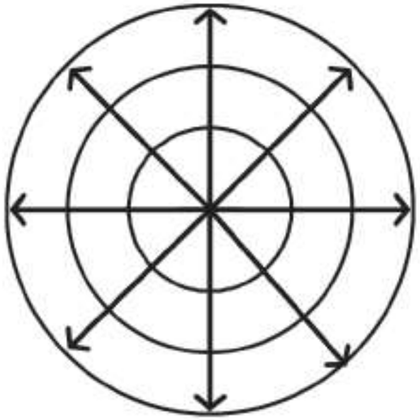
# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

# ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

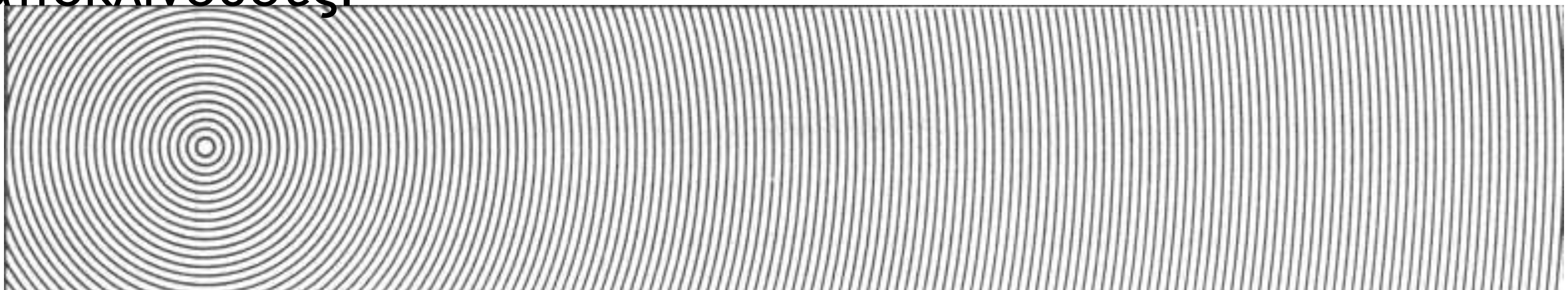
Όταν προσπίπτει φως σε μια διεπιφάνεια που σχηματίζεται μεταξύ δύο οπτικά διαφορετικών μέσων, ένα μέρος του υφίσταται ανάκλαση ενώ το υπόλοιπο διέρχεται από το πρώτο στο δεύτερο μέσο.

**Εξαιτίας της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός σε ένα ομογενές μέσο, χρησιμοποιούμε ευθείες γραμμές για να παραστήσουμε το ίχνος της διαδρομής του.**

- Για ***επίπεδα κύματα φωτός***, τα επίπεδα μέτωπα κύματος είναι εγκάρσια στη διεύθυνση διάδοσης που σημειώνεται με μια τέτοια ευθεία και οι ακτίνες φωτός είναι όλες παράλληλες σε αυτήν.

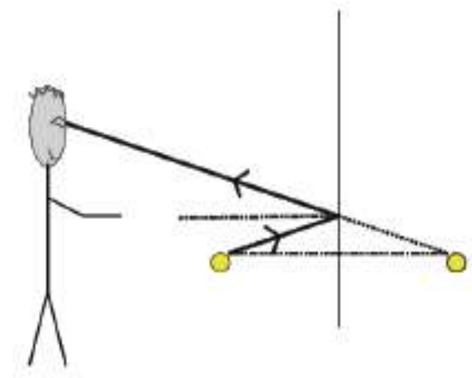


- Στην περίπτωση **σφαιρικών κυμάτων φωτός**, όπως αυτά που εκπέμπονται από σημειακές πηγές, τα μέτωπα του εκπεμπόμενου κύματος είναι σφαιρικές επιφάνειες και οι ακτίνες του φωτός, που είναι και πάλι κάθετες στα σφαιρικά κυματικά μέτωπα, είναι αποκλίνουσες.

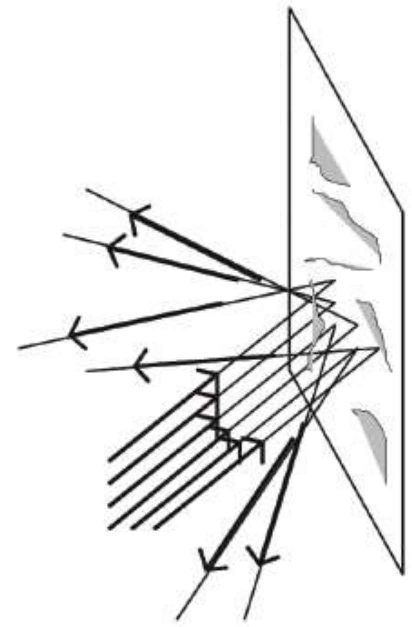


# ΑΝΑΚΛΑΣΗ

Όταν ένα επίπεδο κύμα φωτός με παράλληλες ακτίνες προσπίπτει σε μια λεία και επίπεδη διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφανών μέσων, υφίσταται ***κατοπτρική ανάκλαση*** από αυτήν και οι ανακλώμενες ακτίνες παραμένουν παράλληλες.



Εάν η επίπεδη επιφάνεια, στην οποία προσπίπτει το φως, δεν είναι λεία αλλά τραχιά, η ανακλώμενη ακτινοβολία υπόκειται σε ***διαχεόμενη ανάκλαση***



Αρκετά καλή προσέγγιση κατοπτρικής ανάκλασης παρατηρείται σε καθρέπτες, τζάμια και άλλες γυαλιστερές επιφάνειες ενώ διαχεόμενη ανάκλαση συμβαίνει σε θαμπές και τραχιές επιφάνειες.

**Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο αυτών τύπων ανάκλασης είναι ότι εικόνα ειδώλου σχηματίζεται μόνο στην περίπτωση της κατοπτρικής ανάκλασης.**

# ΑΝΑΚΛΑΣΗ

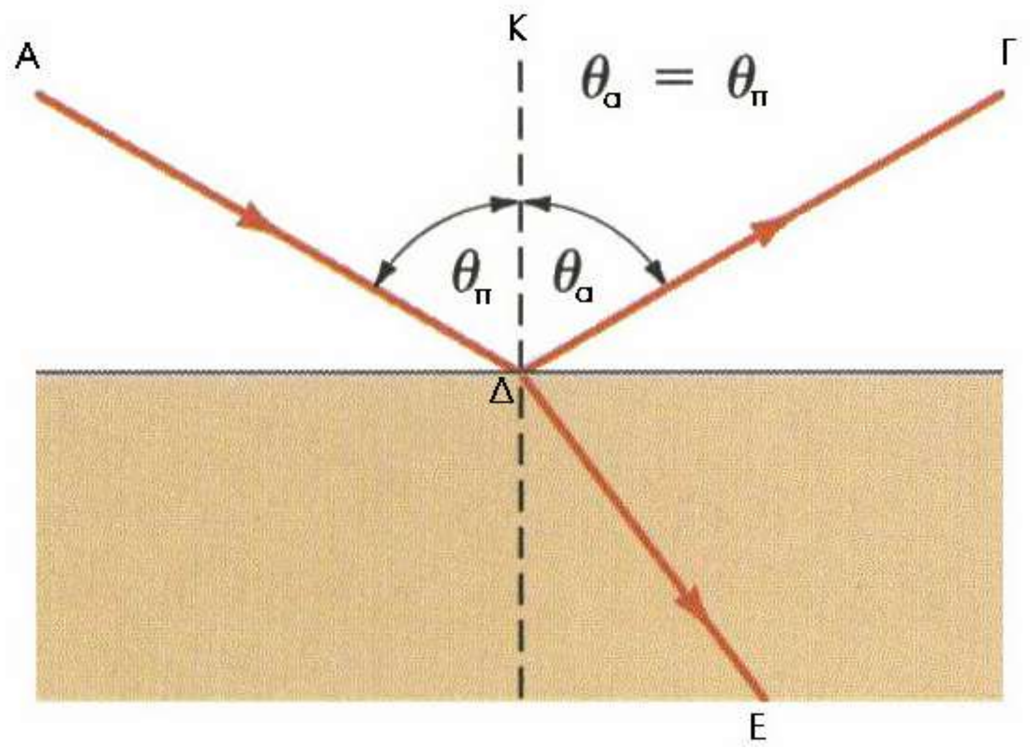
Η ακτίνα (ή η δέσμη) πριν ανακλασθεί ονομάζεται **προσπίπτουσα** ή **αρχική**, ενώ μετά την ανάκλαση ονομάζεται **ανακλώμενη**.

Η γωνία που σχηματίζει η προσπίπτουσα με την κάθετη στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, ονομάζεται **γωνία πρόσπτωσης**.

Η γωνία που σχηματίζει η ανακλώμενη ακτίνα με την κάθετη στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, ονομάζεται **γωνία ανάκλασης**.

**α' νόμος της ανάκλασης**:

Η ανακλώμενη ακτίνα βρίσκεται στο επίπεδο που ορίζουν η προσπίπτουσα ακτίνα και η κάθετος στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης.

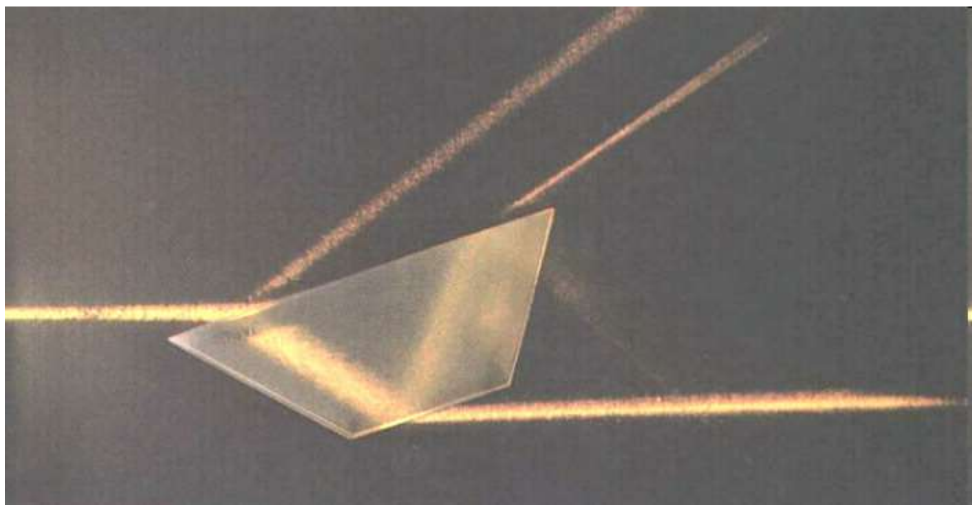



**β' νόμος της ανάκλασης**:

Η γωνία πρόσπτωσης και η γωνία ανάκλασης είναι ίσες.

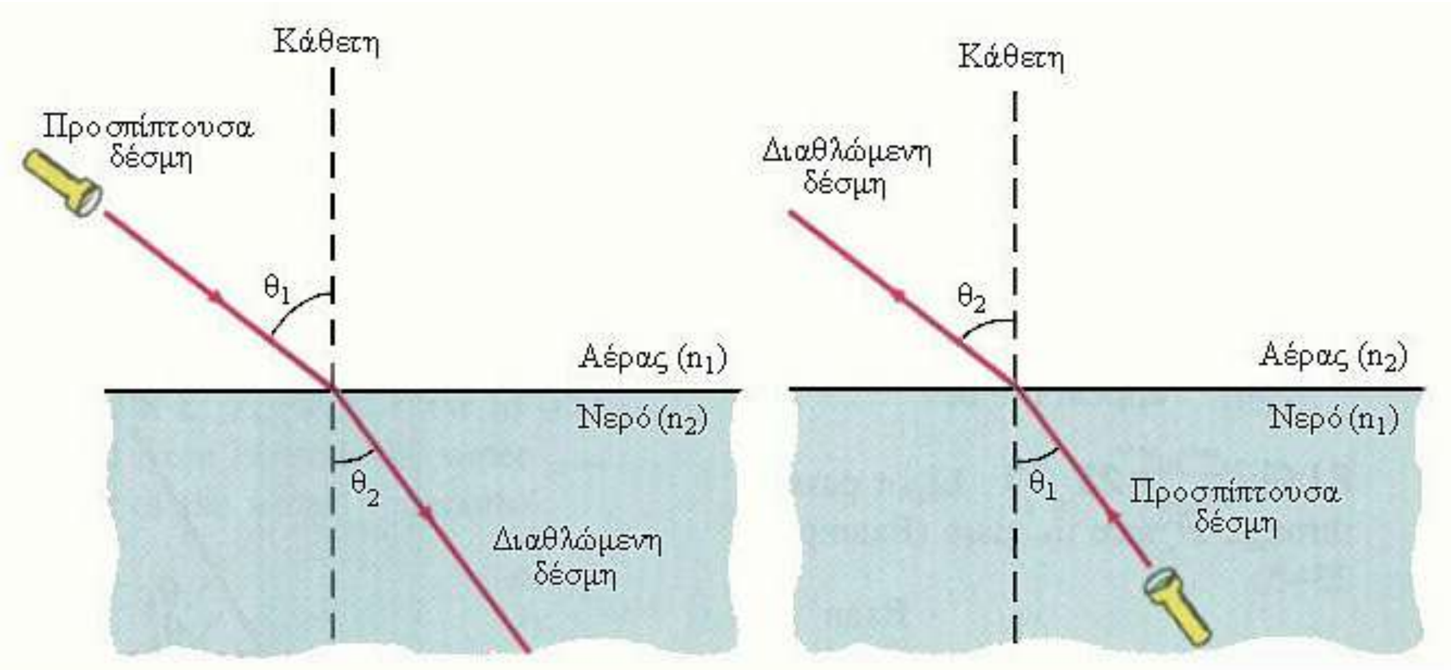
## ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Όταν μία δέσμη (παραλλήλων) φωτεινών ακτίνων, που διαδίδεται σ' ένα μέσο, συναντάει τη διαχωριστική επιφάνεια με ένα άλλο μέσο, τότε ένα μέρος από αυτή **ανακλάται** και το υπόλοιπο περνάει στο δεύτερο μέσο αλλάζοντας τη διεύθυνση διάδοσής της. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **διάθλαση του φωτός** (refraction).



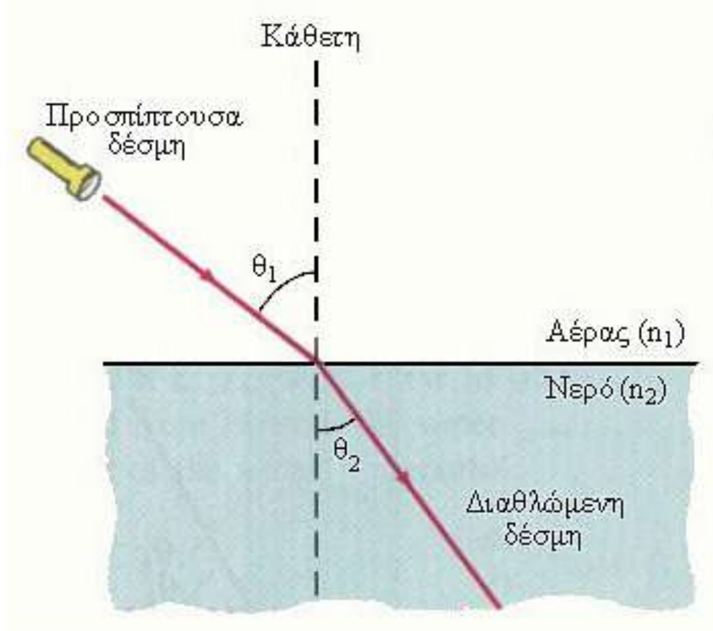
Τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης συμβαίνουν ταυτοχρόνως, όταν το φως περνάει από ένα μέσο σ' ένα άλλο, όπως συμβαίνει στο γυάλινο πρίσμα της φωτογραφίας.
Η διαθλώμενη δέσμη ανακλάται και διαθλάται μερικά και από την κάτω διαχωριστική επιφάνεια του πρίσματος.

# ΔΙΑΘΛΑΣΗ




**Η πορεία των φωτεινών ακτίνων έχει πλήρη αντιστρεπτότητα**

Στο αριστερό μέρος του σχήματος φαίνεται η πορεία μιας δέσμης (ή μιας ακτίνας) που διαθλάται περνώντας από τον αέρα στο νερό, ενώ στο δεξί μέρος του σχήματος φαίνεται η αντίστροφη πορεία της δέσμης περνώντας από το νερό στον αέρα.




Το μέρος της δέσμης που διαθλάται, ονομάζεται **διαθλώμενη δέσμη** και η γωνία που σχηματίζει με την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, ονομάζεται **γωνία διάθλασης ($\theta_2$)**.

Η διαθλώμενη ακτίνα βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο που είναι κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης και περιέχει την προσπίπτουσα και την ανακλώμενη.

**ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ SNELL**

Η γωνία διάθλασης $\theta_2$ εξαρτάται:

- από την ταχύτητα του φωτός στα δύο μέσα διάδοσης (1) και (2) (π.χ. για το σχήμα μέσο (1): Αέρας με $n_1 = c/\upsilon_1$ και μέσο (2): Νερό με $n_2 = c/\upsilon_2$) και
- από τη γωνία πρόσπτωσης $\theta_1$

Ο **νόμος της διάθλασης** ή **νόμος του Snell** (Willebrord Snell, *1591-1626*, Δανός ερευνητής) συνδέει τα αντίστοιχα μεγέθη, όπου (1) είναι το μέσο προέλευσης και (2) το μέσο διάθλασης :

$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{\upsilon_2}{\upsilon_1} = \frac{n_1}{n_2}$$

Phet: Διάθλαση φωτός

**1.** Σημειώστε Σωστό – Λάθος για τις ακόλουθες προτάσεις:

α) Η τιμή του δείκτη διάθλασης $\eta$ ενός υλικού είναι πάντα $0 < \eta < 1$. ΛΑΘΟΣ

β) Εάν το υλικό (α) έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το υλικό (β) ($\eta_\alpha > \eta_\beta$) τότε και η ταχύτητα διάδοσης του φωτός είναι μεγαλύτερη σε αυτό ($\upsilon_\alpha > \upsilon_\beta$) ΛΑΘΟΣ

γ) Όταν μια ακτίνα διέρχεται από το υλικό (α) στο (β), η γωνία $\theta_\beta$ που σχηματίζει με την κάθετο είναι μικρότερη στο δεύτερο υλικό από τη γωνία $\theta_\alpha$ στο πρώτο υλικό και η ακτίνα κάμπτεται και προσεγγίζει την κάθετο. ΛΑΘΟΣ για ($\eta_\alpha > \eta_\beta$)

δ) Ο δείκτης διάθλασης του κενού εξ ορισμού ισούται με τη μονάδα ΣΩΣΤΟ

ε) Όταν μια ακτίνα διέρχεται από το κενό σε ένα υλικό κάμπτεται πάντα και απομακρύνεται από την κάθετο ΛΑΘΟΣ

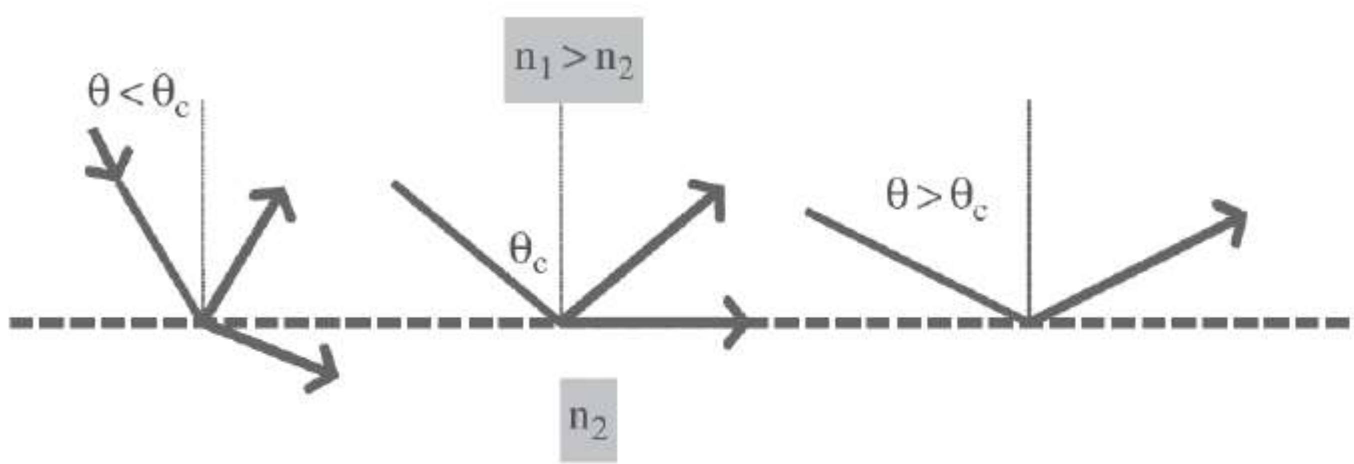
στ) Όταν η προσπίπτουσα ακτίνα είναι κάθετη προς τη διαχωριστική επιφάνεια $\theta_\alpha = 0$, $\sin\theta_\alpha = 0$ η διερχόμενη ακτίνα ανακλάται πλήρως ΛΑΘΟΣ (Σωστό: η διερχόμενη ακτίνα δεν κάμπτεται καθόλου)

# ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ

Από τον νόμο του Snell: $$\sin\theta_2 = \frac{n_1}{n_2}\sin\theta_1$$

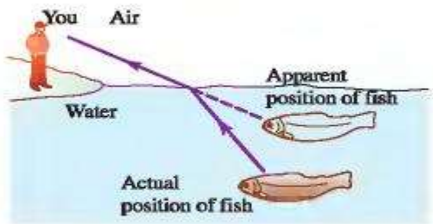
Στην περίπτωση κατά την οποία, *ακτινοβολία που διαδίδεται σε μέσο με δείκτη διάθλασης $n_1$ προσπίπτει σε διεπιφάνεια με μέσο μικρότερου δείκτη διάθλασης $n_2$, και η γωνία πρόσπτωσης* είναι μεγαλύτερη μιας κρίσιμης τιμής $\theta_c$, *οι ακτίνες* δεν διέρχονται στο δεύτερο μέσο και επομένως όλο το φως ανακλάται. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως ***ολική εσωτερική ανάκλαση*** και **η κρίσιμη γωνία** δίνεται ως:

$$\sin\theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$



**2.** (i) Είσαι πάνω σε μια βάρκα και στοχεύεις ένα ψάρι με ένα ψαροντούφεκο. Αν η φαινομενική θέση του ψαριού σχηματίζει γωνία $\theta = 60°$ με τον ορίζοντα, σε ποια γωνία πρέπει να στοχεύσεις για να χτυπήσεις το ψάρι; Δίνεται $n_{νερού} = 1{,}33$.

(α) 22°
(β) 68°
(γ) 52°
(δ) 63°




(ii) Τι βλέπει το ψάρι αν κοιτάζει προς τα πάνω με γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια του νερού 40°, 49° και 60°;

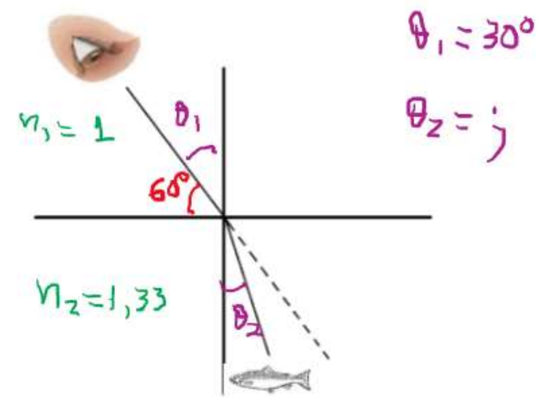
ΛΥΣΗ

(i) ακτίνα από μάτι προς ψάρι γωνία με επιφάνεια θάλασσας 60° άρα με κάθετο $\theta_1$= 30° → $\sin\theta_1 = ½$

$n_1$ = 1,00 (για αέρα)

$n_2$ = 1,33 (για νερό)

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \Rightarrow 1/2 = 1{,}33 \sin\theta_2 \Rightarrow \theta_2 = \sin^{-1}\frac{1}{2\cdot 1{,}33} \Rightarrow \theta_2 = 22°$$




Όταν μια ακτίνα διέρχεται από το υλικό (α) στο (β), η γωνία $\theta_\beta$ που σχηματίζει με την κάθετο είναι μικρότερη στο δεύτερο υλικό από τη γωνία $\theta_\alpha$ στο πρώτο υλικό και η ακτίνα κάμπτεται και προσεγγίζει την κάθετο

Άρα η πραγματική θέση του ψαριού σχηματίζει γωνία 90° - 22° = 68° με τον ορίζοντα και σε αυτή τη γωνία πρέπει να στοχεύσεις.

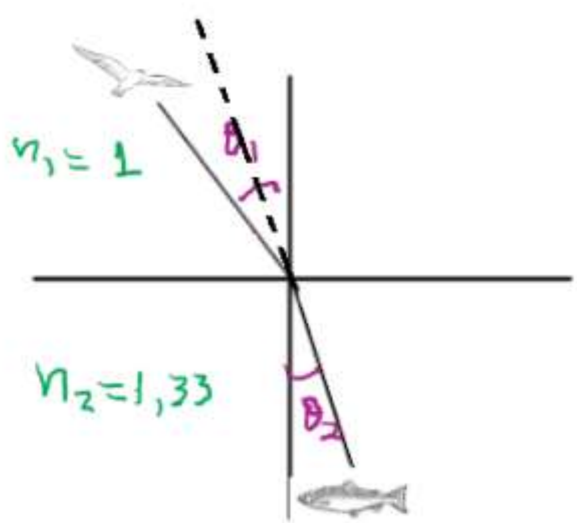
(ii) Η ορική γωνία είναι $\sin \theta_0 = \eta_1 / \eta_2 = 1/1.33 = 0{,}752$

$\theta_0 = 48{,}8°$

Άρα, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι 40°, το ψάρι βλέπει τι γίνεται έξω από το νερό (θα νομίζει όμως ότι τα αντικείμενα έξω από το νερό βρίσκονται πιο ψηλά από την πραγματική τους θέση).

Όταν η γωνία ισούται με 49°, περίπου η οριακή γωνία νερού-αέρα το φως που φτάνει στο μάτι του ψαριού είναι αυτό που οδεύει εφαπτομενικά και παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια νερού-αέρα.

Για γωνίες μεγαλύτερες από την οριακή γωνία, το φως που φτάνει στο μάτι του ψαριού προέρχεται από την ολική εσωτερική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια. Επομένως, όταν η γωνία (με την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια) από την οποία κοιτάζει είναι 60°, τότε το ψάρι βλέπει το βυθό διότι οι ακτίνες που φτάνουν στο μάτι του έχουν υποστεί ολική εσωτερική ανάκλαση.




**3.** Πως θα κατασκευάζατε τριγωνικό πρίσμα από γυαλί με $n = 1.41$ ώστε να πετύχετε ολική ανάκλαση; Υπερτερεί μιας μεταλλικής επιφάνειας ως ανακλαστήρας και γιατί;

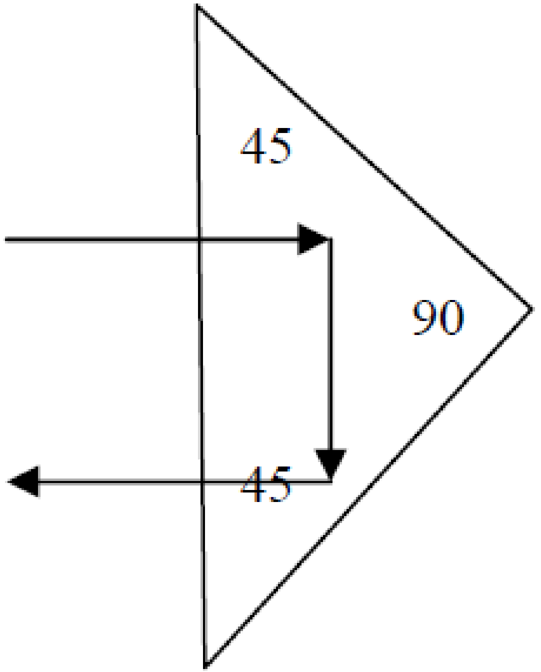
ΛΥΣΗ

Από ν. Snell

$\sin\theta_1 / \sin\theta_2 = \eta_2 / \eta_1$

$\Theta_1 = \Theta_0$ όταν $\Theta_2 = 90°$

$$\boxed{\sin\theta_0 = \eta_2 / \eta_1}$$




Για μια επιφάνεια γυαλιού-αέρα με $\eta = 1.41$ για το γυαλί

$$\sin\theta_0 = \frac{1}{1.41} = 0.707 \Rightarrow \theta_0 = 45°$$

Πλεονεκτήματα:

- Το φως ανακλάται ολικά ενώ καμιά μεταλλική επιφάνεια δεν ανακλά το 100% του φωτός που προσπίπτει σε αυτήν.
- Οι ανακλαστικές τους ιδιότητες είναι μόνιμες και δεν επηρεάζονται από τυχόν αμαυρώσεις της μεταλλικής τους επίστρωσης

## ΕΡΩΤΗΣΗ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης εκδηλώνεται μόνο στην περίπτωση κατά την οποία:

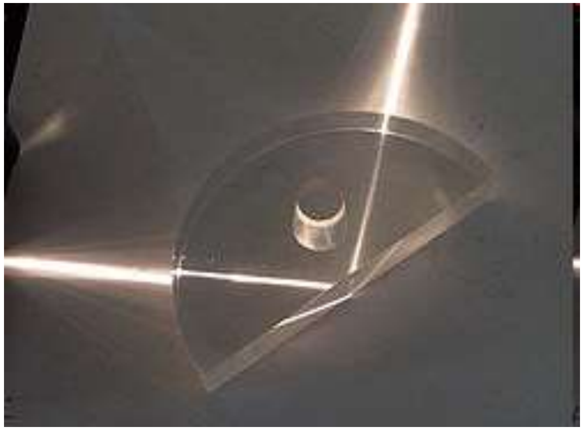
**Α**. μια ακτίνα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια με ένα δεύτερο υλικό υπό γωνία > $45^\circ$ως προς τη κάθετο

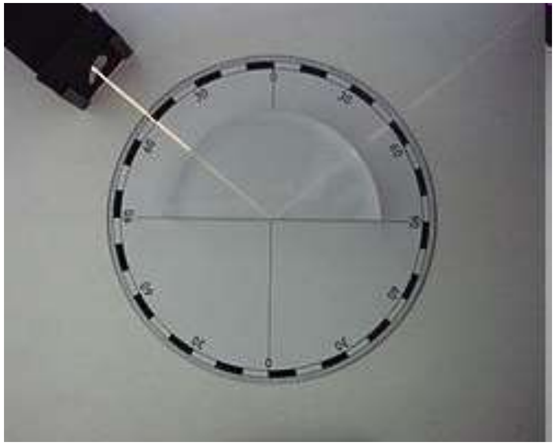
**Β**. μια ακτίνα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια με ένα δεύτερο υλικό υπό γωνία < $45^\circ$ ως προς τη κάθετο

**Γ**. μια ακτίνα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια με ένα δεύτερο υλικό του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι *μικρότερος* από το δείκτη διάθλασης του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται η ακτίνα. **ΣΩΣΤΟ**

**Δ**. μια ακτίνα προσπίπτει σε μια διαχωριστική επιφάνεια με ένα δεύτερο υλικό του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι *μεγαλύτερος* από το δείκτη διάθλασης του υλικού μέσα στο οποίο διαδίδεται η ακτίνα.

# ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ





***Οπτικές Ίνες***

-Ιατρικές εφαρμογές – ενδοσκόπια

-Τηλεπικοινωνίες

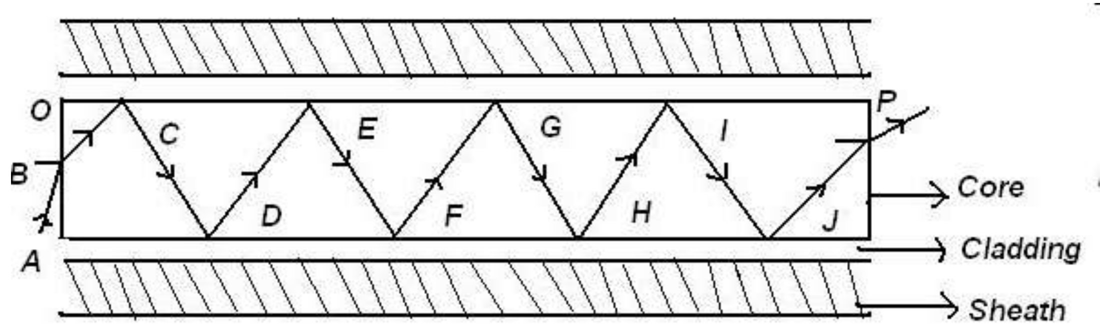



Fig : Total Internal Reflection

# ΟΛΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ – ΟΠΤΙΚΕΣ ΙΝΕΣ


# ΚΑΤΟΠΤΡΑ

- *Επίπεδα κάτοπτρα*
- *Καμπύλα κάτοπτρα*

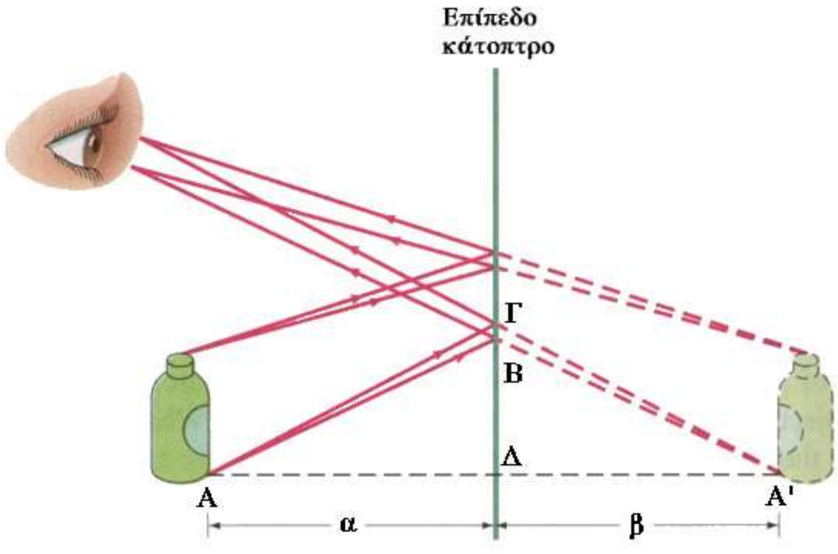
Ο πιο κοινός τύπος είναι **το σφαιρικό κάτοπτρο**. Υπάρχουν δύο τύποι σφαιρικών κατόπτρων, ανάλογα με το ποια πλευρά της σφαιρικής επιφάνειας δέχεται το φως:

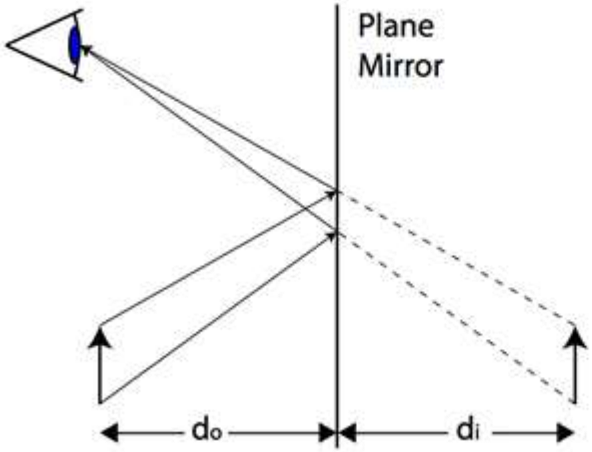
- Τα **κοίλα κάτοπτρα** είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να ανακλούν το φως από την επιφάνεια που είναι αντιμέτωπη με το κέντρο της σφαίρας («εσωτερική» ή κοίλη επιφάνεια) (π.χ καθρεφτάκια καλλωπισμού αφού δημιουργούν μεγεθυμένη εικόνα).
- Τα **κυρτά κάτοπτρα** ανακλούν το φως από την «εξωτερική» επιφάνεια. (τέτοιοι είναι οι καθρέφτες αυτοκινήτων ή καθρέφτες ασφαλείας καταστημάτων, αφού αντικατοπτρίζουν μια ευρύτερη περιοχή.)

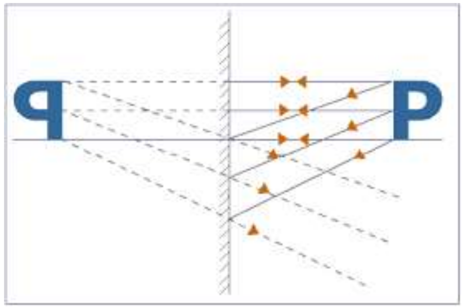
# ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΑΤΟΠΤΡΟ

•**Κάτοπτρο** ή καθρέπτης (mirror) είναι μια επίπεδη ή σφαιρική επιφάνεια γυαλιού, που επάνω της έχει εναποτεθεί με εξάχνωση ένα λεπτό στρώμα μετάλλου, με υψηλό συντελεστή ανακλαστικότητας.
Ό,τι παρατηρεί κανείς μέσα από ένα κάτοπτρο είναι **είδωλα** (image) των αντικειμένων.

•Ο εγκέφαλος επεξεργάζεται *πραγματικές ακτίνες* που εισέρχονται στο μάτι και έχουν διαδοθεί ευθύγραμμα.
Ένα **επίπεδο κάτοπτρο** (plane mirror) σχηματίζει το είδωλο ενός αντικειμένου στην αντίθετη όψη από αυτή που βρίσκεται το αντικείμενο.
•Η **απόσταση του ειδώλου**, β = di (image distance) από το κάτοπτρο, είναι ίση με την **απόσταση του αντικειμένου**, α = do (object distance) απ' αυτό.

