ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΗΣ

(ΜΕ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ)

Ε.Δ. ΒΑΝΙΔΗΣ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2017

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια σύντομη επισκόπηση της εξέλιξης των θεωριών για το φως

Είναι γνωστή σήμερα – και σχεδόν γενικά αποδεκτή – η άποψη για τη δυαδική φύση του φωτός, με την κυματική και σωματιδιακή (φωτονική) της έκφραση. Επίσης έχει απαντηθεί σαφώς το δίλημμα, το οποίο προέκυπτε από το ότι για την περιγραφή και την ερμηνεία μιας σειράς πειραμάτων, ήταν επαρκής η κυματική θεωρία ενώ για τα υπόλοιπα η κβαντομηχανική. Πράγματι κατά τον De Broglie: Το καθένα από αυτά τα πειράματα δεν μας αναδεικνύει μια από τις δύο 'φύσεις' του φωτός καθ' εαυτή (per se), αλλά με ποιόν τρόπο το φως αλληλεπιδρά με τις πειραματικές διατάξεις. Δηλ. το φως αναδεικνύει τις κυματικές ή σωματιδιακές (φωτονικές) του ιδιότητες ανάλογα με το τι αλληλεπιδρά μαζί του. Η απάντηση αυτή βέβαια φέρει το βάρος και συνιστά το αποτέλεσμα της μακραίωνης διαπάλης όλων των θεωριών για το φως από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα και πιο συγκεκριμένα από τη στιγμή που αποτέλεσε 'εξωτερική' οντότητα της οποίας αναζητούνταν η φύση. Δηλ. ήταν ανεξάρτητη του εκάστοτε παρατηρητή.

Η καθοριστική εποχή της μεταστροφής των μελετών που αφορούσαν το φως, από τους μηχανισμούς της όρασης, σε ερωτήσεις σε σχέση με τα φύση του, ήταν ο 17^{ος} αιώνας. Εντούτοις πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη χρονική αυτή περίοδο, μπορούμε να ξεχωρίσουμε την ουσιαστική συμβολή τεσσάρων τον αριθμό θεωριών οι οποίες διαπραγματευόταν τη φύση του. Η κάθε μια από αυτές ή ταυτόχρονά με άλλες, αποκτούσε κύρος ή απορριπτόταν ανάλογα με την ικανότητά τους να ερμηνεύσουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξαγόταν από τους διάφορους κατά εποχή ερευνητές και επιστήμονες. Ας υπενθυμίσουμε εδώ ότι η απόρριψη της ιδέας του 'αιθέρα' έγινε σχετικά πρόσφατα από τον Jules Henry Poincarè (1854-1912) το 1899, βασισμένη σε πειράματα των Michelson – Morley κατά τη δεκαετία 1880 – 1890.

Από το δεδομένο ότι στον ελεύθερο τουλάχιστον χώρο, το φως ήταν διαπιστωμένο ότι διαδιδόταν ευθύγραμμα, κρίθηκε ότι η φύση του αφορούσε κάτι το οποίο κινείται. Το γεγονός αυτό – και όχι μόνο – οδήγησε στο ν' αναπτυχθούν οι προαναφερόμενες τέσσερις κατά γενική αποδοχή θεωρίες ότι το φως ήταν: α) Ένα 'ρευστό' σε κίνηση. β) Κινούμενα σωματίδια (η σωματιδιακή θεωρία). γ) Διάδοση με τη βοήθεια δονήσεων (ταλαντώσεων) ενός αιθέριου ρευστού που ήταν πανταχού παρόν (θεωρία του 'αιθέρα'). δ) Διαδιδόμενα κύματα. Η ιδέα του φωτός σαν κινούμενο ρευστό προήλθε κυρίως από την ανακάλυψη (περί το 1650) των φαινομένων περίθλασης του φωτός (εμφάνιση φωτός μέσα στα όρια μιας γεωμετρικής σκιάς), από τον Francesco Maria Grimaldi (1618 – 1663). Τα φαινόμενα αυτά δεν μπορούσαν να εξηγηθούν από τη σωματιδιακή θεωρία των ευθύγραμμα κινούμενων σωμα-

τιδίων, που συνυπήρχε εκείνη την εποχή. Η υιοθέτηση της θεωρίας του 'ρευστού' προήλθε από την εμπειρία της περίθλασης (περί-θλασης , παρά- θλασης, παρά-καμψης) των κυμάτων του νερού (κινούμενο ρευστό) από τα διάφορα αντικείμενα. Δηλ. των κυμάτων που δημιουργούνταν κατ' οποιονδήποτε τρόπο στην επιφάνειά του. Η θεωρία αυτή εμφάνιζε εξ' αρχής πολλές αντινομίες και αδυναμία εξήγησης πλείστων όσων φαινομένων της οπτικής, όπως π.χ. πως ήταν δυνατόν το φως να διαπεράσει σαν ρευστό στερεά αντικείμενα όπως το γυαλί. Παρά το ότι πολύ σύντομα απορρίφθηκε προς χάριν των άλλων θεωριών, εντούτοις οδήγησε προς την κατεύθυνση της υιοθέτησης της κυματικής θεωρίας για το φως, γεγονός που έγινε πλήρως αποδεκτό μετά από δύο τουλάχιστον αιώνες.

Το 1621 – μια σημαντική στιγμή για την οπτική – ο Willebrord Snell (1591 – 1626) περιγράφει ακριβώς την πορεία των ακτίνων του φωτός μέσα από μια διαθλαστική επιφάνεια. Την ίδια εποχή ο Renè Descarts (1596 – 1650) δημοσιεύει το νόμο των ημίτονων, που αφορά τη διάθλαση του φωτός. Εκτός τούτου όμως στο σύγγραμμά του 'La Dioptrique' το 1637 εισηγείται την ιδέα ότι το φως διαδίδεται σαν τρόπος πίεσης (διαμήκεις διαταραχές) σ' ένα πανταχού παρόν ελαστικό μέσο τον 'αιθέρα'. Την ίδια περίπου εποχή ο Grimaldi (για τον οποίο ήδη αναφέραμε) και ο R. Hooke (1635 – 1703) παρατηρούν φαινόμενα περίθλασης. Ο τελευταίος στο βιβλίο του 'Micrographia' το 1665 αναφέρει ότι το φως είναι μια πολύ γρήγορη διαταραχή που κινείται μέσα σ' ένα μέσο με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Η άποψη αυτή αποτελεί και την απαρχή υιοθέτησης της κυματικής θεωρίας.

