

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΚΥΠΡΟΥ | ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΦΥΣΙΚΗ Α' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΜΕΡΟΣ Β' ΟΠΤΙΚΗ



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ

ΦΥΣΙΚΗ Α΄ ΛΥΚΕΙΟΥ

ΟΠΤΙΚΗ

Μέρος Β΄

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Φυσική Α΄ Λυκείου: Οπτική, Μέρος Β΄

Συγγραφή: Γεώργιος Αρχοντής
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Φώτιος Πτωχός
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Νικόλαος Τούμπας
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Ζαχαρίας Ζαχαρία
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Επιστημών της Αγωγής, Πανεπιστήμιο Κύπρου
Μιχάλης Ιωάννου
Φυσικός, Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Ιωάννης Καρμιώτης
Φυσικός, Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Σάββας Πολυδωρίδης
Φυσικός, Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Δημήτριος Φιλίππου
Φυσικός, Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης
Παναγιώτης Ελευθερίου
Επιθεωρητής Μέσης Εκπαίδευσης Φυσικής
Γιαννάκης Χατζηκωστής
Επιθεωρητής Μέσης Εκπαίδευσης Φυσικής

**Σχεδιασμός
εξωφύλλου:** Έλενα Ηλιάδου, *Λειτουργός Υπηρεσίας Ανάπτυξης Προγραμμάτων*

**Επιμέλεια
έκδοσης:** Μαρίνα Άστρα-Ιωάννου, *Λειτουργός Υπηρεσίας Ανάπτυξης Προγραμμάτων*

**Συντονισμός
έκδοσης:** Χρίστος Παρπούνας, *Συντονιστής Υπηρεσίας Ανάπτυξης Προγραμμάτων*

Έκδοση 2017
Ανατύπωση 2018

Εκτύπωση: Κώνος Λτδ

© ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ISBN: 978-9963-54-071-6



Στο εξώφυλλο χρησιμοποιήθηκε ανακυκλωμένο χαρτί σε ποσοστό τουλάχιστον 50%, προερχόμενο από διαχείριση απορριμμάτων χαρτιού. Το υπόλοιπο ποσοστό προέρχεται από υπεύθυνη διαχείριση δασών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΠΤΙΚΗ

ΕΝΟΤΗΤΑ 5Α: ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Στην Ενότητα 5Α:

- Διακρίνουμε τα σώματα σε διαφανή και ημιδιαφανή οπτικά μέσα, και σε αδιαφανή.
- Αναφέρουμε το μοντέλο της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός σε ομογενή οπτικά μέσα.
- Ερμηνεύουμε φαινόμενα της ευθύγραμμης διάδοσης, όπως ο σχηματισμός σκιάς και παρασκιάς και οι εκλείψεις ηλίου και σελήνης.
- Συζητούμε το φαινόμενο της ανάκλασης του φωτός και τους νόμους που καθορίζουν την κατεύθυνση των ανακλώμενων ακτίνων.
- Διακρίνουμε ανάμεσα στην ανάκλαση από λείες επιφάνειες και στη διάχυση από ανώμαλες επιφάνειες.
- Μελετούμε τον σχηματισμό ειδώλου σημειακής και μη σημειακής πηγής από επίπεδο κάτοπτρο.
- Ερμηνεύουμε την αντιστροφή αντικειμένου-ειδώλου και το σχηματισμό κατοπτρικών ειδώλων σε επίπεδα κάτοπτρα.
- Κάνουμε αναφορά σε μη επίπεδα (καμπύλα) κάτοπτρα, και στις εφαρμογές τους.
- Συζητούμε το φαινόμενο της διάθλασης του φωτός, και τους νόμους που καθορίζουν την κατεύθυνση των διαθλωμένων ακτίνων.
- Χρησιμοποιούμε τους νόμους της διάθλασης για να ερμηνεύσουμε οφθαλμαπάτες, όπως η ανύψωση και παραμόρφωση αντικειμένων βυθισμένων σε νερό.
- Μελετούμε το φαινόμενο της εσωτερικής ανάκλασης και αναφέρουμε εφαρμογές που σχετίζονται με αυτό.

Η **Οπτική** είναι κλάδος της Φυσικής που μελετά φαινόμενα που σχετίζονται με το φως. Η **Γεωμετρική Οπτική** μπορεί να ερμηνεύσει πολλά από αυτά τα φαινόμενα, κάνοντας τη θεώρηση ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα, με τη μορφή **φωτεινών ακτίνων**. Κάποια φαινόμενα ερμηνεύονται μόνο εάν θεωρήσουμε ότι το φως διαδίδεται σαν κύμα, και αποτελούν αντικείμενο της **Κυματικής Οπτικής**. Στο παρόν κεφάλαιο θα περιορισθούμε σε φαινόμενα που εξηγούνται με τη Γεωμετρική Οπτική.

Αυτόφωτα και Ετερόφωτα Σώματα

Όταν ένα σώμα εκπέμπει φως, ονομάζεται **αυτόφωτο**. Παραδείγματα αυτόφωτων σωμάτων είναι ο ήλιος και τα άλλα αστέρια, η φλόγα ενός καίόμενου σώματος, ένα πυρακτωμένο μεταλλικό ραβδί, μια λυχνία φθορισμού, ένας λαμπτήρας LED, ή ένας ηλεκτρικός λαμπτήρας σε λειτουργία. Άλλα σώματα γίνονται ορατά επειδή ανακλούν ή επιτρέπουν τη μερική διέλευση του φωτός που προσπίπτει επάνω τους. Αυτά τα σώματα ονομάζονται **ετερόφωτα**. Παραδείγματα ετερόφωτων σωμάτων είναι η Γη, η σελήνη και τα περισσότερα αντικείμενα.

Οπτικά και Αδιαφανή Μέσα

Οπτικά μέσα ονομάζονται τα υλικά που επιτρέπουν τη διέλευση του ορατού φωτός από το εσωτερικό τους. Τα οπτικά μέσα διακρίνονται σε **διαφανή** και **ημιδιαφανή**. Τα διαφανή μέσα απορροφούν ένα μικρό ποσοστό του φωτός που προσπίπτει σε αυτά. Παραδείγματα τέτοιων μέσων είναι το κενό, ο αέρας, το νερό, διάφορα είδη γυαλιού και πλαστικών. Τα ημιδιαφανή σώματα απορροφούν ένα μεγαλύτερο ποσοστό του φωτός που προσπίπτει επάνω τους, οπότε προκαλούν αισθητή μείωση στην ένταση του διερχόμενου φωτός. Παραδείγματα ημιδιαφανών σωμάτων είναι οι φακοί των γυαλιών ηλίου και έγχρωμα πλαστικά αντικείμενα.

Ένα μέσο ονομάζεται **ομογενές** όταν έχει τις ίδιες ιδιότητες (όπως πυκνότητα, θερμοκρασία και χημική σύσταση) σε όλο του τον όγκο. Σε συμφωνία με την Γεωμετρική Οπτική, θα θεωρούμε ότι **μια φωτεινή ακτίνα διαδίδεται ευθύγραμμα σε οποιοδήποτε ομογενές οπτικό μέσο**.

Η ταχύτητα του φωτός διαφέρει ανάμεσα στα οπτικά μέσα. Στο κενό το φως διαδίδεται με **ταχύτητα** $c = 300\,000 \text{ km/s}$ (η ακριβής τιμή είναι $2,99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$). Σε οποιοδήποτε άλλο μέσο, η ταχύτητα του φωτός είναι μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό, και εξαρτάται τόσο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το μέσο, όσο και από το χρώμα του φωτός. Στον Πίνακα 5-1 καταγράφονται οι τιμές της ταχύτητας του φωτός κίτρινου χρώματος σε διάφορα μέσα.

Πίνακας 5-1: Ταχύτητα διάδοσης κίτρινης φωτεινής ακτινοβολίας σε διάφορα οπτικά μέσα.

| Οπτικό μέσο | Ταχύτητα ($\times 10^8 \text{ m/s}$) |
|-------------|--|
| Κενό | 2,99792458 |
| Αέρας | 2,9970 |
| Νερό | 2,25 |
| Οινόπνευμα | 2,20 |
| Πλέξι γκλας | 1,89 |
| Διαμάντι | 1,24 |

Τα υλικά που δεν επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός στο εσωτερικό τους ονομάζονται **αδιαφανή**. Παραδείγματα αδιαφανών σωμάτων είναι ένας πέτρινος τοίχος, ένα ξύλινο ή μεταλλικό αντικείμενο, και το ανθρώπινο σώμα.

Το φως που προσπίπτει σε ένα σώμα χωρίς να διέρχεται από αυτό, απορροφάται μερικώς από το σώμα και προκαλεί αύξηση της εσωτερικής του ενέργειας, ή ανακλάται και συνεχίζει να διαδίδεται στο αρχικό μέσο.

Ευθύγραμμη Διάδοση του Φωτός

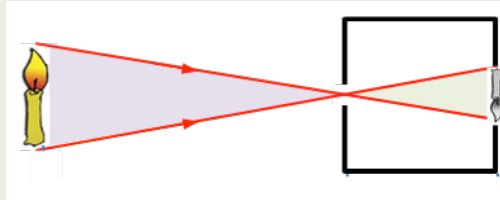
Σε πολυάριθμα παραδείγματα από την καθημερινή μας εμπειρία διαπιστώνουμε ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα. Εάν ανάψουμε έναν ισχυρό προβολέα στο εσωτερικό ενός σκοτεινού δωματίου, θα παρατηρήσουμε ότι το φως του σχηματίζει μια ευθύγραμμη φωτεινή δέσμη. Εάν παρεμβάλουμε ένα αντικείμενο στην πορεία της δέσμης, πίσω από αυτό θα σχηματισθεί μια σκοτεινή περιοχή (σκιά).

Παράδειγμα: Σκοτεινός Θάλαμος

Ο σκοτεινός θάλαμος, που απεικονίζεται στο πιο κάτω σχήμα, αποτελείται από ένα κουτί,

στο τοίχωμα του οποίου υπάρχει μια μικρή οπή.

Αν τοποθετήσουμε ένα αναμμένο κερί μπροστά από την οπή, θα παρατηρήσουμε ότι στην απέναντι έδρα του κουτιού σχηματίζεται αντεστραμμένη η εικόνα του κεριού. Ο σχηματισμός της αντεστραμμένης εικόνας αυτής οφείλεται στην ευθύγραμμη διάδοση του φωτός.

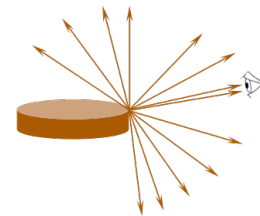


Ερώτηση: Να συγκρίνετε το σκοτεινό θάλαμο με τη φωτογραφική μηχανή.

Αντίληψη της Θέσης και του Μεγέθους ενός Αντικειμένου

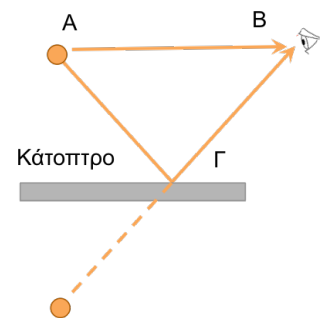
Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αντιλαμβάνεται τη θέση, το σχήμα και το μέγεθος ενός αντικειμένου από τις φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από το αντικείμενο και εισέρχονται στο μάτι.

Από οποιοδήποτε σημείο του αντικειμένου ξεκινούν ακτίνες φωτός προς διάφορες κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Από αυτές τις ακτίνες, μια μικρή δέσμη εισέρχεται στα μάτια του παρατηρητή. Εάν ο παρατηρητής μετακινηθεί ως προς το αντικείμενο, μια διαφορετική δέσμη ακτίνων θα εισέλθει στα μάτια του.



Ο εγκέφαλος προσδιορίζει τη θέση ενός αντικειμένου με βάση τη διεύθυνση των φωτεινών ακτίνων, που προέρχονται από το αντικείμενο και εισέρχονται στο μάτι. Για να το επιτύχει αυτό, ο εγκέφαλος θεωρεί ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα.

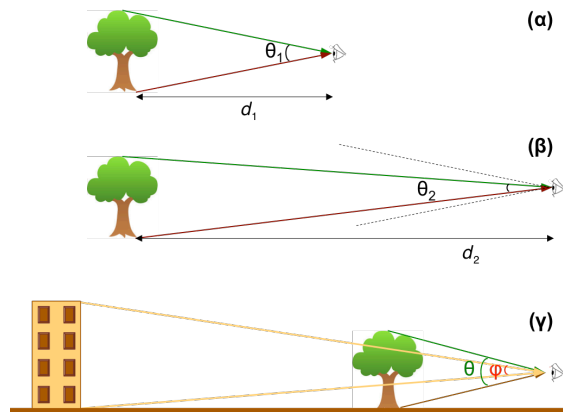
Ο άνθρωπος του διπλανού σχήματος παρατηρεί μια φωτεινή πηγή που είναι τοποθετημένη στο σημείο Α, πάνω από ένα επίπεδο κάτοπτρο. Η ακτίνα ΑΒ της πηγής καταλήγει κατευθείαν στο μάτι του παρατηρητή, ενώ η ακτίνα ΑΓΒ συναντά πρώτα το κάτοπτρο στο σημείο Γ, αλλάζει πορεία και καταλήγει στο μάτι. Θα μελετήσουμε αργότερα την αλλαγή πορείας φωτεινών ακτίνων από κάτοπτρα (ανάκλαση). Ο εγκέφαλος αντιλαμβάνεται ότι υπάρχει μια φωτεινή πηγή στη διεύθυνση της ακτίνας ΑΒ, αλλά θεωρεί ότι υπάρχει μια δεύτερη φωτεινή πηγή στην προέκταση της ακτίνας ΓΒ.



Ο εγκέφαλος δεν μπορεί να αντιληφθεί ότι η ακτίνα ΓΒ στην πραγματικότητα έχει ξεκινήσει από το σημείο Α.

Για να εκτιμήσει το μέγεθος ενός αντικειμένου, ο εγκέφαλος ενός παρατηρητή βασίζεται εν μέρει στην **γωνία όρασης** (ή **οπτική γωνία**), την οποία σχηματίζουν οι φωτεινές ακτίνες που καταλήγουν στο μάτι του παρατηρητή από τα άκρα του αντικειμένου.

Οι Εικόνες 5-1(α) και 5-1(β) απεικονίζουν δύο ανθρώπους που παρατηρούν το ίδιο δέντρο από διαφορετικές αποστάσεις. Οι φωτεινές ακτίνες που προέρχονται από τη βάση του κορμού και το ψηλότερο σημείο του δέντρου, εισέρχονται στο μάτι του παρατηρητή της Εικόνας 5-1(α) υπό τη **γωνία όρασης** θ_1 . Στην περίπτωση του παρατηρητή της Εικόνας 5-1(β), η αντίστοιχη γωνία όρασης θ_2 είναι μικρότερη, συνεισφέροντας στην εντύπωση του παρατηρητή ότι το δέντρο είναι μικρότερο.



Εικόνα 5-1. Ο παρατηρητής του σχήματος (α) θεωρεί ότι το δέντρο είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με τον άνθρωπο του σχήματος (β), επειδή οι ακτίνες από το δέντρο εισέρχονται στα μάτια του με μεγαλύτερη γωνία όρασης. Ομοίως, ο παρατηρητής του σχήματος (γ) θεωρεί ότι το δέντρο είναι μεγαλύτερο από το κτήριο.

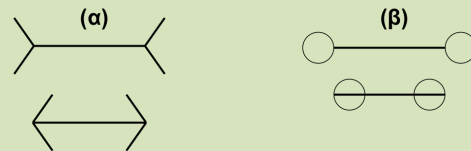
Ο παρατηρητής της Εικόνας 5-1(γ) έχει στο οπτικό του πεδίο το δέντρο και ένα ψηλότερο κτήριο. Οι ακτίνες που εκπέμπονται από τη βάση και την οροφή του κτηρίου εισέρχονται στο μάτι του παρατηρητή της Εικόνας 5-1(γ) υπό γωνία όρασης ϕ , ενώ οι ακτίνες που εκπέμπονται από τη βάση του κορμού και την κορυφή του δέντρου, εισέρχονται υπό γωνία όρασης θ . Επειδή το κτήριο βρίσκεται σε αρκετά μεγαλύτερη απόσταση από τον παρατηρητή συγκριτικά με το δέντρο, η γωνία ϕ είναι μικρότερη από τη γωνία θ , συνεισφέροντας στην εντύπωση του παρατηρητή ότι το κτήριο είναι χαμηλότερο.

Στην εκτίμηση του μεγέθους ενός αντικειμένου συνεισφέρουν κι άλλοι παράγοντες, όπως η αίσθηση του βάθους (δηλαδή η εκτίμηση της απόστασης του αντικειμένου από τον παρατηρητή) και η σύγκριση με άλλα αντικείμενα γνωστού μεγέθους. Στο ένθετο που ακολουθεί φαίνονται κάποια παραδείγματα.

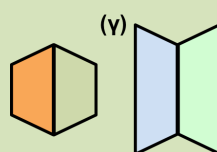
Οφθαλμαπάτες

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζονται ζευγάρια σχημάτων, για τα οποία ενδέχεται ο εγκέφαλός σας να εκτιμά λανθασμένα το μέγεθος. Σε κάθε περίπτωση, να κάνετε μια πρόβλεψη και κατόπιν να μετρήσετε τα αντίστοιχα μεγέθη.

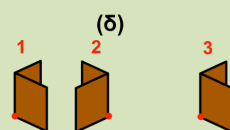
Στο σχήμα (α), ποιο από τα δύο οριζόντια ευθύγραμμα τμήματα φαίνεται μεγαλύτερο; Το ίδιο για το σχήμα (β).

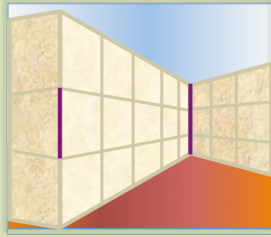


Στο σχήμα (γ), ποια από τις δύο κατακόρυφες εσωτερικές γραμμές φαίνεται μεγαλύτερη;



Στο σχήμα (δ), ποια φαίνεται να απέχουν περισσότερο, τα βιβλία 1 και 2, ή τα βιβλία 2 και 3; (Να εκτιμήσετε τις αποστάσεις 1–2 και 2–3 από τις αντίστοιχες κόκκινες βούλες).

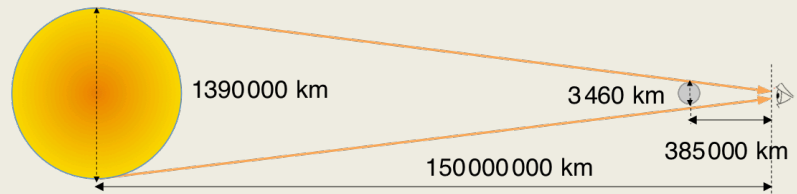




Οι δύο κατακόρυφες μωβ γραμμές του διπλανού σχήματος έχουν το ίδιο μήκος και τις βλέπουμε με την ίδια γωνία όρασης. Σας δίνεται η εντύπωση ότι κάποια γραμμή είναι μεγαλύτερη;

Ο Ήλιος και η Σελήνη έχουν το ίδιο Φαινόμενο Μέγεθος από τη Γη.

Στην Εικόνα 5-2 απεικονίζονται (όχι υπό κλίμακα) ο ήλιος και η σελήνη. Η διάμετρος του ηλιακού δίσκου ισούται περίπου με 1390000 km, και είναι περίπου 400 φορές μεγαλύτερη από τη διάμετρο της σελήνης



Εικόνα 5-2. Ο ήλιος και η σελήνη έχουν το ίδιο φαινόμενο μέγεθος από τη γη, επειδή οι ακτίνες που προέρχονται από τις άκρες των δίσκων τους καταλήγουν με την ίδια περίπου γωνία στη γη.

(3460 km). Ταυτόχρονα, η μέση απόσταση ήλιου-Γης (150000000 km) είναι περίπου 390 φορές μεγαλύτερη από την απόσταση σελήνης-Γης (385000 km). Εξαιτίας αυτής της σύμπτωσης, η γωνία που σχηματίζουν μεταξύ τους οι ακτίνες, που φθάνουν στη Γη από αντιδιαμετρικά σημεία του ηλιακού δίσκου, ισούται με τη γωνία μεταξύ των ακτίνων που φθάνουν στη Γη από αντιδιαμετρικά σημεία της σελήνης. Συνεπώς, η σελήνη και ο ήλιος έχουν το *ίδιο φαινόμενο μέγεθος* από τη Γη. Εάν η σελήνη ευθυγραμμισθεί ανάμεσα στη Γη και στον ήλιο, είναι δυνατόν να κρύψει εντελώς τον ηλιακό δίσκο από κάποια σημεία της επιφάνειας της Γης, προκαλώντας ολική έκλειψη ηλίου. Θα μελετήσουμε το σχηματισμό ηλιακών και σεληνιακών εκλείψεων σε λίγο.

Φαινόμενα που σχετίζονται με την Ευθύγραμμη Διάδοση του Φωτός

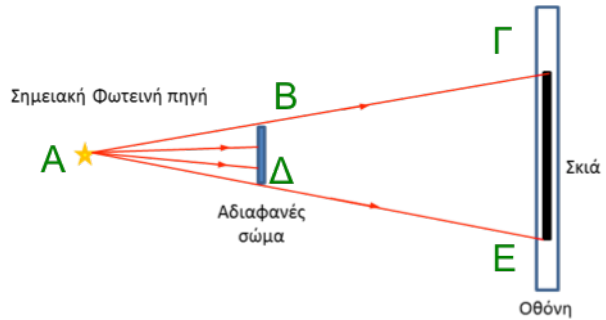
Σκιά και Παρασκιά

Λόγω της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός, όταν παρεμβάλλεται ένα αδιαφανές σώμα μπροστά από μια φωτεινή πηγή, κάποια περιοχή πίσω από το σώμα παραμένει σκοτεινή. Αυτή η περιοχή ονομάζεται **σκιά**.

Σκιά από Σημειακή Φωτεινή Πηγή

Όταν το φως που προσπίπτει στο αδιαφανές σώμα προέρχεται από μια φωτεινή πηγή μικρών διαστάσεων (**σημειακή πηγή**), η προβολή της σκιάς που σχηματίζεται πίσω από το σώμα είναι καλά καθορισμένη (έχει σαφές περίγραμμα και είναι έντονη).

Ένα παράδειγμα απεικονίζεται στην Εικόνα 5-3. Οι ακτίνες εκπέμπονται από τη σημειακή φωτεινή πηγή A προς όλες τις κατευθύνσεις. Οι ακτίνες ABΓ και AΔΕ οριοθετούν μια σκοτεινή περιοχή, πίσω από την οποία δεν διαδίδεται καμία ακτίνα φωτός που προέρχεται από την πηγή A. Εάν σε κάποια απόσταση πίσω από το αδιαφανές σώμα ΒΔ τοποθετήσουμε μια επίπεδη οθόνη, θα προβληθεί πάνω σε αυτή η σκιά του σώματος. Επειδή η πηγή είναι σημειακή, η σκιά έχει σαφές περίγραμμα.



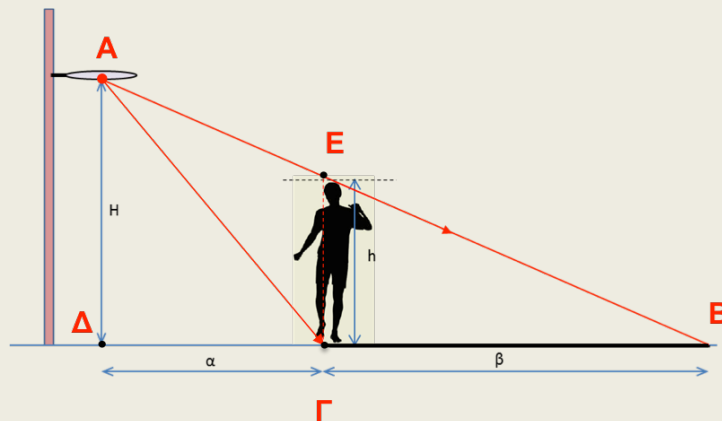
Εικόνα 5-3. Σχηματισμός σκιάς από σημειακή φωτεινή πηγή.

Παράδειγμα

Ένας άνθρωπος ύψους $h = 1,9 \text{ m}$ στέκεται σε απόσταση $\alpha = 2,5 \text{ m}$ από ένα πάσσαλο της αρχής ηλεκτρισμού. Στον πάσσαλο και σε ύψος $H = 3,0 \text{ m}$ από το έδαφος είναι τοποθετημένος ένας λαμπτήρας οδικού φωτισμού. Θα υπολογίσουμε το μήκος της σκιάς του ανθρώπου στο έδαφος, θεωρώντας ότι η φωτεινή πηγή είναι σημειακή.

Η φωτεινή πηγή συμβολίζεται από τον κόκκινο κύκλο στο σημείο A. Η περιοχή της σκιάς οριοθετείται από τις ακτίνες AEB και AΓ. Το μήκος της σκιάς στο έδαφος αντιστοιχεί στο ευθύγραμμο τμήμα ΓB.

Τα τρίγωνα AΔB και EΓB είναι όμοια, επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες (η γωνία $\Delta\hat{B}E$ είναι κοινή, $A\hat{\Delta}Γ = E\hat{Γ}B = 90^\circ$, και $\Delta\hat{A}E = Γ\hat{E}B$). Από την ομοιότητα των τριγώνων αυτών προκύπτει:

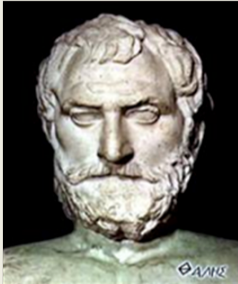


$$\frac{BΓ}{BΔ} = \frac{EΓ}{AΔ} \Rightarrow \frac{\beta}{\alpha + \beta} = \frac{h}{H} \Rightarrow \frac{\beta}{\alpha} = \frac{h}{H - h} \Rightarrow \beta = \alpha \frac{h}{H - h} = 2,5 \text{ m} \times \frac{1,9}{3 - 1,9} \frac{\text{m}}{\text{m}} = 4,1 \text{ m}$$

Πώς ο Θαλής ο Μιλήσιος μέτρησε το ύψος των πυραμίδων;

Ο αρχαίος Έλληνας φυσικός φιλόσοφος Θαλής γεννήθηκε στη Μίλητο της Μικράς Ασίας, πιθανόν το 624 π. Χ. Είναι ένας από τους επτά σοφούς της αρχαιότητας και θεωρείται ως

ο πρώτος φυσικός φιλόσοφος που προσπάθησε να ερμηνεύσει τα φαινόμενα της φύσης με επιστημονικό τρόπο, χωρίς μυθολογικές αναφορές. Παρατήρησε τις ηλεκτρικές ελκτικές δυνάμεις που ασκεί το ήλεκτρο (κεχριμπάρι), και τις μαγνητικές δυνάμεις του ορυκτού μαγνητίτη. Ασχολήθηκε με τα μαθηματικά και τη γεωμετρία. Το «θεώρημα του Θαλή», που διδάσκεστε στα μαθηματικά, οφείλεται σ' αυτόν.

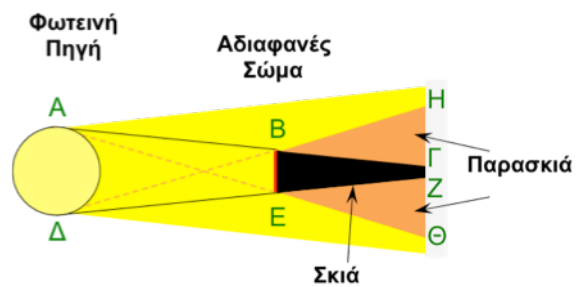


Για να προσδιορίσει το ύψος των πυραμίδων, ο Θαλής στερέωσε ένα ευθύγραμμο ραβδί γνωστού μήκους σε κατακόρυφη διεύθυνση δίπλα από κάθε πυραμίδα. Τη χρονική στιγμή που το μήκος της σκιάς του ραβδιού έγινε ίσο με το ύψος του, ο Θαλής μέτρησε το μήκος της σκιάς κάθε πυραμίδας. Το μήκος αυτό ήταν ίσο με το ύψος της αντίστοιχης πυραμίδας.

Ερώτηση: Χρησιμοποιώντας κατάλληλο σχήμα, να εξηγήσετε τη μέθοδο του Θαλή.

Σκιά από Μη Σημειακή Φωτεινή Πηγή

Εάν κάποιο αδιαφανές αντικείμενο φωτίζεται από μια φωτεινή πηγή με μεγάλες διαστάσεις, πίσω από το αντικείμενο σχηματίζεται εκτός από την εντελώς σκοτεινή περιοχή (σκιά) και μια περιοχή που φωτίζεται μερικώς από τη φωτεινή πηγή. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **παρασκιά**.



Εικόνα 5-4: Σχηματισμός σκίας και παρασκιάς πίσω από αδιαφανές σώμα, όταν φωτίζεται από μία μη σημειακή φωτεινή πηγή.

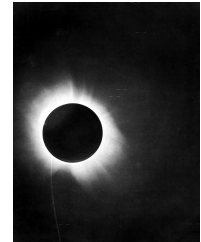
Μπορούμε να κατανοήσουμε καλύτερα τη διάκριση ανάμεσα στη σκιά και στην παρασκιά με τη βοήθεια της Εικόνας 5-4. Τα ευθύγραμμα τμήματα ΒΓ και ΕΖ οριοθετούν την περιοχή της σκιάς, πίσω από την οποία εμποδίζεται εντελώς η διέλευση φωτεινών ακτίνων από την πηγή, εξ' αιτίας της παρεμβολής του αδιαφανούς σώματος ΒΕ. Τα ευθύγραμμα τμήματα ΒΗ και ΕΘ οριοθετούν μια περιοχή, στην οποία καταλήγουν φωτεινές ακτίνες από όλα τα σημεία της πηγής. Στην ενδιάμεση περιοχή (τρίγωνα ΒΗΓ και ΕΖΘ) καταλήγουν φωτεινές ακτίνες από ένα μικρό τμήμα της πηγής. Για παράδειγμα, στο σημείο Γ καταλήγουν μόνο ακτίνες που ξεκινούν από το Α. Η ενδιάμεση αυτή περιοχή αντιστοιχεί στην παρασκιά.

Ερώτηση: Μελετώντας την Εικόνα 5-4, να εξηγήσετε πώς πρέπει να τοποθετήσουμε ένα αδιαφανές αντικείμενο και μια οθόνη πίσω από μια μη σημειακή φωτεινή πηγή, έτσι ώστε να μειώσουμε όσο το δυνατό περισσότερο το μέγεθος (α) της σκιάς, ή (β) της παρασκιάς του αντικειμένου.

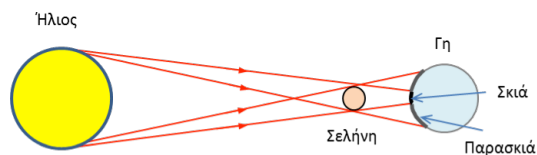
Εκλείψεις ηλίου και σελήνης

Στο σχηματισμό σκιάς και παρασκιάς οφείλονται τα φαινόμενα των **εκλείψεων** του ήλιου και της σελήνης.

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει την ολική έκλειψη ηλίου της 29^{ης} Μαΐου 1919, η οποία ήταν ορατή από την Νότια Αμερική και Αφρική, με διάρκεια 6 λεπτά και 51 δευτερόλεπτα. Η συσκότιση του ουρανού κατά τη διάρκεια της έκλειψης επέτρεψε την μελέτη φωτεινών ακτίνων που προέρχονταν από μακρινά άστρα και διέρχονταν πολύ κοντά από τον ήλιο. Με αυτό τον τρόπο, ο αστρονόμος Sir Arthur Eddington επαλήθευσε την πρόβλεψη της γενικής θεωρίας της σχετικότητας του Albert Einstein, ότι το βαρυτικό πεδίο του ήλιου αναγκάζει το φως να ακολουθήσει καμπύλη τροχιά.

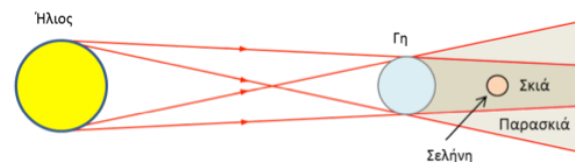


Μια **ηλιακή έκλειψη** πραγματοποιείται όταν η σελήνη παρεμβάλλεται ανάμεσα στον ήλιο και στη Γη, οπότε η σκιά της Σελήνης προσπίπτει πάνω σε ένα τμήμα της επιφάνειας της Γης (Εικόνα 5-5). Η έκλειψη είναι **ολική** στα σημεία της Γης που βρίσκονται μέσα στη σκιά της σελήνης. Από τα σημεία αυτά, ο δίσκος της σελήνης φαίνεται να καλύπτει εντελώς τον ηλιακό δίσκο. Η έκλειψη είναι **μερική** στα σημεία που βρίσκονται μέσα στην παρασκιά. Στα σημεία αυτά παραμένει ορατό ένα μέρος του ηλιακού δίσκου καθ' όλη τη διάρκεια της έκλειψης.



