροδυναμική) έχει εξαλείψει τη φαινομενική αντίφαση μεταξύ των δύο περιγραφών για το φως.

Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό είναι μια παγκόσμια σταθερά, $c = 2,9979 \times 10^8$ m/s. Κατά τη διάδοση ενός κύματος φωτός (ή γενικότερα ενός κύματος), τα σημεία στα οποία η φάση της ταλάντωσης είναι η ίδια ορίζουν μια επιφάνεια που ονομάζεται **μέτωπο κύματος**. Στην περίπτωση σημειακής πηγής που εκπέμπει προς όλες τις διευθύνσεις στο χώρο (τριδιάστατο κύμα), το μέτωπο κύματος είναι σφαιρική επιφάνεια που διαστέλλεται με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος (Σχ. 1α). Οι **ακτίνες φωτός** (ή **φωτεινές ακτίνες**) είναι γραμμές κατά την κατεύθυνση όδευσης του κύματος, κάθετες στο μέτωπο κύματος. Αν το φωτεινό κύμα είναι μονοδιάστατο, το μέτωπο κύματος είναι **επίπεδο** κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης και οι ακτίνες αποτελούν δέσμη παραλλήλων ευθειών, τότε έχουμε **επίπεδο κύμα** (Σχ. 1β).



Σχήμα 1

(α)

(β)

Αρκετά μακριά από μια σημειακή πηγή και σε περιορισμένη έκταση γύρω από ένα σημείο μπορούμε να προσεγγίσουμε το σφαιρικό μέτωπο με το εφαπτόμενο επίπεδο, δηλαδή το σφαιρικό με ένα επίπεδο κύμα.

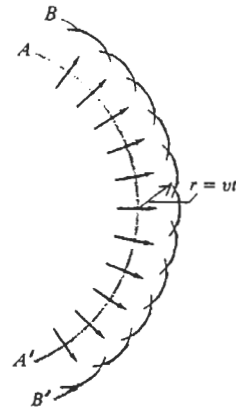
Για την περιγραφή αρκετών οπτικών φαινομένων είναι επαρκής η παράσταση ενός φωτεινού κύματος με τη βοήθεια των φωτεινών ακτίνων. Ο κλάδος αυτός της οπτικής ονομάζεται **γεωμετρική οπτική**. Ο κλάδος που πραγματεύεται τα οπτικά φαινόμενα με βάση την κυματική συμπεριφορά του φωτός ονομάζεται **φυσική οπτική**.

2 Η αρχή του Huygens και η αρχή του Fermat για τη διάδοση του φωτός

Η **αρχή του Huygens** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιγραφή της διάδοσης του φωτός στο χώρο. Σύμφωνα με την αρχή αυτή, ένα κύμα φωτός θεωρείται ως ένα μέτωπο κύματος, κάθε σημείο του οποίου λειτουργεί ως πηγή δευτερευόντων κυμάτων, η περιβάλλουσα των οποίων δίνει τη νέα θέση του κύματος (Σχ. 2).

Η αρχή του Huygens αγνοεί τη διάδοση των δευτερευόντων κυμάτων προς τα πίσω ή πλαγίως. Επίσης, με την αρχή δεν περιγράφεται η μεταβολή της έντασης του κύματος συναρτήσει της θέσης. Με την αρχή αυτή μπορούν να εξαχθούν οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης του φωτός.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ένα μέτωπο φωτός, ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος γενικότερα, είναι μια ισοφασική επιφάνεια. Μια φυσική απόσταση δx μέσα σε ένα μέσον με δείκτη διάθλασης n ισοδυναμεί με οπτική απόσταση που ορίζεται ως $n\delta x$. Ο χρόνος που απαιτείται για να τη διανύσει το φως είναι $\delta t = \delta x/v = n\delta x/c$, όπου v η ταχύτητα του φωτός στο μέσον και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Κάθε σημείο της ισοφασικής επιφάνειας απέχει την ίδια οπτική απόσταση από την πηγή. Το φως χρειάστηκε τον ίδιο χρόνο για να φθάσει σε κάθε σημείο του μετώπου κύματος.



Σχήμα 2

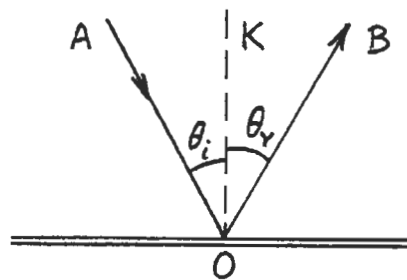
Σύμφωνα με την **αρχή του Fermat**, η διαδρομή που ακολουθεί το φως ανάμεσα σε δύο σημεία είναι εκείνη για την οποία το μήκος του οπτικού δρόμου έχει ακρότατη τιμή (συνήθως ελάχιστη). Έτσι, ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να διαδοθεί από ένα σημείο σε ένα άλλο είναι ο ελάχιστος δυνατός. Κατά συνέπεια, αν το μέσον έχει σταθερό δείκτη διάθλασης, τότε η διαδρομή που ακολουθεί το φως είναι ευθεία. Για μέσον με δείκτη διάθλασης που εξαρτάται από τη θέση, η διαδρομή είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος που χρειάζεται το φως για να τη διανύσει. Με την αρχή του Fermat είναι δυνατή η ερμηνεία των νόμων της ανάκλασης και της διάθλασης.

3 Ανάκλαση του φωτός

Όταν ένα φωτεινό κύμα προσπέσει στη λεία επιφάνεια ενός κατόπτρου, **ανακλάται**. Το **ανακλώμενο κύμα** είναι ένα νέο κύμα που επιστρέφει πίσω στο ίδιο μέσον στο οποίο διαδίδεται το αρχικό κύμα (Σχ.3). Το φαινόμενο της ανάκλασης του φωτός διέπεται από τον ακόλουθο πειραματικό νόμο της ανάκλασης:

- Οι διευθύνσεις πρόσπτωσης και ανάκλασης βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, το οποίο είναι κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια και άρα περιέχει την κάθετο στην επιφάνεια.
- Η γωνία πρόσπτωσης, θ_i , είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, θ_r :

$$\theta_i = \theta_r \quad (1)$$



Σχήμα 3

4 Διάθλαση του φωτός

Όταν ένα φωτεινό κύμα συναντά μια ομαλή επιφάνεια που διαχωρίζει δύο διαφανή υλικά, π.χ. αέρα και γυαλί ή νερό και γυαλί, τότε το κύμα εν μέρει **ανακλάται** και εν μέρει **διαθλάται**.

