



Βασικές Αρχές Απεικόνισης

Απεικόνιση



Πραγματικός
Κόσμος

Οπτικά

Αισθητήρας



- **Αίσθηση (Sensation) ≠ Αντίληψη (Perception)**
- **Αντίληψη (Perception)**
 - Πως αντιλαμβανόμαστε (συνειδητά) τον φυσικό κόσμο
 - Μια ερμηνεία των αισθήσεων
 - Διαφορετικό από ό, τι είναι εκεί έξω, επειδή
 - Οι υποδοχείς μας ανιχνεύουν περιορισμένο αριθμό μορφών ενέργειας
 - Οι πληροφορίες δεν φτάνουν στον εγκέφαλο μας αναλλοίωτες. Μερικά χαρακτηριστικά ενισχύονται και κάποια καταστέλλονται
 - Ο εγκέφαλος ερμηνεύει τις πληροφορίες και συχνά στρεβλώνει ("ολοκληρώνει την εικόνα "ή" συμπληρώνει τα κενά ") για εξαγωγή συμπερασμάτων.
 - Η ερμηνεία επηρεάζεται από πολιτιστικές, κοινωνικές και προσωπικές εμπειρίες στη μνήμη μας

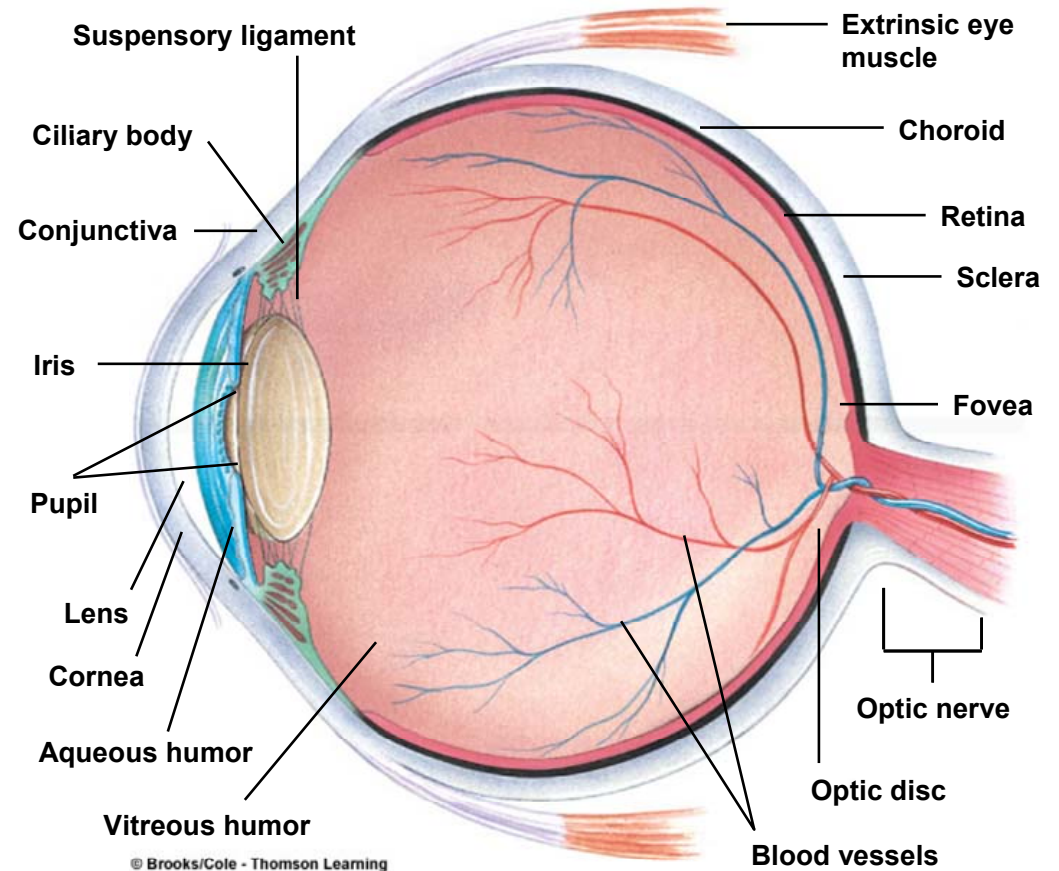
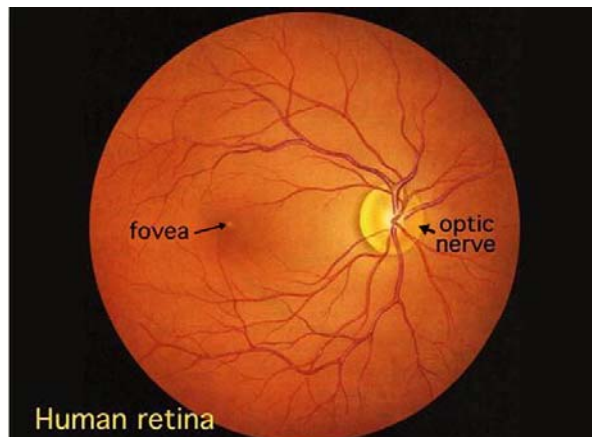
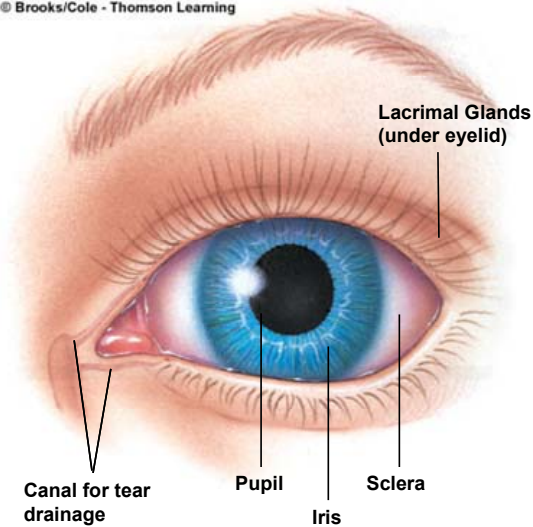


Όραση



• Μάτι – το αισθητήριο όργανο της όρασης

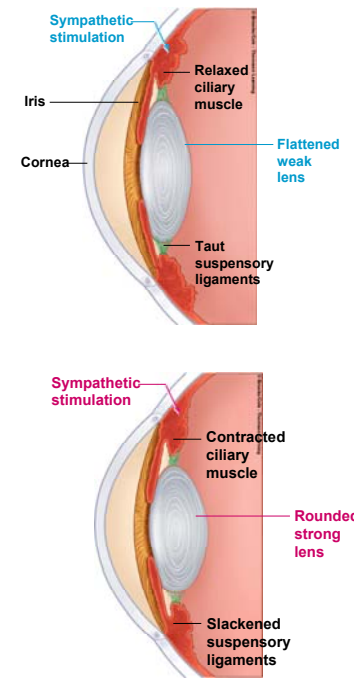
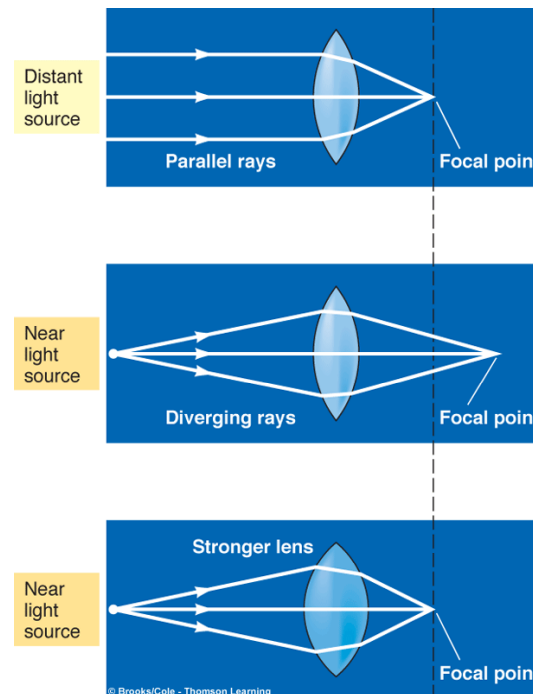
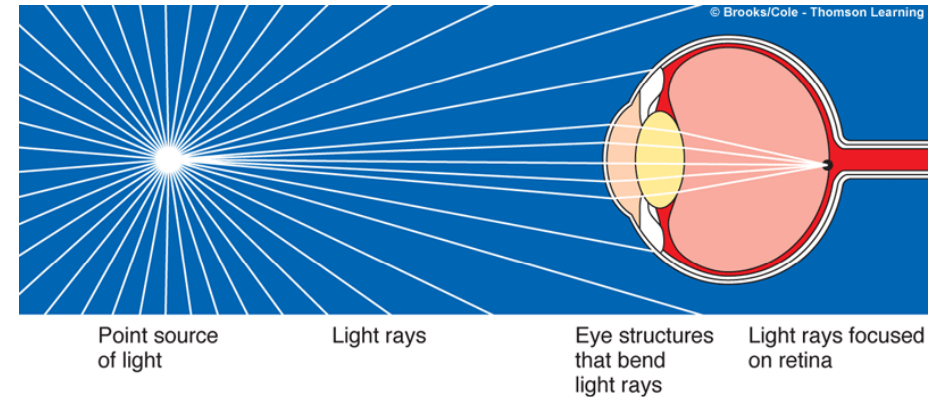
© Brooks/Cole - Thomson Learning

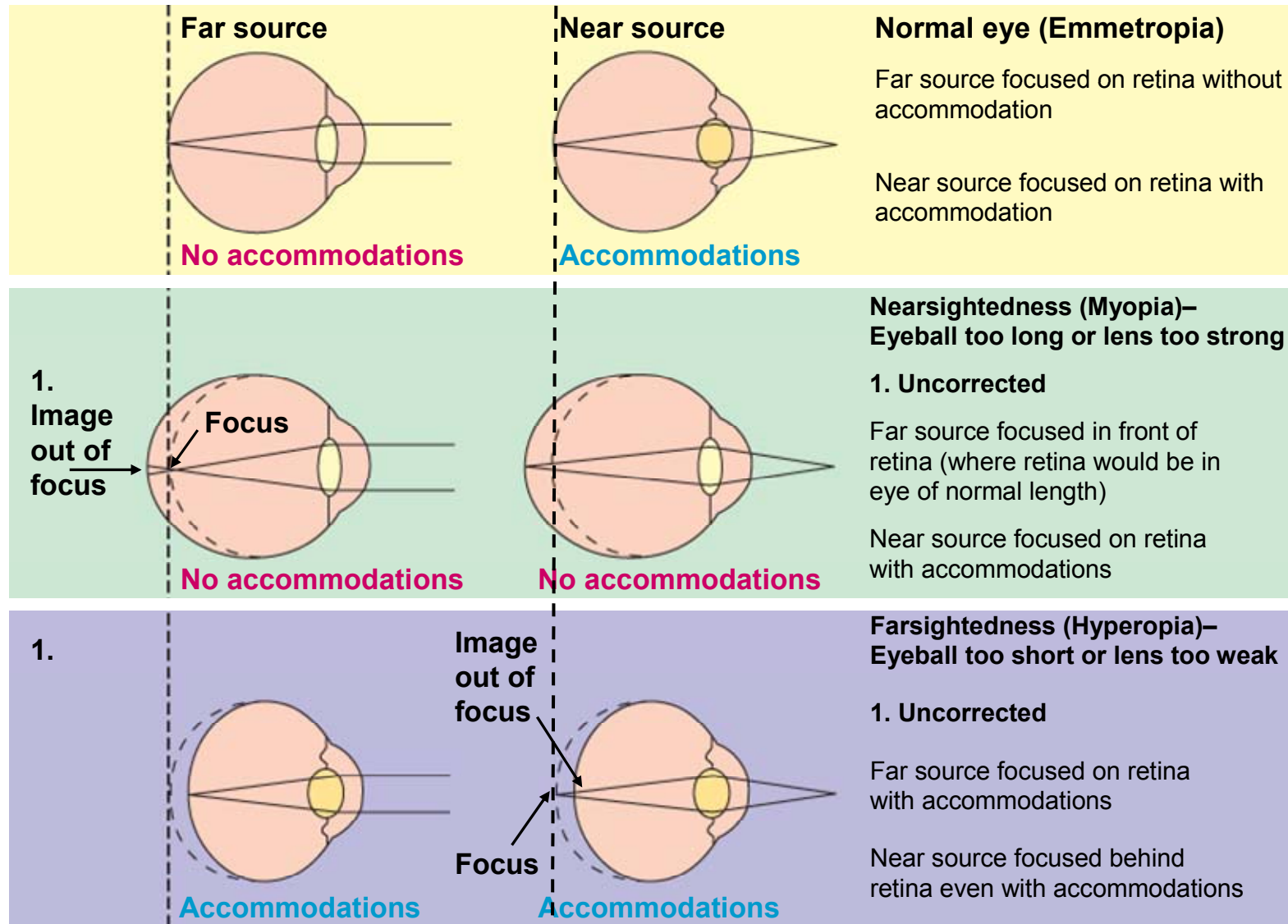


Όραση



- Οι κυρτές δομές του ματιού προκαλούν σύγκλιση των αποκλινουσών ακτινών φωτός που φτάνουν στα μάτια
- Οι δύο πιο σημαντικές δομές στη διαθλαστική ικανότητα ματιού είναι
 - Κερατοειδής (Cornea)
 - Συμβάλλει πιο εκτενώς στη συνολική διαθλαστική ικανότητα του ματιού
 - Η διαθλαστική ικανότητα παραμένει σταθερή, επειδή η καμπυλότητα του δεν αλλάζει
 - Φακός (Lens)
 - Η διαθλαστική ικανότητα μπορεί να ρυθμιστεί με αλλαγή της καμπυλότητας, όπως απαιτείται για κοντινή ή μακρινή όραση (προσαρμογή – accommodation)





