

Η Οπτική από την άποψη της ιστορικής της εξέλιξης

Γεώργιος Μήτσου

Εργαστήριο Φυσικής, Τμήμα Μηχανικών
Ενεργειακής Τεχνολογίας Τ.Ε., Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό
Ίδρυμα (ΤΕΙ) Αθήνας, Αγ. Σπυρίδωνος, 12210 Αιγάλεω, email:gmitsou@teiath.gr

Περίληψη

Η συναρπαστική ιστορία της Οπτικής είναι στενά δεμένη με την ανάπτυξη της σύγχρονης επιστήμης. Η ιχνηλασία πτυχών της ιστορικής της εξέλιξης, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, μας φέρνει σε επαφή με τη συσσωρευμένη γνώση χιλιάδων ετών. Σ' αυτή την εργασία θα αναφερθούμε στα πλέον σημαντικά βήματα στην εξέλιξη αυτού του σημαντικού κλάδου της Φυσικής, συμπεριλαμβάνοντας και τις θεωρίες που αναφέρονται στη φύση του φωτός, σωματιδιακής, κυματικής, ηλεκτρομαγνητικής και της διπλής με σωματιδιακά και κυματικά χαρακτηριστικά. Στη διάρκεια αυτής της διαδρομής θα αναζητήσουμε και αρκετούς από τους βασικούς δημιουργούς που έπαιξαν σημαντικό ρόλο στη δόμηση της εννοιολογικής μας αντίληψης σχετικά με το φως, από τους αρχαίους Έλληνες φιλοσόφους έως τους πρωτοπόρους της θεωρίας της Κβαντικής Ηλεκτροδυναμικής.

Λέξεις κλειδιά: Οπτική, Ιστορία οπτικής, Γεωμετρική Οπτική, Φυσική Οπτική, Οπτική και χρώμα

"Το φως είναι, εν ολίγοις, η πιο εκλεπτυσμένη μορφή της ύλης"
Louis de Broglie

Εισαγωγή

Η Οπτική είναι η επιστήμη που μελετά το φως και όλα τα φαινόμενα που συνδέονται με τη δημιουργία του, τη διάδοση και ανίχνευσή του. Υπό την ευρύτερη έννοια του όρου σ' αυτή περιλαμβάνονται όλα τα φαινόμενα που σχετίζονται με την εκπομπή ακτινοβολίας στο ορατό, στο υπέρυθρο και στο υπεριώδες φάσμα. Η Γεωμετρική Οπτική θεωρεί ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα και διαπραγματεύεται τους νόμους που ελέγχουν την ανάκλαση και διάθλαση των ακτίνων του φωτός. Η Φυσική Οπτική μελετά οπτικά φαινόμενα που εξαρτώνται από την κυματική φύση του φωτός, όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση. Η Κβαντική Οπτική διαπραγματεύεται τα φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση της ύλης με το φως, υπό το πρίσμα της θεωρίας της κβαντομηχανικής.

Η Οπτική ως επιστήμη είναι συμφορής με την ανάπτυξη του δυτικού πολιτισμού και έχει αποτελέσει πηγή έμπνευσης για ένα μεγάλο αριθμό διακεκριμένων επιστημόνων που διαχρονικά προσπάθησαν και βελτίωσαν τις γνώσεις μας αναφορικά με το φως, το χρώμα και τελικά την ίδια τη διαδικασία της όρασης. Έρευνες στις ιδιότητες του φωτός έχουν συμβάλλει ζωτικά στην ανάπτυξη της Φυσικής. Δεν θα ήταν υπερβολή να πούμε ότι χωρίς μια βαθιά κατανόηση της φύσης του φωτός, η σύγχρονη κοινωνία, όπως τη γνωρίζουμε, απλά δεν θα μπορούσε να υπάρξει.

Σ' αυτή την ενότητα θα περιγράψουμε τα πλέον σημαντικά βήματα που έγιναν κατά την εξέλιξη αυτής της καταπληκτικής επιστήμης και τον, επί χιλιάδες χρόνια, αγώνα της ανθρωπότητας στην κατανόηση της διαφανούς και ενίοτε μυστικιστικής φύσης του φωτός.

Καὶ εἶπεν ὁ Θεός· γενηθήτω φῶς· καὶ ἐγένετο φῶς

Παλαιά Διαθήκη

1. Η Αρχή

Έτσι ξεκινά η Γένεση τη Βιβλική αναζήτηση της αρχής της δημιουργίας του κόσμου. Κατά τη Γένεση, τη χρονική στιγμή μηδέν, δεν υπήρχε τίποτε. Υπήρχε μόνο φως και ο Θεός το διαχώρισε από το σκοτάδι, γιατί το φως ήταν καλό. Ονόμασε δε το φως ημέρα και το σκοτάδι νύχτα και είναι αξιοσημείωτο ότι η δημιουργία του φωτός προηγείται της δημιουργίας του ήλιου, του ανθρώπου και ότι άλλου δημιουργήθηκε από τη θεϊκή δύναμη (Newman & Eckelmann, 1977).

Η πίστη της ύπαρξης του φωτός ως μοναδικής οντότητας στην αρχή της δημιουργίας του Σύμπαντος - Κόσμου μπορεί να ανιχνευτεί και στη σημερινή εποχή στην κοσμολογική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης (Big-Bag), σύμφωνα με την οποία από τις πρώτες στιγμές της δημιουργίας μέχρι τα πρώτα 380,000 χρόνια, το σύμπαν βρισκόταν σε τρομερά θερμή κατάσταση λόγω της ακτινοβολίας. Το φως – ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έλουζε στην ολότητά του το σύμπαν με μια εκτυφλωτική καταιγίδα λάμψης. Το ψυχρό υπόλοιπο της δημιουργίας του Σύμπαντος της οποίας η έναρξη δηλώθηκε με την «γενέθλια λάμψη» είναι ακόμη ορατό μετά από 13.5 δισεκατομμύρια χρόνια από την αρχή, ως μικροκυματική ακτινοβολία στο περιβάλλον.

Απόγονοι του φωτός είναι σήμερα οι γαλαξίες, τα άστρα, οι πλανήτες αλλά και ο άνθρωπος. Παράλληλα με την εξέλιξη των ειδών στον πλανήτη μας, εξελίχθηκε και η αίσθηση της όρασης στο ζωικό βασίλειο. Σχεδόν 10 δισεκατομμύρια χρόνια από τις πρώτες στιγμές που σηματοδότησαν την αρχή της δημιουργίας, το σύμπαν είδε την εξέλιξη της όρασης ως αίσθησης, ικανής να δει το φως. Και πριν 2,500 χρόνια οι άνθρωποι άρχισαν να αναρωτούνται τι ήταν αυτό που έβλεπαν τα μάτια τους. Τι ακριβώς συμβαίνει όταν βλέπουμε; Μια βασική απάντηση σ' αυτό το ερώτημα είναι ότι αυτό που βλέπουμε είναι αναπαράσταση του φυσικού κόσμου τριγύρω μας. Βλέπω σημαίνει γίνομαι αποδέκτης μιας πληροφορίας που μου μεταδίδει το περιβάλλον. Ποια είναι όμως η διαδικασία με την οποία παραλαμβάνεται αυτή η πληροφορία; Είναι μήπως παθητική ή ενεργητική;

Η πρώτη προσπάθεια να εντοπιστεί η έννοια φως αναφέρεται σε αρχαίους πολιτισμούς και είχε κυρίως θρησκευτική διάσταση αφού το φως θεωρούνταν ως ένδειξη εκδήλωσης θεϊκής παρουσίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα αποτελούσε ο Ρα¹, ο θεός ήλιος της αρχαίας Αιγύπτου για τον οποίο οι αρχαίοι Αιγύπτιοι θεωρούσαν ότι το φως του ηλίου εκπήγαζε μέσα από τα μάτια του (Wells, 1992).

¹ <https://en.wikipedia.org/wiki/Ra>

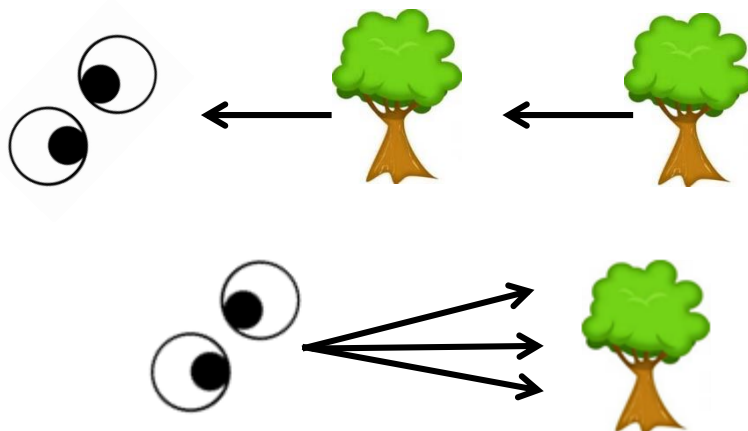
2. Αρχαία Ελλάδα και Αλεξάνδρεια

Οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι ήταν μεταξύ των πρώτων που προσπάθησαν να εξηγήσουν πως λειτουργεί η όραση διατυπώνοντας δυο κυρίως θεωρίες. Κατά την πρώτη από αυτές το φως θεωρήθηκε ως μια εσωτερική φωτιά που ξεκινάει μέσα από το μάτι και που κατά την έξοδό της από την κόρη του ματιού γέμιζε τον περιβάλλοντα χώρο με μια ενεργό ουσία που θα μπορούσε να αλληλεπιδράσει με τις διάφορες επιφάνειες και να ανακλαστεί από αυτές και τότε το ανακλώμενο φως που θα επέστρεφε στα μάτια θα απεκάλυπτε τη «θέα». Ένα μηχανικό ανάλογο αυτής της ιδέας μπορούμε να δούμε πίσω από την αρχή λειτουργίας του ραντάρ: ένα σήμα που εκπέμπεται από έναν πομπό ανακλάται στην επιφάνεια ενός μακρινού αντικειμένου και κατά την επιστροφή του συλλαμβάνεται από ένα δέκτη που βρίσκεται πλησίον του πομπού. Με αυτό τον τρόπο ο πομπός τροφοδοτεί το δέκτη με ένα σήμα που μεταφέρει πληροφορίες σχετικά με το σχήμα, την απόσταση του αντικειμένου απ' αυτόν και την ταχύτητα με την οποία κινείται. Ο δέκτης από μόνος του δεν μπορεί να «δει» ή να ανιχνεύσει το αντικείμενο. Χρειάζεται το σήμα του πομπού, το οποίο θα σταλεί έξω, θα ανακλαστεί από το αντικείμενο και θα επιστρέψει, έχοντας καταγράψει πληροφορίες για το αντικείμενο.