Εικόνα 5-5 (όχι υπό κλίμακα). Έκλειψη ηλίου.

Αντίστοιχα, μία **σεληνιακή έκλειψη** πραγματοποιείται όταν η Γη παρεμβάλλεται ανάμεσα στον ήλιο και τη σελήνη, και η σελήνη εισέρχεται στη σκιά της Γης (Εικόνα 5-6). Αν η σελήνη καλύπτεται εντελώς από τη σκιά της Γης, η έκλειψη είναι ολική.



Εικόνα 5-6 (όχι υπό κλίμακα). Ολική έκλειψη σελήνης.

Όπως αναφέρει ο Ηρόδοτος, ο Θαλής πρόβλεψε την ηλιακή έκλειψη, που πραγματοποιήθηκε στις 28 Μαΐου 595 π.Χ. και ήταν ορατή από τον ποταμό Άλυ της Μικράς Ασίας. Την ίδια ημέρα σε εκείνη την περιοχή θα πραγματοποιούνταν μια σημαντική μάχη ανάμεσα στους Λυδούς και στους Μήδους. Οι Λυδοί είχαν ειδοποιηθεί από τον Θαλή, ενώ οι Μήδοι θεώρησαν ότι η έκλειψη αποτελούσε κακό οίωνό από τους Θεούς. Έτσι, οι Μήδοι έκαναν ανακωχή με τους Λυδούς, αν και υπερείχαν στρατιωτικά.

Ένθετο: Υπολογισμός του Μήκους της Περιφέρειας της Γης από τον Ερατοσθένη.

Ο Ερατοσθένης ο Κυρηναίος έζησε περίπου την περίοδο 275-193 π.Χ. και αποτέλεσε μια από τις σπουδαιότερες προσωπικότητες της Ελληνιστικής εποχής. Στην πραγματεία του "**Περί διαστάσεων της Γης**", ο Ερατοσθένης περιέγραψε μια πρωτοποριακή μέθοδο

υπολογισμού της περιφέρειας της Γης. Ο Ερατοσθένης εκμεταλλεύτηκε το γεγονός ότι κάθε χρόνο στις 21 Ιουνίου, στην Αιγυπτιακή πόλη Σύηνη (το σημερινό Ασουάν), τη στιγμή που ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ (το υψηλότερο σημείο της τροχιάς του), οι ακτίνες του προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της Γης: τα αντικείμενα δεν σχηματίζουν σκιά, και ο ήλιος καθρεφτίζεται σε ένα βαθύ πηγάδι. Το γεωμετρικό σχήμα του πιο κάτω σχήματος επεξηγεί τη μέθοδο του Ερατοσθένη-

Επειδή ο ήλιος είναι πολύ μακριά από τη Γη, και η απόσταση Σύηνης-Αλεξάνδρειας είναι πολύ μικρότερη, οι ακτίνες του ήλιου AB και ΓΔ μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες μεταξύ τους. Όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ στη Σύηνη, οι ακτίνες του (AB) προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια της Γης. Την ίδια στιγμή, στην Αλεξάνδρεια οι ακτίνες του ήλιου (ΓΔ) σχηματίζουν γωνία φ με ένα κατακόρυφο ραβδί. Το τρίγωνο EZΔ είναι ορθογώνιο και η εφαπτομένη της γωνίας φ προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$\epsilon\varphi\varphi = \frac{\Delta Z}{EZ} = \frac{\text{Μήκος σκιάς}}{\text{Μήκος ραβδιού}}$$



Μετρώντας το μήκος της σκιάς του ραβδιού στην Αλεξάνδρεια όταν ο ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ, ο Ερατοσθένης προσδιόρισε τη γωνία φ ως $7^\circ 12'$, ίση με το $1/50$ των 360° .

Η προέκταση της διεύθυνσης του κατακόρυφου ραβδιού EZ διέρχεται από το κέντρο της Γης O. Από το σχήμα προκύπτει ότι οι γωνίες $B\hat{O}Z$ και $Z\hat{E}\Delta$ είναι ίσες, ως εντός εναλλάξ: $B\hat{O}Z = Z\hat{E}\Delta = \varphi = 360^\circ / 50$. Επειδή η γωνία $B\hat{O}Z$ είναι *επίκεντρη*, το μήκος του τόξου BZ (η απόσταση Σύηνης-Αλεξάνδρειας) είναι ίσο με το $1/50$ της περιφέρειας της Γης.

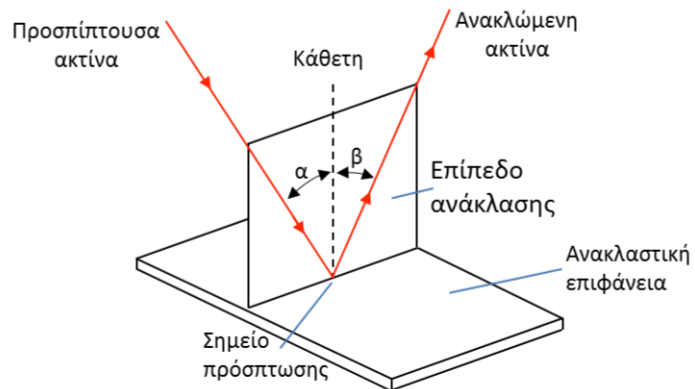
Την εποχή του Ερατοσθένη, η απόσταση Σύηνης-Αλεξάνδρειας υπολογίζονταν ως 5000 στάδια, δηλαδή περίπου 900 km (1 στάδιο \cong 180 m). Συνεπώς, ο Ερατοσθένης εκτίμησε το μήκος της περιφέρειας τη Γης ως 250000 στάδια ή περίπου 45000 km, 11% μεγαλύτερη από την ακριβή τιμή της περιφέρειας της Γης στον Ισημερινό (40008 km). Χρησιμοποιώντας τη σύγχρονη, ακριβή τιμή για την απόσταση Σύηνης-Αλεξάνδρειας, η μέθοδος του Ερατοσθένη προβλέπει ότι η περιφέρεια της Γης έχει μήκος 40074 km, μόλις 0,15% διαφορετικό από την ακριβή τιμή.

Ανάκλαση του Φωτός

Όταν το φως που διαδίδεται σε ένα οπτικό μέσο συναντήσει την επιφάνεια ενός αδιαφανούς μέσου, ή ενός δεύτερου οπτικού μέσου με διαφορετικό δείκτη διάθλασης, ένα μέρος του φωτός **ανακλάται** στην επιφάνεια και συνεχίζει να διαδίδεται στο αρχικό μέσο. Για

παράδειγμα, όταν μια δέσμη ηλιακών ακτίνων συναντήσει την επιφάνεια ενός τοίχου, μιας γυάλινης πλάκας ή του νερού μιας λίμνης, ένα ποσοστό του φωτός της δέσμης ανακλάται και συνεχίζει να διαδίδεται στον αέρα.

Στην Εικόνα 5-7 απεικονίζεται η πορεία μιας ακτίνας που προσπίπτει σε μια επίπεδη ανακλαστική επιφάνεια. Η γωνία α , που σχηματίζουν η προσπίπτουσα ακτίνα και η κάθετη ευθεία στην ανακλαστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, ονομάζεται **γωνία πρόσπτωσης**. Η γωνία β , που σχηματίζουν η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη ευθεία στο σημείο πρόσπτωσης,



Εικόνα 5-7. Ανάκλαση μιας φωτεινής ακτίνας από μια ανακλαστική επιφάνεια.

ονομάζεται **γωνία ανάκλασης**. Αποδεικνύεται πειραματικά ότι οι φωτεινές ακτίνες που ανακλώνται σε οποιαδήποτε επιφάνεια ικανοποιούν τους ακόλουθους δύο νόμους:

Νόμοι της Ανάκλασης

Πρώτος Νόμος: Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη ευθεία στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης ανήκουν στο ίδιο επίπεδο (**επίπεδο της ανάκλασης**).

Δεύτερος Νόμος: Η γωνία ανάκλασης είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης, $\alpha = \beta$.

Κατοπτρική Ανάκλαση

Κάθε λεία και στιλπνή (γυαλιστερή) ανακλαστική επιφάνεια είναι ένα κάτοπτρο. Ανάλογα με το *σχήμα* της ανακλαστικής επιφάνειας, διακρίνουμε διάφορους τύπους κατόπτρων, όπως **επίπεδα**, **σφαιρικά**, **παραβολικά** και **κυλινδρικά**. Στα επόμενα θα μελετήσουμε την ανάκλαση από επίπεδο κάτοπτρο.

Ανάκλαση από Επίπεδο Κάτοπτρο

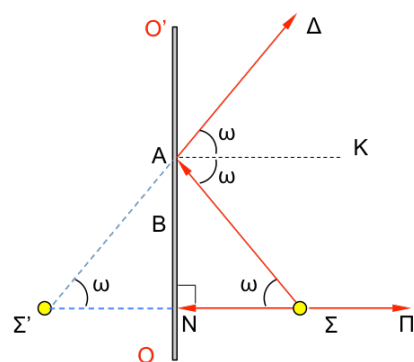
Όταν ένα αντικείμενο στέλνει ακτίνες φωτός σε ένα κάτοπτρο, αυτές ανακλώνται και φαίνεται ότι προέρχονται από μια εικόνα του αντικειμένου, που ονομάζεται **είδωλο**. Θα εξετάσουμε τα είδωλα σημείων και αντικειμένων από επίπεδο κάτοπτρο.

A. Είδωλο Φωτεινού Σημείου

Η Εικόνα 5-8 απεικονίζει μια σημειακή φωτεινή πηγή Σ, από την οποία εκπέμπονται ακτίνες φωτός προς κάθε κατεύθυνση.

Το κατακόρυφο επίπεδο OO' αντιστοιχεί στην πλάγια όψη ενός κατακόρυφου επιπέδου κατόπτρου.

Θεωρούμε δύο ακτίνες της πηγής Σ . Η ακτίνα ΣN προσπίπτει κάθετα στο κάτοπτρο στο σημείο N , και ανακλάται στην ίδια διεύθυνση (ακτίνα $N\Pi$). Μια δεύτερη ακτίνα ΣA προσπίπτει σε ένα *τυχαίο* σημείο A υπό γωνία ω , και ανακλάται στη διεύθυνση $A\Delta$. Οι προεκτάσεις (διακεκομμένες γραμμές) των ανακλώμενων ακτίνων $A\Delta$ και $N\Pi$ τέμνονται στο σημείο Σ' .



Εικόνα 5-8. Οι ακτίνες της φωτεινής πηγής Σ , που ανακλώνται από το επίπεδο κάτοπτρο OO' , τέμνονται στο σημείο Σ' . Το σημείο Σ' είναι το φανταστικό είδωλο του Σ .

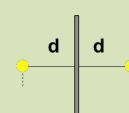
Εφαρμόζοντας τον δεύτερο νόμο της ανάκλασης για την ακτίνα ΣA , συμπεραίνουμε ότι $\hat{\Sigma}A\hat{K} = \hat{K}A\hat{\Delta} = \omega$. Επειδή οι ευθείες KA και $\Sigma\Sigma'$ είναι παράλληλες μεταξύ τους (κάθετες στο κάτοπτρο OO'), συμπεραίνουμε ότι

$\hat{A}\hat{\Sigma}N = \hat{K}\hat{A}\Sigma = \omega$ (γωνίες εντός εναλλάξ), και $N\hat{\Sigma}'A = \hat{K}\hat{A}\Delta = \omega$ (γωνίες εντός, εκτός και επί τα αυτά). Άρα, το τρίγωνο $\Sigma A\Sigma'$ είναι ισοσκελές ($\Sigma A = \Sigma'A$), και η ευθεία AN είναι διχοτόμος και μεσοκάθετος: $\hat{\Sigma}\hat{A}N = \hat{\Sigma}'\hat{A}N = 90^\circ - \omega$, και $\Sigma'N = \Sigma N$.

Επειδή η θέση του σημείου A επιλέχθηκε τυχαία, η ακτίνα $A\Delta$ θα μπορούσε να είναι οποιαδήποτε ανακλώμενη ακτίνα. Συμπεραίνουμε ότι η προέκταση οποιασδήποτε ανακλώμενης ακτίνας θα διέρχεται από το ίδιο σημείο Σ' , το οποίο βρίσκεται στην προέκταση του κάθετου ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει την πηγή με το κάτοπτρο, και σε απέχει από το κάτοπτρο όσο και η πηγή. **Το σημείο Σ' είναι το είδωλο της πηγής Σ .**

Επειδή στο σημείο Σ' συναντώνται οι προεκτάσεις των ανακλώμενων εικόνων, το είδωλο του σημείου είναι **φανταστικό**. Τα είδωλα που σχηματίζουν τα επίπεδα κάτοπτρα είναι πάντοτε φανταστικά.

Το είδωλο μιας σημειακής φωτεινής πηγής σε ένα επίπεδο κάτοπτρο σχηματίζεται στην προέκταση της κάθετης ευθείας από την πηγή στο κάτοπτρο, και απέχει από το κάτοπτρο όσο και η πηγή.



Όπως εξηγήσαμε προηγουμένως, ο εγκέφαλος προσδιορίζει τη θέση ενός αντικείμενου με βάση τη διεύθυνση των φωτεινών ακτίνων, που προέρχονται από το αντικείμενο και εισέρχονται στο μάτι. Έτσι, όταν ο εγκέφαλος του παρατηρητή αναλύει τις ακτίνες της πηγής Σ , που εισέρχονται στα μάτια του μετά από ανάκλαση στο επίπεδο κάτοπτρο OO' , θεωρεί ότι προέρχονται από το είδωλο Σ' .

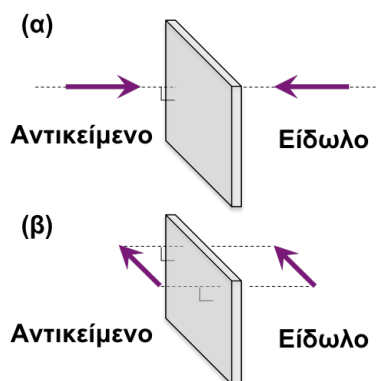
B. Είδωλο Μη Σημειακού Αντικείμενου

Η Εικόνα 5-9 απεικονίζει ένα βέλος που έχει τοποθετηθεί κάθετα (α), ή παράλληλα (β) με ένα επίπεδο κάτοπτρο. Για να σχηματίσουμε το είδωλο του βέλους, θεωρούμε ότι *κάθε σημείο του είναι μια σημειακή πηγή ακτίνων*, και εφαρμόζουμε τα συμπεράσματα για το είδωλο

σημειακής πηγής: Από τα διάφορα σημεία του βέλους φέρουμε κάθετες ευθείες προς το κάτοπτρο (διακεκομμένες γραμμές στην Εικόνα 5-9).

Πάνω σε αυτές τις ευθείες, σε ίση απόσταση από κάθε σημείο και από την άλλη μεριά του κατόπτρου, σχηματίζεται το αντίστοιχο είδωλο. Το είδωλο του βέλους σχηματίζεται ενώνοντας τα είδωλα όλων των σημείων. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για οποιοδήποτε αντικείμενο.

Από την Εικόνα 5-9(α) προκύπτει ότι όταν το βέλος είναι **κάθετο** στο επίπεδο του κατόπτρου, το είδωλό του σχηματίζεται με **αντεστραμμένη** κατεύθυνση. Συνεπώς:



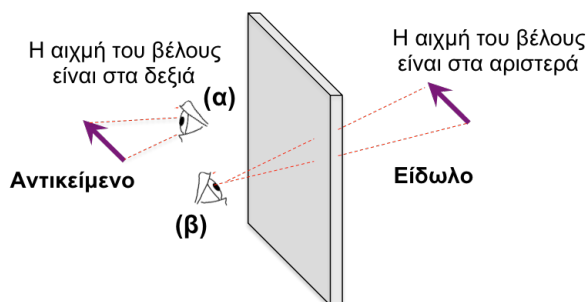
Το επίπεδο κάτοπτρο προκαλεί αντιστροφή σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδό του.

Εικόνα 5-9. Είδωλο βέλους που τοποθετείται (α) κάθετα, ή (β) παράλληλα με επίπεδο καθρέφτη.

Όταν το βέλος είναι παράλληλο με το επίπεδο του κατόπτρου, όπως στην Εικόνα 5-9(β), το είδωλό του σχηματίζεται στην ίδια κατεύθυνση. Συνεπώς:

Το επίπεδο κάτοπτρο δεν προκαλεί αντιστροφή σε διεύθυνση παράλληλη στο επίπεδό του.

Ένας παρατηρητής που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο βέλος και το κάτοπτρο κοιτάζει πρώτα το βέλος (αντικείμενο) και διαπιστώνει ότι η αιχμή του βέλους είναι στο δεξί του χέρι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-10(α). Κατόπιν, στρέφεται προς το κάτοπτρο και διαπιστώνει ότι η αιχμή του ειδώλου του βέλους είναι στο αριστερό του χέρι (5-10(β)). Συνεπώς, θα έχει την εντύπωση ότι το κάτοπτρο αντιστρέφει την κατεύθυνση του βέλους. Ο παρατηρητής κοιτά (α) το αντικείμενο και (β) το είδωλο από **αντιδιαμετρική γωνία**. Έτσι, θεωρεί ότι έχουν αντίθετη κατεύθυνση και συμπεραίνει ότι το κάτοπτρο δημιουργεί **πλευρικά αντεστραμμένο είδωλο**.

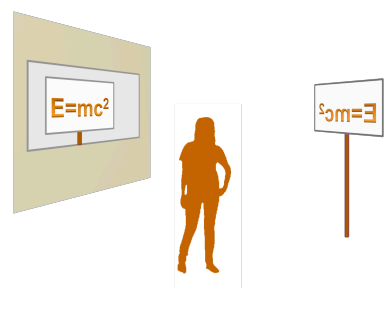


Εικόνα 5-10. Επειδή το βέλος (αντικείμενο) είναι παράλληλο με το κάτοπτρο, το είδωλό του έχει την ίδια κατεύθυνση. Επειδή ο παρατηρητής βρίσκεται ανάμεσα στο βέλος και το κάτοπτρο, κοιτά (α) το βέλος και (β) το είδωλό του από αντιδιαμετρικές οπτικές γωνίες. Έτσι, θεωρεί ότι βλέπει την αιχμή στη δεξιά άκρη του βέλους, και στην αριστερή άκρη του ειδώλου του.

Ερώτηση: Θα έχετε παρατηρήσει ότι η λέξη **AMBULANCE** (ΑΣΘΕΝΟΦΟΡΟ) είναι γραμμένη με πλευρικά αντεστραμμένο τρόπο στο μπροστινό μέρος των ασθενοφόρων. Σε τι εξυπηρετεί αυτή η επιλογή;



Απάντηση: Το είδωλο μιας επιγραφής, που είναι παράλληλη σε έναν επίπεδο καθρέφτη, έχει την ίδια κατεύθυνση με την επιγραφή. Όμως, ένας άνθρωπος που βρίσκεται ανάμεσα στην επιγραφή και στον καθρέφτη, βλέπει την επιγραφή και το είδωλό της αντεστραμμένα το ένα ως προς το άλλο. Η κοπέλα του σχήματος βλέπει ορθά γραμμένο το είδωλο της εξίσωσης, και αντεστραμμένη την εξίσωση.

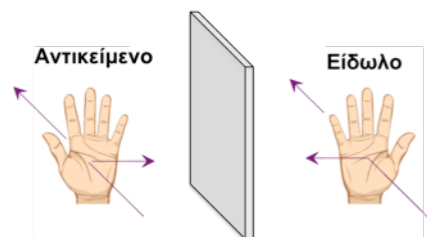


Γ. Κατοπτρικά Είδωλα

Εξ' αιτίας του τρόπου με τον οποίο δημιουργείται το είδωλο στο επίπεδο κάτοπτρο, τα είδωλα πολλών τρισδιάστατων αντικειμένων έχουν διαφορετικό σχήμα σε σχέση με τα αντικείμενα. Σχήματα, που προκύπτουν το ένα από το άλλο με απεικόνιση σε επίπεδο κάτοπτρο, ονομάζονται «**κατοπτρικά είδωλα**».

Η Εικόνα 5-11 μελετά ένα σχετικό παράδειγμα: Η αριστερή παλάμη ενός ανθρώπου καθρεφτίζεται σε επίπεδο κάτοπτρο. Το επίπεδο της παλάμης είναι **κάθετο** στο κάτοπτρο. Οι διευθύνσεις κάθετα και παράλληλα στο κάτοπτρο υποδεικνύονται από τα βέλη.

Στο είδωλο εμφανίζονται αντεστραμμένα τα δάχτυλα (κάθετη διεύθυνση στο επίπεδο του κατόπτρου), αλλά το μπροστινό και πίσω μέρος της αριστερής παλάμης εμφανίζονται με την ίδια σειρά (παράλληλη διεύθυνση). Το **είδωλο** που προκύπτει έχει διαφορετικό σχήμα από την αριστερή παλάμη, και αντιστοιχεί στη δεξιά παλάμη. Οι παλάμες είναι **κατοπτρικά είδωλα**.



Εικόνα 5-11. Η αριστερή και δεξιά παλάμη είναι κατοπτρικά είδωλα.



Σπαζοκεφαλιά: Εάν έχουμε δύο πανομοιότυπα αριστερά γάντια (με το σωστό μέγεθος), πώς μπορούμε να τα φορέσουμε και στα δύο μας χέρια;

Διάχυση Φωτός από Ανώμαλη Επιφάνεια

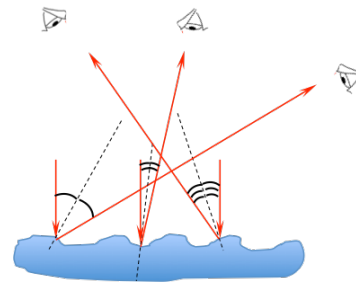
Η Εικόνα 5-12 απεικονίζει μια δέσμη παράλληλων ακτίνων φωτός, η οποία προσπίπτει σε μια **ανώμαλη** (τραχιά) ανακλαστική επιφάνεια. Για κάθε ακτίνα φωτός που ανακλάται από την τραχιά επιφάνεια, η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης.

Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι κάθετες ευθείες σε διαφορετικά σημεία της επιφάνειας (διακεκομμένες γραμμές) έχουν **τυχαία διεύθυνση**, εξ' αιτίας του ακανόνιστου σχήματος της

επιφάνειας. Κατά συνέπεια, οι γωνίες πρόσπτωσης και οι γωνίες ανάκλασης των διαφόρων ακτίνων μεταβάλλονται με τυχαίο τρόπο από σημείο σε σημείο, δηλαδή οι ανακλώμενες ακτίνες διαδίδονται προς κάθε κατεύθυνση. Σε αυτή την περίπτωση το φως υφίσταται **διάχυση** από την επιφάνεια. Όσο πιο τραχιά είναι η ανακλαστική επιφάνεια, τόσο πιο έντονο είναι το φαινόμενο της διάχυσης.

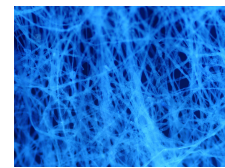
Μια ανώμαλη επιφάνεια διαχέει το φως που πέφτει επάνω της σε όλες τις διευθύνσεις, και συνεπώς είναι ορατή από οποιαδήποτε θέση.

Το ανακλώμενο φως είναι ορατό από παντού



Εικόνα 5-12: Διάχυση από τραχιά ανακλαστική επιφάνεια.

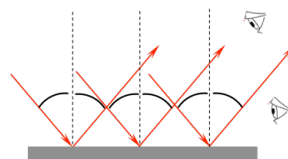
Στις περισσότερες περιπτώσεις, μια επιφάνεια διαχέει το φως *ακόμη κι όταν φαίνεται λεία*. Για παράδειγμα, μια λεία κόλλα χαρτιού είναι ορατή από παντού επειδή διαχέει το φως που προσπίπτει επάνω της. Το διπλανό σχήμα απεικονίζει την επιφάνεια μιας κόλλας χαρτιού, όπως φαίνεται στο μικροσκόπιο. Η κόλλα δεν είναι λεία σε ατομικό επίπεδο.



Πηγή: [commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Richard_Wheeler) (Richard Wheeler).

Η Εικόνα 5-13 απεικονίζει την ανάκλαση μιας δέσμης παράλληλων ακτίνων φωτός από τη **λεία** επιφάνεια ενός επίπεδου κάτοπτρου. Επειδή οι ανακλώμενες ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους, *είναι ορατές μόνο από τη διεύθυνση στην οποία διαδίδονται*. Στη γενικότερη περίπτωση που η επιφάνεια είναι λεία και καμπύλη, όπως για παράδειγμα ένα σφαιρικό ή παραβολικό κάτοπτρο, οι ανακλώμενες ακτίνες επίσης δεν διαχέονται σε τυχαίες διευθύνσεις, αλλά διαδίδονται σε διευθύνσεις που εξαρτώνται από το σχήμα της επιφάνειας.

Το ανακλώμενο φως είναι ορατό μόνο κατά τη διεύθυνση της ανάκλασης



Το ανακλώμενο φως δεν είναι ορατό από αυτή τη διεύθυνση

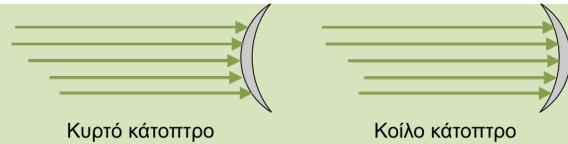
Εικόνα 5-13: Κατοπτρική ανάκλαση από μια λεία και επίπεδη ανακλαστική επιφάνεια.

Ερώτηση: Χρησιμοποιώντας τις πιο πάνω πληροφορίες, μπορείτε να συμπεράνετε κατά πόσο η επιφάνεια της Σελήνης είναι λεία και σιλιπνή ή τραχιά; Να αιτιολογήσετε την άποψή σας. **Υπόδειξη:** Από πού θα ήταν ορατός ο σεληνιακός δίσκος, εάν η επιφάνεια της σελήνης ανακλούσε το φως του ήλιου σαν επίπεδο κάτοπτρο;

Ένθετο: Μη Επίπεδα Κάτοπτρα

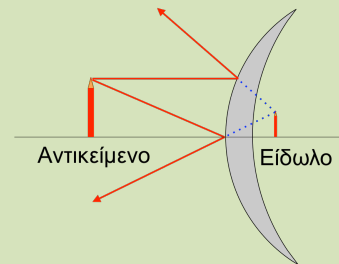
Εάν η ανακλαστική επιφάνεια είναι καμπύλη, αποτελεί μη επίπεδο κάτοπτρο. Μη επίπεδα κάτοπτρα (π.χ., σφαιρικά, παραβολικά ή κυλινδρικά) βρίσκουν πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή. Τα κάτοπτρα αυτά ανακλούν το φως ενός αντικειμένου σε συγκεκριμένες διευθύνσεις, και παράγουν διαφόρους τύπους ειδώλων.

Σε ένα **κυρτό** κάτοπτρο, η ανακλαστική επιφάνεια καμπυλώνεται προς την προσπίπτουσα ακτίνα. Παράδειγμα κυρτού κατόπτρου είναι η πίσω όψη ενός μεταλλικού κουταλιού.



Σε ένα **κοίλο** κάτοπτρο, η ανακλαστική επιφάνεια καμπυλώνεται μακριά από την προσπίπτουσα ακτίνα. Παράδειγμα κοίλου κατόπτρου είναι η μπροστινή όψη ενός μεταλλικού κουταλιού.

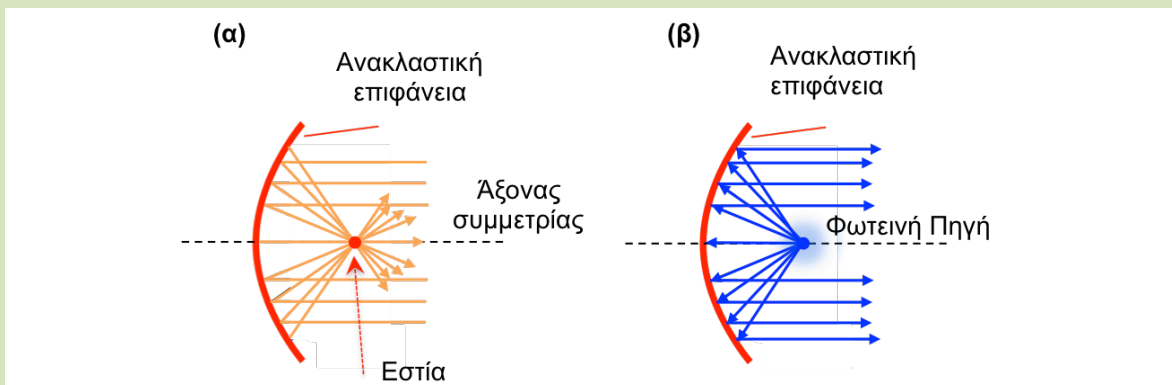
Το διπλανό σχήμα απεικονίζει την ανάκλαση ενός μολυβιού από ένα **κυρτό κάτοπτρο**. Οι ανακλώμενες ακτίνες αποκλίνουν και το είδωλο του μολυβιού είναι φανταστικό, (σχηματίζεται στα σημεία όπου τέμνονται οι προεκτάσεις των ανακλώμενων ακτίνων) και όρθιο, όπως στο επίπεδο κάτοπτρο. *Καθώς το μολύβι απομακρύνεται από το κάτοπτρο, το είδωλό του γίνεται μικρότερο.*



Όταν παρατηρούμε το τοπίο μέσα από ένα κυρτό κάτοπτρο, αντικείμενα σε μεγάλη απόσταση φαίνονται μικρότερα. Τα κυρτά κάτοπτρα παρέχουν ευρύτερη εικόνα του οπτικού πεδίου από τα επίπεδα κάτοπτρα, γι' αυτό και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι καθρέφτες των αυτοκινήτων και οι διασταυρώσεις.



<https://pixabay.com/en/passenger-traffic-airline-aviation-122999/>



Εικόνα 5-14. (α) Το παραβολικό κάτοπτρο συγκεντρώνει σε ένα σημείο (εστία) τις ακτίνες που προσπίπτουν παράλληλα στον άξονα συμμετρίας του. (β) Εάν στην εστία τοποθετηθεί φωτεινή πηγή, το κάτοπτρο δημιουργεί μια δέσμη παράλληλη με τον άξονα συμμετρίας του.

Η Εικόνα 5-14 απεικονίζει τη λειτουργία του **κοίλου παραβολικού κατόπτρου**. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-14(α), οι ακτίνες που προσπίπτουν παράλληλα στον άξονα συμμετρίας του κατόπτρου συγκεντρώνονται σε ένα σημείο, που ονομάζεται εστία του κατόπτρου. Τα παραβολικά κάτοπτρα συλλέγουν στην εστία τους το σήμα από πολύ μακρινές πηγές, γι αυτό και βρίσκουν εφαρμογή στις **δορυφορικές κεραιές** και τα **ραδιοτηλεσκόπια**.

Αντιστρόφως, εάν τοποθετήσουμε μια φωτεινή πηγή στην εστία του κατόπτρου, οι φωτεινές ακτίνες που ανακλώνται από το κάτοπτρο θα εξέρχονται παράλληλα (σχήμα 5-

14(β)). Χάρη σε αυτή την ιδιότητα, τα παραβολικά κάτοπτρα χρησιμοποιούνται σε συσκευές που παράγουν παράλληλες δέσμες ακτίνων, όπως οι **προβολείς αυτοκινήτων**, τα **spots φωτισμού** και οι παραβολικές θερμαντικές συσκευές.



Το μεγαλύτερο ραδιοηλεκτρονικό του κόσμου (με παραβολική αντένα διαμέτρου 305 μέτρων) βρίσκεται στο Arecibo (Puerto Rico).

Πηγή: Arecibo Observatory/NSF.



Χρήση παραβολικού κατόπτρου για το μαγείρεμα φαγητού. Το δοχείο τοποθετείται στην εστία του κατόπτρου. Τέτοιες συσκευές χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες για το μαγείρεμα με ηλιακή ενέργεια.



Κοίλη παραβολική θερμάστρα. Το θερμαντικό σώμα τοποθετείται στην εστία της κατοπτρικής επιφάνειας, και οι ακτίνες του εκπέμπονται παράλληλα προς τα εμπρός.

Ερωτήσεις

Να συμπληρώσετε τον παρακάτω πίνακα με την ένδειξη Σωστό / Λάθος.