Όραση

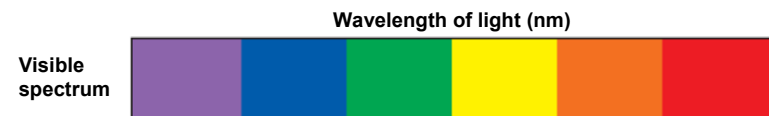
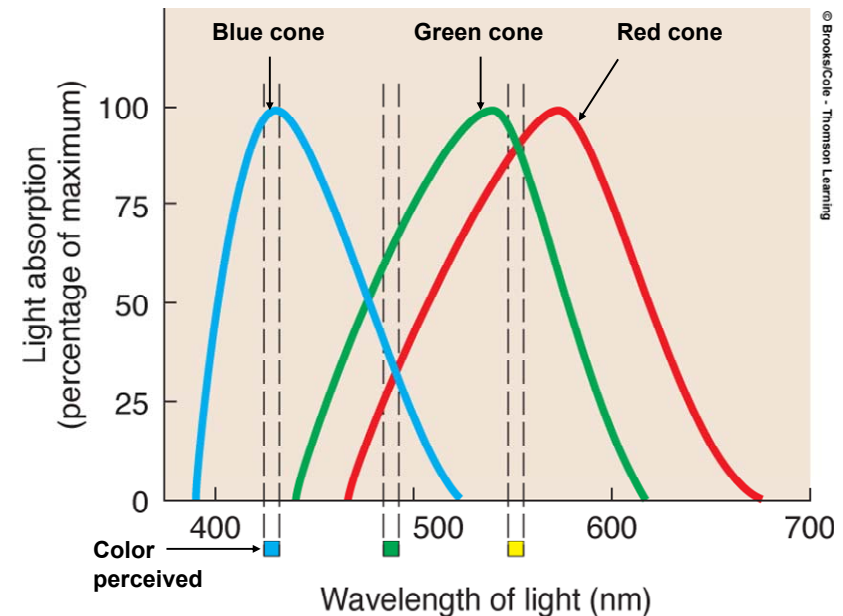


- **Αμφιβληστροειδής(Retina)**

- Φωτο-υποδοχείς με ουσίες που απορροφούν το φως και το μετατρέπουν σε χημικά και ηλεκτρικά σήματα

- **Έγχρωμη Όραση**

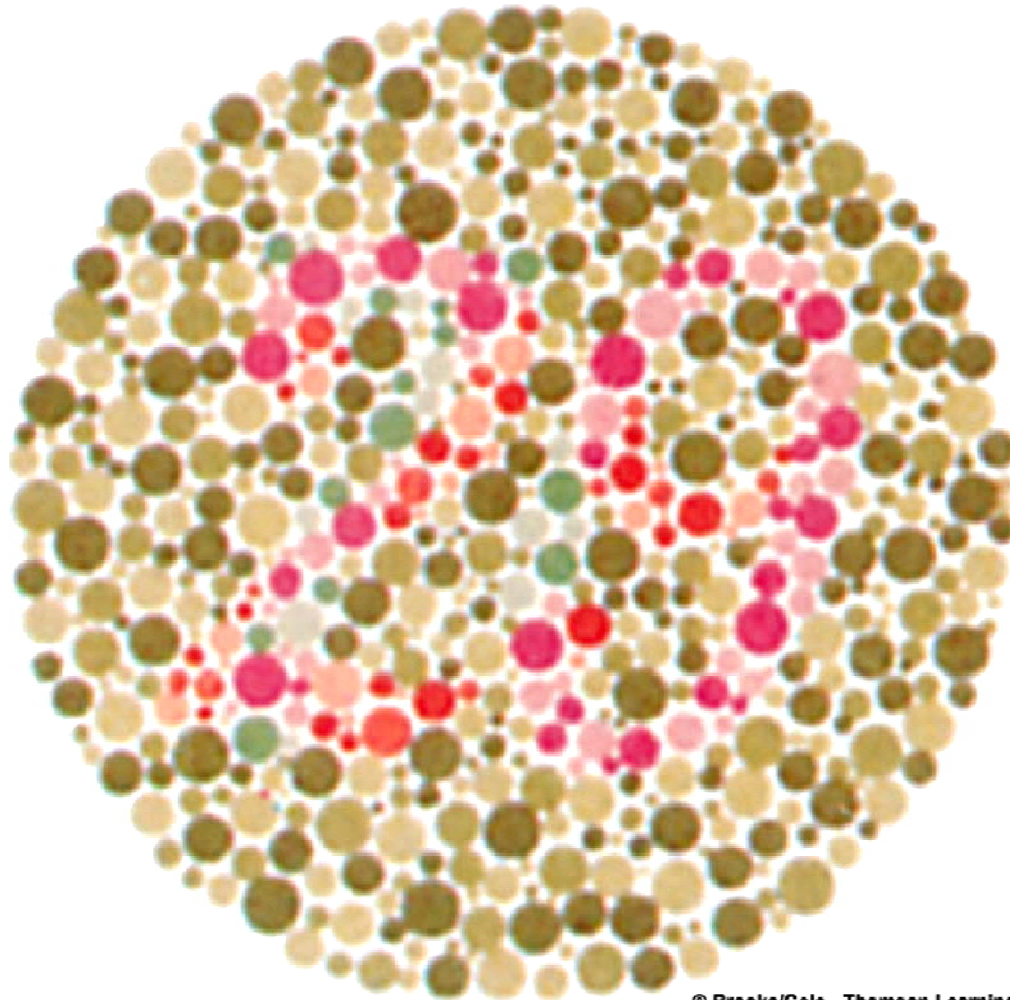
- Αντίληψη του χρώματος
- Εξαρτάται από την αναλογία της διέγερσης των τριών διαφορετικών φωτο-υποδοχέων
 - Διαφορετική απορρόφηση των χρωστικών των φωτο-υποδοχέων
- Αχρωματοψία
 - Ελαττωματικοί κώνου
 - Τα χρώματα γίνονται με συνδυασμό μόνο δύο κώνων
 - Η πιο συνηθισμένη = αχρωματοψία κόκκινου-πράσινου



Color perceived	Percent of maximum stimulation		
	Red cones	Green cones	Blue cones
Blue	0	0	100
Green	31	67	36
Yellow	83	83	0

© Brooks/Cole - Thomson Learning

Όραση



© Brooks/Cole - Thomson Learning

Όραση

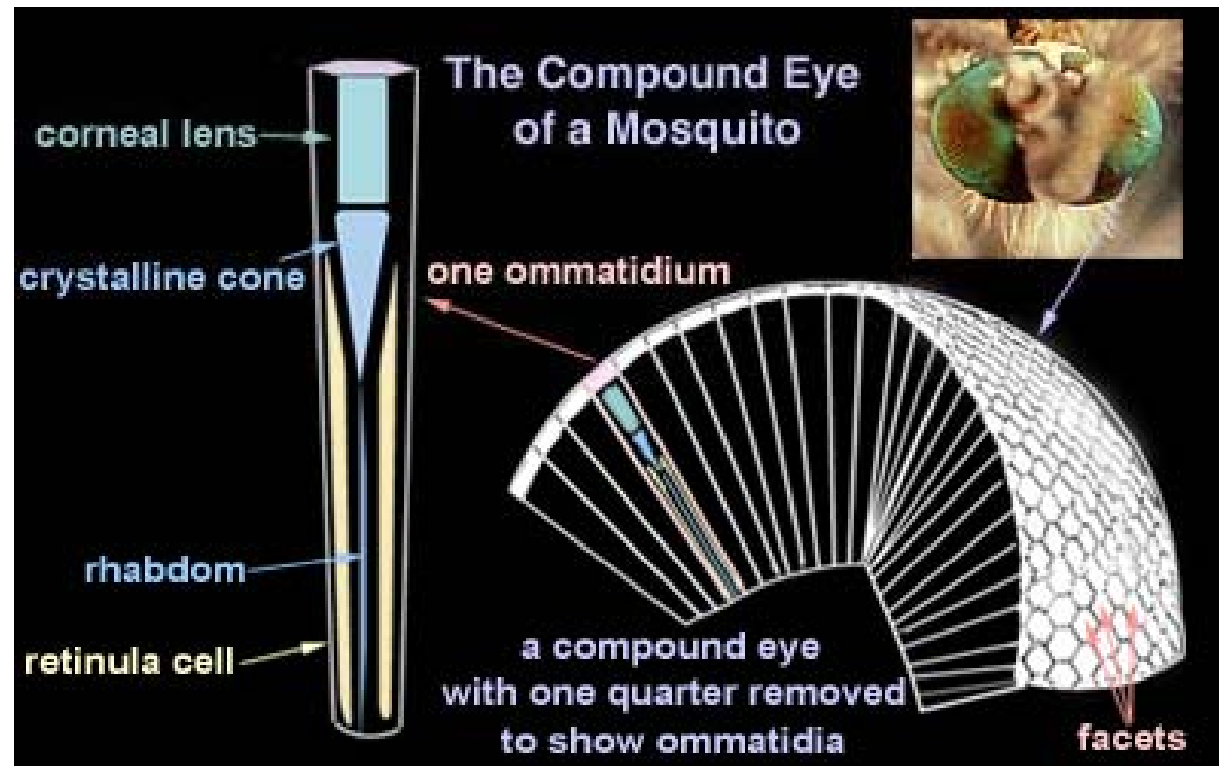


Κάνουμε τις κάμερες να “μοιάζουν” με το ανθρώπινο μάτι, αλλά ...