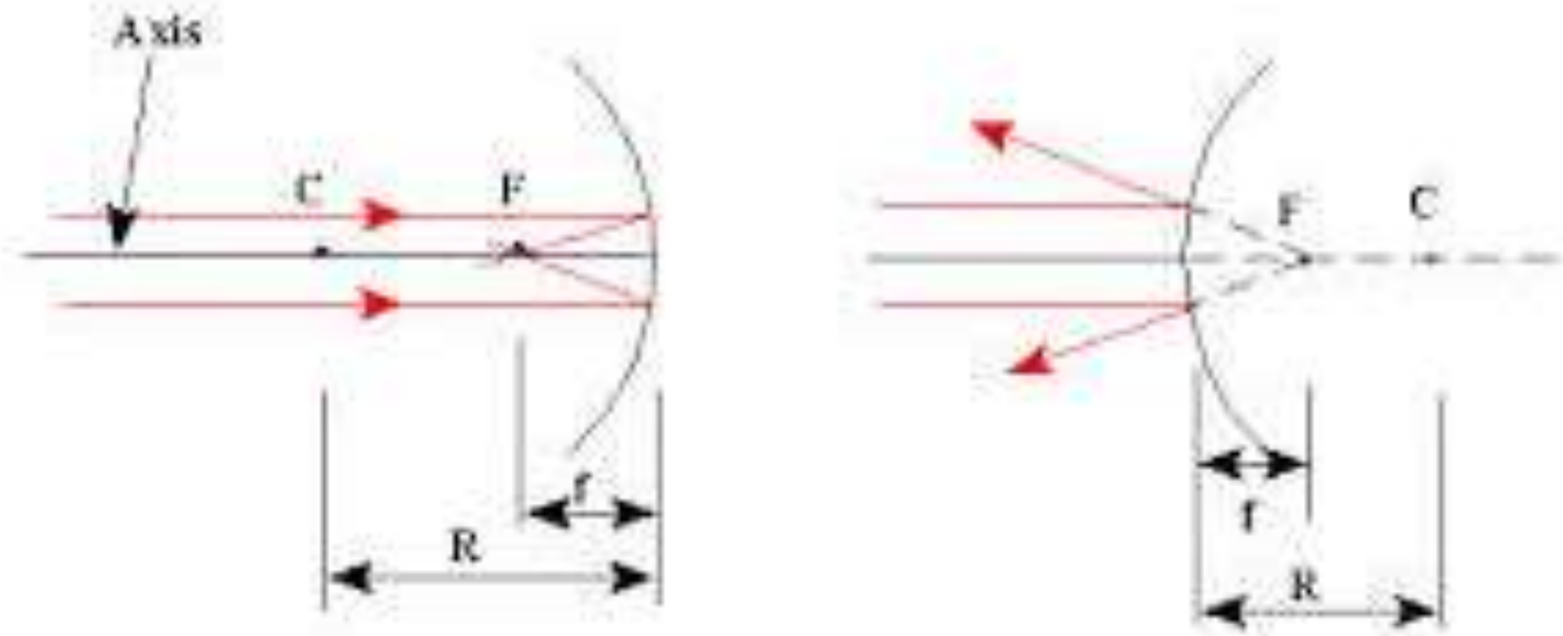


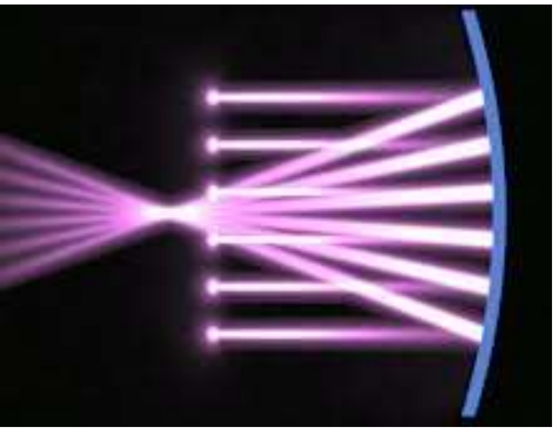
# ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ

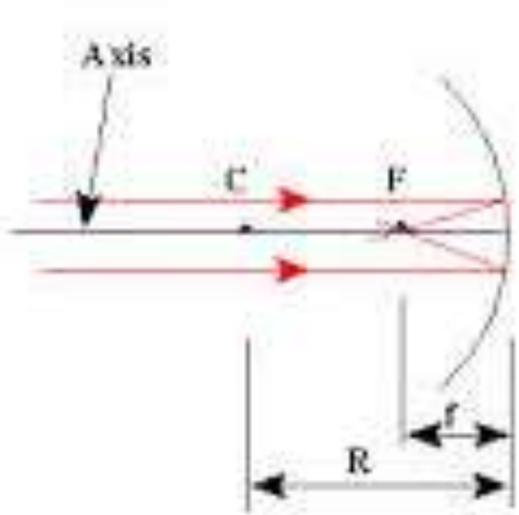
# ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ

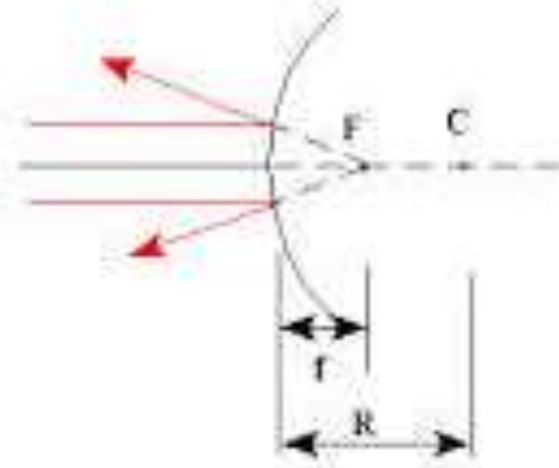



***Κύριος άξονας*** *του κατόπτρου,*
περνά από το ***κέντρο της καμπυλότητας*** **του κατόπτρου C** που είναι το σημείο που ισαπέχει κατά ***R*** (= ***ακτίνα καμπυλότητας*** ) από όλα τα σημεία της επιφάνειας του κατόπτρου) και το ***κέντρο του κατόπτρου***.

# ΣΦΑΙΡΙΚΑ ΚΑΤΟΠΤΡΑ





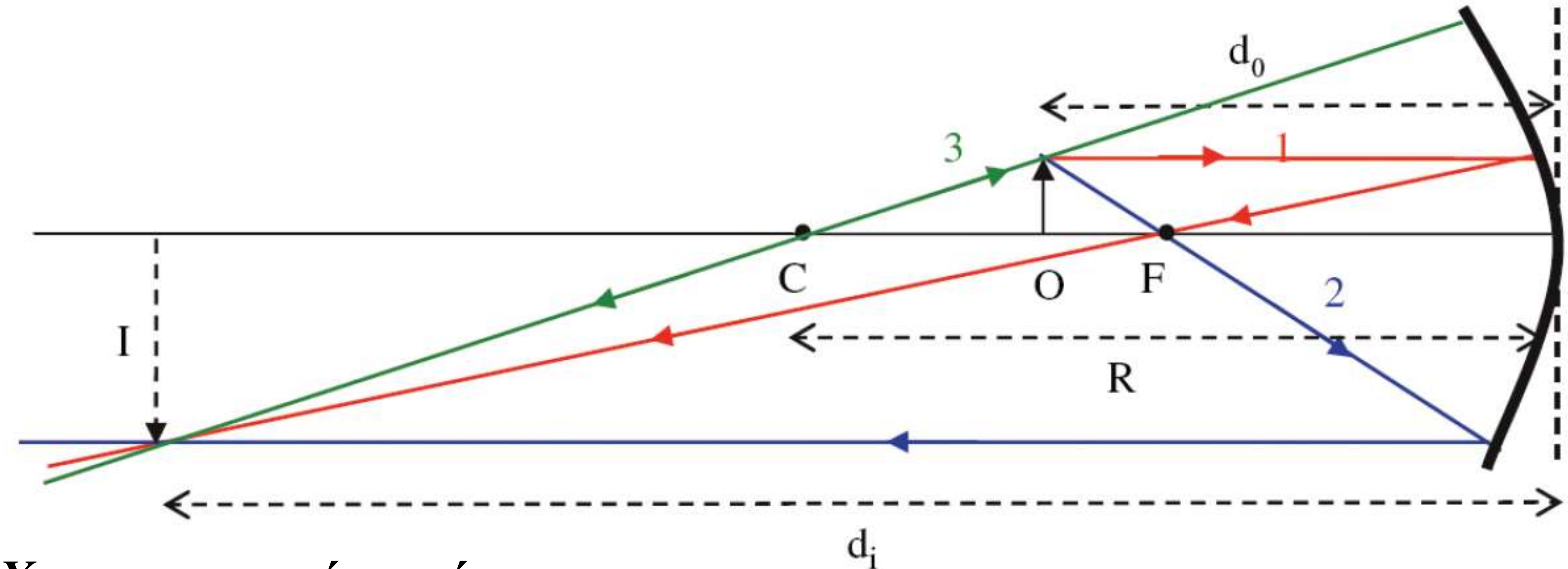




Όλες οι ακτίνες φωτός ανακλώνται από την κατοπτρική επιφάνεια σύμφωνα με τον νόμο της ανάκλασης και <u>συγκλίνουν</u> στο ***εστιακό σημείο F*** *του* κατόπτρου που βρίσκεται σε απόσταση ***f (εστιακή απόσταση)*** *κατά μήκος του κύριου άξονα από την επιφάνειά* του.
Η εστιακή απόσταση για ένα σφαιρικό κάτοπτρο δίνεται ως:

$$f = \frac{R}{2}$$

Επομένως, <u>*η ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου ορίζει άμεσα την εστιακή του απόσταση*</u>, που είναι η παράμετρος-κλειδί για τον σχηματισμό ειδώλων από αυτό.

# ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ




***Χαρακτηριστικές ακτίνες:***

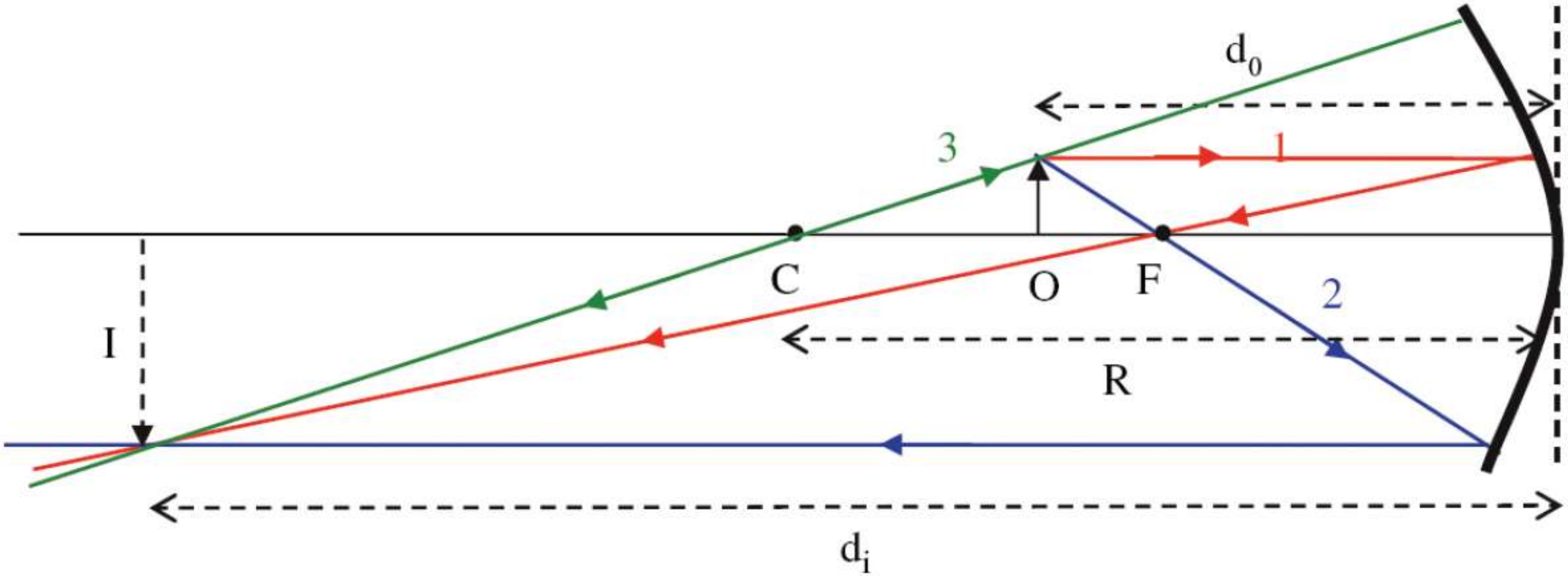
(1) Ακτίνα (κόκκινη) **παράλληλη στον κύριο άξονα του κατόπτρου** που ανακλάται σε αυτό και στη συνέχεια διέρχεται από το εστιακό του σημείο.

(2) Ακτίνα (μπλε) **διερχόμενη από το εστιακό σημείο** που ανακλάται και στη συνέχεια κατευθύνεται παράλληλα στον κύριο άξονα

(3) ακτίνα (πράσινη) **που φαίνεται να προέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας C** και ανακλάται κάθετα στο κάτοπτρο ακολουθώντας την ίδια διεύθυνση προς τα πίσω.

Στο σημείο τομής των ανακλώμενων ακτίνων βρίσκεται η κορυφή (ή το αντίστοιχο σημείο) του βέλους-ειδώλου που σχηματίζεται από το κάτοπτρο.

# ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ




***Εξίσωση των κατόπτρων:*** $$\frac{1}{d_0}+\frac{1}{d_i}=\frac{1}{f}$$

**Μεγέθυνση**: ($|m| = h_i / h_0$) $$m = -\frac{d_i}{d_0}$$

όπου το αρνητικό πρόσημο εισέρχεται για να υποδηλώνει ότι <u>*το είδωλο είναι αντεστραμμένο*</u> ως προς το αντικείμενο.

Από την εξίσωση των κατόπτρων, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση (και τη μεγέθυνση) του ειδώλου ενός αντικειμένου σε κάτοπτρο.

***Παράδειγμα*** Ενα κοίλο κάτοπτρο έχει ακτίνα καμπυλότητας 25 cm. Αντικείμενο ύψους 2 cm τοποθετείται σε απόσταση από το κάτοπτρο 20 cm κατά μήκος του άξονά του. Βρείτε πού σχηματίζεται το είδωλο του αντικειμένου και το μέγεθός του.

***Λύση:*** Λύνουμε την εξίσωση των κατόπτρων ως προς την απόσταση σχηματισμού του ειδώλου και για $d_0 = 20$ cm και $f = R/2 = 12{,}5$ cm, έχουμε:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_0} = \frac{1}{12{,}5} - \frac{1}{20} = 0{,}03\ \mathrm{cm}^{-1} \text{ οπότε } d_i = 33{,}3\ \mathrm{cm}$$

Σύμφωνα με την Εξίσωση (20.9), η μεγέθυνση είναι $m = h_i / h_0 = -d_i / d_0 = -1{,}67$ και επομένως το ύψος του ειδώλου είναι $h_i = -1{,}67 h_0 = -(1{,}67)\cdot(2\ \mathrm{cm}) = -3{,}33$ cm. Εδώ το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι το είδωλο είναι αντεστραμμένο.

*Πρόσημο ορισμένων μεγεθών στην Εξίσωση των Κατόπτρων.*

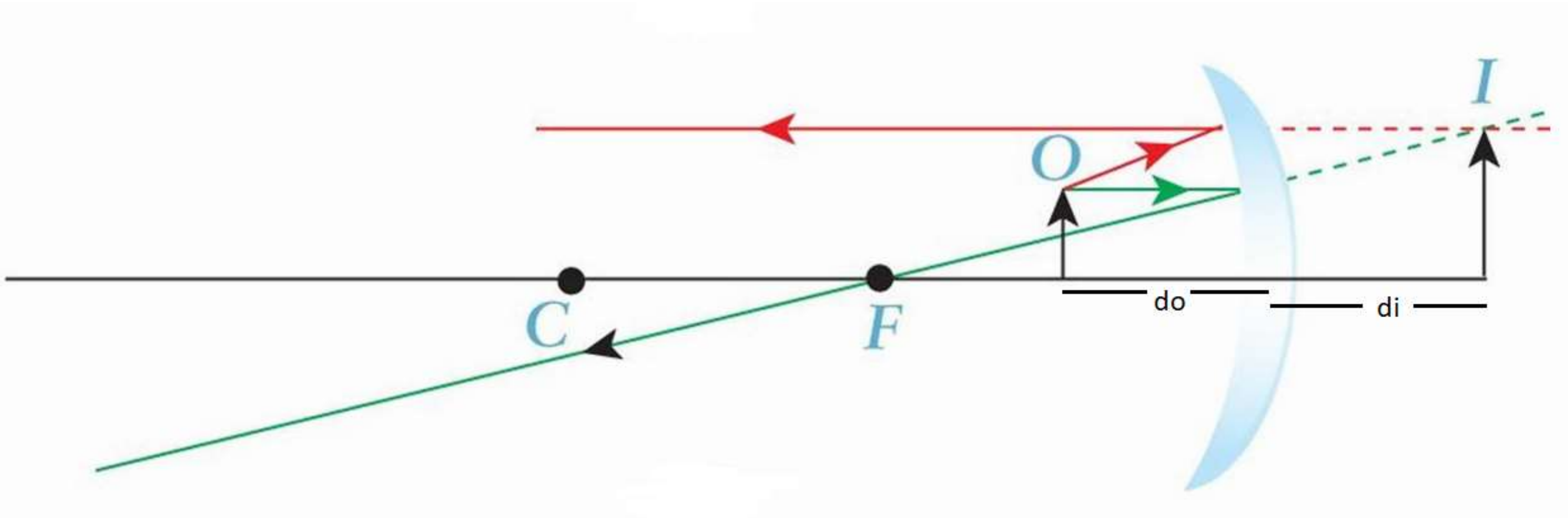
| ***Μέγεθος*** | ***Θετικό όταν*** | ***Αρνητικό όταν*** |
|---|---|---|
| Εστιακή απόσταση, $f$ | Κοίλο κάτοπτρο | Κυρτό κάτοπτρο |
| Απόσταση αντικειμένου, $d_0$ | Πραγματικό αντικείμενο (συνήθης περίπτωση) | * Φανταστικό αντικείμενο (σπάνια περίπτωση) |
| Απόσταση ειδώλου, $d_i$ | Πραγματικό είδωλο (βρίσκεται μπροστά από το κάτοπτρο) | Φανταστικό είδωλο (βρίσκεται πίσω από το κάτοπτρο) |
| Μεγέθυνση, $m$ | Ορθό είδωλο | Αντεστραμμένο είδωλο |

***Παράδειγμα*** Αντικείμενο ύψους 1 cm βρίσκεται σε απόσταση 10 cm από $\boxed{\text{κοίλο κάτοπτρο}}$ με ακτίνα καμπυλότητας 40 cm. Προσδιορίστε το είδωλο που σχηματίζεται από το κάτοπτρο.