- Το **διαθλώμενο κύμα** είναι το κύμα που μεταδίδεται μέσα στο δεύτερο μέσον.
- Ο **δείκτης διάθλασης** ενός (οπτικού) υλικού, n , είναι ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό, c , προς την ταχύτητά του στο υλικό, v , και αποτελεί σημαντικό μέγεθος για τη γεωμετρική οπτική.

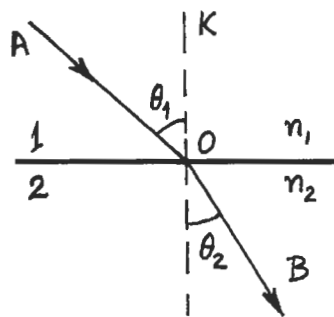
$$n = \frac{c}{v} \quad (2)$$

Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός σε ένα μέσον εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου. Είναι δε $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ και $v = 1/\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}$, όπου ϵ_0 και ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά του κενού και η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μέσου αντίστοιχα και μ_0 , μ_r η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μέσου αντίστοιχα. Επειδή για πολλά υλικά ισχύει κατά προσέγγιση $\mu_r \cong 1$, από την Εξ.(2) προκύπτει ότι: $n \cong \sqrt{\epsilon_r}$.

Για το κενό ισχύει $n=1$. Επειδή η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό, είναι $n > 1$ για οποιοδήποτε υλικό.

Το φαινόμενο της διάθλασης του φωτός διέπεται από τον ακόλουθο πειραματικό **νόμο της διάθλασης** ή **νόμο του Snell**:

- Οι διευθύνσεις πρόσπτωσης και διάθλασης βρίσκονται σε επίπεδο κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια το οποίο περιέχει επομένως και την κάθετο στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης.
- Ο λόγος του ημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης είναι σταθερός και ίσος με το αντίστροφο του λόγου των δεικτών διάθλασης των δύο μέσων n_1 και n_2 :



Σχήμα 4

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{ή} \quad n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

Σύμφωνα με την Εξ.(3) όταν μια ακτίνα διέρχεται από ένα υλικό (1) μέσα σε ένα άλλο υλικό (2) μεγαλύτερου δείκτη διάθλασης ($n_1 < n_2$), η ακτίνα κάμπτεται και προσεγγίζει την κάθετο. Όταν η προσπίπτουσα ακτίνα είναι κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια ($\theta_1=0$, $\sin \theta_1=0$), η διερχόμενη ακτίνα δεν κάμπτεται καθόλου ($\theta_2=0$).

Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης εκφράζουν πειραματικά αποτελέσματα, αλλά είναι δυνατόν να εξαχθούν και θεωρητικώς χρησιμοποιώντας το κυματικό μοντέλο για τη διάδοση του φωτός και τις εξισώσεις Maxwell του Ηλεκτρομαγνητισμού.

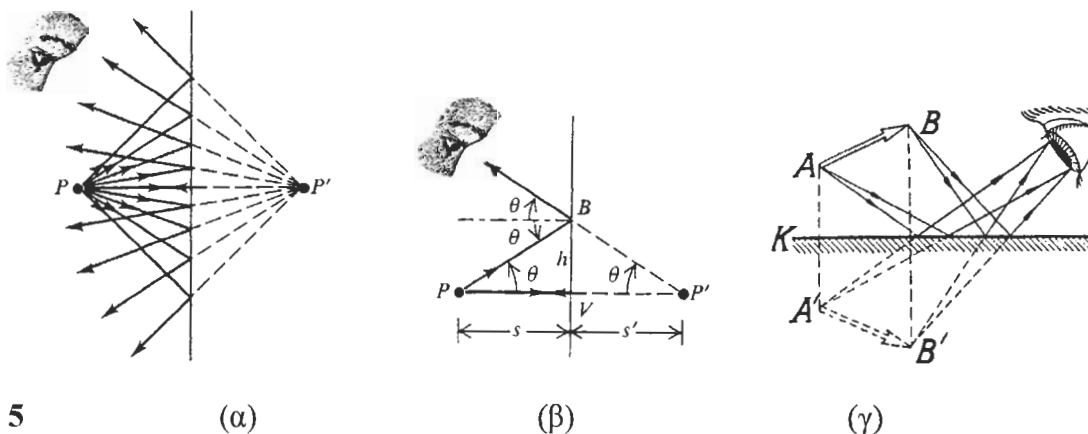
Τα περισσότερα είδη γυαλιού που χρησιμοποιούνται στα οπτικά όργανα έχουν δείκτη διάθλασης με τιμές περίπου από 1,5 ως 2,0. Ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από τη φύση του υλικού και από το μήκος κύματος του φωτός. Το νερό έχει δείκτη διάθλασης ίσο με 1,333. Ο δείκτης διάθλασης του αέρα υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι περίπου 1,0003, οπότε σε πολλές περιπτώσεις θεωρείται ίσος με τη μονάδα.

Όταν το φως διέρχεται από ένα υλικό σε κάποιο άλλο, η συχνότητα f του κύματος δεν μεταβάλλεται. Για κάθε υλικό ισχύει για την ταχύτητα διάδοσης του φωτός, v , μέσα σε αυτό $v = \lambda f$, όπου λ το μήκος κύματος του φωτός. Αφού η συχνότητα f του κύματος σε κάθε υλικό έχει την τιμή που έχει και στο κενό, ενώ η ταχύτητα v είναι πάντοτε μικρότερη από την ταχύτητα του κύματος στο κενό, c , το μήκος κύματος θα μειώνεται επίσης αντίστοιχα, οπότε: $f = c/\lambda_0 = v/\lambda$, όπου λ_0 το μήκος κύματος στο κενό, και σε συνδυασμό με την Εξ.(2): $\lambda = \lambda_0/n$.

Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης που διατυπώθηκαν ισχύουν τοπικά, ακόμη και όταν ούτε το μέτωπο κύματος ούτε η διαχωριστική επιφάνεια είναι επίπεδα, επειδή γύρω από κάθε σημείο είτε του μετώπου κύματος είτε της διαχωριστικής επιφάνειας υπάρχει μια μικρή περιοχή που μπορεί να θεωρηθεί ως επίπεδη προσεγγιστικά και όπου οι ακτίνες θα συμπεριφέρονται όπως αναφέρθηκε πιο πάνω.

