



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΩΝ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΑΙΓΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# Η ΟΠΤΙΚΗ ΣΤΗΝ ΔΙΑΓΝΩΣΤΙΚΗ ΙΑΤΡΙΚΗ

---

Ευαγγελία Τρίκα

Επιβλέπων: Δρ. Κατελούζος Αναστάσιος

ΑΙΓΙΟ  
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2012

Στους γονείς μου και την αδερφή μου

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η συμβολή της επιστήμης της οπτικής, μέσα από τις εφαρμογές της, στην διαγνωστική ιατρική. Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στην βασική θεωρία σχετικά με την φύση του φωτός και πώς μέσα από αυτήν δημιουργείται ο διαχωρισμός της επιστήμης της οπτικής στους κλάδους της Γεωμετρικής οπτικής, Κυματικής οπτικής και Κβαντικής οπτικής.

Αναλύεται εκτενέστερα η γεωμετρική οπτική και τα φαινόμενα της, όπως η ανάκλαση και την διάθλαση αλλά και η συμπεριφορά των φαινομένων αυτών σε κάτοπτρα και φακούς με σκοπό την εύρεση ειδώλου, με αποκορύφωμα την εφαρμογή των φαινομένων στον ανθρώπινο οφθαλμό.

Στην συνέχεια αναπτύσσουμε βασικές εφαρμογές τις οπτικής σε διατάξεις που χρησιμοποιούνται στην διαγνωστική ιατρική και όχι μόνο. Συγκεκριμένα αναφέρονται όλοι οι τύποι μικροσκοπίας ακολουθούμενοι από τις αρχές λειτουργίας τους αλλά και από σχηματικές αναπαραστάσεις της πορεία του φωτός στην τομή του οργάνου με σκοπό την κατανόηση του σχηματισμού ειδώλου σε αυτό. Ακολουθεί η αρχή λειτουργίας του αξονικού τομογράφου μιας διάταξης που αποτελεί πολύ σημαντικό εργαλείο πρόληψης αλλά και αντιμετώπισης παθήσεων στα χέρια των γιατρών, όπου μια μετεξέλιξη της φτάνει μέχρι την τομογραφία του κερατοειδούς η όποια αναφέρεται επίσης. Στην συνέχεια προσεγγίζουμε την εφαρμογή της οπτική στις οπτικές ίνες, με αναφορά στην αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών και την εφαρμογή τους στις τεχνικές της ενδοσκοπής στην διαγνωστική ιατρική οι οποίες αποτελούν τεχνικές πολύ μικρής παρέμβασης του ιατρού, με κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή ακρίβεια χάρις το ενδοσκόπιο.

Τέλος αφιερώνουμε το τελευταίο κεφάλαιο στις αρνητικές επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στον άνθρωπο, αναφερόμενοι αρχικά στους μηχανισμούς και τον βαθμό της βλάβης που προκαλούν στους βιολογικούς ιστούς. Στη συνέχεια εξετάζουμε τις αρνητικές συνέπειες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διαχωρίζοντάς την και ως προς την συχνότητα αλλά και ως προς το μήκος κύματός της.

# Περιεχόμενα

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ .....	7
Εισαγωγή .....	8
1.1 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell .....	9
1.2 Ταχύτητα του φωτός.....	10
1.3 Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη .....	11
1.4 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	12
1.4.1 Ακτίνες $\gamma$ .....	13
1.4.2 Ακτίνες X.....	13
1.4.3 Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation) .....	13
1.4.4 Υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation) .....	14
1.4.5 Ραδιοκύματα (radiowaves) και Μικροκύματα (microwaves).....	14
1.5 Γεωμετρική οπτική.....	15
1.5.1 Ανάκλαση .....	16
1.5.2 Διάθλαση .....	17
1.5.3 Ανάκλαση αποκλίνουσας δέσμης σχηματισμός ειδώλου .....	18
1.5.4 Ανάκλαση σε σφαιρική επιφάνεια – κάτοπτρο .....	19
1.5.5 Ανάκλαση παραλλήλου δέσμης .....	20
1.5.6 Ανάκλαση αποκλίνουσας δέσμης.....	21
1.5.7 Γραφική εύρεση ειδώλου.....	24
1.6 ΦΑΚΟΙ .....	25
1.6.1 Κύρια χαρακτηριστικά των φακών.....	26
1.6.2 Σχηματισμός πραγματικού ειδώλου .....	27
1.6.3 Σχηματισμός φανταστικού ειδώλου .....	28
1.6.4 Εφαρμογή φακών η λειτουργία του οφθαλμού .....	29
ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ.....	32
2.1 Μικροσκόπιο.....	33
2.2 Σύνθετο μικροσκόπιο .....	34
2.2.1 Γενικές αρχές .....	34
2.2.2 Μέρη σύνθετου μικροσκοπίου.....	36
2.3 Μικροσκόπιο σκοτεινού πεδίου (dark field).....	37
2.4 Μικροσκόπιο αντίθεσης φάσης (phase contrast). .....	38
2.5 Πολωτικό μικροσκόπιο (polarised).....	39
2.6 Μικροσκόπιο αντίθεσης διαφορικής συμβολής (differential interference contrast, Nomarski). .....	39

2.7 Μικροσκόπιο φθορισμού (fluorescent).....	40
2.8 Συνεστιακό μικροσκόπιο σάρωσης με ακτίνες Laser. (Confocal Laser Scanning Microscope). .....	42
2.9 Ανεστραμμένα μικροσκόπια (inverted). .....	44
2.10 Στερεοσκόπιο (οπτικό). .....	44
2.11 Οπτικές αρχές λειτουργίας του ομοεστιακού μικροσκοπίου .....	45
2.12 Ομοεστιακό μικροσκόπιο σάρωσης με Laser (Laser Scanning Confocal Ophthalmoscopy, CSLO) .....	46
2.13 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ .....	47
2.13.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) .....	47
2.13.2 Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (ΗΜΔ, TEM, Transmission Electron Microscope). .....	48
2.14 Αντικειμενικοί φακοί μικροσκοπίων.....	50
ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ .....	52
3.1 Παραγωγή ακτίνων Χ .....	53
3.2 Κλασική Ακτινολογία.....	55
3.3 Η ιστορική αναδρομή της αξονικής τομογραφίας .....	57
3.4 Βασικές αρχές λειτουργίας αξονικού τομογράφου .....	58
3.5 Οπτική τομογραφία συνοχής .....	61
3.6 Διαθλασιμετρία .....	63
3.6.1 Σκιασκοπία .....	63
3.6.2 Αυτόματα διαθλασίμετρα.....	64
3.6.3 Τύποι αυτόματων διαθλασίμετρων.....	65
3.7 Κερατομετρία.....	67
3.7.1 Τοπογραφία κερατοειδούς .....	68
3.7.2 Αρχή λειτουργίας τοπογραφίας κερατοειδούς .....	68
ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ.....	72
4.1 Εισαγωγή .....	73
4.2 Αρχή λειτουργίας.....	73
4.3 Τύποι οπτικών ινών.....	74
4.3.1 Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics). .....	74
4.3.2 Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics) .....	74
4.4 Ενδοσκόπιο.....	75
ΟΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ.....	79
Εισαγωγή .....	80
5.1 Ρυθμός απορροφησης της ενέργειας – sar.....	80

5.2 Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με Βιολογικούς ιστούς .....	80
5.3 Υψηλές συχνότητες .....	81
5.3.1 Υπεριώδης Ακτινοβολία (UV) .....	81
5.3.2.Βιολογικές επιπτώσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας .....	82
5.3.3 Οφθαλμικές βλάβες.....	82
5.3.4 Καταστολή Ανοσοποιητικού Συστήματος .....	82
5.3.5 Δερματοπάθειες .....	82
5.3.6 Ακτίνες Χ.....	84
5.3.7 Ακτίνες Γάμμα – Ραδιενέργεια .....	84
5.4 Χαμηλές συχνότητες.....	86
5.5 Τα τμήματα του μη ιονίζοντος ηλεκτρομαγνητικού φασματος σε σχέση με τις βιολογικές τους επιδράσεις.....	87
5.5.1 Μη ιονίζουσα ακτινοβολία με μικρό μήκος κύματος .....	87
5.5.2 Άλλες μη-θερμικές επιδράσεις της ακτινοβολίας.....	88
5.6 Μη ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μεγάλο μήκος κύματος .....	90
5.7 Συμπεράσμα .....	91
Βιβλιογραφία.....	92

1

# **ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ**

## Εισαγωγή

Η οπτική εκφράζει το μέρος εκείνο της φυσικής το οποίο πραγματεύεται τα φαινόμενα που σχετίζονται με την συμπεριφορά του φωτός καθώς και άλλων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ως φώς ονομάζουμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανιχνεύεται από το ανθρώπινο οφθαλμό και που εκλαμβάνεται ως αίσθηση αυτής. Συνεπώς, είναι το αίτιο της όρασης. Όμως η αντίληψη αυτή του "ορατού" φωτός αποτελεί τμήμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το οποίο καλύπτει ένα εύρος μηκών κύματος που «μεταφράζονται», από το μάτι, στα χρώματα του φωτεινού φάσματος

Από τους αρχαιότερους χρόνους οι φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν την «φύση» του φωτός και τις ιδιότητές του ώστε να το ορίσουν εννοιολογικά. Οι αρχαίοι Έλληνες πρώτοι είχαν αντιληφθεί και διατύπωση αυτό που σήμερα ονομάζεται «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή, ότι το φώς αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια τα οποία εκπέμπει η φωτοβόλουσα πηγή και τα οποία καθώς προσπίπτουν στον οφθαλμό του παρατηρητή διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης. Πρώτος ο Ευκλείδης το 300 π.Χ στο βιβλίου του «Οπτικά» έκανε μία μαθηματική προσέγγιση στη μελέτη του φωτός περιγράφοντας το νόμο της διάθλασης και υποστήριξε ότι το φως ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή. Στην συνέχεια ακολούθησαν ο Ήρωνας το 60 μΧ και ο Πτολεμαίος το 140μ.Χ με τον πρώτο να περιγραφεί πώς όταν το φώς ανακλάται σε έναν καθρέφτη τότε αυτό ταξιδεύει κατά μήκος της τροχιάς με το μικρότερο μήκος ενώ ο δεύτερος κατέγραψε την ακριβή θέση των άστρων και ανακάλυψε ότι το φως διαθλάται από την ατμόσφαιρα της γης. Το 1665 άρχισαν να ανακαλύπτονται οι πρώτες ενδείξεις των κυματικών ιδιοτήτων του φωτός. Το 1690 ο Huygens ασχολήθηκε με το φαινόμενα της περίθλασης και της συμβολής του φωτός και μέσω πειραματικών διαδικασιών κατάφερε να δείξει την κυματική φύση του φωτός και πιο συγκεκριμένα να αποδείξει πως είναι εγκάρσιο κύμα. Ως της αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα οι πειραματικές αποδείξεις της κυματικής φύσης του φωτός είχαν ήδη καταστεί ιδιαίτερα πειστικές. Στον αντίποδα της κυματικής θεωρίας ο Νεύτων (Newton) το 1697 χρησιμοποίησε την θεωρία της σωματιδιακής φύσης του φωτός για να ερμηνεύσει τα φαινόμενα της ανάκλασης και της διάθλασης. Το 1865 ο Maxwell ανέπτυξε την θεωρία του, ορόσημο, για την φυσική στην οποία αποδείκνυε την ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και υπολόγισε την ταχύτητα διάδοσης τους, θέτοντας στην κινηματική θεωρία στέρεα θεμέλια προ τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα. [1]

Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, αρκετά φαινόμενα που σχετίζονται με την εκπομπή και απορρόφηση του φωτός φέρνουν και πάλι στο προσκήνιο την σωματιδιακή φύση του φωτός στην οποία υποστηρίχτηκε ότι, η ενέργεια που μεταφέρεται από τα φωτεινά κύματα είναι «συσκευασμένη» σε διακριτές δεσμίδες ή πακέτα που ονομάζονται φωτόνια ή κβάντα. Με βάση την θεωρία αυτή την ίδια εποχή ο Max Planck ερμήνευσε την ακτινοβολία που εκπέμπεται από θερμά αντικείμενα. Την ίδια περίοδο ο Einstein χρησιμοποίησε και αυτός την σωματιδιακή θεωρία για να ερμηνεύσει την εκπομπή ηλεκτρονίων από μέταλλα όταν προσπίπτει πάνω τους φώς, διατυπώνοντας έτσι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Αυτή η φαινομενική αντίφαση μεταξύ της

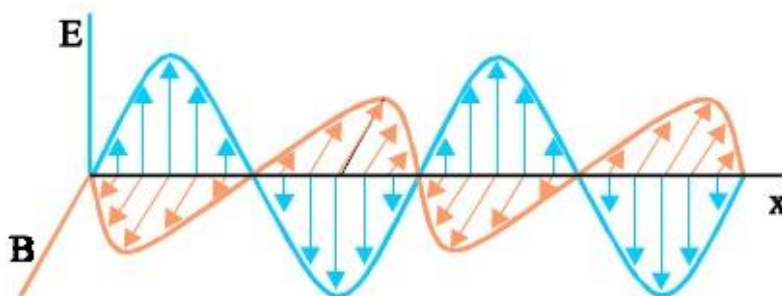


κυματικής και σωματιδιακής φύσης εξαλείφθηκε με την ανάπτυξη της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής από το 1930, μιας ευρύτερης θεωρίας που εμπεριέχει και ερμηνεύει τόσο τις κυματικές όσο και τις σωματιδιακές ιδιότητες του φωτός. Σήμερα εξακολουθούμε να πιστεύουμε ότι το φως έχει διπλή φύση δηλαδή σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα) ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (εκπομπή – απορρόφηση) όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

Στην ερώτηση αν το φως είναι «σωμάτιο ή κύμα» η απάντηση είναι ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο υπό ορισμένες συνθήκες συμπεριφέρεται ως σωμάτιο να εμφανίζει δηλαδή σωματιδιακές ιδιότητες [2].

### 1.1 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell

Ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα ορίζουμε την ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου.. Πιο συγκεκριμένα, οποιαδήποτε χρονική μεταβολή είτε ενός ηλεκτρικού είτε ενός μαγνητικού πεδίου επάγει πεδίου του άλλου είδους σε γειτονικές περιοχές του χώρου. Άρα, το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο επάγει ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και το ανάστροφο. Οδηγούμαστε λοιπόν σύμφωνα με τον παραπάνω μηχανισμό σε μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που περιέχει χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία και η οποία μπορεί να διαδίδεται στον χώρο από μια περιοχή σε άλλη, ακόμη και όταν δεν υπάρχει ύλη στην ενδιάμεση περιοχή. Μια τέτοια διαταραχή έχει ιδιότητες κύματος και ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό κύμα (σχήμα 1).



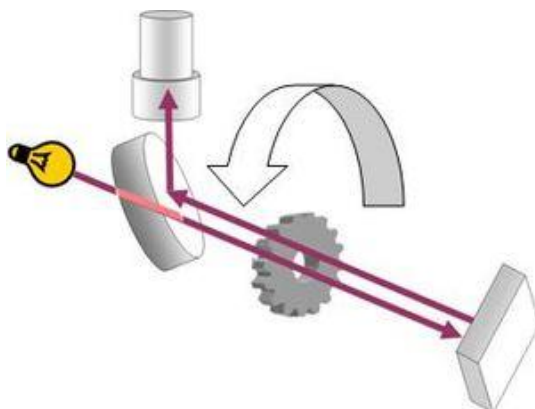
Σχήμα 1: Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος το οποίο διαδίδεται κατά την διεύθυνση  $x$

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο αναλύεται σε δύο τοπικός και χρονικός μεταβαλλόμενα πεδία, του ηλεκτρικού εντάσεως  $E$  και του μαγνητικού εντάσεως  $B$ , με το ηλεκτρικό να πάλλεται στο κατακόρυφο επίπεδο ενώ το μαγνητικό στο οριζόντιο επίπεδο. Κατά την διάδοση το ηλεκτρομαγνητικό κύματος μεταφέρεται ενέργεια, η οποία χωρίζεται και αυτή σε δύο συνεισφορές την ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου και ενέργεια μαγνητικού πεδίου. Οι δύο μορφές ενέργειας σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ονομάζονται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Συνοψίζοντας θα πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι τα δυο χρονικός μεταβαλλόμενα πεδία μεταφέρονται στο χώρο σαν κύμα, επομένως όλα τα

είδη της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας «ταξιδεύουν» στο χώρο με τη μορφή κυμάτων και η ενέργεια του κύματος ονομάζεται ακτινοβολία. Τέλος τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα του φωτός  $c = 3 \times 10^8$  m/s. ενώ σε όλα τα υλικά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα.[2]

## 1.2 Ταχύτητα του φωτός

Η ταχύτητα του φωτός είναι μια θεμελιώδης φυσική σταθερά με αριθμητική τιμή που σήμερα θεωρείται δεδομένη. Αν όμως λάβουμε υπόψη μας ότι το φως χρειάζεται μόλις ένα δευτερόλεπτο για να ταξιδέψει επτάμισυ φορές γύρω από τη γη, μπορεί κανείς να φανταστεί πόσο δύσκολη θα ήταν η διαδικασία ακριβούς υπολογισμού της ταχύτητάς του. Η αλήθεια είναι ότι χρειάστηκαν προσπάθειες αρκετών αιώνων μέχρι να προσδιοριστεί αυτή η τιμή. Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Πρώτος μέτρησε την ταχύτητα του φωτός ο Δανός αστρονόμος Ole Roemer (Όλε Ρέμερ, 1644-1710). Ο Roemer υπολόγισε ότι η τιμή της ταχύτητας του φωτός είναι περίπου  $2 \times 10^8$  m/s. Η μέτρηση αυτή έχει ιστορική αξία, διότι, εκτός του ότι προσέγγιζε αρκετά την πραγματική τιμή της ταχύτητας, έδειξε για πρώτη φορά ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πεπερασμένη τιμή. Η πρώτη μέθοδος με την οποία επετεύχθηκε η μέτρηση του μέτρου ταχύτητα του φωτός με την χρησιμοποίηση μόνο γήινων «εργαλείων» εφαρμόστηκε το 1849 από τον Armand H.L Fizeau (1819 – 1896) Η μέθοδος του Γάλλου Fizeau αφορούσε το χρόνο που χρειαζόταν ένα σήμα φωτός να φτάσει ένα μακρινό καθρέφτη και να επιστρέψει. Ο Fizeau χρησιμοποίησε έναν περιστρεφόμενο τροχό, ο οποίος σε περιοδικά χρονικά διαστήματα άφηνε το φως να διέλθει μέσα από το τηλεσκόπιό του. Ο καθρέφτης του απείχε περίπου 9 χιλιόμετρα από αυτόν και η περίοδος στο τηλεσκόπιό του ήταν 60 ms. (σχήμα 2).[3]

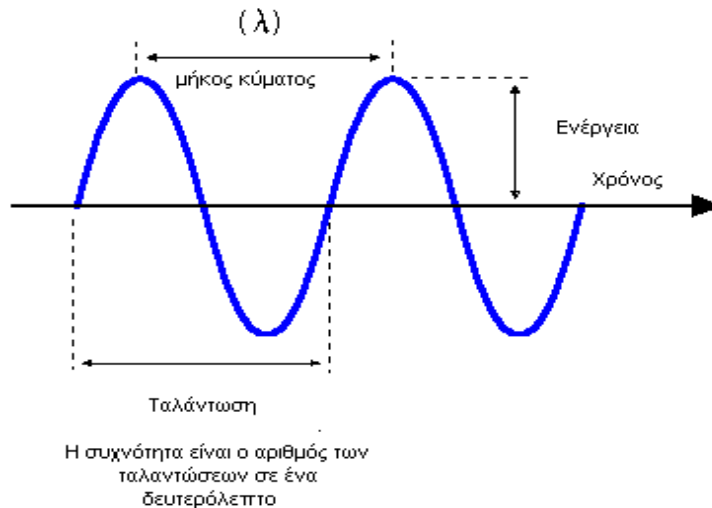


Σχήμα 2: Η μέθοδος του Fizeau για την μέτρηση της ταχύτητας του φωτός με την χρησιμοποίηση του περιστρεφόμενου οδοντωτού τροχού. Το φως περνά από τη μία πλευρά ενός δοντιού, και επιστρέφει στην άλλη πλευρά, υποθέτοντας ότι το γρανάτζι περιστρέφεται ένα δόντι κατά τη διέλευση του φωτός.

Η ταχύτητα του φωτός στο κενό σήμερα υπολογίζεται σε 299.792.458 m/s σε μονάδες SI, δηλαδή κατά προσέγγιση 300.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο

### 1.3 Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη

Ως μήκος κύματος χαρακτηρίζεται η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος. Καθώς "ταξιδεύει" ένα κύμα στο χώρο, που χαρακτηρίζεται με ορισμένη συχνότητα, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών του παραμένει σταθερή. Αυτή η σταθερή απόσταση ονομάζεται **μήκος κύματος**.



Σχήμα 3: Το μήκος κύματος είναι ίσο με: Την απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά όρη ή κοιλάδες (στα εγκάρσια κύματα) την απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικά πυκνώματα ή αραιώματα (στα διαμήκη) κύματα τη μικρότερη απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία του μέσου που έχουν ίδια απομάκρυνση και κινούνται με ίδια ταχύτητα (σε όλα τα κύματα)

Το μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας του ίδιου κύματος, που σημαίνει πως, όσο μικρότερη είναι η συχνότητα ενός κύματος τόσο μεγαλύτερο θα είναι το μήκος κύματός του. Η σχέση που συνδέει τη συχνότητα ( $f$ ) με το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) είναι:

$$f = c / \lambda$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα  $c_0=3 \times 10^8$  m/s. Μέσα όμως σε κάποιο υλικό η ταχύτητα του φωτός είναι πάντα μικρότερη από τη  $c_0$ . Το πηλίκο της ταχύτητας  $c_0$  του φωτός στο κενό, προς την ταχύτητα  $c$  εντός οποιουδήποτε υλικού ονομάζεται δείκτης διάθλασης  $n$ . Συγκεκριμένα, όταν το φως διαδίδεται σε κάποιο υλικό (όπως το γυαλί ή ο αέρας), η ταχύτητά του εξαρτάται από τον δείκτη διάθλασης του συγκεκριμένου υλικού όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διάθλασης, τόσο πιο μικρή είναι η ταχύτητα του φωτός μέσα στο υλικό. ο δείκτης διάθλασης του κενού είναι 1 και στα υπόλοιπα υλικά μεγαλύτερος του

ένα. Λόγω της αλλαγής της ταχύτητάς του φωτός καθώς μεταβαίνει από ένα μέσο σε άλλο με διαφορετικό δείκτη διάθλασης παρατηρείται το φαινόμενο της διάθλασης.

$$n = \frac{\text{Ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{Ταχύτητα του φωτός στο υλικό}} = \frac{c_0}{c}$$

Όταν το φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων (π.χ. από τον αέρα στο γυαλί), η συχνότητα  $f$  παραμένει αμετάβλητη. Τούτο γίνεται σαφές, διότι πρέπει ο αριθμός των μηκών κύματος που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου, είναι ίσος με τον αριθμό των μηκών κύματος που διέρχονται από αυτήν ανά μονάδα χρόνου.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε διαδοχικά:  $c_0 = \lambda_0 \times f$  για το κενό και  $c = \lambda \times f$  για οπουδήποτε οπτικό μέσο πλην του κενού. Διαιρώντας κατά μέλη τελικά θα πάρουμε την σχέση:

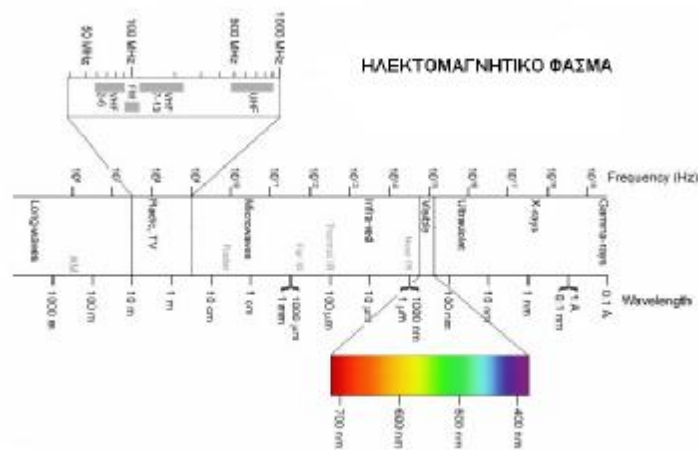
$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος  $\lambda_0$  στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματος του, όταν εισέρχεται σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$  [3].

#### 1.4 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται το ανάπτυσμα της έντασης μιας περιοχής της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σαν συνάρτηση του μήκους κύματος ή της συχνότητας, δηλαδή της ενέργειας, της ακτινοβολίας. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι συνεχές, χωρίς να υπάρχουν κενά μεταξύ ενός "είδους" ακτινοβολίας και ενός άλλου. Ολόκληρο το φάσμα διαιρείται ενεργειακά σε περιοχές,

Ως γνωστόν, το ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν μια ευρεία περιοχή συχνοτήτων (και επομένως και μηκών κύματος και ενεργειών, αφού τα φυσικά αυτά μεγέθη δεν είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους), που καλείται φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που αντιπροσωπεύει το ορατό φως δεν είναι παρά ένα μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, το οποίο εκτείνεται από τις υψηλών συχνοτήτων ακτίνες  $\gamma$  και  $X$  έως τα ραδιοκύματα, που έχουν πολύ μικρή συχνότητα. Η μονάδα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι το μήκος κύματος μετρημένο σε νανόμετρα (1 νανόμετρο = 0.00000001 μέτρα. Η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος. Έτσι, μεγάλα μήκη κύματος παραπέμπουν σε χαμηλή συχνότητα και το αντίστροφο.



Σχήμα 4: Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

#### 1.4.1 Ακτίνες γ

Οι ακτίνες γ, που έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα και τα μικρότερα μήκη κύματος εκπέμπονται από ραδιενεργά υλικά και βρίσκονται και στο διάστημα. Οι ακτίνες αυτές έχουν μια εκπληκτική διατρητική ικανότητα. Μπορούν να διατρήσουν μια επιφάνεια τσιμέντου με πάχος 3 μέτρα! Τα μήκη κύματος αυτής της ακτινοβολίας εκτείνονται από 0.1 έως 0.000001 νανόμετρα.

#### 1.4.2 Ακτίνες X

Οι ακτίνες X, των οποίων η συχνότητα βρίσκεται σε τιμές μεταξύ των ακτινών γ και των υπεριώδων ακτινών έχουν τέτοια διατρητική ικανότητα ώστε να διαπερνούν εύκολα αρκετά υλικά και να καταστρέφουν ιστούς δέρματος πολλών ζώων. Αυτό μας έχει οδηγήσει στο να χρησιμοποιούμε τις ακτίνες X ώστε να παρατηρούμε το ανθρώπινο σώμα. Τα μήκη κύματος των ακτινών X έχουν μεγάλη έκταση, εκτείνονται από ένα μέχρι 0.00001 νανόμετρα.

#### 1.4.3 Υπεριώδης ακτινοβολία (Ultraviolet radiation)

Έχει συχνότητα λίγο παραπάνω από αυτή του ορατού φωτός. Ωστόσο η έντασή τους είναι τέτοια που μπορεί να καταστρέψει ιστούς και κύτταρα. Ο ήλιος είναι μια πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και μικρές δόσεις αυτής της ακτινοβολίας βοηθούν στην παραγωγή της βιταμίνης D και προκαλούν το μαύρισμα του ανθρώπινου δέρματος. Φυσικά, μεγαλύτερες δόσεις προκαλούν σοβαρά εγκαύματα. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χρησιμοποιείται ευρέως στον επιστημονικό χώρο σε διάφορα πειράματα, καθώς και από τους αστρονόμους για την παρατήρηση του ηλιακού συστήματος, του γαλαξία μας και άλλων περιοχών του σύμπαντος. Το μήκος κύματος της υπεριώδους ακτινοβολίας εκτείνεται από 50 μέχρι 350 και 400 νανόμετρα.

#### 1.4.4 Υπέρυθρη ακτινοβολία (infrared radiation)

Εκτείνεται σε ένα μήκος κύματος από εκεί που σταματάει η ορατή ακτινοβολία, δηλαδή περίπου τα 700 νανόμετρα μέχρι περίπου το ένα χιλιοστό. Αυτού του τύπου η ακτινοβολία έχει να κάνει με θερμότητα. Για παράδειγμα, το ανθρώπινο σώμα εκπέμπει θερμότητα όχι στο ορατό φως, αλλά σε περιοχές της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Όλα τα σώματα λίγο έως πολύ εκπέμπουν θερμότητα σε αυτά τα μήκη κύματος ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Οι πιο κοινές χρήσεις της υπέρυθρης ακτινοβολίας έχουν να κάνουν με τη νυχτερινή όραση, ανιχνευτές σε δορυφόρους και αεροπλάνα, καθώς και την αστρονομία.

#### 1.4.5 Ραδιοκύματα (radiowaves) και Μικροκύματα (microwaves)

Ο επόμενος τύπος ακτινοβολίας που συναντάμε καθώς διατρέχουμε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι τα μικροκύματα. Αυτά έχουν ένα μήκος κύματος που εκτείνεται από ένα χιλιοστό μέχρι 30 εκατοστά. Ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε αυτήν την ακτινοβολία στην κατασκευή φούρνων μικροκυμάτων, οι οποίοι μπορούν να θερμάνουν φαγητά, καθώς η ακτινοβολία αυτή απορροφάται από τις τροφές και τις θερμαίνει. Τα μικροκύματα είναι ένα μέρος μιας μεγαλύτερης κατηγορίας ακτινοβολίας, τα ραδιοκύματα. Τα ραδιοκύματα εκπέμπονται από τη Γη, τα κτήρια, τα αυτοκίνητα κι άλλα μεγάλα σε μέγεθος αντικείμενα. Πάνω στα ραδιοκύματα έχει βασιστεί η λειτουργία των ραντάρ τα οποία ανιχνεύουν την παρουσία και την κίνηση σωμάτων που εκπέμπουν αυτού του τύπου την ακτινοβολία. Τα ραδιοκύματα επίσης είναι ευρέως γνωστά για την ικανότητά τους να μεταφέρουν ραδιοφωνικά σήματα και σήματα τηλεόρασης. Τα ραδιοκύματα έχουν μήκος κύματος, που εκτείνεται σε μια αρκετά μεγάλη περιοχή, από ένα εκατοστό έως δεκάδες και εκατοντάδες μέτρα. Τα ραδιοφωνικά σήματα αποτελούνται από δύο ειδών εκπομπές, τα AM σήματα (amplitude modulated waves) και τα FM σήματα (frequency modulated waves). Τα FM σήματα έχουν μικρότερο μήκος κύματος από τα AM και μπορούν να εντοπιστούν από μεγάλα σώματα, όπως σπίτια, κτήρια και τούνελ. Αντίθετα τα AM σήματα μπορούν να "αποφύγουν" τέτοια σώματα και να ταξιδέψουν σε πιο μεγάλες αποστάσεις.

Τα χρώματα του ουράνιου τόξου, δηλαδή η ακτινοβολία που μπορεί να εντοπιστεί από το ανθρώπινο μάτι (από 400 έως 700 νανόμετρα) δεν είναι παρά ένα πολύ μικρό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η παραπάνω ανάλυση σχετικά με την φύση του φωτός δικαιολογεί και την διαίρεση της Οπτικής σε τρία μέρη την Γεωμετρική οπτική την Κυματική οπτική και την Κβαντική οπτική Το φως έχει ορισμένες ιδιότητες οι οποίες μπορούν να περιγραφούν απλά με έννοιες της Γεωμετρικής Οπτικής αρκετές άλλες ιδιότητες του φωτός πρέπει να περιγραφούν με τη βοήθεια της Κυματικής οπτικής ενώ κάποιες άλλες μπορούν να εξηγηθούν μόνο με τη βοήθεια της Κβαντικής Μηχανικής (Φωτόνια) [5]

## 1.5 Γεωμετρική οπτική

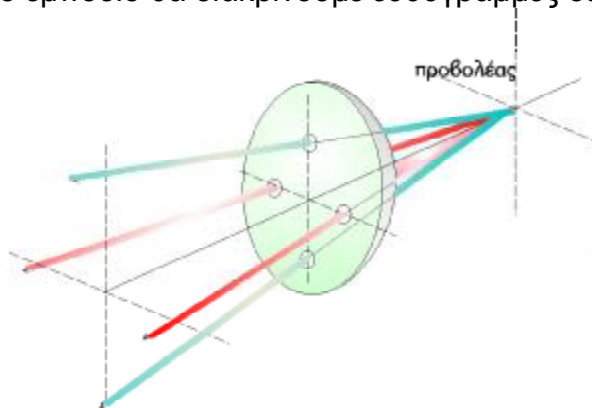
Η Γεωμετρική Οπτική εξετάζει τη διάδοση του φωτός με τους μηχανισμούς της ανάκλασης και διάθλασης. Οι μηχανισμοί αυτοί περιγράφουν μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, όπως τη λειτουργία των κατόπτρων και φακών, την αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών, αλλά και τα φαινόμενα του αντικατοπτρισμού. Στη Γεωμετρική Οπτική δεχόμαστε ότι το φως αποτελείται από ακτίνες που εκκινώντας από κάποια φωτεινή πηγή διαδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις και κάμπτονται απότομα λόγω της διάθλασης ή ανάκλασής τους σε διάφορα οπτικά στοιχεία. Θεωρούμε ότι σε ομογενή μέσα οι φωτεινές ακτίνες διαδίδονται ευθύγραμμα και αγνοούμε το κυματικό χαρακτήρα του φωτός, εφαρμόζοντας τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης χωρίς περιορισμούς. Σε όλα τα οπτικά συστήματα, το φως διαδίδεται πάντα μέσα από κάποιο αριθμό οπών, διαφραγμάτων ή σχισμών από τις οποίες διέρχεται ένα μέρος του προσπίπτοντος κυματομετώπου. Η Γεωμετρική Οπτική μπορεί να θεωρηθεί ως το όριο της Κυματικής Οπτικής στο οποίο η περίθλαση στα στοιχεία αυτά είναι αμελητέα.

Μια γενική αρχή, η αρχή του ελάχιστου χρόνου (ή ισοδύναμα, του ελάχιστου οπτικού δρόμου), παρέχει πλήρη εξήγηση όλων των φαινομένων διάδοσης του φωτός. Από τη γενική αρχή αυτή πηγάζουν οι νόμοι της ανάκλασης, διάθλασης. Σύμφωνα με την αρχή όταν το φως διαδίδεται από ένα σημείο του χώρου σε ένα άλλο ακολουθεί την διαδρομή για την οποία απαιτείται ο ελάχιστος χρόνος, συνέπεια την παραπάνω αρχής αποτελεί η διαπίστωση ότι μέσα σε κάθε ομογενές υλικό το φως ακολουθεί ευθύγραμμη πορεία διάδοσης.

