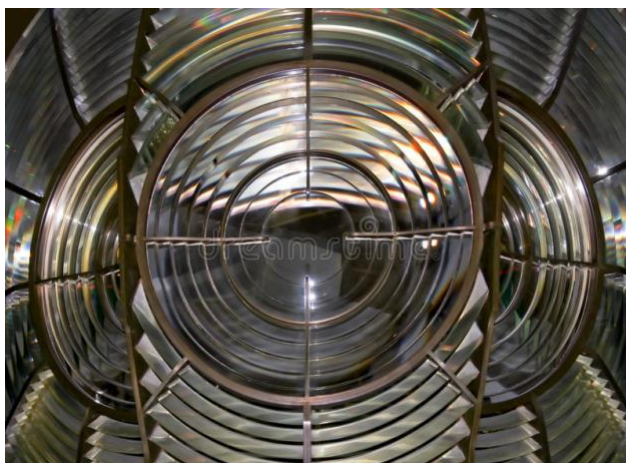




**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ & ΠΡΟΝΟΙΑΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΜΕΤΡΙΑΣ**

**ΦΑΚΟΙ FRESNEL: ΑΠΟ ΤΗΝ ΙΔΕΑ ΣΤΗΝ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΑΝΔΡΕΑΣ ΒΙΔΑΛΗΣ**

**ΑΜ: op15002**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΝΙΝΟΣ**

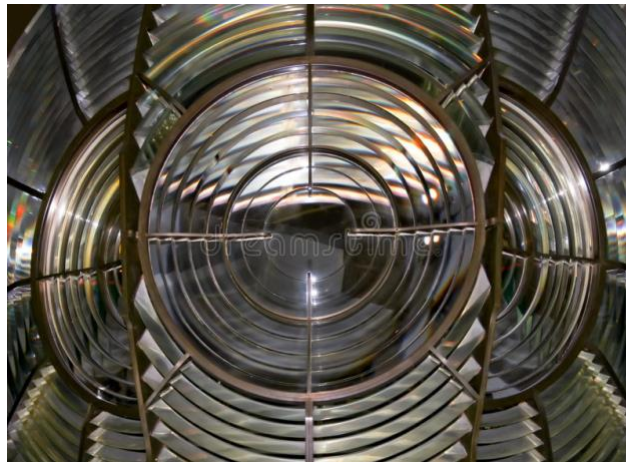
**ΛΕΚΤΟΡΑΣ**

**ΑΘΗΝΑ 2022**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF HEALTH AND CARE SCIENCES**  
**DEPARTMENT OF BIOMEDICAL SCIENCES**  
**DIVISION: OPTICS AND OPTOMETRY**

**FRESNEL LENSES: FROM CONCEPT TO  
IMPLEMENTATION**



**DISSERTATION**

**ANDREAS VIDALIS**

**Candidate Number: op15002**

**ADVISOR: GEORGIOS NINOS**

**LECTURER**

**ATHENS 2022**



Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

|                            |                                                                          |                                                                                             |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Γεώργιος Νίνος<br>Λέκτορας | Δρακόπουλος<br>Παναγιώτης<br>Καθηγητής τμήματος<br>Βιοϊατρικών Επιστημών | Μπάρτζης Βασίλειος<br>Επίκουρος Καθηγητής<br>τμήματος Επιστήμης και<br>Τεχνολογίας Τροφίμων |
|                            |                                                                          |                                                                                             |

## Ευχαριστίες

Με την παρούσα πτυχιακή εργασία ολοκληρώνονται οι προπτυχιακές μου σπουδές στο Τμήμα Βιοϊατρικών Επιστημών με κατεύθυνση Οπτική και Οπτομετρία του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Γεώργιο Νίνο, για την επιστημονική του καθοδήγηση, τη βοήθεια και την άμεση ανταπόκρισή του σε κάθε μου αίτημα.

Επιπλέον, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στο προσωπικό της βιβλιοθήκης του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για τη βοήθειά τους, στη διαδικασία αναζήτησης των απαραίτητων πηγών.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, για όλη τη στήριξη και τη συμπαράσταση.

## Περίληψη

Η σημαντικότερη συνεισφορά του Augustin Fresnel στην ιστορία της οπτικής είναι οι φακοί Fresnel. Στόχος της εργασίας αυτής είναι να μελετήσει τους φακούς Fresnel, από την ιδέα μέχρι την υλοποίησή τους. Η κινητήρια αρχή πίσω από τη σύλληψη ενός φακού Fresnel είναι ότι η κατεύθυνση διάδοσης του φωτός δεν αλλάζει μέσα σε ένα μέσο (εκτός εάν είναι διασκορπισμένο). Ο Fresnel ήταν ο πρώτος που κατάλαβε ότι το φως είναι ένα εγκάρσιο κύμα, και η πόλωση μπόρεσε να γίνει κατανοητή ποσοτικά με τις εξισώσεις του Fresnel. Ο φακός Fresnel είναι ένα είδος σύνθετου συμπαγούς φακού που δημιουργήθηκε από τον Fresnel και προοριζόταν αρχικά για χρήση σε φάρους. Με τον φακό αυτό, είναι δυνατή η κατασκευή φακών με μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση, δίχως τον όγκο και τη μάζα του υλικού που θα χρειαζόνταν ένας συμβατικός φακός. Η καταδιοπτική μορφή του φακού, η οποία εφευρέθηκε εξ ολοκλήρου από τον Fresnel, διαθέτει εξωτερικά στοιχεία που χρησιμοποιούν τα φαινόμενα της ολικής εσωτερικής ανάκλασης καθώς και διάθλασης. Οι φακοί Fresnel έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται και σε σύγχρονες εφαρμογές, όπως τα αυτοκίνητα, τα γυαλιά 3D, και τα φωτοβολταϊκά. Μάλιστα, στο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί ιδιαίτερα η δημοτικότητά τους αναφορικά με τη φωτοβολταϊκή χρήση, καθώς οι φακοί Fresnel αποτελούν μια ελκυστικά οικονομική επιλογή, ιδιαίτερα για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

Λέξεις κλειδιά: φακοί Fresnel, εξισώσεις Fresnel, κυματική φύση φωτός, πόλωση, φάροι

## Summary

Augustin Fresnel's most important contribution to the history of optics is the Fresnel lens. The aim of this work is to study Fresnel lenses, from the idea to their implementation. The driving principle behind the concept of a Fresnel lens is that the direction of propagation of light does not change within a medium (unless it is dispersed). Fresnel was the first to understand that light is a transverse wave, and polarization could be understood quantitatively with Fresnel's equations. A Fresnel lens is a type of compound solid lens created by Fresnel and originally intended for use in lighthouses. With this lens, it is possible to make lenses with a large aperture and a short focal length, without the bulk and mass of material that a conventional lens would need. The catadioptric form of the lens, which was invented entirely by Fresnel, has external elements that use the phenomena of total internal reflection as well as refraction. Fresnel lenses have been used and are used in modern applications such as automobiles, 3D glasses, and photovoltaics. In fact, in the future their popularity is expected to increase particularly with regard to photovoltaic use, as Fresnel lenses are an attractively economical option, especially for large-scale installations.

Keywords: Fresnel lenses, Fresnel equations, wave nature of light, polarization, lighthouses

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Βιδάλης Ανδρέας του Ευαγγέλου, με αριθμό μητρώου ΟΡ15002 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επαγγελματιών Υγείας και Πρόνοιας του Τμήματος Οπτικής και Οπτομετρίας, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο/Η Δηλών/ούσα





# Περιεχόμενα

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ευχαριστίες.....                                                          | v   |
| Περίληψη.....                                                             | vi  |
| Summary.....                                                              | vii |
| Δήλωση συγγραφέα.....                                                     | ix  |
| Περιεχόμενα .....                                                         | x   |
| Κατάλογος εικόνων .....                                                   | x   |
| Εισαγωγή.....                                                             | 1   |
| Κεφάλαιο 1 - Ιστορικά Στοιχεία.....                                       | 2   |
| 1.1 Ιστορική αναδρομή της σωματιδιακής και κυματικής φύσης του φωτός..... | 2   |
| 1.2 Περιγραφή ιστορικού πλαισίου .....                                    | 9   |
| 1.3 Βιογραφία του Fresnel .....                                           | 16  |
| Κεφάλαιο 2 - Το έργο του Augustin Fresnel.....                            | 19  |
| 2.1 Γενικά για το έργο του Fresnel .....                                  | 19  |
| 2.2 Οι εξισώσεις Fresnel .....                                            | 27  |
| 2.3 Οι φακοί Fresnel .....                                                | 38  |
| Κεφάλαιο 3 - Η συμβολή του έργου του Fresnel .....                        | 47  |
| 3.1 Συνεισφορά στην ιστορία της οπτικής.....                              | 47  |
| 3.2 Πρακτικές εφαρμογές των φακών Fresnel στους φάρους .....              | 48  |
| 3.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των φάρων .....                         | 52  |
| 3.4 Σύγχρονες εφαρμογές των φακών Fresnel.....                            | 60  |
| Κεφάλαιο 4 – Μελλοντικές Προοπτικές .....                                 | 69  |
| 4.1 Προοπτικές των φακών.....                                             | 69  |
| 4.2 Προοπτικές των κατόπτρων.....                                         | 69  |
| 4.3 Συμπεράσματα .....                                                    | 69  |
| Βιβλιογραφία .....                                                        | 71  |

## Κατάλογος Εικόνων

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 1. Ο Ibn al Haytham .....                                                          | 3  |
| Εικόνα 2. Ο Thomas Young .....                                                            | 4  |
| Εικόνα 3. Ο Christian Huygens .....                                                       | 5  |
| Εικόνα 4. Ο James Clerk Maxwell .....                                                     | 6  |
| Εικόνα 5. Ο François Arago .....                                                          | 7  |
| Εικόνα 6. Ο Max Karl Planck.....                                                          | 8  |
| Εικόνα 7. Ο Albert Einstein.....                                                          | 8  |
| Εικόνα 8. Ο Isaac Newton .....                                                            | 10 |
| Εικόνα 9. Ο James Bradley .....                                                           | 11 |
| Εικόνα 10. Ο Étienne-Louis Malus .....                                                    | 12 |
| Εικόνα 11. Ο Pierre Louis Maupertuis .....                                                | 13 |
| Εικόνα 12. Ο Sir David Brewster .....                                                     | 14 |
| Εικόνα 13. Ο Jean-Baptiste Biot .....                                                     | 15 |
| Εικόνα 14. Ο Augustin Fresnel .....                                                       | 18 |
| Εικόνα 15. Εξίσωση κύματος.....                                                           | 28 |
| Εικόνα 16. Χαρακτηριστικά κυμάτων.....                                                    | 28 |
| Εικόνα 17. Πηγές φωτός και μέτωπα κύματος.....                                            | 29 |
| Εικόνα 18. Επίπεδο μέτωπο κύματος .....                                                   | 29 |
| Εικόνα 19. Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις Fresnel .....                   | 30 |
| Εικόνα 20. Προσπίπτον, ανακλώμενο και μεταδιδόμενο φως .....                              | 37 |
| Εικόνα 21. Η ανάκλαση και η διάθλαση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.....            | 38 |
| Εικόνα 22. Καμπύλες εσωτερικής ανάκλασης.....                                             | 38 |
| Εικόνα 23. Σφαιρικός απεικονιστικός φακός Fresnel .....                                   | 40 |
| Εικόνα 24. Ο γραμμικός φακός .....                                                        | 42 |
| Εικόνα 25. Προφίλ ενός φακού Fresnel .....                                                | 42 |
| Εικόνα 26. Σύγκριση πλευρικού προφίλ ενός Plano-Convex (PCX) και ενός φακού Fresnel ..... | 43 |

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 27. Ο πρώτος φακός Fresnel .....                                                                                                                                                                 | 44 |
| Εικόνα 28. Συγκέντρωση φωτός μιας σημειακής πηγής με φακό Fresnel .....                                                                                                                                 | 45 |
| Εικόνα 29. Ο φακός Fresnel στο φάρο Anvil Point κοντά στο Swanage στο Dorset της Αγγλίας, ο οποίος αρχικά κατασκευάστηκε το 1881 και αυτοματοποιήθηκε πλήρως πάνω από έναν αιώνα αργότερα το 1991 ..... | 50 |
| Εικόνα 30. Κοντινό πλάνο του φακού Fresnel στον φάρο Anvil Point .....                                                                                                                                  | 50 |
| Εικόνα 31. Ένας μεγάλος (ύψος 6 πόδια) φακός Fresnel για χρήση σε φάρο .....                                                                                                                            | 51 |
| Εικόνα 32. Μεγέθη φακών Fresnel .....                                                                                                                                                                   | 51 |
| Εικόνα 33. Ο φακός Fresnel 5 <sup>ης</sup> τάξης .....                                                                                                                                                  | 52 |
| Εικόνα 34. Βασικοί τύποι ανακλαστήρων .....                                                                                                                                                             | 53 |
| Εικόνα 35. Ανακλαστήρας του Fresnel .....                                                                                                                                                               | 54 |
| Εικόνα 36. Οι ολοφωτικοί ανακλαστήρες του Thomas Stevenson .....                                                                                                                                        | 55 |
| Εικόνα 37. Φάρος με φώτα LED στο St John Point στην Ιρλανδία .....                                                                                                                                      | 56 |
| Εικόνα 38. Η λειτουργία των φακών φάρων .....                                                                                                                                                           | 59 |
| Εικόνα 39. Οπτικό πεδίο φακού Fresnel σε σύγκριση με παραδοσιακούς καθρέφτες .....                                                                                                                      | 60 |
| Εικόνα 40. Ποδηλάτης που φαίνεται μέσα από το φακό Fresnel .....                                                                                                                                        | 61 |
| Εικόνα 41. Διάγραμμα ροής της ανάπτυξης τεχνικής συγκεκρωτικών ηλιακών συστημάτων φακών απεικόνισης Fresnel .....                                                                                       | 64 |
| Εικόνα 42. Εγκατάσταση φακού Fresnel για φωτοβολταϊκή χρήση .....                                                                                                                                       | 64 |
| Εικόνα 43. Ρύθμιση λέιζερ με ηλιακή άντληση με χρήση φακών Fresnel .....                                                                                                                                | 65 |
| Εικόνα 44. Φακοί Fresnel σε φανάρια .....                                                                                                                                                               | 66 |
| Εικόνα 45. Γυαλιά 3D με φακούς Fresnel .....                                                                                                                                                            | 67 |
| Εικόνα 46. Μεγεθυντικός φακός Fresnel .....                                                                                                                                                             | 68 |

## Εισαγωγή

Ο φακός Fresnel είναι ένα είδος σύνθετου συμπαγούς φακού που δημιουργήθηκε από τον Fresnel και προοριζόταν για χρήση σε φάρους. Θεωρήθηκε ως μια «εφεύρεση που έσωσε εκατομμύρια πλοία» (BBC, 2019).

Η κινητήρια αρχή πίσω από τη σύλληψη ενός φακού Fresnel είναι ότι η κατεύθυνση διάδοσης του φωτός δεν αλλάζει μέσα σε ένα μέσο (εκτός εάν είναι διασκορπισμένο). Αντίθετα, οι ακτίνες φωτός αποκλίνουν μόνο στις επιφάνειες ενός μέσου. Ως αποτέλεσμα, το μεγαλύτερο μέρος του υλικού στο κέντρο ενός φακού χρησιμεύει μόνο για την αύξηση του βάρους και της απορρόφησης μέσα στο σύστημα. Για να επωφεληθούν από αυτή τη φυσική ιδιότητα, οι φυσικοί του 18ου αιώνα άρχισαν να πειραματίζονται με τη δημιουργία αυτού που είναι γνωστό σήμερα ως φακός Fresnel (Elton, 2009).

Ο Fresnel σχεδίασε έξι μεγέθη φακών φάρων, χωρισμένους σε τέσσερις τάξεις με βάση την εστιακή απόσταση και το μέγεθος (Levitt, 2013). Οι φακοί Fresnel κατασκευάζονται συνήθως από πλαστικό ή γυαλί, και απαιτούν μικρότερη ποσότητα υλικού συγκριτικά με τους συμβατικούς φακούς, καθώς ο φακός διαιρείται σε ομόκεντρα δακτυλιοειδή τμήματα (Levitt, 2013). Ο σχεδιασμός του φακού Fresnel επιτρέπει σημαντική μείωση του πάχους (και συνεπώς της μάζας και του όγκου του υλικού) σε βάρος της μείωσης της ποιότητας απεικόνισης του φακού, γι' αυτό οι εφαρμογές ακριβούς απεικόνισης όπως η φωτογραφία συνήθως εξακολουθούν να χρησιμοποιούν μεγαλύτερους συμβατικούς φακούς (Elton, 2009).

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να μελετήσει τους φακούς Fresnel, από την ιδέα μέχρι την υλοποίησή τους. Η εργασία αποτελείται από τέσσερα κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο αφορά ιστορικά στοιχεία. Γίνεται μια ιστορική αναδρομή της σωματιδιακής και κυματικής φύσης του φωτός, περιγράφεται το ιστορικό πλαίσιο και παρουσιάζεται η βιογραφία του Fresnel. Το επόμενο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο έργο του Augustin Fresnel, και γίνεται εστίαση στις εξισώσεις Fresnel και στους φακούς Fresnel. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η συμβολή του έργου του Fresnel. Περιγράφεται η συνεισφορά του στην ιστορία της οπτικής, αναλύονται οι πρακτικές εφαρμογές των φακών Fresnel στους φάρους, και οι σύγχρονες εφαρμογές των φακών Fresnel. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προοπτικές των φακών και των κατόπτρων, καθώς και τα συμπεράσματα της εργασίας.

# Κεφάλαιο 1 - Ιστορικά Στοιχεία

## 1.1 Ιστορική αναδρομή της σωματιδιακής και κυματικής φύσης του φωτός

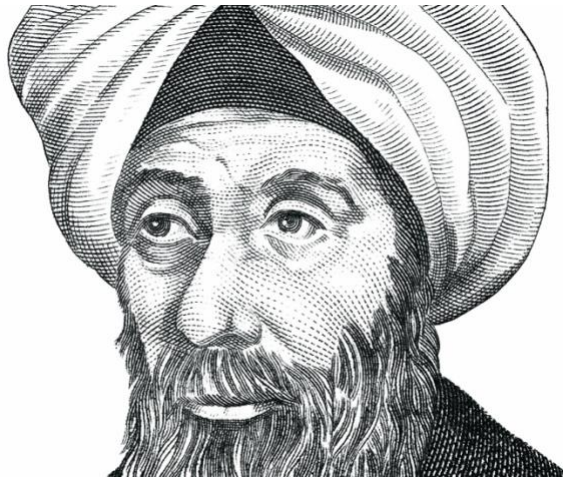
Το φως, η όραση και τα χρώματα από τα πανάρχαια χρόνια προσέλκυσαν το ενδιαφέρον και την προσοχή εξαιρετικών διανοιών, όπως ο Δημόκριτος, ο Πλάτων, ο Αριστοτέλης, ο Ευκλείδης, και από τους νεότερους, ο Newton, ο Bacon, ο Descartes, ο Fresnel και ο Einstein. Από την εμπειρία όλων αυτών των σοφών, ο επιστημονικός κόσμος κατέληξε στο να αποδεχθεί ότι: φως είναι το αίτιο, το οποίο διεγείρει τα αισθητήρια κύτταρα του αμφιβληστροειδή χιτώνα του οργάνου της όρασης, του οφθαλμού (Χανδρινός, 2011).

Αν ανατρέξουμε στο παρελθόν, τόσο οι αρχαίοι Έλληνες, όσο και αρκετοί νεότεροι μέχρι τις μέρες μας, κακώς ταύτιζαν το φως και τις άλλες αισθητήριες αντιλήψεις με το φυσικό μέσο που δίνει το έναυσμα των αντιλήψεων αυτών. Γιατί πολύ απλά, στο γύρω κόσμο μας δεν υπάρχουν οι αισθήσεις αλλά μόνο κύματα και ακτινοβολίες. Συνεπώς, ζούμε σε κόσμο σκοτεινό και αθόρυβο, βομβαρδιζόμενο όμως από ποικίλες ακτινοβολίες (Hecht, 2002).

Το πρώτο βιβλίο της αρχαιότητας που πραγματεύεται το φως, είναι η Οπτική του Ευκλείδη (306-283 π.Χ.). Ο Ευκλείδης ανέπτυξε την θεωρία ότι οι φωτεινές ακτίνες προχωρούν στο άπειρο κατευθείαν σε γραμμή. Ο Δημόκριτος (460-370 π.Χ.) καταδίκασε τη θεωρία του “ορατού πυρός” και υποστήριξε ότι το φως είναι μια ενέργεια αποκλειστικά εξωτερικής προέλευσης. Το φως κατά τον Δημόκριτο προέρχεται από μια αιθέρια ουσία που υπάρχει τόσο στα αυτόφωτα όσο και στα ετερόφωτα σώματα. Αυτή αποσπάται κατά μικρές μονάδες και σε τακτά χρονικά διαστήματα εκπέμπεται στο διάστημα σε ευθεία γραμμή προς τους οφθαλμούς. Επίσης, ο Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.) απέρριπτε και αυτός τη θεωρία για το “οπτικό πυρ” και δεχόταν τη θεωρία για τη διείσδυση φωτεινών ακτινών από τον έξω κόσμο. Όμως, δεν παραδεχόταν ότι το φως είχε υλική σύσταση. Κατ’ αυτόν, πρόκειται για αναθυμιάσεις ενός σώματος οι οποίες διαχεόμενες στο χώρο προσβάλλουν τους υγρούς χιτώνες του οφθαλμού. Η κρούση προκαλεί ένα ερέθισμα που διαβιβάζεται στον εγκέφαλο για να δημιουργηθεί εκεί η όραση. Περίπου τις ίδιες απόψεις είχε και ο Επίκουρος (321-270 π.Χ.) ο οποίος πίστευε ότι τα σώματα εκπέμπουν είδωλα τα οποία εισδύουν στους

οφθαλμούς και από εκεί με την διάνοια λαμβάνουμε γνώση αυτών (Chen, 2000; Waldman, 1983).

Οι Άραβες βελτίωσαν τις υπάρχουσες γνώσεις για την όραση. Σε αυτό συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό ο μαθηματικός Ibn al Haytham (965-1040 μ.Χ.), ο οποίος στα βιβλία τους δίνει την πρώτη άρτια ανατομική περιγραφή του οφθαλμού. Ο Alhazen απέρριπτε τις ιδέες του Εμπεδοκλή και του Πλάτωνα για το “οπτικό πυρ” και υποστήριζε ότι οι ακτίνες εκπορεύονται από τα αντικείμενα και πως τα είδωλα σχηματίζονται σε πρόσθιο τμήμα του φακού. Ακόμη, στον Alhazen αποδίδεται από ορισμένους η ανακάλυψη του σκοτεινού θαλάμου. Επίσης, υποστήριξε ότι υπάρχει σταθερή σχέση μεταξύ της ακτίνας που προσπίπτει και της ακτίνας που διαθλάται (Sabra, 1981).



**Εικόνα 1. Ο Ibn al Haytham**

(Πηγή: Funci, 2020)

Παράλληλα, ο Leonardo Da Vinci ισχυρίστηκε ότι η αναστροφή του ειδώλου γίνεται στο υαλώδες και προβάλλεται ορθά στον αμφιβληστροειδή και ότι η αυξομείωση στο εύρος αποβλέπει στη ρύθμιση της αναγκαίας ποσότητας φωτός κατά την όραση ενός αντικειμένου. Επιπλέον, ο Μαυρόλυκος υποστήριξε ότι οι ακτίνες του φωτός διαθλώνται από τον κρυσταλλοειδή και σχηματίζουν είδωλο ορθό στον αμφιβληστροειδή. Από την άλλη, ο Descartes ήταν ο πρώτος που υποστήριξε πως η ανατροφή της εικόνας δεν γίνεται στον αμφιβληστροειδή αλλά στο χίασμα. Μετά την καρτεσιανή περίοδο, οι Επιστήμες άρχισαν να ανθίζουν και πάλι, ενώ το φως και η όραση ξαναπήραν την πρώτη θέση, κατά κύριο λόγο

ένεκα του ενδιαφέροντος που έδειξαν εξαιρετικές διάνοιες όπως ο Newton, ο Young, ο Helmholtz και ο Fresnel (Buchwald, 1989; Hecht, 2002).



**Εικόνα 2. Ο Thomas Young**

(Πηγή: Beléndez, 2009)

Ένα από τα σοβαρά προβλήματα που απασχόλησαν τη Φυσική ήταν το πρόβλημα της φύσεως του φωτός. Γύρω από αυτό το θέμα, αναπτύχθηκαν πολλές θεωρίες. Από τις θεωρίες αυτές, σήμερα ισχύει η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell, συνοδευόμενη από τις πρόσθετες παραδοχές που προβλέπονται από την Θεωρία των Κβάντα. Η πρώτη θεωρία δέχεται ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ενώ η Κβαντική Θεωρία δέχεται ότι το φως είναι στοιχειώδεις ποσότητες ενέργειας (φωτόνια) (Chen, 2000).

Ο Νεύτωνας (1643-1727) υποστήριξε ότι το φως αποτελείται από πολύ μικρά υλικά σωματίδια που εκπέμπουν σώματα που ακτινοβολούν. Τα σωματίδια αυτά κινούνται με μεγάλη ταχύτητα και προσπίπτοντας στο μάτι, το διεγείρουν και προκαλούν το αίσθημα της όρασης. Κατά την περίπτωση τους, τα σωματίδια αυτά συμπεριφέρονται σαν ελαστικές σφαίρες όταν προσπίπτουν σε λείες επιφάνειες. Με τη θεωρία αυτή ειρηνεύονται όλα τα οπτικά φαινόμενα που σχετίζονται με την αρχή της ευθύγραμμης πορείας του φωτός, δεν ερμηνεύονται όμως σωρεία φαινομένων (διάθλαση, κυματικές ιδιότητες του φωτός κλπ) και για το λόγο αυτό εγκαταλείφθηκε (Hecht, 2002).

Ο Huygens (1629-1695) υποστήριξε ότι κατά τη διάδοση του κύματος κάθε σημείο μιας ισοφασικής επιφάνειας (μετώπου κύματος) μπορεί να θεωρηθεί σαν σημειακή πηγή που εκπέμπει δευτερογενή κύματα, τα οποία διαδίδονται με την ταχύτητα του κύματος στο μέσο. Τα στοιχειώδη αυτά δευτερογενή κύματα συμβάλλουν μεταξύ τους και αλληλοαναιρούνται σε όλα τα άλλα σημεία, εκτός από τα σημεία της περιβάλλουσας (κοινή εφαπτομένη στις στοιχειώδεις ισοφασικές επιφάνειες. Έτσι, αυτή η περιβάλλουσα είναι η νέα ισοφασική επιφάνεια. Η θεωρία του Huygens για την εξήγηση της φύσης του φωτός συμπληρώθηκε από τον Fresnel, ο οποίος σημείωσε ότι τα μόρια των σωμάτων που φωτοβολούν βρίσκονται σε ταχύτατες κραδασμικές κινήσεις που μεταδίδονται δια μέσου ενός ελαστικού και αβαρούς μέσου, του “αιθέρα”, ο οποίος καλύπτει όλα τα κενά διαστήματα που υπάρχουν μεταξύ των μορίων των σωμάτων καθώς επίσης και μεταξύ όλων των σωμάτων του σύμπαντος. Η θεωρία αυτή ερμηνεύει πολλά οπτικά φαινόμενα, όπως ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση του φωτός κλπ. Δεν κατορθώνει όμως να ερμηνεύσει μερικά άλλα οπτικά φαινόμενα, όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, έτσι εγκαταλείφθηκε (Χανδρινός, 2011).