5 Ανάκλαση σε επίπεδη επιφάνεια - Σχηματισμός ειδώλου

Όταν φως από κάποια πηγή προσπίπτει σε ένα επίπεδο κάτοπτρο (μια ανακλαστική επιφάνεια), η ανάκλαση του φωτός οδηγεί στο σχηματισμό ειδώλου της πηγής. Στο Σχ. 5^α, από το σημείο P πηγάζουν ακτίνες που ανακλώνται σε ένα επίπεδο κάτοπτρο, σύμφωνα με το νόμο της ανάκλασης. Αφού ανακλασθούν, οι τελικές κατευθύνσεις των ακτίνων είναι αυτές που θα είχαν αν είχαν προέλθει από το σημείο P' . Ονομάζουμε το σημείο P **σημειακό αντικείμενο**, το σημείο P' αντίστοιχο **σημειακό είδωλο**, και λέμε ότι το κάτοπτρο σχηματίζει ένα είδωλο του σημείου P . Οι εξερχόμενες ακτίνες (εκείνες που απομακρύνονται από το κάτοπτρο) δεν προέρχονται πραγματικά από το σημείο P' , αλλά οι κατευθύνσεις τους συμπίπτουν με τις κατευθύνσεις που θα είχαν αν προέρχονταν από αυτό το σημείο. Ένας παρατηρητής που βλέπει μόνο τις απομακρυνόμενες από την επιφάνεια ακτίνες, αφού ανακλασθούν σε αυτή, έχει την εντύπωση ότι προέρχονται από το σημειακό είδωλο P' . Δηλαδή το σημειακό είδωλο παρέχει ένα πρόσφορο τρόπο περιγραφής των κατευθύνσεων ανακλώμενων ακτίνων, όπως ακριβώς το σημειακό αντικείμενο P περιγράφει τις κατευθύνσεις των ακτίνων που φθάνουν στην επι-



Σχήμα 5

(α)

(β)

(γ)

φάνεια πριν την ανάκλασή τους.

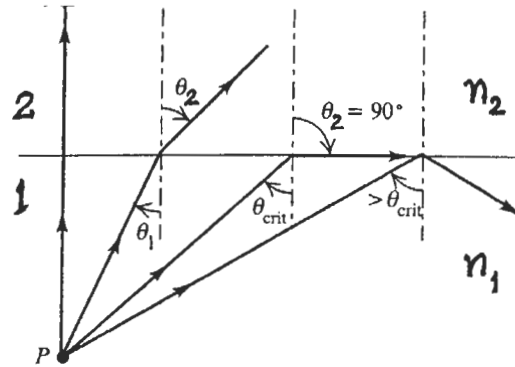
Στο Σχ. 5β φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζεται η θέση του ειδώλου P' . Ονομάζουμε την απόσταση s απόσταση αντικειμένου και την απόσταση s' απόσταση ειδώλου. Στις περιπτώσεις όπως αυτή του σχήματος, όπου οι εξερχόμενες ακτίνες δεν προέρχονται πραγματικά από το σημείο P' , το είδωλο P' ονομάζεται **φανταστικό είδωλο**. Σε επόμενη ενότητα θα αναφερθούμε σε περιπτώσεις όπου οι εξερχόμενες ακτίνες διέρχονται πραγματικά από σημειακό είδωλο και τότε θα ονομάσουμε το σχηματιζόμενο είδωλο **πραγματικό είδωλο**. Στο Σχ. 5γ φαίνεται ο τρόπος δημιουργίας του ειδώλου ενός εκτεταμένου αντικειμένου.

από σημειακό είδωλο και τότε θα ονομάσουμε το σχηματιζόμενο είδωλο **πραγματικό είδωλο**. Στο Σχ. 5γ φαίνεται ο τρόπος δημιουργίας του ειδώλου ενός εκτεταμένου αντικειμένου.

6 Ολική εσωτερική ανάκλαση

Όπως προκύπτει από το νόμο της διάθλασης, $\sin\theta_2 = (n_1/n_2) \sin\theta_1$. Αν θεωρήσουμε μια φωτεινή ακτίνα που διέρχεται από ένα μέσον με δείκτη διάθλασης n_1 σε μέσον με δείκτη διάθλασης $n_2 < n_1$, θα υπάρχει κάποια τιμή της γωνίας πρόσπτωσης $\theta_1 < 90^\circ$, για την οποία προκύπτει $\sin\theta_2 = 1$ και $\theta_2 = 90^\circ$.

Η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η διαθλώμενη ακτίνα αναδύεται εφαπτομενικά προς τη διαχωριστική επιφάνεια ονομάζεται **κρίσιμη γωνία** (ή **ορική γωνία**), θ_{crit} . Αν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία η ακτίνα δεν μπορεί να εισχωρήσει στο δεύτερο υλικό ($\sin\theta_2 > 1$) και



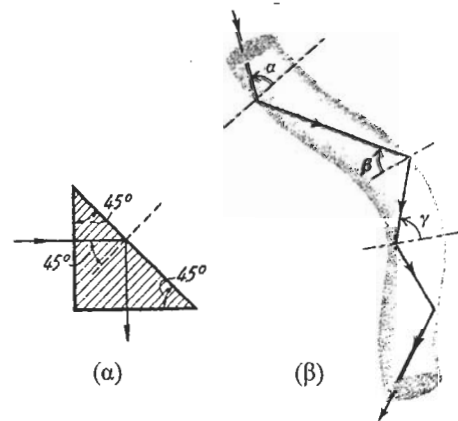
Σχήμα 6

ανακλάται εξ ολοκλήρου εσωτερικά στη διαχωριστική επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ολική εσωτερική ανάκλαση**. Για την κρίσιμη γωνία ισχύει:

$$\theta_{crit} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Για επιφάνεια γυαλιού - αέρα, με $n_1 = 1,52$ για το γυαλί και $n_2 = 1$ για τον αέρα, $\theta_{crit} = 41,1^\circ$. Το γεγονός ότι η θ_{crit} προκύπτει λίγο μικρότερη των 45° κάνει δυνατή τη χρησιμοποίηση ενός τριγωνικού **πρίσματος** με γωνίες 45° , 45° και 90° ως **ολικώς ανακλώσας επιφάνειας** (Σχ 7α).

Η ολική εσωτερική ανάκλαση έχει πολλές εφαρμογές στην οπτική. Στο περισκόπιο και στα κιάλια, το φως ανακλάται μέσα στο σωλήνα υφιστάμενο ολική εσωτερική ανάκλαση σε πρίσματα. Σε μια οπτική ίνα, το φως διαδίδεται κατά μήκος μιας λεπτής ράβδου (ίνας) από διαφανές υλικό, υφιστάμενο πολλές διαδοχικές εσωτερικές ανακλάσεις. Η ίνα δρα ως σωλήνας φωτός (Σχ 7β).