Αρχή του ελάχιστου χρόνου, ή Αρχή του Fermat:

*“Από όλους τους πιθανούς δρόμους που μπορεί να μεταδοθεί από ένα σημείο στο άλλο, το φως διαλέγει το δρόμο που χρειάζεται τον ελάχιστο χρόνο”*

Πιο συγκεκριμένα, αν για παράδειγμα τοποθετούμε ένα εμπόδιο στην πορεία μιας δέσμης από ένα προβολέα, και ‘ανοίξουμε’ μερικές μικρές οπές στο χώρο πέρα από το εμπόδιο θα διακρίνουμε ευθύγραμμες δέσμες φωτός



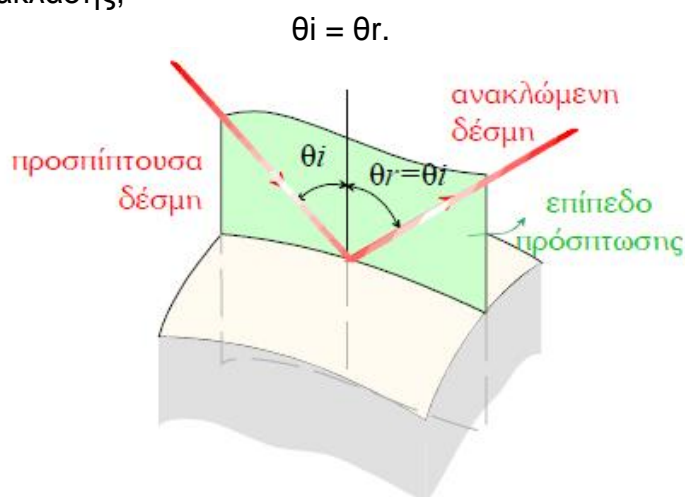
Σχήμα 5 : Το φως φαίνεται να διαδίδεται ευθύγραμμα

Στο σημείο αλλαγής της ταχύτητας το φως αντιλαμβάνεται ένα νέο μέσο διάδοσης. Ένα μέρος του θα περάσει στο δεύτερο μέσο, θα διαθλασθεί, εκτρέπόμενο από την αρχική του πορεία, και ένα άλλο μέρος του θα διαδοθεί

προς μια άλλη διεύθυνση μέσα στο πρώτο μέσο, δηλαδή θα ανακλαστεί. Την αλλαγή της πορείας του φωτός μπορούμε να την παρατηρήσουμε όταν μια ευθύγραμμη δέσμη φωτός συναντήσει μια επιφάνεια π.χ. νερού ή γυαλιού: η δέσμη αλλάζει πορεία, κάμπτεται ακριβώς πάνω στη διαχωριστική επιφάνεια.

### 1.5.1 Ανάκλαση

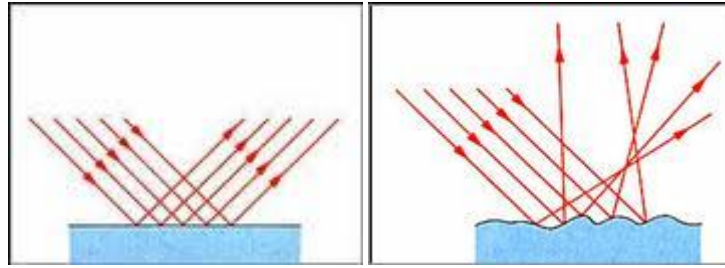
Ας υποθέσουμε ότι φωτεινή ακτίνα (ή φωτεινή δέσμη) διαδίδεται σε κάποιο διαφανές μέσο (π.χ. αέρας) και προσπίπτει σε επίπεδη και λεία επιφάνεια. Η επιφάνεια αυτή μπορεί να είναι είτε μεταλλική, είτε αδιαφανής είτε απλώς η διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφανών υλικών. Κατά την ανάκλαση το φως αλλάζει διεύθυνση διάδοσης αλλά παραμένει εντός του ίδιου μέσου. Ο νόμος της ανάκλασης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Κατά την ανάκλαση, (α) η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα και η κάθετη στην ανακλαστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης βρίσκονται επί του ίδιου επιπέδου το οποίο ονομάζουμε επίπεδο πρόσπτωσης και (β) η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης,



Σχήμα6: Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου της ανάκλασης. Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη οπτική ακτίνα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο με την κάθετη στην ανακλαστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, και η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης

Ως γωνίες πρόσπτωσης και ανάκλασης,  $\theta_i$  και  $\theta_r$ , ορίζουμε αυτές που σχηματίζονται μεταξύ της κάθετης στην επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης και της προσπίπτουσας και ανακλώμενης ακτίνας αντίστοιχα (Σχ.6). Η διάχυτη ανάκλαση (ή απλά διάχυση) του φωτός από τραχιές επιφάνειες εξηγείται μέσω της εφαρμογής του νόμου της ανάκλασης σε κάθε στοιχειώδη επιφάνεια που μπορεί να θεωρηθεί επίπεδη. Το ίδιο ισχύει και για λείες αλλά όχι επίπεδες επιφάνειες θεωρώντας την κάθετο στην επιφάνεια σε κάθε σημείο πρόσπτωσης (σχήμα 7).





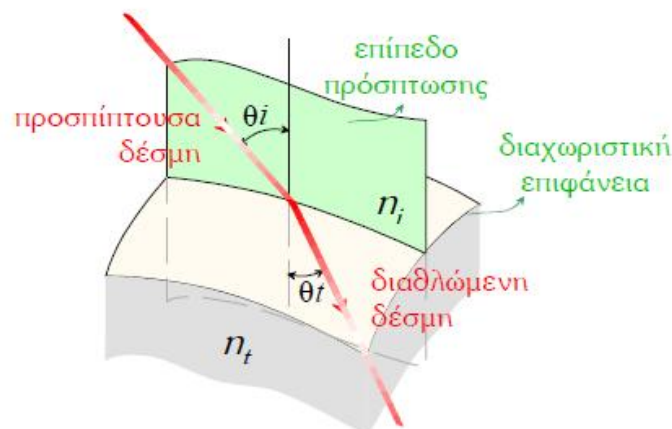
Σχήμα 7: Απεικόνιση της ανάκλασης σε (α) λεία επιφάνεια (β) τραχεία επιφάνεια

### 1.5.2 Διάθλαση

Αν υποθέσουμε φωτεινή ακτίνα προσπίπτει στην επίπεδη και λεία διεπιφάνεια μεταξύ δύο διαφανών υλικών. Στη περίπτωση αυτή, εκτός από ανάκλαση (της οποίας το ποσοστό εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης), παρατηρείται και διάθλαση δηλαδή αλλαγή τόσο της διεύθυνσης διάδοσης του φωτός όσο και του μέσου διάδοσης. Ο νόμος της διάθλασης μπορεί να διατυπωθεί ως εξής: Κατά τη διάθλαση, (α) η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα και η κάθετη στη διαθλαστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης βρίσκονται επί του ίδιου επιπέδου (επίπεδο πρόσπτωσης) και (β) η γωνία πρόσπτωσης συνδέεται με τη γωνία διάθλασης μέσω της σχέσης

$$n_i \sin\theta_i = n_t \sin\theta_t$$

Στη σχέση (που είναι γνωστή ως νόμος του Snell) η γωνία διάθλασης  $\theta_t$  ορίζεται ανάλογα με αυτές της πρόσπτωσης και ανάκλασης, δηλαδή είναι η γωνία μεταξύ της κάθετης στην επιφάνεια και της διαθλώμενης ακτίνας (Σχ. 8).

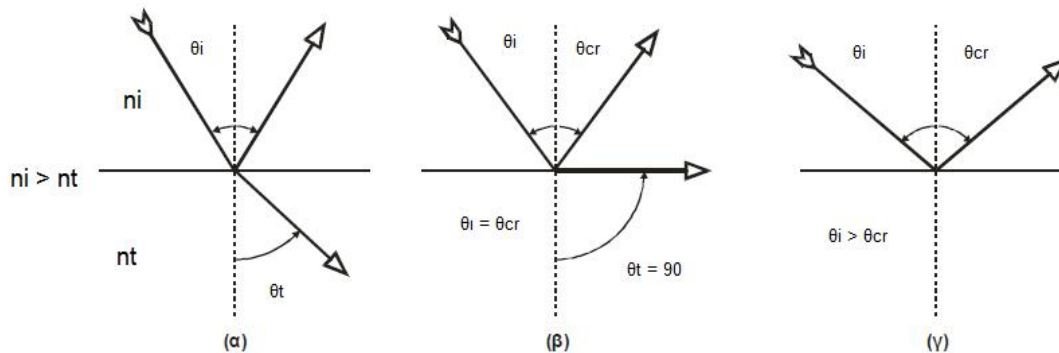


Σχήμα 8: Κατά τη διάθλαση, (α) η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα και η κάθετη στη διαθλαστική επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης βρίσκονται επί του ίδιου επιπέδου

Εάν  $n < n_t$ , (πέραςμα από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο) τότε  $\theta_i > \theta_t$  και η διαθλώμενη ακτίνα πλησιάζει την κάθετη στη διεπιφάνεια. Αντίθετα, εάν  $n_i > n_t$ , (πέραςμα από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο μέσο) τότε  $\theta_i < \theta_t$  και η διαθλώμενη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετη στη

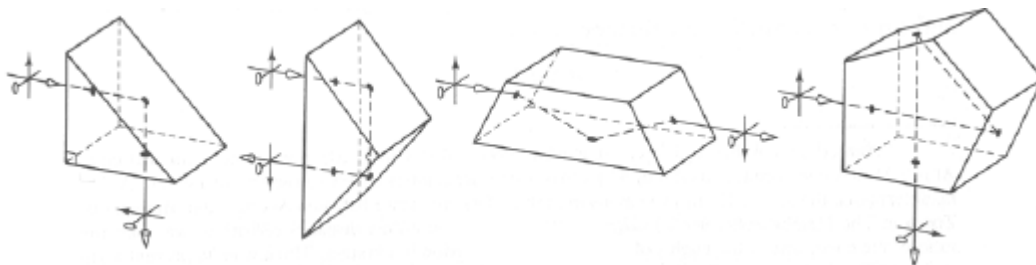
διεπιφάνεια. Στην τελευταία αυτή περίπτωση μπορούμε να έχουμε  $\theta_t = 90^\circ$  (Σχ. 8β) για γωνία πρόσπτωσης ίση με τη λεγόμενη κρίσιμη (Η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η διαθλώμενη ακτίνα αναδύεται εφαπτομενικά προς την επιφάνεια ονομάζεται κρίσιμη γωνία ) που δίδεται από τη σχέση

$$\sin\theta_{cr} = n_t / n_i.$$



Σχήμα 8β: Η εξάρτηση της κρίσιμης γωνία από τον λόγο των δεικτών διάθλασης

Ως παράδειγμα αναφέρουμε τη κατασκευή διαφόρων τύπων πρισμάτων (Σχ. 8γ). Παρ' όλο που ο δείκτης διάθλασης εξαρτάται από το μήκος κύματος η γωνία πρόσπτωσης από το γυαλί στον αέρα για όλους τους τύπους πρισμάτων (~45°) είναι μεγαλύτερη της κρίσιμης (~42°) για όλα τα χρώματα που ενδιαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή [11].

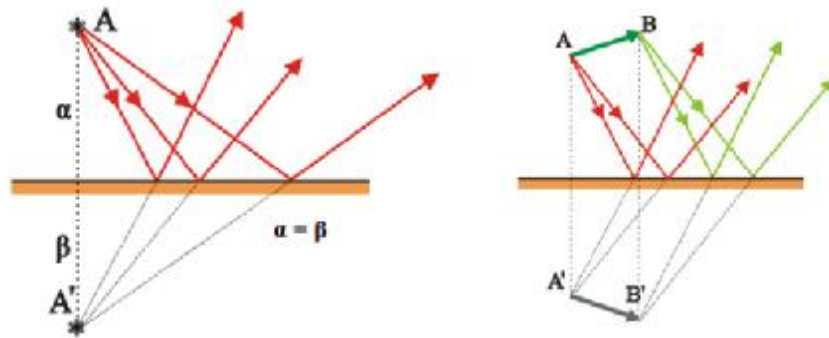


Σχήμα 8γ: Πρίσματα διαφόρων δεικτών διάθλασης. Τα πρίσματα λειτουργούν ως αχρωματικοί ανακλαστήρες με τις διαφορές τους να εστιάζονται στη γωνία εκτροπής της προσπίπτουσας δέσμης και στη περιστροφή, ανόρθωση ή αντιστροφή των ειδώλων των αντικειμένων.

### 1.5.3 Ανάκλαση αποκλίνουσας δέσμης σχηματισμός ειδώλου

Θεωρούμε ότι μία σημειακή φωτεινή πηγή βρίσκεται στην θέση Α (Σχήμα 9). Η πηγή αυτή εκπέμπει αποκλίνουσες φωτεινές ακτίνες προς κάθε κατεύθυνση. Μία αποκλίνουσα δέσμη θα εξακολουθεί να είναι αποκλίνουσα και μετά την ανάκλαση. Εάν προεκτείνουμε τις ακτίνες που προκύπτουν μετά την ανάκλαση, προς τα πίσω, θα παρατηρήσουμε ότι αυτές συναντώνται στο σημείο Α' το οποίο είναι συμμετρικό ως προς το Α από το οποίο ξεκίνησε η δέσμη. Το σημείο Α' καλείται φανταστικό είδωλο του Α, όπου είδωλο,

ονομάζεται η τομή των ανακλώμενων ακτίνων. Οι ανακλώμενες αυτές ακτίνες εισερχόμενες στον οφθαλμό δημιουργούν την εντύπωση ότι το σημείο A βρίσκεται στην θέση A'. Αν η τομή προέρχεται από τις πραγματικές ακτίνες τότε το είδωλο ονομάζεται πραγματικό. Αν όμως προέρχεται από τομή προεκτάσεων ακτίνων τότε το είδωλο ονομάζεται φανταστικό



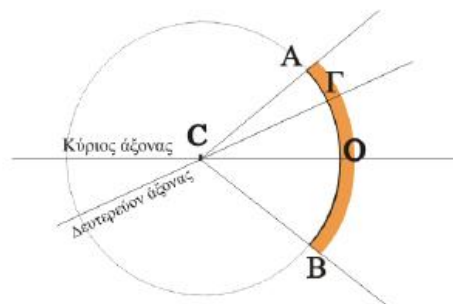
Σχήμα 9: Απεικόνιση σχηματισμού φανταστικού ειδώλου από αποκλίνουσα δέσμη

Εάν αντί ενός σημείου έχουμε ένα αντικείμενο AB (Σχημ 9) θα δημιουργηθεί το φανταστικό είδωλο A'B'. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το AB αποτελείται από ένα άπειρο πλήθος σημειακών φωτεινών πηγών κάθε μία από τις οποίες έχει το είδωλό της και όλα τα είδωλα μαζί φτιάχνουν το είδωλο του αντικειμένου. Από την γεωμετρία του σχήματος προκύπτει ότι το μέγεθος του ειδώλου θα ισούται με το μέγεθος του αντικειμένου.

#### 1.5.4 Ανάκλαση σε σφαιρική επιφάνεια – κάτοπτρο

Η εκτροπή την οποία υφίσταται μία προσπίπτουσα ακτίνα σε μια μη επίπεδη επιφάνεια μελετάται σύμφωνα με τους νόμους της ανάκλασης με την διαφορά ότι τώρα πρέπει να θεωρήσουμε ότι η επιφάνεια αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό επίπεδων επιφανειών. Σφαιρικά κάτοπτρα λέγονται εκείνα που η ανακλαστική επιφάνειά τους είναι τμήμα σφαίρας (Σχήμα 10)

Χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: Τα κοίλα και τα κυρτά σφαιρικά κάτοπτρα.



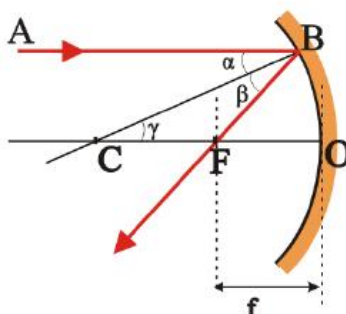
Σχήμα 10: Απεικόνιση σφαιρικού κατόπτρου όπου διακρίνονται τα κύρια στοιχεία του. Κοίλα σφαιρικά κάτοπτρα ονομάζονται εκείνα στα οποία η ανάκλαση δημιουργείται από την εσωτερική τους επιφάνεια ενώ το ανάστροφο συμβαίνει για τα κυρτά

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός σφαιρικού κατόπτρου είναι τα εξής :

- α) Το σημείο Ο το οποίο είναι το κέντρο της επιφάνειας του σφαιρικού κατόπτρου και ονομάζεται κορυφή του κατόπτρου.
- β) Το κέντρο C της σφαίρας στην οποία ανήκει το κάτοπτρο και ονομάζεται κέντρο καμπυλότητας του κατόπτρου.
- γ) Η ακτίνα CO της σφαίρας στην οποία ανήκει το κάτοπτρο και ονομάζεται ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου.
- δ) Η ευθεία από ορίζεται από τα σημεία C και Ο που ονομάζεται κύριος άξονας του κατόπτρου.
- ε) Κάθε ευθεία που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας C και από ένα τυχαίο σημείο Γ του κατόπτρου ονομάζεται δευτερεύον άξονας.
- στ) Η γωνία ACB υπό την οποία φαίνεται από το κέντρο C το κάτοπτρο ονομάζεται γωνιακό άνοιγμα του κατόπτρου. Όταν αυτή είναι μικρότερη από  $8^\circ$ , το κάτοπτρο λέγεται μικρού ανοίγματος [3]

### 1.5.5 Ανάκλαση παραλλήλου δέσμης

Θεωρούμε μία ακτίνα AB που προσπίπτει στο κάτοπτρο παράλληλα με τον κύριο άξονα. Μετά την ανάκλασή της, θα περάσει από ένα σημείο του κύριου άξονα F. Η ευθεία CB είναι κάθετος στην επιφάνεια του κατόπτρου στο σημείο B διότι είναι ακτίνα του κατόπτρου και θα ισχύει



Σχήμα 11: Μηχανισμός ανάκλασης παραλλήλου δέσμης επί κυρτού κατόπτρου

$$\hat{\alpha} = \hat{\beta}$$

Ισχύει ακόμη ότι

$$\hat{\alpha} = \hat{\gamma} \text{ (ως εντός εναλλάξ)}$$

Έτσι έχουμε

$$\hat{\beta} = \hat{\gamma}$$

Άρα το τρίγωνο CFB είναι ισοσκελές και θα ισχύει:

$$CF = FB$$

Στην περίπτωση που το κάτοπτρο είναι μικρού ανοίγματος τότε προσεγγιστικά μπορούμε να θεωρήσουμε ότι

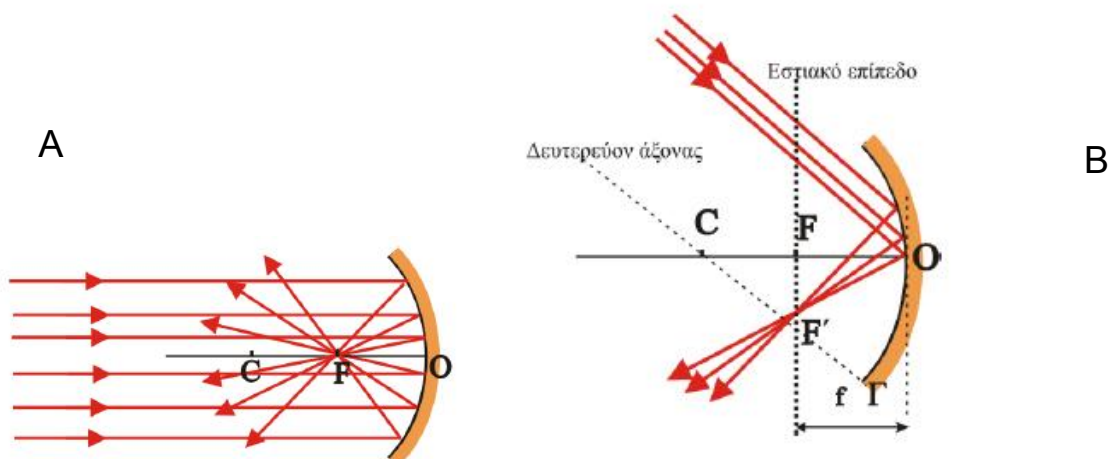
$$FO \sim FB$$

και συνεπώς .  $FO = FC = R/2$

όπου  $CO = R$  η ακτίνα καμπυλότητας του κατόπτρου. Ο παραπάνω συλλογισμός ισχύει για οποιαδήποτε τυχαία ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα, εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι όλες οι ακτίνες οι παράλληλες με

τον κύριο άξονα μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο θα περάσουν από το σημείο F. Αν θεωρήσουμε μία παράλληλη δέσμη ακτινών που είναι παράλληλη με τον κύριο άξονα του κατόπτρου, μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο όλες περνούν από το σημείο F του άξονα που λέγεται **κύρια εστία** του κατόπτρου (σχήμα 12). Η απόσταση μεταξύ της κύριας εστίας και της κορυφής του κατόπτρου ονομάζεται εστιακή απόσταση f ( $f = FO$ ) σύμφωνα με τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι ισχύει:

$$f = R/2$$



Σχήμα 12: (A) Απεικόνιση των ανακλάσεων των παράλληλων δεσμών στο κύριο άξονα με κύρια εστία το σημείο F. (B) Απεικόνιση των ανακλάσεων των παράλληλων δεσμών στον δευτερεύον άξονα με κύρια εστία F'

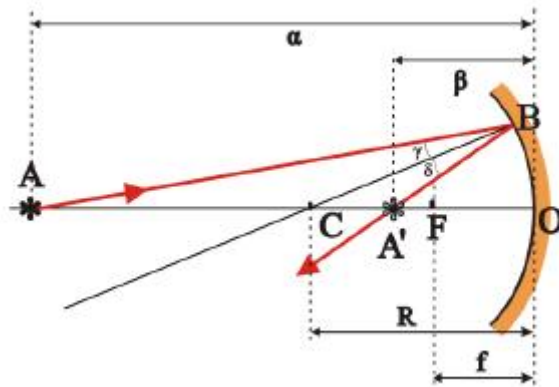
Ας θεωρήσουμε στη συνέχεια μία παράλληλη δέσμη ακτινών που πέφτει στο κάτοπτρο παράλληλα προς τη διεύθυνση ενός δευτερεύοντα άξονα CΓ (σχήμα 12 β). Μετά την ανάκλασή τους οι ακτίνες συγκλίνουν σε ένα σημείο, το F', το οποίο ακολουθώντας τον ίδιο συλλογισμό με προηγουμένως μπορούμε να πούμε ότι απέχει από το κέντρο καμπυλότητας απόσταση .

$$R / 2$$

Λόγω του μικρού ανοίγματος του κατόπτρου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι όλες οι δευτερεύουσες εστίες βρίσκονται πάνω σε ένα επίπεδο το οποίο ονομάζεται εστιακό επίπεδο.

### 1.5.6 Ανάκλαση αποκλίνουσας δέσμης

Ας θεωρήσουμε ένα σημειακό φωτεινό αντικείμενο πάνω στον κύριο άξονα το οποίο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη από την εστιακή απόσταση του κατόπτρου (σχήμα 13).



Σχήμα 13: Μηχανισμός ανάκλασης αποκλίνουσας δέσμης από κυρτό κάτοπτρο

Θεωρούμε μία τυχαία ακτίνα AB η οποία προσπίπτει στο κάτοπτρο ακολουθώντας το νόμο της ανάκλασης  $\gamma = \delta$  βρίσκουμε την ανακλώμενη ακτίνα και κατ' επέκταση το σημείο A' που αυτή τέμνει τον κύριο άξονα. Από το θεώρημα της διχοτόμου έχουμε

$$\frac{AB}{A'B} = \frac{AC}{A'C}$$

και επειδή για τα κάτοπτρα μικρού ανοίγματος ισχύει

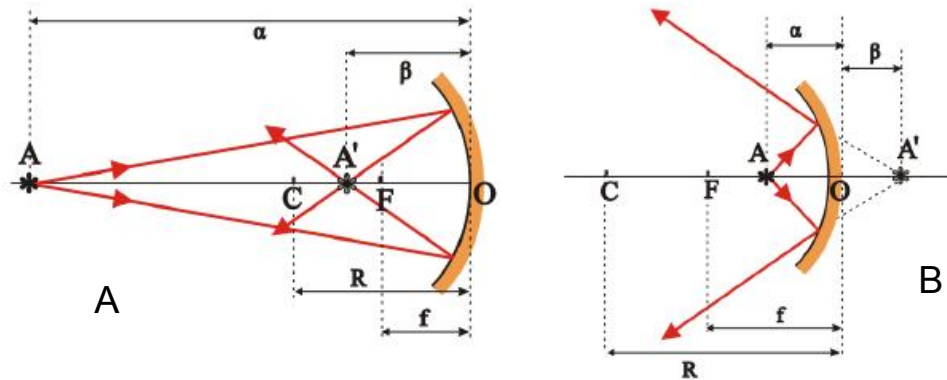
$$AB \approx AO \text{ και } A'B \approx A'O$$

παίρνουμε

$$\frac{AO}{A'O} = \frac{AC}{A'C} \Rightarrow \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\alpha - R}{R - \beta} \Rightarrow \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{2}{R} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

όπου  $\alpha$ ,  $\beta$  οι αποστάσεις του αντικείμενου A και του σημείου τομής A' της ανακλώμενης ακτίνας με τον κύριο άξονα από την κορυφή O του κατόπτρου. Η παραπάνω ανάλυση έγινε με βάση μία τυχαία ακτίνα που ξεκινά από το σημειακό φωτεινό αντικείμενο A. Άρα ισχύει για όλες τις ακτίνες που ξεκινούν από το A και που μετά την ανάκλασή τους στο κάτοπτρο θα περνούν από το A', το οποίο ονομάζεται είδωλο του A και το οποίο είναι πραγματικό (βρίσκεται από το σημείο τομής των ανακλώμενων ακτινών) (σχήμα 14). Αν αρχίσουμε να πλησιάζουμε το αντικείμενο, τότε το είδωλο αρχίζει να απομακρύνεται και φθάνει στο άπειρο όταν το φωτεινό αντικείμενο συμπίπτει

με την κύρια εστία του κατόπτρου. Αν το σημειακό φωτεινό αντικείμενο βρίσκεται μεταξύ της κύριας εστίας και της κορυφής του κατόπτρου(σχήμα 14 β), τότε η φωτεινή δέσμη μετά την ανάκλαση αποκλίνει και συνεπώς το είδωλο είναι φανταστικό γιατί προέρχεται από τομή προεκτάσεων ακτίνων. Α

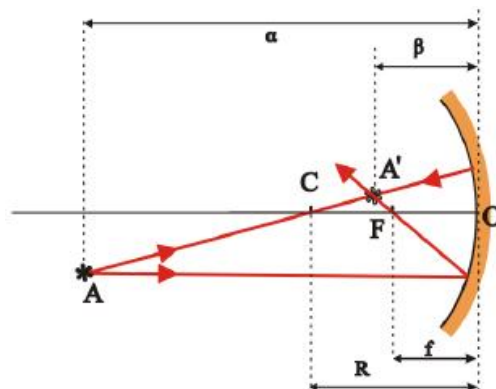


Σχήμα 14: Εξάρτηση εμφάνισης πραγματικού ή φανταστικού ειδώλου από την απόσταση της κύριας εστίας και της κορυφής του κατόπτρου (Α) Πραγματικό είδωλο (Β) Φανταστικό είδωλο.

Αν α και β είναι οι αποστάσεις του αντικειμένου και του ειδώλου από την κορυφή του κατόπτρου ισχύει η σχέση

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{2}{R}$$

Στην περίπτωση όπου το φωτεινό αντικείμενο δεν βρίσκεται πάνω στον οριζόντιο άξονα ( σημείο Α σχήμα 15) τότε οι ακτίνες μετά την ανάκλαση τέμνονται σε ένα σημείο, σχηματίζοντας έτσι το είδωλο Α' του αντικειμένου Α το οποίο δεν βρίσκεται πάνω στον κύριο άξονα και τότε η προηγούμενη σχέση ισχύει προσεγγιστικά.[13]



Σχήμα 15: Απεικόνιση ειδώλου από πηγή που δεν είναι παράλληλη στον κύριο άξονα

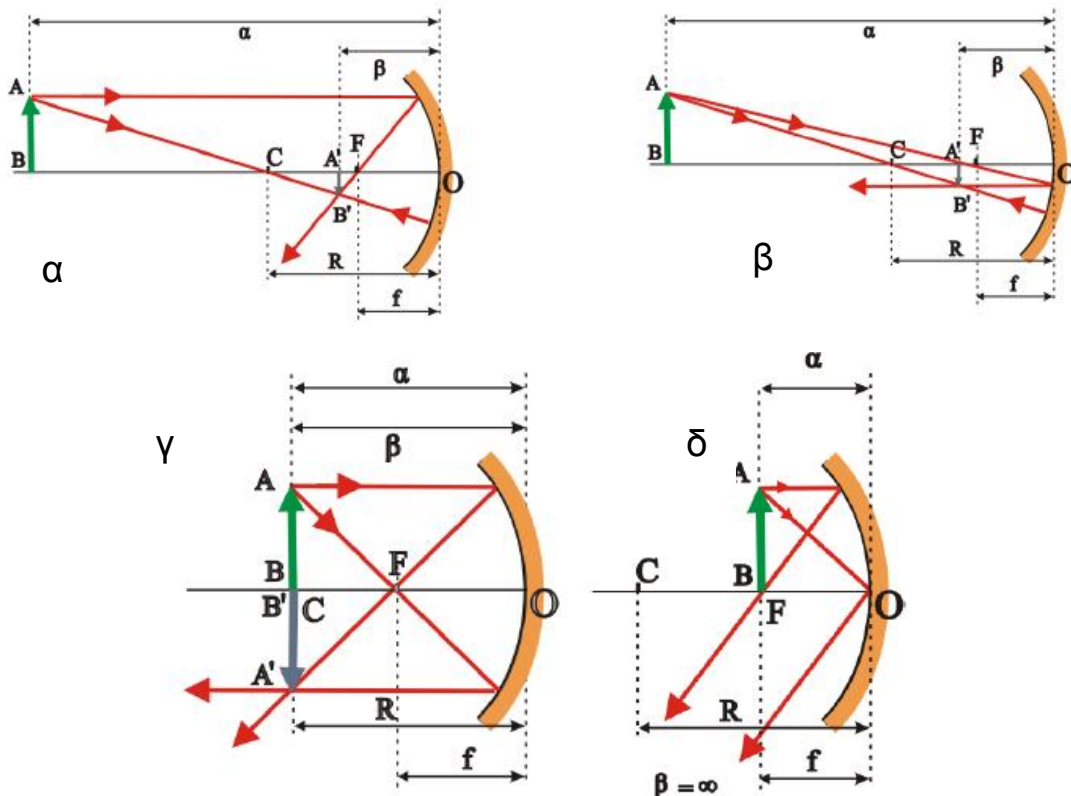
### 1.5.7 Γραφική εύρεση ειδώλου

Για να βρούμε γραφικά το είδωλο ενός σημειακού αντικειμένου, όπως δείχνουν τα παρακάτω γραφικά παραδείγματα ακολουθούμε τους εξής κανόνες:

- α) Ακτίνα που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας του κατόπτρου μετά την ανάκλαση της στο κάτοπτρο ακολουθεί την ίδια πορεία και έχει αντίθετη φορά.
- β) Ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα μετά την ανάκλαση της στο κάτοπτρο περνά από την κύρια εστία του κατόπτρου
- γ) Ακτίνα που περνάει από την κύρια εστία του κατόπτρου μετά την ανάκλαση της στο κάτοπτρο γίνεται παράλληλη με τον κύριο άξονα.
- δ) Ακτίνα που συναντά το κάτοπτρο στην κορυφή  $O$  ανακλάται με γωνία ίση με την γωνία πρόσπτωσης

Για να βρούμε το είδωλο ενός σημειακού αντικειμένου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο από τους παραπάνω κανόνες βρίσκοντας έτσι το σημείο τομής δύο χαρακτηριστικών ακτινών και συνεπώς το είδωλό του ( όλες οι ακτίνες που ξεκινούν από το σημειακό αντικείμενο αναγκαστικά θα περνούν από αυτό το σημείο μετά την ανάκλασή τους).

Αν τώρα το αντικείμενό μας έχει διαστάσεις μπορούμε να βρούμε το είδωλο των άκρων του και κατ' επέκταση και του ίδιου (σχήμα 16 α,β,γ,δ).



Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση των κανόνων για την γραφική εύρεση του ειδώλου και τις εξαρτήσεις αυτού από μεγέθη όπως η απόσταση της κύριας εστίας

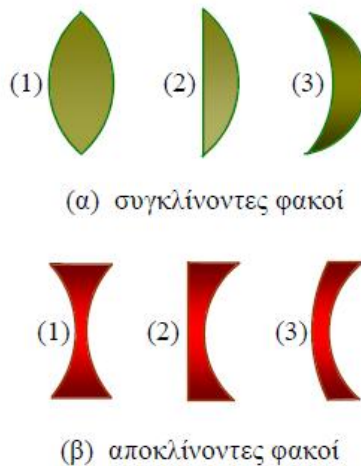


## 1.6 ΦΑΚΟΙ

Φακός ονομάζεται κάθε ομογενές, ισότροπο και διαφανές οπτικό μέσο που διαμορφώνεται από δυο σφαιρικές επιφάνειες (ή από μια σφαιρική και μια επίπεδη). Βασική του λειτουργία είναι ο σχηματισμός του ειδώλου ενός πραγματικού αντικειμένου. Τέτοιας μορφής είδωλα είναι συνήθως μεγαλύτερα από τα αντικείμενα. Οι πλειοψηφία των φακών είναι κατασκευασμένη από απλό γυαλί, ειδικές κατηγορίες φακών κατασκευάζονται από άλλα διαφανή υλικά, όπως πλαστικό ή quartz

Οι φακοί χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την κατασκευή οργάνων οπτικής παρατήρησης και φωτογραφικής αποτύπωσης, όπως είναι τα μικροσκόπια, οι διόπτρες και οι φωτογραφικοί φακοί. Εξαιρετικά μεγάλης χρησιμότητας είναι οι φακοί που κατασκευάζονται για να διορθώσουν οπτικά σφάλματα που παρουσιάζει συχνά ο φακός του ανθρώπινου οφθαλμού, όπως είναι εκείνα της μυωπίας, του αστιγματισμού και της πρεσβυωπίας.