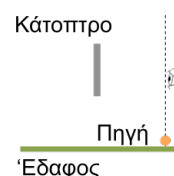
| Πρόταση | Σ/Λ |
|---|-----|
| Το φως διαδίδεται τόσο στα διαφανή όσο και στα ημιδιαφανή οπτικά μέσα. | |
| Στα ημιδιαφανή μέσα, ένα σημαντικό ποσοστό του φωτός απορροφάται. | |
| Η σκιά ενός αδιαφανούς σώματος σχηματίζεται στην περιοχή πίσω από το σώμα όπου δεν φθάνουν οι ακτίνες της φωτεινής πηγής. | |
| Η παρασκία σχηματίζεται μόνο από μια μη σημειακή φωτεινή πηγή. | |
| Η διάχυση του φωτός είναι ειδική περίπτωση ανάκλασης. | |
| Στη διάχυση του φωτός, η γωνία ανάκλασης δεν ισούται με τη γωνία πρόσπτωσης | |
| Όταν μια ακτίνα φωτός προσπίπτει κάθετα σε ένα επίπεδο κάτοπτρο, δεν ανακλάται. | |
| Τα επίπεδα κάτοπτρα σχηματίζουν πάντοτε φανταστικά είδωλα. | |
| Το είδωλο που σχηματίζεται από ένα επίπεδο κάτοπτρο είναι μεγαλύτερο από το αντικείμενο. | |

Ασκήσεις

1. Να αναζητήσετε σε ηλεκτρονικές ή έντυπες πηγές, πληροφορίες για τον τρόπο μέτρησης της ταχύτητας του φωτός από τους Γαλιλαίο, Roemer, Fizeau και Michelson.

2. Το 1969, το πλήρωμα της αποστολής Απόλλων 11 τοποθέτησε στη σελήνη έναν ανακλαστήρα φωτός, και προσδιόρισαν τον χρόνο που χρειάζεται το φως για να καλύψει την απόσταση Γης-σελήνης-Γης ως 2,56 s. Να υπολογίσετε την απόσταση Γης-σελήνης.
3. Ένας άνθρωπος φωτίζεται από έναν μεγάλο λαμπτήρα οδικού φωτισμού, που είναι τοποθετημένος σε κάποιο ύψος πάνω από το κεφάλι του. Γιατί τα πόδια της σκιάς είναι πιο σκούρα και έχουν καθορισμένο περίγραμμα, ενώ το κεφάλι της είναι πιο φωτισμένο και έχει ασαφές περίγραμμα;
4. Ποια γωνία πρέπει να σχηματίζουν με την κατακόρυφο οι ηλιακές ακτίνες, ώστε η σκιά ενός ανθρώπου να έχει μήκος ίσο με το ύψος του;

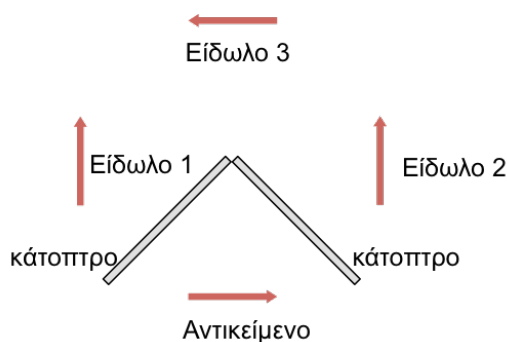
5. **A.** Ο άνθρωπος του διπλανού σχήματος δεν μπορεί να δει το είδωλο της σημειακής φωτεινής πηγής στο επίπεδο κάτοπτρο. Χρησιμοποιώντας κατάλληλο σχήμα, να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό.



- B.** Να σχεδιάσετε την **κατώτατη** θέση, στην οποία πρέπει να βρίσκονται τα μάτια του ανθρώπου, ώστε να βλέπει το είδωλο της πηγής.

- Γ.** Να υπολογίσετε το ελάχιστο ύψος που πρέπει να απέχει το κάτω άκρο του κατόπτρου από το δάπεδο, ώστε ο παρατηρητής να βλέπει το είδωλο του φωτεινού σημείου. Τα μάτια του παρατηρητή βρίσκονται σε ύψος 1,65 m από το έδαφος.

6. Μεταξύ δύο κάθετων μεταξύ τους επιπέδων κατόπτρων τοποθετούμε ένα βέλος όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.



- A.** Να δικαιολογήσετε πώς σχηματίζονται τα είδωλα της εικόνας.

- B.** Εάν ένας παρατηρητής τοποθετηθεί ανάμεσα στο αντικείμενο και στα κάτοπτρα, θα βλέπει αντεστραμμένο το είδωλο 3 σε σχέση με το αντικείμενο;

- Γ.** Εάν τοποθετήσετε ένα χαρτί με το όνομά σας μπροστά από τα κάτοπτρα, πώς θα φαίνεται το είδωλο 3 του ονόματός; (**Δοκιμάστε το**, χρησιμοποιώντας δύο καθρεφτάκια!)

Διάθλαση του Φωτός

Ένα αντικείμενο (π.χ. ένα κουτάλι ή μολύβι), το οποίο είναι μερικώς βυθισμένο σε ένα δοχείο με νερό, φαίνεται παραμορφωμένο. Για να ερμηνεύσουμε το πιο πάνω φαινόμενο, θα μελετήσουμε τη μετάβαση του



φωτός μεταξύ δύο οπτικών μέσων. Θα δείξουμε ότι όταν το φως διαδίδεται με διαφορετική

ταχύτητα στα δύο μέσα, οι φωτεινές ακτίνες αλλάζουν διεύθυνση διάδοσης στη διαχωριστική επιφάνεια των μέσων.

Ορισμός του Δείκτη Διάθλασης

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, το φως διαδίδεται γενικά με διαφορετική ταχύτητα σε διάφορα οπτικά μέσα. Το πηλίκο της ταχύτητας του φωτός στο κενό, c , προς την ταχύτητα του φωτός v σε κάποιο οπτικό μέσο ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** n του οπτικού μέσου:

Δείκτης διάθλασης n οπτικού μέσου:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο οπτικό μέσο}} = \frac{c}{v}$$

Εξ' ορισμού, ο δείκτης διάθλασης του κενού ισούται με τη μονάδα. Επειδή το φως διαδίδεται με τη μέγιστη δυνατή ταχύτητα στο κενό, ο δείκτης διάθλασης οποιουδήποτε άλλου οπτικού μέσου είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα ($v < c \Rightarrow n > 1$). Σε ένα **ομογενές** οπτικό μέσο, ο δείκτης διάθλασης είναι σταθερός σε όλα τα σημεία του μέσου.

Σε μερικά οπτικά μέσα, η ταχύτητα του φωτός *εξαρτάται και από το χρώμα του φωτός*.

Πίνακας 5-2: Δείκτης διάθλασης διαφόρων οπτικών μέσων για κίτρινη φωτεινή ακτινοβολία.

| Οπτικό μέσο | Δείκτης διάθλασης n |
|--------------------------|-----------------------|
| Κενό | 1,00 |
| Αέρας | 1,0003 |
| Πάγος | 1,31 |
| Νερό | 1,33 |
| Οινόπνευμα | 1,36 |
| Γυαλί | 1,52 |
| Αλάτι (Χλωριούχο Νάτριο) | 1,54 |
| Διαμάντι | 2,42 |

Στον Πίνακα 5-2 καταγράφονται οι τιμές του δείκτη διάθλασης διαφόρων οπτικών μέσων για φωτεινή ακτινοβολία κίτρινου χρώματος. Ο αέρας έχει δείκτη διάθλασης ελάχιστα μεγαλύτερο από τη μονάδα, επειδή η ταχύτητα του φωτός στον αέρα είναι περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

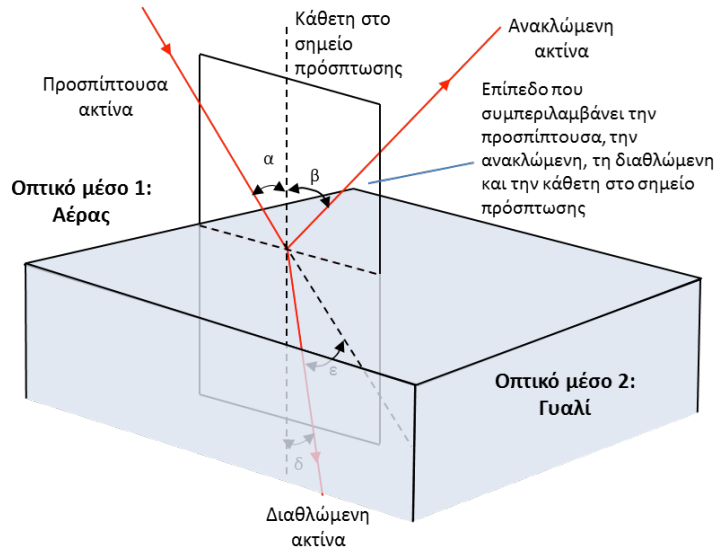
Όταν συγκρίνουμε δύο οπτικά μέσα, ονομάζουμε **πυκνότερο** το μέσο με το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης και **αραιότερο** το μέσο με το μικρότερο δείκτη διάθλασης. Για παράδειγμα, το νερό είναι πυκνότερο οπτικό μέσο από τον αέρα, αλλά αραιότερο οπτικό μέσο από το γυαλί.

Διάθλαση του Φωτός στη Διαχωριστική Επιφάνεια δύο Οπτικών Μέσων

Όταν το φως προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων, στα οποία διαδίδεται με διαφορετικές ταχύτητες, π.χ. από τον αέρα σε μια γυάλινη πλάκα, ένα μέρος του ανακλάται και επιστρέφει στο αρχικό μέσο, και ένα μέρος του διαδίδεται στο δεύτερο μέσο *αλλάζοντας διεύθυνση διάδοσης*. Η μεταβολή της διεύθυνσης διάδοσης κατά τη μετάβαση μιας ακτίνας φωτός από ένα οπτικό σε ένα άλλο ονομάζεται **διάθλαση** του φωτός.

Στην Εικόνα 5-15 απεικονίζεται η ανάκλαση και διάθλαση μιας ακτίνας φωτός, που προσπίπτει στην επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων. Η ακτίνα φωτός που

διαδίδεται στο δεύτερο οπτικό μέσο λέγεται **διαθλώμενη ακτίνα**. Η γωνία δ ανάμεσα στη διαθλώμενη ακτίνα και στην κάθετη ευθεία στη διαχωριστική επιφάνεια, στο σημείο πρόσπτωσης, ονομάζεται **γωνία διάθλασης**. Η γωνία ε ανάμεσα στην προσπίπτουσα και τη διαθλώμενη ακτίνα ονομάζεται **γωνία εκτροπής**.



Εικόνα 5-15: Διάθλαση φωτεινής ακτίνας σε μία επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια αέρα – γυαλιού.

Νόμοι της Διάθλασης

Η διάθλαση του φωτός **οφείλεται στη διαφορετική ταχύτητα του φωτός στα δύο οπτικά μέσα**, δηλαδή στο διαφορετικό **δείκτη διάθλασης** των δύο μέσων. Αποδεικνύεται πειραματικά ότι η διάθλαση διέπεται από δύο νόμους.

Νόμοι της Διάθλασης:

Πρώτος Νόμος: Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα, και η κάθετη ευθεία στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης ανήκουν στο ίδιο επίπεδο.

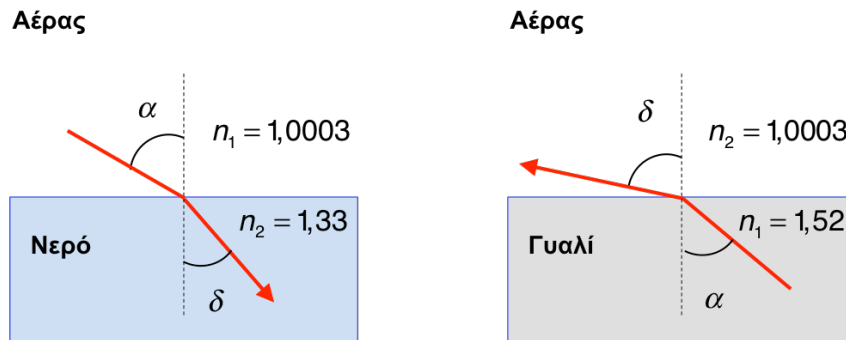
Δεύτερος Νόμος: Όταν μια φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από ένα οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης n_1 σε οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης n_2 , οι γωνίες πρόσπτωσης (α) και διάθλασης (δ) ικανοποιούν την πιο κάτω σχέση, γνωστή ως **νόμο του Snell**:

$$\text{Νόμος του Snell: } n_1 \eta \mu \alpha = n_2 \eta \mu \delta \Rightarrow \frac{\eta \mu \alpha}{\eta \mu \delta} = \frac{n_2}{n_1}$$

Από τον πρώτο νόμο της διάθλασης και το σχήμα 5-15 προκύπτει ότι οι γωνίες πρόσπτωσης α , διάθλασης δ και εκτροπής ε συνδέονται με τη σχέση $\alpha = \delta + \varepsilon$.

Σύμφωνα με τον νόμο του Snell, εάν μια ακτίνα προσπίπτει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων ($\alpha = 0^\circ$), η διαθλώμενη ακτίνα διαδίδεται στην ίδια διεύθυνση ($\delta = 0^\circ$). Εάν η γωνία πρόσπτωσης είναι μη μηδενική ($\alpha \neq 0^\circ$), και η μετάβαση γίνεται από

αραιότερο σε πυκνότερο μέσο, η γωνία διάθλασης δ είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης: $n_2 > n_1 \Rightarrow \delta < \alpha$. Παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η διάθλαση του φωτός κατά τη μετάβαση από τον αέρα στο νερό, που απεικονίζεται στην Εικόνα 5-16(α). Όπως φαίνεται στην εικόνα, η διαθλωμένη ακτίνα πλησιάζει την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια, σε σύγκριση με την προσπίπτουσα ακτίνα.



Εικόνα 5-16. (α) Όταν η φωτεινή ακτίνα διαδίδεται από τον αέρα στο νερό, η γωνία διάθλασης είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης. (β) Όταν η φωτεινή ακτίνα διαδίδεται από το γυαλί στον αέρα, η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης.

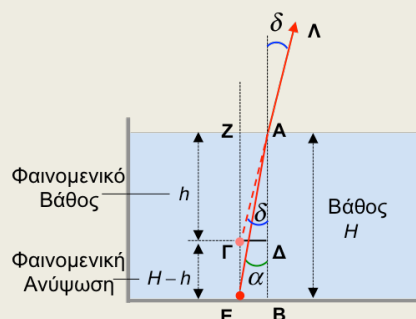
Αντίθετα, εάν το δεύτερο οπτικό μέσο έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης, και η γωνία πρόσπτωσης είναι μη μηδενική, η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης: $n_2 < n_1 \Rightarrow \delta > \alpha$. Η διαθλωμένη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια, σε σχέση με την προσπίπτουσα. Παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι η διάθλαση κατά τη μετάβαση από το γυαλί στον αέρα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-16(β), η διαθλωμένη ακτίνα είναι πιο απομακρυσμένη από την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια, σε σύγκριση με την προσπίπτουσα ακτίνα.

Όπως εξηγούμε πιο κάτω, κατά τη μετάβαση από ένα πυκνότερο σε ένα αραιότερο οπτικό μέσο η ακτίνα ανακλάται χωρίς διάθλαση, εάν η γωνία πρόσπτωσης υπερβεί μια μέγιστη (οριική) τιμή (φαινόμενο ολικής εσωτερικής ανάκλασης).

Παράδειγμα: Φαινόμενη Ανύψωση μικρού Αντικειμένου βυθισμένου στο Νερό.

Όταν στεκόμαστε έξω από το νερό και παρατηρούμε ένα αντικείμενο βυθισμένο σε αυτό, αντιλαμβανόμαστε ότι το αντικείμενο βρίσκεται πιο ψηλά (σε μικρότερο βάθος) από ό,τι στην πραγματικότητα. Γιατί συμβαίνει αυτό;

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει μια σημειακή πηγή φωτός στο σημείο E.



Η φωτεινή ακτίνα EA, που εκπέμπεται από το αντικείμενο, διαθλάται στην επιφάνεια του νερού και διαδίδεται στον αέρα. Επειδή ο αέρας έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από το νερό, η γωνία διάθλασης δ είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης α . Ο

ανθρώπινος εγκέφαλος θεωρεί ότι η διαθλώμενη ακτίνα ΑΛ προέρχεται από την προέκτασή της, ΑΓ. Επειδή η προέκταση ΑΓ βρίσκεται πάνω από την πραγματική ακτίνα ΑΕ, το είδωλο του σημείου Ε φαίνεται σε **μικρότερο βάθος από το πραγματικό**.

Από το σχήμα, μπορούμε να αποδείξουμε ότι οι προεκτάσεις όλων των διαθλώμενων ακτίνων (με μικρή γωνία διάθλασης) διέρχονται από το ίδιο σημείο Γ.

Από τα ορθογώνια τρίγωνα ΑΒΕ και ΑΔΓ προκύπτει:

$$EB = AE \eta \mu \alpha \text{ και } \Gamma\Delta = A\Gamma \eta \mu \delta$$

Λαμβάνοντας υπ' όψη ότι $EB = \Gamma\Delta$, ο νόμος του Snell δίνει:

$$\frac{n_{\text{νερου}}}{n_{\text{αερα}}} = \frac{\eta \mu \delta}{\eta \mu \alpha} = \frac{\Gamma\Delta / A\Gamma}{EB / AE} = \frac{\Gamma\Delta AE}{EB A\Gamma} = \frac{AE}{A\Gamma}$$

Εάν οι γωνίες α και δ είναι αρκετά μικρές, μπορούμε να κάνουμε τις προσεγγίσεις:

$AE \cong AB = H$ και $A\Delta \cong A\Gamma = h$, όπου το σύμβολο \cong έχει την έννοια «περίπου ίσον». Έτσι, προκύπτει:

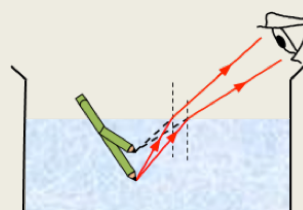
$$\frac{n_{\text{νερου}}}{n_{\text{αερα}}} = \frac{AE}{A\Gamma} \cong \frac{H}{h} \Rightarrow h \cong H \frac{n_{\text{αερα}}}{n_{\text{νερου}}} = \frac{1}{1,33} H$$

Άρα, η προέκταση ΑΓ της διαθλώμενης ακτίνας ΑΛ τέμνει την κάθετο ΕΖ σε συγκεκριμένο φαινομενικό βάθος $h = H / 1,33$. Επειδή η ακτίνα ΑΛ επιλέχθηκε τυχαία, το ίδιο συμπέρασμα πρέπει να ισχύει για όλες τις διαθλώμενες ακτίνες που προέρχονται από το Ε (εάν εξέρχονται σε μικρές γωνίες). Το σημείο τομής Γ, στο οποίο τέμνονται οι προεκτάσεις των διαθλώμενων ακτίνων, είναι το είδωλο του σημείου Ε.

Ερώτηση: Να εξηγήσετε κατά πόσον το είδωλο του αντικειμένου που βλέπει ένας παρατηρητής στο πιο πάνω παράδειγμα είναι πραγματικό ή φανταστικό.

Παράδειγμα: Ένα μολύβι μισοβυθισμένο σε ένα δοχείο με νερό «φαίνεται» σπασμένο.

Όπως είδαμε στο προηγούμενο παράδειγμα, οι διαθλώμενες ακτίνες, που προέρχονται από τα διάφορα σημεία ενός αντικειμένου βυθισμένου σε νερό, φαίνεται να προέρχονται από σημεία που βρίσκονται σε μικρότερο φαινομενικό βάθος. Ο εγκέφαλός μας ενώνει αυτά τα σημεία σε μια υπερυψωμένη εικόνα. Αυτό προκαλεί την εντύπωση του «σπασμένου» μολυβιού.



Ερώτηση: Τα πόδια ενός ανθρώπου που είναι μισοβυθισμένα στο νερό μιας πισίνας ή στη θάλασσα, φαίνονται κοντύτερα. Να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό κάνοντας το κατάλληλο σχήμα.

Παράδειγμα: Διάδοση του φωτός σε οπτικό μέσο με παράλληλες έδρες.

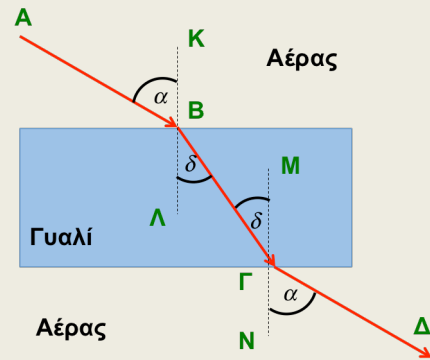
Το διπλανό σχήμα απεικονίζει μια φωτεινή ακτίνα που εισέρχεται και εξέρχεται από δύο παράλληλες έδρες μιας γυάλινης πλάκας. Οι διακεκομμένες ευθείες ΚΒ και ΓΝ είναι κάθετες στις παράλληλες έδρες. Από τη γεωμετρία του σχήματος προκύπτει

$$\angle \hat{B}\Gamma = \angle \hat{B}\Gamma\text{M} = \delta$$

ως εντός εναλλάξ γωνίες. Εφαρμόζοντας το νόμο του Snell στα σημεία Β και Γ, παίρνουμε:

$$\frac{\eta\mu \hat{A}\hat{B}\hat{K}}{\eta\mu \delta} = \frac{\eta_{\text{γυαλιου}}}{\eta_{\text{αερα}}} = \frac{\eta\mu \hat{N}\hat{\Gamma}\hat{\Delta}}{\eta\mu \delta} \Rightarrow \hat{A}\hat{B}\hat{K} = \hat{N}\hat{\Gamma}\hat{\Delta} = \alpha$$

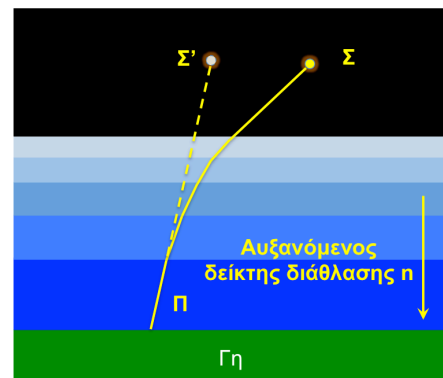
Επειδή οι δύο γωνίες είναι ίσες, οι ακτίνες ΓΔ και ΑΒ είναι παράλληλες. Άρα, η εξερχόμενη ακτίνα ΓΔ είναι **παράλληλα μετατοπισμένη** σε σχέση με την προσπίπτουσα ακτίνα ΑΒ. Σημειώνουμε ότι αυτό το αποτέλεσμα ισχύει μόνο αν ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου, που βρίσκεται έξω από τις δύο παράλληλες πλευρές της πλάκας, είναι ο ίδιος.



Διάθλαση του Φωτός στην Ατμόσφαιρα

Η Γη περιβάλλεται από ένα στρώμα μίγματος αερίων, την ατμόσφαιρα. Το στρώμα αυτό αποτελεί ένα οπτικό μέσο, που επιτρέπει τη διέλευση του φωτός στο εσωτερικό του. Εξ' αιτίας της βαρύτητας, η πυκνότητα της ατμόσφαιρας ελαττώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος. Ο δείκτης διάθλασης του ατμοσφαιρικού αέρα εξαρτάται από την πυκνότητα του αέρα, και ελαττώνεται επίσης με το ύψος.

Οι φωτεινές ακτίνες που διασχίζουν την ατμόσφαιρα διέρχονται από διαδοχικά στρώματα αέρα με διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Μπορούμε να θεωρήσουμε τα στρώματα αυτά σαν διαδοχικά οπτικά μέσα, τα οποία προκαλούν συνεχώς διάθλαση των φωτεινών ακτίνων. Συνεπώς, όταν μια φωτεινή ακτίνα διασχίζει την ατμόσφαιρα, η διεύθυνση διάδοσης της ακτίνας αλλάζει συνεχώς.



Η διπλανή εικόνα απεικονίζει σχηματικά τη διαδρομή μιας ακτίνας φωτός, που προέρχεται από ένα αστέρι Σ και φθάνει στο σημείο Π της επιφάνειας της Γης.

Επειδή ο δείκτης διάθλασης της ατμόσφαιρας αυξάνεται κοντά στην επιφάνεια της Γης, η γωνία διάθλασης της ακτίνας ελαττώνεται σταδιακά. Ένας παρατηρητής στο σημείο Π αντιλαμβάνεται ότι το αστέρι Σ βρίσκεται πάνω στην προέκταση ΠΣ' της ακτίνας που εισέρχεται στα μάτια του. Συνεπώς, η φαινομενική θέση του αστεριού, Σ', βρίσκεται πιο ψηλά

από την πραγματική του θέση Σ, σε σχέση με τον ορίζοντα.

Συμπεραίνουμε ότι η γήινη ατμόσφαιρα επηρεάζει τη φαινομενική θέση των ουρανίων σωμάτων, που παρατηρούμε από την επιφάνεια της Γης. Η φαινομενική ανύψωση των άστρων είναι μεγαλύτερη όσο πιο κοντά αυτά βρίσκονται στον ορίζοντα, λόγω της μεγαλύτερης γωνίας πρόσπτωσης των φωτεινών ακτίνων στην ατμόσφαιρα, και της μεγαλύτερης απόστασης που διανύουν μέσα στην ατμόσφαιρα.

Η διάθλαση του φωτός, που προέρχεται από τον ήλιο, προκαλεί παραμορφώσεις του ηλιακού δίσκου. Όταν ο ήλιος βρίσκεται κοντά στον ορίζοντα, τα σημεία στο κάτω μέρος του ηλιακού δίσκου (πιο κοντά στον ορίζοντα) υφίστανται μεγαλύτερη φαινομενική ανύψωση από τα σημεία στο πάνω μέρος του δίσκου. Εξ αιτίας της διαφορετικής ανύψωσης, ο ηλιακός δίσκος φαίνεται ελαφρώς πεπλατυσμένος κοντά στον ορίζοντα.



Φωτογράφιση του ηλιακού δίσκου στη δύση του. Ο ηλιακός δίσκος φαίνεται παραμορφωμένος, επειδή βρίσκεται κοντά στον ορίζοντα. Πηγή: www.greeksky.gr

Για τον ίδιο λόγο, το επάνω μέρος του ηλιακού δίσκου είναι ορατό για ένα μικρό διάστημα κατά την ανατολή και δύση του ηλίου, αν και ολόκληρος ο δίσκος βρίσκεται κάτω από τον ορίζοντα.



Η διάθλαση του φωτός είναι υπεύθυνη και για το γεγονός ότι τα αστέρια τρεμοσβήνουν (λαμπυρίζουν). Επειδή το μείγμα αερίων της ατμόσφαιρας βρίσκεται διαρκώς σε κίνηση, η ατμόσφαιρα δεν είναι ομογενές οπτικό μέσο: η χημική σύσταση, η πυκνότητα και η θερμοκρασία στα διάφορα σημεία αλλάζει συνεχώς με τον χρόνο, μεταβάλλοντας συνεχώς και το δείκτη διάθλασης της ατμόσφαιρας. Οι ακτίνες φωτός ενός αστεριού που φθάνουν στα μάτια μας σε διαφορετικές χρονικές στιγμές ακολουθούν ελαφρώς διαφορετικά μονοπάτια, επειδή διέρχονται από ατμοσφαιρικά στρώματα με συνεχώς μεταβαλλόμενο δείκτη διάθλασης. Γι' αυτό τον λόγο, η ένταση και η διεύθυνση των φωτεινών ακτίνων που φθάνουν στα μάτια μας από ένα αστέρι μεταβάλλεται συνεχώς, προκαλώντας το λαμπύρισμα. Αντίστοιχο λαμπύρισμα εμφανίζουν και τα φώτα μίας πόλης, όταν τα παρατηρούμε από αρκετά μεγάλη απόσταση.

Ολική Εσωτερική Ανάκλαση

Το επόμενο σχήμα απεικονίζει μία γυάλινη ημικυκλική πλάκα, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω σε γωνιομετρικό κύκλο.

Μια φωτεινή ακτίνα εισέρχεται με ακτινική διεύθυνση από την κάτω πλευρά της πλάκας. Επειδή η ακτίνα είναι κάθετη στην



επιφάνεια της πλάκας στο σημείο πρόσπτωσης, συνεχίζει να διαδίδεται χωρίς εκτροπή μέσα στην πλάκα και συναντά το πάνω μέρος της στο σημείο M (κέντρο του ημικυκλίου), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-17(α). Εάν παρατηρήσουμε προσεκτικά, θα διαπιστώσουμε ότι εκτός από τη διαθλώμενη ακτίνα εμφανίζεται αμυδρά και μια ανακλώμενη ακτίνα.

Εικόνα 5-17: Όταν μια ακτίνα φωτός προσπίπτει από ένα οπτικά πυκνότερο μέσο σε ένα οπτικά αραιότερο μέσο, για μια οριστική τιμή της γωνίας πρόσπτωσης α_{op} , η γωνία διάθλασης γίνεται ίση με 90° . Για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης παρατηρείται ολική εσωτερική ανάκλαση.

Αν αυξήσουμε σταδιακά την γωνία πρόσπτωσης α της ακτίνας στην επάνω επιφάνεια της πλάκας, θα παρατηρήσουμε ότι αυξάνεται και η γωνία διάθλασης δ . Για μια οριστική τιμή της γωνίας πρόσπτωσης $\alpha = \alpha_{op}$, η γωνία διάθλασης γίνεται ίση με 90° , και η διαθλώμενη ακτίνα γίνεται παράλληλη με την επίπεδη επιφάνεια της γυάλινης πλάκας (Εικόνα 5-17(β)). Για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης $\alpha > \alpha_{op}$, η φωτεινή ακτίνα ανακλάται εξ ολοκλήρου και συνεχίζει να διαδίδεται στη γυάλινη πλάκα (Εικόνα 5-17(γ)). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ολική εσωτερική ανάκλαση**.

Μπορούμε να ερμηνεύσουμε εύκολα το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης, με τη βοήθεια του νόμου του Snell. Οι γωνίες ανάκλασης και διάθλασης συνδέονται με τη σχέση:

$$\frac{\eta\mu\delta}{\eta\mu\alpha} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow \eta\mu\delta = \eta\mu\alpha \frac{n_1}{n_2}$$

Επειδή το ημίτονο της γωνίας δ είναι μικρότερο ή ίσο της μονάδας, προκύπτει:

$$\eta\mu\delta \leq 1 \Rightarrow \eta\mu\alpha \frac{n_1}{n_2} \leq 1 \Rightarrow \eta\mu\alpha \leq \frac{n_2}{n_1} = \eta\mu\alpha_{op}$$

Στην ανωτέρω σχέση, n_1 είναι ο δείκτης διάθλασης του αρχικού μέσου (στο οποίο πραγματοποιείται η ολική ανάκλαση), και n_2 είναι ο δείκτης διάθλασης του τελικού μέσου (στο οποίο διαδίδεται η διαθλώμενη ακτίνα).

Η οριστική γωνία α_{op} είναι η μέγιστη γωνία πρόσπτωσης, για την οποία μπορεί να παρατηρηθεί διάθλαση. Γι' αυτή την τιμή γωνίας πρόσπτωσης, η γωνία διάθλασης λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή τιμή $\delta = 90^\circ$, δηλαδή η διαθλώμενη ακτίνα εξέρχεται παράλληλα με τη διαχωριστική επιφάνεια. Εάν η γωνία πρόσπτωσης υπερβεί την οριστική τιμή, $\alpha > \alpha_{op}$, η προσπίπτουσα ακτίνα υφίσταται ολική ανάκλαση.

Εάν η γωνία πρόσπτωσης μιας ακτίνας, που μεταβαίνει από πυκνότερο σε αραιότερο οπτικό μέσο, υπερβεί την οριστική τιμή α_{op} που αντιστοιχεί στα δύο μέσα, η ακτίνα υφίσταται ολική ανάκλαση.

Για τη μετάβαση από το γυαλί στον αέρα της Εικόνας 5-17 προκύπτει η εξής οριστική γωνία:

$$\eta\mu\alpha_{op} = \frac{n_{αερα}}{n_{γυαλιου}} = \frac{1,0003}{1,33} \Rightarrow \alpha_{op} = 48,8^\circ$$

Επειδή το ημίτονο της ορικής (και οποιασδήποτε) γωνίας είναι μικρότερο ή ίσο της μονάδας, συμπεραίνουμε:

$$\eta\mu\alpha_{op} \leq 1 \Rightarrow \frac{n_2}{n_1} \leq 1 \Rightarrow n_2 \leq n_1.$$

Για να παρατηρηθεί ολική ανάκλαση μιας φωτεινής ακτίνας που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων, πρέπει η ακτίνα να μεταβαίνει από πυκνότερο σε αραιότερο μέσο.