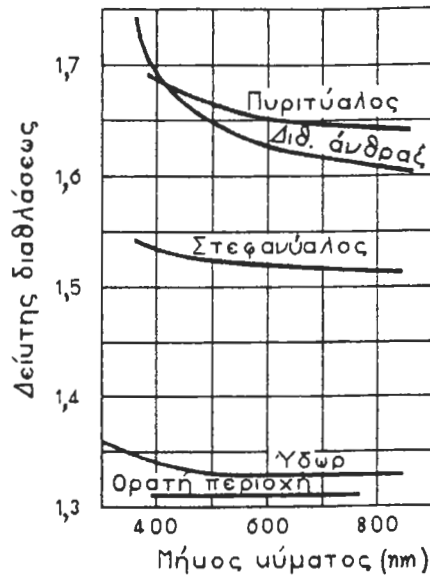


Σχήμα 7

7 Διασπορά ή διασκεδασμός του φωτός

8 Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού εξαρτάται από το μήκος κύματος. Η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης ενός υλικού, και συνεπώς και της ταχύτητας διάδοσης του φωτός σ' αυτό το υλικό, από το μήκος κύματος του φωτός, ονομάζεται **διασπορά** ή **διασκεδασμός του φωτός**.

Το Σχ. 8 δείχνει τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης συναρτήσει του μήκους κύματος σε μερικά ευρέως χρησιμοποιούμενα οπτικά υλικά. Η τιμή του δείκτη διάθλασης n συνήθως

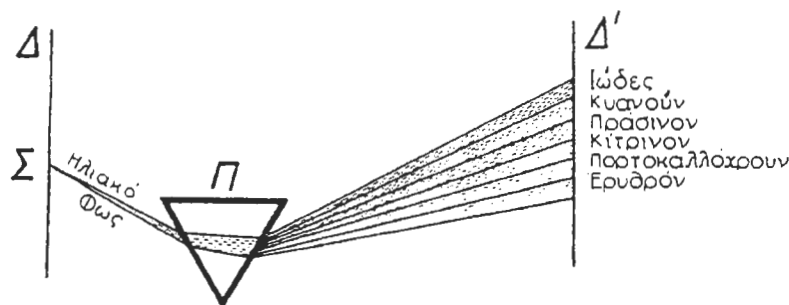


Σχήμα 8

μειώνεται όταν αυξάνεται το μήκος κύματος και επομένως αυξάνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα του φωτεινού κύματος. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος έχει συνήθως μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα υλικό από φως μικρότερου μήκους κύματος.

8 Πρίσμα

Στα εργαστήρια οπτικής, τα πρίσματα χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των φωτεινών ακτίνων στα συστατικά τους χρώματα. Το γυαλί του πρίσματος έχει ελαφρώς διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για φως διαφόρων μηκών κύματος και κατά συνέπεια κάμπτε τις ακτίνες διαφορετικών χρωμάτων κατά διαφορετικές γωνίες. Όπως φαίνεται στο Σχ. 9, το φως, καθώς διέρχεται από το πρίσμα, υφίσταται δύο διαδοχικές διαθλάσεις: μια στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα-γυαλιού και άλλη μια στη διαχωριστική επιφάνεια γυαλιού-αέρα.



Σχήμα 9

Όταν μια ακτίνα λευκού φωτός προσπίπτει σε ένα πρίσμα, η αλλαγή κατεύθυνσης (εκτροπή) που προκαλείται από το πρίσμα αυξάνεται, μειούμενου του μήκους κύματος. Το ιώδες χρώμα ($\lambda = 400 \text{ nm}$) υφίσταται τη μέγιστη εκτροπή, το ερυθρό χρώμα ($\lambda = 700 \text{ nm}$) υφίσταται την ελάχιστη, ενώ τα άλλα χρώματα υφίστανται ενδιάμεσες εκτροπές, με αποτέλεσμα, όταν το φως εξέρχεται από το πρίσμα να διασκορπίζεται σε μια δέσμη σχήματος βεντάλιας. Τότε λέμε ότι το φως διασκορπίζεται ή διασκεδάζεται σε ένα φάσμα. Το μέγεθος του δια-

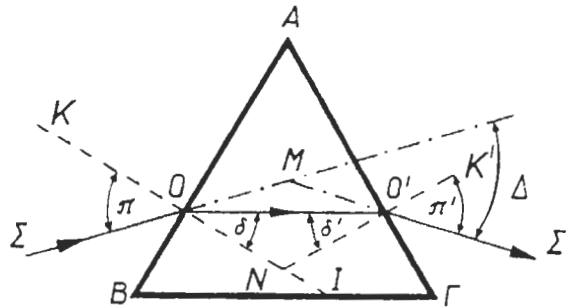
σκορπισμού εξαρτάται από τη διαφορά των δεικτών διάθλασης του υλικού για το ιώδες και για το ερυθρό φως. Το ουράνιο τόξο οφείλεται σε συνδυασμό των φαινομένων της διασποράς και της ολικής εσωτερικής ανάκλασης.

9 Εξισώσεις του πρίσματος

Η εκτροπή μιας ακτίνας φωτός από ένα πρίσμα μπορεί να μελετηθεί ποσοτικά με τη χρήση του νόμου του Snell. Αναφερόμενοι στο Σχ. 10, για την ακτίνα ΣΟΟ'Σ', οι γωνίες $\pi, \pi', \delta, \delta', \Delta$ και A , συνδέονται μεταξύ τους με τις σχέσεις

$$\frac{\sin \pi}{\sin \delta} = n \quad \frac{\sin \pi'}{\sin \delta'} = n \quad (5)$$

$$A = \delta + \delta' \quad \Delta = \pi + \pi' - A$$



Σχήμα 10

οι οποίες είναι γνωστές ως **εξισώσεις του πρίσματος**.

Για **οξύ πρίσμα**, για το οποίο η γωνία A είναι μικρή, και για μικρή γωνία πρόσπτωσης π , τα ημίτονα των γωνιών π, π', δ και δ' μπορούν να αντικατασταθούν με τις τιμές των γωνιών σε ακτίνια και έτσι, από τις Εξ.(5),

$$\pi \cong n\delta, \quad \pi' \cong n\delta' \quad \text{και} \quad \pi + \pi' \cong n(\delta + \delta') \cong nA. \quad (6)$$