Κατά τα γνωστά, αυτός που εισήγαγε την σωματιδιακή θεωρία ήταν ο I. Newton (1642 – 1727). Αποδέχτηκε ότι το φως ήταν ένα ρεύμα από γρήγορα κινούμενα σωματίδια. Με τις απόψεις αυτές ήταν δυνατόν να εξηγηθούν τα εξής φαινόμενα: Της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός, της ανάκλασης και της διάθλασης. Η θεωρία αυτή έγινε ευρέως αποδεκτή μετά το 1687, το χρόνο δηλ. που ο Newton εξέδωσε τι 'Αρχές' του (Principia). Την ίδια εποχή ο Christian Huygens (1629 – 1695) προτείνει την κυματική του θεωρία. Υπέθεσε ότι από κάθε σημείο μιας ανακλώσας ή διαθλώσας επιφάνειας, εκπέμπονται σφαιρικά κυματίδια (wavelets). Σαν αποτέλεσμα, σε μια επόμενη χρονική στιγμή, το ανακλώμενο ή διαθλώμενο μέτωπο κύματος είναι η περιβάλλουσα αυτών των κυματιδίων. Με τη θεωρία του αυτή μπορούσαν να εξηγηθούν: Η ευθύγραμμη διάδοση του φωτός , η ανάκλαση, η διάθλαση καθώς και το φαινόμενο (με μια επιπλέον πρόταση όπως θα δούμε στα επόμενα) της διπλής διάθλασης του φωτός. Επίσης ασχολούμενος με τους κρυστάλλους του Ασβεστίτη (Ισλανδική κρύσταλλος), στους οποίους για πρώτη φορά είχε παρατηρηθεί η διπλή διάθλαση, ανακαλύπτει το φαινόμενο της πόλωσης του φωτός. Η εναντίωση του Newton προς την κυματική θεωρία, οφειλόταν στα αποτελέσματα του τρόπου με τον οποίο σχηματίζεται η σκιά, όταν το φως προσπίπτει σε αδιαφανή αντικείμενα. Ενώ τα υδάτινα και τα ακουστικά κύματα 'κατακλύζουν' εν

πολλοίς το χώρο της 'γεωμετρικής σκιάς' των αντικειμένων μετά την πρόσπτωσή τους σ' αυτά, δεν συμβαίνει το ίδιο (τουλάχιστον κατά τις παρατηρήσεις του) και για το φως. Ο ίδιος ο Newton βέβαια παρατηρούσε ασυνέπειες μεταξύ των δύο θεωριών και για το λόγο αυτό αναφερόταν σε ακτίνες φωτός (ρεύματα σωματιδίων) παρά σε σωματίδια. Οι διάδοχοί του όμως υιοθέτησαν πλήρως τη σωματιδιακή θεωρία, δίνοντας στα σωματίδια διάφορες ιδιότητες (μικρά – μεγάλα σε μέγεθος για την ερμηνεία του διασκεδασμού μέσω των πρισμάτων) καθώς και ότι πάνω τους δρούσαν δυνάμεις σύμφωνα με τον 2° νόμο του Newton. Επίσης προκειμένου να εξηγήσουν το φαινόμενο της πόλωσης, απέδωσαν και ασυμμετρίες στο σχήμα τους όπως θα δούμε στα επόμενα.

Πάντως ανεξαρτήτως της αποδοχής της σωματιδιακής θεωρίας (κινούμενα σωματίδια) ή της κυματικής (επιμήκους φύσης διαταραχές του 'αιθέρα'), ήταν σαφές ότι το φως κινούνταν με μεγάλη ταχύτητα. Το τελευταίο επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1676 από τον Olaf Römer (1644 – 1710). Ο Römer με τη βοήθεια αστρονομικών παρατηρήσεων της κίνησης ενός των δορυφόρων του πλανήτη Δία, υπολόγισε ότι η ταχύτητα του φωτός ήταν πεπερασμένη και ίση με 241.000 km/s.

Στις αρχές του $19^{ου}$ αιώνα ο Thomas Young (1773 – 1829) παρουσιάζει σε τρεις διαλέξεις του (12 Νοεμ. 1801, 1 Ιουλ. 1802 και 24 Νοεμ. 1803) στη Βασιλική Ακαδημία του Λονδίνου την κυματική θεωρία για το φως, συμπληρώνοντάς την με την αρχή της επαλληλίας. Εξηγούσε μ' αυτόν τον τρόπο τα φαινόμενα συμβολής από λεπτά υμένια, χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα του Newton. Οι απόψεις του όμως δεν γίνονται αποδεκτές. Στην Γαλλία την ίδια περίπου εποχή, ο Jean Fresnel (1788 – 1827) δουλεύει ανεξάρτητα την κυματική θεωρία για το φως, υιοθετώντας την αρχή του Huygens συνδυασμένη με την αρχή της επαλληλίας. Είναι η γνωστή μέχρι τις μέρες μας 'αρχή των Huygens – Fresnel'. Με την βοήθεια των: Francois Jean Arago (1786 – 1853), Pierre Simon de Laplace (1749 – 1827) και του Jean-Batiste Biot (1774 – 1862) η θεωρία του Fresnel αποκτά μαθηματική υπόσταση. Σαν αποτέλεσμα, έχουμε τον υπολογισμό προτύπων περίθλασης. Fresnel και Arago αναδεικνύουν πειραματικά την ύπαρξη μιας μικρής φωτεινής κηλίδας, στη σκιά ενός μικρού αδιαφανούς κυκλικού δίσκου (μετά την περίθλαση του φωτός από αυτόν). Το αποτέλεσμα αυτό, ήταν προβλέψιμο από την κυματική θεωρία. Το 1808 οι Ėtienne Luis Malus (1775 – 1812) και ο Fresnel προσπαθούν να εξηγήσουν με πειράματα τη διπλή διάθλαση του φωτός στους κρυστάλλους του Ασβεστίτη. Την ίδια περίπου εποχή – όπως θα δούμε λεπτομερώς στα επόμενα – οι Arago, Young και Fresnel συγκλίνουν στο ν' αποδώσουν εγκάρσιο χαρακτήρα στα κύματα που διαδίδονται μέσω του 'αιθέρα'. Ο ίδιος ο Fresnel με βάση την υπόθεση για τις εγκάρσιες πλέον μηχανικές διαταραχές του 'αιθέρα', αναδεικνύει τους τύπους που αφορούν τις τιμές των πλατών, για τις ανακλώμενες και διαθλώμενες σε οπτικά μέ-

σα δέσμες φωτός. Είναι οι γνωστές στις μέρες μας 'εξισώσεις Fresnel'. Με το πλάτος βέβαια ν' αφορά πλέον το πλάτος της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