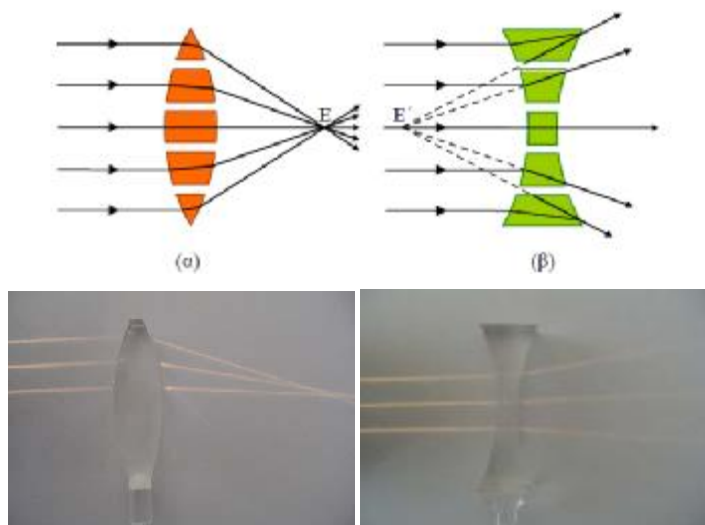
Από άποψη λειτουργικότητας και γεωμετρικών χαρακτηριστικών οι φακοί κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες τους συγκλίνοντες ή θετικούς που είναι παχύτεροι στο κέντρο από ότι στα άκρα και συγκεντρώνουν το φως, και τους αποκλίνοντες ή αρνητικούς που είναι παχύτεροι στα άκρα από ότι στο κέντρο και εξάγουν το αντίθετο οπτικό αποτέλεσμα. Οι συγκλίνοντες μπορεί να είναι αμφίκυρτοι, επιπεδόκυρτοι ή θετικοί μηνίσκοι και οι αποκλίνοντες αντίστοιχα αμφίκυκοι επιπεδόκυκοι ή αρνητική μηνίσκοι (σχήμα 17 α,β)



Σχήμα 17: Οι δύο βασικές κατηγορίες φακών

Η συγκλίνουσα ή αποκλίνουσα δράση των φακών αποτελεί το τελικό αποτέλεσμα επιμέρους διαθλάσεων αυτό εξηγείται καλύτερα αν υποθέσουμε πως ένας φακός αποτελείται από έναν πολύ μεγάλο αριθμό πρισμάτων με μεταβαλλόμενη γωνία κορυφής. Λόγω της μεταβολής της γωνίας κορυφής από πρίσμα σε πρίσμα η γωνία εκτροπής είναι μεγαλύτερη για τα ακραία από ότι για τα κεντρικά τμήματα του φακού. Όταν μία παράλληλη δέσμη του φωτός περάσει μέσα από έναν φακό η εκτροπή των περιφερειακών ακτίνων της δέσμης είναι μεγαλύτερη ενώ σταδιακά μειώνεται στο μηδέν για τις κεντρικές ακτίνες. Το αποτέλεσμα είναι ότι όλες οι ακτίνες τείνουν να συγκεντρωθούν σε μία μικρή περιοχή μετά τον φακό η γεωμετρία και οι διαστάσεις τις οποίας εξαρτώνται από τον τύπο του φακού (σχήμα 18 α). Για αποκλίνοντα μια

παράλληλη δέσμη φωτός μετά την διέλευση της από τον φακό αποτελείται από ακτίνες που αποκλίνουν από μια περιοχή πριν το φακό [12] (σχήμα 18 β)

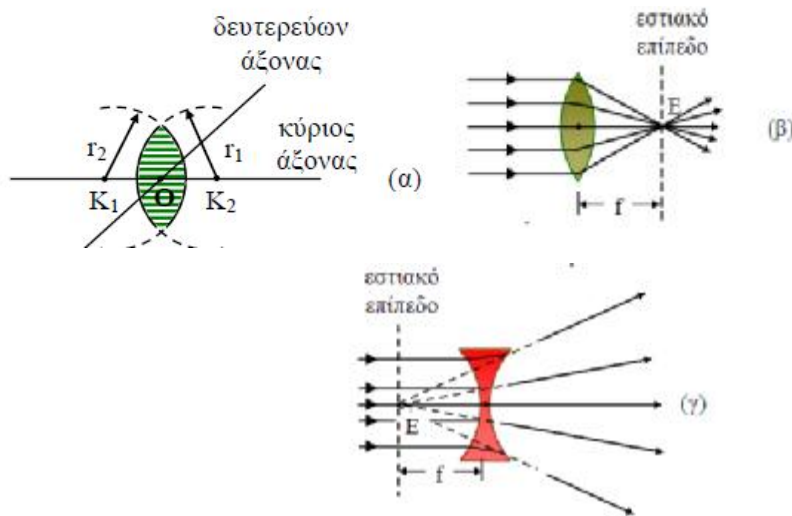


Σχήμα 18: Διατάξεις πρισμάτων που προσομοιώνουν την λειτουργία των φακών (α) Συγκλίνων (β) Αποκλίνων

### 1.6.1 Κύρια χαρακτηριστικά των φακών

Η διάμετρος ενός φακού ονομάζεται γεωμετρικό άνοιγμα του φακού και συνήθως συμβολίζεται με  $d$ . Αν  $K_1$  και  $K_2$  είναι τα κέντρα καμπυλότητας των σφαιρικών επιφανειών του φακού, η ευθεία που περνάει από αυτά και είναι συνεπώς κάθετη στις δύο επιφάνειες του φακού, και ονομάζεται κύριος άξονας. Οι ακτίνες καμπυλότητας  $r_1$ ,  $r_2$  που είναι οι ακτίνες των σφαιρικών επιφανειών του φακού. Στην περίπτωση που η μια επιφάνεια είναι επίπεδη, η σχετική ακτίνα καμπυλότητας είναι  $\infty$ . Το γεωμετρικό κέντρο  $O$  του φακού που βρίσκεται επίσης επάνω στον κύριο άξονα ονομάζεται κορυφή. Κάθε ευθεία που περνάει από την κορυφή  $O$  και δεν συμπίπτει με τον κύριο άξονα ονομάζεται δευτερεύοντας άξονας. Όπως και στα κάτοπτρα, έτσι και στους φακούς ορίζουμε την εστία  $E$  σαν το σημείο που συγκλίνουν για τους συγκλίνοντες ή φαίνονται ότι συγκλίνουν για τους αποκλίνοντες, οι ακτίνες μιας παράλληλης στον κύριο άξονα φωτεινής δέσμης, μετά τη διάθλασή τους από το φακό. Ο φακός έχει δύο επιφάνειες εισόδου, γι' αυτό ορίζουμε δύο εστίες την πρώτη  $E_1$  ( δεξιά του φακού ) και τη δεύτερη  $E_2$ .( αριστερά του φακού). Τέλος, στους λεπτούς φακούς, το επίπεδο που είναι κάθετο στον κύριο άξονα σε κάποια εστία του φακού, ονομάζεται εστιακό επίπεδο . Έχουμε αντίστοιχα πρώτο και δεύτερο εστιακό επίπεδο και μπορούμε να το ορίσουμε πληρέστερα ως το γεωμετρικό τόπο των εστιών του κύριου και των δευτερευόντων αξόνων του φακού. Η εστιακή απόσταση μεταξύ της κύριας εστίας και του οπτικού κέντρου εξαρτάται από την καμπυλότητα των επιφανειών του φακού και από το δείκτη διάθλασης του υλικού. Όσο μεγαλύτερη είναι η καμπυλότητα των σφαιρικών επιφανειών του φακού, τόσο μικρότερη θα είναι η εστιακή του απόσταση. Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός

ότι μεγαλύτερη καμπυλότητα των επιφανειών προκαλεί μεγαλύτερη εκτροπή των ακτίνων που διέρχονται από το φακό κοντά στα άκρα του.



Σχήμα 18: Κύρια στοιχεία ενός φακού

Η οπτική ισχύς (D) που είναι το αντίστροφο της εστιακής απόστασης  $f$ . Στην τεχνολογία της φωτογραφίας καθώς και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ένας φακός χαρακτηρίζεται από την οπτική του ισχύ παρά από την εστιακή του απόσταση. όσο μικρότερη είναι η εστιακή απόσταση, τόσο ισχυρότερος είναι ο φακός ως προς την ικανότητα σύγκλισης των ακτίνων. Όταν η  $f$  εκφράζεται σε m η ισχύς δίνεται σε διοπτρίες, δηλ.  $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$  [6]

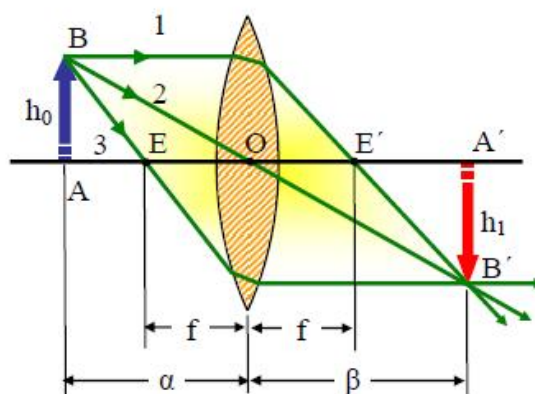
### 1.6.2 Σχηματισμός πραγματικού ειδώλου

Ως πραγματικά ορίζονται τα είδωλα που μπορούν να απεικονιστούν σε πέτασμα και διαμορφώνονται από την τομή των ακτίνων. Όταν ένα αντικείμενο τοποθετηθεί από τη μια πλευρά ενός συγκλίνοντα φακού και πίσω από την κύρια εστία του E τότε από την άλλη πλευρά του φακού θα σχηματιστεί ένα πραγματικό είδωλο (Σχήμα 19). Όσο το αντικείμενο πλησιάζει προς την εστία τόσο το είδωλό του θα μεγαλώνει (μεγέθυνση) και τόσο πιο μακριά θα σχηματίζεται από το φακό. Το αντίθετο συμβαίνει όταν το αντικείμενο απομακρύνεται από την εστία, δηλαδή το είδωλο μικραίνει και σχηματίζεται πιο κοντά στο φακό.

Γενικά, ο προσδιορισμός της θέσης του ειδώλου γίνεται με δυο τρόπους: από τη γραφική σύνθεση των ακτίνων και αριθμητικά από τον τύπο των λεππών φακών

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\beta} = \frac{1}{f}$$

όπου  $\alpha$  και  $\beta$  οι αποστάσεις του αντικειμένου και ειδώλου αντίστοιχα από το φακό [5]

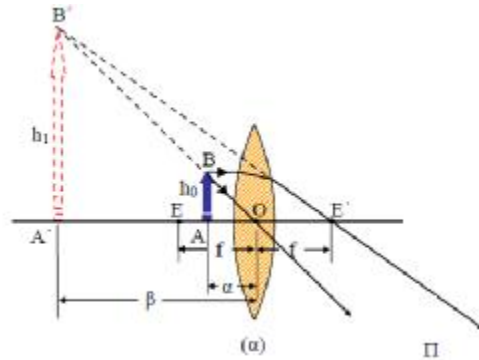


Σχήμα 19: Προσδιορισμός της θέσης και του ειδώλου

### 1.6.3 Σχηματισμός φανταστικού ειδώλου

Τα φανταστικά είδωλα δεν είναι πραγματικά, δεν μπορούν να απεικονιστούν σε πέταμα και διαμορφώνονται από τις προεκτάσεις των ακτινών. Φανταστικά είδωλα μπορούν να σχηματιστούν: (α) από συγκλίνοντα φακό αν το αντικείμενο τοποθετηθεί κοντά στο φακό και μέσα στην εστία και (β) από αποκλίνοντα φακό με το αντικείμενο τοποθετημένο σε οποιοδήποτε σημείο. Το γεγονός ότι ένα φανταστικό είδωλο δεν μπορεί να απεικονιστεί σε πέτασμα δεν σημαίνει ότι είναι και ανύπαρκτο, έχει συγκεκριμένη θέση στην οποία σχηματίζεται καθώς και συγκεκριμένο μέγεθος και μπορεί να παρατηρηθεί με το μάτι, αν κοιτάξουμε μέσα από το φακό. Στο Σχήμα 19 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των ακτινών των δυο περιπτώσεων. Στην πρώτη περίπτωση (Σχήμα 19α) ο φακός χρησιμοποιείται ως μεγεθυντικός φακός. Οι φωτεινές ακτίνες που ξεκινούν από το σημείο B θα διαθλαστούν από το συγκλίνοντα φακό, αλλά όχι αρκετά για να εστιάσουν στο ίδιο σημείο. Στο μάτι του παρατηρητή στο σημείο Π φαίνονται ως να προέρχονται από το σημείο B' πίσω από το φακό. Το σημείο B' αποτελεί την κορυφή ενός φανταστικού ειδώλου, ορθού και μεγαλύτερου του αντικειμένου. Στην περίπτωση αυτή το είδωλο έχει σχηματιστεί στην ίδια πλευρά του φακού που βρίσκεται και το αντικείμενο σε απόσταση β η οποία φέρει αρνητικό πρόσημο (-β). Η σχέση της ανάκλασης εξακολουθεί να ισχύει, λαμβάνοντας όμως υπόψη τη μεταβολή του πρόσημου του β, δηλαδή

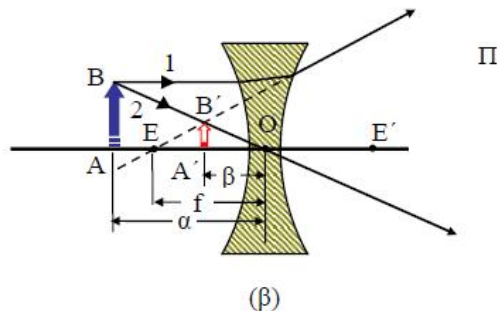
$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{-\beta} = \frac{1}{f}$$



Σχήμα 19: Το είδωλο που σχηματίζεται είναι ορθό και μεγαλύτερο του αντικειμένου

Στην περίπτωση του αποκλίνοντα φακού (Σχήμα 19β) το είδωλο θα είναι πάντα φανταστικό, πιο κοντά στο φακό και μικρότερο σε μέγεθος από το αντικείμενο. Στο μάτι του παρατηρητή στο σημείο Π οι ακτίνες φαίνονται ως να προέρχονται από το σημείο Β' πίσω από το φακό, αλλά πολύ κοντά του. Για τον προσδιορισμό της θέσης του ειδώλου παρατηρούμε ότι η ακτίνα 1 που είναι παράλληλη προς τον κύριο άξονα του φακού θα πρέπει να διαθλαστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εμφανίζεται ως να προέρχεται από το σημείο Ε ενώ η ακτίνα 2 που διέρχεται από το οπτικό κέντρο Ο δεν εκτρέπεται. Επειδή οι δυο αυτές ακτίνες συναντώνται στο Β', το είδωλο που θα σχηματιστεί εκεί στην ίδια πλευρά του φακού που βρίσκεται και το αντικείμενο και σε απόσταση β η οποία φέρει αρνητικό πρόσημο (-β). Στην περίπτωση του αποκλίνοντα φακού η σχέση ανάκλασης διαμορφώνεται ως [5]

$$\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{-\beta} = -\frac{1}{f}$$

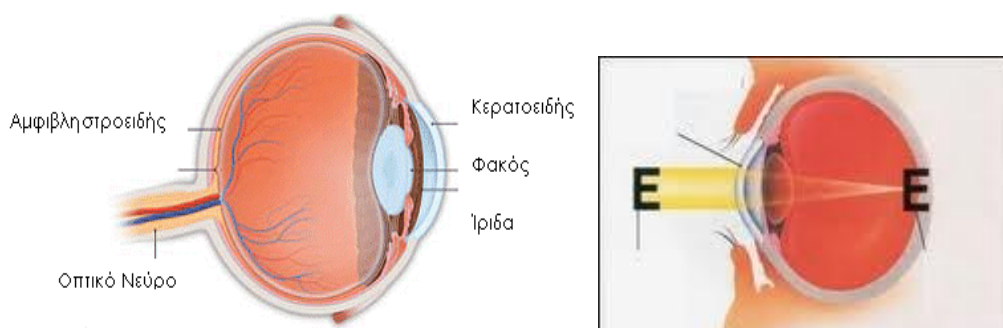


Σχήμα 19β: Το είδωλο είναι ορθό και μικρότερο του αντικειμένου

#### 1.6.4 Εφαρμογή φακών η λειτουργία του οφθαλμού

Κύρια είσοδος πληροφορίας από τον περιβάλλοντα χώρο προς τον εγκέφαλο ιδιαίτερα για τον άνθρωπο, αλλά και για την πλειονότητα των ζώων, είναι ο οφθαλμός. Παρά την πολυπλοκότητα της κατασκευής του, στηρίζει τη λειτουργία του σ' ένα απλό φακό, του οποίου όμως η εστιακή απόσταση προσαρμόζεται ταχύτατα ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ανάγκες της παρατήρησης την κάθε χρονική στιγμή. Οι οπτικές ακτίνες που ξε-

τα αντικείμενα του περιβάλλοντα χώρου εισέρχονται μέσω ενός φυσικού διαφράγματος, την κόρη (pupil) και αφού προσπίπτουν στο σύστημα κερατοειδούς χιτώνα (cornea)-φακού (lens), εστιάζονται επάνω στον αμφιβληστροειδή χιτώνα (retina) του οποίου η πίσω επιφάνεια καλύπτεται από λεπτό φλοιό-πλέγμα νευρικών ινών. Ο αμφιβληστροειδής περιέχει μικροσκοπικές δομές που ονομάζονται ραβδία (rodes) και κωνία (cones) που δέχονται τη φωτεινή εικόνα και μεταφέρουν την πληροφορία μέσω του οπτικού νεύρου (optic nerve) στον εγκέφαλο. Το σχήμα του φακού μπορεί να μεταβάλλεται ελαφρά με τη βοήθεια του περιφερικού μυ (ciliary muscle). Όταν το μάτι είναι αφημένο να παρατηρεί αντικείμενο σε πολύ μεγάλη απόσταση, ο μυς ξεκουράζεται και το σύστημα κερατοειδούς-φακού έχει τη μέγιστη του εστιακή απόσταση που είναι περίπου  $2.5\text{cm}$ , όση είναι η απόσταση από τον κερατοειδή στο αμφιβληστροειδή. Όταν το παρατηρούμενο αντικείμενο βρίσκεται κοντύτερα στο μάτι σε πεπερασμένη απόσταση ο περιφερειακός μυς αυξάνει ελαφρά την καμπυλότητα του φακού, δηλαδή μειώνει την εστιακή του απόσταση έτσι ώστε το είδωλο να εστιασθεί πάλι στην επιφάνεια του αμφιβληστροειδούς. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται προσαρμογή. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται πολύ κοντά στο μάτι, ο φακός δεν μπορεί να εστιάσει τις ακτίνες του ειδώλου στον αμφιβληστροειδή και το είδωλο είναι συγκεχυμένο. Το πλησιέστερο στο μάτι σημείο που μπορεί να βρίσκεται ένα αντικείμενο ώστε να μπορεί να σχηματίσει ο οφθαλμός ευκρινές είδωλό του, ονομάζεται εγγύς σημείο (near point). Η απόσταση του εγγύς σημείου από το μάτι ονομάζεται απόσταση ευκρινούς οράσεως και δεν είναι ίδια σε όλους τους ανθρώπους, εξαρτώμενη κυρίως από την ηλικία. Η μέση απόσταση ευκρινούς οράσεως θα θεωρείται ίση με  $25\text{cm}$ , όπου αυτό χρειάζεται και θα συμβολίζεται με  $\delta$ .



Σχήμα 20: Η τομή ενός οφθαλμού και οι απεικόνιση των κύριων μερών του καθώς και η λειτουργία του όταν σε αυτόν προσπίπτει παράλληλη δέσμη φωτός

Ένας οφθαλμός συχνά παρουσιάζει σφάλματα λειτουργίας ο οφθαλμός ενός πρεσβύωπα (farsighted) όταν παρατηρεί αντικείμενα σε πολύ κοντινές αποστάσεις, εστιάζει και σχηματίζει το είδωλο πίσω από τον αμφιβληστροειδή. Αυτό οφείλεται στη γήρανση του περιφερειακού μυ, που έχει χάσει την προσαρμοστικότητά του. Η διόρθωση γίνεται με τη χρήση ενός συγκλίνοντα φακού. Ο οφθαλμός ενός μύωπα (nearsighted) εστιάζει το είδωλο ενός αντικειμένου, που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση, μπροστά από τον αμφιβληστροειδή. Η μυωπία διορθώνεται με τη βοήθεια ενός αποκλίνοντα φακού.

Ένα άλλο σφάλμα οπτικής παρατήρησης είναι εκείνο του αστιγματισμού (astigmatism). Οφείλεται στο ότι ο αμφιβληστροειδής δεν έχει τελείως σφαιρικό σχήμα, αλλά παρουσιάζει διαφορετικές καμπύλες σε διαφορετικά επίπεδα. Η διόρθωση γίνεται με τη χρησιμοποίηση φακών που το σχήμα τους είναι περισσότερο κυλινδρικό παρά σφαιρικό.

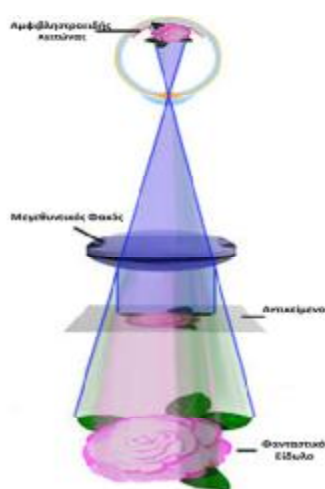
2

## **ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ**



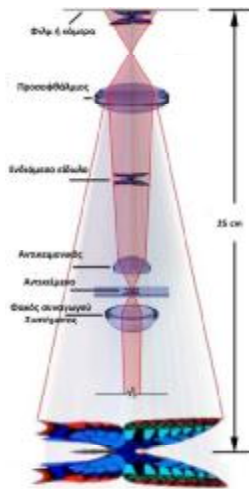
## 2.1 Μικροσκόπιο

Το μικροσκόπιο είναι όργανο, σχεδιασμένο να δημιουργεί μεγεθυμένες εικόνες μικρών αντικειμένων, να διαχωρίζει λεπτομέρειες της εικόνας οι οποίες δεν είναι δυνατό να παρατηρηθούν με γυμνό μάτι και να μεταφέρει αυτά τα στοιχεία για οπτική παρατήρηση ή φωτογραφική καταγραφή τους. Στο ανθρώπινο μάτι το είδωλο δημιουργείται στον αμφιβληστροειδή. Οι διαστάσεις ενός αντικειμένου, που παρατηρούμε με το μάτι, αυξάνονται καθώς αυτό πλησιάζει στο μάτι μας. Υπάρχει ωστόσο μία ελάχιστη απόσταση ευκρινούς οράσεως στην οποία ένα αντικείμενο μπορεί να παρατηρηθεί ευκρινώς και άκοπα από το μάτι. Η απόσταση αυτή είναι 25 cm για τους νέους και αυξάνεται με την αύξηση της ηλικίας.



Σχήμα 2.1: Δημιουργία ειδώλου στον αμφιβληστροειδή του οφθαλμού

Το μέγεθος του ειδώλου που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή εξαρτάται από τη γωνία οράσεως  $\theta$ , τη γωνία με την οποία δηλαδή βλέπει το μάτι το αντικείμενο. Καθώς το αντικείμενο πλησιάζει το μάτι, η γωνία  $\theta$  αυξάνεται και το αντικείμενο φαίνεται μεγαλύτερο. Η  $\theta$  έχει τη μεγαλύτερη τιμή της όταν το αντικείμενο βρίσκεται στα 25 cm. Θέλοντας να αυξήσουμε τη γωνία  $\theta$ , επομένως και το μέγεθος του αντικειμένου, χρησιμοποιούμε το μεγεθυντικό φακό. Ο μεγεθυντικός φακός (ένας συγκλίνοντας δηλαδή φακός) είναι η απλούστερη διάταξη με την οποία μπορούμε να επιτύχουμε μεγέθυνση. Ο φακός αυτός τοποθετείται μεταξύ του ματιού και του αντικειμένου και αυξάνει την γωνία υποδοχής και επομένως και το μέγεθος του σχηματιζόμενου ειδώλου. Έτσι το μάτι αντιλαμβάνεται ένα φανταστικό είδωλο (μεγαλύτερο του πραγματικού) το οποίο βρίσκεται σε μεγαλύτερη απόσταση από αυτήν στην οποία βρίσκεται το πραγματικό αντικείμενο. Για ακόμη μεγαλύτερες μεγεθύνσεις χρησιμοποιούμε ένα σύστημα φακών. Σε ένα τέτοιο σύστημα βασίζεται και η αρχή λειτουργίας του μικροσκοπίου (σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Σύστημα φακών που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη μεγέθυνση

## 2.2 Σύνθετο μικροσκόπιο

### 2.2 1 Γενικές αρχές

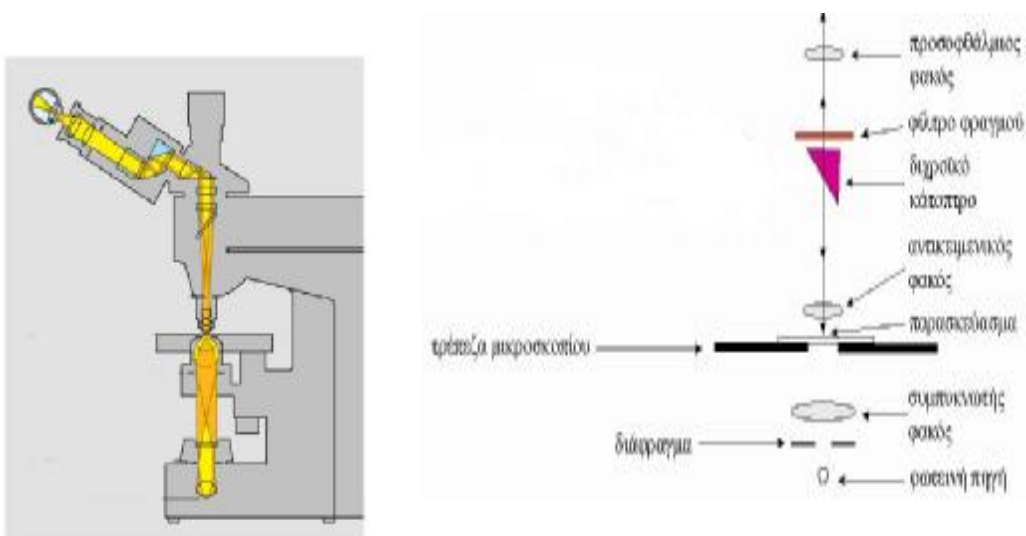
Ως οπτικά ή φωτονικά αναφέρονται τα μικροσκόπια εκείνα όπου χρησιμοποιούν το τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που είναι ορατό, δηλαδή από 380 – 760 nm. Ανάλογα με την διάταξη των φακών και τον τρόπο παρατήρησης τα οπτικά μικροσκόπια διακρίνονται σε μικροσκόπια φωτεινού πεδίου, αντίθεσης φάσεως, μικροσκόπια σκοτεινού πεδίου, πολωτικά μικροσκόπια, μικροσκόπια αντίθεσης διαφορικής συμβολής, μικροσκόπια φθορισμού και άλλα.

Η εφεύρεση του πρώτου σύνθετου μικροσκοπίου έχει αποδοθεί στους Ολλανδούς Χανς Γιάνσεν, Ζακαρίας Γιάνσεν και Χανς Λιπερσεί. Το 17ο αιώνα χρησιμοποιήθηκε συστηματικά από τον φυσικό φιλόσοφο Ρόμπερτ Χουκ, ο οποίος δημοσίευσε το έργο *Micrographia* (1665), με εικόνες γνωστών αντικειμένων και εντόμων σε μικροσκοπική κλίμακα. Τα μικροσκόπια επέδρασαν σημαντικά στην ιστορία της βιολογίας, τουλάχιστον την εποχή που άρχισαν να χρησιμοποιούνται και συντέλεσαν στην ανακάλυψη των μικροβίων καθυστερώντας έτσι την κατάρριψη της θεωρίας της αυτόματης γέννησης. Τα πρώτα μικροσκόπια ήταν οπτικά, δηλαδή συνδύαζαν διαφόρων ειδών φακούς για μεγέθυνση, αποτελώντας ουσιαστικά άμεση εξέλιξη των μεγεθυντικών φακών. Τον 20ό αιώνα εμφανίστηκαν και τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια και αργότερα τα μικροσκόπια ηλεκτρονικής σάρωσης, που μπορούν να υπολογίσουν και να οπτικοποιήσουν το βάθος.



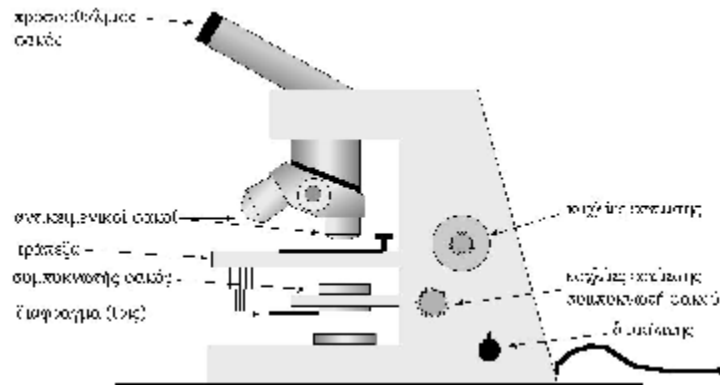
Σχήμα 2.3: Ένα σύνθετο μικροσκόπιο του 17ου αιώνα, από μια χάραξη μέσα Robert Hooke *Micrographia*.

Το σύνθετο μικροσκόπιο είναι ένα οπτικό όργανο που χρησιμοποιείται για την παρατήρηση, υπό μεγέθυνση, αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στον παρατηρητή. Το φως διέρχεται από το σύστημα φωτισμού στο συναγωγό σύστημα, ένα σύστημα φακών που επιτρέπει τον ομοιόμορφο φωτισμό του παρασκευάσματος. Με τη βοήθεια διαφράγματος ρυθμίζεται κατάλληλα η ένταση της δέσμης. Το σύστημα των δύο φακών που συμμετέχουν στη διαδικασία σχηματισμού του ειδώλου του αντικειμένου αποτελείται από τον αντικειμενικό φακό, που είναι κοντά στο προς παρατήρηση αντικείμενο και από τον προσοφθάλμιο που είναι κοντά στο μάτι του παρατηρητή. Ο αντικειμενικός δίνει το είδωλο πραγματικό αντεστραμμένο και μεγεθυμένο κοντά στο εστιακό επίπεδο του προσοφθάλμιου φακού. Ο προσοφθάλμιος φακός λειτουργεί κατά ανάλογο τρόπο με ένα φακό μεγεθύνσεως δίνοντας ένα φανταστικό μεγεθυμένο είδωλο που παραμένει αντεστραμμένο. Οι αντικειμενικοί φακοί είναι τοποθετημένοι σε μια υποδοχή η οποία περιστρέφεται έτσι ώστε να γίνεται εύκολα η αντικατάστασή τους κατά τη διάρκεια της παρατήρησης και να μεταβάλλεται η μεγέθυνση (σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Εσωτερική διάταξη συστήματος φακών

## 2.2.2 Μέρη σύνθετου μικροσκοπίου



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση τυπικού μικροσκοπίου συνοδευόμενο από τα μέρη του.

**1.** Προσοφθάλμιος φακός τοποθετημένος στο πάνω μέρος του σωλήνα. Υπάρχουν τέσσερις τύποι: Huygens, Ramsden, Kellner και αντισταθμιστικοί (compensating). Οι τελευταίοι είναι και οι πιο σύγχρονοι και επιτρέπουν την παρατήρηση χωρίς το μάτι να είναι σε επαφή με φακό. Ο χαραγμένος αριθμός π.χ. 10X δείχνει τη μεγέθυνση του φακού που αν τον πολλαπλασιάσουμε με τη μεγέθυνση του αντικειμενικού φακού μας δίνει τη τελική μεγέθυνση του μικροσκοπίου. Σε όλους σχεδόν τους προσοφθάλμιους φακούς υπάρχει δυνατότητα τοποθέτησης κλίμακας μέτρησης μέσα στο φακό. Ο σωλήνας στην κορυφή του οποίου βρίσκεται ο προσοφθάλμιος φακός (κατακόρυφος στα παλιότερα μικροσκόπια και υπό γωνία στα πιο σύγχρονα), μπορεί να είναι μονός, στα μονοφθάλμια μικροσκόπια και διπλός στα διοφθάλμια για πιο άνετη (όχι στερεοσκοπική) παρατήρηση. Ο σωλήνας συνήθως μπορεί να αφαιρεθεί για να τοποθετηθεί σωλήνας άλλου τύπου π.χ. σωλήνας με υποδοχή για φωτογραφική μηχανή video camera κλπ, ή να περιστραφεί για χρήση του μικροσκοπίου από εμπρός ή από πίσω.

**2.** Περιστρεφόμενη κεφαλή με τους αντικειμενικούς φακούς. Συνήθως έχει θέσεις για 3 - 6 φακούς. Σε ορισμένα ερευνητικά μικροσκόπια η περιστρεφόμενη κεφαλή μπορεί να αφαιρεθεί εύκολα και να αντικατασταθεί με άλλη που έχει διαφορετικό συνδυασμό φακών. Έτσι σχετικά εύκολα μπορεί το μικροσκόπιο να μετατραπεί σε αντίθεσης φάσης, φθορισμού κλπ.

**3.** Η τράπεζα του μικροσκοπίου που μπορεί να είναι τετράγωνη σταθερή ή στρογγυλή περιστρεφόμενη (για πολωτικά μικροσκόπια) και με σύστημα μικρομετρικών κοχλιών για τη μετακίνηση του παρασκευάσματος. Το υλικό κατασκευής της τράπεζας είναι συνήθως κάποιο μέταλλο ενώ σε κάποια σύγχρονα καλά μικροσκόπια μπορεί να είναι από κεραμικό που είναι ανθεκτικό σε διάφορες διαβρωτικές ουσίες. Σε ορισμένα μικροσκόπια υπάρχει μηχανισμός αυτόματης μετακίνησης της αντικειμενοφόρου πλάκας με δυνατότητα συστηματικής σάρωσής της ή και ακόμα με τη δυνατότητα εναλλαγής αντικειμενοφόρων πλακών. Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα

χρήσιμα σε αυτοματοποιημένες αιματολογικές και κυτταρολογικές εξετάσεις και βιοψίες.

4. Μοχλός ρύθμισης της ίριδας (διαφράγματος). Η ίριδα περιορίζει τον φωτεινό κώνο που φωτίζει το παρασκεύασμα έτσι που αυτό να δέχεται τις ακτίνες που δεν προέρχονται από διάθλαση. Η ίριδα δεν πρέπει ποτέ να χρησιμοποιείται για την αύξηση ή ελάττωση της φωτεινής έντασης. Η ρύθμισή της είναι πολύ σημαντική κυρίως όταν πρόκειται να φωτογραφίσουμε το παρασκεύασμα. Ο τρόπος ρύθμισης διαφέρει από κατασκευαστή σε κατασκευαστή και θα πρέπει πάντα να συμβουλευόμαστε τις οδηγίες χρήσης του οργάνου.

5. Συγκεντρωτής (ή συμπυκνωτής) φακός. Σκοπός του εξαρτήματος αυτού είναι η εστίαση της φωτεινής πηγής στο επίπεδο του παρασκευάσματος. Η κακή ρύθμιση του συμπυκνωτή έχει σαν αποτέλεσμα τον κατά πολύ περιορισμό της διακριτικής ικανότητας του οργάνου. Για συνεχή παρατήρηση σε χαμηλή μεγέθυνση (π.χ. 4Χή10Χ) ο φακός αυτός μπορεί να αφαιρεθεί.

6. Κουμπί εστίασης (μεγάλο εξωτερικό για αδρή και μικρό στο κέντρο για λεπτή εστίαση). Σε πολλά μικροσκόπια υπάρχουν ξεχωριστά αυτοί οι δυο κοχλίες. Η κλίμακα που είναι χαραγμένη στο μικρομετρικό κοχλία εστίασης μας δείχνει την κατακόρυφη μετακίνηση του αντικειμενικού φακού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση του ύψους (βάθους) ενός παρασκευάσματος.

