

5. Όραση και Οπτικό Σύστημα Οφθαλμού

Κατανοώντας ένα Πολύπλοκο Σύστημα

Η όραση, η κυρίαρχη αίσθηση στον άνθρωπο, περιλαμβάνει αντίληψη και επεξεργασία οπτικής πληροφορίας από το περιβάλλον, σε μήκη κύματος -φάσμα ορατού φωτός- στα οποία είναι ευαίσθητο το αισθητήριο όργανο της όρασης, ο οφθαλμός.

Αν και στην Ελληνική χρησιμοποιείται μόνο η λέξη όραση, η αγγλική γλώσσα χρησιμοποιεί τις λέξεις *vision* και *sight*. Η λέξη *vision* (λατινικά *visio*), ξεπερνά σε περιεχόμενο τη λέξη *sight*, μιας σχετίζεται κάπως περισσότερο με τη συνολική διαδικασία αντίληψης και ερμηνείας αυτών που βλέπουμε, ενώ η *sight* σχετίζεται με τη μηχανιστική της αντίληψης, και όχι της ερμηνείας αυτών που βλέπουμε.

Θα λέγαμε ότι το *vision* είναι ανθρώπινο, ενώ το *sight* μηχανικό. Αρκετές φορές η ίδια η λέξη *vision* αναφέρεται στην ικανότητα του ανθρώπου όχι απλώς να 'δει' κάποια πράγματα, αλλά να διαπιστώσει, πέρα από αυτά, το νόημά τους. Ο μηχανικός 'άνθρωπος' είναι πιθανό να αποκτήσει τέλεια μηχανιστική όραση. Ο άνθρωπος όμως 'βλέπει' κάτι παραπάνω, ακόμα και με την μη τέλεια όρασή του.

Το απλούστερο πρότυπο του ανθρώπινου οφθαλμού είναι ένας συγκλίνων φακός με αυτορρυθμιζόμενη εστιακή απόσταση, ο οποίος δημιουργεί ένα είδωλο στην επιφάνεια του αμφιβληστροειδή χιτώνα, όπου βρίσκονται τα φωτοευαίσθητα στοιχεία του οφθαλμού.

Δεν ξεχνάμε όμως ότι ο οφθαλμός είναι ένα βιολογικό σύστημα, υπόκειται σε εξέλιξη με το χρόνο και φθορά (γήρανση), η οποία επηρεάζει σημαντικά την οπτική του απόδοση. Επιπλέον, το 'πόσο καλά βλέπουμε' είναι ένα συνδυαστικό αποτέλεσμα των οπτικών ικανοτήτων και των δύο οφθαλμών, που περιλαμβάνουν σημαντικά στοιχεία νευροφυσιολογικής λειτουργίας.

5.1. Η Λειτουργία της Όρασης

Η βασική λειτουργία ενός αισθητήριου οργάνου της όρασης είναι η αντίδραση στο οπτικό ερέθισμα. Σε αρκετά έμβια όντα με χαμηλό βαθμό ανάπτυξης, το (ή τα) αισθητήρια όργανα της 'όρασης' περιορίζονται μόνο στην αντίληψη της ύπαρξης ή όχι του φωτός. Το μόνο που απαιτείται γι' αυτό είναι μια νευρική απόληξη (*eyespot*), ευαίσθητη στην ύπαρξη φωτός. Ένα πιο σύνθετο όργανο όρασης αντιλαμβάνεται πληροφορίες για τη μορφή των αντικειμένων, το σχήμα τους, τη θέση τους, την κίνησή τους, κλπ. Βασική προϋπόθεση είναι η ύπαρξη περισσότερων φωτοευαίσθητων νευρικών απολήξεων. Όσο μεγάλο είναι το πλήθος τους, τόσο περισσότερο διαφορετικούς σχηματισμούς φωτός μπορεί το όργανο αυτό να αντιληφθεί. Στα ασπόνδυλα ζώα αυτό γίνεται χωρίς κάποια διαθλαστική επεξεργασία του οπτικού σήματος, ενώ στα σπονδυλωτά προηγείται μια διαθλαστική επεξεργασία, δηλαδή η δημιουργία ειδώλου.

Στα έντομα, πάλι, το αισθητήριο 'όργανο' δεν είναι ένα, αλλά πολλά, πάρα πολλά, και μιλάμε για **σύνθετο οφθαλμό** (*compound eye*). Σχεδόν κάθε μία νευρική απόληξη συνοδεύεται και από ένα 'μάτι' που μορφοποιεί το προσπίπτον φως, και είναι δυνατό να αντιληφθεί ακόμα και την κατάσταση πόλωσής του. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι ευαίσθητο μόνο σε 'κινούμενα' αντικείμενα, μιας και αυτά μόνο ενδιαφέρουν.

Στα θηλαστικά συναντάμε 'μόνο' δύο οφθαλμούς (*vertebrate eye*), αλλά με σημαντικά πολύπλοκη λειτουργία. Ο κάθε ένας οφθαλμός έχει μία 'είσοδο' από τον εξωτερικό κόσμο, αλλά ένα πολύ μεγάλο αριθμό φωτοαισθητήρων, με μία 'έξοδο' προς τον εγκέφαλο, τον τελικό επεξεργαστή του οπτικού ερεθίσματος.

5.1.1. Ιστορική Εξέλιξη των Γνώσεών μας για την Όραση

Στο ερώτημα 'πώς βλέπουμε' δόθηκαν πολλές και αντιφατικές μεταξύ τους ερμηνείες. Οι Έλληνες φιλόσοφοι συσχέτισαν την όραση με κάποια ιδιαίτερη ικανότητα του οφθαλμού να στέλνει προς τα έξω 'ακτίνες', οι οποίες με τη σειρά τους καθιστούσαν τα αντικείμενα 'ορατά'. Αν και ήταν γνωστή με καλή ακρίβεια η δομή του ματιού, δεν είχε γίνει κατανοητή η βασική του λειτουργία, ο σχηματισμός ειδώλων. Έτσι δεν εξηγήθηκε το γιατί αυτή η ιδιότητα του οφθαλμού να στέλνει προς τα έξω ακτίνες ...εξανεμιζόταν τόσο πολύ τη νύχτα.

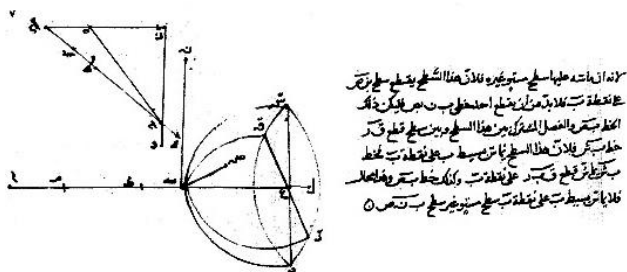
Ο Πλάτωνας, ο κύριος υπεύθυνος της θεωρίας αυτής υποστήριζε ότι κάτι σαν 'οπτική αύρα' έβγαινε από τα μάτια για να συναντήσει την 'αύρα' των αντικειμένων. Ο μαθητής του, Αριστοτέλης, ήταν αντίθετος σε αυτή την ιδέα, καθώς έλεγε ότι αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, θα έπρεπε να βλέπαμε και τη νύχτα. Ο Πλάτωνας σχεδόν απέφυγε αυτό το εμπόδιο, ανταπαντώντας ότι η αύρα αυτή εξασθενίζει στο σκοτάδι. Για να κάνει πιο ...πικάντικη τη θεωρία του, πρόσθεσε ότι αυτό το φαινόμενο ελαττώνει την κίνηση των οφθαλμών και προκαλεί υπνηλία.

Ο Αριστοτέλης έφθασε πολύ κοντά στο να προτείνει μια βιώσιμη θεωρία για την όραση, ωστόσο θα αγνοηθεί για χίλια και πλέον χρόνια μέχρι την εποχή του *Alhazen*. Ήταν ο πρώτος που υποστήριξε ότι τα αντικείμενα εκπέμπουν 'κάτι' που επενεργεί στην αίσθηση της όρασης. Ενδιαφέρον είναι και το γεγονός ότι υποστήριξε ότι τα μάτια υφίστανται όσο υπάρχει ζωή:

"Όταν παύσει η όραση, ο οφθαλμός δεν είναι πλέον οφθαλμός παρά μόνο στο όνομα, και οι οφθαλμοί δεν διαφέρουν πια από τους οφθαλμούς αγαλμάτων"

Ο Ευκλείδης ήταν επίσης ένας μελετητής της οπτικής. Εκτός από το ότι έβαλε τα θεμέλια της ομώνυμης γεωμετρίας, περιέγραψε για πρώτη φορά ότι το φως, ή ό,τι ο αρχαίος κόσμος θεωρούσε ως φως, ταξιδεύει σε ευθείες γραμμές. Έφτασε ακόμα και να κάνει σχεδιαγράμματα της ‘πράξης της όρασης’. Το πρόβλημα ήταν ότι, επηρεασμένος από τον Πλάτωνα, σχεδίασε τις πορείες ακτίνων ανάποδα, δηλαδή από και όχι προς τον οφθαλμό, αλλά κατά τα άλλα παραλίγο να επινοήσει την πρώτη σχηματική απεικόνιση αντικειμένου - ειδώλου.

Ο *Alhazen* ήταν αυτός που ανέλαβε να προωθήσει την επιστήμη ενώ η Ευρώπη βρισκόταν στο Μεσαίωνα. Το έργο του, ‘*Book of Optics*’ (*Kitab al-Manazir, De Aspectibus*) αποτελούμενο από επτά τόμους, επηρέασε πολλούς Ευρωπαίους επιστήμονες, όπως οι *Kepler* και *Bacon*. Στο βιβλίο αυτό, που θεωρείται ισάξιο σε ό,τι αφορά στην επίδρασή του στην επιστημονική σκέψη με το *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* του *Isaac Newton*, παρουσιάζεται η πρώτη ανατροπή της Πλατωνικής αντίληψης για το φως. Ανάλογο είναι και το έργο του ‘*Risala fi l-Daw*’ (*Treatise on Light*). Πρώτος μετά τον Αριστοτέλη, ο *Alhazen* υποστήριξε ότι τα μάτια δέχονται και δεν εκπέμπουν ακτίνες. Κατάλαβε ότι η όραση έχει τη βάση της στον εγκέφαλο και ότι ο οφθαλμός ήταν ένα ‘απλό’ αισθητήριο όργανο και όχι το σημείο που ‘συμβαίνει’ η όραση, αλλά έκανε ένα σημαντικό λάθος: θεώρησε ότι ο κρυσταλλοειδής φακός είναι το σημείο όπου γίνεται η φωτοϋποδοχή στον οφθαλμό.



Σχήμα 5-1-1: Σχεδιάγραμμα διάθλασης σε σφαιρικό δίοπτρο, δια χειρός Alhazen.

Στον *Alhazen* μπορεί να πιστωθεί επίσης¹ η ανακάλυψη της *camera obscura*. Αν και φαίνεται απλοϊκή, η ανακάλυψη αυτή είναι ουσιαστικά η πηγή όλης της οπτικής που ακολούθησε τους επόμενους αιώνες. Για πρώτη φορά ο άνθρωπος μπορούσε να μελετήσει την πορεία του φωτός και να κάνει βάσιμες εικασίες για τη συμπεριφορά του. Όλη η σημερινή Οπτική, από τη μελέτη του οφθαλμού μέχρι το τηλεσκόπιο *Hubble*, έχει εδώ την καταγωγή της.

Στη Δύση, για πολλούς αιώνες το ‘*Perspectiva*’ (1270), του Πολωνού *Vitellio* (*Witelo of Silesia*), ήταν το ‘κλασικό’ βιβλίο στην Οπτική. Η Οπτική στα μεσαιωνικά χρόνια ήταν ένα μέρος της ...προοπτικής. Για πολύ καιρό μείναμε εκεί.

Ο επόμενος που θα συμβάλλει σε σημαντικό βαθμό στη μελέτη της όρασης είναι ο *Leonardo*, γιος του *Piero*, από το *Vinci* της Ιταλίας -ο γνωστός μας *Leonardo da Vinci* (1452-1519). Ασχολήθηκε με τόσα θέματα, που ως καλλιτέχνης θα ήταν απίθανο να μην του είχε κεντρίσει την περιέργεια η αίσθηση της όρασης...

¹ H. Salih, M. Al-Amri, and M. El Gomati, “The Miracle of Light,” *A World of Science* **3** (3) (2005).

Η ανθρωπότητα έχει να επιδείξει πολύ λίγους *Leonardo*. Η επιστημονική γνώση σήμερα έχει επεκταθεί σε τέτοιο εύρος και βαθμό, που κάποιος επιστήμονας μπορεί να ξοδέψει όλη του τη ζωή για να μάθει ένα μικρό μόνο τμήμα της. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η Ιατρική με τις ποικίλες ειδικότητές της, και η ειδικά Οφθαλμολογία έχει να επιδείξει αρκετές υποειδικότητες: υποειδικότητα κερατοειδή, αμφιβληστροειδή, παιδοοφθαλμολογία, νευροοφθαλμολογία, κτλ. Είναι σχεδόν ...εξωφρενικό το ότι ένας άνθρωπος κατάφερε να είναι ταυτόχρονα εξαιρετικός ζωγράφος, γλύπτης, μηχανολόγος μηχανικός, ανατόμος, μαθηματικός, μουσικός, πολιτικός μηχανικός και ερευνητής.

Ο *Leonardo*, εκτός από τα έργα τέχνης, δυστυχώς δεν άφησε βιβλία παρά διάσπαρτες σημειώσεις. Παρόλο που συχνά αναφέρεται και ως εφευρέτης, η αλήθεια είναι ότι δεν κατασκεύασε ποτέ κάποιες από τις μηχανές που σχεδίαζε. Ο λόγος είναι, και είναι χαρακτηριστικό της μεγαλοφυΐας του, το ότι τα σχέδια των μηχανών που έκανε (ανάμεσα σε αυτά, και ενός ελικοπτέρου -θυμηθείτε ότι μιλάμε για τον 15^ο αιώνα) δεν μπορούσαν να υλοποιηθούν παρά μόνο με την τεχνολογία του 20^{ου} αιώνα...

Στον *Leonardo* μπορούν να χρεωθούν αρκετές πρωτιές στην επιστήμη της όρασης. Προφανώς ορμώμενος από την έφεσή του στη ζωγραφική και τη γλυπτική, μελέτησε την υποκειμενικότητα της όρασης, και ανέφερε για το φαινόμενο του μειεικιάσματος (*afterimage*), όταν ο οφθαλμός παρατηρεί μια λαμπρή πηγή φωτός. Ασχολήθηκε επίσης με την αντίληψη του βάθους και της σχέσης της με την αντίθεση, το χρώμα και την προοπτική. Ήταν ο πρώτος που κατανόησε τη σχέση της *camera obscura* με την οπτική του οφθαλμού. Σχεδόν ανακάλυψε τη στερεοσκοπική όραση, όταν ανέφερε για τη 'διαφάνεια' των κοντινών αντικειμένων όταν παρατηρούνται και από τα δύο μάτια μαζί. Τέλος, κατανόησε ότι υπάρχουν σαφείς διαφορές ανάμεσα στην ικανότητα αντίληψης μεταξύ κεντρικής και περιφερειακής όρασης.

Όπως και στις μηχανές που σχεδίαζε, ήταν αρκετούς αιώνες πιο μπροστά από την εποχή του, καθώς η αντίληψη της όρασης θα αρχίσει να ερευνάται ξανά μόλις τον 19^ο αιώνα από τον *Helmholtz*. Επίσης πίστευε (χρησιμοποιώντας τις αρχές της *camera obscura*) ότι η αίσθηση της όρασης είχε την 'πηγή' της στον αμφιβληστροειδή και όχι στον κρυσταλλοειδή φακό. Καθώς όμως δεν μπορούσε να κατανοήσει την εγκεφαλική αναστροφή της εικόνας, πίστευε ότι το είδωλο μέσα στον οφθαλμό σε κάποιο σημείο του υπόκειται σε μια ακόμα αναστροφή.

Ο *Francesco Maurolico* (1494-1577) πίστευε όπως και ο *Leonardo* ότι η βάση της όρασης δεν βρισκόταν στον κρυσταλλοειδή φακό αλλά στον αμφιβληστροειδή. Δική του ήταν η πρώτη, κονδροειδής έστω, εξήγηση της μυωπίας και της υπερμετρωπίας. Υποστήριξε ότι η αιτία της πρώτης είναι η αυξημένη κύρτωση του κρυσταλλοειδή φακού ενώ της δεύτερης η μειωμένη κύρτωσή της.

Στη συνέχεια έγινε μια εκπληκτική ανακάλυψη: Ο *Giovanni Battista della Porta* (1535?-1615) ανακάλυψε ότι το είδωλο της *camera obscura* βελτιώνεται εντυπωσιακά σε ευκρίνεια και φωτεινότητα αν στην οπή τοποθετηθεί ένας συγκλίνων φακός. Στις αρχές του 17^{ου} αιώνα οι αστρονομικές, κυρίως, αναζητήσεις των *Galileo Galilei* και *Johannes Kepler* έδωσαν το έναυσμα για σημαντικές ανακαλύψεις στην Οπτική.

Ο *Kepler* τολμά, το 1604, να αναθεωρήσει τα 'δεδομένα' με το βιβλίο του '*Ad Vitellionem Paralipomena, Quibus Astronomiae Pars Optica Traditur*', όπου γράφει γι' αυτά που ...παρέλειψε ο *Witelo*, δηλαδή την οπτική πλευρά της

Αστρονομίας. Ο *Kepler* επαναφέρει την πρόταση του *Alhazen*, ότι η όραση είναι αποτέλεσμα σύλληψης εικόνων και σχηματισμού ειδώλων από τον οφθαλμό. Η πρόταση αυτή τάρραξε τα λιμνάζοντα νερά.



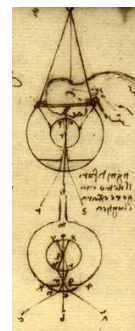
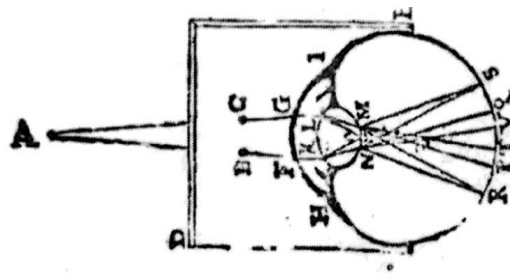
Σχήμα 5-1-2: Διαγράμματα οφθαλμικής ανατομίας, δια χειρός Kepler.



Leonardo da Vinci (1452-1519), Witelo of Silecia (1230-1174), και Christophorus Scheiner (1591-1595).

Ο *Christophorus Scheiner*, μαθητής του *Kepler* πίστεψε στην άποψη του *Kepler*, και προχώρησε ένα βήμα παρακάτω: αποφάσισε να την αποδείξει. Αφαίρεσε ένα μικρό τμήμα αδιαφανούς ιστού από το πίσω μέρος ενός ματιού, αποκαλύπτοντας τον αμφιβληστροειδή. Είδε, έτσι, τα μικροσκοπικά και αντεστραμμένα είδωλα, όπως είναι πολύ πιο εύκολο να κάνουμε σήμερα με ένα πρόπλασμα ματιού.

OCULUS
 HOC EST
 FUNDAMENTUM OPTICUM,
 IN QUO
 EX ACCURATA OCULI
 ANATOMIE, ABSTRUSARUM
 EXPERIENTIARUM SEDULA
 PERQUISITIO, ET OPTICAE THEORIE
 ENDOPTICAE ET EXOPTICAE, NEC
 NON OPTICAE ANATOMIAE
 RADIUS VISUALIS BRACHIIQUE
 SUA VISIONI IN OCULO SEDES
 DECURSUS
 ANGULI VISORII INGENIUM
 APERTURAE
 DIFFICULTATES PRAECLARE SOLVIT, INVENIENSQUE
 VERITATEM. Adhuc abstrusius etiam in oculi structure: sicut
 experimentis et observationibus hactenus hactenus non
 detectis, sicut abstrusius, prout in oculi parte
 dicitur, sicut in oculi parte dicitur, prout in
 parte dicitur, sicut in oculi parte dicitur.
 AUCTORE
 CHRISTOPHO RO. SCHEINER,
 SOC. JESU.
 L. O P P O R T I
 Koenigsbergi, apud Johannem J. G.
 M. DCCLXIX.



Σχήμα 5-1-3: (α) Το βιβλίο του Scheiner, 'Oculus', (β) σχεδιάγραμμα για τη δημιουργία ειδώλων στον οφθαλμό, και (γ) σχεδιάγραμμα εξουδετέρωσης της οπτικής ισχύος του κερατοειδή με εμβύθιση της κεφαλής σε νερό, δια χειρός Leonardo.

Το βιβλίο του *Scheiner*, '*Oculus hoc est fundamentum opticum*' (1619) αποτελεί την πρώτη γνωστή καταγραφή αυτών των παρατηρήσεων της ανατομίας του οφθαλμού, και μπορεί να θεωρηθεί ως η 'Γένεσις' της Οφθαλμολογίας. Από τη λατινική λέξη **oculus** έχει επιβιώσει σήμερα το επίθετο *ocular* = *οφθαλμικός, των οφθαλμών*. Ο *Scheiner* προσδιόρισε την ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδή, και γενικότερα τη διαθλαστική ισχύ του οφθαλμού, δείκτες διάθλασης κλπ. Ανακάλυψε τη ρινική έξοδο του οπτικού νεύρου, κατανόησε την προσαρ-

μογή του κρυσταλλοειδή φακού με αλλαγή της καμπυλότητάς του (§ 3.2.3, 5.3.2.), τη συστολή και διαστολή της κόρης με το φως, την αμειρωπία, το στενοπικό φαινόμενο, περιέγραψε τον καταρράκτη και τη θεραπεία του, τη γωνία όρασης, και τόσα άλλα.

Βασικός Μηχανισμός της Όρασης

Η λειτουργία της όρασης αρχίζει καθώς το φως εισέρχεται στο μάτι μας από το 'αντικείμενο', από το οποίο το φως ανακλάται, σκεδάζεται, ή εκπέμπεται.

Η συνδυασμένη διαθλαστική δράση των διαφόρων στοιχείων του οφθαλμού (κυρίως κερατοειδής χιτώνας και κρυσταλλοειδής φακός) σχηματίζει το είδωλο στο τοίχωμα του αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Η αλληλεπίδραση του 'ειδώλου', δηλαδή της κατανομής του φωτός (είδος και πλήθος φωτονίων) με τους φωτοϋποδοχείς στον αμφιβληστροειδή (ραβδία και κωνία) δημιουργούν τα αντίστοιχα ερεθίσματα που μεταφέρονται στον εγκέφαλο με το οπτικό νεύρο για επεξεργασία και ερμηνεία.

Σταδιακά οι γνώσεις μας για τη λειτουργία της όρασης εμπλουτίστηκαν. Στο βιβλίο του *Johannes Müller 'Zur vergleichenden Physiologie des Gesichtssinnes'* (Συγκριτική Φυσιολογία της Οπτικής Αίσθησης, Λειψία, 1826), συναντάμε ένα εξαιρετικά λεπτομερές σχεδιάγραμμα του οφθαλμού.

Ένας από τους πιο μεθοδικούς ερευνητές της ανατομίας του οφθαλμού και της λειτουργίας της όρασης θεωρείται ο Γερμανός Οφθαλμίατρος *Hermann von Helmholtz* (1821–1894). Για τον *Helmholtz* στην εγκυκλοπαίδεια *Britannica* που κυκλοφόρησε το 1911, αναφέρεται ότι 'η ζωή του ήταν αφιερωμένη στην επιστήμη και πρέπει να θεωρείται ως ένας από τους αξιότερους του 19^{ου} αιώνα'.

Πράγματι, ο *Helmholtz* δεν άφησε σχεδόν τίποτα ανεξερεύνητο. Εργάστηκε πάνω στην οπτική του οφθαλμού, στη λειτουργία της όρασης, στην αντίληψη του χώρου και της κίνησης, στη λειτουργία της προσαρμογής, στην έγχρωμη όραση, στην αντίληψη του ήχου και στην ανάπτυξη της εμπειρίας από τις αισθήσεις. Στη Φυσική ασχολήθηκε επίσης με τις δυνάμεις, τη θερμοδυναμική και την ηλεκτροδυναμική, ενώ μελέτησε και τη φιλοσοφία της επιστήμης και το ρόλο της στην ανάπτυξη του πολιτισμού.

Το μεγαλύτερο χρέος που οφείλει η οφθαλμολογία στον *Helmholtz* είναι αναμφισβήτητα η εφεύρεση του οφθαλμοσκοπίου (§ 10.4.1.). Ανάλογα σημαντικό ήταν και το βιβλίο του, *'Handbuch der Physiologischen Optik'*, το οποίο ήταν το κείμενο αναφοράς του χώρου μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα.

Ο *Helmholtz* λοιπόν χαρακτήρισε τον οφθαλμό ως τη ...χειρότερη ίσως κάμερα του κόσμου. Λέγεται ότι είπε κατά τη διάρκεια μιας διάλεξης:

'Nun ist es nicht zuviel gesagt, dass ich einem Optiker gegenüber, der mir ein Instrument verkaufen wollte, welches die letztgenannten Fehler hätte, mich vollkommen berechtigt glauben würde, die härtesten Ausdrücke über die Nachlässigkeit seiner Arbeit zu gebrauchen und ihm sein Instrument mit Protest zurückzugeben. In Bezug auf meine Augen werde ich freilich letzteres nicht thun, sondern im Gegentheil froh sein, sie mit ihren Fehlern möglichst lange behalten zu dürfen.'

και σε ελεύθερη μετάφραση:

‘Αν ένας οπτικός ήθελε να μου πουλήσει ένα όργανο με τόσο πολλά ελαττώματα, θα θεωρούσα τον εαυτό μου δικαιολογημένο να τον κατηγορήσω για μεγάλη απροσεξία, και θα το επέστρεφα. Φυσικά, δεν θα επέστρεφα στο Δημιουργό τα μάτια μου, και είμαι ευτυχής να τα κρατήσω για όσο καιρό μπορώ, παρά τα όποια ελαττώματά τους.’



Hermann von Helmholtz (1821–1894), και δεξιά σε αναμνηστικό γραμματόσημο.

Ο *Helmholtz* έχει, σε κάποιο βαθμό, δίκιο. Πρέπει να γίνει κατανοητό ότι υπάρχουν περιορισμοί στην ανθρώπινη όραση. Δεν υπάρχει ‘τέλειο’ στην όραση -και ίσως δεν πρέπει να υπάρχει. Τόσο η φυσιολογική όραση, αλλά και η υπερόραση, υπόκεινται σε περιορισμούς.

Παράγοντες που Επηρεάζουν την Ποιότητα της Όρασης

Τρεις παράγοντες είναι σημαντικοί στον καθορισμό της ποιότητας της όρασης:

- το πόσο ευκρινές είναι το είδωλο που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή, δηλαδή η επίδραση των σφαλμάτων και σκέδασης,
- το πόσο μικρό είναι το μικρότερο σημειακό είδωλο, δηλαδή η επίδραση της περίθλασης, και
- το πόσο καλά γίνεται αντιληπτό το είδωλο από τους αισθητήρες, δηλαδή η επίδραση της δειγματοληψίας.

Οι περιορισμοί στην ποιότητα της όρασης προέρχονται από παράγοντες τους οποίους θα γνωρίσουμε με λεπτομέρεια στο επόμενο κεφάλαιο και επηρεάζουν το πόσο ευκρινές είναι το είδωλο που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή. Τέτοιοι παράγοντες είναι οι διαθλαστικές αποκλίσεις του οπτικού συστήματος, δηλαδή τα σφάλματα, αλλά και η ίδια η κυματική φύση του φωτός, που μέσω του φαινομένου της περίθλασης καθορίζει το πόσο ‘μικρό’ είναι ένα υποτιθέμενο ‘σημείο’ στο εστιακό επίπεδο. Αυτό σχετίζεται με την περίθλαση από το ‘κυκλικό άνοιγμα’, το οποίο αντιπροσωπεύει η κόρη του ματιού.

Οι αισθητήρες του οφθαλμού είναι τα κωνία και τα ραβδία. Το πόσο καλά γίνεται αντιληπτό το είδωλο σχετίζεται με την πυκνότητα και την ευαισθησία τους. Η διαδικασία ανίχνευσης του ειδώλου είναι μια ‘δειγματοληψία’ πληροφοριών από τους φωτοϋποδοχείς, και αυτό επιβάλλει ένα ακόμα περιορισμό στο ‘πόσο καλά βλέπουμε’.

Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν το ‘οπτικό’ μέρος της όρασης. Ασφαλώς, η όραση δεν είναι μόνο οπτική (§ 5.1.3). Το ‘πόσο καλά βλέπουμε’ επηρεάζεται και από μια σειρά από άλλους παράγοντες, στους οποίους εμπλέκεται η νευροφυσιολογία του οφθαλμού και η διόφθαλμη όραση. Τέτοιοι παράγοντες είναι το πώς μεταδίδεται το οπτικό σήμα στον οφθαλμό, αλλά και το πώς επεξεργάζεται

και ερμηνεύεται η πληροφορία από τον εγκέφαλο. Θα υποθέσουμε ότι η λειτουργία των άλλων παραγόντων είναι απόλυτα εξισορροπημένη και ότι δεν επηρεάζουν, ούτε επηρεάζονται από τη λειτουργία των 'οπτικών' παραγόντων.

Εδώ μελετάμε μόνο τους καθαρά 'οπτικούς' παράγοντες για να κατανοήσουμε το μηχανισμό της όρασης και άρα, τι μπορούμε να βελτιώσουμε ώστε να πετύχουμε την όσο το δυνατό καλύτερη όραση, και -γιατί όχι;- την υπερόραση.

