

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Α΄ ΛΥΚΕΙΟΥ

ΓΕΝΙΚΟ ΛΥΚΕΙΟ ΛΕΧΑΙΝΩΝ ΣΧΟΛΙΚΟ ΕΤΟΣ 2011-2012

ΘΕΜΑ : *Φως.... Σωματίδιο ή κύμα; Αναζητήστε πειραματικές αποδείξεις για την μια ή την άλλη συμπεριφορά του φωτός, καταλήγοντας σε συμπεράσματα για την διττή φύση του.*

Περιεχόμενα	Σελ. 1
Ιστορική αναδρομή.	Σελ. 2
1. Φαινόμενα που συνηγορούν υπέρ της σωματιδιακής φύσης του φωτός	Σελ.12
1.1. Ανάκλαση, διάθλαση	Σελ.12
1.2. Ακτινοβολία μέλανος σώματος	Σελ.17
1.3.Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	Σελ.25
1.4. Φαινόμενο Compton	Σελ.28
2. Φαινόμενα που συνηγορούν υπέρ της κυματικής φύσης του φωτός	Σελ.29
2.1. Περιγραφή κύματος	Σελ.29
2.2. Συμβολή - περίθλαση	Σελ.38
Βιβλιογραφία	Σελ.47
Συντελεστές	Σελ.48

# Τι είναι ΦΩΣ ;

## Ιστορική αναδρομή

Τροχιές πολύ μικρών αόρατων σωματιδίων.

Οι Έλληνες δημιουργοί της Γεωμετρίας και ιδιαίτερα οι Αλεξανδρινοί ξεκινώντας από ένα είδος πίστης στο ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟ της διάδοσης του φωτός και από την ιδέα «φωτεινής ΑΚΤΙΝΑ» θεμελίωσαν μια γεωμετρική λογική έρευνας των φαινομένων με γραμμές, γωνίες και επίπεδα η οποία και κυριάρχησε.

Οι ιδέες αυτές συνέβαλαν και στη διατύπωση των πρώτων αντιλήψεων για τη φύση του φωτός, σύμφωνα με τις οποίες το φως είναι τροχιές πολύ μικρών αόρατων σωματιδίων. Για τους περισσότερους Έλληνες στοχαστές του 5ου αιώνα τα αόρατα αυτά σωματίδια εκπέμπονται από το ανθρώπινο μάτι, πέφτουν στα αντικείμενα και έτσι εμείς βλέπουμε τα αντικείμενα. Ο Δημόκριτος διαφωνούσε με αυτή τη θεώρηση και υποστήριζε ότι τα αόρατα σωματίδια του φωτός εκπέμπονται από το φωτεινά σώματα και προσπίπτουν στο μάτι του παρατηρητή. Σύμφωνα με μια τρίτη θεωρία την οποία υποστήριζε και ο Πλάτων τόσο το μάτι του παρατηρητή όσο και το φωτεινό αντικείμενο εκπέμπουν σωματίδια και η συνάντησή τους έχει σαν αποτέλεσμα το να γίνεται ορατό το αντικείμενο από τον παρατηρητή.

Οι Αλεξανδρινοί ενδιαφέρθηκαν περισσότερο για την περιγραφή των φωτεινών φαινομένων μέσω της Γεωμετρίας και λιγότερο για το «τι είναι φως» .

Ωστόσο η ιδέα ότι «το φως είναι κινούμενα αόρατα σωματίδια », αφού διακινήθηκε ουσιαστικά χωρίς αντίπαλο, έφθασε και στους Λατίνους στοχαστές. Τον πρώτο αιώνα πριν από τον Χριστό, ο Λουκρήτιος στο De Rerum Natura – Περί της φύσεως των πραγμάτων – ισχυρίζεται ότι το Φως αλλά και η Θερμότητα είναι κινούμενα λεπτότατα σωματίδια. Στο ίδιο βιβλίο προβάλλει την άποψη ότι «η ταχύτητα του φωτός είναι άπειρη» ενώ χρησιμοποιεί και επιχειρήματα για τη λογική τεκμηρίωση της άποψής του.

Το επόμενο ορόσημο στην εξέλιξη των ιδεών για το φως εμφανίζεται τον δέκατο έβδομο αιώνα μετά τον Χριστό. Σε ολόκληρη σχεδόν την καριέρα του, ο Isaac NEWTON ενδιαφέρθηκε σοβαρά για τα ζητήματα του φωτός. Στο κλασικό βιβλίο του OPTICS που πρωτοεμφανίστηκε το 1675 αλλά σε ολοκληρωμένη μορφή το 1703 παρουσίασε μία από τις πρώτες συστηματικές μελέτες για το φως.