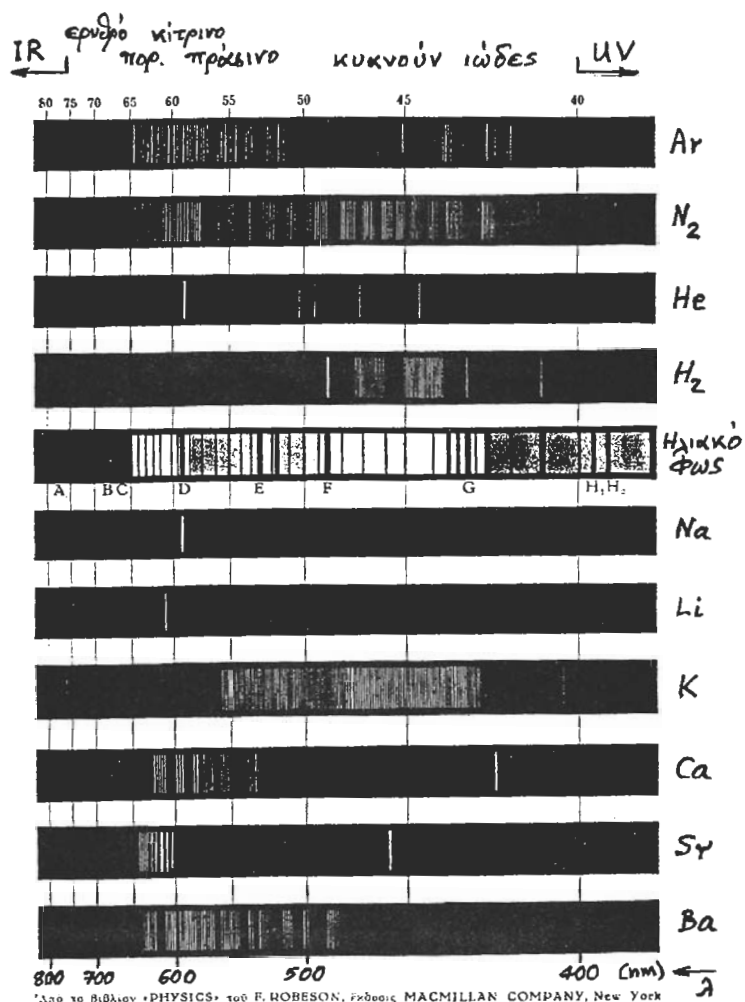
Η εκτροπή μιας ακτίνας από ένα οξύ πρίσμα είναι επομένως προσεγγιστικά ίση με:

$$\Delta = (n-1)A. \quad (7)$$

Επειδή ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός, η εκτροπή διαφέρει από χρώμα σε χρώμα. Αυτή είναι η αρχή της φασματικής ανάλυσης του φωτός από ένα πρίσμα.

10 Φάσμα φωτός

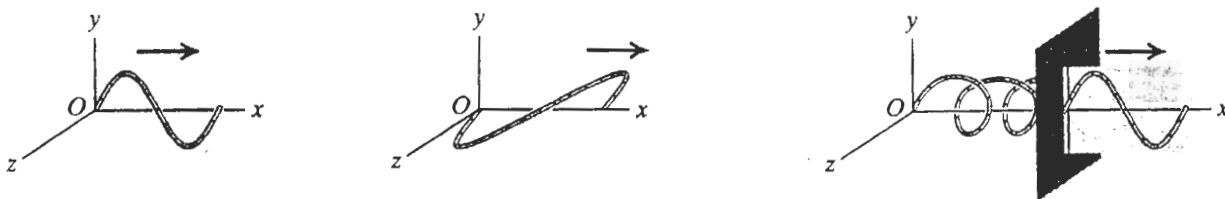
Ο σχηματισμός των χρωμάτων που δημιουργείται από την ανάλυση των φωτεινών ακτίνων από ένα πρίσμα ονομάζεται **φάσμα του φωτός** (Σχ. 9). Υπό κανονικές συνθήκες το λευκό φως έχει ένα συνεχές φάσμα που αποτελείται από την υπέρθεση κυμάτων με μήκη κύματος που εκτείνονται στο ορατό μέρος (μήκος κύματος: από 400 nm για το ιώδες φως, ως 750 nm για το ερυθρό φως) του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τέτοιο είναι και το φάσμα του ηλιακού φωτός. Γραμμικά φάσματα, που αποτελούνται από φασματικές γραμμές διαφόρων χρωμάτων, εκπέμπονται από διεγερμένα αέρια και άλλα στοιχεία. Μερικά φάσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 11.



Σχήμα 11 Το φάσμα του ηλιακού φωτός (συνεχές) και φάσματα εκπομπής αερίων και άλλων στοιχείων (γραμμικά), για μήκη κύματος μεταξύ 400 και 800 nm περίπου. (IR=υπέρυθρο, UV=υπεριώδες)

11 Πόλωση

Η πόλωση είναι χαρακτηριστικό όλων των εγκάρσιων κυμάτων. Εξετάζοντας τη διάδοση εγκάρσιου κύματος σε μια χορδή της οποίας η θέση ισορροπίας συμπίπτει με τον άξονα x , αν οι εγκάρσιες μετατοπίσεις γίνονται κατά τη διεύθυνση y , τότε η χορδή κείται πάντα επί του επιπέδου xy . Αν οι μετατοπίσεις γίνονται κατά τον άξονα z , τότε η χορδή κείται επί του επιπέδου xz .



Σχήμα 12

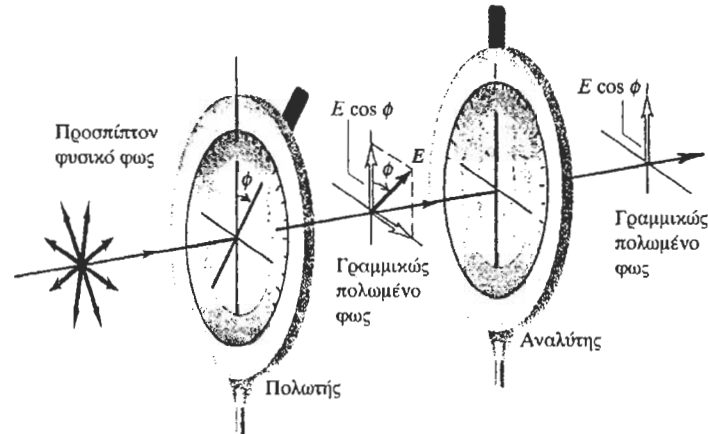
Όταν ένα κύμα έχει μετατοπίσεις μόνο κατά τη διεύθυνση y , λέμε ότι είναι **γραμμικά πολωμένο** στη διεύθυνση y . Ένα κύμα με μετατοπίσεις μόνον κατά τη διεύθυνση z είναι γραμμικά πολωμένο στη διεύθυνση z . Οποιοδήποτε γραμμικά πολωμένο κύμα έχει ενδιάμεση διεύθυνση πόλωσης, μπορεί να προκύψει ως επαλληλία αυτών των δύο πολώσεων.

Ένα **πολωτικό φίλτρο** ή **πολωτής** επιτρέπει να διέρχονται κύματα με ορισμένη διεύθυνση πόλωσης.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα και κατά συνέπεια έχουν το χαρακτηριστικό της πόλωσης. Το (ταλαντούμενο) μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα τόσο μεταξύ τους όσο και στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ως διεύθυνση πόλωσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ορίζεται συνήθως η διεύθυνση του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου.