Κατά τη δεύτερη θεωρία πίστευαν ότι ήταν πιθανόν ότι το φως να εκπέμπεται από την επιφάνεια των ίδιων των αντικειμένων. Σύμφωνα με αυτή την ιδέα τα μάτια μας είναι παθητικά όργανα και λειτουργούν ως αποδέκτες όλων εκείνων των φωτεινών ακτίνων που εκπέμπονται από τα τριγύρω αντικείμενα, τις οποίες τελικά συνθέτουν ως αντιπροσωπευτικές εικόνες των αντικειμένων.

Ο Εμπεδοκλής (490-430 π.Χ) κατά τον 5^ο π.Χ αιώνα διατύπωσε τον ισχυρισμό ότι η ύλη αποτελείται από τέσσερεις «ρίζες» ή στοιχεία: φωτιά, αέρα, χώμα και νερό. Πίστευε ότι η θεά Αφροδίτη έφτιαξε το ανθρώπινο μάτι από αυτά τα στοιχεία και ότι άναψε τη φωτιά σ' αυτό, η οποία εξερχόμενη έκανε δυνατή τη διαδικασία της όρασης. Αν αυτό ήταν σωστό, τότε κάποιος θα μπορούσε να βλέπει το βράδυ εξ ίσου καλά όπως και κατά τη διάρκεια της ημέρας. Υπ' αυτή την έννοια θεώρησε ότι υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ των ακτίνων που προέρχονται από τα μάτια με τις ακτίνες μιας άλλης πηγής, όπως για παράδειγμα ο ήλιος. Από αυτό το σημείο και μετά οι θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων σχετικά με το φως, συνυπάρχουν με τις θεωρίες της όρασης. Ο Δημόκριτος (460-370 π.Χ) περίπου το 400 π.Χ αναφέρει πως η όραση συνίσταται σε μια συνεχή πρόσληψη της εικόνας των ορατών αντικειμένων. Η εικόνα είναι το σχήμα που ανακλάται στην κόρη του ματιού. Θεωρεί έτσι ότι ορισμένα είδωλα, που αποσπώνται διαρκώς από τα ορατά αντικείμενα, διατηρώντας, ωστόσο, το σχήμα τους, διεισδύουν μέσα στα μάτια παράγοντας την όραση. Σύμφωνα με το Δημόκριτο *«κάποια ομοιώματα που ξεκολλούν από τα αντικείμενα έχοντας σχήμα όμοιο μ' αυτά πάνε και πέφτουν πάνω στα μάτια αυτών που βλέπουν κι έτσι παράγεται η αίσθηση της όρασης»*. Αρκετοί από τους πρώτους Έλληνες φιλοσόφους θεωρούσαν ως σωστή την ιδέα της όρασης που δημιουργείται από την εικόνα που εκπέμπεται από τα αντικείμενα, αλλά κατά την αρχή του 4^{ου} π.Χ αιώνα ο Πλάτων και ο Αριστοτέλης είχαν αρχίσει να διαμορφώνουν την αντίληψη – μάλλον πρόκειται για περίπτωση κλασσικού συμβιβασμού - ότι κατά τη δημιουργία της όρασης συνέβαινε μια αμφίδρομη διαδικασία μεταξύ ματιού - αντικειμένων. Υποστήριζαν ότι πέραν της εικόνας

που ξεκινά από την επιφάνεια των αντικειμένων και ανακλάται στο μάτι,



Σχήμα 1. Αμφίδρομη διαδικασία μεταξύ ματιών και ορατών αντικειμένων

υπάρχει και μια «εσωτερική φωτιά» που εξέρχεται από το μάτι και πέφτει, ως ακτίνες, στα αντικείμενα (Σχήμα 1). Η συνάντηση αυτών των δυο είχε ως αποτέλεσμα να γίνεται το αντικείμενο ορατό από τον παρατηρητή. Αυτή η διπλή προσέγγιση – δυο είδη φωτός, εξωτερικό και εσωτερικό – στη διαδικασία της όρασης, κυριάρχησε για χιλιάδες χρόνια και άρχισε να μεταβάλλεται κατά την περίοδο των πρώτων Μεσαιωνικών χρόνων, όταν αναζητήθηκαν και άλλες εναλλακτικές ιδέες.

Στο έργο του Αριστοτέλη «Προβλήματα» για την πατρότητα του οποίου αρκετοί μελετητές διαφωνούν, αποτυπώνεται η παρατήρηση ενός σημαντικού οπτικού φαινομένου. Τα ανοίγματα που υπάρχουν ανάμεσα στα φύλλα των δέντρων και που διαφέρουν μεταξύ τους, επηρεάζουν, ανάλογα με την απόσταση που έχουν από το έδαφος, το φωτεινό ίχνος που αφήνει ο ήλιος στο έδαφος όταν περνά ανάμεσα τους. Το ίχνος αυτό γίνεται κυκλικό όταν η απόσταση είναι μεγάλη ενώ αναπαριστά το σχήμα του ανοίγματος σε μικρή απόσταση. Αυτό συμβαίνει σύμφωνα με τον Αριστοτέλη γιατί οι ακτίνες του ήλιου είναι ευθείες και ευθεία είναι και η γραμμή του αντικειμένου από το οποίο περνούν ανάμεσα και συνεπώς, η προβολή του φωτός γίνεται και αυτή σε ευθεία (Δέδες, 2005).

Παρά το γεγονός ότι αρκετές από τις κλασικές θέσεις των Ελλήνων φιλοσόφων αποδείχτηκαν λανθασμένες, σε σχέση με τις σύγχρονες φυσικές θεωρίες, εν τούτοις συνεισέφεραν στην αναζήτηση και ανάπτυξη νέων ιδεών αναφορικά με το φως και την αλληλεπίδρασή του με την ύλη. Μάλιστα τα θεμέλια της Γεωμετρικής Οπτικής, όπως ισχύει μέχρι και σήμερα, τέθηκαν μερικώς από τον Ευκλείδη ο οποίος το 300 π.Χ περίπου στο έργο του Οπτική διατύπωσε μια από τις πρώτες θεωρίες που συνδέουν γεωμετρία και όραση. Ο ίδιος εισήγαγε την έννοια της φωτεινής ακτίνας η οποία αναπαριστάνεται γεωμετρικά από μια ευθεία γραμμή. Αυτές τις ακτίνες τις αντιμετώπιζε ως λεπτές ίνες φωτός που ταξίδευαν (ξεκινώντας από τα μάτια) προς συγκεκριμένη κατεύθυνση σε ευθεία γραμμή – ιδιότητα που αργότερα σχετίστηκε με την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός. Με βάση την ιδέα αυτή ο Ευκλείδης ισχυρίστηκε ότι η όραση αποτελεί μια σύνθεση όλων των αντικειμένων που βρίσκονται μέσα σε ένα κώνο ακτίνων φωτός του οποίου η κορυφή εδράζεται στο κέντρο του ματιού του

παρατηρητή. Το γεγονός αυτό συνδυαζόμενο με την ιδέα ότι οι φωτεινές ακτίνες ακολουθούν τη συντομότερη οδό κατά τη διάδοσή τους, όπως περιέγραψε ο Ήρων το 100 περίπου π.Χ. τον οδήγησε στην εξήγηση του φαινομένου της ανάκλασης το οποίο και περιέγραψε με μαθηματικούς όρους (Howard & Wade, 1996; Smith, 1998).

3. Αραβικός κόσμος και Ισλάμ

Σημαντική ήταν η συνεισφορά του Αραβικού κόσμου στην ανάπτυξη της οπτικής. Στα χρόνια του Ευρωπαϊκού Μεσαίωνα ένας μεγάλος αριθμός στοχαστών στον Αραβικό κόσμο ασχολήθηκε με τη μελέτη της Οπτικής, παράγοντας αξιόλογο έργο. Γνωστότερος από τους Άραβες μελετητές είναι ο Ibn al-Haytham ή Alhazen (965–1040) όπως είναι γνωστός στους Ευρωπαίους μελετητές του. Ο Alhazen μελέτησε τους Έλληνες φιλοσόφους, και πραγματοποίησε σειρά εμπειρικών ερευνών στην Οπτική (Howards & Rogers, 1995; Howard, 1996; Smith, 1998; Rahim & Rodrigues, 2015). Εξέτασε την ανατομία των οφθαλμών διαφόρων ζώων για να προσδιορίσει την κατασκευή τους και να αποκτήσει αντίληψη περί της λειτουργίας τους. Μέσω αυτών των ερευνών του, ξαναδούλεψε τις ιδέες που είχε εκφράσει ο Ευκλείδης υποστηρίζοντας ότι το μάτι ήταν το ίδιο ένας υποδοχέας φωτός και δεν υπήρχε ανάγκη να εξέρχονται από το εσωτερικό του φωτεινές ακτίνες. Το φως, σύμφωνα με τον Alhazen, ήταν καθαρά ένα εξωτερικό φαινόμενο που φώτιζε τα αντικείμενα τριγύρω μας, ανακλάτο στην επιφάνειά τους και αλληλεπιδρώντας με το μάτι δημιουργούσε την εικόνα του περιβάλλοντος χώρου.

Παρά το γεγονός ότι ο Alhazen ανέστρεψε την αίσθηση περί της κατεύθυνσης των ακτίνων, όπως την εξέφρασε ο Ευκλείδης, εν τούτοις επιβεβαίωσε τη γεωμετρική προσέγγιση των Ελλήνων φιλοσόφων, ότι δηλαδή οι φωτεινές ακτίνες διαδίδονται σε ευθεία γραμμή και ότι ακολουθούν τη συντομότερη διαδρομή μεταξύ του αντικειμένου και του ματιού. Είναι ενδιαφέρον να δει κανείς ότι, ενώ ο Alhazen γνώριζε ότι το μάτι δομείται βασικά από ένα φακό και ότι οι φακοί αναστρέφουν τις εικόνες, εν τούτοις δεν δεχόταν ότι ο φακός παίζει ρόλο στο σχηματισμό των εικόνων στο μάτι. Αντίθετα, πίστευε ότι αυτό που βλέπουμε είναι αυτό που σχηματίζεται στο εξωτερικό τμήμα του φακού. Το φως δηλαδή δεν διαπερνά το φακό για να σχηματίσει την εικόνα γιατί αυτό, πίστευε, θα δημιουργούσε ανεστραμμένο είδωλο, πράγμα που δεν υφίσταται αφού η εικόνα που βλέπουμε είναι ορθή. Εδώ συναντάμε μια από τις μεγαλύτερες, ακόμη και σήμερα, ψευδαισθήσεις της όρασης: αυτό που βλέπει το μάτι είναι στην πραγματικότητα το ανεστραμμένο είδωλο του κόσμου που μας περιβάλλει και είναι το μυαλό μας εκείνο που αναστρέφει τελικά την εικόνα που αντιλαμβανόμαστε.

