

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Καθηγητής: Δ. Γλάρος

Ο Π Τ Ι Κ Η

Δ. Γλάρος, Ph. D.

Μ. Τζαφλίδου, Ph. D.

Ιωάννινα, Οκτώβριος 1983



Αρ. εισ.:.....11089/ 2003.....

Γαρυμπί Σχορζή η.Ι.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΙΑΤΡΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΙΑΤΡΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

Καθηγητής: Δ. Γλάρος

Ο Π Τ Ι Κ Η

Δ. Γλάρος, Ph. D.

Μ. Τζαφλίδου, Ph. D.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.- ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ	Σελ.
1.1.Βασικές έννοιες-Ορισμοί	1
2.- ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ	
2.1.Φωτοερέθισμα	4
2.2.Φωτοαίσθημα. Σχέση φωτοαισθήματος και φωτοερεθίσματος	4
2.3.Ο οφθαλμός σαν όργανο μέτρησης	5
2.4.Φυσικό σύστημα και ψυχολογικό σύστημα φωτομετρικών μονάδων	6
3.- ΟΦΘΑΛΜΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ-ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ ΤΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ	
3.1.Οφθαλμός του ανθρώπου-Στοιχεία ανατομίας του οφθαλμού	8
3.2.Οπτικές ιδιότητες	10
3.3.Οπτικά κύτταρα	14
3.4.Απόκριση του οφθαλμού στα διάφορα μήκη κύματος	15
3.5.Σχέση ευαισθησίας οφθαλμού και μήκους κύματος	16
3.6.Μηχανισμός της όρασης	17
4.- ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ	
4.1.Μεγέθυνση	19
4.2.Οπτικό ή κοινό μικροσκόπιο	19
4.3.Φωτισμός αντικειμένου	24
4.4.Γωνιακό άνοιγμα-Αριθμητικό άνοιγμα	25
4.5.Διακριτικό όριο-Διακριτική ικανότητα	27
4.6.Βάθος ευκρινούς απεικόνισης (βάθος πεδίου)	29
4.7.Σφάλματα φακών μικροσκοπίου	30
4.7.1.Σφαιρικό σφάλμα	30



4.7.2. Κόμη-Αστιγματισμός	31
4.7.3. Παραμόρφωση ειδώλου	33
4.7.4. Χρωματικό σφάλμα	34
4.8. Ειδικά μικροσκόπια	34
4.8.1. Μικροσκόπιο με υπεριώδη φωτισμό (Ultraviolet microscope)	34
4.8.2. Πολωτικό μικροσκόπιο (polarizing microscope)	35
4.8.3. Μικροσκόπιο αντίθεσης φάσεων (phase-contrast microscope)	36
4.8.4. Μικροσκόπιο υπερήχων	36
4.9. Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	37
5.- ΑΛΛΑ ΟΠΤΙΚΑ ΚΛΙΝΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ	
5.1. Όργανα που χρησιμοποιούνται στην Οφθαλμολογία	40
5.1.1. Οφθαλμοσκόπιο	40
5.1.2. Σκιασκόπιο	41
5.1.3. Κερατόμετρο	42
5.1.4. Τονόμετρο	43
5.2. Χρήση των υπερήχων στην Οφθαλμολογία	44
5.3. Οπτική ίνα	44
5.3.1. Ενδοσκοπία-Ψυχρός φωτισμός	46
5.4. Διαφανοσκόπηση	47
6.- LASER - ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ	
6.1. Laser	48
6.2. Εφαρμογές των Laser στις Βιοϊατρικές επιστήμες	52
6.3. Ολογραφία	54

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ



1. ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1. Βασικές Έννοιες-Ορισμοί

Σαν φωτεινή ροή (luminous flux) Φ , ορίζεται το πηλίκο

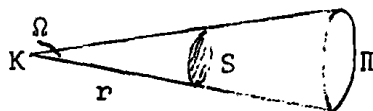
$$\Phi = \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

όπου dE , η ενέργεια που σε μορφή ορατής ακτινοβολίας εκπέμπεται από σημειακή φωτεινή πηγή μέσα σε χρόνο dt .

Σαν στερεά γωνία Ω , ορίζεται το πηλίκο

$$\Omega = \frac{S}{r^2} \quad (2)$$

όπου S είναι το εμβαδό που αποκόπτεται στην επιφάνεια μιας σφαίρας κέντρου K και ακτίνας r (σχήμα 1).



Σχήμα 1



Μονάδα στερεάς γωνίας είναι το στερακτίνιο (sr). Ένα στερακτίνιο ισούται με εκείνη τη στερεά γωνία που πάνω σε σφαίρα ακτίνας r , αποκόπτει επιφάνεια, εμβαδού ίσου με r^2 .

Φωτοβολία ή φωτεινή ένταση (luminous intensity) I , λέγεται το πηλίκο

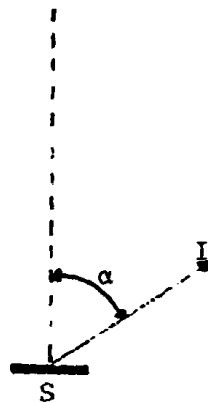
$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (3)$$

όπου $d\Phi$ η φωτεινή ροή που εκπέμπει φωτεινή πηγή μέσα σε στερεά γωνία $d\Omega$. Η φωτοβολία μιας φωτεινής πηγής εξαρτάται από τη διεύθυνση της στερεάς γωνίας.

Η λαμπρότης (luminance) Λ , μιας εκτεταμένης φωτεινής πηγής, ορίζεται από το πηλίκο

$$\Lambda = \frac{I}{S \cos \alpha} \quad (4)$$

όπου S η επιφάνεια που ακτινοβολεί και I η φωτοβολία της κατά διεύθυνση που σχηματίζει γωνία α με την κάθετο στην επιφάνεια S (σχήμα 2).



Σχήμα 2



Ο φωτισμός (illuminance) B , μιας επιφάνειας δίνεται από τη σχέση

$$B = \frac{d\Phi}{dS \cos \alpha} \quad (5)$$

όπου Φ η φωτεινή ροή που πέφτει στην επιφάνεια με εμβαδό S και α , η γωνία που σχηματίζει η κάθετος στην επιφάνεια S με τη διεύθυνση των ακτίνων.

Ισχύς I ενός φακού ονομάζεται το αντίστροφο της εστιακής απόστασης f . Δηλαδή:

$$I = \frac{1}{f} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} \quad (6)$$

όπου α είναι η απόσταση του αντικειμένου από το οπτικό κέντρο του φακού και β η αντίστοιχη απόσταση του ειδώλου.

Μονάδα ισχύος είναι η διοπτρία που είναι ίση με m^{-1} .



2. ΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑ

Η Ακτινομετρία είναι ο κλάδος της Φυσικής που ασχολείται με τη μέτρηση των φυσικών μεγεθών που χαρακτηρίζουν τις ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες όπως τις ραδιοφωνικές, υπέρυθρο, ορατή ή την υπεριώδη ακτινοβολία. Οι ιοντίζουσες ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες, όπως οι ακτίνες γ ή X, εξετάζονται από ειδικό κλάδο της Φυσικής, την Ακτινοφυσική. Η Φωτομετρία ασχολείται με την ειδική περίπτωση που οι μετρήσεις περιορίζονται μόνο στην ορατή από τον ανθρώπινο οφθαλμό περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, δηλαδή για ακτινοβολίες με μήκος κύματος από 400 nm μέχρι 700 nm.

2.1. Φωτοερέθισμα

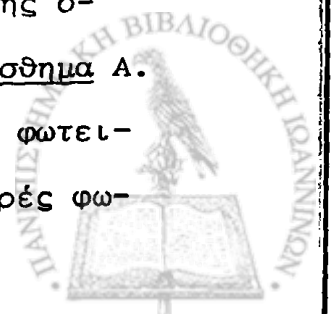
Ειδικά για το φως που προσπίπτει στον αμφιβληστροειδή χιτώνα του οφθαλμού εκτός από το φυσικό μέγεθος "φωτισμός", μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το φυσικό μέγεθος φωτοερέθισμα που δίνεται από τη σχέση:

$$H = \frac{\Phi}{n} \quad (7)$$

όπου Φ , η φωτεινή ροή που εισέρχεται στον οφθαλμό και n , ο αριθμός των κώνων που διεγείρονται.

2.2. Φωτοαίσθημα. Σχέση φωτοαισθήματος και φωτοερεθίσματος

Το φωτοερέθισμα H προκαλεί στον εγκέφαλο το αίσθημα της όρασης μέτρο του οποίου είναι το φυσικό μέγεθος φωτοαίσθημα A . Ο οφθαλμός μπορεί να λειτουργήσει σε πολύ πλατιά όρια φωτεινών εντάσεων, δηλαδή από πολύ ασθενείς μέχρι πολύ ισχυρές φω-



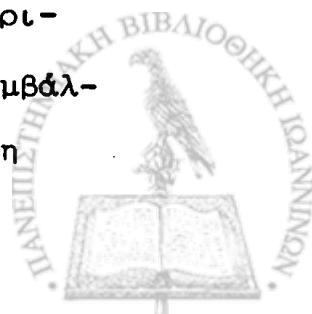
τεινές εντάσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί το φωτοαίσθημα που παράγεται είναι ανάλογο του λογαρίθμου του φωτοερεθίσματος. Έτσι, για να προκληθούν φωτοαισθήματα που αποτελούν αριθμητική πρόοδο πρέπει τα αντίστοιχα φωτοερεθίσματα να αποτελούν γεωμετρική πρόοδο. Ο νόμος αυτός αποτελεί ειδική περίπτωση του γενικού ψυχοφυσικού νόμου Fechner-Weber που συνδέει την ένταση ενός οποιοδήποτε αισθήματος με την ένταση του ερεθίσματος που το προκαλεί. Η λογαριθμική σχέση μεταξύ φωτοαισθήματος και φωτοερεθίσματος είναι η εξής:

$$A = c \cdot \ln \frac{H}{H_0} \quad (8)$$

όπου H_0 είναι το ελάχιστο φωτοερέθισμα που πρέπει να προκαλεί η φωτεινή δέσμη για να γίνει αισθητή και c , είναι μία σταθερά.

2.3. Ο οφθαλμός σαν όργανο μέτρησης

Στη φωτομετρία σαν βασικό όργανο μέτρησης χρησιμοποιείται ο οφθαλμός. Το όργανο αυτό δεν είναι και τόσο κατάλληλο για άμεσο τρόπο (απόλυτο) μέτρησης των φωτομετρικών μεγεθών. Για παράδειγμα, αν χρησιμοποιηθεί ο οφθαλμός για να κρίνει πόσες φορές η ένταση μιας φωτεινής δέσμης είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη μιας άλλης, τα σφάλματα μπορεί να είναι πολύ μεγάλα. Επιπλέον, η όραση θα μπορούσε να θεωρηθεί όχι σαν απλό φυσικό ή φυσιολογικό φαινόμενο αλλά κατά ένα μέρος τουλάχιστον σαν ψυχολογικό φαινόμενο αφού σε πολλές περιπτώσεις (οπτικές απάτες, ψυχολογικά χρώματα κ.λπ.) παρεμβάλλονται η φαντασία και η μνήμη. Η χρήση του οφθαλμού στη



Φωτομετρία βασίζεται στη δυνατότητα που έχει το όργανο αυτό να κρίνει με ικανοποιητική ακρίβεια την ισότητα φωτισμών από δύο φωτεινές δέσμες. Για τους παραπάνω λόγους στη Φωτομετρία χρησιμοποιείται το υποκειμενικό ή ψυχολογικό σύστημα μονάδων.

2.4. Φυσικό σύστημα και Ψυχολογικό σύστημα φωτομετρικών μονάδων

Στην Ακτινομετρία τα φωτομετρικά μεγέθη των διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών, συμπεριλαμβανόμενης και της ορατής, μπορούν να μετρηθούν με αντικειμενικό τρόπο με ειδικά ηλεκτρονικά όργανα που μπορούν να μετρήσουν ισχύ. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται το φυσικό σύστημα ακτινομετρικών μονάδων. Δηλαδή το Watt (1 W) για τη φωτεινή ροή, (προκύπτει από τον ορισμό του μεγέθους αυτού), το 1 Wsr^{-1} για τη φωτοβολία και το 1 Wm^{-2} για το φωτισμό.

Το ψυχολογικό σύστημα μονάδων, στο οποίο βασικό όργανο μέτρησης των φωτομετρικών μεγεθών είναι ο οφθαλμός, έχει σαν θεμελιώδη μονάδα τη μονάδα φωτοβολίας (φωτεινής έντασης) που λέγεται candela. Η μονάδα αυτή είναι μια από τις επτά βασικές μονάδες του Διεθνούς Συστήματος Μονάδων, (S.I.). Οι άλλες φωτομετρικές μονάδες δίνονται σαν παράγωγες μονάδες της candela. Η candela (cd) ορίζεται σαν η φωτοβολία (φωτεινή ένταση) που εκπέμπεται σε διεύθυνση κάθετη, από την επιφάνεια εμβαδού $1/600000 \text{ m}^2$ μέλανος σώματος που βρίσκεται σε θερμοκρασία 2042 K° (θερμοκρασία τήξης λευκοχρύσου) και κάτω από πίεση 101325 Nm^{-2} (1 atm).



Παράγωγες μονάδες στο S.I. για άλλα φωτομετρικά μεγέθη δίνονται στον πίνακα I.

ΠΙΝΑΚΑΣ I. Φωτομετρικά Μεγέθη και Μονάδες

Μέγεθος	Μονάδα	Σύμβολο	
Φωτεινή ροή	lumen	lm	$1\text{lm} = 1\text{cd}\cdot\text{sr}$
Φωτισμός	lux	lx	$1\text{lx} = 1\text{lm}\cdot\text{m}^{-2}$
Λαμπρότητα			$\text{cd}\cdot\text{m}^{-2}$

Το ψυχολογικό σύστημα λοιπόν, διαφέρει από το φυσικό στο ότι κρίνει το φως όχι από την ισχύ αλλά από την επίδρασή του στον οφθαλμό.

Είναι φανερό ότι η τιμή ενός φωτομετρικού μεγέθους στο ψυχολογικό σύστημα μονάδων, φ , θα είναι ανάλογη της τιμής του ίδιου μεγέθους στο φυσικό σύστημα μονάδων, Φ . Δηλαδή:

$$\varphi = g \cdot \Phi \quad (9)$$

όπου g είναι συντελεστής που παρέχει τη σχέση των δύο μονάδων και ονομάζεται ευαισθησία του οφθαλμού. Ο συντελεστής αυτός, όπως θα δούμε σε άλλο κεφάλαιο, εξαρτάται από το μήκος κύματος της φωτεινής δέσμης.

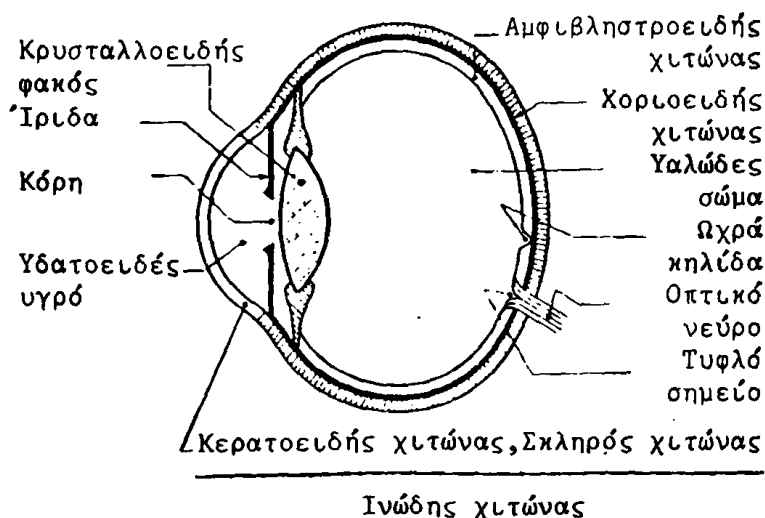


3. ΟΦΘΑΛΜΟΣ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ-ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΑΤΟΜΙΑΣ ΤΟΥ ΟΦΘΑΛΜΟΥ

3.1. Οφθαλμός του ανθρώπου-Στοιχεία ανατομίας του οφθαλμού

Ο οφθαλμός του ανθρώπου βρίσκεται μέσα σε κοιλότητα του κρανίου που ονομάζεται οφθαλμική κόγχη και αποτελείται από το βολβό, από βοηθητικά και προστατευτικά όργανα και από σύστημα μυών. Έξι ζεύγη μυών στηρίζουν τον οφθαλμό και κινούν το βολβό προς όλες τις διευθύνσεις. Οι μύς αυτοί ελέγχονται από τρία ζεύγη νεύρων.

