



HELLENIC REPUBLIC

National and Kapodistrian
University of Athens

— EST. 1837 —

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής

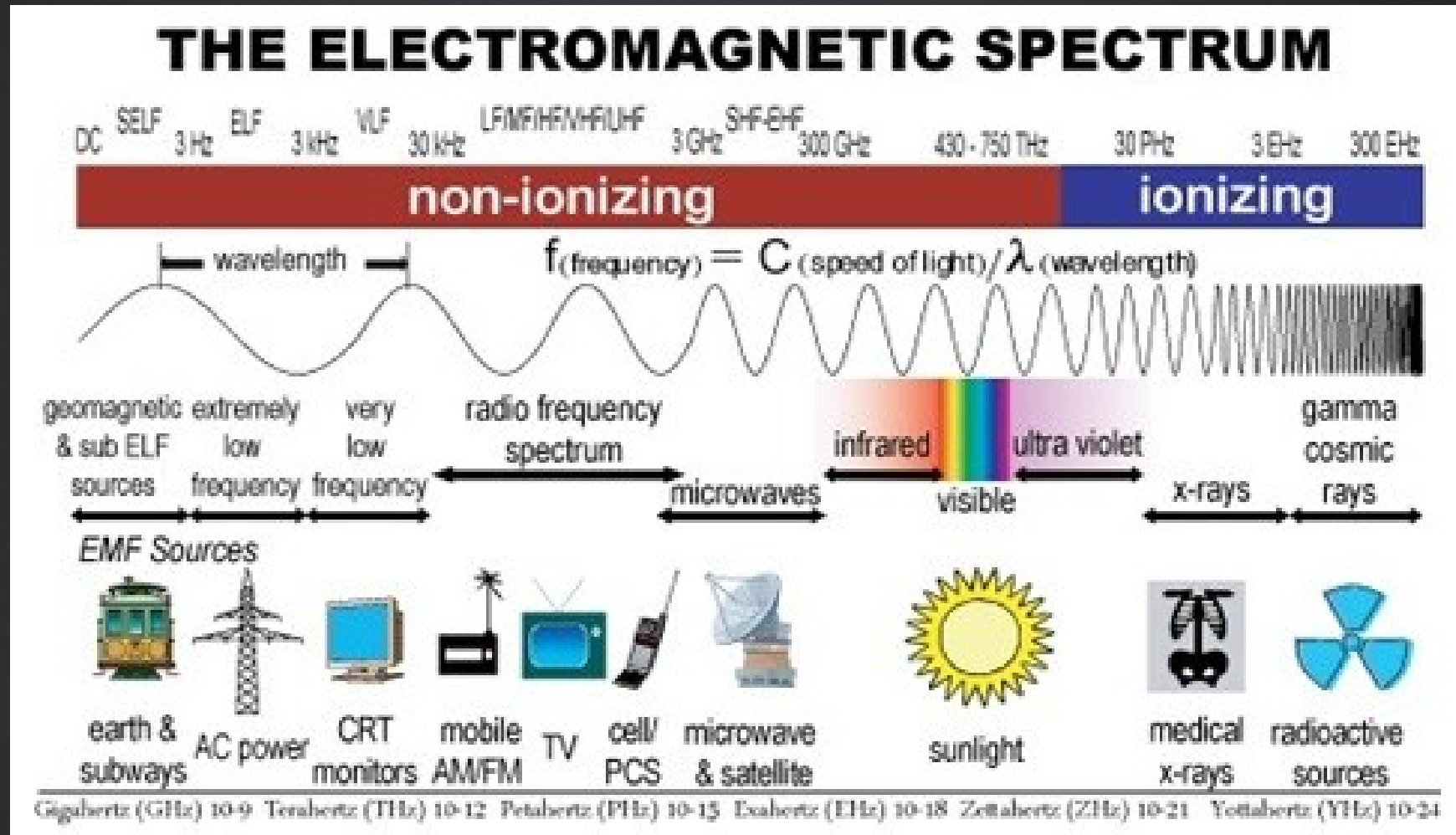
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ
2025-2026

Ιατρική Φυσική
Φως, οφθαλμοί και όραση

Ελευθέριος Παππάς
Επίκουρος Καθηγητής
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή
ΕΚΠΑ

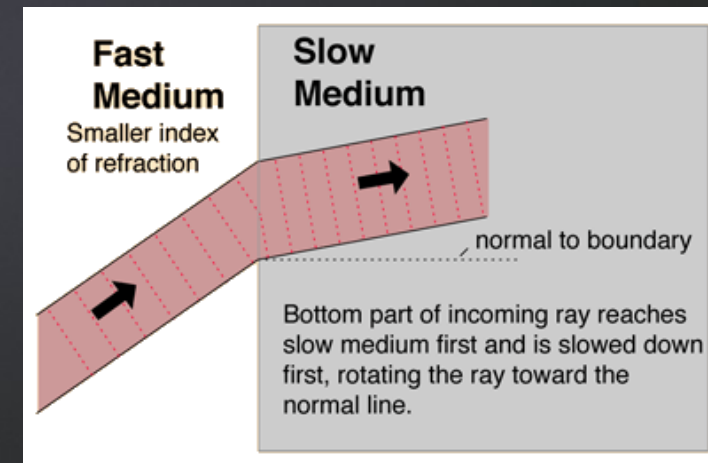
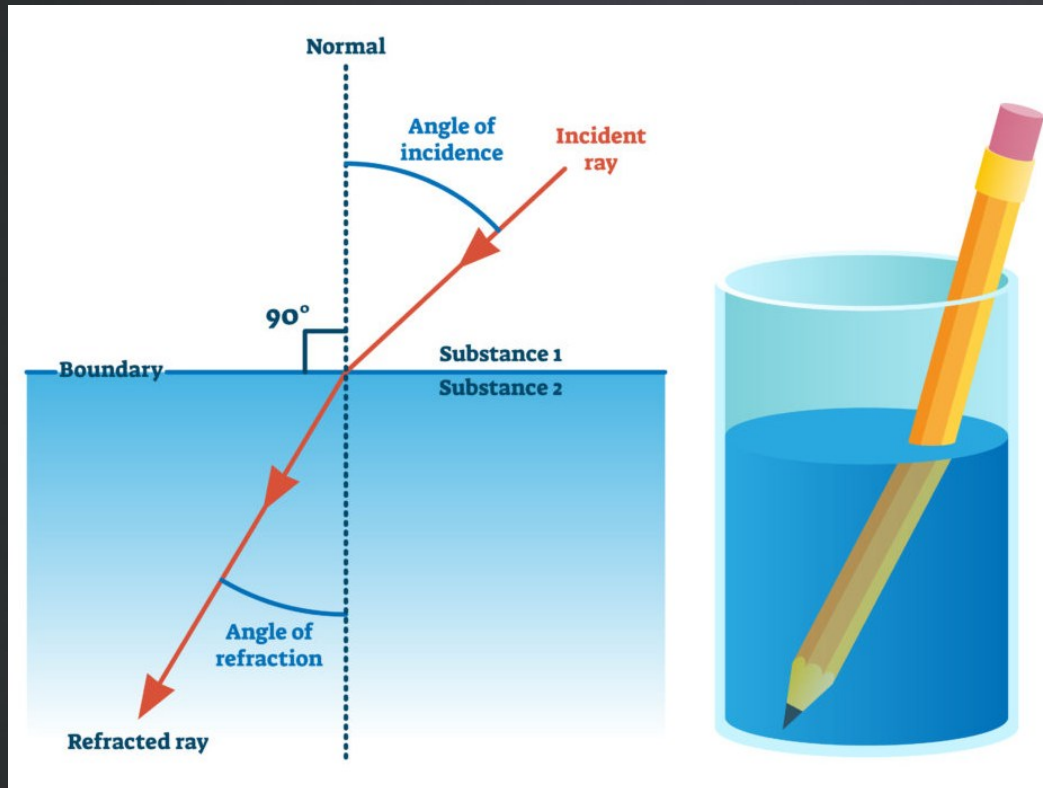
e-mail: elepappas@med.uoa.gr

Φως



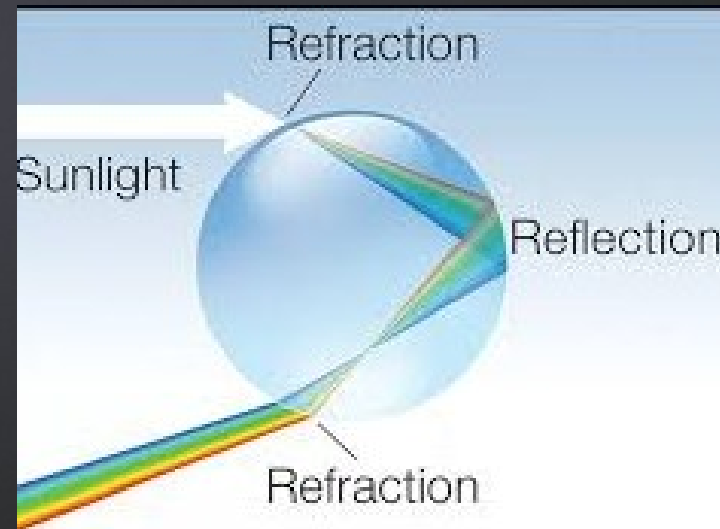
Διάθλαση

- ▶ Το φως **αλλάζει κατεύθυνση** λόγω αλλαγής ταχύτητας διάδοσης σε ένα μέσο
- ▶ Η αλλαγή συμβαίνει **ακριβώς στη διεπιφάνεια των δύο μέσων**