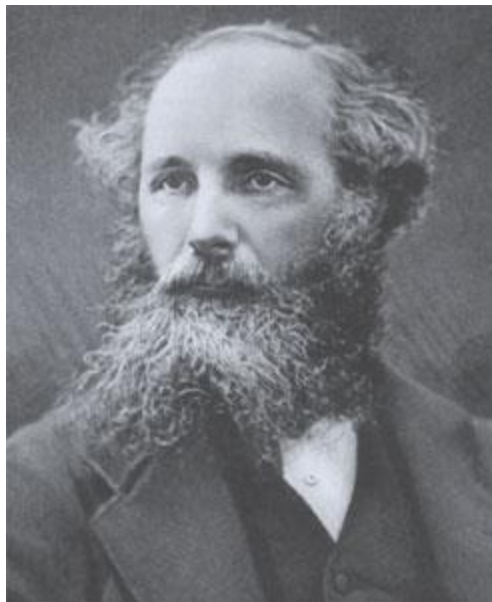
**Εικόνα 3. Ο Christian Huygens**

(Πηγή: Beléndez, 2009)

Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell, το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που ξεκινάνε από την πηγή τους και προχωρούν κατά τη διεύθυνση που διαδίδεται



το φως. Κατά την θεωρία αυτή, ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα που μεταβάλλονται χρονικά και τοπικά, τα ανύσματα αυτά ταλαντώνονται και είναι κάθετα τόσο μεταξύ τους όσο και με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, και τα δύο κύματα είναι πολωμένα σε επίπεδα που είναι κάθετα μεταξύ τους. Επίσης, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κινούνται με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός στο εκάστοτε μέσο διάδοσης με τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρεται ενέργεια υπό μορφή ενέργειας ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (Chen, 2000).



**Εικόνα 4. Ο James Clerk Maxwell**

(Πηγή: Physics World, 2006)

Το 1801, ο Άγγλος φυσικός Thomas Young διεξήγαγε το περίφημο πείραμά του «διπλής σχισμής» στο οποίο προσπάθησε να μετρήσει το μήκος κύματος του φωτός. Ο Young δημιούργησε το πείραμά του έτσι ώστε μια ενιαία δέσμη φωτός από τον ήλιο εισήλθε σε ένα σκοτεινό δωμάτιο μέσα από μια μικρή τρύπα σε ένα παραθυρόφυλλο. Αυτή η δέσμη φωτός στη συνέχεια χωρίστηκε στα δύο. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε ένα μοτίβο παρεμβολής σε μια οθόνη, η οποία τοποθετήθηκε πίσω, ως αποτέλεσμα της επικάλυψης των δύο πηγών φωτός. Αυτό το σχέδιο θα μπορούσε να είχε δημιουργηθεί μόνο εάν το φως ήταν κυματοειδές στη φύση του και από τις παραμέτρους που μετρήθηκαν στο πείραμά του, ο Young ήταν σε θέση να προσδιορίσει το μήκος κύματος του φωτός (Hecht, 2002).

Ο Augustin-Jean Fresnel βοήθησε να καθιερωθεί επίσημα η κυματική θεωρία του φωτός στην οποία συνέβαλε το πείραμα της διπλής σχισμής του Young. Ο Fresnel δεν γνώριζε τα αποτελέσματα του Young στην αρχή, αλλά τα δικά του πειράματα με μια σειρά φραγμάτων περίθλασης και κροσσών συμβολής έφεραν τα ίδια αποτελέσματα. Ο Fresnel χρησιμοποίησε τη μαθηματική αρχή του Ολλανδού επιστήμονα Christiaan Huygens για να εξηγήσει τα αποτελέσματα των δύο πειραμάτων. Η αρχή Huygens-Fresnel, όπως έγινε αργότερα γνωστή, λέει ότι κάθε σημείο σε ένα μέτωπο κύματος μπορεί να θεωρηθεί δευτερεύουσα πηγή σφαιρικών κυμάτων. Αυτό το μοντέλο φωτεινών κυμάτων προέβλεψε ένα πολύ ενδιαφέρον αποτέλεσμα. Εάν μια παράλληλη δέσμη φωτός λάμπει σε ένα μικρό στρογγυλό αντικείμενο, θα εμφανιστεί ένα φωτεινό σημείο στο κέντρο μιας κυκλικής σκιάς. Αυτό το σημείο είναι σχεδόν τόσο φωτεινό σαν το αντικείμενο να μην ήταν καθόλου εκεί. Η θεωρία του Fresnel επιβεβαιώθηκε από τον Γάλλο φυσικό François Arago, ο οποίος αργότερα πραγματοποίησε αυτό το πείραμα. Ο Fresnel ανακάλυψε ότι το φως ήταν ένα εγκάρσιο κύμα αντί για ένα διάμηκες κύμα όπως είχε προηγουμένως θεωρηθεί, και παρουσίασε τα αποτελέσματά του το 1817 (Chen, 2000; Hecht, 2002).



**Εικόνα 5. Ο François Arago**

(Πηγή: David Darling, 2022)

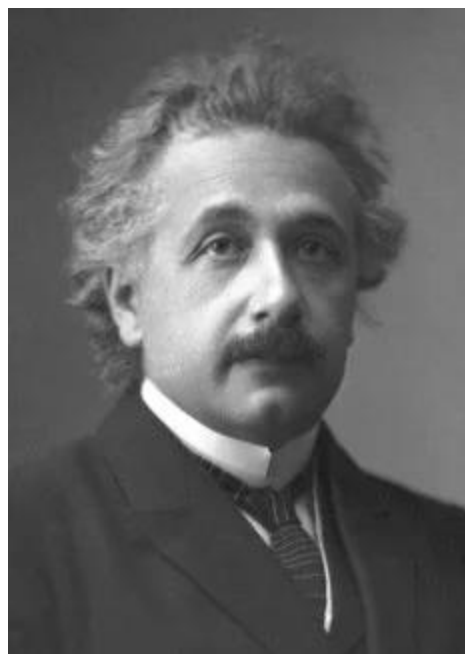
Το 1900 ο Max Karl Planck (1858-1947) διατύπωσε τη θεωρία των κβάντα, σύμφωνα με την οποία η ενέργεια ακτινοβολεί ασυνεχώς και μάλιστα με τη μορφή στοιχειωδών ποσών ενέργειας, τα οποία ονομάζονται κβάντα ενέργειας. Αντί δηλαδή η ενέργεια που

μεταβιβάζεται σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα να είναι κατανεμημένη στο χώρο σε όλη την έκταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, διαδίδεται με τη μορφή συγκεντρωμένων ποσοτήτων ενέργειας, των κβάντα. Ο Albert Einstein (1879-1955) επέκτεινε τις προτάσεις του Planck και στην περίπτωση του φωτός, ονόμασε τα κβάντα φωτός με τον όρο ‘‘φωτόνια’’ (Hecht, 2002).



**Εικόνα 6. Ο Max Karl Planck**

(Πηγή: Stuewer, 2022)

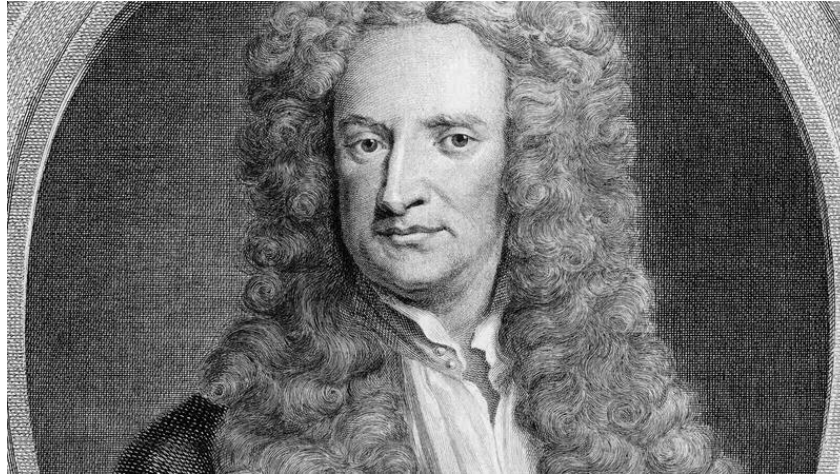


**Εικόνα 7. Ο Albert Einstein**

Έτσι, το φως είναι μονάχα ένα μέρος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που ταξιδεύουν στο σύμπαν. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα καλύπτει ένα εξαιρετικά μεγάλο εύρος από τα ραδιοκύματα με μήκος κύματος ενός μέτρου ή και περισσότερο, και τις ακτίνες Γ με μήκος κύματος λιγότερο από ένα δισεκατομμυριοστό του μέτρου. Η οπτική ακτινοβολία καταλαμβάνει το τμήμα του φάσματος μεταξύ των ραδιοκυμάτων και των ακτινών Γ εκδηλώνοντας μια μοναδική μίξη ιδιοτήτων ακτινών, κυμάτων και σωματιδίων. Στα μικρότερα μήκη κύματος, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τείνει να είναι στη συμπεριφορά της ‘‘σωματιδιακή’’ ενώ στα μεγαλύτερα μήκη κύματος η συμπεριφορά της είναι ‘‘κυματική’’. Το ορατό τμήμα καταλαμβάνει μια ενδιάμεση θέση εκδηλώνοντας συνάμα κυματική και σωματιδιακή συμπεριφορά σε ποικίλες διαβαθμίσεις (Χανδρινός, 2011). Χάρη στις συνεισφορές του Augustin Fresnel, η κυματική θεωρία του φωτός –που απέδειξε πειραματικά ο Young στο περίφημο πείραμά του– έγινε τελικά αποδεκτή.

## 1.2 Περιγραφή ιστορικού πλαισίου

Η εκτίμηση της ανακατασκευής της φυσικής οπτικής από τον Fresnel θα μπορούσε να βοηθηθεί από μια επισκόπηση της κατακερματισμένης κατάστασης στην οποία βρήκε το θέμα. Ο Isaac Newton ανέπτυξε τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός, και οι απόψεις του συμφωνούσαν με τους συναδέλφους του Frenel. Η θεωρία αυτή εξηγούσε την ευθύγραμμη διάδοση. Ανέφερε δηλαδή ότι η πολύ γρήγορη κίνηση των σωματιδίων οδηγεί σε σχεδόν ευθείς δρόμους. Παράλληλα, ο Christiaan Huygens ανέπτυξε την κυματική θεωρία του φωτός, αναλύοντας την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός. Υπέθεσε ότι κάθε σημείο που διασχίζεται από κάποιο κινούμενο μέτωπο κύματος, μετατρέπεται σε πηγή δευτερεύοντος μετώπου κύματος. Με βάση την αρχική θέση του κινούμενου μετώπου κύματος, οποιαδήποτε μεταγενέστερη θέση (κατά τον Huygens) αποτελούσε την κοινή επιφάνεια επαφτομένης (περιβάλλουσα) των δευτερευόντων μετώπων κύματος που εκπέμπονταν από την προηγούμενη θέση. Ενώ αυτή η κατασκευή προέβλεπε πράγματι ευθύγραμμη διάδοση, ήταν δύσκολο να συμβιβαστεί με την κοινή παρατήρηση ότι τα μέτωπα κύματος στην επιφάνεια του νερού μπορεί να κάμπτονται γύρω από εμπόδια (Darrigol, 2012).



**Εικόνα 8. Ο Isaac Newton**

(Πηγή: Westfall, 2022)

Ο Huygens με τη θεωρία του ανέλυσε τον νόμο της συνηθισμένης ανάκλασης και διάθλασης (νόμος του Snell), με την προϋπόθεση ότι τα δευτερεύοντα κύματα κινούνται πιο αργά σε πυκνότερα μέσα (αυτά με υψηλότερο δείκτη διάθλασης). Η σωματιδιακή θεωρία εξήγησε παρομοίως τους ίδιους νόμους. Αυτό το συμπέρασμα ήταν λανθασμένο, αλλά δεν μπορούσε να απορριφθεί άμεσα με την τεχνολογία της εποχής του Νεύτωνα ή ακόμη και της εποχής του Fresnel (Darrigol, 2012).

Παρόμοια, η αστική εκτροπή (δηλαδή η φαινομενική αλλαγή της θέσης κάποιου άστρου εξαιτίας της ταχύτητας της γης) παρέμενε ασαφής. Με βάση τον James Bradley, το 1728, προέκυψε η άποψη ότι η αστρική εκτροπή επιβεβαιώνει τη σωματιδιακή θεωρία. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1746, ο Euler ανέφερε ότι ο αιθέρας της γης δεν διαταράσσεται από την κίνησή της (Darrigol, 2012).

Η εξαιρετική δύναμη της θεωρίας του Huygens ήταν η εξήγησή του για τη διπλή διάθλαση του "κρυστάλλου της Ισλανδίας" (διαφανής ασβεστίτης), με την υπόθεση ότι τα δευτερεύοντα κύματα είναι σφαιρικά για τη συνηθισμένη διάθλαση (που ικανοποιεί το νόμο του Snell). Γενικά, η κατασκευή κοινής εφαπτομένης του Huygens υποδηλώνει ότι οι ακτίνες είναι μονοπάτια του ελάχιστου χρόνου μεταξύ διαδοχικών θέσεων του μετώπου κύματος, σύμφωνα με την αρχή του Fermat. Αναφορικά με τα ιστροπικά μέσα, τα δευτερεύοντα μέτωπα κίνησης είναι σημαντικό να είναι σφαιρικά, και ο Huygens αναφέρει ότι οι ακτίνες πρέπει να είναι κάθετες στο μέτωπο του κύματος. Πριν από τον Huygens, ο Ignace-Gaston Pardies είχε εξηγήσει τον νόμο της συνήθους διάθλασης (Darrigol, 2012).



**Εικόνα 9. Ο James Bradley**

(Πηγή: Hawkins, 2022)

Αν και ο Νεύτωνας απέρριψε τη θεωρία των κυμάτων, παρατήρησε τη δυνατότητά της να εξηγεί τα χρώματα, συμπεριλαμβανομένων των χρωμάτων των «λεπτών πλακών» (π.χ., «δαχτυλίδια του Νεύτωνα»), με την υπόθεση ότι το φως αποτελείται από περιοδικά κύματα, με τις χαμηλότερες συχνότητες (μεγαλύτερα μήκη κύματος) στο κόκκινο άκρο του φάσματος και τις υψηλότερες συχνότητες (μικρότερα μήκη κύματος) στο ιώδες άκρο. Ο Robert Hooke θεωρούσε ότι το φως είναι περιοδικοί παλμοί και δεν θεωρούσε ότι η συχνότητα σχετίζεται με το χρώμα. Από την άλλη, ο Huygens δεν διέκρινε περιοδικότητα στους παλμούς των κυμάτων. Ωστόσο, το 1801, ο Thomas Young εξήγησε τα χρώματα των «ραβδωτών επιφανειών», αναφέροντας ότι εξαρτώνται από το μήκος κύματος ή την μη ύπαρξη αντανάκλασεων των παρακείμενων γραμμών (Levitt, 2013).

Ο Newton και ο Huygens δεν κατάφεραν να εξηγήσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την περίθλαση. Ο Νεύτωνας, που ονόμασε την περίθλαση "κάμψη", υπέθεσε ότι οι ακτίνες φωτός που περνούσαν κοντά σε εμπόδια κάμπτονταν. Η κατασκευή κοινής εφαπτομένης του Huygens, χωρίς τροποποιήσεις, δεν μπορούσε να φιλοξενήσει καθόλου περίθλαση. Δύο τέτοιες τροποποιήσεις προτάθηκαν από τον Young το 1801: πρώτον, ότι τα δευτερεύοντα κύματα κοντά στην άκρη ενός εμποδίου μπορούσαν να αποκλίνουν στη σκιά, αλλά μόνο ασθενώς, λόγω περιορισμένης ενίσχυσης από άλλα δευτερεύοντα κύματα, και δεύτερον, ότι η περίθλαση από μια ακμή προκλήθηκε από παρεμβολή μεταξύ δύο ακτίνων: η μία αντανάκλαται από την άκρη και η άλλη κάμπτεται καθώς περνούσε κοντά στην άκρη. Η τελευταία ακτίνα θα ήταν αμετάκλητη αν ήταν αρκετά μακριά από το άκρο, αλλά ο Young

δεν έδωσε περισσότερες λεπτομέρειες για αυτή την περίπτωση. οι απόψεις αυτές ήταν οι πρώτες που εξήγησαν ότι υπάρχει εξάρτηση μεταξύ μήκους κύματος και βαθμού περίθλασης (Darrigol, 2012).

Ερευνώντας το φαινόμενο της διπλής διάθλασης, ο Huygens παρατήρησε ότι ένα σημείο σε έναν διπλά διαθλαστικό κρύσταλλο παράγει δυο τύπους μετώπων κύματος. Το μέτωπο κύματος που αντιστοιχεί στην ακτίνα Ο είναι σφαιρικό μέτωπο κύματος. Το συνηθισμένο κύμα ταξιδεύει με την ίδια ταχύτητα προς όλες τις κατευθύνσεις και έτσι το αντίστοιχο μέτωπο κύματος είναι σφαιρικό. Το μέτωπο κύματος που αντιστοιχεί στην ακτίνα Ε είναι ελλειψοειδές μέτωπο κύματος. Έτσι, ο Νεύτωνας απέρριψε την κυματική θεωρία, καθώς διαπιστώθηκε ότι οι ακτίνες του φωτός έχουν “πλευρές” (Buchwald, 1980).

Το 1808, η εξαιρετική διάθλαση του ασβεστίτη διερευνήθηκε πειραματικά, με πρωτοφανή ακρίβεια, από τον Étienne-Louis Malus, και βρέθηκε ότι συνάδει με τη σφαιροειδή κατασκευή του Huygens και όχι με τον «Κανόνα» του Νεύτωνα. Έπειτα, ο Pierre-Simon Laplace ενθάρρυνε τον Malus, να διερευνήσει περισσότερο το νόμο αυτό με σωματικούς όρους. Προέκυψε λοιπόν η σωματική ταχύτητα που συνάδει με την αρχή της ελάχιστης δράσης του Maupertuis (Kipnis, 2003).



**Εικόνα 10. Ο Étienne-Louis Malus**

(Πηγή: Britannica, 2022b)

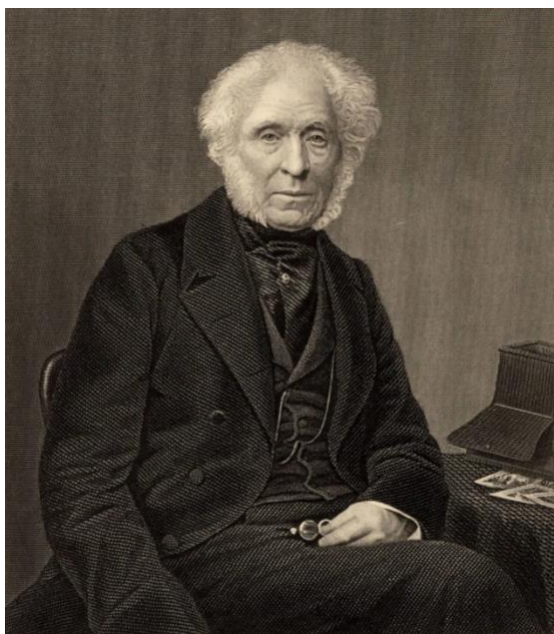


**Εικόνα 11. Ο Pierre Louis Maupertuis**

(Πηγή: Wikipedia, 2021)

Ταυτόχρονα, ο Malus, μελετώντας το φαινόμενο της διπλής διάθλασης, διαπίστωσε ότι όταν μια ακτίνα φωτός ανακλάται από μια επιφάνεια η οποία δεν είναι μεταλλική, έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με τις ακτίνες που ανακλώνται από κρυστάλλους ασβεστίτη. Έδωσε στη συμπεριφορά αυτή τον όρο «πόλωση». Στην περίπτωση της πόλωσης μέσω ανάκλασης, το "επίπεδο πόλωσης" του ήταν το επίπεδο του συμβάντος και οι ανακλώμενες ακτίνες. Το 1809 αναπτύχθηκε και ο λεγόμενος νόμος Malus. Χρησιμοποιώντας έναν κρύσταλλο ασβεστίτη, ο Malus ανακάλυψε ότι το φυσικό προσπίπτον φως πολώθηκε όταν αντανακλάται από μια γυάλινη επιφάνεια και ότι το φως που ανακλάται κοντά σε γωνία πρόσπτωσης  $57^\circ$  μπορούσε να σβήσει όταν το δει μέσα από τον κρύσταλλο. Στη συνέχεια πρότεινε ότι το φυσικό φως αποτελείται από τις πολώσεις s και p, οι οποίες ήταν κάθετες μεταξύ τους. Δεδομένου ότι η ένταση του ανακλώμενου φωτός κυμαινόταν από το μέγιστο στο ελάχιστο καθώς περιστρέφονταν ο κρύσταλλος, ο Malus πρότεινε ότι το πλάτος της ανακλώμενης δέσμης πρέπει να είναι  $A = A_0 \cos\theta$ . Ωστόσο, για να ληφθεί η ένταση, ο Malus τετραγώνισε τη σχέση πλάτους έτσι ώστε η εξίσωση έντασης  $I(\theta)$  του ανακλώμενου πολωμένου φωτός ήταν:  $I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta$ , όπου  $I_0 = A_0^2$  (Darrigol, 2012).





**Εικόνα 12. Ο Sir David Brewster**

(Πηγή: Britannica, 2021)

Ο François Arago το 1811 παρατήρησε ότι αφού περάσει μέσα από ένα λεπτό φύλλο μαρμαρυγίας, το πολωμένο φως χρωματίζει τις δύο εικόνες του αναλυτή διπλής διάθλασης με συμπληρωματικά χρώματα (καθώς η επικάλυψη τους είναι πάντα καθαρό λευκό, ανεξάρτητα από το πάχος των φύλλων ή την κλίση τους) και αυτό το ονόμασε «χρωματική πόλωση». Επιβεβαιώνοντας ότι αυτό δεν είναι κάποιο φαινόμενο διασποράς, ο Arago συνδέει στη συνέχεια αυτή τη συμπληρωματικότητα του χρώματος με τους δακτυλίους του Newton. Όμως, περιστρέφοντας είτε το φύλλο στο δικό του επίπεδο είτε τον αναλυτή, για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης, κάθε εικόνα διατρέχει διαδοχικά και επανειλημμένα ολόκληρη τη σειρά των πρισματικών χρωμάτων. Αυτή η διαδοχή χρωμάτων, που εμφανίζεται τέσσερις φορές, μερικές φορές με ανάδρομη σειρά, εξαρτάται από τη θέση του «άξονα του φύλλου», και αυτό διακρίνει το νέο φαινόμενο από αυτό των δακτυλίων του Νεύτωνα των οποίων τα χρώματα ποικίλλουν μόνο, και με ομοιόμορφο τρόπο, με αλλαγές στο πάχος. Χωρίς να παρατηρείται άλλη αναλογία μεταξύ των δύο φαινομένων και χωρίς έννοιες άλλες από αυτές που κληρονόμησε από τον Malus, ο Arago πρότεινε μια σωματιδιακή ερμηνεία: οι κρυσταλλικές πλάκες «αποπολώνουν» το προσπίπτον πολωμένο φως ανάλογα με το πάχος της πλάκας. Έτσι σε διάφορα πάχη υπάρχουν μόρια διαφόρων χρωμάτων των οποίων οι άξονες έχουν διαφορετικές κατευθύνσεις (Levitt, 2009).

Ένα χρόνο αργότερα, ο Jean-Baptiste Biot αντικαθιστώντας τη μαρμαρυγία με γύψο, διαπίστωσε ότι υπήρχαν χρώματα ακτίνων που επηρεάζονταν και που δεν επηρεάζονταν. Οι «επηρεασμένες» ακτίνες ήταν του ίδιου χρωματικού μείγματος με αυτές που ανακλώνται από άμορφες λεπτές πλάκες αναλογικού, αλλά μικρότερου πάχους (Darrigol, 2012).

Το ίδιο έτος επίσης, ο Biot μελέτησε τις παρατηρήσεις του σαν μια ταλάντωση στην ευθυγράμμιση των επηρεαζόμενων σωματιδίων. Έτσι δημιουργήθηκε ο όρος «κινητή πόλωση». Αργότερα ανέφερε ότι στην περίπτωση του χαλαζία, η οπτική περιστροφή ή περιστροφική πόλωση αποτελούσε μια σταδιακή περιστροφή της κατεύθυνσης της πόλωσης, και δεν μπορούσε να εξηγηθεί με ταλάντωση των σωματιδίων (Levitt, 2009).



**Εικόνα 13. Ο Jean-Baptiste Biot**

(Πηγή: Britannica, 2020)

Το 1814, ο Young, μελετώντας το έργο του Biot για τη χρωματική πόλωση, ανέφερε ότι η περιοδικότητα του χρώματος σαν συνάρτηση του πάχους της πλάκας, μπορεί να εξηγηθεί από τη θεωρία των κυμάτων. Όμως, ο Young υπήρξε τότε ο μοναδικός υπέρμαχος της κυματικής θεωρίας (Darrigol, 2012).

Το ίδιο έτος, ο Fresnel προσπάθησε ανεπιτυχώς να μελετήσει τη φύση της πόλωσης. Οι υπέρμαχοι της σωματιδιακής θεωρίας πίστευαν ότι γνώριζαν τι είναι πόλωση, ενώ από την άλλη, οι υπέρμαχοι της κυματικής θεωρίας δεν γνώριζαν. Και οι δύο θεωρίες ισχυρίστηκαν ότι εξηγούν την ευθύγραμμη διάδοση, αλλά η εξήγηση του κύματος θεωρήθηκε συντριπτικά

ως μη πειστική. Η σωματιδιακή θεωρία δεν συσχέτιζε τη διπλή διάθλαση με τις επιφανειακές δυνάμεις, και δεν μπορούσε να υποστηρίξει προβλέψεις αναφορικά με την περίθλαση, και η κυματική θεωρία δεν συνέδεε τη διπλή διάθλαση με την πόλωση, και θεωρούσε την περίθλαση σαν παρεμβολή. Μόνο η σωματιδιακή θεωρία έδωσε ακόμη και μια αόριστη εικόνα της γωνίας του Brewster, του νόμου του Malus ή της οπτικής περιστροφής. Επιπρόσθετα, η κυματική θεωρία μπόρεσε να εξηγήσει καλύτερα την περιοδικότητα της χρωματικής πόλωσης. Και ο Arago είχε ‘ιδρύσει’ τη μελέτη της χρωματικής πόλωσης, χάνοντας όμως το προβάδισμα, αμφιλεγόμενα, από τον Biot. Την περίοδο εκείνη ο Arago έμαθε για το ενδιαφέρον του Fresnel σχετικά με την οπτική (Frankel, 1976).

### **1.3 Βιογραφία του Fresnel**

Ο Augustin-Jean Fresnel γεννήθηκε στη Νορμανδία, και συγκεκριμένα στο Broglie, στις 10 Μαΐου 1788. Ο πατέρας του ήταν ο Jacques Fresnel (1755-1805) ο οποίος ήταν αρχιτέκτονας, και μητέρα του ήταν η Augustine Mérimée (1755–1833). Είχε τρεις αδελφούς. Μετά την Επανάσταση στο Broglie το 1790, η οικογένεια μετακόμισε δύο φορές – το 1789/90 στο Cherbourg και το 1794 στη γενέτειρα του Jacques Fresnel, στο Mathieu, όπου η Augustine Mérimée θα περνούσε 25 χρόνια ως χήρα, με δυο από τους τέσσερις επιζώντες γιους της (Authier, 2013).