Επίσης ο Alhazen βελτίωσε τη θεωρία του Πτολεμαίου περί διάθλασης του φωτός και πραγματοποίησε τα πρώτα πειράματα σχετικά με την ανάλυση του φωτός σε επί μέρους χρώματα. Ασχολήθηκε ακόμη με την εξήγηση φυσικών φαινομένων όπως σκιές, ουράνιο τόξο, έκλειψη κ.λπ. Αντελήφθη επίσης ότι το φως πρέπει να ταξιδεύει με μεγάλη ταχύτητα κι ότι η διάθλασή του οφείλεται στη μεταβολή της ταχύτητάς του καθώς διέρχεται από διαφορετικά υλικά.

Ο Avicenna (980–1037) θεωρεί ότι η ταχύτητα του φωτός είναι πεπερασμένη, καθώς παραδεχόμενος ότι η αντίληψη του φωτός δημιουργείται από την εκπομπή κάποιου είδους σωματιδίων, από μια φωτοβόλο πηγή, θα πρέπει η ταχύτητά του να είναι πεπερασμένη. Ο Abu Rayhan al - Biruni (973–1048) επίσης συμφωνεί περί του πεπερασμένου της ταχύτητας του φωτός και ήταν ο πρώτος που ανακάλυψε ότι η ταχύτητα του φωτός είναι υψηλότερη από την ταχύτητα του ήχου. Προς το τέλος του 13^{ου} αρχές του 14^{ου} αιώνα ο Qutb al-Din al-Shirazi (1236–1311) συνέχισε τις έρευνες του Ibn al-Haytham και ήταν ο πρώτος που εξήγησε σωστά το φαινόμενο του ουράνιου τόξου.

4. Η κατάσταση στην Ευρώπη

Κατά το 12^ο και 13^ο αιώνα, τα βασικότερα κέντρα μάθησης βρίσκονται πια στα πανεπιστήμια που δημιουργούνται στις πόλεις της Ευρώπης, όπως, στο Παρίσι, Οξφόρδη κ.λπ. Τον 13^ο αιώνα ο Roger Bacon στο έργο του *Opus Majus*² που δημοσιεύτηκε το 1267 αναφέρεται μεταξύ άλλων στην κατασκευή νέων οπτικών οργάνων, τα οποία ενισχύουν την όραση. Όπως ο ίδιος αναφέρει «μπορούμε να κατασκευάσουμε διαφανή σώματα και να τα τοποθετήσουμε κατά τέτοιο τρόπο, σε σχέση με αυτό που θέλουμε να παρατηρήσουμε, ώστε οι ακτίνες να διαθλαστούν και να καμφθούν προς οποιαδήποτε κατεύθυνση και υπό οποιαδήποτε γωνία θέλουμε για να δούμε κοντινά ή μακρινά μας αντικείμενα. Έτσι που να μπορούμε να δούμε από απίστευτη απόσταση και τα πιο μικρά γράμματα και τους κόκκους σκόνης και της άμμου». Στο ίδιο έργο του αναφέρεται και στο φαινόμενο των φωτεινών προβολών, ένα θέμα που θα απασχολήσει κυρίως το ερευνητικό του ενδιαφέρον.

Προς το τέλος του 13ου αιώνα, Ιταλοί τεχνίτες στην επεξεργασία του γυαλιού έφτιαξαν φακούς που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή διοπτρών αλλά και στη διόρθωση της ελαττωματικής όρασης που προκαλούνταν από την πρεσβυωπία. Αυτό ήταν ένα σημαντικό επίτευγμα αφού μέχρι εκείνη τη στιγμή οι φακοί χρησιμοποιούνταν μόνο για τη δημιουργία φωτιάς, ως μεγεθυντικοί φακοί καθώς και για διακοσμητικούς λόγους. Εντούτοις, η ανακάλυψη αυτή δεν προσέελκυσε το επιστημονικό ενδιαφέρον που θα μπορούσε να εξηγήσει τη βελτίωση της όρασης μέσω αυτών των φακών (Rasmussen, 2012).

Προχωρώντας προς την Αναγέννηση, οι διάφορες ιδέες αναφορικά με τη σχεδίαση και λειτουργία απλών οπτικών οργάνων (διόπτρες, κάτοπτρα, φακοί κ.λπ.) άρχισαν να συγκλίνουν με τις σημερινές αντιλήψεις μας. Εκείνο που δεν είχε ακόμη γίνει απόλυτα σαφές ήταν η ταχύτητα με την οποία διαδίδονταν το φως. Γνώριζαν όμως ότι ήταν εξαιρετικά υψηλή. Θα μπορούσε άραγε να διανύσει μια απόσταση στιγμιαία;

5. Η Οπτική στην Αναγέννηση

Κατά τη διάρκεια αυτής της ιστορικής περιόδου πολλές επιστήμες, ανάμεσά τους και η Οπτική, γνώρισαν μεγάλη άνθηση.

Ο Leonardo da Vinci (1452–1519), συνέχισε τα πειράματα που ξεκίνησε ο Alhazen και αναφέρονταν στο ζήτημα των φωτεινών προβολών μέσα από οπές, τα οποία χρησιμοποίησε στην προβολή των ηλιακών εκλείψεων χωρίς να

² https://en.wikipedia.org/wiki/Opus_Majus

τίθεται σε κίνδυνο το ανθρώπινο μάτι, δημοσιεύοντας μετά από εκτενή έρευνα στο σύγγραμμά του *Codex Atlanticus*³ (1502), την πρώτη εκτενή περιγραφή της *camera obscura* (σκοτεινός θάλαμος) ή *pinhole camera* όπως είναι σήμερα γνωστή.

Ο Leonardo στο ίδιο σύγγραμμα έγραψε μεταξύ άλλων: «Όταν οι εικόνες από αντικείμενα που φωτίζονται εισέρχονται σε ένα σκοτεινό θάλαμο, περνώντας από μια μικρή κυκλική οπή, μπορείς να δεις όλα αυτά τα αντικείμενα επάνω σε ένα χαρτί, στα φυσικά τους σχήματα και χρώματα». Διατύπωσε επίσης την άποψη ότι υπάρχει αναλογία μεταξύ ακουστικών κυμάτων και κυμάτων φωτός. Τέλος διατύπωσε την άποψη ότι το φως είναι ένα σωματίδιο που ταλαντώνεται και το χρώμα του διαμορφώνεται από τη συχνότητα ταλάντωσής του.

Ο Γαλιλαίος (1565–1642) στο τελευταίο του βιβλίο (1638) *Discourses and Mathematical Demonstrations Relating to Two New Sciences*, περιέγραψε τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να μετρηθεί η ταχύτητα του φωτός. Η βασική του ιδέα περιλάμβανε δυο παρατηρητές ευρισκόμενους χιλιόμετρα μακριά ο ένας από τον άλλο, κρατώντας ο καθένας τους μια λυχνία φωτός. Ο πρώτος παρατηρητής θα άνοιγε το διάφραγμα της λυχνίας του, ξεκινώντας ταυτόχρονα να μετρά. Αμέσως, μόλις ο δεύτερος παρατηρητής έβλεπε το φως από τη λυχνία του πρώτου παρατηρητή, θα άνοιγε το διάφραγμα της δικής του λυχνίας. Αν η αντίδραση των παρατηρητών στο ερέθισμα ήταν αρκετά γρήγορη, τότε, αν η ταχύτητα του φωτός ήταν πεπερασμένη ποσότητα, ο πρώτος παρατηρητής θα κατέγραφε μια καθυστέρηση στην ενεργοποίηση της δεύτερης λυχνίας. Γνωρίζοντας, επομένως την απόσταση μεταξύ των δυο παρατηρητών και το χρόνο καθυστέρησης των φωτεινών σημάτων, η ταχύτητα του φωτός θα μπορούσε, κατ' αρχήν, να προσδιοριστεί. Δυστυχώς, λόγω του ότι ο χρόνος της καθυστέρησης μεταξύ των δυο σημάτων φωτός δεν μπορούσε να μετρηθεί με ακρίβεια, το πρώτο αυτό πείραμα απέτυχε. Χρειάστηκαν, τελικά, δυο ακόμη αιώνες πριν γίνει το τελικό πειραματικό βήμα στον προσδιορισμό της ταχύτητας του φωτός.

Προς το τέλος του 16^{ου} αιώνα, Ολλανδοί κατασκευαστές διοπτρών σε μια προσπάθεια να διευκολύνουν την μεγέθυνση της προβολής μακρινών αντικειμένων, συνδύασαν ένα σύστημα φακών που αποτέλεσε την αρχή της ανακάλυψης του τηλεσκοπίου (Strano, 2009; Willach, 2001). Ο Γαλιλαίος το 1609 ήταν ο πρώτος που αντελήφθη την επιστημονική σημασία αυτού του οργάνου και κατάφερε να κατασκευάσει το δικό του τηλεσκόπιο ξεκινώντας μια σειρά ουράνιων παρατηρήσεων.

Σε μια ευτυχή για την Οπτική συγκυρία, γύρω στο 1620, διατυπώνεται τελικά από τον Snell (1591–1626) ο νόμος της διάθλασης, από τους πλέον σημαντικούς νόμους της οπτικής μέχρι σήμερα, που περιγράφει την πορεία των ακτίνων του φωτός καθώς περνά από την οριακή επαφή δυο διαφορετικών στρωμάτων και φέρει το όνομά του (Duval et al., 2006).