Σε αυτήν ομολογεί ότι :

« ΕΑΝ ΗΜΟΥΝ ΥΠΟΧΡΕΩΜΕΝΟΣ ΝΑ ΑΠΟΔΕΧΤΩ ΜΙΑ ΘΕΩΡΙΑ, Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΘΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΑ, ΕΙΝΑΙ ΑΥΤΗ ΤΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΟΡΑΤΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΑΠΟ ΤΑ ΦΩΤΕΙΝΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΑ. ΕΙΝΑΙ Η ΠΛΕΟΝ ΑΛΗΘΟΦΑΝΗΣ» . Στην ίδια πραγματεία του θα επιτεθεί στην άποψη ότι το φως είναι ΚΥΜΑ η οποία είχε στο μεταξύ παρουσιαστεί από τον Hooke και τον Huygens.

Το φως ; Μήπως είναι ΚΥΜΑ ;

Την ίδια περίπου εποχή στο Παρίσι ο Ολλανδός Christiaan HUYGENS στο βιβλίο του - γραμμένο στα γαλλικά, *Traité de la Lumière* – Πραγματεία για το Φως – διατύπωσε μια σχετικά ολοκληρωμένη θεωρία την κυματική θεωρία, με την οποία θα ήταν δυνατόν να ερμηνευτούν τα γνωστά τότε φωτεινά φαινόμενα – η ανάκλαση, η διάθλαση και η διπλή διάθλαση στη λεγόμενη ισλανδική κρύσταλλο. Για την ερμηνεία των φαινομένων αυτών πρότεινε μία Αρχή για τη διάδοση όχι μόνο του φωτός αλλά όλων γενικά των κυμάτων. Με βάση την αρχή αυτή μπορεί να δοθεί ερμηνεία στους πειραματικούς νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης.

Η κυματική θεωρία είχε βέβαια και τα αδύνατα σημεία της. Τα τρία σημεία που φώτισε ο Νεύτων αρνούμενος να την αποδεχτεί αλλά και την απάντηση στο ερώτημα «εφόσον τα φωτεινά κύματα είναι κύματα όπως εκείνα της θάλασσας ποιος είναι ο ωκεανός για αυτά όταν το φως διαδίδεται στο κενό;» . Αντίστοιχο ερώτημα για τα ηχητικά κύματα δεν είχε τεθεί διότι οι φυσικοί είχαν βεβαιωθεί ότι ο ήχος δεν διαδίδεται στο κενό.

18ος αιώνας. Η σωματιδιακή θεωρία επιβάλλεται.

Σε όλον σχεδόν τον 18ο αιώνα η εργασία του Christian Huygens αγνοήθηκε εντυπωσιακά. Ελάχιστες ήταν οι εργασίες που αναφέρθηκαν σ' αυτήν και ουσιαστικά επί 100 περίπου χρόνια κανείς δεν πρόσθεσε τίποτε στην κυματική θεωρία του.

Παρά την ισοδυναμία που παρουσίαζαν τα επιχειρήματα των δύο πλευρών για τη φύση του φωτός, η σωματιδιακή θεωρία του Νεύτωνα κυριάρχησε στην ευρωπαϊκή σκέψη σε όλη τη διάρκεια του αιώνα. Για μία ακόμα φορά η δύναμη της αυθεντίας κυριολεκτικά καθοδήγησε τις περισσότερες από τις πειραματικές προσπάθειες και τις θεωρητικές συνθέσεις προς τη μία μόνο κατεύθυνση. Η εξέλιξη αυτή ήταν ένα είδος κανόνα που συνοδευόταν από μερικές εξαιρέσεις. Ο Euler για παράδειγμα υπερασπίστηκε την κυματική θεωρία αλλά δεν κατάφερε να κλονίσει την εδραιωμένη πεποίθηση για τη σωματιδιακή υπόσταση του φωτός. Η κυματική θεωρία φαινόταν ότι θα ήταν για πάντα ανίσχυρη να αντιπαρατεθεί στο νευτωνικό αναντίρρητο. Στα ευρωπαϊκά Πανεπιστήμια οι φοιτητές διδάσκονταν ότι ή «αλήθεια» για το φως ήταν αυτό που είχε υποστηρίξει ο Νεύτων.