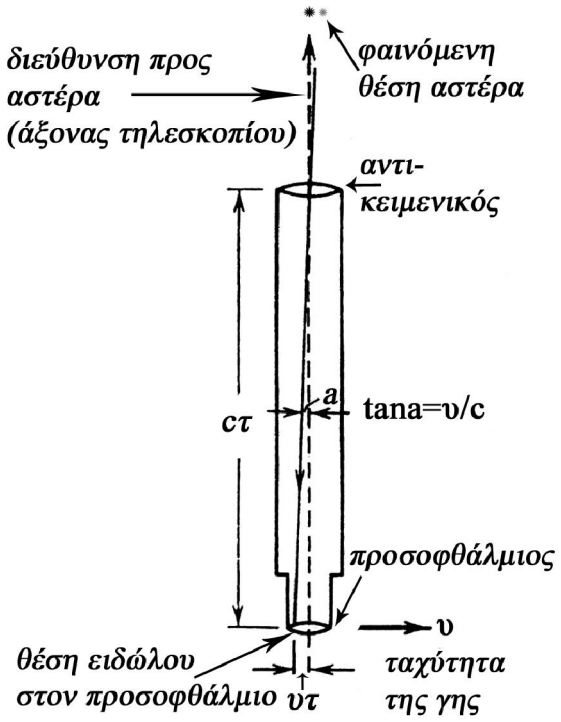
Από το 1825 η σωματιδιακή θεωρία για το φως παύει πλέον να έχει οπαδούς. Στα 1849 ο Armant Louis Fizeau (1819 – 1896) με πειράματά του στη γη, αποδεικνύει ότι η ταχύτητα του φωτός είναι 315.300 km/s. Επίσης στις 6 Μαΐου του 1850 ο Foucault με αναφορά του στην Ακαδημία Επιστημών, παρουσιάζει αποτελέσματα που αποδεικνύουν ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μεγαλύτερη από ότι στο νερό, αποτέλεσμα, που ήταν εντελώς αντίθετο από αυτό που προέκυπτε με βάση τις υποθέσεις της σωματιδιακής θεωρίας.

Την εποχή αυτή αναπτύσσεται πειραματικά σε μεγάλο βαθμό και ο ηλεκτρισμός με πρωτοπόρους τους: Michael Faraday (1791 – 1867) , Karl Friedrich Gauss (1777 – 1855) και André Marie Ampère (1775 – 1836). Ο Faraday για πρώτη φορά συνδέει το φως με τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Ο James Clark Maxwell (1831 - 1879) περί τη δεκαετία 1860-1870 συνθέτει τα υπάρχοντα μέχρι τότε πειραματικά δεδομένα του ηλεκτρομαγνητισμού και παράγει τις περίφημες εξισώσεις του. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει είναι το εξής: Το φως είναι μια εγκάρσια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, η οποία με μορφή κύματος διαδίδεται μέσω του 'αιθέρα'. Η ταχύτητα του φωτός όπως προέκυπτε από την εξίσωση κύματος για το κενό, είχε τη μορφή: $\upsilon = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$, όπου ε_0, μ_0 οι αντίστοιχες ηλεκτρικές και μαγνητικές του σταθερές του. Δεδομένου ότι οι τελευταίες ήταν πειραματικά προσδιορισμένες, από την αντικατάστασή τους στην τελευταία σχέση, προέκυψε το εκπληκτικό αποτέλεσμα ότι: $\upsilon \equiv c \simeq 300.000$ km/s. Δηλ. ότι επρόκειτο για την ταχύτητα του φωτός στο κενό. Το 1888 ο Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894), δημοσιεύει πειραματικά αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν τη θεωρία του Maxwell.

Η αποδοχή του αιθέρα σαν μέσου διάδοσης των κυμάτων του φωτός, είχε σαν αποτέλεσμα – όπως ήδη αναφέραμε – το να του αποδοθούν από τους ερευνητές διάφορες φυσικές ιδιότητες. Εφόσον π.χ. κατά προσέγγιση ήταν γνωστά το μέσο μήκος κύματος και η ταχύτητα του φωτός, μπορούσαν να υπολογίσουν την συχνότητα διαταραχής, που ήταν της τάξης του 10^{15} Hz. Για να μπορεί όμως ο αιθέρας να υποστηρίξει τη διάδοση διαταραχών με τέτοιες συχνότητες, θα έπρεπε οι δυνάμεις επαναφοράς κατά την ταλάντωσή του να ήταν πολύ μεγάλης κλίμακας. Βασικές απόψεις για τη φύση του προτάθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης των φαινομένων της λεγόμενης Οπτικής των κινουμένων σωμάτων (moving media optics)(βλ. Κεφ. 6: Συμβολή του φωτός). Τα πειράματά της συνέβαλλαν ουσιαστικά στη διευκρίνιση των 'ιδιοτήτων' του και τελικά – όπως θα δούμε στα επόμενα – στην απόρριψή του.

Ένα από αυτά ήταν που αφορούσε το λεγόμενο 'αστρικό σφάλμα' (stellar aberration) ή 'σφάλμα του φωτός' (aberration of light). Το 1725 ο James Bradley

(1693 – 1762), προσπαθούσε να υπολογίσει την απόσταση των αστέρων με τη μέθοδο του τριγωνισμού. Δηλ. στηριζόμενος στον εντοπισμό τους σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, δεδομένης της κίνησης της γης στην τροχιά της γύρω από τον ήλιο. Στην διάρκεια των μετρήσεών του έκανε την εξής σημαντική παρατήρηση: Ότι οι φαινόμενες θέσεις των αστέρων που παρατηρούνταν μέσω ενός τηλεσκοπίου, δεν ήταν οι πραγματικές τους θέσεις στο ουράνιο στερέωμα. Το γεγονός αυτό ερμηνευόταν – όπως θα δούμε στα επόμενα – από το ότι το φως από ένα αστέρα ναι μεν κινείται με την ταχύτητα του φωτός c εισερχόμενο στο τηλεσκόπιο, αλλά ταυτόχρονα το τηλεσκόπιο κινείται με την ταχύτητα υ που είναι η ταχύτητα περιστροφής της γης περί τον ήλιο. Υποθέτουμε ότι η πραγματική διεύθυνση ενός αστέ-



(Σχ. 1)