***Λύση:*** Η εστιακή απόσταση είναι $\underline{R/2 = 20\ \text{cm}}$ και από την εξίσωση των κατόπτρων βρίσκουμε την απόσταση του ειδώλου:

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_0} = \frac{1}{20} - \frac{1}{10} = -\frac{1}{20}$$

$\boxed{d_i = -20\ \text{cm}}$. Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι $\boxed{\text{το είδωλο είναι φανταστικό}}$ και βρίσκεται πίσω από το κάτοπτρο. Υπολογίζουμε τη μεγέθυνση ίση με $\underline{m = -d_i/d_0 = -(-20)/(10) = 2}$. Επομένως το είδωλο είναι <u>ορθό</u> και το ύψος του ίσο με 2 cm.



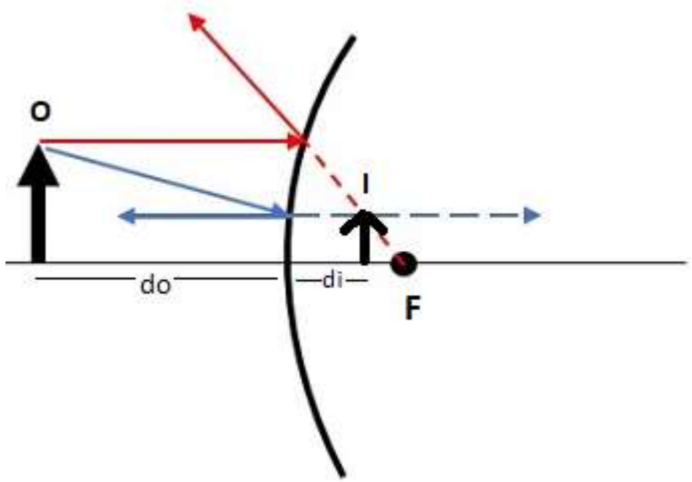
*Παράδειγμα* Το πλαϊνό καθρεφτάκι ενός αυτοκινήτου είναι κυρτό κάτοπτρο με ακτίνα καμπυλότητας 150 cm. Περιγράψτε το είδωλο που σχηματίζεται σε αυτό τον καθρέφτη, ενός αυτοκινήτου που ακολουθεί σε απόσταση 20 m.

**ΛΥΣΗ**

Στην περίπτωση αυτή το κάτοπτρο είναι κυρτό, οπότε $f = -R/2 = -75$ cm = - 0,75 m

Από την εξίσωση κατόπτρων και για $d_0 = 20$ m, βρίσκουμε ότι:

$$\frac{1}{d_\mathrm{i}} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_0} = -\frac{1}{0{,}75} - \frac{1}{20} = -1{,}383\ \mathrm{m}^{-1} \Rightarrow d_\mathrm{i} = -0{,}72\ \mathrm{m}$$





Επομένως, το είδωλο είναι **<u>φανταστικό</u>** και αφού $m = - d_\mathrm{i} / d_0 = - (-0{,}72)/20 = 0{,}036$ είναι και **<u>ορθό</u>**.

Θυμηθείτε ότι το $m$ ορίζεται επίσης και ως: $m = h_\mathrm{i}/h_\mathrm{o}$. Αν υποθέσουμε ότι το αυτοκίνητο που ακολουθεί έχει ύψος $h_0 = 1{,}5$ m, τότε το είδωλό του από το καθρεφτάκι θα έχει ύψος $h_\mathrm{i} = 0{,}036 \cdot 1{,}5 = 0{,}054$ m = 5,4 cm.

- Αν υποθέσουμε ότι το καθρεφτάκι έχει διαστάσεις 10cm x10cm, το είδωλο "χωράει" ολόκληρο στο καθρεφτάκι. Τι θα συμβεί όταν το αυτοκίνητο που ακολουθεί πλησιάσει στα 5 m;
- Γιατί στους κυρτούς καθρέφτες αυτοκινήτου συχνά αναγράφεται: «τα αντικείμενα που αντικατοπτρίζονται στον καθρέφτη βρίσκονται στην πραγματικότητα πιο κοντά από ό,τι φαίνονται»; (γεγονός στο οποίο θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή)

# Videos του Michel van Biezen για το σχηματισμό ειδώλου από κάτοπτρα, φακούς και συστήματα φακών και φακού-κατόπτρου:

ΚΑΤΟΠΤΡΑ
========
Κοίλο κάτοπτρο (1)
www.youtube.com/watch?v=MQZmLuQKDns

Κοίλο κάτοπτρο (2)
www.youtube.com/watch?v=9zJajE_Gmq8

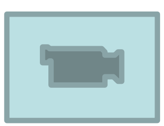
Κοίλο κάτοπτρο (3)
www.youtube.com/watch?v=wbcAaO02rek

Κυρτό κάτοπτρο (1)
www.youtube.com/watch?v=ioklc9JBfI4

Κυρτό κάτοπτρο (2)
www.youtube.com/watch?v=bIyMj0Zd80w

Επίπεδο κάτοπτρο
www.youtube.com/watch?v=20N3qjcFI_w

π. χ.



ΛΕΠΤΟΙ ΦΑΚΟΙ
============
Συγκλίνων φακός (1)
www.youtube.com/watch?v=_LTffEMF5qI

Συγκλίνων φακός (2)
www.youtube.com/watch?v=P5Y6rmPpGo4

Συγκλίνων φακός (3)
www.youtube.com/watch?v=69NPUCIKWIg

Συγκλίνων φακός (4)
www.youtube.com/watch?v=aDhY8jfCJa8

Αποκλίνων φακός (1)
www.youtube.com/watch?v=FkFBAJksvXs

Αποκλίνων φακός (2)
www.youtube.com/watch?v=3XfJxHkiiGs

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΕΠΤΩΝ ΦΑΚΩΝ
======================
Σύστημα 2 συγκλινόντων φακών (1)
www.youtube.com/watch?v=aHHa0cK_3as

Σύστημα 2 συγκλινόντων φακών (2)
www.youtube.com/watch?v=KaLSL8GYCHA

Σύστημα συγκλίνοντα - αποκλίνοντα φακού (1)
www.youtube.com/watch?v=dI-9Zj1Fo4A

Σύστημα συγκλίνοντα - αποκλίνοντα φακού (2)
www.youtube.com/watch?v=7D2N4v4xrVI

Σύστημα συγκλίνοντα φακού - κοίλου κατόπτρου
www.youtube.com/watch?v=aGHnH_4KFRE

# ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΑΤΟΠΤΡΟ

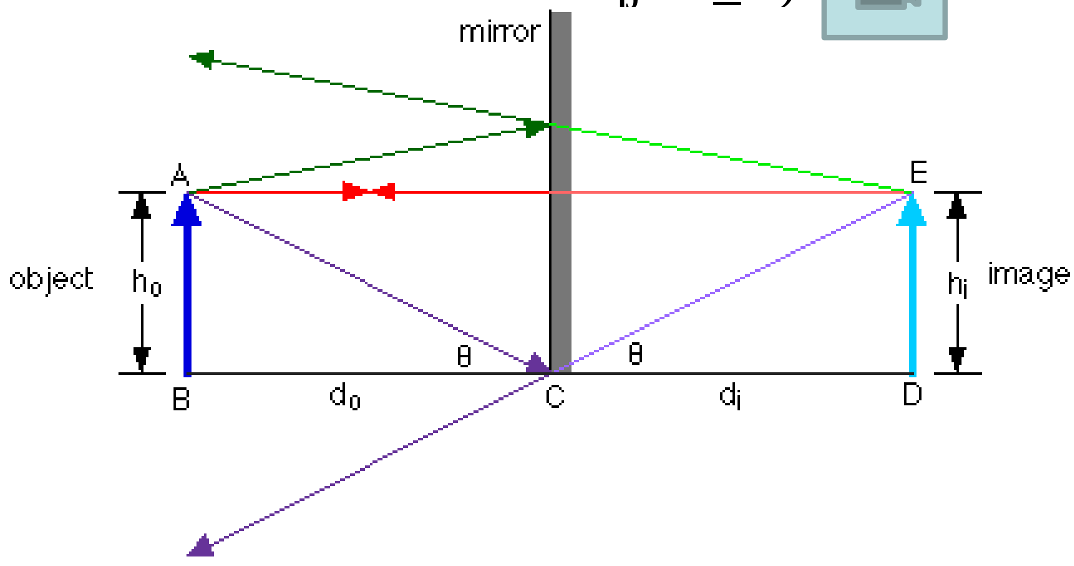
Για το επίπεδο, θεωρούμε ακτίνα καμπυλότητας $R = \infty$. Επομένως,

$$f = R/2 = \infty \text{ και } 1/f = 0$$

Από την εξίσωση κατόπτρων, $(1/d_0) + (1/d_i) = 1/f$, έχουμε τότε $d_i = - d_0$, δηλ. **φανταστικό** είδωλο

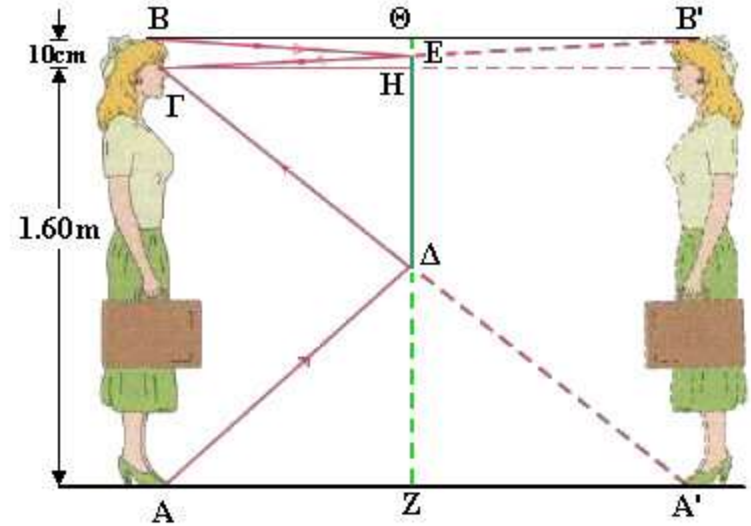
Η μεγέθυνση, που γενικά δίνεται από τη σχέση: $m = - d_i / d_0$, θα είναι τότε: $m = 1$, δηλ. το είδωλο θα είναι **ορθό** και στο μέγεθος του αντικειμένου.

Για να προσδιορίσουμε το είδωλο με διάγραμμα ακτίνων, θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους ανάκλασης αφού δεν υπάρχει εστιακό σημείο για το επίπεδο κάτοπτρο και οι ανακλώμενες από αυτό ακτίνες δεν συγκλίνουν. (βλ. https://www.youtube.com/watch?v=20N3qjcFI_w)



## 'Ασκηση

Μία γυναίκα ύψους 1.70m παρατηρεί όρθια το είδωλο της που σχηματίζεται από ένα επίπεδο κάτοπτρο, όπως στο διπλανό σχήμα. Ποιό πρέπει να είναι το ελάχιστο ύψος του κατόπτρου και πόσο πρέπει να απέχει το χαμηλότερό του σημείο από το δάπεδο, ώστε η γυναίκα να μπορεί να παρατηρήσει μέσα απ' αυτό το είδωλο ολοκλήρου του σώματός της; (Υποθέτουμε ότι τα μάτια είναι 10cm χαμηλότερα από το ψηλότερο σημείο του κεφαλιού.)



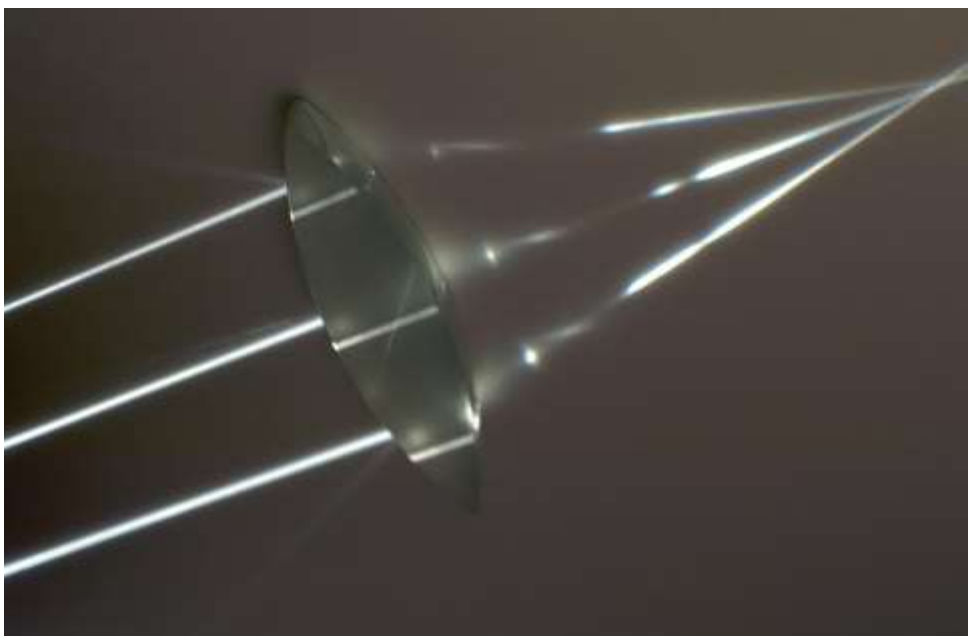

## *Λύση*

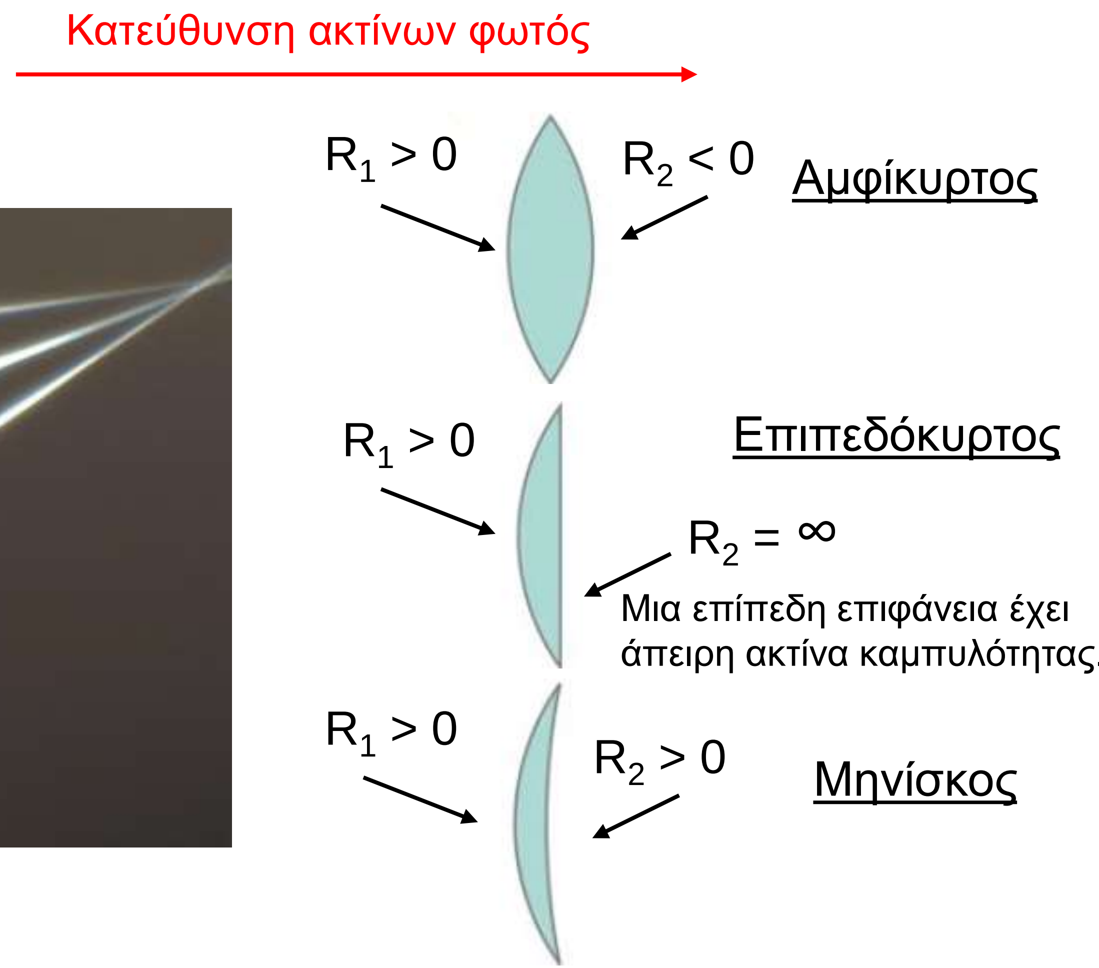
Το είδωλο έχει ύψος, Α'Β', ίσο με το ύψος του αντικειμένου, ΑΒ, (Α'Β' = ΑΒ) και σχηματίζεται σε απόσταση, ΖΑ', από το κάτοπτρο ίση με την απόσταση, ΖΑ, του αντικειμένου (ΖΑ' = ΖΑ).
Οι δύο ακτίνες που παρατηρεί η γυναίκα, ΓΔΑ' από το χαμηλότερο και ΓΕΒ' από το υψηλότερο σημείο του ειδώλου, καθορίζουν τα δύο σημεία-όρια του κατόπτρου, Δ και Ε. Από τη γεωμετρία του σχήματος και επειδή η γωνία πρόσπτωσης, $\theta_{\pi}$, είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης, $\theta_{\alpha}$, θα είναι ΑΔ = ΔΓ, αλλά και ΑΓ = ΖΗ. Επιπλέον το Δ είναι το μέσο του ΖΗ. Επειδή λοιπόν ΗΖ = ΑΓ = 1.70m - 0.10m = 1.60m, θα είναι και ΖΔ = ΖΗ/2 = ΔΗ = 0.80m. Το χαμηλότερο σημείο του κατόπτρου, λοιπόν, απέχει 0.80m από το δάπεδο. Για τον ίδιο λόγο το Ε είναι το μέσο του τμήματος ΗΘ (είναι ΓΕ = ΒΕ και γωνία πρόσπτωσης = γωνία ανάκλασης). Επειδή είναι ΗΘ = ΓΒ = 0.10m θα είναι και ΗΕ = ΗΘ/2 = 0.05m. Το ύψος του κατόπτρου, επομένως, θα είναι ΔΕ = ΔΗ + ΗΕ = 0.80m + 0.05m = 0.85m. (Μπορούμε να παρατηρήσουμε επιπλέον, ότι η θέση και το ύψος του κατόπτρου δεν εξαρτάται από την απόσταση, ΑΖ, του αντικειμένου από το κάτοπτρο. Η θέση, δηλαδή, των σημείων Δ και Ε παραμένει αναλλοίωτη.)

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

Οι φακοί κατασκευάζονται συνήθως από γυαλί ή διαφανές πλαστικό που λειαίνεται έτσι ώστε να έχουν σφαιρικές επιφάνειες.