Μάτια των εντόμων → σύνθετοι (compound) μάτια

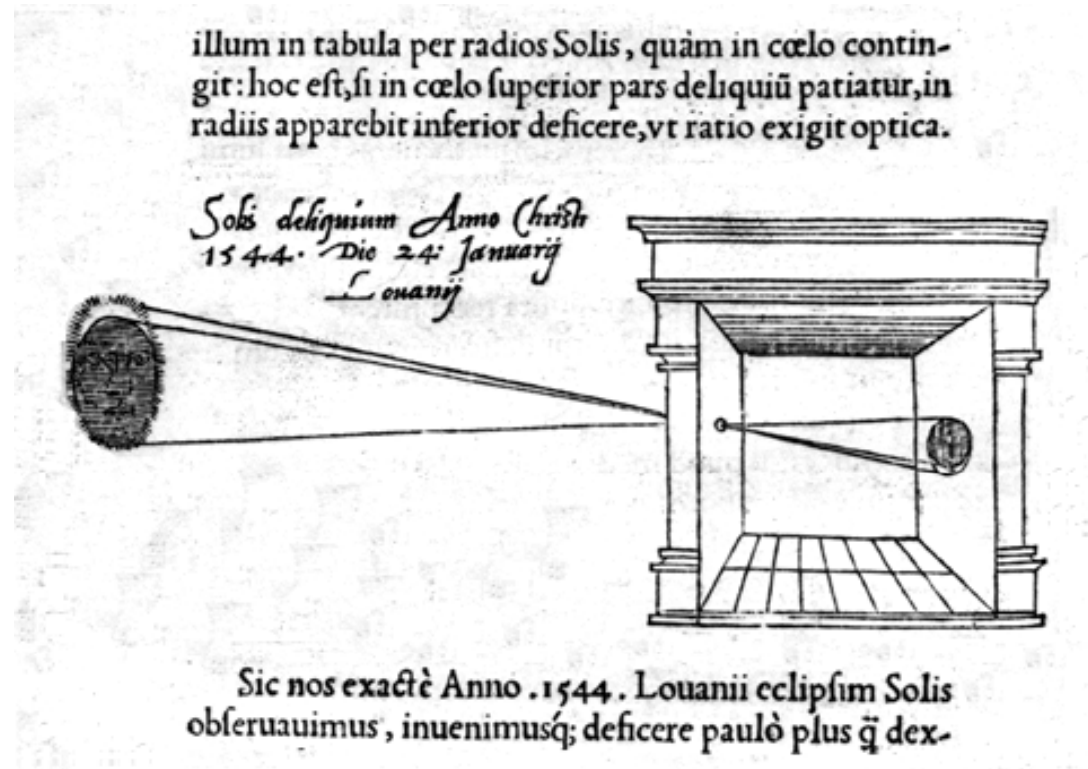


Μύγα



Κουνούπι

Camera Obscura



“Όταν εικόνες από φωτεινά αντικείμενα ... Περάσουν από μια μικρή τρύπα σε ένα σκοτεινό δωμάτιο ... θα δεις [στον απέναντι τοίχο] αυτά τα αντικείμενα στο πραγματικό τους σχήμα και χρώμα, μικρότερα σε μέγεθος ... αναποδογυρισμένα, λόγω της εισχώρησης των ακτινών". Leonardo da Vinci

http://www.acmi.net.au/AIC/CAMERA_OBSCURA.html (Russell Naughton)

Slide credit: David Jacobs

Κάμερες Μικρής Οπής (Pinhole)



- **Κάμερα Μικρής Οπής (Pinhole camera)**

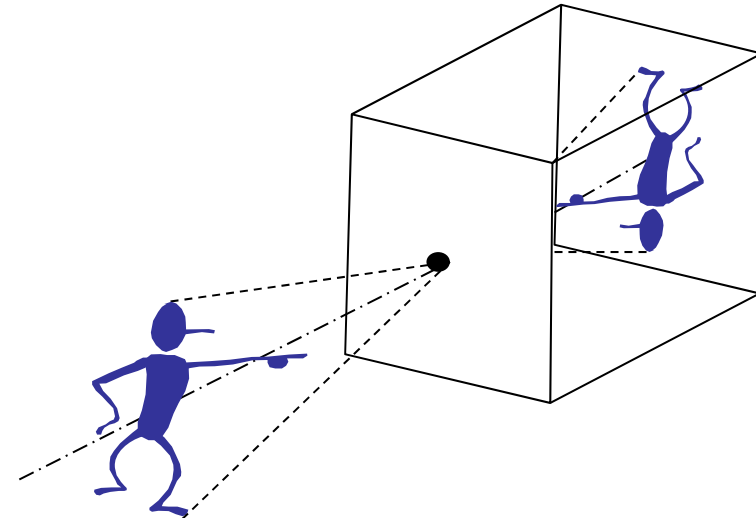
- Κουτί με μικρή οπή
- Η εικόνα είναι αναποδογυρισμένη
- Ερώτηση: Γιατί ο καθρέφτης αναποδογυρίζει τις εικόνες αριστερά-δεξιά και όχι πάνω-κάτω

- **Προβλήματα με τη κάμερα μικρής οπής**

- Η οπή (διάφραγμα - aperture) πρέπει να είναι “πολύ μικρή” για να εξασφαλίζεται καθαρή εικόνα
- Όμως, όσο πιο μικρή η οπή τόσο λιγότερο φως περνά στην εικόνα
- Όταν η οπή είναι της τάξης του μήκους κύματος, η διάθλαση επηρεάζει την ποιότητα της εικόνας
- Η καλύτερη ποιότητα εικόνας επιτυγχάνεται όταν

$$d = 2 \sqrt{f' \lambda}$$

- d: διάμετρος οπής
- Παράδειγμα: Αν $f' = 50\text{mm}$, $\lambda = 600\text{nm}$ (κόκκινο), $\rightarrow d = 0.36\text{mm}$



Φακοί (Lenses)



- **Δημιουργία Εικόνας με (Λεπτούς (Thin)) Φακούς**

- Με τους φακούς αποφεύγονται τα προβλήματα με τις μικρές οπές
- Ιδανικός (Ideal) φακός: Προβάλλει όπως και η οπή αλλά μαζεύει περισσότερο φως!

- **Πραγματικοί φακοί**

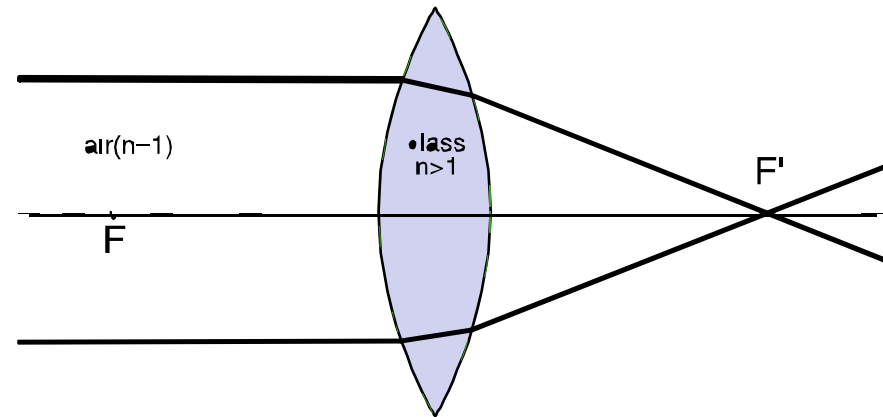
- Ψηλός δείκτης διάθλασης
- Δύο ακτίνες καμπυλότητας
- Εξίσωση Κατασκευαστών φακών (Lensmakers)

$$\frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

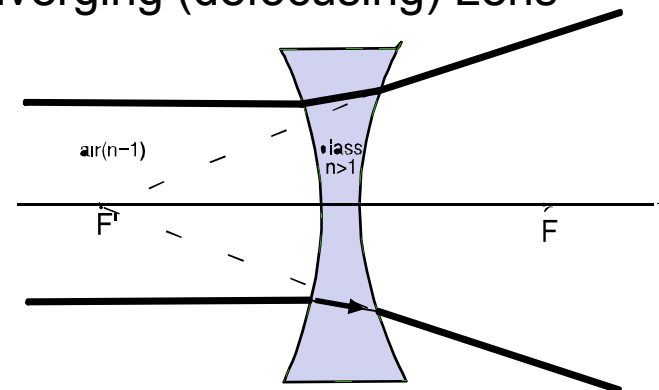
- Εστιακή απόσταση (Focal length)

$$\frac{1}{f} = (n_2 - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Συγκλίνοντας (Εστιάζον) Φακός Converging (focusing) Lens



Αποκλίνοντας (Αντι-εστιάζον) Φακός Diverging (defocusing) Lens



(Η εστιακή απόσταση είναι αρνητική)

Φακοί για Απεικόνιση



- Παραξονική (Paraxial) Προσέγγιση

- Γεωμετρική Οπτική → Ιχνηλάτηση Ακτίνας (Ray Tracing)

- Δημιουργία εικόνας με ένα φακό

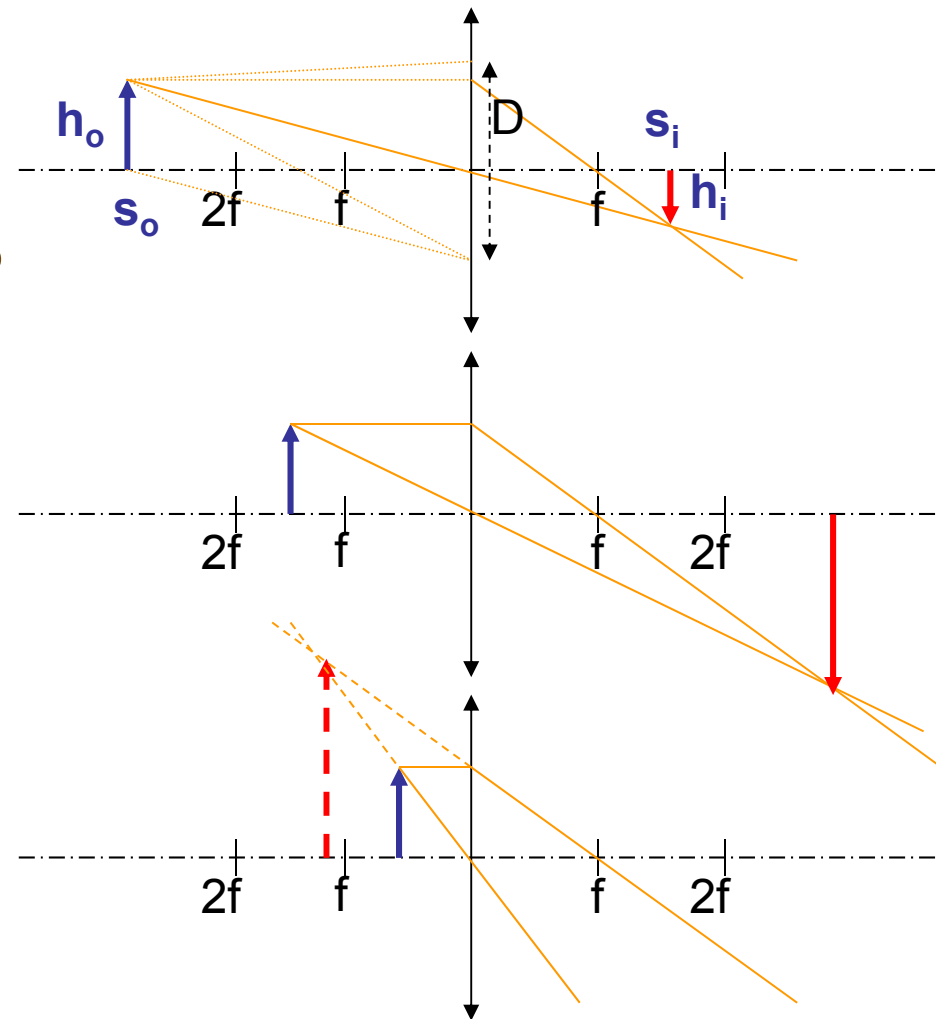
- Ιδανικός (Ideal) λεπτός (thin) φακός

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s_o} + \frac{1}{s_i}$$

- f = εστιακή απόσταση (focal length)
- s_i = απόσταση ειδώλου
- s_o = απόσταση αντικειμένου

- Μεγέθυνση (Magnification)

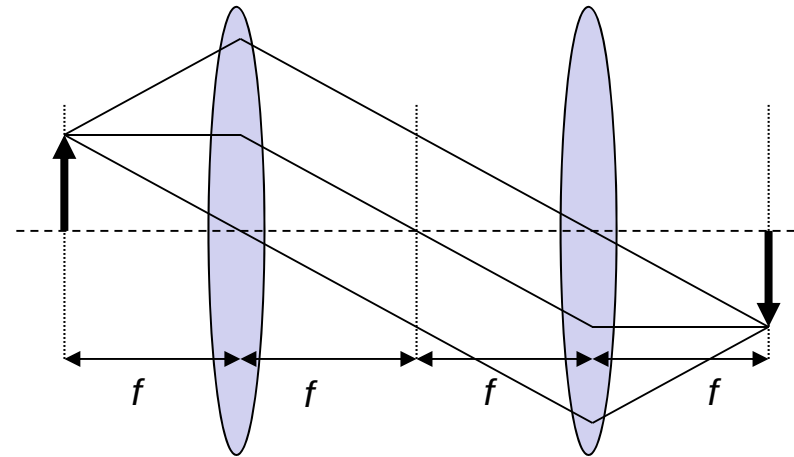
$$M = -\frac{s_i}{s_o} = -\frac{h_i}{h_o}$$