5.1.2. Οφθαλμός και Φωτογραφική Μηχανή

Ένα 'μηχανικό' ανάλογο της λειτουργίας του οφθαλμού είναι η φωτογραφική μηχανή. Και τα δύο δέχονται ακτίνες από το αντικείμενο, και με τη διαθλαστική δράση των οπτικών στοιχείων τους σχηματίζουν ένα ευκρινές είδωλο, το οποίο γίνεται αντιληπτό από φωτοευαίσθητα στοιχεία. Και τα δύο διαθέτουν μηχανισμούς φωτομέτρησης, και 'μηχανικά' μέρη ελέγχου της φωτεινής ροής προς τα φωτοευαίσθητα στοιχεία.

Επίσης και τα δύο διαθέτουν μηχανισμούς μεταβολής της εστιακής απόστασης, ώστε από αντικείμενα σε διαφορετικές αποστάσεις να σχηματιστεί είδωλο στη συγκεκριμένη θέση του φωτοισθητήρα. Στη φωτογραφική μηχανή αυτό γίνεται με μετακίνηση διαθλαστικών στοιχείων κατά μήκος του οπτικού άξονα. Στον οφθαλμό επειδή δεν είναι δυνατό να μετακινηθούν τα διαθλαστικά στοιχεία του, η αύξηση της διαθλαστικής ισχύος επιτυγχάνεται με αύξηση της καμπυλότητας στις επιφάνειες του κρυσταλλοειδή φακού.

Είναι γνωστό σε όσους ασχολούνται συνειδητά με τη φωτογραφία, το πόσο σημαντικό είναι τόσο η ποιότητα του φακού, αλλά και η ποιότητα του φιλμ.

Στα χαρακτηριστικά ενός καλού φακού συγκαταλέγονται το πόσο φως συλλέγει και το ποια είναι η διακριτική του ικανότητα, δηλαδή το πόσο μικρά είναι τα 'σημεία' που υποτίθεται ότι σχηματίζει στο είδωλο, και αυτό εκφράζεται, μεταξύ άλλων, από τον αριθμό $F\#$ και το μήκος κύματος. Ένας καλός φακός μπορεί να έχει αριθμητικό άνοιγμα $F\#$ ή $f/1.4$ (§ 3.3.3). Όσο μικρότερο είναι το αριθμητικό άνοιγμα, τόσο καλύτερα, και ο φακός λέγεται 'γρήγορος', μιας και επιτρέπει τη λήψη φωτογραφιών με μικρή χρονοέκθεση (π.χ. $1/2000 \text{ sec}$).

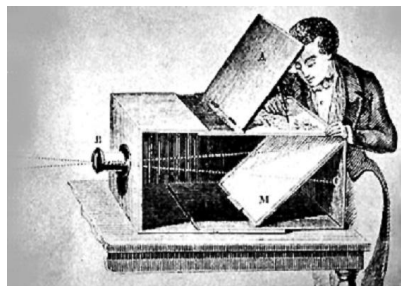
Ένα καλό φιλμ χαρακτηρίζεται από το πόσο ευαίσθητο είναι στο φως, τη γραμμικότητά του -αναλογικότητα καταγραφής προς φωτεινή ένταση- αλλά, κυρίως, το πόσο καλά μπορεί να καταγράψει τις λεπτομέρειες από το σχηματισμένο είδωλο. Αυτά περιγράφονται από τον αριθμό ASA ή ISO 50 (όσο μικρότερο, τόσο καλύτερα). Ένας μικρός αριθμός ISO εκφράζει μικρό μέγεθος κρυστάλλων αλάτων αργύρου, και, αντίστοιχα, μεγάλη πυκνότητα. Λόγω του μικρού τους μεγέθους είναι λιγότερο εύκολο να ξεκινήσουν τη φωτοχημική αντίδραση, άρα απαιτούν μεγάλη ποσότητα φωτός, δηλαδή 'γρήγορους' φακούς ή μεγάλη χρονοέκθεση. Ταυτόχρονα όμως, η μεγάλη πυκνότητά τους επιτρέπει την καταγραφή πολύ μικρών λεπτομερειών από το είδωλο.

Αντίστοιχα, σε μια ψηφιακή μηχανή είναι σημαντικό η φωτοευαίσθητη επιφάνεια να έχει καλή απόκριση στο φως (ISO *equivalent*) αλλά και να υπάρχει μεγάλη πυκνότητα φωτοϋποδοχέων. Το τελευταίο συνήθως αναφέρεται ως συνολικός αριθμός ενεργών στοιχείων (*pixels, picture elements*), όπως για παράδειγμα τα 10×10^6 (*megapixel*) της Nikon D200, με φωτοευαίσθητη επιφάνεια που συγκροτείται από 3872 στήλες \times 2592 σειρές στοιχείων.

Οι ‘φωτογραφικές’ μηχανές στα διάφορα κινητά τηλέφωνα, έχουν εξαιρετικά μικρούς ‘φακούς’, με τόσα σφάλματα που ο *Helmholtz* θα τους επέστρεφε αμέσως, χωρίς συζήτηση. Μας διαφημίζουν όμως, συνεχώς, τα εκατομμύρια των *pixels* που έχει κάθε μηχανή. Τι να το κάνουμε να καταγράψουμε με αυξημένη λεπτομέρεια ένα κακό, κάκιστο είδωλο; Η αύξηση της δειγματοληπτικής ικανότητας, όπως εκφράζεται με τα μεγαλύτερο πλήθος *megapixel*, έχει νόημα μόνο όταν συνοδεύεται από αυξημένη διακριτική ικανότητα των οπτικών στοιχείων, κάτι που δεν συμβαίνει συχνά.

οφθαλμός	φωτογραφική μηχανή	λειτουργία
κερατοειδής χιτώνας και κρυσταλλοειδής φακός	σύνθετος φακός	εστίαση φωτός, δημιουργία ειδώλου
προσαρμογή	μηχανισμός αυτόματης εστίασης	εστίαση για αντικείμενα σε διαφορετικές αποστάσεις
αμφιβληστροειδής	κλασικό φιλμ CCD ή CMOS στις ψηφιακές μηχανές	σύλληψη και καταγραφή ειδώλου, μετατροπή φωτονίων σε ηλεκτρικό σήμα
κωνία και ραβδία	άλατα αργύρου (φιλμ) ημιαγωγικά στοιχεία (<i>pixel</i>) στις ψηφιακές μηχανές	καταγραφή ειδώλου
ίριδα	διάφραγμα	έλεγχος φωτεινότητας ειδώλου, βάθους πεδίου, περίθλασης, σφαλμάτων
μελαχρωστικό επιθήλιο	μαύρο εσωτερικό κάμερας	ελαχιστοποίηση εσωτερικής ανάκλασης και σκέδασης
προσαρμογή στο φως	ISO	αλλαγή ευαισθησίας στη φωτεινότητα ειδώλου

Πίνακας 5-1-1: Σύγκριση φωτογραφικής μηχανής και οφθαλμού.



Σχήμα 5-1-4: Camera Obscura: μια φωτογραφική κάμερα της -πολύ- παλιάς εποχής.

Συγκρίνοντας τον οφθαλμό με μια φωτογραφική μηχανή, μπορούμε να αναφέρουμε τα παρακάτω ως 'μειονεκτήματα' του οφθαλμού:

Υπάρχει περιορισμός στο εύρος 'συχνοτήτων' στα οποία ο οφθαλμός είναι ευαίσθητος. Δεν είναι -κάθε άλλο- παράξενο που είναι ευαίσθητος 'μόνο' στο ορατό φως, και όχι μόνο αυτό, αλλά η μεγαλύτερη ευαισθησία είναι στο κίτρινο, που είναι το μέγιστο της εκπομπής του ηλιακού φωτός. Αντίθετα, υπάρχουν φωτογραφικά φιλμ και φωτονικοί αισθητήρες με ευαισθησία π.χ. στο υπέρυθρο.

Το μάτι έχει περιορισμένο μέγεθος τόσο σε αξονικό μήκος, όσο και σε διάφραγμα εισόδου. Αυτοί οι δύο παράγοντες επηρεάζουν τόσο το μέγιστο ποσό 'φωτός' που μπορεί να συλλέξει, όσο και το ελάχιστο μέγεθος ενός 'ιδανικά' σημειακού ειδώλου.

Με τον οφθαλμό αναγνωρίζουμε ένα νέο 'είδωλο' αρκετές φορές το δευτερόλεπτο, περίπου 10. Αυτό θέτει ένα όριο στο πόσο 'γρήγορα' μπορεί να αντιληφθεί μια κίνηση, αλλά μας επιτρέπει να απολαύσουμε τον ...κινηματογράφο. Ο εγκέφαλος 'διατηρεί' στη μνήμη μια εικόνα για περίπου $1/10$ sec, κι έτσι η γρήγορη αλληλοδιαδοχή εικόνων, περίπου 60 εικόνες το δευτερόλεπτο (*frames per second, fps*) δημιουργεί την αίσθηση της κίνησης. Δεν μας επιτρέπει όμως να κρατήσουμε τη διάρκεια συλλογής φωτός όσο μεγάλη θέλουμε, και έτσι να καταγράψουμε ένα πολύ ακνό οπτικό σήμα, κάτι που μπορούμε να κάνουμε με τη φωτογραφική μηχανή -πάνω σε τρίποδα, ασφαλώς,- κρατώντας το κλείστρο ανοικτό όσο επιθυμούμε.

Δεν μπορούμε να 'διατηρήσουμε' ακριβή αντίγραφα του ειδώλου για πολύ καιρό, παρά μόνο με τη διαδικασία της μνήμης. Με μια φωτογραφική μηχανή, αυτό είναι ιδιαίτερα εύκολο.

Και κάτι που έχει σημασία στο τι ακριβώς εννοούμε λέγοντας οπτική οξύτητα. Ο οφθαλμός έχει 'καλή' διακριτική ικανότητα μόνο σε μια μικρή, σχετικά, περιοχή στο 'κέντρο' της εικόνας. Για 'γωνίες' πάνω από 5° μιλάμε για **περιφερειακή όραση** (*peripheral vision*). Η πρόσφατη διαφήμιση με το γνωστό ποδοσφαιριστή *Ronaldinho*, που στέλνει τη μπάλα στο συμπαίκτη του κοιτάζοντας 'αλλού', είναι χαρακτηριστική. Κοιτάζουμε 'μπροστά', και για να αντιληφθούμε όσο το δυνατό καλύτερα τις λεπτομέρειες από ένα αντικείμενο, πρέπει ή να στρέψουμε τα μάτια μας προς το μέρος αυτό, ή ολόκληρο το κεφάλι μας. Ταυτόχρονα με τη οξεία όραση στο κέντρο, λαμβάνουμε πληροφορίες, κυρίως από αντικείμενα που κινούνται μέσα σε ένα ευρύτερο οπτικό πεδίο, δηλαδή για αρκετά μεγαλύτερες γωνίες τόσο κατακόρυφα, όσο και οριζόντια, αλλά με μικρότερη οξύτητα.

Ένα ευρύ πεδίο δεν είναι ταυτόχρονα ολόκληρο ορατό με την ίδια σαφήνεια, αλλά μας δίνεται αυτή η εντύπωση γιατί οι οφθαλμοί σαρώνουν ταχύτατα όλο το πεδίο. Αντίθετα, με μια φωτογραφική μηχανή τόσο η ποιότητα του σχηματιζόμενου ειδώλου, όσο και η 'σύλληψη' του έχουν μια αρκετά μεγαλύτερη ομοιογένεια σε ένα αρκετά ευρύτερο πεδίο.

5.1.3. Όραση δεν Είναι Μόνο Οπτική...

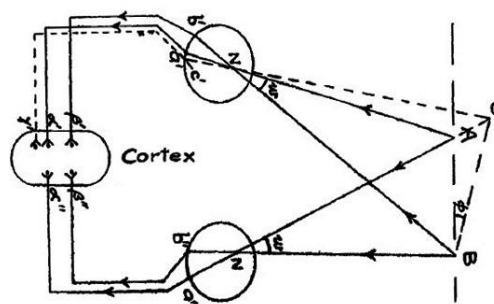
Με τη μετάδοση του οπτικού σήματος προς στον εγκέφαλο και την επεξεργασία του ασχολείται η νευροφυσιολογία. Η 'οπτική' σταματά εκεί που το σήμα καταγράφεται από τους φωτοϋποδοχείς και είναι 'έτοιμο' προς αποστολή.

Η επεξεργασία περιλαμβάνει ανάλυση των πληροφοριών που φέρει το οπτικό σήμα, και επιτρέπει στον εγκέφαλο να ερμηνεύει αυτό που 'βλέπει'. Για παράδειγμα, μπορεί να διακρίνει σχήματα που διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους, π.χ. σε μια λέξη, μια κάθετη γραμμή είναι 'μάλλον' το γράμμα **1**, ενώ σε μια αριθμητική σειρά, ο αριθμός **1**. Σε αυτό συμβάλλει και η οπτική μνήμη, επιτρέποντας τη συμπλήρωση των 'κενών' που ίσως υπάρχουν στο οπτικό σήμα.

Αρκετές από αυτές τις ικανότητες αναπτύσσονται και καλλιεργούνται σταδιακά από τη βρεφική ηλικία και έχουν μεγάλη σημασία στη μετέπειτα εξέλιξη της οπτικής δεξιότητας. Ένα παράδειγμα είναι η σωστή αντίληψη του χώρου. Τα είδωλα στον αμφιβληστροειδή είναι αντεστραμμένα (§ 4.2.2.), και όμως, είμαστε βέβαιοι για την 'ορθή' θέση των αντικειμένων. Αυτή η **εγκεφαλική αναστροφή του ειδώλου** είναι αποτέλεσμα εκπαίδευσης του εγκεφάλου, μια διαδικασία που ξεκινά από τη βρεφική ηλικία και στην οποία βοηθάει η αφή.

Με την **οπτοκινητική συνεργασία**, με τη βοήθεια των χεριών, το βρέφος 'εκπαιδεύει' τον εγκέφαλο διαπιστώνοντας κάθε φορά το λάθος, να ερμηνεύσει σωστά τα οπτικά σήματα, και έτσι να αντιληφθεί το αριστερά-δεξιά, πάνω-κάτω, εμπρός-πίσω. Σταδιακά, στην προσχολική ηλικία, η οπτοκινητική συνεργασία εξελίσσεται, και οι ρόλοι αντιστρέφονται: η όραση κατευθύνει την οριοθέτηση στο χώρο, την αντίληψη της σχετικής θέσης και του προσανατολισμού των αντικειμένων, και συνδέεται έτσι με την αίσθηση της ισορροπίας και της κίνησης.

Εκτός από λόγους 'ασφάλειας', η ύπαρξη δύο αισθητήριων οργάνων δίνει περισσότερες δυνατότητες από τη μονόφθαλμη όραση. Αν και κάθε μάτι λειτουργεί ανεξάρτητα, και σχηματίζει μια εικόνα από το γύρω χώρο, οι δύο εικόνες πρέπει, με σωστή **διόφθαλμη συνεργασία** (*binocular vision*), να επεξεργαστούν ένα τελικό οπτικό σήμα, μία πληροφορία.



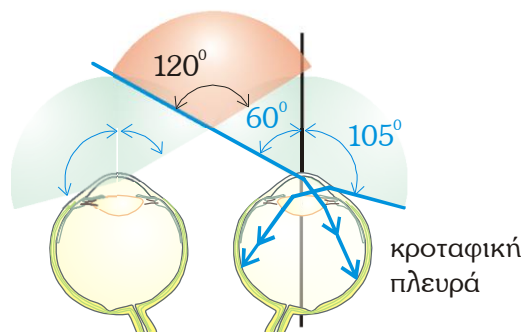
Σχήμα 5-1-5: Μελέτη της αρχής λειτουργίας της στερεοσκοπικής όρασης².

Με δύο αισθητήρια όργανα όρασης μπορούμε να αντιλαμβανόμαστε την απόσταση, το 'βάθος' από το οποίο προέρχεται ένα οπτικό σήμα. Αυτό, επειδή τα δύο μάτια λαμβάνουν ελαφρά διαφορετικές εικόνες δύο διαστάσεων, και η

² H.H. Emsley, "Some Notes on Space Perception," The Proceedings of the Physical Society **56** (5) 293-304 (1944).

σύνθεσή τους σε μία από τον εγκέφαλο δημιουργεί την τρίτη ‘διάσταση’. Αυτή είναι η **στερεοσκοπική αντίληψη** (*stereoscopic vision*).

Επιπλέον, με δύο αισθητήρια όργανα έχουμε μεγαλύτερο οριζόντιο **πεδίο όρασης** (*field of vision*). Η μεγαλύτερη γωνία ακτίνας που μπορεί να εισέλθει σε ένα οφθαλμό είναι $\approx 105^\circ$ (και όχι 90° , μιας και το φως εισέρχεται σε οπτικά πυκνότερο μέσο). Αν και η ρινική πλευρά περιορίζεται ...γεωμετρικά από τη μύτη στις 60° , η συνδυασμένη δράση των δύο οφθαλμών επιτρέπει ένα οριζόντιο πεδίο όρασης 120° κεντρικά, σε συνδυασμό με τις 105° κροταφικά.



Σχήμα 5-1-6: Οριζόντιο πεδίο όρασης.

Προσαρμογή και Σύγκλιση Οφθαλμών σε Κοντινές Αποστάσεις

Όταν διαβάζουμε, γράφουμε ή ...σχηματίζουμε μηνύματα στο κινητό μας, το αντικείμενο είναι σε μικρή, κοντινή απόσταση, μεταξύ 25 και 50 *cm*. Σε τέτοιες κοντινές αποστάσεις έχουμε δύο προβλήματα. Το πρώτο είναι ότι σε ‘κατάσταση ηρεμίας’ είμαστε ‘προγραμματισμένοι’ να κοιτάμε μακριά, δηλαδή η οπτική ισχύς του οφθαλμού είναι τέτοια (60 dpt), ώστε για να σχηματιστεί ευκρινές είδωλο από ένα ‘μακρινό’ αντικείμενο. Για ένα κοντινό αντικείμενο όμως, η οπτική ισχύς των 60 dpt δεν αρκεί. Το μάτι πρέπει να προσαρμοστεί την οπτική ισχύ κατάλληλα, όπως θα γνωρίσουμε αναλυτικά στην § 5.3.2.

Το δεύτερο ‘πρόβλημα’ είναι ότι ο άνθρωπος, καθώς σε ‘κατάσταση ηρεμίας’ κοιτά μακριά, έχει σχεδόν παράλληλους τους άξονες όρασης των οφθαλμών. Για ένα κοντινό αντικείμενο, οι άξονες όρασης (§ 5.3.3.) σχηματίζουν μεταξύ τους μεγάλη, σχετικά γωνία. Η **σύγκλιση** (*convergence*) και η **απόκλιση** (*divergence*) των οφθαλμών είναι η ικανότητα να διατηρείται η μονή διόφθαλμη όραση ανεξάρτητα από το πού εστιάζουν τα μάτια μας.

Οφθαλμική Κινητικότητα

Εκτός από καλή περιφερειακή όραση, ο οφθαλμός χρειάζεται να παρακολουθεί ένα κινούμενο αντικείμενο στο χώρο ή να εναλλάσσει γρήγορα την προσοχή του από ένα σταθερό σημείο σε ένα άλλο. Η οφθαλμική κινητικότητα (*ocular motility*) περιλαμβάνει κινήσεις παρακολούθησης (*pursuit movements*) και μικροκινήσεις (*saccadic movements*) των οφθαλμών³. Οι κινήσεις αυτές, που αρκετές φορές γίνονται αυτόματα, βοηθούν επιπλέον και στην αποφυγή του σχηματισμού ενός μόνιμου, χρονικά, ειδώλου στον αμφιβληστροειδή, ώστε να μην εμφανίζεται κορεσμός στα κωνία από το οπτικό σήμα.

³ Σ. Πλαϊνής, Ι. Βρετιός, και Ι. Παλλήκαρης, “Δομή και Λειτουργία του οφθαλμο-κινητικού συστήματος παρατήρησης,” *Οφθαλμολογικά Χρονικά* **17** (1) 45-52 (2007).

5.2. Βασικά Ανατομικά και Φυσιολογικά Στοιχεία

Ενώ ο ανθρώπινος οφθαλμός είναι και αυτός ένα οπτικό όργανο (στην πιο απλή προσέγγιση, ένας συγκλίνων φακός) όπως τα οπτικά συστήματα που κατασκευάζει ο άνθρωπος, και άρα μπορεί να μελετηθεί η οπτική του λειτουργία με τους νόμους της οπτικής, διαθέτει δύο πολύ σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα τεχνητά οπτικά.

Η πρώτη διαφορά είναι ότι, καθώς ο οφθαλμός είναι ένα βιολογικό σύστημα, υπόκειται τόσο σε ανάπτυξη, κυρίως κατά τη βρεφική ηλικία, όσο και στη φθορά του χρόνου (γήρανση), η οποία επηρεάζει σημαντικά την οπτική του απόδοση. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι ο οφθαλμός, με την καθοδήγηση του νευρικού συστήματος, μπορεί να ανταποκρίνεται σε οπτικές αλλαγές του περιβάλλοντος και να προσαρμόζεται, έτσι ώστε να επιτυγχάνει τη βέλτιστη δυνατή ποιότητα ειδώλου για ένα μεγάλο εύρος φωτιστικών συνθηκών, αντίθεσης και αποστάσεων θέασης, άλλοτε με λιγότερη, και άλλοτε με περισσότερη επιτυχία.

Οι σημαντικότερες από αυτές τις λειτουργίες είναι η προσαρμογή της οπτικής ισχύος, δηλαδή η αύξηση της διαθλαστικής ισχύος του οφθαλμού για τη θέαση των κοντινών αντικειμένων, και η προσαρμογή στο σκοτάδι, δηλαδή η μεταβολή της ευαισθησίας των φωτοϋποδοχέων σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού. Δεν αρκεί, λοιπόν, να θεωρήσουμε τον οφθαλμό ως ένα απλό αντικειμενικό φακό, έστω με μεταβλητή εστιακή απόσταση. Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας, ο φωτοαισθητήρας του οφθαλμού, διαθέτει και αυτός σημαντικές οπτικές ιδιότητες, ενώ βασικό ρόλο στην όραση διαδραματίζει η ερμηνεία της (μονόφθαλμης) εικόνας από τον εγκέφαλο και η διόφθαλμη αλληλεπίδραση και αντίληψη.

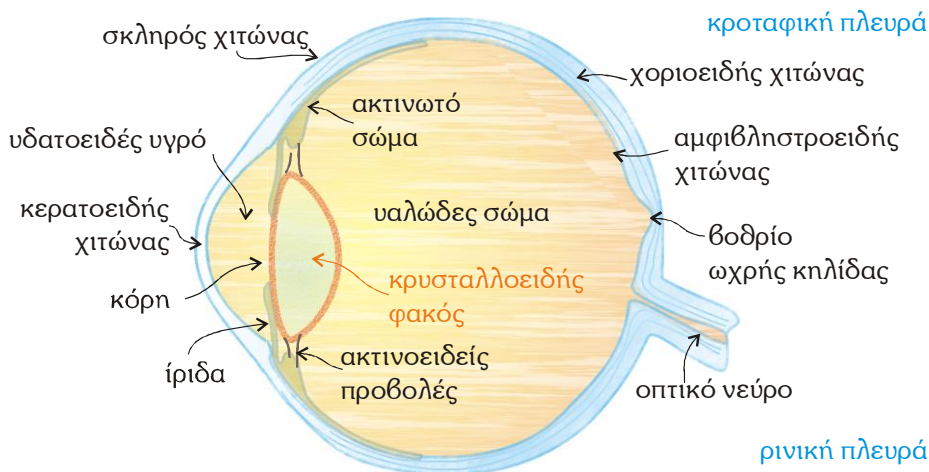
Μπορούμε να πούμε λοιπόν πως τα διαθλαστικά στοιχεία του οφθαλμού, ο αισθητήρας (αμφιβληστροειδής) και το νευρικό σύστημα (οπτική οδός και οπτικό κέντρο του εγκέφαλου) αποτελούν μια αδιαίρετη ενότητα, με την τελική αντίληψη του κόσμου που μας περιβάλλει να εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη νευρική επεξεργασία: ίσως τελικά ο *Helmholtz* να έκανε λάθος όταν υποτιμούσε τον ανθρώπινο οφθαλμό!

5.2.1. Σύντομη Περιγραφή του Οφθαλμού

Στο σχήμα 5-2-1 διακρίνουμε μερικά από τα βασικά μέρη του οφθαλμού. Εξωτερικά ο οφθαλμός περιβάλλεται από τρεις χιτώνες, από έξω προς τα μέσα: τον ινώδη, τον αγγειώδη και τον **αμφιβληστροειδή** χιτώνα (*retina*). Ο εξωτερικός ινώδης χιτώνας αποτελείται από τον αδιαφανή **σκληρό** χιτώνα (*sclera*, *sclerotica dura*) -το 'ασπράδι' του ματιού- που προστατεύει μηχανικά τον οφθαλμό και συμβάλλει στη σταθερότητα του σχήματός του, και το διαφανή **κερατοειδή** χιτώνα (*cornea*), που είναι 'φακός' σε σχήμα μηνίσκου, και αναλαμβάνει σημαντικό μέρος της διαθλαστικής δράσης του οφθαλμού.

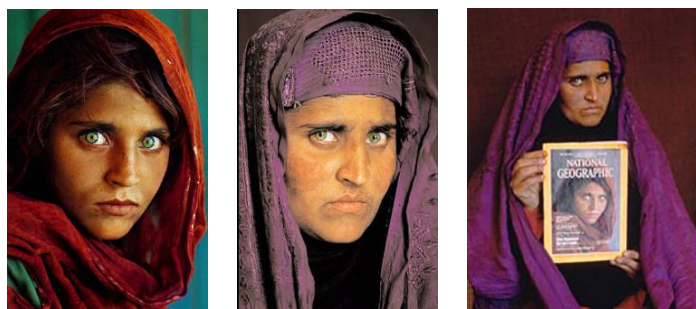
Ο μεσαίος αγγειώδης χιτώνας αποτελείται από την ίριδα, το **ακτινωτό σώμα** (*ciliary body*) και το **χοριοειδή** χιτώνα (*choroid*). Ο χοριοειδής χιτώνας περιέχει αγγεία που φροντίζουν για τη θρέψη του υποκείμενου αμφιβληστροειδή.

Η **ίριδα** (*iris*) είναι το ...χρωματιστό μέρος του οφθαλμού. Σε ένα μεγάλο δείγμα Καυκάσιου πληθυσμού θα συναντήσουμε $\approx 62\%$ σκούρο χρώμα, συνήθως καφέ, και $\approx 38\%$ ανοικτό, συνήθως γαλάζιο.



Σχήμα 5-2-1: Οριζόντια διατομή της δεξιάς πλευράς του οφθαλμού.

Τα χαρακτηριστικά της ίριδας είναι απόλυτα προσωπικά, και αποτελούν βιομετρικό δεδομένο (*biometric*). Το 16-χρονο ‘κορίτσι του Αφγανιστάν’ φωτογραφήθηκε από τον *Steve McCurry* το 1985 στον προσφυγικό καταυλισμό *Munda* στο *Peshawar* του *Pakistan*. Τα ίχνη του χάθηκαν, αλλά η φωτογραφία του, που κόσμησε το εξώφυλλο του *National Geographic*, θαυμάστηκε πολύ. Μόλις πριν από λίγα χρόνια, το 2002, κυκλοφόρησε ένα άρθρο του *National Geographic* με τίτλο “*We found her!*”. Η *Sharbat Gula* βρέθηκε ξανά⁴, και η ταυτοποίηση με το τότε 16-χρονο κορίτσι έγινε με βάση τα χαρακτηριστικά της ίριδας των πανέμορφων ματιών της.



Σχήμα 5-2-2: Το κορίτσι του Αφγανιστάν μετά από 17 χρόνια δεν έχασε καθόλου από την ομορφιά των ματιών της. Φωτογραφίες © Steve McCurry.

Το διαφανές ‘κενό’ που σχηματίζεται από την ίριδα, κυκλικού σχήματος, είναι η **κόρη** (*pupil*), και έχει τον οπτικό ρόλο του διαφράγματος. Φαίνεται μαύρη, γιατί το εισερχόμενο φως απορροφάται από το μελαγχρωστικό επιθήλιο. Μεταβάλλοντας τη διάμετρό της, ανάλογα με τις συνθήκες φωτισμού, επιτρέπει τον έλεγχο της ποσότητας του φωτός που εισέρχεται στον οφθαλμό, και καθορίζει το βάθος πεδίου, καθώς και το μέγεθος των διαθλαστικών εκτροπών (§ 7.4.2.) αυξομειώνοντας το εύρος του κύκλου ελάχιστης σύγχυσης (§ 6.1.1.).