Το **φυσικό φως** δεν είναι πολωμένο, όλες οι δυνατές εγκάρσιες διευθύνσεις ταλάντωσης συνυπάρχουν με το ίδιο πλάτος (π.χ. λαμπτήρες πυρακτώσεως ή εκκενώσεως αερίου).

Υπάρχουν πολωτικά φίλτρα για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Οι λεπτομέρειες της κατασκευής τους εξαρτώνται από τη φασματική περιοχή στην οποία ανήκει το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που πολώνουν. Το Polaroid είναι μια ουσία που χρησιμοποιείται ως πολωτικό φίλτρο στην οπτική. Ένα φίλτρο Polaroid επιτρέπει τη διέλευση κυμάτων πολωμένων παράλληλα προς ορισμένο άξονα, τον **άξονα πόλωσης** ή **άξονα εύκολης διέλευσης**. Αν το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου είναι παράλληλο προς αυτόν τον άξονα, το φως διέρχεται από το φίλτρο με μικρή μόνο εξασθένηση, ενώ αν είναι κάθετο στον άξονα εύκολης διέλευσης, το φως απορροφάται σχεδόν εξ ολοκλήρου. Ένας τέλειος πολωτής (είναι μια ιδεατή κατασκευή) επιτρέπει την εξ ολοκλήρου διέλευση του φωτός αν αυτό είναι πολωμένο στη διεύθυνση του άξονα εύκολης διέλευσης, αλλά αποκόπτει τελείως το σύνολο των φωτεινών κυμάτων που είναι πολωμένα σε διεύθυνση κάθετη προς αυτόν τον άξονα.



Σχήμα 13

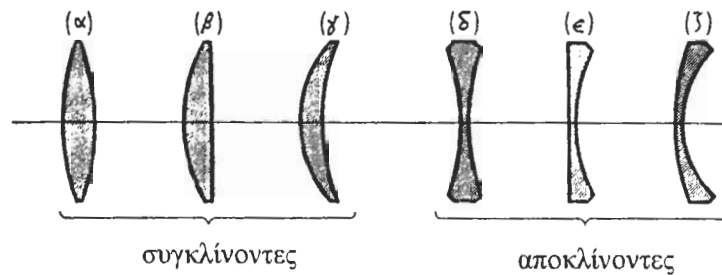
Αν, όπως φαίνεται στο Σχ. 13, μη πολωμένο φως διέλθει διαδοχικά από δύο παράλληλα μεταξύ τους πλακίδια ιδανικών πολωτών και η γωνία μεταξύ των δύο αξόνων πόλωσης είναι ϕ , τότε η σχέση της έντασης (δηλαδή της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας) του εισερχόμενου στο δεύτερο πολωτή (ή αναλύτη) φωτός με την ένταση του εξερχόμενου από αυτόν φωτός δίνεται από το **νόμο του Malus**:

$$I = I_m \cos^2 \phi \quad (8)$$

όπου I_m είναι η μέγιστη ένταση του διερχόμενου φωτός (όταν $\phi=0$) και I είναι η ένταση του διερχόμενου φωτός όταν η γωνία μεταξύ των αξόνων των δύο πολωτών είναι ϕ .

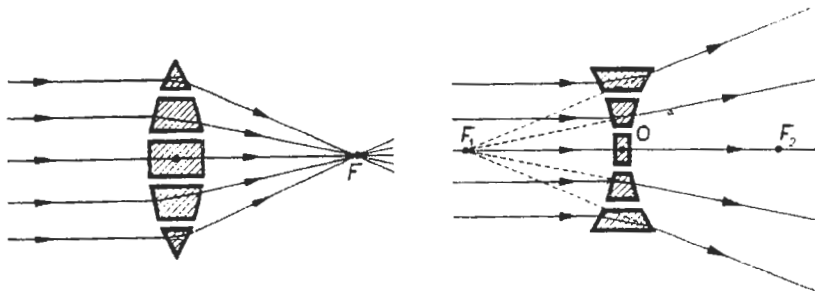
12 Φακοί

Το πιο κοινό είδος φακών είναι οι **σφαιρικοί φακοί** στους οποίους και θα περιορίσουμε το ενδιαφέρον μας. Σφαιρικός φακός ονομάζεται κάθε διαφανές μέσον το οποίο περιορίζεται από δύο σφαιρικές επιφάνειες (μία από τις οποίες μπορεί να είναι και επίπεδη). Οι ακτίνες των δύο σφαιρών ονομάζονται **ακτίνες καμπυλότητας** του φακού και η ευθεία που περνά από τα δύο κέντρα καμπυλότητας **κύριος άξονας** του φακού. Οι φακοί κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, τους **συγκλίνοντες** και τους **αποκλίνοντες** (Σχ. 14).



Σχήμα 14 Σφαιρικοί φακοί:

Συγκλίνοντες: (α) αμφίκυρτος, (β) επιπεδόκυρτος, (γ) συγκλίνων μηνίσκος.
Αποκλίνοντες: (δ) αμφίκοιλος, (ε) επιπεδόκοιλος, (ζ) αποκλίνων μηνίσκος.

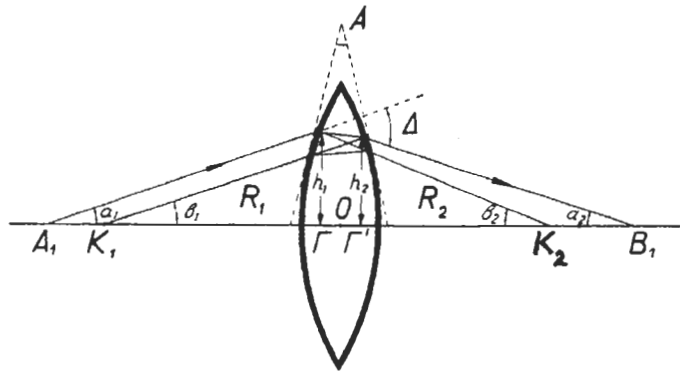


Σχήμα 15 Σύνθεση συγκλίνοντος και αποκλίνοντος φακού από πρίσματα.

Οι συγκλίνοντες φακοί είναι παχύτεροι στο κέντρο από ότι στα άκρα, ενώ οι αποκλίνοντες είναι λεπτότεροι. Η δράση των φακών μπορεί να γίνει κατανοητή αν αυτοί θεωρηθούν ότι αποτελούνται από κατάλληλους συνδυασμούς πρισμάτων τα οποία έχουν διαθλαστική γωνία που μεταβάλλεται από πρίσμα σε πρίσμα (Σχ. 15).