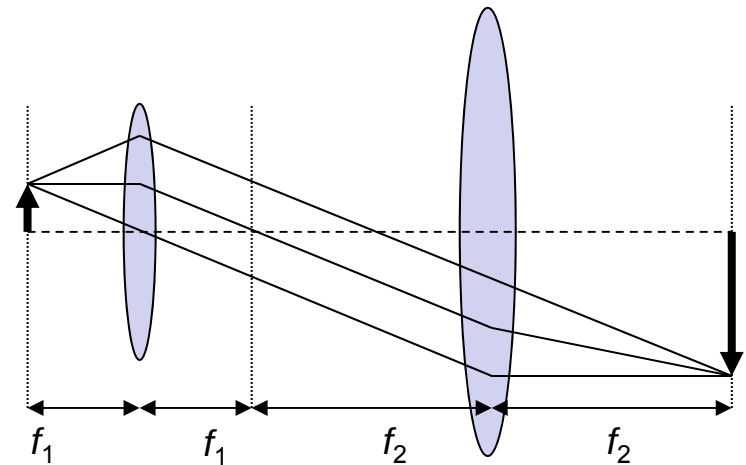
Φακοί για Απεικόνιση



- **Απεικόνιση με δύο φακούς**
 - Εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ φακών
- **Ενδιαφέρουσα περίπτωση → Τηλεσκόπιο (telescope)**
 - Ίσες εστιακές αποστάσεις
 - Απεικόνιση $4f$
 - Άνισες εστιακές αποστάσεις
 - Μεγένθυση = f_2/f_1



$4f$ imaging



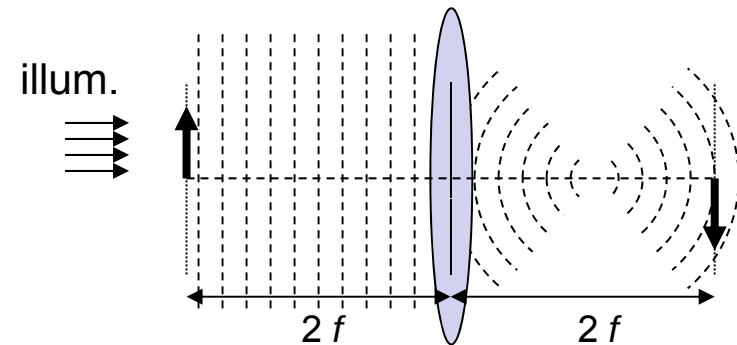
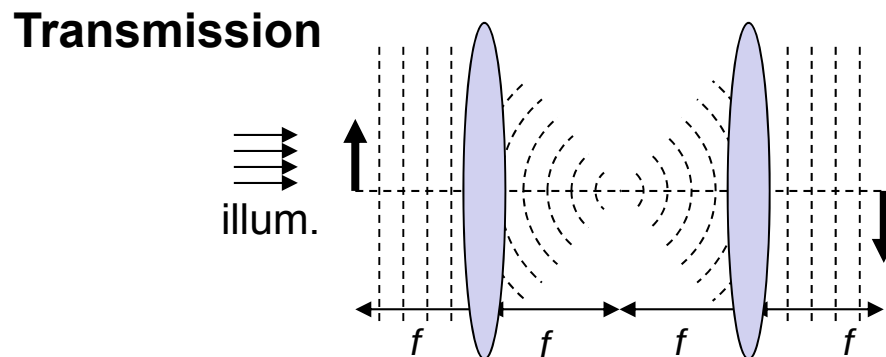
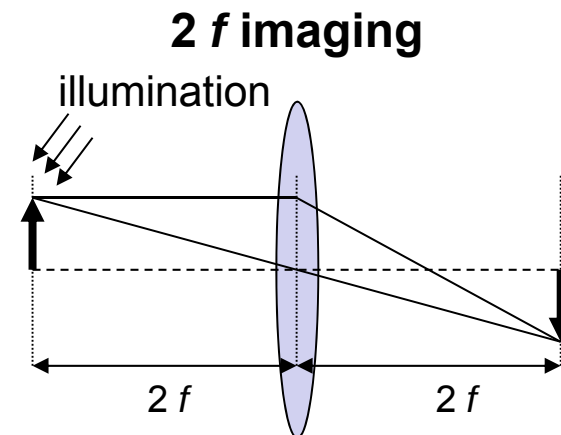
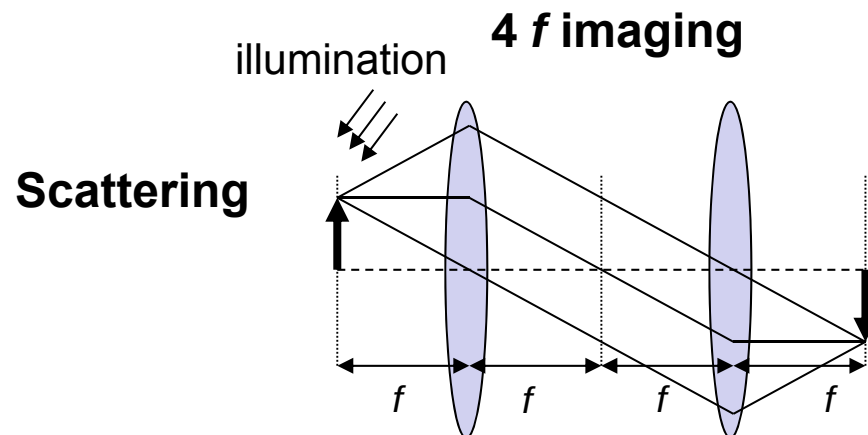
Imaging telescope

Φακοί για Απεικόνιση



- Απεικόνιση αντικειμένων με σκέδαση (scattering) vs. Διαφανών (Transparent) αντικειμένων

- Αντικείμενα με σκέδαση συμπεριφέρονται σαν σειρά από πηγές
- Διάφανο αντικείμενο – η καμπυλότητα είναι πολύ σημαντική
 - Καλύτερα σε $4f$

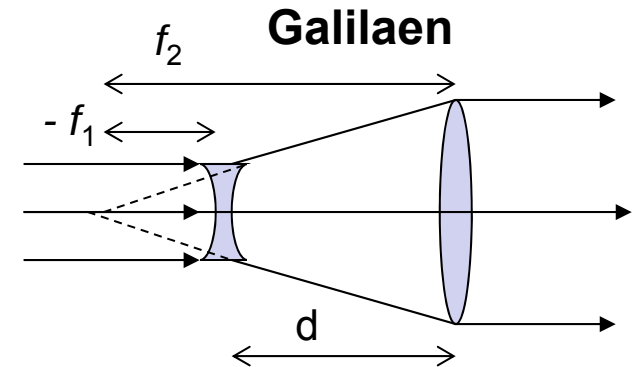


Άλλες Χρήσεις Φακών

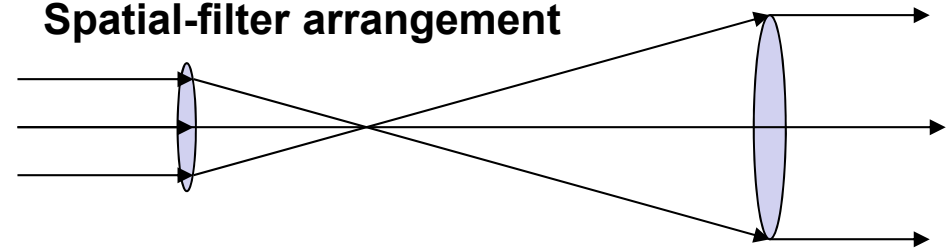


- **Επέκταση Δέσμης (Beam expander)**

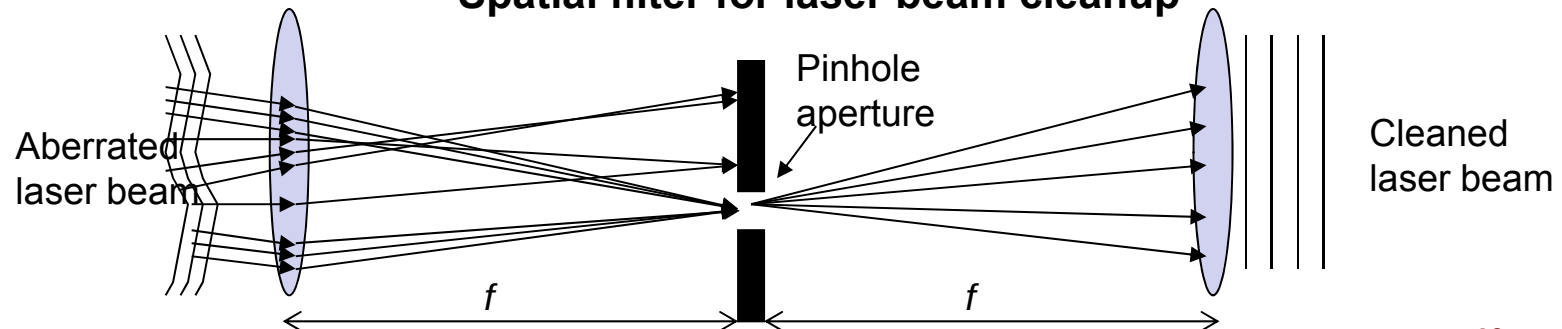
- Ανάλογο με το $4f$
 - Διατηρείται η καμπυλότητα της κυματομορφής (wavefront)
 - Μεγέθυνση είναι ο λόγος των εστιακών αποστάσεων
 - Ανεξάρτητη της απόστασης μεταξύ των φακών
- Δύο Τύποι
 - Galilaen και διάταξη χωρικών φίλτρων
 - Το Galilaen είναι πιο εύκολο να στηθεί και να διατηρείται ευθυγραμμισμένο



Spatial-filter arrangement



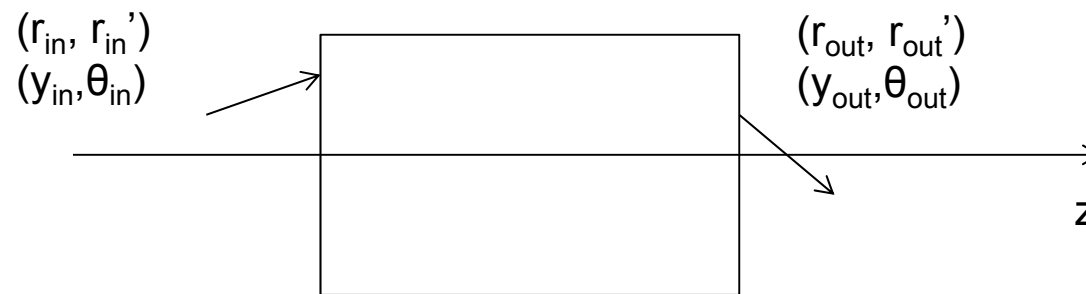
Spatial filter for laser beam cleanup



Οπτικά Συστήματα με Πολλαπλά Στοιχεία



- Πολλαπλά Στοιχεία
 - Χρήση Πινάκων (matrices)



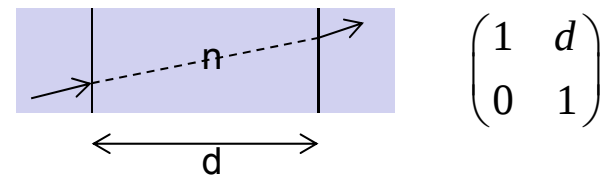
$$\begin{bmatrix} r_{out} \\ r'_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{in} \\ r'_{in} \end{bmatrix}$$

Οπτικά Συστήματα με Πολλαπλά Στοιχεία

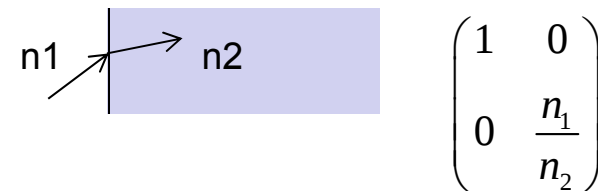


- Πολλαπλά Στοιχεία

- Propagation in a medium of constant refractive index (for free space $n=1$)



- Refraction at a flat interface



- Refraction at a curved interface

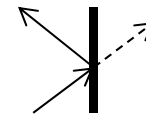


Οπτικά Συστήματα με Πολλαπλά Στοιχεία



• Πολλαπλά Στοιχεία

- Reflection from a flat mirror



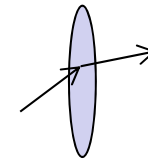
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Reflection from a curved mirror



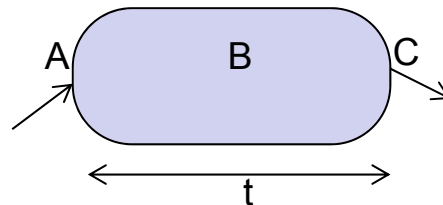
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{pmatrix}$$