Για παράδειγμα, εάν η ακτίνα μεταβαίνει από τον αέρα σε μια γυάλινη πλάκα ή σε ένα δοχείο με νερό, δεν υφίσταται ολική ανάκλαση.

Παράδειγμα: Η λάμψη του διαμαντιού

Το διαμάντι είναι διαφανές οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης $n = 2,42$.

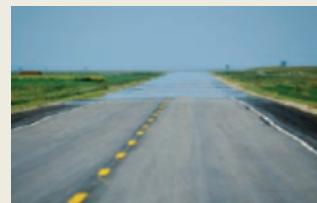
Όταν μια φωτεινή ακτίνα, που διαδίδεται στο εσωτερικό του διαμαντιού, προσπέσει στη διαχωριστική επιφάνεια με τον αέρα, υφίσταται ολική ανάκλαση εάν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από κάποια ορική τιμή. Με κατάλληλη επεξεργασία ενός πολύτιμου λίθου από διαμάντι, οι έδρες του αποκτούν τέτοιο προσανατολισμό, ώστε οι φωτεινές ακτίνες που διαδίδονται στο εσωτερικό του να υφίστανται πολλαπλές ολικές ανακλάσεις, προτού εξέλθουν στον αέρα. Η διαδρομή του φωτός στο εσωτερικό του λίθου προκαλεί τη χαρακτηριστική λάμψη του διαμαντιού.



Ερώτηση: Να προσδιορίσετε την ορική γωνία ολικής εσωτερικής ανάκλασης, για τη μετάβαση μιας κίτρινης φωτεινής ακτίνας από το διαμάντι στον αέρα και στο νερό. Γιατί ένας λίθος από διαμάντι χάνει τη λάμψη του, όταν τοποθετηθεί σε ένα δοχείο με νερό;

Παράδειγμα: Η «βρεγμένη» άσφαλτος το καλοκαίρι

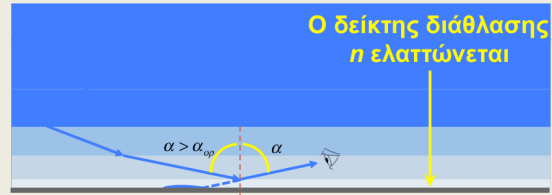
Ίσως να έχετε προσέξει, όταν ταξιδεύετε με το αυτοκίνητο κατά τη διάρκεια μιας ζεστής καλοκαιρινής ημέρας, ότι η άσφαλτος σε μικρή απόσταση από μπροστά σας φαίνεται «βρεγμένη». Η εικόνα του νερού μετατοπίζεται μαζί σας, οπότε αντιλαμβάνεστε ότι είναι οφθαλμαπάτη. Γιατί όμως συμβαίνει αυτό;



Η βρεγμένη επιφάνεια, που εμφανίζεται στο οδόστρωμα σε μια θερμή καλοκαιρινή ημέρα, είναι το είδωλο του ουρανού.

Όταν η άσφαλτος είναι πολύ ζεστή, προκαλεί γρήγορη θέρμανση του στρώματος αέρα που βρίσκεται κοντά στο έδαφος.

Το στρώμα αυτό αποκτά μικρότερη πυκνότητα και μικρότερο δείκτη διάθλασης από τα στρώματα αέρα σε μεγαλύτερο ύψος. Αν και είναι αραιότερο και ελαφρύτερο από τα υπερκείμενα στρώματα αέρα, δεν προλαβαίνει να ανέλθει επειδή η θέρμανσή του είναι γρήγορη. Έτσι, οι φωτεινές ακτίνες, που προέρχονται από ψηλά, συναντούν διαδοχικά στρώματα αέρα με μικρότερο δείκτη διάθλασης.



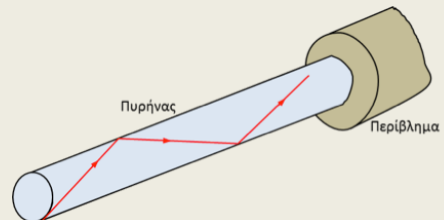
Μια ακτίνα που προέρχεται από τον ουρανό υφίσταται ολική ανάκλαση στα στρώματα αέρα κοντά στην άσφαλτο, και φθάνει στο μάτι του οδηγού.

Ακτίνες από τον ουρανό, που προσπίπτουν στα στρώματα αέρα κοντά στην άσφαλτο υπό αρκετά μεγάλη γωνία, υφίστανται ολική ανάκλαση. Όταν μια τέτοια ακτίνα εισέρχεται στα μάτια ενός οδηγού, αυτός αντιλαμβάνεται στην ευθύγραμμη προέκτασή της (πάνω στον δρόμο) το φανταστικό είδωλο του ουρανού, σαν μια βρεγμένη επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αντικατοπτρισμός**.

Παράδειγμα: Οπτικές ίνες

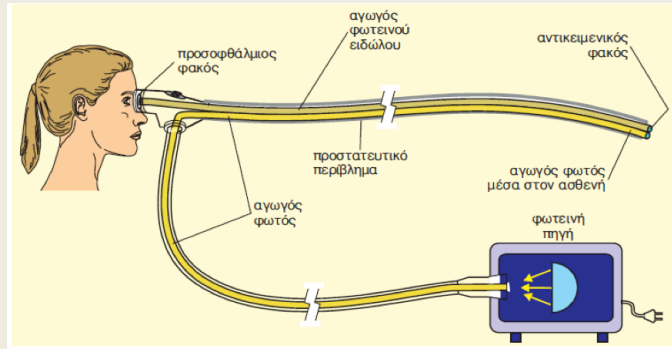
Οι οπτικές ίνες είναι μη ομογενή οπτικά μέσα, που επιτρέπουν τη διάδοση του φωτός στο εσωτερικό τους χρησιμοποιώντας το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης.

Μια οπτική ίνα έχει περίπου ίσο πάχος με μια ανθρώπινη τρίχα. Αποτελείται από δύο οπτικά μέσα, τον πυρήνα και το περίβλημα. Ο πυρήνας έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το περίβλημα. Εάν μια ακτίνα φωτός εισχωρήσει στην οπτική ίνα υπό ένα συγκεκριμένο εύρος γωνιών, υφίσταται διαδοχικές ολικές εσωτερικές ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος, μέχρις ότου εξέλθει από την άλλη άκρη της οπτικής ίνας.



Μια φωτεινή ακτίνα μεταδίδεται κατά μήκος μίας οπτικής ίνας επειδή υφίσταται εσωτερικές ανακλάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος.

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν πολλές εφαρμογές στις τηλεπικοινωνίες και τη μηχανολογία, επειδή κατασκευάζονται από φθηνά υλικά, είναι λεπτές και εύκαμπτες, και επιτρέπουν τη φθηνή μετάδοση ενός μεγάλου αριθμού σημάτων σε μακριές αποστάσεις, χωρίς αλλοίωση των σημάτων λόγω παρεμβολών ή εξασθένησης. Επίσης, χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην ιατρική, επειδή καθιστούν δυνατή τη λήψη εικόνων από το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος. Στην Εικόνα 5-18 απεικονίζεται σχηματικά ένα ενδοσκόπιο, το οποίο συλλέγει εικόνες από το εσωτερικό του ανθρώπινου σώματος (π.χ. το εσωτερικό του στομάχου). Ο οριζόντιος σωλήνας περιέχει μια οπτική ίνα και εισάγεται στο ανθρώπινο σώμα, στην περιοχή που πρόκειται να απεικονισθεί. Η ίνα φωτίζει την περιοχή, και η εικόνα της περιοχής μεταφέρεται μέσω της ίνας στα μάτια του ιατρού και στον υπολογιστή.

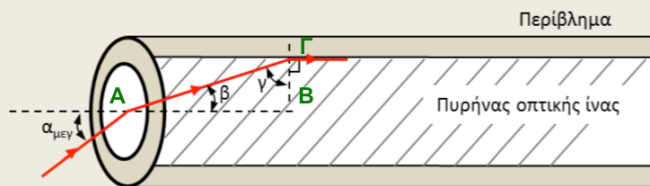


Εικόνα 5-18. Χρήση ενδοσκοπίου στην Ιατρική.

Παράδειγμα: Διάδοση Φωτεινής Ακτίνας σε Οπτική Ίνα.

Ο πυρήνας μιας οπτικής ίνας έχει δείκτη διάθλασης $n_{\text{πυρ}} = 1,53$ και το περίβλημα έχει δείκτη διάθλασης $n_{\text{περ}} = 1,39$. Μια δέσμη φωτεινών ακτίνων εισέρχεται στον πυρήνα της ίνας υπό ένα εύρος γωνιών $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{μεγ}}$. Θα υπολογίσουμε τη μέγιστη γωνία εισδοχής $\alpha_{\text{μεγ}}$, για την οποία όλες οι ακτίνες της δέσμης υφίστανται ολική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος.

Όλες οι ακτίνες της φωτεινής δέσμης, που εισέρχονται με γωνία $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{μεγ}}$, υφίστανται ολική εσωτερική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος.



Μια φωτεινή ακτίνα προσπίπτει στο σημείο A του πυρήνα υπό γωνία α , διαθλάται υπό γωνία β , και προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα-περιβλήματος υπό γωνία γ . Για να υποστεί εσωτερική ανάκλαση στο σημείο Γ, πρέπει η γωνία γ να είναι μεγαλύτερη από την ορική τιμή $\gamma_{\text{ορ}}$.

Από το ορθογώνιο τρίγωνο ABΓ προκύπτει $\gamma = 90^\circ - \beta$. Άρα:

$$\gamma = 90^\circ - \beta \geq \gamma_{\text{ορ}} \Rightarrow \beta \leq 90^\circ - \gamma_{\text{ορ}} \Rightarrow \beta_{\text{μεγ}} = 90^\circ - \gamma_{\text{ορ}}$$

Η ορική γωνία της εσωτερικής ανάκλασης στην επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος είναι:

$$\eta\mu \gamma_{\text{ορ}} = \frac{n_{\text{περ}}}{n_{\text{πυρ}}} \Rightarrow \eta\mu \gamma_{\text{ορ}} = \frac{1,39}{1,53} \Rightarrow \gamma_{\text{ορ}} = 65,3^\circ$$

Συνεπώς:

$$\beta_{\text{μεγ}} = 90^\circ - 65,3^\circ = 24,7^\circ$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Snell στην είσοδο της οπτικής ίνας προκύπτει για τη μέγιστη γωνία $\alpha_{\text{μεγ}}$:

$$\frac{\eta\mu \alpha_{\text{μεγ}}}{\eta\mu \beta_{\text{μεγ}}} = \frac{n_{\text{πυρ}}}{n_{\text{αερα}}} \Rightarrow \eta\mu \alpha_{\text{μεγ}} = \frac{1,53}{1,0003} \eta\mu 24,7^\circ \Rightarrow \alpha_{\text{μεγ}} = 39,7^\circ$$

Όλες οι ακτίνες, που προσπίπτουν στην είσοδο της οπτικής ίνας με γωνίες $0 \leq \alpha \leq 39,7^\circ$, υφίστανται εσωτερική ολική ανάκλαση και παραμένουν στο εσωτερικό του πυρήνα.

Ερωτήσεις

Να συμπληρώσετε τον πιο παρακάτω πίνακα με την ένδειξη Σωστό /Λάθος.

| Πρόταση | Σ/Λ |
|--|-----|
| Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης των φωτεινών ακτίνων σε αυτό. | |
| Ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου μπορεί να εξαρτάται από το χρώμα της φωτεινής ακτίνας που διαδίδεται σε αυτό. | |
| Όταν μια φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από ένα οπτικά αραιότερο σε ένα οπτικά πυκνότερο μέσο, η γωνία διάθλασης είναι πάντοτε μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης. | |
| Όταν μια φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από ένα οπτικά πυκνότερο σε ένα οπτικά αραιότερο μέσο, η γωνία διάθλασης είναι πάντοτε μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης. | |
| Όταν η γωνία πρόσπτωσης μιας φωτεινής ακτίνας στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων μειώνεται, η γωνία διάθλασης αυξάνεται. | |
| Όταν το φως προσπίπτει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων, δεν διαθλάται. | |
| Όταν μια φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από τον αέρα στο νερό, δεν υφίσταται ποτέ ολική εσωτερική ανάκλαση. | |
| Όταν μια φωτεινή ακτίνα μεταβαίνει από το νερό στο γυαλί, είναι δυνατόν να υποστεί ολική εσωτερική ανάκλαση. | |
| Υπό ορισμένες συνθήκες, το φως που προσπίπτει στην επιφάνεια μιας λίμνης μπορεί να υποστεί ολική ανάκλαση. | |

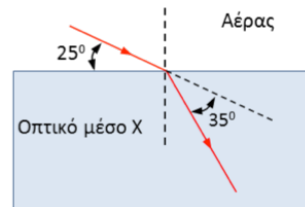
Ασκήσεις

1. Ο δείκτης διάθλασης της γλυκερίνης για το κίτρινο φως είναι ίσος με $n = 1,47$. Να υπολογίσετε την ταχύτητα διάδοσης του κίτρινου φωτός στη γλυκερίνη.

2. Μια φωτεινή ακτίνα κίτρινου χρώματος διαδίδεται στον αέρα και προσπίπτει σε μια υδάτινη επιφάνεια υπό γωνία πρόσπτωσης 50° . Να προσδιορίσετε τις διευθύνσεις της ανακλώμενης και της διαθλώμενης ακτίνας.

3. Μια φωτεινή ακτίνα, που διαδίδεται στον αέρα, προσπίπτει στην επιφάνεια ενός οπτικού μέσου X και διαθλάται όπως στο σχήμα.

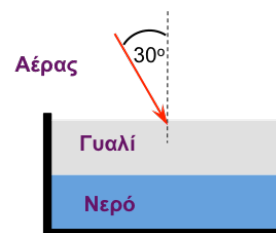
Να υπολογίσετε τον δείκτη διάθλασης του μέσου X.



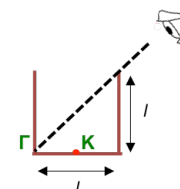
4. Μια γυάλινη πλάκα με παράλληλες έδρες είναι σε επαφή με αέρα από τη μια πλευρά και νερό από την απέναντι πλευρά, όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα. Μια φωτεινή ακτίνα, που διαδίδεται αρχικά στον αέρα, προσπίπτει στη γυάλινη πλάκα υπό γωνία πρόσπτωσης 30° .

A. Να σχεδιάσετε την πορεία της φωτεινής ακτίνας μετά από την είσοδό της στην πλάκα. Όταν η ακτίνα εξέλθει στο νερό, θα είναι παράλληλα μετατοπισμένη ως προς την προσπίπτουσα ακτίνα;

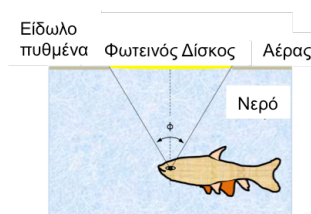
B. Να υπολογίσετε ποια πρέπει να είναι η *ελάχιστη* γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στην επιφάνεια αέρα-γυαλιού, έτσι ώστε η ακτίνα να μην υποστεί ολική εσωτερική ανάκλαση στην επιφάνεια γυαλιού-νερού.



5. Στο διπλανό σχήμα, ένας παρατηρητής βρίσκεται σε τέτοια θέση ώστε μόλις να βλέπει τη γωνία του άδειου δοχείου. Όταν το δοχείο γεμίσει εντελώς με κάποιο διαφανές υγρό, ο παρατηρητής *χωρίς να μετακινηθεί*, διακρίνει το νόμισμα που είναι κολλημένο στο κέντρο K του πυθμένα. Να υπολογίσετε τον δείκτη διάθλασης του υγρού.



6. Ένα ψάρι βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και βλέπει προς την επιφάνεια του νερού. Να εξηγήσετε γιατί το ψάρι βλέπει στην επιφάνεια ένα φωτεινό δίσκο και γύρω από τον δίσκο βλέπει την εικόνα του πυθμένα.



Προτεινόμενα Θέματα Εργασιών

1. Να κατασκευάσετε έναν σκοτεινό θάλαμο.
2. Να μελετήσετε τη χρήση καμπύλων κατόπτρων σε συσκευές της καθημερινής ζωής και την αστρονομία.
3. Να εξερευνήσετε τις εφαρμογές των οπτικών ινών στην ιατρική ή στις τηλεπικοινωνίες.

ΕΝΟΤΗΤΑ 5B: ΔΙΑΔΟΣΗ ΦΩΤΟΣ ΣΕ ΠΡΙΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΦΑΚΟΥΣ

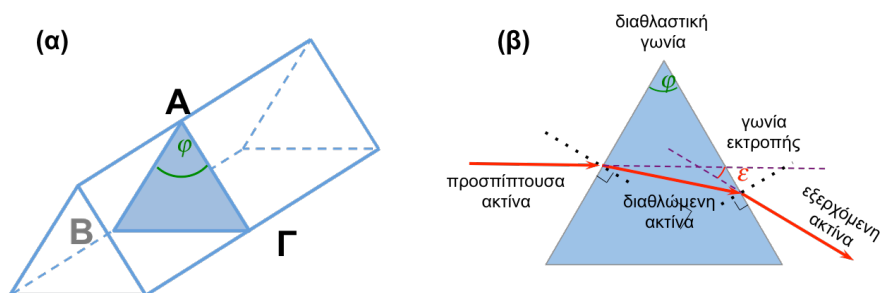
Στην Ενότητα 5B:

- Μελετούμε τη διάδοση μιας φωτεινής ακτίνας μέσα από πρίσμα.
- Δείχνουμε πειραματικά ότι ένα πρίσμα αναλύει το λευκό φως σε απλούστερες (μονοχρωματικές) ακτινοβολίες.
- Διακρίνουμε τους φακούς σε συγκλίνοντες και αποκλίνοντες.
- Εξάγουμε την εξίσωση των λεπτών φακών.
- Ορίζουμε το πραγματικό και το φανταστικό είδωλο ενός φωτεινού αντικειμένου.
- Ορίζουμε τη μεγέθυνση ενός φακού.
- Μελετούμε γραφικά και με την εξίσωση των λεπτών φακών τον σχηματισμό ειδώλου, και τη μεγέθυνση από συγκλίνοντες και αποκλίνοντες φακούς.
- Περιγράφουμε το μάτι σαν οπτικό σύστημα.
- Συζητούμε την πορεία ακτίνων και το σχηματισμό ειδώλου στο φυσιολογικό μάτι.
- Συζητούμε το σχηματισμό ειδώλου στη μη φυσιολογική όραση (μυωπία, υπερμετρωπία, πρεσβυωπία).
- Μαθαίνουμε ότι η μυωπία διορθώνεται με χρήση αποκλίνοντος φακού.
- Μαθαίνουμε ότι η πρεσβυωπία διορθώνεται με χρήση συγκλίνοντος φακού.
- Συζητούμε απλά οπτικά όργανα (φωτογραφική μηχανή, μεγεθυντικός φακός, μικροσκόπιο).

Διάδοση του Φωτός σε Οπτικό Πρίσμα

Ορισμός και Χαρακτηριστικά του Οπτικού Πρίσματος

Ένα οπτικό μέσο που περιορίζεται από δύο μη παράλληλες επίπεδες επιφάνειες ονομάζεται **πρίσμα** (Εικόνα 5-19). Οι επιφάνειες του πρίσματος ονομάζονται **έδρες**, η τομή δύο εδρών ονομάζεται **ακμή**, και η διέδρη γωνία μεταξύ δύο εδρών ονομάζεται **διαθλαστική γωνία**. Κάθε επίπεδο κάθετο σε μία ακμή τέμνει το πρίσμα κατά μια επιφάνεια, που ονομάζεται **κύρια τομή** του πρίσματος.



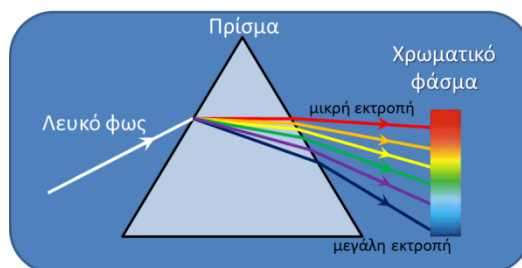
Εικόνα 5-19. (α) Τριγωνικό πρίσμα, (β) Διάθλαση μιας φωτεινής ακτίνας από το πρίσμα.

Η Εικόνα 5-19(α) αναπαριστά ένα πρίσμα με τριγωνική κύρια τομή (τρίγωνο ΑΒΓ). Η γωνία φ είναι η διαθλαστική γωνία του πρίσματος. Η Εικόνα 5-19(β) απεικονίζει την πορεία μιας ακτίνας, που προσπίπτει στο πρίσμα επάνω στο επίπεδο της κύριας τομής του, διαθλάται και αναδύεται σε διαφορετική διεύθυνση. Από τον πρώτο νόμο της διάθλασης προκύπτει ότι *η προσπίπτουσα, διαθλωμένη και εξερχόμενη ακτίνα ανήκουν στο επίπεδο της κύριας τομής του πρίσματος*.

Η γωνία ε , που σχηματίζεται από τις διευθύνσεις της προσπίπτουσας και της εξερχόμενης ακτίνας, ονομάζεται **γωνία εκτροπής**. Η γωνία αυτή εξαρτάται από τους δείκτες διάθλασης του αρχικού μέσου και του πρίσματος, τη γωνία της προσπίπτουσας ακτίνας, και τη διαθλαστική γωνία του πρίσματος.

Ανάλυση του Λευκού Φωτός από Πρίσμα: Το Πείραμα του Νεύτωνα

Ο Νεύτωνα ασχολήθηκε συστηματικά με τη μελέτη των ιδιοτήτων του φωτός. Το 1666 μελέτησε την ανάλυση του φωτός από γυάλινα πρίσματα, χρησιμοποιώντας μια διάταξη που απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 5-20.

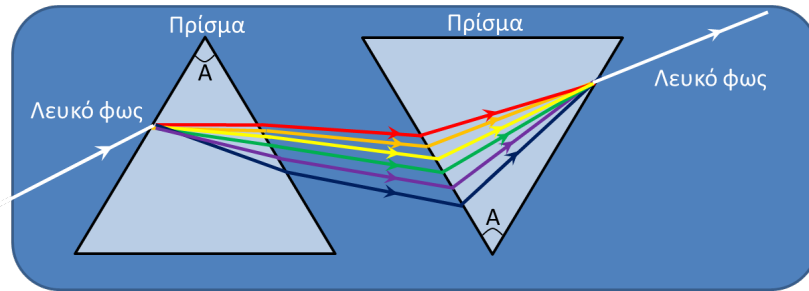


Εικόνα 5-20. Ανάλυση του λευκού φωτός από πρίσμα (πείραμα του Νεύτωνα).

Τοποθετώντας ένα πρίσμα στην πορεία μιας δέσμης παράλληλων ακτίνων ηλιακού (λευκού) φωτός, ο Νεύτωνα παρατήρησε ότι η δέσμη αναλύονταν σε ακτίνες διαφορετικού χρώματος, οι οποίες σχημάτιζαν μια ταινία χρωμάτων με τη σειρά κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, γαλάζιο, μπλε και ιώδες (**χρωματικό φάσμα**). Επειδή αυτά τα χρώματα εμφανίζονται (με την ίδια σειρά) στο ουράνιο τόξο, ονομάζονται και **χρώματα της ίριδας**.

Παρεμβάλλοντας ένα δεύτερο πρίσμα στην πορεία των ακτίνων που είχαν δημιουργηθεί από το αρχικό πρίσμα, ο Νεύτωνα απέδειξε ότι *δεν αναλύονταν σε επιμέρους ακτινοβολίες*. Όταν μια φωτεινή ακτίνα δεν αναλύεται σε επιμέρους ακτίνες κατά τη διάθλασή της από ένα πρίσμα, λέμε ότι είναι **απλή** ή **μονοχρωματική**. Αντίθετα, το λευκό φως είναι **σύνθετο**.

Ο Νεύτωνα έδειξε επίσης ότι *οι έγχρωμες φωτεινές ακτίνες προϋπήρχαν στη λευκή ακτίνα* και δεν δημιουργούνταν από το πρίσμα. Για να το αποδείξει αυτό, τοποθέτησε ένα δεύτερο πανομοιότυπο, *αντεστραμμένο* πρίσμα στην πορεία της πολύχρωμης δέσμης που αναδύονταν από το πρώτο πρίσμα (Εικόνα 5-21). Οι έγχρωμες φωτεινές ακτίνες ακολουθούσαν αντίστροφη πορεία στο δεύτερο πρίσμα, και αναδύονταν σχηματίζοντας μια ακτίνα λευκού φωτός.



Εικόνα 5-21. Εάν η αναδυόμενη δέσμη διέλθει από ένα πανομοιότυπο, αντεστραμμένο πρίσμα, δημιουργεί μία λευκή εξερχόμενη δέσμη.

Ο Νεύτωνας επιβεβαίωσε αυτό το συμπέρασμα με τη βοήθεια της διάταξης της διπλής εικόνας, γνωστής ως «τροχός του Νεύτωνα». Η διάταξη αυτή αποτελείται από έναν κυκλικό δίσκο, χωρισμένο σε τομείς βαμμένους με τα επτά χρώματα της ίριδας. Όταν ο δίσκος περιστρέφεται με μεγάλη ταχύτητα, φαίνεται λευκός.



Τροχός του Νεύτωνα.

Αυτό συμβαίνει επειδή το ανθρώπινο μάτι δεν αντιλαμβάνεται μεταβολές σε μια εικόνα, εάν αυτές διαρκούν λιγότερο από $\sim 0,1\text{ s}$ (μεταίσθημα). Εάν ο δίσκος περιστρέφεται αρκετά γρήγορα, σε χρονικό διάστημα $0,1\text{ s}$ διέρχονται από ένα σημείο του χώρου όλοι οι τομείς. Το μάτι έχει την εντύπωση ότι το φως που προέρχεται από αυτό το σημείο είναι λευκό, επειδή περιέχει ακτίνες με όλα τα χρώματα της ίριδας.

Ερμηνεία της Ανάλυσης του Λευκού Φωτός από Πρίσμα

Όπως αναφέραμε στα προηγούμενα, ο δείκτης διάθλασης ενός οπτικού μέσου εξαρτάται γενικά από το χρώμα της ακτινοβολίας. Ο Πίνακας 5-2 περιέχει τις τιμές του δείκτη διάθλασης ακτίνων διαφορετικού χρώματος για έναν τύπο γυαλιού, που χρησιμοποιείται σε φακούς ακριβείας. Παρατηρήστε ότι ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού αυξάνεται, και η ταχύτητα διάδοσης του φωτός ελαττώνεται από το κόκκινο προς το ιώδες.

Πίνακας 5-2. Δείκτης διάθλασης γυαλιού crown Schott BK-7.

| Χρώμα | Δείκτης Διάθλασης |
|-----------|-------------------|
| κόκκινο | 1,514 |
| πορτοκαλί | 1,515 |
| κίτρινο | 1,517 |
| πράσινο | 1,519 |
| γαλάζιο | 1,522 |
| μπλε | 1,524 |
| ιώδες | 1,528 |

Όταν μια δέσμη λευκού φωτός εισέρχεται σε ένα πρίσμα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-21, οι επιμέρους μονοχρωματικές ακτίνες εκτρέπονται σε διαφορετικό βαθμό, επειδή έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης. Επειδή η εκτροπή αυξάνεται με το δείκτη διάθλασης, οι ακτίνες κόκκινου χρώματος εκτρέπονται λιγότερο, και αυτές με ιώδες χρώμα εκτρέπονται περισσότερο.

Ένθετο: Γωνίες Πρόσπτωσης, Διάθλασης και Εκτροπής Ακτίνας που Διαδίδεται σε Πρίσμα.

Το διπλανό σχήμα απεικονίζει την πορεία μιας φωτεινής ακτίνας KB, η οποία προσπίπτει **υπό γωνία πρόσπτωσης** α_1 στο σημείο B ενός τριγωνικού πρίσματος, με διαθλαστική γωνία φ , και εξέρχεται από το σημείο Δ.

Η προσπίπτουσα ακτίνα KB διαθλάται στο σημείο B, με γωνία διάθλασης δ_1 . Επειδή οι ευθείες BΓ και ΓΔ είναι **κάθετες** στις ακμές του πρίσματος, ισχύει

$$\widehat{A\hat{B}\Gamma} = \widehat{A\hat{\Delta}\Gamma} = 90^\circ$$

Έτσι, από το τετράπλευρο ABΓΔ προκύπτει:

$$\widehat{B\hat{\Gamma}\Delta} = 360^\circ - \widehat{A\hat{B}\Gamma} - \widehat{A\hat{\Delta}\Gamma} - \varphi = 180^\circ - \varphi.$$

Από το τρίγωνο BΓΔ συμπεραίνουμε ότι η γωνία πρόσπτωσης της ακτίνας στο σημείο Δ ισούται με:

$$\widehat{B\hat{\Delta}\Gamma} = 180^\circ - \delta_1 - (180^\circ - \varphi) = \varphi - \delta_1.$$

Παρατηρήστε ότι, όσο μικρότερη είναι η γωνία δ_1 της διάθλασης από την πρώτη επιφάνεια του πρίσματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η γωνία πρόσπτωσης στη δεύτερη επιφάνεια, $\varphi - \delta_1$. Όπως προκύπτει από το νόμο του Snell, η γωνία δ_1 ελαττώνεται με το δείκτη διάθλασης του πρίσματος:

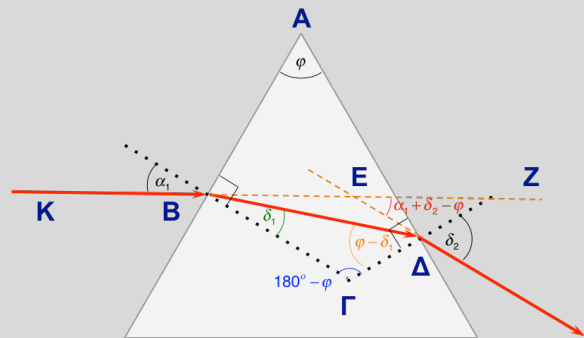
$$\eta\mu \delta_1 = (n_{\alphaερα} / n_{\gammaναλιου}) \eta\mu \alpha_1.$$

Συμπέρασμα:

Όταν μια παράλληλη δέσμη από διαφορετικές μονοχρωματικές ακτίνες προσπίπτει στο πρίσμα **υπό δεδομένη γωνία** α_1 , οι ακτίνες στις οποίες αντιστοιχεί **μεγαλύτερος δείκτης διάθλασης** $n_{\gammaναλιου}$ διαθλώνονται με **μικρότερη γωνία διάθλασης** δ_1 , προσπίπτουν στη δεύτερη έδρα υπό **μεγαλύτερη γωνία** $\varphi - \delta_1$, και αναδύονται **υπό μεγαλύτερη γωνία** δ_2 .

Στην περίπτωση μιας λευκής δέσμης φωτός, οι ιώδεις ακτίνες αναδύονται με τη μεγαλύτερη γωνία και οι κόκκινες με τη μικρότερη.

Η συνολική **γωνία εκτροπής** $\varepsilon = \widehat{Z\hat{E}\Delta}$ σχηματίζεται από τη διεύθυνση της αναδύομενης ακτίνας και της προσπίπτουσας ακτίνας. Από το σχήμα προκύπτει ότι η γωνία $\widehat{Z\hat{E}\Delta}$ είναι εξωτερική γωνία του τριγώνου BEΔ, οπότε ισούται με το άθροισμα των απέναντι εσωτερικών γωνιών:



$$\varepsilon = \widehat{Z\hat{E}\Delta} = \widehat{E\hat{B}\Delta} + \widehat{E\hat{\Delta}B} = [\alpha_1 - \delta_1] + [\delta_2 - (\varphi - \delta_1)] \Rightarrow$$

$$\varepsilon = \alpha_1 + \delta_2 - \varphi$$

Επειδή η γωνία εκτροπής ε μεγαλώνει με τη γωνία διάθλασης δ_2 , ακτίνες που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης $n_{\gamma\omega\lambda\iota\omicron\upsilon}$ εξέρχονται με μεγαλύτερη γωνία εκτροπής.