13 Οι εξισώσεις του αμφίκυρτου φακού

Μερικές απλές σχέσεις, γνωστές ως **εξισώσεις των φακών**, αποδεικνύονται αν υποθέσουμε ότι αναφερόμαστε σε λεπτό φακό, δηλαδή φακό του οποίου οι ακτίνες καμπυλότητας είναι μεγάλες συγκρινόμενες με το πάχος του, και ότι εξετάζουμε την πορεία



Σχήμα 16

ακτίνων φωτός που σχηματίζουν μικρές γωνίες με τον άξονα του φακού. Οι εξισώσεις αυτές θα αποδειχθούν τώρα για την περίπτωση του αμφίκυρτου φακού και θα γενικευθούν αμέσως μετά. Εξετάζουμε μια **παραξονική ακτίνα φωτός** (Σχ. 16), δηλαδή μια ακτίνα που περνά από ένα σημείο A_1 πάνω στον άξονα του φακού και, σχηματίζουσα μικρή γωνία α_1 με τον άξονα, υφίσταται διπλή διάθλαση στο φακό και συναντά τον άξονα στο σημείο B_1 , σχηματίζουσα γωνία α_2 με αυτόν. Οι ακτίνες των δύο σφαιρικών επιφανειών του φακού είναι R_1 και R_2 .

Η εκτροπή που υφίσταται η ακτίνα αυτή είναι: $\Delta = \alpha_1 + \alpha_2$. Στα σημεία όπου διαθλάται η ακτίνα, ο φακός μπορεί να θεωρηθεί ως πρίσμα γωνιάς A , όπως φαίνεται στο σχήμα. Είναι δε $A = \beta_1 + \beta_2$, όπου β_1 και β_2 είναι οι γωνίες που σχηματίζουν με τον άξονα του φακού οι ευθείες που φέρονται από τα κέντρα K_1 και K_2 των σφαιρικών επιφανειών του φακού, στα σημεία όπου η ακτίνα διαθλάται από τον φακό. Από τον τύπο των οξέων πρισμάτων, είναι:

$$\Delta = (n - 1)A = (n - 1)(\beta_1 + \beta_2) \quad (9)$$

και επομένως

$$\alpha_1 + \alpha_2 = (n - 1)(\beta_1 + \beta_2) \quad (10)$$

Επειδή οι γωνίες είναι μικρές, ισχύουν οι εξής προσεγγιστικές σχέσεις:

$$\begin{aligned} \alpha_1 \approx \tan \alpha_1 &= \frac{h_1}{\Gamma A_1} \approx \frac{h_1}{OA_1}, & \text{ή} & \quad \alpha_1 \approx \frac{h_1}{s}, & \text{όπου} & \quad s = OA_1, \\ \alpha_2 \approx \tan \alpha_2 &= \frac{h_2}{\Gamma' B_1} \approx \frac{h_2}{OB_1}, & \text{ή} & \quad \alpha_2 \approx \frac{h_2}{s'}, & \text{όπου} & \quad s' = OB_1, \\ \beta_1 \approx \sin \beta_1 &= \frac{h_1}{R_1} & \text{και} & \quad \beta_2 \approx \sin \beta_2 &= \frac{h_2}{R_2}. \end{aligned}$$

Αντικαθιστώντας στην Εξ.(10) και επειδή είναι $h_1 \approx h_2$, προκύπτει ότι

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

μια σχέση που συνδέει τις αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου του από το κέντρο αμφίκυρτου φακού με τις ακτίνες καμπυλότητας και το δείκτη διάθλασης του φακού. Πριν συζητήσουμε την εξίσωση αυτή θα τη γενικεύσουμε ώστε να ισχύει για κάθε είδος φακού.

14 Οι εξισώσεις των φακών και η σύμβαση των προσήμων

Υπάρχουν κάποιες εξισώσεις, γνωστές ως **εξισώσεις των φακών**, οι οποίες και ισχύουν για όλα τα είδη σφαιρικών φακών και θέσεις αντικειμένων-ειδώλων, αν τηρηθεί η κατάλληλη σύμβαση προσήμων για τα μήκη που χρησιμοποιούνται. Η βασική σχέση είναι η σχέση που βρέθηκε για λεπτό σφαιρικό αμφίκυρτο φακό από υλικό με δείκτη διάθλασης n μέσα στον αέρα, τροποποιημένη σύμφωνα με τη σύμβαση προσήμων που θα διατυπωθεί παρακάτω,

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (11)$$

γνωστή ως **θεμελιώδης τύπος των φακών**.

Ορίζουμε ένα μήκος f , χαρακτηριστικό του φακού, που ονομάζεται **εστιακή απόσταση** του φακού, σύμφωνα με τη σχέση

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (12)$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως **εξίσωση των κατασκευαστών των φακών** και συνδέει την εστιακή απόσταση του φακού με τις ακτίνες καμπυλότητας και το δείκτη διάθλασής του. Έχουμε έτσι τη σχέση

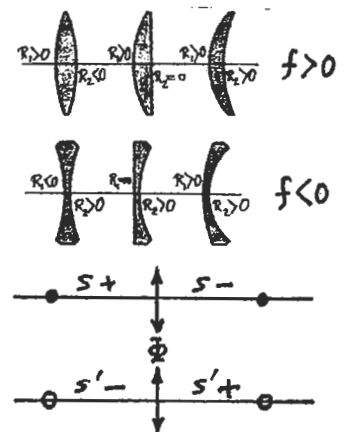
$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (13)$$

που συνδέει την απόσταση s του **αντικειμένου** από το κέντρο του φακού, με την απόσταση s' του **ειδώλου** του από το κέντρο του φακού και με την εστιακή απόσταση f του φακού. Τα δύο σημεία που απέχουν από το κέντρο του φακού απόσταση ίση με την εστιακή του απόσταση f , ονομάζονται **κύριες εστίες** του φακού και συμβολίζονται συνήθως με F_1 και F_2 (βλ. π.χ. Σχ. 17).

Οι εξισώσεις (12) και (13), στη μορφή που έχουν δοθεί, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλα τα είδη σφαιρικών φακών και θέσεις αντικειμένων-ειδώλων, αν τηρηθεί η ακόλουθη **σύμβαση προσήμων**:

Θεωρώντας, χάριν αναφοράς, ότι το φως προσπίπτει στο φακό από τα αριστερά,

1. Μια ακτίνα καμπυλότητας, R_1 ή R_2 , της επιφάνειας του φακού, είναι θετική αν το κέντρο καμπυλότητάς της βρίσκεται στα δεξιά της διαθλώσας επιφάνειας, και αρνητική αν βρίσκεται στα αριστερά.
2. Ως επακόλουθο του (1) και της Εξ.(12), η εστιακή απόσταση f ενός φακού είναι: θετική αν ο φακός είναι συγκλίνων, και αρνητική αν ο φακός είναι αποκλίνων.
3. Η απόσταση s του αντικειμένου από το φακό είναι θετική αν το αντικείμενο βρίσκεται στα αριστερά του φακού, και αρνητική αν βρίσκεται στα δεξιά του φακού.
4. Η απόσταση s' του ειδώλου από το φακό είναι θετική αν το αντικείμενο βρίσκεται στα δεξιά του φακού, και αρνητική αν βρίσκεται στα αριστερά του φακού.