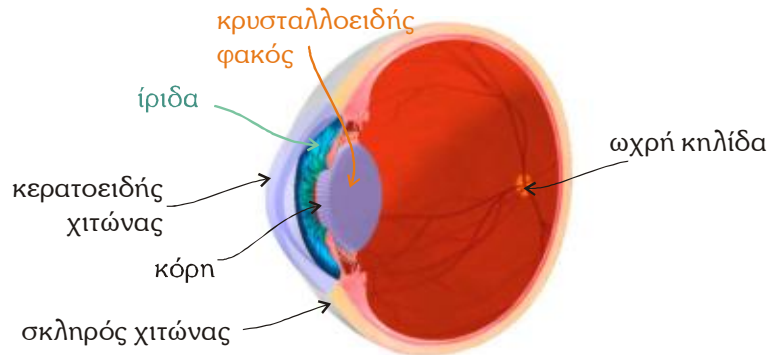
Το ακτινωτό σώμα διαθέτει τις **ακτινοειδείς προβολές** (*zonules*), και τον **ακτινωτό μυ**, που συντελεί στη λειτουργία της προσαρμογής. Πίσω από την ίριδα βρίσκεται ο **κρυσταλλοειδής φακός** (*crystalline lens*), σε σχήμα αμφί-

⁴ <http://www.npr.org/ramfiles/me/20020313.me.14.ram>

κυρτου φακού, και αναλαμβάνει κι αυτός μέρος της διαθλαστικής δράσης, αλλά κυρίως, τη λειτουργία της προσαρμογής. Ο φακός συγκρατείται στο ακτινωτό σώμα μέσω των ινών του *Zinn* και διαχωρίζει τον ενδοφθάλμιο χώρο στον πρόσθιο και τον οπίσθιο πόλο. Ο πρόσθιος πόλος διαχωρίζεται στον πρόσθιο (*anterior*) και τον οπίσθιο θάλαμο (*posterior chamber*). Ο πρόσθιος θάλαμος ορίζεται από την εξωτερική επιφάνεια της ίριδας και τον κερατοειδή, ενώ ο οπίσθιος θάλαμος ορίζεται από την εσωτερική επιφάνεια της ίριδας, το ακτινωτό σώμα τις ίνες του *Zinn* και την πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού.

Ο πρόσθιος πόλος είναι γεμάτος με το **υδατοειδές υγρό** (*aqueous humor*). Η σύσταση του είναι παρόμοια με αυτή του πλάσματος του αίματος, με λίγο διαφορετική αναλογία συστατικών. Το υδατοειδές υγρό βρίσκεται σε συνεχή κυκλοφορία, εκκρίνεται από τις ακτινοειδείς προβολές, διοχετεύεται μέσω της κόρης στον πρόσθιο θάλαμο, και είναι υπεύθυνο για τη ρύθμιση της **ενδοφθάλμιας πίεσης** (*intraocular pressure*).

Η ενδοφθάλμια πίεση καθορίζεται από την ισορροπία παραγωγής και αποχέτευσης (*drainage*) του υδατοειδούς υγρού. Το ρόλο της 'βαλβίδας ρύθμισης' της πίεσης παίζουν οι διάυλοι του *Schlemm* που βρίσκονται στη γωνία που σχηματίζει ο κερατοειδής με το σκληρό χιτώνα και την ίριδα. Αυξημένη ενδοφθάλμια πίεση μπορεί να προκαλέσει βλάβες στο οπτικό νεύρο, και επειδή συνήθως δεν προηγούνται συμπτώματα, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη.



Σχήμα 5-2-3: Στοιχεία του οφθαλμού σε τρισδιάστατη κατακόρυφη τομή.

Ο οπίσθιος πόλος ορίζεται από την εσωτερική επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού, το ακτινωτό σώμα, τις ίνες του *Zinn* και τον αμφιβληστροειδή, και είναι γεμάτος με το **υαλοειδές** ή **υαλώδες σώμα** (*vitreous body*), ένα παχύρρευστο υγρό με ελαστικές ιδιότητες.

Η ανίχνευση του φωτός γίνεται από τους **φωτοϋποδοχείς** (*photoreceptors*), νευρικές απολήξεις που βρίσκονται στο εσωτερικό του αμφιβληστροειδή, στο πίσω μέρος του βολβού, και συγκεκριμένα στην **ωχρή κηλίδα** (*macula*). Συνδέονται με το οπτικό νεύρο, την οδό μετάδοσης του οπτικού σήματος προς τον εγκέφαλο. Τα φωτοευαίσθητα κύτταρα είναι δύο ειδών, τα **κωνία** (*cones*) και τα **ραβδία** (*rods*). Τα ονόματα αυτά προέρχονται από το σχήμα τους.

Τα κωνία ευαισθητοποιούνται στο φως ημέρας, χρησιμοποιούνται δηλαδή για την όραση σε φωτοπικές και μεσοπικές συνθήκες φωτός. Είναι περίπου 5 εκατομμύρια και είναι συγκεντρωμένα στο κεντρικό τμήμα της ωχρής κηλίδας, το **βοθρίο** (*fovea*). Τα ραβδία 'λειτουργούν' με χαμηλό φωτισμό, (σκοτοπικές συνθήκες φωτός), είναι πολύ περισσότερα, περίπου 120 εκατομμύρια, και βρίσκονται συγκεντρωμένα κυρίως στην περιφέρεια της ωχρής κηλίδας.

5.3. Οπτικές Ιδιότητες του Οφθαλμού

5.3.1. Μαθηματικά Πρότυπα Ματιού

Προσπαθώντας να κατανοήσουμε την οπτική λειτουργία του οφθαλμού, δημιουργήσαμε τις **σχηματικές προσομοιώσεις** (*schematic eyes*) ή **πρότυπα οφθαλμού** (*eye models*). Αυτά είναι συγκεκριμένες, σχηματικές αναπαραστάσεις των βασικών χαρακτηριστικών του οφθαλμού, όπως οι διαθλαστικές επιφάνειες και τα χαρακτηριστικά τους, όπως διαστάσεις, ακτίνες καμπυλότητας, τιμές του δείκτη διάθλασης, κλπ. με κάποιο βαθμό ανατομικής πιστότητας. Οι τιμές των παραμέτρων προέρχονται από μετρήσεις σε μεγάλο αριθμό φυσιολογικών οφθαλμών.

Τα πρότυπα ματιού, ασφαλώς, είναι απλοποιημένα, για να διευκολύνουν τη μελέτη του 'μέσου' οφθαλμού, αν και είναι γνωστό ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα μεγέθη από άτομο σε άτομο ακόμα και του ίδιου φύλου⁵. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι το μέσο 'άρρεν' μάτι έχει περίπου 0.5 mm μεγαλύτερο αξονικό μήκος, ή σε διοπτρίες, το μέσο 'θήλυ' μάτι έχει περίπου 2 dpt περισσότερη οπτική ισχύ.

Ωστόσο η 'αποστολή' που επιτελούν τα πρότυπα ματιού κρίνεται ιδιαίτερα επιτυχημένη, αν λάβουμε υπ' όψη το πόσο έχουν αναπτυχθεί και μελετηθεί. Επιτρέπουν, εκτός από τη βασική μελέτη των οπτικών ιδιοτήτων του οφθαλμού, και τη δυνατότητα ιχνηλάτησης ακτίνων -θα γνωρίσουμε ένα παράδειγμα στην § 6.2.3- μέσα από το οπτικό σύστημα, και με αυτό τον τρόπο, την εκτίμηση των σφαλμάτων και της ποιότητας του αμφιβληστροειδικού ειδώλου.

Ένα από τα πρώτα πρότυπα κατασκευάστηκαν το 1702 από τον *Christiaan Huygens*, για να εξηγήσει με αυτό τη διαθλαστική δράση του φακού και το σχηματισμό του αντεστραμμένου ειδώλου.

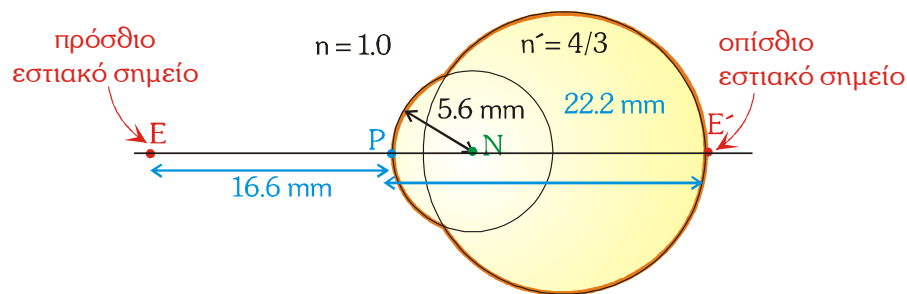
Το πιο απλό πρότυπο περιλαμβάνει μία μόνο διαθλαστική επιφάνεια (*reduced schematic eye*). Είναι μια πρώτη προσέγγιση, ασφαλώς, μιας και απλοποιεί πολύ την πραγματική ανατομία του οφθαλμού. Ακολουθούν πρότυπα με τρεις, τέσσερις ή και έξι διαθλαστικές επιφάνειες. Ανάλογα με το βαθμό προσέγγισής τους, υπάρχουν τα **παραξονικά πρότυπα** (*paraxial models*), που είναι χρήσιμα για υπολογισμούς σε περιοχές κοντά στον οπτικό άξονα, και τα **ευρείας γωνίας πρότυπα** (*wide angle ή finite models*), τα οποία είναι σαφώς πιο ρεαλιστικά και χρησιμεύουν στη μελέτη πραγματικών συνθηκών.

Σε αρκετά από αυτά τα πρότυπα οι διαθλαστικές επιφάνειες του οφθαλμού είναι σφαιρικές και συμμετρικές, και ο άξονας της όρασης συμπίπτει με τον οπτικό άξονα. Ακόμα, θεωρείται ότι ο κρυσταλλοειδής φακός είναι ομοιογενής, με σταθερή τιμή δείκτη διάθλασης. Η πραγματικότητα, βεβαίως, μπορεί να προσεγγιστεί με καλύτερη πιστότητα, αν θεωρήσουμε ασφαιρικές επιφάνειες διόπτρων, τη -μικρή, αλλά υπαρκτή- σχετική γωνία ανάμεσα στον άξονα της όρασης και στον οπτικό άξονα, και την ακτινική διαβάθμιση του δείκτη διάθλασης του κρυσταλλοειδή.

⁵ C. Banu Cosar and A. Bozkurt Sener, "Orbscan Corneal Topography System in Evaluating the Anterior Structures of the Human Eye," *Cornea* **22** (2) 118-121 (2003).

Ένα αρκετά ‘απλό’ πρότυπο οφθαλμού προτάθηκε από ένα ...μαθηματικό, τον *Johann Benedict Listing*, κατά τη διάρκεια των μελετών του για την κίνηση του ματιού⁶. Περιλαμβάνει μία μόνο διαθλαστική επιφάνεια, αυτή του κερατοειδή με τον αέρα. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό, το μάτι αποτελείται από την κοινή εξωτερική επιφάνεια δύο σφαιρικών επιφανειών, η μία από τις οποίες ‘ορίζει’ τον κερατοειδή, και η άλλη το βολβό του ματιού με ακτίνες καμπυλότητας 5.6 mm και 10 mm , αντίστοιχα.

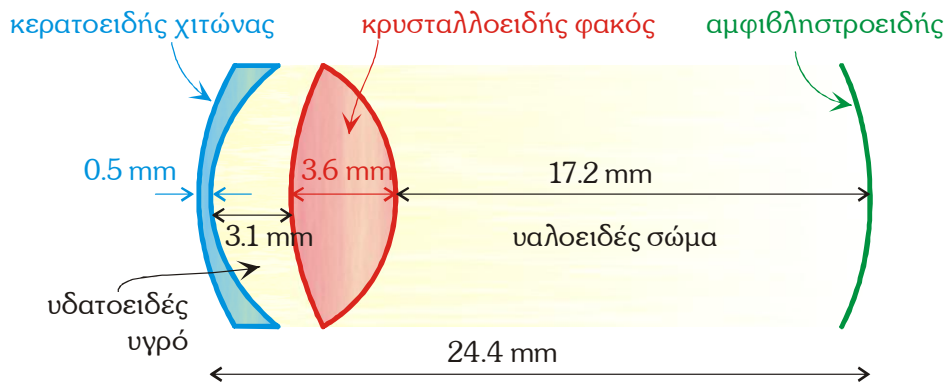
Οπτικά αντιμετωπίζεται ως ένα απλό δίοπτρο, που διαχωρίζει αέρα από μέσο με δείκτη διάθλασης $4/3$, αρκετά ‘κοντά’ στη γνωστή τιμή για το υαλοειδές σώμα σήμερα. Το κύριο σημείο P συμπίπτει με το εξώτερο σημείο του κερατοειδή, ενώ το δεσμικό σημείο N με το κέντρο καμπυλότητας του ‘δίοπτρου’, δηλαδή 5.6 mm εσωτερικά. Η εμπρόσθια εστιακή απόσταση είναι 16.6 mm , και η οπίσθια 22.2 mm . Το όλο ‘σύστημα’ έχει οπτική ισχύ 60 dpt .



Σχήμα 5-3-1: Το πρότυπο οφθαλμού Listing.

Ένα αρκετά πιο λεπτομερές πρότυπο οφθαλμού προτάθηκε από το Σουηδό Οφθαλμίατρο *Allvar Gullstrand*, ο οποίος τιμήθηκε με το βραβείο *Nobel* στη Φυσιολογία και Ιατρική (1911) για τις έρευνές του πάνω στη λειτουργία της προσαρμογής.

Το πρότυπο *Gullstrand* αποτελεί ακόμα και σήμερα ένα ‘κλασικό’ πρότυπο ματιού. Περιγράφει τον οφθαλμό τόσο σε κατάσταση ηρεμίας, όσο και σε κατάσταση προσαρμογής. Έχει εξελιχθεί αρκετά, κυρίως από τον *H.H. Emsley*, καθηγητή Οπτικής στο *Applied Optics Department* του *Northampton Polytechnic Institute*, στο Λονδίνο, και είναι γνωστό ως πρότυπο *Gullstrand- Emsley*.



Σχήμα 5-3-2: Το πρότυπο οφθαλμού Gullstrand.

⁶ J.B. Listing, “Beitrag zur physiologischen Optik,” Gottinger Studien, Vandenhoeck and Ruprecht (1845).

	πάχος	δείκτης διάθλασης	ακτίνες καμπυλότητας
κερατοειδής	0.5 mm	1.376	7.7 mm (πρόσθια) 6.8 mm (οπίσθια)
πρόσθιος θάλαμος (υδατοειδές υγρό)	3.1 mm	1.336	-
κρυσταλλοειδής φακός	3.6 mm	1.386 (φλοιός) 1.406 (πυρήνας)	10.0 mm (πρόσθια) -6.0 mm (οπίσθια)
υαλοειδές σώμα	17.2 mm	1.336	-

Πίνακας 5-3-1: Οπτικά δεδομένα του ακριβούς σχηματικού οφθαλμού Gullstrand.

Το μήκος του οφθαλμού είναι 24.4 mm , η ολική ισχύς του 60 dpt , με τον κερατοειδή χιτώνα να συνεισφέρει τις 40 dpt και τον κρυσταλλοειδή φακό τις 20 dpt . Η κόρη του οφθαλμού θεωρείται ότι βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή.



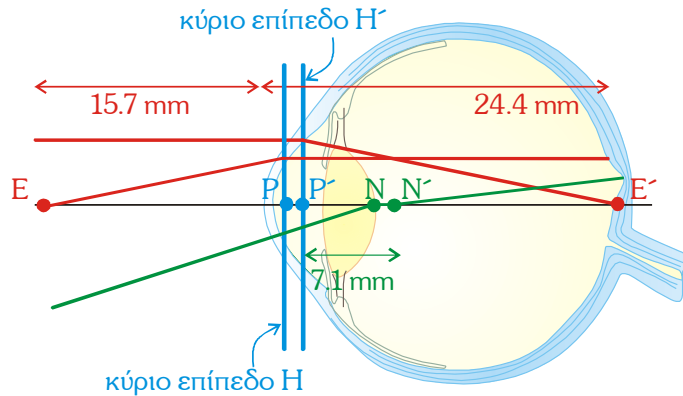
Johann Benedict Listing (1808-1882) και Allvar R. Gullstrand (1862 -1930)

Το οπτικό σύστημα του οφθαλμού αντιμετωπίζεται, από όλα τα πρότυπα, ως ένας παχύς φακός. Όπως γνωρίσαμε στην § 3.3.2., σε ένα παχύ φακό έχουμε τρία ζεύγη με **θεμελιώδη σημεία** (*cardinal points*): τα δύο **εστιακά** (*focal points*), τα δύο **κύρια** (*principal points*), και τα δύο **κομβικά** (*nodal points*).

Τα εστιακά σημεία του οφθαλμού βρίσκονται 15.71 mm και 24.39 mm μπροστά και πίσω, αντίστοιχα, από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή. Τα κύρια σημεία βρίσκονται 1.35 και 1.6 mm πίσω από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, δηλαδή μέσα στο χώρο του προσθίου θαλάμου. Έτσι η **εμπρόσθια εστιακή απόσταση** του οφθαλμού είναι 17.1 mm και η **οπίσθια** 22.79 mm . Αν εφαρμόσουμε τη σχέση (3.2.8) διαπιστώνουμε ότι οι λόγοι των αντίστοιχων εστιακών αποστάσεων προς την αντίστοιχη τιμή του δείκτη διάθλασης είναι ίσοι:

$$\text{λόγος εστιακών αποστάσεων προς δείκτη διάθλασης} \quad \frac{17.1\text{ mm}}{1} = \frac{22.79\text{ mm}}{1.333} \quad (5.3.1)$$

Διαπιστώνουμε δηλαδή ότι δεν ισαπέχουν οι εστιακές αποστάσεις από του οπτικού συστήματος του οφθαλμού, και αυτό οφείλεται ακριβώς στις διαφορετικές τιμές στους δείκτες διάθλασης ανάμεσα στον αέρα και υδατοειδές υγρό/υαλώδες σώμα. Αν τις διαιρέσουμε, όμως, με τις τιμές των αντίστοιχων δεικτών διάθλασης, προκύπτει ο ίδιος αριθμός!



Σχήμα 5-3-3: Εστιακά, κύρια, και κομβικά σημεία στον οφθαλμό.

Τέλος, τα κύρια και δεσμικά σημεία του οφθαλμού δεν συμπίπτουν, και η απόστασή τους δίνεται από τη σχέση 3.3.6. Τα δεσμικά σημεία βρίσκονται αντίστοιχα 7.08 mm και 7.33 mm από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, δηλαδή περίπου στο όριο κρυσταλλοειδή φακού με το υαλοειδές σώμα. Ο λόγος είναι ακριβώς η διαφορετική τιμή του δείκτη διάθλασης στους χώρους ‘αντικειμένου’ και ‘ειδώλου’, δηλαδή στο εξωτερικό και το εσωτερικό του οφθαλμού.

Με βάση τις τιμές για τους δείκτες διάθλασης, τις αποστάσεις των δεσμικών σημείων και το μέγεθος του βολβού, μια ακτίνα που σχηματίζει 1° (0.0175 rad) με το δεσμικό σημείο, συναντά τον αμφιβληστροειδή σε ‘ύψος’ 0.3 mm .

Το είδωλο στον αμφιβληστροειδή σχηματίζεται από τη συνδυασμένη διαθλαστική δράση όλων των ενεργών διαθλαστικών επιφανειών του οφθαλμού, που είναι οι εξής τέσσερις διαχωριστικές επιφάνειες:

- εξωτερική επιφάνεια του κερατοειδή, που διαχωρίζει τον αέρα από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή.
- εσωτερική επιφάνεια κερατοειδή, δηλαδή την οπίσθια επιφάνεια που διαχωρίζει τον κερατοειδή από το υδατοειδές υγρό.
- εξωτερική επιφάνεια κρυσταλλοειδή φακού, δηλαδή την επιφάνεια που διαχωρίζει το υδατοειδές υγρό με την πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού.
- εσωτερική επιφάνεια κρυσταλλοειδή, που διαχωρίζει την οπίσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή με το υαλοειδές σώμα.

Αυτές οι επιφάνειες αποτελούν το οπτικό σύστημα, το ‘φακό’ του οφθαλμού. Το κύριο διαθλαστικό έργο (κατά τα $\frac{2}{3}$) παρέχεται από την εξωτερική (πρόσθια) επιφάνεια του κερατοειδή -και γι’ αυτό το λόγο η διαθλαστική χειρουργική (§ 11.2.) σμιλεύει ακριβώς αυτή την επιφάνεια-, μιας και ‘γειτονεύει’ με τον αέρα, ένα μέσο με το οποίο έχει σημαντική διαφορά στο δείκτη διάθλασης (αέρας, $n \approx 1$, κερατοειδής $n \approx 1.375$). Αντίθετα, η εσωτερική επιφάνεια ‘γειτονεύει’ με το υδατοειδές υγρό με δείκτη διάθλασης ≈ 1.34 . Ρόλο στη διαθλαστική λειτουργία παίζει και ο κρυσταλλοειδής φακός. Οι οπτικές ιδιότητες όλου του οπτικού συστήματος επηρεάζονται και από το μέγεθος του διαφράγματος εισόδου (κόρη), και συγκεκριμένα, τη διάμετρό της.

5.3.2. Οπτική Ισχύς και Προσαρμογή

Η συνολική οπτική ισχύς του ‘φακού’ σε κατάσταση ‘ηρεμίας’ είναι κάτι λιγότερο από 60 dpt . Η απόσταση φακού-ειδώλου s' (η απόσταση κυρίου επιπέδου με τον αμφιβληστροειδή), εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του βολβού, άρα είναι $s' \approx 22.8 \text{ mm}$, σχετικά αμετάβλητη, μιας και δεν αλλάζει το αξονικό μήκος του βολβού. Για να είναι δυνατό το μάτι να εστιάζει όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις s πρέπει να αλλάζει η οπτική ισχύς του φακού!

Σε κατάσταση ‘ηρεμίας’ (*relaxed eye*), ο κρυσταλλοειδής φακός έχει την κατάλληλη οπτική ισχύ ($\approx 20 \text{ dpt}$) ώστε, σε συνδυασμό με την οπτική ισχύ του κερατοειδή ($\approx 40 \text{ dpt}$) να δημιουργηθεί το ευκρινές είδωλο από ένα αρκετά μακρινό αντικείμενο. Πράγματι, για μια παράλληλη δέσμη -αντικείμενο στο οπτικό άπειρο, $s = \infty$ - η απλή σχέση απεικόνισης λεπτών φακών (3.2.9) μας λέει ότι για $s' \approx 22.8 \text{ mm}$ απαιτείται οπτική ισχύς:

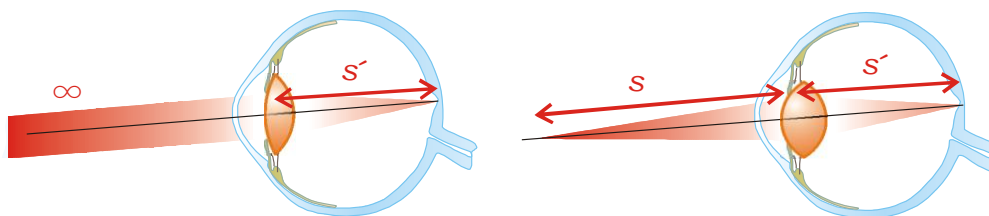
$$\text{μακρινό αντικείμενο} \quad \frac{1}{s = \infty} + \frac{1.34}{s' = 22.8 \text{ mm}} = 0 + \frac{1.34}{22.8 \text{ mm}} \approx 59 \text{ dpt} \quad (5.3.2)$$

[Αρκεί το αντικείμενο να είναι πέρα από π.χ. 5 m για να πάρουμε πρακτικά το ίδιο αποτέλεσμα.]

Αν όμως το αντικείμενο βρίσκεται κοντά στον οφθαλμό, στις αποστάσεις που ‘διαβάζουμε’, απαιτείται περισσότερη οπτική ισχύς, περίπου 70 dpt . Για να πεισθούμε, ας δοκιμάσουμε πάλι τη σχέση απεικόνισης, θέτοντας $s = 92 \text{ mm}$:

$$\text{κοντινό αντικείμενο} \quad \underbrace{\frac{1}{s = 92 \text{ mm}}}_{\text{άλλαξε}} + \underbrace{\frac{1.34}{s' = 22.8 \text{ mm}}}_{\text{ίδιο με πριν}} \approx \underbrace{70 \text{ dpt}}_{\text{άλλαξε}} \quad (5.3.3)$$

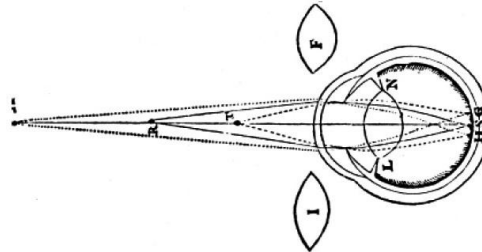
Διαπιστώνουμε, δηλαδή, ότι πρέπει να αυξηθεί η οπτική ισχύς του οφθαλμού κατά περίπου 11 dpt . Αυτή την αποστολή αναλαμβάνει ο κρυσταλλοειδής φακός, με τη διαδικασία της **προσαρμογής** (*accommodation*).



Σχήμα 5-3-4: Για μακρινή και κοντινή όραση απαιτείται διαφορετική οπτική ισχύς.

Στο σχήμα 5-3-4 παρουσιάζουμε την προσαρμογή κάπως απλοποιημένη. Οι αποστάσεις αντικειμένου-‘φακού’ και ‘φακού’-ειδώλου μετρώνται από τα αντίστοιχα κύρια σημεία, και, ασφαλώς, διαθλαστική δράση αναλαμβάνει -κυρίως- ο κερατοειδής χιτώνας. Είναι ωστόσο σαφές ότι για να εστιαστεί στην ίδια -περίπου- απόσταση ‘φακού’-ειδώλου ένα αντικείμενο που βρίσκεται σε διαφορετικές αποστάσεις χρειάζεται ένας ‘άλλος’ φακός, με μεγαλύτερη οπτική ισχύ. Και μιας και δεν γίνεται να αλλάξει σχήμα, και άρα οπτική ισχύ, ο κερατοειδής χιτώνας, την αποστολή αυτή αναλαμβάνει ο κρυσταλλοειδής φακός.

Γνωρίσαμε τη ‘μηχανική αρχή’ λειτουργίας της προσαρμογής στην § 3.2.3. Σε κατάσταση ηρεμίας οι ακτινωτοί μύες κρατούν το φακό ‘τεντωμένο’. Οι ακτίνες καμπυλότητας είναι $+10.2 \text{ mm}$ και -6 mm , αντίστοιχα, για την πρόσθια και οπίσθια επιφάνεια. Για να επιτευχθεί η προσαρμογή επιτρέπουν ‘συμπίεση’ του σχήματός του, ώστε να μειωθούν οι ακτίνες καμπυλότητας σε $+5 \text{ mm}$ και -5 mm . Έτσι αυξάνεται η οπτική του ισχύς, επιτρέποντας στον οφθαλμό να εστιάσει σε κοντινά αντικείμενα.

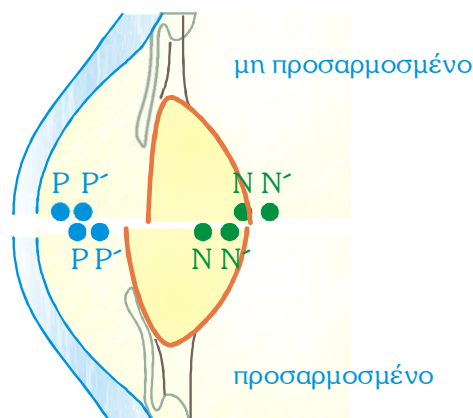


Σχήμα 5-3-5: Η προσαρμογή του κρυσταλλοειδή φακού σύμφωνα με τον Descartes.

‘In order to represent the point X distinctly it is necessary that the whole shape of the humour NL be changed and that it becomes a little fatter as that which is marked I, and to represent the point T it is necessary to become a little more convex like that which is marked F’

Reneé Descartes.

Ωστόσο, οι αλλαγές στις καμπυλότητες του φακού δεν είναι από μόνες τους αρκετές για να προκαλέσουν την επιθυμητή αύξηση στην οπτική ισχύ. Η πρόσθια επιφάνεια πλησιάζει προς τον κερατοειδή κατά 0.2 mm , ενώ η θέση της οπίσθιας επιφάνειας διατηρείται σταθερή, καθώς την εμποδίζει να μετακινηθεί το υαλοειδές σώμα. Τη θεωρία αυτή παρουσίασε στην πρώιμη της μορφή ο *Helmholtz*⁷ και συνεχίζει να επικεντρώνει το ερευνητικό ενδιαφέρον⁸.



Σχήμα 5-3-6: Μεταβολή των θέσεων των κύριων σημείων του οφθαλμού κατά την προσαρμογή.

⁷ H. Helmholtz, “Ueber die Akkommodation des Auges,” A.v.Graefe’s Arch. Klin. Ophthalmol. **1** 1-74 (1855).

⁸ A. Glasser and P.L. Kaufman, “The mechanism of accommodation in primates,” Ophthalmology **106** (5) 863-872 (1999).

Το αποτέλεσμα αυτών των μετακινήσεων είναι να πλησιάσουν τα κύρια σημεία του οφθαλμού το φακό, και οι αποστάσεις των κύριων και δεσμικών σημείων από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή να γίνουν από 1.7 mm, 2.0 mm, και από 6.5 mm, 6.8 mm, αντίστοιχα, ενώ τα εστιακά σημεία πλησιάζουν στα 12.4 mm και 21.0 mm.

Η κοντινότερη απόσταση αντικειμένου για την οποία ο φακός μπορεί να προσαρμοστεί και να δημιουργήσει ευκρινές είδωλο είναι το **κοντινό** ή **εγγύτατο σημείο** ευκρινούς όρασης (*near point*). Η απόσταση αυτή αυξάνει με την ηλικία και τη μείωση της προσαρμοστικής ικανότητας. Αντίστοιχα, υπάρχει το **μακρινό** ή **απώτερο σημείο** ευκρινούς όρασης (*far point*), που είναι η μεγαλύτερη απόσταση για την οποία ένας μη προσαρμοσμένος οφθαλμός μπορεί να δημιουργήσει ευκρινές είδωλο.