7. Βάση μικροσκοπίου με (συνήθως) ενσωματωμένο σύστημα φωτισμού. Στα περισσότερα μικροσκόπια σήμερα υπάρχει ρεοστάτης για τη ρύθμιση της έντασης του φωτός. Προσοχή όμως γιατί αλλάζοντας τη φωτεινή ένταση με αυτόν τον τρόπο αλλάζουν και τα μήκη κύματος που απαρτίζουν το φως. Αυτό δεν επηρεάζει την απλή παρατήρηση ή την ασπρόμαυρη φωτογράφιση, επηρεάζει όμως σημαντικά την έγχρωμη φωτογράφιση. Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιούμε τον φωτισμό στή μέγιστη ένταση και για τον περιορισμό της φωτεινής έντασης χρησιμοποιούμε ουδέτερα φίλτρα.[15]

### **2.3 Μικροσκόπιο σκοτεινού πεδίου (dark field).**

Αυτό το μικροσκόπιο είναι ίδιο με το φωτεινού πεδίου με μόνη διαφορά ότι στο συγκεντρωτή φακό υπάρχει ένας αδιαφανής δίσκος που σκεπάζει το κέντρο του φακού με αποτέλεσμα το παρασκεύασμα να φωτίζεται μόνο από πολύ πλάγιες ακτίνες που δεν εισέρχονται στον αντικειμενικό φακό παρά μόνο αν υποστούν διάθλαση μέσα στο παρασκεύασμα. Έτσι η εικόνα που παρατηρούμε είναι φωτεινό αντικείμενο (από διάθλαση των ακτινών μέσα στο παρασκεύασμα) σε σκοτεινό πεδίο. Η πορεία των ακτινών φαίνεται στο σχήμα 2.6. Αυτό το είδος μικροσκοπίου συνιστάται για τη παρατήρηση μονοκύτταρων οργανισμών που θέλουμε να τους παρατηρήσουμε ζωντανούς ή/και αχρωμάτιστους. Σήμερα τα μικροσκόπια αυτά έχουν επισκιαστεί από τα μικροσκόπια αντίθεσης φάσης.



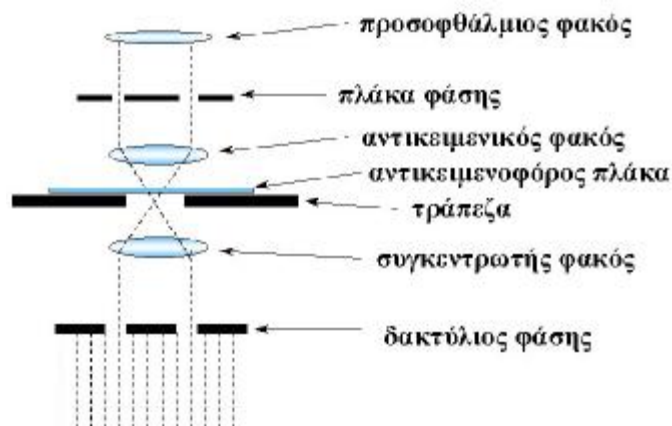
Σχήμα 2.6: Διάγραμμα της διάταξης των φακών και της πορείας των φωτεινών ακτινών στο μικροσκόπιο σκοτεινού πεδίου.

## 2.4 Μικροσκόπιο αντίθεσης φάσης (phase contrast).

Η πορεία των φωτεινών ακτινών σ' ένα μικροσκόπιο αντίθεσης φάσης φαίνεται στο σχήμα 2.7. Εδώ το παρασκεύασμα φωτίζεται από ένα κενό φωτεινό κώνο. Αυτός ο φωτεινός κώνος παράγεται από το δακτύλιο φάσης που βρίσκεται στο επίπεδο της ίριδας του συγκεντρωτή φακού και ο οποίος είναι ορατός μέσα από τον αντικειμενικό φακό όταν ο δακτύλιος είναι σωστά ρυθμισμένος.

Αν στο επίπεδο της εστιακής απόστασης του αντικειμενικού φακού τοποθετηθεί η πλάκα φάσης, που καθυστερεί τις ακτίνες κατά  $1/4$  του μήκους κύματος σε σχέση με τις απ' ευθείας φωτεινές ακτίνες, τότε σχηματίζεται μια εικόνα από την αντίθεση που παράγεται από τη συμβολή των δυο φωτεινών ακτίνων. Η ρύθμιση του δακτυλίου και της πλάκας φάσης για κάθε αντικειμενικό φακό είναι απαραίτητο να γίνεται με πολύ σχολαστικότητα για να έχουμε καλή εικόνα αλλιώς η εικόνα είναι ένας απαράδεκτος συνδυασμός σκοτεινού πεδίου και αντίθεσης φάσης. Θετική λέμε την αντίθεση που το αντικείμενο φαίνεται φωτεινό σε σκοτεινό πεδίο ενώ το αντίθετο, που είναι και το πιο συνηθισμένο, το λέμε αρνητική αντίθεση.

Για σωστή παρατήρηση το παρασκεύασμα πρέπει να τοποθετηθεί για παρατήρηση σε μέσο με δείκτη διάθλασης όσο γίνεται πιο διαφορετικό από εκείνο του παρασκευάσματος. Αν ο δείκτης διάθλασης είναι ο ίδιος το παρασκεύασμα δε θα φαίνεται καθόλου



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα των φωτεινών ακτινών στο μικροσκόπιο αντίθεσης φάσης.

Αυτός ο τύπος μικροσκοπίας είναι πολύ χρήσιμος κυρίως για τη παρατήρηση μονοκύτταρων οργανισμών, μικροοργανισμών, φυκών, μυκήτων, κυτταροκαλλιεργειών, κλπ. που θέλουμε να τα παρατηρήσουμε ζωντανά. Δε συνιστάται για τη παρατήρηση μονιμοποιημένων και χρωματισμένων τομών ιστών, εκτός από ορισμένες περιπτώσεις όπως είναι η συστηματική ταξινόμηση γυρεόκοκκων

Οι αντικειμενικοί φακοί αυτών των μικροσκοπίων έχουν χαραγμένα τα χαρακτηριστικά π.χ. Ph 2 ή Ph 3 που σημαίνει ότι ο φακός είναι για μικροσκοπία αντίθεσης φάσης με αντίστοιχο δακτυλίδι συγκεντρωτή No 2 ή No 3.[15]

## 2.5 Πολωτικό μικροσκόπιο (polarised).

Είναι ένα απλό μικροσκόπιο στο οποίο όμως το παρασκεύασμα φωτίζεται με πολωμένο φως. Το αποτέλεσμα είναι να μπορούμε να παρατηρήσουμε παρασκευάσματα που έχουν διαφορετική διαπερατότητα στο πολωμένο φως λόγω φαινομένων οπτικής ανισοτροπίας. Τα μικροσκόπια αυτά είναι χρήσιμα κυρίως για τη παρατήρηση τροφίμων ορυκτών και γενικά παρασκευασμάτων που μας ενδιαφέρει η κρυσταλλική τους δομή. Χαρακτηριστικό των μικροσκοπίων αυτών είναι η κυκλική τράπεζα που μπορεί να περιστραφεί κατά  $360^{\circ}$  ενώ οι φακοί τους έχουν χαραγμένη τη λέξη "POL"

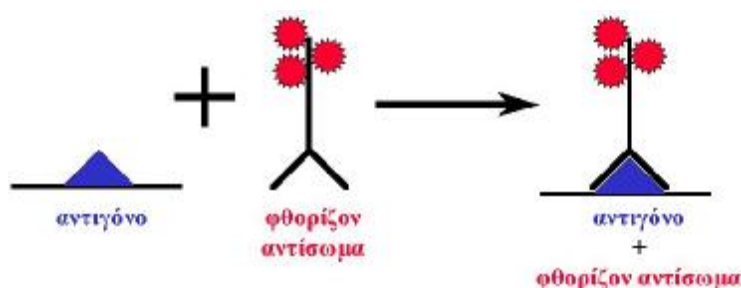
## 2.6 Μικροσκόπιο αντίθεσης διαφορικής συμβολής (differential interference contrast, Nomarski).

Το είδος αυτής της μικροσκοπίας βρίσκει περιορισμένες εφαρμογές συνήθως στη παρατήρηση κυτταρικών οργανιδίων χωρίς χρώση και οι εικόνες που βλέπουμε έχουν μια χαρακτηριστική ανάγλυφη εμφάνιση σε τόνους του γκρι. Είναι ένα είδος διαφορικής συμβολής χρησιμοποιώντας ειδικά πολωτικά πρίσματα τοποθετημένα σύμφωνα με τη σχεδίαση Nomarski. Αυτό το μικροσκόπιο αποτελεί εξέλιξη του μικροσκοπίου συμβολής ή συμβολομετρίας που η μόνη χρήση του ήταν η μέτρηση του όγκου κυττάρων και κυτταρικών οργανιδίων.

## 2.7 Μικροσκόπιο φθορισμού (fluorescent).

Φθορισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ορισμένα σώματα εκπέμπουν φως όταν αυτά διεγείρονται από κάποια ακτινοβολία. Η εκπομπή φωτός σταματάει αμέσως με τη παύση της διεγείρουσας ακτινοβολίας. Μικροσκοπία φθορισμού είναι η μελέτη ουσιών που μπορούν να διεγερθούν και να φθορίσουν. Αν και είναι αρκετές δεκαετίες από τότε που πρωτοχρησιμοποιήθηκαν αυτά τα μικροσκόπια, τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει δώσει μια νέα ώθηση στις επιστήμες που τα χρησιμοποιούν. Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που παράγεται (φθορισμός) είναι μεγαλύτερο από εκείνο της διεγείρουσας ακτινοβολίας (νόμος του Stokes). Επομένως μια φθορίζουσα ουσία μπορεί να διεγερθεί με μια ακτινοβολία της περιοχής του υπεριώδους που είναι αόρατη και να παραχθεί μια ακτινοβολία που να είναι ορατή. Το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιείται στη μικροσκοπία φθορισμού για τη παρατήρηση ουσιών ή κυτταρικών δομών που είτε φθορίζουν από τη φύση τους είτε γίνονται φθορίζουσες με τη χρήση χημικών ουσιών, "χρωστικών", που φθορίζουν.

Υπάρχουν στη φύση ουσίες που έχουν την ιδιότητα να φθορίζουν όπως είναι η χλωροφύλλη, μερικά έλαια και κηροί. Αυτές οι ουσίες λέμε ότι εμφανίζουν "πρωτογενή φθορισμό" ή "αυτοφθορισμό". Οι περισσότερες όμως ουσίες ή κυτταρικές δομές που μας ενδιαφέρουν επιστημονικά δεν εμφανίζουν "πρωτογενή φθορισμό". Έτσι αυτά τα παρασκευάσματα θα πρέπει να χρωματισθούν για να μας δώσουν "χρήσιμο" φθορισμό. Στόχος μας είναι ο φθορισμός ορισμένων μόνο περιοχών, ουσιών ή οργανιδίων των παρασκευασμάτων. Ο εξειδικευμένος αυτός φθορισμός μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση φθοριοχρωμάτων. Οι ουσίες αυτές χρησιμοποιούνται όπως ακριβώς και οι συνηθισμένες ιστολογικές χρωστικές. Ο φθορισμός που παρατηρείται στα παρασκευάσματα που έχουν χρωσθεί με φθοριοχρώματα αναφέρεται ως "δευτερογενής φθορισμός". Όταν το φθοριόχρωμα έχει συνδεθεί με κάποιο αντίσωμα που στη συνέχεια συνδέεται με το αντιγόνο και έτσι κάνει το τελευταίο ορατό, τότε η τεχνική αναφέρεται σαν ανοσοφθορισμός (σχήμα 2.8). Η τεχνική αυτή, αν και όχι τόσο νέα, επινοήθηκε το 1950 από τους Coons και Kaplan, τα τελευταία χρόνια έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις βιοϊατρικές επιστήμες κυρίως για διαγνωστικούς σκοπούς, λόγω της δημιουργίας καθαρών και μονοκλωνικών αντισωμάτων.

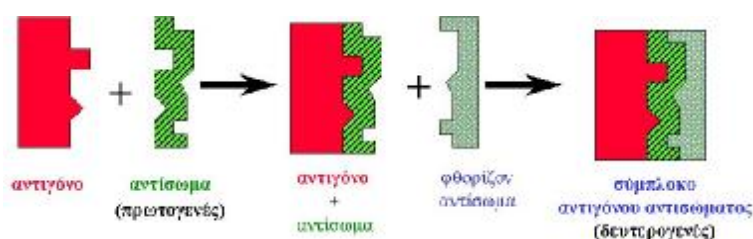


Σχήμα 2.8: Σύνδεση αντιγόνου με φθορίζον αντίσωμα.

Μια παραλλαγή της μεθόδου του ανοσοφθορισμού είναι και η τεχνική sandwich όπου το φθοριόχρωμα είναι ήδη συνδεδεμένο με ένα δευτερογενές



αντίσωμα το οποίο στη συνέχεια προσκολλάται στο σύμπλοκο αντιγόνο / πρωτογενές αντίσωμα. (σχήμα 2.9). Από πλευράς κατασκευής το μικροσκόπιο φθορισμού είναι ένα κοινό μικροσκόπιο στο οποίο όμως το παρασκεύασμα μπορεί να φωτίζεται εκτός από το κλασσικό τρόπο και με υπεριώδη ακτινοβολία. Οι φακοί των μικροσκοπίων αυτών είναι ειδικής κατασκευής, από γυαλί που δεν εμφανίζει "αυτοφθορισμό", και έχουν χαραγμένη πάνω τους τη λέξη Fluor ή Ultrafluor, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν και για παρατήρηση σε διάταξη φωτεινού πεδίου. Ανάλογα με την τοποθέτηση της πηγής υπεριώδους φωτός τα μικροσκόπια φθορισμού διακρίνονται σε δυο τύπους. α. Το μικροσκόπιο φθορισμού διελεύσεως (transmitted light fluorescence) που είναι και το παλαιότερο, και β. το μικροσκόπιο φθορισμού προσπίπτοντος ακτινοβολίας (epi-fluorescence).



Σχήμα 2.9: Σύνδεση αντιγόνου με το αντίσωμα και στη συνέχεια με φθορίζον αντίσωμα (τεχνική sandwich).

Από τους δυο τύπους, αυτός που έχει επικρατήσει είναι ο δεύτερος για τους πιο κάτω λόγους:

α. Ο αντικειμενικός φακός λειτουργεί και σαν συμπυκνωτής με αποτέλεσμα να μην χρειάζεται ρύθμιση. Η πορεία των φωτεινών ακτίνων σε αυτόν τον τύπο μικροσκοπίου φαίνονται στο σχήμα 2.10..

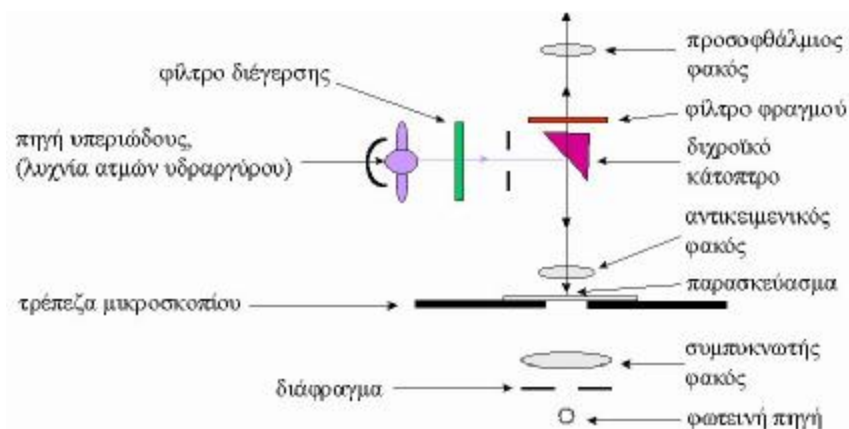
β. Στο μικροσκόπιο φθορισμού διελεύσεως ο φθορισμός παράγεται στα χαμηλότερα τμήματα του παρασκευάσματος με αποτέλεσμα κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από το παρασκεύασμα αυτή να διαχέεται. Έτσι με αυτό το μικροσκόπιο μπορούμε να παρατηρήσουμε παρασκευάσματα με μικρό μόνο σχετικά πάχος. Αντίθετα στο μικροσκόπιο προσπίπτοντος ακτινοβολίας επειδή και ο φωτισμός και η παρατήρηση γίνονται από την ίδια πλευρά του παρασκευάσματος η εικόνα από φθορισμό είναι πολύ πιο φωτεινή, με λιγότερο θόρυβο και κατά συνέπεια καλύτερης ποιότητας.

γ. Στο μικροσκόπιο φθορισμού προσπίπτουσας ακτινοβολίας, η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η ακτινοβολία από φθορισμό δεν συγχέονται. Η πρώτη οδεύει μέσα από το παρασκεύασμα προς τα κάτω και χάνεται, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει την εικόνα από φθορισμό.

Το συνεστιακό μικροσκόπιο μπορεί να θεωρηθεί μια εξελιγμένη μορφή μικροσκοπίου φθορισμού όταν χρησιμοποιείται με τον κατάλληλο τρόπο. Μερικά από τα πλεονεκτήματα της παρατήρησης ή διάγνωσης με μικροσκόπιο φθορισμού είναι:

1. Ευαισθησία. Απαιτείται πολύ μικρή συγκέντρωση του φθοριοχρώματος (διαλύσεις 1/10.000 -1/100.000) με αποτέλεσμα τη προστασία του παρασκευάσματος από τεχνητές αλλοιώσεις (artefacts), κάτι ιδιαίτερα σημαντικό σε ανοσοβιολογικές τεχνικές όπου οι διάφορες χημικές ουσίες μπορεί να επηρεάσουν την αντιγονικότητα του αντιορού.
2. Εξειδίκευση. Οι σύγχρονες μέθοδοι προετοιμασίας παρασκευασμάτων, τα νέα φθοριοχρώματα και τα φίλτρα δίνουν ένα μεγάλο βαθμό εξειδίκευσης με αποτέλεσμα η τεχνική να είναι πολύ αξιόπιστη.
3. Ταχύτητα και ευκολία. Τα παρασκευάσματα μπορούν να παρατηρηθούν χωρίς σχεδόν καμία προετοιμασία.
4. Οι ίδιες τεχνικές μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους κλάδους της βιοϊατρικής όπως είναι η ιολογία, μυκητολογία, κυτταρολογία, ανοσοβιολογία, παρασιτολογία κλπ.

Αξιοπιστία Η μέθοδος είναι πολύ αξιόπιστη λόγω της ευαισθησίας και της εξειδίκευσης των φθοριοχρωμάτων με αποτέλεσμα την ελάττωση των λανθασμένων διαγνώσεων ακόμα και από προσωπικό που δεν έχει μεγάλη εμπειρία.



Σχήμα 2.10: Διάταξη φωτεινών ακτινών μικροσκοπίου με υπεριώδη φωτισμό.

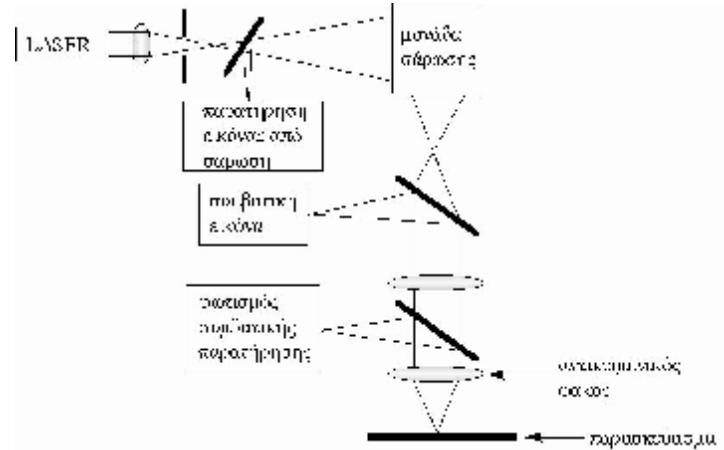
## 2.8 Συνεστιακό μικροσκόπιο σάρωσης με ακτίνες Laser. (Confocal Laser Scanning Microscope).

Η συνεστιακή μικροσκοπία σάρωσης αν και βρίσκεται σε πολύ γρήγορη εξέλιξη τα τελευταία χρόνια, η αρχή της λειτουργίας της πρωτοπεριγράφηκε από τον Minsky το 1961. Αντίθετα με το κλασικό τρόπο φωτισμού και παρατήρησης που γίνεται στο κοινό μικροσκόπιο, η συνεστιακή μικροσκοπία στηρίζεται στο γεγονός ότι και ο φωτισμός και η παρατήρηση είναι περιορισμένα σε ένα σημείο του παρασκευάσματος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη τοποθέτηση ενός πολύ μικρού διαφράγματος, που μπορεί να είναι μικρότερο από 10 μm, στους οπτικούς άξονες του αντικειμενικού και του

συγκεντρωτή φακού. Η εικόνα σχηματίζεται με σάρωση όλων των σημείων του πεδίου του μικροσκοπίου. Αρχικά το παρασκεύασμα παρατηρείται με φως ορατού μήκους κύματος ή με υπεριώδεις και στη συνέχεια επιλέγεται η ακτίνα Laser αργού (με πιο χρήσιμα peaks στα 488 και 514 nm που συμπίπτουν με το μήκος κύματος που διεγείρει στο μέγιστο τη φλουορεσκίνη και τη ροδαμίνη) ή ηλίου-νέου (με peak στα 633 nm για άλλα φθοριοχρώματα) ή και με τα δυο συγχρόνως. Οι εικόνες δεν είναι άμεσα ορατές (real time), αλλά η παρατήρηση γίνεται στην οθόνη του μικροϋπολογιστή του μικροσκοπίου και φυσικά μπορούν να ψηφιοποιηθούν για αποθήκευση ή εκτύπωση (σχήμα 2.11).

Το σημαντικότερο πλεονεκτήματα του συνεστιακού μικροσκοπίου είναι ότι σε αυτό ελαττώνονται κατά πολύ τα μηνύματα από τα μη εστιασμένα σημεία του παρασκευάσματος με αποτέλεσμα να ενισχύεται η αντίθεση (contrast) του παρασκευάσματος. Αυτό το χαρακτηριστικό επιτρέπει τη σάρωση του παρασκευάσματος όχι μόνο ως προς τους άξονες x και y αλλά και ως προς τον z (βάθος) με αποτέλεσμα να παίρνουμε καλά εστιασμένες τρισδιάστατες εικόνες που όμως δεν παρατηρούνται άμεσα, αλλά μέσω μικροϋπολογιστή με ειδικά προγράμματα (software) που κάνουν ψηφιοποίηση και ανακατασκευή της εικόνας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει αυτού του τύπου η μικροσκοπία σε συνδυασμό με το φθορισμό. Είναι γνωστό ότι είναι αδύνατον να παρατηρηθούν φθορίζοντα παρασκευάσματα πάχους μεγαλύτερου των 10 μm λόγω του δυνατού θορύβου από τα μη εστιασμένα σημεία του παρασκευάσματος. τρισδιάστατες καλά εστιασμένες εικόνες που συγκρίνονται με εκείνες του ΗΜΣ αλλά που να μας δείχνουν συγχρόνως και τη κατανομή των φθοριοχρωμάτων. Λόγω των πολλών εφαρμογών σχεδόν σε όλους τους τομείς, όλοι οι μεγάλοι κατασκευαστές μικροσκοπίων έχουν ήδη κατασκευάσει τέτοια μικροσκόπια τα οποία και βελτιώνονται συνεχώς. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η βασική σχεδίαση ενός οπτικού μικροσκοπίου είναι η ίδια για όλα τα οπτικά μικροσκόπια που περιγράφηκαν. Έτσι είναι δυνατόν σε ένα όργανο να υπάρχουν όλοι οι τύποι μικροσκοπίας που αναφέρονται πιο πάνω. Η μετατροπή από τον ένα τύπο στον άλλο είναι συνήθως πολύ εύκολη και γίνεται με την αντικατάσταση ορισμένων φακών.



Σχήμα 2.11: Σχηματική παράσταση της λειτουργίας του συνεστιακού μικροσκοπίου.

## 2.9 Ανεστραμμένα μικροσκόπια (inverted).

Εκτός από τη κλασική διάταξη, με το φωτισμό από το κάτω μέρος της τράπεζας και την παρατήρηση να γίνεται από πάνω, υπάρχουν και μικροσκόπια σχεδόν όλων των τύπων με την αντίθετη διάταξη δηλαδή το παρασκεύασμα να φωτίζεται από επάνω και να παρατηρείται από κάτω. Αυτή η διάταξη διευκολύνει πολλές φορές τη παρατήρηση κυττάρων μέσα σε καλλιέργειες (μέσα σε τρυβλία Petri, φιάλες καλλιέργειας κλπ.).

## 2.10 Στερεοσκόπιο (οπτικό).

Το όργανο αυτό βρίσκει εφαρμογές εκεί που χρειαζόμαστε να παρατηρήσουμε σε μεγέθυνση την εξωτερική μορφολογία ενός αντικείμενου, ιστού κλπ όταν χρησιμοποιείται προσπίπτων ή πλάγιος φωτισμός οργανισμού, ή και την εσωτερική μορφολογία διαφανών ή διαφανοποιημένων παρασκευασμάτων όταν αυτά φωτίζονται από κάτω. Με αυτό το όργανο πετυχαίνουμε στερεοσκοπική τμήμα του δείγματος από διαφορετική γωνία. Τα στερεοσκόπια είτε έχουν αντικειμενικούς φακούς σταθερής εστιακής απόστασης (μεγέθυνσης) είτε μεταβαλλόμενης (zoom). Συνήθως τα όργανα αυτά μπορούν να μεγεθύνουν μέχρι περίπου 80X γιατί μεγαλύτερες μεγεθύνσεις έχουν πολύ μικρό βάθος εστίασης και επομένως οι εικόνες δε μπορούν πλέον να θεωρηθούν στερεοσκοπικές. Το παρασκεύασμα συνήθως δε χρειάζεται καμία προετοιμασία και μπορεί να παρατηρηθεί αρκεί να μπορεί να τοποθετηθεί στο οπτικό πεδίο του μικροσκοπίου [16].



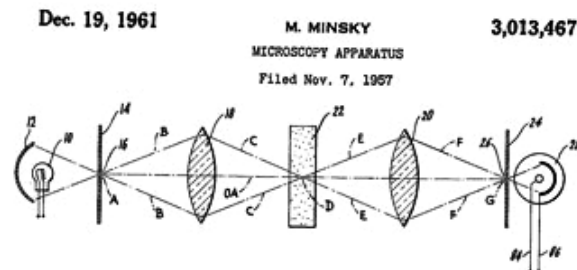
Σχήμα2.12: Ένα σύγχρονο οπτικό στερεοσκόπιο.

Στα στερεοσκόπια ο φωτισμός του παρασκευάσματος μπορεί να γίνει και από πάνω και από κάτω. Τα πιο σύγχρονα στερεοσκόπια διαθέτουν και σύστημα φωτισμού με υπεριώδη ακτινοβολία για μετατροπή τους σε μικροσκόπια φθορισμού. Τα στερεοσκόπια έχουν πολλές εφαρμογές στη γεωπονία όπως είναι η μελέτη και προσδιορισμό εντόμων, μικρών καρπών, ασθενειών σε

φυτά, πλαγκτονικών οργανισμών κλπ. Για καλύτερη παρατήρηση συνιστάται η χρήση ισχυρής φωτεινής πηγής με λαμπτήρα αλογόνου και οπτικές ίνες.

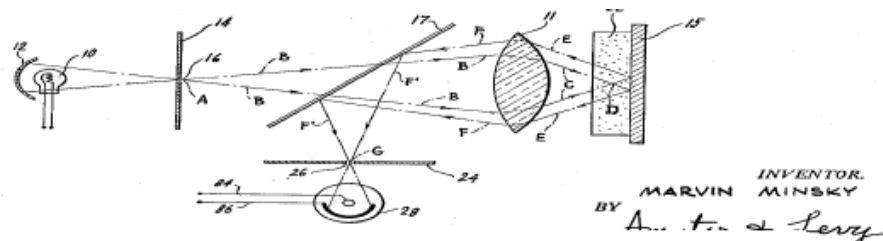
## 2.11 Οπτικές αρχές λειτουργίας του ομοεστιακού μικροσκοπίου

Ο Marvin Minsky θεωρείται ο εφευρέτης του ομοεστιακού μικροσκοπίου (1957). Πρόκειται για ένα είδος μικροσκοπίου που επιτρέπει την απεικόνιση αντικειμένων αυξημένου πάχους, όπως ο κερατοειδής, με εστιασμένο σημειακό φωτισμό. Στο σχήμα 2.13 φαίνεται ο οπτικός δρόμος σε απλό ομοεστιακό μικροσκόπιο. Ο συγκεντρωτικός φακός στην αριστερή πλευρά της εικόνας χρησιμεύει για το φωτισμό ενός σημείου D του αντικειμένου, συλλέγοντας τις ακτίνες της φωτεινής πηγής που περνούν από το διάφραγμα A. Ο αντικειμενικός φακός στη δεξιά πλευρά της εικόνας εστιάζει τις φωτεινές ακτίνες στο δεύτερο διάφραγμα G, το οποίο είναι ομοεστιακό με το A και το σημείο D. Ο φακός τοποθετείται, ώστε το εστιακό του επίπεδο να είναι κοινό (ομοεστιακό) με το σημείο D. Όλο το φως που ο αντικειμενικός φακός συλλέγει από το φωτιζόμενο σημείο περνά από το δεύτερο διάφραγμα και φτάνει στο ανιχνευτή. Οποιοδήποτε άλλο σημείο του αντικειμένου, που δεν είναι ομοεστιακό με το διάφραγμα A, θα φωτίζεται λιγότερο. Επιπλέον, το περισσότερο φως που σκεδάζεται από αυτό το σημείο δεν θα περάσει το διάφραγμα G. Μειώνοντας τη διάμετρο του δεύτερου διαφράγματος, το φαινόμενο της περίθλασης αποκλείεται και η ποιότητα της εικόνας βελτιώνεται.



Σχήμα 2.13: Οπτικό δρόμος στο απλό ομοεστιακό μικροσκόπιο.

Στην πραγματικότητα, ένας μόνο αντικειμενικός φακός χρησιμοποιείται τόσο για το φωτισμό όσο και για την απεικόνιση του αντικειμένου, ενώ στον οπτικό δρόμο παρεμβάλλονται κάτοπτρα, όπως φαίνεται στη δεύτερη εικόνα (σχήμα 2.14).

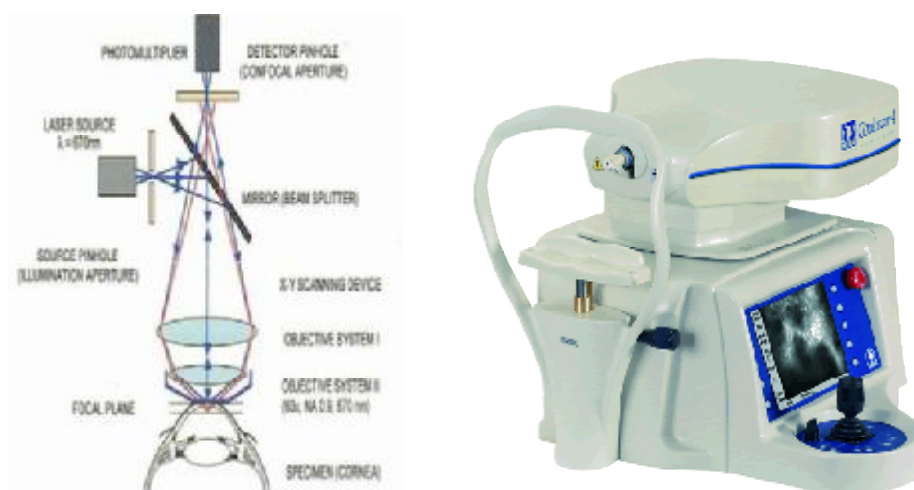


Σχήμα 2.14: Οπτικός δρόμος ομοεστιακού μικροσκοπίου.

Γενικότερα, υπάρχουν δύο μέθοδοι λήψης εικόνων, σταθερής δέσμης (stage scanning) και κινούμενης δέσμης (beam scanning). Ο Marvin Minsky χρησιμοποίησε τη μέθοδο σταθερής δέσμης κατά την οποία το αντικείμενο κινείται γύρω από τη δέσμη. Η δεύτερη μέθοδος πλεονεκτεί στο γεγονός ότι η φωτεινή δέσμη κινείται γύρω από το αντικείμενο, για αυτό αυτή χρησιμοποιείται κλινικά.[17]

## 2.12 Ομοεστιακό μικροσκόπιο σάρωσης με Laser (Laser Scanning Confocal Ophthalmoscopy, CSLO)

Η ανάπτυξη του CSLO το 1980 επέτρεψε την τρισδιάστατη απεικόνιση των λεπτών δομών του οφθαλμού γρήγορα, μη επεμβατικά και με πολύ χαμηλότερα επίπεδα φωτισμού. Χρησιμοποιεί μονοχρωματικό laser για το φωτισμό του αντικειμένου μέσω κατόπτρων. Συγκεκριμένα, η δέσμη του laser εστιάζεται σε ένα σημείο του αντικειμένου μέσω ενός διαφράγματος. Το ανακλώμενο φως διαχωρίζεται, μέσω κατόπτρου (beam splitter) από το προσπίπτον και εκτρέπεται μέσω ενός δεύτερου σε ένα φωτοευαίσθητο ανιχνευτή. Τα δύο διαφράγματα είναι ομοεστιακά με το φωτιζόμενο, παρέχοντας όλα τα πλεονεκτήματα της ομοεστιακής μικροσκοπίας. Προκειμένου να ληφθεί μια δισδιάστατη εικόνα κάθετη στον οπτικό άξονα της συσκευής, η δέσμη πρέπει να σαρώσει το αντικείμενο σημείο προς σημείο. Μετατοπίζοντας το εστιακό επίπεδο, εξασφαλίζονται εικόνες από βαθύτερα στρώματα, δίνοντας τη δυνατότητα απεικόνισης αντικειμένων αυξημένου πάχους (σχήμα 2.15).



Σχήμα 2.15: (α) Οπτικές αρχές CSLO. (β) Μικροσκόπιο Κερατοειδούς *Nidek*

## 2.13 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

### 2.13.1 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM)

Η Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (Scanning Electron Microscopy, SEM) είναι μία από τις σύγχρονες και ευέλικτες μεθόδους ανάλυσης της μικροδομής μεγάλου αριθμού υλικών.

Η ικανότητα των οπτικών μικροσκοπίων περιορίζεται λόγω της φύσης του φωτός σε επίπεδα μεγεθύνσεων έως 1000x και σε διακριτική ικανότητα έως 0.2  $\mu\text{m}$ . Στις αρχές της δεκαετίας του '30 υπήρχε ήδη η ανάγκη για εξέταση του εσωτερικού του κυττάρου (πυρήνας, μιτοχόνδρια κλπ.) που απαιτούσε μεγεθύνσεις μεγαλύτερες του 10,000 x. Η απαίτηση αυτή οδήγησε στην ανακάλυψη και εφαρμογή των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης ή διαπερατότητας (TEM, Transmission Electron Microscope) ήταν το πρώτο είδος ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και στη συνέχεια ακολούθησε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM, Scanning Electron Microscope). Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης είναι ένα όργανο που λειτουργεί όπως περίπου και ένα οπτικό μικροσκόπιο μόνο που χρησιμοποιεί δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας αντί για φως, για να εξετάσει αντικείμενα σε λεπτομερή κλίμακα. Τα ηλεκτρόνια λόγω της κυματικής τους φύσης μπορούν να εστιαστούν όπως και τα φωτεινά κύματα αλλά σε πολύ μικρότερη επιφάνεια (π.χ. κόκκος υλικού). Η δέσμη ηλεκτρονίων σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με το οποίο αλληλεπιδρά. Από την αλληλεπίδραση αυτή προκύπτουν πληροφορίες σε σχέση με τα άτομα των στοιχείων που απαρτίζουν το εξεταζόμενο υλικό. Από τα άτομα των στοιχείων εκπέμπονται κυρίως δευτερογενή (secondary) και οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered) ηλεκτρόνια καθώς και ακτίνες X. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας.