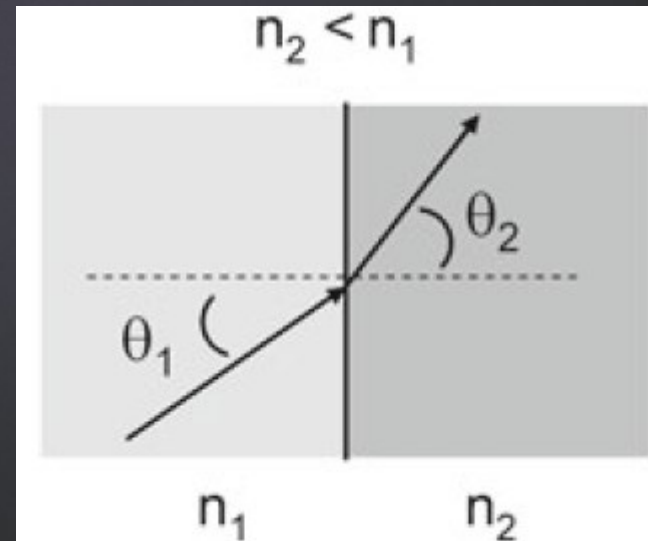
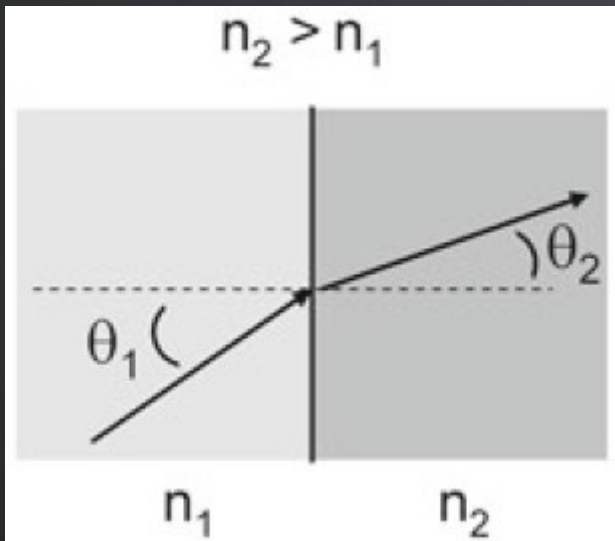
Δείκτης διάθλασης

- ▶ Ταχύτητα του φωτός στο κενό: c
- ▶ Ταχύτητα του φωτός σε διαφανές μέσο: u
- ▶ **Δείκτης διάθλασης** του μέσου: $n = c / u$ (δηλ. ≥ 1 , αδιάστατο)
- ▶ Ο n εξαρτάται από τη σύνθεση και πυκνότητα του υλικού (κυρίως), τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος (διασκεδασμός)
- ▶ Δεν εξαρτάται από την καμπυλότητα των επιφανειών



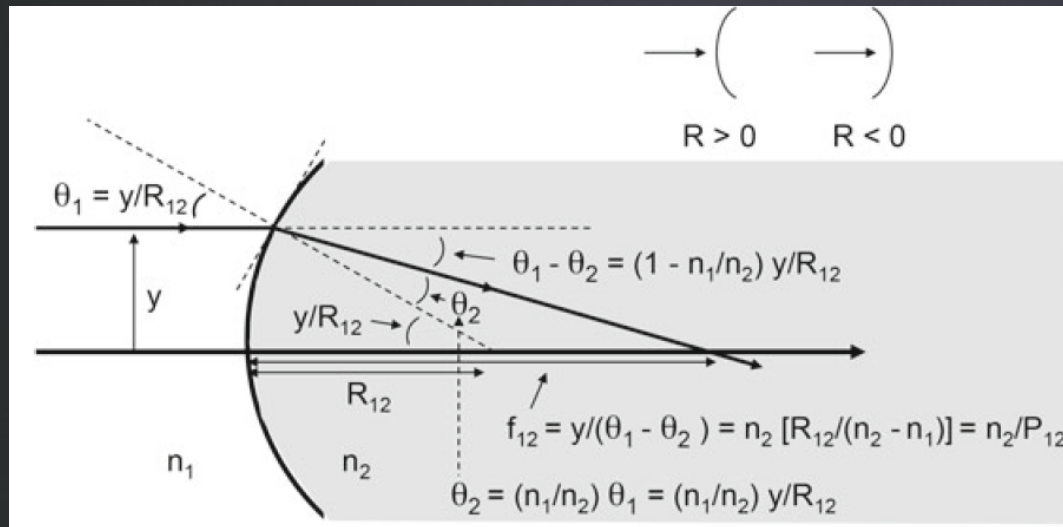
Νόμος του Snell

- ▶ Μέσο διάδοσης 1 με n_1
- ▶ Μέσο διάδοσης 2 με n_2
- ▶ θ_1 : γωνία πρόσπτωσης, θ_2 : γωνία διάθλασης
- ▶ **Νόμος του Snell:** $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
- ▶ Αν $\theta_1 = 0$ (κάθετη πρόσπτωση), τότε $\theta_2 = 0$, δηλ, δεν αλλάζει κατεύθυνση



Απεικόνιση και εστιακή απόσταση

- ▶ Η απεικόνιση μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο όταν οι διεπαφάνειες είναι καμπύλες
- ▶ Παράλληλες ακτίνες προσπίπτουν σε σφαιρική διεπιφάνεια με ακτίνα καμπυλότητας R_{12} . Τότε, θα τέμνουν τον οπτικό άξονα σε απόσταση f_{12} :



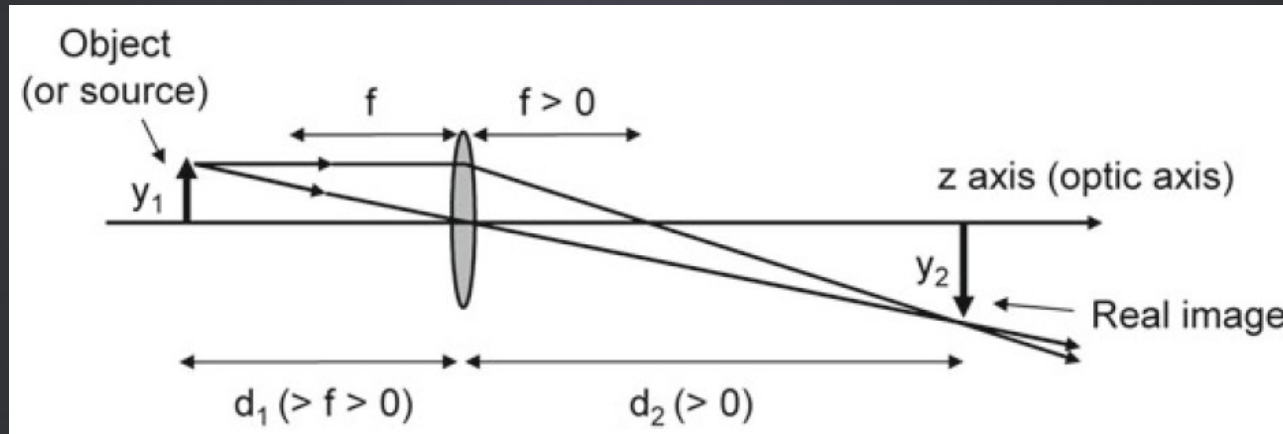
$$\frac{n_1}{d_1} + \frac{n_2}{d_2} = \frac{n_2 - n_1}{R_{12}}$$

$$f_{12} = \frac{y}{[(n_2 - n_1)/n_2](y/R_{12})} = n_2 \frac{R_{12}}{n_2 - n_1}$$

Αυτή η απόσταση είναι ανεξάρτητη από το y , και έτσι όλες οι παράλληλες ακτίνες που προσπίπτουν στην καμπύλη επιφάνεια τέμνουν τον οπτικό άξονα στην ίδια απόσταση, η οποία ονομάζεται **εστιακή απόσταση, f** (ή f_{12} για τη διεπιφάνεια του σχήματος)

Φακοί και εστιακές αποστάσεις

- ▶ Η προσέγγιση του λεπτού φακού: ο φακός είναι τόσο λεπτός που η απόσταση που διανύει το φως μέσα στον φακό θεωρείται αμελητέα
- ▶ d_1 : απόσταση αντικειμένου-φακού, d_2 : απόσταση φακού-ειδώλου, f : εστιακή απόσταση
- ▶ Κατά σύμβαση, οι αποστάσεις από αριστερά προς τα δεξιά είναι θετικές και από δεξιά προς τα αριστερά είναι αρνητικές



- ▶ Η εικόνα σχηματίζεται στο d_2 , με

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$$

- ▶ Μεγέθυνση:

$$M = \frac{d_2}{d_1} = \frac{y_2}{y_1}$$

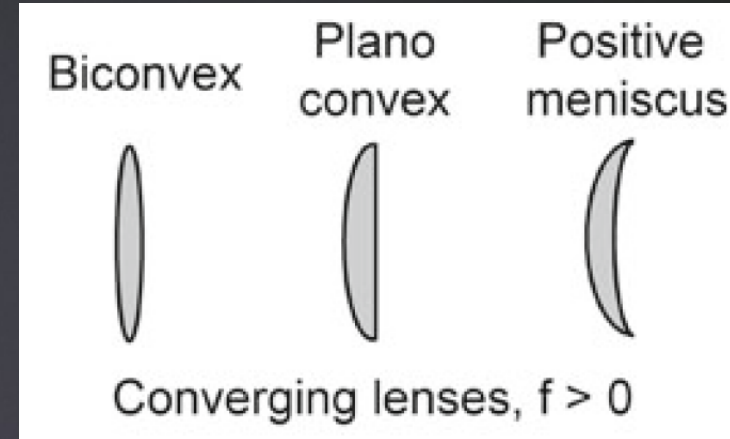
Εάν $d_2 > d_1$, τότε $y_2 > y_1$. Το αντικείμενο θα εμφανίζεται M φορές μεγαλύτερο

Τύποι φακών

► Κυρτοί (ή συγκλίνοντες ή θετικοί) φακοί

Θετική εστιακή απόσταση ($f > 0$)

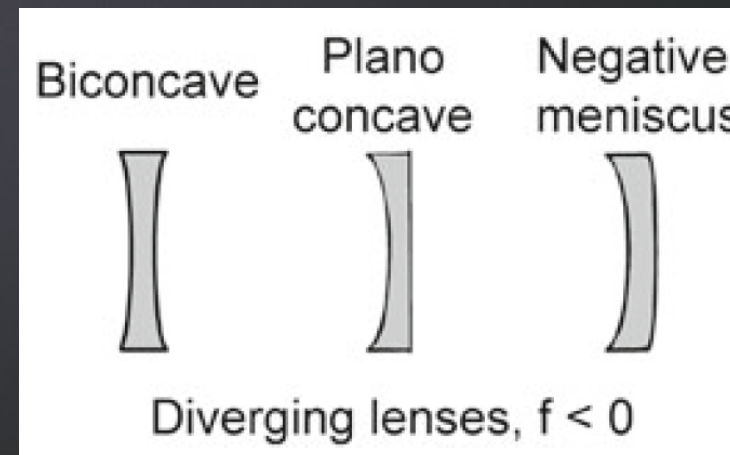
Πιο λεπτοί στα άκρα, παχύτεροι στο μέσο



► Κοίλοι (ή αποκλίνοντες ή αρνητικοί) φακοί

Αρνητική εστιακή απόσταση ($f < 0$)