- Thin lens



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$$

- Thick lens

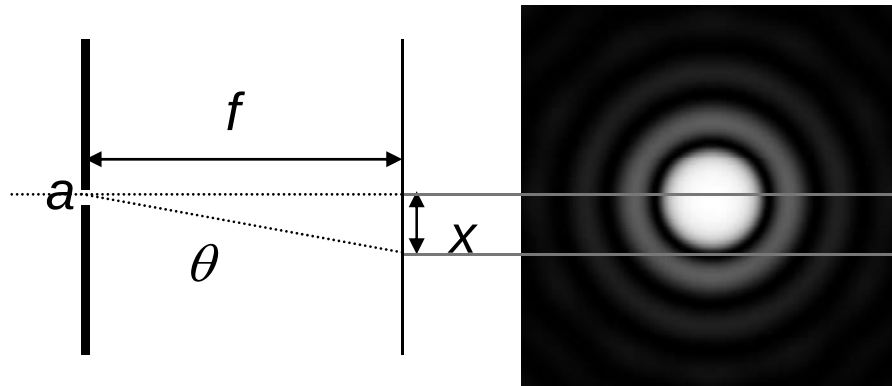


$$CBA = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_L - n_1}{Rn_1} & \frac{n_L}{n_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_L}{Rn_L} & \frac{n_1}{n_L} \end{pmatrix}$$

Φακοί και Κυματική Οπτική



- Περίθλαση σε κυκλικό άνοιγμα → Airy Disk

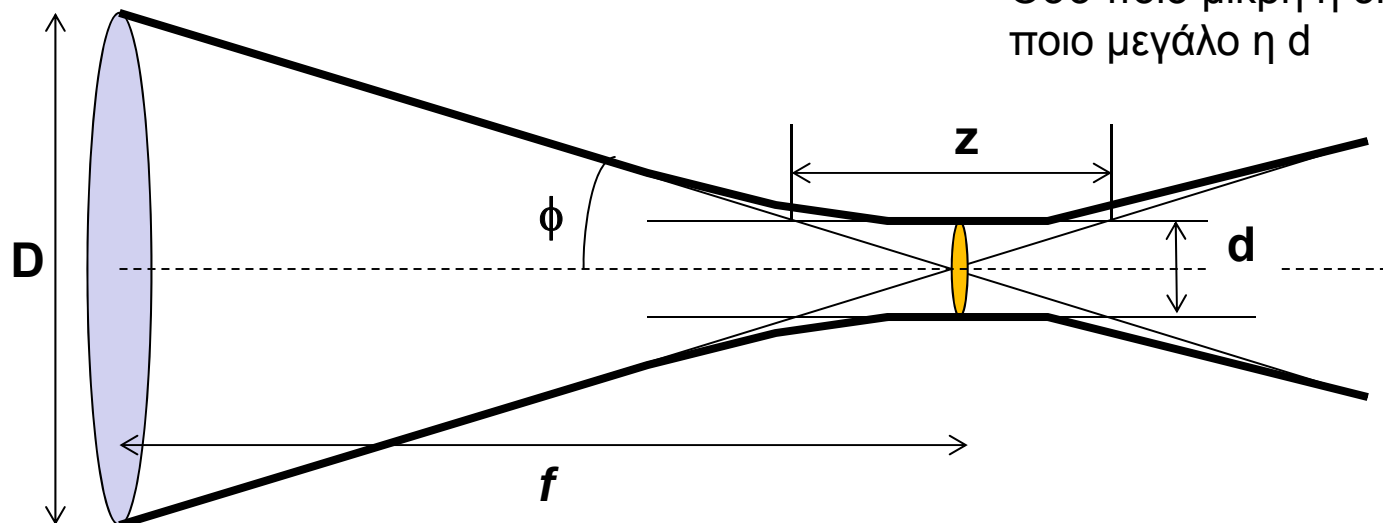


$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(\rho)}{\rho} \right]^2 \quad \rho = \frac{\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

Διάμετρος του κύριου λοβού:

$$d \approx \frac{1.22\lambda}{NA} \quad NA = n \sin \phi \approx \frac{D}{2f} = \frac{1}{2f/\#}$$

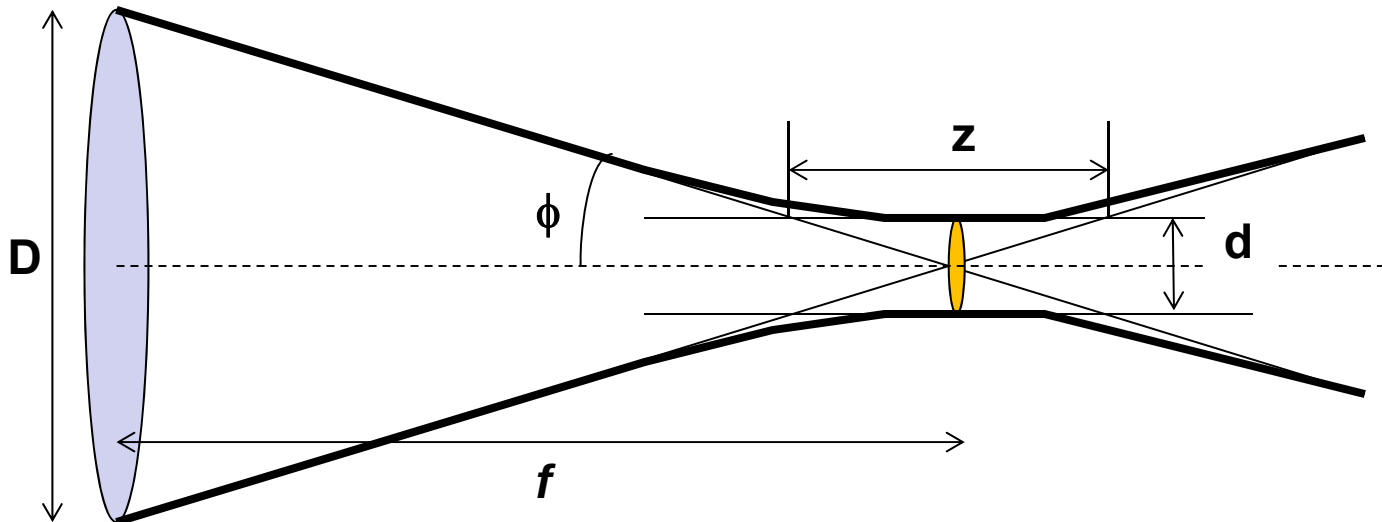
Όσο πιο μικρή η διάμετρος D τόσο πιο μεγάλο η d



Χαρακτηριστικά Των Φακών



- **F-number:** $f / \# = \frac{f}{D}$
- **Numerical aperture:** $NA = n \sin \phi$, για μικρές γωνίες: $NA = \frac{D}{2f} = \frac{1}{2f / \#}$
 - Αριθμητικό άνοιγμα (n: δείκτης διάθλασης)
- **Διάμετρος Εστιακού Σημείου:** $d = \frac{2.44 f \lambda}{D} = 2.44 \lambda f / \# \approx \frac{1.22 \lambda}{NA}$
- **Βάθος Εστίασης:** $z = 1.22 \lambda \left(\frac{2f}{D} \right)^2 \cos \phi$, για μικρές γωνίες: $z \approx \frac{1.22 \lambda}{NA^2}$



Χαρακτηριστικά Φακών



- Ο Gromit με $f/22$ (αριστερά) και $f/4$ (δεξιά).



Μικρή Διάμετρος
Μεγάλη Εστιακή Απόσταση

Βάθος Εστίασης $\uparrow$, Ευκρίνεια $\downarrow$



Μεγάλη Διάμετρος
Μικρή Εστιακή Απόσταση

Βάθος Εστίασης $\downarrow$, Ευκρίνεια $\uparrow$

Φακοί και Γκαουσιανές Δέσμες



- **Γκαουσιανές Δέσμες (Gaussian Beams)**

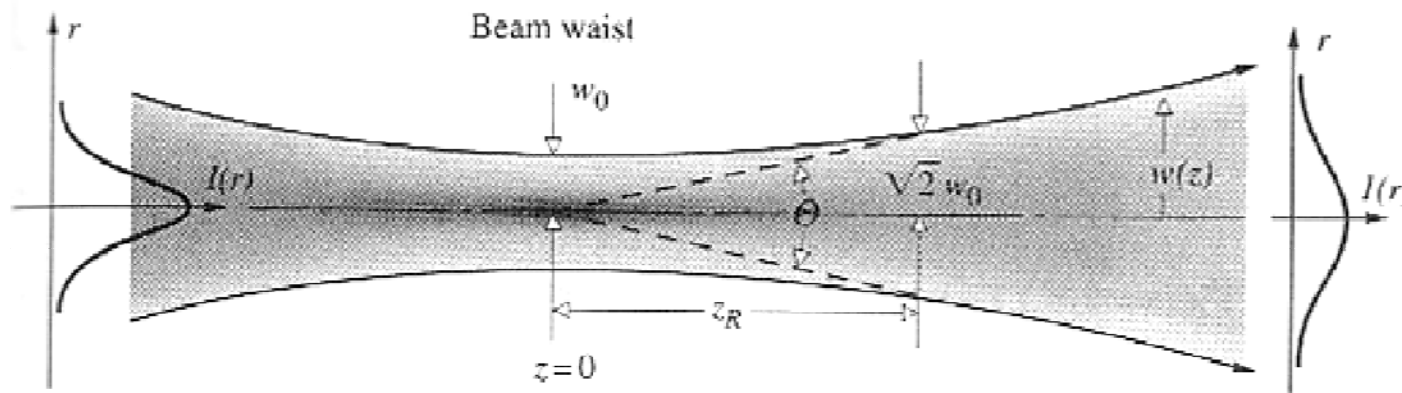
- Π.χ. από λέιζερ ή οπτική ίνα, Ενεργή (effective) διάμετρος D : $2w$

- Προφίλ Έντασης: $I = I_0 e^{-2r^2/w^2}$

- Ακτινικής Διατομή (Beam waist): $w = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2}$

- Ομοεστιακή παράμετρος (Confocal parameter): $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$

- Μακριά από τη μέση: $w \rightarrow \frac{\lambda z}{\pi w_0}$, γωνία απόκλισης : $\Theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0} = 0.637 \frac{\lambda}{w_0}$
(divergence)



Χαρακτηριστικά Φακών



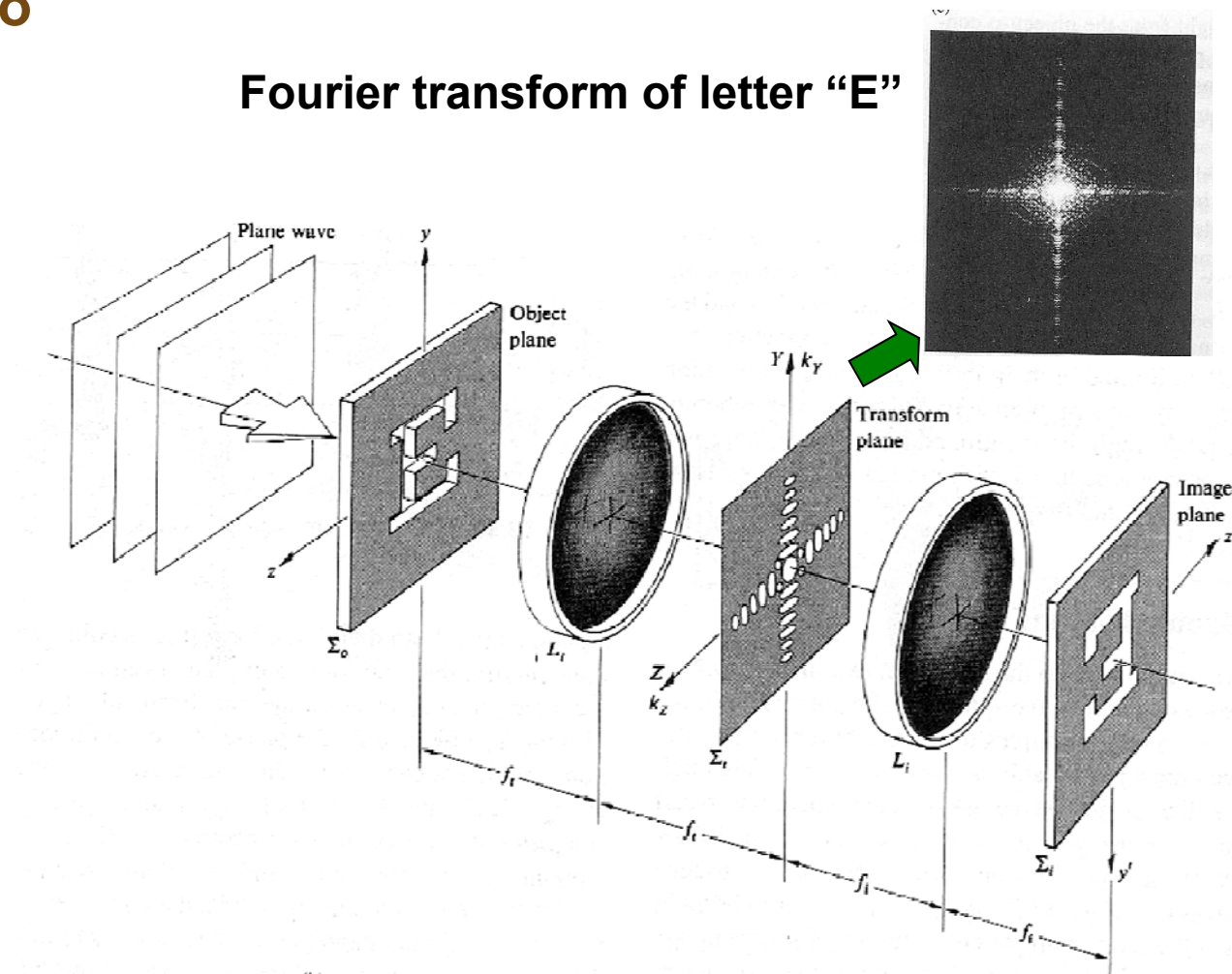
	Standard Lens	Gaussian Beam
Aperture size	D	$2w$
Focal spot size	$d = \frac{2.44 f \lambda}{D}$	$d = 2w_0 = \frac{2.54 f \lambda}{2w}$
Depth of focus	$z = 1.22 \lambda \left(\frac{2f}{D} \right)^2$	$z = 1.27 \lambda \left(\frac{2f}{2w} \right)^2$