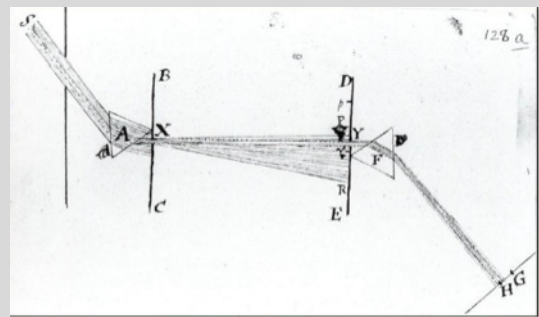
Εάν αυξηθεί η διαθλαστική γωνία του πρίσματος, φ , αυξάνεται και η γωνία δ_2 . Αποδεικνύεται ότι η γωνία εκτροπής ε αυξάνεται με τη διαθλαστική γωνία φ .

Ένθετο: Από το βιβλίο «Opticks» του Νεύτωνα

Από τις δημοσιεύσεις του Νεύτωνα, και κυρίως από όσα αναφέρει στο βιβλίο του «Opticks», γνωρίζουμε επακριβώς την πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε για την ανάλυση του φωτός, καθώς και τα αποτελέσματα που κατέγραψε. Τα λόγια του ίδιου του Νεύτωνα είναι χαρακτηριστικά: «Στα 1666 προμηθεύτηκα ένα γυάλινο τριγωνικό πρίσμα. Αφού συσκότισα το δωμάτιο κι έκανα μια μικρή τρύπα στο παραθυρόφυλλο, για να αφήνω να περνά μια κατάλληλη ποσότητα από ηλιακό φως, τοποθέτησα το πρίσμα μου έτσι ώστε το φως που διαθλάται να χτυπά στον απέναντι τοίχο. Ήταν μια πολύ ευχάριστη διασκέδαση, να παρατηρείς τα ζωηρά κι έντονα χρώματα που παράγονται με αυτόν τον τρόπο.»



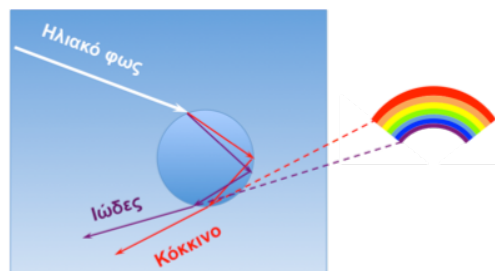
Πίνακας που αναπαριστά το πείραμα του Νεύτωνα.



Πρωτότυπο σχήμα από το βιβλίο «Opticks».

Ερμηνεία του Σχηματισμού του Ουρανίου Τόξου

Το ουράνιο τόξο, που παρατηρείται συχνά στην ατμόσφαιρα μετά από βροχή (Εικόνα 5-22), οφείλεται στην ανάλυση του ηλιακού φωτός από εκατομμύρια μικροσκοπικά σταγονίδια νερού που δρουν σαν πρίσματα. Ο Νεύτωνα χρησιμοποίησε τα συμπεράσματά του για την ανάλυση φωτός από πρίσματα και εξήγησε το σχηματισμό του ουρανίου τόξου.



Πηγή: http://all-free-download.com/free-photos/download/rainbow_beautiful_devon_263552.html

Εικόνα 5-22. **Αριστερά:** Ουράνιο τόξο που σχηματίζεται μετά από βροχή. **Δεξιά:** Ανάλυση του ηλιακού φωτός από μία μεμονωμένη σταγόνα βροχής

Το δεξιό σχήμα της Εικόνας 5-22 απεικονίζει την ανάλυση μιας ακτίνας ηλιακού φωτός από μια μεμονωμένη σφαιρική σταγόνα νερού. Ένα ποσοστό του φωτός της ακτίνας διαθλάται μέσα στο νερό της σταγόνας και αναλύεται στα χρώματα του ίριδας, με το κόκκινο χρώμα να παρουσιάζει τη μικρότερη γωνία διάθλασης, και το ιώδες τη μεγαλύτερη. Ένα ποσοστό των ακτίνων ανακλάται στην πίσω επιφάνεια της σταγόνας, διαθλάται στο κάτω μέρος της σταγόνας και εξέρχεται στην ατμόσφαιρα. Κατά τη δεύτερη αυτή διάθλαση, αυξάνεται ακόμη περισσότερο η εκτροπή των ακτίνων, ανάλογα με το χρώμα τους. Οι κόκκινες ακτίνες υφίστανται τη μικρότερη συνολική εκτροπή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-22. Γι' αυτό τον λόγο, οι κόκκινες ακτίνες δίνουν την εντύπωση ότι προέρχονται από υψηλότερα σημεία (σχηματίζουν το επάνω μέρος του ουράνιου τόξου).

Το φως αναδύεται από την ίδια μεριά της σταγόνας, στην οποία είχε προσπέσει αρχικά. Γι αυτό, το ουράνιο τόξο εμφανίζεται μόνο όταν οι συνθήκες είναι κατάλληλες: ο ήλιος πρέπει να βρίσκεται πίσω από τον παρατηρητή και τα σταγονίδια της βροχής που αναλύουν το φως του ήλιου πρέπει να βρίσκονται μπροστά του. Επειδή χρειάζεται έντονο φως για να σχηματιστεί το ουράνιο τόξο, παρατηρείται συνήθως όταν η βροχή έχει σταματήσει.

Ερωτήσεις Κατανόησης

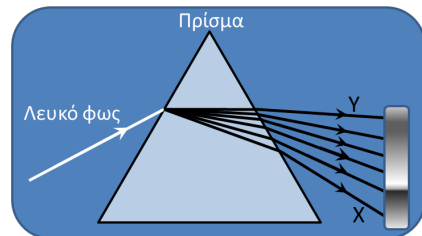
Να συμπληρώσετε τον παρακάτω πίνακα με την ένδειξη Σωστό / Λάθος.

| Ερώτηση | Σ/Λ |
|--|-----|
| Μια δέσμη λευκού φωτός αναλύεται από ένα γυάλινο πρίσμα, επειδή αποτελείται από μονοχρωματικές ακτίνες που διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα στο γυαλί. | |
| Όταν μια παράλληλη δέσμη φωτεινών ακτίνων με τα χρώματα της ίριδας προσπίπτει σε γυάλινο πρίσμα, η εκτροπή των ακτίνων αυξάνεται από το κόκκινο στο ιώδες χρώμα. | |
| Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο γυαλί αυξάνεται από το κόκκινο στο ιώδες χρώμα. | |

| | |
|---|--|
| Ο δείκτης διάθλασης του γυαλιού αυξάνεται από το κόκκινο προς το ιώδες χρώμα. | |
| Μια μονοχρωματική ακτίνα δεν αναλύεται σε περαιτέρω χρώματα. | |
| Κατά τη γρήγορη περιστροφή του χρωματικού δίσκου του Νεύτωνα, μας δημιουργείται η αίσθηση του λευκού φωτός. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται οφθαλμαπάτη. | |

Ασκήσεις

- Κατά την ανάλυση του λευκού φωτός από ένα οπτικό πρίσμα, ποιο χρώμα διαθλάται περισσότερο και ποιο λιγότερο;
- Όταν μια ακτίνα λευκού φωτός διέρχεται μέσα από ένα πρίσμα, αναδύεται ως μία χρωματιστή ταινία.
 - Να ονομάσετε το φαινόμενο που συνδέεται με το διαχωρισμό του λευκού φωτός στα διάφορα χρώματα.
 - Πως ονομάζεται η χρωματιστή ταινία φωτός που δημιουργείται;
 - Ποιο χρώμα του φωτός σημειώνεται με X, και ποιο χρώμα σημειώνεται με Y στα δύο άκρα της ταινίας του φωτός που αναδύεται από το πρίσμα;
- Πως θα διαπιστώσουμε εάν το φως που εξέρχεται από μία συσκευή laser είναι απλό (μονοχρωματικό) ή σύνθετο;
- Αν το φως διαδιδόταν μέσα στις σταγόνες της βροχής με την ίδια ταχύτητα που διαδίδεται στον αέρα, θα παρατηρούσαμε το ουράνιο τόξο;



Διάδοση του Φωτός μέσα σε Φακούς

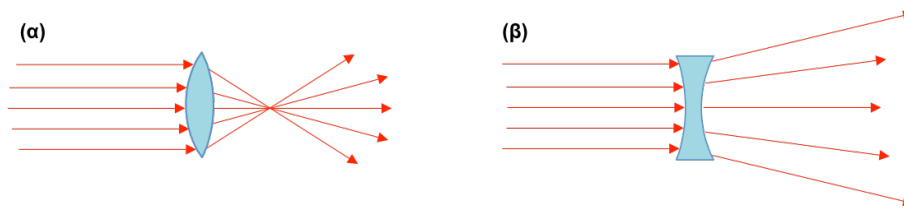
Η πιο διαδεδομένη οπτική συσκευή είναι οι φακοί. Τα διορθωτικά γυαλιά που βοηθούν καθημερινά εκατομμύρια ανθρώπους να βελτιώσουν την όρασή τους, χρησιμοποιούν φακούς. Πολλές άλλες συσκευές της καθημερινότητάς μας όπως φωτογραφικές μηχανές,

βιντεοκάμερες, μικροσκόπια, τηλεσκόπια, κυάλια, περιέχουν φακούς ως βασικό τους εξάρτημα. Το ανθρώπινο μάτι αποτελείται από διαφανή τμήματα που λειτουργούν ως φακοί.

Οπτικός **φακός** ονομάζεται ένα διαφανές σώμα, το οποίο περιορίζεται από δύο καμπυλωμένες επιφάνειες, ή από μία καμπυλωμένη και μία επίπεδη επιφάνεια. Οι καμπυλωμένες επιφάνειες μπορούν να αποτελούν τμήματα σφαιρών (σφαιρικός φακός), κυλίνδρου (κυλινδρικός φακός), ή άλλων στερεών σχημάτων. Όπως και τα πρίσματα, οι φακοί μεταβάλλουν την πορεία των φωτεινών ακτίνων που διέρχονται από το εσωτερικό τους. Γι' αυτό τον λόγο έχουν ευρεία εφαρμογή στα διάφορα οπτικά όργανα. Στις επόμενες ενότητες θα μελετήσουμε τις ιδιότητες των **σφαιρικών φακών**.

Είδη Φακών

Όταν μια δέσμη παράλληλων ακτίνων προσπίπτει σε ένα φακό, οι ακτίνες αναδύονται σε διευθύνσεις που είτε πλησιάζουν μεταξύ τους (συγκλίνουν), είτε απομακρύνονται (αποκλίνουν), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-23. Με βάση την εκτροπή που προκαλούν στη δέσμη των ακτίνων, διακρίνουμε τους φακούς σε **συγκλίνοντες** και **αποκλίνοντες**.

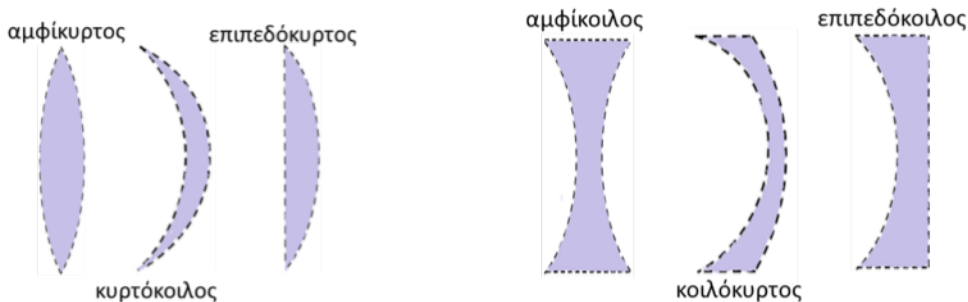


Εικόνα 5-23. (α) Ο συγκλίνων φακός προκαλεί συγκέντρωση μιας δέσμης παράλληλων ακτίνων σε ένα σημείο. (β) Ο αποκλίνων φακός προκαλεί διεύρυνση της δέσμης.

Διάφοροι συγκλίνοντες και αποκλίνοντες σφαιρικοί φακοί απεικονίζονται στην Εικόνα 5-24. Οι επιφάνειες που καθορίζουν τα όρια ενός φακού μπορούν να συνδυάζονται με διάφορους τρόπους. Γενικά, οι συγκλίνοντες φακοί είναι παχύτεροι στο κέντρο και λεπτότεροι στα άκρα τους, ενώ οι αποκλίνοντες φακοί είναι λεπτότεροι στο κέντρο και παχύτεροι στα άκρα τους.

(α) Συγκλίνοντες φακοί

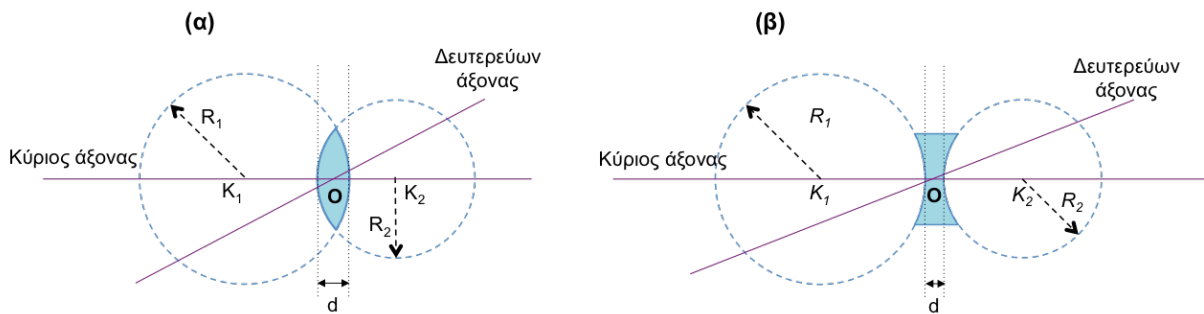
(β) Αποκλίνοντες φακοί



Εικόνα 5-24. (α) Συγκλίνοντες και (β) Αποκλίνοντες φακοί

Χαρακτηριστικά Γεωμετρικά Στοιχεία ενός Απλού Σφαιρικού Φακού

Τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν έναν απλό σφαιρικό φακό απεικονίζονται στην Εικόνα 5-25.



Εικόνα 5-25. Ένας απλός (α) συγκλίνων ή (β) αποκλίνων σφαιρικός φακός (γαλάζιο σώμα) περιορίζεται από δύο σφαιρικές επιφάνειες, με κέντρα K_1 και K_2 και ακτίνες καμπυλότητας R_1 και R_2 .

Οι **ακτίνες καμπυλότητας** R_1 και R_2 είναι οι ακτίνες των σφαιρικών επιφανειών που καθορίζουν τα όρια του φακού. Εάν μία από τις δύο επιφάνειες είναι επίπεδη, η αντίστοιχη ακτίνα καμπυλότητας είναι άπειρη. Εάν το πάχος d του φακού είναι μικρό συγκριτικά με τις ακτίνες καμπυλότητας των επιφανειών του, ο φακός είναι **λεπτός**.

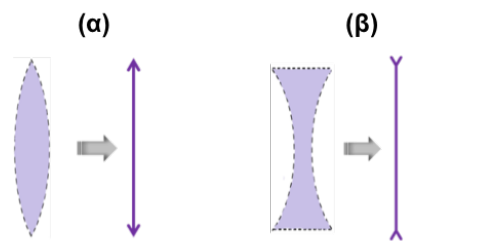
Ο **κύριος άξονας** είναι η ευθεία που διέρχεται από τα κέντρα καμπυλότητας K_1 και K_2 των επιφανειών του φακού.

Το **οπτικό κέντρο** O είναι ένα χαρακτηριστικό σημείο του κύριου άξονα του φακού, με την ιδιότητα ότι οποιαδήποτε φωτεινή ακτίνα διέρχεται από αυτό το σημείο, εξέρχεται από το φακό *χωρίς μεταβολή* στη διεύθυνσή της. Η θέση του οπτικού κέντρου ενός φακού εξαρτάται από το σχήμα των επιφανειών του και το πάχος του. Εάν ο φακός είναι λεπτός, το οπτικό κέντρο του συνήθως συμπίπτει με το γεωμετρικό κέντρο του.

Δευτερεύων άξονας είναι κάθε ευθεία που περνάει από το οπτικό κέντρο O του φακού και δεν συμπίπτει με τον κύριο άξονα. Ένας φακός έχει άπειρους δευτερεύοντες άξονες.

Συμβολισμός Λεπτών Φακών

Η Εικόνα 5-26 απεικονίζει ένα συνηθισμένο συμβολισμό για συγκλίνοντες και αποκλίνοντες φακούς. Οι αιχμές των βελών δηλώνουν τη θέση των βάσεων των πρισμάτων, από τα οποία θεωρείται ότι αποτελείται ένας συγκλίνων ή αποκλίνων φακός.



Εικόνα 5-26: Συνηθισμένος συμβολισμός για (α) συγκλίνοντα και (β) αποκλίνοντα λεπτό φακό

Διάθλαση Φωτεινής Δέσμης από Φακούς

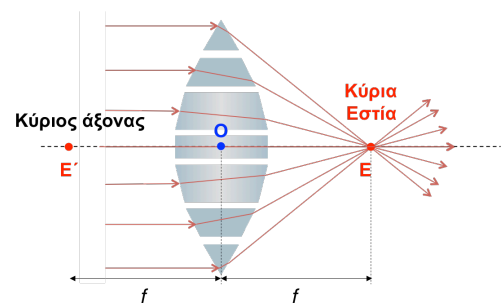
Η διάθλαση των φωτεινών ακτίνων, που διέρχονται από έναν φακό, εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης του υλικού του, τον δείκτη διάθλασης του μέσου που τον περιβάλλει, και το σχήμα των επιφανειών του. Στις επόμενες ενότητες μελετούμε τη διάθλαση φωτός από **λεπτούς συγκλίνοντες** και **αποκλίνοντες** φακούς.

Συγκλίνοντες Φακοί

Η Εικόνα 5-27 απεικονίζει ένα συγκλίνοντα σφαιρικό φακό. Μια δέσμη φωτεινών ακτίνων προσπίπτει *παράλληλα στον κύριο άξονα* του φακού.

Για να μελετήσουμε την πορεία των ακτίνων, χωρίζουμε το φακό σε τμήματα, όπως φαίνεται στην εικόνα. Το κεντρικό τμήμα έχει περίπου σχήμα *παραλληλεπίπεδης πλάκας*. Οι ακτίνες που διέρχονται από το κεντρικό τμήμα *δεν υφίστανται εκτροπή*, επειδή προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνειά του.

Τα υπόλοιπα τμήματα έχουν σχήμα πρίσματος, κατά προσέγγιση. Η διαθλαστική γωνία αυτών των τμημάτων, και η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης, αυξάνονται από το κέντρο προς τα άκρα του φακού. Γι' αυτό, η εκτροπή των ακτίνων της δέσμης αυξάνεται από το κέντρο προς τα άκρα.



Εικόνα 5-27. Οι ακτίνες που προσπίπτουν παράλληλα στον κύριο άξονα του φακού συγκεντρώνονται στην κύρια εστία.

Εάν ο φακός είναι **λεπτός**, αποδεικνύεται ότι **οι αναδυόμενες ακτίνες τέμνονται σε ένα συγκεκριμένο σημείο Ε**, πάνω στον κύριο άξονα του φακού. Το σημείο αυτό ονομάζεται κύρια εστία του φακού.

Όταν μία δέσμη ακτίνων προσπίπτει παράλληλα στον κύριο άξονα ενός συγκλίνοντος φακού, οι αναδυόμενες ακτίνες συγκεντρώνονται σε ένα σημείο του κύριου άξονα, που ονομάζεται **κύρια εστία** του φακού.

Η απόσταση της κύριας εστίας από το οπτικό κέντρο του φακού ονομάζεται **εστιακή απόσταση f** του φακού.

Εάν η δέσμη προσπέσει παράλληλα στον κύριο άξονα του φακού από τη *δεξιά επιφάνεια* του φακού, θα διέλθει από το σημείο **Ε'** του κύριου άξονα, αριστερά του οπτικού κέντρου **Ο** (Εικόνα 5-27). Το σημείο αυτό βρίσκεται στην ίδια απόσταση f και αποτελεί **δεύτερη κύρια εστία**.

Εξίσωση του Κατασκευαστή Φακών

Ένας φακός εκτρέπει περισσότερο το φως (είναι πιο ισχυρός) όταν η εστιακή του απόσταση f είναι μικρή. Η εστιακή απόσταση ενός φακού, που περιβάλλεται από αέρα, συνδέεται με τον δείκτη διάθλασης n του υλικού του φακού, και τις ακτίνες καμπυλότητας R_1 και R_2 των επιφανειών του, με την πιο κάτω εξίσωση:

Εξίσωση του Κατασκευαστή Φακών

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

Από την εξίσωση αυτή, φαίνεται ότι η εστιακή απόσταση f είναι **μικρή** όταν το υλικό του φακού έχει **μεγάλο δείκτη διάθλασης**. Ένας φακός από γυαλί ($n=1,52$) προκαλεί μεγαλύτερη εκτροπή των ακτίνων, από μία σταγόνα νερού με το ίδιο σχήμα ($n=1,33$).

Επίσης, η εστιακή απόσταση είναι **μικρή** όταν οι ακτίνες καμπυλότητας του φακού είναι μικρές, δηλαδή ο φακός γίνεται «πιο στρογγυλός». Αντίθετα, ένας λεπτός επίπεδος φακός συμπεριφέρεται ως παραλληλεπίπεδη πλάκα, που δεν εκτρέπει τις φωτεινές ακτίνες.

Από την εξίσωση του κατασκευαστή φακών, συμπεραίνουμε ότι ο φακός έχει μία μοναδική εστιακή απόσταση, που καθορίζεται **και από τις δύο ακτίνες καμπυλότητας**. Συνεπώς, οι δύο εστίες του φακού απέχουν το ίδιο από το οπτικό του κέντρο.

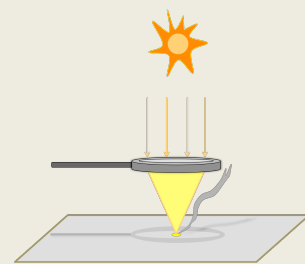
Ένας φακός έχει δύο κύριες εστίες, που είναι **συμμετρικά τοποθετημένες ως προς το οπτικό κέντρο** του φακού, ακόμη και εάν οι δύο επιφάνειες του φακού έχουν διαφορετικό σχήμα.

Πειραματικός Προσδιορισμός της Κύριας Εστίας Συγκλίνοντος Φακού

Όπως φαίνεται στο διπλανό σχήμα, μπορούμε να προσδιορίσουμε την κύρια εστία ενός συγκλίνοντος φακού, εάν προσανατολίσουμε τον κύριο άξονά του προς τον ήλιο και παρεμβάλλουμε ένα φύλλο χαρτιού από την άλλη πλευρά, με το επίπεδό του χαρτιού κάθετο στον κύριο άξονα του φακού. Επειδή ο ήλιος είναι πολύ μακριά, οι ηλιακές ακτίνες που προσπίπτουν στο χαρτί είναι παράλληλες μεταξύ τους και με τον κύριο άξονα του φακού.

Εάν μετακινήσουμε το χαρτί κατά μήκος του άξονα του φακού, θα παρατηρήσουμε ότι σε κάποια συγκεκριμένη απόσταση από το φακό οι ηλιακές ακτίνες θα συγκεντρώνονται πάνω σε ένα σημείο του χαρτιού. Η απόσταση αυτή *ισούται με την εστιακή απόσταση του φακού*, και το σημείο όπου συγκεντρώνονται οι ηλιακές ακτίνες είναι η κύρια εστία του φακού.

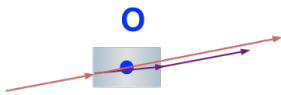
Επειδή το χαρτί θερμαίνεται έντονα σε εκείνο το σημείο, είναι δυνατόν να αναφλεγεί.



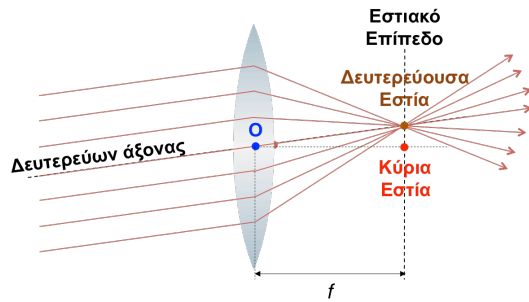
Οι ακτίνες του ήλιου συγκεντρώνονται στην εστία του φακού.

Εστιακό Επίπεδο Φακού

Η Εικόνα 5-28 απεικονίζει την πορεία μιας φωτεινής δέσμης ακτίνων, που είναι παράλληλη προς έναν **δευτερεύοντα άξονα** του φακού. Επειδή το κεντρικό τμήμα του φακού είναι κατά προσέγγιση παραλληλεπίπεδο, οι ακτίνες που διέρχονται κοντά από το οπτικό κέντρο O υφίστανται παράλληλη μετατόπιση. Εάν ο φακός είναι λεπτός, η μετατόπιση αυτή είναι αμελητέα, και οι ακτίνες αναδύονται *χωρίς αλλαγή στη διεύθυνση διάδοσής τους*, όπως φαίνεται στο κάτω σχήμα.



Οι ακτίνες, που διέρχονται από το κεντρικό, παραλληλεπίπεδο τμήμα ενός **λεπτού φακού**, υφίστανται αμελητέα παράλληλη μετατόπιση.



Εικόνα 5-28. Μια δέσμη ακτίνων που προσπίπτει παράλληλα σε δευτερεύοντα άξονα, συγκεντρώνεται σε μια δευτερεύουσα εστία του φακού.

Οι υπόλοιπες ακτίνες διέρχονται από ένα σημείο, που ονομάζεται **δευτερεύουσα εστία**. Το σημείο αυτό βρίσκεται πάνω στο **εστιακό επίπεδο**, το οποίο είναι κάθετο προς τον κύριο άξονα, και διέρχεται από την κύρια εστία του φακού (Εικόνα 5-28).

Εάν η δέσμη ακτίνων είναι παράλληλη σε κάποιον άλλο δευτερεύοντα άξονα, θα διέρχεται από *διαφορετική δευτερεύουσα εστία* πάνω στο εστιακό επίπεδο. Ένας φακός έχει δύο εστιακά επίπεδα, συμμετρικά τοποθετημένα ως προς το οπτικό του κέντρο.

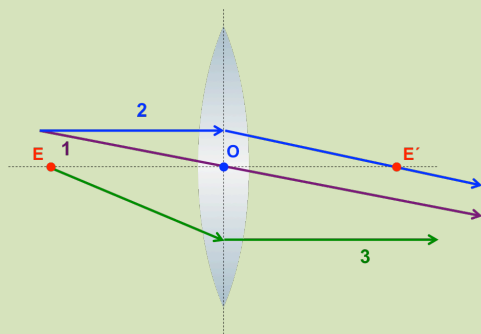
Τα πιο βασικά συμπεράσματα, που περιγράφουν τη διάθλαση ακτίνων από συγκλίνοντα φακό, συνοψίζονται ως εξής:

Πορεία Ακτίνων που διαθλώνται από Συγκλίνοντα Φακό

(1) Μία ακτίνα που διέρχεται από το **οπτικό κέντρο O** , αναδύεται *χωρίς αλλαγή στην πορεία της*.

(2) Μία ακτίνα που προσπίπτει **παράλληλα προς τον κύριο άξονα** του φακού, αναδύεται σε διεύθυνση που διέρχεται από **την κύρια εστία** του φακού.

(3) Μία ακτίνα που διέρχεται από **την κύρια εστία** του φακού, αναδύεται **παράλληλα προς τον κύριο άξονα** του φακού.



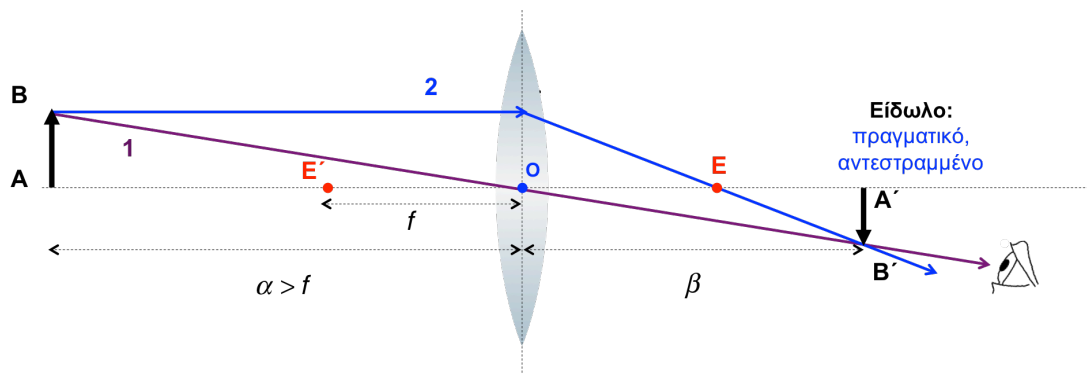
Το τελευταίο συμπέρασμα διαπιστώνεται εύκολα, **εάν αντιστρέψουμε την πορεία** της ακτίνας **3**: Εάν η ακτίνα προσπέσει παράλληλα στον κύριο άξονα *από τη δεξιά πλευρά* του φακού, η αναδυόμενη ακτίνα θα διέλθει από την εστία E .

Σχηματισμός Ειδώλου από Συγκλίνοντα Φακό

Όταν οι ακτίνες ενός φωτεινού αντικειμένου αναδύονται από τον φακό, φαίνεται ότι προέρχονται από το **είδωλο** του αντικειμένου. Για να προσδιορίσουμε *γραφικά* το είδωλο ενός αντικειμένου, σχεδιάζουμε ακτίνες με αφετηρία το αντικείμενο και γνωστή διαδρομή, όπως τα παραδείγματα ακτίνων 1-3, που περιγράψαμε πιο πάνω. Εξηγούμε τη γραφική μέθοδο στην επόμενη ενότητα.

Γραφικός Προσδιορισμός του Ειδώλου

Στην Εικόνα 5-29 απεικονίζεται ένα αντικείμενο AB, το οποίο είναι τοποθετημένο σε απόσταση α από το οπτικό κέντρο O. Επιλέγουμε αυτή την απόσταση **μεγαλύτερη από την εστία του φακού** ($\alpha > f$), αλλά χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο για κάθε απόσταση. Από το άκρο B του αντικειμένου ξεκινούν άπειρες φωτεινές ακτίνες. Για να προσδιορίσουμε το είδωλο του σημείου B, σχεδιάζουμε *δύο ακτίνες γνωστής διαδρομής*, και βρίσκουμε το σημείο τομής τους. Η **ακτίνα 1** διέρχεται από το οπτικό κέντρο O και αναδύεται χωρίς αλλαγή στην πορεία της. Η **ακτίνα 2** προσπίπτει παράλληλα στον κύριο άξονα, και αναδύεται σε διεύθυνση που διέρχεται από την εστία E.



Εικόνα 5-29. Για να προσδιορίσουμε το είδωλο ενός αντικειμένου, σχεδιάζουμε από τα άκρα του ακτίνες γνωστής διαδρομής και βρίσκουμε το σημείο τομής τους.

Οι αναδυόμενες ακτίνες τέμνονται στο σημείο B', γι' αυτό λέμε ότι το B' αποτελεί το **είδωλο** του σημείου B. Εάν επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία για *οποιοδήποτε ενδιάμεσο σημείο* του αντικειμένου AB, θα διαπιστώσουμε ότι το είδωλό του θα είναι ένα ενδιάμεσο σημείο του ευθύγραμμου τμήματος A'B', το οποίο τέμνει κάθετα τον κύριο άξονα σε απόσταση β από το οπτικό κέντρο. Το τμήμα A'B' είναι το **είδωλο του αντικειμένου AB**.

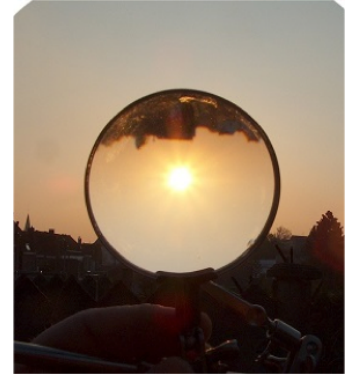
Επειδή από το τμήμα A'B' διέρχονται οι αναδυόμενες ακτίνες, εάν τοποθετήσουμε ένα πέτασμα (π.χ. ένα φύλλο χαρτιού) στη θέση του A'B', θα *δούμε να προβάλλεται στο πέτασμα η εικόνα του A'B'*. Γι' αυτό το λόγο, λέμε ότι το είδωλο A'B' είναι **πραγματικό**.

Πραγματικό είδωλο: η εικόνα που σχηματίζουν **πάνω σε πέτασμα** οι ακτίνες ενός αντικειμένου, όταν αναδύονται από ένα φακό. Το πραγματικό είδωλο σχηματίζεται από την άλλη μεριά του φακού ως προς το αντικείμενο.