ρα είναι κάθετη στο επίπεδο που σχηματίζει η γη κατά την περιστροφή της περί τον ήλιο. Δηλ. η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης που ο άξονας του τηλεσκοπίου προσανατολίζεται προς τον αστέρα και του διανύσματος $\mathbf{\upsilon}$ της ταχύτητας περιστροφής της γης περί τον ήλιο είναι 90^0 καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τότε οι ακτίνες θα πέφτουν κάθετα στον αντικειμενικό φακό δηλ. παράλληλα με τον άξονά του. Όπως βλέπουμε από το (Σχ. 1), κατά τη διάρκεια του χρόνου τ που χρειάζεται το φως για να καλύψει την απόσταση $c\tau$ (αντικειμενικού – προσοφθαλμίου) το τηλεσκόπιο (μαζί με τη γη) θα κινηθεί κατά την απόσταση $\upsilon\tau$ στη διεύθυνση του $\mathbf{\upsilon}$. Το αποτέλεσμα θα είναι το εξής: Το είδωλο του αστέρα δεν θα βρίσκεται στο κέντρο του

προσοφθαλμίου αλλά θα είναι μετατοπισμένο προς την αντίθετη διεύθυνση περιστροφής της γης. Προκειμένου το είδωλο του αστέρα να βρεθεί στο κέντρο του, ο άξονα του τηλεσκοπίου θα πρέπει να στραφεί (περί άξονα κάθετο στο σχήμα μας και δεξιόστροφα) κατά μια γωνία a η οποία θα υπακούει στη σχέση $\tan a = \upsilon/c$. Στο γεγονός αυτό οφείλεται το ότι μέσω του τηλεσκοπίου (επειδή το μάτι μας βλέπει κατά την εφαπτομενική διεύθυνση αυτής της ακτίνας), δεν βλέπουμε την πραγματική αλλά τη φαινόμενη θέση ενός αστέρα. Είναι κατανοητό ότι οι φαινόμενες θέσεις (σε σχέση με τις πραγματικές) για ένα αστέρα (που φαίνεται σε διεύθυνση κάθετη στο επίπεδο περιστροφής της γης) και για παρατηρήσεις από διάφορες θέσεις της γης κατά την κίνησή της γύρω από τον ήλιο, θα βρίσκονται πάνω σ' ένα κύκλο. Ο Bradley μέσω αστρονομικών παρατηρήσεων, υπολόγισε ότι: $a \simeq 20,45''$. Τότε με τη βοήθεια της σχέσης $\tan a = \upsilon/c$ γνωρίζοντας τη υ ($\upsilon \simeq 27000\,\mathrm{m/s}$), βρήκε ότι: $c \simeq 303.000\,\mathrm{km/s}$.

Το 'αστρικό σφάλμα' ήταν επόμενο ν' αποτελέσει αντικείμενο προσπάθειας ερμηνείας του, με βάση τις επικρατούσες σωματιδιακή και κυματική θεωρία. Και οι δύο πέτυχαν του σκοπού τους, αλλά η δεύτερη έθετε σαν προϋπόθεση ότι η γη κινείται σε σχέση με τον ακίνητο 'αιθέρα', ή ισοδύναμα ότι ο 'αιθέρας' κινείται σε σχέση με την ακίνητη γη. Το αν η κίνηση της γης μέσω του 'αιθέρα' επηρεάζει με παρατηρήσιμο τρόπο το φως που προέρχεται από πηγές πάνω στη γη ή βρίσκονται στον εξωδιαστημικό χώρο, ασχολήθηκε πειραματικά ο Arago. Επιβεβαίωσε ότι δεν υφίστανται διαφορές, με την προϋπόθεση ότι η γη θα πρέπει να θεωρηθεί ακίνητη σε σχέση με το κινούμενο 'αιθέρα'. Στην προσπάθειά του ο Fresnel να ερμηνεύσει το 'αστρικό σφάλμα' με βάση την κυματική θεωρία, υπέθεσε ότι οι ακτίνες του φωτός κάμπτονται μερικώς (παρασύρονται) όταν διέρχονται από ένα διαφανές μέσο (όπως ήταν ο 'αιθέρας') που βρίσκεται σε κίνηση. Η θεωρία αυτή επιβεβαιώθηκε από τα πειράματα του Fizeau (βλ. Κεφ. 6: Συμβολή του φωτός, ΘΕΜΑ 1) (φως που περνάει από κινούμενα δοχεία με νερό) και του George Biddell Airy (1801 – 1892) (παρατήρηση αστέρων μέσω τηλεσκοπίου το οποίο ήταν γεμάτο με νερό). Ο Hendrik Anton Lorentz (1853 – 1928), υποθέτοντας ότι ο 'αιθέρας' βρίσκεται σε απόλυτη ακινησία παρουσιάζει μια θεωρία που καλύπτει τις ιδέες του Fresnel. Το 1879 ο Maxwell εισηγείται μια διαδικασία με την οποία θα μπορούσε να μετρηθεί η ταχύτητα με την οποία το ηλιακό σύστημα κινείται σε σχέση με τον 'αιθέρα'. Στηριζόμενος σ' αυτές τις απόψεις ο Albert Abraham Michelson (1852 – 1931) λίγα χρόνια αργότερα, πειραματίζεται με σκοπό να υπολογίσει κατά πόσο το φως επηρεάζεται από την κίνηση της γης μέσα στον 'αιθέρα'. Συγκεκριμένα επειδή η ταχύτητα του φωτός κατά τη διάδοσή του στον 'αιθέρα' είναι σταθερή και η γη κινείται σε σχέση μ' αυτόν, η ταχύτητα του φωτός μετρούμενη σε σχέση με τη γη, θα επηρεαζόταν από την κίνησή της. Τα αποτελέσματά του τα οποία δημοσιεύτηκαν το