Ο Descartes (1596–1650) που το 1637 στο σύγγραμμά του *La Dioptrique* εισηγήθηκε την ιδέα ότι το φως διαδίδεται σε ένα ελαστικό μέσο, τον αιθέρα, προσπάθησε να εξηγήσει το νόμο του Snell, χρησιμοποιώντας ως μοντέλο ένα μηχανικό ανάλογο του φωτός, θεωρώντας ότι αποτελείται από μικροσκοπικά

³ https://en.wikipedia.org/wiki/Codex_Atlanticus

σωματίδια και δημοσίευσε το νόμο των ημίτονων, που αφορά τη διάθλασή του (Sabra, 1981). Στο ίδιο έργο θεωρεί, λανθασμένα, ότι το φως διαδίδεται γρηγορότερα σε πυκνότερα οπτικά μέσα παρά σε πιο αραιά. Την ίδια εποχή ο Grimaldi (1618–1663) παρατηρεί φαινόμενα περίθλασης, τα οποία περιγράφει στο βιβλίο *Physico – Mathesis de Lumine coloribus et iride, aliisque annexis libri* που εκδόθηκε μετά το θάνατό του. Όμως και ο Robert Hooke (163–1703) στο βιβλίο του *Micrographia*, που σηματοδοτεί ένα σημείο καμπής της επιστήμης γενικότερα, το 1665 περιγράφει φαινόμενα περίθλασης και θεωρεί ότι το φως είναι μια ιδιαίτερα συμμετρική διαταραχή που κινείται σ' ένα μέσο με μεγάλη ταχύτητα. Αν και η θεωρία του δεν ήταν ακριβώς σωστή, εν τούτοις έθεσε το πλαίσιο μέσα στο οποίο αναπτύχθηκε η θεωρία περί της κυματικής φύσης του φωτός.

6. Σωματιδιακή Φύση του Φωτός

Ο πρώτος που διαπραγματεύθηκε μια θεωρία περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός ήταν ο Alhazen στο *Βιβλίο της Οπτικής* (1021). Θεώρησε ότι οι ακτίνες αποτελούν μια ροή σωματιδίων ενέργειας που κινούνται σε ευθείες γραμμές με πεπερασμένη ταχύτητα. Τα αποκαλεί μικρά τμήματα φωτός που διατηρούν μόνο αυτές τις ιδιότητες που μπορεί να διαπραγματευθεί η γεωμετρία και αποδεικνύονται πειραματικά. Την ίδια περίοδο ο Avicenna προτείνει την ιδέα ότι «το φως το αντιλαμβανόμαστε λόγω της εκπομπής κάποιου είδους σωματιδίων από μια ακτινοβολό πηγή».

Ο Gassendi (1592–1655) σε μια εργασία του που δημοσιεύτηκε γύρω στα 1660, αναφέρεται στο φως ως σωματίδια, μια θεωρία που ο Newton, μελετώντας την σε νεαρή ηλικία, θεώρησε ότι ήταν καλύτερη από τη θεωρία του Descartes για τον αιθέρα.

Όπως όμως είναι γνωστό ο Newton ήταν εκείνος που εισήγαγε τη θεωρία περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός (Optiks, 1704). Θεώρησε ότι το φως ήταν ένα κινούμενο ρεύμα σωματιδίων και υπ' αυτή την έννοια ερμηνεύτηκαν⁴ τα φαινόμενα της ευθύγραμμης διάδοσης καθώς και αυτά της ανάκλασης και διάθλασης του φωτός. Η θεωρία του αυτή έγινε ευρέως αποδεκτή, ειδικά επειδή η φήμη του ήταν ήδη σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο αντίστοιχο με αυτήν του Αριστοτέλη, μετά τη δημοσίευση του έργου του *Principia Mathematica* (1687)⁵. Η φήμη του Newton βοήθησε στην επικράτηση της θεωρίας περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός κατά το 18^ο αιώνα.

Κατά το έτος 1666 στο Cambridge κατασκεύασε ένα τριγωνικό πρίσμα από γυαλί το οποίο φώτισε με μια ακτίνα ηλιακού φωτός, την οποία άφησε να περάσει από ένα παράθυρο μέσω μιας μικρής κυκλικής οπής. Παρατηρώντας την εικόνα που δημιουργήθηκε με αυτόν τον τρόπο σε ένα πέτασμα από χαρτί είδε ότι το λευκό φως από το παράθυρο είχε διαχωριστεί σε κόκκινο, κίτρινο, πράσινο, μπλε και ιώδες. Οι σύγχρονοί του θεώρησαν τα αόρατα αυτά χρώματα (δεδομένου ότι δεν ήταν αντιληπτά κατά την παρατήρηση της ηλιακής ακτίνας) ως φαντάσματα (ghosts) και αποκαλούσαν τους εαυτούς τους παρατηρητές φαντασμάτων (ghost watchers). Ghost όμως στα λατινικά σημαίνει φάσμα (spectrum λατ. = είδωλο - εικόνα στην ψυχή). Μόλις στα τέλη του 19ου αιώνα

⁴ <https://en.wikipedia.org/wiki/Opticks>

⁵ https://en.wikipedia.org/wiki/Philosophi%C3%A6_Naturalis_Principia_Mathematica

η παρατήρηση των φασμάτων έγινε γνωστή ως φασματοσκοπία (spectroscopy), όρος που χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Sir Arthur Schuster το 1882 κατά τη διάρκεια μιας διάλεξης στη Royal Society (Βασιλική Εταιρεία) (Schuster, 1911).

7. Κυματική Φύση του Φωτός

Με δεδομένο την πεπερασμένη ταχύτητα του φωτός, το επόμενο ερώτημα που έπρεπε να απαντηθεί ήταν «τι είναι τελικά το φως;» Είναι ένα κυματικό φαινόμενο ή κινούμενα μικρά σωματίδια; Ο Newton είχε ξεκαθαρίσει από το 1704 την άποψή του ότι το φως ήταν μια ροή από διαφορετικού μεγέθους σωματίδια και ενώ ο Hooke⁶ (1672⁷) είχε υποστηρίξει μια εναλλακτική θεωρία περί της συμπεριφοράς του φωτός ως κύμα όπου οι δονήσεις είναι κάθετες ως προς την διεύθυνση διάδοσης του φωτός, ήταν τελικά ο Christian Huygens (1629 – 1695) που πρότεινε το 1678 αναλυτικά μια θεωρία για την κυματική φύση του φωτός. Στην εργασία του *Traite de la Lumiere*⁸ (1678 – στα Γαλλικά), ο Ολλανδός Huygens εξέφρασε τις αρχές της κυματικής οπτικής θεωρώντας το φως ως ένα οδεύον μέτωπο κύματος. Η βασική του ιδέα είναι να θεωρήσουμε ότι φως προερχόμενο από μια φωτεινή πηγή διαδίδεται ως διαδοχικά σφαιρικά κυματίδια και ότι σε μια επόμενη στιγμή κάθε περιβάλλουσα αυτών των κυμάτων συνιστά ένα νέο μέτωπο κύματος. Ένα καθημερινό ανάλογο αυτής της αρχής είναι η διάδοση των ακουστικών κυμάτων. Με αυτό το μοντέλο ο Huygens ήταν σε θέση να εξηγήσει τόσο την ευθύγραμμη διάδοση του φωτός όσο και τα φαινόμενα της ανάκλασης και διάθλασης.

Μέχρι το 1801 που ο Young (1773 – 1829) πραγματοποίησε το πολύ γνωστό και ιστορικό πείραμά της διπλής σχισμής, η φύση του φωτός, αν δηλαδή το φως ήταν κυματικό ή σωματιδιακό φαινόμενο, δεν είχε αποσαφηνιστεί. Όπως προαναφέραμε, οι δυο επικρατούσες μέχρι τότε θεωρίες ήταν αυτή του Νεύτωνα που θεωρούσε το φως ως σωματίδια και του Huygens που θεωρούσε τη φύση του φωτός κυματική. Το τέλος του 18ου αιώνα χαρακτηρίστηκε από την επικράτηση της άποψης περί της κυματικής φύσης του φωτός. Η απεικόνιση της συμβολής δυο συμφώνων κυμάτων που παρουσιάστηκε από το Young το 1801 στο ιστορικό πείραμα της διπλής σχισμής, ήταν μια καθαρή απόδειξη ότι το φως είναι κυματικό φαινόμενο. Την ίδια εποχή περίπου, ο Fresnel (1788 – 1827) που δουλεύει ανεξάρτητα την κυματική θεωρία για το φως, υιοθετεί και βελτιώνει την αρχή του Huygens, γνωστή ως αρχή των Huygens – Fresnel: «αν ένα επίπεδο μονοχρωματικό κύμα προσπέσει σε πέτασμα που φέρει ένα άνοιγμα, τότε όλα τα σημεία στο επίπεδο του ανοίγματος μπορεί να θεωρηθούν ως δευτερογενείς σημειακές πηγές που εκπέμπουν σφαιρικά κύματα και αυτές οι σημειακές πηγές αντικαθιστούν την πραγματική πηγή η οποία πλημμυρίζει το πέτασμα, ενώ το ίδιο το πέτασμα απορροφά την ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτό». (Μήτσου, 2016; Mollon, 2003).

Την εργασία του αυτή την υπέβαλε σε ένα διαγωνισμό της Γαλλικής Ακαδημίας Επιστημών που ήταν στα πλαίσια της επανεκτίμησης της ορθότητας των δυο θεωριών, αν δηλαδή το φως ήταν σωματιδιακό ή κυματικό

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Hooke

⁷ <http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/NATP00005>

⁸ https://en.wikipedia.org/wiki/Treatise_on_Light

φαινόμενο. Η θεωρία του Fresnel υποστηρίχτηκε σ' αυτό το διαγωνισμό από τον Arago ο οποίος ήταν και ο επικεφαλής της επιτροπής. Εκτελώντας ο ίδιος το πείραμα του Fresnel με μεγαλύτερη προσοχή στις λεπτομέρειές του κατάφερε να αποδείξει την ορθότητα της θεωρίας του, επιτυγχάνοντας τον σχηματισμό μιας μικρής φωτεινής κηλίδας, στη σκιά ενός μικρού αδιαφανούς κυκλικού δίσκου, αφού πρώτα το φως υπέστη περίθλαση από αυτόν. Με δεδομένο ότι το αποτέλεσμα αυτό το προέβλεπε η κυματική θεωρία, η επιστημονική κοινότητα, στο μεγαλύτερο τμήμα της, πείστηκε για την ορθότητα των ισχυρισμών του, ότι δηλαδή η φύση του φωτός ήταν κυματική και έτσι το πείραμα του Arago, γνωστό ως κηλίδα του Arago, ήταν ο αποφασιστικός παράγοντας που έκρινε το ερώτημα περί της φύσης του φωτός (Worrall, 1989; Crosland, 2002).