Επειδή η ακτίνα 1 αναδύεται κάτω από τον κύριο άξονα, το σημείο Β' είναι αναγκαστικά κάτω από τον άξονα, και το είδωλο Α'Β' είναι **αντεστραμμένο**.

Το είδωλο που σχηματίζει ένας συγκλίνων φακός είναι **πραγματικό και αντεστραμμένο**, όταν το αντικείμενο βρίσκεται σε **μεγαλύτερη απόσταση από την κύρια εστία** του φακού ($\alpha > f$).

Εάν στρέψουμε ένα συγκλίνοντα φακό προς κάποιο μακρινό αντικείμενο, θα δούμε μέσα από το φακό το μικρότερο, αντεστραμμένο είδωλο του αντικειμένου. Στη διπλανή εικόνα απεικονίζεται **ένα μακρινό τοπίο**, όπως φαίνεται μέσα από μεγεθυντικό φακό. Στο κάτω μέρος της εικόνας φαίνεται το πραγματικό τοπίο. Στο κέντρο της εικόνας φαίνεται ο φακός (κύκλος), και μέσα του φαίνεται το είδωλο του τοπίου. Επειδή το είδωλο είναι αντεστραμμένο, το έδαφος απεικονίζεται πάνω από τον ήλιο.



Το **μακρινό τοπίο φαίνεται αντεστραμμένο μέσα από το φακό**.

Το είδωλο του τοπίου είναι πραγματικό: Εάν τοποθετήσουμε ένα χαρτί (ή φωτογραφικό φιλμ) σε κατάλληλη απόσταση πίσω από το μεγεθυντικό φακό, θα σχηματισθεί επάνω του η εικόνα του αντεστραμμένου τοπίου.

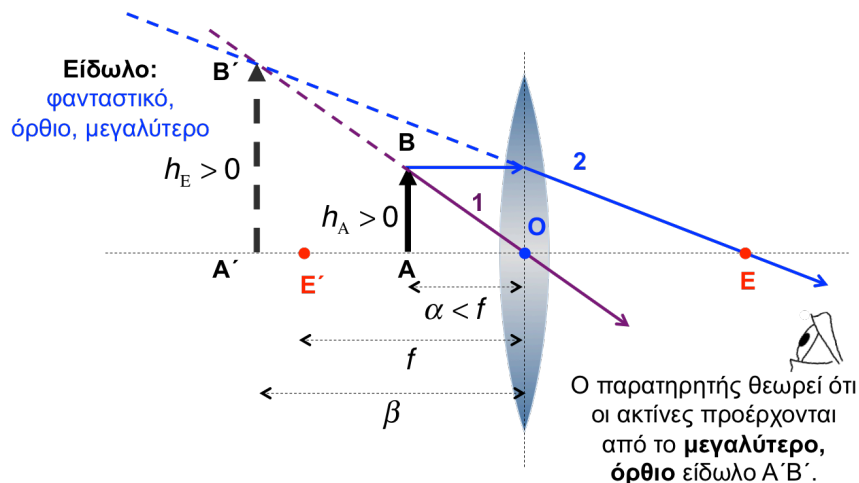
Εφαρμογή: Ο Συγκλίνων Φακός μπορεί να λειτουργεί σαν Μεγεθυντικός

Εάν το αντικείμενο τοποθετηθεί ανάμεσα στην εστία και τον φακό ($\alpha < f$), το είδωλο είναι **όρθιο και μεγαλύτερο**: ο συγκλίνων φακός **λειτουργεί ως μεγεθυντικός**.



Στην Εικόνα 5-30 μελετούμε το είδωλο που σχηματίζεται σε αυτή την περίπτωση. Όπως και πριν, σχεδιάζουμε δύο ακτίνες γνωστής διαδρομής με αφετηρία το σημείο Β, και προσδιορίζουμε το σημείο τομής τους. Η ακτίνα 1 διέρχεται από το κέντρο Ο και αναδύεται χωρίς αλλαγή στην πορεία της. Η ακτίνα 2 προσπίπτει παράλληλα με τον κύριο άξονα, οπότε μετά από την ανάδυσή της διέρχεται από την εστία Ε.

Από το σχήμα παρατηρούμε ότι οι διευθύνσεις των *αναδύομενων ακτίνων* 1 και 2 αποκλίνουν μεταξύ τους, οπότε δεν είναι δυνατόν να συναντηθούν από τη δεξιά πλευρά του φακού. Οι **προεκτάσεις** των ακτίνων αυτών τέμνονται σε ένα σημείο Β', από την *ίδια πλευρά* του φακού με το σημείο Β. Το σημείο Β' είναι το **είδωλο** του σημείου Β. Όμοια, ένα ενδιάμεσο σημείο του ευθύγραμμου τμήματος ΑΒ θα έχει ως είδωλο ένα ενδιάμεσο σημείο του τμήματος Α'Β', το οποίο είναι κάθετο στον κύριο άξονα, σε απόσταση β από το κέντρο Ο.



Εικόνα 5-30. Όταν το αντικείμενο AB τοποθετηθεί ανάμεσα στην εστία (E') και το οπτικό κέντρο O ενός συγκλίνοντος φακού, το είδωλο A'B' είναι όρθιο, μεγαλύτερο και φανταστικό. Ο φακός λειτουργεί ως μεγεθυντικός.

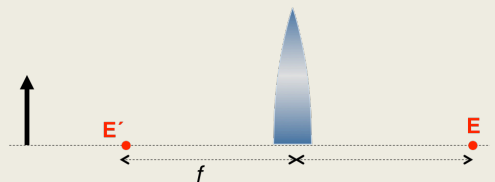
Ένας παρατηρητής που κοιτά από την άλλη πλευρά του φακού, θεωρεί ότι οι αναδυόμενες ακτίνες 1 και 2 προέρχονται από το σημείο B'. Επειδή στο σημείο B' τέμνονται οι προεκτάσεις των αναδυόμενων ακτίνων, εάν τοποθετήσουμε ένα πέτασμα (π.χ. ένα φύλλο χαρτιού) στο σημείο B', δεν προβάλλεται στο πέτασμα η εικόνα του ειδώλου. Γι' αυτό, λέμε ότι το B' είναι το **φανταστικό είδωλο** του B, και το A'B' είναι το φανταστικό είδωλο του AB.

Φανταστικό είδωλο: Η εικόνα που σχηματίζουν οι προεκτάσεις των αναδυόμενων ακτίνων στην ίδια μεριά με το αντικείμενο. Το φανταστικό είδωλο **δεν** μπορεί να προβληθεί σε πέτασμα. Όμως, όταν παρατηρούμε ένα φανταστικό είδωλο μέσα από φακό, έχουμε την εντύπωση ότι είναι υπαρκτό, όπως και το φανταστικό είδωλο ενός επίπεδου καθρέφτη.

Επειδή οι προσπίπτουσες ακτίνες 1 και 2 βρίσκονται πάνω από τον κύριο άξονα, και το σημείο B' είναι από την ίδια μεριά του φακού με τις προσπίπτουσες ακτίνες, το B' είναι πάνω από τον κύριο άξονα και το είδωλο A'B' είναι **όρθιο**.

Το είδωλο που σχηματίζει ένας συγκλίνων φακός είναι **φανταστικό και όρθιο**, όταν το αντικείμενο βρίσκεται σε **μικρότερη απόσταση από την κύρια εστία** του φακού ($\alpha < f$).

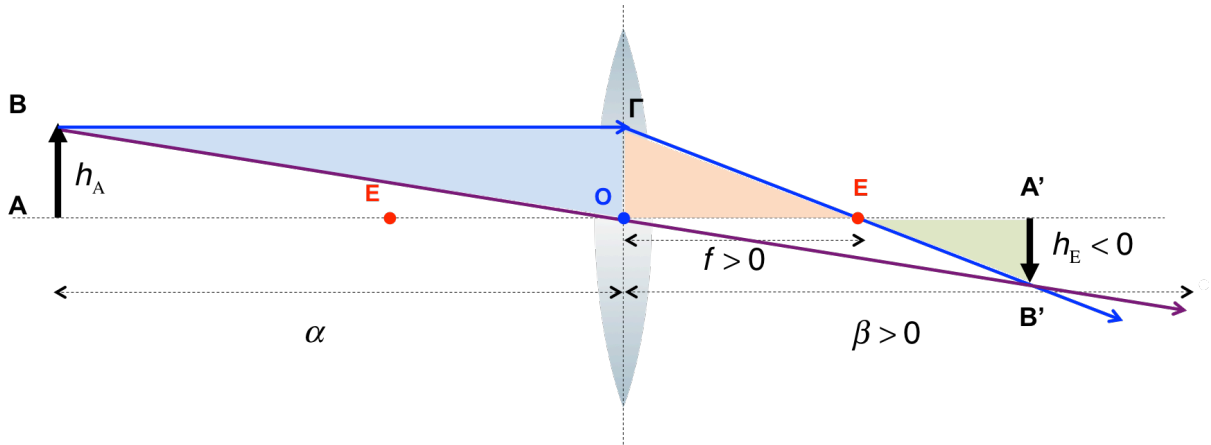
Ερώτηση: Εάν χρησιμοποιήσουμε έναν φακό κομμένο στη μέση, όπως στο σχήμα, θα σχηματισθεί είδωλο; Πώς θα διαφέρει το είδωλο από αυτό που σχηματίζεται από ολόκληρο τον φακό; (Σκεφθείτε πρώτα τι θα συμβεί εάν καλύψετε



τους φακούς γυαλιών όρασης από τη μέση και κάτω. Επηρεάζεται η εικόνα που σχηματίζουν τα γυαλιά;). Κατόπιν, να μελετήσετε γραφικά το σχηματισμό του ειδώλου.

Εξίσωση Λεπτών Φακών

Μπορούμε να εξαγάγουμε εύκολα μια πολύ χρήσιμη **γενική σχέση**, που συνδέει την απόσταση α του αντικειμένου, την απόσταση β του ειδώλου και την εστιακή απόσταση f .



Εικόνα 5-31. Τα τρίγωνα ΓΟΕ και ΕΑ'Β' είναι όμοια, επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες. Το ίδιο ισχύει για τα τρίγωνα ΟΑ'Β' και ΒΓΟ.

Στην Εικόνα 5-31 εξετάζουμε σε μεγαλύτερη λεπτομέρεια τις ακτίνες της Εικόνας 5-29. Τα τρίγωνα ΓΟΕ και ΕΑ'Β' είναι *όμοια*, επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες: $\widehat{\Gamma\hat{O}E} = \widehat{E\hat{A}'B'} = 90^\circ$, $\widehat{O\hat{E}\Gamma} = \widehat{A'\hat{E}B'}$ (κατά κορυφήν), και $\widehat{O\hat{\Gamma}E} = \widehat{E\hat{B}'A'}$ (εντός εναλλάξ γωνίες). Συνεπώς οι λόγοι των αντιστοίχων πλευρών των τριγώνων ισούνται:

$$\frac{A'B'}{O\Gamma} = \frac{EA'}{OE} = \frac{\beta - f}{f}$$

Ομοίως, τα τρίγωνα ΟΑ'Β' και ΒΓΟ είναι όμοια επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες: $\widehat{O\hat{A}'B'} = \widehat{B\hat{\Gamma}O} = 90^\circ$, $\widehat{A'\hat{O}B'} = \widehat{\Gamma\hat{B}O}$ (εντός εναλλάξ), και $\widehat{O\hat{B}'A'} = \widehat{B\hat{O}\Gamma}$ (εντός-εκτος και επί τα αυτά μέρη). Συνεπώς,

$$\frac{A'B'}{O\Gamma} = \frac{OA'}{AO} = \frac{\beta}{\alpha}$$

Από τις πιο πάνω σχέσεις, προκύπτει:

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\beta - f}{f} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{\beta - f}{\beta f} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{\beta}{\beta f} - \frac{f}{\beta f} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

Η τελευταία εξίσωση συνδέει τις αποστάσεις του αντικειμένου α και του ειδώλου β με την εστιακή απόσταση f , και ονομάζεται **εξίσωση λεπτών φακών**.

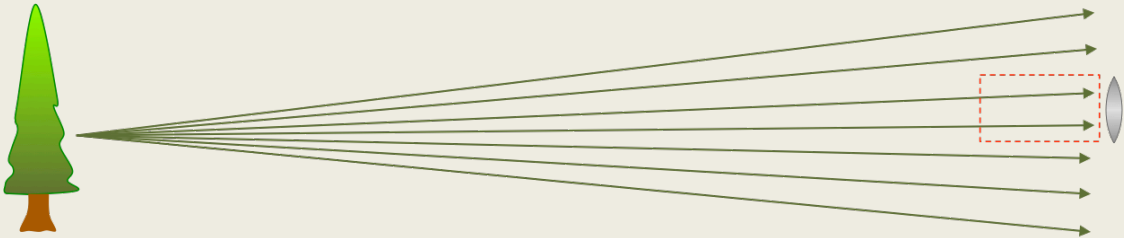
Εξίσωση Λεπτών Φακών: $\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$

Για παράδειγμα, εάν το αντικείμενο τοποθετηθεί στη θέση $\alpha = 3f$, το είδωλο θα σχηματισθεί σε απόσταση $\beta = 3f/2$ από το φακό: $\frac{1}{3f} + \frac{2}{3f} = \frac{3}{3f} = \frac{1}{f}$.

Άσκηση: Με εφαρμογή της εξίσωσης λεπτών φακών, να δείξετε ότι **εάν το αντικείμενο τοποθετηθεί πάνω στην εστία του φακού, το είδωλο θα σχηματιστεί στο άπειρο**. Να εξηγήσετε **γραφικά** αυτό το αποτέλεσμα, χρησιμοποιώντας κατάλληλες ακτίνες, όπως στην Εικόνα 5-30.

Άσκηση: Με εφαρμογή της εξίσωσης λεπτών φακών, να δείξετε ότι **εάν το αντικείμενο είναι σε άπειρη απόσταση, το είδωλο θα σχηματιστεί πάνω στην εστία του φακού**.

Σημείωση: Όταν το αντικείμενο είναι σε πολύ μεγάλη απόσταση, οι ακτίνες που προέρχονται από κάθε σημείο του προσπίπτουν **παράλληλα** στο φακό, όπως φαίνεται στο πιο κάτω σχήμα.

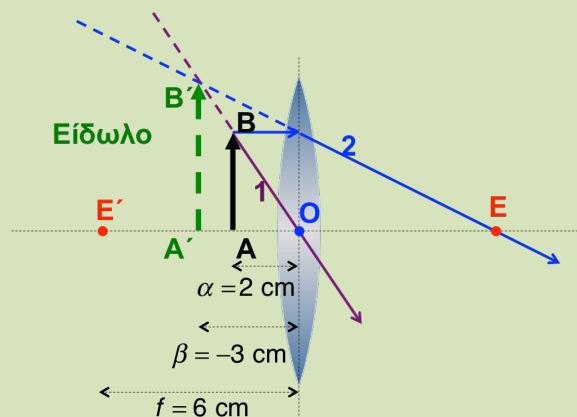


Να παρατηρήσετε ότι εάν η απόσταση $\alpha < f$, η εξίσωση των φακών προβλέπει ότι η απόσταση β του ειδώλου είναι **αρνητική**:

$$\alpha < f \Rightarrow \frac{1}{\alpha} > \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{f} - \frac{1}{\alpha} < 0 \Rightarrow \frac{1}{\beta} < 0$$

Για παράδειγμα, εάν $f = 6 \text{ cm}$ και $\alpha = 2 \text{ cm}$, προκύπτει:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\alpha} \Rightarrow \frac{1}{\beta} = \frac{\alpha - f}{\alpha f} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha f}{\alpha - f} = \frac{2 \times 6 \text{ cm}^2}{2 - 6 \text{ cm}} = -3 \text{ cm}$$



Όταν το είδωλο είναι **φανταστικό**, η απόσταση β θεωρείται **αρνητική**.

Το πιο πάνω αποτέλεσμα δηλώνει ότι το είδωλο σχηματίζεται σε απόσταση 3 cm από το οπτικό κέντρο Ο του φακού. Το **αρνητικό** πρόσημο δηλώνει ότι το είδωλο σχηματίζεται **στην ίδια μεριά** με το αντικείμενο (είναι φανταστικό).

Συμπέρασμα: Στην εφαρμογή της εξίσωσης φακών, θεωρούμε ότι η απόσταση β του ειδώλου είναι **αρνητική**, όταν το είδωλο σχηματίζεται **στην ίδια μεριά** με το αντικείμενο (είναι **φανταστικό**).

Ορισμός της Μεγέθυνσης Φακού

Ενώ το είδωλο που σχηματίζει ένας επίπεδος καθρέφτης έχει το ίδιο μέγεθος με το αντικείμενο, *το είδωλο ενός φακού έχει γενικά διαφορετικό μέγεθος από το αντικείμενο*. Για παράδειγμα, το είδωλο της Εικόνας 5-30 είναι μεγαλύτερο από το αντικείμενο. Το είδωλο της Εικόνας 5-31 είναι μικρότερο από το αντικείμενο.

Για να συγκρίνουμε το μέγεθος h_A του αντικειμένου με το μέγεθος h_B του ειδώλου, χρησιμοποιούμε την έννοια της **μεγέθυνσης** $M = h_E / h_A$. Στον υπολογισμό της μεγέθυνσης, το μέγεθος του *αντικειμένου*, h_A , θεωρείται θετικό. Το μέγεθος του *ειδώλου*, h_E , θεωρείται **θετικό όταν το είδωλο είναι όρθιο, και αρνητικό όταν το είδωλο είναι αντεστραμμένο**. Εάν $M = +3$, το είδωλο είναι όρθιο και τριπλάσιο σε μέγεθος από το αντικείμενο. Εάν $M = -2$, το είδωλο είναι αντεστραμμένο, και διπλάσιο σε μέγεθος από το αντικείμενο. Το φανταστικό είδωλο της Εικόνας 5-30 έχει θετικό ύψος και θετική μεγέθυνση. Το πραγματικό είδωλο της Εικόνας 5-31 έχει αρνητικό ύψος και αρνητική μεγέθυνση.

Χρησιμοποιώντας την Εικόνα 5-31, εξάγουμε μια πολύ χρήσιμη σχέση ανάμεσα στη μεγέθυνση και τις αποστάσεις α και β . Τα τρίγωνα ABO και A'B'O είναι όμοια, επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες: η $\hat{A}OB$ είναι κοινή, $\hat{BAO} = \hat{B'A'O} = 90^\circ$, και $\hat{ABO} = \hat{A'B'O}$ (εντός-εκτός και επί τα αυτά μέρη). Συνεπώς, οι λόγοι των αντιστοίχων πλευρών των δύο τριγώνων ισούνται μεταξύ τους:

$$M = \frac{h_E}{h_A} = \frac{-A'B'}{AB} = \frac{-A'O}{AO} = -\frac{\beta}{\alpha}$$

Στην τελευταία ισότητα χρησιμοποιήσαμε το γεγονός ότι το ύψος του ειδώλου είναι αρνητικό, επειδή το είδωλο είναι αντεστραμμένο: $h_E = -A'B' < 0$.

Συνοψίζουμε τα παραπάνω ως εξής:

$$\text{Μεγέθυνση Συγκλίνοντος Φακού, } M = \frac{\text{Μέγεθος Ειδώλου}}{\text{Μέγεθος Αντικειμένου}} = \frac{h_E}{h_A} = -\frac{\beta}{\alpha}$$

Το μέγεθος (ύψος) του ειδώλου, h_E , θεωρείται **θετικό** όταν το είδωλο είναι **όρθιο**, και **αρνητικό** όταν το είδωλο είναι **αντεστραμμένο**. Η μεγέθυνση **M** είναι θετική όταν το είδωλο είναι **όρθιο και φανταστικό**, και αρνητική όταν το είδωλο είναι **αντεστραμμένο και πραγματικό**. Εάν η μεγέθυνση είναι μεγαλύτερη σε απόλυτη τιμή από την μονάδα ($|M| > 1$), το είδωλο είναι μεγαλύτερο από το αντικείμενο.

Παρατήρηση: Επειδή τα μεγέθη α και h_A είναι θετικά, από τη σχέση $h_E / h_A = -\beta / \alpha$ προκύπτει ότι η απόσταση β και το ύψος του ειδώλου h_E έχουν **αντίθετα πρόσημα**: Ένα **πραγματικό** είδωλο ($\beta > 0$) είναι **αντεστραμμένο** ($h_E < 0$), και ένα **φανταστικό** είδωλο ($\beta < 0$) είναι **όρθιο** ($h_E > 0$).

Άσκηση: Να προσδιορίσετε το πρόσημο της μεγέθυνσης του φακού για τη διάταξη της Εικόνας 5-30. Να βεβαιωθείτε ότι η σχέση $M = -\beta / \alpha$ έχει το σωστό πρόσημο και σε αυτή την περίπτωση.

Άσκηση: Χρησιμοποιώντας την εξίσωση των λεπτών φακών, να δείξετε ότι η μεγέθυνση **M** ικανοποιεί τη σχέση

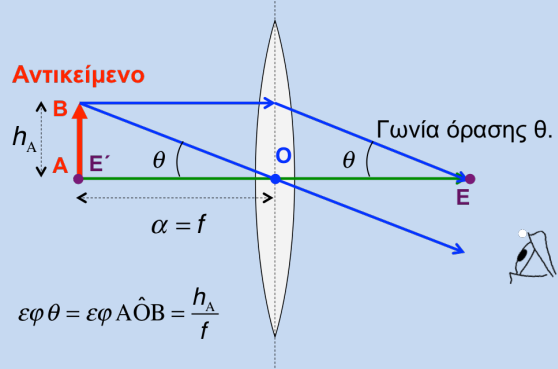
$$M = \frac{f}{f - \alpha}$$

Με βάση αυτή τη σχέση, να δείξετε ότι για **συγκλίνοντα φακό** ισχύουν τα εξής:

- (1) Εάν $\alpha < f \Rightarrow M > 1$: Όταν το αντικείμενο βρίσκεται ανάμεσα στο φακό και στην κύρια εστία, το είδωλο του φακού είναι όρθιο και μεγαλύτερο από το αντικείμενο. Ο φακός λειτουργεί ως μεγεθυντικός.
- (2) Εάν $f < \alpha < 2f \Rightarrow M < -1$: Το είδωλο είναι αντεστραμμένο και μεγαλύτερο από το αντικείμενο.
- (3) Εάν $2f < \alpha \Rightarrow -1 < M < 0$: το είδωλο είναι αντεστραμμένο και μικρότερο από το αντικείμενο.

Άσκηση: Να μελετήσετε **γραφικά** τον σχηματισμό ειδώλου από συγκλίνοντα φακό για τις πιο πάνω τρεις περιπτώσεις, και να δείξετε ότι ισχύουν **τα ίδια συμπεράσματα**.

Σημείωση: Εάν τοποθετήσουμε τον φακό πολύ κοντά στο αντικείμενο ($\alpha \cong 0$) και αρχίσουμε να τον απομακρύνουμε, καθώς το αντικείμενο θα πλησιάζει στην εστία του φακού, το μέγεθός του θα μεγαλώνει απεριόριστα: $\alpha \cong f \Rightarrow M = \frac{f}{f - \alpha} \cong \frac{f}{0} \cong +\infty$, και $h_E = M h_A \cong +\infty$. Ταυτόχρονα όμως, το είδωλο απομακρύνεται σε άπειρη απόσταση ($\beta \cong +\infty$).



Γι' αυτό το λόγο, αν και η μεγέθυνση γίνεται άπειρη, το είδωλο δεν φαίνεται άπειρα μεγάλο. Η **γωνία όρασης** με την οποία βλέπουμε το είδωλο αποκτά σταθερή τιμή: $\epsilon\phi\theta = \frac{h_A}{f}$. Αυτό χρησιμοποιείται στο **μεγεθυντικό φακό**, όπως εξηγούμε πιο κάτω.

Παράδειγμα 1

Πάνω στον κύριο άξονα ενός συγκλίνοντος φακού εστιακής απόστασης $f = 20 \text{ cm}$, και σε απόσταση 60 cm από το οπτικό κέντρο, τοποθετούμε ένα όρθιο βιβλίο, ύψους 26 cm .

Θα υπολογίσουμε (i) τη θέση στην οποία σχηματίζεται το είδωλο, (ii) τη φύση του ειδώλου, και (iii) το μέγεθός του σε σχέση με το μέγεθος του βιβλίου.

Λύση

(i) Χρησιμοποιώντας τον τύπο των λεπτών φακών, λύνουμε ως προς την απόσταση β :

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\alpha} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha f}{\alpha - f}$$

Αντικαθιστούμε τις τιμές για τις αποστάσεις α και f , και βρίσκουμε:

$$\beta = \frac{60 \times 20 \text{ cm} \times \text{cm}}{60 - 20 \text{ cm}} \Rightarrow \beta = 30 \text{ cm}$$

Συνεπώς, το είδωλο του βιβλίου σχηματίζεται σε απόσταση 30 cm από το οπτικό κέντρο.

(ii) Επειδή $\beta > 0$, το είδωλο είναι **πραγματικό** και σχηματίζεται από την άλλη πλευρά του φακού, σε σχέση με το αντικείμενο.

(iii) Για να υπολογίσουμε το ύψος του ειδώλου, ξεκινάμε από τον τύπο της μεγέθυνσης **M**:

$$M = -\frac{\beta}{\alpha} \Rightarrow M = -\frac{30 \text{ cm}}{60 \text{ cm}} \Rightarrow M = -0,5$$

Επειδή η μεγέθυνση είναι αρνητική, το είδωλο είναι **αντεστραμμένο**. Το ύψος του ειδώλου του βιβλίου ισούται με το μισό του ύψους του βιβλίου:

$$\frac{h_E}{h_A} = M \Rightarrow h_E = M \times h_A = -0,5 \times 26 \text{ cm} = -13 \text{ cm}.$$

Το αρνητικό ύψος h_E δηλώνει ότι το είδωλο είναι αντεστραμμένο.

Παράδειγμα 2

Σε απόσταση 8 cm από το οπτικό κέντρο ενός συγκλίνοντος φακού, εστιακής απόστασης $f = 12 \text{ cm}$, και πάνω στον κύριο άξονά του, τοποθετούμε ένα όρθιο κέρμα ύψους 1 cm. Όπως στο προηγούμενο παράδειγμα, θα υπολογίσουμε τη θέση στην οποία σχηματίζεται το είδωλο, τη φύση του ειδώλου και το μέγεθός του.

Λύση

Εργαζόμαστε όπως στο **Παράδειγμα 1**:

$$\beta = \frac{\alpha f}{\alpha - f} \Rightarrow \beta = \frac{8 \times 12 \text{ cm} \times \text{cm}}{8 - 12 \text{ cm}} \Rightarrow \beta = -24 \text{ cm}$$

Συνεπώς, το είδωλο είναι φανταστικό και σχηματίζεται σε απόσταση 24 cm από το οπτικό κέντρο του φακού, και από την ίδια πλευρά με το κέρμα.

Η μεγέθυνση του ειδώλου είναι:

$$M = -\frac{\beta}{\alpha} \Rightarrow M = -\frac{-24 \text{ cm}}{8 \text{ cm}} \Rightarrow M = +3$$

Το είδωλο έχει ύψος $h_E = M \times h_A = 3 \times 1 \text{ cm} = 3 \text{ cm}$. από το αντικείμενο. Επειδή η μεγέθυνση είναι θετική, το είδωλο είναι όρθιο.

Παράδειγμα 3

Ένας συγκλίνων φακός εστιακής απόστασης $f = 30 \text{ cm}$ σχηματίζει πάνω στον κύριο άξονά του, σε απόσταση 15 cm από το οπτικό του κέντρο, το φανταστικό είδωλο ενός κουτιού. Το είδωλο έχει ύψος 6 cm. Θα υπολογίσουμε τη θέση και το μέγεθος του αντικειμένου.

Λύση

Από τον τύπο των φακών προκύπτει:

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\beta} \Rightarrow \alpha = \frac{\beta f}{\beta - f}$$

Επειδή το είδωλο είναι φανταστικό, πρέπει στην εξίσωση των φακών να θεωρήσουμε ότι η απόσταση β είναι αρνητική ($\beta = -15 \text{ cm}$). Αντικαθιστώντας, βρίσκουμε:

$$\alpha = \frac{\beta f}{\beta - f} \Rightarrow \alpha = \frac{(-15) \times 30 \text{ cm}^2}{-15 - 30 \text{ cm}} \Rightarrow \alpha = 10 \text{ cm}$$

Συνεπώς, το αντικείμενο είναι τοποθετημένο σε απόσταση 10 cm από το οπτικό κέντρο, από την ίδια πλευρά με το είδωλο.

Η μεγέθυνση του ειδώλου είναι:

$$M = -\frac{-15 \text{ cm}}{10 \text{ cm}} \Rightarrow M = +1,5$$

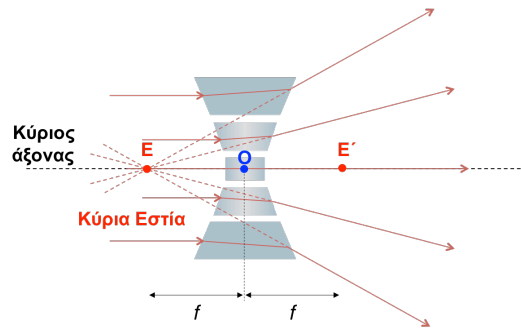
Επειδή η μεγέθυνση είναι θετική, το είδωλο είναι όρθιο. Το αντικείμενο έχει ύψος:

$$M = \frac{h_E}{h_A} \Rightarrow h_A = \frac{h_E}{M} = \frac{6 \text{ cm}}{1,5} = 4 \text{ cm}$$

Αποκλίνοντες Φακοί

Όπως και για τον συγκλίνοντα φακό, μπορούμε να μελετήσουμε τη διάθλαση μιας δέσμης ακτίνων μέσα από έναν αποκλίνοντα φακό, διαχωρίζοντάς τον σε τμήματα (Εικόνα 5-32). Το κεντρικό τμήμα έχει κατά προσέγγιση *παραλληλεπίπεδο* σχήμα. Τα υπόλοιπα τμήματα έχουν σχήμα πρίσματος, με αυξανόμενη διαθλαστική γωνία από το κέντρο προς τα άκρα του φακού. Οι ακτίνες που διέρχονται από το κεντρικό τμήμα, κοντά στο οπτικό κέντρο O , προσπίπτουν κάθετα στην επιφάνεια του φακού και αναδύονται χωρίς εκτροπή. Οι ακτίνες που απέχουν αρκετά από το οπτικό κέντρο υφίστανται εκτροπή, η οποία αυξάνεται από το οπτικό κέντρο προς τα άκρα του φακού.

Σε αντίθεση με τον συγκλίνοντα φακό, οι αναδυόμενες ακτίνες απομακρύνονται από τον κύριο άξονα (αποκλίνουν). Εάν ο φακός είναι λεπτός, μπορεί να αποδειχθεί ότι οι προέκτασεις των αναδυόμενων ακτίνων συναντώνται σε ένα σημείο E , που βρίσκεται στον κύριο άξονα του φακού και στην ίδια πλευρά με την προσπίπτουσα δέσμη. Το σημείο αυτό ονομάζεται **κύρια εστία** του φακού. Η απόσταση f της κύριας εστίας εξαρτάται από την καμπυλότητα των επιφανειών του και το υλικό κατασκευής του φακού. Φακοί με μεγαλύτερη καμπυλότητα έχουν μικρότερη εστιακή απόσταση, γιατί προκαλούν μεγαλύτερη εκτροπή των ακτίνων που διέρχονται κοντά από τα άκρα τους.



Εικόνα 5-32. Όταν μια δέσμη ακτίνων προσπίπτει στον αποκλίνοντα φακό παράλληλα στον κύριο άξονα, οι νοητές προεκτάσεις των αναδυόμενων ακτίνων συγκεντρώνονται στην κύρια εστία.

Εάν η δέσμη της Εικόνας 5-32 προσπέσει στη δεξιά επιφάνεια του φακού, οι προεκτάσεις των αναδυόμενων ακτίνων θα τέμνονται στο σημείο E' του κύριου άξονα, σε απόσταση f δεξιά του οπτικού κέντρου O . Το σημείο E' αποτελεί τη δεύτερη κύρια εστία. Ένας αποκλίνων φακός παρουσιάζει δύο κύριες εστίες, οι οποίες είναι *συμμετρικά τοποθετημένες ως προς το οπτικό κέντρο* του φακού, ακόμη και εάν οι επιφάνειες του φακού έχουν διαφορετικό σχήμα.