Πιο λεπτοί στα άκρα παχύτεροι στο μέσο



Φακοί και εστιακές αποστάσεις

$$\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$$

Πραγματικές και εικονικές εικόνες

Ειδικές περιπτώσεις:

Συγκλίνων φακός ($f > 0$)

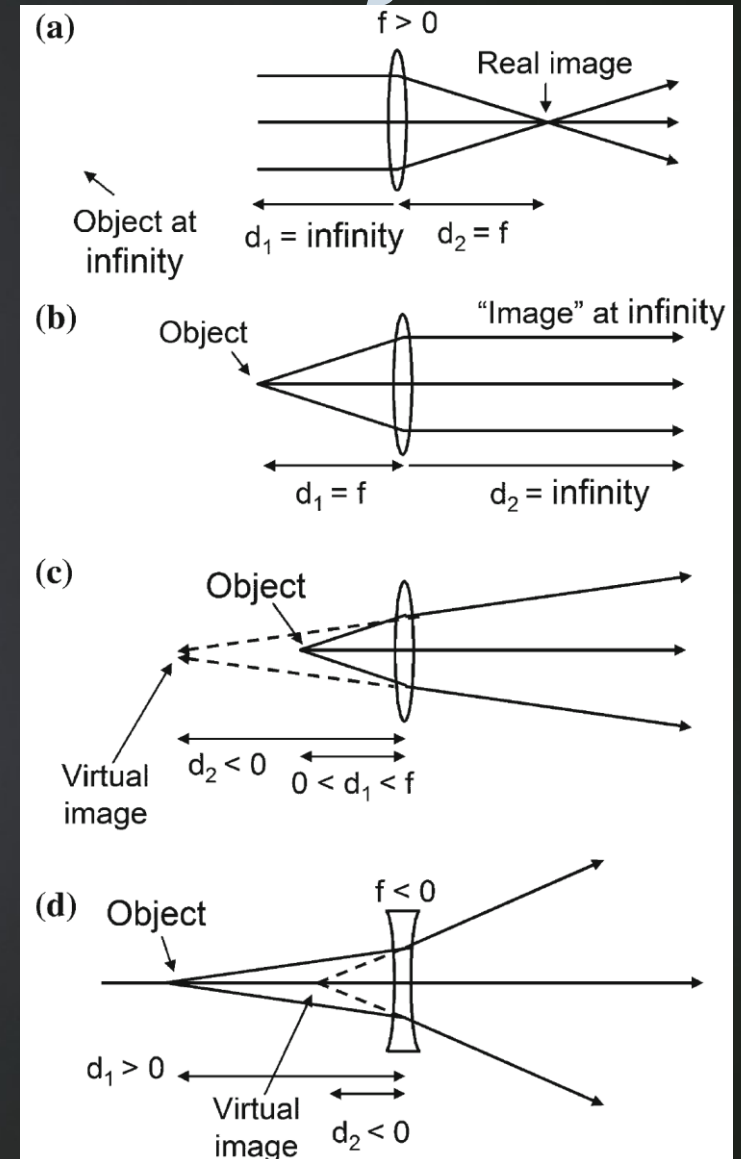
(a) Αν d_1 στο άπειρο (οι προσπίπτουσες ακτίνες είναι παράλληλες), τότε $d_2 = f$, δηλ εικόνα στην εστιακή απόσταση

(b) Αν $d_1 = f$, τότε d_2 στο άπειρο

(c) $d_1 < f$, τότε $d_2 < 0$ (φανταστικό είδωλο προς τα αριστερά)

Αποκλίνων φακός ($f < 0$)

(d) $f < 0$ και $d_1 > 0$, τότε πάντα $d_2 < 0$ (φανταστικό είδωλο, virtual image, προς τα αριστερά)



Διαθλαστική Ισχύς (refractive power)

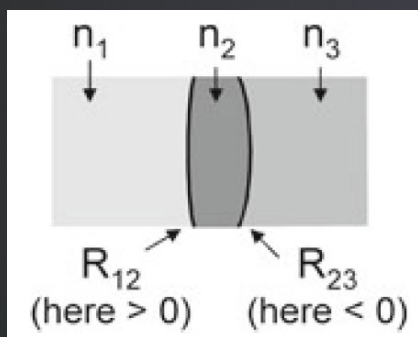
P: η διαθλαστική ισχύς (refractive power) μιας διεπιφάνειας (γνωστή και ως οπτική δύναμη, διοπτρική δύναμη, δύναμη εστίασης, δύναμη σύγκλισης)

Στον αέρα (ή στο κενό): $P = 1/f$. Σε ένα μέσο n : $P = n/f$. Άρα, εξαρτάται από n και f (δηλ., υλικό και καμπυλότητα)

Μονάδα μέτρησης: $1 \text{ D} = 1 \text{ m}^{-1}$ (διοπτρίες)

Εκφράζει την ικανότητα μιας διεπαφής να συγκλίνει (θετική δύναμη) ή να αποκλίνει (αρνητική δύναμη) το φως.

Φακός: δύο διεπιφάνειες και τρία μέσα με δείκτες διάθλασης n_1 , n_2 και n_3 :



$$P_{12} = \frac{n_2 - n_1}{R_{12}} = \frac{n_2}{f_{12}} = \frac{n_1}{f_{21}}$$

$$P_{23} = \frac{n_3 - n_2}{R_{23}}$$

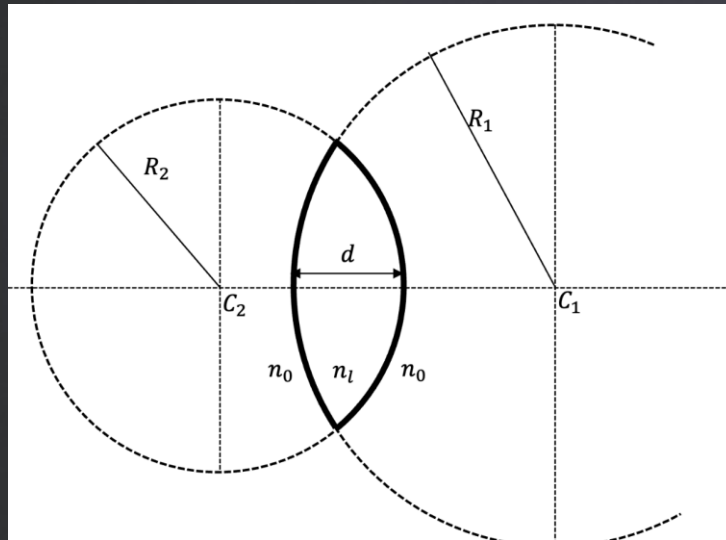
Σύμφωνα με την προσέγγιση του λεπτού φακού, **οι διαθλαστικές ισχύες αθροίζονται!** Δηλ:

Αυτό ισχύει για οποιοδήποτε σύστημα διεπαφαιών ή διαδοχικών φακών.

$$P_{\text{total}} = P_{12} + P_{23}$$

Η εξίσωση κατασκευής φακού

Ένας λεπτός φακός (αμελητέο d) με δείκτη διάθλασης n_l σε ένα μέσο με n_0 . Για μια δεδομένη εστιακή απόσταση, f , υπολογίστε τις ακτίνες καμπυλότητας, R_1 και R_2 .

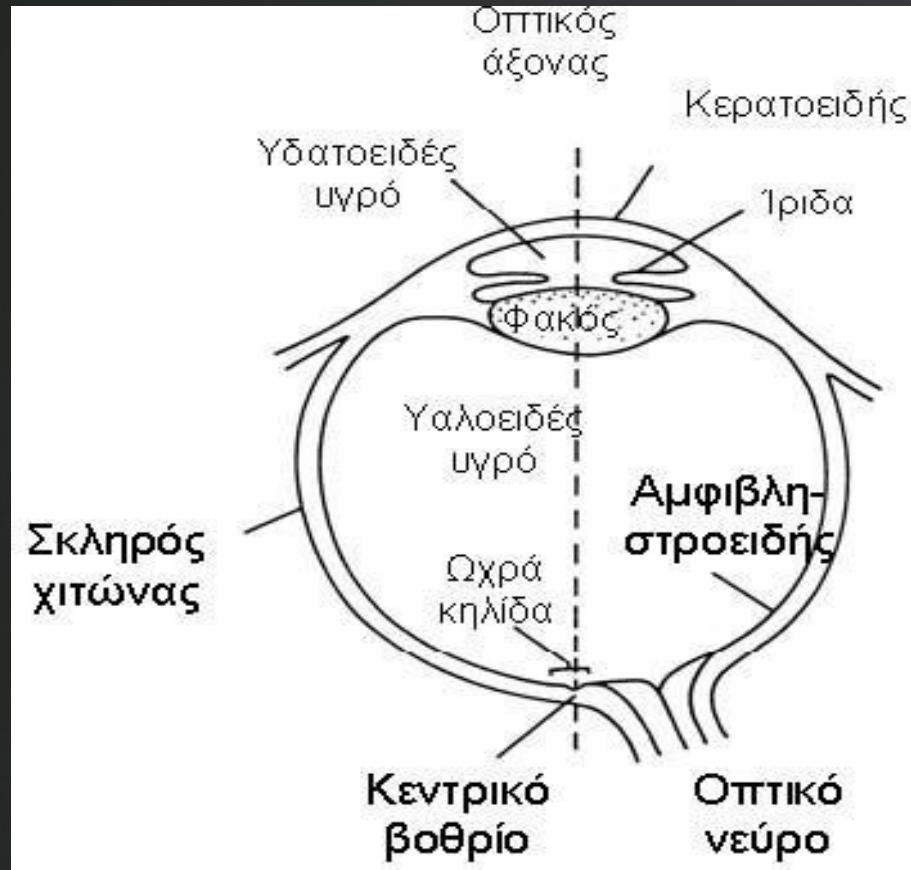
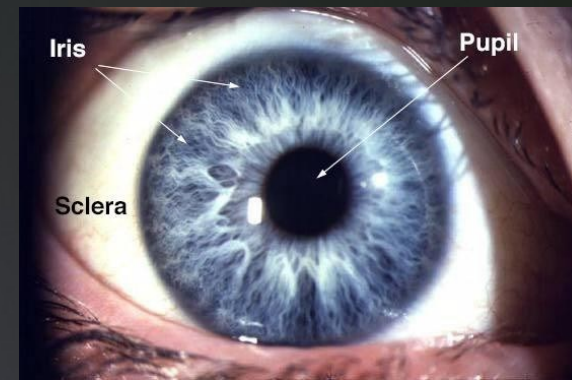


$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_l - n_0}{n_0} \right) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

Σύμβαση: εάν το κέντρο της σφαίρας βρίσκεται στα δεξιά του φακού, τότε $R > 0$. Δηλαδή, $R_1 > 0$ και $R_2 > 0$.