Ο βολβός έχει σχήμα σφαιρικό (σχήμα 3). Η εξωτερική διάμετρος είναι περίπου 2,3 cm. Το τοίχωμά του αποτελείται από τρεις χιτώνες: τον ινώδη (εξωτερικό), το χοριοειδή και τον αμφιβληστροειδή. Ο ινώδης χιτώνας είναι πολύ ανθεκτικός και



Σχήμα 3. Οφθαλμός (Από Αλεξόπουλο, τόμος 5ος, 1966).



προφυλάσσει τα ευαίσθητα μέρη του οφθαλμού. Το μπροστινό του μέρος είναι διαφανές για να μπαίνει το φως και ονομάζεται κερατοειδής χιτώνας και το υπόλοιπο τμήμα του είναι αδιαφανές, εξωτερικά λευκό και ονομάζεται σκληρός χιτώνας. Ο μεσαίος χιτώνας είναι ο χοριοειδής του οποίου το εξωτερικό στρώμα φέρει τα αιμοφόρα αγγεία ενώ η εσωτερική μεμβράνη του έχει σκούρο χρώμα για να απορροφά το φως που σκεδάζεται. Ο χιτώνας αυτός καταλήγει στο μπροστινό μέρος σε κυκλικό διάφραγμα, την ίριδα που στο κέντρο της έχει μια οπή, την κόρη, από όπου μπορεί η φωτεινή δέσμη να περάσει μέσα στον οφθαλμό (σύστημα ανάλογο με το διάφραγμα της φωτογραφικής μηχανής). Η αυτόματη ρύθμιση στη διάμετρο της κόρης που γίνεται με ειδικό σύστημα μυών, ελέγχει το φως που μπαίνει στον οφθαλμό και προστατεύει την φωτοευαίσθητη εσωτερική του επιφάνεια. Ο τρίτος χιτώνας (ο πιο εσωτερικός) ονομάζεται αμφιβληστροειδής και αποτελεί τον αισθητήριο χιτώνα του βολβού γιατί πάνω σ' αυτόν καταλήγει το αισθητήριο νεύρο της όρασης που μεταδίδει τους ερεθισμούς από τα οπτικά κύτταρα-τους κόνους και τα ραβδία-στον εγκέφαλο.

Μια φωτεινή δέσμη μπαίνει στον οφθαλμό από το διαφανή κερατοειδή χιτώνα. Ο χιτώνας αυτός είναι εξογκωμένος προς τα έξω και έχει διάμετρο 1,2 cm και ακτίνα καμπυλότητας περίπου 0,8 cm. Το σχήμα του κερατοειδή χιτώνα τον κάνει να λειτουργεί σαν μια απλή σφαιρική διαθλαστική επιφάνεια, έτσι ώστε να μπορεί να εστιάζει τη φωτεινή δέσμη που μπαίνει στον οφθαλμό.

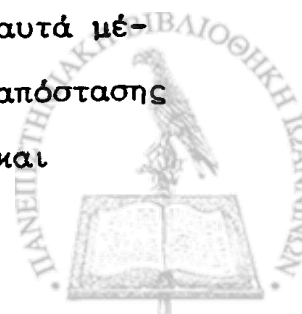
Πίσω από την ίριδα βρίσκεται ο κρυσταλλοειδής φακός που είναι



διαφανής και έχει σχήμα αμφίκυρτου φακού με διάφορες ακτίνες καμπυλότητας. Ο χώρος ανάμεσα στον κερατοειδή χιτώνα και το φακό ονομάζεται πρόσθιος θάλαμος και είναι γεμάτος με το διαφανές και άχροο υδατοειδές υγρό ενώ ο χώρος που βρίσκεται πίσω από το φακό είναι γεμάτος από διαφανές αλλά πηκτό υγρό που ονομάζεται υαλώδες σώμα. Στη θέση που το οπτικό νεύρο μπαίνει στον οφθαλμό δεν υπάρχουν καθόλου οπτικά κύτταρα και η περιοχή ονομάζεται τυφλό σημείο. Η ωχρά κηλίδα που βρίσκεται στην περιοχή όπου ο άξονας της όρασης συναντά τον αμφιβληστροειδή, είναι η πιο ευαίσθητη περιοχή του αμφιβληστροειδή. Η περιοχή αυτή περιέχει μόνο κώνους και μάλιστα σε μεγάλο αριθμό. Όσο απομακρυνόμαστε από την ωχρά κηλίδα, αρχίζουν να εμφανίζονται ραβδία και ο λόγος του αριθμού των ραβδίων προς τους κώνους αυξάνει προοδευτικά. Στην περίμετρο του αμφιβληστροειδή, αν και σε αριθμό κυριαρχούν τα ραβδία, υπάρχουν ακόμη κώνοι.

3.2. Οπτικές ιδιότητες

Ο οφθαλμός είναι σύνθετο οπτικό σύστημα με τρία διαθλαστικά μέρη: (α) υδατοειδές υγρό με δείκτη διάθλασης 1,34, (β) κρυσταλλοειδής φακός με δείκτη διάθλασης 1,37-1,42 και (γ) υαλώδες σώμα με δείκτη διάθλασης 1,34. Διάθλαση των ακτίνων συμβαίνει πρώτα κατά την είσοδο στο υδατοειδές υγρό, στη συνέχεια κατά την είσοδο στο φακό και τέλος κατά την είσοδο στο υαλώδες σώμα γιατί όπως αναφέραμε παραπάνω έχουν διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Στο σύνολό τους τα τρία αυτά μέρη συμπεριφέρονται σαν ένας λεπτός φακός εστιακής απόστασης f που σχηματίζει στον αμφιβληστροειδή πραγματικό και ανεστραμμένο είδωλο του αντικειμένου.



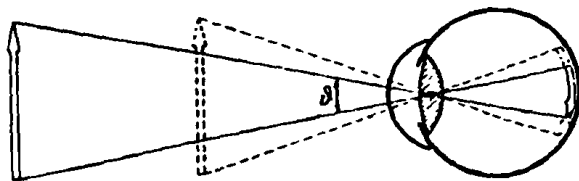
Ο κρυσταλλοειδής φακός, μπορεί να μεταβάλλει την εστιακή του απόσταση, μεταβάλλοντας το σχήμα του με τη βοήθεια συστήματος ειδικών μυών που με τη μορφή δακτυλίου περιβάλλουν το φακό. Όταν ο οφθαλμός βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας, απροσάρμοστος, οι μυς αυτοί επιτρέπουν στη μπροστινή επιφάνεια του φακού να έχει σχετικά επίπεδο σχήμα. Στην περίπτωση αυτή, η εστιακή απόσταση του συστήματος είναι $f=1,7\text{cm}$ και έτσι μια παράλληλη φωτεινή δέσμη εστιάζει ακριβώς πάνω στον αμφιβληστροειδή. Με άλλα λόγια, στον απροσάρμοστο οφθαλμό, μια φωτεινή πηγή που βρίσκεται σε άπειρη απόσταση σχηματίζει είδωλο πάνω στον αμφιβληστροειδή. Για παρατήρηση αντικειμένων σε μικρότερες αποστάσεις, οι μυς του οφθαλμού μεταβάλλουν την καμπυλότητα του φακού, κυρίως της εξωτερικής του επιφάνειας, έτσι ώστε να μικρύνει η εστιακή του απόσταση και το είδωλο να σχηματιστεί πάλι πάνω στον αμφιβληστροειδή. Αυτό λέγεται προσαρμογή του οφθαλμού. Μεταβολή της εστιακής απόστασης του φακού γίνεται επίσης και από τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης λόγω σύσπασης του φακού. Ο κανονικός λοιπόν οφθαλμός μπορεί να βλέπει καθαρά και τα μακρινά αντικείμενα και εκείνα που βρίσκονται κοντά.

Για κανονικό οφθαλμό, η ελάχιστη απόσταση που μπορεί να πλησιάσει ένα αντικείμενο και να εξακολουθεί να το βλέπει καθαρά, ονομάζεται ελάχιστη απόσταση ευκρινούς όρασης. Η απόσταση αυτή μεταβάλλεται με την ηλικία. Έτσι για παιδιά είναι ίση με 10 cm, για ενήλικες είναι ίση με 20 cm και στους γέροντες φθάνει τα 60 cm. Ελάχιστη απόσταση άνετης όρασης είναι η ελάχιστη απόσταση που πλησιάζει ένα αντικείμενο τον οφθαλμό χωρίς να επέρχεται κόπωση του οφθαλμού.



Για ενήλικες συνήθως εκλέγεται η τιμή $\Delta = 25$ cm. Η μέγιστη απόσταση ευκρινούς όρασης για τον κανονικό οφθαλμό είναι τό άπειρο. Αυτή επιτυγχάνεται με απροσάρμοστο τον οφθαλμό όπου η εστιακή του απόσταση είναι $f = 1,7$ cm, δηλαδή, όταν η εστία του οφθαλμικού οπτικού συστήματος βρίσκεται πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα.

Γωνία όρασης. Η γωνία θ (σχήμα 4) με την οποία ο οφθαλμός βλέπει ένα αντικείμενο, ονομάζεται γωνία όρασης. Όπως προκύπτει από το σχήμα, όσο πλησιάζει ένα αντικείμενο τον οφθαλμό τόσο μεγαλύτερη γίνεται η γωνία όρασης και τόσο μεγαλύτερη η επιφάνεια του αμφιβληστροειδή χιτώνα που καλύπτει το είδωλο, δηλαδή το είδωλο αναπτύσσεται όλο και σε μεγαλύτερο αριθμό κώνων. Επομένως όσο πλησιάζει το αντικείμενο



Σχήμα 4. Όσο πλησιάζει ένα αντικείμενο τον οφθαλμό, τόσο αυξάνεται η γωνία όρασης (Από Αλεξόπουλο, τόμος 5ος, 1966).

τον οφθαλμό τόσο μεγαλύτερο φαίνεται και όλο και περισσότερες λεπτομέρειές του διακρίνονται. Η απόσταση όμως ανάμεσα στο αντικείμενο και τον οφθαλμό δέν μπορεί να γίνει μικρότερη της ελάχιστης απόστασης άνετης όρασης λόγω της όχι καλής προσαρμογής του οφθαλμού για αποστάσεις μικρότερες των 25 cm.

Οξύτητα όρασης. Η ελάχιστη γωνιακή απόσταση δύο φωτεινών σημείων που απέχουν την ίδια απόσταση από τον οφθαλμό και που μόλις επιτρέπει το διαχωρισμό των δύο σημείων, ονομάζεται οξύτητα όρασης. Σε φυσιολογικά άτομα η οξύτητα όρασης είναι περίπου $\theta_{op} = 5 \times 10^{-4}$ rad. Από την οξύτητα όρασης μπορούμε να προσδιορίσουμε την ελάχιστη απόσταση δ ανάμεσα σε δύο διακρινόμενα σημεία στον αμφιβληστροειδή. Η σχέση ανάμεσα στην ελάχιστη απόσταση δ και στην οξύτητα όρασης είναι $\delta = D \eta \mu \theta_{op}$ ή επειδή η γωνία θ_{op} είναι πολύ μικρή,

$$\delta = D \theta_{op} \quad (10)$$

όπου D , είναι η διάμετρος του βολβού. Επομένως, $\delta = 2,3 \times 10^{-2} \text{ m} \times 5 \times 10^{-4} \text{ rad} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ m}$. Επειδή η μέση απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κυττάρων (κώνων) στον αμφιβληστροειδή είναι περίπου $5 \times 10^{-6} \text{ m}$, συμπεραίνουμε ότι για να διαχωριστούν δύο σημεία πρέπει τα είδωλά τους στον αμφιβληστροειδή να διαχωρίζονται από ένα τουλάχιστο μη διεγερμένο κώνο. Επομένως, η ίδια η κατασκευή του οφθαλμού (απόσταση μεταξύ κώνων), ατέλειες του οφθαλμού και φαινόμενα περίθλασης είναι οι κύριες αιτίες που περιορίζουν την οξύτητα όρασης και όχι η κυματική φύση του φωτός.



Η ισχύς προσαρμογής του οφθαλμού, είναι :

$$I_{\Pi} = I_E - I_{\infty} \quad (11)$$

όπου I_E είναι η ισχύς του οφθαλμού προσαρμοσμένου στην ελάχιστη απόσταση άνετης όρασης και I_{∞} είναι η ισχύς για απροσαρμοστο οφθαλμό. Από τη σχέση (6) και επειδή $\beta = D$ (διάμετρος βολβού), έχουμε: $I_E = \frac{1}{0,25} \text{ m}^{-1} + \frac{1}{D}$ και $I_{\infty} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{D} = \frac{1}{D}$

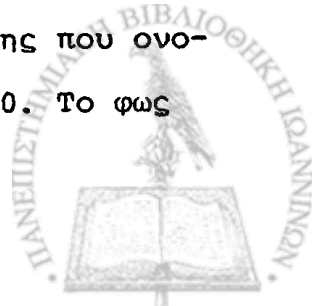
Επομένως από τη σχέση (11) έχουμε:

$$I_{\Pi} = \frac{1}{0,25} \text{ m}^{-1} + \frac{1}{D} - \frac{1}{D} = 4 \text{ m}^{-1} = 4 \text{ διοπτρίες}$$

3.3. Οπτικά κύτταρα

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, σε φυσιολογικές καταστάσεις, το είδωλο σχηματίζεται πάντοτε πάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα όπου βρίσκονται τα οπτικά κύτταρα. Τα κύτταρα αυτά μπορούν να θεωρηθούν σαν μετατροπείς σήματος, μετατρέποντας ένα φωτεινό σήμα σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο μέσω του οπτικού νεύρου μεταφέρεται στον εγκέφαλο. Υπάρχουν δύο είδη οπτικών κυττάρων: οι κόννοι που χαρακτηρίζονται από τη δυνατότητα να διακρίνουν τα χρώματα και τις λεπτομέρειες του αντικειμένου και τα ραβδία που παρόλο ότι δεν βοηθούν στη διάκριση των χρωμάτων και των λεπτομερειών, λόγω της ευαισθησίας τους ακόμη και σε πολύ μικρή ένταση φωτός, χρησιμεύουν για τη νυκτερινή όραση.

Η ικανότητα των οπτικών κυττάρων να ανιχνεύουν το φως, κατά κύριο λόγο οφείλεται σε ειδικές φωτοευαίσθητες ουσίες. Οι ουσίες αυτές αποτελούνται από ειδικό τύπο πρωτεΐνης που ονομάζεται οψίνη, μοριακού βάρους της τάξης των 40.000. Το φως



απορροφούμενο από τη χρωστική ουσία αλλάζει τη μορφή της με επακόλουθο μια σειρά βιοχημικών αντιδράσεων. Τα οπτικά κύτταρα ή οποιαδήποτε άλλα φωτοευαίσθητα κύτταρα (όπως οι χλωροπλάστες), εξεταζόμενα με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο παρουσιάζουν μια κανονική διάταξη από πολλές συνεχείς στοιβάδες. Πιθανώς η διάταξη αυτή να διευκολύνει τη μεταφορά των ηλεκτρονίων που παράγονται κατά τις βιοχημικές αντιδράσεις, σε σημεία του κυττάρου στα οποία μπορούν να δημιουργήσουν μια ηλεκτρική απόκριση.