Ένας άλλος υποστηρικτής της κυματικής θεωρίας ήταν ο Euler (1707 – 1783). Στην εργασία του (1746) *Nova theoria lucis et colorum*, υποστηρίζει ότι το φαινόμενο της περίθλασης θα μπορούσε εύκολα να εξηγηθεί από την κυματική θεωρία.

Το αδύναμο σημείο της κυματικής θεωρίας ήταν ότι τα οπτικά κύματα, όπως τα ακουστικά, χρειάζονταν ένα μέσο για τη διάδοσή τους. Η υπόθεση περί της ύπαρξης του «αιθέρα» που πρώτος είχε υποστηρίξει ο Descartes, αμφισβητήθηκε δυνατά κατά το τέλος του 19^{ου} αιώνα από το περίφημο πείραμα των Michelson-Morley.

Η θεωρία του Newton περί της σωματιδιακής φύσης του φωτός, θεωρούσε ότι το φως διαδίδεται γρηγορότερα σε πυκνότερα μέσα, ενώ η κυματική θεωρία του Huygens και των άλλων μελετητών θεωρούσε ακριβώς το αντίθετο. Όμως, κατά την περίοδο αυτή, η ταχύτητα του φωτός δεν μπορούσε να προσδιοριστεί με αρκετή ακρίβεια, τέτοια ώστε να δείξει ποια από τις δυο θεωρίες ήταν η σωστή. Ο Foucault (1819 – 1868), ήταν ο πρώτος που το κατάφερε να πραγματοποιήσει μια αρκετά ακριβή μέτρηση, την οποία παρουσίασε με αναφορά του στη Γαλλική Ακαδημία Επιστημών το 1850. Κατ' αυτή, η ταχύτητα του φωτός στο κενό ήταν μεγαλύτερη από την ταχύτητά του στο νερό και έτσι η κλασσική σωματιδιακή θεωρία τελικά εγκαταλείφθηκε.

Την ίδια εποχή έχει ξεκινήσει να αναπτύσσεται και ο ηλεκτρισμός σε αρκετά καλό πειραματικό επίπεδο και στο προσκήνιο εισέρχεται ο Maxwell (1831–1879), ένας από τους γίγαντες της επιστήμης του 19^{ου} αιώνα, που το στίγμα του έχει χαραχθεί στα θεμέλια πολλών κλάδων της Φυσικής.

8. Η Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία

Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του 19^{ου} αιώνα από τον Maxwell, ανοίγοντας έτσι μια καινούργια εποχή στην ιστορία του. Ο Maxwell κατά τη δεκαετία του 1860 συνέθεσε όλα τα μέχρι τότε γνωστά πειραματικά δεδομένα του ηλεκτρομαγνητισμού σε ένα ενιαίο θεωρητικό πλαίσιο και το 1873 δημοσιεύει το έργο του *A Treatise on Electricity and Magnetism*, στο οποίο περιέχεται μια ολοκληρωμένη μαθηματική περιγραφή σχετικά με τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, γνωστή ως «Εξισώσεις του Maxwell». Σ' αυτό διατυπώνει το αξίωμα ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μια εγκάρσια διαταραχή που διαδίδεται στο χώρο, πράγμα που επιβεβαιώνει και ο Hertz (1857–1894), οκτώ

χρόνια μετά το θάνατό του και έτσι οι εξισώσεις του αποτέλεσαν τα θεμέλια της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

Το έργο του Maxwell στον ηλεκτρομαγνητισμό θεωρείται η δεύτερη μεγάλη ενοποίηση στη Φυσική, με την πρώτη να είναι ο νόμος της παγκόσμιας έλξης του Newton. Οι εξισώσεις του, συνοψίζονται περιληπτικά στα παρακάτω. Η πρώτη περιγράφει τη δημιουργία ηλεκτρικών πεδίων από ηλεκτρικά φορτία, γνωστής και ως νόμος του Gauss και αναφέρει ότι το μέγεθος του ηλεκτρικού πεδίου εξερχόμενο οποιασδήποτε κλειστής επιφάνειας (ηλεκτρική ροή) είναι ανάλογο του συνολικού φορτίου που περικλείεται από την επιφάνεια. Μ' άλλα λόγια σχετίζεται με το πειραματικό δεδομένο ότι τα ηλεκτρικά φορτία είναι πηγές των ηλεκτρικών πεδίων. Η δεύτερη εξίσωση αποτελεί το μαγνητικό ισοδύναμο του νόμου του Gauss και δείχνει ότι πειραματικά δεν παρατηρούνται μαγνητικά μονόπολα, δηλαδή το μαγνητικό πεδίο που εξέρχεται από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια (μαγνητική ροή) είναι μηδέν. Η τρίτη εξίσωση είναι ο νόμος του Faraday και περιγράφει με μαθηματικούς όρους πως δημιουργούνται ηλεκτρικά πεδία από μεταβαλλόμενα μαγνητικά πεδία. Η τέταρτη και τελευταία εξίσωση διατυπώνει το νόμο του Ampere και περιγράφει τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων από ηλεκτρικά ρεύματα και μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία. Με τις τέσσερις αυτές εξισώσεις ο Maxwell έδειξε ότι ο ηλεκτρισμός και ο μαγνητισμός ήταν απλά πτυχές μιας ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.

Το 1887 οι Αμερικανοί Michelson και Morley συνεργάστηκαν στην πραγματοποίηση μιας αρκετά πολύπλοκης μέτρησης της ταχύτητας του φωτός⁹ για να μετρήσουν την ταχύτητα κίνησης της Γης μέσα στον υποθετικό (και ακίνητο) αιθέρα. Η ύπαρξη του αιθέρα¹⁰, ήταν μία ιδέα που είχε προταθεί αρχικά από τον Descartes (1596-1650)¹¹. Οι Michelson και Morley πίστευαν ότι αν υπάρχει ο αιθέρας θα πρέπει να υπάρχει και “άνεμος αιθέρα” (ως προς την Γη), κάτι που θα επηρέαζε την ταχύτητα του φωτός ως προς την (κινούμενη) Γη. Προς τούτο χρησιμοποίησαν ένα όργανο πολύ μεγάλης ακρίβειας, το γνωστό συμβολόμετρο Michelson. Τα συμπεράσματα από το πείραμα έδειξαν ότι δεν υπάρχει καμία κίνηση μεταξύ της γης και του αιθέρα, δηλαδή δεν παρατηρήθηκε άνεμος αιθέρα. Αυτό οδήγησε τελικά¹² τον Albert Einstein (1879 – 1955) να διατυπώσει την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας το 1905, στην οποία δεν κάνει καμιά αναφορά στην έννοια του αιθέρα.

9. Πόλωση του φωτός

Είναι ευρέως διαδεδομένη η πεποίθηση ότι η ιστορία της πόλωσης του φωτός ξεκίνησε με τους Vikings, οι οποίοι υποτίθεται ότι χρησιμοποιούσαν ορισμένους διπλοδιαθλαστικούς κρυστάλλους στην ανάλυση της πόλωσης του ουρανίου φωτός για να βοηθηθούν κατά την πλοήγησή τους¹³. Δεδομένης όμως της έλλειψης ιστορικών ή αρχαιολογικών στοιχείων που να συνηγορούν προς αυτό το γεγονός, η ιστορία της πόλωσης ξεκινά τελικά με την ανακάλυψη του

⁹ https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson%E2%80%93Morley_experiment

¹⁰ https://en.wikipedia.org/wiki/Luminiferous_aether

¹¹ [https://en.wikipedia.org/wiki/The_World_\(Descartes\)](https://en.wikipedia.org/wiki/The_World_(Descartes))

¹² https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_general_relativity

¹³ [https://en.wikipedia.org/wiki/Sunstone_\(medieval\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Sunstone_(medieval))

φαινομένου της διπλής διάθλασης. Αυτό έγινε από τον Bartholinus το 1669 με το πείραμα κατά το οποίο διαπιστώθηκε η διπλή διάθλαση του φωτός μέσω ασβεστίτη (Ισλανδική κρύσταλλος¹⁴) αν και ο ίδιος δεν το είχε ερμηνεύσει ως φαινόμενο πόλωσης.

Ο Huygens (1629-1695) πρωτίστως ερμήνευσε το φαινόμενο της διπλής διάθλασης υποθέτοντας ότι στον κρύσταλλο υπάρχει εκτός από το τακτικό (πρωτεύων) σφαιρικό κύμα και ένα έκτακτο (δευτερεύων) ελλειψοειδές κύμα. Στα πλαίσια αυτής της έρευνας (1690) ο Huygens ανακάλυψε το φαινόμενο της πόλωσης του φωτός: κάθε μια από τις εξερχόμενες ακτίνες από τον κρύσταλλο, μπορούσε να αποσβεστεί, αν περνούσε μέσα από ένα δεύτερο κρύσταλλο, ίδιας σύνθεσης με τον πρώτο, αν ο τελευταίος περιστρεφόταν γύρω από άξονα που βρισκόταν στην ίδια διεύθυνση με την αντίστοιχη ακτίνα. Επί πλέον οι αποσβέσεις παρατηρούνταν σε ορθογώνιες μεταξύ τους θέσεις του δευτέρου κρυστάλλου, εξ' ου και μια «καθετότητα» μεταξύ των δυο ακτίνων (Klier & Lewis, 2012).

Ο Newton, διαπραγματεύτηκε την εξήγηση του φαινομένου, υπό το πρίσμα της σωματιδιακής του θεωρίας και ανέπτυξε την ιδέα ότι οι ακτίνες έχουν πλευρές, δηλαδή πλαταίνουν, θεωρώντας ότι τα σωματίδια που τις συγκροτούν δεν έχουν συμμετρικές διαστάσεις. Λόγω της «καθετότητας» των ακτίνων, ο Newton απέρριψε την ιδέα περί της κυματικής φύσης του φωτός –ιδέα που είχε προταθεί από τον Hook και που βελτιώθηκε αργότερα από τον Huygens-, επειδή εκείνη την εποχή οι επιστήμονες γνώριζαν μόνο τα διαμήκη κύματα από τη διάδοση του ήχου. Τέτοιας μορφής κύματα δεν μπορούσαν να ερμηνεύσουν την «καθετότητα» των οπτικών κυμάτων.