19ος αιώνας. ΦΩΣ + ΦΩΣ = ΣΚΟΤΑΔΙ

Υπήρχε όμως ένα ακραιφνώς κυματικό φαινόμενο που είχε ήδη παρατηρηθεί στον ΗΧΟ αλλά ποτέ στο ΦΩΣ . Ήταν το φαινόμενο ΣΥΜΒΟΛΗ. Αν μπορούσε κανείς ανακρίνοντας την ύλη να της αποσπάσει το μυστικό ότι το φως παρουσιάζει φαινόμενα συμβολής θα μπορούσε να δημιουργήσει ένα σημαντικό ρήγμα στην εδραιωμένη πεποίθηση της εποχής και να ενισχύσει την κυματική θεωρία. Η ιδέα αυτή έφερε στο προσκήνιο τον Άγγλο Thomas Young. Η συμβολή είναι το φαινόμενο που προκύπτει από τη συνάντησή δύο κυμάτων που διαδίδονται ταυτόχρονα και στο ίδιο μέσον. Κατά τη συνάντηση δύο όμοιων ήχων είχε ήδη

διαπιστωθεί ότι - εκτός από μία αναμενόμενη ενίσχυση - και μία ασυνήθιστη κατάσταση κατά την οποία **ήχος + ήχος = σιωπή**.

Η ιδέα ήταν ότι κατά τη συνάντηση μιας φωτεινής μονοχρωματικής δέσμης με μια άλλη απολύτως παρόμοια θα μπορούσε να παρατηρηθεί το ακόμα πιο εντυπωσιακό

$$\text{φως} + \text{φως} = \text{σκοτάδι}$$

Η σωματιδιακή θεωρία κλονίζεται.

Το εγχείρημα παρουσίαζε μια δυσκολία φαινομενικά αξεπέραστη. Η ύπαρξη δύο φωτεινών κυμάτων πηγών που να είναι σύμφωνες ήταν κάτι ανέφικτο. Η σκέψη του Young ήταν ότι η φαινομενικά αξεπέραστη δυσκολία θα μπορούσε να ξεπεραστεί αν, μαζί με τη συμβολή, αξιοποιούσε ένα άλλο φαινόμενο, το οποίο είχε ανακαλυφθεί τον 17ο αιώνα αλλά παρέμενε σκοτεινό, το φαινόμενο ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ είναι απόκλιση ενός κύματος από την ευθύγραμμη διάδοσή του κάθε φορά που προσέπιπτε σε μία σχισμή με διαστάσεις στην τάξη μεγέθους του μήκους κύματος. Το φαινόμενο είχε παρατηρηθεί στο φως από τον Ιταλό Grimaldi το έτος 1665, μερικά δηλαδή χρόνια πριν διαμορφωθούν οι δύο αντίπαλες θεωρίες για το φως. Το φαινόμενο ήταν γνωστό τόσο στον Newton όσο και στον Huygens, αλλά ο πρώτος δεν διέκρινε μέσα από αυτό μια κυματική θεωρία για το φως. Από την άλλη πλευρά ο Huygens αδιαφόρησε και δεν ασχολήθηκε ποτέ με αυτό.

Χρησιμοποιώντας μία μονοχρωματική φωτεινή πηγή, ένα διάφραγμα με δύο πολύ μικρές σχισμές και μια οθόνη τοποθετημένη παράλληλα προς το διάφραγμα σε σχετικά

απόσταση, κατάφερε φωτίζοντας το διάφραγμα να δει να σχηματίζονται στην οθόνη φωτεινές και σκοτεινές περιοχές που η μία διαδεχόταν την άλλη . Παράλληλα οι μετρήσεις που πήρε του επέτρεψαν για πρώτη φορά να υπολογίσει το μήκος κύματος των διαφόρων ακτινοβολιών.

Ένας άνθρωπος που δεν είχε σπουδάσει Φυσική είχε πραγματοποιήσει ένα από τα σημαντικότερα πειράματα στην ιστορία της Φυσικής. είχε πραγματοποιηθεί από έναν άνθρωπο που δεν είχε σπουδάσει Φυσική.