Βασικές μορφές φακών:
***Συγκλίνοντες φακοί***, οι οποίοι είναι παχύτεροι στο κέντρο από ότι στα άκρα τους

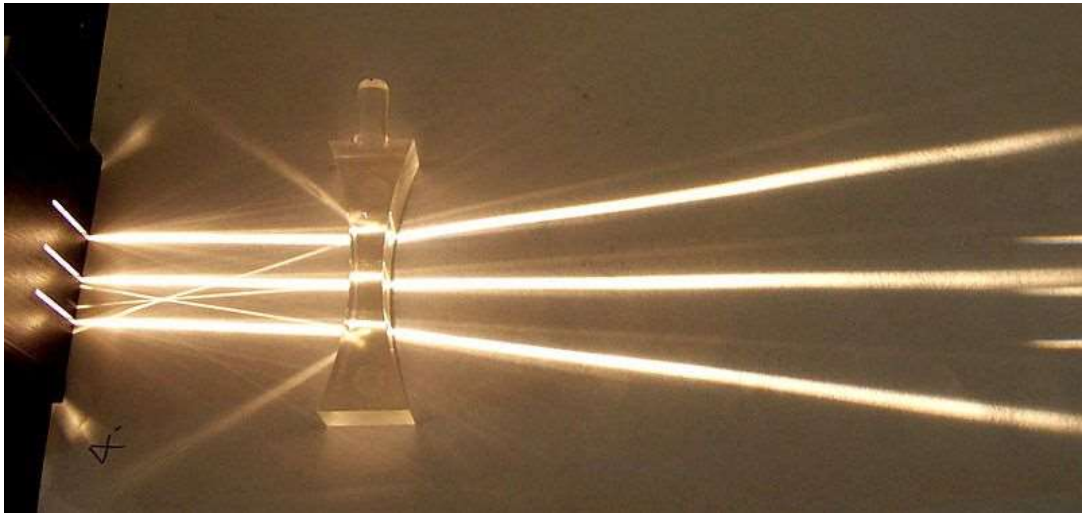




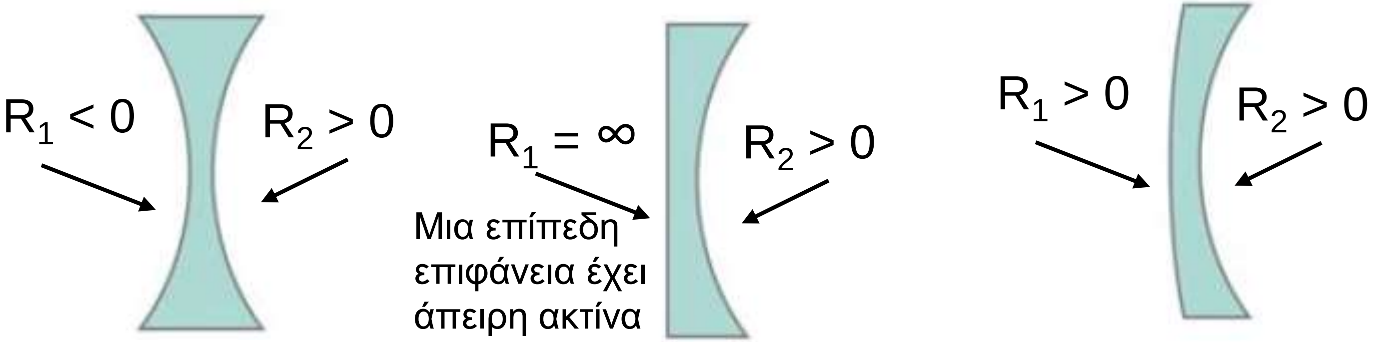
# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

Βασικές μορφές φακών:

***Αποκλίνοντες φακοί***, *που είναι λεπτότεροι* στο κέντρο από ότι στα άκρα



Κατεύθυνση ακτίνων φωτός




Μια επίπεδη επιφάνεια έχει άπειρη ακτίνα καμπυλότητας.

Αμφίκοιλος

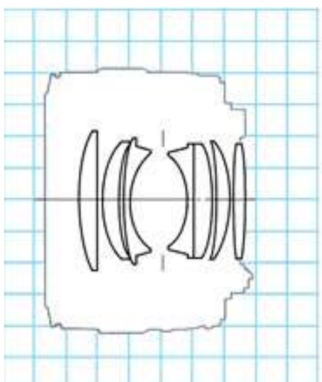
Επιπεδόκοιλος

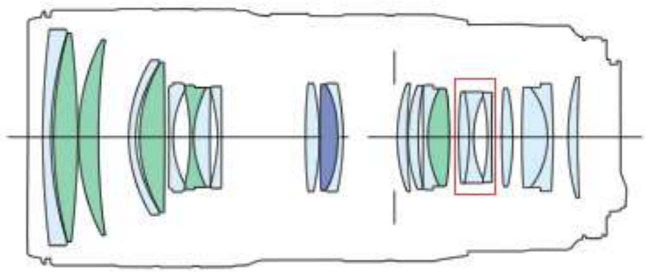
Μηνίσκος

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

Βασικές μορφές φακών:

***Σύνθετοι φακοί:*** *συνδυασμός πολλών απλών φακών σε σειρά και σε επαφή μεταξύ τους.*

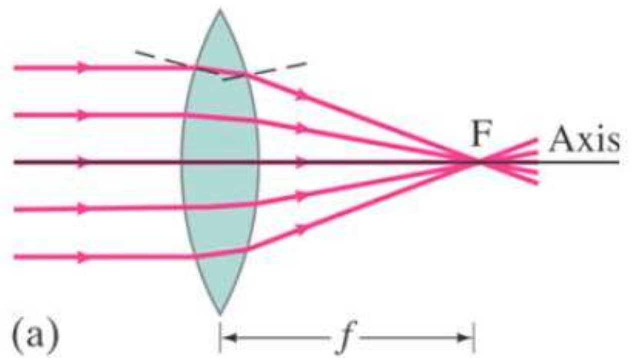


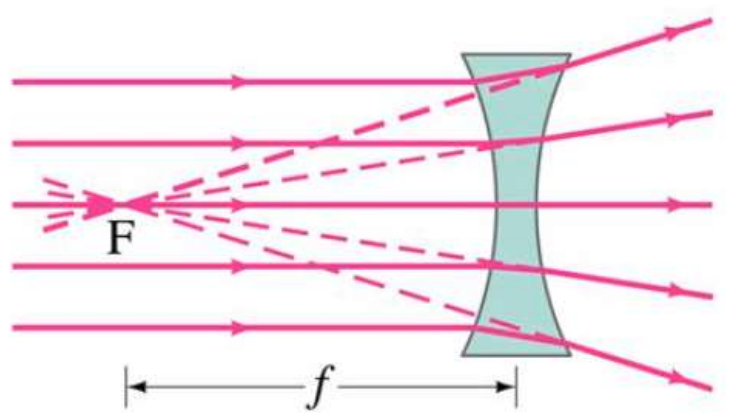



Απλούς φακούς θεωρούμε αυτούς που έχουν αμελητέο πάχος συγκριτικά με τη διάμετρό τους. Οι τελευταίοι είναι γνωστοί ως ***λεπτοί φακοί*** *και* *<u>οι εξισώσεις που θα εισάγουμε περιορίζονται σε αυτούς.</u>*

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

***Οπτικός άξονας φακού***: η ευθεία που περνά από το κέντρο του κάθετα προς τις δύο επιφάνειές του.
Για έναν λεπτό φακό υπάρχει ένα σημείο, το ***εστιακό σημείο F***, στο οποίο όλες αυτές οι ακτίνες συγκλίνουν και τέμνουν τον οπτικό του άξονα. Η **απόσταση *f* *αυτού του σημείου*** *από το κέντρο του φακού ονομάζεται* ***εστιακή απόσταση*** *του φακού* και είναι η ίδια και από τις δύο πλευρές του φακού (αν ο φακός περιστραφεί 180° γύρω από ένα κατακόρυφο άξονα θα εστιάζει το φως στο ίδιο σημείο).



# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

Η εστιακή απόσταση ενός λεπτού φακού σχετίζεται με τις ακτίνες καμπυλότητας $R_1$ και $R_2$ *των δύο πλευρών του και τον* δείκτη διάθλασης *n του υλικού του* (θεωρώντας ότι το περιβάλλον του φακού είναι ο αέρας για τον οποίον $n_{αέρα} = 1$) *από την*

***Εξίσωση του κατασκευαστή φακών***

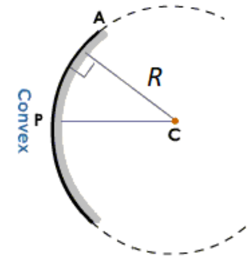
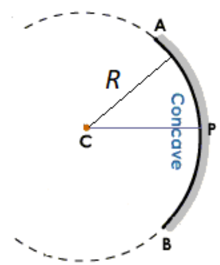
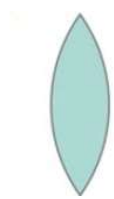
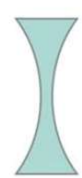
(για λεπτό φακό)

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

✓Η εξίσωση αυτή ορίζει **μία και μοναδική εστιακή απόσταση** για έναν φακό, από όποια πλευρά κι αν δέχεται το προσπίπτον φως και ακόμα και αν οι πλευρές του έχουν διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας.

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

## *Ακτίνες καμπυλότητας και εστιακή απόσταση*

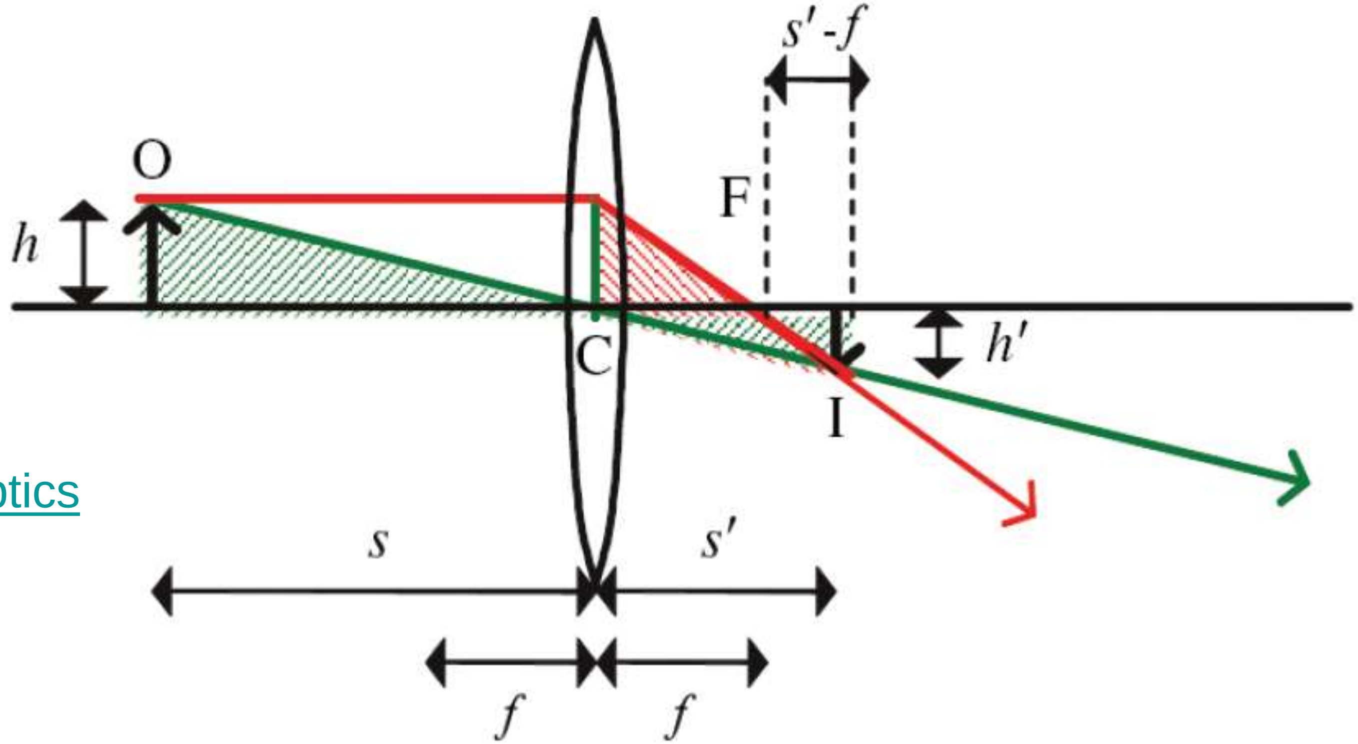
| | | | Πρόσημο |
|---|---|---|---|
| Ακτίνα καμπυλότητας | Κυρτή επιφάνεια |  | + |
| | Κοίλη επιφάνεια |  | - |
| Εστιακή απόσταση *f* | Συγκλίνων |  | + |
| | Αποκλίνων |  | - |

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ

## *Εξίσωση του κατασκευαστή φακών (για λεπτό φακό)*

| Τύπος φακού | Ακτίνες καμπυλότητας | Εστιακή απόσταση *f* |
|---|---|---|
| Αμφίκυρτος (γενική περίπτωση) | $R_1 \neq R_2$ | $\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$ |
| Συμμετρικός αμφίκυρτος | $R_1 = -R_2 = R$ | $\frac{1}{f} = (n-1)\frac{2}{R}$ |
| Συμμετρικός αμφίκοιλος | $R_1 = -R_2 = -R$ | $\frac{1}{f} = (1-n)\frac{2}{R}$ |
| Επιπεδόκυρτος | $R_1 = R$<br>$R_2 = \infty$ | $\frac{1}{f} = (n-1)\frac{1}{R}$ |
| Επιπεδόκοιλος | $R_1 = -R$<br>$R_2 = \infty$ | $\frac{1}{f} = (1-n)\frac{1}{R}$ |

# ΣΥΓΚΛΙΝΩΝ ΦΑΚΟΣ – ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ




Βλ. Phet : Geometric optics

***Εξίσωση φακού:*** $$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

*s*: απόσταση του αντικειμένου από το κέντρο του φακού
*s'*: απόσταση του ειδώλου από το κέντρο του φακού

***Γραμμική μεγέθυνση:*** $m = -\frac{s'}{s}$ $\quad |m| = \frac{h'}{h}$

(το αρνητικό δηλώνει αρνητική μεγέθυνση στον σχηματισμό αντεστραμμένων ειδώλων και θετική μεγέθυνση στον σχηματισμό ορθών ειδώλων)

***Ισχύς του φακού:*** $$P = \frac{1}{f}$$

- Όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση ενός φακού τόσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς του

**Η μονάδα ισχύος φακού είναι η <u>διόπτρα (D) και 1 D = 1 m$^{-1}$</u>**

# ΟΠΤΙΚΟΙ ΦΑΚΟΙ – ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ

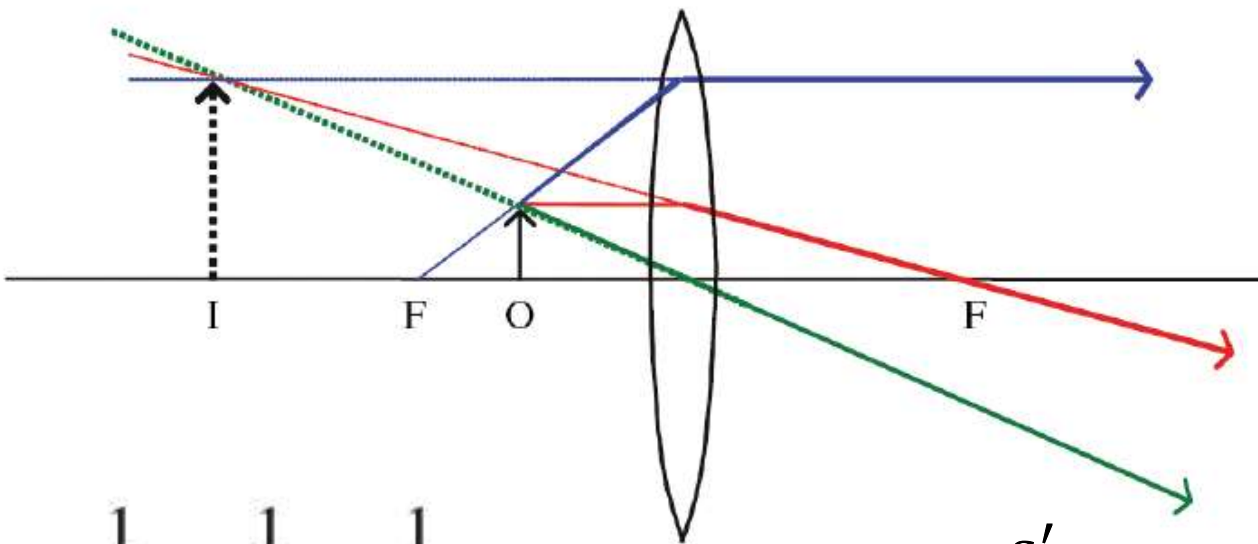
*Κανόνες προσήμου για λεπτούς φακούς.*

| *Μέγεθος* | *Κανόνας* |
|---|---|
| $s$ | + Αν το αντικείμενο είναι μπροστά* από τον φακό |
| | – Αν το αντικείμενο είναι πίσω από τον φακό |
| $s'$ | + Αν το είδωλο είναι πίσω από τον φακό |
| | – Αν το είδωλο είναι μπροστά από τον φακό |
| $h, h'$ | + Αν το είδωλο είναι ορθό |
| | – Αν το είδωλο είναι αντεστραμμένο |
| $R_1, R_2$ | + Αν η επιφάνεια είναι κυρτή |
| | – Αν η επιφάνεια είναι κοίλη |
| $f$ | + Αν ο φακός είναι συγκλίνων |
| | + Αν ο φακός είναι αποκλίνων |

* Το μπροστά ή πίσω καθορίζεται σε σχέση με το προσπίπτον φως. Ως μπροστινή θεωρείται η πλευρά του φακού στην οποία προσπίπτει αρχικά το φως.