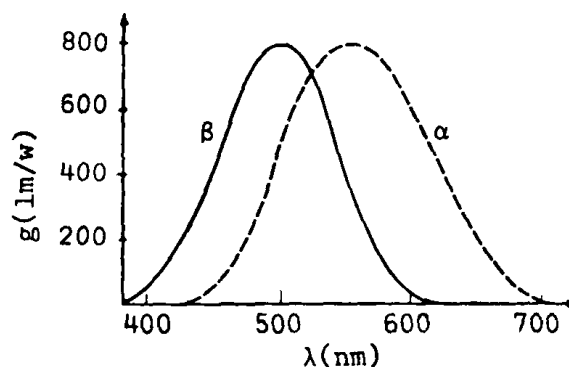
3.4. Απόκριση του οφθαλμού στα διάφορα μήκη κύματος.

Τα οπτικά κύτταρα είναι ευαίσθητα ακόμη και σε ακτινοβολίες όπως η υπεριώδης που το φάσμα τους βρίσκεται έξω από το ορατό φάσμα. Ο λόγος που δεν μπορούμε να δούμε σ'αυτά τα μήκη κύματος οφείλεται στο ότι ο κερατοειδής χιτώνας απορροφά έντονα τις ακτινοβολίες με μήκος κύματος μικρότερο από 300nm. Επίσης ο κρυσταλλοειδής φακός απορροφά έντονα τις ακτινοβολίες με μήκος κύματος κάτω από 380 nm και αυτό είναι το μικρότερο μήκος κύματος που μπορεί να φθάσει στον αμφιβληστροειδή. Εξάλλου, τα μόρια ύδατος στον κερατοειδή χιτώνα και στο υδατοειδές υγρό απορροφούν έντονα τις ακτινοβολίες με μήκος κύματος μεγαλύτερο από 1200 nm. Οι ακτινοβολίες με μεγάλα μήκη κύματος περιορίζονται ακόμη περισσότερο λόγω της μικρής ευαισθησίας των οπτικών κυττάρων σε μήκος κύματος μεγαλύτερο από 700 nm. Ακόμη και μέσα στο ορατό φάσμα (380 nm - 700 nm) ο οφθαλμός δεν αποκρίνεται το ίδιο σε όλα τα μήκη κύματος.



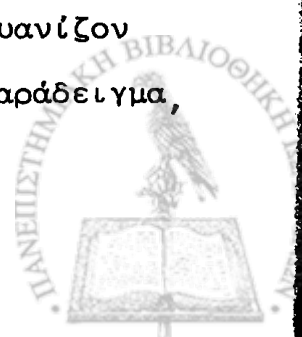
3.5. Σχέση ευαισθησίας οφθαλμού και μήκους κύματος

Στο δεύτερο κεφάλαιο ορίστηκε ο συντελεστής ευαισθησίας του οφθαλμού, g . Η σχέση μεταξύ του συντελεστή αυτού και του μήκους κύματος αποδίδεται στο σχήμα 5. Από την καμπύλη του σχήματος αυτού προκύπτει ότι ο οφθαλμός έχει τη μέγιστη ευ-



Σχήμα 5: Καμπύλη ευαισθησίας του οφθαλμού (Από MacDonald και Burns, 1975).

αισθησία για πρασινοκίτρινο φως, μήκους κύματος 555 nm. Αυτό ισχύει όταν ο οφθαλμός δέχεται φωτισμό όχι πολύ ασθενή. Αν ο φωτισμός είναι περίπου κάτω των 3 lx, οι κώνοι δεν αποκρίνονται και η όραση γίνεται μόνο με τα ραβδία (λυκαυγής όραση). Η ευαισθησία των ραβδίων γίνεται μέγιστη σε μήκος κύματος 520 nm, αντί 555 nm, έχει δηλαδή μετατοπιστεί προς τα μικρότερα μήκη κύματος (σχήμα 5, καμπύλη β). Στη μετατόπιση αυτή που λέγεται φαινόμενο Purkinije, οφείλεται το κυανίζον χρώμα των επιφανειών που φωτίζονται πολύ λίγο, για παράδειγμα, από το φως της σελήνης.



3.6. Μηχανισμός της όρασης.

Ένα σχετικά περίπλοκο πρόβλημα είναι να υπολογιστεί ο ελάχιστος αριθμός των φωτονίων που πρέπει να ερεθίσουν ένα οπτικό κύτταρο για να γίνει το φως αντιληπτό (κβαντική απόκριση του οφθαλμού). Ακόμη και αν μετρηθεί η ένταση της φωτεινής δέσμης που προσπίπτει στον κερατοειδή χιτώνα, η απορρόφηση της δέσμης μέσα στον οφθαλμό, δεν επιτρέπει τον κατ' ευθεία προσδιορισμό του μέσου αριθμού φωτονίων που προσπίπτουν στον αμφιβληστροειδή και μάλιστα αυτών που προσπίπτουν πάνω σε ένα μεμονωμένο οπτικό κύτταρο. Παρ' όλα αυτά όμως, από συνδυασμό θεωρητικών στατιστικών κατανομών και πειραματικών αποτελεσμάτων θα μπορούσαμε να δεχθούμε ότι ένα οπτικό κύτταρο διεγείρεται μετά από απορρόφηση ενός σχετικά μικρού αριθμού φωτονίων (1-8). Αυτό όμως δεν ισχύει στην πράξη. Οι νευρικές ίνες που εκκινούν από ομάδες οπτικών κυττάρων συνενούνται μεταξύ τους σχηματίζοντας δεμάτια νευρικών ινών (περίπου 5000 κύτταρα συνδέονται σε κάθε δεμάτιο ινών). Η χρονική ή τοπική, σε διάφορα κύτταρα, σύμπτωση δεκάδων σημάτων (φωτονίων) σε ένα δεμάτιο ινών, είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να διεγερθεί το οπτικό νεύρο που μεταφέρει την πληροφορία στον εγκέφαλο.

Ο μηχανισμός αυτός είναι ανάλογος με τη λειτουργία των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων σύμπτωσης που χρησιμοποιούνται συνήθως για να βελτιώσουν το λόγο σήμα/θόρυβος. Η θερμική ενέργεια των οπτικών κυττάρων κυμαίνεται συνεχώς γύρω από μια μέση τιμή που καθορίζεται από τη θερμοκρασία. Η στατιστική κατανομή



της θερμικής αυτής ενέργειας είναι τέτοια που περίπου σε κάθε δευτερόλεπτο, κάποιο κύτταρο θα αποκτήσει αρκετή ενέργεια για να διεγερθεί. Επιπλέον, μεμονωμένα φωτόνια από το υπόστρωμα ή από σκέδαση μπορούν να περάσουν από την κόρη και να διεγείρουν κάποιο οπτικό κύτταρο. Αν σε περιπτώσεις σαν κι αυτές υπήρχε απόκριση, ο εγκέφαλος θα λάμβανε σήμα και θα διεγειρόταν χωρίς κανένα λόγο. Η ύπαρξη των μηχανισμών σύμπτωσης στα δεμάτια των ινών εξασφαλίζει την αποκοπή αυτών των ανεπιθύμητων μεμονωμένων σημάτων (θορύβου).



4. ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

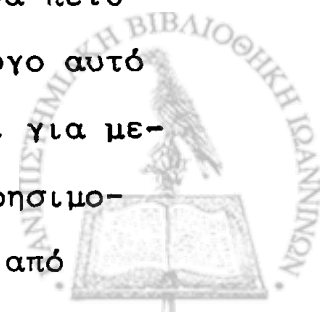
4.1. Μεγέθυνση

Ο οφθαλμός δεν μπορεί να διακρίνει καθαρά αντικείμενα μικρότερα από 100 μm . Για την παρατήρηση πολύ μικρών αντικειμένων χρησιμοποιούνται ειδικά οπτικά όργανα, όπως τα μικροσκόπια που δίνουν μεγεθυσμένο είδωλο του παρατηρούμενου αντικείμενου. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση της γωνίας όρασης με την οποία ο οφθαλμός βλέπει ένα αντικείμενο.

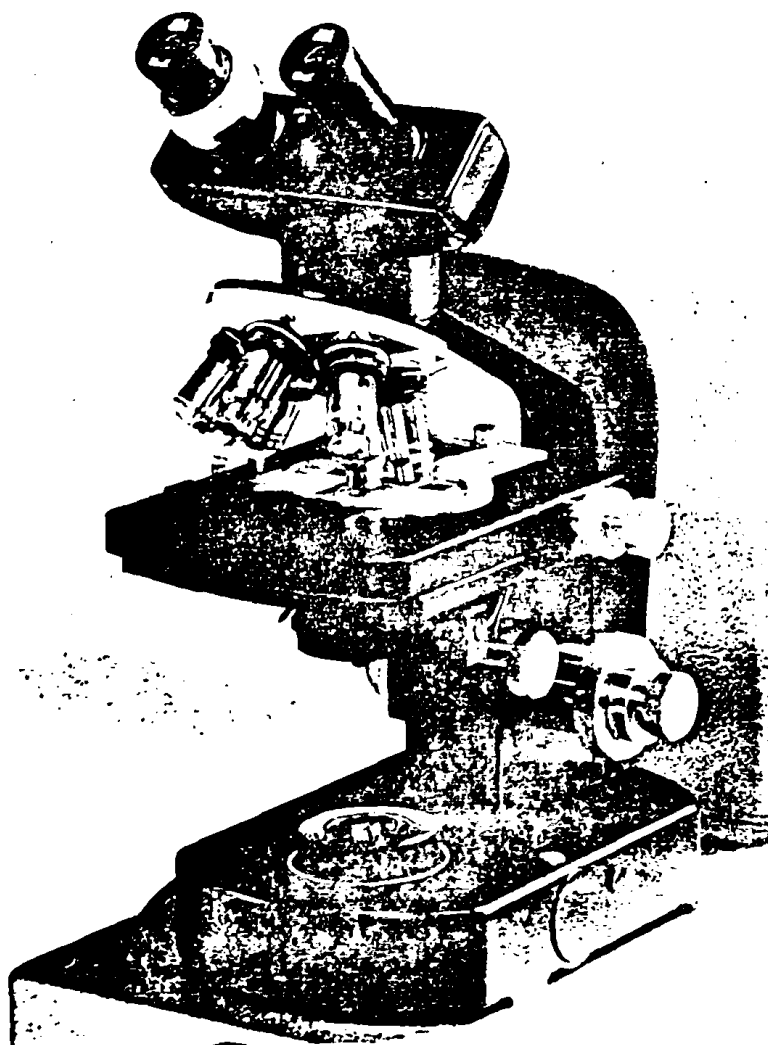
Γωνιακή μεγέθυνση M ενός οπτικού οργάνου καλείται ο λόγος της γωνίας όρασης που βλέπουμε το αντικείμενο με τη βοήθεια του οργάνου, προς τη γωνία όρασης που βλέπουμε το αντικείμενο με γυμνό οφθαλμό, όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην ελάχιστη απόσταση άνετης όρασης, $\Delta = 25 \text{ cm}$. Παρόλο ότι υπάρχει και η εγκάρσια (γραμμική) μεγέθυνση, συνήθως με τον όρο μεγέθυνση εννοούμε τη γωνιακή μεγέθυνση.

4.2. Οπτικό ή κοινό μικροσκόπιο

Το οπτικό ή κοινό μικροσκόπιο είναι ένα από τα οπτικά όργανα που μπορεί να δώσει μεγεθυσμένο είδωλο μικρού αντικείμενου. Το απλούστερο μικροσκόπιο που χρησιμοποιήθηκε από την αρχή του 17ου αιώνα, είναι ένας απλός αμφίκυρτος φακός. Όμως, στην περίπτωση αυτή η μεγέθυνση που μπορούμε να πετύχουμε περιορίζεται από τις παραμορφώσεις. Για το λόγο αυτό σήμερα, οι απλοί μεγεθυντικοί φακοί χρησιμοποιούνται για μεγεθύνσεις μέχρι $\times 10$. Για μεγαλύτερες μεγεθύνσεις χρησιμοποιείται το σύνθετο μικροσκόπιο που κατασκευάζεται από

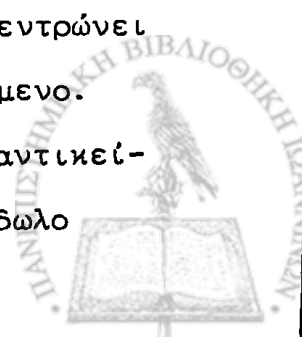


συνδυασμό δύο ή περισσότερων φακών (σχήμα 6) έτσι ώστε η μεγάλη μεγέθυνση του αντικειμένου να γίνεται σταδιακά χωρίς σοβαρές παραμορφώσεις.

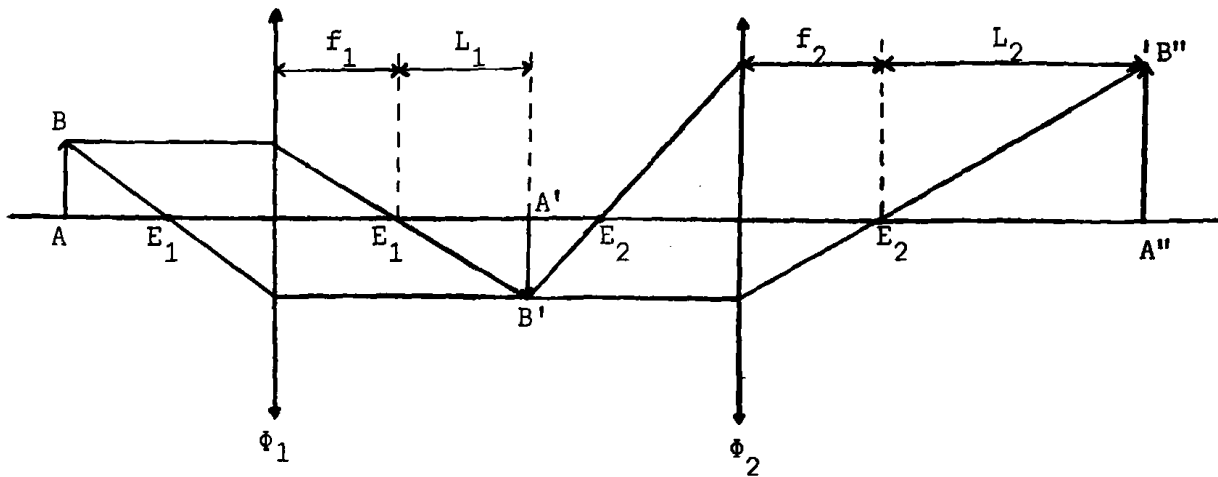


Σχήμα 6: Οπτικό ή κοινό μικροσκόπιο.