Το 1808 ο Étienne-Louis Malus (1775-1812) ανακαλύπτει την πόλωση, παρατηρώντας δια μέσου ενός κρυστάλλου από ασβεστίτη, τα είδωλα από την ανάκλαση του ηλιακού φωτός στα τζάμια των παραθύρων του Palais de Luxembourg στο Παρίσι. Τα δυο είδωλα λόγω της διπλής διάθλασης παρουσίαζαν, κατά την περιστροφή του κρυστάλλου, μια μεταβολή ως προς τις σχετικές μεταξύ τους εντάσεις. Ωστόσο, ο Malus δεν προσπάθησε να ερμηνεύσει το φαινόμενο. Διατύπωσε όμως το νόμο, γνωστό ως νόμο του Malus, ότι δηλαδή η ένταση της ακτινοβολίας που θα διέλθει από ένα πολωτή είναι ανάλογη του τετραγώνου του συνημίτονου της γωνίας μεταξύ του άξονα διέλευσης του πολωτή και του άξονα, κατά τη διεύθυνση του οποίου το προσπίπτων φως είναι γραμμικά πολωμένο. Στην ουσία ο Malus καθιέρωσε πρώτος τον όρο «πόλωση» του φωτός. Υπέθεσε (στηριζόμενος στη σωματιδιακή θεωρία του Newton) ότι μετά την ανάκλαση τα σωματίδια του φωτός που διέρχονται από τον κρύσταλλο, ευθυγραμμίζονται κατά τον ίδιο τρόπο που ευθυγραμμίζονται τα μαγνητικά σώματα από του πόλους ενός μαγνήτη. Θεώρησε δηλαδή ότι τα σωματίδια έχουν πόλους, σε αναλογία με τα μαγνητικά δίπολα και γι' αυτό το λόγο αποκάλεσε αυτό το φως πολωμένο. Λίγο μετά, το 1809, ο Arago (1786-1853) ανακαλύπτει φαινόμενα πόλωσης στον καθαρό ουρανό

¹⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Iceland_spar

10. Η Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας

Η κυματική θεωρία, όντας ο θρίαμβος της Φυσικής του 19^{ου} αιώνα, μπορούσε, με μεγάλη επιτυχία να εξηγήσει σχεδόν όλα τα οπτικά και ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα. Όμως, προς το τέλος αυτού του αιώνα παρέμεινε μια σειρά πειραματικών αντιφάσεων που δεν μπορούσε να εξηγηθεί ή βρίσκονταν σε αντιπαράθεση με την κυματική θεωρία.

Μια τέτοια αντικανονικότητα περιλάμβανε την ταχύτητα του φωτός. Η σταθερή ταχύτητα που προέβλεπαν οι εξισώσεις του Maxwell και επαληθεύτηκαν από το πείραμα των Michelson & Morley, βρίσκονταν σε αντιπαράθεση με τους νόμους της Μηχανικής που δεν είχαν αμφισβητηθεί από την εποχή ακόμη του Γαλιλαίου. Ότι δηλαδή όλες οι ταχύτητες ήταν σχετικές με την ταχύτητα που είχε ο παρατηρητής.

Το 1905 ο Einstein επέλυσε αυτό το παράδοξο αναθεωρώντας το μοντέλο του Γαλιλαίου περί του χωροχρόνου λαμβάνοντας υπόψη και τη σταθερότητα της ταχύτητας του φωτός. Οι ιδέες αυτές του Einstein διατυπώθηκαν στην Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας.

11. Αναθεώρηση της σωματιδιακής θεωρίας

Ένα άλλο πειραματικό παράδοξο ήταν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, κατά το οποίο ηλεκτρόνια αποσπώνται από την επιφάνεια ενός μετάλλου κατά την πρόσπτωση φωτός και δημιουργούν μια ροή ρεύματος μεταξύ ενός συστήματος καθόδου-ανόδου. Πειραματικές μετρήσεις έδειξαν ότι η ενέργεια των αποσπώμενων ηλεκτρονίων ήταν ανάλογη της συχνότητας και όχι της έντασης του προσπίπτοντος φωτός. Επιπλέον, για συχνότητες κάτω από ένα όριο που εξαρτιόταν από το ίδιο το μέταλλο, δεν παρατηρούνταν καμιά ροή ρεύματος ανεξάρτητα από την ένταση του φωτός.

Αυτή η διαπίστωση φάνηκε να αμφισβητεί την κυματική θεωρία και για αρκετά χρόνια οι φυσικοί προσπαθούσαν να εξηγήσουν το φαινόμενο. Το 1905 ο Einstein λύνει αυτό το γρίφο εγείροντας εκ νέου τη σωματιδιακή θεωρία για να εξηγήσει το φαινόμενο και διατυπώνει την περίφημη φωτοηλεκτρική του εξίσωση η οποία επιβεβαιώθηκε πειραματικά, δέκα χρόνια αργότερα, από τον Millikan (1868–1953). Αυτή η εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Einstein αποτέλεσε τελικά τη βάση περί της διπλής φύσης του φωτός και την απαρχή της κβαντομηχανικής.

12. Το φωτόνιο: Κβαντική Θεωρία – Διπλή φύση του φωτός

Ένα τρίτο παράδοξο που εμφανίστηκε προς τα τέλη του 19^{ου} αιώνα ήταν η αντίφαση ανάμεσα στην κυματική θεωρία και τις μετρήσεις του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκπέμπεται από μέλανα σώματα. Οι φυσικοί προσπαθούσαν, χωρίς επιτυχία, να επιλύσουν αυτό το πρόβλημα που αργότερα έγινε γνωστό ως Υπεριώδης Καταστροφή. Το 1900 ο Planck (1858–1947) ανέπτυξε τη θεωρία περί της ακτινοβολίας μέλανος σώματος και διατύπωσε τη σχέση που περιγράφει σωστά αυτή την ακτινοβολία για κάθε περιοχή συχνοτήτων. Γι' αυτή του την εργασία έλαβε το 1918 το βραβείο Nobel.

Η ιδέα του Planck ήταν ότι τα μέλανα σώματα εκπέμπουν φως (μαζί με άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) ως διακριτά πακέτα ενέργειας, δηλαδή η εκπεμπόμενη ενέργεια μπορούσε να πάρει μόνο διακριτές τιμές, από μια ενεργειακή στάθμη στην επόμενη. Η παραδοχή αυτή του Planck παραβίασε το μέχρι τότε μοντέλο, ότι δηλαδή η ενέργεια είναι μια ποσότητα που μπορούσε να μεταβάλλεται σταδιακά, παρά σε διακριτά βήματα. Ο Planck κάλεσε αυτές τις διακριτές μεταβολές της ενέργειας «κβάντα» ενέργειας.

Αυτή η θεωρία δεν εξηγεί την ταυτόχρονη κύμα – σωματίδιο φύση του φωτός, αν και αργότερα ο Planck το διατύπωσε σε άλλες εργασίες του. Όμως ο Einstein στην εργασία του για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το 1905 υποστηρίζει ότι η έννοια του φωτός δεν θα πρέπει να κατανοηθεί μόνο ως κίνηση ενός κύματος, αλλά θα πρέπει να την κατανοήσουμε επίσης ως «κβάντα» φωτός - πακέτα ενέργειας, που αργότερα, το 1926, ονομάστηκαν από τον Lewis (1875-1946) φωτόνια (Vohnsen, 2004). Υποστήριξε ότι η ενέργεια ενός φωτονίου είναι ανάλογη της συχνότητάς του. Γενικότερα, η θεωρία του δηλώνει ότι τα πάντα παρουσιάζουν και σωματιδιακή και κυματική φύση και ότι, ανάλογα με την πειραματική αναζήτηση, μπορούμε να δούμε είτε τη μια φύση είτε την άλλη.

Για παράδειγμα, στο πείραμα της διπλής σχισμής του Young, μπορούμε να ανιχνεύσουμε φωτόνια, ξεχωριστά το καθένα, κατά τον ίδιο τρόπο που ανιχνεύουμε σωματίδια. Ωστόσο, η απεικόνιση συμβολής που παρατηρούμε, μπορεί μόνο να εξηγηθεί αν θεωρήσουμε ότι το κάθε φωτόνιο πέρασε ταυτόχρονα και από τις δυο σχισμές. Πως όμως μπορεί να συμβεί αυτό; Θα πρέπει να είναι είτε η μια σχισμή είτε η άλλη και εδώ βρίσκεται το μεγάλο μυστήριο. Το φως είναι και τα δυο: είναι κύμα αν εμείς θέλουμε να είναι κύμα και είναι σωματίδιο, αν το θέλουμε σωματίδιο.

Αν καταφέρουμε, για κάθε φωτόνιο, να προσδιορίσουμε τη σχισμή από την οποία πέρασε, τότε δεν θα μπορούσαμε να παρατηρήσουμε φαινόμενα συμβολής. Έτσι τη στιγμή που θα έχουμε αποδείξει τη σωματιδιακή φύση του φωτός, με το να προσδιορίσουμε τη σχισμή, την ίδια στιγμή θα έχουμε καταστρέψει την κυματική του φύση και τότε δεν θα συμπεριφέρεται ως κύμα, αλλά ως σωματίδιο.

Όμως, όσο ο προσδιορισμός της σχισμής από την οποία πέρασε το κάθε φωτόνιο παραμένει ως εικασία, το φως θα μας αποκαλύπτει την κυματική του φύση και επομένως θα βλέπουμε φαινόμενα συμβολής. Η επιλογή είναι δική μας. Σε κάθε περίπτωση δεν μπορούμε να έχουμε και τα δυο. (Μήτσου, 2016; Mollon, 2003).

13. Η κβαντική θεώρηση της ηλεκτροδυναμικής

Η Νευτώνεια μηχανική, από τις αρχές κιόλας του 20^{ου} αιώνα φάνηκε να αποτυγχάνει όταν εφαρμόστηκε σε αντικείμενα που κινούνται με πολύ υψηλές ταχύτητες και έπρεπε να αντικατασταθεί από την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας. Επίσης δεν μπορούσε να εξηγήσει φαινόμενα που σχετίζονταν με αντικείμενα εξαιρετικά μικρών (ατομικών) διαστάσεων και αντικαταστάθηκε από την Κβαντομηχανική που αναπτύχθηκε κατά τη δεκαετία του 1920 από τους Bohr, Schrödinger, Heisenberg και άλλους.

Σε αντίθεση με τη Νευτώνεια Μηχανική, η Κλασική Ηλεκτροδυναμική είναι μια σχετικιστική θεωρία, δηλαδή δεν υπάρχουν θεμελιώδη ερωτήματα που να

ενσωματώνουν σ' αυτή τα αποτελέσματα της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας. Στην πραγματικότητα ήταν ακριβώς η θεώρηση της ηλεκτροδυναμικής που οδήγησε τον Einstein στη διατύπωση της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας και στο να δείξει ότι τα μαγνητικά πεδία είναι η έκφραση του συστήματος συντεταγμένων των ηλεκτρικών πεδίων σε ένα διαφορετικό πλαίσιο αναφοράς (Griffiths, 1999).