Το κοντινό σημείο είναι συζυγές με τον αμφιβληστροειδή όταν η προσαρμογή έχει τη μέγιστη τιμή της και το απώτερο είναι συζυγές όταν η προσαρμογή είναι χαλαρή. Σε ένα φυσιολογικό, εμμετρωπικό οφθαλμό, το απώτερο σημείο βρίσκεται στο άπειρο, σε ένα μυωπικό (§ 7.3.), σε κάποια απόσταση μπροστά από τον οφθαλμό, και σε ένα υπερμετρωπικό οφθαλμό είναι φανταστικό, και βρίσκεται πίσω από τον αμφιβληστροειδή.

Το αντίστροφο της απόστασης του εγγύτατου σημείου (*dpt*, όπως κάθε αντίστροφο απόστασης) εκφράζει το **πλάτος** της **προσαρμογής** (*amplitude of accommodation*) και μπορεί να μετρηθεί υποκειμενικά (§ 9.1.6.). Το πλάτος της προσαρμογής είναι κατά τι μεγαλύτερο από την πραγματική αλλαγή στην οπτική ισχύ, κυρίως λόγω αλλαγής στο βάθος πεδίου.

Η προσαρμογή ελέγχεται από το νευρικό σύστημα και το κύριο ερέθισμα είναι ο σχηματισμός θολής εικόνας στον αμφιβληστροειδή από ένα κοντινό αντικείμενο, κάτι που προκαλεί άμεση απόκριση σε μια προσπάθεια να γίνει το είδωλο πιο σαφές. Οι μηχανισμοί που ενεργοποιούν την προσαρμογή είναι οι⁹:

- ο ανακλαστικός (*reflex*), που ενεργοποιείται με βάση την κλίση (*vergence*) των ακτίνων λόγω της παρουσίας αντικειμένου σε κοντινή απόσταση,
- ο τονικός (*tonic*), που εμφανίζεται παρά την απουσία ερεθίσματος και προκαλείται από ισορροπία συμπαθητικής και παρασυμπαθητικής εννεύρωσης (*innervation*), στον οποίο οφείλονται οι μικρές διακυμάνσεις της προσαρμογής,
- ο σχετιζόμενος με τη σύγκλιση των οφθαλμών (*convergence*), και τέλος,
- ο άμεσος (*proximal*), που προκαλείται από φαινόμενη, παρά μια πραγματική απόσταση του αντικειμένου. Η ψυχική αίσθηση της εγγύτητας ενεργοποιεί σε αυτή την περίπτωση την προσαρμογή.

Ο άμεσος μηχανισμός της προσαρμογής αποτελεί πρόβλημα για τους σχεδιαστές αντικειμενικών συσκευών διάθλασης, όπως διαθλασίμετρα και εκτροπόμετρα (§ 8.3.3.). Ακόμα και αν ο στόχος προσήλωσης του οργάνου προβάλλεται από το οπτικά άπειρο, η αίσθηση του εξεταζόμενου ότι βλέπει κάτι που βρίσκεται κοντά του -λόγω της εγγύτητας της συσκευής- οδηγεί στην ασυνείδητη προσαρμογή και σε πιο μυωπικές (από το φυσιολογικό) μετρήσεις.

⁹ G.C. Heath, "Components of accommodation," Am. J. Optom. Arch. Am. Acad. Optom. **33** 569-579 (1956).

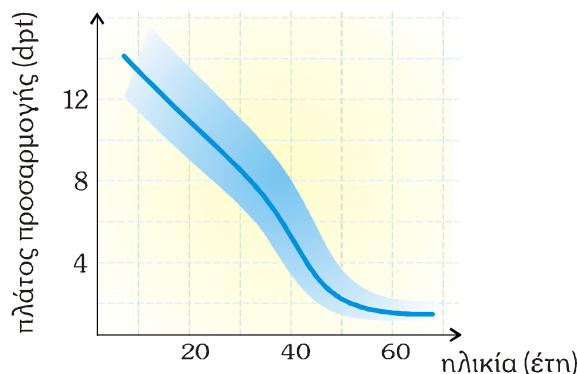
Ο μηχανισμός της προσαρμογής είναι τμήμα της **τριάδας του κοντινού αντανakλαστικού** (*near triad*). Τα άλλα δύο τμήματα είναι η σύγκλιση των οφθαλμών και η συστολή της κόρης. Ενεργοποίηση της προσαρμογής μπορεί να προκληθεί μετά από εξάσκηση και με τη βούληση, και να ‘αποσυνδεθεί’ από τη σύγκλιση, δηλαδή το άτομο να ενεργοποιεί κατά βούληση ξεχωριστά την προσαρμογή και τη σύγκλιση.

Προσαρμογή
<p>Είναι η αλλαγή στην οπτική ισχύ του οφθαλμού ώστε να μπορεί να σχηματίζεται ευκρινές είδωλο από αντικείμενα σε διαφορετικές αποστάσεις.</p> <p>Ενεργοποιείται για κοντινά αντικείμενα με αύξηση στις καμπυλότητες των επιφανειών στον κρυσταλλοειδή φακό.</p>

Η διαθλαστική απόκριση της προσαρμογής δεν είναι απόλυτα ακριβής στο ερέθισμα και συνήθως υπάρχει μια υστέρηση (*accommodation lag*), δηλαδή είναι μικρότερη από την απαιτούμενη: με άλλα λόγια ο οφθαλμός εστιάζει λίγο πιο μπροστά από εκεί που πρέπει. Ακόμα και για σταθερό ερέθισμα παρουσιάζονται διακυμάνσεις με εύρος μέχρι 0.25 *dpt*. Καθώς η προσαρμογή αυτο-‘διορθώνεται’ μέσω ενός νευρικού συστήματος ανάδρασης, πιστεύεται ότι αυτή η ‘ανακρίβεια’ διατηρεί την προσαρμογή σε υψηλό βαθμό ετοιμότητας.

Καθώς όμως είναι απαραίτητη για την προσαρμογή η αντίληψη ενός ευκρινούς ειδώλου, κάτι που προϋποθέτει λειτουργία κωνίων, η ακρίβεια της μειώνεται κατά πολύ σε σκοτοπικές συνθήκες. Επιπλέον, σε έντονο φως, η συστολή της κόρης προκαλεί αύξηση του βάθους πεδίου και μείωση του κύκλου σύγχυσης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ευκρινείας του ειδώλου και την αναιρέση της ανάγκης για απόλυτα ακριβή λειτουργία της προσαρμογής.

Η σταδιακή, με την ηλικία, απώλεια της ελαστικότητας του φακού και του περιφάκιου και της ευλυγισίας του ακτινωτού μυ προκαλεί μείωση της ικανότητας προσαρμογής. Ενώ σε νεαρή ηλικία το πλάτος προσαρμογής μπορεί να είναι ακόμα και 14 *dpt*, μειώνεται κατά 0.4 *dpt* ανά έτος, μέχρι να σταθεροποιηθεί σε μια χαμηλή τιμή (2 *dpt*) γύρω στα 50 έτη¹⁰, και τότε εμφανίζεται η **πρεσβυωπία** (*presbyopia*).



Σχήμα 5-3-7: Μείωση του εύρους προσαρμογής με την ηλικία.

¹⁰ A. Duane, “Studies in monocular and binocular accommodation with their clinical applications,” *Am. J. Ophthalmol.* **3** (5) 865-877 (1922).

5.3.3. Διαφράγματα και Άξονες

Τα κατασκευασμένα από τον άνθρωπο οπτικά συστήματα, όπως τηλεσκόπια, μικροσκόπια κτλ, έχουν συμμετρία γύρω από τον οπτικό άξονα, είναι δηλαδή, ομοαξονικά, εκτός από την περίπτωση σοβαρού κατασκευαστικού λάθους. Οι τηρούμενες ανοχές κατά τη σχεδίαση και τη συναρμολόγηση του οπτικού οργάνου, έχουν ως αποτέλεσμα σωστά επικεντρωμένα οπτικά στοιχεία, τα οποία συνήθως έχουν σφαιρικές επιφάνειες, και έναν σαφή οπτικό άξονα, κάτι που κάνει τον ποιοτικό έλεγχο σχετικά εύκολη υπόθεση.

Στον οφθαλμό τα πράγματα δεν είναι τόσο ...ρόδινα. Τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού δεν είναι ακριβώς επικεντρωμένα, ενώ και οι επιφάνειες του είναι πιθανό να έχουν ένα όχι απόλυτα σφαιρικό και συμμετρικό σχήμα. Το αποτέλεσμα είναι να χρειαζόμαστε όχι έναν, αλλά μια ..πλειάδα αξόνων για την περιγραφή και μελέτη της οπτικής λειτουργίας του οφθαλμού. Ας τα δούμε πιο αναλυτικά, ξεκινώντας από το διάφραγμα του οφθαλμού, την κόρη.

Η Κόρη, το Διάφραγμα του Οφθαλμού

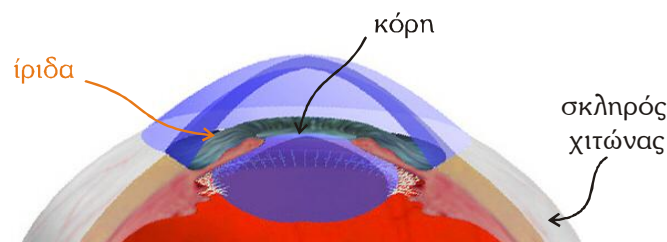
Όπως γνωρίσαμε στην § 4.5.3, η **κόρη εισόδου** (*entrance pupil*) ενός οπτικού συστήματος είναι το είδωλο του διαφράγματος στο χώρο του αντικειμένου, και αντίστοιχα, η κόρη εξόδου είναι το είδωλο του διαφράγματος στο χώρο του ειδώλου.

Είναι λοιπόν αυτονόητο, ότι όταν κοιτάμε τον οφθαλμό, δεν βλέπουμε την κόρη, αλλά την κόρη εισόδου, δηλαδή το είδωλο της κόρης, όπως αυτό σχηματίζεται από τον κερατοειδή, το οπτικό στοιχείο μεταξύ της κόρης και του παρατηρητή.

Η κόρη εισόδου είναι πιο κοντά στον κερατοειδή και είναι πιο μεγάλη από την ίριδα. Η κόρη εξόδου είναι κάπως μικρότερη και πιο κοντά στην κόρη - πάλι όμως προς το μέρος του κερατοειδή, και κάπως πιο μεγάλη από τη διάμετρο της κόρης. Ο λόγος των διαμέτρων τους λέγεται **λόγος μεγέθυνσης κόρης** (*pupil magnification*) και έχει μέση τιμή 0.91 ± 0.04 .

$$\text{λόγος μεγέθυνσης κόρης } M_{EE'} = \frac{\text{διάμετρος κόρης εξόδου}}{\text{διάμετρος κόρης εισόδου}} \quad (5.3.4)$$

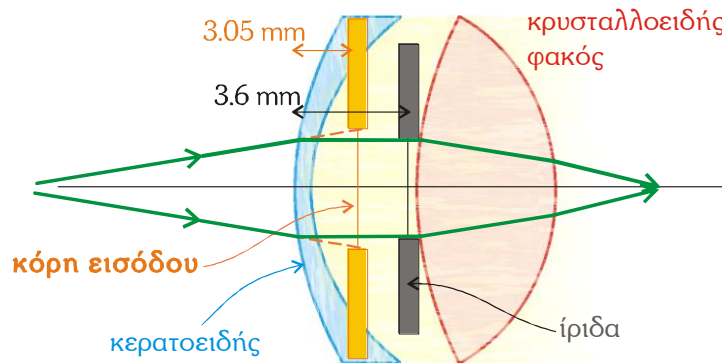
Όταν λοιπόν συνταγογραφούμε ένα φακό επαφής ή σχεδιάζουμε μια επέμβαση διαθλαστικής χειρουργικής, αν η οπτική ζώνη είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο της κόρης εξόδου, τότε θα καλύπτει και τη διάμετρο της πραγματικής κόρης. Αν όμως σχεδιάζουμε να τοποθετήσουμε κάποιο ενδοφακό -ο οποίος βρίσκεται πάντα πίσω από τον κερατοειδή- θα πρέπει η οπτική του ζώνη να είναι μεγαλύτερη από το πραγματικό μέγεθος της κόρης και όχι το φαινομενικό, για να μην καταλήξουμε σε αναίτια μεγάλο σε διαστάσεις φακό.



Σχήμα 5-3-8: Ίριδα και κόρη του οφθαλμού.

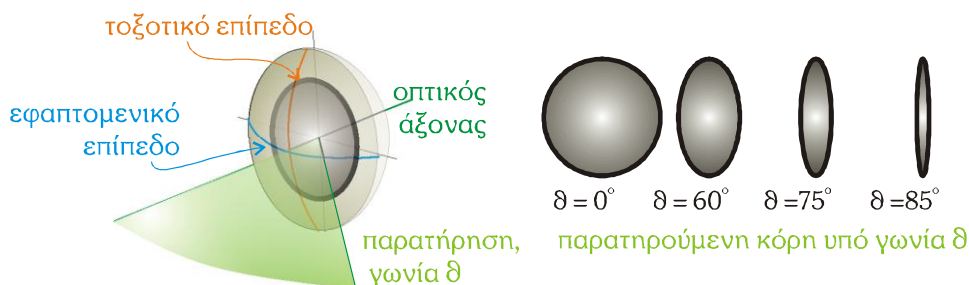
Η κόρη εισόδου έχει μεγάλη σημασία στην οφθαλμική οπτική, καθώς μέσα από αυτή γίνονται οι διαθλαστικές εξετάσεις. Αντίστοιχα, κατά την παρατήρηση του αμφιβληστροειδή (οφθαλμοσκόπηση) το αντικείμενο, που είναι πλέον ο αμφιβληστροειδής, παρατηρείται μέσα από την κόρη εξόδου. Επιπλέον, η κόρη είναι συνήθως αποκεντρωμένη προς τη ρινική πλευρά κατά 0.5 mm, το κέντρο της συνήθως αλλάζει κατά τη διαστολή της, ενώ και το σχήμα της μπορεί να μην είναι απόλυτα κυκλικό.

Όσο πιο πλάγια παρατηρούμε τον οφθαλμό, τόσο πιο στενή γίνεται η κόρη εισόδου, και συγκεκριμένα μειώνεται η εφαπτομενική (*tangential*) διάμετρος, ενώ η τοξοτική (*sagittal*) παραμένει σταθερή, προκαλώντας έτσι αστιγματικό σφάλμα. Ο σχεδιασμός στις κάμερες βυθού του οφθαλμού (§ 10.4.4.) προβλέπει αυτό το φαινόμενο, και ενσωματώνει αστιγματικούς φακούς για την παρατήρηση του περιφερειακού αμφιβληστροειδή από πλάγια θέση.



Σχήμα 5-3-9: Κόρη εισόδου του οφθαλμού.

Ένα άλλο πρόβλημα είναι η ευθυγράμμιση του άξονα του οργάνου και του άξονα φωτισμού σε τόσο μικρή έκταση της κόρης εισόδου. Και ενώ οι κάμερες βυθού παρακάμπτουν το πρόβλημα ταυτίζοντας τους άξονες φωτισμού και παρατήρησης, η παρατήρηση του βυθού με βιομικροσκόπιο σχισμοειδούς λυχνίας (§ 10.1.2.) σε τέτοιες γωνίες είναι πιο δύσκολη, γιατί πρέπει στον περιορισμένο χώρο της κόρης εισόδου να τοποθετηθούν τρεις άξονες, δύο του διόφθαλμου συστήματος παρατήρησης και ένας του συστήματος φωτισμού.



Σχήμα 5-3-10: Σχήμα κόρης παρατηρούμενο από πλάγια.

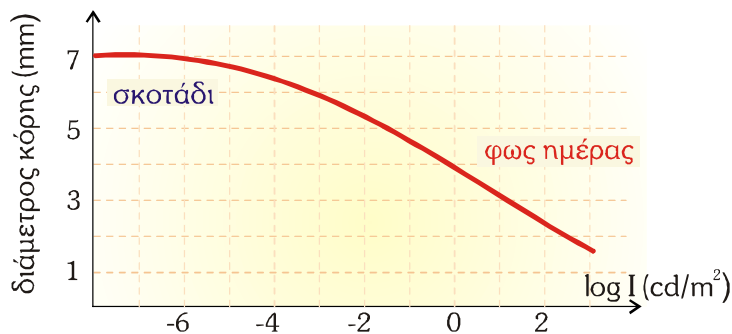
Κανονικά, το μέγεθος της κόρης είναι ίσο και στους δύο οφθαλμούς. Αν δεν ισχύει αυτό, τότε εμφανίζεται η **ανισοκορία** (*anisocoria*), με σοβαρό επακόλουθο την είσοδο διαφορετικής φωτεινής ενέργειας σε κάθε μάτι.

Το μέγεθος της κόρης επηρεάζεται από τις εξωτερικές συνθήκες φωτισμού. Η φυσιολογική αντίδραση είναι να μειωθεί με υψηλό φωτισμό: το φως ημέρας

αντιστοιχεί σε φωτοπικές και μεσοπικές συνθήκες, και σε αυτό η μέση τιμή της διαμέτρου είναι $3.0 \pm 0.7 \text{ mm}$ (με εύρος από 2.0 έως 7.4 mm). Σε φως νύχτας, σκοτοπικές συνθήκες, η μέση τιμή της διαμέτρου είναι $6.5 \pm 0.9 \text{ mm}$ (με εύρος από 3.5 έως 9.0 mm). Η **διαστολή** της κόρης (*pupil dilation*) -που συμβαίνει και κατά την προσαρμογή στη φωτεινότητα¹¹- είναι γνωστή και ως μυδρίαση, ενώ η **συστολή** (*pupil contraction*), είναι γνωστή και ως μύση. Η αναλυτική έκφραση της μείωσης της διαμέτρου της κόρης D (σε mm) με τη φωτεινή ένταση I (σε cd/m^2) δίνεται από τη σχέση¹²:

$$\log_{10}(D) = 0.8558 - 4.01 \times 10^{-4} \left[\log_{10}(I) + 8.6 \right]^3 \quad (5.3.5)$$

λογάριθμος διαμέτρου λογάριθμος φωτεινής έντασης



Σχήμα 5-3-11: Μεταβολή της διαμέτρου της κόρης με τη φωτεινότητα.

Η μεταβολή της διαμέτρου της κόρης, εκτός από τον έλεγχο της ποσότητας του φωτός που εισέρχεται στον οφθαλμό επηρεάζει:

- το βάθος πεδίου, και
- το μέγεθος των διαθλαστικών εκτροπών.

Γνωρίσαμε στην § 4.5.2 ότι το βάθος πεδίου είναι ανάλογο του τετραγώνου της ελάχιστης ακτινικής διατομής μιας δέσμης u_b (σχέση 4.5.8), η οποία, με τη σειρά της είναι αντίστροφα ανάλογη της διαμέτρου D του διαφράγματος (σχέση 4.5.6). Άρα λοιπόν, σε μικρές διαμέτρους κόρης περιμένουμε μεγάλες τιμές του βάθους πεδίου. Με αυξημένο βάθος πεδίου υπάρχει μεγαλύτερο εύρος αποστάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα αντικείμενο ώστε και πάλι το είδωλό του να είναι ικανοποιητικά ευκρινές.

Σε πολλές περιπτώσεις διαθλαστικών σφαλμάτων, όπως αφεστίαση, κόμη, σφαιρική εκτροπή, η έκταση του σφάλματος εξαρτάται από τη διάμετρο του διαφράγματος (§ 7.4.2.): όσο μεγαλύτερη η κόρη, τόσο πιο έντονες είναι οι ‘συνέπειες’ του σφάλματος στην ποιότητα της όρασης¹³. Με άλλα λόγια, μείωση της διαμέτρου της κόρης, συντελεί στην ελάττωση των διαθλαστικών εκτροπών.

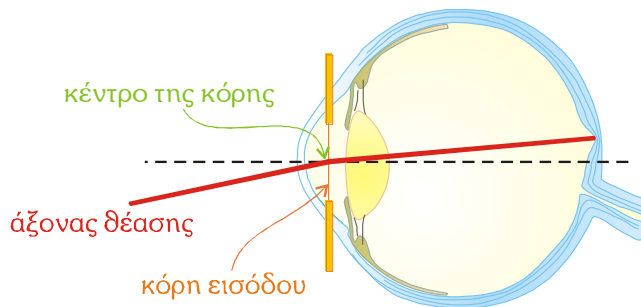
¹¹ Adrian Werner, “Spectral sensitivity of the pupillary system,” *Clinical and Experimental Optometry* **86** (4) 235-238 (2003).

¹² S.G. De Groot and J.W. Gebhard, “Pupil size as determined by adapting luminance,” *Journal of the Optical Society of America* **42** 492-495 (1952).

¹³ Y. Wang, K. Zhao, Y. Jin, Y. Niu, and T. Zuo, “Changes of higher order aberration with various pupil sizes in the myopic eye,” *Journal of Refractive Surgery* **19** (2) S270-S274 (2003).

Άξονες του Οφθαλμού

Ο **άξονας θέασης** (*line of sight*) είναι ο άξονας ο οποίος συνδέει το παρατηρούμενο αντικείμενο, που λέγεται και **σημείο προσήλωσης** (*fixation point*) με το κέντρο της κόρης εισόδου. Είναι πιο χρήσιμος από τον **οπτικό άξονα** (*optical axis*), τον άξονα που ενώνει τα κέντρα καμπυλότητας των επιφανειών. Αν ο οφθαλμός ήταν συμμετρικός, ο οπτικός άξονας θα ήταν ο άξονας συμμετρίας του οπτικού συστήματος. Επειδή όμως τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού δεν είναι επικεντρωμένα (δηλαδή τα κέντρα καμπυλότητας των διαθλαστικών επιφανειών του οφθαλμού δεν βρίσκονται πάνω στον ίδιο άξονα), ο οπτικός άξονας μπορεί να εκτιμηθεί μόνο κατά προσέγγιση.



Σχήμα 5-3-12: Άξονας θέασης του οφθαλμού.

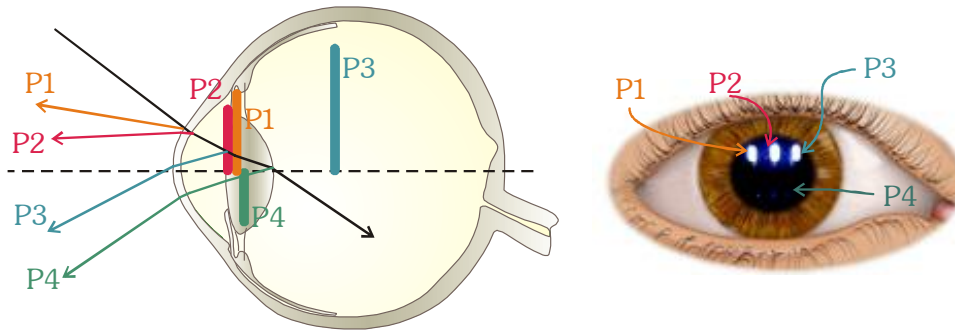
Σε διάφορες αντικειμενικές εξετάσεις της όρασης όπως με τα αυτοματοποιημένα διαθλασίμετρα, ο χειριστής παρατηρώντας τον οφθαλμό μέσα από μια κάμερα επικεντρώνει το όργανο με το κέντρο της κόρης. Με άλλα λόγια, ευθυγραμμίζει τον οπτικό άξονα του οργάνου με τον άξονα της θέασης.

Μπορούμε να βρούμε όμως τη θέση του οπτικού άξονα κατά προσέγγιση, χρησιμοποιώντας τα είδωλα των *Purkyně - Sanson*, τα οποία ονομάστηκαν προς τιμή των *Jan Evangelista Purkyně* και *Louis Joseph Sanson*, οι οποίοι τα περιέγραψαν.

Σε ένα σχετικά σκοτεινό δωμάτιο, τοποθετούμε μια φωτεινή πηγή μπροστά από τον οφθαλμό και καθοδηγούμε τον εξεταζόμενο να προσηλώσει το βλέμμα του σε αυτήν. Η φωτεινή πηγή σχηματίζει από ανακλάσεις από τις τέσσερις διαθλαστικές επιφάνειες του οφθαλμού, τέσσερα είδωλα: το πρώτο (P1) προέρχεται από την πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή, το δεύτερο (P2) από την οπίσθια, το τρίτο (P3) από την πρόσθια επιφάνεια, και το τέταρτο (P4) από την οπίσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή φακού.

Όλα τα είδωλα, εκτός από το τελευταίο, είναι ανεστραμμένα. Ο εξεταστής πρέπει λοιπόν να ευθυγραμμίσει την πηγή με τα είδωλα αυτά όσο καλύτερα μπορεί, και να βρει έτσι τον κατά προσέγγιση οπτικό άξονα.

Τα είδωλα των *Purkyně - Sanson* και ειδικότερα η αλλαγή του μεγέθους του P3 και P4 κατά την προσαρμογή φάνηκαν ιδιαίτερα χρήσιμα στο Δανό Οφθαλμίατρο *Marius Tscherning*, όταν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα πραγματοποίησε κάποιες από τις πρώτες έρευνες για την προσαρμοστική λειτουργία του κρυσταλλοειδή φακού. Εξακολουθούν να είναι χρήσιμα και σήμερα για τον ίδιο λόγο, ενώ το πρώτο και το τέταρτο είδωλο χρησιμεύουν στην καταγραφή της θέσης των οφθαλμών, κάτι που είναι απαραίτητο στη διαθλαστική χειρουργική για να αποφύγουμε την έκκεντρη φωτοαποδόμηση.



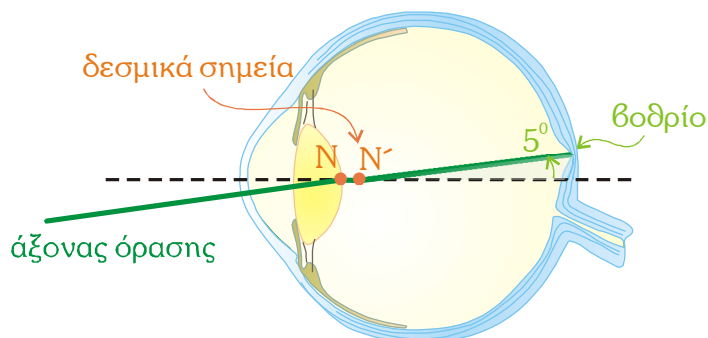
Σχήμα 5-3-13: Είδωλα Purkyně.

Επιπλέον, από σύγκριση των σχετικών φωτεινοτήτων των ειδώλων μπορούμε να μελετήσουμε τη φασματική διαπερατότητα καθώς και το ποσοστό σκέδασης από τα οπτικά στοιχεία του οφθαλμού.

Ένας τρίτος άξονας είναι ο **άξονας της όρασης** (*visual axis*), ο οποίος ενώνει το αντικείμενο που παρατηρούμε με το είδωλό του στο κεντρικό βοθρίο μέσω των δεσμικών σημείων του οφθαλμού. Και ενώ θεωρητικά όλοι χρησιμοποιούμε αυτόν τον άξονα για να δούμε, ο προσδιορισμός του δεν είναι ιδιαίτερα εύκολος, καθώς λόγω έλλειψης συμμετρίας του οφθαλμού δεν μπορούν να οριστούν επακριβώς οι θέσεις των δεσμικών σημείων. Είναι ωστόσο χρήσιμος άξονας αναφοράς στη μελέτη της όρασης, καθώς δεν εξαρτάται από το μέγεθος της κόρης. Ο *Tscherning* υπολόγισε ότι ο άξονας της όρασης αποκλίνει από τον οπτικό άξονα κατά 3° με 5° ρινικά και 2° με 3° προς τα κάτω, όπως φαίνεται από την πλευρά του παρατηρητή. Αποτελέσματα λογικά, αν σκεφτούμε ότι το κεντρικό βοθρίο στο οποίο σχηματίζεται το είδωλο βρίσκεται κροταφικά και προς τα πάνω σε σχέση με τον οπίσθιο πόλο του αμφιβληστροειδή.



Jan Evangelista Purkyně (1787-1869) και Marius Tscherning (1854-1939)



Σχήμα 5-3-14: Άξονας της όρασης.

Θα αναφέρουμε ακόμα και τον **κορικό άξονα** (*pupillary axis*): είναι ο άξονας που διέρχεται από το κέντρο της κόρης εισόδου και είναι κάθετος στην

πρόσθια επιφάνεια του κερατοειδή. Όταν το κέντρο της κόρης εισόδου βρίσκεται πάνω στον οπτικό άξονα, τότε ο κορικός άξονας ταυτίζεται με τον οπτικό άξονα. Τέλος, αναφέρουμε και τον **άξονα προσήλωσης** (*fixation axis*), που ενώνει το παρατηρούμενο αντικείμενο με το κέντρο περιστροφής του οφθαλμού.