Ο Young είχε πειστεί ότι το φως έχει χαρακτήρα κυματικό. Αυτό δεν σημαίνει ότι κατάφερε να πείσει και την επιστημονική κοινότητα της εποχής. Η δημοσίευση της εργασίας του ενώ έγινε με απλό και πειστικό τρόπο προκάλεσε όχι μόνο αποδοκimasίες αλλά και παρά πέρα αντιδράσεις στα όρια του εμπαιγμού. Ήταν το αναπόφευκτο τίμημα της προσωπικής του σύγκρουσης με τη νευτωνική αυθεντία. Μέσα σε εκατό χρόνια, η νευτωνική επανάσταση είχε προλάβει να γίνει καθεστώς.

1825. Το φως είναι κύμα και μάλιστα εγκάρσιο.

Στα χρόνια που ακολούθησαν η προσπάθεια για τη στήριξη της κυματικής θεωρίας ενισχύθηκε σημαντικά από τον Augustin Fresnel, έναν Γάλλο φυσικό με εξαιρετική μαθηματική κατάρτιση ο οποίος, δεκαπέντε χρόνια αργότερα με ένα διαφορετικό πείραμα έδειξε ότι το φως παρουσιάζει φαινόμενα συμβολής. Και δεν σταμάτησε εκεί. Ενάμιση περίπου αιώνα μετά τον Huygens θα «διακρίνει» μέσα στο φαινόμενο ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ αυτό που δεν μπόρεσε να διακρίνει ο Huygens, ένα ισχυρό δηλαδή



επιχείρημα για την κυματική φύση του φωτός και θα χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά την Αρχή του Huygens για να ερμηνεύσει θεωρητικά την περίθλαση.

Σε αντίθεση με ότι είχε συμβεί με τον Young, η παρέμβαση του Fresnel έπεισε τους περισσότερους φυσικούς της εποχής για τον κυματικό χαρακτήρα του φωτός. Την ίδια περίπου εποχή η ανακάλυψη και η μελέτη του φαινομένου ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ενίσχυσε ακόμα περισσότερο την κυματική θεωρία και έδειξε ότι το φως διαδίδεται ως ΕΓΚΑΡΣΙΟ κύμα.

Κατά την πρώτη εικοσιπενταετία του 19ου αιώνα η θεωρία για την κυματική φύση του φωτός δέχτηκε μια ώθηση αποφασιστική. Ήταν η πρώτη φορά που μια νευτωνική άποψη δεχόταν ένα τόσο ισχυρό κλονισμό με αποτέλεσμα την τελική της ανατροπή. Η καινούρια θεωρία εδραιώθηκε χωρίς τη σφραγίδα μιας αυθεντίας.

Ωστόσο δύο σοβαρά ερωτήματα παρέμεναν αναπάντητα. Το πρώτο ήταν «εφόσον το φως είναι κύμα, ποιος είναι ο ωκεανός;» ενώ το δεύτερο «εφόσον το κύμα είναι μηχανισμός διάδοσης μιας ταλάντωσης ποια είναι η φυσική ποσότητα που εκτελεί ταλάντωση στην περίπτωση των κυμάτων του φωτός;» Και για μεν το πρώτο η απάντηση ήταν ίδια με αυτή που είχαν δώσει οι φυσικοί του προηγούμενου αιώνα. Εξακολουθούσαν να ισχυρίζονται ότι το φως διαδίδεται μέσα στον φωτοφόρο ΑΙΘΕΡΑ την ουσία που κάλυπτε ολόκληρο το Σύμπαν και μολονότι η ύπαρξή του δεν είχε ανιχνευτεί οι φυσικοί διατηρούσαν ένα είδος πίστης σε αυτήν.

Η απάντηση για το δεύτερο από τα ερωτήματα αργούσε να έλθει.

## 1870. Το φως είναι κύμα ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ

Τέσσερις περίπου δεκαετίες μετά την παρέμβαση του Fresnel, ο James Clark Maxwell, ο μεγαλύτερος θεωρητικός φυσικός του 19ου αιώνα, με την Ηλεκτρομαγνητική του θεωρία έπεισε την επιστημονική κοινότητα ότι το φως διαδίδεται μέσα στον Αιθέρα με εγκάρσια κύματα της ίδιας μορφής με τα ηλεκτρομαγνητικά. Και η απάντηση στο ερώτημα «ποια είναι η φυσική ποσότητα που εκτελεί ταλάντωση στην περίπτωση των κυμάτων του φωτός;» ήταν «η ένταση τόσο του ηλεκτρικού όσο και του σιαμαίου μαγνητικού πεδίου».