Έτσι το SEM δίνει πληροφορίες που αφορούν κυρίως στη μορφολογία και στη σύσταση της επιφανείας. Εφαρμόζοντας ένα σύστημα ανίχνευσης της διασποράς των ενεργειών των ακτινών X που δημιουργούνται στην επιφάνεια από την προσπίπτουσα δέσμη, μπορεί να γίνει ημιποσοτική στοιχειακή ανάλυση του υλικού.

Επομένως το SEM χρησιμοποιείται για την εξέταση μικροδομής στερεών δειγμάτων και για να δίνει εικόνες υψηλού βαθμού διεύθυνσης.



Σχήμα 2.16: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

### 2.13.2 Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (ΗΜΔ, TEM, Transmission Electron Microscope).

Στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Διέλευσης (σχήμα 2.17), η πηγή ηλεκτρονίων αποτελείται ένα νήμα βολφραμίου (ή ακίδα  $\text{LaB}_6$ ) που με την πυράκτωσή, όταν περάσει από αυτό ηλεκτρικό ρεύμα, εκπέμπει ηλεκτρόνια. Μεταξύ του νήματος, που αποτελεί την κάθοδο, και της ανόδου, εφαρμόζεται μια διαφορά δυναμικού (συνήθως της τάξης των 60-100 kV) η οποία επιταχύνει τα ηλεκτρόνια. Η πορεία των ηλεκτρονίων, ρυθμίζεται από τους ηλεκτρομαγνητικούς φακούς στους οποίους αλλάζοντας την ένταση του ρεύματος που τους διαπερνάει, μπορούμε να μεταβάλλουμε την ένταση του μαγνητικού πεδίου τους (δηλαδή την εστιακή τους απόσταση) και επομένως να εστιάσουμε τη δέσμη των ηλεκτρονίων πάνω στο παρασκεύασμα.

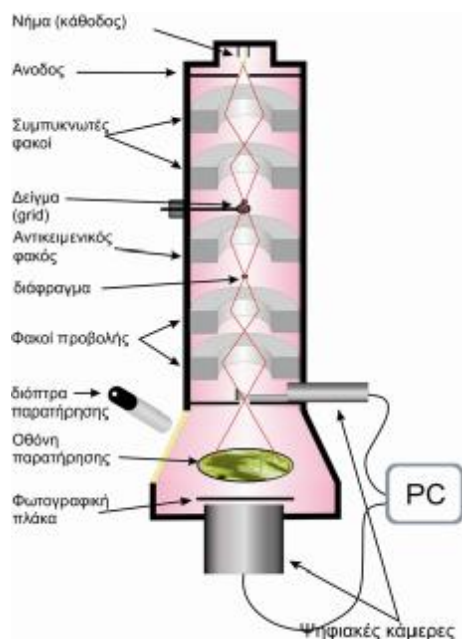
Οι κύριες ρυθμίσεις σ' ένα ΗΜΔ επιτυγχάνονται με:

- 1) Τον συγκεντρωτή φακό (condenser lens), εστίαση της δέσμης στο παρασκεύασμα.
- 2) Τον αντικειμενικό φακό (objective lens), εστίαση της εικόνας στην οθόνη.
- 3) ενδιάμεσος ή και φακός προβολής (intermediate, projector lens) για τη ρύθμιση της μεγέθυνσης.

Η εικόνα σχηματίζεται πάνω σε μια οθόνη επικαλυμμένη με φωσφορίζουσα ουσία η οποία διεγείρεται από τα ηλεκτρόνια που πέφτουν επάνω της, αφού αυτά διαπεράσουν το παρασκεύασμα. Τα σημεία του παρασκευάσματος που δεν είναι διαπερατά από τα ηλεκτρόνια, μας δίνουν σκοτεινές περιοχές (ηλεκτρονιόφιλες, ηλεκτρονιακά πυκνές, electron dense) ενώ αντίθετα τα διαπερατά σημεία (ηλεκτρονιακά διαφανή, electron lucent) μας δίνουν



φωτεινές περιοχές. Αυτή η διαφοροποίηση επιτυγχάνεται με την εκλεκτική «χρώση» του παρασκευάσματος



Σχήμα 2.17: Σχηματική παράσταση ενός ηλεκτρονικού μικροσκοπίου διέλευσης.

Φυσικά αυτές τις εικόνες εκτός του ότι μπορούμε να τις παρατηρήσουμε απ' ευθείας στην οθόνη του μικροσκοπίου, μπορούμε και να τις απεικονίσουμε με τις ειδικές φωτογραφικές μηχανές που είναι πάντα ενσωματωμένες στα μικροσκόπια. Τα πιο σύγχρονα μικροσκόπια διαθέτουν ενσωματωμένη ψηφιακή κάμερα και μικροϋπολογιστή και έτσι μπορεί να γίνει απ' ευθείας ψηφιοποίηση και αποθήκευση της εικόνας

Επειδή τα ηλεκτρόνια δε μπορούν να ταξιδέψουν στον αέρα, το όλο σύστημα, πηγή ηλεκτρονίων, φακοί, παρασκευάσμα, οθόνη και σύστημα φωτογράφισης πρέπει να βρίσκονται σε υψηλό κενό της τάξης των  $10^{-4}$  Torr τουλάχιστο.

Ο τρόπος που λειτουργεί το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, μας θέτει πολλούς περιορισμούς ως προς τη φύση των δειγμάτων που μπορούμε να παρατηρήσουμε. Έτσι ένα δείγμα για να είναι δυνατό να παρατηρηθεί με το κλασσικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης και με τις κλασσικές μεθόδους θα πρέπει να έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- α. να αντέχει σε υψηλό κενό,
- β. να είναι σταθερό στο βομβαρδισμό ηλεκτρονίων,
- γ. να είναι αρκετά λεπτό για να μπορούν να το διαπερνούν τα ηλεκτρόνια, και
- δ. να επιτρέπει τη διαφορική σκέδαση των ηλεκτρονίων.

Αυτές οι ιδιότητες που πρέπει να έχει ένα παρασκεύασμα, μας περιορίζουν στο να μπορούμε να εξετάσουμε μόνο μονιμοποιημένα δείγματα (νεκρά), αφυδατωμένα, κομμένα σε πολύ λεπτές τομές (πάχος 50-100 nm) και «χρωματισμένα» με «χρωστικές» που περιέχουν βαριά μέταλλα, όπως για παράδειγμα είναι ο μόλυβδος και το ουράνιο [15].

## 2.14 Αντικειμενικοί φακοί μικροσκοπίων

Οι αντικειμενικοί φακοί είναι τα πιο σημαντικά εξαρτήματα του συστήματος σχηματισμού εικόνας του μικροσκοπίου γιατί από αυτούς εξαρτάται η τελική διακριτική ικανότητα και η αρχική μεγέθυνση. Οι φακοί αυτοί έχουν κατασκευαστεί έτσι που οι εικόνες να μην έχουν σφαιρικά ή χρωματικά σφάλματα, να μην έχουν αστιγματισμό. Ο φακοί αυτοί έχουν χαραγμένες στο σώμα τους διάφορες ενδείξεις π.χ. Plan 40/0.65 160/0.17, που σημαίνει φακός επίπεδος μεγέθυνσης 40X, αριθμητικό άνοιγμα 0.65, για χρήση σε μικροσκόπιο με σωλήνα μήκους 160 mm, και με καλυπτρίδα πάχους 0.17+0.01 mm. Η ένδειξη  $d=0$  σημαίνει ότι ο φακός είναι σχεδιασμένος για να χρησιμοποιείται χωρίς καλυπτρίδα. Επειδή οι διάφοροι κατασκευαστές μικροσκοπίων μπορεί να χρησιμοποιούν διαφορετικούς συμβολισμούς θα πρέπει πάντα να διαβάζουμε τις οδηγίες χρήσης του συγκεκριμένου οργάνου. Το χρώμα των γραμμάτων και συμβόλων που είναι χαραγμένα πάνω στον αντικειμενικό φακό επίσης είναι ενδεικτικά του οπτικού τύπου του φακού π.χ. κόκκινα γράμματα συμβολίζουν φακό για πολωμένο φως ενώ πράσινα γράμματα συμβολίζουν φακό αντίθεσης φάσης. Πολλές φορές ο τύπος του φακού και η μεγέθυνσή του συμβολίζονται και με χρωματιστά δαχτυλίδια χαραγμένα πάνω τους.

Μεγέθυνση	Χρώμα
1-1.25	μαύρο
1.6-2	γκρι
2.5-3.2	καφέ
4-5	κόκκινο
6.3-8	πορτοκαλί
10-12.5	κίτρινο
16-20	ανοιχτό πράσινο
25-32	σκούρο πράσινο
40-50	ανοιχτό μπλε
63-80	σκούρο μπλε
100, 125, 160	άσπρο

Υγρό κατάδυσης φακού	Χρώμα
λάδι	μαύρο
νερό	άσπρο
γλυκερίνη	πορτοκαλί
άλλα υγρά	κόκκινο

Σχήμα 2.18: Η ερμηνεία των χρωματιστών δαχτυλιδιών που είναι χαραγμένα στους αντικειμενικούς φακούς.

Άλλα σύμβολα που μπορεί να είναι χαραγμένα πάνω στους αντικειμενικούς φακούς:

- PH: φακός για διάταξη αντίθεσης φάσης, ο αριθμός που συνήθως ακολουθεί π.χ. PH2 σημαίνει ότι ο φακός αυτός πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε συνεργασία με το διάφραγμα νούμερο 2 του συμπυκνωτή φακού.
- PLAN: σημαίνει ότι ο φακός είναι επίπεδος, δηλαδή όλα τα σημεία του οπτικού πεδίου εστιάζουν στο ίδιο επίπεδο, αντίθετα σε φακούς χωρίς αυτή την ένδειξη όταν το κέντρο του οπτικού πεδίου είναι εστιασμένο τα σημεία στην περιφέρεια δεν είναι εστιασμένα. Είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται τέτοιοι φακοί όταν πρόκειται να γίνει φωτογράφιση του παρασκευάσματος.
- APO: σημαίνει ότι ο φακός είναι αποχρωματικός, δηλαδή τα χρωματικά σφάλματα του φακού έχουν ελαχιστοποιηθεί για τρία τουλάχιστον μήκη κύματος (450, 550 και 650 nm) ενώ τα σφαιρικά σφάλματα έχουν ελαχιστοποιηθεί για μήκος κύματος περίπου 550 nm.
- Achromat: λίγο κατώτερης ποιότητας από τους φακούς APO γιατί τα χρωματικά σφάλματα είναι ελαχιστοποιημένα για δυο μόνο μήκη κύματος (περίπου 500 και 600 nm) ενώ η διόρθωση για σφαιρικά σφάλματα είναι η ίδια με εκείνη των φακών APO.
- POL: σημαίνει ότι ο φακός είναι για πολωτικό μικροσκόπιο.
- Semi-apochromat: φακοί ποιότητας ενδιάμεσης μεταξύ του APO και του Achromat.
- Fluorite, Neofluor: σημαίνει ότι το γυαλί από το οποίο είναι κατασκευασμένος ο φακός δεν απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία και δεν φθορίζει. Αυτοί οι φακοί είναι κατάλληλοι για μικροσκοπία φθορισμού ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και με κοινό φωτισμό.



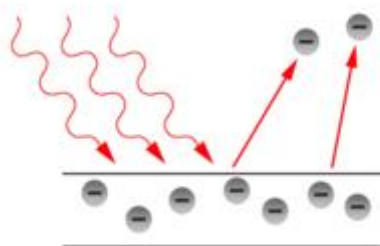
Σχήμα 2.19: Υπομνημα επεξήγησης συμβόλων επάνω στο σώμα των φακών

3

## **ΑΞΟΝΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ**

### 3.1 Παραγωγή ακτίνων X

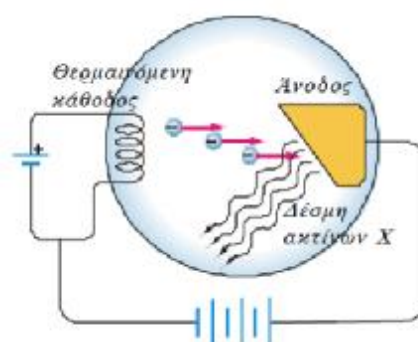
Το 1895 ο Wilhelm Rontgen (Ρέντγκεν) ανακάλυψε ότι όταν ένα μέταλλο «βομβαρδιστεί» με ηλεκτρόνια που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή ονομάστηκε ακτίνες X ή ακτίνες Rontgen. Ακτίνες X χρησιμοποιούνται καθημερινά σήμερα για την λήψη κοινών ακτινογραφιών. Οι ακτίνες X έχουν μήκη κύματος από 0,001 nm, έως 1 nm . Ο μηχανισμός παραγωγής των ακτίνων X είναι ακριβώς ο αντίστροφος του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μια μεταλλική επιφάνεια «βομβαρδίζεται» με ηλεκτρομαγνητικό κύμα και εκπέμπει ηλεκτρόνια.



Σχήμα 3.1: Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Στις ακτίνες X η μεταλλική επιφάνεια «βομβαρδίζεται» με ηλεκτρόνια και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

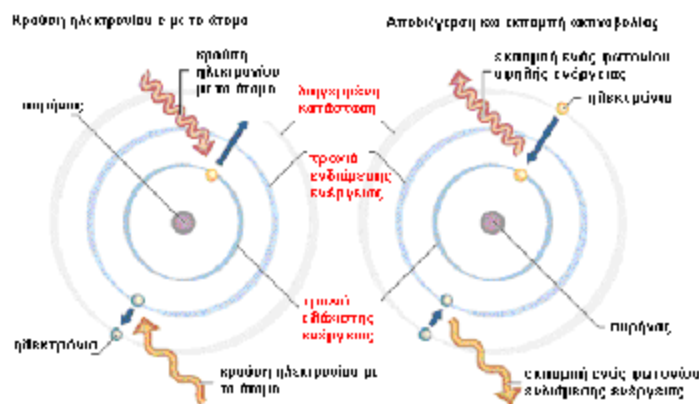
Όταν τα ηλεκτρόνια της δέσμης φτάνουν στην επιφάνεια του μετάλλου επιβραδύνονται απότομα. Η επιβράδυνση αυτή συνοδεύεται από εκπομπή ακτινοβολίας, το φωτόνιο της οποίας θα έχει ενέργεια μικρότερη ή ίση με την ενέργεια του ηλεκτρονίου στο οποίο οφείλεται η εκπομπή του.



Σχήμα 3.2: Διάταξη (λυχνία) σχηματισμού ακτίνων X

Υπάρχει και άλλη αιτία για την οποία εκπέμπεται ακτινοβολία από τη μεταλλική επιφάνεια. Καθώς τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα της επιφάνειας του μετάλλου τούς μεταφέρουν ενέργεια. Τα άτομα διεγείρονται, τα ηλεκτρόνιά τους δηλαδή μεταφέρονται σε στιβάδες μεγαλύτερης ενέργειας. Όταν αποδιεγείρονται, όταν δηλαδή τα ηλεκτρόνια επανέλθουν στην αρχική

τους στιβάδα, εκπέμπουν στο περιβάλλον ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



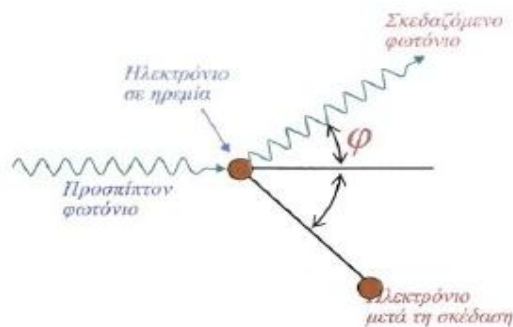
Σχήμα 3.3: Διέγερση και αποδιέγερση ηλεκτρονίων η οποία συνοδεύεται με παραγωγή ακτίνων X

Η ύπαρξη φωτονίων επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1924 από τον Αμερικανό Arthur Holly Compton. Ο Compton παρατήρησε ότι όταν ακτίνες X προσπίπτουν πάνω σε μια υλική επιφάνεια ένα μέρος τους εκτρέπεται από τα σωματίδια της ύλης (σκεδαάζεται). Ο Compton διαπίστωσε ότι το σκεδαζόμενο τμήμα της ακτινοβολίας έχει μήκος κύματος μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (μικρότερη συχνότητα). Οι μετρήσεις του Compton έδειξαν ότι η μεταβολή του μήκους κύματος ανάμεσα στην προσπίπτουσα και τη σκεδαζόμενη δέσμη εξαρτάται μόνο από τη γωνία ανάμεσα στις δύο δέσμες και μάλιστα υπακούει στη σχέση:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\phi)$$

όπου  $\lambda'$  το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης δέσμης,  $\lambda$  το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης,  $m$  η μάζα του ηλεκτρονίου και  $\phi$  η γωνία μεταξύ προσπίπτουσας και ανακλώμενης δέσμης.

Υποθέσουμε ότι ένα φωτόνιο μήκους κύματος  $\lambda$  συγκρούεται μ' ένα πρακτικώς ακίνητο ηλεκτρόνιο. Μετά τη σκέδαση το φωτόνιο κινείται σχηματίζοντας γωνία  $\psi$  με την αρχική διεύθυνση κίνησης και έχοντας χάσει τμήμα της αρχικής του ενέργειας αφού ένα μέρος της αρχικής του ενέργειας θα μεταφερθεί στο ηλεκτρόνιο. Το σκεδαζόμενο φωτόνιο θα έχει μετατραπεί σε φωτόνιο μήκους κύματος  $\lambda'$  με  $\lambda' > \lambda$ .



Σχήμα 3.4: Το φαινόμενο Compton

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι: Όταν οι ακτίνες X διέρχονται από την ύλη μπορεί να συμβούν τα ακόλουθα:

- α) Μη αλληλεπίδραση: υπάρχει πάντοτε μια πεπερασμένη πιθανότητα διαπεραίωσης της ακτινοβολίας χωρίς αλληλεπίδραση.
- β) Έκλυση θερμότητας.
- γ) Φωτοηλεκτρική απορρόφηση: φαινόμενο που συνδέεται i) με την παραγωγή ελεύθερων (φωτο)ηλεκτρονίων, ii) με φθορισμό,.
- δ) Σκέδαση Compton: φαινόμενο που συνδέεται με την παραγωγή φωτοηλεκτρονίων και ταυτόχρονα δευτερογενών φωτονίων με μικρότερη ενέργεια από τα προσπίπτοντα.
- ε) Ελαστική σκέδαση: φαινόμενο κατά το οποίο τα φωτόνια της πρωτογενούς ακτινοβολίας εκτρέπονται από την πορεία τους διατηρώντας την ενέργειά τους [1].

### 3.2 Κλασική Ακτινολογία

Στην κλασική ακτινολογία, η τρισδιάστατη ανθρώπινη ανατομία προβάλλεται και καταγράφεται σαν εικόνα δύο διαστάσεων σε ακτινολογικό φιλμ με χρήση δέσμης ακτίνων X, ενέργειας 50-150 keV. Οι ακτίνες X απορροφώνται ή σκεδάζονται από τους ιστούς του ανθρώπινου σώματος. Ο βαθμός απορρόφησης ή σκέδασης εξαρτάται κυρίως από την ενέργεια της δέσμης, καθώς και από τον ατομικό αριθμό ( $Z$ ) και την πυκνότητα ( $\rho$ ) των βιολογικών ιστών. Στις ενέργειες που χρησιμοποιούνται στη διαγνωστική ακτινολογία, η απορρόφηση των ακτίνων X οφείλεται κυρίως στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ενώ η σκέδαση τους οφείλεται στο φαινόμενο Compton. Η πιθανότητα απορρόφησης των ακτίνων X με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αυξημένη για φωτόνια χαμηλής ενέργειας και συστατικά στοιχεία βιολογικών ιστών μεγάλου ατομικού αριθμού. Η πιθανότητα σκέδασης Compton των ακτίνων X εξαρτάται μόνο από την πυκνότητα και αυξάνεται σε υψηλές ενέργειες. Οι δύο αυτοί τρόποι αλληλεπίδρασης της δέσμης των ακτίνων X με τους βιολογικούς ιστούς διαφέρουν αρκετά ως προς την επίδραση τους πάνω στην ποιότητα της

τελικής εικόνας καθώς και ως προς την ακτινοβολία που δέχονται οι ασθενείς [21].

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ενισχύει τις φυσιολογικές διαφορές απορρόφησης των ακτινών X μεταξύ γειτονικών ιστών, όπου αυτές υπάρχουν και ιδιαίτερα μεταξύ οστών και μαλακών ιστών, και έτσι δίνει εικόνες πολύ καλής διαγνωστικής ποιότητας. Όμως, μια και όλη η ενέργεια των φωτονίων που αλληλεπιδρούν με τον τρόπο αυτό με τους ιστούς απορροφάται από το ανθρώπινο σώμα, οι ασθενείς δέχονται πολύ μεγαλύτερη ακτινοβολία. Οι βιολογικές αυτές επιπτώσεις του φωτοηλεκτρικού φαινομένου μπορούν να ελαχιστοποιηθούν αν χρησιμοποιηθεί δέσμη ακτινών X της μεγαλύτερης επιτρεπτής ενέργειας υπό περιορισμούς που θέτει η επιθυμητή ποιότητα της ακτινογραφίας για κάθε κλινική εφαρμογή. Σε μεγαλύτερες ενέργειες επικρατεί η αλληλεπίδραση τύπου Compton που είναι υπεύθυνη για όλη σχεδόν τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία και έχει σαν αποτέλεσμα την προσθήκη θορύβου στην τελική εικόνα και τη μείωση της ικανότητας του συστήματος απεικόνισης να διακρίνει μικρές διαφορές στην εξασθένηση της δέσμης ακτινών X από γειτονικούς βιολογικούς ιστούς.

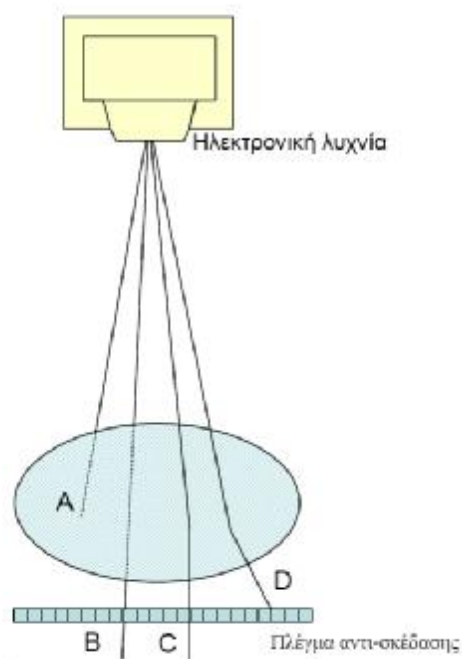
Γενικά, στην κλασική ακτινολογία σημαντική για την διαγνωστική ποιότητα της τελικής εικόνας θεωρείται η επιλογή της ενέργειας και της έντασης της δέσμης των ακτινών X. Η ενέργεια, όπως είδαμε παραπάνω, καθορίζει την πιθανότητα απορρόφησης ή σκέδασης των φωτονίων της δέσμης ακτινών X και, με βάση τα κριτήρια διαφοροποίησης γειτονικών ιστών και ελαχιστοποίησης της ακτινοβολίας που δέχεται ο ασθενής, αποτελεί εκείνη την παράμετρο του συστήματος που είναι κυρίως υπεύθυνη για την τελική ποιότητα της εικόνας. Η ένταση της δέσμης καθορίζει το λόγο του σήματος προς το θόρυβο στην τελική εικόνα. Συγκεκριμένα, σε κάθε σημείο της εικόνας, ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο ισούται με την τετραγωνική ρίζα του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στο σημείο αυτό του ακτινογραφικού φιλμ. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση της δέσμης τόσο περισσότερα φωτόνια προσπίπτουν ανά μονάδα επιφάνειας του φιλμ και τόσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος σήματος προς το θόρυβο. Βέβαια, η ακτινοβολία που δέχεται ο ασθενής επίσης αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ένταση, και πρέπει και πάλι να επιλεγεί η μικρότερη δυνατή ένταση που ικανοποιεί όμως τις κλινικές απαιτήσεις διαγνωστικής ποιότητας. Οι αντίστοιχοι συμβιβασμοί διερευνούνται στο μέρος B των σημειώσεων.

Η δέσμη ακτινών X, αφού υποστεί κάποια εξασθένηση λόγω απορρόφησης και σκέδασης των φωτονίων που τη συνθέτουν, εξέρχεται από το ανθρώπινο σώμα μεταφέροντας τη δισδιάστατη προβολή της ανατομίας με τη μορφή εικόνας σε λανθάνουσα κατάσταση. Την εικόνα αυτή τη συνθέτουν οι αυξομειώσεις εντάσεως που προέρχονται από τη μεταβλητή απορρόφηση διαφόρων ακτινών της δέσμης ανάλογα με τους ιστούς από τους οποίους πέρασε η κάθε μια. Σύμφωνα με το μοντέλο απεικόνισης, η ακτινοβολία η οποία μεταφέρει τις πληροφορίες που απαιτούνται για την ανακατασκευή και καταγραφή της τελικής εικόνας πρέπει να περάσει από ένα τελικό στάδιο επεξεργασίας. Στην περίπτωση της κλασικής ακτινολογίας, η επεξεργασία αυτή είναι καθαρά αναλογική και πολύ απλή. Στην απλούστερη μορφή της, ισοδυναμεί με την παρεμβολή στη δέσμη ακτινοβολίας ενός κοινού ακτινογραφικού φιλμ και την εμφάνιση του φιλμ. Όμως, προκειμένου να



ελαχιστοποιηθεί η ακτινοβολία που δέχονται οι ασθενείς, το φιλμ συνήθως τοποθετείται ανάμεσα σε δύο φθορίζουσες πλάκες που ενισχύουν την εικόνα, μετατρέποντας την ενέργεια των ακτινών Χ σε πολύ περισσότερα φωτόνια χαμηλότερης ενέργειας στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το μήκος κύματος των ορατών αυτών φωτονίων επιλέγεται ούτως ώστε να ανήκει στο διάστημα μέγιστης ευαισθησίας του φιλμ (συνήθως γύρω στα 4300 Angstroms, που αντιστοιχεί στο χρώμα μπλε).

Για την εξήγηση του τρόπου απεικόνισης με ακτίνες Χ, πρώτα πρέπει να εξετάσουμε το πως αλληλεπιδρούν με τους ιστούς. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5, τα φωτόνια απορροφούνται, σκεδάζονται ή περνάνε χωρίς καμία αλληλεπίδραση. Η εικόνα παράγεται από τα πρωτεύοντα φωτόνια ενώ τα σκεδαζόμενα δημιουργούν θόρυβο. Η συσκευή (πλέγμα) αντι-σκεδάσης, έχει σα σκοπό να μειώσει τον αριθμό των σκεδαζομένων φωτονίων δημιουργώντας όμως αύξηση της δόσης ακτινοβολίας για να επιτευχθεί η ίδια ποιότητα εικόνας. Η εικόνα δημιουργείται από τον δέκτη (π.χ. εμφάνιση φιλμ) για να εξετασθεί μετέπειτα από τον ακτινολόγο. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η (διαφορετική) απορρόφηση της ακτινοβολίας από τους ιστούς, δημιουργεί το απαραίτητο κόντράστ για να είναι η απεικόνιση διαγνωστικά ωφέλιμη.[8]



Σχήμα 3.5: Τα βασικά μέρη ενός συστήματος ακτινογραφίας και η δημιουργία της ακτινολογικής εικόνας. Το 'Α' αντιπροσωπεύει ένα φωτόνιο που απορροφήθηκε, το 'Β' πέρασε χωρίς αλληλεπίδραση, ενώ από τα σκεδαζόμενα φωτόνια 'C' και 'D' μόνο το πρώτο περνά το πλέγμα αντί-σκεδάσης

### 3.3 Η ιστορική αναδρομή της αξονικής τομογραφίας

Τον Απρίλιο του 1972 ο άγγλος ηλεκτρονικός μηχανικός G. Hounsfield ανακοίνωσε στο βρετανικό ακτινολογικό συνέδριο μία νέα επαναστατική

απεικονιστική μέθοδο την οποία ονόμασε Computerized Axial Transverse Scanning την επονομαζόμενη Ηλεκτρονική τομογραφία (Computed Tomography) Για την ανακάλυψη αυτή οι Hounsfield και Cormack τιμήθηκαν με βραβείο Nobel Ιατρικής το έτος 1979. Το βραβείο μοιράστηκε ο Hounsfield με τον Cormack διότι ο δεύτερος πολλά χρόνια πριν είχε ανακαλύψει την μαθηματική μέθοδο που επέλυσε τα προβλήματα της ανακατασκευής της εικόνας.

Η καινοτομία της αξονικής τομογραφίας είχε δύο νέα στοιχεία σε σχέση με την κλασική ακτινολογία. Το ένα ήταν η σύλληψη και η κατασκευή του μηχανήματος όσο αναφορά τα μηχανικά μέρη και το άλλο ήταν η συνεργασία του μηχανήματος με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Έτσι η αξονική τομογραφία εισήχθη στην ιατρική διαγνωστική τη δεκαετία του 1970 και έφερε επανάσταση στο χώρο. Ξεκίνησε από τις ΗΠΑ και το πρώτο όργανο που μελετήθηκε με αυτήν ήταν ο εγκέφαλος. Η μέθοδος έτυχε ταχέως καθολικής αποδοχής, κυρίως, για το ότι δεν προκαλεί καμία ταλαιπωρία στους ασθενείς και έχει μεγάλη διαγνωστική ακρίβεια. Αναφέρεται επίσης ως CAT scan (Computerized Axial Tomography).

### 3.4 Βασικές αρχές λειτουργίας αξονικού τομογράφου

Η Αξονική Τομογραφία(AT),στη βάση της, είναι μία μαθηματική διαδικασία με την οποία προσπαθούμε να αναπαράγουμε με ακρίβεια τις τρισδιάστατες δομές (όργανα) του εσωτερικού του ανθρώπινου σώματος, σε δισδιάστατες εικόνες. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιείται μία μαθηματική τεχνική, η οποία ονομάζεται ανακατασκευή (reconstruction),με βάση την οποία μπορεί ν' ανακατασκευαστεί και να παρουσιαστεί σαν δισδιάστατη εικόνα(π.χ. σε μία οθόνη υπολογιστή),ένα τρισδιάστατο αντικείμενο, αρκεί να έχουμε πολλές προβολές αυτού του αντικειμένου από διαφορετικές θέσεις. Ο Αξονικός τομογράφος το επιτυγχάνει αυτό περιστρέφοντας την λυχνία ακτινών -Χ γύρω από τον εξεταζόμενο και καταγράφοντας την απορρόφηση της ακτινοβολίας από διάφορες θέσεις.



Σχήμα 3.6: Άποψη του μαγνητικού τομογράφου εξωτερικά και η διάταξη λυχνίας – ανιχνευτών εντός του δακτυλίου

Η απορρόφηση καταγράφεται από τους ανιχνευτές, οι οποίοι βρίσκονται απέναντι από την λυχνία διατεταγμένοι σε τόξο και περιστρέφονται ταυτόχρονα μ' αυτήν(ΑΤ τρίτης γενιάς) ή είναι σταθεροί σ' όλη την περίμετρο του gantry(ΑΤ τέταρτης γενιάς, σ' αυτά τα συστήματα περιστρέφεται μόνο η λυχνία).Αφού καταγραφούν όλες οι μετρήσεις, για μία πλήρη περιστροφή 360ο του συστήματος λυχνίας- ανιχνευτών γύρω από τον εξεταζόμενο, ψηφιοποιούνται και υφίστανται μια σειρά από μαθηματικές επεξεργασίες, με βάση τις οποίες υπολογίζεται ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης (linear attenuation coefficient) για κάθε pixel. Κάθε διαφορετική τιμή του γραμμικού συντελεστή απορρόφησης αντιστοιχίζεται με μια συγκεκριμένη τιμή της κλίμακας του γκρίζου με βάση την κλίμακα του Hounsfield (HU).Αυτή η κλίμακα χρησιμοποιεί σαν τιμές αναφοράς το νερό με τιμή μηδέν και τον αέρα με τιμή 1000. Ο υπολογισμός του αριθμού CT (CT Number) για ένα συγκεκριμένο υλικό γίνεται με βάση της εξίσωση:

$$\text{Αριθμός CT(υλικού)} = 1000 (\mu - \mu_w) / (\mu_w - \mu_a)$$

όπου  $\mu$  είναι ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης του υλικού ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης του νερού και  $\mu_a$  ο γραμμικός συντελεστής απορρόφησης του αέρα. Σύμφωνα μ' αυτή την κλίμακα όσο περισσότερο απορροφά την ακτινοβολία ένα αντικείμενο, τόσο περισσότερο άσπρο απεικονίζεται(π.χ. οστό),ενώ όσο λιγότερο απορροφά την ακτινοβολία, τόσο πιο μαύρο απεικονίζεται(π.χ. αέρας).Μ' αυτό τον τρόπο καταλήγουμε με τις γνωστές εικόνες της αξονικής τομογραφίας, οι οποίες στην πράξη δεν είναι τίποτε άλλο παρά ένας χάρτης των γραμμικών συντελεστών απορρόφησης των διαφόρων υλικών που πέρασαν οι ακτίνες -Χ κατά την διέλευσή τους μέσα από το σώμα.

Τα σημαντικότερα τμήματα ενός αξονικού τομογράφου είναι:

### 1) Το gantry

Είναι ο δομικός σκελετός ο οποίος περικλείει την ακτινολογική λυχνία, τους ανιχνευτές και διάφορους μηχανισμούς για την κίνησή τους. Περικλείει, επίσης, και τα laser επικέντρωσης. Στο κέντρο του υπάρχει ένα κυκλικό άνοιγμα (gantry aperture),μέσω του οποίου μετακινείται το εξεταστικό τραπέζι. Η σχέση του gantry με το εξεταστικό τραπέζι καθορίζει και το επίπεδο τομής. Το gantry μπορεί να πάρει κλίση που στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα φτάνει μέχρι και 30 μοίρες και προς τις δύο κατευθύνσεις

### 2) Η ακτινολογική λυχνία

Η λυχνία είναι το τμήμα εκείνο του αξονικού τομογράφου στο οποίο παράγεται η ακτινοβολία Χ.Η διαδικασία της εκπομπής των ακτίνων Χ από την ακτινολογική λυχνία παράγει μεγάλα ποσά θερμότητας. Χαρακτηριστικό είναι ότι περίπου το 1% της ηλεκτρικής ενέργειας με την οποία τροφοδοτείται η λυχνία μετατρέπεται σε ενέργεια των ακτίνων Χ. Το υπόλοιπο μετασχηματίζεται σε θερμότητα. Το θερμικό φορτίο που αναπτύσσεται στην λυχνία είναι ανάλογο των στοιχείων (kV, mA) που χρησιμοποιούνται και της

χρονικής διάρκειας των τομών,  $KVp \times mA \times s$  όπου  $kVp$  τα Kilovolt,  $mA$  τα milliamper και  $s$  ο συνολικός χρόνος κατά τον οποίο η λυχνία ακτινοβολεί. Χαρακτηριστικά μεγέθη για την λυχνία, ιδίως για Ελικοειδείς Αξονικούς Τομογράφους, όπου ο χρόνος ακτινοβολήσης είναι μεγάλος, είναι η θερμοχωρητικότητά της η οποία εκφράζεται σε θερμικές Μονάδες(Heat Units) και στα σύγχρονα συστήματα φτάνει τα 3.5 έως 5 εκατομμύρια θερμικές Μονάδες(MHU) και ο ρυθμός απαγωγής της θερμότητας που μπορεί να φτάνει τα 0.5 έως 1 MHU/min. Τμήμα της λυχνίας αποτελούν, επίσης και οι collimators. Χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το εύρος της δέσμης και συνεπώς το ονομαστικό πάχος τομής(στην EAT, nominal slice thickness). Ένα άλλο σημαντικό τμήμα της λυχνίας είναι τα φίλτρα τα οποία είναι φτιαγμένα συνήθως από αλουμίνιο ή τεφλόν. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από την λυχνία είναι πολυχρωματική, περιέχει δηλαδή φωτόνια διαφόρων ενεργειών. Τα φίλτρα αποκόπτουν τα φωτόνια των χαμηλότερων ενεργειών κάνοντας τη δέσμη πιο ομοιογενή και κατά συνέπεια τις μετρήσεις πιο ακριβείς

### 3) Οι ανιχνευτές

Οι ανιχνευτές είναι εκείνο το τμήμα του Αξονικού Τομογράφου που καταγράφει τον αριθμό των φωτονίων της ακτινοβολίας  $X$  αφού αυτή έχει περάσει μέσα από τον ασθενή. Αποτελούνται από πολλά επιμέρους στοιχεία, τις κυψέλες, τα οποία στους αξονικούς τομογράφους 3ης γενιάς φτάνουν σε αριθμό τις 800-1000 και στους αξονικούς τομογράφους 4ης γενιάς φτάνουν σε αριθμό τις 4000-5000. Η καταγραφή γίνεται με την μετατροπή της ενέργειας των φωτονίων της ακτινοβολίας  $X$  που προσπίπτει πάνω στους ανιχνευτές σε ηλεκτρικό σήμα. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιούνται υλικά τα οποία πρέπει να πληρούν πολύ αυστηρές προϋποθέσεις. Στην πράξη χρησιμοποιούνται δύο ειδών ανιχνευτές, οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης και οι ανιχνευτές αερίου.