Φακοί ως Μετασχηματιστές Fourier



- Διάταξη 4 f– ο μετασχηματισμός βρίσκεται στο κεντρικό επίπεδο

Fourier transform of letter “E”



Φακοί ως Μετασχηματιστές Fourier



- Στο πεδίο Fourier

- $r_F = \rho \lambda f$ όπου $\rho = \sqrt{f_X^2 + f_Y^2}$

- Σε μια διάσταση

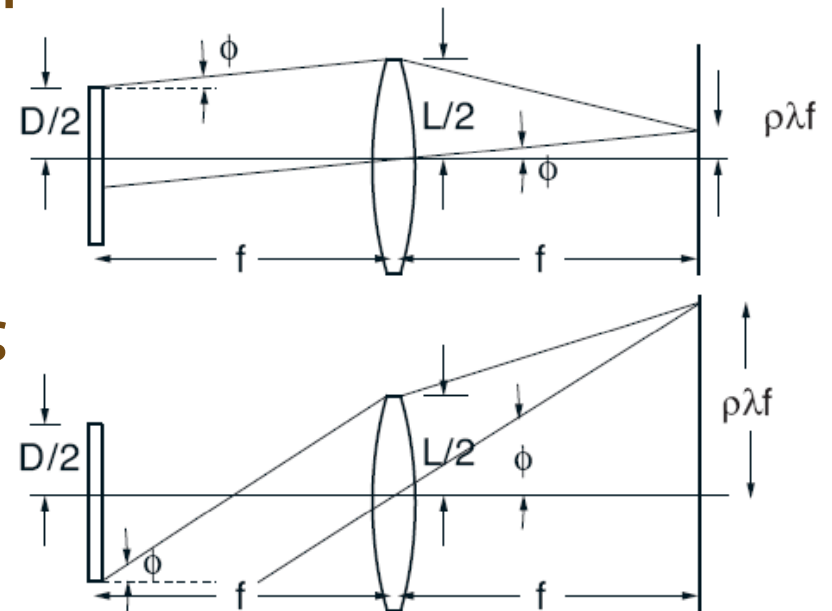
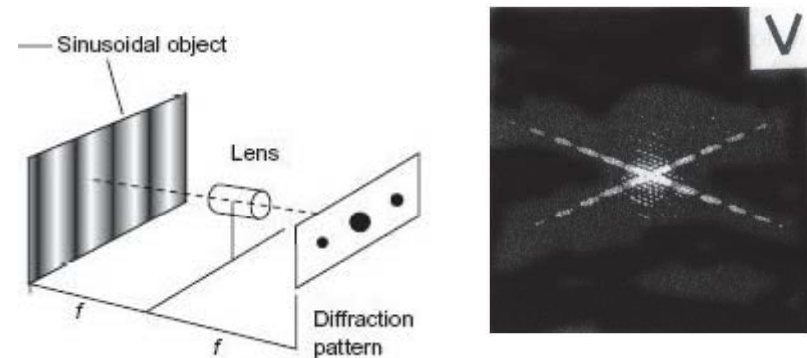
- $d_F = \rho \lambda f$ όπου $\rho = f_X$

- Μέγιστη συχνότητα όπου ο μετασχηματισμός έχει τη σωστή ένταση

$$\rho = \frac{1}{\lambda f} \left(\frac{L}{2} - \frac{D}{2} \right)$$

- Συχνότητα στην οποία ο μετασχηματισμός εξαφανίζεται εντελώς

$$\rho = \frac{1}{\lambda f} \left(\frac{L}{2} + \frac{D}{2} \right)$$

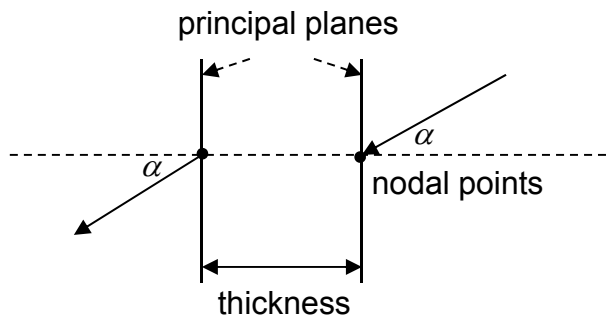


Χαρακτηριστικά Φακών

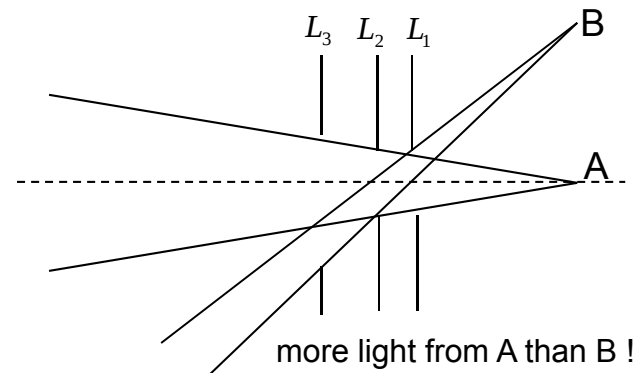


- Προβλήματα με τους φακούς

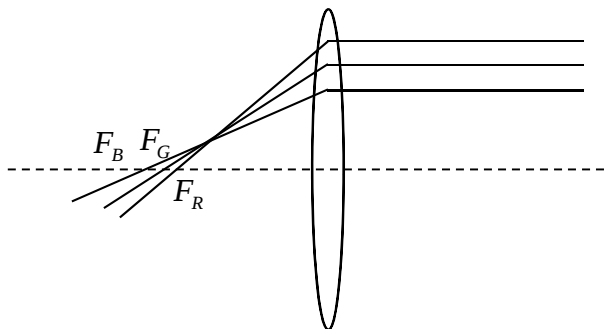
Compound (Thick) Lens



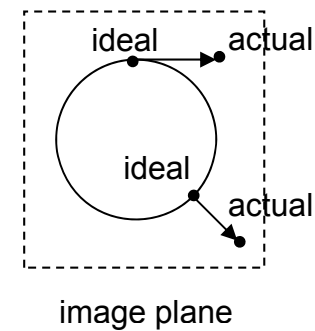
Vignetting



Chromatic Abberation



Radial and Tangential Distortion

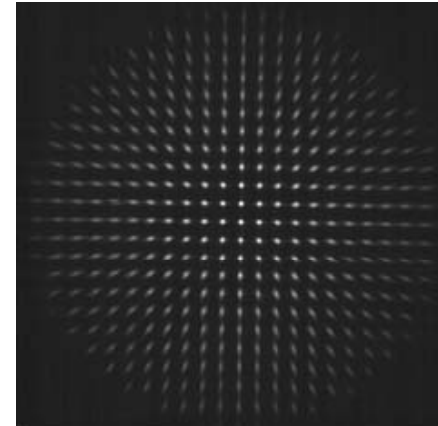


Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)



- **Σφάλματα**

- Χρωματικά (Chromatic)
- Σφαιρικά (Spherical)
- Οριακός Αστιγματισμός (Marginal Astigmatism)
- Κόμη (Coma)
- Καμπύλωση Πεδίου (Curvature of Field)
- Διαστρόφη (Distortion)
- Βινιετάρισμα (Vignetting)

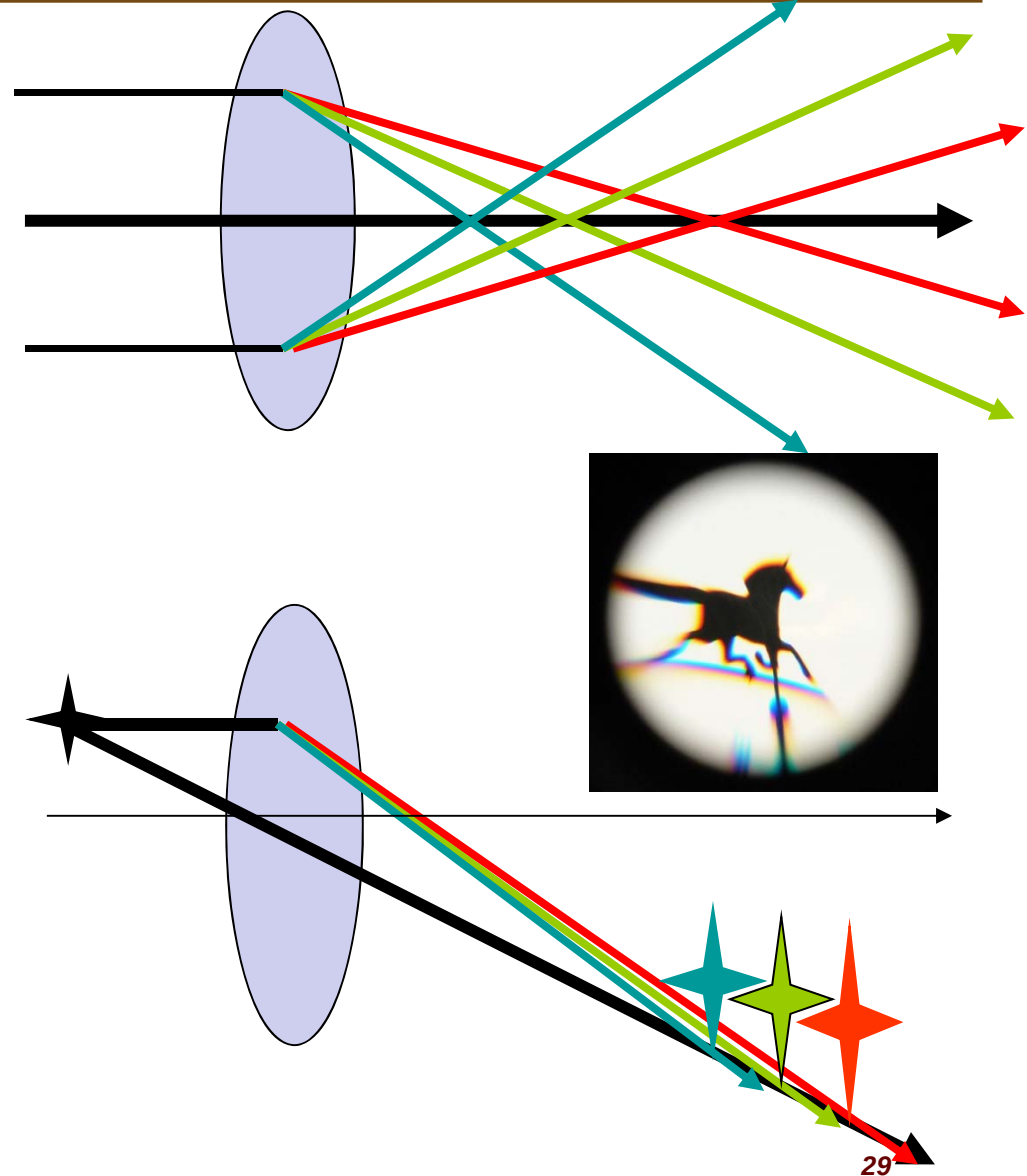


Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)