Στη θεωρία του τρεις από τις σημαντικότερες έννοιες της Φυσικής,

το ΠΕΔΙΟ, το ΚΥΜΑ και η ΕΝΕΡΓΕΙΑ,

συγκατοίκησαν στο εσωτερικό της ίδιας υλικής οντότητας και της επέβαλλαν τρία διαφορετικά ονόματα . ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΚΥΜΑ και ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

Η υλική αυτή οντότητα κυοφορήθηκε ως μία προφητεία μέσα στις μαθηματικές εξισώσεις του Maxwell αλλά μερικά χρόνια αργότερα ( το 1889 ) έκανε την «εμφάνισή της στο προσκήνιο της Πραγματικότητας – και για την ακρίβεια στο εργαστήριο του Heinrich Hertz - δημιουργημένη με διατάξεις ηλεκτρομαγνητικές.

Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το ηλεκτρομαγνητικό ΠΕΔΙΟ είναι δύο σιαμαία πεδία, το ένα ηλεκτρικό ( χρονικώς μεταβαλλόμενο ) , το άλλο μαγνητικό ( χρονικώς μεταβαλλόμενο )

τα οποία είναι αδύνατον να υπάρξουν το ένα χωρίς το άλλο. Το ηλεκτρομαγνητικό αυτό πεδίο παράγεται από επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία και ΔΙΑΔΙΔΕΤΑΙ με μηχανισμό ΚΥΜΑΤΟΣ με ταχύτητα διάδοσης ίση με την ταχύτητα του φωτός. Και η θεωρία αυτή αναφέρεται σε όλες τις ηλεκτρομαγνητικές ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΕΣ στις οποίες θεωρεί ότι ανήκει και το φως.

Στα τέλη του 19ου αιώνα το φως θεωρείται από την άποψη της υλικής του δομής ηλεκτρομαγνητικό πεδίο από τη σκοπιά του τρόπου διάδοσης ηλεκτρομαγνητικό κύμα από τη σκοπιά της ενέργειας που μεταφέρει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Στο τέλος όμως του 19ου αιώνα ανακαλύφθηκε και ένα καινούριο φαινόμενο ανεξήγητο με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Ήταν το «ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ» . Την ίδια εποχή προβλήματα ερμηνείας παρουσιάζει επίσης και το φαινόμενο «ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ από ένα θερμό αντικείμενο».

1905. Albert Einstein. Το ξεπέρασμα ενός διλήμματος

Πέντε χρόνια αργότερα ο Albert EINSTEIN επιδιώκοντας να δώσει ερμηνεία στο ανεξήγητο μέχρι τότε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με μια από τις τρεις εργασίες του πρότεινε μια αξιοποίηση της θεωρίας του Planck και μια περαιτέρω προέκτασή της . Σύμφωνα με το δικό του μοντέλο κάθε φωτεινή δέσμη συντίθεται από σωματίδια καθένα από τα οποία μεταφέρει ενέργεια ενός κβάντου. Είκοσι χρόνια αργότερα τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν ΦΩΤΟΝΙΑ. Το φωτόνιο άρχισε να θεωρείται σωματίδιο χωρίς μάζα ηρεμίας

Το καινοφανές στοιχείο της νέας θεωρίας είναι ότι δεν αρνείται την κυματική φύση του φωτός. Για πρώτη φορά το δίλημμα «σωματίδιο ή κύμα» φαίνεται να ξεπερνιέται. Η άποψη αυτή που επικρατεί μέχρι και σήμερα αποδίδει σε κάθε ακτινοβολία μία διπλή υπόσταση. Η ακτινοβολία συνιστά μία υλική οντότητα αλλά σε ορισμένα από τα φαινόμενα με τα οποία εκδηλώνεται η ύπαρξή της – διάθλαση, συμβολή, περίθλαση, πόλωση,- μπορούμε να ερμηνεύσουμε και να προβλέψουμε τη συμπεριφορά της επικαλούμενοι την κυματική της υπόσταση. Σε άλλα πάλι φαινόμενα – κατά τα οποία αλληλεπιδρά με την ύλη , όπως είναι το φωτοηλεκτρικό- για να ερμηνεύσουμε και να προβλέψουμε τη συμπεριφορά της, της αποδίδουμε μία σωματιδιακότητα, θεωρούμε ότι συγκροτείται από φωτόνια.