Στη σύγχρονη Φυσική, όπου παρατηρούνται αντικείμενα απειροελάχιστων διαστάσεων που κινούνται με εξωπραγματικές ταχύτητες χρειαζόταν μια σχετικιστική θεωρία που να συνδυάζει τις αρχές της Κβαντομηχανικής με τη θεωρία της Σχετικότητας. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε κατά τις δεκαετίες του 1930 και 1940 και είναι γνωστή ως κβαντική θεωρία πεδίου. Η Κβαντική Ηλεκτροδυναμική (για συντομία QED) είναι η σχετικιστική κβαντική θεωρία πεδίου της ηλεκτροδυναμικής και περιγράφει όλα τα παγκόσμια φαινόμενα, κυρίως την αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με τη φορτισμένη ύλη, δηλαδή τα φαινόμενα εκείνα που αφορούν την αλληλεπίδραση ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων, μέσα στο πλαίσιο της Ειδικής Θεωρίας της Σχετικότητας και της Κβαντομηχανικής. Βασικά περιγράφει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στο φως και στην ύλη, ειδικότερα ανάμεσα στα ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και φωτόνια και θεωρεί ότι η ανάπτυξη των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων αποδίδεται στην εκπομπή και την απορρόφηση φωτονίων ως σωματιδίων ανταλλαγής, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαταραχές των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Κατά τρόπο ανάλογο και τα ηλεκτρόνια μπορούν να θεωρηθούν ως διαταραχές αντίστοιχων κβαντισμένων πεδίων.

Η θεωρία QED αναπτύχθηκε κυρίως κατά τις δεκαετίες του 1940 και 1950 από τους Feynman, Dyson, Schwinger και τον Tomonaga. Οι Feynman, Schwinger και Tomonaga έλαβαν το 1965 το βραβείο Νόμπελ για τη συνεισφορά τους στη Φυσική.

14. Οπτική και χρώμα

Οι γνώσεις και θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων φιλόσοφων αναφορικά με το φως και τα χρώματα ήταν αποσπασματικές και κυρίως εικαστικής φύσης, πριν τις εργασίες του Πλάτωνα και του Αριστοτέλη. Η πρώτη θεωρία για την όραση που χρησιμοποιήθηκε εκτενώς κατά τη διάρκεια του 18^{ου} αιώνα, ήταν αυτή της οπτικής ακτίνας. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία, ο άνθρωπος είναι σε θέση να δει εξωτερικά αντικείμενα βάσει αυτού που εκπέμπεται από το μάτι. Ένας πρώιμος υποστηρικτής αυτής της θεωρίας ήταν ο Πυθαγόρειος Αλκμέων που παρείχε ως απόδειξη τις λάμπεις φωτός και χρώματος στο μάτι (Ierodiakonou, 2005; Rudolph, 2012). Τη θεωρία αυτή φαίνεται ότι γνώριζε καλά και ο Εμπεδοκλής όπως αποδεικνύεται από την αναφορά του Αριστοτέλη στο «Περί φύσεως» (Kalderon, 2015). Και στο έργο «Τιμαίος» όμως ο Πλάτωνας αναφέρεται σε αυτή τη θεωρία περιγράφοντας μία σωματιδιακή φωτιά ύλης που εκπέμπεται από το μάτι ως κινούμενο ρεύμα. Κατά τη διάρκεια του φωτός της ημέρας, ένα είδος ήπιας φωτιάς συναντά αυτή την ουσία και έτσι σχηματίζεται η οπτική ακτίνα (Ierodiakonou, 2005).

Τα χρώματα για τον Πλάτωνα ήταν φλόγες σωματιδίων διαφορετικού μεγέθους που εκπέμπονταν από κάθε είδος οργανισμού. Τα μεγαλύτερα σωματίδια είναι αυτά που, όταν ενώνονται, δημιουργούν την αίσθηση του μαύρου, ενώ τα

μικρότερα σωματίδια δημιουργούν το λευκό (Ierodiakopou, 2005). Σ' αυτό βασίστηκε και η θεωρία που ανέπτυξε στη συνέχεια ο Αριστοτέλης. Στο έργο του «Περί αισθήσεως και αισθητών», διατυπώνει μια σειρά σημαντικών ισχυρισμών, όπως για παράδειγμα ότι κάθε μία από τις πέντε αισθήσεις αποτελεί ξεχωριστή πηγή γνώσης της εξωτερικής πραγματικότητας. Για την όραση αυτό είναι το χρώμα και ότι χρώμα είναι αυτό που μπορούμε να δούμε (Bynum, 1993).

Σύμφωνα λοιπόν με τον Αριστοτέλη, το χρώμα δεν εκπορεύεται από την όραση ή την αντίληψη των αντικειμένων αλλά είναι μία άυλη μορφή και γίνεται ορατό μέσω του φωτός. Όταν το φως εισέρχεται στο διάφανο, τότε το αποτέλεσμα είναι το χρώμα (Sorabji, 2004; Crone, 2012).

Ο Αριστοτέλης επίσης αναφέρονταν στην ύπαρξη επτά χρωμάτων: του λευκού, του κίτρινου, του κόκκινου, του ιώδους, του πράσινου, του μπλε και του μαύρου. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι ο Αριστοτέλης ταξινομεί τα χρώματα σε μία χρωματική ακολουθία όπως αυτή του πρισματικού φάσματος. Αντίθετα, τα καταχωρεί δημιουργώντας μία κλίμακα φωτεινότητας ξεκινώντας από το λευκό και κατόπιν στο κίτρινο, φτάνοντας τελικά μέχρι τα πιο σκοτεινά χρώματα που είναι το μπλε και το μαύρο. Είναι προφανές ότι η λογική του είναι αυτή του διαχωρισμού των πραγματικών χρωμάτων από τα εφήμερα όπως αυτά που διαμορφώνονται για παράδειγμα από το ουράνιο τόξο που αργότερα έγιναν γνωστά ως φαινομενικά. Η διάκριση αυτή αποδείχθηκε ένα πραγματικό εμπόδιο στις προσπάθειες για την κατανόηση της φυσικής προέλευσης του χρώματος και τη σχέση του με το φως (Concklin, 1973).

Τα μόνα φαινομενικά χρώματα τα οποία αναφέρει ο Αριστοτέλης ήταν αυτά του ουράνιου τόξου στο έργο του «Μετεωρολογικά», αφού ήταν ο πρώτος που τα μελέτησε λεπτομερώς. Αναφέρει δε λανθασμένα ότι μόνο το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε μπορούν και διακρίνονται και κάποιες φορές το κίτρινο αλλά ότι στο δεύτερο ουράνιο τόξο τα τρία αυτά χρώματα παρουσιάζονται σε αντίστροφη σειρά (Concklin, 1973).

Τα έργα του Αριστοτέλη συνετέλεσαν στην ανάπτυξη των επιστημών στη Δύση. Σε αυτά όμως συμπεριλαμβάνονταν και κάποια έργα που επειδή περιλάμβαναν κάποια αριστοτελικά χαρακτηριστικά, λανθασμένα αποδόθηκαν σε αυτόν. Αυτό ισχύει και για το έργο *Περί χρωμάτων* που υπάρχει μεγάλη διχογνωμία για το αν ανήκει όντως στον Αριστοτέλη. Στο έργο αυτό διατυπώνεται για πρώτη φορά η άποψη ότι το φως δεν περιορίζεται στο να κάνει τα χρώματα ορατά αλλά ότι έχει ένα μυστηριώδες ρόλο στην τροποποίηση τους αφού αναφέρεται ότι τα αντικείμενα φαίνονται διαφορετικά στη σκιά και διαφορετικά στο φως του ήλιου, ανάλογα με το αν το φως είναι δυνατό ή όχι και ανάλογα με τη γωνία που κάποιος τα παρατηρεί. Αυτή είναι μία διαπίστωση που στο παρελθόν είχαν κάνει και οι Επικούρειοι αναφέροντας ότι το φτέρωμα του πουλιού αλλάζει ανάλογα με τη γωνία που φωτίζεται. Αν τα φτερά του πουλιού κρατιόνταν στο φως φαίνονταν βιολετί ενώ αν έπεφτε λιγότερο φως φαίνονταν να έχουν ένα σκούρο γκριζωπό καφέ χρώμα (Kuehni & Schwarz, 2008).

Στην ύστερη αρχαιότητα, ο Ευκλείδης και ο Πτολεμαίος επανέφεραν στο προσκήνιο παλαιότερες θεωρίες για το χρώμα. Στην οπτική του Ευκλείδη δεν έχει καμία σημασία αν οι ακτίνες προέρχονται από μάτι ή από το αντικείμενο

που παρατηρείται. Το χρώμα και ο ρόλος του φωτός είναι δύο θέματα που δεν απασχολούσαν τον Ευκλείδη. Ο Πτολεμαίος όμως ακολούθησε πολλές από τις απόψεις του Αριστοτέλη για το χρώμα. Υποστήριξε ότι τα χρώματα βρίσκονται στα ορατά αντικείμενα αφού αποτελούν ιδιότητες τους. Υποστήριξε δε ότι υπάρχουν δύο βασικά χρώματα, το μαύρο και το λευκό και ότι τα άλλα χρώματα προκύπτουν από αυτά. Ο Πτολεμαίος όμως είχε και διαφορές με τη θεωρία του Αριστοτέλη αφού θεωρούσε ότι η όραση ήταν αποτέλεσμα των οπτικών ακτίνων που προέρχονταν από το μάτι και ότι στο ουράνιο τόξο ήταν διακριτά όχι τρία, αλλά επτά χρώματα (Adamson, 2006).