Εάν ο φακός λειτουργεί στον αέρα, $n_0 = 1$, επομένως: $\frac{1}{f} = (n_l - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

Δομή του οφθαλμού



Σχηματισμός ειδώλου στον αμφιβληστροειδή οπτικά ανεστραμμένου (πάνω-κάτω, αριστερά-δεξιά)



Δομή του οφθαλμού

Δείκτες διάθλασης των στοιχείων του ματιού

Μέσο διάδοσης	Δείκτης διάθλασης
Αέρας	1.000
Νερό	1.333
Κερατοειδής χιτώνας	1.3376
Υδατοειδές υγρό	1.336
Φακός	1.386-1.406 (περιφέρεια – κέντρο)
Υαλοειδές υγρό	1.337



Η διαθλαστική ισχύς εξαρτάται από τους δείκτες διάθλασης και τα σχήματα των επιφανειών. Ο κερατοειδής χιτώνας και ο φακός είναι τα πραγματικά στοιχεία εστίασης στο μάτι. Ο κερατοειδής χιτώνας εκτελεί περίπου τα δύο τρίτα της εστίασης και ο φακός το υπόλοιπο ένα τρίτο. Η μεταβαλλόμενη καμπυλότητα των επιφανειών του φακού επιτρέπει μεταβλητή εστιακή απόσταση.

Δομή του οφθαλμού

Αμφιβληστροειδής: ο ανιχνευτής φωτός

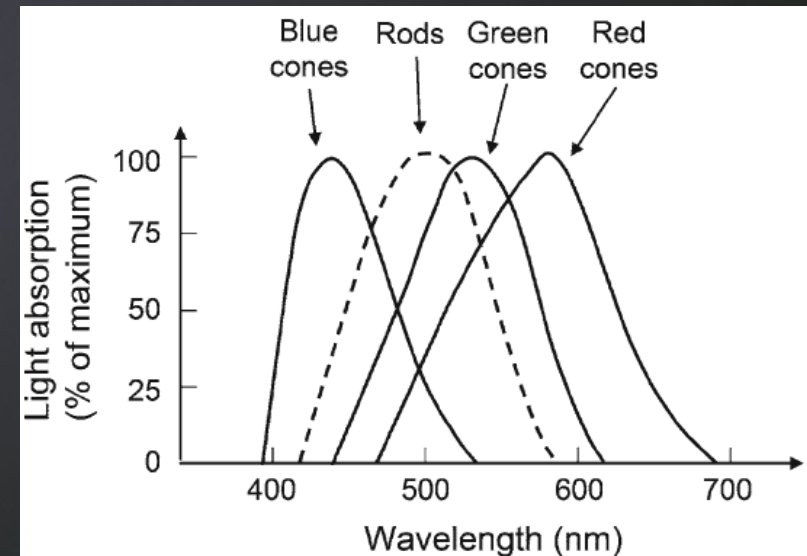
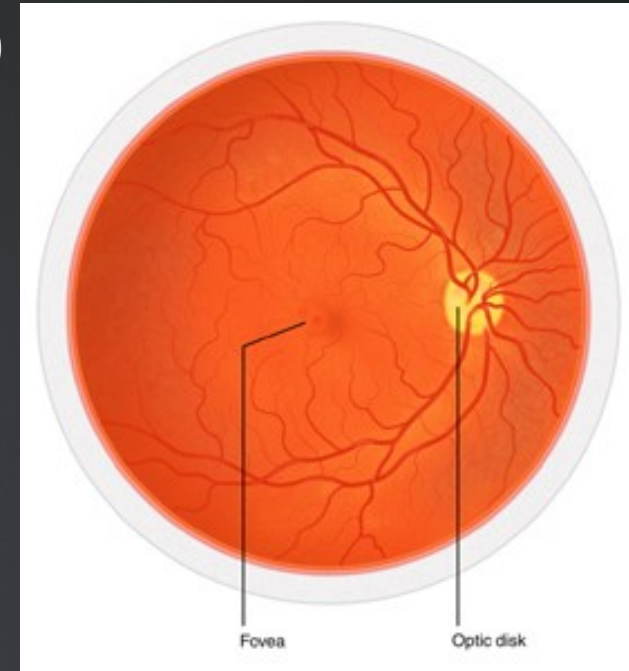
Μόλις το 50% των φωτονίων που προσπίπτουν στο μάτι φτάνουν στον αμφιβληστροειδή!

Ωχρά κοιλίδα (fovea): η κεντρική περιοχή του αμφιβληστροειδούς, η πιο ευκρινής όραση

Ραβδία και κωνία: κύτταρα που απορροφούν το φως και παράγουν ηλεκτρικό σήμα

Ραβδία: υψηλή ευαισθησία, χαμηλή χωρική οξύτητα, άφθονες στην περιφέρεια. Υπεύθυνες για τη νυχτερινή όραση και την περιφερειακή όραση

Κωνία: χαμηλή ευαισθησία, υψηλή χωρική οξύτητα, άφθονα στην ωχρά κηλίδα. Υπεύθυνα για την ευκρινή έγχρωμη όραση στην ωχρά κηλίδα. Τρία είδη: ένα για κάθε χρώμα RGB