Στο μεταξύ στην ίδια δημοσίευση στο τεύχος 17 με τη διασημότερη από τις τρεις εργασίες του, τη λεγόμενη Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, προτείνει ΝΑ ΑΓΝΟΗΣΟΥΜΕ τον ΑΙΘΕΡΑ αποδεικνύοντας ότι πρόκειται για μία έννοια που μας είναι εντελώς άχρηστη και ότι οι ηλεκτρομαγνητικά κύματα και οι αντίστοιχες ακτινοβολίες δεν έχουν ανάγκη κάποιον υποθετικό «ωκεανό» για τη διάδοσή τους στο κενό.

## 1. ΑΠΟΔΕΙΞΕΙΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

- ΑΝΑΚΛΑΣΗ
- ΔΙΑΘΛΑΣΗ
- ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕΛΑΝΟΣ ΣΩΜΑΤΟΣ
- ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ
- ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ COMPTON

### 1.1. ΑΝΑΚΛΑΣΗ

Έως τώρα εξετάσαμε τη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό. Εκεί ένα επίπεδο κύμα θα διαδοθεί σε σταθερή κατεύθυνση και με σταθερή ταχύτητα  $c$ . Όταν όμως το κύμα συναντήσει μια περιοχή με υλη όπως π.χ. ένα μεταλλικό φύλλο, το τζαμί ενός παράθυρου ή ένα στρώμα νερού θα αλληλεπιδράσει με την υλη και θα μεταβληθούν η ταχύτητα, η κατεύθυνση έντασης και η πόλωση του. Αυτές οι μεταβολές μπορούν φυσικά να υπολογιστούν από τις εξισώσεις του Maxwell αν ληφθούν υπόψη τα ηλεκτρικά φορτία και ρεύματα, που επάγονται από τη δράση του κύματος μέσα στην ύλη. Συχνά όμως οι υπολογισμοί γίνονται εξαιρετικά πολύπλοκοι. Επιπλέον οι εξισώσεις Maxwell μας δίνουν πολύ περισσότερες πληροφορίες από αυτές που συνήθως θέλουμε να ξέρουμε. Για παράδειγμα αν ένα κύμα προσπέσει σ' επιφάνεια νερού, μπορεί να θέλουμε να υπολογίσουμε τη γωνία με την οποία εισέρχεται στο νερό, πολλές φορές όμως δεν ενδιαφερόμαστε για τις μεταβολές της έντασης και της πόλωσης. Θα δούμε ότι ένας απλός κανόνας, που ονομάζεται Αρχή του Huygens μας επιτρέπει να ανακαλύψουμε χωρίς πολύπλοκους

υπολογισμούς πως η αλλαγή της κατεύθυνσης διάδοσης σχετίζεται με την αλλαγή της ταχύτητας του κυματος, καθώς εισέρχεται σε περιοχή που είναι γεμάτη ύλη κατασκευή Huygens είναι γεωμετρική κατασκευή βασισμένη στη συμπεριφορά του μετώπου των κυμάτων, παρακάμπτει δε τις εξισώσεις Maxwell.

## **ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΑΤΑ ΗΥΓΕΝΣ**

Η διάδοση των κυμάτων μπορεί να περιγράψει με τη βοήθεια των μετώπων κύματος ή των κορυφών του κύματος δηλ. των σημείων στα οποία το κύμα έχει μέγιστο πλάτος σε κάποια χρονική στιγμή. Ο κανόνας που διέπει τη διάδοση των μετώπων κύματος είναι η κατασκευή κατά Huygens. Για να βρείτε τη νέα θέση στην οποία μετατοπίστηκε το μέτωπο κύματος στο χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , σχεδιάστε πολλές μικρές σφαίρες ακτίνας  $v\Delta t$  με κέντρα στην παλιά θέση του μετώπου κύματος. Το νέο μέτωπο κύματος είναι η περιβάλλουσα εφαπτόμενη επιφάνεια αυτών των σφαιρών. Οι μικρές σφαίρες που χρησιμοποιούνται σ' αυτή την κατασκευή ονομάζονται κυματίδια. Η κατασκευή κατά Huygens εφαρμόζεται όχι μόνο στη διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό αλλά επίσης και στη διάδοση σε οποιοδήποτε διαφανές μέσο. Όπως θα δούμε στα επόμενα εδάφια η κατασκευή αυτή μας επιτρέπει να εξαγάγουμε τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης. Μολονότι θα δώσουμε έμφαση στη διάδοση του φωτός η κατασκευή κατά Huygens είναι γενικό χαρακτηριστικό της διάδοσης κυμάτων εφαρμόζεται το ίδιο καλά τόσο στα ηχητικά όσο και στα υδατικά κύματα. Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης όλων αυτών των κυμάτων είναι ουσιαστικά οι ίδιοι και σε μερικά

από τα παραδείγματα μας θα εκμεταλλευτούμε αυτό το γεγονός.