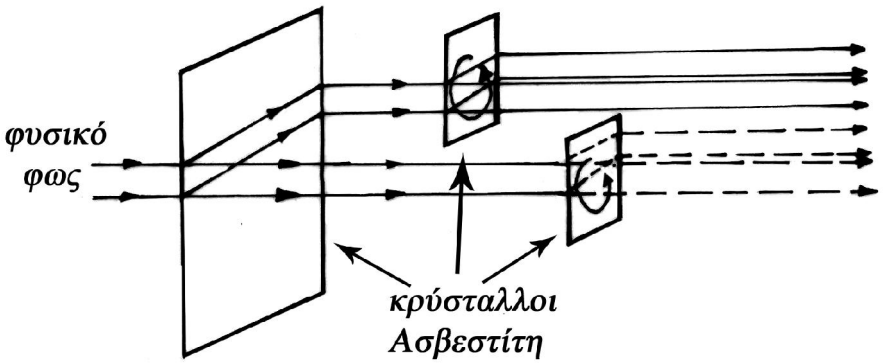
1881 έδειξαν ότι δεν υφίσταται μετρήσιμη κίνηση της γης σε σχέση με τον 'αιθέρα'. Το εκπληκτικό όμως αυτό αποτέλεσμα δεν προβλήθηκε ικανοποιητικά συνεπικουρούντος του γεγονότος ότι ο Lorentz ανακάλυψε στους υπολογισμούς του ορισμένα σφάλματα. Ο Michelson επανέλαβε τα πειράματά του με τη βοήθεια του Edward Williams Morley (1838 – 1923) και με όργανα πολύ μεγαλύτερης ακρίβειας (βλ. Κεφ. 6: Συμβολή του φωτός, ΘΕΜΑ 1) (πρόκειται για το περίφημο συμβολόμετρο του Michelson). Τα αποτελέσματά τους – τα οποία δεν μπορούσαν ν' αμφισβητηθούν από απόψεως ακρίβειας – δημοσιευμένα το 1887 οδηγούσαν στα ίδια συμπεράσματα: Ουδεμία σχετική κίνηση υφίσταται μεταξύ γης και 'αιθέρα'. Το γεγονός αυτό βέβαια απέκλειε τη δυνατότητα να ερμηνευθεί το 'αστρικό σφάλμα' με τις απόψεις του Fresnel. Αυτός ήταν ο λόγος που το 1899 ο Poincaré απορρίπτει για πρώτη φορά την έννοια του 'αιθέρα'.

Το 1905 ο Albert Einstein (1879 – 1955) εισάγει την 'Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας' όπου δεν υφίσταται η έννοια του 'αιθέρα'. Κατά τον ίδιο: 'Το φως διαδίδεται στον κενό χώρο με μια πεπερασμένη ταχύτητα ίση με c η οποία είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση κίνησης της εκπέμπουσας πηγής'. Έκτοτε την έννοια του αιθέρα (απόλυτο σύστημα συντεταγμένων), την αντικαθιστά η έννοια του πεδίου. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποκτά δική του οντότητα και τα πειράματα των Michelson- Morley, Fizeau και Airy ερμηνεύονται με την σχετικιστική κινηματική. Την 19 Οκτωβρίου του 1900 ο Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947) θέτει τις βάσεις αυτού που αργότερα θα ονομαστεί Κβαντομηχανική. Πρόκειται για τη θεωρία που θ' ασχοληθεί κυρίως με τα υποατομικά φαινόμενα. Το 1905 ο Einstein δέχεται τη κβαντική φύση του φωτός. Πρόκειται για μια καινούργια άποψη της σωματιδιακής θεωρίας για το φως βασισμένης στη κβάντωση του Η/Μ πεδίου. Το φως αποτελείται από 'σωματίδια' ενέργειας (quanta ενέργειας) τα γνωστά φωτόνια, με ενέργεια το καθένα $\mathcal{E} = h\nu$ όπου h η λεγόμενη σταθερή του Planck. Με βάση αυτές τις απόψεις ήταν δυνατόν να περιγραφούν πολλά φαινόμενα όπως π.χ. του φθορισμού, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο κ.λ.π., τα οποία αδυνατούσε να ερμηνεύσει η κυματική θεωρία.

Σε γενικές γραμμές η σχετικιστική περιγραφή, απάλλαξε το φως από τον 'αιθέρα' και απέδειξε τη συγγένεια μεταξύ της μάζας και της ενέργειας μέσω της σχέσης $\mathcal{E} = mc^2$ της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας. Δηλ. τον 'σωματιδιακό' του χαρακτήρα. Με την πάροδο του χρόνου επίσης έγινε προφανές ότι οι απόψεις περί σωματιδίων και κυμάτων οι οποίες μακροσκοπικά ήταν αμοιβαία αποκλειόμενες, στον μικρόκοσμο θα μπορούσαν να 'συγχωνευτούν'. Πράγματι πειράματα έδειξαν ότι 'σωματίδια' εκτός των φωτονίων, όπως ηλεκτρόνια, νετρόνια κ.λ.π. έδιναν φαινόμενα συμβολής και περίθλασης, γεγονός που δεν απέκλειε και τον κυματικό τους χαρακτήρα. Πράγματι η κβαντομηχανική απέδειξε ότι σωματίδια (ανεξάρτητα αν

διαθέτουν μάζα ηρεμίας ή όχι) που η ορμή τους είναι p, συνδέονται με ένα κύμα του οποίου το μ.κ. λ δίνεται μέσω της σχέσης: $p = h/\lambda$.

Το θεμελιώδες φαινόμενο – αν όχι το καθοριστικότερο – που συνεισέφερε στην κατανόηση της φύσης του φωτός, είναι αυτό της ***πόλωσης***. Η ανακάλυψή του βασίζεται στο φαινόμενο της διπλής διάθλασης του φωτός μέσω της Ισλανδικής κρυστάλλου (Ασβεστίτη), και διαπιστώθηκε πειραματικά για πρώτη φορά από τον Erasmus Bartholinus (1625 – 1698) το 1669. Δέσμη φωτός που προσπίπτει στον κρύσταλλο, διαχωρίζεται στο εσωτερικό του σε δύο και κατά την έξοδό τους από αυτόν διαδίδονται παράλληλα. Ο Huygens το 1690, εξέτασε πειραματικά (Σχ. 2)



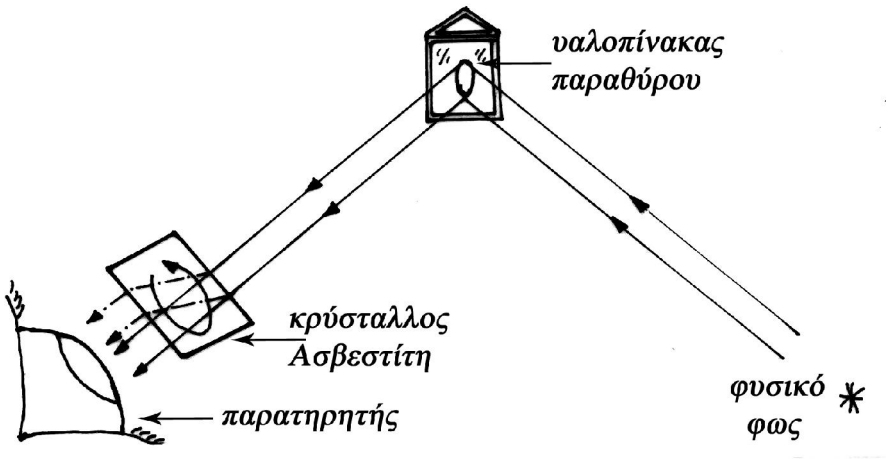
(Σχ.2)