5.3.4. Φασματική Διαπερατότητα

Για να διαπεράσει το φως όλα τα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού, είναι λογικό να περιμένουμε ότι τα μέσα αυτά έχουν μεγάλη ‘διαφάνεια’. Μιλώντας για ‘διαφάνεια’ εννοούμε τη διαπερατότητα (§ 2.1.2.), τον αδιάστατο λόγο της διερχόμενης φωτεινής έντασης προς την προσπίπτουσα, που μετράται είτε ως κλάσμα είτε ποσοστικά (%).

$$\text{διαπερατότητα } T \equiv \frac{\text{διερχόμενη φωτεινή ένταση } I_t}{\text{προσπίπτουσα φωτεινή ένταση } I_i} \quad (5.3.6)$$

Θέλουμε από τα διαθλαστικά μέσα του οφθαλμού μεγάλη διαπερατότητα για το ορατό, και, αντίστοιχα, μικρή, για τα άλλα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, για λόγους προστασίας του οφθαλμού. Και όχι μόνο αυτό, αλλά είναι επιθυμητό η διαπερατότητα να έχει μια σταθερή τιμή σε μια όσο πιο ‘μεγάλη’ περιοχή του ορατού φάσματος. Η **φασματική διαπερατότητα** (*spectral transmissivity*) είναι η διαπερατότητα για συγκεκριμένα μήκη κύματος, από λ έως $\lambda + \delta\lambda$:

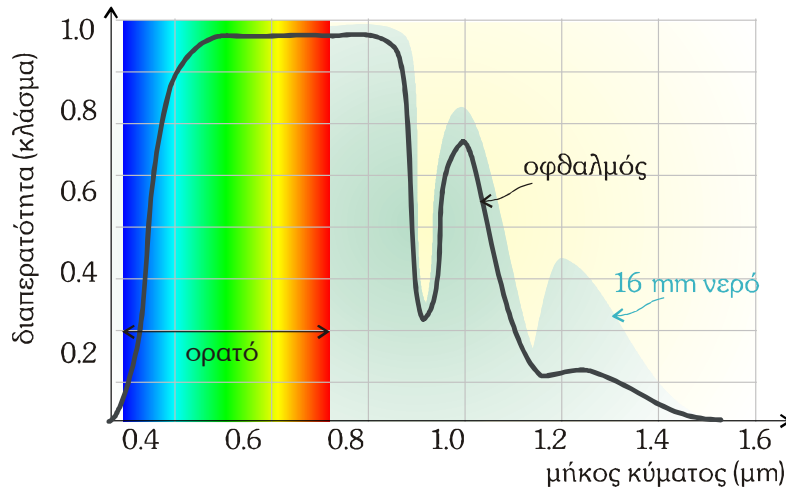
$$\text{φασματική διαπερατότητα } T_{\lambda+\delta\lambda} \equiv \frac{I_t(\lambda + \delta\lambda)}{I_i(\lambda + \delta\lambda)} \quad (5.3.7)$$

Πράγματι, τόσο συνολικά από τον οφθαλμό, όσο και από τα επιμέρους διαθλαστικά μέσα του, η φασματική διαπερατότητα, όπως έχει μετρηθεί πειραματικά^{14,15} έχει πολλές ομοιότητες με αντίστοιχο πάχος νερού. Συγκεκριμένα, ο οφθαλμός είναι αδιαφανής (σχεδόν 0% διαπερατότητα) στο μπλε άκρο του φάσματος, για μήκη κύματος $< 0.38 \mu m$, και είναι σχεδόν πλήρως διαφανής στο ορατό για μήκη κύματος μέχρι $0.8 \mu m$. Υπάρχει ένα παράθυρο διαφάνειας γύρω στα $1.1 \mu m$, και τέλος, πάνω από τα $1.5 \mu m$, ο οφθαλμός γίνεται πάλι πλήρως αδιαφανής.

Στο σχήμα 5-3-15 παρατηρείται πολύ μεγάλη ταύτιση με τα φασματικά χαρακτηριστικά νερού αντίστοιχου πάχους. Μιας και η οργανική σύσταση του οφθαλμού είναι, κατά ένα μεγάλο ποσοστό νερό, δεν είναι καθόλου παράξενο αυτό. Τα οπτικά μέσα του οφθαλμού παρουσιάζουν λοιπόν την καλύτερη δυνατή διαπερατότητα για το τμήμα εκείνο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που μας ενδιαφέρει, το ορατό.

¹⁴ C.A. Johnson, D.L. Howard, D. Marshall, and H. Shu, “A non-invasive video-based method of measuring lens transmission properties of the human eye,” *Optometry and Vision Science* **70** 944-955 (1993).

¹⁵ T.J. van de Berg and K.E.W. Tan, “Light transmittance of the human cornea from 320 to 700 nm for different ages,” *Vision Research* **34** 1453-1456 (1994).



Σχήμα 5-3-15: Φασματική διαπερατότητα του οφθαλμού.

Οπτική Πυκνότητα

Ένα ποσοτικό κριτήριο για το πόσο ‘διαφανές’ είναι ένα μέσο είναι η **οπτική πυκνότητα** (*optical density*). Ορίζεται ως ο λογάριθμος του αντίστροφου της διαπερατότητας:

$$\text{οπτική πυκνότητα} \quad D \equiv \log\left(\frac{1}{T}\right) = \log\left(\frac{100}{T(\%)}\right) \quad (5.3.8)$$

Αν ένα μέσο απορροφά το 40% της προσπίπτουσας φωτεινής έντασης -δηλαδή έχει διαπερατότητα 0.6, τότε έχει οπτική πυκνότητα $D = 0.22$. Η οπτική πυκνότητα του οφθαλμού στο μεγαλύτερο μέρος του ορατού φάσματος είναι < 0.2 , εκτός από τα ιώδη μήκη κύματος, στα οποία η οπτική πυκνότητα πλησιάζει στο 0.4.

Όπως και η διαπερατότητα, έτσι και η φασματική οπτική πυκνότητα εξαρτάται από το είδος του υλικού, το πάχος του, αλλά και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, 10 mm καθαρού νερού έχουν διαπερατότητα 99.98% στα 0.48 μm , 99.4% στα 0.7 μm , αλλά μόνο $5.6 \times 10^{-7}\%$ στα 1.5 μm . [Η διαπερατότητα, σύμφωνα με το νόμο των *Beer - Lambert*¹⁶, μειώνεται εκθετικά με την αύξηση του πάχους.]

Έτσι λοιπόν το νερό είναι ‘σχεδόν’ διαφανές στο ορατό. Το ‘σχεδόν’ χρησιμοποιείται για να τονίσει ότι πάντα υπάρχει ‘απώλεια’ του προσπίπτοντος φωτός. Το ότι απορροφάται και σκεδάζεται το φως ακόμα και σε καθαρό νερό δεν παραξενεύει τους ...ψαροντουφεκάδες, μιας και γνωρίζουμε ότι ακόμα και σε μια ηλιόλουστη μέρα, το διερχόμενο φως μειώνεται σημαντικά σε βάθος κάτω από τα είκοσι μέτρα. Άρα λοιπόν, ναι, υπάρχουν απώλειες, που εξαρτώνται τόσο από το βάθος όσο και από το μήκος κύματος. Οι μηχανισμοί απώλειας είναι εκτός από την απορρόφηση, και η σκέδαση (§ 6.5).

¹⁶ “Μαθήματα Οπτικής,” Κεφ. 4 § 4.2., Η Φυσική Σημασία του Φανταστικού Μέρους.

5.4. Τα Διαθλαστικά Μέσα του Οφθαλμού

5.4.1. Ο Κερατοειδής Χιτώνας: Ανατομία και Φυσιολογία

Ο κερατοειδής χιτώνας (*cornea*) είναι το πιο σημαντικό διαθλαστικό στοιχείο του οφθαλμού, καθώς η διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης του αέρα και του κερατοειδή συμβάλλει ώστε η πρόσθια διαχωριστική επιφάνεια να είναι υπεύθυνη για τα $\frac{2}{3}$ της διαθλαστικής ισχύος του οφθαλμού

Δακρυϊκή Στοιβάδα

Ουσιαστικά όμως η πρώτη διάθλαση γίνεται στη διαχωριστική επιφάνεια **δακρυϊκής στοιβάδας** (*tear film*)-αέρα. Η στοιβάδα αυτή καλύπτει εξωτερικά τον κερατοειδή και διακρίνεται στη λιπώδη (εξωτερη) η οποία εμποδίζει την εξάτμιση της υδάτινης, την υδάτινη (μεσαία), που είναι η κύρια και αποτελεί το 98% του πάχους, και τη βλενώδη (εσωτερη), που συμβάλλει στην προσκόλληση όλης της στοιβάδας στο επιθήλιο.

Η δακρυϊκή στοιβάδα, με μέσο πάχος στα 7 μm , υγραίνει και προστατεύει μηχανικά τον κερατοειδή. Επιπλέον μεταφέρει αντιμικροβιακούς παράγοντες, 'γερμίζει' τις μικροανωμαλίες ανάμεσα στα επιθηλιακά κύτταρα του κερατοειδή σχηματίζοντας έτσι μια πιο λεία διαθλαστική επιφάνεια, και μεταφέρει ατμοσφαιρικό οξυγόνο στο επιθήλιο. Δυσλειτουργίες της δακρυϊκής στοιβάδας, τόσο σε ποσότητα όσο και σε σύσταση θέτουν σε κίνδυνο την υγεία του κερατοειδή, και γι' αυτό το λόγο το αντανακλαστικό των βλεφαρισμών φροντίζει έτσι ώστε η δακρυϊκή στοιβάδα να ανανεώνεται άμεσα μόλις αυτή διασπάται.

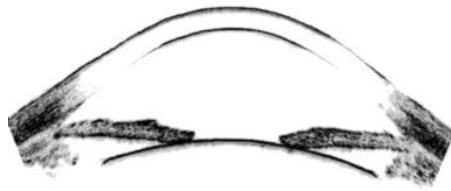
Η μεγάλη σημασία της δακρυϊκής στοιβάδας στην οπτική του οφθαλμού άρχισε να γίνεται εμφανής με την έλευση των φακών επαφής από PMMA (§ 11.1.1.). Ουσιαστικά, επειδή παρεμβάλλεται μεταξύ του φακού επαφής και της εξωτερικής επιφάνειας του κερατοειδή, και με το να έχει σχεδόν ίδιο δείκτη διάθλασης, σχηματίζει το λεγόμενο φακό δακρύων, και πρακτικά εξουδετερώνει την εξωτερική επιφάνεια του κερατοειδή ως διαθλαστική επιφάνεια, επιτρέποντας έτσι την αναίρεση των όποιων διαθλαστικών δυσλειτουργιών αυτή προκαλεί.

Το δακρυϊκό σύστημα αποτελείται από το εκκριτικό τμήμα που παράγονται τα δάκρυα, και το αποχετευτικό τμήμα που αποτελείται από τα δακρυϊκά σωληνάκια, το δακρυϊκό ασκό και το ρινοδακρυϊκό πόρο, με τον οποίο τα δάκρυα διοχετεύονται στη ρινική κοιλότητα.

Ανατομία Κερατοειδή

Ο κερατοειδής χιτώνας αποτελείται από πέντε επιμέρους τμήματα, από τον εξώτερο στον ενδότερο: επιθήλιο (*corneal epithelium*), τη μεμβράνη του *Bowman*, το στρώμα (*stroma*), τη μεμβράνη του *Descemet* και το ενδοθήλιο (*corneal endothelium*).

Το **επιθήλιο** (πάχος $\approx 60 \mu\text{m}$) αποτελείται από επτά, περίπου, στοιβάδες κυττάρων, με τα πιο πεπλατυσμένα κύτταρα, τα λεπιδώδη (*squamous cells*), προς τα έξω, με διατομή περίπου 40 μm και πάχος λίγα μm . Σταδιακά συναντούμε τα πτερυγοειδή πολυγωνικά κύτταρα (*wing cells*), και τέλος τα βασικά κύτταρα (*basal cells*) τα οποία σταδιακά αποκτούν ένα πιο κυβοειδές σχήμα.

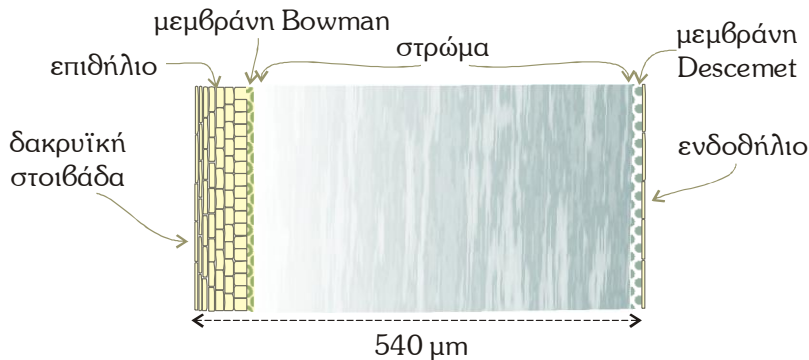


Σχήμα 5-4-1: Τομή πρόσθιου τμήματος του οφθαλμού με τεχνική υπερέχων. Διακρίνεται ο κερατοειδής, η ίριδα και η πρόσθια επιφάνεια του κρυσταλλοειδή.

Η ακεραιότητα του επιθηλίου έχει μεγάλη σημασία για την προστασία του κερατοειδή από λοιμώξεις, ιδιαίτερα κατά τη χρήση φακών επαφής και μετά από εφαρμογές επιφανειακής φωτοδιαθλαστικής χειρουργικής (§ 11.2.2.) όπου σε μεγάλο βαθμό καταστρέφεται το επιθήλιο, επιβάλλεται η χρήση φαρμακευτικών κολλύριων για τη γρήγορη αναγέννησή του και την πρόληψη των λοιμώξεων, ενώ εφαρμόζεται και θεραπευτικός φακός επαφής για την προστασία του.

Η **μεμβράνη του Bowman** (από τον Άγγλο ‘πατέρα της ιστολογικής ανατομίας’ *William Bowman*) αποτελείται από τυχαίας διάταξης ίνες κολλαγόνου και δεν διαθέτει κύτταρα. Αν τραυματιστεί η μεμβράνη αυτή σχηματίζεται αδιαφανής ουλώδης ιστός, και γι’ αυτό αποφεύγεται όσο το δυνατό ο τραυματισμός της κατά τις διαθλαστικές επεμβάσεις.

Το **στρώμα** (*stroma*), το 90% του πάχους του κερατοειδή, αποτελείται από περίπου 200 επιστρώσεις ινών κολλαγόνου. Οι ίνες σε κάθε επίστρωση είναι παράλληλες μεταξύ τους, ενώ σε διαφορετικές επιστρώσεις έχουν διαφορετικές κατευθύνσεις. Ανάμεσα στις ίνες κολλαγόνου υπάρχουν διασκορπισμένα ινοβλαστικά κύτταρα, οι κερατοκύττες.



Σχήμα 5-4-2: Ανατομία του κερατοειδή¹⁷.

Όταν αφαιρεθεί ιστός από το στρώμα, δεν έχουμε αναγέννηση, σε αντίθεση με το επιθήλιο, δηλαδή το νέο σχήμα του στρώματος διατηρείται. Αυτή ακριβώς η ιδιότητα είναι η βάση της φωτοδιαθλαστικής χειρουργικής, κατά την οποία ο κερατοειδής ‘σμιλεύεται’ ώστε να αποκτήσει την κατάλληλη οπτική ισχύ.

Η διάταξη των ινών κολλαγόνου εξασφαλίζει μηχανική σταθερότητα και ελαστικότητα, και συμβάλλει στη διαφάνεια και διαύγεια του κερατοειδή, μαζί με την έλλειψη αιμοφόρων αγγείων, την έλλειψη μυελώδους ελύτρου από τις νευρικές ίνες και το μικρό αριθμό των κερατοκυττών, που αν ήταν περισσότεροι

¹⁷ R. Farrell, D. Freund, and R. McCally, “Research on Corneal Structure,” J. Hopkins APL Tech. Digest **11** (1) (1990).

θα προκαλούσαν αυξημένη σκέδαση. Οι κερατοκύττες, ειδικότερα, θεωρούνται πηγές της σκέδασης (§ 6.5.), και στην αυξημένη δραστηριοποίησή τους μετά από διαθλαστική χειρουργική αποδίδεται η ανάπτυξη θολερότητας (*haze*).

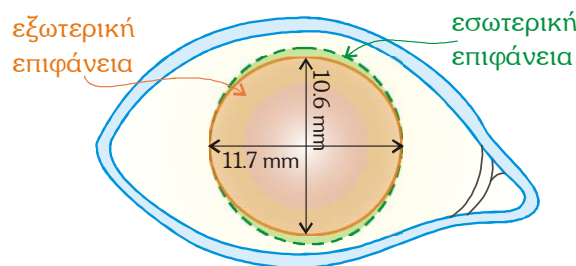
Η **μεμβράνη του Descemet** (από τον Γάλλο Ανατόμο *Jean Descemet*) είναι μια ελαστική μεμβράνη κολλαγόνου ακριβώς πριν από το ενδοθήλιο. Το **ενδοθήλιο** αποτελείται από μια μονή στοιβάδα εξαγωνικών κυττάρων. Τα ενδοθηλιακά κύτταρα δεν ανανεώνονται, και με την πάροδο του χρόνου ο αριθμός τους μειώνεται και το κενό γεμίζει από τα γειτονικά κύτταρα.

Το ενδοθήλιο ρυθμίζει την εισροή ύδατος από το υδατοειδές υγρό στον κερατοειδή έτσι ώστε το ποσοστό νερού στο στρώμα να διατηρείται στο 78% περίπου, διατηρώντας τη διαφάνειά του. Η καλή κατάστασή του είναι ζωτική για τον κερατοειδή, και γι' αυτό το λόγο κατά την ένθεση ενδοφακού στον οφθαλμό λαμβάνεται υπόψη η απόστασή του από το ενδοθήλιο ώστε να μην είναι σχετικά κοντά και προκληθεί εκφύλιση του.

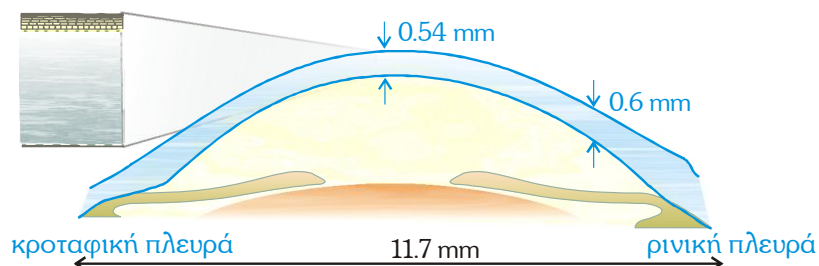
5.4.2. Σχήμα και Οπτικές Ιδιότητες Κερατοειδή

Από την εξωτερική του 'όψη', ο μέσος κερατοειδής έχει ελαφρά ελλειπτικό σχήμα, με διάμετρο 11.7 mm στον οριζόντιο άξονα και 10.6 mm στον κάθετο. Η διαφορά αυτή οφείλεται, μεταξύ άλλων, και στην πίεση του άνω βλεφάρου. Εσωτερικά το σχήμα είναι κυκλικό, με διάμετρο 11.7 mm . Ο πρόσθιος θάλαμος, ο χώρος μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του κερατοειδή και της εξωτερικής του κρυσταλλοειδή φακού έχει μέσο βάθος $3.5 \pm 0.4 \text{ mm}$, με εύρος από 2.0 ως 4.8 mm .

Από τη διατομή του κερατοειδή διαπιστώνουμε ότι έχει σχήμα μηνίσκου φακού. Είναι λεπτότερος κεντρικά, με μέση τιμή πάχους $d = 540 \pm 40 \mu\text{m}$ και εύρος από 330 ως $700 \mu\text{m}$, ενώ περιφερειακά αυξάνεται κατά $50\text{-}70 \mu\text{m}$, με την κροταφική πλευρά να είναι κάπως πιο λεπτή.



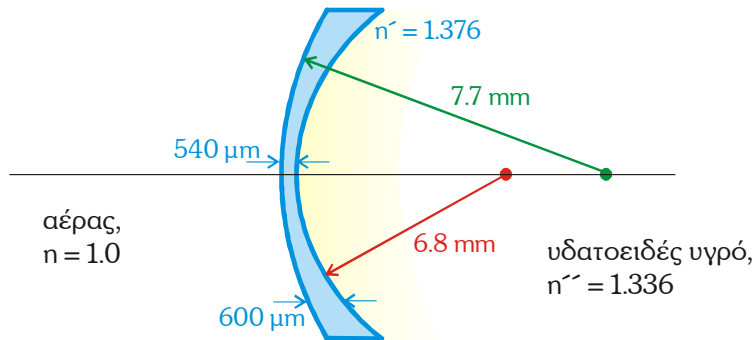
Σχήμα 5-4-3: Εξωτερικό σχήμα κερατοειδή.



Σχήμα 5-4-4: Οριζόντια τομή κερατοειδή και πρόσθιου θαλάμου.

Τόσο οι στατιστικές αποκλίσεις, όσο και οι τιμές του εύρους αναφέρονται σε υγιή πληθυσμό, κάτι που τονίζει ότι, όπως και στα άλλα μεγέθη του οφθαλμού, υπάρχει διαφοροποίηση τιμών.

Η παραξονική ακτίνα καμπυλότητας της εξωτερικής επιφάνειας είναι $7.7 \pm 0.1 \text{ mm}$ και της εσωτερικής επιφάνειας $6.8 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$. Περιμένουμε λοιπόν, σύμφωνα με τον απλό ‘κανόνα’ που γνωρίσαμε στην § 3.2.3., ότι ως ένας φακός λεπτότερος στη μέση του, να έχει αρνητική οπτική ισχύ, να είναι δηλαδή αποκλίνων φακός. Κάτι τέτοιο όμως, κάθε άλλο παρά συμβαίνει. Αυτό γιατί οι τιμές για τους δείκτες διάθλασης εκατέρωθεν του είναι αρκετά διαφορετικές.



Σχήμα 5-4-5: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση κερατοειδή.

Εξωτερικά βρίσκεται -συνήθως- αέρας, δηλαδή $n = 1$. Η τιμή του δείκτη διάθλασης του κερατοειδή, σύμφωνα με τα πιο πολλά πρότυπα ματιών και αρκετές μελέτες¹⁸, είναι $n_w = 1.376 \pm 0.001$, και καθορίζεται κυρίως από το στρώμα, που αποτελεί το 90% του πάχους του. Στην οπίσθια (εσωτερική) επιφάνειά του υπάρχει το υδατοειδές υγρό, με $n' = 1.336 \pm 0.001$.

Από τα στοιχεία αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την παραξονική διαθλαστική ισχύ για κάθε μία επιφάνεια ξεχωριστά, χρησιμοποιώντας τη σχέση οπτικής ισχύος δίοπτρου (3.2.2):

$$\text{οπτική ισχύς δίοπτρου} \quad P = \frac{n' - n}{R} \quad (5.4.1)$$

όπου n και n' οι τιμές για τους δείκτες διάθλασης της πλευράς πρόσπτωσης και διάθλασης, αντίστοιχα, και R είναι η αντίστοιχη ακτίνα καμπυλότητας.

Με βάση αυτή τη σχέση, η οπτική ισχύς της εξωτερικής επιφάνειας είναι $P_{εξ} = +48.8 \pm 0.6 \text{ dpt}$, ενώ της εσωτερικής είναι $P_{εσ} = -5.9 \pm 0.2 \text{ dpt}$. Αν αγνοήσουμε το πάχος του κερατοειδή σε πρώτη προσέγγιση, με απλή πρόσθεση προκύπτει ότι η οπτική του ισχύς είναι θετική, $\approx +43 \text{ dpt}$, δηλαδή ο κερατοειδής είναι ένας συγκλίνων φακός.

Σε μια δεύτερη προσέγγιση, αν λάβουμε υπ' όψη το πάχος του κερατοειδή ($d = 540 \mu\text{m}$ κεντρικά) και την τιμή του δείκτη διάθλασης ($n_w = 1.376$), η ολική -παραξονική- ισχύς του κερατοειδή υπολογίζεται από τη σχέση (3.3.2), που δίνει την οπτική ισχύ για ένα παχύ φακό, ο οποίος οφείλεται μάλιστα στον *Allvar Gullstrand*:

¹⁸ I. Escudero-Sanz and R.Navarro, "Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye model," Journal of the Optical Society of America A **16** (8) 1881-1891 (1999).

$$P_{\text{κερατοειδή}} = P_{\text{εξωτερικής επιφάνειας}} + P'_{\text{εσωτερικής επιφάνειας}} - \frac{d}{n_v} P \cdot P' \quad (5.4.2)$$

Ο προσεγγιστικός όρος είναι της τάξης του $+0.1 \text{ dpt}$, από όπου προκύπτει ότι η οπτική ισχύς του κερατοειδή είναι, με καλή προσέγγιση, ίση με $+43 \pm 0.8 \text{ dpt}$. Το ‘άθροισμα’ είναι πάλι το ίδιο αν θεωρήσουμε ξεχωριστά τη δακρυϊκή στοιβάδα ως δίοπτρο, και τότε βρίσκουμε: αέρας-δακρυϊκή στοιβάδα $+43.5 \text{ dpt}$, δακρυϊκή στοιβάδα με πρόσθια επιφάνεια κερατοειδή $+5.5 \text{ dpt}$, και πρόσθια με οπίσθια επιφάνεια κερατοειδή -6 dpt .

Οι τιμές για την οπτική ισχύ, όπως την υπολογίσαμε, ισχύουν με την προϋπόθεση ότι ο εξωτερικός χώρος είναι ο αέρας. Αυτό δεν συμβαίνει πάντα. Όπως γνωρίζουμε πολύ καλά όσοι προσπαθούμε να δούμε μέσα στο νερό καθώς κολυμπάμε: δεν βλέπουμε καθόλου, μα καθόλου καλά, ενώ στον αέρα έχουμε φυσιολογική όραση.

Ο λόγος δεν είναι άλλος από το ότι η τιμή του δείκτη διάθλασης του εξωτερικού χώρου με τον οποίο βρίσκεται σε επαφή ο κερατοειδής (νερό) είναι $n = 1.33$, αντί για $n = 1$. Με αυτή την τιμή η οπτική ισχύς του ‘δίοπτρου’ εξωτερικός χώρος (νερό)-δακρυϊκή στοιβάδα μηδενίζεται, και έτσι η συνολική οπτική ισχύς του κερατοειδή πρακτικά μηδενίζεται!

Αυτό είναι κάτι που ίσως γνωρίζουν όσοι πάσχουν από μυωπία. [Σε πρώτη προσέγγιση στη μυωπία ο οφθαλμός έχει περισσότερη οπτική ισχύ από ό,τι χρειάζεται (§ 7.3.1.).] Μέσα στο νερό βλέπουν κάπως καλύτερα -μειώνεται η συνολική διαθλαστική ισχύς, άρα ο βαθμός μυωπίας- από ότι βλέπει μέσα στο νερό ένα άτομο με φυσιολογική όραση!

Κερατοειδής Χιτώνας

Ο κερατοειδής χιτώνας είναι ένας φακός με σχήμα μηνίσκου. Αποτελεί την πρώτη και κύρια ‘διαθλαστική’ μονάδα του οπτικού συστήματος του οφθαλμού.

Έχει θετική οπτική ισχύ $\approx 43 \text{ dpt}$, που οφείλεται σε ένα πολύ μεγάλο μέρος στα χαρακτηριστικά της εξωτερικής του επιφάνειας, δηλαδή καμπυλότητα και διαφορά των δεικτών διάθλασης.

Καθώς ο κερατοειδής είναι η κύρια διαθλαστική επιφάνεια του οφθαλμού, είναι, ταυτόχρονα και η κύρια πηγή διαθλαστικών εκτροπών, τόσο χαμηλής όσο και υψηλής τάξης. Η σημασία των εκτροπών υψηλής τάξης γίνεται ιδιαίτερα εμφανής σε μεγάλες διαμέτρους κόρης (σκοτοπικές συνθήκες). Η περιφέρεια του κερατοειδή, δηλαδή, είναι ‘υπέυθυνη’ για τα υψηλής τάξης σφάλματα, όπως σφαιρική εκτροπή και κόμη.

Έτσι λοιπόν η μελέτη του σχήματος του κερατοειδή δίνει στον ερευνητή και στον κλινικό επιστήμονα μια σειρά από πολύ χρήσιμες πληροφορίες για την ποιότητα της όρασης του εξεταζόμενου, σε όλες τις συνθήκες φωτός. Η σύγχρονη εξέλιξη της μεθόδου καταγραφής σφαλμάτων (εκτροπομετρία) και η διασύνδεση της με την τοπογραφία του κερατοειδή, που θα γνωρίσουμε στην § 8.1.3., δίνει ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για την εύρεση του κατάλληλου τύπου διαθλαστικής διόρθωσης για κάθε ασθενή.

Ασφαιρικότητα Κερατοειδή

Γνωρίζουμε από μετρήσεις τοπογραφίας (§ 8.2.1.) ότι η επιφάνεια του κερατοειδή δεν είναι ιδανικά σφαιρική. Ακόμα και ένας φυσιολογικός κερατοειδής παρουσιάζει μια ασφαιρικότητα, και μάλιστα υπάρχουν διαφορετικές τιμές ασφαιρικότητας για διάφορες ομόκεντρες ζώνες στον ίδιο κερατοειδή, ακόμα και διαφορετικές τιμές στους δύο κύριους διαθλαστικούς μεσημβρινούς. Η διαφορά ανάμεσα στις τιμές αυτές αυξάνει όσο πιο ασύμμετρη είναι η επιφάνεια του κερατοειδή.

Περιφερειακά, η εξωτερική επιφάνεια είναι λιγότερο καμπύλη, με μέση ακτίνα καμπυλότητας 11.7 mm . Ο φυσιολογικός κερατοειδής, δηλαδή, έχει μεγαλύτερη καμπυλότητα (μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας) κεντρικά, είναι πιο πλατύς στην περιφέρεια, με μέση τιμή ασφαιρικότητας $Q = -0.26 \pm 0.18$. [Θυμίζουμε τους ορισμούς ασφαιρικότητας στην § 3.1.2.] Συχνά αναφέρεται και ο παράγοντας σχήματος $p = 1 - Q$. Τοπογραφικές μετρήσεις σε διάφορες έρευνες¹⁹ δίνουν τιμές του παράγοντα σχήματος μεταξύ 0.69 και 0.83.