Τα επίπεδα που είναι κάθετα στον κύριο άξονα του φακού και διέρχονται από τις δύο κύριες εστίες ονομάζονται **εστιακά επίπεδα**. Εάν η δέσμη των ακτίνων είναι παράλληλη σε κάποιον δευτερεύοντα άξονα του φακού, οι προεκτάσεις των αναδυόμενων ακτίνων συγκεντρώνονται σε ένα σημείο του εστιακού επιπέδου, που ονομάζεται **δευτερεύουσα εστία**. Σε κάθε δευτερεύοντα άξονα αντιστοιχεί διαφορετική δευτερεύουσα εστία.

Συνοψίζουμε τα βασικότερα συμπεράσματα για τη διάδοση ακτίνων σε αποκλίνοντες φακούς:

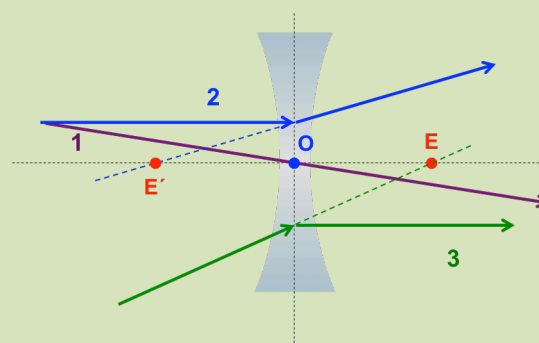
Πορεία Ακτίνων που διαθλώνται από Αποκλίνοντα Φακό

(1) Εάν μία ακτίνα διέρχεται από το οπτικό κέντρο O του φακού, αναδύεται χωρίς αλλαγή στην πορεία της.

(2) Εάν μία ακτίνα προσπίπτει παράλληλα προς τον κύριο άξονα του φακού, η προέκτασή της αναδυόμενης ακτίνας διέρχεται από την κύρια εστία του φακού.

(3) Εάν η προέκτασή μιας προσπίπτουσας ακτίνας διέρχεται από την κύρια εστία του φακού, η ακτίνα αναδύεται παράλληλα στον κύριο άξονα του φακού.

Για να επιβεβαιώσουμε το τελευταίο συμπέρασμα, αντιστρέφουμε τη φορά κίνησης της



ακτίνας 3: Η αντίστροφη ακτίνα κινείται όπως περιγράφει το συμπέρασμα (2).

Γραφικός Προσδιορισμός Ειδώλου σε Αποκλίνοντες Φακούς

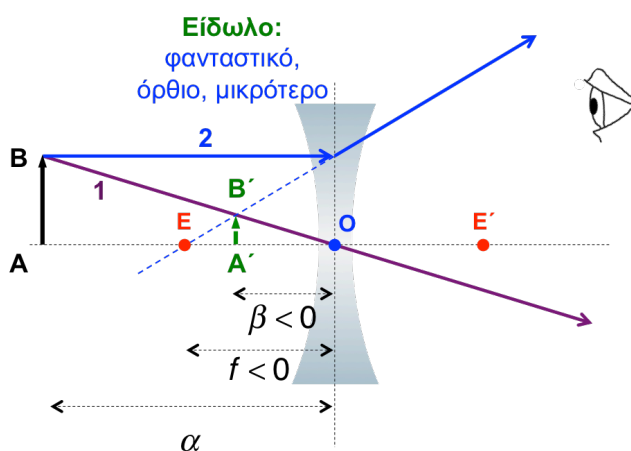
Το αντικείμενο AB της Εικόνας 5-33 είναι τοποθετημένο σε απόσταση α από το οπτικό κέντρο O ενός αποκλίνοντος φακού. Όπως και για τους συγκλίνοντες φακούς, για να προσδιορίσουμε το είδωλο του σημείου B επιλέγουμε δύο ακτίνες γνωστής διαδρομής με αφετηρία το B, και βρίσκουμε το σημείο τομής τους. Η ακτίνα 1 διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού και αναδύεται στην ίδια διεύθυνση. Η ακτίνα 2 προσπίπτει στον φακό παράλληλα με τον κύριο άξονά του. Η προέκταση της αναδύμενης ακτίνας διέρχεται από την εστία E.

Οι προεκτάσεις των αναδύμενων ακτίνων 1 και 2 τέμνονται στο σημείο B'. Ένας παρατηρητής που κοιτά το φακό, σχηματίζει την εντύπωση ότι οι αναδύμενες ακτίνες 1 και 2 προέρχονται από το σημείο B', το οποίο αποτελεί το **φανταστικό είδωλο** του B.

Εάν επαναλάβουμε την ίδια διαδικασία για οποιοδήποτε ενδιάμεσο σημείο του αντικείμενου, θα διαπιστώσουμε ότι το είδωλό του θα είναι ένα ενδιάμεσο σημείο του ευθύγραμμου τμήματος A'B', το οποίο είναι κάθετο στον κύριο άξονα, σε απόσταση β από το κέντρο O.

Συνεπώς, το ευθύγραμμο τμήμα A'B' είναι το **είδωλο του AB**.

Οι προσπίπτουσες ακτίνες 1 και 2 βρίσκονται πάνω από τον κύριο άξονα, και το σημείο B' είναι από την ίδια μεριά του φακού με αυτές. Συνεπώς, είναι αδύνατον το B' να βρίσκεται κάτω από τον κύριο άξονα, και το είδωλο A'B' είναι **όρθιο**. Επίσης, είναι μικρότερο από το αντικείμενο. Αυτά τα συμπεράσματα ισχύουν **γενικά για αποκλίνοντες** φακούς, **ανεξάρτητα από τη θέση** του αντικείμενου.



Εικόνα 5-33. Το είδωλο που σχηματίζεται από έναν αποκλίνοντα φακό είναι πάντοτε φανταστικό, όρθιο και μικρότερο από το αντικείμενο.

Το είδωλο που παράγει ένας αποκλίνων φακός είναι πάντοτε φανταστικό, όρθιο και μικρότερο σε μέγεθος από το αντικείμενο.

Το διπλανό σχήμα δείχνει το είδωλο ενός χάρακα, όπως φαίνεται μέσα από έναν φακό γυαλιών μυωπίας. Το είδωλο είναι πάντοτε όρθιο και μικρότερο, ανεξάρτητα από τη θέση του φακού, επειδή ο φακός μυωπίας είναι αποκλίνων.



Πηγή: <https://taksreview.wikispaces.com/Diverging+Lenses>

Άσκηση: Ένα όρθιο βέλος τοποθετείται μπροστά από έναν αποκλίνοντα φακό, σε διάφορες αποστάσεις. Με χρήση κατάλληλων ακτίνων να **προσδιορίσετε γραφικά** το είδωλο, εάν το βέλος βρίσκεται:

(α) Σε άπειρη απόσταση από τον φακό.

(β) Πίσω από την κύρια εστία του φακού.

(γ) Πάνω στην κύρια εστία του φακού.

(δ) Μπροστά από την κύρια εστία του φακού.

Να επιβεβαιώσετε ότι το είδωλο είναι πάντοτε όρθιο, φανταστικό και μικρότερο από το αντικείμενο. Τι παρατηρείτε για τη θέση του ειδώλου ως προς το αντικείμενο;

Ένθετο: Εξίσωση Λεπτών Φακών για Αποκλίνοντες Φακούς

Εξετάζοντας την Εικόνα 5-33, παρατηρούμε ότι τα τρίγωνα ABO και A'B'O είναι όμοια επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες: η γωνία AÔB είναι κοινή, BÂO = B'Â'O = 90°, και AÔO = A'Ô'O (εντός-εκτος και επί τα αυτά μέρη). Έτσι,

$$\frac{A'B'}{AB} = \frac{A'O}{AO}$$

Ομοίως, τα τρίγωνα EB'A' και EΓO είναι όμοια και οι λόγοι των αντιστοίχων πλευρών τους ισούνται μεταξύ τους:

$$\frac{A'B'}{OΓ} = \frac{EA'}{EO} = \frac{EO - A'O}{EO}$$

Επειδή $AB = OΓ \Rightarrow A'B'/AB = A'B'/OΓ$, προκύπτει:

$$\frac{A'O}{AO} = \frac{EO - A'O}{EO} \Rightarrow \frac{A'O}{AO} = 1 - \frac{A'O}{EO} \Rightarrow \frac{1}{AO} = \frac{1}{A'O} - \frac{1}{EO} \Rightarrow \frac{1}{AO} - \frac{1}{A'O} = -\frac{1}{EO}$$

Στην πιο πάνω εξίσωση, $AO = \alpha$ είναι η απόσταση αντικειμένου-οπτικού κέντρου.

Η εξίσωση αποκτά **την ίδια μορφή με τους συγκλίνοντες φακούς**, εάν θεωρήσουμε ως **αρνητικές** (1) την εστιακή απόσταση ($f = -EO < 0$), και (2) την απόσταση του ειδώλου ($\beta = -A'O < 0$). Με αυτή τη σύμβαση, γράφουμε:

$$\frac{1}{AO} - \frac{1}{A'O} = -\frac{1}{EO} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{-\beta} = -\frac{1}{-f} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

Εξίσωση Λεπτών Φακών για Αποκλίνοντες Φακούς

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

Στην εξίσωση των λεπτών φακών για αποκλίνοντες φακούς, θεωρούμε ότι η απόσταση του ειδώλου και η εστιακή απόσταση είναι αρνητικές: $\beta < 0$ και $f < 0$.

Μεγέθυνση Αποκλίνοντος Φακού

Ο λόγος των μεγεθών ειδώλου και αντικειμένου, $M = h_E / h_A$, εκφράζει τη **μεγέθυνση M του φακού**, όπως και στους συγκλίνοντες φακούς. Επειδή το είδωλο ενός αποκλίνοντος φακού είναι πάντοτε **όρθιο**, το μήκος $h_E = A'B'$ του ειδώλου λαμβάνεται πάντοτε **θετικό** και η μεγέθυνση M είναι πάντοτε **θετική**.

Μελετώντας την Εικόνα 5-33, διαπιστώνουμε ότι τα τρίγωνα ABO και A'B'O είναι όμοια επειδή έχουν τρεις ίσες γωνίες: η $\hat{A}\hat{O}\hat{B}$ είναι κοινή, $\hat{B}\hat{A}\hat{O} = \hat{B}'\hat{A}'\hat{O} = 90^\circ$, και $\hat{A}\hat{B}\hat{O} = \hat{A}'\hat{B}'\hat{O}$ (εντός-εκτός και επί τα αυτά μέρη). Ο λόγος των μεγεθών ειδώλου και αντικειμένου ικανοποιεί την ίδια σχέση με τους συγκλίνοντες φακούς:

$$M = \frac{h_E}{h_A} = \frac{A'B'}{AB} = \frac{A'O}{AO} = -\frac{\beta}{\alpha}$$

Άρα, η μεγέθυνση M ικανοποιεί την ίδια σχέση με τους συγκλίνοντες φακούς:

$$\text{Μεγέθυνση Αποκλίνοντος φακού } M = \frac{\text{Μέγεθος Ειδώλου}}{\text{Μέγεθος Αντικειμένου}} = \frac{h_E}{h_A} = -\frac{\beta}{\alpha}$$

Επειδή το είδωλο στους αποκλίνοντες φακούς είναι πάντοτε όρθιο και μικρότερο από το αντικείμενο, η **μεγέθυνση M στους αποκλίνοντες φακούς είναι πάντα θετική και μικρότερη της μονάδας**.

Άσκηση: Χρησιμοποιώντας την εξίσωση λεπτών φακών, να δείξετε ότι η μεγέθυνση ενός αποκλίνοντος φακού ικανοποιεί τη σχέση $M = f / (f - \alpha) = -f / (\alpha - f)$. Λαμβάνοντας υπόψη το πρόσημο της εστιακής απόστασης f στους αποκλίνοντες φακούς, να συμπεράνετε ότι η μεγέθυνση M είναι **πάντοτε θετική και μικρότερη από τη μονάδα**.

Ερώτηση: Να κρατήσετε τα γυαλιά **μυωπίας** ενός/μίας συμμαθητή/ριάς σας σε κάποια απόσταση από τα μάτια σας, και να παρατηρήσετε το είδωλο του τοπίου που βρίσκεται μπροστά από τον φακό. Είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο; Όρθιο, ή αντεστραμμένο; Οι φακοί

μυωπίας είναι συγκλίνοντες ή αποκλίνοντες;

Ερώτηση: Να κρατήσετε τα γυαλιά **υπερμετρωπίας** ενός συμμαθητή/ριάς σας σε κάποια απόσταση από τα μάτια σας, και να παρατηρήσετε το είδωλο του τοπίου που βρίσκεται μπροστά από τον φακό. Είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο; Όρθιο, ή αντεστραμμένο; Οι φακοί υπερμετρωπίας είναι αποκλίνοντες ή συγκλίνοντες;

Παράδειγμα 1

Η κύρια εστία ενός αποκλίνοντος φακού βρίσκεται 50 cm μακριά από το οπτικό κέντρο του φακού. Εάν τοποθετήσουμε ένα κατακόρυφο κεριά ύψους 20 cm σε απόσταση 120 cm από το οπτικό κέντρο, ποια θα είναι η θέση και το μέγεθος του ειδώλου;

Λύση

Χρησιμοποιώντας τον τύπο των λεπτών φακών, λύνουμε ως προς την απόσταση του ειδώλου:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\alpha} \Rightarrow \beta = \frac{\alpha f}{\alpha - f}$$

Επειδή ο φακός είναι αποκλίνων, θέτουμε $\alpha = 120$ cm και $f = -50$ cm, οπότε προκύπτει:

$$\beta = \frac{120 \times (-50) \text{ cm}^2}{120 - (-50) \text{ cm}} = -35,3 \text{ cm}$$

Συνεπώς, το είδωλο είναι φανταστικό ($\beta < 0$) και απέχει κατά 35,3 cm από το οπτικό κέντρο.

Για να βρούμε το μέγεθος του ειδώλου, υπολογίζουμε πρώτα τη μεγέθυνση του φακού:

$$M = -\frac{\beta}{\alpha} = -\frac{-35,3 \text{ cm}}{120 \text{ cm}} = +0,29.$$

Συνεπώς, το είδωλο είναι όρθιο και έχει μέγεθος ίσο με το 29% του μεγέθους του κεριού:

$$M = \frac{h_E}{h_A} \Rightarrow h_E = M \times h_A = 0,29 \times 20 \text{ cm} = 5,8 \text{ cm}.$$

Παράδειγμα 2

Ένα μολύβι τοποθετείται όρθιο μπροστά από αποκλίνοντα φακό, εστιακής απόστασης 20 cm. Το είδωλο του μολυβιού σχηματίζεται σε απόσταση 10 cm από το οπτικό κέντρο του φακού, και έχει μήκος 8 cm. Να προσδιορίσετε την απόσταση του μολυβιού από τον φακό, και το μήκος του.

Λύση

Χρησιμοποιώντας τον τύπο των λεπτών φακών, λύνουμε ως προς την απόσταση του αντικειμένου:

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{1}{f} - \frac{1}{\beta} \Rightarrow \alpha = \frac{\beta f}{\beta - f}$$

Επειδή ο φακός είναι αποκλίνων, θέτουμε $\beta = -10 \text{ cm}$ και $f = -20 \text{ cm}$, οπότε προκύπτει:

$$\alpha = \frac{-10 \times (-20) \text{ cm}^2}{-10 - (-20) \text{ cm}} = +20 \text{ cm}$$

Συνεπώς, το μολύβι είναι τοποθετημένο **πάνω στην κύρια εστία** του φακού.

Προσοχή: Όταν το αντικείμενο είναι πάνω στην κύρια εστία ενός **αποκλίνοντος** φακού, το είδωλο **δεν** σχηματίζεται στο άπειρο, όπως ισχύει για τον συγκλίνοντα φακό.

Η μεγέθυνση του φακού είναι

$$M = -\frac{\beta}{\alpha} = -\frac{-10 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = +0,5.$$

Το είδωλο είναι όρθιο ($M > 0$) και κατά 50% μικρότερο από το αντικείμενο. Άρα, το μολύβι έχει μήκος:

$$M = \frac{h_E}{h_A} \Rightarrow h_A = \frac{h_E}{M} = \frac{8 \text{ cm}}{0,5} = 16 \text{ cm}.$$

Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον παρακάτω πίνακα με την ένδειξη Σωστό / Λάθος.

| Ερώτηση | Σ/Λ |
|---|-----|
| Το πραγματικό είδωλο ενός φακού σχηματίζεται από την προέκταση των αναδυόμενων ακτίνων. | |
| Το πραγματικό είδωλο σχηματίζεται στο σημείο που τέμνονται οι προσπίπτουσες ακτίνες, γι' αυτό και προβάλλεται σε πέτασμα. | |
| Το πραγματικό είδωλο σχηματίζεται από την άλλη μεριά του φακού, σε σχέση με το αντικείμενο. | |
| Το φανταστικό είδωλο σχηματίζεται από την ίδια μεριά με το αντικείμενο. | |
| Το φανταστικό είδωλο δεν μπορεί να προβληθεί σε πέτασμα, επειδή σχηματίζεται από την προέκταση των αναδυόμενων ακτίνων. | |

| | |
|---|--|
| Ανάλογα με την απόσταση του αντικείμενου από ένα συγκλίνοντα φακό, το είδωλο που σχηματίζεται από τον φακό μπορεί να είναι πραγματικό ή φανταστικό. | |
| Για να βλέπουμε ένα αντικείμενο μεγαλύτερο και όρθιο μέσα από συγκλίνοντα φακό, πρέπει να τοποθετήσουμε το αντικείμενο ανάμεσα στο φακό και στην εστία του. | |
| Τα σπασμένα μπουκάλια σε δάσος ενδέχεται να προκαλέσουν πυρκαγιά, επειδή λειτουργούν ως συγκλίνοντες φακοί. | |
| Ένας αποκλίνων φακός δεν προκαλεί ποτέ μεγέθυνση του αντικείμενου. | |
| Το είδωλο που σχηματίζεται από έναν αποκλίνοντα φακό είναι πάντοτε όρθιο. | |
| Με έναν αποκλίνοντα φακό, δεν είναι δυνατόν να συγκεντρώσουμε τις ακτίνες του ήλιου σε ένα σημείο και να προκαλέσουμε ανάφλεξη. | |
| Στην εξίσωση φακών, η εστιακή απόσταση του συγκλίνοντος φακού είναι πάντα θετική. | |
| Στην εξίσωση φακών, η εστιακή απόσταση του αποκλίνοντος φακού είναι πάντα θετική. | |
| Σε ένα φακό, η μία εστία έχει θετική και η δεύτερη εστία έχει αρνητική εστιακή απόσταση. | |
| Όταν η μεγέθυνση ενός φακού είναι αρνητική, το είδωλο είναι πραγματικό και αντεστραμμένο. | |
| Ένας συγκλίνων φακός έχει πάντοτε θετική μεγέθυνση. | |

Ασκήσεις

1. Σε ποια περιοχή του κύριου άξονα ενός συγκλίνοντος φακού πρέπει να τοποθετήσουμε ένα κερί (κάθετα στον άξονα), ώστε το είδωλο του κεριού να είναι ορατό επάνω σε πτέασμα;
2. Να αναφέρετε **δύο** ομοιότητες και **δύο** διαφορές ανάμεσα στους συγκλίνοντες και τους αποκλίνοντες φακούς.
3. Ένα καρφάκι με ύψος 1 cm τοποθετείται κάθετα στον οπτικό άξονα μπροστά από συγκλίνοντα φακό εστιακής απόστασης 4 cm.

A. Να σχηματίσετε γραφικά (σε χιλιοστομετρικό χαρτί) το είδωλο του καρφιού, σχεδιάζοντας το αντίστοιχο διάγραμμα ακτίνων όταν το αντικείμενο απέχει από τον φακό (i) 10 cm, (ii) 6 cm, και (iii) 2 cm.

B. Για κάθε περίπτωση, να προσδιορίσετε τη φύση του ειδώλου (πραγματικό ή φανταστικό), και να υπολογίσετε τη μεγέθυνση.

4. Ένα σπίρτο ύψους 3,0 cm βρίσκεται σε απόσταση 2,0 cm από έναν κυρτό φακό εστιακής απόστασης 6,0 cm. Να σχεδιάσετε διάγραμμα με τις πορείες των ακτίνων για να καθορίσετε τη θέση και το μέγεθος του ειδώλου. Αφού κάνετε το σχεδιάγραμμα, να χρησιμοποιήσετε την εξίσωση λεπτών φακών και την εξίσωση της μεγέθυνσης για να επαληθεύσετε την απάντησή σας.

5. Η εστιακή απόσταση ενός συγκλίνοντος φακού είναι ίση με 20 cm. Σε ποια από τις παρακάτω αποστάσεις από το οπτικό κέντρο του φακού πρέπει να τοποθετηθεί ένα κεριά κάθετα στον κύριο άξονα του φακού, έτσι ώστε το είδωλο του να είναι όρθιο;

α. 10 cm, β. 22 cm, γ. 30 cm.

Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

6. Η απόσταση μεταξύ των δύο εστιών ενός αποκλίνοντος φακού είναι ίση με 20 cm. Σε ποια απόσταση από το οπτικό κέντρο του φακού πρέπει να τοποθετηθεί ένα μολύβι, κάθετα στον κύριο άξονα του φακού, έτσι ώστε το είδωλο του να είναι φανταστικό:

α. 15 cm. β. 20 cm. γ. 30 cm. δ. οποιαδήποτε από τις παραπάνω αποστάσεις.

Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

7. Ένα μολύβι μήκους 15 cm τοποθετείται κάθετα στον κύριο άξονα ενός συγκλίνοντος φακού, και σε απόσταση 12 cm από το κέντρο του φακού. Η εστιακή απόσταση του φακού είναι 10 cm. Ποιο από τα παρακάτω θα ισχύει για το είδωλο του μολυβιού;

α. Έχει μήκος μικρότερο από 15 cm. β. Είναι πραγματικό. γ. Είναι όρθιο.
δ. Έχει μήκος μεγαλύτερο από 15 cm.

8. Ένα αντικείμενο τοποθετείται σε απόσταση 32,0 cm από έναν συγκλίνοντα φακό εστιακής απόστασης 8,0 cm.

A. Να υπολογίσετε τη θέση και τον προσανατολισμό του ειδώλου.

B. Αν το αντικείμενο έχει ύψος 3,0 cm, να υπολογίσετε το ύψος του ειδώλου.

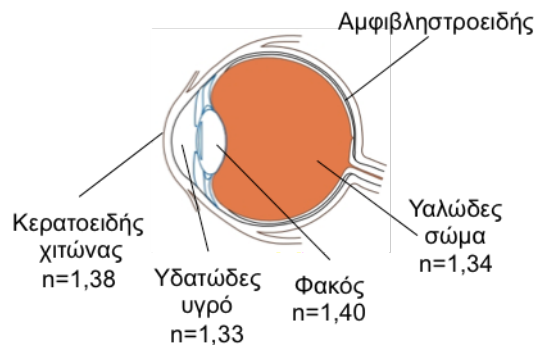
Γ. Να κάνετε το αντίστοιχο σχεδιάγραμμα, τοποθετώντας το αντικείμενο, το είδωλο και τον φακό.

Οπτικά Όργανα

Τα οπτικά όργανα σχηματίζουν είδωλα αντικειμένων με επιθυμητή μορφή και διαστάσεις, χρησιμοποιώντας συνδυασμούς ενός ή περισσοτέρων φακών. Θα παρουσιάσουμε αρχικά το ανθρώπινο μάτι, και στη συνέχεια κάποια σημαντικά οπτικά όργανα, όπως η φωτογραφική μηχανή, ο μεγεθυντικός φακός και το μικροσκόπιο.

Το Ανθρώπινο Μάτι

Το μάτι έχει περίπου σφαιρικό σχήμα, και αποτελείται από διάφορα τμήματα που λειτουργούν ως διαφανή οπτικά μέσα, με ελαφρώς διαφορετικούς δείκτες διάθλασης (Εικόνα 5-34). Στο μπροστινό, εξωτερικό μέρος του ματιού βρίσκεται ο κερατοειδής χιτώνας, και στο πίσω μέρος του ματιού ο αμφιβληστροειδής χιτώνας. Ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένας θάλαμος με άχρωμο διαφανές υγρό (υδατώδες υγρό), ο φακός του ματιού, και ένας θάλαμος με διαφανές, παχύρρευστο υγρό (υαλώδες σώμα).



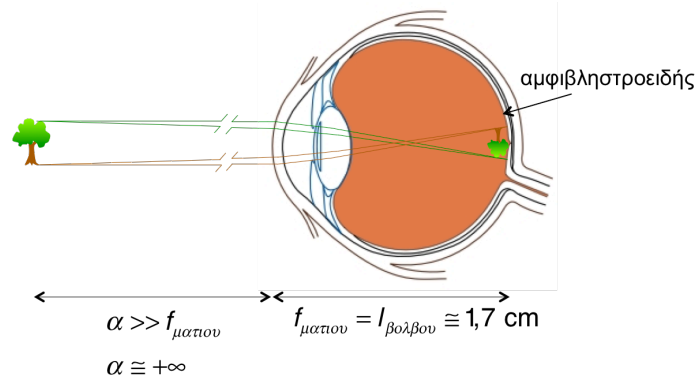
Εικόνα 5-34. Τα διάφορα μέρη του ανθρώπινου ματιού.

Μια φωτεινή ακτίνα εισέρχεται στο μάτι από τον κερατοειδή χιτώνα (δείκτης διάθλασης $n=1,38$), διέρχεται μέσα από το υδατοειδές υγρό ($n=1,33$) τον φακό ($n=1,40$), το υαλώδες υγρό ($n=1,34$), και καταλήγει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα, όπου απορροφάται από εξειδικευμένα κύτταρα που ονομάζονται κωνία και ραβδία. Επειδή η μεγαλύτερη μεταβολή στο δείκτη διάθλασης παρατηρείται ανάμεσα στον αέρα ($n=1$) και στον κερατοειδή χιτώνα ($n=1,38$), ο κερατοειδής προκαλεί τη μεγαλύτερη μεταβολή στη διεύθυνση διάδοσης των φωτεινών ακτίνων. Ένα δεύτερο σημαντικό ποσοστό διάθλασης συμβαίνει στο φακό του ματιού.

Ο έγχρωμος κυκλικός δίσκος στο μπροστινό μέρος του ματιού είναι η ίριδα. Στο κέντρο της ίριδας υπάρχει μια μικρή οπή, η κόρη του ματιού. Η κόρη διαστέλλεται στο αδύνατο φως και συστέλλεται στο έντονο φως, ρυθμίζοντας την ποσότητα του φωτός που εισέρχεται στο μάτι, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού του περιβάλλοντος.

Φυσιολογική Όραση

Για να διακρίνεται καθαρά ένα αντικείμενο, πρέπει το είδωλό του να σχηματίζεται **πάνω στον αμφιβληστροειδή** (Εικόνα 5-35).



Εικόνα 5-35. Στο φυσιολογικό μάτι, το είδωλο από ένα μακρινό αντικείμενο σχηματίζεται μικρότερο και αντεστραμμένο επάνω στον αμφιβληστροειδή.

Όπως προκύπτει από την εξίσωση των φακών, όταν ένα αντικείμενο βρίσκεται πολύ μακριά από τον φακό ($\alpha = +\infty \Rightarrow 1/\alpha = 0$), το είδωλό του σχηματίζεται πάνω στην εστία του φακού:

$$0 + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f} \Rightarrow \beta = f$$

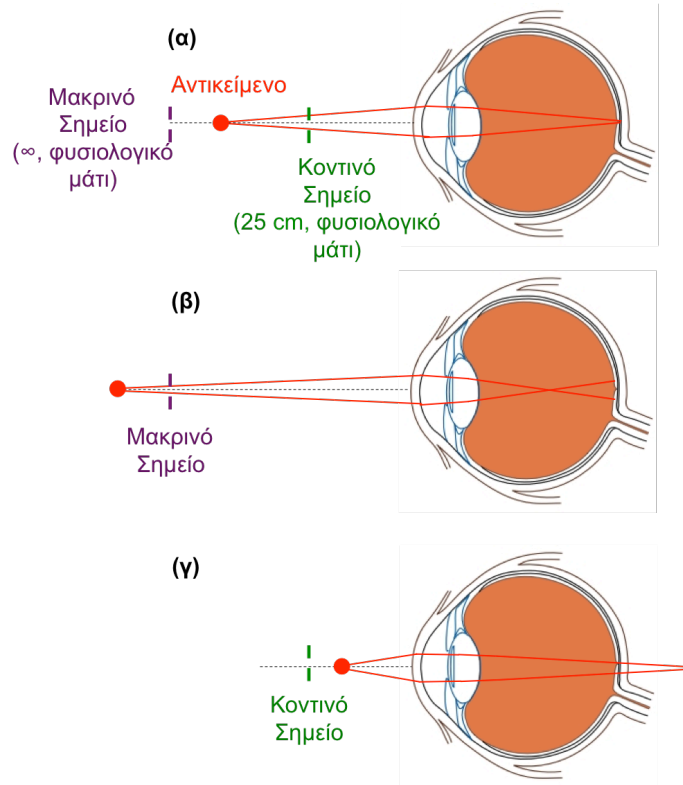
Επειδή τα είδωλα πολύ μακρινών αντικειμένων σχηματίζονται πάνω στον αμφιβληστροειδή, η εστιακή απόσταση του ματιού $f_{\text{ματιου}}$ ισούται με το μήκος του βολβού:

$$f_{\text{ματιου}} = \beta = l_{\text{βολβου}} \cong 1,7 \text{ cm}$$

Έτσι, το φυσιολογικό μάτι λειτουργεί ως συγκλίνων φακός, με εστιακή απόσταση περίπου ίση με τη διάμετρό του (1,7 cm). Τα αντικείμενα που παρατηρούμε με γυμνό μάτι βρίσκονται πάντα σε απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή ($\alpha > f_{\text{ματιου}}$). Συνεπώς, τα είδωλα που σχηματίζει το μάτι είναι πραγματικά, αντεστραμμένα και μικρότερα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-35.

Ορισμός Μακρινού και Κοντινού Σημείου

Το μάτι διακρίνει καθαρά τα αντικείμενα που απέχουν μεταξύ μίας μέγιστης απόστασης, που ονομάζεται **μακρινό σημείο**, και μίας ελάχιστης απόστασης, που ονομάζεται **κοντινό σημείο** (Εικόνα 5-36). Σε ένα μάτι με φυσιολογική όραση, το μακρινό σημείο είναι περίπου άπειρο, και το κοντινό σημείο είναι περίπου ίσο με 25 cm στους ενήλικες, και αρκετά μικρότερο στα παιδιά.



Εικόνα 5-36. (α) Το μάτι σχηματίζει στον αμφιβληστροειδή τα είδωλα αντικειμένων που βρίσκονται ανάμεσα στο μακρινό και το κοντινό σημείο του ματιού. Αντικείμενα πέρα από το μακρινό σημείο εστιάζονται μπροστά, και (γ) αντικείμενα πιο κοντά από το κοντινό σημείο εστιάζονται πίσω από τον αμφιβληστροειδή.

Προσαρμογή του Φακού του Ματιού

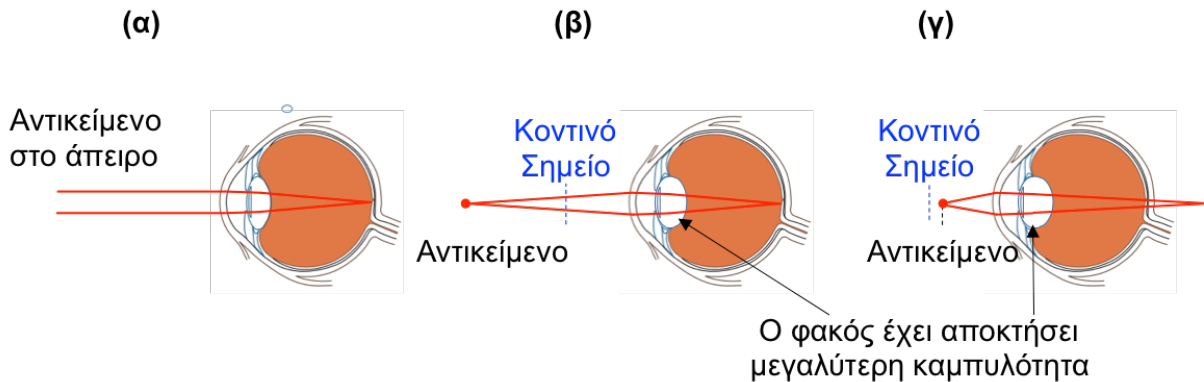
Όταν ένα αντικείμενο πλησιάζει στο μάτι, η απόσταση α του αντικειμένου από τη μπροστινή άκρη του ματιού ελαττώνεται, αλλά η απόσταση β του ειδώλου διατηρείται σταθερή και ίση με $\beta = l_{\beta\alpha\lambda\beta\omicron\nu}$. Για να ικανοποιείται ο τύπος των φακών πρέπει να ελαττώνεται συνεχώς η εστιακή απόσταση του ματιού:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{l_{\beta\alpha\lambda\beta\omicron\nu}} : \text{Εάν } \alpha \downarrow \Rightarrow f \downarrow .$$

Το μάτι αυξάνει την κυρτότητα και τη διαθλαστική ικανότητα του φακού με σύσπαση ενός μυός (ακτινωτός μυς). Η ικανότητα αυτή του οφθαλμού ονομάζεται **προσαρμογή**. Στην Εικόνα 5-37 εξηγούμε την προσαρμογή του φυσιολογικού ματιού.