Η θεωρία του Αριστοτέλη ήταν αυτή που επηρέασε σε μεγάλο βαθμό την Αναγέννηση, ως επικρατέστερη. Η σύγχρονη όμως αντίληψή μας για το φως και το χρώμα ξεκίνησε με τον Newton και με μια σειρά πειραμάτων που πραγματοποίησε τη δεκαετία του 1660 και έκανε γνωστά το 1672. Είναι ο πρώτος που αντιλαμβάνεται το μηχανισμό του ουράνιου τόξου – διαθλά λευκό φως μέσω ενός πρίσματος αναλύοντάς το στα επί μέρους συνιστώσα χρώματα: κόκκινο, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, μπλε και ιώδες. Όπως προαναφέραμε, πριν από αυτό το χρώμα θεωρούνταν ως μια μείξη φωτός και σκότους. Πίστευαν ακόμη ότι το πρίσμα ήταν αυτό που έδινε χρώμα στο φως – ο Newton απέδειξε ότι το ίδιο το φως ήταν υπεύθυνο για το χρώμα.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1660 ο Newton, ξεκίνησε την εργασία του σχετικά με το φως, που την αποκάλεσε “*celebrated phenomenon of colours*”. Την ίδια εποχή ο Hook ήταν υπέρμαχος της θεωρίας του χρώματος περί μείξης του φωτός με το σκότος. Είχε μάλιστα κατασκευάσει και μια κλίμακα χρωμάτων – από λαμπρό κόκκινο, που ήταν καθαρό λευκό φως στο οποίο είχε προστεθεί η λιγότερη δυνατή ποσότητα σκότους, μέχρι θαμπό μπλε ως την τελευταία απόχρωση πριν το μαύρο που αποτελούσε την ολική εξαφάνιση του φωτός από το σκότος. Ο Newton αντιλαμβάνεται ότι αυτή η θεωρία είναι λανθασμένη. Στο πείραμα που πραγματοποίησε για να καταλήξει σε αυτό το συμπέρασμα άνοιξε στο πατζούρι ενός δωματίου μία οπή έξι εκατοστών, ώστε το φως του ήλιου να εισέρχεται στο δωμάτιο ως μία λεπτή ακτίνα. Η ακτίνα αυτή έπεφτε πάνω στον τοίχο που βρίσκονταν απέναντι από το παντζούρι και δημιουργούσε μία κηλίδα λευκού χρώματος αντίστοιχη σε μέγεθος με την ακτίνα. Στην πορεία της ακτίνας ο Newton τοποθέτησε ένα πρίσμα κατασκευασμένο από γυαλί και είδε ότι η λευκή κηλίδα μετατράπηκε σε μία ταινία χρωμάτων πάχους ανάλογου της οπής. Το πρώτο χρώμα που αποτυπώθηκε στην ταινία ήταν το κόκκινο και ακολουθούσαν το πορτοκαλί, το κίτρινο, το πράσινο, το γαλάζιο, το κυανό και τελευταίο το ιώδες. Η ακολουθία των χρωμάτων δηλαδή ήταν ίδια με αυτή των χρωμάτων του ουράνιου τόξου (Duck, 1988; Schaffer, 1989; Thompson, 1995).

Ο Newton θέλοντας να κατανοήσει καλύτερα αυτό το φαινόμενο, άρχισε να πειραματίζεται, αρχικά με το είδος και τη θέση του πρίσματος και στη συνέχεια χρησιμοποίησε ένα δεύτερο πρίσμα για να δει αν μπορεί το κάθε χρώμα χωριστά να αναλυθεί εκ νέου. Επί πλέον, για να αποδείξει ότι το πρίσμα δεν χρωμάτιζε το φως, τοποθέτησε ένα δεύτερο πρίσμα αλλά αντίθετα προσανατολισμένο και παρατήρησε ότι η ταινία χρωμάτων μετατρέπονταν εκ νέου σε λευκή κηλίδα. Τα παραπάνω, τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι όχι το λευκό αλλά τα χρώματα της ίριδας ήταν τα βασικά και ότι το λευκό δημιουργούνταν από την μείξη τους.

Η επιβεβαίωση του ευρήματος του έγινε μέσω ενός δίσκου που φέρει τα χρώματα της ίριδος και έγινε γνωστός ως ο δίσκος του Newton. Ο δίσκος αυτός όταν περιστραφεί με πολύ μεγάλη ταχύτητα φαίνεται λευκός λόγω του φαινομένου της διασποράς του φωτός. (Duck, 1988; Schaffer, 1989; Thompson, 1995). Η πλέον πολύτιμη συνεισφορά του στους καλλιτέχνες της εποχής ήταν μια εννοιολογική διάταξη των χρωμάτων γύρω από την περιφέρεια ενός κύκλου που επέτρεπε στα βασικά χρώματα των ζωγράφων (κόκκινο, κίτρινο, μπλε) να διαταχθούν απέναντι από τα συμπληρωματικά τους χρώματα (για παράδειγμα το κόκκινο απέναντι από το πράσινο). Αυτό το κυκλικό διάγραμμα ήταν το πρώτο μοντέλο για πολλά χρωματικά συστήματα του 18^{ου} και 19^{ου} αιώνα. Ο χρωματικός κύκλος του Boutet, ήταν πιθανά ο πρώτος που βασίστηκε στον κύκλο του Newton.

Η θεωρία των χρωμάτων του Newton ήταν κυρίαρχη για πάρα πολλά χρόνια και ενισχύθηκε από τη θεωρία του Helmholtz στο έργο του «Περί της θεωρίας των σύνθετων χρωμάτων». Σύμφωνα με τους πειραματισμούς του, η μείξη του κίτρινου και του μπλε στις ακτίνες φωτός δημιουργούσαν το λευκό χρώμα. Τα τρία χρώματα σύμφωνα με αυτή τη θεωρία που στις ακτίνες φωτός μπορούν να παράγουν άλλα χρώματα ήταν το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε (Thompson, 1995). Τα τρία αυτά χρώματα υποστήριζε και η θεωρία του Young, αποκαλούμενη και ως τριχρωματική, σύμφωνα με την οποία στα κωνία του αμφιβληστροειδή χιτώνα υπήρχαν τρεις χρωματικοί υποδοχείς, αντίστοιχοι με τα τρία βασικά χρώματα (Lang, 1983).

Έναν αιώνα αργότερα, Ο Goethe (1749-1832) στο έργο του *Theory of Colours* το 1810 επαναδιατυπώνει το ζήτημα του χρώματος με μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση. Ο Newton είχε προσεγγίσει το χρώμα ως ένα φυσικό ζήτημα, μηχανικής φύσης και ως εκ τούτου ένα ποσοτικό και μετρήσιμο φαινόμενο. Ο Goethe έρχεται να υποστηρίξει ότι η αίσθηση που προκαλεί το χρώμα καθώς γίνεται αντιληπτό από τον εγκέφαλό μας, οφείλεται επίσης και στην ίδια την αντίληψή μας – στη μηχανική της ανθρώπινης όρασης και στον τρόπο με τον οποίο το μυαλό μας επεξεργάζεται την εισερχόμενη πληροφορία. Επομένως, σύμφωνα με τον Goethe, ότι βλέπουμε σε ένα αντικείμενο εξαρτάται από το ίδιο το αντικείμενο, το φως και την αντίληψή μας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adamson, P. (2006). Vision, light and color in Al-Kindi, Ptolemy and the ancient commentators. *Arabic sciences and philosophy*, 16(02), 207-236.
2. Bynum, T. W. (1993). A new look at Aristotle's theory of perception. *Aristotle's De Anima in Focus*, 90-109.
3. Crone, R. A. (2012). A history of color: the evolution of theories of light and color. Springer Science & Business Media.
4. Conklin, H. C. (1973). Color categorization. *American Anthropologist*, 75(4), 931-942.
5. Crosland, M. (2002). Science under Control: The French Academy of Sciences 1795-1914. Cambridge University Press.
6. Δέδες, Χ. (2005). Η χρήση μοντέλων από την Ιστορία της Επιστήμης για την ανίχνευση και το μετασχηματισμό βιωματικών νοητικών παραστάσεων των μαθητών στο πεδίο της Οπτικής: Διδακτική προσέγγιση. Διδακτορική Διατριβή, Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Επιστημών της Εκπαίδευσης και της Αγωγής στην Προσχολική Ηλικία.

7. Duck, M. J. (1988). Newton and Goethe on colour: Physical and physiological considerations. *Annals of Science*, 45(5), 507-519.
8. Duval, C., Horváth, Z., & Horváthy, P. A. (2006). Fermat principle for spinning light. *Physical Review D*, 74(2), 1-5.
9. Griffiths, D. (1999). *Introduction to electrodynamics*. Upper Saddle River: Prentice Hall.
10. Howard, I. P., & Wade, N. J. (1996). Ptolemy's contributions to the geometry of binocular vision. *Perception*, 25(10), 1189-1201.
11. Ierodiakonou, K. (2005). Empedocles on colour and colour vision. *Oxford studies in ancient philosophy*, 29(1), 1-38.
12. Kuehni, R. G., & Schwarz, A. (2008). *Color ordered: a survey of color systems from antiquity to the present*. Oxford University Press.
13. Lang, H. (1983). Trichromatic theories before Young. *Color Research & Application*, 8(4), 221-231.
14. Μήτσου, Γ. (2016) Συμβολή κυμάτων–Πείραμα διπλής σχισμής. Σε: *Επιλεγμένα Πειράματα Οπτικής*, Έκδοση Α, Λιβαδειά: Εκδόσεις Ιδίου, 61-75.
15. Mollon, J. D. (2003). The origins of modern color science. *The Science of Color*, 2, 1-39.
16. Newman, R. C., & Eckelmann, H. J. (1977). *Genesis One and the Origin of the Earth*. Interscience Press.
17. Rasmussen, S. C. (2012). *How Glass Changed the World: The History and Chemistry of Glass from Antiquity to the 13th Century* (Vol. 3). Springer Science & Business Media
18. Sabra, A. I. (1981). Theories of light: from Descartes to Newton. CUP Archive.
19. Schuster, A. (1911 ed.) in *Encyclopedia Britannica*
20. Smith, A. M. (1998). Ptolemy, Alhazen, and Kepler and the problem of optical images. *Arabic Sciences and Philosophy*, 8(01), 9-44.
21. Schaffer, S. (1989). Glass works: Newton's prisms and the uses of experiment. *The uses of experiment: Studies in the natural sciences*, 67-104.
22. Sorabji, R. (2004). Aristotle on colour, light and imperceptibles. *Bulletin of the Institute of Classical Studies*, 47(1), 129-140.
23. Thompson, E. (1995). *Colour vision: A study in cognitive science and the philosophy of perception*. Psychology Press.
24. Wells, R. A. (1992). The mythology of Nut and the birth of Ra. *Studien zur altägyptischen Kultur*, 305-321.
25. Worrall, J. (1989). Fresnel, Poisson, and the white spot: The role of successful predictions in the acceptance of scientific theories. *The Uses of Experiment*, 135-157.