Το μικροσκόπιο αποτελείται από τρεις συγκλίνοντες φακούς: το συλλέκτη φακό, τον αντικειμενικό φακό και τον προσοφθάλμιο φακό. Ο συλλέκτης φακός χρησιμοποιείται για να συγκεντρώνει το φως που εκπέμπει η φωτεινή πηγή πάνω στο αντικείμενο. Δηλαδή, ο ρόλος του φακού αυτού είναι να φωτίσει το αντικείμενο. Ο αντικειμενικός φακός δημιουργεί το πρώτο είδωλο



και επομένως παίζει τον πιο σπουδαίο ρόλο. Ο προσοφθάλμιος φακός έχει σαν σκοπό να μεγεθύνει το είδωλο που έχει ήδη σχηματιστεί από τον αντικειμενικό φακό. Το διάγραμμα των φωτεινών ακτίνων για τον σχηματισμό του τελικού ειδώλου δίνεται στο σχήμα 7. Ο αντικειμενικός φακός Φ_1 σχηματίζει πραγματικό και ανεστραμμένο είδωλο $A'B'$ του αντικειμένου AB , με γραμμική μεγέθυνση $m_1 = \frac{A'B'}{AB} = \frac{L_1}{f_1}$



Σχήμα 7: Διάγραμμα φωτεινών ακτίνων για το σχηματισμό του τελικού ειδώλου $A''B''$ όταν το πρώτο είδωλο $A'B'$ σχηματίζεται σε κάποιο σημείο του οπτικού μήκους, E_1E_2 , του μικροσκοπίου.

Επίσης ο προσοφθάλμιος φακός Φ_2 , σχηματίζει πραγματικό και ανεστραμμένο είδωλο $A''B''$ του ειδώλου $A'B'$, με γραμμική μεγέθυνση $m_2 = \frac{A''B''}{A'B'} = \frac{L_2}{f_2}$. Ως προς το αντικείμενο AB το τελικό είδωλο $A''B''$ είναι πραγματικό και μη ανεστραμμένο και παρουσιάζει ολική γραμμική μεγέθυνση

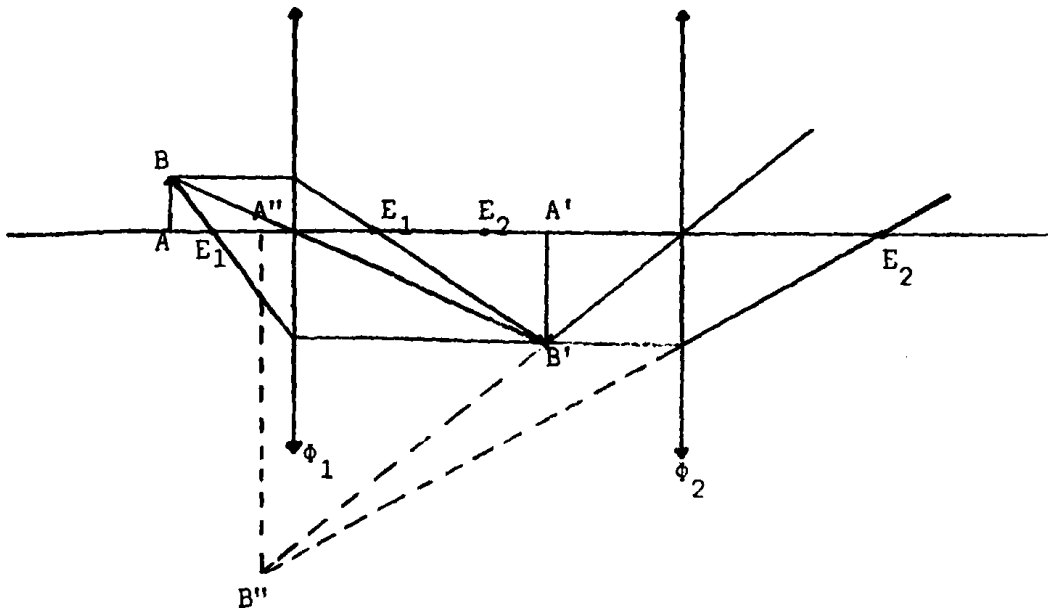
$$m = m_1 \times m_2 = \frac{L_1}{f_1} \times \frac{L_2}{f_2} = \frac{A''B''}{AB} \quad (12)$$



Επειδή το είδωλο A''B'' είναι πραγματικό μπορούμε να το πάρουμε πάνω σε οθόνη ή σε φωτογραφική πλάκα. Στην περίπτωση αυτή η ολική γραμμική μεγέθυνση, π , είναι ίση με την ολική γωνιακή μεγέθυνση, M , του μικροσκοπίου. Αν το οπτικό μήκος $L = E_1E_2$ του μικροσκοπίου είναι τέτοιο ώστε το είδωλο A'B' να σχηματιστεί μεταξύ του φακού Φ_2 και της εστίας του E_2 , όπως στο σχήμα 8, τότε ο ανθρώπινος οφθαλμός μπορεί να παρατηρήσει είδωλο φανταστικό και ανεστραμμένο με ολική μεγέθυνση

$$M = \frac{\theta_2}{\theta_{\text{γυμν.οφθ.}}} = \pi_1 M_2 \quad (13)$$

όπου π_1 η γραμμική μεγέθυνση του αντικειμενικού φακού Φ_1 και M_2 η γωνιακή μεγέθυνση του προσοφθάλμιου φακού Φ_2 .



Σχήμα 8: Διάγραμμα φωτεινών ακτίνων για το σχηματισμό του τελικού ειδώλου όταν το ενδιάμεσο είδωλο σχηματίζεται πέρα από το οπτικό μήκος E_1E_2 .



Στην περίπτωση που το είδωλο A'B' σχηματιστεί ακριβώς πάνω στην εστία E₂ του προσοφθάλμιου φακού Φ₂, τότε ο οφθαλμός βλέπει είδωλο φανταστικό, ανεστραμμένο και σε άπειρη απόσταση. Για την περίπτωση αυτή η γωνιακή μεγέθυνση του μικροσκοπίου δίνεται από τη σχέση:

$$M = \frac{25\text{cm} \times L}{f_1 f_2} \quad (14) \quad \text{όπου} \quad L = E_1 E_2$$

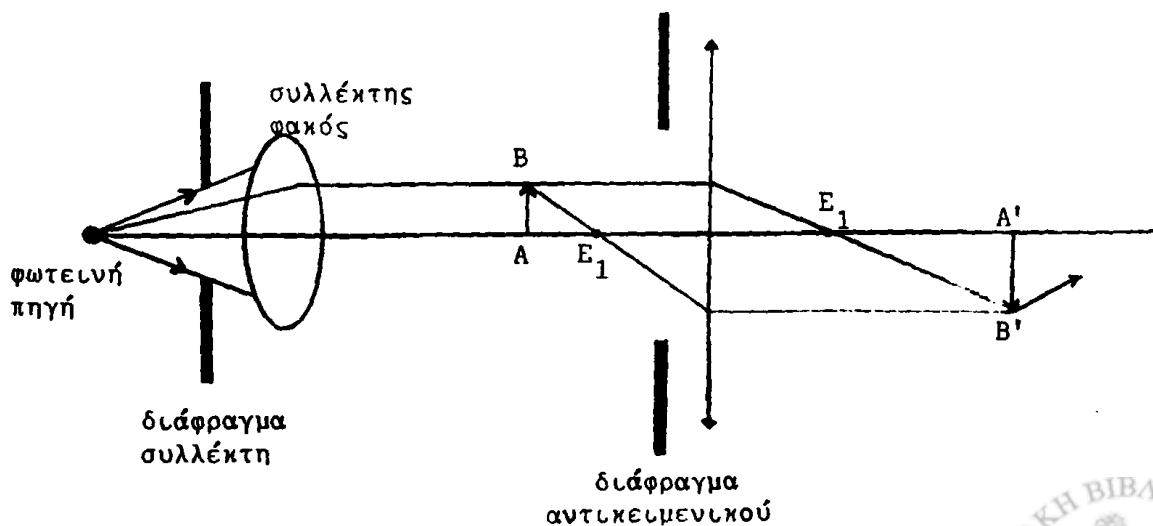
Η σχέση (14) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν το είδωλο A'B' δεν σχηματίζεται ακριβώς πάνω στην εστία E₂ του προσοφθάλμιου, αλλά κοντά σ' αυτή.

Θεωρητικά η μεγέθυνση του μικροσκοπίου μπορεί να λάβει οσοδήποτε μεγάλη τιμή επιθυμούμε. Από τη σχέση (14), αύξηση της μεγέθυνσης μπορούμε να έχουμε αυξάνοντας το οπτικό μήκος, L, του μικροσκοπίου ή ελαττώνοντας τις εστιακές αποστάσεις f₁, f₂ των φακών. Επίσης θα μπορούσαμε να αυξήσουμε τη μεγέθυνση προσθέτοντας και άλλους φακούς μεταξύ προσοφθάλμιου και αντικειμενικού φακού (μεγέθυνση σε περισσότερα στάδια). Στην πράξη όμως, επειδή θέλουμε να έχουμε ένα συμπαγές όργανο χωρίς πολλές ρυθμίσεις, αυτό που μεταβάλλουμε είναι τα f₁ και f₂ και όχι το μήκος L. Αυτό γίνεται με αλλαγή του φακού, συνήθως του αντικειμενικού, με ένα άλλο φακό μικρότερης εστιακής απόστασης f₁. Σαν αποτέλεσμα, στα κοινά μικροσκόπια, μόνο ορισμένες τιμές μεγέθυνσης μπορούμε να έχουμε που καθορίζονται από τους φακούς που χρησιμοποιούνται. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι υπάρχει περιορισμός στη μεγέθυνση που μπορούμε να φθάσουμε λόγω της διακριτικής ικανότητας του ανθρώπινου οφθαλμού.



4.3. Φωτισμός αντικειμένου

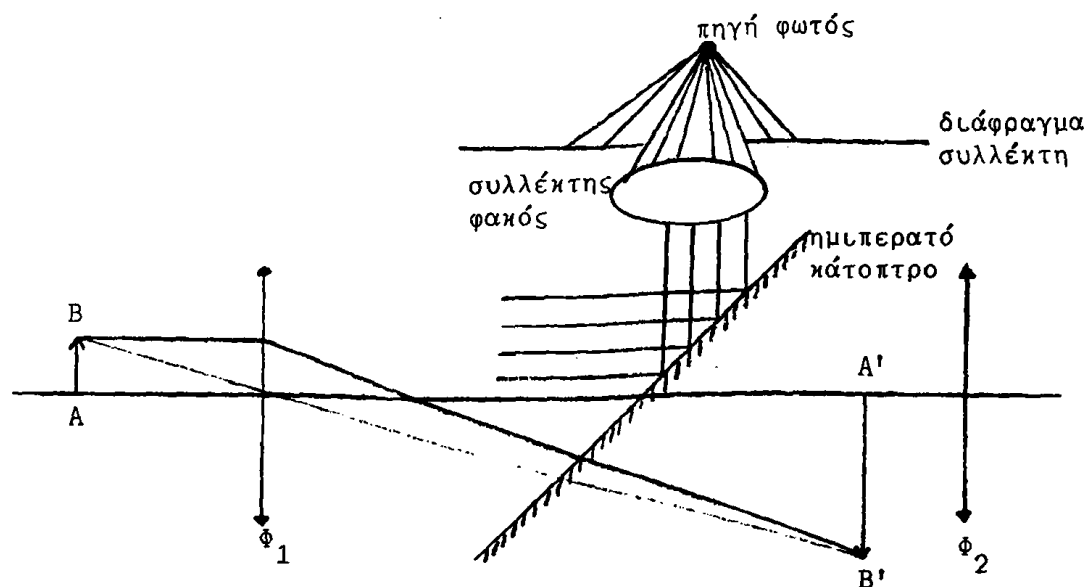
Επειδή το παρατηρούμενο αντικείμενο συνήθως δεν είναι αυτόφωτο και το λίγο φως (από ανάκλαση) που προέρχεται από την επιφάνειά του κατανέμεται στην πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια του ειδώλου, η εικόνα που βλέπει ο οφθαλμός είναι πολύ αμυδρή. Για το λόγο αυτό επιβάλλεται ισχυρός φωτισμός του αντικειμένου από κατάλληλη φωτεινή πηγή. Επίσης, υπάρχει ο συλλέκτης φακός που όπως έχει πιο πάνω αναφερθεί χρησιμοποιείται για να συγκεντρώνει το φως που εκπέμπει η φωτεινή πηγή πάνω στο αντικείμενο. Επιπλέον, μπορούμε να πετύχουμε συγκλίνουσα φωτεινή δέσμη που να εστιάζει πάνω στο αντικείμενο ή παράλληλη δέσμη φωτός. Ακόμη η ύπαρξη διαφράγματος, επιτρέπει το φωτισμό μέρους μόνο της επιφάνειας του αντικειμένου. Στην περίπτωση που το αντικείμενο (δείγμα) είναι διαφανές, όπως τα βιολογικά δείγματα, η φωτεινή πηγή τοποθετείται πίσω από το αντικείμενο και η φωτεινή δέσμη διέρχεται μέσα από αυτό (σχήμα 9). Όταν το δείγμα είναι αδιαφανές, τότε φωτίζεται



Σχήμα 9: Φωτισμός διαφανούς δείγματος.



από μπροστά και χρησιμοποιούμε την ανακλώμενη στην επιφάνειά του δέση (σχήμα 10).

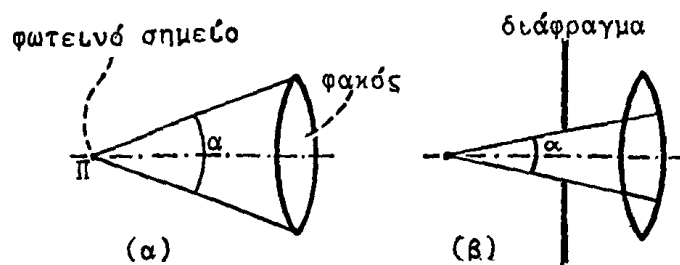


Σχήμα 10: Φωτισμός αδιαφανούς δείγματος .

4.4. Γωνιακό άνοιγμα - Αριθμητικό άνοιγμα

Γωνιακό άνοιγμα, α , ενός φακού είναι η μέγιστη γωνία που σχηματίζουν οι φωτεινές ακτίνες που ξεκινούν από ένα φωτεινό σημείο, Π , και κατορθώνουν να περάσουν από την κόρη του οφθαλμού ή να εισέρθουν μέσα σ'ένα οπτικό σύστημα. Το γωνιακό άνοιγμα εξαρτάται από τη διάμετρο του φακού ή από το διάφραγμα του (σχήμα 11). Το γωνιακό άνοιγμα παίρνει τη μέγιστη τιμή όταν το διάφραγμα είναι τελείως ανοικτό και την ελάχιστη όταν είναι κλειστό.





Σχήμα 11: Το γωνιακό άνοιγμα ενός φακού περιορισμένο (α) από τη διάμετρο, (β) από το διάφραγμα.

Το αριθμητικό άνοιγμα, A, ενός φακού ορίζεται σαν

$$A = n \cdot \eta \mu \frac{\alpha}{2} \quad (15)$$

όπου n , ο δείκτης διάθλασης στο χώρο του αντικειμένου (για τον αέρα $n=1$). Όπως θα δούμε παρακάτω, το μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα στον αντικειμενικό φακό δίνει στο μικροσκόπιο μεγάλη διακριτική ικανότητα και αυξάνει τη φωτεινότητα των ειδώλων.

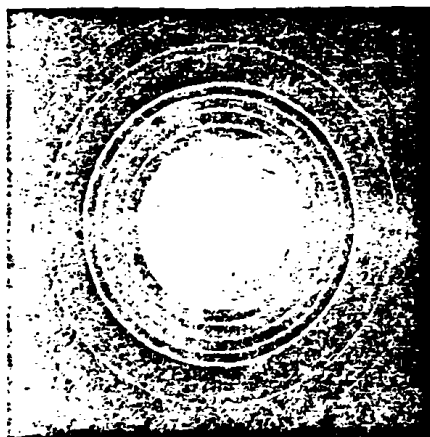
Για να αυξήσουμε το γωνιακό άνοιγμα, βάζουμε μεταξύ του αντικειμένου και του αντικειμενικού φακού σταγόνα από ειδικό υγρό, για παράδειγμα κεδρέλαιο, του οποίου ο δείκτης διάθλασης είναι ίσος με εκείνον του φακού ($n=1,5$). Οι φακοί αυτοί ονομάζονται καταδυτικοί φακοί. Έτσι, με τους φακούς αυτούς αυξά-



νεται και το γωνιακό άνοιγμα και ο δείκτης διάθλασης και επομένως από τη σχέση (15) αυξάνεται το αριθμητικό άνοιγμα που συνεπάγεται αύξηση της διακριτικής ικανότητας του μικροσκοπίου.