την καθεμιά από τις δύο δέσμες που προέκυπταν από έναν πρώτο κρύσταλλο Ασβεστίτη (όταν σ' αυτόν έπεφτε μια δέσμη φωτός), μ' έναν δεύτερο κρύσταλλο πανομοιότυπο με τον πρώτο. Διαπίστωσε ότι όταν ο δεύτερος κρύσταλλος περιστρεφόταν γύρω από τον άξονα που ταυτιζόταν με οποιαδήποτε από τις δύο δέσμες που προερχόταν από τον πρώτο κρύσταλλο, παρατηρούνταν κατάσβεση διαδοχικά εκάστης των δύο αναδυόμενων από τον δεύτερο κρύσταλλο. Μάλιστα οι κατασβέσεις απαντούνταν σε ορθογώνιες μεταξύ τους θέσεις του δευτέρου κρυστάλλου, εξ' ου και ένα είδος 'ορθογωνιότητας' μεταξύ των δύο αυτών δεσμών.

Η πρότασή του – που αφορούσε την προσπάθεια ερμηνείας του φαινομένου της διπλής διάθλασης του φωτός – ήταν ότι μετά την πρόσπτωσή του στην επιφάνεια του κρυστάλλου, από κάθε σημείο της, δεν αναπτυσσόταν πλέον στο εσωτερικό του μόνο σφαιρικά κυμάτια, αλλά ταυτόχρονα και άλλα ελλειψοειδούς μορφής. Ο Newton προκειμένου να ερμηνεύσει το ίδιο φαινόμενο με βάση την σωματιδιακή θεωρία, αντέταξε την ιδέα ότι οι ακτίνες του φωτός αποκτούν 'πλευρές' (sides) (δηλ. 'πλατύνονται'), δεδομένου ότι απέδωσε στα σωματίδια που τις συγκροτούν ασυμμετρία ως προς τις διαστάσεις τους. Η εμφανιζόμενη 'ορθογωνιότητα' που αναδύθηκε από το πείραμα του Huygens αποτέλεσε γι' αυτόν μια σοβαρή αντίρρηση όσον

αφορά την αποδοχή της κυματικής θεωρίας για το φως. Πράγματι την εποχή εκείνη σαν κύματα εννοούσαν μόνο τα ηχητικά τα οποία βέβαια ήταν επιμήκη (δηλ. οι διαταραχές του μέσου, γινόταν κατά τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος). Τέτοιου είδους κύματα, δεν θα μπορούσαν με κανένα τρόπο να ερμηνεύσουν την 'ορθογωνιότητα' των κυμάτων του φωτός. Πιστευόταν δηλ. ότι τα κύματα του φωτός – αν υπήρχαν – θα ήταν παρόμοια με τα ηχητικά.

Όπως όμως ήδη αναφέραμε, στις αρχές του 19^{ου} αιώνα, ο Young μεταξύ των ετών 1801 – 1803, με τις τρεις διαλέξεις του στη Βασιλική Ακαδημία του Λονδίνου, τόνωσε το ενδιαφέρον γύρω από την κυματική θεωρία. Μάλιστα εκτέλεσε ένα από τα σημαντικότερα πειράματα της Οπτικής, που αφορούσε στη συμβολή δύο δεσμών φωτός . Το πείραμα ήταν πολύ απλό και συνίστατο στην επαλληλία δύο δεσμών φωτός σ' ένα πέτασμα, που προερχόταν από ένα διάφραγμα

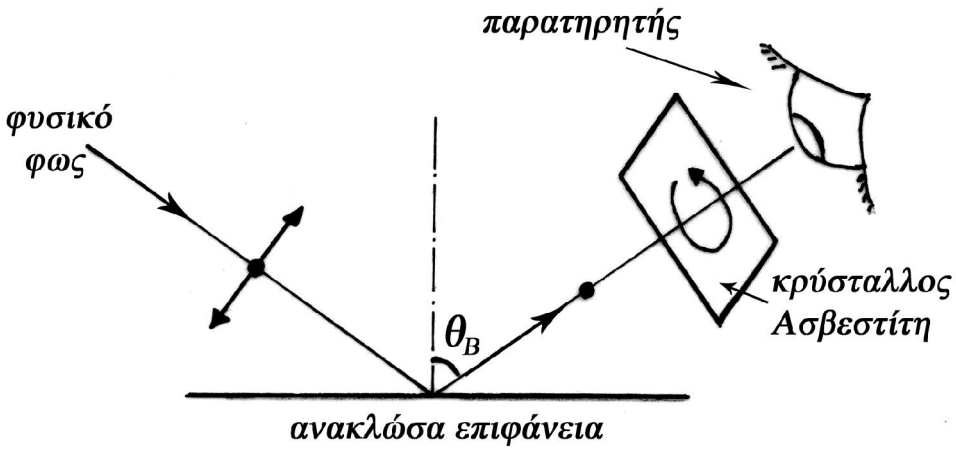


(Σχ. 3)

με δύο κυκλικά ανοίγματα, το οποίο φωτιζόταν με τη σειρά του από μία μοναδική πηγή. Αποτέλεσμα ήταν η εμφάνιση στο πέτασμα κροσσών συμβολής. Η εν πολλοίς όμως – με κυματικούς όρους – ποιοτική ερμηνεία του πειράματος, δεν έγινε αποδεκτή. Το 1809 ο Malus (αξιωματικός του Γαλλικού στρατού) έκανε μια σημαντική ανακάλυψη, παρατηρώντας δια μέσου ενός κρυστάλλου Ασβεστίτη τα είδωλα που προερχόταν μέσω της ανάκλασης του φωτός στα τζάμια των παραθύρων του Palais de Luxembourg στο Παρίσι (Σχ. 3). Περιστρέφοντας τον κρύσταλλο, είδε ότι τα δύο είδωλα (λόγω του φαινομένου της διπλής διάθλασης του φωτός) σχεδόν κατασβένονταν διαδοχικά και μάλιστα σε ορθογώνιες θέσεις. Η ερμηνεία που έδωσε στηριζόταν στη σωματιδιακή θεωρία του Newton με το δεδομένο της δομής που εμφάνιζαν τα τελευταία σε μια διεύθυνση. Υπέθεσε ότι η προσπίπτουσα στον κρύσταλλο δέσμη φωτός περιλαμβάνει τυχαία προσανατολι-

σμένα σωματίδια. Καθώς όμως αυτά περνούν δια μέσου του, προσανατολίζονται σε δύο κυρίαρχες διευθύνσεις. Σε αναλογία με τα μαγνητικά δίπολα, ο Malus πρότεινε ότι τα σωματίδια απ' τα οποία αποτελούνταν οι ακτίνες του φωτός, έχουν 'πόλους'. Για το λόγο αυτό αποκάλεσε το 'προσανατολισμένο αυτό φως', ***πολωμένο φως***.