Όταν $\boldsymbol{s > f}$ , $1/s < 1/f$ και σύμφωνα με την *Εξίσωση φακού, $s' > 0$ και το* **είδωλο είναι πραγματικό και αντεστραμμένο** (επειδή $m < 0$).
*- Αν $s' > s$ το είδωλο είναι* μεγαλύτερο ενώ αν *$s' < s$ είναι μικρότερο από το αντικείμενο.*

# ΣΥΓΚΛΙΝΩΝ ΦΑΚΟΣ – ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ




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

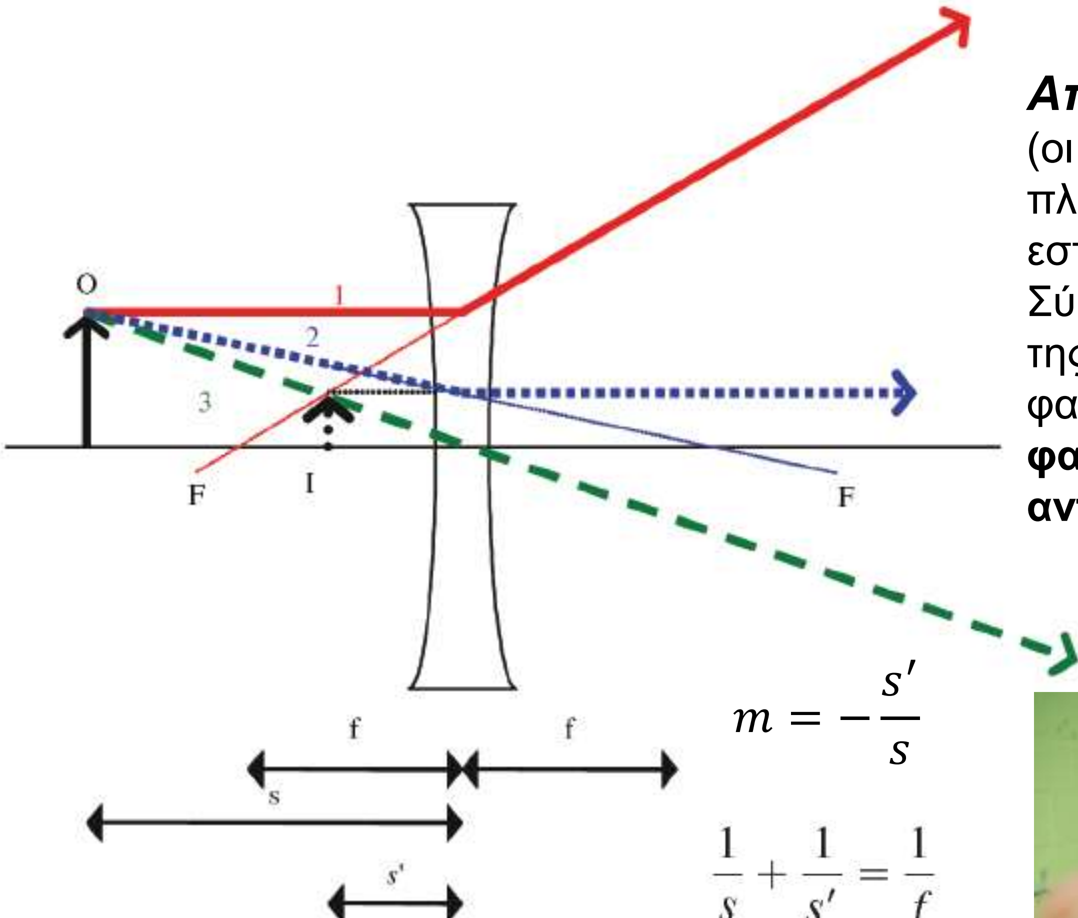
$$m = -\frac{s'}{s}$$

Περίπτωση όπου το αντικείμενο βρίσκεται σε απόσταση **μικρότερη της εστιακής** απόστασης (**$1/s > 1/f$** ) από τον φακό: Σύμφωνα με την Εξίσωση φακού **$s' < 0$**.

<u>*Τι σημαίνει αυτό για το σχηματιζόμενο είδωλο;*</u>

Οι ακτίνες, μετά τη διάθλασή τους από τον φακό, αποκλίνουν και γι' αυτό δεν σχηματίζεται κανένα πραγματικό είδωλο (δηλαδή δεν υπάρχει τοποθεσία πίσω από τον φακό όπου αν τοποθετηθεί ένα πέτασμα θα σχηματιστεί το είδωλο του αντικειμένου). Ένας παρατηρητής που βρίσκεται σε μακρινή απόσταση από τη δεξιά πλευρά του φακού κοιτάζοντας προς τον φακό θα βλέπει τις **ακτίνες σαν να προέρχονται από ένα (φανταστικό) είδωλο ευρισκόμενο πίσω από τον φακό, μεγαλύτερο από το αντικείμενο και σε ορθή θέση** (μεγεθυμένο και ορθό αφού $s' > s$ *και* $s' < 0$, επομένως **$m > +1$**. Όσο το αντικείμενο προσεγγίζει το εστιακό σημείο, το φανταστικό είδωλο πηγαίνει σε μεγαλύτερες αποστάσεις και μεγεθύνεται

# ΑΠΟΚΛΙΝΩΝ ΦΑΚΟΣ – ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ ΕΙΔΩΛΟΥ




***Αποκλίνων φακός***
(οι ακτίνες καμπυλότητας και των δύο πλευρών είναι αρνητικές). Επομένως και η εστιακή απόσταση θα είναι αρνητική. Σύμφωνα με την εξίσωση φακού, ανεξάρτητα της θέσης του αντικειμένου στα αριστερά του φακού, **το είδωλο θα είναι πάντα φανταστικό, ορθό και μικρότερο από το αντικείμενο**.

$$m = -\frac{s'}{s}$$

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

Για αποκλίνων φακό $f < 0$. Για να γίνει πιο παραστατικό σημειώνουμε $f = -|f|$, οπότε:

$$\frac{1}{s'} = -\frac{1}{|f|} - \frac{1}{s}$$

Επομένως, θα είναι πάντα $s' < 0$ και $|s'| < s$.

## Videos του Michel van Biezen για το σχηματισμό ειδώλου από κάτοπτρα, φακούς και συστήματα φακών και φακού-κατόπτρου:

ΚΑΤΟΠΤΡΑ
========
Κοίλο κάτοπτρο (1)
www.youtube.com/watch?v=MQZmLuQKDns

Κοίλο κάτοπτρο (2)
www.youtube.com/watch?v=9zJajE_Gmq8

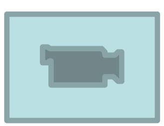
Κοίλο κάτοπτρο (3)
www.youtube.com/watch?v=wbcAaO02rek

Κυρτό κάτοπτρο (1)
www.youtube.com/watch?v=ioklc9JBfI4

Κυρτό κάτοπτρο (2)
www.youtube.com/watch?v=bIyMj0Zd80w

Επίπεδο κάτοπτρο
www.youtube.com/watch?v=20N3qjcFI_w

π. χ.



ΛΕΠΤΟΙ ΦΑΚΟΙ
===========
Συγκλίνων φακός (1)
www.youtube.com/watch?v=_LTffEMF5qI

Συγκλίνων φακός (2)
www.youtube.com/watch?v=P5Y6rmPpGo4

Συγκλίνων φακός (3)
www.youtube.com/watch?v=69NPUCIKWIg

Συγκλίνων φακός (4)
www.youtube.com/watch?v=aDhY8jfCJa8

Αποκλίνων φακός (1)
www.youtube.com/watch?v=FkFBAJksvXs

Αποκλίνων φακός (2)
www.youtube.com/watch?v=3XfJxHkiiGs

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΛΕΠΤΩΝ ΦΑΚΩΝ
=====================
Σύστημα 2 συγκλινόντων φακών (1)
www.youtube.com/watch?v=aHHa0cK_3as

Σύστημα 2 συγκλινόντων φακών (2)
www.youtube.com/watch?v=KaLSL8GYCHA

Σύστημα συγκλίνοντα - αποκλίναντα φακού (1)
www.youtube.com/watch?v=dI-9Zj1Fo4A

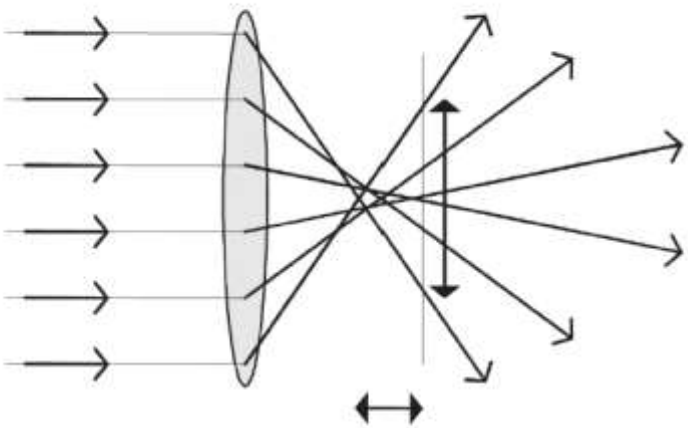
Σύστημα συγκλίνοντα - αποκλίναντα φακού (2)
www.youtube.com/watch?v=7D2N4v4xrVI

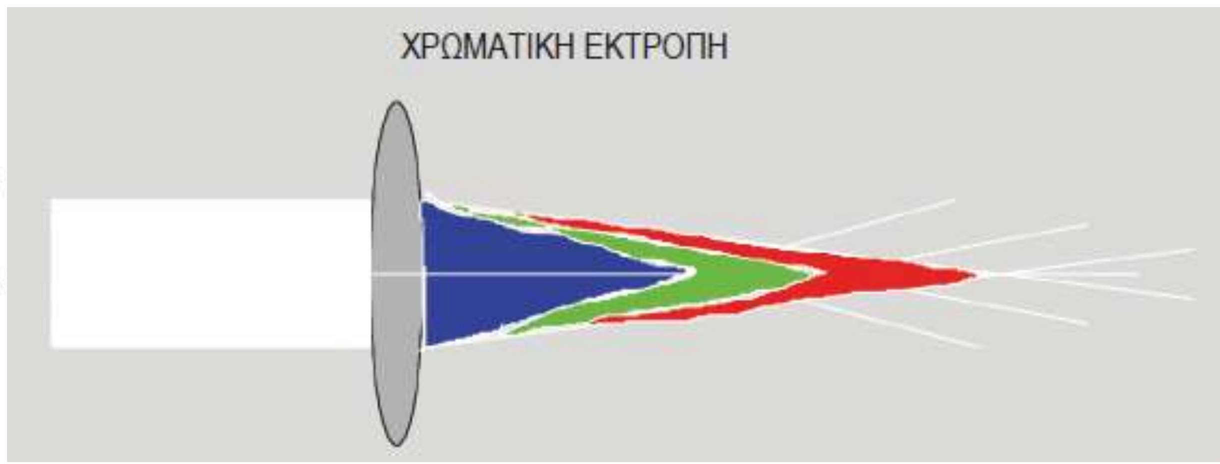
Σύστημα συγκλίνοντα φακού - κοίλου κατόπτρου
www.youtube.com/watch?v=aGHnH_4KFRE

# ΕΚΤΡΟΠΕΣ ΦΑΚΟΥ

- *Μονοχρωματικές εκτροπές* (αφορούν ένα μόνο χρώμα)
- *Χρωματικές εκτροπές* (εκφράζουν την αδυναμία ενός φακού να εστιάσει στην ίδια θέση ακτίνες διαφορετικού λ (χρώματος) οι οποίες, εξαιτίας της διασποράς του υλικού του φακού, αντιστοιχούν σε διαφορετικό δείκτη διάθλασης και διαθλώνται διαφορετικά.)

ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΚΤΡΟΠΗ





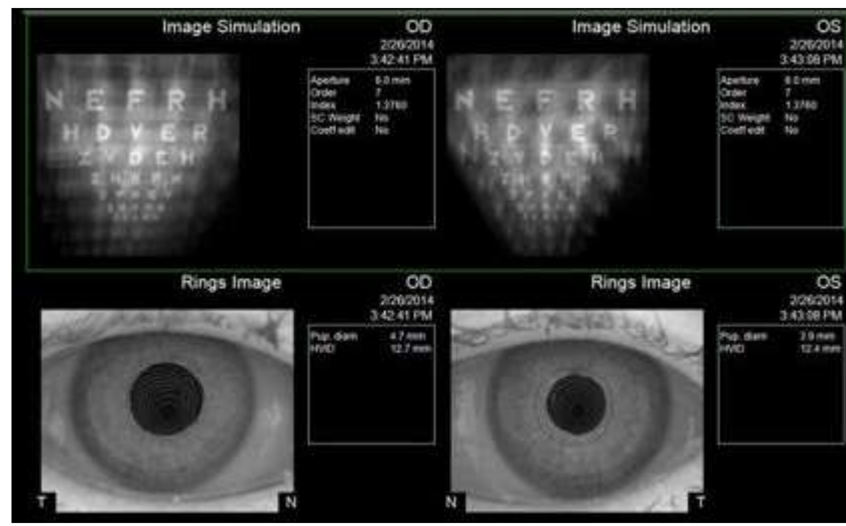

ΔΙΟΡΘΩΣΗ:
- Παραβολοειδής αντί σφαιρικού φακού
- Χρήση διαφράγματος που επιτρέπει την πρόσπτωση στο φακό μόνο των παραξονικών ακτίνων (αυτές που βρίσκονται κοντά στον οπτικό άξονα)

ΔΙΟΡΘΩΣΗ:


Χρησιμοποιώντας έναν αχρωματικό φακό (σύνθετος φακός), μειώνεται αισθητά η θολή απόδοση των χρωμάτων

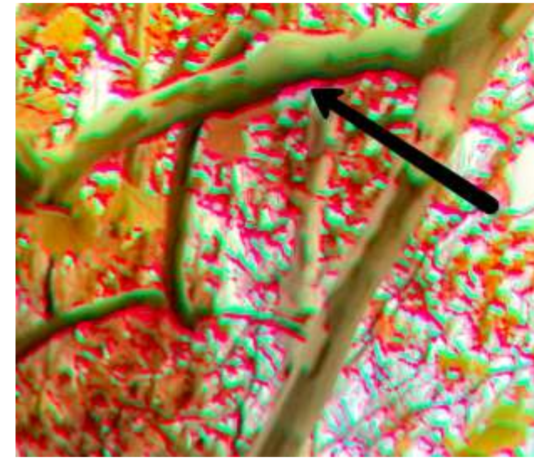
# Σφαιρική εκτροπή

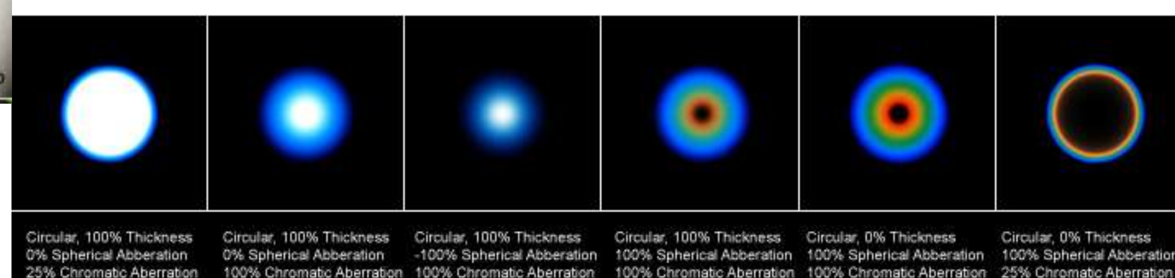
Δραματική βελτίωση των εικόνων από το διαστημικό τηλεσκόπιο ***Hubble*** μετά τη διόρθωση των προβλημάτων σφαιρικής εκτροπής




Περιορίζουμε τη σφαιρική εκτροπή αποκόπτοντας τις  μη παραξονικές ακτίνες με τη χρήση κατάλληλου διαφράγματος.

# Χρωματική εκτροπή



# ΣΥΝΘΕΤΟΙ ΦΑΚΟΙ

Συνδυασμοί πολλών απλών φακών σε σειρά, που είτε βρίσκονται σε επαφή είτε απέχουν μεταξύ τους. Οι περισσότεροι φακοί των οπτικών συσκευών είναι σύνθετοι φακοί κατασκευασμένοι έτσι ώστε να αντισταθμίζουν τις εκτροπές.

***Δύο λεπτοί φακοί που είναι σε επαφή μεταξύ τους:***

Το είδωλο του αντικειμένου από τον πρώτο μεμονωμένο φακό (αυτόν που βρίσκεται πλησιέστερα στο αντικείμενο) θεωρείται ως αντικείμενο για τον δεύτερο φακό κ.ο.κ. και χρησιμοποιούμε τους κανόνες προσήμων.

Εξίσωση φακού για τον 1ο φακό και τον $2^o$ φακό είναι:


$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_1} = \frac{1}{f_1} \qquad \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_2}$$

Αν θεωρήσουμε **το είδωλο από τον πρώτον φακό ως αντικείμενο για τον δεύτερο, θα είναι $s_2 = -s'_1$** *και προσθέτοντας τις δύο* εξισώσεις βρίσκουμε ότι:

$$\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s'_2} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$$

# ΣΥΝΘΕΤΟΙ ΦΑΚΟΙ

Δηλ., μπορούμε να θεωρήσουμε τους δύο λεπτούς φακούς, που είναι σε επαφή μεταξύ τους, ως έναν φακό του οποίου η εστιακή απόσταση προκύπτει από τον συνδυασμό των άλλων δύο, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$$

Οι περισσότεροι φακοί των οπτικών συσκευών είναι σύνθετοι φακοί κατασκευασμένοι έτσι ώστε να αντισταθμίζουν τις εκτροπές.

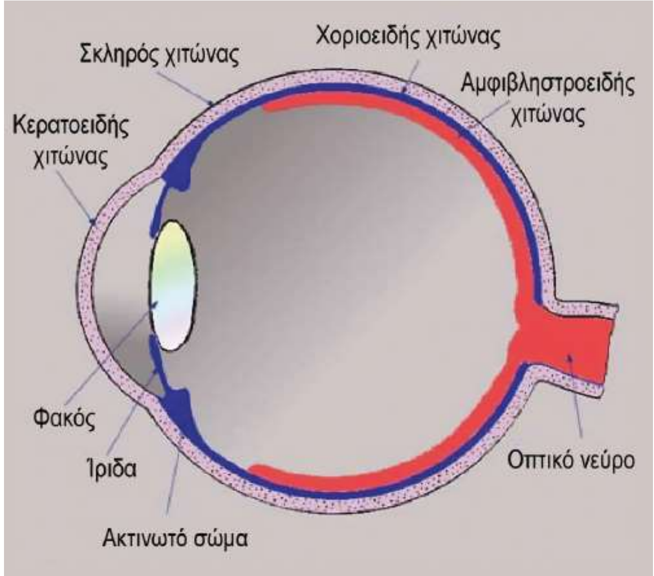
# Ο ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΟΦΘΑΛΜΟΣ

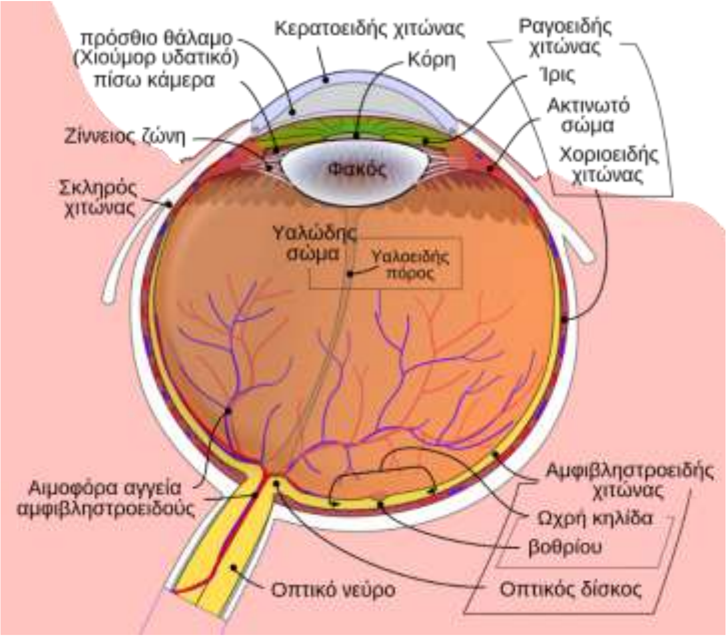
- Διάφανος **κερατοειδής χιτώνας με $n \approx 1{,}38$**.
- Θάλαμος με ***υδατοειδές υγρό.***
- **Ο *φακός*** είναι ένας **διπλός κυρτός φακός με $n \approx 1{,}42$.**

Συνολικά, **ως οπτικό ισοδύναμο του οφθαλμού μπορεί να θεωρηθεί ένα σύστημα παχύ φακού που αποτελείται από τον κερατοειδή χιτώνα, το υδατοειδές υγρό και τον φακό.**

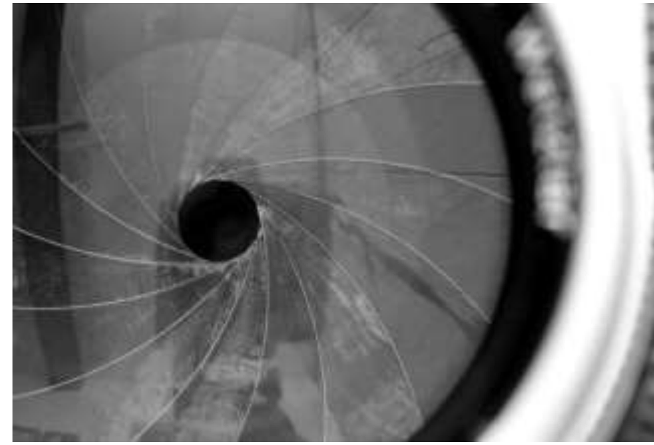
- Το σχήμα του φακού ελέγχεται από ακτινωτούς μυς που μπορούν να αλλάζουν την ικανότητα εστίασής του

με μια διαδικασία γνωστή ως *προσαρμογή*.