4.5. Διακριτικό όριο-Διακριτική ικανότητα.

Η περίθλαση είναι έμφυτη στο φως λόγω της κυματικής φύσης του. Δεν μπορεί να εξαλειφθεί αν και η επίδρασή της στο είδωλο μπορεί να ελαττωθεί στο ελάχιστο. Η περίθλαση προέρχεται από τις ανωμαλίες του αντικειμένου και από την παρουσία των διαφραγμάτων (κυρίως του αντικειμενικού φακού) που μέσα από τις οπές τους είναι αναγκασμένη να περάσει η φωτεινή δέσμη. Λόγω περίθλασης, το είδωλο ενός σημείου του αντικειμένου δεν είναι ποτέ ένα σημείο αλλά μια κηλίδα που έχει ένα κεντρικό κύκλο ακτίνας δ (σχήμα 12). Αν θέλουμε να πα-



Σχήμα 12: Υπόδειγμα περίθλασης (Από Meek, 1976).



ρατηρήσουμε δύο σημεία πρέπει τα είδωλά τους (κηλίδες) να βρίσκονται σε μια ορισμένη απόσταση μεταξύ τους ώστε να ξεχωρίζουν σαν δύο κηλίδες και όχι να φαίνονται σαν μία. Η ελάχιστη αυτή απόσταση ονομάζεται διακριτικό όριο και είναι ίση με την ακτίνα δ του κεντρικού κύκλου των κηλίδων. Δίνεται από τη σχέση:

$$\delta = \frac{0,61\lambda}{n \eta \frac{\alpha}{2}} \quad (16)$$

όπου λ το μήκος κύματος, n , ο δείκτης διάθλασης του μέσου μεταξύ αντικειμένου και φακού, και α το γωνιακό άνοιγμα του αντικειμενικού φακού. Επειδή το γωνιακό άνοιγμα είναι πολύ μικρό μπορούμε να θεωρήσουμε $\eta \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$. Επίσης, επειδή ο χώρος μέσα στο φακό καλύπτεται από αέρα ο δείκτης διάθλασης n ισούται με τη μονάδα. Έτσι η σχέση (16) μπορεί να γραφεί:

$$\delta = \frac{0,61\lambda}{\frac{\alpha}{2}} = \frac{1,22\lambda}{\alpha} \quad (17)$$

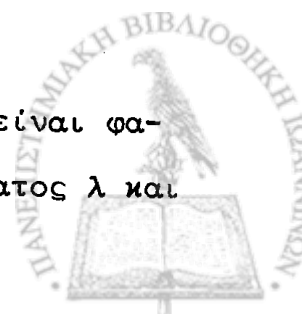
Ακόμη, επειδή $n \eta \frac{\alpha}{2} = A$ (αριθμητικό άνοιγμα), η σχέση (16) μπορεί να πάρει τη μορφή:

$$\delta = \frac{0,61\lambda}{A} \quad (18)$$

Η διακριτική ικανότητα είναι το αντίστροφο του διακριτικού ορίου. Δηλαδή:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{\alpha}{1,22\lambda} \quad (19)$$

Για να πετύχουμε την καλύτερη διακριτική ικανότητα είναι φανερό ότι χρειαζόμαστε το μικρότερο δυνατό μήκος κύματος λ και



τις μεγαλύτερες τιμές για το γωνιακό άνοιγμα α και το δείκτη διάθλασης n . Με το οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί πράσινος φωτισμός ($\lambda=400$ nm) ή και υπεριώδης ($\lambda=200$ nm). Επίσης, με τη βοήθεια καταδυτικών φακών ο δείκτης διάθλασης, n , μπορεί να αυξηθεί (έως περίπου 1,5). Έτσι, για πράσινο φωτισμό μπορούμε να πετύχουμε διακριτικό όριο περίπου 130 nm. Στην πράξη όμως είναι άσκοπο το να πετύχουμε τόσο μικρό διακριτικό όριο γιατί το μικρότερο αντικείμενο που μπορεί να διακρίνει καθαρά ο γυμνός οφθαλμός είναι 0,1 mm. Ακόμη, θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι στην πράξη η διακριτική ικανότητα περιορίζεται πολύ από τα σφάλματα των φακών.

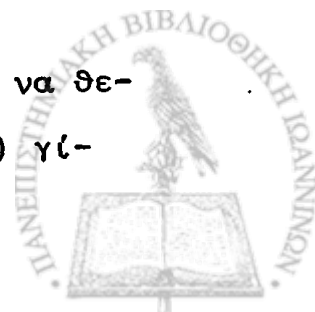
4.6. Βάθος ευκρινούς απεικόνισης (βάθος πεδίου)

Για να είναι σαφής η απεικόνιση του ειδώλου πρέπει το παρατηρούμενο αντικείμενο να βρίσκεται σε μια ορισμένη απόσταση από τον αντικειμενικό φακό. Η απόσταση αυτή, ονομάζεται απόσταση εργασίας. Η μικρή περιοχή γύρω από τη σωστή θέση του αντικειμένου που μέσα σ' αυτή το είδωλο εξακολουθεί να απεικονίζεται καθαρά, λέγεται βάθος ευκρινούς απεικόνισης ή βάθος πεδίου, Δl . Μια ικανοποιητική προσέγγιση του Δl μπορεί να μας δώσει η σχέση:

$$\Delta l = \frac{\lambda}{n \eta \mu^2 \frac{\alpha}{2}} + \frac{l}{7M \eta \mu \frac{\alpha}{2}} \quad (20)$$

όπου M, η μεγέθυνση του οπτικού συστήματος.

Όπως έχουμε αναφέρει στην προηγούμενη ενότητα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι $n=1$ και $\eta \mu \frac{\alpha}{2} = \frac{\alpha}{2}$ και επομένως η σχέση (20) γίνεται:



$$\Delta l = \frac{4\lambda}{\alpha^2} + \frac{2}{7Ma} \quad (21)$$

Από την παραπάνω σχέση φαίνεται ότι το βάθος πεδίου εξαρτάται από τη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου και τη μεγέθυνση. Όταν η διακριτική ικανότητα βελτιώνεται και η μεγέθυνση αυξάνεται το βάθος πεδίου γίνεται μικρότερο. Επομένως αν δεν θυσιάσουμε μέρος της διακριτικής ικανότητας (π.χ. μικραίνοντας το α) ή της μεγέθυνσης M , δεν μπορούμε να αυξήσουμε το βάθος πεδίου. Η αύξηση του βάθους πεδίου πολλές φορές χρειάζεται, όπως όταν θέλουμε να εντοπίσουμε το είδωλο στο ξεκίνημα μιας παρατήρησης.

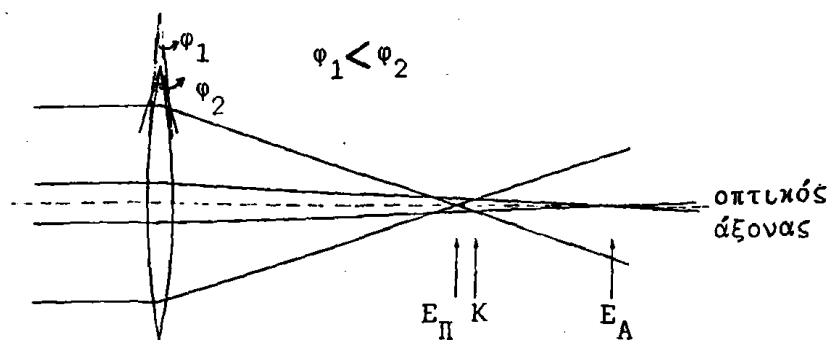
4.7. Σφάλματα φακών μικροσκοπίου.

Στην πράξη λόγω σφαλμάτων των φακών υπάρχει απώλεια στην ποιότητα του σχηματιζόμενου ειδώλου. Για τη διόρθωση των σφαλμάτων αυτών χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός πολλών φακών.

4.7.1. Σφαιρικό σφάλμα

Το σφαιρικό σφάλμα οφείλεται στην ανικανότητα του φακού να συγκεντρώσει όλες τις ακτίνες που εισέρχονται σ' αυτόν σε κοινή εστία (σχήμα 13). Αυτό οφείλεται στο ότι οι ακτίνες που περνούν από το περιφερειακό μέρος του φακού εκτρέπονται περισσότερο από τις ακτίνες που περνούν κοντά από τον κεντρικό άξονα. Αυτό συμβαίνει γιατί όσο απομακρυνόμαστε από τον οπτικό άξονα του φακού, η θλαστική γωνία του πρίσματος όλο και αυξάνει. Επειδή το σφάλμα αυτό είναι ανάλογο του α^3 (γωνιακό άνοιγμα) μπορεί να ελαττωθεί με τη χρησιμοποίηση





E_{Π} : εστία περιμετρικών ακτίνων, K : κύκλος ελάχιστης σύγχυσης
 E_A : εστία αξονικών ακτίνων

Σχήμα 13: Σφαιρικό σφάλμα (Από Goodhew, 1975).

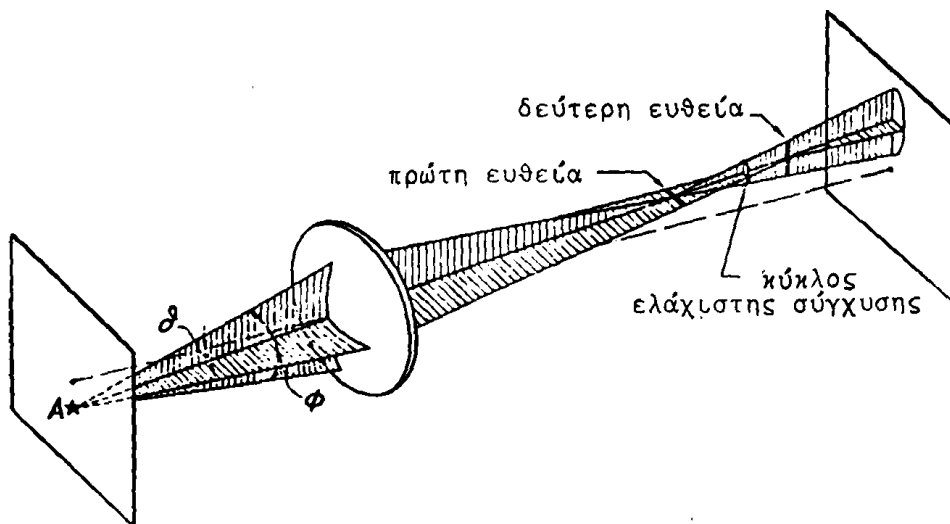
μόνο του κεντρικού τμήματος του φακού. Αυτό γίνεται με την ελάττωση της διαμέτρου του φακού, για παράδειγμα με τη βοήθεια διαφράγματος. Έτσι, μόνο οι φωτεινές ακτίνες που περνούν αρκετά κοντά από τον κεντρικό άξονα του φακού μπορούν να περάσουν μέσα από την οπή του διαφράγματος για να σχηματίσουν το είδωλο. Επίσης χρησιμοποιούνται ειδικού σχήματος φακοί.

4.7.2. Κόμη - Αστιγματισμός

Αν ένα φωτεινό σημείο βρίσκεται πάνω σ' ένα δευτερεύοντα άξονα που σχηματίζει γωνία θ με τον κύριο άξονα, τότε αντί σημειακού ειδώλου δημιουργείται φωτεινή κηλίδα. Το σφάλμα αυτό ονομάζεται κόμη. Οι διαστάσεις της κόμης εξαρτώνται από τη γωνία θ , αλλά κυρίως, από το γωνιακό άνοιγμα της διάταξης.



Πλην της κόμης δημιουργείται και άλλο σφάλμα που ονομάζεται αστιγματισμός. Στην περίπτωση αυτή, οι ακτίνες όταν βγαίνουν από το φακό, δεν συγκλίνουν σε ένα σημείο, αλλά διέρχονται από δύο τμήματα ευθειών (σχήμα 14). Οι ευθείες αυτές είναι κάθετες μεταξύ τους και ανάμεσά τους υπάρχει θέση στην οποία το σύνολο των ακτίνων παίρνει τη μικρότερη δυνατή διατομή. Η διατομή αυτή έχει περίπου τη μορφή κύκλου που καλείται κύκλος ελάχιστης σύγχυσης. Οι διαστάσεις του κύκλου εξαρτώνται από το γωνιακό άνοιγμα Φ , αλλά κυρίως από τη γωνία θ μεταξύ του κύριου και δευτερεύοντα άξονα.



Σχήμα 14: Σφάλμα αστιγματισμού (Από Αλεξόπουλο, τόμος 5ος, 1966).

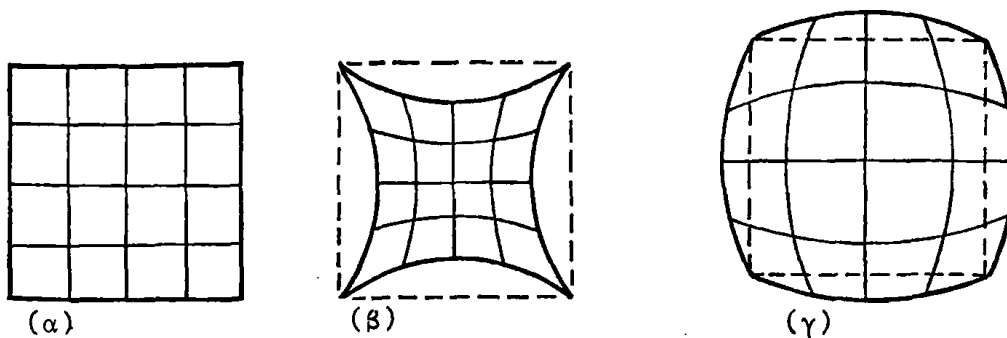
Έτσι για ένα φωτεινό σημείο που βρίσκεται πάνω σ' ένα δευτερεύοντα άξονα ο οποίος σχηματίζει μεγάλη γωνία θ με τον κύριο άξονα, ο φακός παρουσιάζει κόμη και αστιγματισμό. Το



πρώτο σφάλμα υπερτερεί όταν η διάταξη έχει μεγάλο γωνιακό άνοιγμα Φ , και το δεύτερο, όταν το γωνιακό άνοιγμα είναι σχετικά μικρό, αλλά η γωνία θ μεταξύ των δύο αξόνων είναι μεγάλη.

4.7.3. Παραμόρφωση ειδώλου

Ένα άλλο πρόβλημα που μπορεί να παρουσιαστεί στο μικροσκόπιο, κυρίως σε μικρές μεγεθύνσεις, είναι η παραμόρφωση του ειδώλου. Αυτό συμβαίνει όταν η μεγέθυνση μεταβάλλεται (αυξάνει ή ελαττώνεται) όσο απομακρυνόμαστε από τον οπτικό άξονα. Έτσι η περιφέρεια του ειδώλου μπορεί να είναι μεγεθυσμένη περισσότερο από το κέντρο ή και το αντίστροφο (σχήμα 15).