15 Η γεωμετρική κατασκευή του ειδώλου ενός αντικειμένου

Από τις ιδιότητες των λεπτών φακών, είναι αληθές με αρκετά καλή προσέγγιση, ότι μια ακτίνα που περνά από το οπτικό κέντρο του φακού διαδίδεται ευθύγραμμα, χωρίς απόκλιση (Σχ. 17, ακτίνα BO).

Επίσης, η διερεύνηση της Εξ.(13) οδηγεί στα ακόλουθα συμπεράσματα:

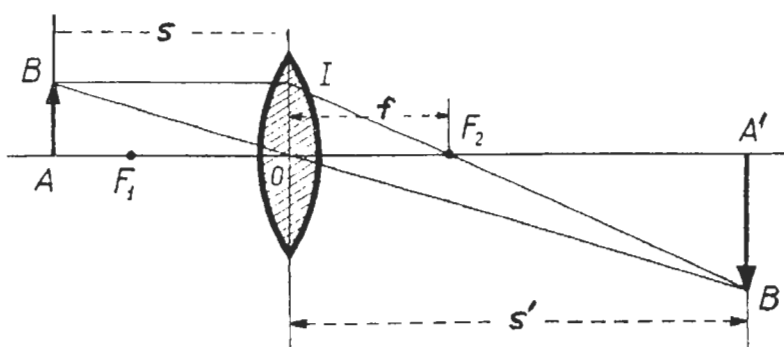
(α) Αν είναι $s = \infty$, τότε $s' = f$.

Δηλαδή, μια ακτίνα παράλληλη προς τον κύριο άξονα του φακού (αντικείμενο στο άπειρο) θα περάσει, μετά τη διάθλαση, από την κύρια εστία του φακού (Σχ. 17, ακτίνα BI).

(β) Αν είναι $s = f$, τότε $s' = \infty$.

Δηλαδή, μια ακτίνα που περνά από την κύρια εστία του φακού, θα είναι, μετά τη διάθλαση, παράλληλη με τον κύριο άξονα του φακού.

Χρησιμοποιώντας αυτούς τους κανόνες, είναι δυνατό να υπολογισθεί γεωμετρικά η θέση του ειδώλου ενός αντικειμένου, που σχηματίζεται από ένα φακό. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο Σχ. 17.



Σχήμα 17 Γεωμετρική κατασκευή ειδώλου

Μια ακτίνα που ξεκινά από το σημείο B και περνά από το κέντρο του φακού, δεν θα υποστεί σημαντική εκτροπή (ακτίνα BOB'). Η ακτίνα BI που κινείται παράλληλα με τον άξονα του φακού, θα περάσει από την εστία F_2 (πορεία BIF₂B'). Στο σημείο τομής των δύο αυτών ακτινών, το B', θα σχηματιστεί το είδωλο του B. Το είδωλο του σημείου A θα βρίσκεται πάνω στον άξονα του φακού. Επειδή όλα τα σημεία του αντικειμένου AB απέχουν ίδια απόσταση από το κέντρο του φακού, το ίδιο θα ισχύει και για το είδωλο, σε πρώτη προσέγγιση (δηλαδή για μικρό αντικείμενο που βρίσκεται κοντά στον άξονα του φακού). Για το λόγο αυτό, φέρνοντας κάθετη στον άξονα από το B', βρίσκουμε το είδωλο του σημείου A. Το βέλος A'B' στο σχήμα είναι το είδωλο του βέλους AB. Όπως φαίνεται, είναι ανεστραμμένο. Το μέγεθος του ειδώλου δίνεται από τη σχέση:

$$(A'B') = -\frac{s'}{s}(AB) \quad (14)$$

όπου το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει την αναστροφή του ειδώλου.

Η ίδια σχέση, Εξ.(13), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αποκλίνοντα φακό, αν η εστιακή απόσταση ληφθεί αρνητική. Σε όλες τις περιπτώσεις, αν η απόσταση s' του ειδώλου προκύψει αρνητική, το είδωλο είναι φανταστικό και βρίσκεται στην ίδια πλευρά του φακού στην οποία βρίσκεται και το αντικείμενο. Στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος του ειδώλου σύμφωνα, με την Εξ.(14), έχει θετικό πρόσημο και επομένως είναι ορθό (μη ανεστραμμένο).

16 Ισχύς φακού

Το αντίστροφο της εστιακής απόστασης ενός φακού ονομάζεται **διαθλαστική δύναμη** ή **ισχύς** του φακού:

$$P = \frac{1}{f}. \quad (15)$$

Αν η εστιακή απόσταση του φακού εκφραστεί σε μέτρα, η ισχύς του εκφράζεται σε **διοπτρίες** (m^{-1}). Η ισχύς ενός αποκλίνοντος φακού είναι αρνητική. Έτσι, για παράδειγμα, ένας συγκλίνων φακός με εστιακή απόσταση 0,5 m, έχει ισχύ 2 διοπτρίες. Ένας αποκλίνων φακός με εστιακή απόσταση -0,25 m, έχει ισχύ -4 διοπτρίες.

Όταν λεπτοί φακοί τοποθετούνται ο ένας πίσω από τον άλλο, σχηματίζοντας ένα **σύστημα φακών**, η ισχύς του σύνθετου φακού που προκύπτει είναι ίση με το αλγεβρικό άθροισμα των ισχύων των φακών που τον αποτελούν.

Άσκηση

Έξη φακοί είναι κατασκευασμένοι από υλικό με δείκτη διάθλασης ίσο με 1,5.

Να βρεθεί η εστιακή απόσταση του φακού και η ισχύς του σε διοπτρίες στην καθεμιά από τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- (α) αμφίκυρτου φακού με ακτίνες 10 και 20 cm.
- (β) επιπεδόκυρτου φακού με ακτίνα 10 cm.
- (γ) συγκλίνοντος μηνίσκου με ακτίνες 10 και 20 cm.
- (δ) αμφικόιλου φακού με ακτίνες 10 και 20 cm.
- (ε) επιπεδόκοιλου φακού με ακτίνα 10 cm.
- (στ) αποκλίνοντος μηνίσκου με ακτίνες 10 και 20 cm.