Ο πρωτότοκος γιος της οικογένειας, ο Louis Fresnel (1786-1809) σπούδασε στην École Polytechnique, ήταν υπολοχαγός πυροβολικού, και σκοτώθηκε κατά τη διάρκεια της μάχης στη Jaca, στην Ισπανία, στα 23<sup>α</sup> του χρόνια. Ο τρίτος γιος, ο Léonor (1790–1869), ακολούθησε τον Augustin γίνοντας πολιτικός μηχανικός, έγινε γραμματέας της Επιτροπής Φάρων και βοήθησε στην επεξεργασία των συλλεκτικών έργων. Ο τέταρτος γιος, ο Fulgence Fresnel (1795–1855), ήταν διπλωμάτης και γλωσσολόγος, και βοήθησε ορισμένες φορές τον Augustin στις διαπραγματεύσεις. Πέθανε στη Βαγδάτη κατά τη διάρκεια μιας αποστολής εξερεύνησης της Βαβυλώνας (Levitt, 2013).

Ο Augustin Fresnel και οι αδελφοί του, αρχικά εκπαιδεύονταν κατ’ οίκον από τη μητέρα τους. Ο Augustin στάλθηκε να σπουδάσει στο École Centrale το 1801. Στα τέλη του 1804 έγινε δεκτός στο École Polytechnique, τοποθετώντας τον 17ο στις εισαγωγικές εξετάσεις. Έκανε ελάχιστους φίλους και – παρά τη συνεχιζόμενη κακή υγεία του – διέπρεψε στο σχέδιο και τη γεωμετρία: στο πρώτο του έτος πήρε ένα βραβείο για την επίλυσή του σε ένα πρόβλημα γεωμετρίας που έθεσε ο Adrien-Marie Legendre. Αποφοίτησε το 1806, στη

συνέχεια εγγράφηκε στο *École Nationale des Ponts et Chaussées*, από την οποία αποφοίτησε το 1809 (O'Connor & Robinson, 2002; Darrigol, 2012).

Οι γονείς του Fresnel ήταν Ρωμαιοκαθολικοί, και συγκεκριμένα ασπάζονταν την αίρεση των Γιανσενιστών. Οι Γιανσενιστές είχαν ακραία αυγουστινιανή άποψη αναφορικά με το προπατορικό αμάρτημα. Η αίρεση κατείχε σημαντικό ρόλο κατά την εκπαίδευση των αγοριών. Ο Augustin παρέμεινε γιανσενιστής. Πίστευε ότι οι διανοητικές του ικανότητες ήταν δώρα από το Θεό και είχε καθήκον να τις χρησιμοποιεί για το καλό των άλλων. Ο Γιανσενισμός θεωρείται αιρετικός από τη Ρωμαιοκαθολική Εκκλησία, και αυτό μπορεί να είναι μέρος της εξήγησης γιατί ο Augustin, παρά τα επιστημονικά του επιτεύγματα και τα βασιλικά του διαπιστευτήρια, δεν απέκτησε ποτέ μόνιμη ακαδημαϊκή θέση διδασκαλίας (Sun Signs, 2017; Levitt, 2013).

Το 1811, ο Fresnel προέβλεψε τη λεγόμενη διαδικασία Solvay αναφορικά με την παραγωγή ανθρακικού νατρίου. Ένα χρόνο αργότερα, εγκαταστάθηκε στη Nyons, βοηθώντας την κατασκευή αυτοκρατορικού αυτοκινητόδρομο που θα συνέδεε Ιταλία και Ισπανία. Από τότε ξεκίνησε το ενδιαφέρον του για την οπτική. Η επιστροφή του Ναπολέοντα το 1815 θεωρήθηκε επίθεση κατά του πολιτισμού, κι έτσι ο Fresnel πήγε στην Τουλούζη. Επιστρέφοντας στη Nyons ηττημένος τον απείλησαν. Κατά τη διάρκεια των Εκατό Ημερών τέθηκε σε αναστολή, την οποία τελικά του επέτρεψαν να περάσει στο σπίτι της μητέρας του στο Mathieu. Εκεί χρησιμοποίησε τον ελεύθερο χρόνο του για να ξεκινήσει τα οπτικά του πειράματα (Britannica, 2022a).

Το 1819 εξελέγη στη *Société Philomathique* και το 1822 έγινε εκδότης του *Δελτίου Επιστημών της Εταιρείας*. Ήδη από τον Μάιο του 1817, μετά από πρόταση του Arago, ο Fresnel υπέβαλε αίτηση για ένταξη στην *Académie des Sciences*, αλλά έλαβε μόνο μία ψήφο. Το 1825 έγινε μέλος της Βασιλικής Εταιρείας του Λονδίνου. Το 1827 έλαβε το βραβείο Rumford για τη συμβολή του στην ανάπτυξη της Ουδαλιστικής Θεωρίας για το πολωμένο φως και για τη συμβολή του στην Φυσική Οπτική. Μάλιστα, στις 14 Σεπτεμβρίου 1884 δημιουργήθηκε ένα μνημείο για τον ίδιο στη γενέτειρά τους. Αξίζει επίσης να αναφερθεί, ότι το όνομά του είναι γραμμένο ανάγλυφα στον Πύργο του Άιφελ, ανάμεσα στα άλλα 73 που υπάρχουν (Levitt, 2013).

Σε γενικές γραμμές, η υγεία του Fresnel ήταν πάντα κακή. Όμως, επιδεινώθηκε σημαντικά τον χειμώνα του 1822, γεγονός που τον οδήγησε να τελειώσει γρήγορα την έρευνά του, και τον εμπόδισε να γράψει άρθρο στην *Encyclopedia Britannica* για τη διπλή διάθλαση και την

πόλωση. Τα απομνημονεύματά του για την οπτική περιστροφή, τις εξισώσεις Fresnel, την κυκλική και ελλειπτική πόλωση χρονολογούνται εκείνη την περίοδο. Την άνοιξη ανέκαμψε αρκετά, κατά την άποψή του, ώστε να επιβλέπει την εγκατάσταση του φακού στο Cordouan. Αργότερα διαπιστώθηκε πως είχε φυματίωση. Θεωρώντας ότι το έργο του στον φάρο ήταν το πιο σημαντικό του καθήκον, παραιτήθηκε από εξεταστής στο *École Polytechnique* και έκλεισε τα επιστημονικά του τετράδια. Η αρρώστια του επιδεινώθηκε πολύ τον χειμώνα του 1826 και δεν ήταν σε θέση να γυρίσει Mathieu. Η τελευταία συνεδρία της Ακαδημίας που παρευρέθηκε ήταν στις 30 Απριλίου 1827. Στις αρχές του Ιουνίου πήγε στο *Ville-d'Avray*. Εκεί ήρθε μαζί του η μητέρα του. Ο Fresnel δεν είχε τη δύναμη να απαντήσει στη Βασιλική Εταιρεία. Πέθανε στις 14 Ιουλίου 1827, σε ηλικία 39 ετών. Κηδεύτηκε στο νεκροταφείο *Père Lachaise* στο Παρίσι (O'Connor & Robinson, 2002; Bountry, 1948).



**Εικόνα 14. Ο Augustin Fresnel**

(Πηγή: O'Connor & Robinson, 2002)

## Κεφάλαιο 2 - Το έργο του Augustin Fresnel

### 2.1 Γενικά για το έργο του Fresnel

Γύρω στο 1815, ο Fresnel ξεκίνησε τα οπτικά του πειράματα. Ωστόσο, το πρώτο βήμα προς την κυματική θεωρία του φωτός έγινε πιθανότατα από τον Robert Hooke. Ανέπτυξε μια θεωρία παλμών και συνέκρινε τη διάδοση του φωτός με αυτή των κυμάτων στο νερό στο έργο του *Micrographia* το 1665. Λίγα χρόνια αργότερα πρότεινε ότι οι δονήσεις του φωτός θα μπορούσαν να είναι κάθετες στην κατεύθυνση διάδοσης. Το 1678, ο Ολλανδός φυσικός, μαθηματικός, αστρονόμος Christiaan Huygens ανέπτυξε μια μαθηματική κυματική θεωρία του φωτός. Ο Huygens πρότεινε ότι το φως εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις ως μια σειρά κυμάτων σε ένα μέσο που ονομάζεται φωτεινός αιθέρας. Καθώς τα κύματα δεν επηρεάζονται από τη βαρύτητα, θεωρήθηκε ότι επιβραδύνθηκαν κατά την είσοδό τους σε ένα πυκνότερο μέσο. Ο Thomas Young έδειξε περαιτέρω μέσω ενός πειράματος περίθλασης ότι το φως συμπεριφέρθηκε ως κύματα. Ο Young πρότεινε περαιτέρω ότι τα διαφορετικά χρώματα προκαλούνται από διαφορετικά μήκη κύματος φωτός και εξήγησε την έγχρωμη όραση με όρους τρίχρωμων υποδοχέων στο μάτι. Ο Leonard Euler υποστήριξε ότι η περίθλαση θα μπορούσε πιο εύκολα να εξηγηθεί από μια κυματική θεωρία (Kirpnis, 1991).

Ο André-Marie Ampère έδωσε στον Augustin-Jean Fresnel μια ιδέα ότι η πόλωση του φωτός μπορεί να εξηγηθεί από τη θεωρία των κυμάτων εάν το φως ήταν εγκάρσιο κύμα, γύρω στο 1816. Ο Fresnel κατάφερε να δημιουργήσει τη δική του θεωρία για το φως. Παρουσιάστηκε στην Académie des Sciences το 1817. Βασιζόμενος στο έργο του Augustin-Jean Fresnel, ο Siméon Denis Poisson ανέπτυξε ένα πειστικό επιχείρημα υπέρ της κυματικής θεωρίας, βοηθώντας στην ανατροπή της σωματιδιακής θεωρίας του Νεύτωνα. Το 1821 ο Fresnel ήταν σε θέση να δείξει μέσω μαθηματικών μεθόδων ότι η πόλωση μπορούσε να εξηγηθεί από την κυματική θεωρία του φωτός και μόνο εάν το φως ήταν εντελώς εγκάρσιο, χωρίς καμία διαμήκη δόνηση. Ωστόσο, μια αδυναμία της θεωρίας περιλάμβανε ότι τα κύματα φωτός θα χρειαζόνταν ένα μέσο για μετάδοση. Η ύπαρξη της υποθετικής ουσίας φωτεινού αιθέρα που προτάθηκε από τον Huygens το 1678 τέθηκε σε έντονη αμφιβολία στα τέλη του δέκατου ένατου αιώνα από το πείραμα Michelson-Morley. Η σωματιδιακή θεωρία του Ισαάκ Νεύτωνα υπονοούσε ότι το φως θα ταξίδευε πιο γρήγορα σε ένα πυκνότερο μέσο, ενώ η κυματική θεωρία του Huygens και άλλων υπονοούσε το αντίθετο. Τότε, η ταχύτητα του

φωτός δεν μπορούσε να μετρηθεί με επαρκή ακρίβεια για να αποφασιστεί ποια θεωρία ήταν σωστή. Το 1850, ήταν ο Léon Foucault που μπόρεσε να κάνει την πρώτη αρκετά ακριβή μέτρηση. Τα αποτελέσματα του Foucault υποστήριξαν τη θεωρία των κυμάτων και η κλασική θεωρία των σωματιδίων τελικά εγκαταλείφθηκε, για να επανεμφανιστεί εν μέρει μόνο τον 20ο αιώνα (Buchwald, 1989).

Μαζί με τον François Arago, ο Fresnel μελέτησε την παρεμβολή των πολωμένων ακτίνων. Μερικά από τα ευρήματά τους συνοψίστηκαν σε 4 δηλώσεις, τους νόμους Fresnel-Arago. Παρήγαγε κυκλικά πολωμένο φως μέσω ενός γυάλινου ρόμβου, γνωστού ως ρόμβου Fresnel, με αμβλείες γωνίες  $126^\circ$  και οξείες γωνίες  $54^\circ$ . Το έργο του για την οπτική έλαβε ελάχιστη δημόσια αναγνώριση κατά τη διάρκεια της ζωής του, και πολλά από τα άρθρα του τυπώθηκαν από την Ακαδημία των Επιστημών μόνο χρόνια μετά τον θάνατό του (Kipnis, 1991).

Το 1816, ο Fresnel διαπίστωσε ότι στην περίπτωση που ένας διπλοδιαθλαστικός κρύσταλλος παράγει δυο εικόνες μιας σχισμής, δεν έχει το κλασικό μοντέλο παρεμβολής δυο σχισμών, και αυτό ίσχυε ακόμα και στην περίπτωση αντισταθμίσιματος των διαφορετικών χρόνων διάδοσης. Χρησιμοποιώντας δυο λεπτά ταιριαστά ελάσματα σε μια συσκευή διπλής σχισμής, διαπίστωσε ότι το προσπίπτον φως χωριζόταν από κάθε έλασμα, όπως και ένας διπλοδιαθλαστικός κρύσταλλος. Αυτό ερχόταν σε αντίθεση με την κινητή πόλωση του Biot (Buchwald, 1989).

Την ίδια περίοδο, ο Fresnel μελέτησε τη χρωματική πόλωση. Βρήκε ότι στην περίπτωση που το πολωμένο φως περνά μέσα από το κρυσταλλικό έλασμα, χωρίζεται σε κύματα τα οποία είναι κάθετα πολωμένα και δεν παράγονται χρώματα. Αν όμως τα κύματα περάσουν μέσα από έναν δεύτερο πολωτή, υφίσταται ευθυγράμμιση. Έτσι, εάν ο δεύτερος πολωτής υποστεί περιστροφή κατά  $90^\circ$ , τα κύματα αλλάζουν ρόλους, και αν ο δεύτερος πολωτής είναι ασβεστίτης, οι δυο εικόνες του ελάσματος έχουν ίδια απόχρωση. Ο Biot και ο Arago είχαν αναφέρει ότι αυτά είναι συμπληρωματικά χρώματα. Έτσι ο Fresnel πρότεινε μια πρόσθετη μετατόπιση  $180^\circ$  μέσα από το έλασμα, γεγονός που αναγνώρισε αργότερα ότι ήταν αδύναμη θεωρία συγκριτικά με τη θεωρία του Biot. Επίσης, ο Fresnel δεν είχε εξηγήσει ακόμα το πρόβλημα της υπέρθεσης των ημιτονοειδών συναρτήσεων (Silliman, 2008).

Αυτό το πρόβλημα το “έλυσε” με ένα έγγραφο του στις 15 Ιανουαρίου 1818. Στο ίδιο έγγραφο, υιοθέτησε τον νόμο του Malus προτείνοντας έναν υποκείμενο νόμο: ότι εάν το πολωμένο φως προσπίπτει σε έναν διπλοδιαθλαστικό κρύσταλλο με τον οπτικό του άξονα

υπό γωνία  $\theta$  ως προς το «επίπεδο πόλωσης», οι συνηθισμένες και οι έκτακτες δονήσεις (ως συναρτήσεις του χρόνου) κλιμακώνονται με τους παράγοντες  $\cos \theta$  και  $\sin \theta$ , αντίστοιχα. Όμως, ο Fresnel χρειαζόταν ακόμα τον κανόνα της αναστροφής φάσης. Διερεύνησε τις αρχές αυτές στην περίπτωση της χρωματικής πόλωσης χωρίς τους τύπους του Biot (Κίρπνις, 1991).

Ο Fresnel εφάρμοσε τις ίδιες αρχές στην τυπική περίπτωση της χρωματικής πόλωσης, στην οποία ένα διπλοδιαθλαστικό έλασμα κόπηκε σε κομμάτια παράλληλα με τον άξονά του και τοποθετήθηκε μεταξύ ενός πολωτή και ενός αναλυτή. Εάν ο αναλυτής είχε τη μορφή ενός παχύ κρυστάλλου ασβεστίτη με τον άξονά του στο επίπεδο πόλωσης, ο Fresnel προέβλεψε ότι οι εντάσεις των συνηθισμένων και εξαιρετικών εικόνων του ελάσματος ήταν αντίστοιχα ανάλογες με (Buchwald, 1989):

$$I_o = \cos^2 i \cos^2(i-s) + \sin^2 i \sin^2(i-s) + \frac{1}{2} \sin 2i \sin 2(i-s) \cos \phi, (1)$$

$$I_e = \cos^2 i \sin^2(i-s) + \sin^2 i \cos^2(i-s) - \frac{1}{2} \sin 2i \sin 2(i-s) \cos \phi, (2)$$

όπου  $i$  είναι η γωνία από το αρχικό επίπεδο πόλωσης προς τον οπτικό άξονα του ελάσματος,  $s$  είναι η γωνία από το αρχικό επίπεδο πόλωσης προς το επίπεδο πόλωσης της τελικής συνηθισμένης εικόνας, και  $\phi$  είναι η υστέρηση φάσης του ασυνήθιστου κύματος σε σχέση με το συνηθισμένο κύμα λόγω της διαφοράς στους χρόνους διάδοσης μέσω του ελάσματος. Από αυτές τις εξισώσεις επαληθεύεται εύκολα ότι  $I_o + I_e = 1$  για όλα τα  $\phi$ , ώστε τα χρώματα να είναι συμπληρωματικά (Buchwald, 1989).

Ο Fresnel είχε στείλει τις εξισώσεις αυτές στον Biot, ο οποίος με τη σειρά του, τις εξέλιξε (Levitt, 2013). Αν αντικαταστήσουμε:

$$U = \cos^2 \frac{\phi}{2} \quad \text{και} \quad A = \sin^2 \frac{\phi}{2}, \quad \text{τότε οι τύποι του Fresnel μπορούν να ξαναγραφτούν ως:}$$

$$I_o = U \cos^2 s + A \cos^2(2i - s), (3)$$

$$I_e = U \sin^2 s + A \sin^2(2i - s), (4)$$



που δεν είναι άλλοι από τους εμπειρικούς τύπους του Biot του 1812, εκτός από το ότι ο Biot ερμήνευσε τα  $U$  και  $A$  ως τις "ανεπηρέαστες" και "επηρεασμένες" επιλογές των ακτίνων που προσπίπτουν στο έλασμα (Levitt, 2013).

Ο Arago άργησε να αναφερθεί στο έργο του Fresnel για τη χρωματική πόλωση. Αναφέρθηκε το 1821 χρησιμοποιώντας το ως επιθετική απάντηση στη θεωρία του Biot. Στη γραπτή απάντησή του, ο Biot διαμαρτυρήθηκε ότι η επίθεση του Arago ξεπέρασε το κατάλληλο πεδίο αναφοράς για τα προτεινόμενα έργα του Fresnel. Αλλά ο Biot ισχυρίστηκε επίσης ότι οι αντικαταστάσεις για τα  $U$  και  $A$ , και συνεπώς οι εκφράσεις του Fresnel για τα  $I_0$  και  $I_e$  ήταν εμπειρικά λάθος γιατί όταν οι εντάσεις των φασματικών χρωμάτων του Fresnel αναμειγνύονταν σύμφωνα με τους κανόνες του Νεύτωνα, οι συναρτήσεις του τετραγώνου συνημιτόνου και ημιτόνου ποικίλλουν πολύ ομαλά για να ληφθεί υπόψη η παρατηρούμενη ακολουθία χρωμάτων. Ο Fresnel τότε αμφισβήτησε την απότομη αλλαγή των χρωμάτων και το ότι το ανθρώπινο μάτι ήταν ικανό να κρίνει αντικειμενικά ένα χρώμα. Επίσης, ο Fresnel τόνισε ότι κάθε άτομο μπορεί να βλέπει διαφορετικά κάποιο χρώμα (Levitt, 2013).

Στη δεύτερη έκδοση του "Calcul des teintes" (Ιούνιος 1821), ο Fresnel υπέθεσε, κατ' αναλογία με τα ηχητικά κύματα, ότι η πυκνότητα του αέρα σε ένα διαθλαστικό μέσο ήταν αντιστρόφως ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας του κύματος, και επομένως ευθέως ανάλογη με το τετράγωνο του δείκτη διάθλασης. Για ανάκλαση και διάθλαση στην επιφάνεια μεταξύ δύο ισοτροπικών μέσων διαφορετικών δεικτών, ο Fresnel αποσυνέθεσε τις εγκάρσιες δονήσεις σε δύο κάθετες συνιστώσες, τώρα γνωστές ως συνιστώσες  $s$  και  $p$ , οι οποίες είναι παράλληλες με την επιφάνεια και το επίπεδο πρόσπτωσης, αντίστοιχα. Με άλλα λόγια, οι συνιστώσες  $s$  και  $p$  είναι αντίστοιχα τετράγωνες και παράλληλες στο επίπεδο πρόσπτωσης. Για τη συνιστώσα  $s$ , ο Fresnel υπέθεσε ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο μέσων ήταν ανάλογη με μια ελαστική σύγκρουση και έλαβε έναν τύπο για αυτό που τώρα ονομάζουμε ανακλαστικότητα: ο λόγος της ανακλώμενης έντασης προς την ένταση προσπίπτουσας. Η προβλεπόμενη ανακλαστικότητα ήταν μη μηδενική σε όλες τις γωνίες (Kipnis, 1991).

Στην τρίτη έκδοση (Ιούλιος 1821) ο Fresnel επεσήμανε ότι είχε βρει έναν τύπο για την ανακλαστικότητα του συστατικού  $p$ , ο οποίος προέβλεπε ότι η ανακλαστικότητα ήταν 0 στη γωνία Brewster. Με τον τρόπο αυτό, η πόλωση μέσω ανάκλασης λαμβάνονταν υπόψιν αλλά

μόνο με την προϋπόθεση ότι η κατεύθυνση της δόνησης ήταν κάθετη στο επίπεδο πόλωσης όπως ‘προστάζει’ ο νόμος Malus. Η τεχνολογία της εποχής δεν επέτρεψε τη μέτρηση της ανακλαστικότητας  $s$  και  $p$  με αρκετή ακρίβεια ώστε να δοκιμαστούν οι τύποι του Fresnel σε αυθαίρετες γωνίες πρόσπτωσης. Στις μέρες μας θα μπορούσε να ονομαστεί συντελεστής ανάκλασης (αναλογία ανακλώμενου πλάτους προς προσπίπτον πλάτος). Τότε, εάν το επίπεδο πόλωσης της προσπίπτουσας ακτίνας ήταν  $45^\circ$  ως προς το επίπεδο πρόσπτωσης, η εφαπτομένη της αντίστοιχης γωνίας για την ανακλώμενη ακτίνα μπορούσε να ληφθεί από τον λόγο των δύο συντελεστών ανάκλασης και αυτή η γωνία μπορούσε να μετρηθεί. Ο Fresnel είχε χρησιμοποιήσει αρκετές γωνίες πρόσπτωσης, για νερό και γυαλί, και οι υπολογισμένες και μετρούμενες γωνίες ήταν καλύτερες από  $1,5^\circ$  σε κάθε περίπτωση (Silliman, 2008).

Ο Fresnel συνδύασε τη διατήρηση ενέργειας με την εφαπτόμενη δόνηση της διεπιφάνειας. Οι τύποι που προέκυψαν για τους συντελεστές ανακλαστικότητας και ανάκλασης έγιναν γνωστοί ως εξισώσεις Fresnel. Οι συντελεστές ανάκλασης για τις πολώσεις  $s$  και  $p$  εκφράζονται πιο συνοπτικά ως (Levitt, 2013):

$$r_s = -\frac{\sin(i - r)}{\sin(i + r)} \quad (5) \quad \text{και} \quad r_p = \frac{\tan(i - r)}{\tan(i + r)}, \quad (6)$$

όπου  $i$  και  $r$  είναι οι γωνίες πρόσπτωσης και διάθλασης. Αυτές οι εξισώσεις είναι γνωστές αντίστοιχα ως νόμος ημιτόνου του Fresnel και νόμος εφαπτομένης του Fresnel. Επιτρέποντας στους συντελεστές να είναι σύνθετοι, ο Fresnel υπολόγισε ακόμη και τις διαφορετικές μετατοπίσεις φάσης των συνιστωσών  $s$  και  $p$  λόγω της συνολικής εσωτερικής ανάκλασης (Levitt, 2013).

Αυτή η επιτυχία ενέπνευσε τους James MacCullagh και Augustin-Louis Cauchy, ξεκινώντας το 1836, να αναλύσουν την ανάκλαση από μέταλλα χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις Fresnel με έναν σύνθετο δείκτη διάθλασης. Η ίδια τεχνική ισχύει για μη μεταλλικά αδιαφανή μέσα. Με αυτές τις γενικεύσεις, οι εξισώσεις Fresnel μπορούν να προβλέψουν την εμφάνιση μιας μεγάλης ποικιλίας αντικειμένων υπό φωτισμό - για παράδειγμα, σε γραφικά υπολογιστή (Kipnis, 2003).

Σε ένα υπόμνημα με ημερομηνία 9 Δεκεμβρίου 1822, ο Fresnel επινόησε τους όρους γραμμική πόλωση για την απλή περίπτωση στην οποία οι κάθετες συνιστώσες της δόνησης βρίσκονται σε φάση ή  $180^\circ$  εκτός φάσης, κυκλική πόλωση για την περίπτωση σε που είναι ίσου μεγέθους και τετάρτου κύκλου ( $\pm 90^\circ$ ) εκτός φάσης, και ελλειπτική πόλωση για άλλες περιπτώσεις στις οποίες τα δύο συστατικά έχουν σταθερό λόγο πλάτους και σταθερή διαφορά φάσης. Στη συνέχεια εξήγησε πώς η οπτική περιστροφή θα μπορούσε να γίνει κατανοητή ως είδος διπλής διάθλασης. Το γραμμικά πολωμένο φως θα μπορούσε να διαχωριστεί σε δύο κυκλικά πολωμένα συστατικά που περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Εάν αυτά τα στοιχεία διαδίδονταν με ελαφρώς διαφορετικές ταχύτητες, η διαφορά φάσης μεταξύ τους - και επομένως η κατεύθυνση του γραμμικά πολωμένου αποτελέσματός τους - θα ποικίλλει συνεχώς ανάλογα με την απόσταση (Levitt, 2009).

Αυτές οι έννοιες απαιτούσαν έναν επαναπροσδιορισμό της διάκρισης μεταξύ πολωμένου και μη πολωμένου φωτός. Πριν από τον Fresnel, θεωρήθηκε ότι η πόλωση θα μπορούσε να ποικίλλει ως προς την κατεύθυνση και το βαθμό (π.χ. λόγω της διακύμανσης της γωνίας ανάκλασης από ένα διαφανές σώμα) και ότι θα μπορούσε να είναι συνάρτηση του χρώματος (χρωματική πόλωση), αλλά όχι ότι μπορεί να διαφέρει σε είδος. Ως εκ τούτου, θεωρήθηκε ότι ο βαθμός πόλωσης ήταν ο βαθμός στον οποίο το φως μπορούσε να κατασταλεί από έναν αναλυτή με τον κατάλληλο προσανατολισμό. Το φως που είχε μετατραπεί από γραμμική σε ελλειπτική ή κυκλική πόλωση (π.χ. με διέλευση από ένα κρυσταλλικό έλασμα ή με ολική εσωτερική ανάκλαση) περιγράφηκε ως μερικώς ή πλήρως "αποπολωμένο" λόγω της συμπεριφοράς του σε έναν αναλυτή. Μετά τον Fresnel, το καθοριστικό χαρακτηριστικό του πολωμένου φωτός ήταν ότι οι κάθετες συνιστώσες της δόνησης είχαν μια σταθερή αναλογία πλάτους και μια σταθερή διαφορά φάσης. Σύμφωνα με αυτόν τον ορισμό, το ελλειπτικά ή κυκλικά πολωμένο φως είναι πλήρως πολωμένο αν και δεν μπορεί να κατασταλεί πλήρως μόνο από έναν αναλυτή (Kipnis, 1991).