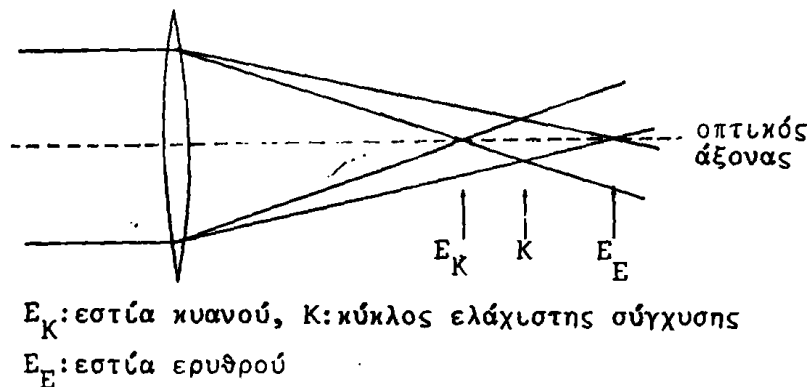


Σχήμα 15: Παραμόρφωση ειδώλου. (α) είδωλο χωρίς παραμόρφωση (β) η περιφέρεια του ειδώλου είναι μεγεθυσμένη περισσότερο από το κέντρο (γ) το κέντρο του ειδώλου είναι μεγεθυσμένο περισσότερο από την περιφέρεια (Από Weakley, 1972).



4.7.4. Χρωματικό σφάλμα

Το χρωματικό σφάλμα παρουσιάζεται όταν ο χρησιμοποιούμενος φωτισμός περιέχει ακτινοβολίες με διάφορα μήκη κύματος (ορατό φως). Στην περίπτωση αυτή ο φακός παρουσιάζει διάφορες εστιακές αποστάσεις για τα διάφορα μήκη κύματος επειδή η γωνία διάθλασης εξαρτάται από το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η περίπτωση δίνεται παραστατικά στο διάγραμμα των φωτεινών ακτίνων του σχήματος 16.



Σχήμα 16: Χρωματικό σφάλμα (Από Goodhew, 1975).

Το σφάλμα αυτό μπορεί να ελαττωθεί με τη βοήθεια συστήματος φακών (συνδυασμός φακών με διαφορετικά σχήματα και διαθλαστικές ιδιότητες) ή με τη χρησιμοποίηση φίλτρων και ειδικών λυχνιών φωτισμού.

4.8. Ειδικά μικροσκόπια

4.8.1. Μικροσκόπιο με υπεριώδη φωτισμό (Ultraviolet microscope)



Χρησιμοποιώντας υπεριώδη φωτισμό αντί για ορατό θα περιμέναμε αύξηση της διακριτικής ικανότητας του μικροσκοπίου. Στην πράξη όμως, αυτό δεν συμβαίνει. Το τελικό είδωλο αποτυπώνεται πάνω σε φωτογραφική πλάκα επειδή ο οφθαλμός δεν είναι ευαίσθητος στην υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτό σημαίνει ότι ο χειρισμός του μικροσκοπίου αυτού είναι πολύ πιο δύσκολος από το χειρισμό του κοινού μικροσκοπίου. Επίσης, επειδή το γυαλί απορροφά τις υπεριώδεις ακτίνες πρέπει οι φακοί να είναι κατασκευασμένοι από ειδικό υλικό. Πράγματι, χρησιμοποιούνται κάτοπτρα αντί για φακοί με αποτέλεσμα ο τύπος αυτός του μικροσκοπίου να είναι πολύ δαπανηρός. Ο λόγος που χρησιμοποιείται το μικροσκόπιο αυτό είναι το ότι διάφορα συστατικά του κυττάρου όπως πρωτεΐνες και νουκλεϊνικά οξέα απορροφούν σε μεγάλο βαθμό τις υπεριώδεις ακτίνες. Έτσι, τα στοιχεία αυτά λόγω του μεγάλου contrast (αντίθεση) μπορούν να μελετηθούν, πράγμα πολύ δύσκολο με το κοινό μικροσκόπιο.

4.8.2. Πολωτικό μικροσκόπιο (polarizing microscope)

Πολλές βιολογικές ουσίες περιέχουν διπλοθλαστικές περιοχές. Αυτές μπορεί να εμφανίζονται διαφανείς και σχεδόν αόρατες σε σύγκριση με γειτονικές περιοχές όταν φωτίζονται από το συνηθισμένο ορατό φως. Αυτό μπορούμε να το αποφύγουμε αν χρησιμοποιηθεί για το φωτισμό τους πολωμένο φως. Έτσι, ανάμεσα στις διπλοθλαστικές περιοχές και στις μη, δημιουργούνται διαφορές στην ένταση του φωτός που τις φωτίζει. Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται στο πολωτικό μικροσκόπιο.



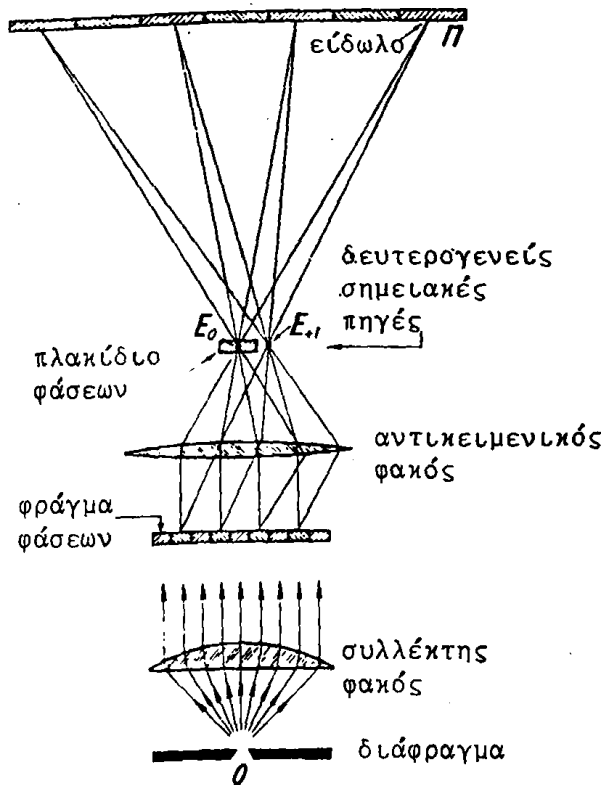
4.8.3. Μικροσκόπιο αντίθεσης φάσεων (phase-contrast microscope)

Στο μικροσκόπιο αυτό μεταξύ του συλλέκτη φακού και του αντικειμενικού παρεμβάλλεται ένα φράγμα φάσεων. Έτσι η παράλληλη φωτεινή δέσμη που προέρχεται από το συλλέκτη φακό προσπίπτει πάνω στο φράγμα και λόγω περίθλασης δίνει ακτίνες διαφόρων διευθύνσεων. Μερικές από τις ακτίνες αυτές (μηδενικής τάξης) δεν εκτρέπονται, ενώ άλλες εκτρέπονται κατά διάφορες γωνίες. Οι ακτίνες προσπίπτουν στον αντικειμενικό φακό. Μετά από τον αντικειμενικό φακό στην πορεία των ακτίνων μηδενικής τάξης παρεμβάλλεται γυάλινο πλακίδιο κατάλληλου πάχους (πλακίδιο φάσεων) που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του δρόμου των ακτίνων αυτών κατά $\lambda/4$ (σχήμα 17). Με τον τρόπο αυτό, όταν τα φωτεινά κύματα που εκπέμπονται φθάσουν στο πέτασμα πάνω στο οποίο παίρνουμε το είδωλο, λόγω συμβολής θα δίνουν το είδωλο αντικειμένου πλάτους και όχι το είδωλο αντικειμένου φάσεων, με αποτέλεσμα οι λεπτομέρειες του αντικειμένου να γίνονται ορατές.

4.8.4. Μικροσκόπιο υπερήχων

Με το μικροσκόπιο αυτό γίνεται σάρωση του εξεταζόμενου δείγματος με δέσμη υπερήχων. Με συχνότητα 10 GHz μπορούμε να έχουμε διακριτική ικανότητα περίπου 0,1 μm που είναι πολύ καλύτερη από εκείνη του οπτικού μικροσκοπίου.





Σχήμα 17: Διάταξη μετατροπής του ειδώλου αντικειμένου φάσεων σε είδωλο αντικειμένου πλάτους (Από Αλεξόπουλο, τόμος 5ος, 1966).

4.9. Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο

Το κυριότερο πλεονέκτημα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σε σχέση με το οπτικό μικροσκόπιο είναι η πολύ καλύτερη διακριτική ικανότητα. Μια από τις αιτίες που κάνει αυτό δυνατό, είναι το ότι το μήκος κύματος των ηλεκτρονίων είναι χιλιάδες φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του φωτός.

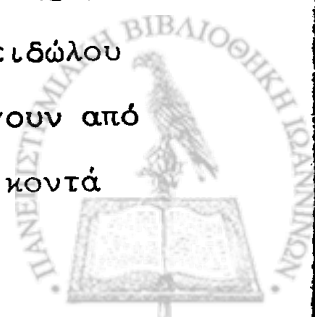
Έχει αναφερθεί σε άλλη ενότητα γιατί το μήκος κύματος επηρεάζει τη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου. Το ότι



τα ηλεκτρόνια φέρουν φορτίο, σημαίνει ότι στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρομαγνητικούς φακούς και να έχουμε ένα είδωλο σε οποιαδήποτε μεγέθυνση (μέσα σε μια μεγάλη περιοχή, π.χ. μέχρι X 100.000) χωρίς να αλλάξουμε φακούς. Επομένως, τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια προσφέρουν καλύτερη διακριτική ικανότητα, μεγαλύτερη μεγέθυνση, μεγαλύτερο βάθος πεδίου απ'ό,τι τα οπτικά μικροσκόπια. Οι βασικοί τύποι ηλεκτρονικών μικροσκοπίων είναι οι εξής:

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης (transmission electron microscope) στο οποίο τα ηλεκτρόνια παράγονται με θερμιονική εκπομπή και επιταχύνονται από δυναμικό που κυμαίνεται μεταξύ 20 KV και 200 KV ανάλογα με τη φύση και το πάχος του δείγματος. Τα ηλεκτρόνια που ανιχνεύονται για το σχηματισμό του ειδώλου είναι τα ηλεκτρόνια που κατορθώνουν να διαπεράσουν το δείγμα. Επομένως το είδωλο που παίρνουμε μας δίνει πληροφορίες για την εξωτερική και εσωτερική μορφολογία του δείγματος που εξετάζεται.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (scanning electron microscope), Με το μικροσκόπιο αυτό έχουμε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις από το μικροσκόπιο διέλευσης αλλά μειονεκτεί ως προς τη διακριτική ικανότητα. Με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης γίνεται βασικά διερεύνηση μόνο της επιφανειακής μορφολογίας του δείγματος γιατί για το σχηματισμό του ειδώλου ανιχνεύονται τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που για να βγουν από το δείγμα χωρίς να απορροφηθούν πρέπει να παραχθούν κοντά



στην επιφάνεια του δείγματος.

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης-διέλευσης που είναι ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης στο οποίο όμως τα ηλεκτρόνια που ανιχνεύονται για το σχηματισμό του ειδώλου είναι τα ηλεκτρόνια που κατορθώνουν να περάσουν το δείγμα και όχι τα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Έτσι το μικροσκόπιο αυτό, συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του μικροσκοπίου διέλευσης και σάρωσης.



5. ΑΛΛΑ ΟΠΤΙΚΑ ΚΛΙΝΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ

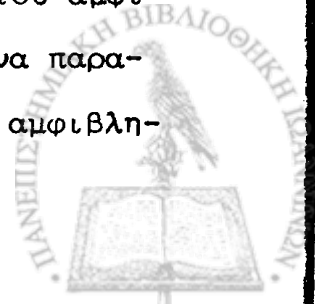
Το μικροσκόπιο είναι ίσως το πιο σπουδαίο οπτικό κλινικό όργανο γι' αυτό και έχει μελετηθεί λεπτομερώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο κεφάλαιο αυτό θα μελετηθούν άλλα οπτικά κλινικά όργανα.

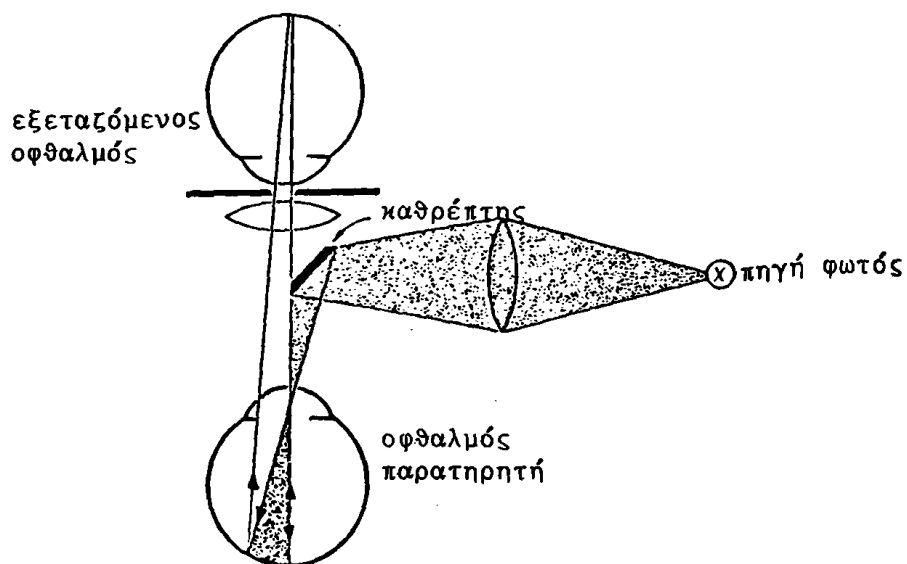
5.1. Όργανα που χρησιμοποιούνται στην Οφθαλμολογία

Υπάρχουν τρία βασικά όργανα που χρησιμοποιούνται για την εξέταση του οφθαλμού: το οφθαλμοσκόπιο με το οποίο μπορούμε να εξετάσουμε τον αμφιβληστροειδή χιτώνα, το σκιασκόπιο που μετράει την ισχύ του κρυσταλλοειδούς φακού και το κερατόμετρο με το οποίο μετράται η καμπυλότητα του κερατοειδούς χιτώνα. Ένα άλλο όργανο το τονόμετρο, μετράει την πίεση του οφθαλμού.

5.1.1. Οφθαλμοσκόπιο

Η αρχή λειτουργίας του οφθαλμοσκοπίου φαίνεται στο σχήμα 18. Η όλη συσκευή είναι έτσι κατασκευασμένη ώστε το φως που πέφτει στον εξεταζόμενο οφθαλμό να εστιάζεται από τον κρυσταλλοειδή φακό μπροστά από τον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Έτσι ο αμφιβληστροειδής φωτίζεται από μια μη εστιασμένη αποκλίνουσα δέσμη φωτός. Σ' ένα φυσιολογικό οφθαλμό που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας το φως που σκεδάζεται από ένα σημείο του αμφιβληστροειδούς είναι μια παράλληλη δέσμη που μπορεί να παρατηρηθεί. Με τον τρόπο αυτό ο παρατηρητής βλέπει τον αμφιβληστροειδή χιτώνα του εξεταζόμενου οφθαλμού.