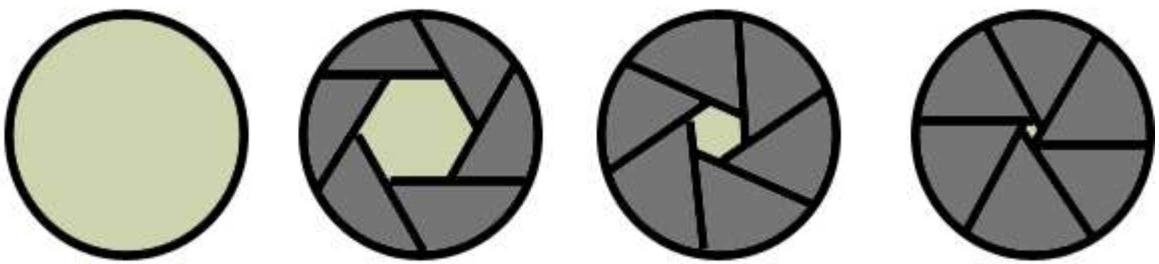



# Ο ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΟΦΘΑΛΜΟΣ

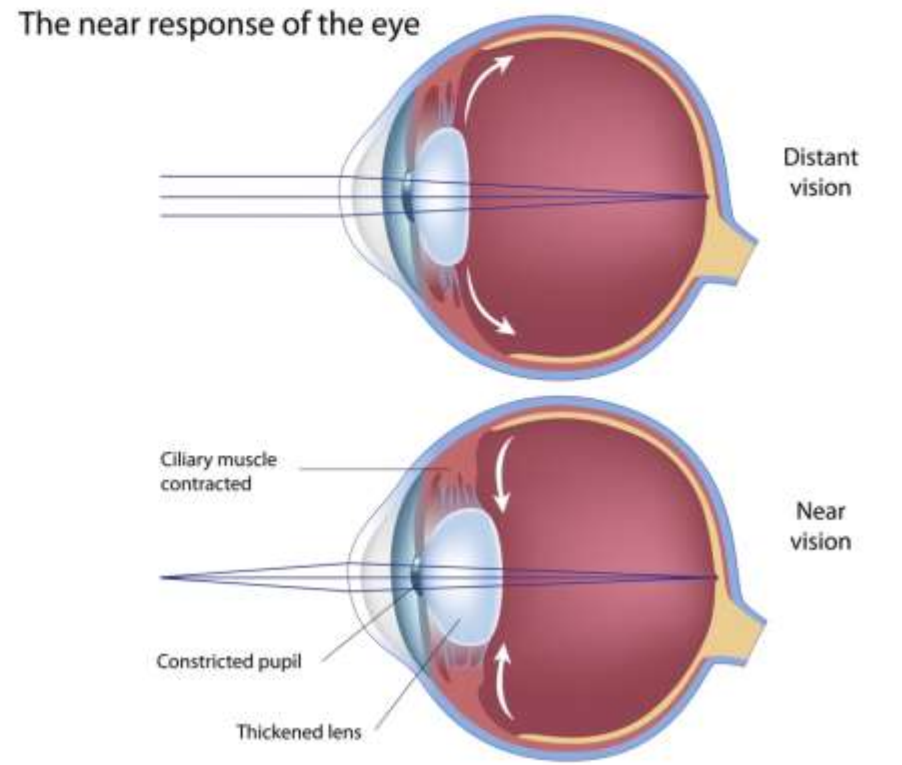


ίριδα




Μια λειτουργία της ίριδας είναι η μείωση της διαμέτρου του ανοίγματος του διαφράγματος, ώστε να ρυθμίζεται η **ποσότητα του φωτός** που εισέρχεται στον οφθαλμό (όπως το **διάφραγμα** Φωτ. Μηχανής)

# Ο ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΟΦΘΑΛΜΟΣ




Φυσιολογικά, χωρίς καμία αλλαγή του σχήματος του φακού, μπορούμε να εστιάζουμε σε αντικείμενα που βρίσκονται σε απόσταση από περίπου <u>6 m έως το άπειρο</u>.
<u>Για να δούμε αντικείμενα που βρίσκονται σε κοντινότερες αποστάσεις, το μάτι δεν παραμένει χαλαρωμένο. Ο φακός του αλλάζει σχήμα, εξογκώνεται και δίνει πιο κοντινή εστίαση.</u>

Phet : Geometric optics

Από ένα αντικείμενο στο «άπειρο», παράλληλες ακτίνες φωτός εστιάζονται, από τον φακό σε κατάσταση χαλάρωσης, σε ένα σημείο του αμφιβληστροειδούς, περίπου 2 cm πίσω από τον φακό.
Ένα αντικείμενο σε μεγάλη αλλά πεπερασμένη απόσταση **εστιάζεται πάνω στον αμφιβληστροειδή ως αντεστραμμένο είδωλο**, το οποίο ερμηνεύεται ανορθωμένο από τον εγκέφαλο.

## Χειρισμός Γεωμετρική Οπτικής για τον Ανθρώπινο Οφθαλμό

Αν και η πραγματική απόσταση κερατοειδούς-αμφιβληστροειδούς είναι περίπου 1.7 cm (~2 cm), επειδή ο φακός είναι στο πίσω μέρος του πρόσθιου θαλάμου που είναι γεμάτος με υδατοειδές υγρό με $n_i$ = 1,33, η εξίσωση φακών αλλάζει και το f του φακού διαχωρίζεται σε $f_o$ αντικειμένου (=1,7 cm) και $f_i$ ειδώλου (=2,2 cm).

$$\frac{1}{s_o} + \frac{n_i}{s_i} = \frac{1}{f_o} = \frac{n_i}{f_i}$$

Προκειμένου να συνεχίζουμε να χρησιμοποιούμε την απλοποιημένη εξίσωση φακών, χωρίς να εισάγουμε το $n_i$ = 1,33,

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

***θα θεωρήσουμε ότι <u>η εστιακή απόσταση του οφθαλμού ενός ανθρώπου είναι μία, f, ίση περίπου με 3 cm όταν είναι πλήρως χαλαρωμένος</u>***

## *Εγγύς σημείο όρασης*

Για να βλέπουμε «καθαρά» ένα αντικείμενο, το είδωλό του από το φακό του οφθαλμού θα πρέπει να σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή, δηλαδή $s' = 3$ cm.

- Όταν οφθαλμός είναι πλήρως χαλαρωμένος, η εστιακή απόσταση του φακού του είναι $f = 3$ cm, επομένως εστιάζει αντικείμενα στο άπειρο αφού τότε $s = \infty$ και $s' = f$.

- Όταν το αντικείμενο δεν είναι στο άπειρο, αλλά σε μια απόσταση πρακτικά $s < 6$ m, το $s'$ γίνεται μεγαλύτερο από 3 cm (μάλιστα, αν θεωρήσουμε $f$ = σταθ., το $s'$ μεγαλώνει καθώς το s μικραίνει – βλέπε phet).

Τότε, για να πετύχει το μάτι εστίαση στον αμφιβληστροειδή, δηλ. $s' = 3$ cm, συμπιέζει με τους μυς του τον φακό, ελαττώνει την ακτίνα καμπυλότητας του και επομένως μειώνει την $f$ του.

Αυτό μπορεί να το κάνει μέχρις ενός ορίου, μπορεί δηλαδή να μειώσει την $f$ μέχρι 2,7 cm ($f_{min}$). Αυτό σημαίνει ότι για να εστιαστεί το είδωλο στον αμφιβληστροειδή ($s' = 3$ cm) υπάρχει και ένα κατώτερο $s$ ($s_{min}$) στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί το αντικείμενο:

$$(1/ f_{min}) = (1/ s_{min}) + (1/3) \Rightarrow (1/2{,}7) = (1/ s_{min}) + (1/3)$$

Ο υπολογισμός του $s_{min}$, σύμφωνα με αυτό, δίνει μια τιμή περίπου 25 cm που ονομάζεται **ΕΓΓΥΣ ΣΗΜΕΙΟ ΟΡΑΣΗΣ**.

## Εγγύς σημείο όρασης

(η μικρότερη απόσταση από τον οφθαλμό στην οποία όταν βρίσκεται ένα αντικείμενο, ο οφθαλμός έχει την ικανότητα να εστιάζει σε αυτό με ευκρίνεια)

Για ένα **φυσιολογικό οφθαλμό**:

- το εγγύς σημείο όρασης είναι $s_{min} = 25$ cm και
- θεωρούμε απόσταση από τον αμφιβληστροειδή $s' = 3$ cm,

τότε, όπως προκύπτει από την Εξίσωση φακού:

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

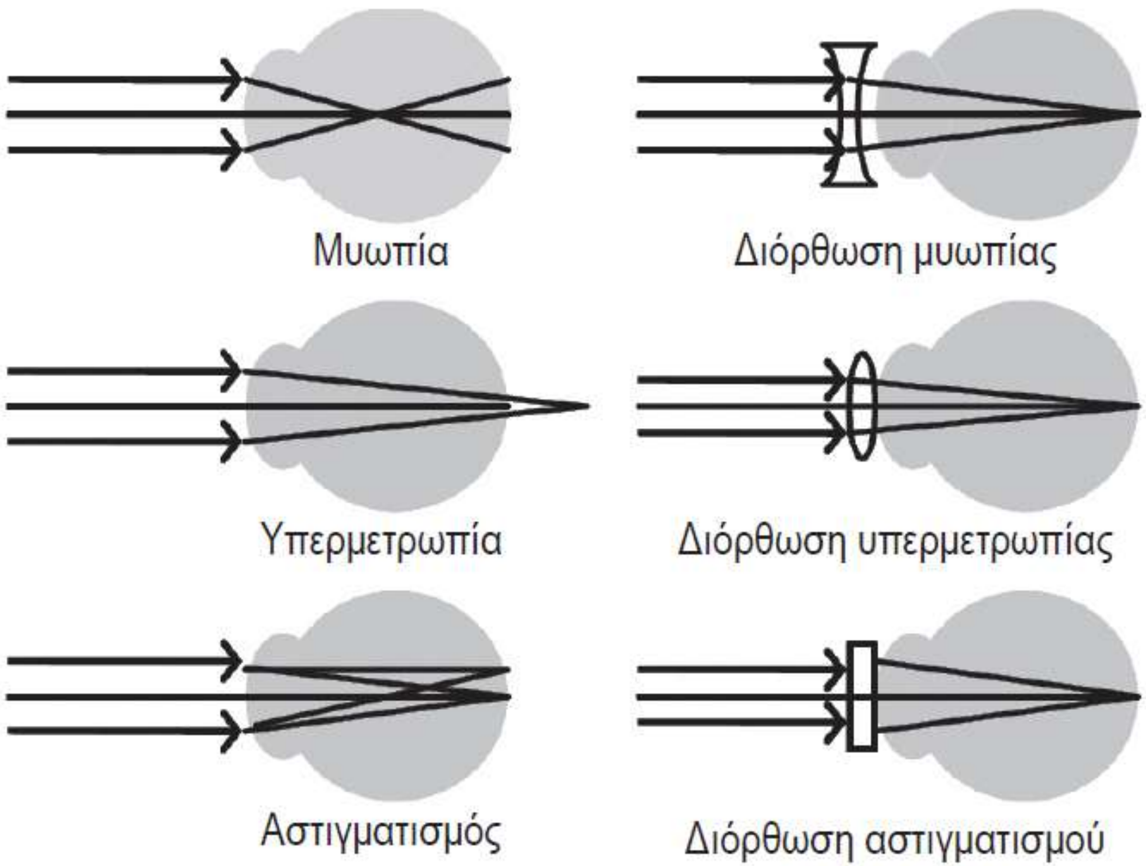
η **ελάχιστη εστιακή απόσταση** $f$ **του φυσιολογικού οφθαλμού (αυτή που μπορεί να αποκτήσει επιτυγχάνοντας τη μέγιστη δυνατή εξόγκωση του φακού με τους ακτινωτούς μυς) είναι περίπου 2,7 cm**.

Ο φυσιολογικός οφθαλμός σχηματίζει ένα αντεστραμμένο πραγματικό είδωλο στον αμφιβληστροειδή

$$m = - s'/s = - 3\text{cm} / 25 \text{ cm} = - 0{,}12$$

που είναι σε μέγεθος $|m| = 12\%$ του μεγέθους του αντικειμένου.

# Ο ΑΝΘΡΩΠΙΝΟΣ ΟΦΘΑΛΜΟΣ




***Μυωπία****: Ο βολβός του οφθαλμού είναι, σε σχέση με την ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδούς, περισσότερο επιμηκυμένος κατά μήκος του οπτικού άξονα.*

***Υπερμετρωπία****:* λιγότερο επιμηκυμένος κατά μήκος του οπτικού άξονα.

***Αστιγματισμός****:* η επιφάνεια του κερατοειδούς δεν είναι σφαιρική αλλά ωοειδής, με αποτέλεσμα η εστίαση να μην είναι η ίδια για δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.

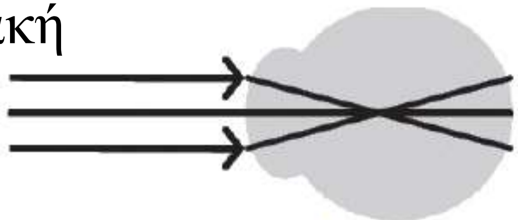
## ΑΣΚΗΣΗ

Υποθέστε ότι η εστιακή απόσταση του οφθαλμού ενός ανθρώπου είναι 3 cm όταν είναι πλήρως χαλαρωμένος (δηλαδή, όταν κοιτάζει ένα αντικείμενο που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση). Εάν ο αμφιβληστροειδής του οφθαλμού βρίσκεται σε απόσταση 3,3 cm πίσω από τον φακό του οφθαλμού

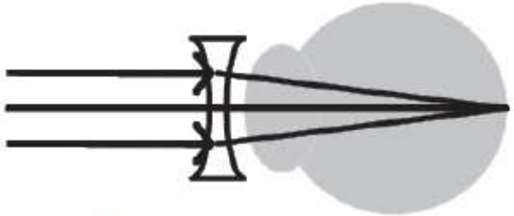
**Α)** τι πάθηση θα εμφανίζει ο οφθαλμός;

**Απάντηση**: πρόκειται για μυωπικό οφθαλμό.

**Β)** Ποιά πρέπει να είναι η εστιακή απόσταση των διορθωτικών φακών που πρέπει να χρησιμοποιήσει αυτός ο άνθρωπος ώστε να μπορεί να βλέπει ευκρινώς αντικείμενα σε μεγάλες αποστάσεις;



Μυωπία



Διόρθωση μυωπίας

***Λύση:*** Χρησιμοποιώντας την εξίσωση λεπτού φακού με $s = \infty$ και $s' = 3{,}3$ cm, βρίσκουμε ότι χρειάζεται να πετύχουμε μια συνολική εστιακή απόσταση ίση με 3,3 cm. Για ένα τέτοιο σύστημα δύο φακών (*φακός του οφθαλμού και διορθωτικός φακός*), η συνολική εστιακή απόσταση υπολογίζεται από την εξίσωση σύνθετων φακών : $\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f}$ ως:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_{\text{διορ. φακ.}}} + \frac{1}{f_{\text{φακ. οφθαλ.}}}$$

και επομένως η εστιακή απόσταση του φακού που χρειάζεται, είναι:

$$f_{\text{διορ. φακ.}} = \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{f_{\text{φακ. οφθαλ.}}} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{3{,}3} - \frac{1}{3{,}0} \right)^{-1} = -33{,}0\ \text{cm}$$

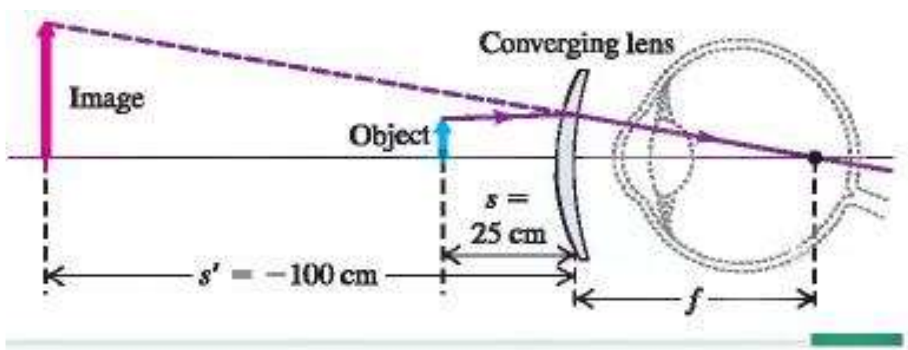
ή σε διόπτρες 1/(- 0,33 m) = - 3 D.

## Άσκηση

Η μέση ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως (εγγύς σημείο) ενός ασθενούς με υπερμετρωπία είναι 100 cm. Χρειάζεται φακούς επαφής και ποιας εστιακής απόστασης, ώστε να μπορεί να εστιάσει στα 25 cm;

## Λύση

Πρέπει ο φακός επαφής να δημιουργεί ένα είδωλο στα 100 cm για ένα αντικείμενο που βρίσκεται στα 25 cm.