Ένα άλλο πολύ ενδιαφέρον πείραμα που εκτελέστηκε από τον Sir David Brewster (1781 – 1868) το 1812, αφορούσε την μελέτη της συμπεριφοράς του φωτός που ανακλάται από τις γυάλινες επιφάνειες. Ανακάλυψε ότι όταν το φως ανακλάται από μια επίπεδη επιφάνεια (Σχ. 4), σε συγκεκριμένη γωνία (η γωνία



(Σχ. 4)

αυτή ονομάζεται γωνία Brewster θ_B), τότε η ανακλώμενη παρουσιάζει ιδιομορφία, σε σχέση με το αν η γωνία πρόσπτωσης ήταν μια οποιαδήποτε άλλη. Πράγματι για τυχαία γωνία πρόσπτωσης, ο έλεγχος της ανακλώμενης κατά τη δίοδό της μέσω ενός κρυστάλλου Ασβεστίτη, έδινε δύο δέσμες φωτός (λόγω της διπλής διάθλασης). Κατά την περιστροφή όμως του κρυστάλλου, οι εντάσεις των δεσμών αυξομειωνόταν χωρίς όμως οποιαδήποτε από αυτές να κατασβεσθεί. Για μια όμως συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης θ_B, η ανακλώμενη (που κατά τα γνωστά ανακλάται με την ίδια γωνία ως προς την κάθετη στο σημείο πρόπτωσης), έδινε μέσω του κρυστάλλου δύο δέσμες οι οποίες όμως κατά την περιστροφή του, εκάστη διαδοχικά κατασβένονταν πλήρως. Για την συγκεκριμένη αυτή περίπτωση, ο Brewster διαπίστωσε ένα σημαντικό γεγονός: Ότι υφίσταται απλή σχέση μεταξύ της θ_B και του δείκτη διάθλασης της γυάλινης επιφάνειας. Ήταν η πρώτη φορά που μπόρεσε να γίνει προσδιορισμός του δ.δ. ενός υλικού μέσω του φαινομένου της ανάκλασης και όχι της διάθλασης.

Όπως είχαμε αναφέρει, περί το 1825 η σωματιδιακή θεωρία για το φως είχε πάψει πλέον να έχει οπαδούς. Η κυματική θεωρία του Fresnel και αυτών που την υποστήριζαν, έχαιρε πλήρους αποδοχής δεδομένου ότι με τη βοήθειά της μπορούσαν να εξηγηθούν πλείστα όσα φαινόμενα από τις περιοχές της Οπτικής όπως: Της συμβολής της περίθλασης και της πόλωσης του φωτός. Ο ίδιος ο Fresnel εφάρμοσε με επιτυχία την κυματική θεωρία για να ερμηνεύσει τη διάδοση του φωτός στα ανισότροπα υλικά δηλ. τους κρυστάλλους, καθώς και στα οπτικά ενεργά υλικά. Επίσης το 1851 έγινε από τον Fizeau ένα σημαντικό πείραμα που αποδείκνυε ότι η ταχύτητα του φωτός σε οπτικά πυκνότερο μέσο ήταν μικρότερη από ότι στο κενό γεγονός που αποτελούσε συμπέρασμα της κυματικής θεωρίας και ερχόταν σε αντίθεση με την σωματιδιακή η οποία προέβλεπε το αντίθετο. Εντούτοις μέχρι το 1852 στην κυματική θεωρία υπέβοσκε μια κρίση, της οποίας οι ρίζες αναγόταν αρκετά χρόνια πριν – περί το 1817 – και αφορούσε μάλιστα τον ίδιο τον Fresnel που την είχε θεμελιώσει.

Πράγματι εκείνη την εποχή ο Fresnel και ο συνάδελφός του Arago είχαν εκτελέσει μια σειρά πειραμάτων που αφορούσαν την επίδραση της πόλωσης στο πείραμα συμβολής του Young. Τι δεδομένη όμως χρονική περίοδο για την κυματική θεωρία, η διάδοση του φωτός θεωρούνταν ότι γινόταν με την βοήθεια των επιμηκών διαταραχών του 'αιθέρα', γεγονός το οποίο ήταν αδύνατο να ερμηνεύσει τα πειραματικά τους αποτελέσματα. Η συζήτηση των αποτελεσμάτων τους με τον Young, είχε σαν αποτέλεσμα ο τελευταίος ν' απορρίψει την άποψη περί επιμηκών διαταραχών του 'αιθέρα' και να υιοθετήσει αντί γι' αυτές τις εγκάρσιες. Πρότεινε δηλ. ότι τα κύματα του φωτός διαδίδονται μέσω εγκαρσίων διαταραχών του 'αιθέρα' και συνίστανται από δύο ορθογώνιες συνιστώσες με την τρίτη (κατά τη διεύθυνση της διάδοσης) να είναι μηδενική. Η πρόταση αυτή αποτέλεσε σημαντική ερμηνευτική διέξοδο, όχι όμως – όπως θα δούμε στα επόμενα – και καταλυτική. Και ο λόγος ήταν ο εξής:

Τα προαναφερόμενα πειραματικά αποτελέσματα κατέληξαν σ' αυτό που σήμερα είναι γνωστό σαν οι τέσσερις νόμοι των Fresnel – Arago. Προκειμένου ο Fresnel να τους περιγράψει μαθηματικά, χρησιμοποίησε την προτεινόμενη από τον Young κυματική θεωρία για τις εγκάρσιες διαταραχές του ***πλάτους*** των κυμάτων. Με βάση τη θεωρία αυτή, οι τέσσερις νόμοι μπορούσαν να εκφραστούν αλλά με την προϋπόθεση ότι το χρησιμοποιούμενο φως ήταν πλήρως πολωμένο. Δηλ. συνιστούσαν μια από τις καταστάσεις όπως: Το γραμμικά, το κυκλικά ή το εν γένει ελλειπτικά πολωμένο φως. Όμως τα πειράματά τους είχαν διεξαχθεί ως επί το πλείστον με φυσικό φως (μη πολωμένο) ή με μερικά πολωμένο (δηλ. μίγμα φυσικού και μιας εκάστης των προαναφερόμενων καταστάσεων πόλωσης). Επομένως ο Fresnel ήταν υποχρεωμένος να περιγράψει με μαθηματικό τρόπο το μη πολωμένο φως. Παρά τις μεγάλες του όμως προσπάθειες το τελευταίο ήταν αδύνατον να