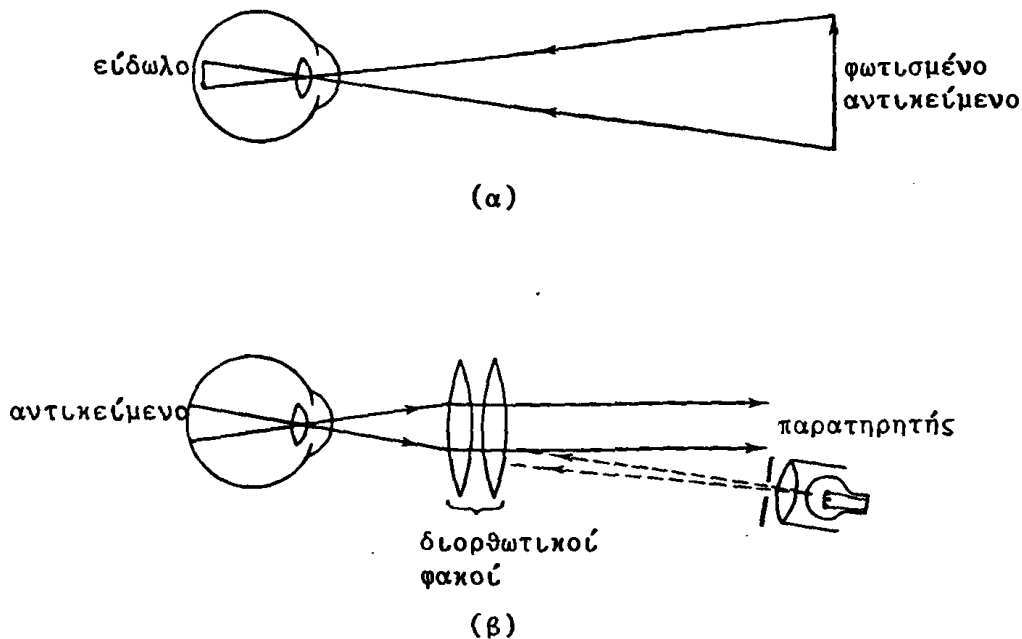


Σχήμα 18: Τρόπος λειτουργίας οφθαλμοσκοπίου (Από Cornsweet, 1970).

5.1.2. Σκιασκόπιο

Το σκιασκόπιο χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις ανωμαλιών του οφθαλμού για την παροχή διορθωτικών φακών. Μια δέσμη φωτός περνάει από το σκιασκόπιο, πέφτει στον εξεταζόμενο οφθαλμό και σχηματίζει είδωλο στον αμφιβληστροειδή που συμπεριφέρεται σαν αντικείμενο για τον παρατηρητή. Ο παρατηρητής τοποθετεί φακούς μπροστά από τον οφθαλμό που εξετάζεται έτσι ώστε το είδωλο του αμφιβληστροειδούς του να εστιάζεται στον οφθαλμό του παρατηρητή (σχήμα 19).

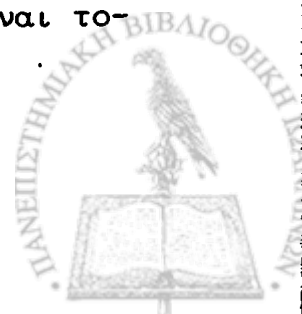


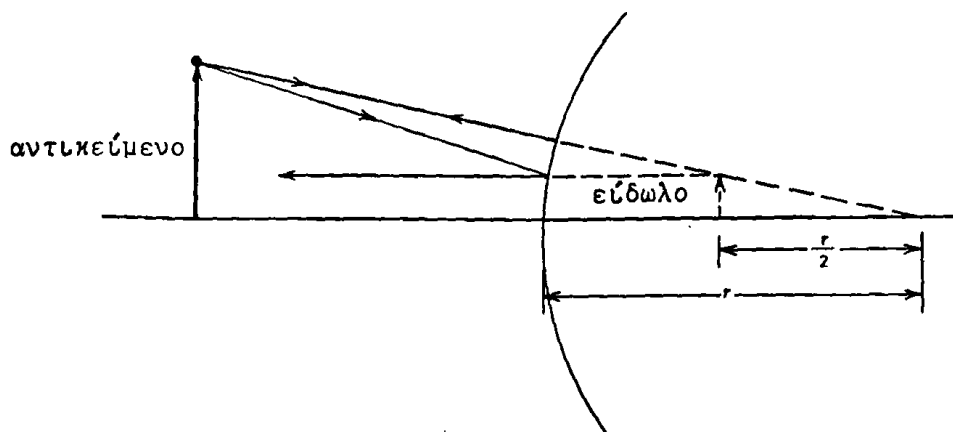


Σχήμα 19: (α) ο οφθαλμός κατά τη φυσιολογική όραση
(β) κατά τη διάρκεια σκιασκοπίας (Από Cameron και Skofronick, 1978).

5.1.3. Κερατόμετρο

Όπως έχει παραπάνω αναφερθεί με το κερατόμετρο μπορούμε να μετρήσουμε την καμπυλότητα του κερατοειδούς χιτώνα. Η μέτρηση αυτή είναι απαραίτητη για την παροχή φακών επαφής. Αν φωτίσουμε ένα αντικείμενο γνωστού μεγέθους τοποθετημένο σε γνωστή απόσταση από ένα κυρτό κάτοπτρο και μετρήσουμε το μέγεθος του ειδώλου, μπορούμε να προσδιορίσουμε την καμπυλότητα του κατόπτρου. Στην κερατομετρία ο κερατοειδής χιτώνας συμπεριφέρεται σαν ένα κυρτό κάτοπτρο. Το κερατόμετρο ρυθμίζεται έτσι ώστε το είδωλο να σχηματίζεται σε απόσταση $r/2$ πίσω από τον κερατοειδή χιτώνα (σχήμα 20) και να είναι τοποθετημένο στο εστιακό επίπεδο.





Σχήμα 20: Στην κερατομετρία το είδωλο σχηματίζεται σε απόσταση $r/2$ πίσω από τον κερατοειδή χιτώνα. r , είναι η ακτίνα καμπυλότητας του κερατοειδούς (Από Cameron και Skofronick, 1978).

5.1.4. Τονόμετρο

Πριν από το 1900 ήταν γνωστό ότι η υψηλή πίεση του οφθαλμού έχει σαν συνέπεια το γλαύκωμα. Η ασθένεια αυτή περιορίζει την όραση και οδηγεί στην τύφλωση αν δεν θεραπευτεί. Η πίεση του οφθαλμού καθορίζεται από τους ρυθμούς παραγωγής και εκροής του υδατοειδούς υγρού (συνήθως είναι 5 ml την ημέρα). Τα υγρά στο βολβό του οφθαλμού σε φυσιολογική κατάσταση βρίσκονται σε πίεση 20-25 mmHg ενώ στην κατάσταση του γλαυκώματος η πίεση μπορεί να αυξηθεί μέχρι 85 mmHg. Περίπου το 1900, ο Γερμανός Schiøtz ανακάλυψε το τονόμετρο που μετρά-



ει την πίεση του οφθαλμού προσδιορίζοντας την κάμψη του κερατοειδούς σε δεδομένη δύναμη. Ο τύπος αυτός του τονόμετρου τροποποιήθηκε το 1950. Ένα πλεονέκτημα του νέου μοντέλου είναι ότι μπορούμε να έχουμε την αλλαγή της πίεσης σε σχέση με το χρόνο. Το τονόμετρο Goldmann που ανακαλύφθηκε το 1955 μετράει την οφθαλμική πίεση με μεγαλύτερη ακρίβεια.

5.2. Χρήση των υπερήχων στην Οφθαλμολογία

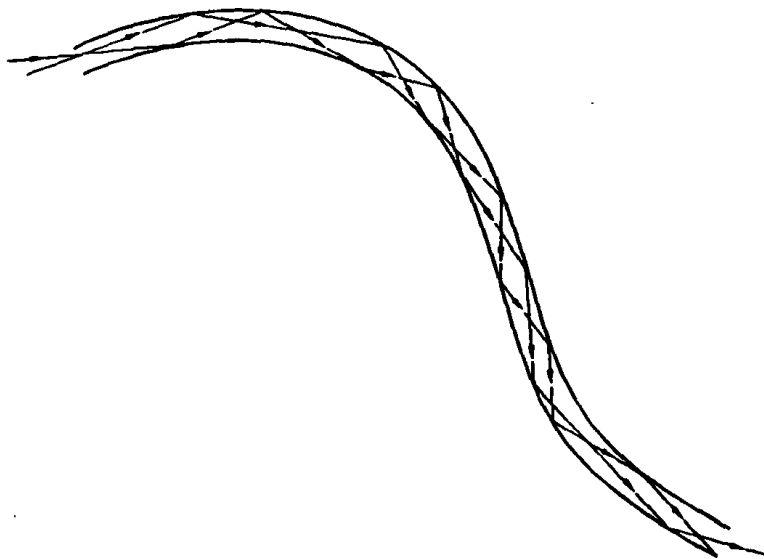
Με τη χρήση των υπερήχων μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για τις εσωτερικές περιοχές του οφθαλμού. Οι υπέρηχοι είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι στην περίπτωση που ο κερατοειδής χιτώνας ή ο κρυσταλλοειδής φακός είναι θολοί. Όγκοι και απόκλιση του αμφιβληστροειδούς είναι επίσης μερικά από τα προβλήματα που μπορούν να αντιμετωπιστούν με υπερήχους. Χωρίς υπερήχους μπορούμε να δούμε το εσωτερικό του οφθαλμού μέχρι το οπτικό νεύρο, αλλά μετρήσεις γίνονται μόνο για εξωτερικά μέρη του οφθαλμού. Με υπερήχους όμως είναι δυνατό να μετρηθούν εσωτερικά μέρη του οφθαλμού. Για παράδειγμα, μπορεί να μετρηθεί το πάχος του κρυσταλλοειδούς φακού, η απόσταση μεταξύ του κερατοειδούς χιτώνα και του κρυσταλλοειδούς φακού, το πάχος του αμφιβληστροειδούς και του υαλώδους σώματος. Αυτές οι πληροφορίες συνδυάζονται με άλλες, όπως είναι η καμπυλότητα του κερατοειδούς, με αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των δεικτών διάθλασης του οπτικού συστήματος.

5.3. Οπτική ίνα

Αρκετές ενδιαφέρουσες ιατρικές εφαρμογές βασίζονται στο



φαινόμενο της ανάκλασης του φωτός. Μέρος δέσμης φωτός που εισέρχεται σε μια συμπαγή γυάλινη ράβδο, θα προσπέσει στην εσωτερική επιφάνεια της ράβδου κατά τέτοια γωνία ώστε να υποστεί ολική ανάκλαση. Έτσι, οι φωτεινές αυτές ακτίνες ανακλώμενες στα πλευρικά τοιχώματα της ράβδου θα φθάσουν μέχρι το τέλος της. Ακόμη κι όταν η ράβδος είναι κεκαμμένη το φως μπορεί να διαδοθεί διαμέσου της ράβδου (σχήμα 21).



Σχήμα 21: Η διάδοση του φωτός διαμέσου μιας γυάλινης ράβδου λόγω ανάκλασης του φωτός. (Από MacDonald και Burns, 1975).

Μια συμπαγής ράβδος είναι πολύ εύκολο να σπάσει αν προσπαθήσουμε να την κάμψουμε. Αυτό μπορούμε να το αποφύγουμε με τη χρησιμοποίηση μιας δέσμης γυάλινων (ή και πλαστικών) ινών αντί για συμπαγή ράβδο. Οι ίνες είναι φτιασμένες από γυαλί πάχους 2 μm με μεγάλο δείκτη διάθλασης και επικαλύπτονται από λεπτό στρώμα γυαλιού μικρού δείκτη διάθλασης που προστατεύεται από ένα εξωτερικό στρώμα γυαλιού.



5.3.1. Ενδοσκοπία - Ψυχρός φωτισμός

Ένας αριθμός οργάνων που βασίζονται στην τεχνική της οπτικής ίνας, ονομάζονται ενδοσκοπία και χρησιμοποιούνται για την εξέταση εσωτερικών περιοχών του σώματος. Έτσι, τα κυστεοσκόπια χρησιμοποιούνται για την εξέταση της κύστης, τα βρογχοσκόπια για την εξέταση των πνευμόνων.

Επειδή κατά την απορρόφηση του φωτός το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του μετατρέπεται σε θερμότητα, μόνο ένα περιορισμένο ποσό φωτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ενδοσκοπία. Για το λόγο αυτό, στην ενδοσκοπία, το ποσό της παραγόμενης θερμότητας ελαττώνεται με την απορρόφηση της υπερύθρου ακτινοβολίας που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή από ειδικά φίλτρα. Αυτό το είδος της ενδοσκοπίας που ονομάζεται ψυχρός φωτισμός περιέχει πολύ μικρό ποσό υπερύθρου ακτινοβολίας με αποτέλεσμα η θερμική ενέργεια που παράγεται να περιορίζεται στο ελάχιστο.

Με τη χρήση των ενδοσκοπίων είναι ακόμη δυνατό να γίνουν ορατές διάφορες απρόσιτες περιοχές του στόματος. Επίσης, μπορεί να γίνει προσδιορισμός του κορεσμού του αίματος με οξυγόνο. Οι διάφορες τεχνικές για τον προσδιορισμό αυτό, βασίζονται στη διαφορετική απορρόφηση του κόκκινου φωτός ($\lambda=640 \text{ nm}$) από την οξυαιμοσφαιρίνη και από την αιμοσφαιρίνη στην οποία έχει αφαιρεθεί το οξυγόνο, καθώς και στο ότι απορροφούν όμοια την υπέρυθρο ακτινοβολία ($\lambda=800 \text{ nm}$).



5.4. Διαφανοσκόπηση

Διαφανοσκόπηση είναι η μετάδοση του φωτός διαμέσου των ιστών του σώματος. Βασικά, μόνο το κόκκινο φως μεταδίδεται γιατί τα άλλα χρώματα απορροφούνται από τα ερυθρά αιμοσφαίρια του αίματος. Η διαφανοσκόπηση χρησιμοποιείται για τη διάγνωση της υδροκεφαλίας στα βρέφη. Επειδή η ασβεστοποίηση του κρανίου των βρεφών δεν είναι πλήρης, το φως μπορεί να διεισδύσει στο εσωτερικό του κρανίου. Αν υπάρχει υπέρμετρος ποσότητα εγκεφαλονωτιαίου υγρού το φως σκεδάζεται από διαφορετικά μέρη του κρανίου και έτσι παίρνουμε μια εικόνα χαρακτηριστική της υδροκεφαλίας.

Το διαφανοσκόπιο ανακαλύφθηκε στο Πανεπιστήμιο Wisconsin από τους J.R.Cameron, C.Vought και R.Chun και ονομάζεται "Chun Gun " προς τιμή του Dr. Chun.

Η διαφανοσκόπηση χρησιμοποιείται επίσης για τη διάγνωση του πνευμοθώρακα στα βρέφη. Το φως διεισδύει το λεπτό μπροστινό μέρος του θώρακα και φωτίζει τον πνεύμονα. Με την τεχνική αυτή έχουν ακόμη μελετηθεί τα ούλα και το στήθος.

Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι τό ορατό φως παίζει σπουδαίο ρόλο από θεραπευτικής πλευράς. Αυτό οφείλεται στο ότι το φως είναι μια μορφή ενέργειας που απορροφάται εκλεκτικά από διάφορα μόρια. Πολλά πρόωρα βρέφη που έχουν ίκτερο θεραπεύονται αν εκτεθούν στο φως (φωτοθεραπεία). Ο ακριβής μηχανισμός δεν είναι γνωστός αλλά φαίνεται ότι το μπλε φως ($\lambda \approx 450 \text{ nm}$) παίζει τον πιο σπουδαίο ρόλο.



6. LASER - ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ

6.1. Laser

Μια κοινή φωτεινή πηγή εκπέμπει φως επειδή ένας μεγάλος αριθμός διεγερμένων ατόμων ($\sim 10^{10}$) επανέρχονται αυθόρμητα στην θεμελιώδη τους κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή κάθε άτομο αποδιεγείρεται, εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανεξάρτητα από τα άλλα άτομα. Το φως από μια κοινή φωτεινή πηγή λέμε ότι είναι "ασύμφωνο" στο χρόνο και στο χώρο.