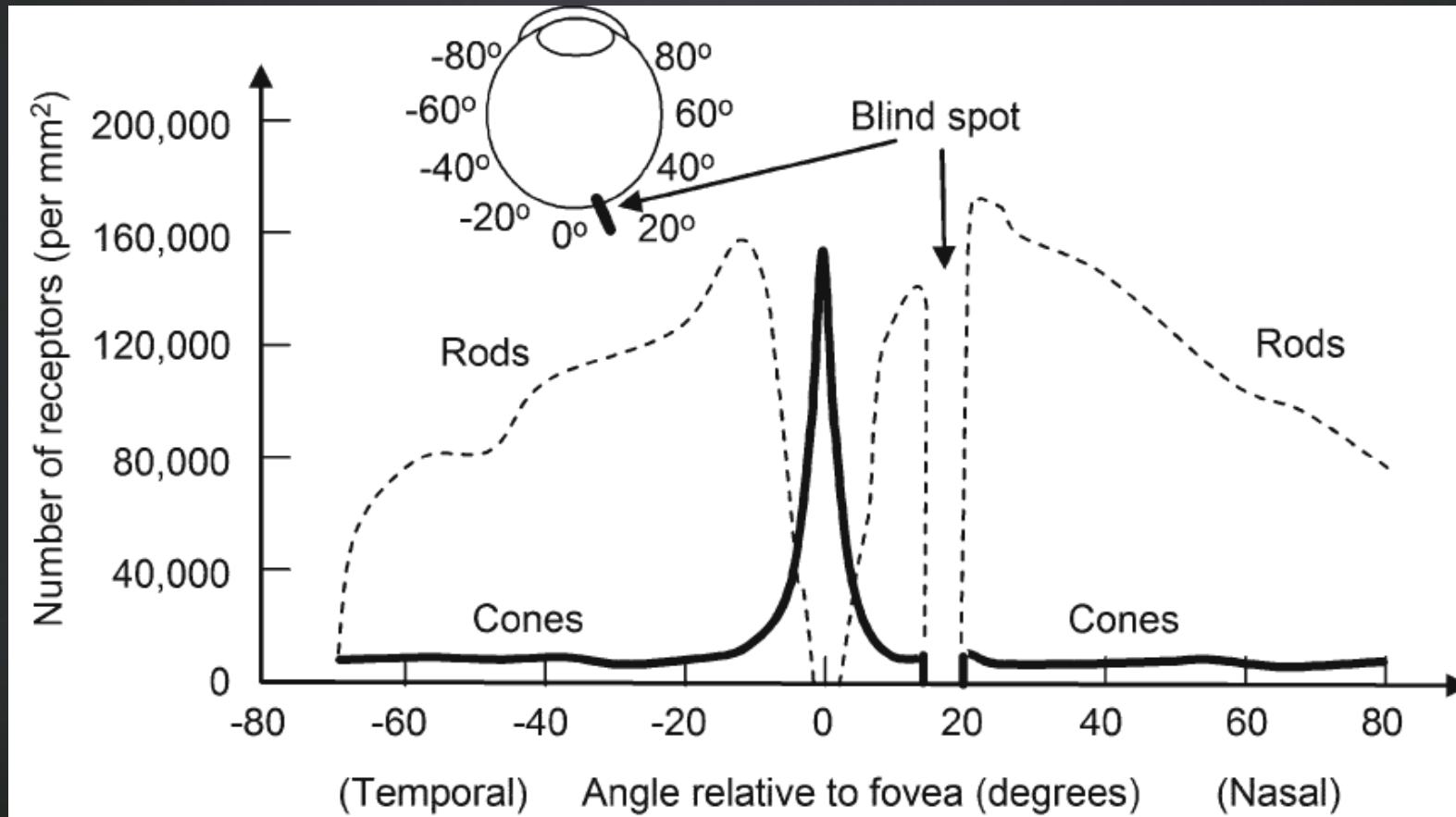


Δομή του οφθαλμού

Κατανομή των ραβδίων και των κωνίων στον αμφιβληστροειδή

Κωνία: άφθονα στο κέντρο, κεντρική όραση, έγχρωμη όραση, χαμηλή ευαισθησία

Ραβδία: άφθονα στη περιφέρεια, περιφερική και σκοτοπική όραση, υψηλή ευαισθησία

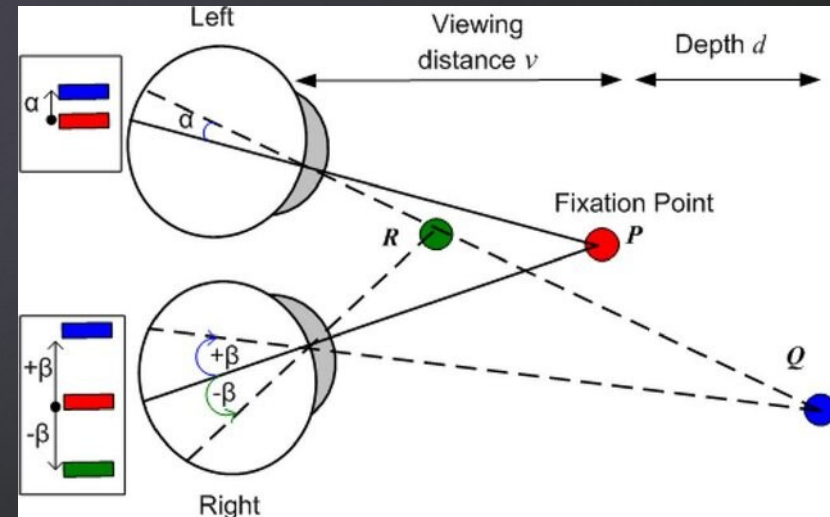
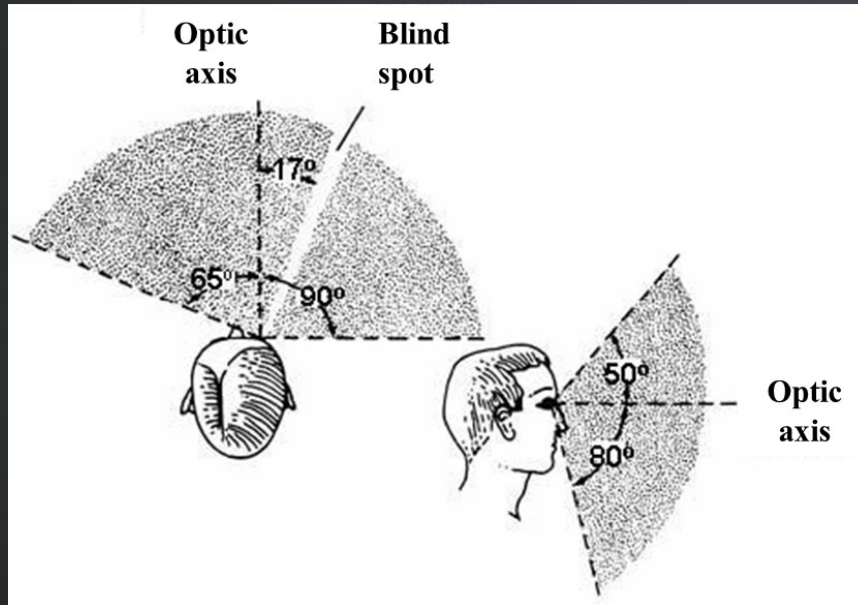


Δομή του οφθαλμού

Το μεγάλο οπτικό πεδίο και η στερεοσκοπική όραση με ελάχιστη παραμόρφωση οφείλονται στο σφαιρικό σχήμα του αμφιβληστροειδούς.

Τυφλό σημείο: στις ~17 μοίρες λόγω οπτικού νεύρου

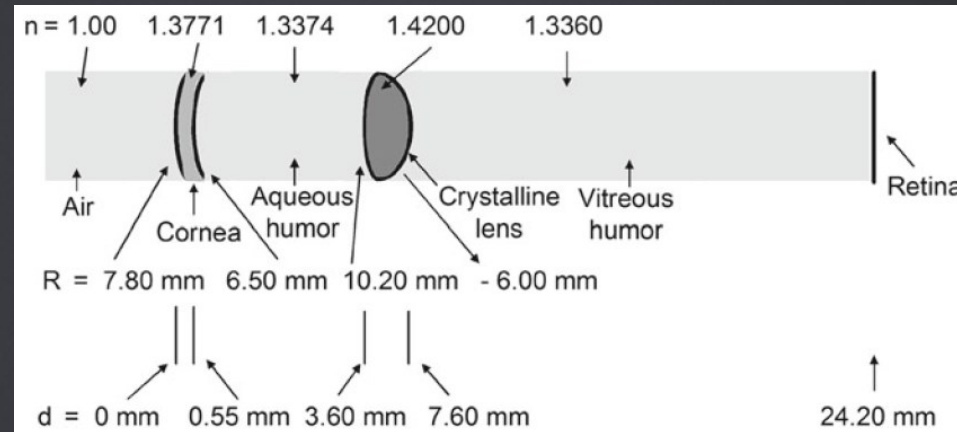
Διόφθαλμη όραση: ο εγκέφαλος συγχωνεύει τις δύο εικόνες και προσθέτει την αντίληψη του βάθους (3D - στερεοσκοπική όραση). Απαλείφεται το τυφλό σημείο



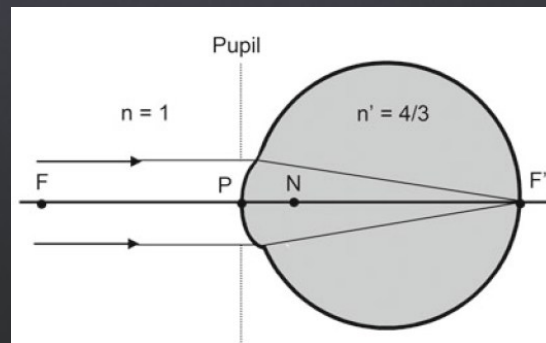
Μοντελοποίηση της διαθλαστικής ισχύος

Ο οφθαλμός μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα σύστημα φακών και διαθλαστικών μέσων.

Π.χ.:



Το «μειωμένο μάτι» (Reduced eye model)



Μοντελοποίηση της διαθλαστικής ισχύος

Ο οφθαλμός μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα σύστημα φακών και διαθλαστικών μέσων.

Διαθλαστικές ισχύεις του κερατοειδούς και του φακού:

$$P_{\text{eye}} = P_{\text{cor}} + P_{\text{lens}} = 42,24 \text{ D} + 22,10 \text{ D} = 64,34 \text{ D}$$

$$f_{\text{eye}} = n_{\text{eye}} / P_{\text{eye}} = 1,336 / 64,34 \text{ D} = 20,8 \text{ mm}$$

Μήκος του βολβού του ματιού: $L_{\text{eye}} = 24 \text{ mm}$. Οι ακτίνες εστιάζονται στον αμφιβληστροειδή!

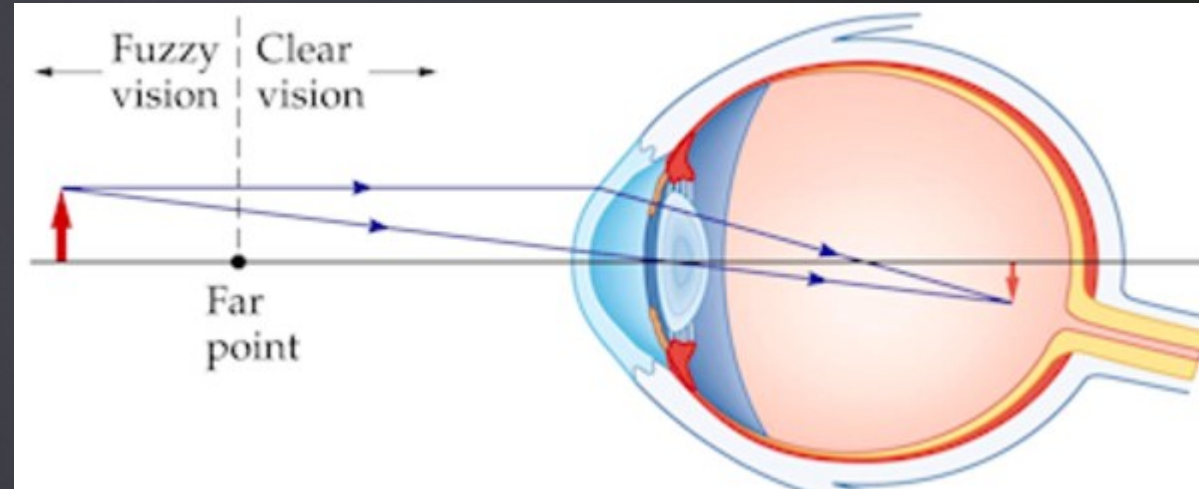
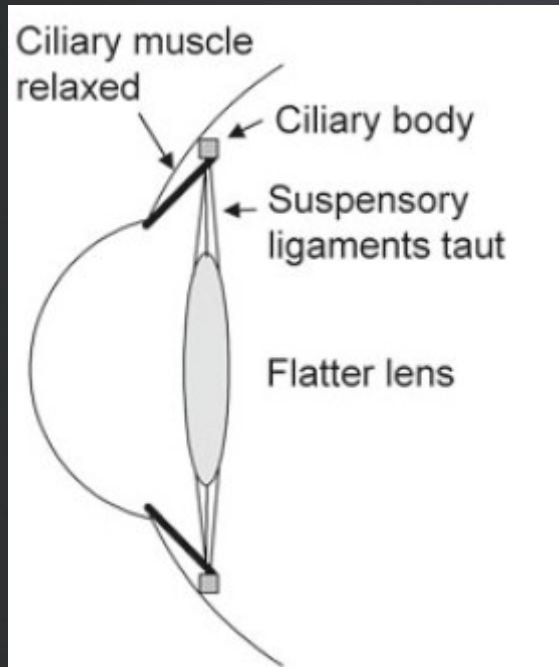
Το μοντέλο «Τυπικό μάτι»:

Το σύστημα κερατοειδούς/φακού μοντελοποιείται ως ένας φακός στον αέρα. Ο αμφιβληστροειδής βρίσκεται σε εστιακή απόσταση 17 mm (περίπου $\sim L_{\text{eye}} / 1,33$).

$$\text{Τότε, } P = 1 / (0,017 \text{ m}) = \sim 60 \text{ D}$$

Απόμακρο σημείο (FP)