Μέχρι που ο Fresnel έστρεψε την προσοχή του στη διαξονική διπλή διάθλαση, θεωρήθηκε ότι η μία από τις δύο διαθλάσεις ήταν συνηθισμένη, ακόμη και σε διαξονικούς κρυστάλλους. Όμως, σε ένα υπόμνημα που υποβλήθηκε στις 19 Νοεμβρίου 1821, ο Fresnel ανέφερε δύο πειράματα σε τοπάζι που έδειχναν ότι καμία διάθλαση δεν ήταν συνηθισμένη με την έννοια της ικανοποίησης του νόμου του Snell. δηλαδή καμία ακτίνα δεν ήταν προϊόν σφαιρικών δευτερογενών κυμάτων (Buchwald, 1989).

Στα ίδια απομνημονεύματα βρίσκονταν το πρωταρχικό έργο του Fresnel για τον νόμο της διαξονικής ταχύτητας. Για τον ασβεσίτη, αν ανταλλάξουμε την ισημερινή και την πολική ακτίνα του πεπλατυσμένου σφαιροειδούς του Huygens διατηρώντας την πολική κατεύθυνση, θα λάβουμε ένα σφαιροειδές που αγγίζει τη σφαίρα στον ισημερινό. Ένα επίπεδο διαμέσου του κέντρου/προέλευσης κόβει αυτό το σφαιροειδές σε μια έλλειψη της οποίας οι κύριοι και δευτερεύοντες ημιάξονες δίνουν τα μεγέθη των εξαιρετικών και συνηθισμένων ταχυτήτων ακτίνων στην κατεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο και τις κατευθύνσεις των αντίστοιχων δονήσεων τους. Η διεύθυνση του οπτικού άξονα είναι η κάθετη προς το επίπεδο για το οποίο η έλλειψη τομής μειώνεται σε κύκλο. Έτσι, για τη διαξονική περίπτωση, ο Fresnel απλώς αντικατέστησε το σφαιροειδές με ένα τριαξονικό ελλειψοειδές, το οποίο επρόκειτο να τεμαχιστεί από ένα επίπεδο με τον ίδιο τρόπο. Γενικά θα υπήρχαν δύο επίπεδα που περνούσαν από το κέντρο του ελλειψοειδούς και το κόβουν σε κύκλο, και οι κανονικές σε αυτά τα επίπεδα θα έδιναν δύο οπτικούς άξονες. Από τη γεωμετρία, ο Fresnel συνήγαγε τον ημιτονοειδή νόμο του Biot (με τις ταχύτητες των ακτίνων να αντικαθίστανται από τις αντίστροφές τους) (Levitt, 2013).

Το ελλειψοειδές πράγματι έδωσε τις σωστές ταχύτητες ακτίνων (αν και η αρχική πειραματική επαλήθευση ήταν μόνο κατά προσέγγιση). Αλλά δεν έδωσε τις σωστές κατευθύνσεις δόνησης, για τη διαξονική περίπτωση ή ακόμα και για τη μονοαξονική περίπτωση, επειδή οι δονήσεις στο μοντέλο του Fresnel ήταν εφαπτομενικές στο μέτωπο κύματος - το οποίο, για μια εξαιρετική ακτίνα, δεν είναι γενικά κανονική με την ακτίνα. Αυτό το σφάλμα διορθώθηκε σε ένα «απόσπασμα» που ο Fresnel διάβασε στην Ακαδημία μια εβδομάδα αργότερα, στις 26 Νοεμβρίου. Ξεκινώντας με το σφαιροειδές του Huygens,

ο Fresnel απέκτησε μια επιφάνεια 4ου βαθμού, η οποία, όταν τεμαχιστεί από ένα επίπεδο όπως παραπάνω, θα απέδιδε τις κανονικές κυματικές ταχύτητες για ένα μέτωπο κύματος σε αυτό το επίπεδο, μαζί με τις κατευθύνσεις δόνησης τους. Για τη διαξονική περίπτωση, γενίκευσε την εξίσωση για να αποκτήσει μια επιφάνεια με τρεις άνισες κύριες διαστάσεις. αυτό το ονόμασε στη συνέχεια «επιφάνεια ελαστικότητας». Αλλά διατήρησε το προηγούμενο ελλειψοειδές ως προσέγγιση, από το οποίο συνήγαγε τον διεδρο νόμο του Biot (Kipnis, 2003).

Η αρχική παραγωγή της επιφάνειας ελαστικότητας από τον Fresnel ήταν καθαρά γεωμετρική και όχι απαγωγικά αυστηρή. Η πρώτη του προσπάθεια για μηχανική εξαγωγή, που περιέχεται σε ένα «συμπλήρωμα» με ημερομηνία 13 Ιανουαρίου 1822, υπέθεσε ότι (α) υπήρχαν τρεις αμοιβαία κάθετες κατευθύνσεις στις οποίες μια μετατόπιση παρήγαγε μια αντίδραση προς την ίδια κατεύθυνση, (β) η αντίδραση ήταν διαφορετικά γραμμική συνάρτηση της μετατόπισης, και (γ) η ακτίνα της επιφάνειας προς οποιαδήποτε κατεύθυνση ήταν η τετραγωνική ρίζα της συνιστώσας, προς αυτή την κατεύθυνση, της αντίδρασης σε μια μοναδιαία μετατόπιση προς αυτήν την κατεύθυνση. Η τελευταία υπόθεση αναγνώριζε την απαίτηση ότι εάν ένα κύμα επρόκειτο να διατηρήσει μια σταθερή κατεύθυνση διάδοσης και μια σταθερή διεύθυνση δόνησης, η αντίδραση δεν πρέπει να βρίσκεται εκτός του επιπέδου αυτών των δύο κατευθύνσεων (Kipnis, 2003).

Στο ίδιο συμπλήρωμα, ο Fresnel εξέτασε πώς θα μπορούσε να βρει, για τη διαξονική περίπτωση, το δευτερεύον μέτωπο κύματος που διαστέλλεται από την αρχή σε μονάδα χρόνου - δηλαδή, την επιφάνεια που μειώνεται στη σφαίρα του Huygens και στη σφαιροειδή στη μονοαξονική περίπτωση. Σημείωσε ότι αυτή η «επιφάνεια κύματος» είναι εφαπτομενική σε όλα τα πιθανά επίπεδα μέτωπα κύματος που θα μπορούσαν να έχουν διασχίσει την αρχή πριν από μία μονάδα χρόνου, και απαρίθμησε τις μαθηματικές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί. Αλλά αμφέβαλλε για τη σκοπιμότητα εξαγωγής της επιφάνειας από αυτές τις συνθήκες (Silliman, 2008).

Σε ένα «δεύτερο συμπλήρωμα», ο Fresnel τελικά εκμεταλλεύτηκε δύο σχετικά γεγονότα: (α) η «επιφάνεια κύματος» ήταν επίσης η επιφάνεια της ταχύτητας ακτίνων, η οποία μπορούσε να ληφθεί με τομή του ελλειψοειδούς που αρχικά είχε μπερδέψει με την επιφάνεια του ελαστικότητας, και (β) η «επιφάνεια κύματος» τέμνει κάθε επίπεδο συμμετρίας του ελλειψοειδούς σε δύο καμπύλες: έναν κύκλο και μια έλλειψη. Έτσι βρήκε ότι η «επιφάνεια κύματος» περιγράφεται από την εξίσωση 4ου βαθμού (Levitt, 2013):

$$r^2(a^2x^2 + b^2y^2 + c^2z^2) - a^2(b^2 + c^2)x^2 - b^2(c^2 + a^2)y^2 - c^2(a^2 + b^2)z^2 + a^2b^2c^2 = 0, (7)$$

όπου  $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$  και  $a, b, c$  είναι οι ταχύτητες διάδοσης σε κατευθύνσεις κάθετες προς τους άξονες συντεταγμένων για δονήσεις κατά μήκος των αξόνων (οι κανονικές ταχύτητες ακτίνων και κυμάτων είναι οι ίδιες σε αυτές τις ειδικές περιπτώσεις) (Levitt, 2013).

Στο τέλος ενός απομνημονεύματος που διαβάστηκε τον Σεπτέμβριο του 1822, ο Fresnel προέβλεψε ότι εάν τα συμπιεσμένα πρίσματα αντικατασταθούν από (άτονα) μονοκρυσταλλικά πρίσματα χαλαζία με αντίστοιχες κατευθύνσεις οπτικής περιστροφής και με τους οπτικούς άξονές τους ευθυγραμμισμένους κατά μήκος της σειράς, ένα αντικείμενο φαίνεται κοιτώντας κατά μήκος ο κοινός οπτικός άξονας θα έδινε δύο εικόνες, οι οποίες θα φαίνονται μη πολωμένες όταν τις βλέπουμε μέσω ενός αναλυτή, αλλά, όταν τις βλέπουμε μέσω ενός ρόμβου Fresnel, θα πολώνονται σε  $\pm 45^\circ$  στο επίπεδο ανάκλασης του ρόμβου (δείχνοντας ότι αρχικά ήταν κυκλικά πολωμένοι σε αντίθετες κατευθύνσεις). Αυτό θα συνεπαγόταν ότι η οπτική περιστροφή αποτελεί μια μορφή διπλής διάθλασης. Στα απομνημονεύματα του Δεκεμβρίου του 1822, εισάχθηκε ο όρος «κυκλική πόλωση» και ανέφερε ότι η πρόβλεψη αυτή είχε επιβεβαιωθεί με τη χρήση ενός μόνο πρίσματος πρίσμα  $14^\circ - 152^\circ - 14^\circ$  και δύο γυάλινων ημιπρισμάτων. Αλλά πέτυχε έναν ευρύτερο διαχωρισμό των εικόνων αντικαθιστώντας το γυάλινο μισό πρίσμα με ημιπρίσματα χαλαζία των οποίων η περιστροφή ήταν αντίθετη από εκείνη του πρίσματος  $14^\circ - 152^\circ - 14^\circ$ . Επεσήμανε επίσης ότι θα μπορούσε να αυξηθεί ο αριθμός των πρισμάτων (Levitt, 2013).

## 2.2 Οι εξισώσεις Fresnel

Οι εξισώσεις Fresnel (ή οι συντελεστές Fresnel) περιγράφουν την ανάκλαση και τη μετάδοση του φωτός (ή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας γενικά) όταν προσπίπτει σε μια διεπαφή μεταξύ διαφορετικών οπτικών μέσων. Συνήχθησαν από τον Augustin-Jean Fresnel ο οποίος ήταν ο πρώτος που κατάλαβε ότι το φως είναι ένα εγκάρσιο κύμα, παρόλο που κανείς δεν συνειδητοποίησε ότι οι «δονήσεις» του κύματος ήταν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Για πρώτη φορά, η πόλωση μπορούσε να γίνει κατανοητή ποσοτικά, καθώς οι εξισώσεις του Fresnel προέβλεψαν σωστά τη διαφορετική συμπεριφορά των κυμάτων των πόλων  $s$  και  $p$  που προσπίπτουν σε μια διεπαφή υλικού (Skaar, 2019).

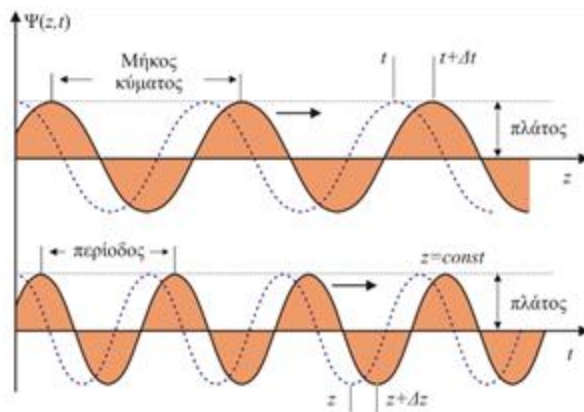


$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

διαταραχή  $\Psi(\mathbf{r}, t)$       ταχύτητα διάδοσης

Εικόνα 15. Εξίσωση κύματος

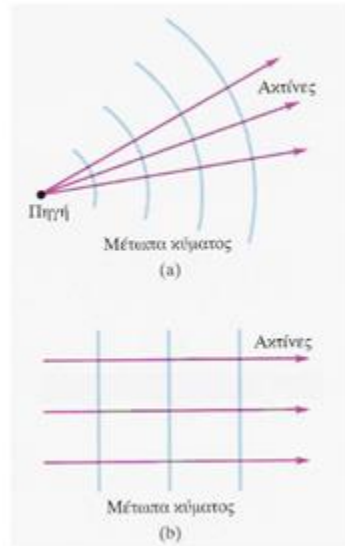
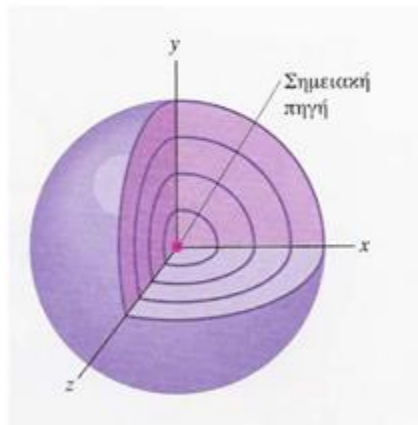
(Πηγή: Παπάζογλου, 2013)



- **Μήκος κύματος**      (περιοδικότητα στον χώρο)
- **Περίοδος**      (περιοδικότητα στον χρόνο)
- **Πλάτος**
- **Ταχύτητα**
- **Φάση**

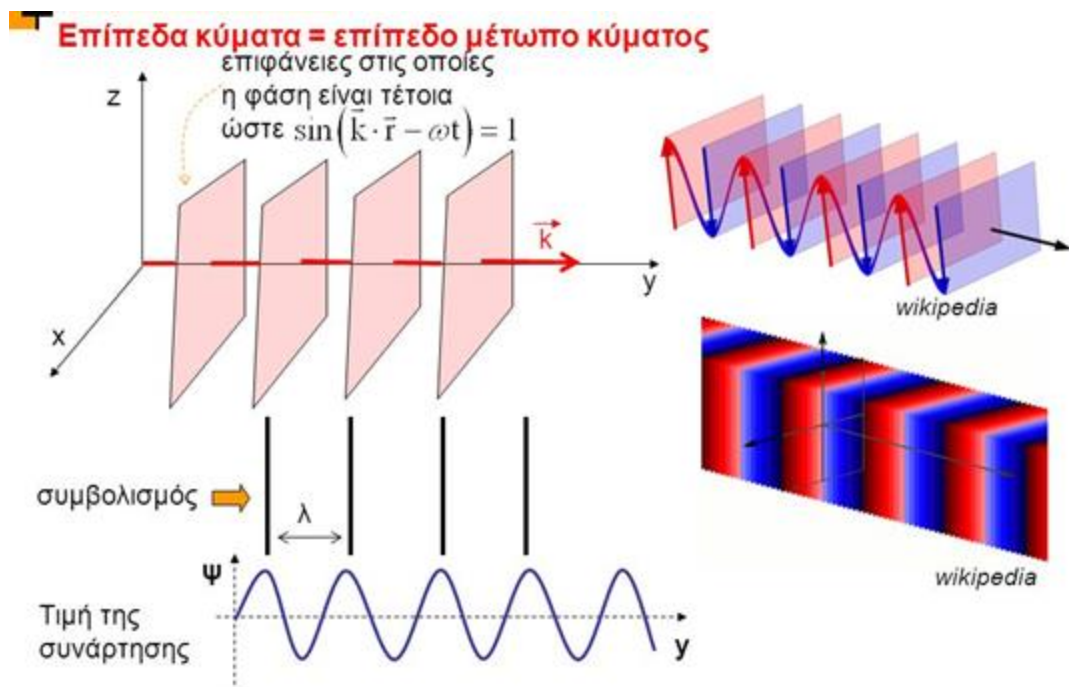
Εικόνα 16. Χαρακτηριστικά κυμάτων

(Πηγή: Παπάζογλου, 2013)



**Εικόνα 17. Πηγές φωτός και μέτωπα κύματος**

(Πηγή: Αγγελίδης & Μπέλλου, 2022)



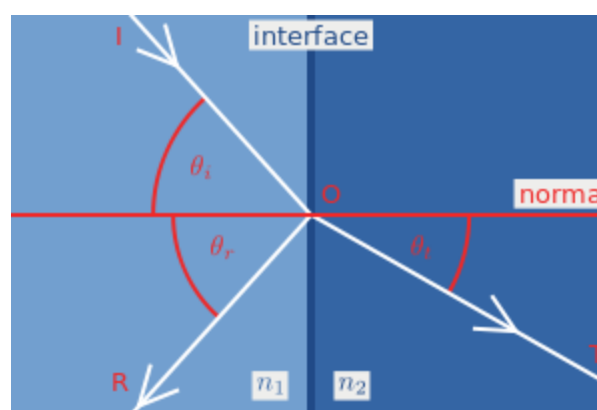
**Εικόνα 18. Επίπεδο μέτωπο κύματος**

(Πηγή: Κατσικίνη, 2014)



Όταν το φως προσπίπτει στη διεπιφάνεια μεταξύ ενός μέσου με δείκτη διάθλασης  $n_1$  και ενός δεύτερου μέσου με δείκτη διάθλασης  $n_2$ , μπορεί να συμβεί τόσο ανάκλαση όσο και διάθλαση του φωτός. Οι εξισώσεις Fresnel δίνουν τον λόγο του ηλεκτρικού πεδίου του ανακλώμενου κύματος προς το ηλεκτρικό πεδίο του προσπίπτοντος κύματος και τον λόγο του ηλεκτρικού πεδίου του μεταδιδόμενου κύματος προς το ηλεκτρικό πεδίο του προσπίπτοντος κύματος, για καθένα από τα δύο συστατικά της πόλωσης. Οι εξισώσεις υποθέτουν ότι η διεπαφή μεταξύ των μέσων είναι επίπεδη και ότι τα μέσα είναι ομοιογενή και ισότροπα. Το προσπίπτον φως υποτίθεται ότι είναι ένα επίπεδο κύμα, το οποίο είναι αρκετό για να λύσει οποιοδήποτε πρόβλημα, καθώς κάθε προσπίπτον πεδίο φωτός μπορεί να αποσυντεθεί σε επίπεδα κύματα και πολώσεις. Υπάρχουν δύο σύνολα συντελεστών Fresnel για δύο διαφορετικές συνιστώσες γραμμικής πόλωσης του προσπίπτοντος κύματος. Δεδομένου ότι οποιαδήποτε κατάσταση πόλωσης μπορεί να επιλυθεί σε συνδυασμό δύο ορθογώνιων γραμμικών πόλωσης, αυτό είναι αρκετό για οποιοδήποτε πρόβλημα. Ομοίως, το μη πολωμένο (ή "τυχαία πολωμένο") φως έχει ίση ποσότητα ισχύος σε καθεμία από τις δύο γραμμικές πολώσεις (Band, 2010).

Η πόλωση s αναφέρεται στην πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου ενός κύματος κάθετου στο επίπεδο πρόσπτωσης. Η πόλωση p αναφέρεται στην πόλωση του ηλεκτρικού πεδίου στο επίπεδο πρόσπτωσης. Αν και η ανάκλαση και η μετάδοση εξαρτώνται από την πόλωση, σε κανονική συχνότητα ( $\theta = 0$ ) δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ τους, επομένως όλες οι καταστάσεις πόλωσης διέπονται από ένα ενιαίο σύνολο συντελεστών Fresnel (Skaar, 2019).



Εικόνα 19. Μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις Fresnel

(Πηγή: Wikipedia, 2022)

Στην παραπάνω εικόνα, ένα προσπίπτον επίπεδο κύμα προς την κατεύθυνση της ακτίνας IO προσκρούει στη διεπαφή μεταξύ δύο μέσων των δεικτών διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$  στο σημείο O. Ένα μέρος του κύματος διαθλάται (κατεύθυνση OT) και ένα ανακλάται (κατεύθυνση OR). Οι γωνίες των προσπίπτουσων, οι ανακλώμενων και διαθλώμενων ακτίνων ορίζονται ως  $\theta_i$ ,  $\theta_r$  και  $\theta_t$ , αντίστοιχα. Η σχέση μεταξύ αυτών των γωνιών δίνεται από τον νόμο της ανάκλασης ( $\theta_i = \theta_r$ ) καθώς και από τον νόμο του Snell ( $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$ ). Λαμβάνεται η αναλογία των πλατών του ηλεκτρικού πεδίου (ή του μαγνητικού πεδίου) των κυμάτων, αλλά στην πράξη κάποιος ενδιαφέρεται συχνότερα για τύπους που καθορίζουν τους συντελεστές ισχύος, αφού η ισχύς (ή η ακτινοβολία) είναι αυτό που μπορεί να μετρηθεί άμεσα σε οπτικές συχνότητες (Buchwald, 1989).

Ονομάζουμε το κλάσμα της προσπίπτουσας ισχύος που ανακλάται από τη διεπαφή ανακλαστικότητα (ή ανακλαστικότητα, ή συντελεστής ανάκλασης ισχύος) R και το κλάσμα που διαθλάται στο δεύτερο μέσο ονομάζεται μετάδοση (ή μεταδοτικότητα, ή συντελεστής μετάδοσης ισχύος) T (Darrigol, 2012).

Η ανάκλαση για το s-πολωμένο φως είναι:

$$R_s = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_i - Z_1 \cos \theta_t}{Z_2 \cos \theta_i + Z_1 \cos \theta_t} \right|^2, \quad (8)$$

ενώ η ανάκλαση για το p-πολωμένο φως είναι:

$$R_p = \left| \frac{Z_2 \cos \theta_t - Z_1 \cos \theta_i}{Z_2 \cos \theta_t + Z_1 \cos \theta_i} \right|^2, \quad (9)$$

όπου  $Z_1$  και  $Z_2$  είναι οι αντιστάσεις κυμάτων των μέσων 1 και 2, αντίστοιχα (Buchwald, 1989).

Αν υποθεθεί ότι τα μέσα δεν είναι μαγνητικά (δηλαδή  $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ ), τότε οι αντιστάσεις κυμάτων προσδιορίζονται αποκλειστικά από τους δείκτες διάθλασης  $n_1$  και  $n_2$ :  $Z_i = Z_0 / n_i$ , όπου  $Z_0$  είναι η σύνθετη αντίσταση του ελεύθερου χώρου και  $i=1,2$ . Κάνοντας αυτή την αντικατάσταση, λαμβάνουμε εξισώσεις χρησιμοποιώντας τους δείκτες διάθλασης (Hecht, 2002):

$$R_s = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2}} \right|^2, \quad (10)$$

$$R_p = \left| \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right|^2 = \left| \frac{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_i\right)^2} + n_2 \cos \theta_i} \right|^2. \quad (11)$$

Η δεύτερη μορφή κάθε εξίσωσης προέρχεται από την πρώτη εξαλείφοντας το  $\theta_t$  χρησιμοποιώντας το νόμο του Snell και τις τριγωνομετρικές ταυτότητες. Ως συνέπεια της διατήρησης της ενέργειας, μπορεί κανείς να βρει τη μεταδιδόμενη ισχύ (ή πιο σωστά, ακτινοβολία: ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας) απλώς ως το τμήμα της προσπίπτουσας ισχύος που δεν ανακλάται:  $T_s = 1 - R_s$  και  $T_p = 1 - R_p$ . (Darrigol, 2012).

Για την περίπτωση της κανονικής επίπτωσης,  $\theta_i = \theta_t = 0$ , και δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ της πόλωσης s και p. Επομένως, η ανάκλαση είναι (Woan, 2010):

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2. \quad (12)$$

Για κοινό γυαλί ( $n_2 \approx 1,5$ ) που περιβάλλεται από αέρα ( $n_1=1$ ), η ανάκλαση ισχύος σε κανονική πρόσπτωση μπορεί να φανεί ότι είναι περίπου 4% ή 8% που αντιστοιχεί και στις δύο πλευρές ενός υαλοπίνακα (Hecht, 2002).

Σε μια διηλεκτρική διεπαφή από το  $n_1$  έως το  $n_2$ , υπάρχει μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης στην οποία το  $R_p$  πηγαίνει στο μηδέν και ένα πολωμένο προσπίπτον κύμα διαθλάται καθαρά, επομένως όλο το ανακλώμενο φως είναι s-πολωμένο. Αυτή η γωνία είναι γνωστή ως γωνία του Brewster και είναι περίπου  $56^\circ$  για  $n_1=1$  και  $n_2=1,5$  (τυπικό γυαλί) (Hecht, 2002).

Όταν το φως που ταξιδεύει σε ένα πυκνότερο μέσο προσκρούει στην επιφάνεια ενός λιγότερο πυκνού μέσου (δηλαδή,  $n_1 > n_2$ ), πέρα από μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης γνωστή ως κρίσιμη γωνία, όλο το φως ανακλάται και  $R_s = R_p = 1$ . Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως ολική εσωτερική ανάκλαση, εμφανίζεται σε γωνίες

πρόσπτωσης, όπου ο νόμος του Snell αναφέρει ότι το ημίτονο της γωνίας διάθλασης υπερβαίνει τη μονάδα (ενώ στην πραγματικότητα  $\sin\theta \leq 1$  για όλα τα πραγματικά  $\theta$ ). Για γυαλί με  $n=1,5$  που περιβάλλεται από αέρα, η κρίσιμη γωνία είναι περίπου  $42^\circ$  (Levitt, 2013).

Οι παραπάνω εξισώσεις που σχετίζονται με τις δυνάμεις (οι οποίες θα μπορούσαν να μετρηθούν για παράδειγμα με ένα φωτόμετρο) προέρχονται από τις εξισώσεις Fresnel που λύνουν το φυσικό πρόβλημα όσον αφορά τα σύνθετα πλάτη ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, δηλ. λαμβάνοντας υπόψη τις μετατοπίσεις φάσης επιπέδων των πλάτη τους. Αυτές οι υποκείμενες εξισώσεις παρέχουν γενικά σύνθετες αναλογίες αυτών των πεδίων EM και μπορεί να έχουν πολλές διαφορετικές μορφές, ανάλογα με τον φορμαλισμό που χρησιμοποιείται. Οι σύνθετοι συντελεστές πλάτους για ανάκλαση και μετάδοση συνήθως αντιπροσωπεύονται με πεζά  $r$  και  $t$  (ενώ οι συντελεστές ισχύος γράφονται με κεφαλαία). Όπως και πριν, υποθέτουμε ότι η μαγνητική διαπερατότητα,  $\mu$  και των δύο μέσων είναι ίση με τη διαπερατότητα του ελεύθερου χώρου  $\mu_0$ , όπως ισχύει ουσιαστικά για όλα τα διηλεκτρικά στις οπτικές συχνότητες (Darrigol, 2012).