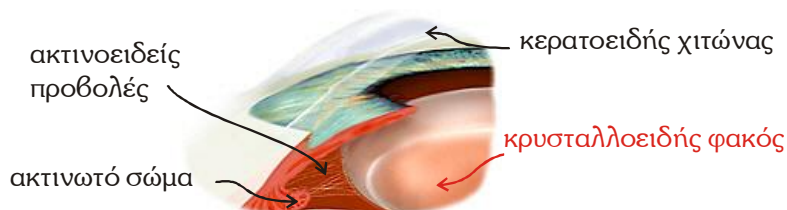
Κάτι αντίστοιχο ισχύει και στην πίσω επιφάνεια, αλλά σε αρκετά μικρότερο βαθμό. Αρκετά συχνά εμφανίζεται ένα μικρό ποσό κερατοειδικού αστιγματισμού (§ 7.3.1.), δηλαδή ο κάθετος μεσημβρινός έχει μεγαλύτερη καμπυλότητα από τον οριζόντιο λόγω της πίεσης των βλεφάρων.

Η κωνική τομή που ανταποκρίνεται στην παραπάνω περιγραφή του κερατοειδή είναι η **προμήκης** (*prolate*). **Πεπλατυσμένοι** (*oblate*) κερατοειδείς με αυξημένη καμπυλότητα περιφερειακά (ασφαιρικότητες από 0 έως +0.5) εμφανίζονται μόνο μετά από μυωπική φωτοδιαθλαστική χειρουργική ή μετά από ορθοκερατολογία (§ 11.1.4). Η ασφαιρικότητα του κερατοειδή έχει οπτικές και μηχανικές 'συνέπειες': συμβάλλει στη μείωση της σφαιρικής εκτροπής και στο να σχηματίσει ο κερατοειδής μια ομαλή, μη απότομη ένωση με το βολβό.

5.4.3. Ο Κρυσταλλοειδής Φακός

Φυσιολογία του Κρυσταλλοειδή Φακού

Ο κρυσταλλοειδής φακός (*crystalline lens*) έχει σχήμα αμφίκυρτο. Αποτελείται από το περιφάκιο, το επιθήλιο, το φλοιό, και τον πυρήνα (*crystalline nucleus*). Το περιφάκιο είναι μια ελαστική μεμβράνη που αποτελείται από γλυκοπρωτεΐνες και περιβάλλει το φακό. Το επιθήλιο βρίσκεται πίσω από το πρόσθιο περιφάκιο και είναι η στοιβάδα που δημιουργεί νέες φακικές ίνες, ενώ ο φλοιός και ο πυρήνας αποτελούν το σώμα του φακού.



Σχήμα 5-4-6: Κρυσταλλοειδής φακός και η σύζευξή του με τον οφθαλμό.

¹⁹ L. Carney, J. Mainstone, and B. Henderson, "Corneal Topography and Myopia," Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. **38** 311-320 (1997).

Ο φακός διατηρεί τη θέση του στον οφθαλμό από τις ίνες του *Zinn*, οι οποίες προσφύονται κατά 180° στον ισημερινό και λίγο μπροστά και πίσω στην πρόσθια και οπίσθια επιφάνεια, αντίστοιχα. Η σύστασή του είναι κατά 65% νερό και 35% στερεά συστατικά, κυρίως πρωτεΐνες (κρυσταλλίνες). Η διαφάνεια του φακού οφείλεται σε αυτήν ακριβώς τη δομή και την απουσία αγγείων και νεύρων, καθώς ο φακός τρέφεται από τον περιβάλλοντα χώρο.

Όπως γνωρίσαμε, ο κρυσταλλοειδής φακός επιτελεί τη λειτουργία της προσαρμογής. Όταν κοιτάζουμε ένα μακρινό αντικείμενο (πρακτικά ό,τι βρίσκεται πέρα από τα 5-6 m) το ακτινωτό σώμα έχει τη μέγιστη εσωτερική του διάμετρο, με αποτέλεσμα οι τεταμένες ίνες του *Zinn* να τεντώνουν το περιφάκιο, δίδοντας στο φακό το σχήμα που έχει σε κατάσταση 'ηρεμίας' (*relaxed state*). Κατά την προσαρμογή ο ακτινωτός μυς συσπάται και η εσωτερική διάμετρος του ακτινωτού σώματος μειώνεται κατά περίπου 1.6 mm, με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης στις ίνες του *Zinn*. Το περιφάκιο χαλαρώνει και ο φακός καμπυλώνεται, παίρνοντας το προσαρμοσμένο (*accommodated*) σχήμα του.

Καταρράκτης

Η πρωτεϊνική φύση του φακού επιτρέπει τη διαφάνειά του. Οι υγρής μορφής πρωτεΐνες, με την επίδραση της υπεριώδους ακτινοβολίας -αλλά και υψηλής θερμότητας- στερεοποιούνται, και γίνονται από διαφανείς, άσπρες αδιαφανείς. Το γνωρίζουμε αυτό, από το 'ασπράδι' του αβγού όταν το βράζουμε.

Με τη χρόνια έκθεση στις υπεριώδεις ακτινοβολίες, οι πρωτεΐνες του κρυσταλλοειδή φακού δημιουργούν τοπικές συμπυκνώσεις και αδιαφάνεια, οι οποίες σκεδάζουν έντονα το φως, και έτσι προκαλείται ο **καταρράκτης** (*cataract*). Το όνομα αυτό έχει τις ρίζες του σε μια παλιά εντύπωση των αρχαίων Ελλήνων ότι προέρχεται από την πτώση νερού.

Το οπτικό φαινόμενο που κυριαρχεί στον καταρράκτη είναι η σκέδαση, με αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας της όρασης. [Η σκέδαση και η επίδρασή του στον περιορισμό της όρασης συζητείται στην § 6.5.]. Συχνότεροι είναι οι γεροντικοί και προγεροντικοί καταρράκτες και αρχίζουν από τα 55 χρόνια.

Καταρράκτης δημιουργείται και από άλλα αίτια εκτός από τη χρόνια έκθεση στις υπεριώδεις ακτινοβολίες. Είναι γενικά ο κακός μεταβολισμός, σε συνδυασμό με έλλειψη βιταμίνης C που διαταράσσουν τη σωστή θρέψη του κρυσταλλοειδή, επιπλοκές από άλλες παθήσεις -χρόνιες χοραιοειδίτιδες, ή παλιά αποκόλληση του αμφιβληστροειδή, ή ακόμα και τραυματισμοί.

Οι ενδοκρινικοί καταρράκτες προκαλούνται από διαταραχές του μεταβολισμού όπως ενδοκρινική παύση ή άλλη δυσμεταβολική κατάσταση. Έτσι έχουμε καταρράκτη που εμφανίζεται λόγω σακχαρώδη διαβήτη, τη γαλακτοζαιμία, καταρράκτη που συνδυάζεται με χρόνιες δερματολογικές παθήσεις, μεταξύ των οποίων οι ατοπικές δερματίτιδες, καταρράκτη της μυοπάθειας, του μογγολισμού και της τιτανίας. Οι φαρμακευτικοί καταρράκτες προκαλούνται από παρατεταμένη και μακρόχρονη χρήση κορτικοστεροειδών.

Οι συγγενείς καταρράκτες εμφανίζονται από τη γέννηση του παιδιού και αποδίδονται είτε σε κληρονομικές αιτίες είτε σε εμβρυοπάθειες, οι οποίες οφείλονται σε πάθηση της μητέρας κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης. Οι συγγενείς καταρράκτες δεν εξελίσσονται, αντίθετα με τους προηγούμενους, που εξελίσσονται αργά αλλά σταθερά.

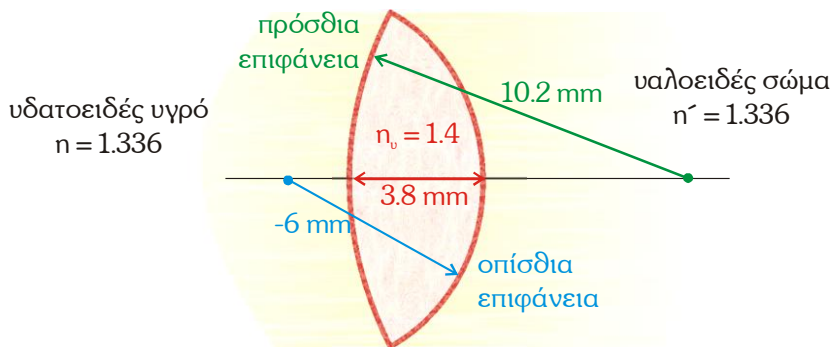
Είναι δυνατό να ανιχνευθεί ο καταρράκτης σε πρώιμη μορφή με εκτροπομετρία. Συγκεκριμένα, η παρουσία του τρίφυλλου (Πολυώνυμα *Zernike* $Z_{3,3}$ και $Z_{3,-3}$, § 6.2.6), η οποία είναι συσχετισμένη με την παρουσία κέντρων σκέδασης στον κρυσταλλοειδή φακό, θεωρείται ως ένδειξη πρώιμης μορφής καταρράκτη²⁰.

Σχήμα και Οπτικές Ιδιότητες του Κρυσταλλοειδή Φακού

Το ‘έξωτερικό’ του σχήμα του κρυσταλλοειδή είναι σχεδόν κυκλικό, με ακτίνα $\approx 5.5 \text{ mm}$. Από τη διατομή του φακού διαπιστώνουμε ότι έχει σχήμα αμφίκυρτου φακού, με μέση τιμή πάχους κεντρικά $d = 3.8 \pm 0.2 \text{ mm}$, και με παραξονική ακτίνα καμπυλότητας στην πρόσθια επιφάνεια $10.2 \pm 0.1 \text{ mm}$ και στην οπίσθια $-6.0 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$.

Πριν από την πρόσθια επιφάνεια βρίσκεται το υδατοειδές υγρό με $n = 1.336 \pm 0.001$. Η τιμή του δείκτη διάθλασης του κρυσταλλοειδή στο κέντρο του είναι $n_o = 1.40 \pm 0.02$. Στην οπίσθια επιφάνειά του υπάρχει το υαλοειδές σώμα, με $n' = 1.336 \pm 0.001$.

Με την ίδια λογική που υπολογίσαμε την οπτική ισχύ στον κερατοειδή μπορούμε να υπολογίσουμε την οπτική ισχύ στον κρυσταλλοειδή φακό. Για την πρόσθια επιφάνεια βρίσκουμε $P = 8.1 \pm 0.2 \text{ dpt}$, ενώ για την εσωτερική επιφάνεια $P' = 13.2 \pm 0.4 \text{ dpt}$. Με απλή πρόσθεση βρίσκουμε ότι η συνολική οπτική του ισχύς είναι θετική, με τιμή $P_{\text{ολ}} \approx +21.3 \pm 0.5 \text{ dpt}$. Λαμβάνοντας υπ’ όψη το πάχος του φακού έχουμε μια μικρή διόρθωση -0.3 dpt . Ο κρυσταλλοειδής είναι ένας συγκλίνων φακός, όπως και ο κερατοειδής χιτώνας.



Σχήμα 5-4-7: Απλοποιημένη σχηματική αναπαράσταση κρυσταλλοειδή.

Κατά την προσαρμογή οι ακτίνες καμπυλότητας του φακού αλλάζουν σε $\approx + 5 \text{ mm}$ στην πρόσθια και $- 5 \text{ mm}$ στην οπίσθια. Επαναλαμβάνοντας τους υπολογισμούς, βρίσκουμε οπτική ισχύ $P = P' = 16.8 \text{ dpt}$, με $P_{\text{ολ}} \approx 32.7 \text{ dpt}$. Λαμβάνοντας υπ’ όψη το νέο πάχος του φακού έχουμε μια διόρθωση -0.9 dpt .

Η αρνητική ‘διόρθωση’ ως μη μας παραξενεύει. Θυμίζουμε (§ 3.3.2, σχήμα 3-3-6) ότι η οπτική ισχύς σε ένα φακό με ομόσημη οπτική ισχύ στα δύο δίοπτρα (αμφίκυρτους και αμφίκοιλους) μειώνεται με την αύξηση του πάχους του. Αυτό μπορεί να μη φαίνεται τόσο κατανοητό γιατί διαπιστώνουμε ότι η εστία πλησιάζει στην κορυφή του φακού. Η εστιακή απόσταση όμως μετράται από το κύριο σημείο, όχι από την κορυφή. Με την αύξηση του πάχους, τα κύρια σημεία ‘συμπιέζονται’ πλησιάζοντας το κέντρο του φακού με πιο γρήγορο

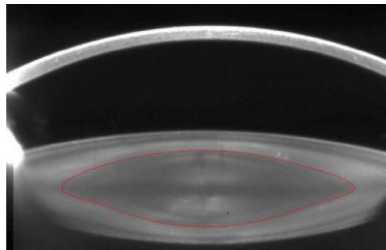
²⁰ Charles Campbell, “Observations on the optical effects of a cataract,” J. Cataract Refract. Surg. **25** 995–1003 (1999).

ρυθμό. Στους μηνίσκους φακούς -κερατοειδής- η οπτική ισχύς στις δύο επιφάνειες είναι ετερόσημη, και έτσι η διόρθωση είναι θετική, η οπτική ισχύς αυξάνει με το πάχος του φακού. Η διόρθωση όμως στον κερατοειδή είναι κατά πολύ μικρότερη (+ 0.1 *dpt*), λόγω του μικρότερου πάχους του φακού.

Κρυσταλλοειδής Φακός

Ο κρυσταλλοειδής φακός είναι ένας φακός με σχήμα αμφίκυρτο. Αποτελεί τη δεύτερη 'διαθλαστική' μονάδα του οπτικού συστήματος του οφθαλμού, με θετική οπτική ισχύ από 20 έως 32 *dpt*. Σε αυτόν οφείλεται η ιδιότητα της προσαρμογής της διαθλαστικής ισχύος του οφθαλμού.

Ας σταθούμε όμως για λίγο στο θέμα της τιμής του δείκτη διάθλασης. Στο πρότυπο *Gullstrand* θεωρούμε $n = 1.406$ στον πυρήνα και $n = 1.386$ στο φλοιό. Μιλώντας για τιμές του δείκτη διάθλασης πρέπει πάντα να αναφέρουμε το μήκος κύματος για το οποίο έχει υπολογιστεί· αν όχι, υπονοείται το μέσο μήκος κύματος του ορατού. Μια ματιά στο σχήμα 6-1-3 δείχνει ότι η τιμή του δείκτη διάθλασης σε ένα υλικό εξαρτάται από το μήκος κύματος.



Σχήμα 5-4-8: Όρια του πυρήνα στον κρυσταλλοειδή φακό.

Ακόμα κι αν κρατήσουμε σταθερό το μήκος κύματος διαπιστώνουμε ότι στον κρυσταλλοειδή φακό η τιμή του δείκτη διάθλασης παρουσιάζει **βαθμιαίες μεταβολές** (*GRIN-GRadient INdex lens*). Η τιμή του δείκτη διάθλασης μειώνεται ακτινωτά από το κέντρο προς την περιφέρεια και τον ισημερινό. Γνωρίσαμε την αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου φακού στην § 2.4.

Η διαβαθμισμένη τιμή του δείκτη διάθλασης συντελεί σε μια αυξημένη οπτική ισχύ στο φακό, σχεδόν σα να είχε όλος ο φακός τιμή δείκτη διάθλασης μεγαλύτερη από 1.4. Έτσι, στην οπτική ισχύ του φακού από την καμψυλότητα των επιφανειών προστίθεται επιπλέον οπτική ισχύς από τη βαθμιαία αύξηση του δείκτη διάθλασης, κάτι που βοηθά ιδιαίτερα κατά την προσαρμογή. Επιπλέον, η σχεδόν παραβολική μείωση της τιμής του δείκτη διάθλασης μειώνει το σφάλμα σφαιρικής εκτροπής και συντελεί σε καλύτερη, πιο στιγματική απεικόνιση.

Σύμφωνα με το σχήμα 5-4-9, η τιμή του δείκτη διάθλασης μεταβάλλεται με την απόσταση από το κέντρο του φακού r με μια σχέση της μορφής:

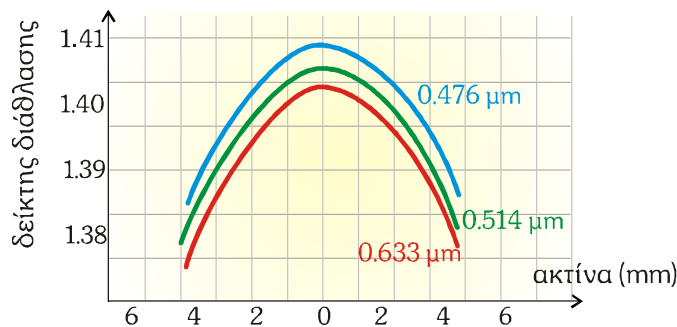
$$\text{μεταβολή δ.δ. κρυσταλλοειδή} \quad n(r) = n_0 + n_1 r^2 + n_2 r^4 + \dots \quad (5.4.3)$$

και, σύμφωνα με τον *Gullstrand*, οι δύο πρώτες τιμές για τους συντελεστές n είναι: $n_0 = 1.406$ και $n_1 = -0.006269$. Η οπτική ισχύς που οφείλεται στη μεταβολή αυτή εκφράζεται:

αύξηση οπτικής ισχύος λόγω μεταβλητού δείκτη διάθλασης:

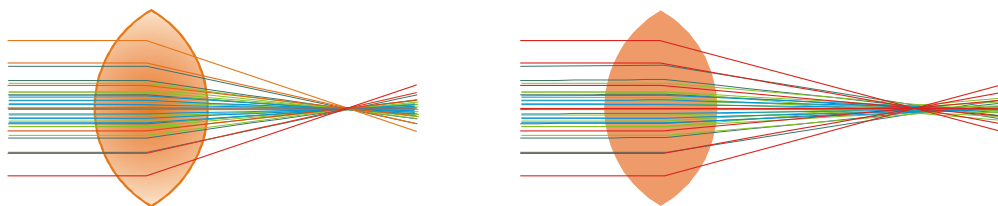
$$P' (dpt) = -\frac{2d(mm)}{r^2(mm) \cdot (\frac{2}{3}n_1 + \frac{3}{5}n_2 + \dots)} \quad (5.4.4)$$

όπου d το πάχος του φακού και r η ακτίνα του φακού σε mm . Το ότι μειώνεται η οπτική ισχύς εκφράζεται με αρνητικές τιμές για τους συντελεστές n_1, n_2 , και γι' αυτό η εμφάνιση του (-) στην παραπάνω σχέση.



Σχήμα 5-4-9: Κατανομή της τιμής του δείκτη διάθλασης στον κρυσταλλοειδή.

Στο πρότυπο *Gullstrand* αυτό ενσωματώνεται θεωρώντας έξι διαθλαστικές επιφάνειες, με το νέο ζεύγος επιφανειών να αντιπροσωπεύει ένα φακό μέσα στο φακό με δείκτη διάθλασης 1.406, ενώ ο φλοιός έχει 1.386.



Σχήμα 5-4-10: Σχηματικό διάγραμμα ακτίνων για την περίπτωση που στον κρυσταλλοειδή θεωρήσουμε ότι η τιμή του δείκτη διάθλασης είναι (α) παραβολικά διαβαθμισμένη και (β) σταθερή.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό του κρυσταλλοειδή φακού είναι ότι, επειδή στην περιφέρεια του φακού δεν υπάρχει πυρήνας, παρά μόνο φλοιός, εμφανίζεται αρνητική σφαιρική εκτροπή (κατά *Seidel*, § 6.2.4.) αντί για θετική, όπως θα περιμέναμε από τη γεωμετρία του. Αυτό ενισχύεται από το ότι οι επιφάνειες του κρυσταλλοειδή είναι υπερβολικές, με τιμές ασφαιρικότητας, κατά μέσο όρο, $Q = -5$ και -4 για την πρόσθια και την οπίσθια, αντίστοιχα.

Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι ο φακός είναι καλά 'σχεδιασμένος' για να αντισταθμίζει τη θετική σφαιρική εκτροπή που προέρχεται από τον κερατοειδή.

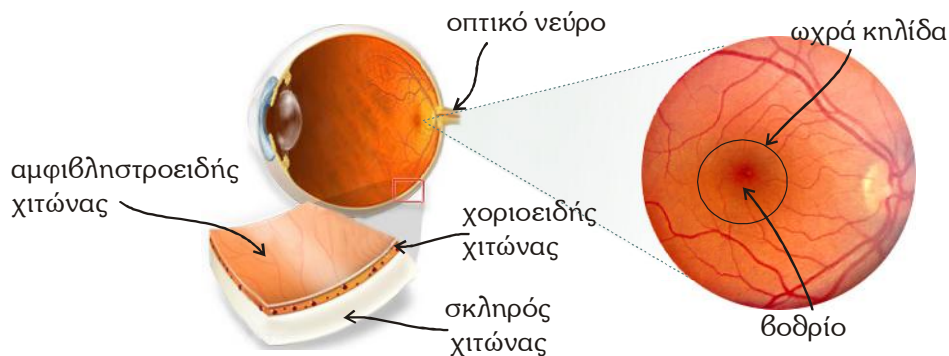
Μάλιστα, έρευνες έχουν δείξει ότι κατά την προσαρμογή και τη γήρανση η αρνητική σφαιρική εκτροπή του φακού αυξάνεται, εξισορροπώντας ακόμα καλύτερα τη θετική σφαιρική εκτροπή του κερατοειδή. Μήπως τελικά ο *Helmholtz* πρέπει να ...αρχίσει να ανησυχεί για τις 'κατηγορίες' που εκτόξευσε ενάντια στο οπτικό σύστημα του οφθαλμού;

5.4.4. Ο Αμφιβληστροειδής: το Φιλμ - και όχι Μόνο - του Οφθαλμού

Φυσιολογία του Αμφιβληστροειδή Χιτώνα

Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας, με πάχος $\approx 0.5 \text{ mm}$, είναι το 'εσωτερικό κάλυμμα' του φωτογραφικού θαλάμου που λέγεται οφθαλμός. Αρχίζει από το τέλος του ακτινωτού σώματος, το *pars plana*, συνεχίζει στην τυφλή μοίρα, μετά στην **πριονωτή ζώνη** (*ora serrata*), και τέλος στο 'ενεργό' μέρος του χιτώνα, την οπτική μοίρα, που περιέχει τις φωτοευαίσθητες νευρικές απολήξεις. Σε αντίθεση με το θάλαμο της φωτογραφικής μηχανής -παραλληλόγραμμο-, στον οφθαλμό ο χιτώνας είναι σχεδόν σφαιρικός, με ακτίνα καμπυλότητας περίπου -12 mm . Το πρόσημο (-) απλώς τονίζει το κοίλο σχήμα του.

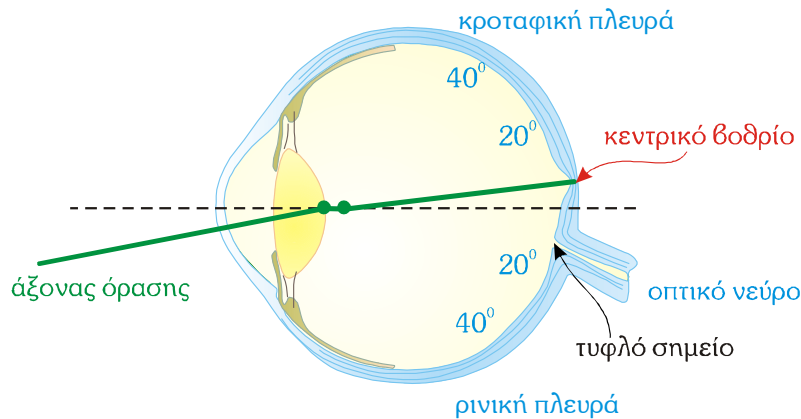
Η εσωτερική επιφάνεια είναι καλυμμένη με το **μέλαν στρώμα** ή **μελαχρωστικό επιθήλιο** (*retinal pigment epithelium*), εκτός από την περιοχή στον οπίσθιο πόλο, όπου βρίσκονται οι φωτοευαίσθητες νευρικές απολήξεις. Το μελαχρωστικό επιθήλιο, εκτός από το διατροφικό και φαγοκυτταρικό ρόλο, έχει και οπτικό ρόλο, καθώς η μελανίνη που περιέχει εμποδίζει τη διάδοση του φωτός στο χοριοειδή αποτρέποντας τη μείωση της ποιότητας της όρασης από πολλαπλές ανακλάσεις και σκεδάσεις, ενώ απορροφά το υπεριώδες, το ιώδες και το μπλε, μειώνοντας έτσι την έκθεση του χοριοειδή σε αυτές τις βλαβερές ακτινοβολίες. Η περιοχή της κόρης φαίνεται μαύρη, ακριβώς λόγω του μελαχρωστικού επιθηλίου. Η σημασία του μελαχρωστικού επιθηλίου φαίνεται στον αλφισμό. Σε αυτά τα περιστατικά, λόγω έλλειψης μελανίνης, ο ασθενής εμφανίζει έντονη φωτοφοβία, που οφείλεται στις πολλαπλές ανακλάσεις του φωτός μέσα στον οφθαλμό, οι οποίες προκαλούν φωτεινό θάμβος.



Σχήμα 5-4-11: Ανατομία του αμφιβληστροειδή

Στην επιφάνεια του χιτώνα μπορούμε να διακρίνουμε:

- την **ωχρή κηλίδα** (*macula*) η οποία έχει διάμετρο περίπου 5 mm και αντιστοιχεί σε γωνία όρασης περίπου $\pm 17^\circ$.
- το κεντρικό **βοθρίο** (*fovea*), μια εμβάθυνση του αμφιβληστροειδή στο κέντρο της ωχρής κηλίδας με διάμετρο 1.5 mm και που αντιστοιχεί σε γωνία 3° με 5° ρινικά. Το κεντρικό βοθρίο βρίσκεται κροταφικά 2° με 3° και προς τα πάνω σε σχέση με τον οπίσθιο πόλο του αμφιβληστροειδή.
- την **οπτική θηλή** (*papilla*), το σημείο εισόδου του οπτικού νεύρου και των αγγείων του αμφιβληστροειδή. Δεν διαθέτει φωτοϋποδοχείς και συνεπώς αποτελεί το **τυφλό σημείο** (*blind spot*) στο οπτικό πεδίο. Το ότι αυτή η ...μαύρη τρύπα στο οπτικό πεδίο δεν γίνεται αντιληπτή, αποτελεί άλλο ένα εντυπωσιακό δείγμα της δουλειάς που επιτελεί ο εγκέφαλος.

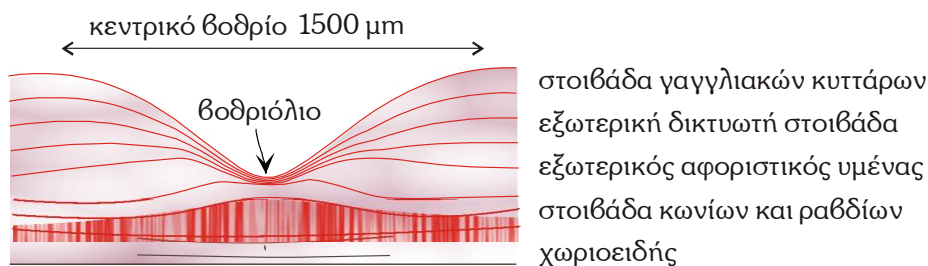


Σχήμα 5-4-12: Το κεντρικό βοθρίο βρίσκεται προς την κροταφική πλευρά και προς τα πάνω.

Ένα ‘περίεργο λάθος’ της φύσης είναι ότι για να φτάσει το φως στους φωτοϋποδοχείς πρέπει πρώτα να διαπεράσει τις νευρικές και αιμοφόρες στοιβάδες του αμφιβληστροειδή (σχήμα 5-4-13). Το φως, δηλαδή, για να γίνει αντιληπτό, πρέπει να διαπεράσει όλες αυτές τις στοιβάδες και να φτάσει στις απολήξεις των κωνίων και των ραβδίων για να τις διεγείρει, και αυτό είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό στα μάτια όλων των σπονδυλωτών. Ναι μεν οι όλες αυτές οι νευρικές στοιβάδες είναι αμύελες, ώστε να είναι διαφανείς στο ορατό φάσμα, ωστόσο υπάρχει μια απώλεια σήματος (απορρόφηση & σκέδαση) κατά τη διέλευση αυτή. Μάλιστα, η ύπαρξη του τυφλού σημείου οφείλεται ακριβώς σε αυτή την ‘αναποδιά’ του αμφιβληστροειδή: για να συγκεντρωθούν στο οπτικό νεύρο όλες οι νευρικές απολήξεις πρέπει να περάσουν μέσα από τον αμφιβληστροειδή.

Παραμένει μυστήριο το γιατί συμβαίνει αυτό. Σύμφωνα με μια θεωρία, στην αρχή της εξελικτικής πορείας των σπονδυλωτών ο αμφιβληστροειδής προέκυψε από μια εσωτερική πτύκωση του αναπτυσσόμενου εγκεφάλου, και τα φωτοευαίσθητα κύτταρα κατέληξαν στην εσωτερική πλευρά της πτύκωσης.