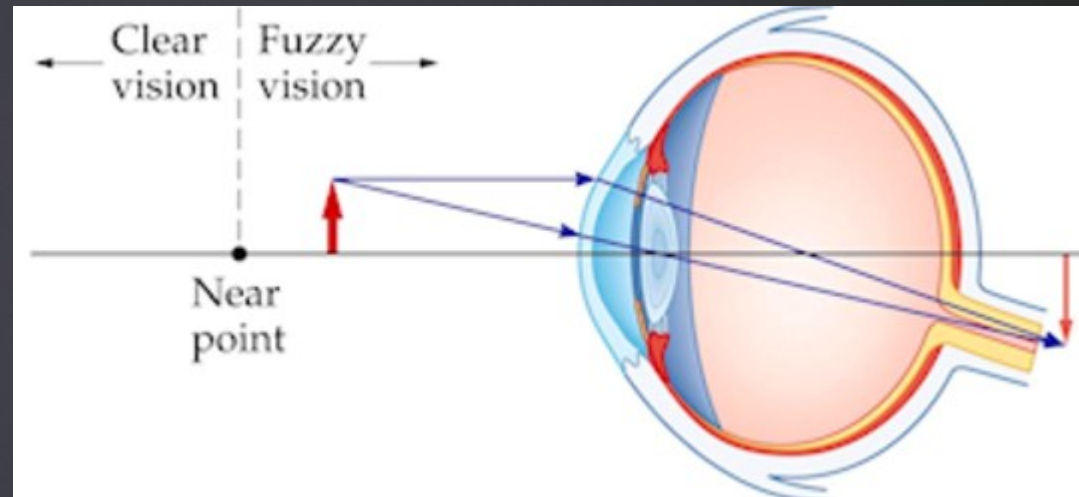
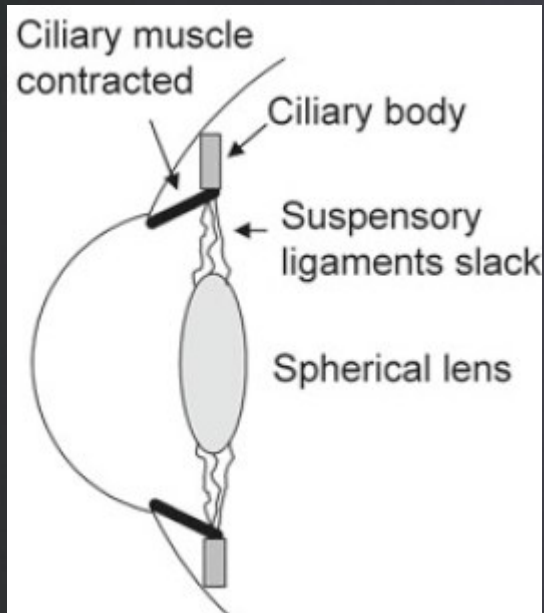
Έστω ένα αντικείμενο πολύ μακριά από τα μάτια. Οι ακτινωτοί μύες χαλαρώνουν, η τάση στον φακό είναι μέγιστη, ο φακός ισιώνει και η εστιακή απόσταση αυξάνεται. Το μάτι εστιάζει στο άπειρο (οι προσπίπτουσες ακτίνες μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες για $d_l > 6m$).



Απόμακρο σημείο (Far Point, FP): το πιο απομακρυσμένο σημείο στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί ένα αντικείμενο ώστε το φως να εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή. Σε θέσεις μακρύτερες του FP, οι ακτίνες εστιάζονται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή και η εικόνα δεν είναι ευκρινής.

Κοντινό σημείο (NP)

Έστω ένα αντικείμενο πολύ κοντά στα μάτια. Οι μύες συστέλλονται, η καμπυλότητα αυξάνεται, η εστιακή απόσταση μικραίνει.



Κοντινό σημείο (Near Point, NP): το κοντινότερο σημείο στο οποίο μπορεί να τοποθετηθεί ένα αντικείμενο και να σχηματιστεί μια εστιασμένη εικόνα στον αμφιβληστροειδή. Σε θέσεις πιο κοντά από το NP, οι ακτίνες εστιάζουν πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Η εικόνα είναι θολή.

Προσαρμογή

Προσαρμογή (accommodation): η δυνατότητα ελέγχου της εστιακής απόστασης του φακού του οφθαλμού, άρα και της διαθλαστικής ισχύος P .

Πόση προσαρμογή χρειάζεται για να έχουμε ευκρινή όραση, τόσο μακριά όσο και κοντά;

Ιδανικά, FP στο άπειρο.

Για έναν ενήλικα, NP στα 25 cm.

Μοντέλο «τυπικού ματιού»: λεπτός φακός στον αέρα, $L_{eye} = 17 \text{ mm}$.

Χρησιμοποιώντας $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$, έχουμε:

$$P_{FP} = \frac{1}{f_{FP}} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{L_{eye}} = 0 + \frac{1}{0.017m} = 58.8 \text{ D}$$

$$P_{NP} = \frac{1}{f_{NP}} = \frac{1}{0.25m} + \frac{1}{L_{eye}} = 4 \text{ D} + \frac{1}{0.017m} = 4 \text{ D} + 58.8 \text{ D} = 62.8 \text{ D}$$

Απαραίτητη προσαρμογή: $P_{NP} - P_{FP} = 4 \text{ D}$.

Προσαρμογή

Προσαρμογή (accommodation): η δυνατότητα ελέγχου του εστιακού μήκους του φακού του οφθαλμού. άρα και της διαθλαστικής ισχύος P .

Η προσαρμογή μειώνεται με την ηλικία! Πρεσβυωπία. Το NP απομακρύνεται από τα μάτια με την αύξηση της ηλικίας!

Η απώλεια της προσαρμογής με την ηλικία οφείλεται (i) στην αύξηση του συντελεστή ελαστικότητας του φακού, (ii) στην επιπέδωση του φακού και (iii) στη μείωση του συντελεστή ελαστικότητας της κάψουλας του φακού.

Ηλικία (έτη)	Near Point (m)	Προσαρμογή (D)
10	0.07	14
20	0.10	10
30	0.13	7.7
40	0.19	5.3
50	0.54	1.9
60	0.83	1.2

Ο πίνακας Snellen

Η οπτική οξύτητα δίνεται ως κλάσμα S (π.χ. 20/40). Ο αριθμητής είναι η απόσταση στην οποία πρέπει να βρίσκεται κάποιος για να διακρίνει μια δεδομένη γραμμή σε έναν πίνακα οπτικής οξύτητας (συνήθως καθορίζεται στα 20 πόδια στις ΗΠΑ ή στα 6 μέτρα στην Ευρώπη). Ο παρονομαστής είναι η μέγιστη απόσταση στην οποία ένας τυπικός παρατηρητής μπορεί να δει την ίδια γραμμή στον πίνακα οπτικής οξύτητας.

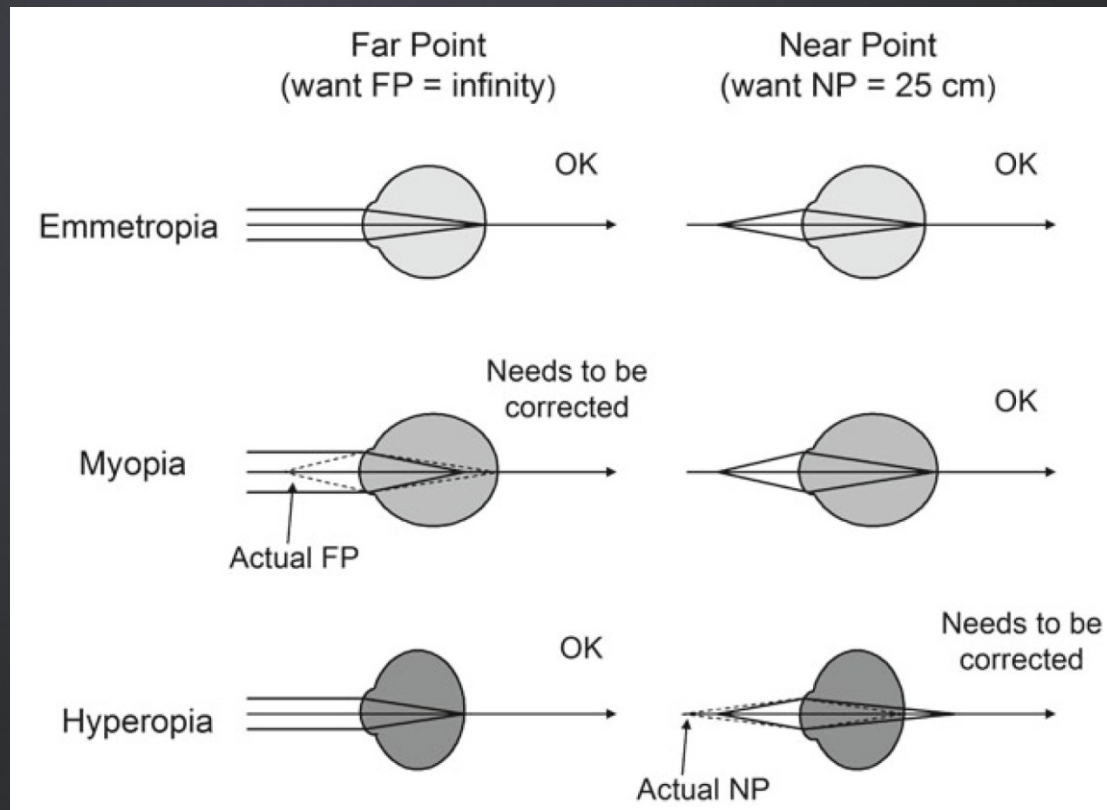
E	1	20/200
F P	2	20/100
T O Z	3	20/70
L P E D	4	20/50
P E C F D	5	20/40
E D F C Z P	6	20/30
F E L O P Z D	7	20/25
D E F P O T E C	8	20/20
L E F O D P C T	9	
F D P L T C E O	10	
F E Z O L C F T D	11	

Ατελής όραση: μυωπία και υπερμετρωπία

Εμμετρωπία (φυσιολογική όραση): δεν απαιτείται διόρθωση της διαθλαστικής ισχύος

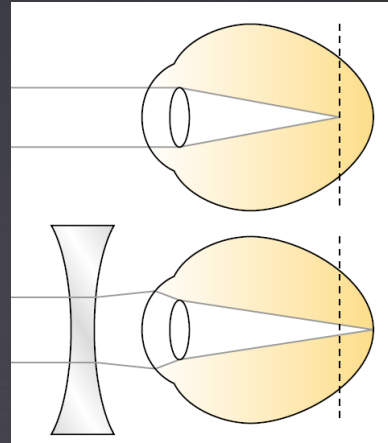
Μυωπία: το FP δεν είναι αρκετά μακριά. Οι ακτίνες από μακρινά αντικείμενα εστιάζονται μπροστά από τον αμφιβληστροειδή. Συνηθισμένοι λόγοι: ο βολβός του ματιού είναι πολύ μακρύς ή ο κερατοειδής είναι πολύ καμπύλος.