- **Χρωματικά (Chromatic) Σφάλματα**

- Διαμήκη (αξονικά)
 - Διάφορα σημεία εστίασης στον άξονα.
- Πλευρικά (μεγέθυνση)
 - Διαφορετικά μεγέθη εικόνας
 - Καταλήγουν σε έγχρωμες εικόνες «φάντασμα»
- Εξαρτώνται από το υλικό
 - Το λ εξαρτάται από τον n
- Όσο ψηλότερη είναι η δύναμη του φακού, τόσο περισσότερα τα χρωματικά σφάλματα
- Διόρθωση:
 - Διπλός (Doublet) ή τριπλό (triplet) φακό
 - Αλλαγή υλικού του φακού.
 - Ελέγχου του πάχους των άκρων

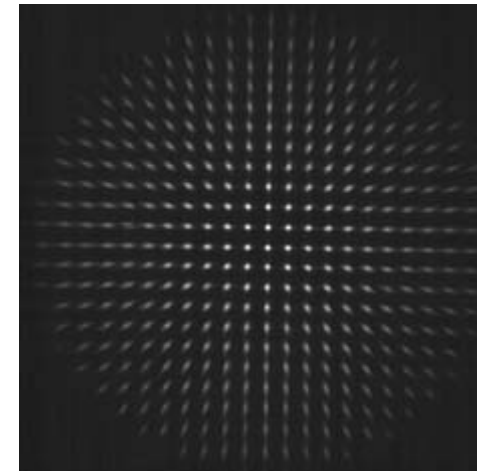
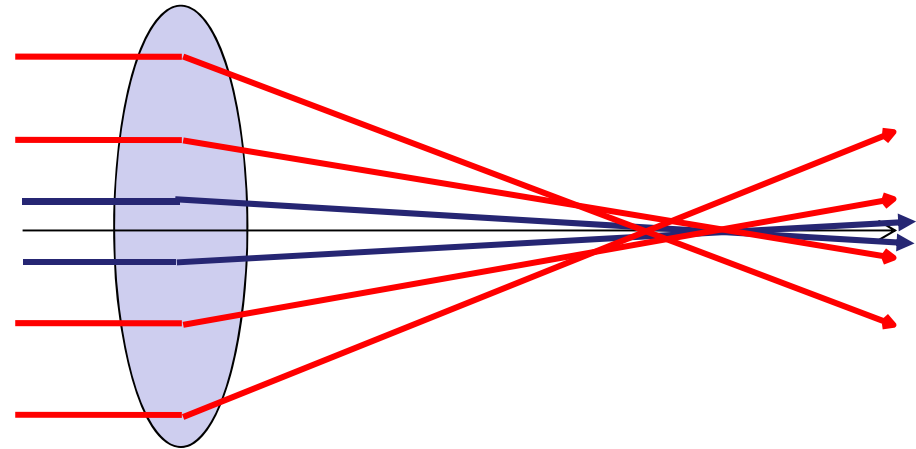


Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)



- **Σφαιρικά (Spherical)
Σφάλματα**

- Σφαιρικός φακός
 - Περιφερική ακτίνες έχουν μικρότερο εστιακό μήκος από παραξονικές (paraxial) ακτίνες → Περιφερικές διαθλούνται περισσότερο από παραξονικές ακτίνες.
- Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα μη-εστιασμένη
- Σφάλματα για μεγάλης διαμέτρου ακτίνες- δεν έχουν σημασία για στενές δέσμες
- Παραξονικό Σφάλμα
- Διόρθωση
 - Παραβολικές καμπύλες
 - Απλανητικός σχεδιασμός του φακού.

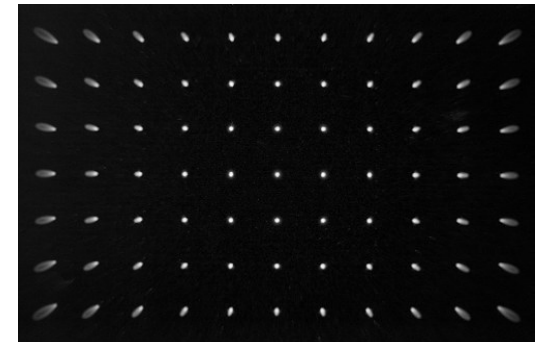
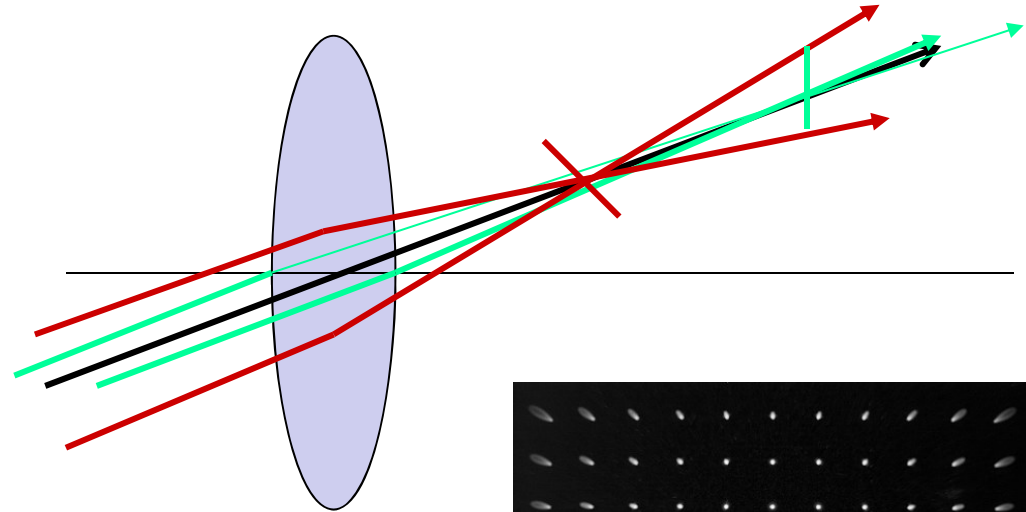


Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)



- **Οριακός αστιγματισμός (Marginal Astigmatism)**

- Γνωστός και ως πλάγιος αστιγματισμός ή ακτινικός αστιγματισμός
- Ακτίνες που διαδίδονται σε δύο κάθετα επίπεδα έχουν διαφορετικές εστίες
- Σφαιρικός φακός, στενή δέσμη εισέρχεται εκτός άξονα.
- Δέσμη εισέρχεται λοξά προς τον άξονα του φακού, επομένως, τα αποτελέσματά περιφέρεια
- Σφάλματα για μικρής διαμέτρου ακτίνες



- **Διόρθωση**

- Ασφαιρικός σχεδιασμός για υψηλής δύναμης και μεγάλους φακούς.

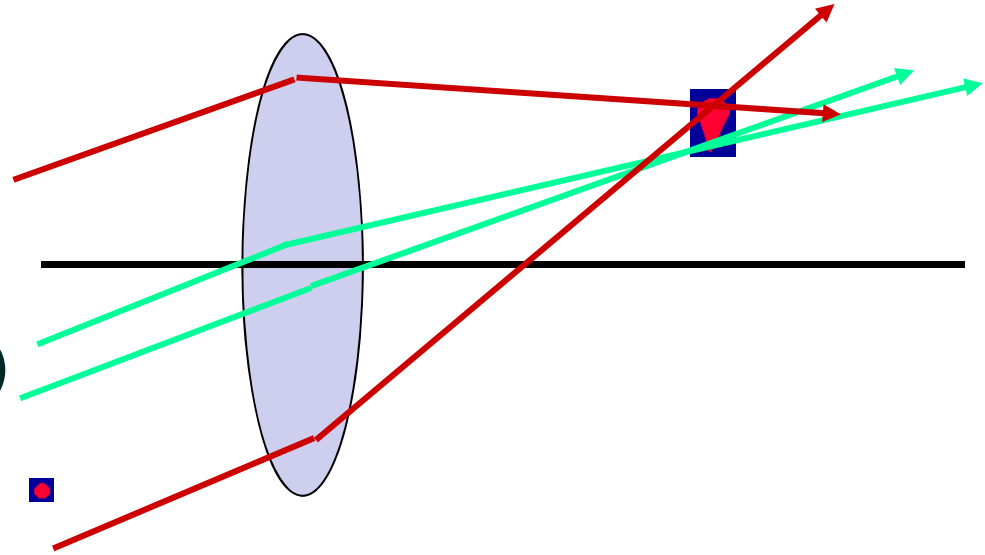


Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)



- **Κόμη (Coma)**

- Εκτός άξονα σημειακές πηγές εμφανίζονται παραμορφωμένες, σαν να έχουν μια ουρά (κόμη)
- Το αποτέλεσμα είναι μη-εστιασμένη εικόνα
- Σφάλματα για μεγάλης διαμέτρου ακτίνες



- **Διόρθωση**

- παραβολικές καμπύλες, Απλανητικός σχεδιασμός του φακού.



Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)

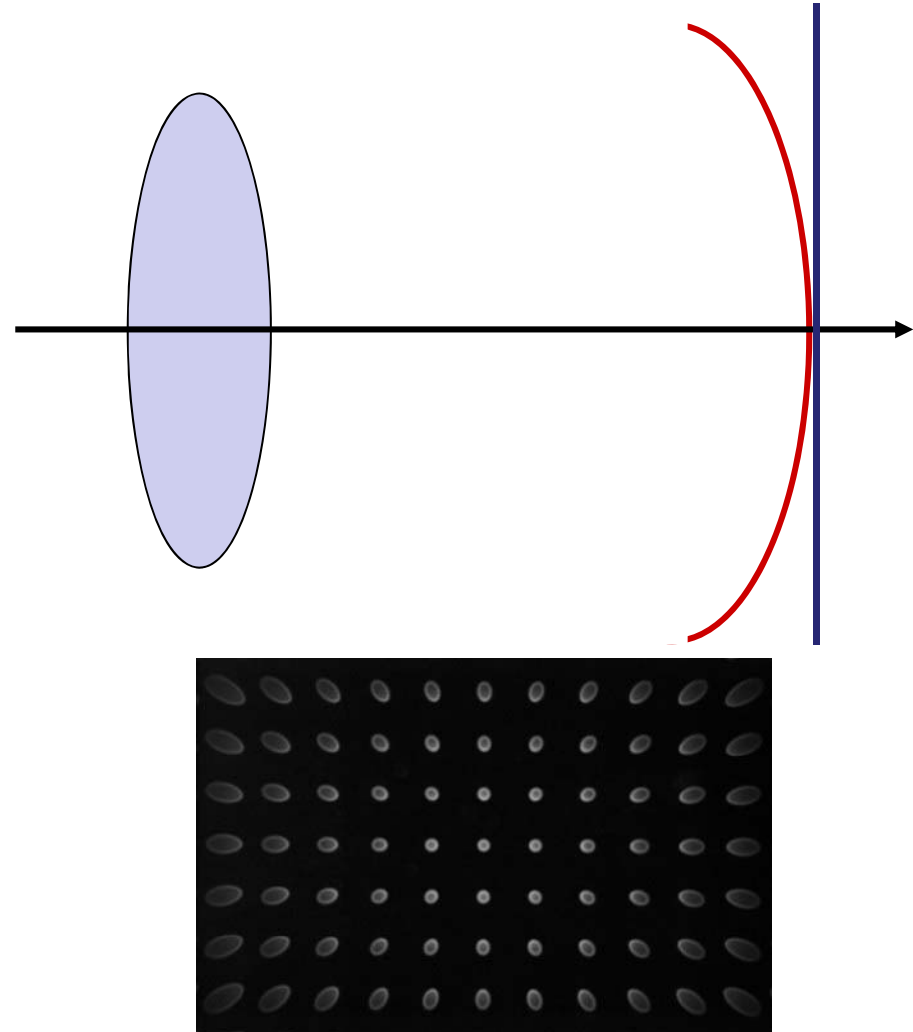


- **Καμπύλωση πεδίου (Curvature of Field)**

- Γνωστή και ως Καμπύλωση πεδίου Petzval
- Το φως δεν εστιάζεται πάνω σε μια επίπεδη εστιακή επιφάνεια. Το εστιακό επίπεδο είναι κυρτό.
 - Παλιές οθόνες κινηματογράφου → Ήταν κυρτές, όχι επίπεδες, για να εστιάζουν τις πλευρές της ταινίας καθώς και το κέντρο
 - Ο αμφιβληστροειδής δεν είναι μια επίπεδη επιφάνεια. Είναι καμπύλος.
- Επηρεάζει την περιφέρεια