Στο βοθρίο τα πράγματα καλυτερεύουν. Ο αμφιβληστροειδής είναι πιο λεπτός, λόγω της μετατόπισης προς τα πλάγια των υπόλοιπων στοιβάδων, έτσι ώστε το φως να φτάσει στα κωνία με τη λιγότερη δυνατή απώλεια. Στο κεντρικό σημείο βρίσκεται το **βοθριόλιο** (*foveola*) με διάμετρο 0.3 mm (γωνία 1°), και σε αυτό δεν υπάρχουν ραβδία παρά μόνο κωνία. Η περιοχή στερείται αγγείων (ανάγγειος ζώνη, *foveal avascular zone*). Ο αμφιβληστροειδής σε αυτό το σημείο τρέφεται αποκλειστικά από τα αγγεία του υποκείμενου χοριοειδή. Το είδωλο του αντικειμένου στο οποίο προσηλώνουμε σχηματίζεται πάντα στο βοθριόλιο που διαθέτει τη μεγαλύτερη πυκνότητα κωνίων, και έτσι τη μέγιστη διακριτική ικανότητα, και άρα οπτική οξύτητα.



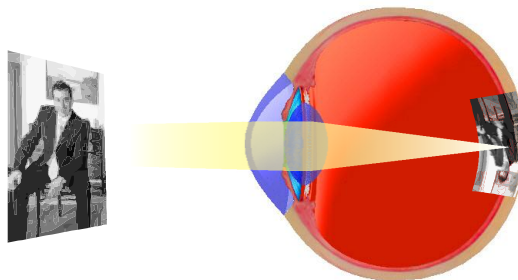
Σχήμα 5-4-13: Κεντρικό βοθρίο και βοθριόλιο.

Απεικόνιση στον Αμφιβληστροειδή

Μέσα στον οφθαλμό, και συγκεκριμένα στην ωχρή κηλίδα, σχηματίζεται το **αμφιβληστροειδικό είδωλο** (*retinal image*). Το είδωλο αυτό είναι πραγματικό, αντεστραμμένο, και μικρότερο του αντικειμένου. Θα μπορούσαμε σε μια πρώτη προσέγγιση να χαρακτηρίσουμε την απεικόνιση στον αμφιβληστροειδή ως μια απλή αλληλουχία από το αντικείμενο, τη διάθλασή του από τα οπτικά στοιχεία και το σχηματισμό του ειδώλου, όπως γίνεται και με την απεικόνιση σε μια φωτογραφική μηχανή.

Προσεκτική παρατήρηση όμως δείχνει ότι τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Εκτός από τις επιδράσεις των οφθαλμικών μέσων, μπορούμε να διαπιστώσουμε μερικές διαφοροποιήσεις:

Η πρώτη διαφορά βρίσκεται στο σχήμα του φωτογραφικού φιλμ. Αν και ...τείνει προς εξαφάνιση, είναι γνωστό ότι το φιλμ, -και η σύγχρονή του έκδοση, το *CCD* ή το *CMOS*- δηλαδή η επιφάνεια καταγραφής του ειδώλου, είναι επίπεδη. Αυτό κάθε άλλο παρά συμβαίνει στον αμφιβληστροειδή, που είναι καμπύλος. Ωστόσο, το πρόβλημα δεν το έχει ο οφθαλμός, αλλά η φωτογραφική μηχανή. Θα γνωρίσουμε ότι από κάθε εγκάρσια εκτεταμένο αντικείμενο -σχεδόν ποτέ δεν διαβάζουμε ένα γράμμα μόνο, άρα μας ενδιαφέρει το πώς απεικονίζεται μια ολόκληρη σελίδα- το ευκρινές είδωλο σχηματίζεται όχι σε ένα επίπεδο αλλά σε μια καμπύλη επιφάνεια, και αυτό είναι το σφάλμα καμπύλωσης πεδίου (§ 6.1.5.). Τόσο η γραμμική, όσο και η εγκάρσια μεγέθυνση μειώνονται σταδιακά καθώς απομακρυνόμαστε από τον οπτικό άξονα. Η καμπύλη επιφάνεια του αμφιβληστροειδή είναι προετοιμασμένη να ανιχνεύσει ένα είδωλο καλύτερα από ό,τι ένα φιλμ!



Σχήμα 5-4-14: Σχηματισμός καμπύλου ειδώλου στον αμφιβληστροειδή.

Η δεύτερη διαφορά είναι ότι δείκτης διάθλασης του μέσου στη φωτογραφική μηχανή (αέρας) είναι ίσος με αυτόν του εξωτερικού χώρου, ενώ στον οφθαλμό υπάρχει μια σημαντική διαφορά ($n = 1.34$). Έτσι τα γεωμετρικά μεγέθη σχετικά με το σχηματισμό ειδώλου είναι 'συμπιεσμένα' αντίστροφα ανάλογα, δηλαδή περίπου κατά 75% από ότι θα συνέβαινε αν αντί για το υαλώδες σώμα είχαμε απλώς αέρα: στο υαλώδες σώμα το μήκος κύματος μικραίνει αντίστροφα ανάλογα με την τιμή του δείκτη διάθλασης (§ 1.2.4.).

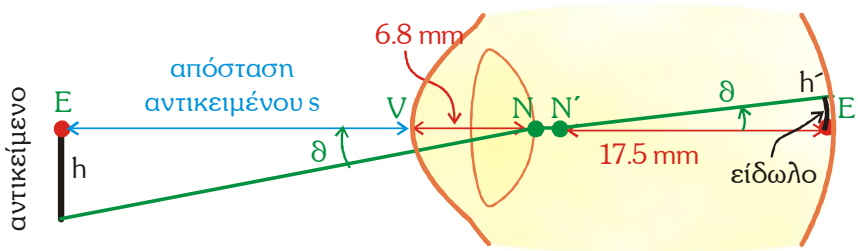
Αυτό επηρεάζει τόσο το μέγεθος του ειδώλου, όσο και την έκταση των οπτικών εκτροπών -και, αντίστοιχα, του δίσκου *Airy* (§ 6.3.2.). Ο 'συντελεστής σμίκρυνσης' αυξάνει λίγο, αν λάβουμε υπ' όψη το λόγο μεγέθυνσης κόρης. Το μέγεθος του αμφιβληστροειδικού ειδώλου h' μπορεί να υπολογιστεί ακολουθώντας μια ακτίνα που διέρχεται από τα δεσμικά σημεία. Γνωρίζουμε ότι μια ακτίνα που 'στοχεύει' προς το ένα δεσμικό σημείο N , εξέρχεται από το άλλο, N' με την ίδια γωνία. Εκφράζουμε, λοιπόν το μέγεθος του ειδώλου h' ως:

$$\text{ύψος ειδώλου} \quad h' = \vartheta \cdot (N'E') \quad (5.4.5)$$

όπου $N'E'$ η απόσταση του δεσμικού σημείου N' από τον εσωτερικό πόλο του αμφιβληστροειδή (= 17.5 mm για ένα προσαρμοσμένο φακό), και η φαινόμενη γωνία ϑ' εκφράζεται σε ακτίνια (rad). Για ένα αντικείμενο με ύψος h σε απόσταση s από την κορυφή του κερατοειδή, μπορούμε να γράψουμε:

$$\text{ύψος αντικειμένου} \quad h = \vartheta \cdot (NE) = \vartheta \cdot (s + VN) \quad (5.4.6)$$

όπου ϑ είναι η φαινόμενη γωνία (σε rad) που σχηματίζει το είδωλο από τον οφθαλμό και VN η απόσταση της κορυφής του κερατοειδή V από το δεσμικό σημείο N (= 6.8 mm για ένα προσαρμοσμένο φακό).



Σχήμα 5-4-15: Μέγεθος αμφιβληστροειδικού ειδώλου.

Είναι σχετικά εύκολο να εκφράσουμε το μέγεθος του αμφιβληστροειδικού ειδώλου (σε mm), λαμβάνοντας υπ' όψη το 'μήκος' του οπτικού θαλάμου, καταλήγοντας στην απλή σχέση:

$$\text{μέγεθος ειδώλου} \quad h' (mm) = -h (mm) \frac{17.5}{s (mm) + 7.5} \quad (5.4.7)$$

όπου το (-) στη σχέση τοποθετείται για να τονίσει ότι το είδωλο είναι αντεστραμμένο. Αν το αντικείμενο βρίσκεται αρκετά μακριά από τον οφθαλμό (πρακτικά $s > 6 \text{ m}$), τότε είναι αρκετά πιο εύκολο να εκφράσουμε το μέγεθος του αμφιβληστροειδικού ειδώλου ως:

$$h' (mm) = -16.8 \times \frac{\text{μέγεθος αντικειμένου}}{\text{απόσταση αντικειμένου}} = -16.8 \cdot \vartheta (rad) \quad (5.4.8)$$

όπου στην παραπάνω σχέση η φαινόμενη γωνία ϑ εκφράζεται σε ακτίνια (rad), και οι αποστάσεις δεσμικών σημείων υπολογίζονται για τον μη προσαρμοσμένο οφθαλμό.

Ένας απλός κανόνας να μετατρέπουμε γωνίες σε mm πάνω στον αμφιβληστροειδή (οι γωνίες μετρώνται από το δεσμικό σημείο) είναι ο:

$$1 \text{ mm} \leftrightarrow 0.06 \text{ rad} = 3.345^\circ \quad (5.4.9)$$

Παράδειγμα \boxplus :

Ένας καλαθοσφαιριστής ύψους 2 m που βρίσκεται σε απόσταση 20 m μακριά μας φαίνεται με γωνία $\vartheta = 2/20 = 0.1 \text{ rad}$, και το αμφιβληστροειδικό του είδωλο έχει ύψος $h' = 1.68 \text{ mm}$.

5.5. Οι Φωτοϋποδοχείς της Όρασης

Φαντασθείτε στο ...κοντινό μέλλον μια διαφήμιση στα καταστήματα ηλεκτρονικών: *‘Νέο μοντέλο, κάμερα 120 Megapixel, με CMOS για φως ημέρας και για φως νύχτας, f# 2.8, έγχρωμη, με εξελεγμένο white balance, αυτόματη επεξεργασία σήματος και αναγνώριση χαρακτήρων, αλλά με 0 MByte μνήμη ...’.*

Τη διαφήμιση αυτή θα τη διαβάζουμε με ένα οπτικό σύστημα με τα ίδια ακριβώς χαρακτηριστικά, σε κυκλοφορία εδώ και ...αρκετούς αιώνες: ο οφθαλμός ανιχνεύει το φως με περίπου 125 εκατομμύρια φωτοϋποδοχείς (*photoreceptors*), σε δύο βασικές μορφές: τα **κωνία** (*cones*) και τα **ραβδία** (*rods*). Τα ονόματα τους σχετίζονται με το σχήμα τους, καθώς τα ραβδία είναι πιο επιμήκη και λεπτά, ενώ τα κωνία μοιάζουν, κάπως, με κώνο. Πέρα από το σχήμα τους, οι διαφορές τους είναι πολλές και σημαντικές. Ας τις γνωρίσουμε:

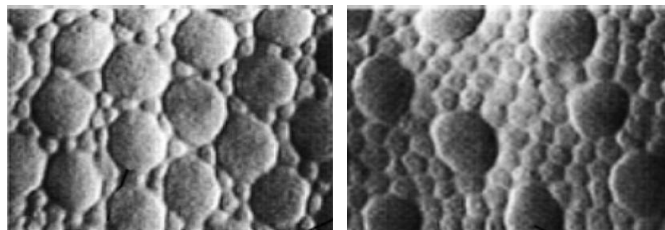


Σχήμα 5-5-1: Φωτογραφία κωνίων (πιο ‘κοντά’ και με λεπτές απολήξεις) και ραβδίων (πιο ‘κυλινδρικά’) *in vitro* από σαρωτικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο.

Τα κωνία λειτουργούν σε κανονικές συνθήκες φωτισμού -όραση ημέρας- και επιτρέπουν την αντίληψη χρωμάτων, ενώ τα ραβδία έχουν τη ...νυκτερινή βάρδια: λειτουργούν σε χαμηλό φωτισμό. Ο λόγος δεν είναι άλλος από το ότι τα ραβδία είναι σχεδόν 500 φορές πιο ευαίσθητα από τα κωνία, καθώς μπορούν να διεγερθούν ακόμα και από ένα μόνο φωτόνιο, αλλά με φως ημέρας το σήμα τους υφίσταται κορεσμό, και έτσι ‘βγαίνουν’ εκτός λειτουργίας.

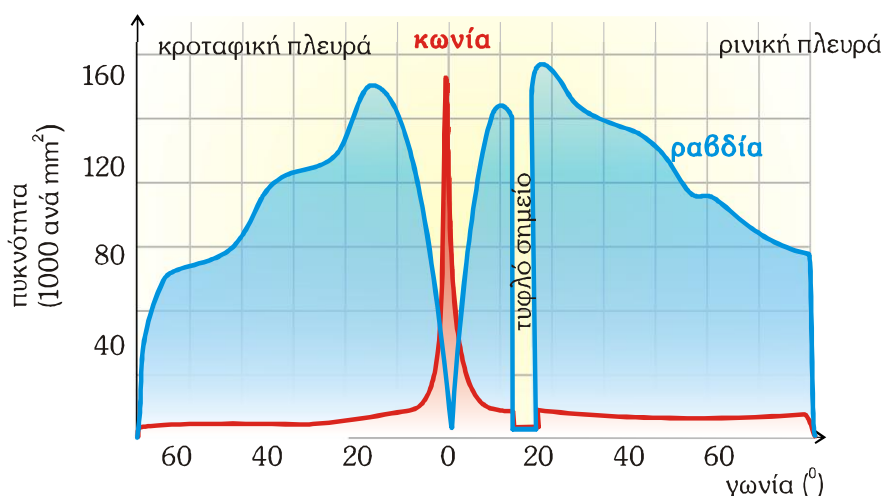
Το ‘αντίτιμο’ της αυξημένης ευαισθησίας στα ραβδία είναι η μειωμένη διακριτική ικανότητα στο χώρο και το χρόνο. Αυτό οφείλεται στη ‘συνδεσμολογία’ τους: π.χ. μέχρι και 100 ραβδία συνάπτονται σε ένα γαγγλιακό κύτταρο. Έτσι το σήμα τους ενισχύεται -αυξημένη ευαισθησία- αλλά αυτό έχει συνέπειες. Η χρονική απόκριση γίνεται πιο αργή, και αυξάνεται σε $\approx 200 \text{ msec}$, και η χωρική διακριτική ικανότητα μειώνεται: δεν μπορούμε να ξεχωρίσουμε από ποιο ακριβώς ραβδίο προέρχεται το σήμα και ούτε να διακρίνουμε ‘χαρακτηριστικά’ μεταξύ των σημάτων από τα συνδεδεμένα ραβδία.

Το αντίθετο ακριβώς συμβαίνει με τα κωνία -ιδιαίτερα στο κεντρικό βοθρίο- τα οποία είναι ικανά να αντιληφθούν λεπτά χαρακτηριστικά στο σήμα και ταχείες εναλλαγές της εικόνας στο χρόνο (50 msec χρονική απόκριση). Τα κωνία συνδέονται με τα γαγγλιακά κύτταρα σε αναλογία 1:1 στο κεντρικό βοθρίο, και έτσι έχουν αυξημένη διακριτική ικανότητα, αλλά μειωμένη ευαισθησία σε χαμηλό φωτισμό. [Στα κωνία που βρίσκονται στην περιφέρεια συναντάται και πολλαπλή συνδεσμολογία, περίπου 6 κωνία μαζί].



Σχήμα 5-5-2: Το μωσαϊκό των φωτοϋποδοχέων in vitro όπου διακρίνονται κωνία (μεγάλα κύτταρα) και ραβδία (μικρά κύτταρα) (α) σε 5° και (β) 20° από το κεντρικό βοθρίο. Η πυκνότητα των ραβδίων αυξάνεται περιφερειακά.

Η χωρική κατανομή των ραβδίων και των κωνίων είναι δραστικά διαφορετική. Τα 5 εκατομμύρια κωνία, με μέγεθος περίπου $\sim 0.2 \mu\text{m}$ ($1/3 \text{ arcmin}$ σε διάμετρο), είναι συγκεντρωμένα κυρίως στην περιοχή του κεντρικού βοθρίου²¹, και γι' αυτό η όραση που οφείλεται σε αυτά ονομάζεται και **ωχρική όραση** (*foveal vision*). Αντίθετα, τα σχεδόν 120 εκατομμύρια ραβδία με μέγεθος περίπου $\sim 0.05 \mu\text{m}$ ($1/10 \text{ arcmin}$), εμφανίζουν τη μέγιστη πυκνότητά τους (170,000 ανά mm^2) στην περιφέρεια του κεντρικού βοθρίου, περίπου 5 mm (15-20°) μακριά, όπου κυριαρχούν σε σχέση με τα κωνία σε αναλογία πάνω από 20:1.



Σχήμα 5-5-3: Η πυκνότητα των κωνίων και των ραβδίων από το κέντρο προς την περιφέρεια ²².

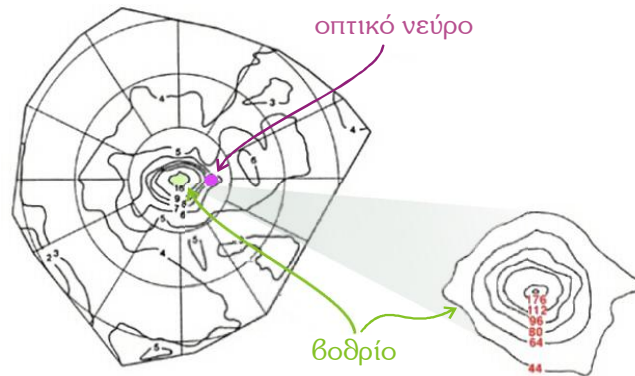
Διαπιστώνουμε τη δραστικά διαφορετική χωρική κατανομή μεταξύ ραβδίων και κωνίων. Το μόνο κοινό στοιχείο είναι η πλήρης έλλειψη φωτοϋποδοχέων στο τυφλό σημείο. Δεν είναι καθόλου παράξενο λοιπόν που συναντάμε τον όρο ενεργός όραση (*active vision*). Η κάθε άλλο παρά ομοιογενής κατανομή των φωτοαισθητήρων -μια ακόμα διαφορά από το φωτογραφικό φιλμ- δίνει δυναμικά χαρακτηριστικά στην όραση.

Έχοντας μεγάλη πυκνότητα ευαίσθητων ραβδίων, η περιφέρεια (*peripheral vision*) έχει αναλάβει το ρόλο του αρχικού εντοπισμού ενός οπτικού ερεθίσματος, π.χ. ενός κινούμενου αντικειμένου, ενώ η ωχρική όραση αναλαμβάνει την

²¹ C.A. Curcio and A.E. Hendrickson, "Organization and development of the primate photoreceptor mosaic," *Prog. Retinal Res.* **10** 89-120 (1991).

²² G. Östenberg, "Topography of the layer of rods and cones in the human retina," *Acta Ophthalmol. Suppl.* **6** 11-103 (1935).

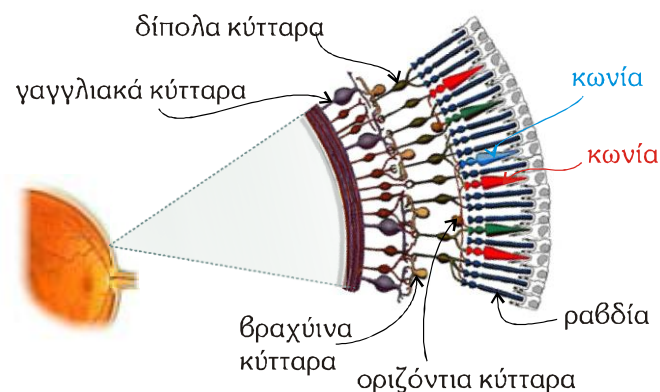
αναγνώριση και ταυτοποίηση (με τη βοήθεια των ανώτερων εγκεφαλικών κέντρων) του ερεθίσματος με την υψηλή διακριτική ικανότητα που διαθέτει.



Σχήμα 5-5-4: Καμπύλες ίσης πυκνότητας ($\times 1000$) κωνίων στην ωχρή κηλίδα και στο βοθρίο.

Η πλήρης απουσία των ραβδίων από το βοθριόλιο έχει ένα ενδιαφέρον φαινόμενο: κοιτάζοντας ‘κατευθείαν’ κάποιο αντικείμενο στο σκοτάδι η όρασή μας δεν είναι τόσο καλή. Μέσα από ένα τηλεσκόπιο, για παράδειγμα, είναι καλύτερα να κοιτάσουμε το αστέρι λίγο πιο ‘πλάγια’! Το ότι τα κωνία είναι σαφώς λιγότερα στην περιφέρεια, εξηγεί γιατί η περιφερειακή όραση, ενώ έχει καλύτερη ικανότητα να διακρίνει ένα κινούμενο αντικείμενο, έχει μικρή ικανότητα να διακρίνει σωστά τα χρώματα.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η ‘συνδεσμολογία’ των κωνίων και ραβδίων - γνωστή και ως σύναψη- με τα οπτικά νεύρα. Στις ‘δικτυωτές’ στοιβάδες βρίσκονται τα οριζόντια (*horizontal*), τα δίπολα (*bipolar*), και τα βραχύινα (*amacrine*) κύτταρα, που συνδέουν τις απολήξεις των φωτοϋποδοχέων με τα -περίπου 1.25 εκατομμύριο- **γαγγλιακά κύτταρα** (*ganglion cells*)²³.



Σχήμα 5-5-5: ‘Συνδεσμολογία’ κωνίων και ραβδίων με τις νευρικές ίνες.

Τα κωνία και ραβδία συνδέονται ‘αρχικά’ με τα οριζόντια κύτταρα. Αυτά, μέσω των δίπολων κυττάρων συνδέονται με τα βραχύινα -που είναι κι αυτά μια μορφή οριζόντιων κυττάρων- και ‘τέλος’ με τα γαγγλιακά κύτταρα. Η διάταξη τους είναι τέτοια που επιτρέπει τη διέγερση γειτονικών κυττάρων από αρκετούς φωτοϋποδοχείς (κυρίως ραβδία) και το αντίστροφο, ένας φωτοϋποδοχέας (κυ-

²³ Heinz Wässle, “A patchwork of cones,” *Nature* **397** 473-474 (1999).

ρίως κωνία) είναι πιθανό να διεγείρει ταυτόχρονα αρκετά κύτταρα. Η περιοχή που καθορίζουν οι φωτοϋποδοχείς που συνδέονται με το γαγγλιακό κύτταρο, ονομάζεται **υποδεκτικό πεδίο** του κυττάρου.

Τα γαγγλιακά κύτταρα ‘παραλαμβάνουν’ το οπτικό σήμα και το οδηγούν στο οπτικό νεύρο. Τα μεγέθη τους ποικίλλουν, κάποια είναι μικρά με λεπτούς δενδρίτες, άλλα μεγαλύτερα. Είναι κι αυτά δύο ειδών: κάποια διεγείρονται αν πέσει φως στο κέντρο του πεδίου και αναστέλλουν τη νευρική ώση αν πέσει φως στην περιφέρεια, και σε κάποια συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο.

Με άλλα λόγια, η ‘πληροφορία’ από τους φωτοϋποδοχείς δεν διοχετεύεται άμεσα στον εγκέφαλο, σημείο προς σημείο, αλλά ‘φιλτράρεται’ με κάποιο τρόπο από τη συνδεσμολογία των κυττάρων. Μια πρώτη μορφή οπτικής επεξεργασίας, δηλαδή, γίνεται και στον αμφιβληστροειδή.

Στο κεντρικό βοθρίο που οι συνδέσεις είναι 1:1, το υποδεκτικό πεδίο των γαγγλιακών κυττάρων είναι μικρό, ενώ το αντίθετο συμβαίνει στην περιφέρεια, όπου πολλά κωνία (ή ραβδία) συνδέονται με ένα γαγγλιακό κύτταρο. Αποτέλεσμα είναι τα υποδεκτικά πεδία να έχουν καλύτερη διακριτική ικανότητα στο χώρο του κεντρικού βοθρίου από την περιφέρεια.

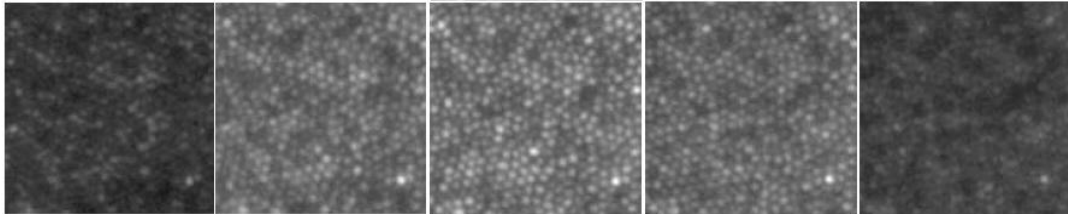
Συνοπτικά μπορούμε να παραθέσουμε τις εξής αιτίες για τις οποίες ο χώρος του βοθριολίου παρουσιάζει τη μέγιστη διακριτική ικανότητα, και άρα, οπτική οξύτητα:

- η μεγάλη πυκνότητα των κωνίων και η απουσία ραβδίων,
- η απουσία των εσώτερων στοιβάδων του αμφιβληστροειδή (όπως είδαμε, έχουν ...κάνει στην άκρη για να περάσει το φως), κάτι που μειώνει τις απώλειες λόγω σκέδασης μέχρι να φτάσει το φως στα κωνία,
- η αναλογία 1:1 των κωνίων με τα δίπολα και τα γαγγλιακά κύτταρα, κάτι που εξασφαλίζει μεγάλη διακριτική ικανότητα κατά τη μεταβίβαση του οπτικού ερεθίσματος,
- το μικρό εύρος του υποδεκτικού πεδίου των γαγγλιακών κυττάρων, που εξασφαλίζει τη διάκριση γειτονικών ερεθισμάτων που βρίσκονται πολύ κοντά το ένα με το άλλο,
- η απουσία κωνίων υπεύθυνων για το μπλε και το ιώδες στο βοθρίολιο. Καθώς η ευαισθησία του οφθαλμού είναι μικρή σε αυτά τα μήκη κύματος (εξαιτίας του μικρού αριθμού αυτού του τύπου κωνίων), η απουσία τους από το βοθρίολιο ουσιαστικά βελτιώνει την όραση καθώς ‘μειώνει’ το χρωματικό σφάλμα του οφθαλμού.
- και ένας νευρολογικός λόγος: η περιοχή του κεντρικού βοθρίου αντιπροσωπεύεται σε δυσανάλογα μεγάλο ποσοστό στο οπτικό κέντρο του ινιακού λοβού σε σχέση με τον υπόλοιπο αμφιβληστροειδή. Περίπου το 50% των κυττάρων του οπτικού φλοιού διατίθενται για την ανάλυση αυτών των κεντρικών 5° της όρασης.

Τα κωνία είναι γενικά προσανατολισμένα προς τα κύριο δεσμικό σημείο του οφθαλμού, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποτελεσματικότητα των φωτεινών ακτίνων που φτάνουν σε αυτά. Καθώς οι φωτοευαίσθητες απολήξεις των κωνίων διαθέτουν ιδιότητες οπτικών ινών, οι ακτίνες που φτάνουν σε αυτές με μεγάλη γωνία δεν υφίστανται ολική ανάκλαση μέσα στο κωνίο, αλλά διαθλώνται έξω από αυτό και, ‘χάνονται’.

Με απλά λόγια, το φως που εισέρχεται από το κέντρο της κόρης προκαλεί μεγαλύτερη οπτική 'αίσθηση' από ό,τι το φως που εισέρχεται περιφερειακά, και, άρα, συναντά τα κωνία με κάποια γωνία. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **Stiles - Crawford effect**, από τους *W.H. Stiles* και *B.H. Crawford*²⁴.

Ενώ η πρώτη εντύπωση είναι ότι το φαινόμενο αυτό επιδρά αρνητικά στην όραση, στην πραγματικότητα την ωφελεί, καθώς οι ακτίνες που φτάνουν με μεγάλη γωνία στα κωνία είναι αυτές που προέρχονται από τα άκρα της κόρης εισόδου (*marginal rays*) και φέρουν τις περισσότερες εκτροπές.



Σχήμα 5-5-6: In vivo φωτογράφιση κωνίων σε 0° (κέντρο), ±3.5°, και ±7° (ακραία) από το βοθριόλιο.

Ουσιαστικά λοιπόν το φαινόμενο *Stiles-Crawford* συμβάλλει στη βελτίωση του αμφιβληστροειδικού ειδώλου, μέσω της μείωσης των συνεπειών των διαθλαστικών εκτροπών, με μόνο συμβιβασμό μια μικρή μείωση στη φωτεινότητα. Το φαινόμενο *Stiles-Crawford* προσομοιώνεται στα πρότυπα του οφθαλμού μέσω του αποδοισμού (*apodization*). Στην προσομοίωση αυτή, η διαφάνεια της κόρης κατά την έκτασή της δεν είναι σταθερά ίση με τη μονάδα, αλλά μειώνεται από το κέντρο προς την περιφέρεια.

5.5.1. Λειτουργία της Φωτονικής Αίσθησης

Έχουμε αναρωτηθεί πώς ακριβώς δουλεύει μια οθόνη της 'κλασικής' τηλεόρασης -είδος κι αυτό προς ...εξαφάνιση- του τύπου καθοδικού σωλήνα (*Cathodic Ray Tube*); Ηλεκτρόνια 'εκτοξεύονται' προς μια φωτοευαίσθητη επιφάνεια, όπου προκαλούν διεγέρσεις και φωσφορισμό (§ 1.4.2.). Πρόσπτωση ηλεκτρονίων, δηλαδή, προκαλεί εκπομπή φωτός.