Με τον όρο χρονικά ασύμφωνο εννοούμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από τα διεγερμένα άτομα παρουσιάζουν μεταξύ τους διαφορά φάσης. Με άλλα λόγια η φάση του συνισταμένου κύματος αλλάζει απότομα και ασυνεχώς και δεν συμπεριφέρεται σαν συνεχές κύμα.

"Ασύμφωνο" στο χώρο, σημαίνει ότι κύματα που κινούνται προς διαφορετικές διευθύνσεις μπορεί να έχουν παραχθεί από διαφορετικές ομάδες ατόμων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν διαφορές φάσης.

Τέλος, σε μια κοινή φωτεινή πηγή επειδή τα διεγερμένα άτομα επανέρχονται στη θεμελιώδη τους κατάσταση τυχαία και ασύγχρονα, η ενέργεια που παρέχεται από την πηγή δεν εκπέμπεται ακαριαία, αλλά μέσα σ'ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ισχύς που εκπέμπεται να είναι μικρή.

Εκτός από την αυθόρμητη εκπομπή, ένα διεγερμένο άτομο μπορεί



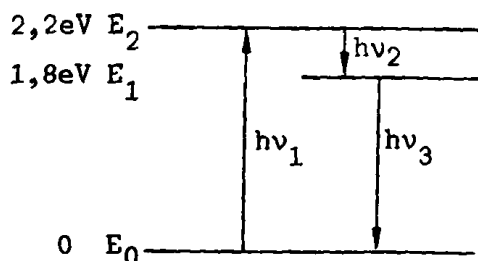
να αναγκαστεί να αποδιεγερθεί (εκπέμποντας φωτόνιο, π.χ. $h\nu_1 = E_2 - E_1$) από την παρουσία ενός φωτονίου ($h\nu$). Για να συμβεί αυτό πρέπει η ενέργεια ($h\nu$) του φωτονίου που προκαλεί την αποδιέγερση, να είναι ίση με τη διαφορά ενέργειας μεταξύ της διεγερμένης και της σταθερής κατάστασης ($E_2 - E_1$) του διεγερμένου ατόμου. Το φαινόμενο αυτό που λέγεται εξηναγκασμένη εκπομπή, εκμεταλλευόμαστε στις ακτίνες LASER. Ο όρος αυτός προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων: Light Amplification (by) Stimulated Emission (of) Radiation που σημαίνει ενισχυτής φωτός με εξηναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας.

Σε ένα υλικό, σε κανονικές συνθήκες, τα περισσότερα άτομα είναι αποδιεγερμένα έχοντας τα ηλεκτρόνιά τους στις χαμηλότερες δυνατές στάθμες ενέργειας και πολύ λίγα άτομα βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή, όταν μέσα από το υλικό περάσει δέσμη φωτός, περισσότερα φωτόνια της δέσμης απορροφούνται για τη διέγερση ατόμων του υλικού και λιγότερα φωτόνια συμβάλλουν στο φαινόμενο της εξηναγκασμένης εκπομπής. Για να γίνει μακροσκοπικά φανερό το φαινόμενο της εξηναγκασμένης εκπομπής πρέπει να πετύχουμε μέσα στο υλικό "αναστροφή πληθυσμού", δηλαδή τα διεγερμένα άτομα στην κατάλληλη στάθμη ενέργειας να είναι περισσότερα από τα μη διεγερμένα άτομα.

Στο LASER ρουβινίου, η "αναστροφή πληθυσμού" γίνεται με οπτική άντληση. Στην περίπτωση αυτή παλμικός φωτισμός ($\lambda \sim 550 \text{ nm}$) φωτίζει ένα ραβδίο κρυσταλλικού ρουβινίου (Al_2O_3) που φέρει



προσμίξεις Cr_2O_3 , με αποτέλεσμα τη διέγερση ατόμων στη στάθμη $E_2 = 2,2 \text{ eV}$. (σχήμα 22).



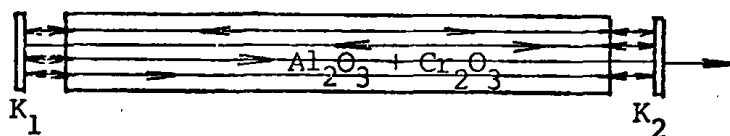
Σχήμα 22.

Σε μικρό χρονικό διάστημα ($\sim 0.1 \text{ ms}$) μετά τη διέγερση τα περισσότερα από τα διεγερμένα ηλεκτρόνια εγκαταλείπουν αυτόματα τη στάθμη E_2 , αλλά για να επανέλθουν στην αρχική θεμελιώδη κατάσταση E_0 και άλλα για να μεταπέσουν στη στάθμη E_1 που είναι μετασταθής. Στη μετασταθή στάθμη E_1 , τα ηλεκτρόνια παραμένουν για ένα χρονικό διάστημα μερικών ms πριν πέσουν στη σταθερή κατάσταση E_0 . Αν η οπτική άντληση (παλμοί φωτισμού) είναι πολύ γρήγορη μπορεί να γίνει "αναστροφή πληθυσμού" και τα περισσότερα άτομα να έχουν ηλεκτρόνια στη στάθμη E_1 παρά στη στάθμη E_0 .

Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα φωτόνιο ($E_1 - E_0 = h\nu_3$) με μήκος κύματος 694 nm μπορεί να συμβάλει σε εξηναγκασμένη εκπομπή φωτονίων από άλλα άτομα τα οποία με τη σειρά τους να συμβάλουν σε εξηναγκασμένη εκπομπή κ.ο.κ. ώστε πολύ γρήγορα ο



ολικός αριθμός φωτονίων ($h\nu_3$) να αυξηθεί σημαντικά. Για να εξασφαλίσουμε ότι η ενίσχυση του φωτός θα συνεχιστεί, οι βάσεις του ρουβινίου επαργυρώνονται, έτσι ώστε η μία βάση (K_1) να λειτουργεί σαν κάτοπτρο, ενώ η άλλη (K_2) σαν ημιπερατό κάτοπτρο για να αφήνει μέρος από το ενισχυμένο φως να περνά έξω από τον κρύσταλλο του ρουβινίου (σχήμα 23).



Σχήμα 23: Αρχή Laser ρουβινίου (Από MacDonald και Burns, 1975).

Ένα φωτόνιο πριν εγκαταλείψει τον κρύσταλλο κάνει πολλές διαδρομές μεταξύ των δύο κατόπτρων, συμβάλλοντας σε εξηναγασμένη εκπομπή πολλών ατόμων. Έτσι, το φως που εξέρχεται από τον κρύσταλλο είναι αισθητά ενισχυμένο, μονοχρωματικό και "σύμφωνο", ακόμη, η δέσμη που εξέρχεται είναι παράλληλη γιατί όταν η τροχιά ενός φωτονίου μέσα στον κρύσταλλο σχηματίζει έστω και μικρή γωνία με τον κεντρικό άξονα του ραβδίου, το φωτόνιο αυτό μέσα από τις πολλές ανακλάσεις θα χτυπήσει και θα απορροφηθεί στα πλευρικά τοιχώματα του ραβδίου.

Σε παλμικά συστήματα Laser, όπως του ρουβινίου, η ισχύς (κορυφή παλμού ισχύος) μπορεί να φθάσει τα 5000 MW. Σε συστή-



ματα συνεχούς εκπομπής ακτίνων Laser, όπως τα Laser He - Ne, η ισχύς είναι της τάξης του 1 KW. Όμως στα συστήματα Laser ημιαγωγών (p-n) που παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα, η ισχύς είναι σχετικά μικρή (~1W).

Με τη βοήθεια φακών, μια παράλληλη δέσμη ακτίνων Laser μπορεί να εστιαστεί σε ένα σχεδόν μαθηματικό σημείο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η πυκνότητα ενέργειας να είναι τεράστια στο σημείο εστίασης και επιτρέπει την εξάχνωση μιας πολύ μικρής περιοχής υλικού χωρίς επίδραση στα γειτονικά σημεία. Στη δυνατότητα αυτή των Laser στηρίζονται οι περισσότερες από τις ιατρικές εφαρμογές τους.

6.2. Εφαρμογές των Laser στις Βιοϊατρικές επιστήμες

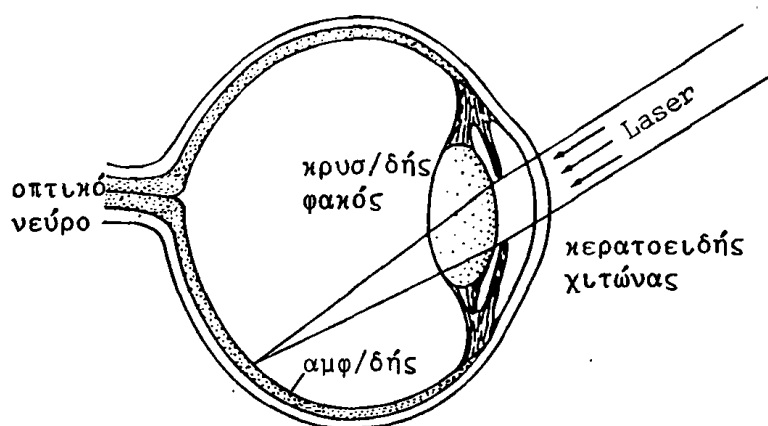
Μια από τις εφαρμογές των Laser είναι η καταστροφή ενός συγκεκριμένου κυτταρικού στοιχείου χωρίς να προξενηθεί βλάβη στον υπόλοιπο οργανισμό. Αυτό επιτρέπει τη μελέτη του ρόλου και της λειτουργίας των διαφόρων στοιχείων του κυττάρου ή των διαφόρων τμημάτων του γενετικού υλικού.

Η δυνατότητα εξάχνωσης ενός πολύ μικρού τμήματος ύλης επιτρέπει, με τη βοήθεια ηλεκτρικού τόξου που σχηματίζεται μεταξύ δύο μικρών ηλεκτροδίων, μικροφασματοσκοπική ανάλυση των αερίων εξάχνωσης. Με την τεχνική αυτή για πρώτη φορά μπορεί να γίνει φασματοσκοπική ανάλυση σε ζώντα οργανισμό, αρκεί να εξαχνωθεί μάζα της τάξης των 10^{-7} g. Η τεχνική αυτή έχει χρησιμοποιηθεί πολύ για τη μελέτη των χημικών στοιχείων στα δόντια.



Επίσης Laser χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση της τερηδόνας από τα δόντια.

Σήμερα η σπουδαιότερη χρήση των Laser στην Ιατρική είναι στις εγχειρήσεις του οφθαλμού, κυρίως για τη συγκόλληση του αμφιβληστροειδούς. Στην περίπτωση αυτή παλμός φωτός Laser διάρκειας 1 ms εστιάζεται στον αμφιβληστροειδή στο σημείο που θέλουμε να συγκολληθεί ο αμφιβληστροειδής με τον χοριοειδή χιτώνα (σχήμα 24). Στην επέμβαση αυτή δεν χρειάζεται ακινητοποίηση του οφθαλμού γιατί η διάρκεια του παλμού είναι τόσο μικρή (1 ms) που ο ασθενής δεν προλαβαίνει να κινήσει τον οφθαλμό του. Επειδή ο ασθενής δεν αισθάνεται καθόλου πόνο δεν χρειάζεται ούτε τοπική αναισθησία. Η απλότητα της μεθόδου επιτρέπει την εφαρμογή της ακόμη και σε εξωτερικά ιατρεία.



Σχήμα 24: Συγκόλληση του αμφιβληστροειδούς με Laser (Από Cameron και Skofronick, 1978).

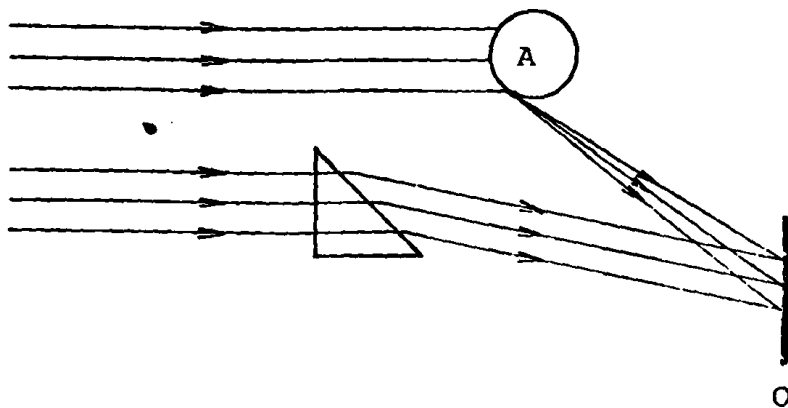


Καλά εστιασμένη δέσμη ακτίνων Laser μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν χειρουργικό νυστέρι, με βασικό πλεονέκτημα τη μικρή αιμορραγία σε όργανα όπως το ήπαρ με μεγάλη αγγειοβρήθεια.

Λόγω της βλάβης που μπορούν να προκαλέσουν οι ακτίνες Laser σε ευαίσθητα όργανα του σώματος (π.χ. οφθαλμοί) πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προφύλαξης όπου χρησιμοποιούνται ακτίνες Laser όπως ειδικά γυαλιά, περιορισμός της πιθανότητας ανάκλασης των ακτίνων σε τοίχους ή σε γυαλιστερά αντικείμενα.

6.3. Ολογραφία

Ολογραφία είναι η τεχνική για τρισδιάστατη απεικόνιση ενός ειδώλου με τη βοήθεια συμφώνου φωτός, όπως ο φωτισμός με Laser. Ολογράφημα (O) μπορούμε να πάρουμε όταν μια δέσμη συμφώνου φωτός που φέρει την πληροφορία, δηλαδή δέσμη που διέρχεται μέσα από διαφανές αντικείμενο ή δέσμη που ανακλάται από διαφανές αντικείμενο A, συμβάλλει με μια δέσμη αναφοράς (σχήμα 25).



Σχήμα 25: Αρχή τεχνικής ολογραφίας.



Το ολογράφημα (O) που παίρνουμε σε μια φωτογραφική πλάκα αποτελείται από ένα πολύπλοκο σύστημα κροσσών συμβολής.

Όταν όμως το εμφανισμένο φιλμ φωτιστεί με την αρχική δέσμη τότε αυτή σκεδάζεται από το ολογράφημα και αναπαράγει τρισδιάστατο είδωλο του αρχικού αντικειμένου (A).

Τα τελευταία χρόνια γίνεται έρευνα για ιατρικές εφαρμογές της ολογραφίας π.χ. τρισδιάστατη απεικόνιση ακτινογραφιών, τρισδιάστατα υπερηχογραφήματα, συνδυασμός ολογραφίας με μικροσκοπία κ.λπ.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1.- Αλεξόπουλος,Κ.Δ.(1966). Οπτική. Τόμος 5ος .
- 2.- Cameron,J.R. and Skofronick,J.G.(1978). Medical Physics.
John Wiley and Sons,Inc.
- 3.- Cornsweet,T.N.(1970). Visual Perception. Academic Press,New York.
- 4.- Goodhew,P.J.(1975). Electron microscopy and analysis. Wykeham
Publications (London) Ltd.
- 5.- Gregory,R.L.(1966). Eye and Brain: The Psychology of seeing.
McGraw-Hill,Inc.,New York.
- 6.- MacDonald,S.G.G. and Burns,D.M.(1975). Physics for the life
and health sciences. Addison-Wesley Publishing Co.
- 7.- Meek,G.A.(1976). Practical electron microscopy for biologists.
John Wiley and Sons,Ltd.,2nd edition.
- 8.- Pirenne,M.H.(1967). Vision and the eye. Chapman-Hall,London,
2nd edition.
- 9.- Weakley,B.S.(1972). A beginner's handbook in biological electron
microscopy. Longman Group Ltd.,G.Britain.
- 10.- Wells,P.N.T.(1977). Ultrasonics in medicine and biology.
Physics in Medicine and biology,Vol.22,p.629-669.