Τα υλικά από τα οποία είναι φτιαγμένοι οι ανιχνευτές στερεάς κατάστασης είναι, συνήθως, το Bismuth Germanate ( $Bi_4Ge_3O_{12}$ ) ή το Cadmium Tungstate ( $CdWO_4$ ) και κεραμικά σπανίων γαιών. Όταν προσπέσει πάνω σ' αυτά τα υλικά ένα φωτόνιο, ακτινοβολούν φως, η ένταση του οποίου είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων που έπεσαν πάνω στο υλικό. Το φως αυτό μέσω μίας φωτοδιόδου μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Οι ανιχνευτές αερίου είναι στην ουσία θάλαμοι από κεραμικό που περιέχουν αέριο υπό πίεση, συνήθως ξένο. Όσο περισσότερα είναι τα μόρια του αερίου που υπάρχουν μέσα στο θάλαμο τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει στις μετρήσεις. Γι' αυτό προτιμάται το ξένο το οποίο είναι εξαιρετικά σταθερό αέριο κάτω από υψηλές πιέσεις. Ο ιονισμός του αερίου, από την απορρόφηση της ακτινοβολίας παράγει ηλεκτρικό σήμα, το οποίο είναι ανάλογο της ποσότητας των φωτονίων που απορροφήθηκαν από το αέριο. Και στις δύο περιπτώσεις το σήμα αυτό (raw data) χρησιμοποιείται από τον υπολογιστή του συστήματος για την παραγωγή των τελικών εικόνων.

### 4) Το DAS

Το ηλεκτρικό σήμα(raw data) που παράγεται από τους ανιχνευτές είναι αναλογικό, είναι δηλαδή συνεχές ως προς τις πληροφορίες που περιέχει. Επειδή οι υπολογιστές δεν μπορούν να επεξεργαστούν αναλογικά σήματα, είναι απαραίτητο να μετατραπεί σε ψηφιακό, πράγμα το οποίο επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό σήμα(digital to analog converter,DAC ). Η ενίσχυση του σήματος και η μετατροπή του σε ψηφιακό γίνεται στο DAS. Αφού γίνει αυτό, τα ψηφιακά δεδομένα μεταφέρονται στον υπολογιστή του συστήματος όπου μέσω της διαδικασίας της ανακατασκευής, δηλαδή μιας πολύπλοκης σειράς μαθηματικών υπολογισμών ανακατασκευάζεται η τελική εικόνα.

### 5) Οι υπολογιστές του συστήματος

Οι υπολογιστές είναι στην κυριολεξία η καρδιά ενός αξονικού τομογράφου. Εκεί γίνονται όλοι οι υπολογισμοί για την ανακατασκευή και παρουσίαση των εικόνων από τα πρωτογενή δεδομένα(raw data). Είναι χαρακτηριστικό ότι στις πρώιμες φάσεις της Ελικοειδούς Αξονικής Τομογραφίας αναφέρεται ότι ο περιοριστικός παράγοντας δεν είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στην λυχνία, αλλά οι περιορισμένες δυνατότητες των υπολογιστών για την ολοκλήρωση των απαραίτητων πράξεων σε λογικό χρόνο. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν γίνει πολλές βελτιώσεις και είναι σαφές ότι περαιτέρω βελτιώσεις τόσο στην ταχύτητα όσο και στον αποθηκευτικό χώρο, θα αποφέρουν μόνο οφέλη τόσο για την αξονική τομογραφία, όσο και για μία σειρά από άλλες ιατρικές εφαρμογές (π.χ. επεξεργασία εικόνας, τρισδιάστατες απεικονίσεις).

### 6) Το εξεταστικό τραπέζι

Πάνω σ' αυτό βρίσκεται ξαπλωμένος ο εξεταζόμενος κατά την διάρκεια της εξέτασης . Όπως, έχει ειπωθεί σχέση του με gantry καθορίζει το επίπεδο τομής. Σε μια EAT εξέταση το τραπέζι μετακινείται με σταθερή ταχύτητα καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου συλλογής των δεδομένων. Πάνω σ' αυτό προσαρμόζονται διάφορα εξαρτήματα για την διενέργεια ειδικών εξετάσεων(π.χ. ειδικά στατό για την λήψη στεφανιαίων τομών στο κεφάλι). Οι τελευταίες εξελίξεις στην Αξονική Τομογραφία αφορούν τα μηχανήματα συνεχούς περιστροφής. Με την εμφάνιση της τεχνολογίας των ολισθαινόντων δακτυλίων(Slip Ring) περάσαμε στην εποχή της Ελικοειδούς Αξονικής Τομογραφίας.[9]

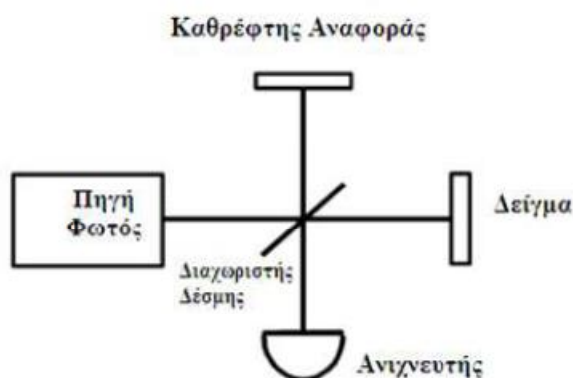
### 3.5 Οπτική τομογραφία συνοχής

Η Οπτική Τομογραφία Συνοχής (Optical Coherence Tomography - OCT) είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιείται ευρέως σαν μια μέθοδος μη επεμβατικής βιοϊατρικής απεικόνισης. Είναι μια τεχνολογία υψηλής ευκρίνειας για απεικόνιση της διατομής της εσωτερικής μικροδομής βιολογικών ιστών. Η OCT είναι σχετικά πρόσφατη, με τις πρώτες αναφορές για χρήση της τεχνολογίας αυτής να γίνονται στις αρχές της δεκαετίας του '90. Ο συμβατικός τρόπος που γίνεται μέχρι σήμερα μια ιατρική διάγνωση απαιτεί την αφαίρεση του ιστού και έπειτα μια διαδικασία ανάλυσης του με μικροσκόπιο για να εξαχθούν συμπεράσματα. Η OCT δίνει τη δυνατότητα να παρθούν εικόνες του παθολογικού ιστού επιτόπου (*in situ*) και σε πραγματικό χρόνο – (*real time*).

Ακόμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις όπου η υπάρχουσα πρότυπη βιοψία είναι επικίνδυνη ή και αδύνατη. Η τεχνολογία OCT είναι ανάλογη με την τεχνολογία απεικόνισης με υπέρηχους με τη διαφορά ότι η OCT χρησιμοποιεί φως αντί για ήχο. Γι' αυτό συχνά χρησιμοποιείται η δεύτερη τεχνολογία σαν ένα μέτρο σύγκρισης της πρώτης. Μια σύγκριση της OCT με τη συμβατική τεχνολογία υπέρηχων δείχνει ότι μπορεί να επιτευχθεί μια ή δύο τάξεις μεγέθους ψηλότερη ανάλυση εικόνας από 1 μέχρι 15  $\mu\text{m}$

### 3.5.1 Γενική αρχή λειτουργίας

Η λειτουργία της OCT είναι βασισμένη στο φαινόμενο της συμβολής λόγω συμφωνίας των κυμάτων και πιο συγκεκριμένα στη συμφωνία μικρού μήκους. Η OCT έχει τη δυνατότητα να πετυχαίνει υψηλή ευκρίνεια βάθους, κάτι το οποίο προσδιορίζεται από το μήκος συμφωνίας της πηγής. Αυτό είναι το μήκος στο οποίο δύο δέσμες φωτός μπορούν να παραμείνουν σε συμφωνία. Φαινόμενο συμβολή μπορεί να παρατηρηθεί μόνο μέσα στο μήκος συμφωνίας της πηγής. Χρησιμοποιώντας πηγές με πάρα πολύ μικρό μήκος συμφωνίας, είναι εφικτή η ευκρίνεια βάθους του ιστού σε μικρομετρικές ( $\mu\text{m}$ ) τάξεις. Αυτό είναι και ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά της OCT. Στο πάνω μέρος του σχήματος 3.7 φαίνεται ένας μετρητής συμβολών τύπου Michelson.

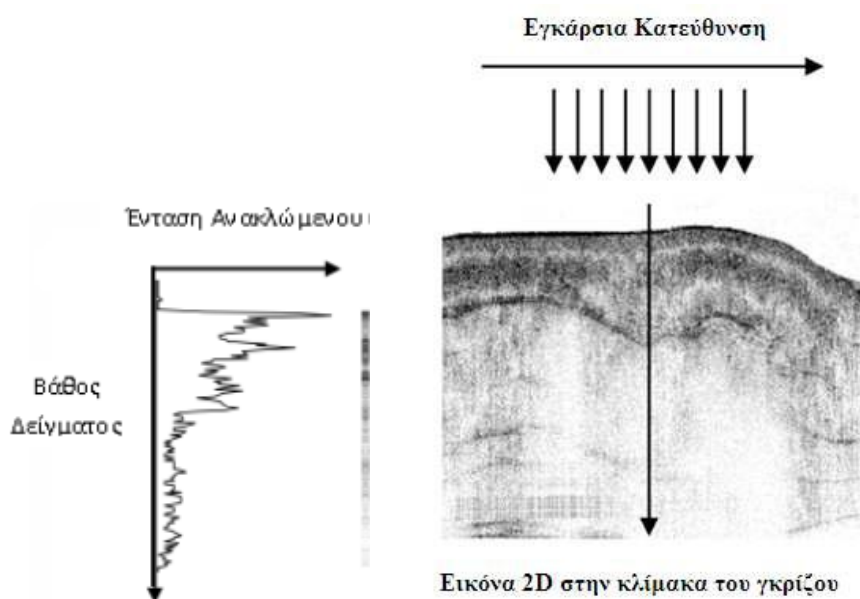


Σχήμα 3.7: Διάταξη Οπτικής Τομογραφίας Συνοχής τύπου συμβολομετρίας Michelson.

δέσμη φωτός από την πηγή φτάνει στον διαχωριστή δέσμης. Το ένα από τα δύο σήματα που συμμετέχουν στη συμβολή είναι εσωτερικό και ονομάζεται δέσμη αναφοράς (reference beam) και κατευθύνεται μέσω του διαχωριστή δέσμης στον καθρέφτη αναφοράς. Το άλλο σήμα είναι αυτό που πέφτει στο σημείο που είναι επιθυμητό να απεικονιστεί, δηλαδή στο δείγμα και ονομάζεται δέσμη δείγματος (sample beam). Οι δέσμες θα ανακλαστούν από το καθρέφτη αναφοράς και τον ιστό αντίστοιχα, και θα επιστρέψουν και πάλι στον διαχωριστή δέσμης, εκεί όπου θα επανασυνδυαστούν. Ο συνδυασμός του θα κατευθυνθεί προς τον φωτοανιχνευτή. Όταν δύο ακτίνες φωτός

συνδυαστούν, αυτά που συνιστούν τη συμβολή είναι τα πεδία τους παρά οι εντάσεις τους. Ο φωτοανιχνευτής μετρά τις αυτοσυσχετίσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων των δύο ακτινών και όχι τις εντάσεις τους και με αυτό τον τρόπο μπορεί να παρατηρεί συμβολές. Αφού έχει χρησιμοποιηθεί μικρό μήκος συμφωνίας στη πηγή, τότε συμβολή θα συμβεί μόνο εάν το μήκος του μονοπατιού αναφοράς και το μήκος του μονοπατιού του δείγματος συμπίπτουν εντός αυτού του μήκους συμφωνίας της πηγής. Αν λόγω χάρη ο καθρέφτης μετακινηθεί έτσι ώστε να μεγαλώνει το μήκος του μονοπατιού αναφοράς, τότε συμβολή θα γίνει μεταξύ της δέσμης αναφοράς και της δέσμης του δείγματος που να έχει ανακλαστεί από πιο μεγάλο βάθος του ιστού.

Έτσι τα δύο μονοπάτια (αναφοράς και δείγματος) θα ισούνται. Σε κάθε περίπτωση, για να μπορεί να απεικονιστεί το δείγμα πρέπει να μετρείται και η ένταση της ανακλώμενης δέσμης αλλά και η χρονική καθυστέρηση της. Η προσπίπτουσα δέσμη σαρώνεται στην εγκάρσια κατεύθυνση, και για να μπορεί να απεικονιστεί η διατομή του δείγματος σε δύο διαστάσεων εικόνα, πρέπει να σαρωθούν αρκετές δέσμες από διαφορετικές θέσεις στην εγκάρσια κατεύθυνση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8 [19]



Σχήμα 3.8: Εικόνες διατομής κατασκευάζονται παίρνοντας μετρήσεις της προσπίπτουσας δέσμης σε διάφορα σημεία στην εγκάρσια κατεύθυνση

### 3.6 Διαθλασιμετρία

#### 3.6.1 Σκιασκοπία

Η σκιασκοπία είναι μία μέθοδος εκτίμησης της διάθλασης που ενδείκνυται για τη διάθλαση σε βρέφη, μικρά παιδιά πνευματικά καθυστερημένα άτομα, αναλφάβητους και μη συνεργάσιμους ασθενείς. Στην σκιασκοπία προβάλλεται φως το οποίο επιτρέπει στον εξεταστή να παρατηρεί την κίνηση μιας περιοχής του βυθού του εξεταζόμενου. Προσθέτοντας

δοκιμαστικούς φακούς μπροστά από το μάτι παρατηρούμε τη φαινόμενη κίνηση της φωτισμένης περιοχής του βυθού. Αν η κίνηση είναι ομόρροπη προσθέτουμε θετικούς φακούς ενώ αν είναι αντίρροπη αρνητικούς φακούς. Τοποθετώντας ανάλογα με την περίπτωση είτε αρνητικούς είτε θετικούς φακούς θα υπάρξει κάποια στιγμή που θα παρατηρηθεί αναστροφή της κίνησης της περιοχής. Ο φακός που προκάλεσε την αναστροφή της κίνησης είναι αυτός που προσδιορίζει τον βαθμό της αμετρωπίας.

### 3.6.2 Αυτόματα διαθλασίμετρα

Το πρώτο αυτόματο διαθλασίμετρο παρουσιάστηκε πριν από περίπου 30 χρόνια με αμφιλεγόμενες αντιδράσεις. Από τότε μέχρι σήμερα η αποδοχή, η διάδοση και η εξέλιξη της αυτοματοποιημένης διαθλασιμετρίας υπήρξε ραγδαία. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι αυτές οι συσκευές προσφέρουν ταχύτητα, αξιόπιστη ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Τα αυτόματα διαθλασίμετρα αποτελούνται ουσιαστικά από :

#### 1) Μια πηγή υπέρυθρου φωτός (800-900 nm)

Η υπέρυθη ακτινοβολία χρησιμοποιείται κυρίως λόγω της μεγάλης διαπερατότητας και αντανakλαστικότητας που επιτυγχάνεται από τα βαθύτερα στρώματα του ματιού (σκληρό και χοριοειδή). Σε αυτό το μήκος κύματος, η ανάκλαση από τον σκληρό και τον χοριοειδή, σε συνδυασμό με την επίδραση της εκτεταμένης χρωματικής εκτροπής, συνεπάγεται ένα συστηματικό σφάλμα της τάξης της  $-0,50$  D το οποίο πρέπει να προστίθεται για να αντισταθμίσει την διάθλαση για το φυσικό φως.

#### 2) Ένας στόχος προσήλωσης

Διάφοροι στόχοι έχουν χρησιμοποιηθεί ανά καιρούς όπως 'αστέρια' ή εικόνες με θόλωση στην περιφέρεια για να επιτευχθεί χαλάρωση της προσαρμογής. Τώρα όλα τα αυτόματα διαθλασίμετρα χρησιμοποιούν τεχνικές θόλωσης για την χαλάρωση της προσαρμογής πριν από την αντικειμενική μέτρηση όπου συνήθως τοποθετείται ένας θετικός φακός μπροστά από την εικόνα έτσι ώστε να φαίνεται θολή. Ωστόσο η χαλάρωση της προσαρμογής δεν επιτυγχάνεται πάντα και μπορεί να υπάρξουν διακυμάνσεις μέχρι  $0,50$  D με αποτέλεσμα μικρή υπερδιόρθωση στην μυωπία ή υποδιόρθωση στην υπερμετρωπία η και περισσότερο αν πρόκειται για νεαρά άτομα ή παιδιά.

#### 3) Ένα οπτόμετρο Badal

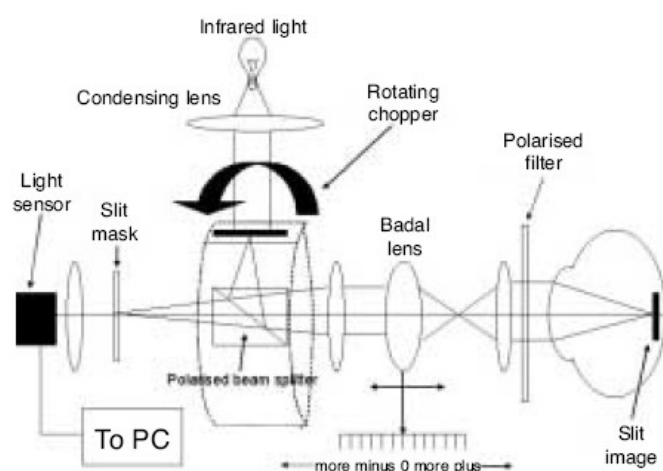
Το οπτόμετρο Badal χρησιμοποιείται από τα περισσότερα διαθλασίμετρα γιατί παρουσιάζει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα:

α) Υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της απόστασης του φακού του Badal από τον οφθαλμό και της διάθλασης στον άξονα που μετράμε.

β) Με το συγκεκριμένο σύστημα φακών, η μεγέθυνση του στόχου παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από τη θέση του φακού Badal.



Η βασική αρχή λειτουργίας του διαθλασίμετρου φαίνεται στο σχήμα 3.9 .Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός ενσωματώθηκε στο διαθλασίμετρο Dioptron της CooperVision το 1970 και αναπτύχθηκε από τον Charles Munnerlyn. Υπάρχει μια πηγή υπέρυθρου φωτός το οποίο ευθυγραμμίζεται και περνάει διαμέσου ορθογώνιων μασκών που βρίσκονται σε ένα περιστρεφόμενο τύμπανο. Έπειτα το φως περνάει στο σύστημα Badal διαμέσου ενός διαχωριστή δέσμης. Αυτό το σύστημα κινείται πλάγια μέχρι το φως που έχει περάσει από τη σχισμή να εστιαστεί ιδανικά στον αμφιβληστροειδή. Όταν επιτευχθεί η καλύτερη εστίαση ένας φωτοσένσoras δίνει το σήμα κορύφωσης. Ο πολωτικός διαχωριστής δέσμης απομακρύνει το ανακλώμενο φως από τον κερατοειδή ενώ το είδωλο της σχισμής στον αμφιβληστροειδή περνάει διαμέσου ενός πολωμένου διαχωριστή δέσμης. Το συγκεκριμένο σύστημα μετράει σε τουλάχιστον 3 άξονες του ματιού για να μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της διαθλαστικής ισχύος του ματιού με τη μέθοδο των τετράγωνων ημιτόνων(sine-squared function).



Σχήμα 3.9 :Βασική αρχή αυτόματης διαθλασιμετρίας.

### 3.6.3 Τύποι αυτόματων διαθλασίμετρων

Ουσιαστικά υπάρχουν 3 τύποι αυτόματων διαθλασίμετρων.

#### 1) Ανάλυσης ποιότητας εικόνας.

Αυτός ο τύπος διαθλασίμετρου δεν χρησιμοποιείται ευρέως σήμερα. Αρχική του εφαρμογή υπήρξε το διαθλασίμετρο Dioptron. Η ιδανική θέση εστίασης του οπτομέτρου Badal καθορίζεται από το εξερχόμενο σήμα του φωτοσένσορα. Το περιστρεφόμενο τύμπανο παράγει έναν εναλλασσόμενο φωτεινό/σκοτεινό στόχο. Ο φωτοσένσορας συνδυάζει την ένταση του

εισερχόμενου φωτός από το μάτι με την ένταση του φωτός από τη σχισμή του περιστρεφόμενου τύμπανου. Αν η ένταση του φωτός από το μάτι είναι χαμηλή σημαίνει ότι το οπτόμετρο Badal δεν είναι στη σωστή θέση για τη διόρθωση αξονικής δύναμης. Αν η ένταση του φωτός κορυφωθεί χρησιμοποιείται η ένδειξη στο Badal για να βρεθεί η ισχύς του άξονα που μετράμε. Όταν αυτό

γίνει για 3 άξονες, χρησιμοποιείται η μέθοδος των τετράγωνων ημιτόνων για να υπολογιστεί η σφαιροκυλινδρική συνταγή.

## 2) Διπλού pin-hole ,βασισμένο στην αρχή Scheiner.

Τα περισσότερα διαθλασίμετρα σε λειτουργία σήμερα χρησιμοποιούν την αρχή του Scheiner. Στην κλινική διάταξη χρησιμοποιείται ένας διπλός στενοπικός δίσκος ο οποίος τοποθετείται μπροστά από την κόρη του οφθαλμού. Αν ο οφθαλμός είναι μυωπικός ,ο ασθενής θα βλέπει το αντικείμενο διπλό και χιασμένο (η εικόνα του

αριστερού οφθαλμού προς τα δεξιά και του αριστερού οφθαλμού προς τα αριστερά). Αν ο οφθαλμός είναι υπερμετρωπικός ,ο ασθενής βλέπει το αντικείμενο διπλό και αχίαστο. Η διάκριση μεταξύ χιασμένου και αχίαστου ειδώλου μπορεί να γίνει εύκολα ζητώντας από τον ασθενή να πει ποιο είδωλο εξαφανίζεται όταν φραχθεί το άνοιγμα του πάνω ή του κάτω στενοπικού δίσκου. Η εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας στα αυτόματα διαθλασίμετρα είναι λίγο διαφορετική. Υπάρχουν 2 LEDS (δίοδοι που εκπέμπουν φως που απεικονίζονται στο κορικό επίπεδο. Αυτοί δρουν σαν το στενοπικό δίσκο του Scheiner με το πλεονέκτημα ότι στενές δέσμες φωτός παράγονται από ένα μικρό άνοιγμα του στενοπικού δίσκου ο οποίος είναι τοποθετημένος στην εστία του αντικειμενικού φακού.

Όταν γίνει η απεικόνιση των LEDS στο κορικό επίπεδο ,αν υπάρχει διαθλαστικό σφάλμα θα γίνει διπλασιασμός των LEDS. Μετά την διάθλαση ,το αμφιβληστροειδικό είδωλο από τα LEDS ανακλάται από τον αμφιβληστροειδικό φως που εκπέμπεται από το μάτι ανακλάται ξανά από ένα ημιεπίπεδο καθρέπτη και κατευθύνεται σε ένα διπλό φωτοανιχνευτή. Για να γίνει η διάκριση μεταξύ του χιασμένου και του αχίαστου διπλασιασμού ,τα LEDS πάλλονται διαφορετικά στις υψηλές συχνότητες. Ο διπλός φωτοανιχνευτής του ειδώλου είναι έτσι σχεδιασμένος ώστε να απεικονίζει μόνο το ένα από τα 2 LEDS σε κάθε του μισό και έτσι γίνεται δυνατή η διάκριση χιασμένου και αχίαστου ειδώλου. Καθώς το σύστημα των LEDS μετακινείται μπροστά και πίσω ο διαχωρισμός των διπλωπικών ειδώλων εξαρτάται από τον φωτοανιχνευτή .Όταν το αμφιβληστροειδικό είδωλο είναι μονό ένα μονό είδωλο των LEDS βρίσκεται στην εστία και των 2 φωτοανιχνευτών. Από τη θέση του LED υπολογίζεται το διαθλαστικό σφάλμα σε αυτόν τον άξονα. Για τον υπολογισμό του αστιγματισμού χρησιμοποιούνται 4 LEDS και υπολογίζεται η δύναμη του άξονα που είναι κάθετος σε αυτόν που μετράμε.

Είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ευθυγράμμιση των φωτοανιχνευτών και το σημείο προσήλωσης του ασθενούς να βρίσκεται ομοαξονικά με το μηχάνημα. Αν δεν πληρείται αυτή η προϋπόθεση και η μέτρηση γίνει παραξονικά θα υπάρχει σφάλμα. Οι κατασκευαστές έχουν προσπαθήσει να αποφύγουν αυτού του είδους τα σφάλματα φτιάχνοντας συστήματα αυτο-ευθυγράμμισης. Οι οπτομέτρες που παρακάμπτουν αυτή την διαδικασία μπορεί να αυξήσουν την πιθανότητα σφάλματος μέτρησης λόγω κακής ευθυγράμμισης.

## 3) Σκιασκοπίας.

Κάποια αυτόματα διαθλασίμετρα χρησιμοποιούν υπέρυθρη βιντεοδιάθλαση (Welsch Allen Suresight, Power Refractor II). Ένα περιστρεφόμενο τύμπανο παράγει ένα πλέγμα (grating) ή σχισμή. Το σκεπτικό είναι το ίδιο με την σκιασκοπία όπου η ταχύτητα του αντανακλαστικού χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διάθλασης. Η σχισμή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ισχύος του ματιού. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του αντανακλαστικού ανιχνεύεται από φωτοανιχνευτές και στην συνέχεια γίνονται υπολογισμοί για να εξαχθεί η αξονική ισχύς.[20]

### 3.7 Κερατομετρία

Κερατομετρία ονομάζεται η διαδικασία με την οποία μετράται η ακτίνα καμπυλότητας της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς. Τα όργανα που χρησιμοποιούνται συνήθως για την κερατομέτρηση είναι το κερατόμετρο (σχήμα 3.10) και το οφθαλμόμετρο Javal (σχήμα 3.11). Η κερατομετρία αρχικά χρησιμοποιήθηκε για την αντικειμενική μέτρηση του αστιγματισμού. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως για την εφαρμογή φακών επαφής.



Σχήμα 3.10: Κερατόμετρο.

Η εφαρμογή της για τον προσδιορισμό του αστιγματισμού πιστεύεται ότι είναι ανακριβής για τους ακόλουθους λόγους:

1. Το κερατόμετρο ή οφθαλμόμετρο μετράει την καμπυλότητα και όχι τη διαθλαστική δύναμη της πρόσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς. Η δύναμη υπολογίζεται έμμεσα με την αποδοχή ενός συμβατικού δείκτη διάθλασης του κερατοειδούς.
2. Η διαθλαστική δύναμη της οπίσθιας επιφάνειας του κερατοειδούς αγνοείται παρ' όλο που μπορεί να έχει δύναμη μέχρι και 0,50 διοπτρία ,συνήθως παρά τον κανόνα.
3. Δεν συνυπολογίζει τον φακικό αστιγματισμό.
4. Δεν συνυπολογίζει το vertex distance με αποτέλεσμα στην υψηλή μυωπία ο απαιτούμενος κύλινδρος να είναι μεγαλύτερος από αυτόν που δείχνει το κερατόμετρο ενώ στην υψηλή υπερμετρωπία μικρότερος.



Σχήμα 3.11 : Οφθαλμόμετρο *javal*.

### 3.7.1 Τοπογραφία κερατοειδούς

Η τοπογραφία κερατοειδούς (*videokeratography*) χρησιμοποιείται ευρέως για να πάρουμε πληροφορίες για την επιφάνεια του κερατοειδούς. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ότι η τεχνολογία εξελίχθηκε και οι σημερινοί τοπογράφοι είναι πιο προσιτοί οικονομικά ,έχουν μικρότερες διαστάσεις και παρέχουν περισσότερη ακρίβεια. Οι τοπογράφοι σε αντίθεση με το κερατόμετρο που μετράει μόνο σε 4 σημεία στην κεντρική περιοχή του κερατοειδούς διαμέτρου 3-4mm μπορούν να απεικονίσουν 8.000-20.000 συγκεκριμένα σημεία σε όλη την επιφάνεια του κερατοειδούς προσφέροντας μια πολύ καλύτερη και ποσοτικά και ποιοτικά μελέτη. Η τοπογραφία ενδείκνυται κλινικά για παθήσεις του κερατοειδή όπως τον κερατόκωνο ,στον προεγχειρητικό έλεγχο για πιθανά εμπόδια όπως ουλές ή ανώμαλο αστιγματισμό ,στον μετεγχειρητικό έλεγχο για την παρακολούθηση της περιόδου επούλωσης. Επίσης είναι πολύ χρήσιμη για τον ετήσιο έλεγχο των μεταβολών του κερατοειδούς των χρηστών μαλακών φακών επαφής και στην εφαρμογή των σκληρών αεροδιαπερατών φακών επαφής. Οι περισσότεροι τοπογράφοι διαθέτουν λογισμικό για τον ατομικό σχεδιασμό του φακού επαφής για καλύτερη εφαρμογή.

### 3.7.2 Αρχή λειτουργίας τοπογραφίας κερατοειδούς

Οι τοπογράφοι χρησιμοποιούν ομόκεντρους εναλλασσόμενους φωτεινούς και σκοτεινούς δακτυλίους (*placido rings*) οι οποίοι προβάλλονται στον κερατοειδή σχηματίζοντας ένα είδωλο που ανακλάται. Το είδωλο της ανάκλασης προβάλλεται σε μια CCD κάμερα. Το εικονιζόμενο είδωλο συγκρίνεται με το αρχικό είδωλο και μέσω του κατάλληλου λογισμικού γίνεται η σύγκριση των εικόνων ,η ανάλυση των αποτελεσμάτων και η προβολή τους με διάφορες μορφές. Υπάρχουν δύο τύποι τοπογράφων. Στον ένα τύπο τοπογράφου ο κώνος (*placido disk*) ο οποίος περιέχει τους δακτυλίους είναι αρκετά μεγάλος (σχήμα 3.12) σε διάμετρο ,είναι τοποθετημένος σε κάποια απόσταση από τον εξεταζόμενο ενώ στον τύπο ο κώνος είναι μικρότερου μεγέθους (σχήμα 3.13) και βρίσκεται σε επαφή με το μάτι του εξεταζόμενου.

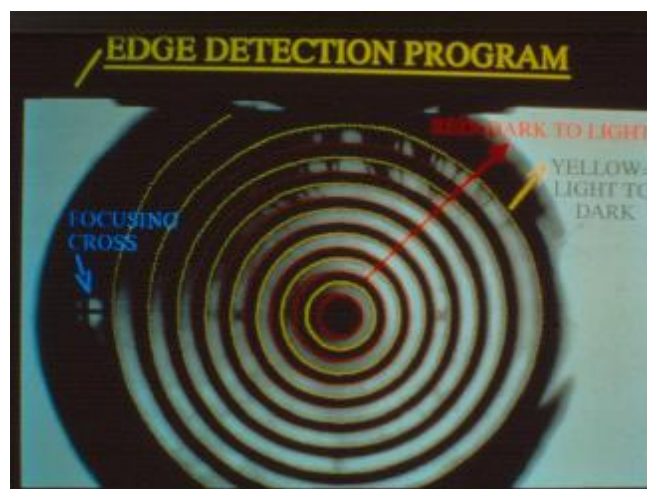


Σχήμα 3.12 : Τοπογράφος με μεγάλο κώνο για μέτρηση χωρίς επαφή με το μάτι του εξεταζόμενου.



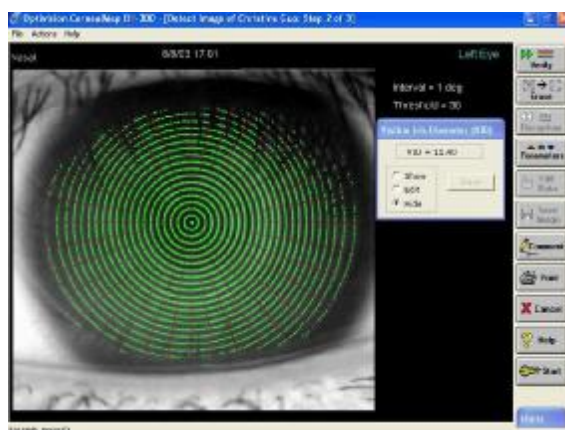
Σχήμα 3.13: Τοπογράφος με μικρό κώνο.

Επίσης υπάρχουν δύο τύποι εναλλασσόμενων φωτεινών και σκοτεινών δακτυλίων και συνεπώς δύο διαφορετικοί τρόποι να πάρουμε πληροφορίες από τον κερατοειδή. Στην μία περίπτωση ο κώνος περιέχει ένα μικρό αριθμό από φαρδείς ομόκεντρους κύκλους. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιεί την τεχνική edge-detection (ανίχνευση άκρης σχήμα 3.14) ,ανιχνεύοντας την μετάβαση από τις σκοτεινές στις φωτεινές περιοχές της εικόνας. Αν η εικόνα είναι καλά εστιασμένη οι άκρες ανιχνεύονται εύκολα.



Σχήμα 3.14: Σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική edge detection.

Το παραπάνω σύστημα δεν είναι πολύ ευαίσθητο στις μικρές λεπτομέρειες και αν η παθολογία εντοπίζεται σε μια πολύ μικρή περιοχή μπορεί να μη γίνει αντιληπτή. Στη δεύτερη περίπτωση ο κώνος αποτελείται από ένα μεγαλύτερο αριθμό λεπτών ομόκεντρων δακτυλίων. Η συγκεκριμένη τεχνική ονομάζεται *peak detection* (ανίχνευση κορυφής σχήμα 3.15) και λειτουργεί προβάλλοντας μια ακίδα που αντιπροσωπεύει την ένταση κάθε φωτιζόμενου δακτυλίου. Το λογισμικό εντοπίζει την κορυφή της έντασης σε κάθε ακίδα και τοποθετεί τα δεδομένα στο συγκεκριμένο σημείο. Λόγω του αυξημένου αριθμού των ομόκεντρων κύκλων η μέθοδος αυτή είναι πιο ευαίσθητη και γίνονται αντιληπτές ακόμα και μικρές αλλαγές στην επιφάνεια του κερατοειδούς που τα άλλα συστήματα μπορεί να αγνοήσουν.