Στις παρακάτω εξισώσεις και γραφήματα, για την πόλωση  $s$ , ο συντελεστής ανάκλασης  $r$  ορίζεται ως ο λόγος του πλάτους του μιγαδικού ηλεκτρικού πεδίου του ανακλώμενου κύματος προς αυτό του προσπίπτοντος κύματος, ενώ για την  $p$  πόλωση  $r$  είναι ο λόγος των πλάτη του μιγαδικού μαγνητικού πεδίου των κυμάτων (ή ισοδύναμα, το αρνητικό του ο λόγος των πλάτη του ηλεκτρικού τους πεδίου). Ο συντελεστής μετάδοσης  $t$  είναι ο λόγος του πλάτους του μιγαδικού ηλεκτρικού πεδίου του εκπεμπόμενου κύματος προς αυτό του προσπίπτοντος κύματος, για κάθε πόλωση. Οι συντελεστές  $r$  και  $t$  είναι γενικά διαφορετικοί μεταξύ των πόλωσης  $s$  και  $p$  και ακόμη και σε κανονική συχνότητα το πρόσημο του  $r$  αντιστρέφεται ανάλογα με το αν το κύμα θεωρείται  $s$  ή  $p$  πολωμένο, ένα τεχνούργημα της εγκεκριμένης σύμβασης σήμανσης. Οι εξισώσεις θεωρούν ένα επίπεδο κύμα που προσπίπτει σε μια διεπαφή επιπέδου υπό γωνία πρόσπτωσης  $\theta_i$ , ένα κύμα που ανακλάται υπό γωνία  $\theta_r = \theta_i$  και ένα κύμα που εκπέμπεται υπό γωνία  $\theta_t$ . Αν γίνει διεπαφή σε απορροφητικό υλικό (όπου το  $n$  είναι σύνθετο) ή υλικό με ολική εσωτερική ανάκλαση, τότε η γωνία μετάδοσης δεν υπολογίζεται σε πραγματικό αριθμό. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, μπορούν να ληφθούν σημαντικά αποτελέσματα χρησιμοποιώντας διατυπώσεις αυτών των σχέσεων στις οποίες αποφεύγονται οι τριγωνομετρικές συναρτήσεις και οι γεωμετρικές γωνίες. Τα ανομοιογενή κύματα που εκτοξεύονται στο δεύτερο μέσο δεν μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας μία μόνο γωνία διάδοσης. Έτσι (Darrigol, 2012):

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (13)$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}, \quad (14)$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}, \quad (15)$$

$$t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}. \quad (16)$$

Από την άλλη πλευρά, ο υπολογισμός του συντελεστή μετάδοσης ισχύος  $T$  είναι λιγότερο απλός, καθώς το φως ταξιδεύει σε διαφορετικές κατευθύνσεις στα δύο μέσα. Επιπλέον, οι αντιστάσεις κυμάτων στα δύο μέσα διαφέρουν. Η ισχύς (ακτινοβολία) δίνεται από το τετράγωνο του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου διαιρούμενο με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση του μέσου (ή με το τετράγωνο του μαγνητικού πεδίου πολλαπλασιασμένο με τη χαρακτηριστική σύνθετη αντίσταση). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα (Band, 2010):

$$T = \frac{n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i} |t|^2 \quad (17)$$

Στην περίπτωση της συνολικής εσωτερικής ανάκλασης όπου η μετάδοση ισχύος  $T$  είναι μηδέν, το  $t$  ωστόσο περιγράφει το ηλεκτρικό πεδίο (συμπεριλαμβανομένης της φάσης του) ακριβώς πέρα από τη διεπαφή. Αυτό είναι ένα παροδικό πεδίο που δεν διαδίδεται ως κύμα (άρα  $T=0$ ) αλλά έχει μη μηδενικές τιμές πολύ κοντά στη διεπαφή. Η μετατόπιση φάσης του ανακλώμενου κύματος στην ολική εσωτερική ανάκλαση μπορεί παρομοίως να ληφθεί από τις γωνίες φάσης των  $r_p$  και  $r_s$  (των οποίων τα μεγέθη είναι μονάδα σε αυτήν την περίπτωση). Αυτές οι μετατοπίσεις φάσης είναι διαφορετικές για τα κύματα  $s$  και  $p$ , η οποία είναι η γνωστή αρχή με την οποία χρησιμοποιείται η ολική εσωτερική ανάκλαση για την πραγματοποίηση μετασχηματισμών πόλωσης (Buchwald, 1989).

Στον παραπάνω τύπο για το  $r_s$ , αν βάλουμε  $n_2 = n_1 \sin \theta_i / \sin \theta_t$  (νόμος Snell) και πολλαπλασιαστεί ο αριθμητής και ο παρονομαστής με  $1 / n_1 \sin \theta_i$ , τότε (Hecht, 2002):

$$r_s = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}. \quad (18)$$

Αν κάνουμε το ίδιο με τον τύπο για  $r_p$ , τότε:

$$r_p = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (19)$$

Αυτοί οι τύποι είναι γνωστοί αντίστοιχα ως νόμος ημιτόνου Fresnel και νόμος εφαπτομένης Fresnel (Hecht, 2002).

Για να υπολογιστούν σημαντικοί συντελεστές Fresnel, πρέπει να υποτεθεί ότι το μέσο είναι (περίπου) γραμμικό και ομοιογενές. Εάν το μέσο είναι επίσης ισότροπο, τα τέσσερα διανύσματα πεδίου  $E, B, D, H$  σχετίζονται με  $D = \epsilon E$  και  $B = \mu H$ , όπου  $\epsilon$  και  $\mu$  είναι η ηλεκτρική διαπερατότητα και η μαγνητική διαπερατότητα του μέσου. Ορίζεται η σχετική διαπερατότητα (ή διηλεκτρική σταθερά) ως  $\epsilon_{rel} = \epsilon / \epsilon_0$  και η σχετική διαπερατότητα ως  $\mu_{rel} = \mu / \mu_0$ . Στην οπτική, συνήθως γνωρίζουμε τον δείκτη διάθλασης  $n$  του μέσου, που είναι ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό ( $c$ ) προς την ταχύτητα του φωτός στο μέσο. Στην ανάλυση της μερικής ανάκλασης και μετάδοσης, κάποιος ενδιαφέρεται επίσης για την ηλεκτρομαγνητική σύνθετη αντίσταση κύματος  $Z$ , που είναι ο λόγος του πλάτους του  $E$  προς το πλάτος του  $H$ . Είναι επομένως επιθυμητό να εκφραστούν τα  $n$  και  $Z$  με όρους  $\epsilon$  και  $\mu$ , και από εκεί να συσχετίσουμε το  $Z$  με το  $n$ . Στην περίπτωση ομοιόμορφων επιπέδων ημιτονοειδών κυμάτων, η σύνθετη αντίσταση ή η είσοδος κύματος είναι γνωστή ως ενδογενής σύνθετη αντίσταση ή είσοδος του μέσου. Αυτή η περίπτωση είναι αυτή για την οποία πρέπει να προκύψουν οι συντελεστές Fresnel (Darrigol, 2012).

Σε ένα ομοιόμορφο επίπεδο ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  έχει τη μορφή (Smith, 2013):

$$\mathbf{E}_k e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)},$$

όπου  $E_k$  είναι το (σταθερό) μιγαδικό διάνυσμα πλάτους,  $i$  είναι η φανταστική μονάδα,  $k$  είναι το διάνυσμα κύματος (του οποίου το μέγεθος  $k$  είναι ο γωνιακός κυματικός αριθμός),  $r$  είναι το διάνυσμα θέσης,  $\omega$  είναι η γωνιακή συχνότητα,  $t$  ο χρόνος (Hecht, 2002).

Για την πόλωση  $s$ , το πεδίο  $E$  είναι παράλληλο στον άξονα  $z$  και μπορεί να περιγραφεί από τη συνιστώσα του στην κατεύθυνση  $z$ . Έστω οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης  $r_s$  και  $t_s$ , αντίστοιχα. Στη συνέχεια, εάν το προσπίπτον πεδίο  $E$  θεωρηθεί ότι έχει μοναδιαίο πλάτος, η μορφή της συνιστώσας  $z$  είναι (Hecht, 2002):

$$E_i = e^{i\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{r}}, \quad (20)$$

και τα ανακλώμενα και μεταδιδόμενα πεδία, στην ίδια μορφή, είναι(Hecht, 2002):

$$\begin{aligned} E_r &= r_s e^{ik_r \cdot r} \\ E_t &= t_s e^{ik_t \cdot r}. \end{aligned} \quad (21-22)$$

Στη διεπαφή, σύμφωνα με τις συνήθεις συνθήκες διεπαφής για τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία, οι εφαπτομενικές συνιστώσες των πεδίων E και H πρέπει να είναι συνεχείς. Έτσι(Darrigol, 2012):

$$\left. \begin{aligned} E_i + E_r &= E_t \\ H_i \cos \theta_i - H_r \cos \theta_i &= H_t \cos \theta_t \end{aligned} \right\} \text{ at } y = 0. \quad (23)$$

Σε κανονική επίπτωση ( $\theta_i = \theta_t = 0$ ), που υποδεικνύεται από έναν επιπλέον δείκτη 0, αυτά τα αποτελέσματα γίνονται(Waldman, 1983):

$$r_{s0} = \frac{Y_1 - Y_2}{Y_1 + Y_2} \quad (24)$$

$$t_{s0} = \frac{2Y_1}{Y_1 + Y_2}. \quad (25)$$

Για την πόλωση p, τα προσπίπτοντα, ανακλώμενα και μεταδιδόμενα πεδία E είναι παράλληλα με τα κόκκινα βέλη και επομένως μπορούν να περιγραφούν από τις συνιστώσες τους προς τις κατευθύνσεις αυτών των βελών. Έστω  $E_i, E_r, E_t$  (επαναπροσδιορισμός των συμβόλων για το νέο πλαίσιο) και οι συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης  $r_p$  και  $t_p$ . Τότε, εάν το προσπίπτον πεδίο E θεωρηθεί ότι έχει πλάτος μονάδας, έχουμε(Buchwald, 1989):

$$\begin{aligned} E_i &= e^{ik_i \cdot r} \\ E_r &= r_p e^{ik_r \cdot r} \\ E_t &= t_p e^{ik_t \cdot r}. \end{aligned} \quad (26-28)$$

Σε κανονική επίπτωση ( $\theta_i = \theta_t = 0$ ), που υποδεικνύεται από έναν επιπλέον δείκτη 0, αυτά τα αποτελέσματα γίνονται(Hecht, 2002):

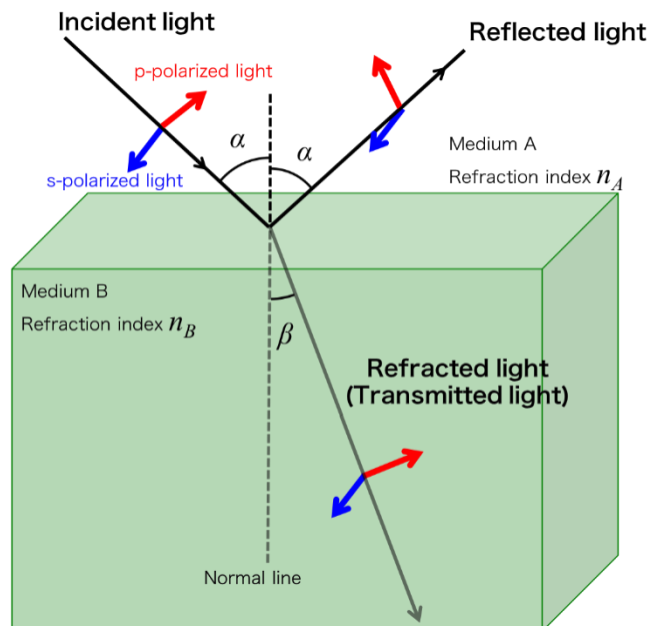
$$r_{p0} = \frac{Y_2 - Y_1}{Y_2 + Y_1} \quad (29)$$

$$t_{p0} = \frac{2Y_1}{Y_2 + Y_1} \quad (30)$$

Ο απλούστερος τρόπος για να ληφθεί ο συντελεστής μετάδοσης ισχύος (μεταδοτικότητα, ο λόγος της μεταδιδόμενης ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ στην κατεύθυνση κανονική προς τη διεπαφή, δηλαδή την κατεύθυνση  $y$ ) είναι η χρήση  $R+T=1$  (διατήρηση ενέργειας). Με αυτόν τον τρόπο ισχύει (Smith, 2013):

$$T_s = 1 - R_s = \frac{4 \operatorname{Re}\{Y_1 Y_2 \cos \theta_i \cos \theta_t\}}{|Y_1 \cos \theta_i + Y_2 \cos \theta_t|^2} \quad (31)$$

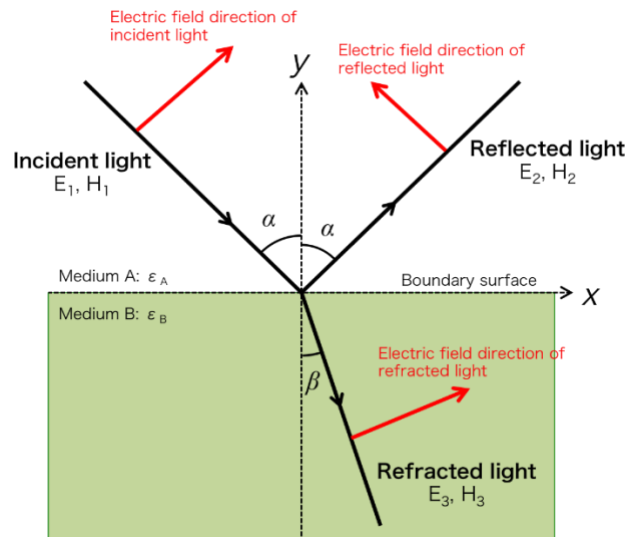
$$T_p = 1 - R_p = \frac{4 \operatorname{Re}\{Y_1 Y_2 \cos \theta_i \cos \theta_t\}}{|Y_2 \cos \theta_i + Y_1 \cos \theta_t|^2} \quad (32)$$



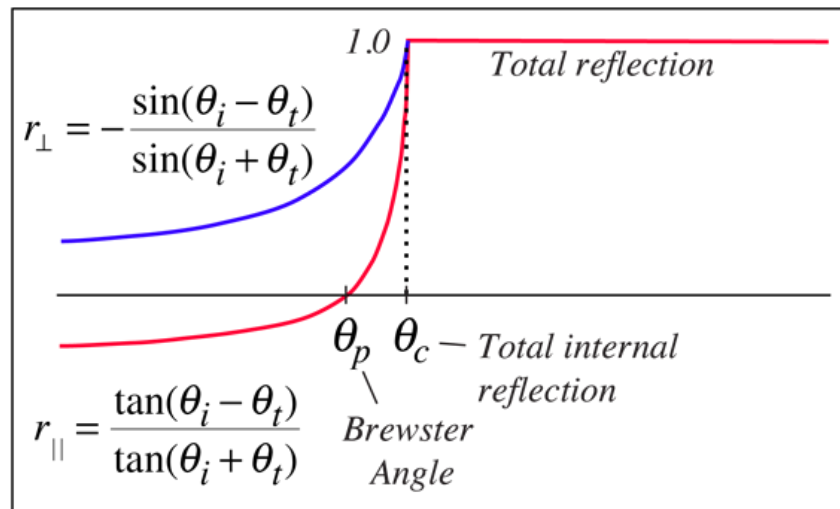
Εικόνα 20. Προσπίπτον, ανακλώμενο και μεταδιδόμενο φως

(Πηγή: Physics Thick, n.d.)





**Εικόνα 21. Η ανάκλαση και η διάθλαση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου**  
(Πηγή: Physics Thick, n.d.)



**Εικόνα 22. Καμπύλες εσωτερικής ανάκλασης**  
(Πηγή: Hyperphysics, n.d.)

### 2.3 Οι φακοί Fresnel

Ο φακός Fresnel είναι ένας φακός σύνθετος και συμπαγής, που δημιουργήθηκε από τον Fresnel και προοριζόταν αρχικά για χρήση σε φάρους. Θεωρήθηκε ως μια «εφεύρεση που έσωσε εκατομμύρια πλοία» (BBC, 2019).

Οι φακοί Fresnel έχουν μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση και δεν απαιτούν τον όγκο και τη μάζα του υλικού που θα χρειάζονταν ένας συμβατικός φακός. Μάλιστα,

ένας φακός Fresnel μπορεί να είναι τόσο λεπτός όσο ένα φύλλο, γεγονός που δεν μπορεί να γίνει με συμβατικούς φακούς. Ο Count Buffon ήταν εκείνος που πρότεινε αρχικά την διοπτρική (διαθλαστική) μορφή του φακού, και ο Augustin Fresnel αργότερα εξέλιξε την ιδέα αυτή. Όμως, ο Fresnel εφηύρε εξ ολοκλήρου την καταδιοπτρική μορφή του φακού, η οποία χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά της διάθλασης και της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μπορεί να κάνει το φως να είναι ορατό από μεγάλες αποστάσεις (Elton, 2009).

Ένας φακός Fresnel δεν χρειάζεται την ποσότητα υλικού που απαιτεί ένας συμβατικός φακός, και αποτελείται από ομόκεντρα δακτυλιοειδή τμήματα. Στην ιδανική περίπτωση, θα μπορούσε να έχει άπειρα τμήματα. Σε κάθε τμήμα, το πάχος είναι μικρότερο συγκριτικά με άλλους συμβατικούς φακούς. Αυτό το γεγονός βοηθά στη διαίρεση της επιφάνειας του φακού σε ένα σύνολο επιφανειών με ίδια καμπυλότητα και σταδιακές ασυνέχειες (Levitt, 2013).

Σε κάποιους φακούς, οι επιφάνειες που είναι καμπύλες αντικαθίσταται με επιφάνειες επίπεδες, και κάθε τμήμα έχει διαφορετική γωνία. Οι φακοί αυτοί μπορεί να θεωρηθούν ως ένα σύνολο διατεταγμένων κυκλικών πρισμάτων με απότομα πρίσματα στις άκρες και ελαφρώς κυρτό ή επίπεδο κέντρο. Οι πρώτοι φακοί Fresnel είχαν ξεχωριστό πρίσμα σε κάθε τμήμα. Αργότερα δημιουργήθηκαν μονοκόμματοι φακοί για χρήση σε φακούς στάθμευσης, προβολείς αυτοκινήτων, φλας κλπ. (Himer et al., 2019).

Ο σχεδιασμός του φακού Fresnel επιτρέπει σημαντική μείωση του πάχους (και συνεπώς της μάζας και του όγκου του υλικού) σε βάρος της μείωσης της ποιότητας απεικόνισης του φακού, γι' αυτό οι εφαρμογές ακριβούς απεικόνισης όπως η φωτογραφία συνήθως εξακολουθούν να χρησιμοποιούν μεγαλύτερους συμβατικούς φακούς (Elton, 2009).

Οι φακοί Fresnel κατασκευάζονται συνήθως από πλαστικό ή γυαλί. Υπάρχουν ποικίλα μεγέθη: από πολύ μεγάλους (π.χ. φάροι) μέχρι μεσαίους (π.χ. βοηθήματα για ανάγνωση βιβλίων) και μικρούς (π.χ. οθόνες κάμερας TLR/SLR). Σε αρκετές περιπτώσεις είναι πολύ λεπτοί και επίπεδοι, σχεδόν εύκαμπτοι, με πάχος που κυμαίνεται από 1 έως 5 mm (Levitt, 2013).

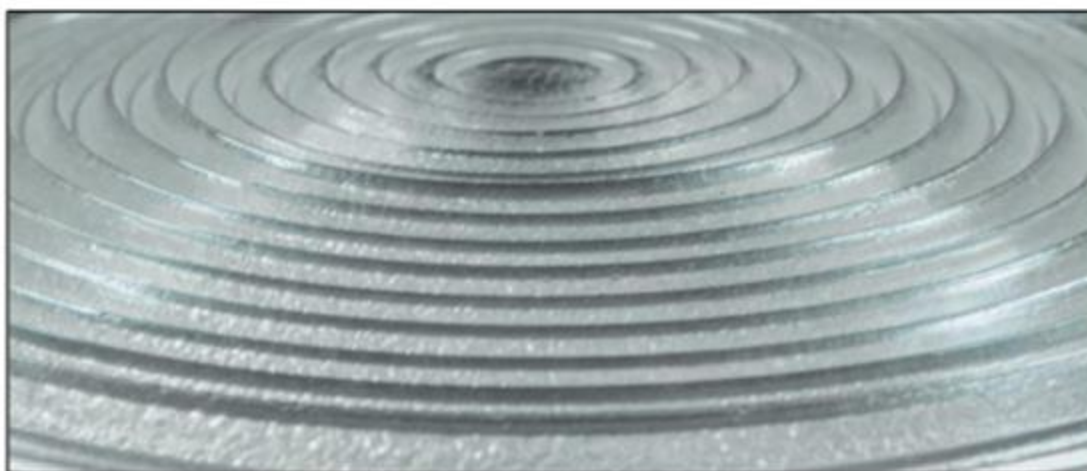
Στις μέρες μας, οι περισσότεροι φακοί Fresnel έχουν μόνο τα χαρακτηριστικά της διάθλασης. Όμως, οι φακοί για φάρους έχουν και διαθλαστικά και ανακλαστικά χαρακτηριστικά. Τα εσωτερικά στοιχεία αποτελούν τμήματα των διαθλαστικών φακών, ενώ τα εξωτερικά είναι ανακλαστικά πρίσματα, και το καθένα έχει μια ολική εσωτερική

ανάκλαση και δυο διαθλάσεις, αποφεύγοντας με τον τρόπο αυτό την απώλεια φωτός που γίνεται λόγω ανάκλασης σε κάποιον ασημένιο καθρέφτη (Levitt, 2013).

Έξι διαφορετικά μεγέθη φακών για φάρους σχεδιάστηκαν από τον Fresnel. Οι φακοί Fresnel χωρίστηκαν με βάση την εστιακή τους απόσταση και το μέγεθος σε 4 τάξεις. Στη σύγχρονη εποχή, υφίστανται 6 τάξεις. Ένας φακός πρώτης τάξης έχει εστιακή απόσταση 920 mm (36+1/4 in) και έχει ύψος περίπου 2,59 m (8 ft 6 in) και πλάτος 1,8 m (6 ft). Αντίθετα, ένας φακός έκτης τάξης έχει ύψος 433 mm και εστιακή απόσταση 150 mm. Οι μεγαλύτεροι σε μέγεθος φακοί Fresnel ονομάζονται υπερακτινικοί ή υπερακτινωτοί φακοί. Τέτοιος είναι και ο φακός που χρησιμοποιήθηκε στη Χαβάη στο Makapu Point Light (Levitt, 2013).

Παράλληλα, υπάρχουν οι απεικονιστικοί και οι μη απεικονιστικοί φακοί Fresnel. Οι πρώτοι έχουν τμήματα με διατομές καμπύλες και δημιουργούν εικόνες με μεγάλη ευκρίνεια. Οι δεύτεροι έχουν τμήματα με καμπύλες επίπεδες και δεν δημιουργούν εικόνες με ευκρίνεια. Με την αύξηση των τμημάτων, αυξάνεται και η ομοιότητα μεταξύ απεικονιστικών και μη απεικονιστικών φακών, ενώ στην περίπτωση που υπάρχουν άπειρα τμήματα, τότε δεν υπάρχει καμία διαφορά μεταξύ επίπεδων και καμπύλων τμημάτων (Buchwald, 1989).

Ο σφαιρικός φακός Fresnel μοιάζει με έναν συμβατικό σφαιρικό φακό, και χρησιμοποιεί τμήματα τα οποία έχουν σχήμα δακτυλίου, και το κάθε τμήμα αποτελεί κομμάτι μιας σφαίρας το οποίο εστιάζει μόνο σε ένα σημείο το φως. Ο σφαιρικός φακός Fresnel δημιουργεί ευκρινείς εικόνες, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό, και αυτό συμβαίνει εξαιτίας της περίθλασης στις κορυφές (Levitt, 2013).

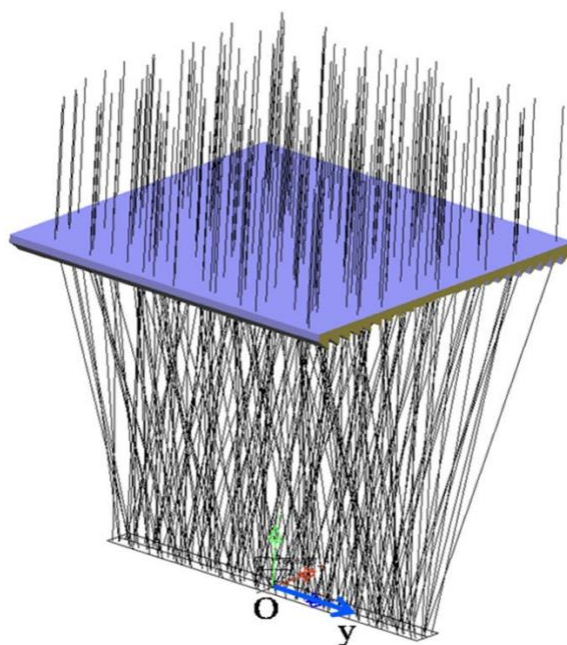


Εικόνα 23. Σφαιρικός απεικονιστικός φακός Fresnel

Επιπρόσθετα, ο κυλινδρικός φακός Fresnel μοιάζει έναν συμβατικό κυλινδρικό φακό, και αποτελείται από τμήματα ευθύγραμμα τα οποία έχουν κυκλική διατομή, και η εστίαση του φωτός γίνεται μόνο σε μια γραμμή. Ο κυλινδρικός φακός Fresnel δημιουργεί ευκρινείς εικόνες, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό, και αυτό συμβαίνει και πάλι εξαιτίας της περίθλασης (Elton, 2009).

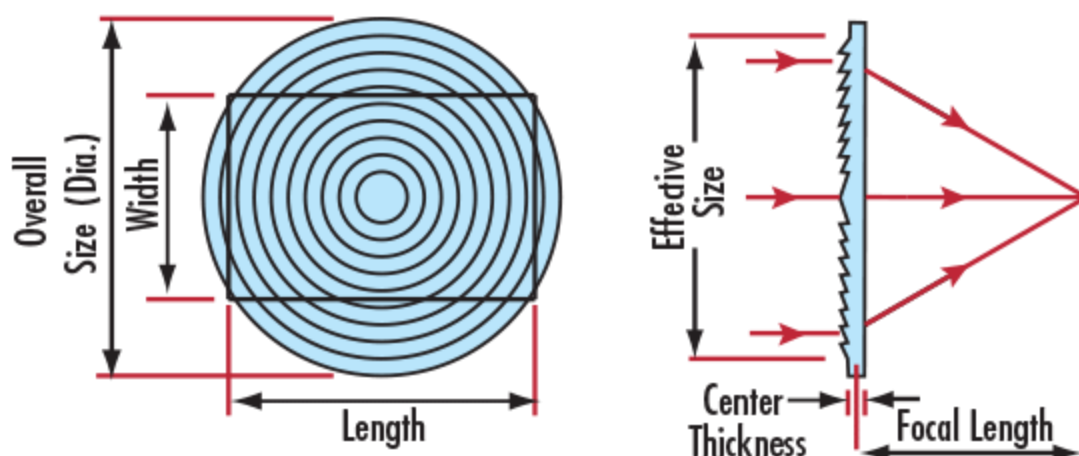
Ο μη απεικονιστικός φακός Fresnel αποτελείται από τμήματα τα οποία έχουν σχήμα δακτυλίου και έχουν ευθείες διατομές. Εστιάζει σε ένα μικρό σημείο το φως, όμως δεν παράγεται ευκρινής εικόνα. Οι μη απεικονιστικοί αυτοί φακοί χρησιμοποιούνται για την ηλιακή ενέργεια, όπως για παράδειγμα για την εστίαση του ηλιακού φωτός σε κάποιο ηλιακό πάνελ. Επίσης, ένας φακός Fresnel μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως συστατικό των οπτικών φωτισμού Köhler, δημιουργώντας μη απεικονιστικούς αποτελεσματικούς ηλιακούς συγκεντρωτές Fresnel-Köhler (Levitt, 2013).

Παράλληλα, ο μη απεικονιστικός γραμμικός φακός Fresnel αποτελείται από ευθύγραμμα τμήματα τα οποία έχουν ευθείες διατομές. Εστιάζει σε ένα μικρό σημείο το φως, όμως δεν παράγεται ευκρινής εικόνα. Ωστόσο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηλιακή ενέργεια, (π.χ. εστίαση ηλιακού φωτός για θέρμανση νερού) (Nábělek, Malý & Jirka, 1991).