Υπερμετρωπία: το NP δεν είναι αρκετά κοντά. Το είδωλο σχηματίζεται πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Συνηθισμένοι λόγοι: ο βολβός του ματιού είναι πολύ κοντός ή ο κερατοειδής χιτώνας είναι πολύ επίπεδος.

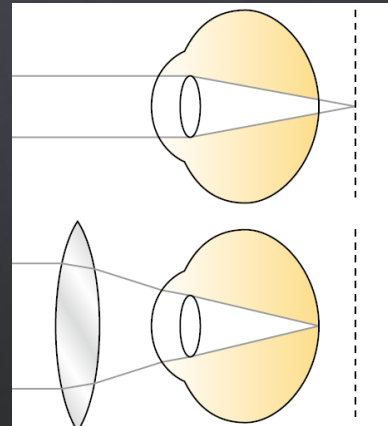


Ατελής όραση: μυωπία και υπερμετρωπία

Η μυωπία μπορεί να διορθωθεί με τη χρήση αρνητικών (αποκλίνουσων) φακών. Η εστιακή απόσταση αυξάνεται, διαθλαστική ισχύς μειώνεται.

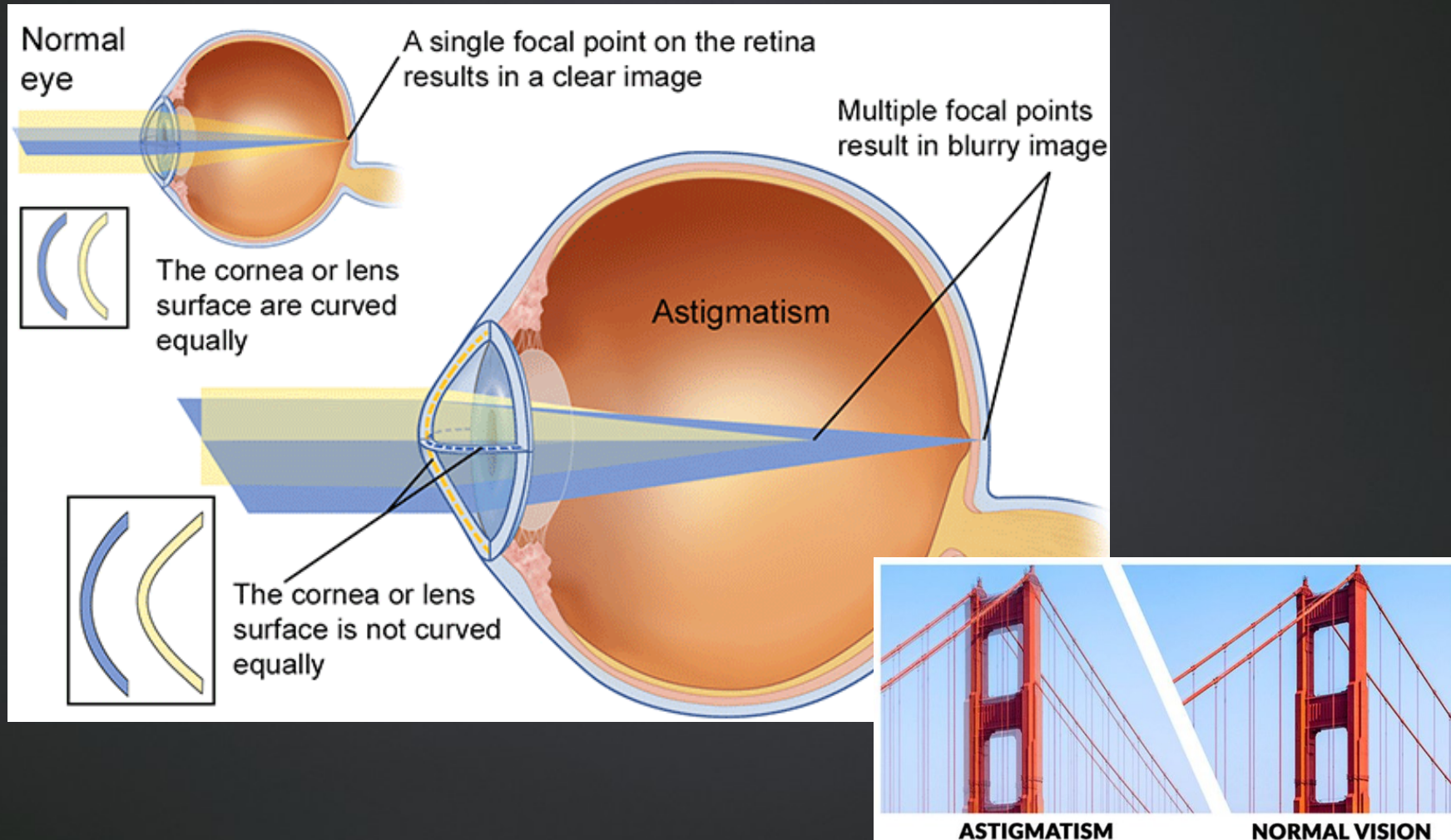


Η υπερμετρωπία μπορεί να διορθωθεί με τη χρήση θετικών (συγκλίνοντων) φακών. Η εστιακή απόσταση μειώνεται, διαθλαστική ισχύς αυξάνεται.



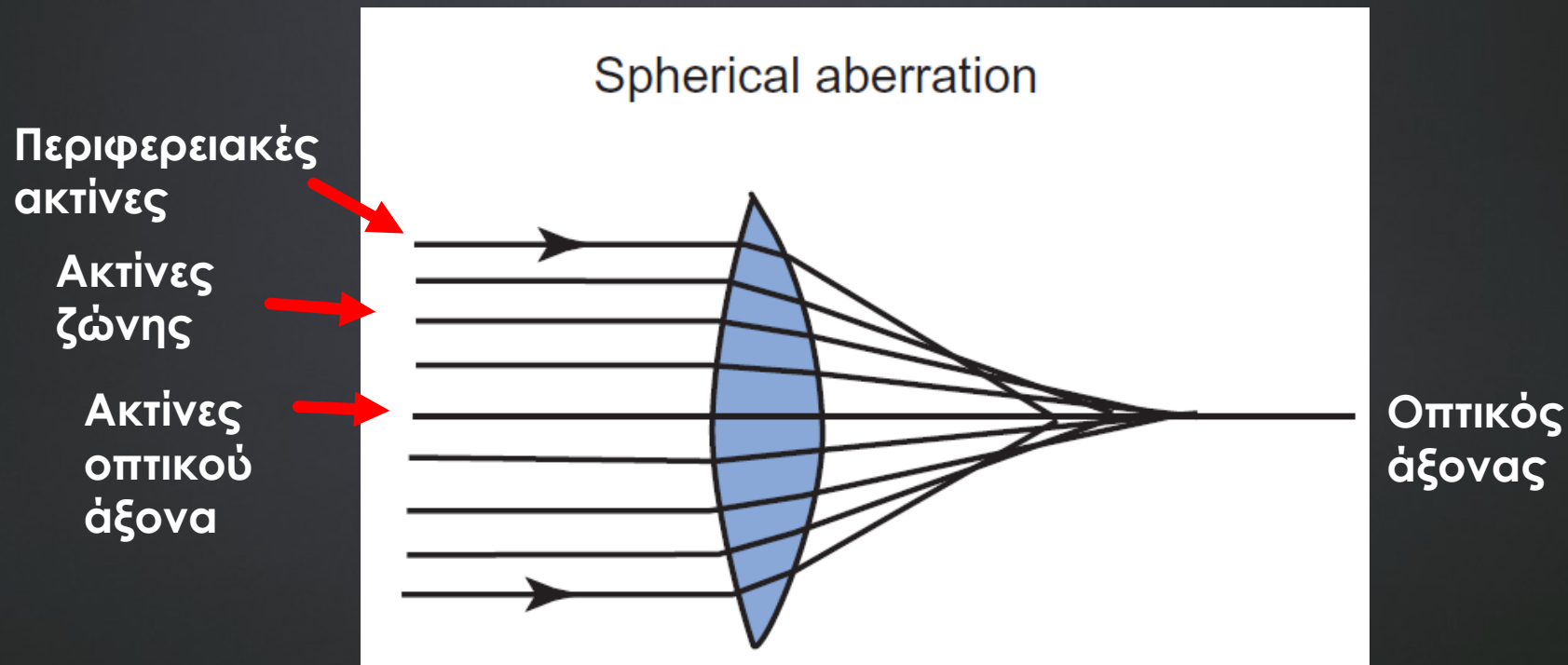
Ατελής όραση: αστιγματισμός

Αστιγματισμός: απουσία γωνιακής συμμετρίας στις εστιακές αποστάσεις. Επιφάνεια κερατοειδούς ή φακός με άνισες καμπυλότητες στα επίπεδα x ή y.



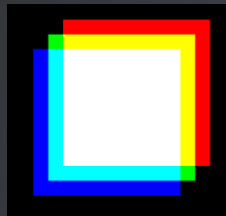
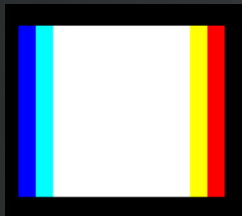
Ατελής όραση: εκτροπές

Σφαιρική εκτροπή: Η διάθλαση του φωτός εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης και τους δείκτες διάθλασης των δύο μέσων. Λόγω της σφαιρικής καμπυλότητας, το φως που διέρχεται από τα άκρα ενός σφαιρικού φακού δεν εστιάζεται ακριβώς στο ίδιο σημείο με το φως που διέρχεται από τα πιο κεντρικά μέρη του φακού.