Σχήμα 3.15: Σύστημα που χρησιμοποιεί την τεχνική *peak detection*.

Η προβολή των αποτελεσμάτων γίνεται με διάφορους τρόπους. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι χαρτογράφησης που χρησιμοποιούνται από τους οφθαλμιάτρους είναι οι ακόλουθοι:

- **Axial map:** Εμφανίζει τις αλλαγές στην καμπυλότητα του κερατοειδούς σαν προβολές και χρησιμοποιεί χρώματα που αντιπροσωπεύουν τις τιμές σε διοπτρίες. Τα θερμά χρώματα αντιπροσωπεύουν τις πιο κυρτές περιοχές (κόκκινο, πορτοκαλί) ενώ τα ψυχρά χρώματα τις πιο επίπεδες (μπλε, πράσινο). Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής είναι ότι αγνοεί τις μικρές παραλλαγές στην καμπυλότητα.
- **Tangential map:** Χρησιμοποιεί χρώματα που αντιπροσωπεύουν τις μεταβολές σε τιμές διοπτριών. Προσφέρει καλύτερη απεικόνιση για τον εντοπισμό κερατοειδικής βλάβης και χρησιμεύει για την μετεγχειρητική παρακολούθηση.
- **Elevation map:** Ο συγκεκριμένος χάρτης δείχνει το μετρούμενο ύψος από το οποίο αποκλίνει η κερατοειδική καμπυλότητα σε σύγκριση με μία επιφάνεια αναφοράς καθορισμένη από τον υπολογιστή. Τα θερμότερα χρώματα στον χάρτη αντιπροσωπεύουν τα σημεία στον κερατοειδή που βρίσκονται ψηλότερα από την επιφάνεια αναφοράς

ενώ τα ψυχρά χρώματα αντιπροσωπεύουν τα σημεία που βρίσκονται πιο χαμηλά από την επιφάνεια αναφοράς.

- Refractive map: Χρησιμοποιεί την μετρημένη ισχύ σε διοπτρίες και εφαρμόζει το νόμο του Snell για τον υπολογισμό της πραγματικής διαθλαστικής ισχύος του κερατοειδή. Το σημαντικότερο κομμάτι του διαθλαστικού χάρτη είναι το κεντρικό που καλύπτει το τμήμα της κόρης και έχει την μεγαλύτερη επίδραση στην ποιότητα της όρασης.

**ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΚΑΙ  
ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΟΠΤΙΚΗΣ ΙΝΑΣ**



#### 4.1 Εισαγωγή

Οι οπτικές ίνες είναι η τεχνολογία παθητικής οδήγησης της οπτικής ακτινοβολίας μέσα σε οπτικούς αγωγούς που μπορεί να είναι γυάλινοι ή πλαστικοί. Είναι σχεδιασμένη να καθοδηγεί το φως κατά μήκος της εγκλωβίζοντας όσο το δυνατόν περισσότερο φως σε μια συγκεκριμένη μορφή διάδοσης. Στις ίνες με μεγάλη διάμετρο πυρήνων, η διάδοση του φωτός βασίζεται σε ολική εσωτερική ανάκλαση ενώ σε ίνες μικρότερων διαμέτρων η διάδοση του φωτός στηρίζεται στην καθιέρωση ενός κυματοδηγού

#### 4.2 Αρχή λειτουργίας

Η ίνα θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως κυματοδηγός μέσα στο οποίο διαδίδεται το φως από το ένα άκρο στο άλλο. Τα φωτόνια περνούν την θέση των ηλεκτρονίων που υπάρχουν αντίστοιχα στους μεταλλικούς αγωγούς. Η διάδοση επιτυγχάνεται με διαδοχικές ανακλάσεις στα τοιχώματα της ίνας

Η ίνα αποτελείται από έναν πυρήνα που περιβάλλεται από μία στρώση επένδυσης. Για να περιοριστεί το οπτικό σήμα στον πυρήνα ο διαθλαστικός δείκτης του πυρήνα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της επένδυσης. Πυρήνας οπτικής ίνας είναι το τμήμα εκείνο της ίνας μέσα στο οποίο διαδίδονται τα οπτικά σήματα. Το περίβλημα είναι το υλικό χαμηλού δείκτη διάθλασης που περιβάλλει τον πυρήνα σε όλο το μήκος (σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1: Μονότροπη οπτική ίνα .

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μια ακτίνα φωτός που εισέρχεται στον πυρήνα να μην μπορεί να εξέλθει από αυτόν μέσω του περιβλήματος διότι προσπαθεί να μεταβεί από οπτικό πυκνότερο σε οπτικό αραιότερο μέσο ( με γωνία πρόσπτωσης μεγαλύτερη από την οριακή) παρά μόνο όταν φτάσει στο άλλο άκρο της ίνας



Σχήμα4.2: Τρόπος μετάδοσης σήματος εντός οπτικής ίνας με βάση την ολική ανάκλαση

### 4.3 Τύποι οπτικών ινών

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι οπτικών ινών οι οποίοι διακρίνονται κυρίως από την κατανομή του δείκτη διάθλασης εγκάρσια της τομής της ίνας. Η κατανομή του δείκτη διάθλασης μιας οπτικής ίνας αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται ως συνάρτηση της ακτινικής αποστάσεως από το κέντρο του πυρήνα της ίνας. Έτσι διακρίνονται οι παρακάτω τρεις τύποι οπτικών ινών

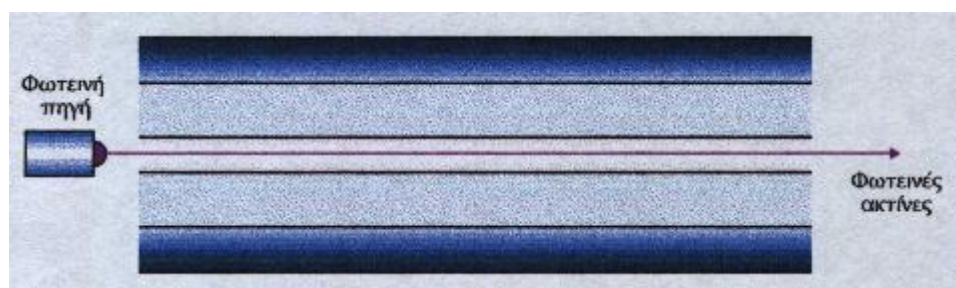
1 Ίνα απλού ρυθμού - βηματικού δείκτη

2 Ίνα πολλαπλού ρυθμού – βηματικού δείκτη

3 Ίνα πολλαπλού ρυθμού – βαθμιαίου δείκτη

#### 4.3.1 Μονότροπες οπτικές ίνες (single mode fiber optics).

Στις μονότροπες οπτικές ίνες η διάμετρος της κεντρικής ίνας είναι πολύ μικρή και πλησιάζει περίπου το επίπεδο του μήκους κύματος του εκπεμπόμενου σήματος. Στην περίπτωση αυτή, έχουμε έναν μόνο δυνατό τρόπο μετάδοσης του οπτικού σήματος, τον αξονικό. Η πορεία των ακτινών σε μια τέτοια οπτική ίνα φαίνεται στο σχήμα 4.3. Η κεντρική ίνα στις μονότροπες οπτικές ίνες έχει διάμετρο από 5μm έως 10μm με συνηθέστερη τιμή τα 8,3 μm.



Σχήμα 4.3. Μονότροπη οπτική ίνα

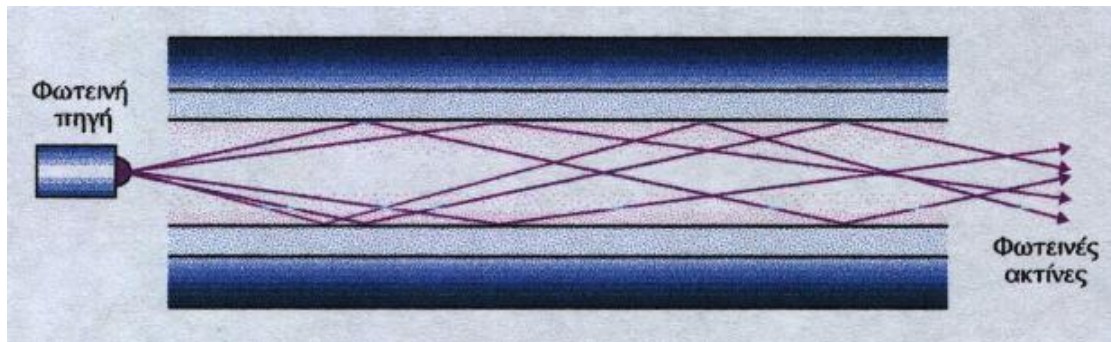
#### 4.3.2 Πολύτροπες οπτικές ίνες (Multimode fiber optics)

Ο τρόπος αναφοράς των μεγεθών για τις οπτικές ίνες είναι να αναφέρουμε πρώτα τη διάμετρο του πυρήνα (γυαλιού) και στη συνέχεια τη διάμετρο της επίστρωσης (cladding). Οι μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών γίνονται σε  $10^{-6}$  μέτρα. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες έχουν τυπικά μεγέθη 50μm/ 125μm, 62,5/125, 85/125 ή 100/140. Ο συνηθέστερος τύπος, ο οποίος κυκλοφορεί, είναι ο 62,5/125. Η ολική διάμετρος της οπτικής ίνας συμπεριλαμβανομένων των ενισχυτικών συνθετικών ινών και του εξωτερικού περιβλήματος φτάνει τα 900μm. Η αρχή μετάδοσης σε πολύτροπη οπτική ίνα είναι ότι οι διάφορες ακτίνες του οπτικού σήματος ανάλογα με την είσοδο τους στην οπτική ίνα ταξιδεύουν ανακλώμενες υπό διαφορετικές γωνίες, όπως φαίνεται στα σχήματα

2,3. Αυτός ο τρόπος μετάδοσης ονομάζεται πολύτροπος (multimode), επειδή έχουμε πολλούς δρόμους μετάδοσης, που αντιστοιχούν στις διαφορετικές γωνίες ανάκλασης. Οι πολύτροπες οπτικές ίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες: τις διακριτού βήματος (step index) και τις βαθμιαίου βήματος (graded index).

- Οπτική ίνα διακριτού δείκτη (step index)

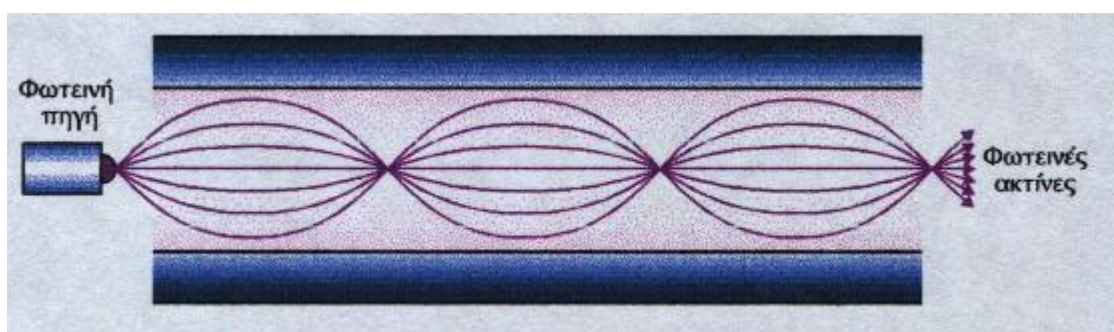
Στις ίνες αυτές συμβαίνει απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης μεταξύ της κεντρικής ίνας και του υλικού επίστρωσης. Στην περίπτωση αυτή, η πορεία των ακτίνων εμφανίζεται στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4.: Οπτική ίνα διακριτού δείκτη

- Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη (graded index)

Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης του υλικού της κεντρικής ίνας. Συμβαίνει βαθμιαία μείωση όσο απομακρυνόμαστε από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του γυαλιού. Η πορεία των ακτίνων σε μια τέτοια ίνα είναι αυτή, που φαίνεται στο σχήμα 4.5 [24].



Σχήμα 4.5.: Οπτική ίνα βαθμιαίου δείκτη

#### 4.4 Ενδοσκόπιο

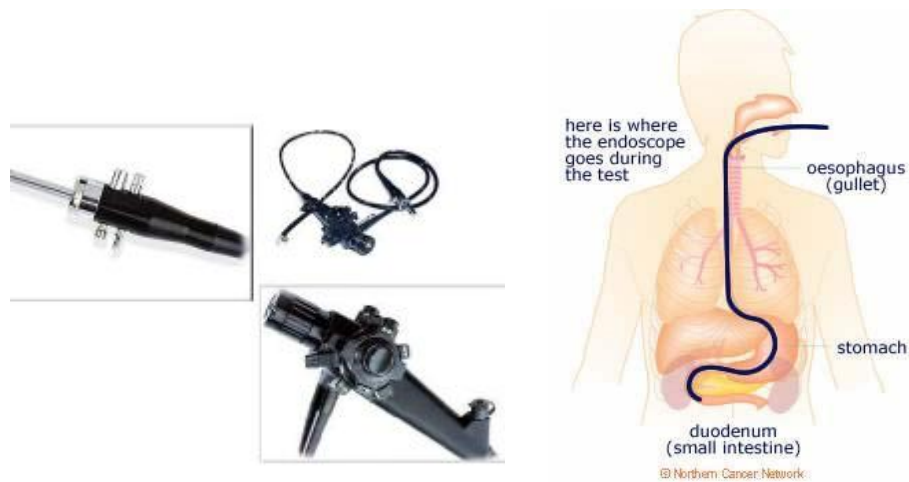
Μια από της πιο αντιπροσωπευτικές εφαρμογές των οπτικών ινών στην διαγνωστική ιατρική είναι το ενδοσκόπιο.

Με το ενδοσκόπιο ο γιατρός μπορεί να δει (με δυνατότητα και να επέμβει) το εσωτερικό κοιλότητων του σώματος. Το βασικό του εξάρτημα είναι

ένας οπτικός αγωγός. Επειδή οι κοιλότητες του σώματος είναι σκοτεινές, απαιτείται κατ' αρχήν να οδηγηθεί φως, μέσω των οπτικών ινών, στο εσωτερικό τους. Συνήθως χρησιμοποιείται λυχνία αερίου ξένου που εκπέμπει φως μεγάλης έντασης. Ο «μισός» οπτικός αγωγός καταλαμβάνεται από τις οπτικές ίνες που οδηγούν το φως μέσα στην κοιλότητα και ο υπόλοιπος από τις οπτικές ίνες που μεταφέρουν την εικόνα του εσωτερικού της κοιλότητας στην ειδική οθόνη της αίθουσας της επέμβασης. Όταν ο «δρόμος» που θα διανύσει το ενδοσκοπίο είναι σχετικά σύντομος και ευθύς (όπως με το αρθροσκόπιο και το λαπαροσκόπιο) επιλέγεται τύπος με φακούς που παρεμβάλλονται στην πορεία εξόδου της εικόνας, για να την ενισχύσουν, όπως στο τηλεσκόπιο.

Όταν αντίθετα, ο «δρόμος» του ενδοσκοπίου είναι ελικοειδής (όπως του κολονοσκοπίου), υπάρχουν δύο επιλογές για τη μεταφορά της εικόνας. Όταν ο οπτικός αγωγός έχει μεγάλο μήκος συνήθως έχει προσαρμοσμένη στο άκρο του μία μικροσκοπική κάμερα λήψης, εμβαδού λίγων τετραγωνικών χιλιοστομέτρων (άμεση ή τοπική λήψη εικόνας). Το ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα είναι παρεμφερές με αυτό των κλασικών συσκευών τηλεοπτικής λήψης (video camera) του εμπορίου. Πρόκειται για συσκευή εξοπλισμένη με τετράγωνο μικρό πλέγμα με χιλιάδες ηλεκτρονικούς αισθητήρες φωτός (συσκευή CCD – charge coupled device) που ανιχνεύουν και αποθηκεύουν την ένταση του φωτός κάθε σημείου του φωτεινού αντικειμένου που «βλέπουν». Σε αυτήν την περίπτωση, οι οπτικές ίνες για τη μεταφορά στην έξοδο της εσωτερικής εικόνας, έχουν αντικατασταθεί από ηλεκτρικά καλώδια. Η εικόνα παρουσιάζεται σε δέκτη τηλεόρασης και αποθηκεύεται σε μαγνητο-οπτική συσκευή εγγραφής (video recorder). Η δεύτερη επιλογή είναι ο κλασικός «διπλός» οπτικός αγωγός, δηλαδή ένα μέρος των οπτικών ινών είναι επιφορτισμένο να φωτίσει την εσωτερική κοιλότητα και οι υπόλοιπες ίνες, αυστηρά διατεταγμένες, «οδηγούν» την εικόνα έξω από το σώμα. Στις απλές ιατρικές διαδικασίες, στην έξοδο του οπτικού αγωγού προσαρμόζεται προσοφθάλμιος φακός (όπως στο μικροσκόπιο), όπου ο εξεταστής παρατηρεί την εικόνα (σχήμα 4.6).

Σε διαδικασίες πιο πολύπλοκες ή σε επεμβάσεις, στην έξοδο του οπτικού αγωγού προσαρμόζεται CCD camera και η εικόνα μεταφέρεται στην οθόνη τηλεοπτικού δέκτη, τον οποίο μπορεί να παρατηρεί όλη η ιατρική ομάδα και σε πραγματικό χρόνο (on line) να αποφασίζονται τα επόμενα βήματα της επέμβασης. Το μέρος του ενδοσκοπίου που περνά μέσα στο ανθρώπινο σώμα (οισοφάγος, έντερο, κοιλιά) έχει διάμετρο 0,3 ως 15,0 mm περίπου, αναλόγως του τύπου του. Το μήκος του μπορεί να φτάνει το 1,5 μέτρο. Τα υλικά του είναι κατάλληλα για συνεχείς αποστειρώσεις και τα πρόσθετα – βοηθητικά εξαρτήματα – εργαλεία είναι συνήθως μίας χρήσης, για λόγους υγιεινής.



Σχήμα 4.6: Άποψη σύγχρονου γαστροσκοπίου με εφαρμογή στην διάγνωση παθήσεων του γαστρεντερικού συστήματος

Τα σύγχρονα ενδοσκόπια περιέχουν πλέον δεκάδες χιλιάδες οπτικές ίνες διαμέτρου μικρομέτρων (εκατοστά της ανθρώπινης τρίχας), δίνοντας διακριτική ικανότητα της τάξης δέκατων του χιλιοστού. Πιο λεπτές ίνες δεν θα βοηθούσαν, επειδή υπάρχει περιορισμός και από το μήκος κύματος του χρησιμοποιούμενου φωτός

Το ενδοσκόπιο είναι όμως και χειρουργικό εργαλείο, επομένως εκτός από την οπτική διάταξη είναι εξοπλισμένο και με μηχανικά εξαρτήματα. Π.χ. επειδή τα όργανα του ανθρωπίνου σώματος στέκονται, από τη φύση τους, συνωπισμένα, χωρίς ελεύθερο πεδίο γύρω τους για να δράσει ο χειρουργός, υπάρχει ειδικό σωληνάκι εμφύσησης αδρανούς CO<sub>2</sub>, που φουσκώνει την περιοχή και διαχωρίζονται οι επιφάνειες των γειτονικών οργάνων μεταξύ τους. Το ενδοσκόπιο είναι δυνατόν να εμπεριέχει λεπτή χειρουργική λαβίδα για εξέταση-διερεύνηση του είδους των ιστών που φωτίζονται, όπως και μικροσκοπικό νυστέρι για αφαίρεση δειγμάτων ιστών που πρέπει να εξεταστούν στο εργαστήριο. Μικρός βρόχος μπορεί να τυλιχθεί στο «λαιμό» ογκιδίου που κρίνεται σκόπιμο να αφαιρεθεί, ενώ ο βρόχος διαπερνάται με κατάλληλο ηλεκτρικό ρεύμα που τον θερμαίνει για τον ταυτόχρονο καυτηριασμό του πληγωμένου ιστού (βοηθά στο σφράγισμα των αιμοφόρων αγγείων και τον περιορισμό της τοπικής αιμορραγίας). Το ενδοσκόπιο μπορεί να εμπεριέχει και ειδικό μηχανισμό εκτόξευσης μικροσκοπικών συρραπτικών ελασμάτων ή άλλης διάταξης για συρραφή χειρουργικών τομών. Στην κεφαλή του ενδοσκοπίου είναι εγκατεστημένη διάταξη πιλοτηρίου, από όπου ο χειριστής μπορεί, αφενός να γυρνά το άκρο και να φωτίζει όλη η γύρω περιοχή, αφετέρου να επεμβαίνει χειρουργικά με όλους τους τρόπους που αναφέρθηκαν, κατά περίπτωση.



Σχήμα 4.7: Το ενδοσκόπιο με ένα εργαλείο

# 5

## ΟΙ ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

## Εισαγωγή

Η αυξανόμενη ανησυχία για τις πιθανές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία προέρχεται κυρίως από επιδημιολογικές μελέτες εκτεθειμένων πληθυσμών αλλά επίσης και από τα αποτελέσματα μελετών σε ζώα και σε καλλιέργειες κυττάρων ή ιστών εκτεθειμένων σε διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας.

Η απειλή του καρκίνου από μόνη της αποτελεί σημαντικό λόγο αναστάτωσης. Ωστόσο, η ανησυχία αναμφίβολα αυξάνεται εξαιτίας της προφανούς έλλειψης συμφωνίας ανάμεσα στους επιστήμονες όσον αφορά τη σπουδαιότητα αυτών των επιδράσεων, αλλά και λόγω της παραπληροφόρησης πολλές φορές από τα μέσα ενημέρωσης που εντείνουν αδικαιολόγητα την κινδυνολογία γύρω από τα θέματα που έχουν να κάνουν με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσλαμβάνει ο οργανισμός μας καθημερινά.

Γεννάται εύλογα λοιπόν το ερώτημα αν όντως απειλούμαστε από την πρόσληψη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η φύση της αλληλεπίδρασης μιας ηλεκτρομαγνητικής πηγής με το βιολογικό υλικό εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής. Άρα, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ως ενιαία τη συμπεριφορά όλων των ειδών των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, σε σχέση με τις βιολογικές τους επιδράσεις. Συνεπώς οφείλουμε να μελετήσουμε ξεχωριστά τα διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικών πηγών και τις συνέπειές τους.

### 5.1 Ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας – sar

Πριν περιγράψουμε τους τρόπους με τους οποίους αλληλεπιδρούν τα διάφορα είδη ακτινοβολίας με τα κύτταρα και τους ζωτικούς ιστούς, είναι χρήσιμο να εισάγουμε τη βασική έννοια του ρυθμού απορρόφησης της ενέργειας. Η αναλογία της παραγωγής θερμότητας μπορεί να εκφραστεί ως ο αποκαλούμενος *ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας* (**SAR** – Specific Absorption Rate) με μονάδα μέτρησης, τα  $W.kg^{-1}$  όπου:

$$SAR = (J^2/2)\sigma\rho$$
$$\text{ή } SAR = E_i^2(\sigma/2)\rho$$

όπου **J** είναι η μέγιστη πυκνότητα ρεύματος (**A.m<sup>-2</sup>**), **E<sub>i</sub>** είναι η μέγιστη ισχύς του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου (**V.m<sup>-1</sup>**), **σ** είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα του ιστού (**S.m<sup>-1</sup>**) και **ρ** είναι η φυσική πυκνότητα (**kg.m<sup>-3</sup>**).

### 5.2 Αλληλεπίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με Βιολογικούς ιστούς

Οι ακτίνες Χ, οι υπεριώδεις ακτίνες (UV), το ορατό φως, τα πεδία ραδιοσυχνοτήτων, τα μαγνητικά πεδία που προέρχονται από συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τα στατικά μαγνητικά πεδία είναι όλα πηγές ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Όλες αυτές οι διαφορετικές ηλεκτρομαγνητικές πηγές χαρακτηρίζονται από ξεχωριστή συχνότητα και μήκος κύματος. Τα μαγνητικά πεδία που προέρχονται από συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν συχνότητες που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 60Hz και μήκος κύματος γύρω στα 5000m. Αντίθετα, οι φούρνοι μικροκυμάτων λειτουργούν σε



συχνότητες  $2,54 \cdot 10^3 \text{GHz}$  με μήκος κύματος  $10 \text{cm}$  και οι ακτίνες X έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από  $10^{15} \text{Hz}$  και μήκη κύματος πολύ μικρότερα των  $100 \text{nm}$ . Τα στατικά πεδία, ή τα πεδία συνεχούς ρεύματος μένουν σταθερά στο χρόνο και θα μπορούσαμε να πούμε ότι έχουν μηδενική συχνότητα και άπειρο μήκος κύματος.

Η αλληλεπίδραση ενός βιολογικού ιστού με μια πηγή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σχετίζεται με τη συχνότητα της πηγής. Συνήθως κάνουμε λόγο για ηλεκτρομαγνητικό φάσμα σαν να έχουμε παραγωγή κυμάτων ενέργειας, αλλά αυτό δεν είναι αυστηρά σωστό, διότι πολλές φορές η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια δρα όπως τα άτομα (κβάντα) παρά ως κύμα. Αυτό ισχύει κυρίως στις υψηλές συχνότητες. Αυτή η ατομική μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας είναι πολύ σημαντική, διότι η ενέργεια ανά άτομο (ή φωτόνιο) είναι αυτή που καθορίζει τις βιολογικές επιδράσεις που θα έχει η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια.[26]

### 5.3 Υψηλές συχνότητες

Στις υψηλές συχνότητες, που χαρακτηρίζουν τις σκληρές υπεριώδεις ακτινοβολίες και τις ακτίνες X και γάμμα (ραδιενέργεια), τα φωτόνια έχουν αρκετή ενέργεια για να σπάσουν χημικούς δεσμούς (ιονισμός).

#### 5.3.1 Υπεριώδης Ακτινοβολία (UV)

Η Υπεριώδης ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία εκτείνεται από τα  $40 \text{nm}$  έως περίπου τα  $400 \text{nm}$ . Ανάλογα με τις βιολογικές επιπτώσεις που προκαλεί στον ανθρώπινο οργανισμό έχει διαιρεθεί σε τρεις επί μέρους περιοχές:

Την *υπεριώδη Α (UVA)*, την *υπεριώδη Β (UV-B)* και την *υπεριώδη C (UV-C)*.

- Η **UV-C** εκτείνεται από τα  $40 \text{ nm}$  έως τα  $280 \text{nm}$  και είναι εξαιρετικά επικίνδυνη.
- Η **UV-B** εκτείνεται από τα  $280$  μέχρι τα  $315 \text{nm}$ . Είναι ουσιαστικά ο λόγος που προκαλείται το μαύρισμα από τον ήλιο αλλά και σοβαρές βλάβες στο δέρμα.
- Η **UV-A** εκτείνεται από τα  $315$  μέχρι τα  $400 \text{nm}$  και μπορεί να είναι επικίνδυνη σε μεγάλες δόσεις.

Παρά την μικρή της ένταση, ή υπεριώδης ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στον άνθρωπο, ειδικά όταν αυτός εκτίθεται παρατεταμένα σε αυτή. Γενικά, όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτεροι οι κίνδυνοι από την έκθεση σε ακτινοβολία UV.

Για τους περισσότερους, η κύρια πηγή έκθεσης σε ακτινοβολία UV είναι ο ήλιος. Άλλες πηγές, επίσης αποτελούν οι θάλαμοι μαυρίσματος, ενώ οι κυριότερες πηγές υπεριώδους ακτινοβολίας στα εργαστήρια είναι οι μικροβιοκτόνοι λαμπτήρες (UV-C στα  $253,7 \text{nm}$ ) και οι τράπεζες υπεριώδους ακτινοβολίας (UV-B στα  $312 \text{nm}$ ).

### 5.3.2. Βιολογικές επιπτώσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας

Γενικά, τα όργανα που υφίσταται την μεγαλύτερη έκθεση στις υπεριώδεις ακτίνες του ήλιου είναι το δέρμα και τα μάτια. Αν και τα μαλλιά και τα νύχια είναι περισσότερο εκτεθειμένα, είναι λιγότερο σημαντικά από ιατρικής άποψης. Η παρατεταμένη έκθεση στην ηλιακή υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να καταλήξει σε άμεσα και σε χρόνια προβλήματα υγείας του δέρματος, των ματιών και του ανοσοποιητικού συστήματος.

### 5.3.3 Οφθαλμικές βλάβες

Ακόμα και μικρά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας, αυξάνουν τις πιθανότητες οφθαλμικής βλάβης, όπως είναι η φωτοκερατίτις που είναι ουσιαστικά έγκαυμα του οφθαλμού και προδιαθέτει σε επιπλοκές αργότερα στη ζωή. Στα χρόνια αποτελέσματα του ματιού περιλαμβάνονται ο καταρράκτης, που είναι μια από τις κύριες αιτίες τύφλωσης, το *πτερύγιο* και η *κερατοπάθεια*. Είναι πολύ σημαντικό να προστεθεί ότι η βλάβη στους οφθαλμούς από την υπεριώδη ακτινοβολία, είναι αθροιστική. Έτσι δεν είναι ποτέ αργά για να αρχίσουμε να προστατεύουμε τα μάτια μας. Εξάλλου, ο οργανισμός μέσω του δέρματος έχει την ικανότητα να αφομοιώσει την υπεριώδη ακτινοβολία παράγοντας μελανίνη (μαύρισμα), η οποία προστατεύει από την έκθεση στην UV ακτινοβολία. Ωστόσο, το ανθρώπινο μάτι δεν έχει αυτή την ικανότητα, γεγονός που το καθιστά πιο ευπαθές.

### 5.3.4 Καταστολή Ανοσοποιητικού Συστήματος

Η υπερβολική έκθεση στον ήλιο αυξάνει τις πιθανότητες να αλλάξει η κατανομή και η λειτουργία των υπεύθυνων κυττάρων για την άμυνα του οργανισμού, ενώ η επαναλαμβανόμενη υπερέκθεση στην ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μείωση της αμυντικής ικανότητας του οργανισμού.

### 5.3.5 Δερματοπάθειες

Παθήσεις του δέρματος που σχετίζονται άμεσα με την ακτινοβολία UV είναι η Ροδόχρους Νόσος, ο Απλούς Έρπης, η Ανεμοβλογιά, η Ψωρίαση, ο Ερυθηματώδης Λύκος αλλά και άλλες δερματοπάθειες συγγενείς και μη.

Επίσης πολύ πιθανές είναι και οι αλλεργικές αντιδράσεις που οφείλονται στο ηλιακό φως (ηλιακή κνίδωση) ή στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με καλλυντικά, αρώματα, φυτά, τοπικές κρέμες ή ακόμα και αντηλιακά. Ορισμένα φάρμακα, όπως τα αντισυλληπτικά, τα αντιυπερτασικά, τα αντιφλεγμονώδη, τα αντικαταθλιπτικά κ.α. μπορεί να προκαλέσουν φωτοαλλεργικό εξάνθημα.

Εκτός από τις παραπάνω παθήσεις, πρέπει να αναφέρουμε τα επιβραδυνόμενα αποτελέσματα της ακτινοβολίας στο δέρμα (οφείλονται κυρίως στη UV-B ακτινοβολία), όπως, οι φακίδες, οι δυσχρωμίες, οι βαθιές ρυτίδες και το ηλιακό ερύθημα, το κλασσικό έγκαυμα. Αυτό, μπορεί να ποικίλλει από ένα ήπιο κοκκίνισμα έως την εμφάνιση φυσαλίδων και η

βαρύτητά του εξαρτάται από την ένταση και τον χρόνο έκθεσης στον ήλιο καθώς και από τον φωτότυπο του δέρματος. Οι ακτίνες UV-A επιδεινώνουν το έγκαυμα. Όσο για την επιβραδυνόμενη μελάγχρωση ή "μαύρισμα", αυτή προκαλείται από την UV-B ακτινοβολία, εμφανίζεται 2 μέρες μετά την έκθεση στον ήλιο, έχει τη μέγιστη ένταση την 20η περίπου ημέρα και μετά υποχωρεί σταδιακά. Η UV-A ακτινοβολία, διεγείρει επίσης την παραγωγή μελανίνης, αλλά για τονσκοπό αυτό απαιτείται 1000 φορές περισσότερη ενέργεια ακτινοβολίας.

Σχετικά με τα χρόνια αποτελέσματα, αυτά οφείλονται στη UV-A και UV-B ακτινοβολία και θεωρούνται ως τα πιο επικίνδυνα και συχνά μοιραία. Μπορεί να δημιουργηθούν λοιπόν παθήσεις όπως διάχυτη ερυθρότητα, ευρυαγγείες, φλεβικές λίμνες, σταγονοειδής υπομελάνωση μέχρι και πρόκληση στίλων και δερματικών καρκίνων.

Είδη δερματικών καρκίνων υπάρχουν αρκετά. Το βασικοκυτταρικό καρκίνωμα (επιθηλιώμα), αποτελεί τη συχνότερη μορφή δερματικού καρκίνου (>75%) και εμφανίζεται κυρίως σε υπέρ-εκτεθειμένες στον ήλιο περιοχές όπως πρόσωπο (ιδίως στη μύτη), αλλά και σε πλάτη, ώμους. Ωστόσο, ο πιο επικίνδυνος τύπος δερματικού καρκίνου (το 80% των θανάτων λόγω δερματικού καρκίνου οφείλονται σε αυτό) είναι το μελάνωμα, που είναι μορφή επιθητικού όγκου και δημιουργεί σύντομα μεταστάσεις.

Η σχέση της υπεριώδους ακτινοβολίας με αυτές τις ασθένειες είναι άμεση, γιατί ευθύνεται για τον ιονισμό των ατόμων των κυττάρων του DNA και κατά συνέπεια για την αλλοίωση του γενετικού κώδικα.

Τέλος, η UV-A ακτινοβολία παίζει σημαντικό ρόλο στη φωτογήρανση. Μέσω ενός σύνθετου γενετικού μηχανισμού, το ηλιακό φως καταστέλλει τη παραγωγή κολλαγόνου αδρανοποιώντας τα γονίδια που "παράγουν" το κολλαγόνο. Ταυτοχρόνως, το ηλιακό φως ενεργοποιεί καταστρεπτικά για το κολλαγόνο ένζυμα. Αυτό έχει σα συνέπεια τη σταδιακή φθορά και καταστροφή του δέρματος. Εξάλλου, όταν το δέρμα έχει ένα τραύμα, φροντίζει ώστε να επουλωθεί. Η επούλωση ενός τραύματος δεν είναι ποτέ τέλεια. Η μικροουλή αυτή δεν είναι ορατή με το μάτι, αλλά μετά από προκλήσεις χιλιάδων τέτοιων ουλών στη διάρκεια της ζωής, οι μικροουλές γίνονται μακρο-ουλές και ορατές. Επιπλέον, οι ίνες κολλαγόνου και της ελαστίνης που διατηρούν ελαστικό το δέρμα, αδυνατίζουν ή καταστρέφονται. Το δέρμα αρχίζει και φαίνεται θαμπό, χαλαρό και μαλακό, γίνεται λεπτότερο, χάνει το λίπος του και γίνεται πιο πλαδαρό.