#### Εικόνα 24. Ο γραμμικός φακός

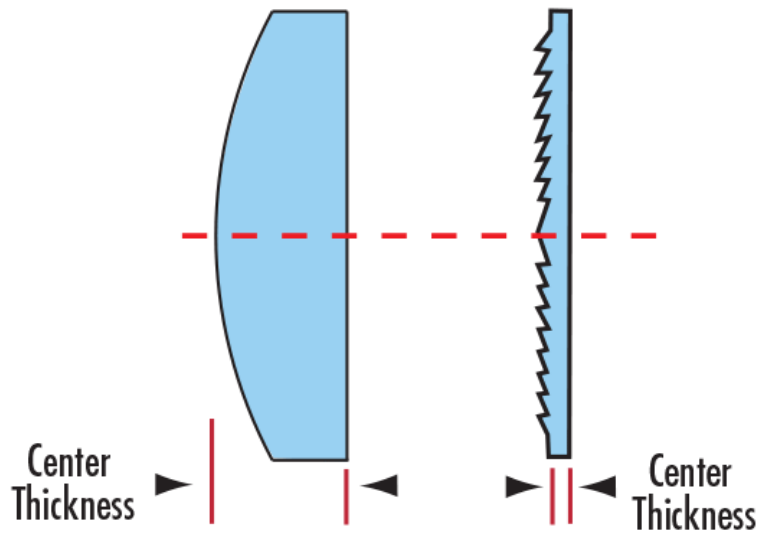
(Πηγή: Pham, Vu & Shin, 2017)



Εικόνα 25. Προφίλ ενός φακού Fresnel

(Πηγή: Edmund Optics, 2022)

Η κινητήρια αρχή πίσω από τη σύλληψη ενός φακού Fresnel είναι ότι η κατεύθυνση διάδοσης του φωτός δεν αλλάζει μέσα σε ένα μέσο (εκτός εάν είναι διασκορπισμένο). Αντίθετα, οι ακτίνες φωτός αποκλίνουν μόνο στις επιφάνειες ενός μέσου. Ως αποτέλεσμα, το μεγαλύτερο μέρος του υλικού στο κέντρο ενός φακού χρησιμεύει μόνο για την αύξηση του βάρους και της απορρόφησης μέσα στο σύστημα. Για να επωφεληθούν από αυτή τη φυσική ιδιότητα, οι φυσικοί του 18ου αιώνα άρχισαν να πειραματίζονται με τη δημιουργία αυτού που είναι γνωστό σήμερα ως φακός Fresnel. Τότε κόπηκαν αυλακώσεις σε κομμάτι γυαλιού για να δημιουργηθούν δακτυλιοειδείς δακτύλιοι καμπύλου προφίλ. Αυτό το καμπύλο προφίλ, όταν εξωθήθηκε, σχημάτισε έναν συμβατικό, κυρτό φακό – είτε σφαιρικό είτε ασφαιρικό. Λόγω αυτής της παρόμοιας οπτικής ιδιότητας σε σύγκριση με έναν συμβατικό οπτικό φακό, ένας φακός Fresnel μπορεί να προσφέρει ελαφρώς καλύτερη απόδοση εστίασης, ανάλογα με την εφαρμογή. Επιπλέον, η υψηλή πυκνότητα αυλακώσεων επιτρέπει εικόνες υψηλότερης ποιότητας, ενώ η χαμηλή πυκνότητα αυλακώσεων αποδίδει καλύτερη απόδοση (όπως απαιτείται σε εφαρμογές συλλογής φωτός). Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όταν απαιτείται απεικόνιση υψηλής ακρίβειας, οι συμβατικοί απλοί, διπλοί ή ασφαιρικοί οπτικοί φακοί εξακολουθούν να είναι οι καλύτεροι (Elton, 2009).



**Εικόνα 26. Σύγκριση πλευρικού προφίλ ενός Plano-Convex (PCX) και ενός φακού Fresnel**

(Πηγή: Edmund Optics, 2022)

Οι πρώτοι φακοί Fresnel κατασκευάστηκαν με λείανση και στίλβωση γυαλιού με το χέρι. Τελικά, το λιωμένο γυαλί χύθηκε σε καλούπια, αλλά μόνο με την ανάπτυξη πλαστικών οπτικής ποιότητας και τεχνολογίας χύτευσης με έγχυση τον 20ο αιώνα έγινε πρακτική η χρήση φακών Fresnel σε πολλές βιομηχανικές και εμπορικές εφαρμογές (Levitt, 2013).

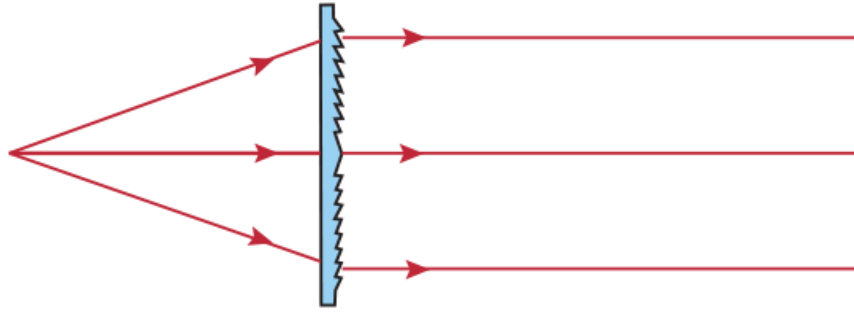


**Εικόνα 27. Ο πρώτος φακός Fresnel**

(Πηγή: Ζακή & Δημοπούλου, 2022)

Οι φακοί Fresnel μπορούν να κατασκευαστούν από μια ποικιλία υποστρωμάτων. Κατασκευάζονται από ακρυλικό έως πολυανθρακικό έως βινύλιο, ανάλογα με το επιθυμητό μήκος κύματος λειτουργίας. Το ακρυλικό είναι το πιο κοινό υπόστρωμα λόγω της υψηλής διαπερατότητάς του στις ορατές και υπεριώδεις περιοχές, αλλά το πολυανθρακικό είναι το υπόστρωμα επιλογής σε σκληρά περιβάλλοντα λόγω της αντοχής του στην κρούση και στην υψηλή θερμοκρασία (Elton, 2009).

Ένας φακός Fresnel μπορεί εύκολα να συγκεντρώσει μια σημειακή πηγή τοποθετώντας την μια εστιακή απόσταση μακριά από την πηγή. Σε ένα σύστημα πεπερασμένου συζυγούς, η αυλακωτή πλευρά του φακού Fresnel θα πρέπει να βλέπει προς το μακρύτερο συζυγές επειδή αυτό παράγει την καλύτερη απόδοση (Nábělek, Malý & Jirka, 1991).



**Εικόνα 28. Συγκέντρωση φωτός μιας σημειακής πηγής με φακό Fresnel**

(Πηγή: Edmund Optics, 2022)

Μία από τις πιο κοινές εφαρμογές ενός φακού Fresnel είναι η συλλογή ηλιακού φωτός, το οποίο θεωρείται πολύ σχεδόν παράλληλο (ένα άπειρο συζευγμένο σύστημα). Η χρήση φακού Fresnel για συλλογή φωτός είναι ιδανική για τη συγκέντρωση του φωτός σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ή για τη θέρμανση μιας επιφάνειας. Για παράδειγμα, ένας φακός Fresnel μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δημοφιλείς εργασίες συντήρησης σπιτιού, όπως θέρμανση σπιτιού ή πισίνας. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η συνολική επιφάνεια του φακού καθορίζει την ποσότητα του συλλεγόμενου φωτός (Bachhav & Sonawwanay, 2022).

Μια άλλη κοινή εφαρμογή για φακούς Fresnel είναι η μεγέθυνση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μεγεθυντικός φακός ή φακός προβολής. Ωστόσο, λόγω του υψηλού επιπέδου παραμόρφωσης, αυτό δεν συνιστάται. Επίσης, η ποιότητα της εικόνας δεν συγκρίνεται με εκείνη ενός συστήματος υψηλότερης ακρίβειας δεδομένου του μεγέθους της παραμόρφωσης (Edmund Optics, 2022).

Αν και βρίσκονται συνήθως σε ηλιακές εφαρμογές, οι φακοί Fresnel είναι ιδανικοί για οποιαδήποτε εφαρμογή που απαιτεί φθηνά, λεπτά, ελαφριά θετικά στοιχεία φακού. Οι φακοί Fresnel δεν είναι νέας τεχνολογίας, αλλά η διεισδυτικότητά τους έχει αυξηθεί με τις βελτιώσεις στις τεχνικές και τα υλικά κατασκευής. Οι φακοί Fresnel είναι πραγματικά μοναδικοί οπτικοί φακοί που τους καθιστούν εξαιρετικό εργαλείο για μια σειρά από ενδιαφέροντα οπτικά σχέδια (Elton, 2009).

Ταυτόχρονα, οι φακοί Fresnel μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν απλοί μεγεθυντικοί φακοί χειρός. Ακόμη, χρησιμοποιούνται σε αρκετές διαταραχές των οφθαλμών, όπως για παράδειγμα ο στραβισμός. Επίσης, οι φακοί Fresnel μπορούν να αυξήσουν το οπτικό μέγεθος των οθονών CRT σε μικρές τηλεοράσεις (π.χ. Sinclair TV80). Χρησιμοποιούνται



επίσης σε φανάρια. Μια εφαρμογή για αυτοκίνητα ενός φακού Fresnel είναι ένας ενισχυτής οπισθοπορείας. Οι πολυεστιακοί φακοί Fresnel χρησιμοποιούνται επίσης ως μέρος των καμερών αναγνώρισης αμφιβληστροειδούς. Επιπρόσθετα, η Nikon και η Canon έχουν χρησιμοποιήσει φακούς Fresnel για τη μείωση του μεγέθους των τηλεφακών. Ακόμη, οι κάμερες προβολής σε συνδυασμό με το γυαλί, μπορούν να αυξήσουν την αντιληπτή φωτεινότητα μιας εικόνας, βοηθώντας επομένως στη ρύθμιση της σύνθεσης και της εστίασης. Γυάλινοι φακοί Fresnel υψηλής ποιότητας έχουν χρησιμοποιηθεί σε φάρους, από τα τέλη του 19<sup>ου</sup> αιώνα μέχρι τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Οι περισσότεροι φάροι έχουν πλέον αποσύρει τους γυάλινους φακούς Fresnel και τους έχουν αντικαταστήσει με πολύ λιγότερο ακριβούς και πιο ανθεκτικούς, οι οποίοι συχνά περιέχουν πλαστικούς φακούς Fresnel. Επιπλέον, οι φακοί Fresnel χρησιμοποιούνταν για πολύ μεγάλο διάστημα στους προβολείς των αυτοκινήτων. Όμως, στις μέρες μας αυτό δεν συμβαίνει εξαιτίας του βάρους, του κόστους και της αντοχής στην κρούση. Έτσι χρησιμοποιούνται φακοί από πολυανθρακικό με πολυεπίπεδους ανακλαστήρες. Ακόμη, οι γυάλινοι φακοί Fresnel χρησιμοποιούνται επίσης σε όργανα φωτισμού για θέατρο και κινηματογραφικές ταινίες. Τέλος, τα αεροπλανοφόρα και οι ναυτικοί αεροσταθμοί χρησιμοποιούν συνήθως φακούς Fresnel στα οπτικά συστήματα προσγείωσης τους (Levitt, 2013).

## Κεφάλαιο 3 - Η συμβολή του έργου του Fresnel

### 3.1 Συνεισφορά στην ιστορία της οπτικής

Ο Augustin-Jean Fresnel ήταν Γάλλος πολιτικός μηχανικός και φυσικός του οποίου η έρευνα στην οπτική οδήγησε στη σχεδόν ομόφωνη αποδοχή της κυματικής θεωρίας του φωτός, αποκλείοντας οποιοδήποτε υπόλοιπο της σωματιδιακής θεωρίας του Νεύτωνα, από τα τέλη της δεκαετίας του 1830 έως τα τέλη του 19ου αιώνα. Είναι ίσως περισσότερο γνωστός για την επινόηση του καταδιοπτρικού (ανακλαστικού/διαθλαστικού) φακού Fresnel και για την πρωτοπορία στη χρήση φακών για την επέκταση της ορατότητας των φάρων, σώζοντας αμέτρητες ζωές στη θάλασσα. Ο απλούστερος διοπτρικός (καθαρά διαθλαστικός) βαθμιδωτός φακός, που προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Count Buffon και “ανανεώθηκε” από τον Fresnel, χρησιμοποιείται σε μεγεθυντικούς φακούς οθόνης και σε φακούς συμπυκνωτή για προβολείς οροφής (Great Light Titanic Quarter, 2018; Darrigol, 2012).

Βασιζόμενος στην αρχή της παρεμβολής του Young και στην αρχή των δευτερευόντων κυμάτων του Huygens, και στην ιδέα ότι τα απλά χρώματα έχουν κύματα ημιτονοειδή, ο Fresnel ήταν ο πρώτος που εξήγησε ικανοποιητικά την περίθλαση σε ευθείες γραμμές. Εξήγησε την άποψή του βασιζόμενος στην αναλογία μεταξύ ημιτονοειδών συναρτήσεων που έχουν ίδια συχνότητα αλλά διαφορετικές φάσεις και δυνάμεων με κατευθύνσεις διαφορετικές. Θεωρώντας τα κύματα εγκάρσια, ο Fresnel εξήγησε επίσης τη φύση της πόλωσης, την χρωματική πόλωση και τους συντελεστές ανάκλασης και μετάδοσης στη διεπαφή μεταξύ δύο ισοτροπικών διαφανών μέσων. Στη συνέχεια, γενικεύοντας τη σχέση κατεύθυνσης-ταχύτητας-πόλωσης για τον ασβεστίτη, υπολόγισε τις κατευθύνσεις και τις πολώσεις των διαθλασμένων ακτίνων σε διπλά διαθλαστικούς κρυστάλλους της διαξονικής κατηγορίας (αυτοί για τους οποίους τα δευτερεύοντα μέτωπα κύματος του Huygens δεν είναι αξονικά συμμετρικά). Η περίοδος μεταξύ της πρώτης δημοσίευσης της υπόθεσης του για καθαρά εγκάρσια κύμα και της υποβολής της πρώτης σωστής λύσης στο διαξονικό πρόβλημα, ήταν λιγότερο από ένα έτος. Τα επόμενα χρόνια δημιούργησε τους όρους «κυκλική πόλωση», «γραμμική πόλωση» και «ελλειπτική πόλωση», και ανέφερε ότι η οπτική περιστροφή μπορούσε να εξηγηθεί σαν διαφορά μεταξύ των ταχυτήτων διάδοσης των δυο κατευθύνσεων της κυκλικής πόλωσης (Authier, 2013).

Η σημαντικότερη συνεισφορά του Augustin Fresnel στην ιστορία της οπτικής είναι οι φακοί Fresnel. Ο φακός Fresnel είναι ένας φακός σύνθετος και συμπαγής, που δημιουργήθηκε από τον Fresnel και προοριζόταν αρχικά για χρήση σε φάρους. Θεωρήθηκε ως μια «εφεύρεση που έσωσε εκατομμύρια πλοία». Οι φακοί Fresnel έχουν μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση και δεν απαιτούν τον όγκο και τη μάζα του υλικού που θα χρειαζόνταν ένας συμβατικός φακός. Μάλιστα, ένας φακός Fresnel μπορεί να είναι τόσο λεπτός όσο ένα φύλλο, γεγονός που δεν μπορεί να γίνει με συμβατικούς φακούς. Ο Count Buffon ήταν εκείνος που πρότεινε αρχικά την διοπτρική (διαθλαστική) μορφή του φακού, και ο Augustin Fresnel αργότερα εξέλιξε την ιδέα αυτή. Όμως, ο Fresnel εφήυρε εξ ολοκλήρου την καταδιοπτρική μορφή του φακού, η οποία χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά της διάθλασης και της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μπορεί να κάνει το φως να είναι ορατό από μεγάλες αποστάσεις (Elton, 2009). Ένας φακός Fresnel δεν χρειάζεται την ποσότητα υλικού που απαιτεί ένας συμβατικός φακός, και αποτελείται από ομόκεντρα δακτυλιοειδή τμήματα. Στην ιδανική περίπτωση, θα μπορούσε να έχει άπειρα τμήματα. Σε κάθε τμήμα, το πάχος είναι μικρότερο συγκριτικά με άλλους συμβατικούς φακούς. Αυτό το γεγονός βοηθά στη διαίρεση της επιφάνειας του φακού σε ένα σύνολο επιφανειών με ίδια καμπυλότητα και σταδιακές ασυνέχειες (Levitt, 2013). Σε κάποιους φακούς, οι επιφάνειες που είναι καμπύλες αντικαθίσταται με επιφάνειες επίπεδες, και κάθε τμήμα έχει διαφορετική γωνία. Οι φακοί αυτοί μπορεί να θεωρηθούν ως ένα σύνολο διατεταγμένων κυκλικών πρισμάτων με απότομα πρίσματα στις άκρες και ελαφρώς κυρτό ή επίπεδο κέντρο. Οι πρώτοι φακοί Fresnel είχαν ξεχωριστό πρίσμα σε κάθε τμήμα. Αργότερα δημιουργήθηκαν μονοκόμματοι φακοί για χρήση σε φακούς στάθμευσης, προβολείς αυτοκινήτων, φλας κλπ. (Himer et al., 2019).

### **3.2 Πρακτικές εφαρμογές των φακών Fresnel στους φάρους**

Οι φακοί Fresnel χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε φάρους και προβολείς για τη συγκέντρωση του φωτός σε μια σχετικά στενή δέσμη. Θα ήταν σχεδόν αδύνατο να κατασκευαστεί ένας μεγάλος φακός φάρου του συνηθισμένου τύπου συμπαγούς γυάλινου δίσκου επειδή το πάχος και το βάρος θα ήταν απαγορευτικά. Ο ελαφρύτερος φακός Fresnel είναι κατασκευασμένος από στοιχεία που αλέθονται χωριστά και γυαλίζονται από κατάλληλα γυάλινα τεμάχια και συναρμολογούνται για να συνθέσουν τον πλήρη φακό. Ένας μονοκόμματος φακός Fresnel από χυτό γυαλί είναι κατάλληλος για προβολείς, σήματα σιδηροδρόμων και τροχαίας και διακοσμητικά φώτα σε κτίρια. Οι κυλινδρικοί φακοί Fresnel

χρησιμοποιούνται στα φανάρια του πλοίου για την αύξηση της ορατότητας. Ο Georges-Louis Leclerc de Buffon το 1748 ξεκίνησε την ιδέα της διαίρεσης μιας επιφάνειας φακού σε ομόκεντρους δακτυλίους προκειμένου να μειωθεί σημαντικά το βάρος. Το 1821 αυτή η ιδέα υιοθετήθηκε από τον Augustin-Jean Fresnel στην κατασκευή φακών φάρων (Levitt, 2013).

Ένας φάρος χρησιμοποιεί παρόμοια επιστήμη με ένα τηλεσκόπιο, αλλά λειτουργεί ακριβώς με τον αντίθετο τρόπο - με τη βοήθεια ενός φακού Fresnel. Οι γυάλινοι φακοί σε ένα τηλεσκόπιο διαθλούν τις ακτίνες φωτός από μακρινά αντικείμενα και έτσι φαίνονται να είναι πολύ πιο κοντά. Αλλά σε έναν φάρο, ο φακός Fresnel που είναι τυλιγμένος γύρω από τη λάμπα συγκεντρώνει τις ακτίνες φωτός σε μια ισχυρή και παράλληλη δέσμη, ώστε οι άνθρωποι να μπορούν να τη δουν, με γυμνό μάτι, έως και 30 χιλιόμετρα μακριά ή περισσότερο (Woodford, 2008).

Ο φακός Fresnel, μερικές φορές κοντά στα 15 πόδια, είναι κατασκευασμένος από ομόκεντρους δακτυλίους γυάλινων πρισμάτων τόσο πάνω όσο και κάτω. Διαθλούν το φως στη στενή δέσμη που φωτίζει τις πλωτές οδούς και είναι αρκετά ισχυρά για να “κόψουν” την πιο βαριά ομίχλη. Ο σχεδιασμός της κυψέλης βοηθά στη σύλληψη και την αντανάκλαση του φωτός και την εστίαση των ακτίνων έξω στο νερό. Οι φακοί Fresnel είναι πιο διαδεδομένοι στην Ευρώπη καθώς οι φαροφύλακες αποδέχονταν εύκολα τη νέα «τεχνολογία». Μόλις στα τέλη του 1800 οι φάροι στις Ηνωμένες Πολιτείες μετατράπηκαν επειδή πολλοί από τους φαροφύλακες των ΗΠΑ πίστευαν ότι ο φακός ήταν μόδα (Universe Optics, 2022).

Οι φακοί Fresnel για φάρους διατίθενται σε 6 κύρια μεγέθη με τους φακούς πρώτης τάξης να χρησιμοποιούνται μόνο σε ωκεάνιους φάρους. Μόνο μερικοί φακοί 2ης τάξης χρησιμοποιήθηκαν στις Μεγάλες Λίμνες, και οι φακοί 4<sup>ης</sup> τάξης είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι (Kewaunee Pierhead Lighthouse, 2022).



**Εικόνα 29. Ο φακός Fresnel στο φάρο Anvil Point κοντά στο Swanage στο Dorset της Αγγλίας, ο οποίος αρχικά κατασκευάστηκε το 1881 και αυτοματοποιήθηκε πλήρως πάνω από έναν αιώνα αργότερα το 1991**

(Πηγή: Woodford, 2008)



**Εικόνα 30. Κοντινό πλάνο του φακού Fresnel στον φάρο Anvil Point**

(Πηγή: Woodford, 2008)



**Εικόνα 31. Ένας μεγάλος (ύψος 6 πόδια) φακός Fresnel για χρήση σε φάρο**

(Πηγή: Global Spec, 2022)



**Εικόνα 32. Μεγέθη φακών Fresnel**

(Πηγή: Kewaunee Pierhead Lighthouse, 2022)



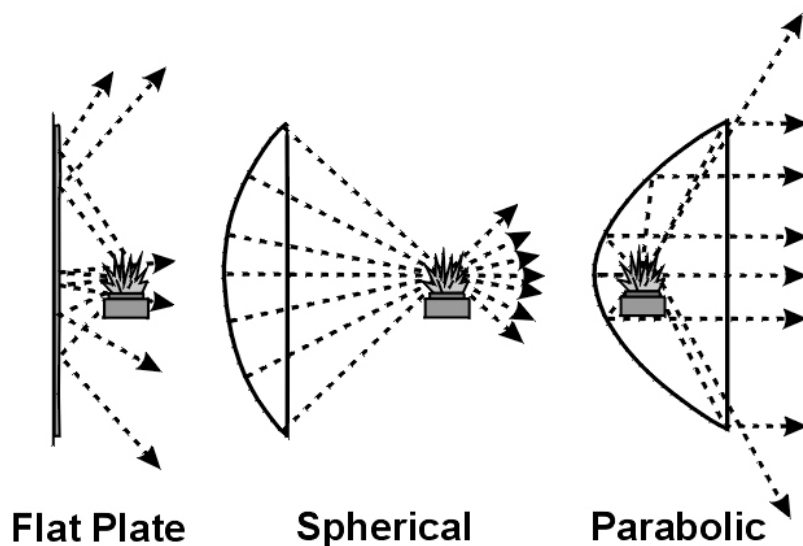
**Εικόνα 33. Ο φακός Fresnel 5<sup>ης</sup> τάξης**  
(Πηγή: Kewaunee Pierhead Lighthouse, 2022)

### **3.3 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των φάρων**

Σε έναν φάρο, η πηγή φωτός ονομάζεται «λάμπα» (είτε είναι ηλεκτρικό είτε τροφοδοτείται από πετρέλαιο) και το φως συγκεντρώνεται, εάν χρειάζεται, από τον «φακό». Κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup>-21<sup>ου</sup> αιώνα, οι φάροι είχαν διάφορες πηγές ενέργειας: ανοιχτές φωτιές και κεριά, λαμπτήρες με φυτίλι Argand και παραβολικό ανακλαστήρα, μέχρι και λάδι φαλαινών χρησιμοποιούνταν με φυτίλια (Crompton & Rhein, 2002).

Με την εμφάνιση του καυστήρα Argand, ενός αξιόπιστου και σταθερού φωτιστικού, κατέστη δυνατή η ανάπτυξη αποτελεσματικών οπτικών συσκευών για την αύξηση της έντασης του φωτός. Στον πρώτο εξοπλισμό αυτού του τύπου, γνωστό ως κατοπτρικό

σύστημα, οι παραβολοειδείς ανακλαστήρες συγκέντρωναν το φως σε μια δέσμη. Το 1777 ο William Hutchinson από το Λίβερπουλ της Αγγλίας, κατασκεύασε τους πρώτους πρακτικούς καθρέφτες για φάρους, αποτελούμενους από μεγάλο αριθμό μικρών όψεων από ασημένιο γυαλί σε γύψο διαμορφωμένο σε παραβολοειδή μορφή. Γενικότερα, χρησιμοποιήθηκαν διαμορφωμένοι μεταλλικοί ανακλαστήρες, επαργυρωμένοι ή πολύ γυαλισμένοι. Αυτά ήταν, ωστόσο, επιρρεπή σε ταχεία φθορά από τη θερμότητα και τη διάβρωση. Οι καλύτεροι μεταλλικοί ανακλαστήρες που ήταν διαθέσιμοι το 1820 κατασκευάζονταν από βαριά ασημένιο χαλκό σε αναλογία 6 ουγγιών (170 γραμμάρια) ασημιού προς 16 ουγγιές (454 γραμμάρια) χαλκού (σε σύγκριση με τα 14 γραμμάρια ασημιού προς 16 ουγγιές χαλκού που χρησιμοποιείται συνήθως για επιμεταλλωμένα επιτραπέζια σκεύη της εποχής). Αν και ο καθρέφτης μπορούσε να συγκεντρώνει αποτελεσματικά το φως σε μια έντονη δέσμη, ήταν απαραίτητο να περιστραφεί για να γίνει ορατός από οποιαδήποτε κατεύθυνση. Αυτό παρήγαγε τη γνωστή πλέον δέσμη του περιστρεφόμενου φάρου, με το φως να εμφανίζεται ως μια σειρά από λάμπσεις. Οι ναυτικοί δεν ήταν ευνοϊκά διατεθειμένοι σε αυτά τα πρώιμα φώτα που αναβοσβήνουν, υποστηρίζοντας ότι ένα σταθερό σταθερό φως ήταν απαραίτητο για μια ικανοποιητική ρουλεμάν. Ωστόσο, η πολύ αυξημένη ένταση και το πλεονέκτημα της χρήσης ενός σχεδίου φλας για την αναγνώριση του φωτός ξεπέρασαν σταδιακά τις αντιρρήσεις τους. Ο πρώτος φάρος με περιστρεφόμενη δέσμη ήταν στο Carlsten, κοντά στο Marstrand, στη Σουηδία, το 1781 (Clingan, 2020).