επιτευχθεί με βάση την κατά πλάτος περιγραφή των κυμάτων. Ο πρόωρος θάνατός του το 1827, έδωσε τη σκυτάλη της επίλυσης του προβλήματος στους διαδόχους του, με τα ίδια όμως αποτελέσματα. Ούτε βέβαια μέχρι τις μέρες μας μπόρεσε να επιτευχθεί. Στο γεγονός αυτό συνίστατο η κρίση που αφορούσε την κυματική θεωρία, η οποία δεν ήταν δυνατόν να εκφράσει – με βάση την περιγραφή των κυμάτων κατά πλάτος – το φυσικό και το μερικά πολωμένο φως και κατά προέκταση τους νόμους των Fresnel – Arago.

Την 'χαμένη τιμή' της κυματικής θεωρίας για το φως, έσωσε ο Sir George Gabriel Stokes (1819 – 1903) με τη δημοσίευση το 1852 της περίφημης για την κλασσική οπτική εργασίας του με τίτλο: 'On the Composition and Resolution of Streams of Polarized Light from Different Sources'. Στο άρθρο αυτό ο Stokes εγκαταλείπει την άκαρπη προσπάθεια περιγραφής των κυμάτων με βάση το πλάτος τους και προσφεύγει σ΄ ένα πειραματικό ορισμό των διαφόρων καταστάσεων πόλωσης, συμπεριλαμβανομένων όμως του φυσικού και των μερικά πολωμένων φώτων. Δηλ. οδηγείται σε μια διατύπωση των πολωμένων φώτων με βάση μια μετρίσιμη ποσότητα που δεν είναι άλλη παρά η ***ένταση*** του φωτός. Παρεμπιπτόντως αναφέρουμε ότι μετρήσεις του πλάτους των διαταραχών στην περιοχή του ορατού φωτός με κοινούς ανιχνευτές είναι αδύνατη, δεδομένης της υψηλής τους συχνότητας ($\simeq 10^{15}$ Hz). Στην εργασία του ο Stokes, σαφώς πλέον αποδεικνύει ότι όλες οι καταστάσεις πόλωσης του φωτός συμπεριλαμβανομένων και του φυσικού και μερικά πολωμένου φωτός, μπορούν να περιγραφούν μαθηματικά (στα πλαίσια της κυματικής θεωρίας) με τη βοήθεια μετρήσεων έντασης. Οι μετρήσεις αυτές οδηγούν στον προσδιορισμό τεσσάρων μεγεθών που ονομάζονται παράμετρες Stokes. Με τη βοήθειά τους, χαρακτηρίζονται όλα τα στοιχεία οποιασδήποτε κατάστασης πόλωσης (δηλ. η ελλειπτικότητα, το αζιμούθιο και η στροφικότητά της). Επίσης με βάση αυτές τις παραμέτρους, είναι δυνατή η μαθηματική έκφραση των νόμων της συμβολής των Fresnel – Arago.

Παρά το ότι η προαναφερόμενη εργασία του Stokes κατέληγε σε σαφώς σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά την περιγραφή και την ερμηνεία της πόλωσης του φωτός, εντούτοις δεν έτυχε ιδιαίτερης προβολής από τον ίδιο τον συγγραφέα. Παρατηρείται δηλ. μια επιφύλαξη, όσον αφορά τις εφαρμογές τις οποίες θα μπορούσε να έχει. Ο λόγος για τον ίδιο ήταν πραγματικός και εξηγείται από τα πειραματικά αποτελέσματα που περιλαμβάνονται σε μια δεύτερη εργασία του, που δημοσιεύτηκε δύο μήνες αργότερα (δηλ. το Μάιο του 1852). Ο τίτλος της ήταν: 'On the Change of the Refrangibility of Light'. Το ερευνητικό της αντικείμενο ήταν ο φθορισμός των διαλυμάτων. Μετά από μια τεράστια ερευνητική προσπάθεια ο Stokes κατέληξε στο γνωστό νόμο που φέρει και το όνομά του. Ότι δηλ. 'το μήκος κύματος της φθορίζουσας ακτινοβολίας, είναι μεγαλύτερο από εκείνης που προκάλεσε το φθορισμό'. Ήταν η πρώτη από μια σειρά εργασίες, που 75 χρό-

νια αργότερα, θα οδηγούσε – όπως ήδη αναφέραμε – στην Κβαντομηχανική άποψη για το φως. Αυτός ήταν ο λόγος που για 50 περίπου χρόνια – μέχρι το θάνατό του το 1903 – δεν μπόρεσε να ερμηνεύσει το ιδιάζον αυτό φαινόμενο με βάση την κλασσική Οπτική και μάλιστα την κυματική θεωρία του φωτός. Η ερμηνεία του φθορισμού, προτάθηκε δύο χρόνια αργότερα – το 1905 – από τον Einstein στην εργασία του 'On the Heuristic Point of View Concerning the Generation and Conversion of Light'. Βάση της θεωρίας αποτέλεσε η κβαντική υπόθεση για το φως του Planck, δηλ. η φωτονική του φύση. Μετά από αυτά, μπορούμε να κατανοήσουμε το λόγο για τον οποίο ο Stokes στα συμπεράσματα της πρώτης του εργασίας – του Μαρτίου του 1852 – παρά την καταλυτική επιβεβαίωση της κυματικής θεωρίας του φωτός, δεν εξέφρασε ένα δικαιολογημένο ενθουσιασμό.

Αν και οι πολωτικές παράμετρες του Stokes αποτελούν ένα δυναμικό εργαλείο έρευνας και κατανόησης του πολωμένου φωτός, καθώς και της αλληλεπίδρασής του με την ύλη, πρακτικά η εργασία του αγνοήθηκε για το πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα του ενός περίπου αιώνα. Η σπουδαιότητά του για πρώτη φορά αναγνωρίστηκε από τον S.Chandrasekhar (1910 –1995) όταν ο τελευταίος χρησιμοποίησε τις παραμέτρους του Stokes το 1940, για να συμπεριλάβει φαινόμενα πόλωσης του φωτός στις εξισώσεις διάδοσης της ακτινοβολίας. Έκτοτε και μέχρι τις μέρες μας, η θεωρία του Stokes συνιστά τη βάση, για αναρίθμητες εργασίες θεωρητικής και τεχνικής φύσης.