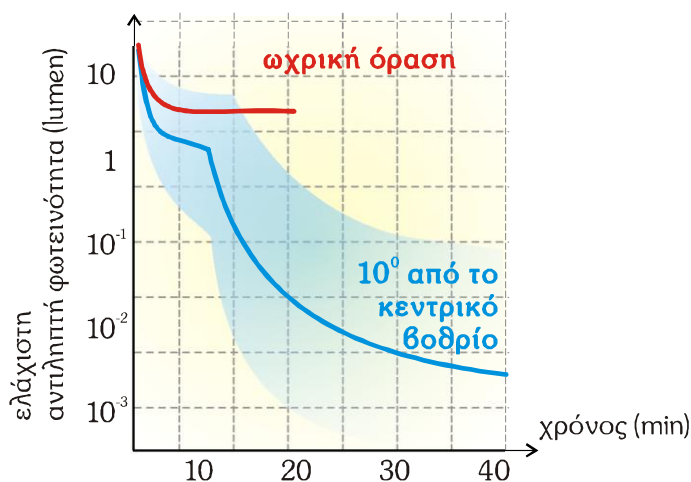
Ο ακριβώς αντίστροφος μηχανισμός συμβαίνει στη λειτουργία της φωτονικής αίσθησης στους φωτοϋποδοχείς του οφθαλμού. Το προσπίπτον φωτόνιο δημιουργεί ένα ηλεκτρικό σήμα, που είναι, τελικά το νευρικό σήμα που οδηγείται μέσω του οπτικού νεύρου στον εγκέφαλο. Η πρώτη 'αντίδραση' γίνεται στα δισκία, στην εξωτερική επιφάνεια του φωτοανιχνευτή. Σε πρωτεϊνικά φωτοευαίσθητα μόρια ρετινάλης προκαλείται φωτοδιάσπαση δεσμών, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση ιόντων. Η οσμωτική αλλαγή ροής ιόντων προκαλεί την αλλαγή δυναμικού της μεμβράνης, και έτσι δημιουργείται το ηλεκτρικό 'σήμα'.

Ωστόσο, δεν υπάρχει αναλογία 1:1 ανάμεσα στον αριθμό των φωτονίων που οδεύουν προς τον οφθαλμό και τον αριθμό των φωτονίων που ανιχνεύονται. Από τα 100 φωτόνια που προσπίπτουν στον οφθαλμό, με τον ένα ή άλλο τρόπο μόνο 50, περίπου, φθάνουν στον αμφιβληστροειδή. Αυτό ας μη μας παραξενεύει, μιας και στην πορεία τους τα φωτόνια συναντούν αρκετές διαθλαστικές

²⁴ W.H. Stiles and B.H. Crawford, "The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at different points," Proc. R. Soc. Lond. B **112** 428-450 (1933).

επιφάνειες και οπτικά μέσα. Καθώς το φως, δηλαδή, ανακλάται, σκεδάζεται, και απορροφάται, χάνει μέρος της φωτεινής του έντασης.

Θα περιμέναμε λοιπόν τα κωνία να ανιχνεύσουν τουλάχιστο αυτά τα 50 φωτόνια. Στην πραγματικότητα, περίπου 7 φωτόνια ανιχνεύονται από τις οργανικές χρωστικές ουσίες: η **κβαντική απόδοση** (*quantum efficiency*) του οφθαλμού είναι περίπου 7%. Συναντάμε συχνά τον όρο κβαντική απόδοση στους σύγχρονους φωτονικούς αισθητήρες (CCD, CMOS, § 1.4.3.). Για παράδειγμα, ο αισθητήρας *iStar* της *Andor Technology*, έχει κβαντική απόδοση περίπου 18% στο μεγαλύτερο τμήμα του οπτικού φάσματος.



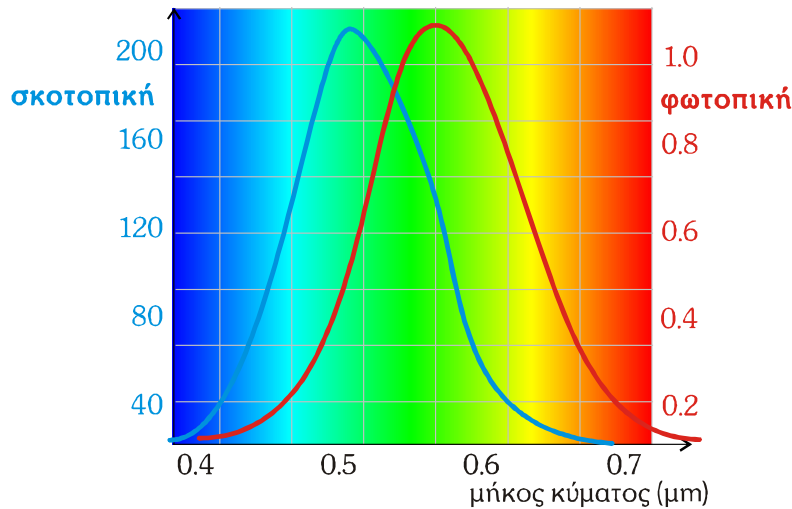
Σχήμα 5-5-7: Ελάχιστη αντιληπτή φωτεινότητα με το χρόνο.

Το ελάχιστο επίπεδο φωτεινότητας που μπορεί να ανιχνευθεί σχετίζεται με το είδος των φωτοανιχνευτών. Όταν μειώνεται η φωτεινότητα, η κόρη διαστέλλεται -και έτσι εισέρχεται περισσότερο φως στον οφθαλμό-, και ‘αναλαμβάνουν’ δράση τα ραβδία. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως **προσαρμογή φωτεινότητας** (*dark adaptation*). Αυτό είναι κάτι που γνωρίζουμε, καθώς εισερχόμενοι σε ένα σκοτεινό δωμάτιο στην αρχή δεν βλέπουμε τίποτε, αλλά σταδιακά με το χρόνο ‘συνηθίζουμε’ στο σκοτάδι και αρχίζουμε να διακρίνουμε²⁵.

Καθώς ενεργοποιείται η προσαρμογή φωτεινότητας, μπορούμε να αντιληφθούμε ολοένα και πιο μικρές φωτεινότητες. Στο σχήμα 5-5-7 παρουσιάζονται τα όρια υψηλής και χαμηλής αντιληπτής φωτεινότητας. Μέσα στο βοθρίο (γωνίες < 2°) το όριο είναι σχεδόν σταθερό, μιας και λειτουργούν κυρίως τα κωνία, δηλαδή η ωχρική όραση. Στην περιφέρεια, το όριο σταδιακά μειώνεται έως και τέσσερις τάξεις μεγέθους μέχρι 10^{-3} cd/m^2 , καθώς αναλαμβάνουν ‘δράση’ τα ραβδία (σκοτοπική όραση): έτσι μπορούμε να ‘δούμε’ ακόμα και με 10,000 φορές ‘αμυδρότερο’ φως, αν περιμένουμε λίγο χρόνο, κάπου μισή ώρα, ώστε να προσαρμοστούμε στο σκοτάδι.

Η φωτονική ευαισθησία είναι και συνάρτηση του μήκους κύματος. Σε κανονικές συνθήκες φωτισμού ημέρας, τα κωνία είναι πιο ευαίσθητα στα $0.56 \mu\text{m}$, που αντιστοιχεί στο κιτρινο-πράσινο. Καθόλου τυχαίο, μιας και σε αυτή τη φασματική ζώνη αντιστοιχεί το μέγιστο της εκπομπής του ηλιακού φωτός.

²⁵ S. Plainis, I.J. Murray, and W.N. Charman, “The role of retinal adaptation in night driving,” *Optometry and Vision Science* **82** (8) 682-688 (2005).



Σχήμα 5-5-8: Σχετική φασματική ευαισθησία του οφθαλμού. Αριστερή κλίμακα, σκοτοπική, δεξιά κλίμακα, φωτοπική.

Στο παραπάνω σχεδιάγραμμα απεικονίζεται η σχετική φασματική ευαισθησία του οφθαλμού για φυσιολογικά επίπεδα φωτεινότητας και για το 'προσαρμοσμένο' σε χαμηλή φωτεινότητα οφθαλμό. Η **φωτοπική** (*photopic*) καμπύλη ισχύει για φωτεινή ένταση πάνω από 3 cd/m^2 και η **σκοτοπική** (*scotopic*), αντίστοιχα, για κάτω 3×10^{-3} μέχρι 10^{-5} cd/m^2 . Σε ενδιάμεσες φωτεινές εντάσεις χρησιμοποιείται ο όρος **μεσοπική** (*mesopic*). Παρατηρούμε ότι:

- η μέγιστη φωτεινότητα για σκοτοπική όραση μετατοπίζεται προς το μπλε ($0.5 \mu\text{m}$). Αυτή η μετατόπιση είναι γνωστή ως 'Purkyně shift', και
- η μέγιστη σκοτοπική ευαισθησία είναι αρκετά μεγαλύτερη από τη μέγιστη φωτοπική ευαισθησία.

Έτσι, αν παρατηρούμε δύο χρωματιστά αντικείμενα, ένα μπλε και ένα κόκκινο -ακόμα κι αν το κόκκινο είναι πιο φωτεινό σε φως ημέρας- το κόκκινο αντικείμενο σε αρκετά σκοτεινό φως -π.χ. με φεγγαρόφωτο- θα φανεί σχεδόν μαύρο, ενώ θα δούμε καλύτερα το μπλε αντικείμενο: αυτός είναι ο λόγος που το βράδυ τα αντικείμενα μας φαίνονται πιο μπλε.

5.5.2. Η Έγχρωμη Όραση

'Color is but a sensation and has no existence outside the nervous system of living beings'.

Nicholas Odgen Rood

Εκτός από το ότι βλέπουμε 'πιο μπλε', έχουμε σίγουρα παρατηρήσει ότι διακρίνουμε με δυσκολία τα ίδια χρώματα που παρατηρούμε με σχετική ευκολία την ημέρα. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ραβδία, με τα οποία βλέπουμε τη νύχτα, έχουν όχι μόνο καλύτερη ευαισθησία στο μπλε, αλλά σχεδόν μηδενική ικανότητα να διαχωρίσουν τα χρώματα: η όραση των ραβδίων είναι σχεδόν ασπρόμαυρη, με λίγη ...δόση από μπλε. Μια 'αρκετά' κόκκινη εικόνα φαίνεται σχεδόν μαύρη όταν την όραση αναλαμβάνουν μόνο τα ραβδία!

Αντίθετα, τα κωνία, με τα οποία βλέπουμε την ημέρα έχουν τη δυνατότητα να διακρίνουν πολύ καλύτερα τα χρώματα, επιτρέπουν δηλαδή την **έγχρωμη όραση** (*color vision*).

Γιατί συμβαίνει αυτό; Σε ένα έγχρωμο εκτυπωτή έχουμε τρία είδη μελάνης. Αν κοιτάξουμε με ένα μεγεθυντικό φακό μια 'έγχρωμη' εκτύπωση (και τα *pixels* στο ...κινητό μας τηλέφωνο), θα διαπιστώσουμε τις κόκκινες, μπλε και πράσινες κουκκίδες, εκεί ακριβώς που, από μακριά, βλέπουμε κάποιο χρώμα ή ακόμα και άσπρο. Η σύνθεση, δηλαδή, από τρία βασικά χρώματα δημιουργεί την αίσθηση ολόκληρης της γκάμας χρωμάτων²⁶.

Το **τι ακριβώς είναι το 'χρώμα'** είναι ένα ενδιαφέρον ερώτημα. Στον κόσμο των φωτονίων και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δεν υπάρχουν χρώματα με τη ...γνωστή μας έννοια· υπάρχει η διαφορετική ενέργεια των φωτονίων που τα ξεχωρίζει μεταξύ τους (ισοδύναμα, διαφορετικό μήκος κύματος στα κύματα).

Μια δέσμη με 'λευκό' φως, δηλαδή ένα μείγμα από διάφορα μήκη κύματος, αναλύεται στις διάφορες χρωματικές συνιστώσες μέσα από ένα πρίσμα ή από τις σταγόνες του νερού στο ουράνιο τόξο. Χρώματα μπορούμε να δούμε από συμβολή σε λεπτά πλακίδια, και τι πιο ωραίο από τα χρώματα που προκύπτουν από μια λεπτή σαπουνόφουσκα! Το ποιο χρώμα θα εμφανιστεί σε κάθε σημείο εξαρτάται από το αν ισχύουν οι συνθήκες ενισχυτικής συμβολής για το συγκεκριμένο οπτικό δρόμο μέσα από το στρώμα νερού για το συγκεκριμένο μήκος κύματος²⁷. Χρώματα, πανέμορφα, εμφανίζονται κατά την ανατολή και τη δύση του ήλιου, που οφείλονται στην εξάρτηση των γωνιακών χαρακτηριστικών και έντασης της σκέδασης του ηλιακού φωτός από το μήκος κύματος²⁸.

Η Φυσική έχει μια πολύ επακριβή γλώσσα για να το περιγράψει. Μιλάει για ανακλαστικότητα (%) στα $0.45 \mu\text{m}$, στα $0.57 \mu\text{m}$, και στα $0.63 \mu\text{m}$, αντίστοιχα, ή με το συμπληρωματικό ποσοστό της, την απορροφητικότητα. Όλα αυτά αν στο αντικείμενο προσπίπτει 'λευκό' φως, δηλαδή μια καλή ισορροπία από τα μήκη κύματος του ορατού. Μέρος από το φως απορροφάται, και κάποιο ανακλάται. Κάθε αντικείμενο λοιπόν, έχει χρώμα γιατί ανακλά ένα τμήμα από το μπλε, λίγο από το κίτρινο, και λίγο από το κόκκινο, αλλά σε διαφορετικά ποσοστά. Τα φύλλα των δένδρων είναι πράσινα γιατί απορροφούν αρκετά στο κόκκινο και στο μπλε, ανακλώντας αρκετά το πράσινο, και αυτό οφείλεται στις φασματικές ιδιότητες απορρόφησης της χλωροφύλλης.

Τα χρώματα, λοιπόν, υπάρχουν στη φύση, όχι όμως ως μια απόλυτη ιδιότητα των σωμάτων ή του φωτός, αλλά με όρους μήκους κύματος ή ενέργειας φωτονίων. Τα χρώματα σύμφωνα με την ανθρώπινη αντίληψη είναι η εγκεφαλική ερμηνεία ενός ερεθίσματος που προκύπτει από διέγερση συγκεκριμένης ομάδας κωνίων από συγκεκριμένα είδη φωτονίων.

Το ερώτημα είναι, 'πώς ακριβώς θα αντιληφθούμε το χρώμα ενός αντικείμενου;' Χρειαζόμαστε ένα τρόπο να αντιληφθούμε τις διαφορετικές φωτεινότητες στα διάφορα τμήματα του ορατού, και έτσι να **αντιληφθούμε τα χρώματα** (*color perception*). Στην πιο απλή περίπτωση είναι απαραίτητα τρία είδη φωτοϋποδοχέων. Κάπως έτσι συμβαίνει και με τα κωνία. Υπάρχουν τρία 'είδη' κωνίων με διαφορετική σχετική φασματική ευαισθησία, και η σύνθεση των σημάτων από αυτά δημιουργεί την αίσθηση όλων των χρωμάτων. Η τριχρωματική εκδοχή της έγχρωμης όρασης συναντάται εκτός από τον άνθρωπο και στα πρωτεύοντα είδη (*primates*).

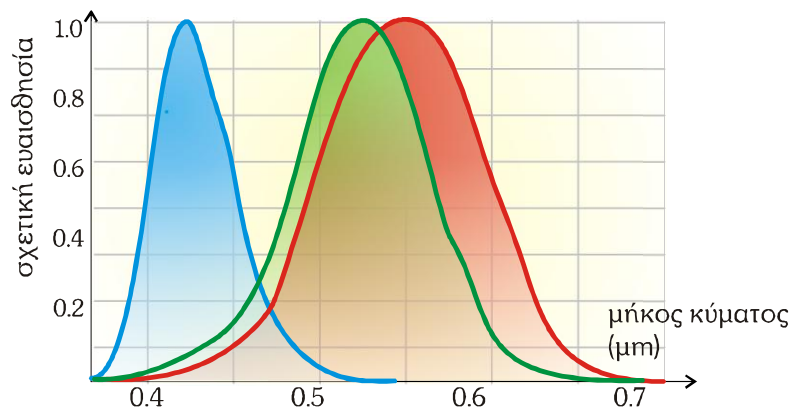
²⁶ 'Μαθήματα Οπτικής,' Κεφ. 4, Παράρτημα 4.3. Στοιχεία Χρωματομετρίας.

²⁷ 'Μαθήματα Οπτικής,' Κεφ. 5 § 5.3.1., Σαπουνόφουσκες και Μη Ανακλαστικά Γυαλιά.

²⁸ 'Μαθήματα Οπτικής,' Κεφ. 4 Παράρτημα 4.2., Η Πράσινη Αναλαμπή

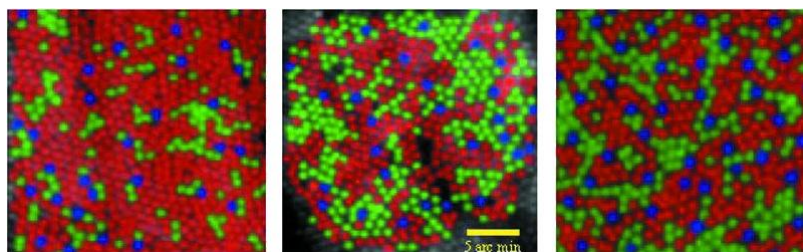
Οι τάξεις κωνίων ονομάζονται, τα S- (*short-wave*), M- (*medium wave*) και L (*long-wave*). Τα S- παρουσιάζουν μέγιστο ευαισθησίας στο μπλε (0.440 μm) και τα M- στο πράσινο (0.545 μm). Τα L- κωνία έχουν μέγιστο κοντά στο πορτοκαλί, κοντά στο κόκκινο (0.565 μm).

Η διαφορά τους βρίσκεται στο ότι η φωτοχρωστική που περιέχουν (οψίνη²⁹) έχει ελαφρά διαφορετική δομή και έτσι διαφορετικό μήκος κύματος έχει περισσότερες πιθανότητες³⁰ να προκαλέσει δομικές αλλαγές στην αντίστοιχη του φωτοχρωστική. Για παράδειγμα π.χ. με κόκκινο φως 'ενεργοποιούνται' πολύ περισσότερο τα L- κωνία από τα υπόλοιπα, μιας και η πιθανότητα να ανιχνευθεί από τα L- κωνία είναι μεγαλύτερη αν έχει μήκος κύματος κοντά στο 0.6 μm . Όπως και στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, έτσι και εδώ, το ηλεκτρικό σήμα που προκαλείται όταν απορροφηθεί ένα φωτόνιο, είναι το ίδιο κάθε φορά.



Σχήμα 5-5-9: Σχετική φασματική ευαισθησία για τα τρία είδη κωνίων. Στο σχήμα η ευαισθησία για το μπλε (S-κωνία) παρουσιάζεται μεγεθυμένη³¹.

Το τελικό σήμα 'ανίχνευσης' εξαρτάται από το πόσα φωτόνια ανιχνεύονται (δηλαδή πόσα κωνία διεγείρονται) και είναι το γινόμενο του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν ανά περιοχή του φάσματος επί την αντίστοιχη ευαισθησία των κωνίων, επί την πυκνότητα των κωνίων στην περιοχή πρόσπτωσης.



Σχήμα 5-5-10: Υψηλής ανάλυσης in vivo απεικόνιση κωνίων στο βοθριόλιο με τεχνική ευπροσάρμοστων οπτικών³².

²⁹ J. Nathans, S.L. Merbs, C.H. Sung, C.J. Weitz, and J. Wang, "Molecular genetics of human visual pigments," *Annu. Rev. Genet.* **26** 403-424 (1992).

³⁰ A. Stockman, D.I.A. MacLeod, and N.E. Johnson, "Spectral sensitivities of human cones," *Journal of the Optical Society of America A* **10** 2491-2521 (1993).

³¹ A. Stockman and L.T. Sharpe, "The spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype," *Vision Research* **40** 1711-1737 (2000).

Το νευροφυσιολογικό σύστημα της όρασης αντιλαμβάνεται τα χρώματα επεξεργαζόμενο τις σχετικές 'εντάσεις' των σημάτων από τις τρεις τάξεις κωνίων. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει συνδυασμούς ερεθισμάτων από τα τρία είδη κωνίων, με κωδικοποίηση αθροίσματος ή διαφοράς.

Σύμφωνα με την θεωρία της 'χρωματικής ανταγωνιστικότητας' (*opponent theory*)³³, αντιλαμβανόμαστε τα διάφορα χρώματα στα χαρακτηριστικά των αντικειμένων (*local colors*) με συνδυασμούς όπως:

- το κόκκινο ή πράσινο $(r-g)_\lambda$ γίνεται αντιληπτό από τη διαφορά - χρησιμοποιείται ο όρος ανταγωνισμός (*opponency*)- στο οπτικό σήμα ανάμεσα στα L- και στα M- κωνία, δηλαδή το σήμα L-M:

$$\text{αντίληψη κόκκινου-πράσινου} \quad (r-g)_\lambda = 1.2L_\lambda - 1.6M_\lambda + 0.4S_\lambda \quad (5.5.1)$$

- η συνολική φωτεινότητα (*luminance*) από το άθροισμα των δύο αυτών ερεθισμάτων, δηλαδή το σήμα L+M:

$$\text{αντίληψη φωτεινότητας} \quad (LUM)_\lambda = 0.6L_\lambda + 0.4M_\lambda \quad (5.5.2)$$

- και τέλος, το κίτρινο ή μπλε γίνεται αντιληπτό από το σήμα L+M-S:

$$\text{αντίληψη κίτρινου-μπλε} \quad (y-b)_\lambda = 0.24L_\lambda + 0.105M_\lambda - 0.7S_\lambda \quad (5.5.3)$$

Το ποσοστό των L- κωνίων αγγίζει το 60%, των M-κωνίων το 30% ενώ τα S-κωνία δεν ξεπερνούν το 10%³⁴. Μάλιστα τα τελευταία απουσιάζουν εντελώς από την κεντρική περιοχή του βοθριολίου, κάνοντάς το τυφλό στο μπλε και στο ιώδες. Αυτό μπορούμε να το διαπιστώσουμε με τη βοήθεια της ψευδαισθησης που ονομάζεται *Maxwell's spot*: παρατηρούμε μονόφθαλμα μια έντονα κίτρινη επιφάνεια, και αμέσως μετά μια έντονη μπλε. Στο κεντρικό οπτικό πεδίο ίσως τότε παρατηρήσουμε (εξαρτάται και από την αντιληπτική ικανότητα του κάθε ατόμου) ένα ασαφές μαύρο σκότωμα (έλλειμμα του οπτικού πεδίου).

Η έλλειψη αυτή είναι προς όφελος της οπτικής οξύτητας, καθώς με αυτό τον τρόπο μειώνεται το χρωματικό σφάλμα του οφθαλμού στο επίπεδο του αισθητήρα. Πιστεύεται ότι τα S- κωνία συμβάλλουν περισσότερο στην έγχρωμη όραση και στη στερεοσκοπική τρισδιάστατη αίσθηση μέσω του χρώματος, παρά στην οπτική οξύτητα. Είναι πιθανό να έχουμε παρατηρήσει ότι ένα κίτρινο αντικείμενο (π.χ. κείμενο) σε μπλε φόντο (π.χ. διαφάνεια προβολής) δείχνει να ξεπετάγεται από το φόντο του δίνοντας μια ψευδο-τρειςδιάστατη αίσθηση.

Η εξήγηση είναι απλή και μάλιστα οφείλεται στη γεωμετρική οπτική: καθώς το κίτρινο και το μπλε χρώμα εστιάζονται σε διαφορετικό βάθος μέσα στον οφθαλμό εξαιτίας του χρωματικού σφάλματος (§ 6.1.2.), ο εγκέφαλος θεωρεί ότι τα ερεθίσματα προέρχονται από διαφορετικά επίπεδα. Ο εγκέφαλος λοιπόν γνωρίζει από γεωμετρική οπτική, αλλά τον ξεγελά ο οφθαλμός με τα σφάλματά του!

³² A. Roorda and D.R. Williams, "The Arrangement of the Three Cone Classes in the Living Human Eye," *Nature* **397** 520-522 (1999).

³³ C.R. Ingling and B.H.P. Tsou, "Orthogonal combination of three visual channels," *Vision Research* **17** 1075-82 (1977).

³⁴ A. Roorda, A.B. Metha, P. Lennie, and D.R. Williams, "Packing arrangement of the three cone classes in primate retina," *Vision Research* **41** 1291-1306 (2001).

Υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα άτομα στην αναλογία μεταξύ L- κωνίων και M-κωνίων: σε ορισμένα άτομα τα M- κωνία είναι τέσσερις φορές περισσότερα από τα L- κωνία, ενώ σε άλλα άτομα τα L- κωνία είναι είκοσι φορές περισσότερα από τα M- κωνία, χωρίς να υφίσταται κάποια δυσλειτουργία της έγχρωμης όρασης³⁵. Αυτό οφείλεται στο ότι υπάρχει ένα σύστημα ρύθμισης του συσχετισμού των ερεθισμάτων.

Η απουσία ή η δυσλειτουργία, μερική ή ολική, κάποιου είδους κωνίων οδηγεί στην **αχρωματοψία** (*color blindness*). Καθώς υπάρχουν τρία είδη κωνίων, υπάρχουν και τρεις κύριες κατηγορίες αχρωματοψίας. Σε απουσία ή μη λειτουργία των L- κωνίων έχουμε πρωτανωπία, (1% στους άνδρες, σπάνια στις γυναίκες), ενώ των M- κωνίων, δευτερανωπία (1% στους άνδρες, 0.01% στις γυναίκες), και έτσι συγχέεται το πράσινο με το κόκκινο. Η πιο σπάνια περίπτωση είναι η τριτανωπία, η απουσία ή μη λειτουργία των S- κωνίων.



Σχήμα 5-5-11: Εικόνα με φυσιολογική χρωματική αντίληψη (πάνω α), με πρωτανωπία (πάνω β), με δευτερανωπία (κάτω α), και με τριτανωπία (κάτω δ).

Οι συγκεκριμένες παθήσεις προκαλούν σοβαρή αδυναμία διάκρισης των διάφορων χρωμάτων. Αν αντί για απουσία ή μη λειτουργία έχουμε μερική λειτουργία, οι παθήσεις ονομάζονται αντίστοιχα, πρωτανωμαλία, δευτερανωμαλία, και τριτανωμαλία. Οι τελευταίες καταστάσεις είναι πιο ήπιες και τα συμπτώματά τους κυμαίνονται από μικρή έως σοβαρή αδυναμία διάκρισης λεπτών αποχρώσεων.

Παλαιότερα συναντούσαμε και τον όρο **δαλτωνισμός**, προς τιμή του Άγγλου Χημικού *John Dalton*, ο οποίος ανακάλυψε τυχαία το 1798 ότι έπασχε από αυτό που σήμερα ονομάζουμε πρωτανωπία, και διεξήγαγε τις πρώτες έρευνες. Ωστόσο, το πρώτο καταγεγραμμένο περιστατικό πιστώνεται στον *Joseph*

³⁵ D.H. Brainard, A. Roorda, Y. Yamauchi, J.B. Calderone, A. Metha, M. Neitz, J. Neitz, D.R. Williams, and G.H. Jacobs, "Functional consequences of the relative numbers of L and M cones," *Journal of the Optical Society of America A* **17** 607–614 (2000).

Huddart το 1777, και αναφερόταν σε έναν παπουτσή, ο οποίος είχε μάλιστα συναίσθηση της αδυναμίας του να διακρίνει κάποια χρώματα.

Ο *Dalton* πίστευε ότι η πρωτανωπία του οφειλόταν στο ότι το υαλοειδές του σώμα είχε μπλε χρώμα, και έτσι απορροφούσε το κόκκινο. Μετά το θάνατό του *Dalton* και τη νεκροτομή που έγινε στους οφθαλμούς του μετά από επιθυμία του, αποδείχθηκε ότι δεν ήταν έτσι. Οι εργασίες του *Dalton* προκάλεσαν μεγάλο ενδιαφέρον και έδωσαν αφορμή να διερευνηθούν πολλά περιστατικά ακρωματωπίας. Το 1829 ο *David Brewster* πρότεινε τον όρο ακρωματωπία, ο οποίος χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα.

Πολύ πιο σπάνιες είναι οι ανωμαλίες όπου υπάρχει μόνο ένας ή και κανένας τύπος κωνίων. Η πρώτη περίπτωση ονομάζεται μονοχρωματισμός κωνίων, ενώ η δεύτερη μονοχρωματισμός ραβδίων. Σε αυτές τις καταστάσεις υπάρχει πλήρης ακρωματωπία (ο ασθενής διακρίνει μόνο διαφορές στη φωτεινότητα των αντικειμένων), που συνοδεύεται από ιδιαίτερα χαμηλή οπτική οξύτητα και φωτοφοβία.

Φωτοϋποδοχείς του Οφθαλμού		
	Κωνία	Ραβδία
πλήθος	5 εκατομμύρια	120 εκατομμύρια
χωρική κατανομή	κυρίως στο κεντρικό βοθρίο	κυρίως στην περιφέρεια, 10-20°
χρονική απόκριση	πολύ γρήγορη	σχετικά αργή
διακριτική ικανότητα (οπτική οξύτητα)	μεγάλη	μικρή
συνδεσμολογία με γαγγλιακά κύτταρα	1:1	πολλά ραβδία σε ένα κύτταρο
μέγιστη ευαισθησία	0.56 μm	0.51 μm
συνθήκες φωτισμού	ημέρας	νύχτας
ευαισθησία	μεγάλη	μικρή
διάκριση χρωμάτων	ναι	όχι

Πίνακας 5-5-1: Σύγκριση ιδιοτήτων σε κωνία και ραβδία.