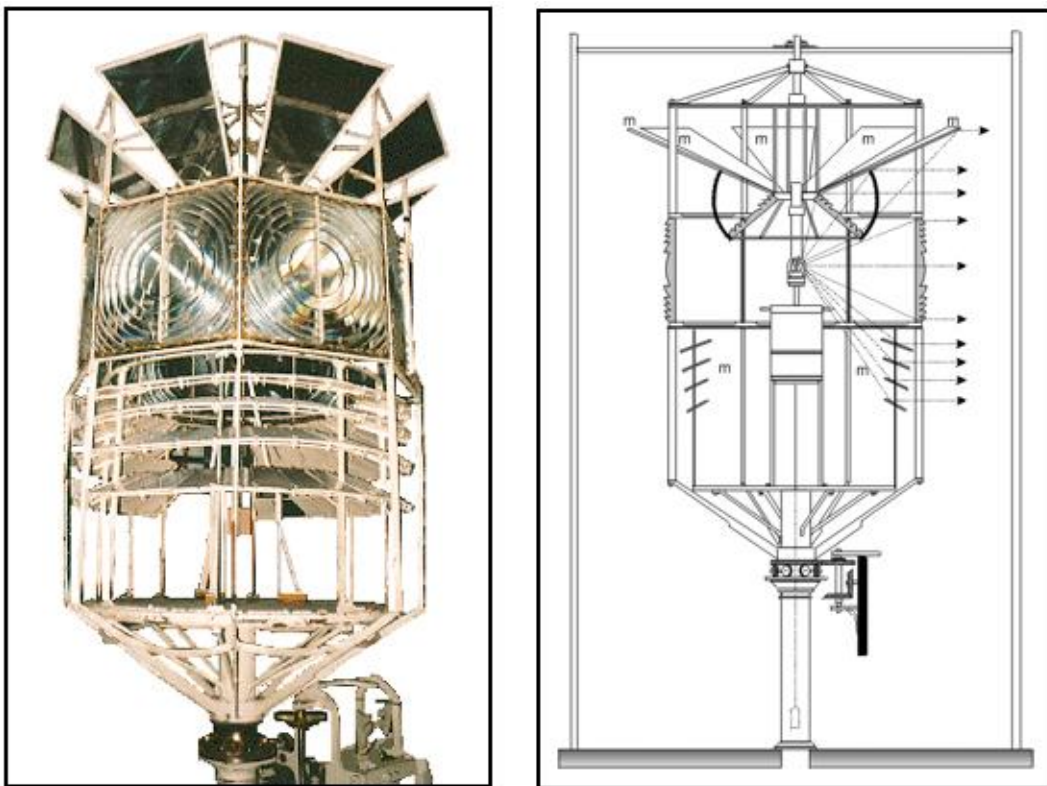
Εικόνα 34. Βασικοί τύποι ανακλαστήρων

(Πηγή: United States Lighthouse Society, 2022)



Η κηροζίνη έγινε δημοφιλής στη δεκαετία του 1870 και ο ηλεκτρισμός και το καρβίδιο (αέριο ακετυλένιο) άρχισαν να αντικαθιστούν την κηροζίνη γύρω στα τέλη του 20ου αιώνα. Στον Ψυχρό Πόλεμο, αρκετοί φάροι της Σοβιετικής Ένωσης τροφοδοτούνταν μέσω θερμοηλεκτρικών γεννητριών ραδιοϊσοτόπων (RTG). Οι γεννήτριες αυτές παρείχαν ρεύμα όλο το 24ωρο και δεν απαιτούνταν συντήρηση ή ανεφοδιασμός (Rawlings, 2021).

Σε πολλές περιπτώσεις, οι φάροι με φακούς Fresnel έχουν μετατραπεί σε περιστρεφόμενους αεροφάρους, απαιτώντας έτσι μικρότερη συντήρηση. Στην περίπτωση των σύγχρονων αυτοματοποιημένων φάρων, οι περιστρεφόμενοι φακοί συχνά αντικαταστάθηκαν από φώτα με μεγάλη ένταση τα οποία εκπέμπουν λάμπες προς όλες τις κατευθύνσεις. Παρόμοια φώτα χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση προειδοποιήσεων των αεροσκαφών για υψηλές κατασκευές. Η μεταγενέστερη καινοτομία ήταν τα λεγόμενα "Vega Lights" και οι δίοδοι εκπομπής φωτός (LED) (Stevenson, 2010).



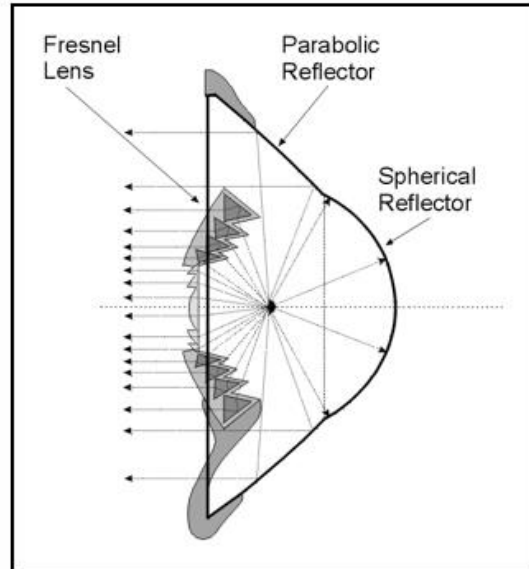
**Fresnel's first First-Order Lens. (1823) m - in the drawing indicates a mirror.**

### Εικόνα 35. Ανακλαστήρας του Fresnel

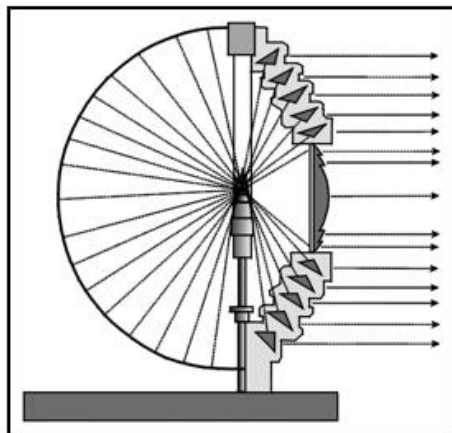
(Πηγή: United States Lighthouse Society, 2022)



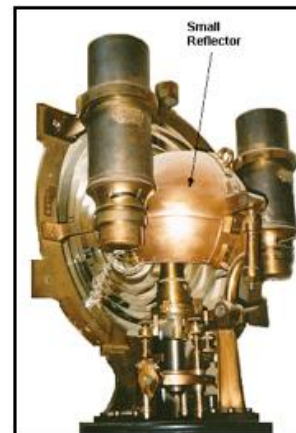
**Thomas Stevenson's Holophotal Reflector.**



**Side view of Holophotal Reflector Showing the Spherical and Parabolic Portions of the 25-inch Reflector and the Fresnel Lens.**



**A Holophotal Reflector consisting of a Spherical Reflector and a Fresnel Bull's-eye Lens.**



**A Holophotal Reflector Lens Combination with a Small Reflector.**

**Εικόνα 36. Οι ολοφωτικοί ανακλαστήρες του Thomas Stevenson**

(Πηγή: United States Lighthouse Society, 2022)

Τα φώτα LED, τα οποία καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και είναι ευκολότερα στη συντήρηση, είχαν τεθεί σε ευρεία χρήση μέχρι το 2020. Στην Ιρλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο, σχεδόν το 1/3 των φάρων χρησιμοποιούν LED. Η πηγή φωτός σχεδιάστηκε για να παράγει τον χαρακτήρα και το χρώμα του παραδοσιακού φωτός όσο πιο πιστά γίνεται. Ωστόσο, η αλλαγή αυτή δεν είναι ιδιαίτερα αντιληπτή στους ανθρώπους. Αναπτύχθηκε από το Trinity House ένα τυπικό σύστημα με LED το οποίο μοιάζει με το περίβλημα των φακών

Fresnel. Το σύστημα κοστίζει σχεδόν 20.000 ευρώ, και η διάρκεια ζωής είναι 50.000-100.000 ώρες (Rawlings, 2021).



**Εικόνα 37. Φάρος με φώτα LED στο St John Point στην Ιρλανδία**

(Πηγή: Rory, 2020)

Παραματικές εγκαταστάσεις φωτών λέιζερ, είτε σε υψηλή ισχύ για να παρέχουν μια «γραμμή φωτός» στον ουρανό είτε, χρησιμοποιώντας χαμηλή ισχύ, που στοχεύουν στους ναυτικούς έχουν εντοπίσει προβλήματα αυξημένης πολυπλοκότητας στην εγκατάσταση και συντήρηση, καθώς και υψηλές απαιτήσεις ισχύος. Η πρώτη πρακτική εγκατάσταση, το 1971 στον φάρο Point Danger, στο Κουίνσλαντ, αντικαταστάθηκε από ένα συμβατικό φως μετά από τέσσερα χρόνια, επειδή η δέσμη ήταν πολύ στενή για να φαίνεται εύκολα (Crompton & Rhein, 2002).

Πριν τη χρήση των σύγχρονων στροβοσκοπικών φωτών, χρησιμοποιούνταν φακοί για τη συγκέντρωση του φωτός από μια συνεχή πηγή. Οι κάθετες ακτίνες φωτός του λαμπτήρα ανακατευθύνονται σε ένα οριζόντιο επίπεδο και οριζόντια το φως εστιάζεται σε μία ή μερικές κατευθύνσεις κάθε φορά, με τη δέσμη φωτός να σαρώνεται γύρω. Ως αποτέλεσμα, εκτός από το να βλέπει κανείς την πλευρά της δέσμης φωτός, το φως είναι άμεσα ορατό

από αρκετά μεγάλες αποστάσεις έχοντας ένα χαρακτηριστικό αναγνωριστικό φως (Stevenson, 2010).

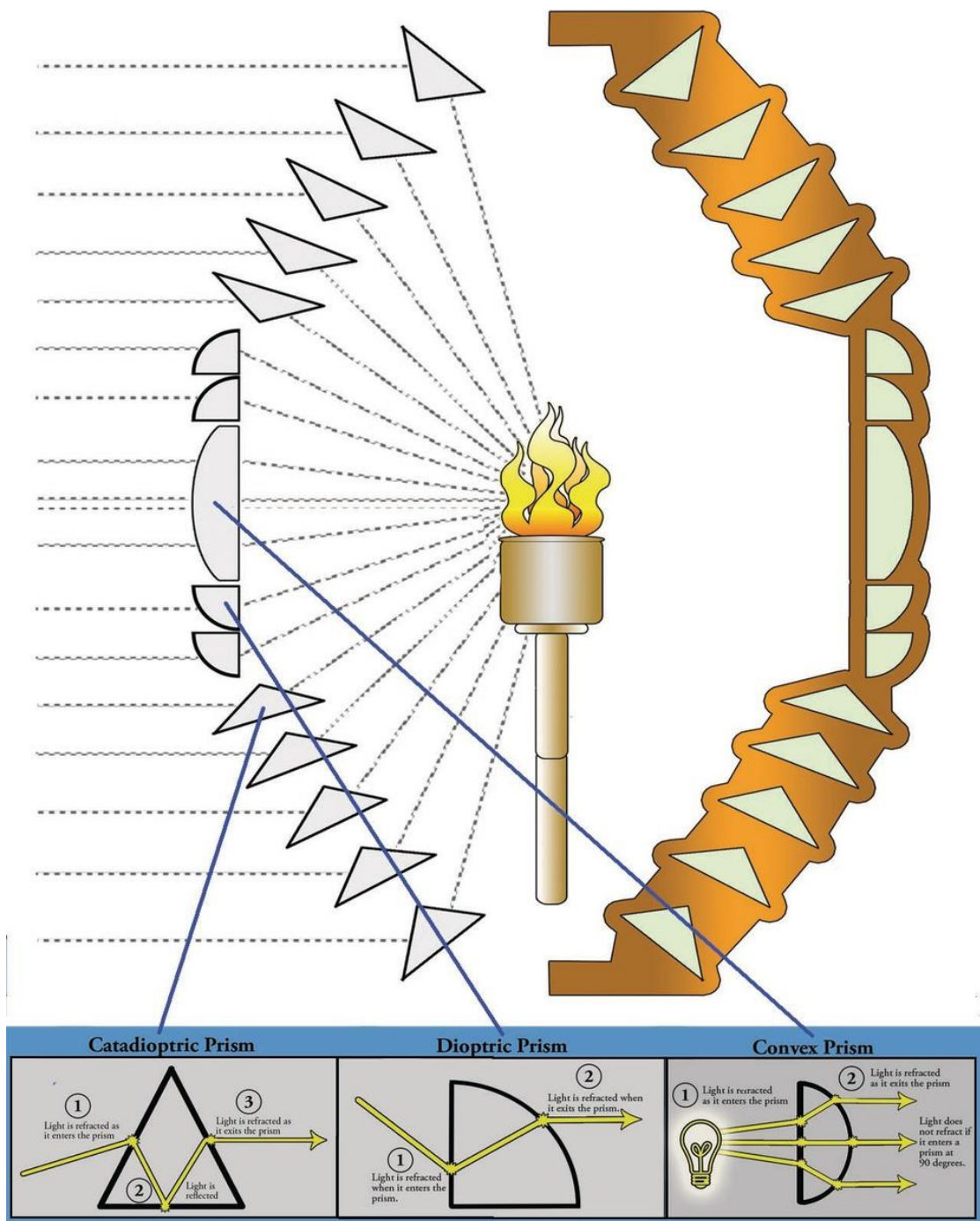
Το 1821 ο Augustin Fresnel παρήγαγε την πρώτη συσκευή χρησιμοποιώντας τις διαθλαστικές ιδιότητες του γυαλιού, που τώρα είναι γνωστό ως διοπτρικό σύστημα ή φακός Fresnel. Πριν από την εφεύρεση του Fresnel, τα καλύτερα συστήματα καθρέφτη μπορούσαν να παράγουν φως περίπου 20.000 κεριών με έναν καυστήρα Argand. Το σύστημα φακών Fresnel αύξησε αυτή την ισχύ σε 80.000 κεριά, περίπου ισοδύναμη με έναν σύγχρονο προβολέα αυτοκινήτου. Με τον καυστήρα λαδιού πίεσης, θα μπορούσαν να επιτευχθούν εντάσεις έως και 1.000.000 κεριών. Για ένα φως αυτής της τάξης, ο μανδύας του καυστήρα θα είχε διάμετρο 4 ίντσες (100 mm). Το σύστημα περιστρεφόμενων φακών θα είχε τέσσερα μεγάλα γυάλινα πάνελ φακών Fresnel, ύψους 12 ποδιών, τοποθετημένα περίπου τέσσερα πόδια από τον καυστήρα σε έναν περιστρεφόμενο φορέα φακών. Το φορείο του φακού θα ζύγιζε πιθανώς πέντε τόνους, περίπου το μισό από αυτό είναι μόνο το βάρος του γυαλιού. Το περιστρεφόμενο πιάτο θα επέπλεε σε μια κυκλική χυτοσίδηρο που περιέχει υδράργυρο. Με αυτό το ρουλεμάν στήριξης σχεδόν χωρίς τριβές, ολόκληρο το συγκρότημα θα μπορούσε να περιστραφεί ομαλά με ρολόι με βάση το βάρος. Εάν το φωτιστικό ήταν αέριο ασετυλένιο, η περιστροφή του φακού θα μπορούσε να οφείλεται στην πίεση του αερίου. Οι εγκαταστάσεις αυτού του τύπου μπήκαν σε κοινή χρήση, αν και πολλές μετατράπηκαν σε ηλεκτρικούς λαμπτήρες με ηλεκτροκινητήρες. Ο σύγχρονος εξοπλισμός φακών του ίδιου τύπου είναι πολύ μικρότερος, ίσως 30 ίντσες (75 cm) σε ύψος, τοποθετημένος σε ρουλεμάν και κινείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Τα πάνελ φακών μπορούν να διαμορφωθούν σε διαφανές πλαστικό, το οποίο είναι ελαφρύτερο και φθηνότερο (Clingan, 2020).

Για να συγκεντρώνεται αποτελεσματικά το φως μέσα από μια πηγή πανκατευθυντική, απαιτείται ένας φακός με μεγάλη διάμετρο. Αυτό συνεπάγεται τη χρήση ενός βαρύ και παχύ φακού. Ο φακός Fresnel εστίασε το 85% του φωτός ενός λαμπτήρα έναντι του 20% που εστιαζόταν με τους παραβολικούς ανακλαστήρες της εποχής. Οι φακοί Fresnel μπόρεσαν να πετύχουν την δημιουργία μεγάλου μεγέθους φακών με μικρή εστιακή απόσταση. Οι φακοί Fresnel που χρησιμοποιήθηκαν στους φάρους κατηγοριοποιήθηκαν με βάση τη διαθλαστική ισχύ και την εστιακή απόσταση, από τον φακό 1<sup>ης</sup> τάξης (ο μεγαλύτερος, ακριβότερος και πιο ισχυρός, μεγάλη εστιακή απόσταση) έως τον φακό 6<sup>ης</sup> τάξης (ο μικρότερος, φθηνότερος, και λιγότερο ισχυρός, μικρή εστιακή απόσταση). Οι φακοί 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> τάξης χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σε παράκτιους φάρους, ενώ οι υπόλοιπες τάξεις χρησιμοποιούνται κυρίως για τα φώτα στα λιμάνια (Crompton & Rhein, 2002).

Ενώ τα κτίρια φάρων διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία και τον σκοπό, τείνουν να έχουν κοινά στοιχεία. Ο σταθμός φωτός αποτελείται από τον πύργο του φάρου και τα βοηθητικά κτίρια (π.χ. κτίριο για σηματοδότηση ομίχλης, σαλόνι του φύλακα, κλπ). Το δωμάτιο με φανάρια είναι το γυάλινο περίβλημα στην κορυφή ενός πύργου φάρου που περιέχει τη λάμπα και τον φακό. Οι υαλοπίνακες καταγιγίδας του στηρίζονται από μεταλλικές ράβδους υαλοπινάκων που εκτείνονται κάθετα ή διαγώνια. Στην κορυφή του δωματίου φαναριών υπάρχει ένας ανεμιστήρας που είναι ανθεκτικός στις καταιγίδες, σχεδιασμένος να αφαιρεί τον καπνό των λαμπτήρων και τη θερμότητα που δημιουργείται στο γυάλινο περίβλημα. Ένα αλεξικέραυνο και ένα σύστημα γείωσης που συνδέονται με τη μεταλλική οροφή θόλου παρέχουν έναν ασφαλή αγωγό για τυχόν κεραυνούς (Rawlings, 2021).

Για αποτελεσματικότητα, ο λαμπτήρας πρέπει να είναι αρκετά ψηλός ώστε να φαίνεται πριν φτάσει στον κίνδυνο ο ναυτικός. Το ελάχιστο ύψος υπολογίζεται με τον τριγωνομετρικό τύπο  $d = 1,17 \sqrt{H}$  όπου  $H$  είναι το ύψος πάνω από το νερό σε πόδια και  $d$  είναι η απόσταση από τον ορίζοντα σε ναυτικά μίλια (Stevenson, 2010).





Εικόνα 38. Η λειτουργία των φακών φάρων

(Πηγή: Ponce de Leon Lighthouse & Museum, 2020)

### 3.4 Σύγχρονες εφαρμογές των φακών Fresnel

Οι φακοί Fresnel έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται και σε σύγχρονες εφαρμογές, όπως τα αυτοκίνητα και τα φωτοβολταϊκά.

Η τοποθέτηση των φακών Fresnel στο παράθυρο του συνοδηγού βαρέων οχημάτων έχει βρεθεί σε δοκιμές ότι βελτιώνει σημαντικά την ικανότητα των οδηγών να βλέπουν άλλους χρήστες του δρόμου που μπορεί να είναι παρόντες σε αυτά τα «τυφλά σημεία», μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο ατυχημάτων, ειδικά όταν ο οδηγός του βαρέος οχήματος αλλάζει λωρίδα ή στρίβει. Σε έρευνα του Transport for New South Wales (2022) δοκιμάστηκαν δύο τύποι φακών Fresnel, ένας ακρυλικός φακός και ένας φακός PVC. Τα περισσότερα οχήματα σε αυτή τη μελέτη ήταν εφοδιασμένα με φακό PVC. Πολλοί οδηγοί βαρέων οχημάτων αντιλαμβάνονται τον φακό Fresnel ως αποτελεσματικό, με περισσότερους από τους μισούς οδηγούς βαρέων οχημάτων να αναφέρουν ότι η χρήση του φακού Fresnel βελτιώνει την οδική ασφάλεια. Επίσης, βελτιώνουν την ορατότητα των χρηστών σε «τυφλά σημεία» σε τέσσερις καταστάσεις υψηλότερου κινδύνου. Ακόμη, έχει βρεθεί ότι οι φακοί Fresnel βοηθάνε στην αποφυγή συγκρούσεων. Θεωρούνται επίσης εύχρηστοι και μάλιστα περισσότερο εύχρηστοι από τους υπάρχοντες κοινούς καθρέπτες (Transport for New South Wales, 2022).



**Εικόνα 39. Οπτικό πεδίο φακού Fresnel σε σύγκριση με παραδοσιακούς καθρέπτες**

(Πηγή: Transport for New South Wales, 2022)



**Εικόνα 40. Ποδηλάτης που φαίνεται μέσα από το φακό Fresnel**

(Πηγή: Transport for New South Wales, 2022)

Για εφαρμογές συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV), χρησιμοποιούνται μεγάλοι, ανθεκτικοί ακρυλικοί φακοί Fresnel αντίστροφης διαμόρφωσης. Οι φακοί Fresnel έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε η επίπεδη πλευρά να βλέπει προς τον ήλιο και η αυλακωτή πλευρά να βλέπει προς το φωτοβολταϊκό στοιχείο για να εστιάσει το φως (Xie et al., 2011).

Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί έχουν κάνει χρήση φακών Fresnel από τις αρχές του 21ου αιώνα. Είναι σε θέση να πάρουν μια μεγάλη περιοχή διάσπαρτου ηλιακού φωτός και να τη συγκεντρώσουν σε μια σφιχτή δέσμη. Οι φακοί ‘‘λυγίζουν’’ τις ακτίνες του φωτός και τις εστιάζουν σαν να χρησιμοποιούν μεγεθυντικό φακό για να εστιάζουν τις ακτίνες του ήλιου. Οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί αποτελούνται από πολλά ηλιακά κύτταρα. Στους συγκεντρωτές Fresnel, κάθε ένα από τα ηλιακά κύτταρα έχει το δικό του φακό Fresnel. Οι φακοί Fresnel αυξάνουν την ποσότητα του ήλιου που χτυπά κάθε μεμονωμένο ηλιακό κύτταρο με αναλογία συγκέντρωσης περίπου 500:1. Αυτό επιτρέπει στην ενεργή επιφάνεια του ηλιακού στοιχείου να μειωθεί σε όγκο, έτσι ώστε να απαιτείται μόνο ένας αρκετά μικρός όγκος φωτοβολταϊκού υλικού πυριτίου (PV). Με τα PV πυριτίου να είναι υπεύθυνα για το μεγαλύτερο μέρος του κόστους παραγωγής ηλιακών, οι συγκεντρωτικοί ηλιακοί που χρησιμοποιούν την τεχνολογία Fresnel αποτελούν μια ελκυστικά οικονομική επιλογή, ιδιαίτερα για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας (Knight Optical, 2019).

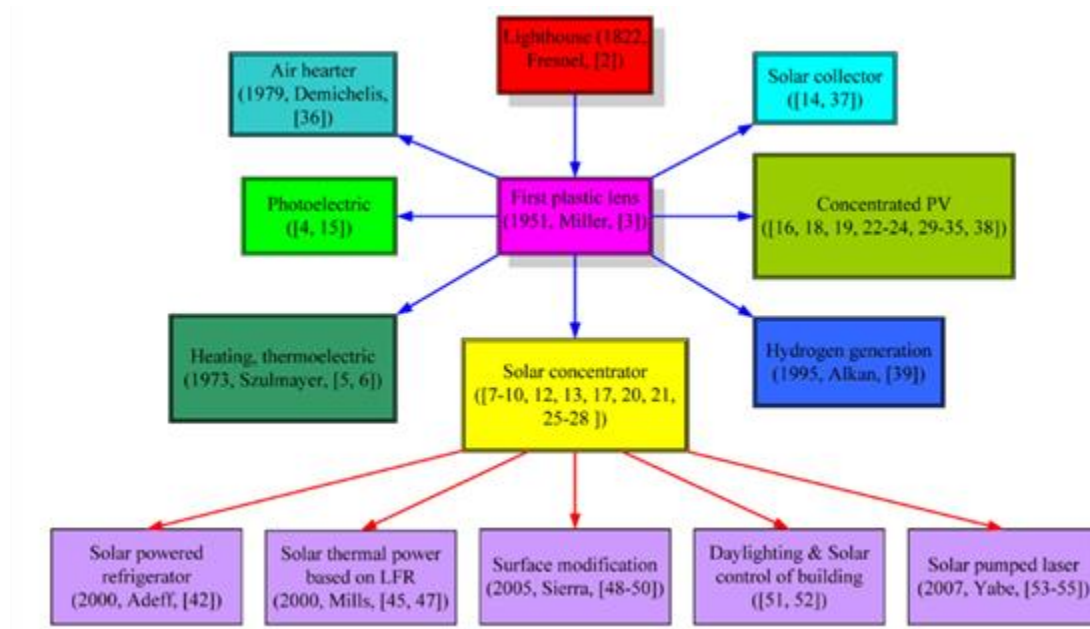


Η χρήση του φακού Fresnel ως συγκεντρωτικών ηλιακών προσέλκυε πάντα μεγάλο ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για τη συγκέντρωση φωτοβολταϊκών εφαρμογών τις τελευταίες δεκαετίες. Το προφίλ φωτισμού ή η κατανομή ακτινοβολίας που παράγεται από συγκεντρωτικούς ηλιακούς είναι γενικά ανομοιόμορφη. Η ανομοιομορφία στην κατανομή ακτινοβολίας προκαλεί αρνητική επίδραση στην απόδοση μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης με μείωση του συντελεστή πλήρωσης και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος (Huang et al., 2011). Ο Ryu και οι συνεργάτες του (2006) πρότειναν μια νέα διαμόρφωση των οπτικών ηλιακής συγκέντρωσης χρησιμοποιώντας φακούς Fresnel με αρθρωτά όψη για την επίτευξη ομοιόμορφης έντασης στο επίπεδο απορρόφησης με μέτρια αναλογία συγκέντρωσης και σχεδίασαν ένα οικονομικά αποδοτικό ηλιακό φωτοβολταϊκό σύστημα τρισδιάστατης συγκέντρωσης. Οι Chenlo και Cid (1987) τοποθέτησαν τέσσερις φακούς Fresnel σε σχήμα οροφής για να σχηματίσουν ένα αποτελεσματικό άνοιγμα πλάτους 0,6 m και μήκους 1 m. Κατασκεύασαν τα δικά τους φωτοβολταϊκά κύτταρα και τα δοκίμασαν με τον συμπυκνωτή φακών Fresnel. Η απόδοση της φωτοβολταϊκής μονάδας ~17% επιτεύχθηκε με αναλογία ηλιακής συγκέντρωσης ~20, ενώ η απόδοση ΦΒ 11,4% μετρήθηκε χωρίς τη χρήση του ηλιακού συμπυκνωτή. Μέσω μιας μελέτης προσομοίωσης, ανακάλυψαν ότι η ανομοιόμορφη κατανομή ακτινοβολίας και θερμοκρασίας θα μπορούσε να προκαλέσει μια σχετική πτώση της τάξης του 5% στην απόδοση των Φ/Β κυψελών. Ο Mellor και οι συνεργάτες του (2009) παρουσίασαν ένα δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ροής ρεύματος στην μπροστινή επιφάνεια μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης και πραγματοποίησαν μια πειραματική δοκιμή για να επικυρώσουν το μοντέλο. Η συμφωνία μεταξύ των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης και των πειραματικών δεδομένων ήταν αρκετά ικανοποιητική. Στη συνέχεια χρησιμοποίησαν το μοντέλο για να προβλέψουν την επίδραση της μη ομοιόμορφης κατανομής ακτινοβολίας στην απόδοση των φωτοβολταϊκών κυττάρων και να διερευνήσουν πώς θα μπορούσε να μειωθεί η επίδραση. Διαπίστωσαν ότι η πτώση της απόδοσης λόγω της ανομοιομορφίας θα μπορούσε να μειωθεί από 1,7 σε 0,7% μέσω της χρήσης βελτιστοποιημένου αριθμού μεταλλικού πλέγματος στην μπροστινή επιφάνεια μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Στη μελέτη του Soni και των συνεργατών του (2019), συνήχθη το συμπέρασμα ότι ένας φακός Fresnel είναι πιο κατάλληλος για εφαρμογή για συγκέντρωση ηλιακής ενέργειας σε εφαρμογή θέρμανσης νερού στην περιοχή μεταξύ 15°N και 40°S με ελάχιστη άμεση κανονική ακτινοβολία (DNI) 1,9 kW h/m<sup>2</sup> /έτος και περιστασιακά σε μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη.