- **Διόρθωση**

- Ελαχιστοποιείται με σχεδιασμό διορθωμένων καμπύλων



Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)

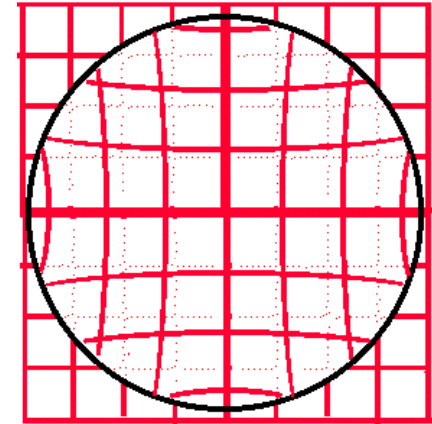
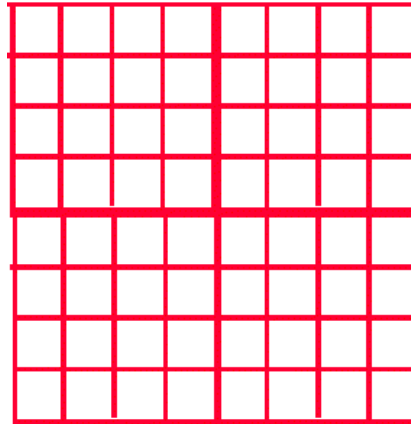


- **Διαστροφή (Distortion)**

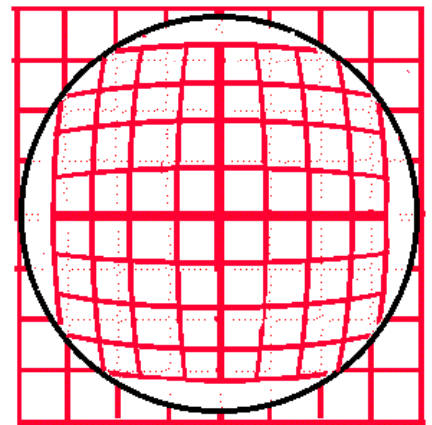
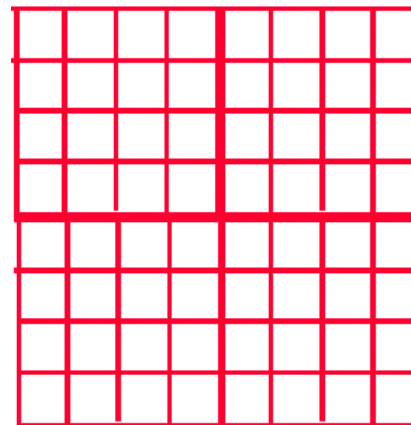
- Μια απόκλιση από την ευθύγραμμη προβολή → ευθείες γραμμές σε μια σκηνή δεν παραμένουν ευθείες στην εικόνα
- Η εικόνα είναι εστιασμένη αλλά δεν έχει το ίδιο σχήμα με το αντικείμενο
- Συνήθως από την παρουσία των διαφραγμάτων (apertures) στο σύστημα που στρεβλώνουν την ακτινική (radial) μεγέθυνση

- **Διόρθωση:**

- Σχεδιασμό με Ασφαιρικούς φακούς



Μηνοειδής ή θετική διαστροφή (Pincushion distortion) – Πολύ θετικός φακός



Πιθοειδής ή αρνητική διαστροφή (Barrel distortion) – Πολύ αρνητικός φακός

Οπτικά Σφάλματα(Aberrations)



- **Βινιετάρισμα (Vignetting)**

- Μείωση της φωτεινότητας ή κορεσμού μιας εικόνας στην περιφέρεια σε σύγκριση με το κέντρο της εικόνας
- Μηχανική (φραγμός), οπτικά (εμπρός φακός φράσει το φως στο πίσω μέρος), φυσική (μείωση όχι από φραγμό)



- **Διόρθωση:**

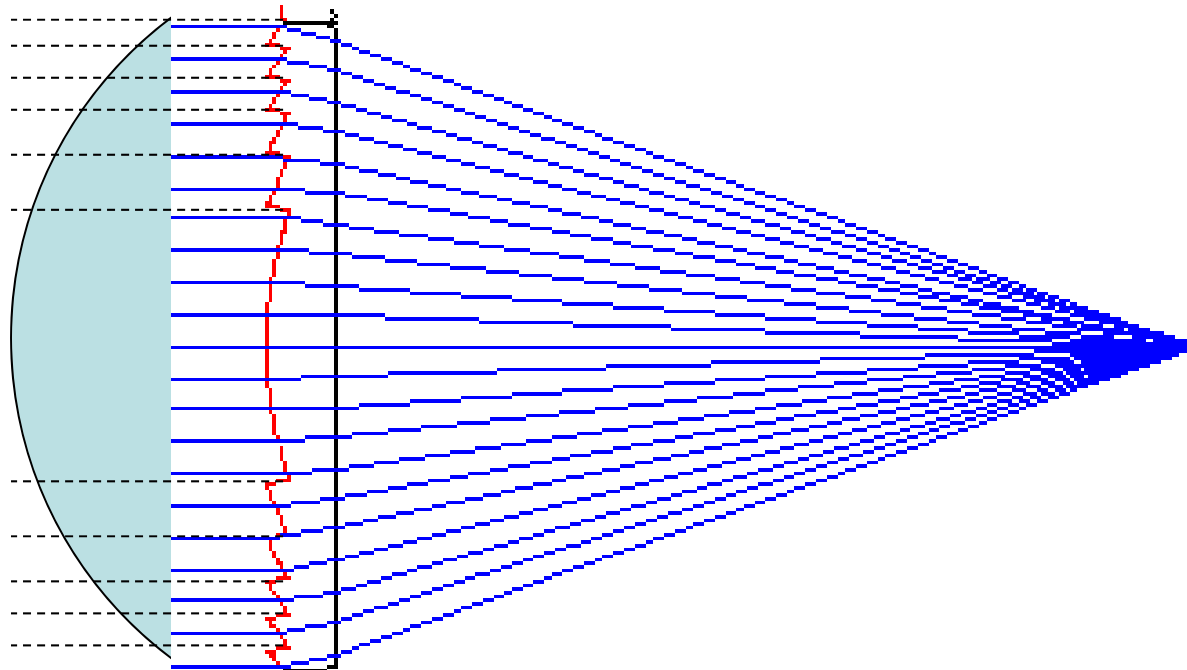
- Μειώσει του ανοίγματος
- Διαφορετικός σχεδιασμός

Φακοί Fresnel



- Ξεκινήστε με συμβατικό φακό
- Περιορίστε το οπτικό πάχος να είναι υπόλοιπο (modulo) 1
- Πλεονεκτήματα - λεπτότεροι και ελαφρύτεροι

Fresnel vs conventional lens

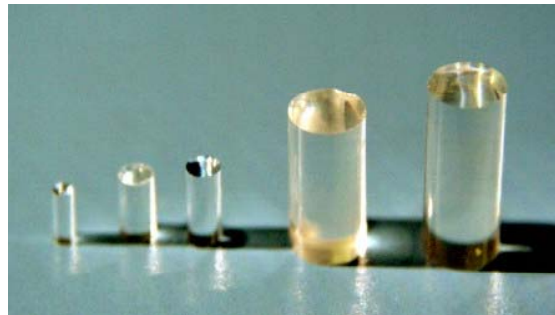
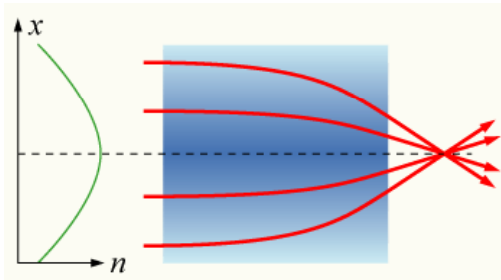


Φακοί βαθμιαίου δείκτη διάθλασης (Graded index (GRIN) lens)

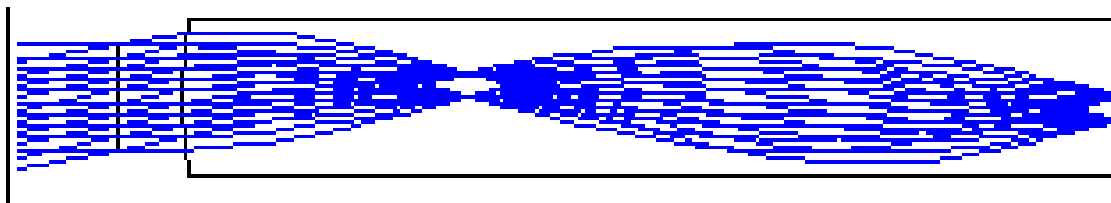


- Γυάλινη ράβδος με ακτινική αύξηση του δείκτη διάθλασης
 - Τετραγωνική (Quadratic) αύξηση
 - Ψηλός δείκτης στο κέντρο σαν φακός
 - Το μήκος της οπτικής διαδρομής αυξάνεται τετραγωνικά από το κέντρο
- Περιοδική εστίαση
 - Ημιτονοειδής μεταβολή της διαμέτρου της ακτίνας

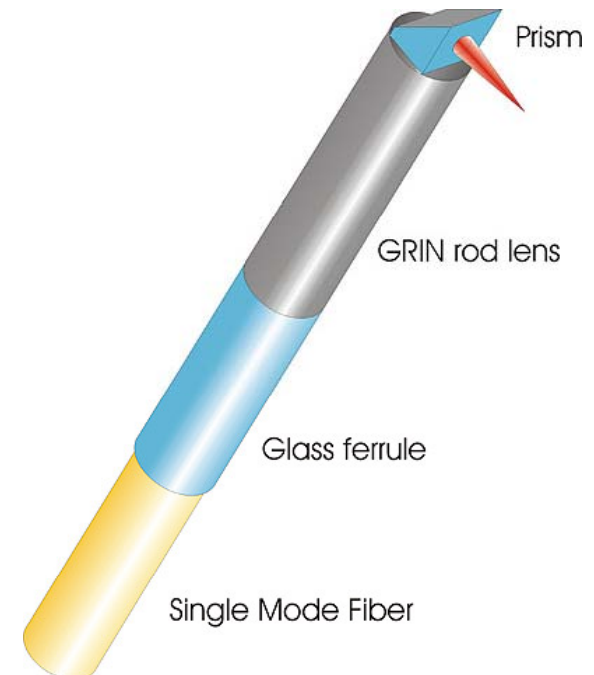
GRIN rod lens



GRIN periodic focusing



GRIN fiber probes

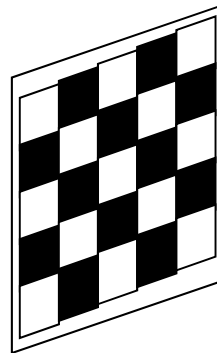


Σχηματισμός Εικόνας



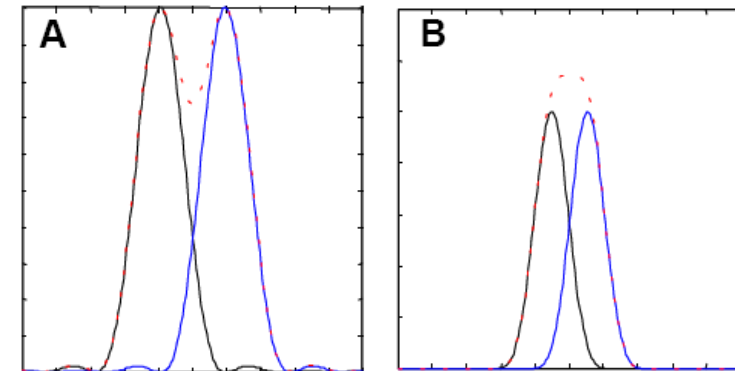
- “Ευκρίνεια” (resolution) εικόνας

- Αριθμός εικονοστοιχείων (pixels) (e.g. 1024x1024)
- Η μικρότερη διακριτή χωρική συχνότητα → μικρότερη διακριτή λεπτομέρεια = οπτική ευκρίνεια (optical resolution)



- Οπτική Ευκρίνεια

- Κριτήριο Rayleigh
 - 3 dB πτώση μεταξύ κορυφών
- Κριτήριο Sparrow
 - Διάμετρος συνάρτησης μεταφοράς σημείου (Point Spread Function ή PSF)
- Τα σφάλματα υποβαθμίζουν την ευκρίνεια



$$d_{3dB} = \frac{1.02\lambda}{NA}$$

$$d = \frac{1.22\lambda}{NA}$$