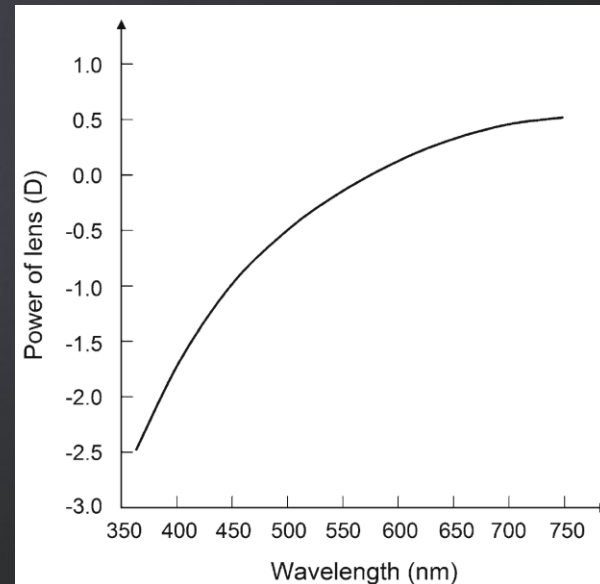
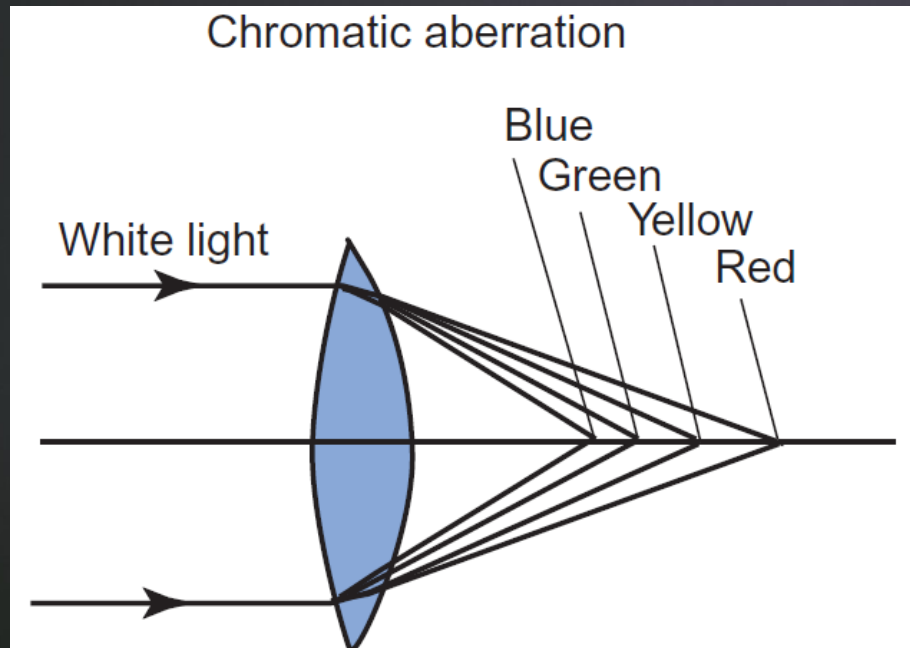


Ατελής όραση: εκτροπές

Χρωματική εκτροπή: Ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από το μήκος κύματος (διασκεδασμός). Η εικόνα μπορεί να είναι ευκρινής μόνο σε ένα μήκος κύματος.



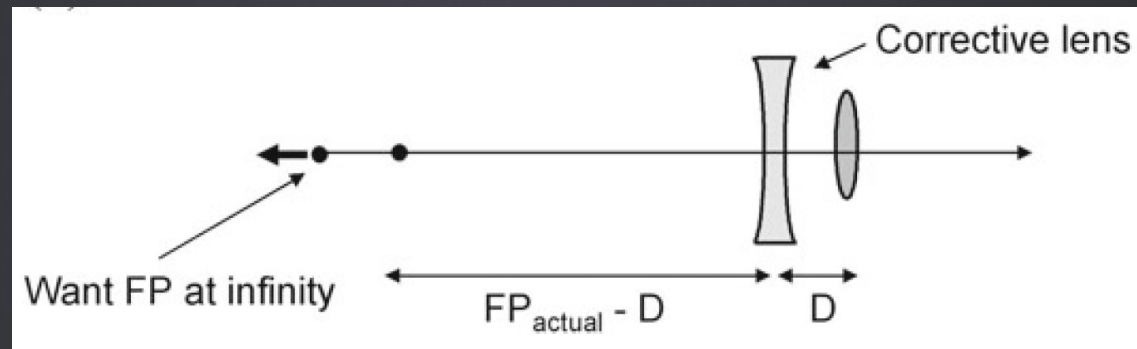
Wavelength (nm) (spectral line)	Humors	Crystalline lens
380	1.3450	1.4334
480.0 (F')	1.3378	1.4221
587.6 (d)	1.3333	1.4160
643.8 (C')	1.3315	1.4138
780	1.3285	1.4101



Συνταγογράφηση γυαλιών και φακών επαφής

Παράδειγμα: μυωπία με $FP=53$ cm. Διορθωτικός φακός σε απόσταση $D=1,5$ cm από τον φακό του ματιού. Χρειαζόμαστε φακό που για d_1 στο άπειρο να σχηματίζει είδωλο σε απόσταση $d_2 = D - FP$

Προσέγγιση λεπτού φακού:



$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{D - FP} = \frac{1}{f_{\text{corrective}}} = P_{\text{corrective}}$$

$$f_{\text{corrective}} = D - FP$$

Γυαλιά: $P_{\text{corrective}} = 1/f_{\text{corrective}} = -1.93 \text{ D}$

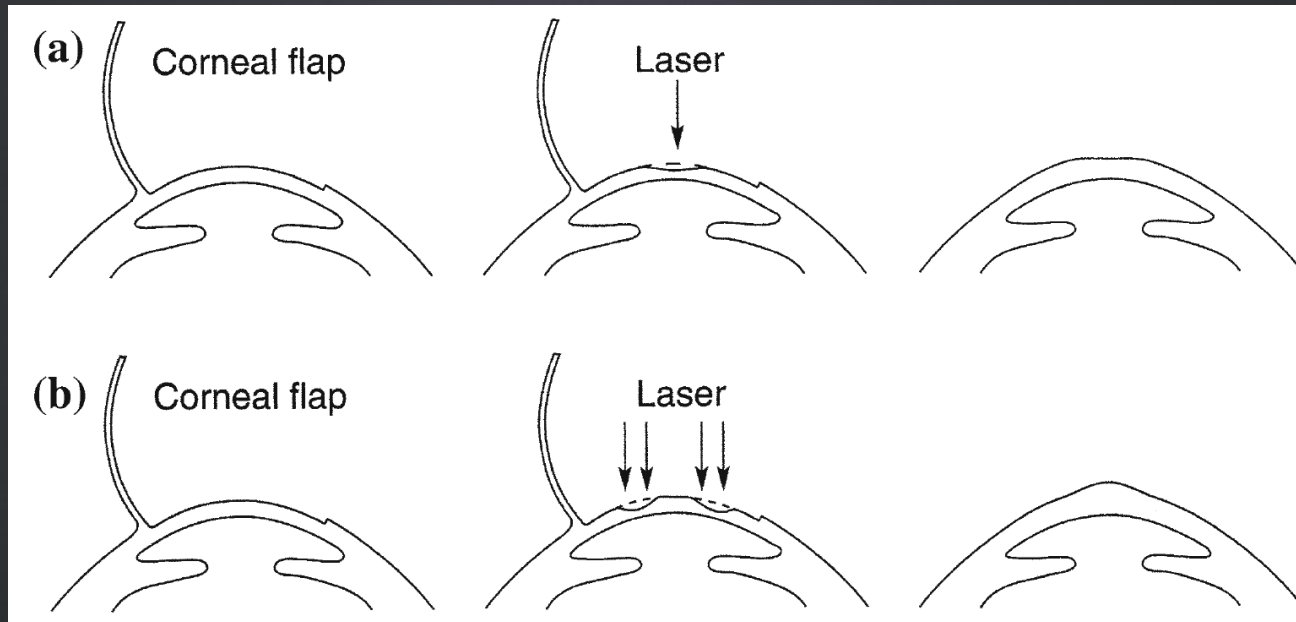
Φακοί επαφής: $D=0$, επομένως: $P_{\text{corrective}} = -1.89 \text{ D}$

Χειρουργική επέμβαση LASIK

Μέθοδος LASIK για διόρθωση μυωπίας ή υπερμετροπίας

Διαμόρφωση (σμίλευση) της επιφάνειας του κερατοειδούς με λέιζερ για μείωση (μυωπία) ή αύξηση (υπερμετροπία) της καμπυλότητάς του. Δηλ, μεταβάλλουμε την διαθλαστική ισχύ του οφθαλμού

Μυωπία



Πιο επίπεδος
κερατοειδής
χιτώνας

Υπερμετροπία

Πιο
καμπύλος
κερατοειδής
χιτώνας

Υπενθύμιση - Highlights

- ▶ Το φαινόμενο της διάθλασης
- ▶ Δείκτης διάθλασης: τι είναι και από τι εξαρτάται, μονάδες μέτρησης??
- ▶ Εστιακή απόσταση, συγκλίνοντες και αποκλίνοντες φακοί
- ▶ Διαθλαστική ισχύς: τι είναι, από τι εξαρτάται και μονάδες μέτρησης
- ▶ Διάθλαση στον οφθαλμό
- ▶ Ραβδία, κωνία
- ▶ Near Point και Far Point
- ▶ Προσαρμογή
- ▶ Μυωπία, υπερμετρωπία: πού οφείλονται, διόρθωση με φακούς και LASIK

Βιβλιογραφία

- ▶ Irving Herman, “Chapter 11: Light, eyes and vision”, in “Physics of the Human Body”, 2nd edition, Springer, 2016.
Διαθέσιμο δωρεάν στο:
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-23932-3>
- ▶ Joseph Feher, “Chapter 4.8: Vision” in “Quantitative Human Physiology”, 2nd Edition, Academic Press, 2017