Οι Choong, Ho και Bahar (2020) χρησιμοποίησαν έναν φακό Fresnel για τη συγκέντρωση της ηλιακής ενέργειας σε ένα σημείο για την αύξηση της τοπικής θερμοκρασίας του τροφοδοτικού νερού και του ρυθμού εξάτμισης. Χρησιμοποιήθηκαν επίπεδοι φακοί Fresnel σε παθητικό ηλιακό αποστακτήρα διπλής κλίσης, όπου τα εστιακά σημεία προσαρμόστηκαν ώστε να πέφτουν απευθείας στο νερό τροφοδοσίας. Τα πειράματα διεξήχθησαν για δύο διαφορετικές γεωμετρίες και παράλληλα με τη σύγκριση μεταξύ του συμβατικού και του τροποποιημένου ηλιακού αποστακτήρα. Ο αριθμός των φακών Fresnel ήταν επίσης ποικίλος. Ως ύδωρ τροφοδοσίας χρησιμοποιήθηκε αλατούχο διάλυμα με συγκέντρωση 20.000 ppm. Η έρευνα στοχεύει να υλοποιηθεί για την παραγωγή γλυκού νερού στις φυσικές καιρικές συνθήκες της Μαλαισίας. Διαπιστώθηκε ότι η χρήση δύο φακών Fresnel αντί για έναν μεγάλο, δίνει ώθηση στην παραγωγή γλυκού νερού ανά μονάδα ηλιακής ακτινοβολίας κατά 39%. Το παραγόμενο νερό έχει τιμή ολικών διαλυμένων στερεών (TDS) 37 ppm, η οποία είναι αρκετά εντός των προτύπων για το πόσιμο νερό σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας.

Παράλληλα, σκοπός της μελέτης του Li και των συνεργατών του (2014) ήταν η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των ηλιακών κυψελών χρησιμοποιώντας φακό Fresnel. Για να ελεγχθεί πώς οι φακοί Fresnel θα επηρέαζαν την ενεργειακή έξοδο των ηλιακών κυψελών, οκτώ φακοί τοποθετήθηκαν πάνω από οκτώ μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα σε ύψη ίσα με 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6 και 1,8 φορές τα εστιακά μήκη των φακών, με ένα επιπλέον ηλιακό στοιχείο χωρίς φακό που χρησιμεύει ως έλεγχος. Αυτές οι ρυθμίσεις δοκιμάστηκαν σε εξωτερικούς χώρους για επτά ημέρες, με τις εξόδους ισχύος σε αντιστάσεις 120Ω να μετρώνται από ένα κύκλωμα καταγραφής δεδομένων που βασίζεται σε Arduino. Διαπιστώθηκε ότι όλες οι πειραματικές ομάδες ξεπέρασαν την ομάδα ελέγχου στη μέση παραγωγή ενέργειας εκτός από την ομάδα 1.0F με το ηλιακό κύτταρο στην εστιακή απόσταση (F), η οποία μείωσε την παραγωγή ενέργειας κατά μέσο όρο 9,76%. Οι καθαρές αυξήσεις κυμαίνονταν κατά μέσο όρο από 1,25% έως 14,93% με την ομάδα 0,8F να έχει την καλύτερη απόδοση, παράγοντας 14,93% περισσότερη ενέργεια από την ομάδα ελέγχου. Η ομάδα 1.0F απέτυχε να βελτιώσει την απόδοση της ηλιακής κυψέλης. Τα ευρήματα της τρέχουσας μελέτης δείχνουν ότι οι χρήσεις των φακών Fresnel με ηλιακά κύτταρα σε βελτιστοποιημένες αποστάσεις φακού-ηλιακής κυψέλης θα μπορούσαν να βελτιώσουν την παραγωγή κυψέλης και ως εκ τούτου την πρακτικότητα της χρήσης της ηλιακής ενέργειας.



**Εικόνα 41. Διάγραμμα ροής της ανάπτυξης τεχνικής συγκεντρωτικών ηλιακών συστημάτων φακών απεικόνισης Fresnel**

(Πηγή: Xie et al., 2011)



**Εικόνα 42. Εγκατάσταση φακού Fresnel για φωτοβολταϊκή χρήση**

(Πηγή: Xie et al., 2011)



**Εικόνα 43. Ρύθμιση λέιζερ με ηλιακή άντληση με χρήση φακών Fresnel**

(Πηγή: Xie et al., 2011)

Λόγω της δημοτικότητας των LED υψηλής ισχύος, η χρήση μεμονωμένων ή περισσότερων LED ως φωτεινών πηγών και η χρήση φακών Fresnel με φακούς μικροσυστοιχίας ως φωτεινά σώματα αντί για πολλαπλά LED ως πηγές φωτός για το σχηματισμό φωτεινών σηματοδοτών έχει γίνει τάση στο ανάπτυξη του κλάδου. Έχει τεθεί σε χρήση σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο (E-Tay Industrial, 2022).



**Εικόνα 44. Φακοί Fresnel σε φανάρια**

(Πηγή:Sunburst, 2016)

Για να γίνουν οι τρισδιάστατοι φακοί λεπτότεροι και ελαφρύτεροι, ορισμένα γυαλιά 3D χρησιμοποιούν φακούς Fresnel. Αυτός ο φακός έχει την ίδια καμπυλότητα με έναν κανονικό φακό, αλλά έχει νήματα διαφορετικών μεγεθών χαραγμένα στη μία πλευρά. Επειδή η δέσμη φωτός χτυπά τον φακό από διαφορετικές γωνίες, αισθάνεται ότι η απόσταση μεταξύ του ματιού και του αντικειμένου είναι μεγάλη, αλλά στην πραγματικότητα η απόσταση δεν είναι τόσο μακριά (Maxwell, Oaster & Lynch, 2018).



**Εικόνα 45. Γυαλιά 3D με φακούς Fresnel**

(Πηγή: Maxwell, Oaster & Lynch, 2018)

Τέλος, ο μεγεθυντικός φακός Fresnel είναι ένας εξαιρετικά λεπτός μεγεθυντικός φακός. Είναι κατασκευασμένος από διάφανο πλεξιγκλάς συνήθως. Το ελάχιστο πάχος του μεγεθυντικού φακού Fresnel από PVC μπορεί να είναι μεταξύ 0,45mm~0,90mm. Σε αντίθεση με τους συνηθισμένους μεγεθυντικούς φακούς, η επιφάνειά του καλύπτεται με μικροσκοπικές λωρίδες και οι στροβιλιζόμενες λωρίδες του περιέχουν πολλούς κυρτούς φακούς (αναφέρεται ως κυκλικός δακτύλιος), που κάνει το φως που περνά μέσα από αυτό να κάμπτεται για να δημιουργήσει ένα φαινόμενο περίθλασης, σχηματίζοντας έτσι μια μεγεθυμένη εικόνα.



**Εικόνα 46. Μεγεθυντικός φακός Fresnel**

(Πηγή: Alibaba, 2022)



## Κεφάλαιο 4 – Μελλοντικές Προοπτικές

### 4.1 Προοπτικές των φακών

Οι μελλοντικοί φακοί αναμένεται να είναι σε θέση να διαγιγνώσκουν ασθένειες, όπως ο σακχαρώδης διαβήτης και ο καρκίνος. Επίσης, οι φακοί επαφής που χορηγούν φάρμακα μπορεί να προσφέρουν πιο ακριβή δοσολογία από τις παραδοσιακές οφθαλμικές σταγόνες, είτε μέσω *in vitro* πρόσληψης και απελευθέρωσης, ενσωμάτωσης νανοσωματιδίων που περιέχουν φάρμακο σε υλικά φακών επαφής ή μοριακής αποτύπωσης για να εμποτίσουν πολυμερή με χαρακτηριστικά μνήμης που βοηθούν τη διανομή. Η ενσωματωμένη μικροηλεκτρονική μπορεί να παρακολουθεί συνεχώς την κατεύθυνση του βλέμματος του κερατοειδούς, ελέγχοντας οπτικά στοιχεία για την αντιμετώπιση της πρεσβυωπίας - τη σταδιακή απώλεια της ικανότητας εστίασης των ματιών - σε πραγματικό χρόνο (Jones et al., 2021; Zhu et al., 2022).

### 4.2 Προοπτικές των κατόπτρων

Τα μελλοντικά κάτοπτρα αναμένεται να μπορούν να προλαμβάνουν εγκαίρως ασθένειες των οφθαλμών. Επίσης, η χρήση της τεχνητής νοημοσύνης θα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη (Richer, 2020).

### 4.3 Συμπεράσματα

Η σημαντικότερη συνεισφορά του Augustin Fresnel στην ιστορία της οπτικής είναι οι φακοί Fresnel. Ο φακός Fresnel είναι ένας φακός σύνθετος και συμπαγής, που δημιουργήθηκε από τον Fresnel και προοριζόταν αρχικά για χρήση σε φάρους. Οι φακοί Fresnel έχουν μεγάλο διάφραγμα και μικρή εστιακή απόσταση και δεν απαιτούν τον όγκο και τη μάζα του υλικού που θα χρειάζονταν ένας συμβατικός φακός. Μάλιστα, ένας φακός Fresnel μπορεί να είναι τόσο λεπτός όσο ένα φύλλο, γεγονός που δεν μπορεί να γίνει με συμβατικούς φακούς. Ο Count Buffon ήταν εκείνος που πρότεινε αρχικά την διοπτρική (διαθλαστική) μορφή του φακού, και ο Augustin Fresnel αργότερα εξέλιξε την ιδέα αυτή. Όμως, ο Fresnel εφηύρε εξ



ολοκλήρου την καταδιοπτρική μορφή του φακού, η οποία χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά της διάθλασης και της ολικής εσωτερικής ανάκλασης. Μπορεί να κάνει το φως να είναι ορατό από μεγάλες αποστάσεις. Ένας φακός Fresnel δεν χρειάζεται την ποσότητα υλικού που απαιτεί ένας συμβατικός φακός, και αποτελείται από ομόκεντρα δακτυλιοειδή τμήματα.

Η κινητήρια αρχή πίσω από τη σύλληψη ενός φακού Fresnel είναι ότι η κατεύθυνση διάδοσης του φωτός δεν αλλάζει μέσα σε ένα μέσο (εκτός εάν είναι διασκορπισμένο). Ο Fresnel ήταν ο πρώτος που κατάλαβε ότι το φως είναι ένα εγκάρσιο κύμα, παρόλο που κανείς δεν συνειδητοποίησε ότι οι «δονήσεις» του κύματος ήταν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Για πρώτη φορά, η πόλωση μπόρεσε να γίνει κατανοητή ποσοτικά, με τις εξισώσεις του Fresnel.

Οι φακοί Fresnel έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται και σε σύγχρονες εφαρμογές, όπως τα αυτοκίνητα, τα γυαλιά 3D, και τα φωτοβολταϊκά. Μάλιστα, στο μέλλον αναμένεται να αυξηθεί ιδιαίτερα η δημοτικότητα τους αναφορικά με τη φωτοβολταϊκή χρήση, καθώς οι φακοί Fresnel αποτελούν μια ελκυστική οικονομική επιλογή, ιδιαίτερα για εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας.

## Βιβλιογραφία

- Alibaba (2022). *Fresnel Magnifying Glass HD Amplifier Screen Magnifier* [online]. Retrieved from [https://www.alibaba.com/product-detail/Fresnel-Magnifying-Glass-HD-Amplifier-Screen\\_62325002691.html](https://www.alibaba.com/product-detail/Fresnel-Magnifying-Glass-HD-Amplifier-Screen_62325002691.html) [accessed 9/11/2022].
- Authier, A. (2013). *Early Days of X-ray Crystallography*. Oxford: Oxford University Press.
- Bachhav, C.Y., & Sonawwanay, P.D. (2022). Study on design and performance enhancement of Fresnel lens solar concentrator. *Materials Today: Proceedings*, 56(5), 2873-2879.
- Band, Y. B. (2010). *Light and Matter: Electromagnetism, Optics, Spectroscopy and Lasers*. UK:John Wiley & Sons.
- BBC (2019). *The invention that saved a million ships* [online]. Retrieved from <https://www.bbc.com/travel/article/20190620-the-invention-that-saved-a-million-ships> [accessed 12/7/2022].
- Beléndez, A. (2009). Holography: science, art and technology. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 31(1), 1602.
- Boutry, G.A. (1948). Augustin Fresnel: His Time, Life and Work 1788-1827. *Science Progress*, 36, 587-604.
- Britannica (2020). *Jean-Baptiste Biot* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/Jean-Baptiste-Biot> [accessed 3/11/2022].
- Britannica (2021). *Sir David Brewster* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/David-Brewster> [accessed 3/11/2022].
- Britannica (2022a). *Augustin-Jean Fresnel* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/Augustin-Jean-Fresnel> [accessed 1/6/2022].
- Britannica (2022b). *Étienne-Louis Malus* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/Etienne-Louis-Malus> [accessed 1/11/2022].
- Buchwald, J. (1989). *The Rise of the Wave Theory of Light: Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*. Chicago: University of Chicago Press.

- Buchwald, J.Z. (1980). Experimental investigations of double refraction from Huygens to Malus. *Archive for History of Exact Sciences*, 21(4), 311–373.
- Chen, X. (2000). *Instrumental Traditions and Theories of Light: The Uses of Instruments in Optical Revolution*. Berlin: Springer.
- Chenlo, F., & Cid, M. (1987). A linear concentrator photovoltaic module: analysis of non-uniform illumination and temperature effects on efficiency. *Solar Cells*, 20(1), 27–39.
- Choong, W.S., Ho, Z.Y., & Bahar, R. (2020). Solar Desalination Using Fresnel Lens as Concentrated Solar Power Device: An Experimental Study in Tropical Climate. *Frontiers in Energy Research*, 8, 565542.
- Clingan, I.C. (2020). *Lighthouses* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/technology/lighthouse> [accessed 7/11/2022].
- Crompton, S.W., & Rhein, M.J. (2002). *The Ultimate Book of Lighthouses*. San Diego, CA: Thunder Bay Press.
- Darrigol, O. (2012). *A History of Optics: From Greek Antiquity to the Nineteenth Century*. Oxford: Oxford University Press.
- David Darling (2022). *Arago, Dominique François Jean (1786–1853)* [online]. Retrieved from <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/A/Arago.html> [accessed 4/11/2022].
- Edmund Optics (2022). *Advantages of Fresnel Lenses* [online]. Retrieved from <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/optics/advantages-of-fresnel-lenses/> [accessed 12/7/2022].
- Elton, J. (2009). A Light to Lighten our Darkness: Lighthouse Optics and the Later Development of Fresnel's Revolutionary Refracting Lens 1780–1900. *International Journal for the History of Engineering & Technology*, 79 (2), 183–244.
- E-Tay Industrial (2022). *Application of Fresnel Lens in Daily Consumption* [online]. Retrieved from <https://www.mymagnifier.com/en/faq/APPLICATION-OF-FRESNEL-LENS-IN-DAILY-CONSUMPTION/E-TAY-faq-011.html> [accessed 9/11/2022].
- Frankel, E. (1976). Corpuscular optics and the wave theory of light: The science and politics of a revolution in physics. *Social Studies of Science*, 6(2), 141–184.

Funci (2020). *Ibn al-Haytham and the rays of light* [online]. Retrieved from <https://funci.org/73607/?lang=en> [accessed 6/11/2022].

Global Spec (2022). *Fresnel Lenses Information* [online]. Retrieved from [https://www.globalspec.com/learnmore/optics\\_optical\\_components/optical\\_components/fresnel\\_lenses](https://www.globalspec.com/learnmore/optics_optical_components/optical_components/fresnel_lenses) [accessed 3/11/2022].

Great Light Titanic Quarter (2018). *Augustin-Jean Fresnel Biography* [online]. Retrieved from <https://www.greatlighttq.org/app/uploads/2018/03/Famous-People-Augustin-Jean-Fresnel.pdf> [accessed 1/6/2022].

Hawkins, S.H. (2022). *James Bradley* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/James-Bradley> [accessed 4/11/2022].

Hecht, E. (2002). *Optics*. San Francisco: Addison-Wesley.

Himer, S.E., Ahaitouf, A., El-Yahyaoui, S., & Mechaqrane, A. (2019). Performance analysis of non-imaging Fresnel lens as a primary stage for CPV units. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 161, 012029.

Huang, H., Su, Y., Gao, Y., & Riffat, S. (2011). Design analysis of a Fresnel lens concentrating PV cell. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 6 (3), 165–170.

Hyperphysics (n.d.). *Fresnel's equations* [online]. Retrieved from <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/freseq.html> [accessed 9/7/2022].

Jones, L., Hui, A., Phan, C.-M., Read, M. L., Azar, D., Buch, J., & Willcox, M. (2021). CLEAR - Contact lens technologies of the future. *Contact Lens and Anterior Eye*, 44(2), 398–430.

Kewaunee Pierhead Lighthouse (2022). *Kewaunee Lighthouse Fresnel Lens* [online]. Retrieved from <https://kewauneepierheadlighthouse.org/kewaunee-lighthouse-fresnel-lens/> [accessed 3/11/2022].

Kipnis, N. (1991). *History of the Principle of Interference of Light*. Basel: Birkhäuser.

Kipnis, N. (2003). Physical optics. In I. Grattan-Guinness (ed.), *Companion Encyclopedia of the History and Philosophy of the Mathematical Sciences* (pp.1143-1152). USA: JHU Press.

Knight Optical (2019). *How Fresnel Lenses are used in Solar CPV Applications* [online]. Retrieved from <https://www.knightoptical.com/news/how-fresnel-lenses-are-used-in-solar-cpv-applications/> [accessed 8/11/2022].

Levitt, T.H. (2009). *The Shadow of Enlightenment: Optical and Political Transparency in France, 1789–1848*. Oxford: Oxford University Press.

Levitt, T.H. (2013). *A Short Bright Flash: Augustin Fresnel and the Birth of the Modern Lighthouse*. New York: W.W. Norton.

Li, D., Sawhney, M., Kurtz, R., Solomon, L., & Collette, J. (2014). Impact of the Location of a Solar Cell in Relationship to the Focal Length of a Fresnel Lens on Power Production. *Energy and Power*, 4(1), 1-6.

Maxwell, D., Oaster, E., & Lynch, S. (2018). *Evaluating the Applicability of Repurposed Entertainment Virtual Reality Devices for Military Training* [online]. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/324755194\\_Evaluating\\_the\\_Applicability\\_of\\_Repurposed\\_Entertainment\\_Virtual\\_Reality\\_Devices\\_for\\_Military\\_Training](https://www.researchgate.net/publication/324755194_Evaluating_the_Applicability_of_Repurposed_Entertainment_Virtual_Reality_Devices_for_Military_Training) [accessed 8/11/2022].

Mellor, A., Domenech-Garret, J. L., Chemisana, D., & Rosell, J. I. (2009). A two-dimensional finite element model of front surface current flow in cells under non-uniform, concentrated illumination. *Solar Energy*, 83(9), 1459–1465.

Nábělek, B., Malý, M., & Jirka, V. (1991). Linear Fresnel lenses, their design and use. *Renewable Energy*, 1(3-4), 403–408.

O'Connor, J.J., & Robinson, E.F. (2002). *Augustin Jean Fresnel* [online]. Retrieved from <https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Fresnel/> [accessed 10/5/2022].

Pham, T., Vu, N., & Shin, S. (2017). Daylighting System Based on Novel Design of Linear Fresnel lens. *Buildings*, 7(4), 92.

Physics Thick (n.d.). *Fresnel equations* [online]. Retrieved from [http://physics.thick.jp/Experimental\\_Physics/Section1/1-7\\_en.html](http://physics.thick.jp/Experimental_Physics/Section1/1-7_en.html) [accessed 10/7/2022].

Physics World (2006). *James Clerk Maxwell: a force for physics* [online]. Retrieved from <https://physicsworld.com/a/james-clerk-maxwell-a-force-for-physics/> [accessed 5/11/2022].

- Ponce de Leon Lighthouse & Museum (2020). *Understanding how Lighthouse Lenses Work* [online]. Retrieved from <https://www.ponceinlet.org/Understanding-how-Lighthouse-Lenses-Work-1-6297.html> [accessed 7/11/2022].
- Rawlings, W. (2021). *Lighthouses of the Georgia Coast*. Macon, GA: Mercer University Press.
- Richer, S. (2020). *Prevention, artificial intelligence, and the future of optometry* [online]. Retrieved from <https://www.optometrytimes.com/view/prevention-artificial-intelligence-and-future-optometry> [accessed 3/11/2022].
- Rory, C. (2020). *Rage against the dimming light: Irish rebel over lighthouse LED makeover* [online]. Retrieved from <https://www.theguardian.com/world/2020/aug/02/rage-against-the-dimming-light-irish-rebel-over-lighthouse-led-makeover> [accessed 8/11/2022].
- Ryu, K., Rhee, J.-G., Park, K.-M., & Kim, J. (2006). Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system. *Solar Energy*, 80(12), 1580–1587.
- Sabra, A.I. (1981). *Theories of Light: From Descartes to Newton*. Canada: Cambridge University Press.
- Silliman, R.H. (2008). Fresnel, Augustin Jean. In C.C. Gillispie (ed.), *Complete Dictionary of Scientific Biography* (pp.165-171). USA: Detroit: Charles Scribner's Sons.
- Skaar, J. (2019). Fresnel's equations in statics and quasistatics. *European Journal of Physics*, 40, 1-16.
- Smith, D.G. (2013). *Field Guide to Physical Optics*. USA: SPIE Press.
- Soni, V. K., Shrivastava, R. L., Untawale, S. P., & Shrivastava, K. (2019). Performance analysis and optimization of Fresnel lens concentrated solar water heater. *Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME*, 141, 1-10.
- Stevenson, T. (2010). *Lighthouse Construction and Illumination*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Stuewer, R.E. (2022). *Max Planck* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/Max-Planck> [accessed 1/11/2022].

Sun Signs (2017). *Augustin-Jean Fresnel Biography, Life, Interesting Facts* [online]. Retrieved from <https://www.sunsigns.org/famousbirthdays/d/profile/augustin-jean-fresnel/> [accessed 1/6/2022].

Sunburst (2016). *Full Ball Red Green Yellow Traffic Light Fresnel Lens* [online]. Retrieved from <https://www.traffic-lighting.com/product/Traffic-Light-Fresnel-Lens.html> [accessed 9/11/2022].

The Nobel Foundation (2022). *Albert Einstein* [online]. Retrieved from <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/einstein/biographical/> [accessed 3/11/2022].

Transport for New South Wales (2022). *Fresnel lens trial research* [online]. Retrieved from <https://roadsafety.transport.nsw.gov.au/downloads/fresnel-lens-trial.pdf> [accessed 8/11/2022].

United States Lighthouse Society (2022). *Reflectors by Thomas Tag* [online]. Retrieved from <https://uslhs.org/reflectors> [accessed 3/11/2022].

Universe Optics (2022). *Lighthouses Use Fresnel Lenses* [online]. Retrieved from <https://www.universeoptics.com/lighthouses-use-fresnel-lenses/> [accessed 4/11/2022].

Waldman, G. (1983). *Introduction to Light: The Physics of Light, Vision, and Color*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Westfall, R.S. (2022). *Isaac Newton* [online]. Retrieved from <https://www.britannica.com/biography/Isaac-Newton> [accessed 3/11/2022].

Wikipedia (2021). *Pierre Louis Maupertuis* [online]. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Pierre\\_Louis\\_Maupertuis](https://en.wikipedia.org/wiki/Pierre_Louis_Maupertuis) [accessed 3/11/2022].

Wikipedia (2022). *Fresnel equations* [online]. Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel\\_equations](https://en.wikipedia.org/wiki/Fresnel_equations) [accessed 10/7/2022].

Woan, G. (2010). *The Cambridge Handbook of Physics Formulas*. Cambridge: Cambridge University Press.

Woodford, C. (2008). *Fresnel lenses* [online]. Retrieved from <https://www.explainthatstuff.com/fresnel-lenses.html> [accessed 1/11/2022].

Xie, W. T., Dai, Y. J., Wang, R. Z., & Sumathy, K. (2011). Concentrated solar energy applications using Fresnel lenses: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2588–2606.

Zhu, Y., Li, S., Li, J., Falcone, N., Cui, Q., Shah, S., Hartel, M. C., Yu, N., Young, P., de Barros, N. R., Wu, Z., Haghniaz, R., Ermis, M., Wang, C., Kang, H., Lee, J., Karamikamkar, S., Ahadian, S., Jucaud, V., Dokmeci, M. R., & Khademhosseini, A. (2022). Lab-on-a-Contact Lens: Recent Advances and Future Opportunities in Diagnostics and Therapeutics. *Advanced Materials*, 34(24), e2108389.

Αγγελίδης, Π., & Μπέλλου, Σ. (2022). *Οπτική και αρχές μικροσκοπίας* [online]. Ανακτήθηκε από [https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/ICTE256/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%2013%20-%20Optics%20and%20microscopy\\_oc.pdf](https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/ICTE256/%CE%98%CE%B5%CF%89%CF%81%CE%AF%CE%B1/%CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%2013%20-%20Optics%20and%20microscopy_oc.pdf) [πρόσβαση 6/11/2022].

Ζακή, Μ., & Δημοπούλου, Π. (2022). *Η χρήση των φακών Fresnel για θέρμανση/ ψύξη στα θερμοκηπιακά συστήματα* [Πτυχιακή εργασία]. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωπονίας.

Κατσικίνη, Μ. (2014). *12 Κύματα σε 3 διαστάσεις-Επίπεδα κύματα* [online]. Ανακτήθηκε από <https://slideplayer.gr/slide/3100095/> [πρόσβαση 6/11/2022].

Παπάζογλου, Δ. (2013). *Οπτική και κύματα* [online]. Ανακτήθηκε από [https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY302/notes/new/lecture\\_01.pdf](https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY302/notes/new/lecture_01.pdf) [πρόσβαση 6/11/2022].

Χανδρινός, Α. (2011). *Ιστορία και οπτική του γυαλιού*. Αθήνα: Έλλην.

G. Ninos, V. Bartzis, N. Merlemis, I. E. Sarris, Uncertainty quantification implementations in human hemodynamic flows, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Volume 203, 2021, 106021, ISSN 0169-2607, <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2021.106021>

“Natural Convection of Blood-Magnetic Iron Oxide Bio-nanofluid in the Context of Hyperthermia Treatment” Lefteris Benos, George Ninos, Nickolas D. Polychronopoulos,

Maria-Aristera Exomanidou and Ioannis Sarris, *Computation* 2022, 10, 190. <https://doi.org/10.3390/computation10110190>



A Low-Cost Algorithm for Uncertainty Quantification Simulations of Steady-State Flows:  
Application to Ocular Hemodynamics Georgios Ninos, George Sofiadis, Aikaterini  
Skouroliakou, and Ioannis E. Sarris Symmetry 2022, 14,  
2305.<https://doi.org/10.3390/sym14112305>