$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{+25\ \text{cm}} + \frac{1}{-100\ \text{cm}}$$

$$f = +33\ \text{cm}$$

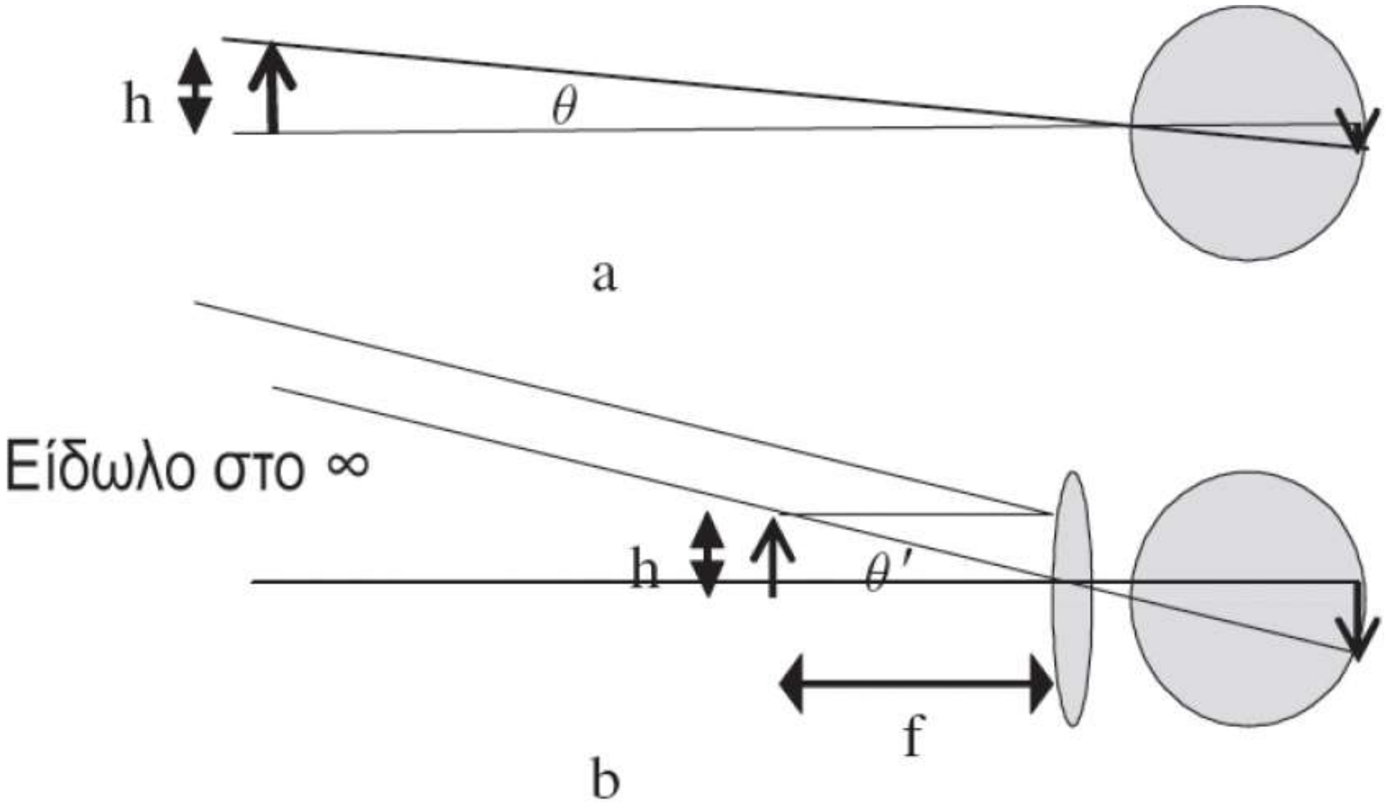
# ΟΠΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ: ΜΕΓΕΘΥΝΤΙΚΟΣ ΦΑΚΟΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Για να μπορέσουμε να παρατηρήσουμε μικρές λεπτομέρειες ενός αντικειμένου θα πρέπει να το φέρουμε όσο το δυνατόν πλησίον στα μάτια μας. Με αυτό τον τρόπο το είδωλο του αντικειμένου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή μεγεθύνεται και καταλαμβάνει μεγαλύτερη έκταση στις περιοχές ανίχνευσης, με αποτέλεσμα την αύξηση της χωρικής ανάλυσης στον αμφιβληστροειδή.

**Αφού η ύπαρξη του εγγύς σημείου περιορίζει την ικανότητά μας να φέρουμε τα αντικείμενα όσο κοντά θα θέλαμε, ώστε να αυξήσουμε το μέγεθος του εστιασμένου στον αμφιβληστροειδή ειδώλου, η δυνατότητα του γυμνού ανθρώπινου οφθαλμού να διακρίνει λεπτομέρειες είναι περιορισμένη**.

# ΜΕΓΕΘΥΝΤΙΚΟΣ ΦΑΚΟΣ

Αν θεωρήσουμε ότι το εγγύς σημείο είναι στα 25 cm (συνήθης τιμή)




Phet : [Geometric optics]

(a) γωνία $\theta = h/25$.

(b) οφθαλμός βοηθούμενος από μεγεθυντικό φακό. Το αντικείμενο μεταφέρεται στο εστιακό σημείο του κυρτού φακού [εγγύτερα στον οφθαλμό από ότι στο (a)] και η γωνία $\theta' = h/f$ είναι μεγαλύτερη της $\theta$.

# ΜΕΓΕΘΥΝΤΙΚΟΣ ΦΑΚΟΣ

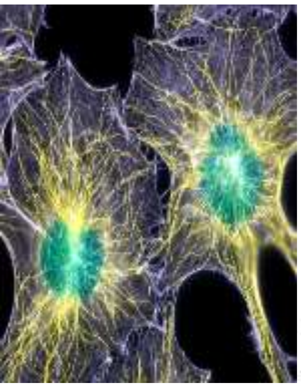
Ο μεγεθυντικός  (κυρτός) φακός είναι συγκλίνων φακός που δίνει τη δυνατότητα εστίασης σε αποστάσεις κοντινότερες από ότι ο φακός του γυμνού οφθαλμού μας. Έτσι, μπορούμε να φέρουμε τα αντικείμενα πιο κοντά στο μάτι μας και τα είδωλό τους να παραμένουν εστιασμένα. Η ***γωνιακή μεγέθυνση ή ισχύς μεγέθυνσης*** ορίζεται από το πηλίκο της γωνίας *θ′* όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην κοντινή θέση όπου επιτυγχάνεται εστίαση με τη βοήθεια του φακού, προς τη γωνία *θ όταν* το αντικείμενο είναι στο εγγύς σημείο του γυμνού οφθαλμού:

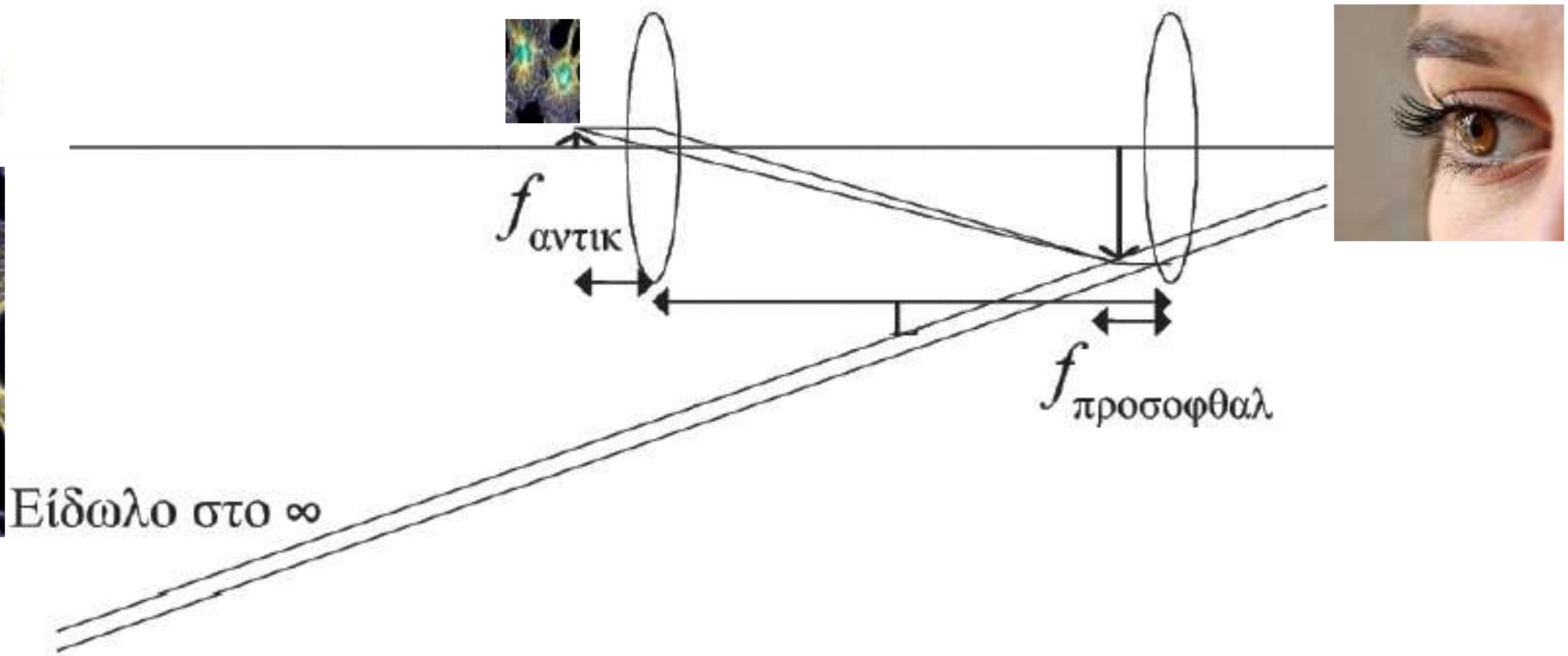
$$m_\theta = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{\left(\dfrac{h}{f}\right)}{\left(\dfrac{h}{25\text{ cm}}\right)} = \frac{25\text{ cm}}{f}$$

Όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση του φακού, τόσο μεγαλύτερη είναι η μεγέθυνση του ειδώλου που επιτυγχάνεται στο μάτι. Μέγιστη μεγέθυνση θα έχουμε όταν το είδωλο από τον μεγεθυντικό φακό σχηματίζεται στο εγγύς σημείο του οφθαλμού.

# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

*Προσοφθάλμιος και αντικειμενικός φακός*

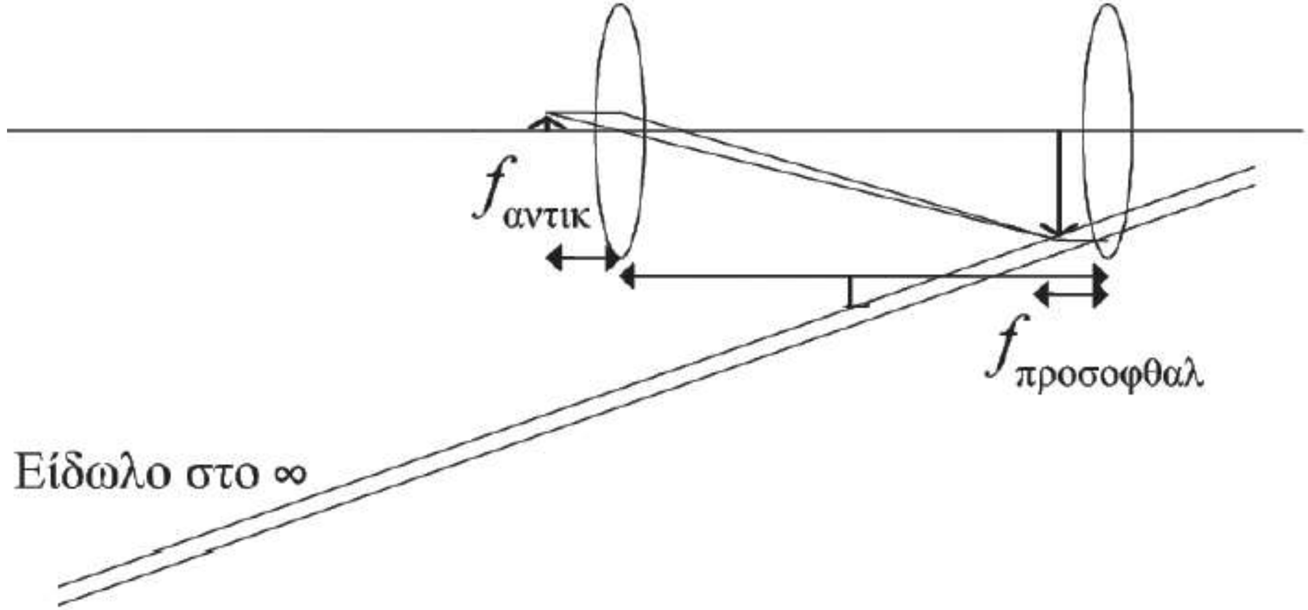





Το αντικείμενο τοποθετείται ακριβώς έξω από το *εστιακό σημείο του αντικειμενικού φακού* ώστε ένα μεγεθυμένο, αντεστραμμένο, πραγματικό είδωλο να σχηματίζεται ακριβώς πάνω στο εστιακό σημείο του προσοφθάλμιου φακού.

*Ο προσοφθάλμιος φακός*, με τη σειρά του, σχηματίζει ένα περαιτέρω μεγεθυμένο φανταστικό είδωλο στο άπειρο, ώστε να το βλέπει ο οφθαλμός σε χαλάρωση.

# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

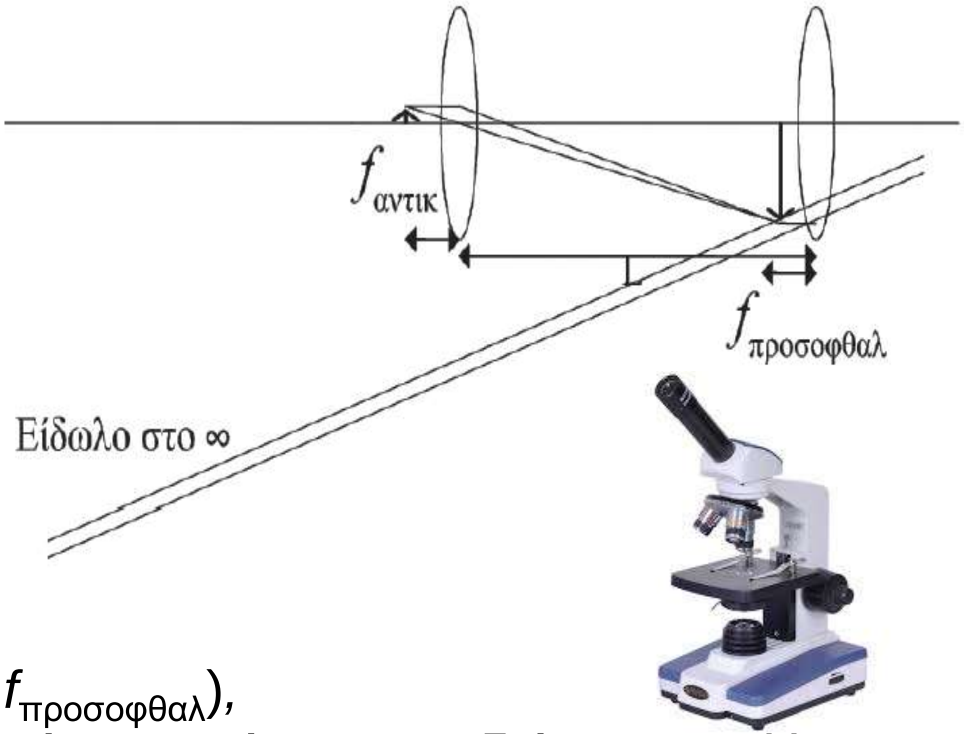



Τοποθετούμε το αντικείμενο που θέλουμε να παρατηρήσουμε ακριβώς έξω από το εστιακό σημείο του αντικειμενικού φακού, $s \sim f_{αντικ}$, και σχηματίζεται ένα πραγματικό αντεστραμμένο είδωλο με γραμμική μεγέθυνση :

$$m_{αντικ} = \frac{s'}{s} = \frac{s'}{f_{αντικ}}$$

# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

Το είδωλο αυτό χρησιμοποιείται ως αντικείμενο από τον προσοφθάλμιο φακό, ο οποίος ρυθμίζεται έτσι ώστε να σχηματίζει ένα φανταστικό τελικό είδωλο στο άπειρο και επομένως ο οφθαλμός μπορεί να είναι σε χαλάρωση όταν το βλέπει.




Τότε:

$$s' = (L - f_{\pi\rho o\sigma o\varphi\theta\alpha\lambda}),$$

όπου $L$ η απόσταση μεταξύ των φακών, όπως φαίνεται στο διάγραμμα. Η συνολική μεγέθυνση που επιτυγχάνεται με αυτό το σύστημα φακών, συγκριτικά με το μέγεθος του ειδώλου όταν το αντικείμενο βρίσκεται στο εγγύς σημείο του γυμνού οφθαλμού, είναι τότε:

$$m = m_{\alpha\nu\tau\iota\kappa}\, m_{\pi\rho o\sigma o\varphi\theta\alpha\lambda} = \left(\frac{L - f_{\pi\rho o\sigma o\varphi\theta\alpha\lambda}}{f_{\alpha\nu\tau\iota\kappa}}\right)\left(\frac{25\ \text{cm}}{f_{\pi\rho o\sigma o\varphi\theta\alpha\lambda}}\right) \approx \frac{25\ \text{cm} \cdot L}{f_{\alpha\nu\tau\iota\kappa}\, f_{\pi\rho o\sigma o\varphi\theta\alpha\lambda}}$$

γενικά η $f_{\pi\rho o\sigma o\varphi\theta\alpha\lambda}$ είναι πολύ μικρότερη από την $L$ και όλες οι αποστάσεις δίνονται σε cm.

# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ


Εύκολα επιτυγχάνονται μεγεθύνσεις πάνω από 1.000×.

Υπάρχει δυνατότητα εναλλαγής **αντικειμενικών φακών** με διαφορετική εστιακή απόσταση.

Συνήθως οι φακοί μικρής εστιακής απόστασης ενός μικροσκοπίου είναι **σύνθετοι φακοί** σχεδιασμένοι έτσι ώστε να απαλείφουν τις εμφανιζόμενες εκτροπές.

**Θέμα εξετάσεων**

Ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού κυμαίνεται μεταξύ n=1,7 για λ=400 nm και n=1,5 για λ=700 nm.
Μια δέσμη λευκού φωτός (400 -700 nm) στο κενό, πέφτει πλάγια πάνω σε επιφάνεια του υλικού.
α) Εκτρέπεται της πορείας του περισσότερο το
Α) κόκκινο φως Β) πράσινο φως Γ) ιώδες φως Δ) κανένα από τα παραπάνω ;
Εξηγείστε την απάντηση σας:

β) Βάσει του (α), η εστιακή απόσταση ενός συγκλίνοντος φακού από αυτό το υλικό, είναι μεγαλύτερη για:
Α) κόκκινο φως Β) πράσινο φως Γ) ιώδες φως Δ) κανένα από τα παραπάνω

γ) ) Βάσει του (β), υπολογίστε την μορφή και θέση του ειδώλου σημειακής πηγής **λευκού φωτός** που βρίσκεται στην θέση Κ στο παρακάτω διάγραμμα. Ο συγκεκριμένος φακός από το υλικό αυτό, έχει ακτίνες καμπυλότητας $R_1$=$R_2$=7 cm.
Σχεδιάστε διάγραμμα ακτίνων και το είδωλο της πηγής. Είναι και το είδωλο σημειακό; Πως λέγεται το φαινόμενο που παρατηρούμε αναφορικά με το χρώμα;