Η φωτογήρανση είναι ένα φαινόμενο αθροιστικό. Η συσσώρευση στο δέρμα της δράσης της ηλιακής ακτινοβολίας, συνεχίζεται από τη βρεφική ηλικία μέχρι το θάνατο. Το 60-80% της συνολικής δράσης της ακτινοβολίας έχει "αποκτηθεί" μέχρι την ηλικία των 18. Η ικανότητα του ανθρώπινου σώματος να προστατεύει και να αποκαθιστά τις βλάβες που προκαλούνται από την υπεριώδη ακτινοβολία, μειώνεται κατά τη διάρκεια της ζωής μας.

Από την άλλη πλευρά πρέπει να αναφερθεί ότι οι επιδράσεις της υπεριώδους ακτινοβολίας δεν είναι μόνο αρνητικές καθώς ο ήλιος είναι απαραίτητος για την παραγωγή θερμότητας, που είναι αποτέλεσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, τη σύνθεση βιταμίνης D στο δέρμα (αποτέλεσμα της UV-B ακτινοβολίας), καθώς επίσης και για τη σωματική και συναισθηματική μας σταθερότητα. Επιπλέον, δεν πρέπει να ξεχνάμε την τεράστια σημασία του στη φωτοσύνθεση των φυτών. [29] [30]

### 5.3.6 Ακτίνες Χ

Το μήκος κύματός τους είναι 10000 φορές μικρότερο από το μήκος κύματος του ορατού φωτός και είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του ατόμου. Όταν οι ακτίνες Χ διαπερνούν οποιοδήποτε υλικό, τότε ένα μέρος της ακτινοβολίας απορροφάται από το υλικό. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη φύση του υλικού, το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το πάχος του υλικού.

Οι ακτίνες Χ που έχουν μικρά μήκη κύματος είναι περισσότερο δεισδυτικές και ονομάζονται σκληρές ακτίνες, ενώ οι ακτίνες που έχουν μεγάλα μήκη κύματος είναι λιγότερο δεισδυτικές και ονομάζονται μαλακές ακτίνες. Οι ακτίνες Χ είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στο χώρο της ιατρικής. Οι ακτίνες Χ δεν είναι ραδιενέργεια. Ωστόσο και παρά τη μεγάλη τους χρησιμότητα οι ακτίνες Χ μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιβλαβείς για το ανθρώπινο σώμα. Πολλοί επιστήμονες και ιατροί ακτινολόγοι πέθαναν από βλάβες που τους προκάλεσαν οι ακτίνες Χ, στις αρχές του αιώνα όταν δεν ήξεραν τις βλαβερές συνέπειες της ακτινοβολίας αυτής. Γρήγορα, λοιπόν, έγινε αντιληπτό στην επιστημονική κοινότητα ότι οι ακτίνες Χ προκαλούν ζημιά στα ζωντανά κύτταρα. Η ζημιά μπορεί να είναι είτε πρόωρος θάνατος, είτε προσωρινή είτε μόνιμη βλάβη.

Επίσης, τα αποτελέσματα της ακτινοβολίας μπορεί να είναι είτε σωματικά, βραχυπρόθεσμα (εγκαύματα, αλλοιώσεις του αίματος κ.λ.π., έως θάνατος) ή μακροπρόθεσμα (καρκίνος κ.λ.π.), είτε γενετικά τα οποία οφείλονται στις μεταλλάξεις των γεννητικών κυττάρων και εμφανίζονται στους απογόνους (αλλοιώσεις της διάπλασης, λειτουργικές διαταραχές κ.λ.π.).

Συγκεκριμένα, όταν απορροφηθούν οι ακτίνες Χ από τους ιστούς, διασπών τους μοριακούς δεσμούς και δημιουργούν ενεργές ελεύθερες ρίζες, που με τη σειρά τους μπορεί να διαταράξουν τη μοριακή δομή των πρωτεϊνών και ειδικά του γενετικού υλικού (DNA). Αν το κύτταρο που έχει υποστεί βλάβη από την ακτινοβολία επιβιώσει, τότε μπορεί να δώσει πολλές γενεές μεταλλαγμένων κυττάρων. Αν οι αλλαγές στο DNA αφορούν σε γονίδια που ελέγχουν το ρυθμό πολλαπλασιασμού των κυττάρων, οι ακτίνες Χ μπορεί να προκαλέσουν καρκίνο. Η υπερβολική έκθεση ενός οργανισμού σε ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στα γενετικά κύτταρα. Σ' αυτή την περίπτωση, ενώ ο ίδιος οργανισμός δε θα εμφανίσει κάποια βλάβη, θα επηρεαστούν οι απόγονοί του.

Η χρήση των ακτινών Χ για διαγνωστικούς και θεραπευτικούς σκοπούς πρέπει να γίνεται με προσοχή, εκτιμώντας τόσο τα οφέλη όσο και τους κινδύνους που προέρχονται από την έκθεση του οργανισμού σε ακτινοβολία για μεγάλο χρονικό διάστημα [32].

### 5.3.7 Ακτίνες Γάμμα – Ραδιενέργεια

Με τον γενικό όρο Ραδιενέργεια χαρακτηρίζεται το φαινόμενο της εκπομπής σωματιδίων ή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από τους πυρήνες ορισμένων χημικών στοιχείων, που και γι' αυτό το λόγο ονομάζονται ραδιενεργά. Τα άτομα των ραδιενεργών στοιχείων φέρουν ασταθείς πυρήνες. Τούτο σημαίνει πως αυτά μπορούν να διασπαστούν αυθόρμητα, απελευθερώνοντας πυρηνική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία συνίσταται σε σωματίδια άλφα (ή ακτίνες

α), σωματίδια βήτα (ή ακτίνες β) και ακτινοβολία γάμμα (ή ακτίνες γ). Η ακτινοβολία γάμμα φέρει συνήθως την περισσότερη ενέργεια από τα προϊόντα των ραδιενεργών διασπάσεων.

Γενικά όλα τα προϊόντα της διάσπασης μπορεί να αποδειχτούν επικίνδυνα για την ισορροπία της λειτουργίας του ανθρώπινου οργανισμού. Πιο αναλυτικά, κάθε σωματίδιο άλφα είναι ένας πυρήνας του στοιχείου ηλίου, ο οποίος σχηματίζεται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια. Ταξιδεύουν με ταχύτητα μεταξύ 15.000-20.000 χιλιομέτρων την ώρα, αλλά έχουν μικρότερη ικανότητα διείσδυσης. Αρκεί ένα χαρτί -ή ένα στρώμα αέρα πάχους το πολύ οχτώ εκατοστών- για να ανακόψει την πορεία τους. Για τον άνθρωπο οι ακτίνες άλφα, δηλαδή η ροή σωματιδίων Α, είναι βλαβερές μόνο αν κάποιος καταπιεί ή εισπνεύσει την ουσία που τις εκπέμπει. Σ' αυτή την περίπτωση η τεράστια δύναμη ionτισμού τους προκαλεί σοβαρές βλάβες στους ιστούς του σώματός μας.

Τα σωματίδια βήτα είναι ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια –θετικά σωματίδια αντιύλης που αντιστοιχούν στα ηλεκτρόνια- που εκπέμπονται από τους πυρήνες με ταχύτητα μεγαλύτερη από 150.000 χιλιόμετρα το δευτερόλεπτο. Η διεισδυτική τους ικανότητα είναι εκατό φορές μεγαλύτερη από εκείνη των ακτινών άλφα και για να τα εμποδίσουμε απαιτούνται πέντε χιλιοστά αλουμινίου. Στο δέρμα εισχωρούν σε βάθος μέχρι και ένα εκατοστό.

Οι ακτίνες γάμμα είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, γι' αυτό κινούνται με την ταχύτητα του φωτός. Έχουν μεγάλη διεισδυτική ικανότητα και μπορούν εύκολα να διαπεράσουν το ανθρώπινο σώμα. Συγκεκριμένα, η έκθεση στην ακτινοβολία ενός ζώντος οργανισμού δημιουργεί προβλήματα υγείας τόσο στα άτομα που εκτέθηκαν σε αυτή όσο και τους απογόνους τους.

Γενικά παρατηρούνται δυο κατηγορίες συνεπειών στην υγεία, οι στοχαστικές και οι μη στοχαστικές συνέπειες. Οι πρώτες χαρακτηρίζονται από μια τυχαιότητα και το μέγεθός τους είναι πάντα το μέγιστο δυνατόν. Αντίθετα οι δεύτερες δεν παρουσιάζουν τυχαιότητα, δηλαδή η εμφάνισή τους από ένα επίπεδο δόσης και πάνω είναι βέβαιη και το μέγεθος συνδέεται άμεσα με το μέγεθος της απορροφώμενης δόσης. Στις μη στοχαστικές συνέπειες κατατάσσονται το γαστρεντερικό σύνδρομο, η καταστροφή του μυελού των οστών, η ακτινική πνευμονίτις και άλλα μικρότερης σημασίας σύνδρομα. Κοινό τους χαρακτηριστικό είναι ότι για όλα υπάρχει μια κατώτατη δόση κάτω από την οποία αυτά δεν εμφανίζονται. Αντίθετα οι στοχαστικές επιπτώσεις δεν συνδέονται με την ύπαρξη κατώτερου ορίου ακτινοβολίας. Αυτές είναι ο καρκίνος και οι κληρονομικές αλλοιώσεις που εμφανίζονται στους απογόνους, η δε εκδήλωσή τους μπορεί να γίνει δεκάδες χρόνια μετά την έκθεση στην ακτινοβολία.

Οι στοχαστικές επιπτώσεις που προκαλούνται από πολύ χαμηλές δόσεις ακτινοβολίας είναι πολύ σπουδαιότερες για το μέλλον της ανθρωπότητας επειδή δεν αφορούν μόνο τους λίγους ανθρώπους που βρέθηκαν κοντά στην εστία του πυρηνικού ατυχήματος, αλλά αφορούν τη ζωή εκατοντάδων χιλιάδων ατόμων ακόμη και στην περίπτωση περιορισμένου ατυχήματος. Το κοινό χαρακτηριστικό των κληρονομικών ανωμαλιών και των καρκινοπαθειών που προκαλούνται από τη ραδιενέργεια είναι οι αλλοιώσεις στο DNA.

Για να γίνει κατανοητή η επικινδυνότητα της έκθεσης του ανθρώπου αρκεί μια σύντομη επισκόπηση στο ατύχημα του Τσερνομπίλ.

Έκθεση της Greenpeace καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, βάσει των δημογραφικών δεδομένων, τα τελευταία 15 χρόνια, στη Ρωσία προκλήθηκαν 60.000 επιπλέον θάνατοι από το ατύχημα στο Τσερνομπίλ και εκτιμά ότι ο συνολικός απολογισμός των θανάτων στην Ουκρανία και τη Λευκορωσία μπορεί να αυξηθεί κατά 140.000 θύματα. Παράλληλα, η έκθεση εξετάζει τις επιπτώσεις του Τσερνομπίλ στην υγεία όσων επιβίωσαν από την καταστροφή και στους απογόνους τους. Ο υπολογισμός και σε αυτό το σημείο είναι τραγικός [32]

#### 5.4 Χαμηλές συχνότητες

Στις χαμηλές συχνότητες, που χαρακτηρίζουν το φάσμα του ορατού φωτός, τις ραδιοσυχνότητες, τις υπέρυθρες και τα μικροκύματα, η ενέργεια του φωτονίου είναι πολύ χαμηλότερη από αυτή που απαιτείται για να τη διάσπαση των χημικών δεσμών. Αυτό το κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καλείται μη-ιονίζων. Αφού η μη-ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν μπορεί να διασπάσει τους χημικούς δεσμούς δεν τίθεται θέμα αντιστοιχίας ανάμεσα στις βιολογικές συνέπειες της ιονίζουσας και της μη-ιονίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Ωστόσο, οι μη-ιονίζουσες ηλεκτρομαγνητικές πηγές μπορούν επίσης να επιδράσουν βιολογικά.

Πολλές από τις βιολογικές παρενέργειες της χαμηλής υπεριώδους ακτινοβολίας, της ορατής και της υπέρυθρης ακτινοβολίας εξαρτώνται επίσης από τη φωτονική ενέργεια, αλλά σχετίζονται με την ηλεκτρονική διέγερση παρά με τον ιονισμό και δεν υφίστανται σε συχνότητες κάτω από  $3 \cdot 10^{11}$  Hz. Οι πηγές ραδιοσυχνότητας και μικροκυμάτων μπορεί να προκαλέσουν παρενέργειες επάγοντας ηλεκτρικά ρεύματα στους ιστούς, που προκαλούν τη θέρμανσή τους. Η δυνατότητα επαγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και κατά συνέπεια παραγωγής θερμότητας από μια ηλεκτρομαγνητική πηγή εξαρτάται από τη συχνότητα της πηγής, το μέγεθος και τον προσανατολισμό του αντικειμένου που θερμαίνεται.

Σε συχνότητες κάτω από  $10^6$  Hz τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν ασθενώς με τους ζωτικούς ιστούς και έτσι δεν επάγονται τα ηλεκτρικά ρεύματα που απαιτούνται για την παραγωγή θερμότητας. Συνεπώς όσο αφορά τις πιθανές βιολογικές επιδράσεις του μη-ιονίζοντος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μπορούμε να το χωρίσουμε σε τρία τμήματα.

- Το τμήμα της οπτικής ακτινοβολίας, όπου μπορεί να συμβεί διέγερση των ηλεκτρονίων (χαμηλή υπεριώδης ακτινοβολία, ορατό φως και υπέρυθρη ακτινοβολία) με αποτέλεσμα φωτοχημικές βιολογικές επιδράσεις.
- Το τμήμα όπου το μήκος κύματος είναι μικρότερο από το σώμα που ακτινοβολείται και μπορεί να προκληθεί θέρμανση μέσω των επαγόμενων ρευμάτων (μικροκύματα και υψηλές ραδιοσυχνότητες).
- Το τμήμα όπου τα μήκη κύματος είναι πολύ μεγαλύτερα από το σώμα και είναι σπάνιο να επαχθούνε ρεύματα και θερμότητα (χαμηλές ραδιοσυχνότητες, μαγνητικά πεδία από συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και στατικά πεδία).

## 5.5 Τα τμήματα του μη ιονίζοντος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε σχέση με τις βιολογικές τους επιδράσεις

Στο τμήμα αυτό του μη-ιονίζοντος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανήκουν η χαμηλή υπεριώδης ακτινοβολία, το ορατό φως και η υπέρυθρη ακτινοβολία. Οι τιμές έκθεσης που σχετίζονται με βιολογικές επιπτώσεις από την οπτική ακτινοβολία εξαρτώνται από το μήκος κύματος και τη διάρκεια έκθεσης στην ακτινοβολία που εκπέμπεται από την πηγή [27]

*Πίνακας κινδύνων από την οπτική ακτινοβολία:*

Μήκος κύματος [nm] $\lambda$	Περιοχή ακτινοβολίας	Επηρεαζόμενο όργανο	Κίνδυνος
180 έως 400	UV	οφθαλμός	φωτοχημική βλάβη και θερμική βλάβη
180 έως 400	UV	δέρμα	ερύθημα
400 έως 700	Ορατή ακτινοβολία	οφθαλμός	βλάβη του αμφιβληστροειδούς
400 έως 600	Ορατή ακτινοβολία	οφθαλμός	φωτοχημική βλάβη
400 έως 700	Ορατή ακτινοβολία	δέρμα	θερμική βλάβη
700 έως 1400	IRA	οφθαλμός	θερμική βλάβη
700 έως 1400	IRA	δέρμα	θερμική βλάβη
1400 έως 2 600	IRB	οφθαλμός	θερμική βλάβη
2 600 έως 106	IRC	οφθαλμός	θερμική βλάβη
1400 έως 106	IRB, IRC	οφθαλμός	θερμική βλάβη
1400 έως 106	IRB, IRC	δέρμα	θερμική βλάβη

### 5.5.1 Μη ιονίζουσα ακτινοβολία με μικρό μήκος κύματος

Σε αυτό το κομμάτι του μη-ιονίζοντος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανήκουν τα μικροκύματα και οι υψηλές ραδιοσυχνότητες. Οι επιπτώσεις αυτού του είδους των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην ανθρώπινη υγεία εξαρτώνται από τον βαθμό απορρόφησης τους από τους διάφορους ιστούς. Έχουμε τρεις μηχανισμούς μεταφοράς ενέργειας από το κύμα στο ανθρώπινο σώμα, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του:

1. Διέγερση των ελευθέρων ηλεκτρονίων των ατόμων
2. Εξαναγκασμένη πόλωση των ατόμων και μορίων των ιστών από το ηλεκτρικό πεδίο του κύματος
3. Ευθυγράμμιση υπαρχόντων δίπολων ατόμων ή μορίων με το ηλεκτρικό πεδίο του κύματος

#### 3.4.1 Το φαινόμενο της θέρμανσης

Επειδή οι ιστοί περιέχουν κατά 70% νερό και το μόριο του νερού αποτελεί ένα ηλεκτρικό δίπολο (πολική ομοιοπολική ένωση), όταν το σώμα μας βρεθεί μέσα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο τα μόρια του νερού, θα αρχίσουν να περιστρέφονται ή να ταλαντώνονται με τη συχνότητα της ακτινοβολίας του κύματος. Όσο πιο μεγάλη είναι η ταχύτητα παλμού και όσο η διάρκεια του φαινομένου είναι μεγαλύτερη τόσο μεγαλύτερα ποσά θερμότητας θα παραχθούν.

Θερμικές ονομάζονται εκείνες οι επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που οφείλονται σε μετρήσιμη αύξηση της θερμοκρασίας των ιστών που δέχονται ακτινοβολία. Ο οργανισμός του ανθρώπου διαθέτει θερμορρυθμιστικούς μηχανισμούς που κρατούν τη θερμοκρασία του σώματος σταθερή μεταξύ 36 και 37 βαθμών Κελσίου. Όταν τα παραγόμενα ποσά θερμότητας είναι σχετικά μικρά, οι θερμορρυθμιστικοί μηχανισμοί μπορούν να απάγουν αυτήν τη θερμότητα και να κρατούν σταθερή τη θερμοκρασία στους 36-37°C.

Αντίθετα, όταν τα ποσά θερμότητας υπερβούν κάποια τιμή, τότε οι μηχανισμοί αυτοί δεν μπορούν να λειτουργήσουν σωστά κάτι που οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας σε ιστούς ή όργανα του σώματος άνω των 37 βαθμών. Κατώφλι για τις επιδράσεις της θέρμανσης είναι πιθανόν ένα ελάχιστο γύρω από τις συχνότητες στις οποίες το σώμα (ή μέρη αυτού) ενεργεί σαν συντονιστικός απορροφητής.

Οξεία έκθεση σε αρκετά έντονη ραδιοσυχνότητα ή μικροκυματική ακτινοβολία (στους φούρνους μικροκυμάτων της τάξης των  $2,54 \cdot 10^9$  Hz) συνεπάγεται θέρμανση, που θα καταλήγει είτε σε ανιχνεύσιμες αυξήσεις στη θερμοκρασία του ιστού ή του σώματος είτε σε αντιδράσεις για την ελάττωση της θερμοκρασίας. Οι βλάβες στον οργανισμό προξενούνται από τη θέρμανση των ακτινοβολουμένων ιστών και από την αδυναμία των θερμορρυθμιστικών μηχανισμών των διαφόρων ιστών στην αντιμετώπιση της ακτινοβολήσης.

Όταν η RF ακτινοβολία θερμαίνει τους ιστούς, τότε αν ο θερμορρυθμιστικός μηχανισμός του σώματος δεν μπορεί να επαναφέρει την κανονική θερμοκρασία τους και γι' αυτό προξενούνται βλάβες. Όμως για να έχουμε παρατηρήσιμη αύξηση της θερμοκρασίας, πρέπει η πυκνότητα ισχύος να είναι πολύ μεγάλη ( $1 \text{ mW/cm}^2$ ) ή η μέση τιμή ενέργειας που απορροφάται από όλο το σώμα (SAR) να είναι πάνω από  $5 \text{ W/kg}$ .

Οι ραδιοσυχνότητες στην περιοχή AM (106 Hz), αλληλεπιδρούν πολύ ασθενώς με τους ανθρώπινους ιστούς και έτσι δεν προκαλούν θερμικά φαινόμενα. Τα όρια ασφαλούς έκθεσης του κοινού έχουν καθοριστεί έτσι ώστε να μην μπορούν να προκύψουν τέτοιες θερμικές επιδράσεις. Εφόσον αυτές οι οριακές τιμές τηρούνται σε όλους τους προσιτούς χώρους καθώς και κατά τη συνομιλία με συσκευή κινητού τηλεφώνου, δεν πρέπει να φοβόμαστε θερμικές επιδράσεις.[25]

### 5.5.2 Άλλες μη-θερμικές επιδράσεις της ακτινοβολίας

Αντίθετα με τις θερμικές επιδράσεις της υπέρυχνης ακτινοβολίας, οι βιολογικές επιδράσεις από την έκθεση σε μικρές τιμές ακτινοβολίας υψηλών συχνοτήτων δεν είναι ακόμα εντελώς γνωστές.



Ενώ πριν από μερικά χρόνια η ύπαρξη τέτοιων μη θερμικών επιδράσεων ήταν υπό αμφισβήτηση, σήμερα είναι εξακριβωμένο, ότι η υψίσυχνη ακτινοβολία μπορεί να έχει και άλλες επιδράσεις εκτός των θερμικών που προαναφέρθηκαν. Παρατηρήθηκαν π.χ. φυσιολογικές μεταβολές σε κυτταρικές καλλιέργειες και σε ζώα καθώς και επηρεασμός της ηλεκτρικής δραστηριότητας στον ανθρώπινο εγκέφαλο Αναλυτικά λοιπόν έχουμε:

#### *5.5.2.1 Επιδράσεις στους οφθαλμούς*

Συνήθως η έρευνα για δημιουργία καταρράκτη αφορά απλές ή πολλαπλές οξείες εκθέσεις σε H/M ακτινοβολίες με πυκνότητα ισχύος 80-500mW/cm<sup>2</sup>.

#### *5.5.2.2 Ακουστικό φαινόμενο*

Άνθρωποι εκτιθέμενοι σε οξείς μικροκυματικούς παλμούς αναφέρουν ότι ακούν υπόκωφο ήχο με συχνότητα ίση προς την συχνότητα επανάληψης των παλμών

#### *5.5.2.3 Εκροή ασβεστίου*

Έχει παρατηρηθεί αυξημένη εκροή ιόντων του ασβεστίου  $45Ca^{2+}$  σε απομονωμένους εγκεφαλικούς αλλά και καρδιακούς ιστούς πειραματόζωων που εκτέθηκαν σε ημιτονοειδώς διαμορφωμένα H/M πεδία. Τα ιόντα ασβεστίου είναι εξαιρετικής σημασίας για την μεταφορική σύζευξη μιας μεγάλης γκάμας ανοσολογικών, ενδοκρινολογικών και νευρολογικών φαινομένων στην εξωτερική επιφάνεια της μεμβράνης των κυττάρων. Το φαινόμενο εξαρτάται ισχυρά από την συχνότητα διαμόρφωσης και την πυκνότητα ισχύος της χρησιμοποιούμενης H/M ακτινοβολίας.

#### *5.5.2.4 Επιδράσεις στη συμπεριφορά*

Η αλλαγή συμπεριφοράς πειραματόζωων που εκτέθηκαν σε H/M ακτινοβολία βρέθηκε να είναι το φαινόμενο που παρουσιάζεται στις χαμηλότερες τιμές κατωφλίων από όλες τις υπόλοιπες βιολογικές επιδράσεις των ραδιοκυμάτων. Τα όρια αυτά βρέθηκαν σε γενικές γραμμές να έχουν τιμές 4-8W/kg ανεξάρτητα από τη συχνότητα, τη διαμόρφωση, τη μέση ισχύ ή τον τρόπο που γινόταν η έκθεση.

#### *5.5.2.5 Γενετικές και αναπτυξιακές ανωμαλίες*

Δεν είναι ξεκάθαρο αν δημιουργούνται τέτοιες ανωμαλίες για SAR < 1W/kg. Όμως πρέπει να αναφερθεί ότι έχει παρατηρηθεί 10% αλλαγή στον ρυθμό ανάπτυξης κάποιων ποικιλιών δημητριακών που εκτίθονταν σε ακτινοβολία 41,65 – 41,825GHz χωρίς να δίνεται αντίστοιχη τιμή του SAR.

Κάποιες δημοσιεύσεις αναφέρονται σε επιδράσεις στην ενδομήτρια ανάπτυξη των εμβρύων αλλά και στην μετά τον τοκετό ανάπτυξη των παιδιών των οποίων οι μητέρες εκτέθηκαν σε υψηλές τιμές Η/Μ ακτινοβολίας. Οι επιδράσεις αυτές εξηγήθηκαν ως οφειλόμενες στην τοπική άνοδο της θερμοκρασίας του σώματος της μητέρας ως αποτέλεσμα της απορρόφησης Η/Μ ενέργειας και υπέρβασης των ορίων για τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές του SAR. Τέλος, με τον ίδιο τρόπο, δηλ. υπερβολική τοπική θέρμανση, εξηγήθηκαν και οι δυσλειτουργίες που παρατηρήθηκαν στους όρχεις.

#### *5.5.2.6 Βιολογικές αλληλεπιδράσεις από χρόνια Η/Μ έκθεση*

Πώς προκύπτουν αυτές οι επιδράσεις, δεν είναι γνωστό. Η αξιολόγηση καθίσταται δύσκολη από το γεγονός ότι τα πειράματα κατά ένα μέρος δεν ήταν δυνατόν να επαναληφθούν ή υπάρχουν αντιφατικά αποτελέσματα. Χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να διαγνωσθούν ενδεχόμενες επιδράσεις στην υγεία της υψίσυχνης ακτινοβολίας μικρής ισχύος, όπως αυτή που χρησιμοποιείται στην κινητή τηλεφωνία. Οι μακροπρόθεσμες επιδράσεις της ακτινοβολίας μικρής ισχύος δεν κατέστη δυνατόν ως σήμερα να ερευνηθούν καθόλου.[28]

### **5.6 Μη ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μεγάλο μήκος κύματος**

Στο τελευταίο τμήμα του μη-ιονίζοντος ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανήκουν οι χαμηλές ραδιοσυχνότητες, τα μαγνητικά πεδία που παράγονται από συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και τα στατικά πεδία. Στατικά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία υπάρχουν ως φυσικά φαινόμενα, Αυτά δημιουργούνται από τις ηλεκτρικές φορτίσεις στις επιφάνειες, όπως για παράδειγμα στα σύννεφα, όπου οι διαφορές ηλεκτρικών δυναμικών μπορούν να υπερβούν τα κατώφλια των διηλεκτρικών αντοχών και να προκληθούν αποφορτίσεις με αστραπές.

Επίσης, στατικά μαγνητικά πεδία 20-70μΤ υπάρχουν σε όλη την επιφάνεια της γης και σχετίζονται με τον προσανατολισμό και την αποδημητική συμπεριφορά ορισμένων ζώων. Η συντριπτική πλειοψηφία των ανθρώπων είναι εκτεθειμένη σε πολύ χαμηλή πεδιακή ισχύ. Υπάρχουν, εν τούτοις, αρκετές περιοχές βιολογικής αλληλεπίδρασης σε χαμηλά επίπεδα έκθεσης που μπορεί να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην υγεία και για τις οποίες οι γνώσεις μας είναι περιορισμένες. Αυτή η πιθανότητα δεν μπορεί να αγνοηθεί και θα πρέπει να

ερευνηθεί περαιτέρω. Στην έκθεση σε στατικά ηλεκτρικά πεδία οι κύριες συνέπειες προέρχονται από την αντίληψη του πεδίου και από τις σπινθηρικές εκφορτίσεις με την επαφή αντικειμένων με διαφορετικό ηλεκτρικό δυναμικό.

Όπως στα ηλεκτρικά πεδία, έτσι και οι βασικές επιδράσεις της έκθεσης σε στατικά μαγνητικά πεδία, προέρχονται από τα αποτελέσματα που επιφέρουν τα ηλεκτρικά πεδία που επάγονται εξ' αιτίας της κίνησης μέσα στο πεδίο. Οι επιδράσεις αυτές εξαρτώνται από το μέγεθος των πεδίων και είναι αμελητέες στα επίπεδα της ακτινοβολίας που συνήθως δεχόμαστε καθημερινά. Σύμφωνα με μελέτες ωστόσο, οξεία έκθεση σε υπερβολικά χαμηλής συχνότητας ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία επαρκούς ισχύος πεδίου ή

πυκνότητας ροής θα καταλήξει στην αίσθηση έντονης επιφανειακής φόρτισης (ηλεκτρικά πεδία μόνο) και στην επαγωγή τέτοιων ηλεκτρικών δυναμικών και ρευμάτων στο σώμα, που μπορούν να επιδράσουν σε ηλεκτρικά διεγέρσιμους ιστούς όπως τα νεύρα και οι μύες.

## 5.7 Συμπέρασμα

Με λίγα λόγια θα λέγαμε ότι δεν υπάρχει καμία περίπτωση σοβαρών κινδύνων για την υγεία για την οποία να υπάρχουν λογικές και ακέραιες αποδείξεις, ούτε κάποια ατομική μελέτη που να παρέχει επαρκείς αποδείξεις, ότι η συχνή έκθεση σε μη-ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εμπεριέχει σημαντικές απειλές, όπως ο καρκίνος. Γενικά, σε καμία περίπτωση, δεν έχουμε αρκετές πληροφορίες όσο αφορά την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και αυτό σε συνδυασμό με την έλλειψη ακρίβειας και τους μεθοδολογικούς περιορισμούς, αφήνουν μετέωρο το ενδεχόμενο να υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της μη-ιονίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και σοβαρών κινδύνων για την υγεία. Αυτό ωστόσο δεν είναι κάτι που θα πρέπει να μας εφησυχάζει. Η έντονη έκθεση του ανθρώπου σε τόσες πολλές πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι ένα φαινόμενο, που δεν είμαστε σε θέση να ξέρουμε πως ακριβώς θα μας επηρεάσουν σε βάθος χρόνου. Η έλλειψη στατιστικών δεδομένων είναι αυτή που προκαλεί την αβεβαιότητα.

## Βιβλιογραφία

- [1] Young, D. (1995) *Πανεπιστημιακή φυσική Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική Σύγχρονη Φυσική.2*. Εκδόσεις Παπαζήση.
- [2] Serway, R. (1990) *Physics for Scientists and Engineers.3.3.*:Κορφιάτης Ιωάννης
- [3] Αλεξοπούλου, Κ.Δ.(1966) *Γενική φυσική Οπτική.1.5*. Αθήνα
- [4] Greenberg, L.H. *Physics for biology and pre-med students.1*.Regina:W B Saunders
- [5] Ζευγώλης, Δ.(2007) *Εφαρμοσμένη Οπτική με θέματα οπτοηλεκτρονικής και laser. 2*.Εκδόσεις Τζιόλα
- [6] Σπυριδέλη, Ι. (1991) *Θέματα Οπτικής*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη
- [7] Οικονόμου, Ε.Ν.(1995) *Η Φυσική σήμερα οι δέκα κλίμακες της ύλης*. Κρήτη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- [8] Κουτσούρης, Δ.Νικήτα, Κ.Παυλόπουλος, Θ.(2004) *Ιατρικά Απεικονιστικά Συστήματα*.Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα,.
- [9] Αλειφεροπουλος, Δ.(2000) *Ακτινογραφική Απεικόνιση*. Εκδόσεις ΒΗΤΑ.
- [10] Αραβαντινός,Α. «Διάθλαση μέσω πρίσματος – Φασματοσκοπικά χαρακτηριστικά πρίσματος», [physics.teiath.gr/physics/pdf/O1.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/pdf/O1.pdf)
- [11] Αραβαντινός, Α. «Διάθλαση μέσω οπτικού πρίσματος – Υπολογισμός δείκτη διάθλασης», [physics.teiath.gr/physics/pdf/O2.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/pdf/O2.pdf)
- [12] Μήτσου, Γ. «Γενικά περί Φακών», [physics.teiath.gr/physics/pdf/O3.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/pdf/O3.pdf)
- [13]Βαμβακάς,Ι. Μπάρτζης, Β. «Κοίλα κάτοπτρα», [physics.teiath.gr/physics/opto\\_lab\\_1a/pdf%20files/O15.pdf](http://physics.teiath.gr/physics/opto_lab_1a/pdf%20files/O15.pdf)
- [14] Ασημέλλης, Γ. «Μαθήματα οπτικής», [users.auth.gr/okoutris/Themata.../Optiki/.../2\\_Anaklash\\_Diathlash.pdf](http://users.auth.gr/okoutris/Themata.../Optiki/.../2_Anaklash_Diathlash.pdf)

- [15] Φασσέας, Κ. « Οπτικά (φωτονικά) μικροσκοπία. γενικές αρχές», <http://www.aua.gr/fasseas/optika%20mikroskopia.htm>
- [16] Αδάμου, Α.(2007)*Μελέτη φυτικών ιστών με μεθόδους σύγχρονης μικροσκοπίας*, Πτυχιακή εργασία, ΑΤΕΙ Κρήτης.
- [17] Νιτοδά, Ε.(2009) *Συσχέτιση της διαβητικής αμφιβληστροπάθειας και κερατοπάθειας με την βοήθεια της ομοεστιακής μικροσκοπίας*, Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης
- [18] Hell,S.W. (1992), *Opt. Commun.* 93, 277
- [19] Νεοφύτου, Ν. (2010) *Κατάτμηση και αυτόματη ταξινόμηση χαρακτηριστικών εικόνων οπτικής τομογραφίας συνοχής*, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Κύπρου.
- [20] Παπαδημητράκη, Σ.(2009) *Μελέτη της εγκυρότητας διαθλασίμετρου πριν και μετά την χρήση κυκλοπληγικού φαρμάκου*, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης
- [21] Ορφανουδάκης, Σ. Μάρας, Κ. (2004) *Κλασική ακτινολογία εισαγωγή και βασικές αρχές*, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης
- [22] Webb,S.(1998) *The physics of Medical Imaging*. Institute of Physics.
- [23] Κατσαούνης, Ι. (2008) *Ανάλυση των εξελίξεων και των μελλοντικών προοπτικών με βάση τα ερευνητικά δεδομένα στη χρήση των δικτύων υψηλής τάσης για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς*, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [24] Γεωργακοπούλου, Ε. *Εφαρμογή οπτικών ινών σε γραμμές υψηλής τάσης*, Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών
- [25] Δημήτριος, Β.(2008) *Μη ιοναζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και οι βιολογικές της επιδράσεις*, Πτυχιακή εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- [26] Λιολιούση, Κ. *Βιολογικές Επιδράσεις της Ηλεκτρομαγνητικής Ακτινοβολίας*
- [27] Λουίζη, Α. (2007) *Μη ιονίζουσα Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία- Φυσικές αρχές- βιολογικές επιδράσεις – Κανονισμοί και όρια προστασίας*, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών
- [28] Αιδίνη, Δ. *Επίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στον άνθρωπο*, Πτυχιακή εργασία, Τμήμα ηλεκτρολόγων μηχανικών και τεχνολογίας υπολογιστών Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [29] Βέρρος, Κ. *Οι συνέπειες της ηλιακής ακτινοβολίας*, [www.iatronet.gr](http://www.iatronet.gr)
- [30] Μιχελάκη, Λ. *Δερματικές βλάβες- Καρκίνος του δέρματος*, [www.iatronet.gr](http://www.iatronet.gr)
- [31] Μπάιης, Α *Η υπεριώδης ακτινοβολία και οι επιδράσεις στον άνθρωπο*, <http://lap.physics.auth.gr>.
- [32] Ευσταθόπουλος, Ε. *Προστασία από ακτίνες Χ*. [www.rad.uoa.gr](http://www.rad.uoa.gr)