Στο σχήμα 5-37(α), το αντικείμενο βρίσκεται σε αρκετά μεγάλη απόσταση και οι ακτίνες του προσπίπτουν παράλληλα στο μάτι. Το είδωλο σχηματίζεται στο πίσω μέρος χωρίς να χρειάζεται προσαρμογή (ο μυς είναι χαλαρός). Στο σχήμα (β), το αντικείμενο πλησιάζει σε μικρότερη απόσταση, αλλά παραμένει πιο μακριά από το κοντινό σημείο. Για να σχηματίζεται το είδωλο στο πίσω μέρος του ματιού, πρέπει οι ακτίνες να εκτρέπονται περισσότερο,

δηλαδή να αυξηθεί η διαθλαστική ικανότητα του ματιού. Αυτό επιτυγχάνεται με προσαρμογή του φακού του ματιού. Στο σχήμα (γ), το αντικείμενο έχει πλησιάσει το μάτι πιο κοντά από το κοντινό σημείο. Ο φακός δεν μπορεί να προσαρμοστεί επαρκώς, και το είδωλο σχηματίζεται πίσω από τον αμφιβληστροειδή: το αντικείμενο φαίνεται θολό.



Εικόνα 5-37. (α) Το **φυσιολογικό** μάτι εστιάζει στο πίσω μέρος του τις ακτίνες που προέρχονται από αντικείμενα σε μεγάλη απόσταση, χωρίς να προσαρμόζει το φακό του. (β) Κοντινά αντικείμενα εστιάζονται επίσης στο πίσω μέρος του ματιού, με κατάλληλη **προσαρμογή** (αύξηση της καμπυλότητας του φακού). (γ) Σε αποστάσεις μικρότερες από μια ελάχιστη τιμή $d_{\text{ελαχ}}$, ο φακός του ματιού δεν προσαρμόζεται επαρκώς, και το είδωλο σχηματίζεται πίσω από το μάτι.

Δραστηριότητα: Να πλησιάσετε ένα κέρμα κοντά στο μάτι σας, και να παρατηρήσετε πώς αυξάνεται η πίεση που νιώθετε στο φακό του ματιού σας καθώς αυτός προσαρμόζεται. Η απόσταση στην οποία το κέρμα γίνεται θολό είναι το κοντινό σημείο του ματιού σας.

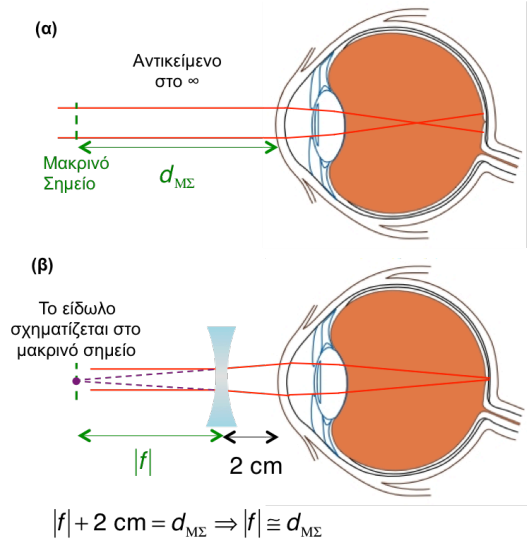
Μυωπία

Η μυωπία είναι πολύ συχνή διαθλαστική ανωμαλία, που παρατηρείται στο 30% του γενικού πληθυσμού. Στο φυσιολογικό μάτι, το μακρινό σημείο είναι άπειρο. Στο μυωπικό μάτι όμως, το μακρινό σημείο είναι μικρό (μερικά μέτρα). Αυτό οφείλεται στο ότι ο βολβός του ματιού έχει μεγαλύτερο μήκος από το κανονικό, ή έχει αυξημένη διαθλαστική δύναμη.

Εάν κάποιο αντικείμενο βρίσκεται *πέρα* από το μακρινό σημείο, εστιάζεται *μπροστά* από τον αμφιβληστροειδή στο μυωπικό μάτι, οπότε δεν διακρίνεται καθαρά (Εικόνα 5-38(α)). Έτσι, το μυωπικό μάτι δεν εστιάζει σωστά τα μακρινά αντικείμενα. Το μακρινό σημείο εξαρτάται από το βαθμό μυωπίας του ματιού.

Για τη διόρθωση της μυωπίας χρησιμοποιείται κατάλληλος **αποκλίνων** φακός (Εικόνα 5-38(β)). Ακτίνες από ένα μακρινό αντικείμενο προσπίπτουν παράλληλα στον κεντρικό άξονα του διορθωτικού φακού, και οι προεκτάσεις των αναδυόμενων ακτίνων φαίνεται ότι *προέρχονται από την εστία* του φακού.

Εάν ο διορθωτικός φακός επιλεγεί έτσι ώστε η εστία του να βρίσκεται **πάνω στο μακρινό σημείο** του ματιού, το είδωλο πολύ μακρινών αντικειμένων σχηματίζεται στο μακρινό σημείο. Έτσι, το μάτι εστιάζει τις αναδυόμενες ακτίνες πάνω στον αμφιβληστροειδή, όπως θα συνέβαινε εάν το ίδιο το αντικείμενο βρισκόταν πάνω στο μακρινό σημείο.



Εικόνα 5-38. Μυωπικό μάτι: (α) Αντικείμενα πέρα από το μακρινό σημείο εστιάζονται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή. (β) Εάν διέλθουν από αποκλίνοντα φακό, οι αναδυόμενες ακτίνες φαίνεται να προέρχονται από το μακρινό σημείο, και εστιάζονται κανονικά.

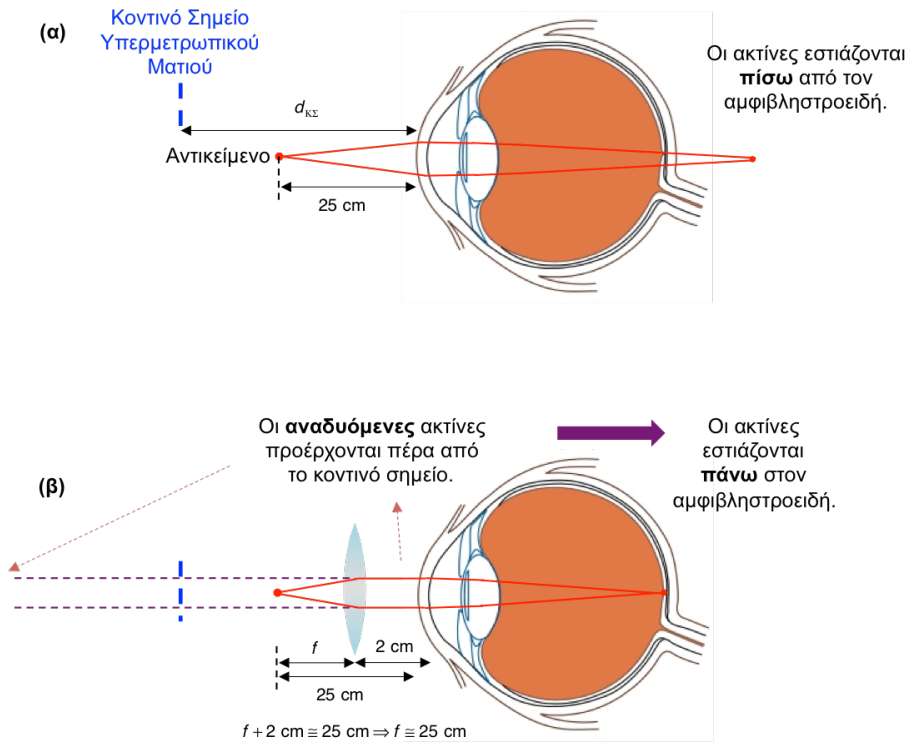
Στη διόρθωση της **μυωπίας** χρησιμοποιείται **αποκλίνων** φακός. Η εστιακή απόσταση του φακού ισούται περίπου με το μακρινό σημείο του ματιού, $|f| \cong d_{M\Sigma}$. Τα είδωλα μακρινών αντικειμένων σχηματίζονται στο μακρινό σημείο, και διακρίνονται καθαρά.

Παράδειγμα: Ένα μυωπικό μάτι έχει μακρινό σημείο $d_{M\Sigma} = 35$ cm. Ένας αποκλίνων διορθωτικός φακός, εστιακής απόστασης $f = -33$ cm, τοποθετείται 2 cm μπροστά από το μάτι, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-38. Το είδωλο πολύ μακρινών αντικειμένων θα σχηματίζεται πάνω στην εστία του διορθωτικού φακού, σε απόσταση $|-33| \text{ cm} + 2 \text{ cm} = 35$ cm από το μάτι (δηλαδή πάνω στο μακρινό σημείο του ματιού).

Υπερμετρωπία

Στην υπερμετρωπία, ο βολβός του ματιού έχει μικρότερο μήκος από το φυσιολογικό, ή έχει μικρή διαθλαστική δύναμη. Γι αυτό, το μάτι εστιάζει *τα είδωλα όλων των αντικειμένων πίσω από τον αμφιβληστροειδή*. Με προσαρμογή του φακού, το μάτι μπορεί να μετακινήσει τα είδωλα αντικειμένων, που βρίσκονται από άπειρη έως μια ελάχιστη απόσταση, πάνω στον αμφιβληστροειδή. Η ελάχιστη αυτή απόσταση, το κοντινό σημείο του ματιού, είναι όμως

αρκετά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τον φυσιολογικό οφθαλμό: ενώ το φυσιολογικό μάτι ενός ενήλικα διαβάζει μια τυπωμένη σελίδα σε απόσταση 25 cm, ένας άνθρωπος με υπερμετρωπία τη διακρίνει καθαρά σε μεγαλύτερη απόσταση, π.χ. $d_{κς} = 1$ m (Εικόνα 5-39(α)).



Εικόνα 5-39. (α) Το υπερμετρωπικό μάτι έχει μεγαλύτερο κοντινό σημείο, σε σύγκριση με το φυσιολογικό μάτι ($d_{κς} \gg 25 \text{ cm}$). (β) Για να βλέπει καθαρά το υπερμετρωπικό μάτι ένα αντικείμενο σε απόσταση 25 cm, παρεμβάλλεται κατάλληλος συγκλίνων διορθωτικός φακός. Οι αναδύομενες ακτίνες φαίνεται να προέρχονται πέρα από το κοντινό σημείο, οπότε συγκλίνουν κανονικά στο πίσω μέρος του αμφιβληστροειδή.

Για να διορθωθεί η όραση του υπερμετρωπικού ματιού, χρησιμοποιείται *συγκλίνων* διορθωτικός φακός, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-39(β). Οι ακτίνες από ένα αντικείμενο σε απόσταση 25 cm αναδύονται μέσα από τον φακό υπό μικρή γωνία (περίπου οριζόντιες), οπότε φαίνεται ότι προέρχονται από ένα μακρινό αντικείμενο (πέρα από το κοντινό σημείο του ματιού). Το μάτι εστιάζει κανονικά αυτές τις ακτίνες στο πίσω μέρος του, με προσαρμογή.

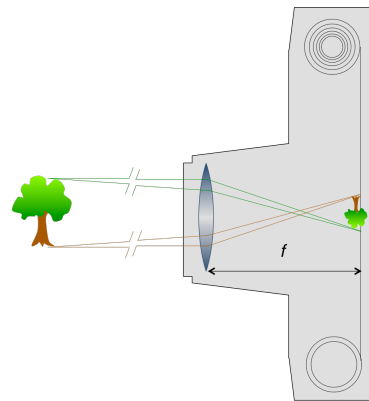
Στη διόρθωση της **υπερμετρωπίας** χρησιμοποιείται **συγκλίνων** φακός. Εάν η εστιακή απόσταση του διορθωτικού φακού είναι παρόμοια με το κοντινό σημείο του φυσιολογικού ματιού, ($f \cong 25 \text{ cm}$), τα αντικείμενα από αυτή την απόσταση διακρίνονται καθαρά.

Πρεσβυωπία

Με την πάροδο της ηλικίας (περίπου μετά την ηλικία των 40-45 ετών), ο φακός του ανθρώπου σκληραίνει προοδευτικά, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται η ικανότητα προσαρμογής του ματιού. Το κοντινό σημείο αυξάνεται, οπότε το μάτι δεν μπορεί να διακρίνει καθαρά τα κοντινά αντικείμενα. Η διόρθωση επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων συγκλινόντων φακών, όπως στην υπερμετρωπία.

Η Φωτογραφική Μηχανή

Η φωτογραφική μηχανή έχει παρόμοια γεωμετρία με το ανθρώπινο μάτι. Το φως από ένα αντικείμενο εισέρχεται από μία οπή σε ένα κουτί με αδιαφανή τοιχώματα, διέρχεται μέσα από ένα συγκλίνοντα φακό, και σχηματίζει είδωλο πάνω σε ένα φωτογραφικό φιλμ (παραδοσιακή μηχανή) ή σε αισθητήρα (ψηφιακή μηχανή). Το μέγεθος της οπής και ο χρόνος, κατά τον οποίο αυτή παραμένει ανοικτή, ρυθμίζονται ανάλογα με τη φωτεινότητα του αντικειμένου και του περιβάλλοντος.



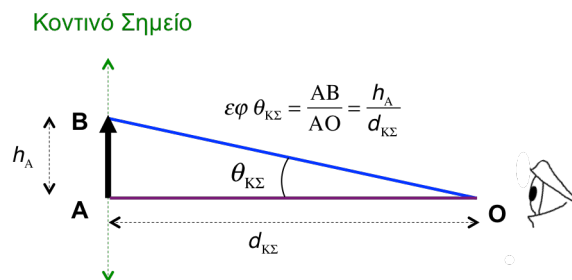
Σε αντίθεση με το μάτι, η εστιακή απόσταση του φακού είναι σταθερή, επειδή η κυρτότητα του φακού της μηχανής δεν μεταβάλλεται. Για να εστιάζονται αντικείμενα σε διάφορες αποστάσεις, πρέπει να αλλάζει η απόσταση του ειδώλου από το φακό. Για κοντινά αντικείμενα (μεγάλες τιμές $1/\alpha$), πρέπει να μεγαλώνει η απόσταση ειδώλου-φακού (μικρές τιμές $1/\beta$), έτσι ώστε το άθροισμα $1/\alpha + 1/\beta = 1/f$ να είναι σταθερό. Επειδή το είδωλο σχηματίζεται σε συγκεκριμένη θέση (πάνω στο φιλμ), η απόσταση β μεταβάλλεται με μετακίνηση του φακού.

Ο Μεγεθυντικός Φακός

Στα προηγούμενα εξηγήσαμε ότι ένας συγκλίνων φακός λειτουργεί ως μεγεθυντικός, όταν το αντικείμενο βρίσκεται ανάμεσα στο φακό και στην εστία.

Όταν παρατηρούμε ένα αντικείμενο με γυμνό μάτι, μπορούμε να το πλησιάσουμε μέχρι το κοντινό σημείο του ματιού, $d_{\text{κς}}$. Σε αυτή την απόσταση βλέπουμε το αντικείμενο υπό τη μέγιστη γωνία όρασης $\theta_{\text{κς}}$. Από το σχήμα προκύπτει ότι η γωνία $\theta_{\text{κς}}$ ικανοποιεί τη

$$\text{σχέση } \varepsilon\varphi \theta_{\text{κς}} = \frac{h_A}{d_{\text{κς}}}$$

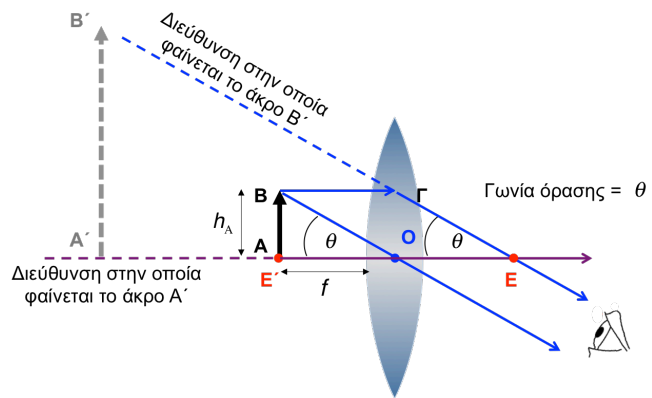


Εικόνα 5-40. Για να δούμε ένα αντικείμενο με τη μέγιστη γωνία όρασης, με γυμνό μάτι, το τοποθετούμε στο κοντινό σημείο του ματιού.

Για παράδειγμα, εάν το κοντινό σημείο του ματιού είναι $d_{\text{κς}} = 25 \text{ cm}$, ένα γραμματόσημο πλευράς $h_A = 1 \text{ cm}$ φαίνεται από αυτή την απόσταση με γωνία όρασης:

$$\varepsilon\varphi \theta_{\text{κς}} = \frac{h_A}{d_{\text{ελαχ}}} = \frac{1 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \Rightarrow \theta_{\text{κς}} = 2,3^\circ$$

Όταν παρατηρούμε το αντικείμενο μέσα από έναν μεγεθυντικό φακό, βλέπουμε το είδωλο του αντικειμένου. Στο διπλανό σχήμα, το αντικείμενο AB έχει τοποθετηθεί πάνω στην εστία E' του φακού. Οι ακτίνες BO και ΓE είναι παράλληλες, και το είδωλο A'B' σχηματίζεται στο άπειρο.



Εικόνα 5-41. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην εστία του φακού, το είδωλο σχηματίζεται στο άπειρο. Μέσα από το φακό παρατηρούμε το είδωλο. Εάν η εστιακή απόσταση είναι μικρή, η γωνία όρασης γίνεται $\theta \gg \theta_{\text{κς}}$.

Το σημείο B' φαίνεται πάνω στη διεύθυνση B'ΓE, και το σημείο A' πάνω στη διεύθυνση A'AE. Η γωνία $A'\hat{E}B' = \theta$ είναι η **γωνία όρασης του ειδώλου**. Επειδή $A\hat{O}B = A'\hat{E}B' = \theta$ (γωνίες εντός-εκτός και επί τα αυτά), προκύπτει

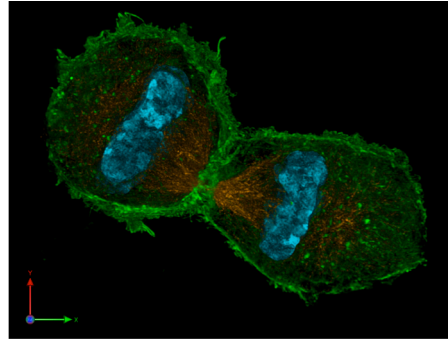
$$\varepsilon\varphi \theta = \frac{AB}{AO} = \frac{h_A}{f}$$

Όσο πιο μικρή είναι η εστιακή απόσταση f , τόσο μεγαλύτερη γίνεται η γωνία όρασης θ . Για παράδειγμα, εάν ο μεγεθυντικός φακός έχει εστιακή απόσταση $f = 5 \text{ cm}$, η γωνία όρασης, με την οποία παρατηρούμε το γραμματόσημο μέσα από το φακό, γίνεται $\varepsilon\varphi \theta = \frac{h_A}{f} = \frac{1 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} \Rightarrow \theta = 11,3^\circ$. Η γωνία θ είναι ~ 5 φορές μεγαλύτερη από την μέγιστη γωνία $\theta_{\text{κς}}$, με την οποία φαίνεται το γραμματόσημο με γυμνό μάτι. Το γραμματόσημο φαίνεται ~ 5 φορές μεγαλύτερο, μέσα από το φακό.

Στον **μεγεθυντικό φακό**, ο παρατηρητής τοποθετεί το αντικείμενο κοντά στη εστία του φακού και κοιτάζει από την άλλη μεριά του φακού, με το μάτι κοντά στο φακό. **Εάν η εστιακή απόσταση του φακού είναι μικρή**, η γωνία όρασης μεγαλώνει και το είδωλο φαίνεται μεγάλο.

Το Οπτικό Μικροσκόπιο

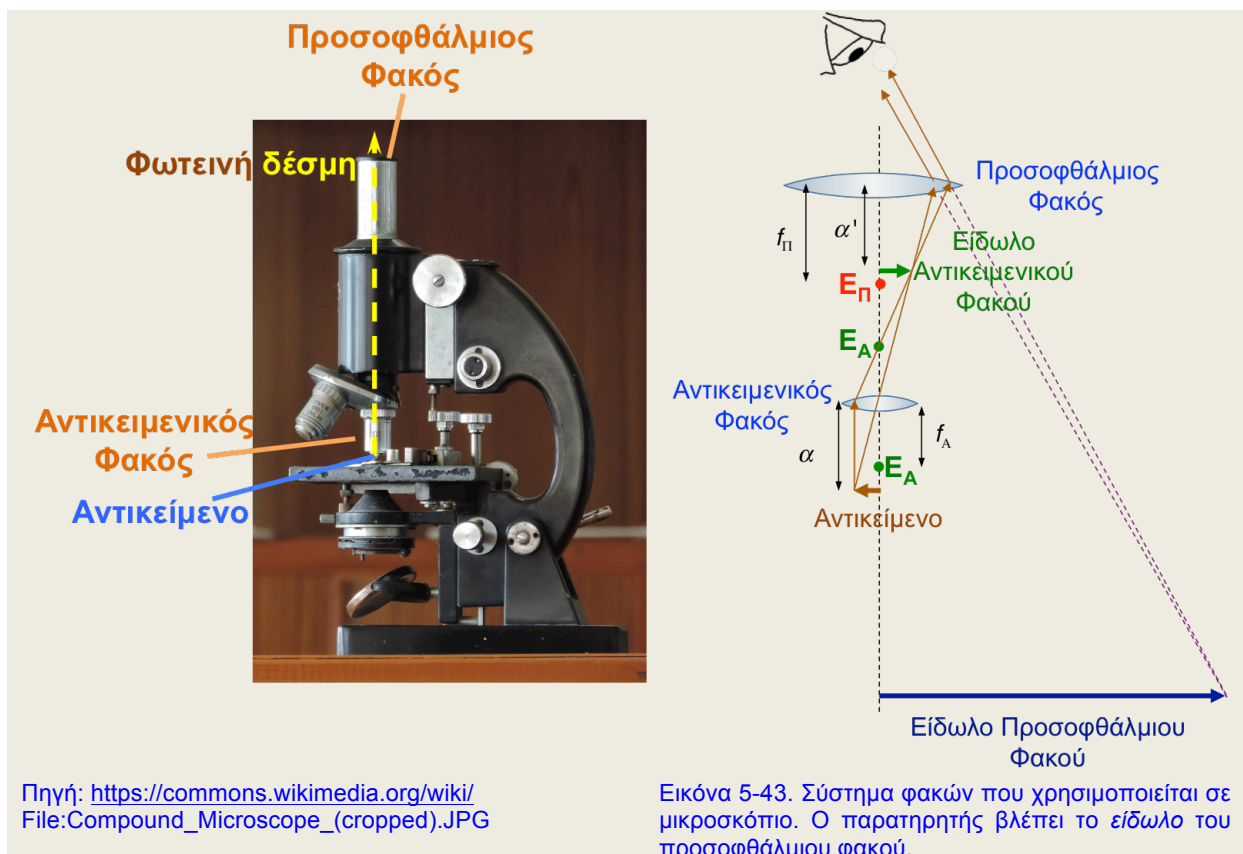
Το οπτικό μικροσκόπιο είναι μια οπτική διάταξη που επιτρέπει την παρατήρηση αντικειμένων αόρατων με γυμνό μάτι, επειδή τα μεγενθύνει σε μεγάλο βαθμό. Το μικροσκόπιο έχει πολλές εφαρμογές σε όλες τις φυσικές επιστήμες. Το Νόμπελ Χημείας του 2014 απονεμήθηκε για την εφεύρεση του μικροσκοπίου φθορισμού, το οποίο κάνει δυνατή τη μελέτη μορίων στο εσωτερικό των κυττάρων, με διαστάσεις μερικών νανομέτρων ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Η Εικόνα 5-42 έχει παραχθεί με τέτοιο μικροσκόπιο, και δείχνει ένα κύτταρο στο τέλος της διαίρεσής του.



Εικόνα 5-42. Διαίρεση κυττάρων, όπως απεικονίζεται σε μικροσκόπιο φθορισμού.

Πηγή: Lothar Schermelleh, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5728354>.

Η Εικόνα 5-43 δείχνει ένα σύνθετο οπτικό μικροσκόπιο, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε μαθητικά εργαστήρια.



Εικόνα 5-43. Σύστημα φακών που χρησιμοποιείται σε μικροσκόπιο. Ο παρατηρητής βλέπει το είδωλο του προσοφθάλμιου φακού.

Το μικροσκόπιο της Εικόνας 5-43 αποτελείται από δύο συγκλίνοντες φακούς: τον **αντικειμενικό φακό**, που βρίσκεται κοντά στο αντικείμενο υπό παρατήρηση, και τον **προσοφθάλμιο φακό**, που βρίσκεται από τη μεριά του παρατηρητή. Το αντικείμενο τοποθετείται λίγο πριν από την εστία E_A του αντικειμενικού φακού ($\alpha \approx f_A$). Οι ακτίνες

από το αντικείμενο διαθλώνται στον αντικειμενικό φακό, και δημιουργούν το είδωλο του αντικειμενικού φακού. Το μικροσκόπιο ρυθμίζεται έτσι ώστε το είδωλο να είναι πολύ κοντά στην εστία του προσοφθάλμιου φακού, ($\alpha' \ll f_{\text{II}}$). Το είδωλο **λειτουργεί σαν αντικείμενο** για τον προσοφθάλμιο φακό, ο οποίος δημιουργεί ένα τεράστιο, φανταστικό είδωλο. Μέσα από το μικροσκόπιο παρατηρούμε το είδωλο του προσοφθάλμιου φακού.

Θυμίζουμε ότι εάν κάποιο αντικείμενο τοποθετηθεί κοντά στην εστία ενός συγκλίνοντος φακού, $f \cong \alpha$, το είδωλο του αντικειμένου σχηματίζεται με μεγάλη μεγέθυνση:

$$1/\beta = 1/f - 1/\alpha \cong 0 \Rightarrow |\beta| \cong +\infty, \text{ και } |M| = |\beta|/|\alpha| \cong +\infty.$$

Πίνακας 2. Σύνοψη Χαρακτηριστικών Απλών Λεπτών Φακών.

| Τύπος Φακού | Απόσταση α | Απόσταση β | Τύπος Ειδώλου | Μεγέθυνση Αντικειμένου M | |
|-------------|------------------------|------------------|---------------------------------------|----------------------------|--|
| Συγκλίνων | $0 < \alpha < f$ | $\beta < 0$ | Φανταστικό, Όρθιο, Μεγαλύτερο | $M > 1$ | |
| Συγκλίνων | $f < \alpha < 2f$ | $\beta > 0$ | Πραγματικό, Αντεστραμμένο, Μεγαλύτερο | $M < -1$ | |
| Συγκλίνων | $2f < \alpha$ | $\beta > 0$ | Πραγματικό, Αντεστραμμένο, Μικρότερο | $-1 < M < 0$ | |
| Αποκλίνων | $0 < \alpha < +\infty$ | $\beta < 0$ | Φανταστικό, Όρθιο, Μικρότερο | $0 < M < 1$ | |

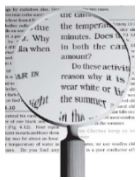
Ερωτήσεις Κατανόησης

Να συμπληρώσετε τον παρακάτω πίνακα με την ένδειξη Σωστό / Λάθος.

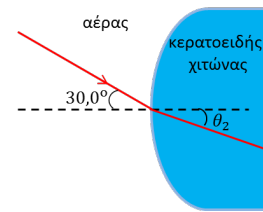
| Ερώτηση | Σ/Λ |
|--|-----|
| Στο μάτι, το μεγαλύτερο ποσοστό διάθλασης του φωτός συμβαίνει στον φακό. | |
| Κατά την προσαρμογή του ματιού, ο φακός του ματιού μετακινείται πιο μπρος ή πιο πίσω. | |
| Στο φυσιολογικό μάτι, τα πολύ μακρινά αντικείμενα εστιάζονται στο πίσω μέρος χωρίς προσαρμογή. | |

| | |
|---|--|
| Στο μυωπικό μάτι, τα μακρινά αντικείμενα εστιάζονται πίσω από τον αμφιβληστροειδή. | |
| Για να διορθωθεί η μυωπία, χρησιμοποιούμε συγκλίνοντα μεγεθυντικό φακό. | |
| Ο διορθωτικός φακός της μυωπίας πρέπει να έχει εστιακή απόσταση περίπου ίση με το μακρινό σημείο του ματιού. | |
| Στο υπερμετρωπικό μάτι, μακρινά αντικείμενα εστιάζονται πίσω από τον αμφιβληστροειδή χωρίς προσαρμογή, και πάνω στον αμφιβληστροειδή με προσαρμογή. | |
| Το υπερμετρωπικό μάτι έχει υπερβολικά μεγάλο κοντινό σημείο. | |
| Το υπερμετρωπικό μάτι έχει υπερβολικά μικρό μακρινό σημείο. | |
| Για να διορθωθεί η υπερμετρωπία, χρησιμοποιούμε αποκλίνοντα φακό. | |
| Ο μεγεθυντικός φακός αυξάνει τη γωνία όρασης του αντικειμένου. | |

Ασκήσεις

1. Οι μεγεθυντικοί φακοί χρησιμοποιούνται συνήθως για να δημιουργούν είδωλα που είναι μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα αντικείμενα, αλλά επίσης μπορεί να δημιουργούν είδωλα που είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα αντικείμενα. Να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό.
- 
2. Ένας μεγεθυντικός φακός έχει εστιακή απόσταση 12,0 cm. Ένα νόμισμα, με διάμετρο 2,0 cm, τοποθετείται σε απόσταση 3,4 cm από τον φακό. Να υπολογίσετε τη θέση του ειδώλου του κέρματος. Πόση είναι η διάμετρος του ειδώλου;
 3. Ένας συλλέκτης γραμματοσήμων θέλει να μεγεθύνει ένα γραμματόσημο 4,0 φορές, όταν το γραμματόσημο βρίσκεται σε απόσταση 3,5 cm από τον φακό. Πόσο μεγάλη πρέπει να είναι η εστιακή απόσταση του φακού;
 4. Ένα αντικείμενο τοποθετείται στα αριστερά ενός κυρτού φακού εστιακής απόστασης 25 mm, έτσι ώστε το είδωλο του να έχει το ίδιο ύψος με το αντικείμενο. Να υπολογίσετε τις θέσεις του ειδώλου και του αντικειμένου.

5. Καθώς το φως εισέρχεται στο μάτι, συναντά πρώτα τον κερατοειδή χιτώνα. Να θεωρήσετε ότι μια ακτίνα φωτός προσπίπτει στον κερατοειδή χιτώνα ενός ατόμου υπό γωνία $30,0^\circ$ ως προς την κάθετο. Ο δείκτης διάθλασης του κερατοειδούς είναι ίσος με 1,38.



- A.** Να υπολογίσετε τη γωνία διάθλασης της ακτίνας, χρησιμοποιώντας τον νόμο του Snell.
- B.** Ποια θα είναι η γωνία διάθλασης της ίδιας ακτίνας, εάν το μάτι του παρατηρητή βρίσκεται μέσα σε νερό;
- Γ.** Η διάθλαση είναι μεγαλύτερη στον αέρα ή στο νερό; Τι συνέπειες έχει αυτό ως προς τη δυνατότητα σχηματισμού ευδιάκριτου ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, όταν κοιτάμε μέσα στο νερό;
6. Ο Φώτης κάθεται στην τελευταία σειρά στην τάξη του και δυσκολεύεται να διαβάσει από τον πίνακα. Πώς ονομάζεται η ανωμαλία της όρασης, από την οποία πάσχει ο μαθητής αυτός; Πως μπορεί να διορθωθεί η ανωμαλία αυτή;
7. Η Αντιγόνη έχει μυωπία και δεν μπορεί να δει ευδιάκριτα τα αντικείμενα πέραν από 1,2 m. Ποιος πρέπει να είναι ο τύπος του διορθωτικού φακού που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των γυαλιών της, ώστε να αποκατασταθεί η όραση της;