## **ΑΝΑΚΛΑΣΗ**

Ανάκλαση ονομάζεται το φαινόμενο της αλλαγής διεύθυνσης ενός κύματος μέσα στο ίδιο μέσο από μια διαχωριστική επιφάνεια. Τα πιο συνηθισμένα παραδείγματα ανάκλασης είναι αυτά των κυμάτων του φωτός, ήχου και νερού. Οι επιφάνειες που προκαλούν το φαινόμενο της ανάκλασης ονομάζονται κάτοπτρα της ανάκλασης. Ο νομός της ανάκλασης του κύματος το οποίο προσπίπτει σε επίπεδη επιφάνεια υπό κάποια γωνία είναι ευρέως γνωστό. Η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης. Ανακλαστική επιφάνεια είναι αυτή που συμβαίνει το φαινόμενο της ανάκλασης. Προσπίπτουσα ακτίνα είναι αυτή που κατευθύνεται από τη φωτεινή πηγή προς το κάτοπτρο. Ανακλώμενη ακτίνα είναι αυτή που ξεκινάει απ' το και φτάνει στον παρατηρητή. Επίπεδο ανάκλασης είναι το επίπεδο που ορίζεται από την προσπίπτουσα στην ανακλώμενη ακτίνα. Σημείο πρόσπτωσης είναι το σημείο του κατόπτρου όπου προσπίπτει η ακτίνα και στη συνέχεια ανακλάται το σημείο πρόσπτωσης είναι και σημείο ανάκλασης. Γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται από την προσπίπτουσα ακτίνα με την κάθετο του σημείου πρόσπτωσης από την οποία και μετράται. Γωνία ανάκλασης είναι η γωνία που σχηματίζεται την ανακλώμενη ακτίνα με την κάθετο του σημείου πρόσπτωσης από την οποία και μετράται.

Ανάκλαση φωτός. Το φως μπορεί να ανακλαστεί κατοπτρικά (όπως στους καθρέφτες) ή να διαχυθεί. Ο τρόπος που ανακλάται το φως εξαρτάται.

## ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Η ταχύτητα του φωτός σε υλικό μέσο όπως ο αέρας, το νερό ή το γυαλί διαφέρει από την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Διάθλαση ονομάζεται το φυσικό φαινόμενο της εκτροπής της ευθύγραμμης τροχιάς διάδοσης που υφίστανται φωτεινά ή άλλα κύματα όταν διέρχονται από έναν διαπερατό από αυτά μέσον σε έτερο. Διάθλαση φωτός χαρακτηρίζεται κάθε οπτικό φαινόμενο της εκτροπής της διεύθυνσης των φωτεινών ακτίνων κατά τη μετάβαση τους από ένα διαπερατό μέσο διάδοσης με δείκτη διάθλασης  $N_1$  σε άλλο μέσο με δείκτη  $N_2 \neq N_1$ . Η διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων ονομάζεται διόπτρο. Γωνία πρόσπτωσης ονομάζεται η σχηματιζόμενη γωνία από τη διεύθυνση της ακτίνας με την κάθετο του σημείου πρόσπτωσής της. Γωνία διάθλασης χαρακτηρίζεται η γωνία από τη διαθλώμενη ακτίνα με την ίδια κάθετο του σημείου εισόδου στο ίδιο περατό μέσο.

Επίπεδο διάθλασης χαρακτηρίζεται το επίπεδο που ορίζεται από τη προσπίπτουσα και ανακλώμενη ακτίνα.

## ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ

- 1) Το επίπεδο διάθλασης είναι κάθετο στη διαθλαστική επιφάνεια.
- 2) το ημίτονο του ημίτονου της γωνίας πρόσπτωσης προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης είναι σταθερό για δύο ορισμένα οπτικά μέσα όπου και υφίσταται η σχέση

$$\frac{\eta_{\mu\alpha}}{\eta_{\mu\beta}} = c = \text{σταθερό}$$

Από την ιστορία φαίνεται ότι μελέτησε πρώτος τούς νόμους της



διάθλασης ο Κλαύδιος Πτολεμαίος τον 2ο αι μ.χ. στην Αλεξάνδρεια. Ο λεγόμενος σήμερα νόμος τού Snell περιγράφεται για πρώτη φορά από τον Ιμπισάλ ο οποίος τον χρησιμοποιούσε για να προσδιορίσει το σχήμα φακών που συγκεντρώνουν το φως, γνωστοί ως ανακλαστικοί φακοί.

Στα εργαστήρια οπτικής και φασματοσκοπίας τα πρίσματα χρησιμοποιούνται για το διαχωρισμό των φωτεινών ακτίνων στα συστατικά τους χρώματα. Το γυαλί τού πρίσματος έχει ελαφρώς διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για φως διάφορων μηκών κύματος και ως εκ τούτου κάμπτει τις ακτίνες διαφορετικών χρωμάτων κατά διαφορετικές ποσότητες

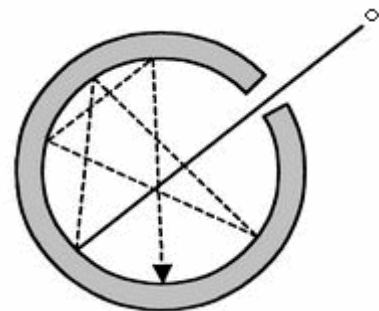
Καθώς περνάει από το πρίσμα το φως διαθλάται δύο φορές μία φορά στην κοινή επιφάνεια αέρα γυαλιού και άλλη μία στην κοινή επιφάνεια γυαλιού αέρα. Σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας ένα καλό πρίσμα εισάγει διάφορα πολλών μοιρών μεταξύ των διευθύνσεων των αναδυόμενων φωτεινών ακτίνων τού ερυθρού και τού ιώδους. Ο σχηματισμός των χρωμάτων που δημιουργείται από την ανάλυση των φωτεινών ακτίνων από ένα πρίσμα ονομάζεται φάσμα τού φωτός. Το λευκό φως που εκπέμπεται από τον Ήλιο έχει συνεχές φάσμα που αποτελείται από μίγμα όλων των χρωμάτων. Το έγχρωμο φως που εκπέμπεται από τα άτομα ενός χημικού στοιχείου σ' ένα σωλήνα ηλεκτρικής εκκένωσης όπως π.χ. ο σωλήνας νέου έχει διακεκριμένο φάσμα το οποίο αποτελείται από ένα μικρό αριθμό διακεκριμένων χρωμάτων. Καθένα χρώμα είναι καθαρό αυτά τα διακεκριμένα χρώματα ονομάζονται φασματικές.

## 1.1. ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕΛΑΝΟΣ ΣΩΜΑΤΟΣ

Το 1900 ξεκίνησε από τον Planck μια επανάσταση στην φυσική η οποία ολοκληρώθηκε 28 χρόνια αργότερα με την γέννηση της κβαντικής θεωρίας. Η κβαντική φυσική μαζί με την σχετικότητα αποτελούν τα δύο βήματα στα οποία στηρίζεται το οικοδόμημα της νεότερης φυσικής. Η κβαντική φυσική ασχολείται με τα φαινόμενα μικρής κλίμακας, δηλαδή ερμηνεύει την συμπεριφορά της ύλης στις μικρές διαστάσεις των ατόμων και των υποατομικών σωματιδίων.

Ένα από τα λίγα προβλήματα στα οποία η κλασική φυσική (Μηχανική του Newton και η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell ) δεν μπορούσε να δώσει ικανοποιητική εξήγηση, ήταν η ερμηνεία της ακτινοβολίας τους μέλανος σώματος .Ως μέλαν σώμα θεωρούμε εκείνο που απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω του. Ένα μέλαν σώμα μπορεί να προσεγγιστεί άριστα από την κοιλότητα που δείχνει το σχήμα 1.

Κάθε ακτινοβολία που περνά από την οπή ο και εισέρχεται μέσα στην κοιλότητα, ανακλάτε στην ανώμαλη επιφάνειας αυτής μέχρι να απορροφηθεί πλήρως. Έτσι η οπή Ο στο σχήμα 1 είναι ένα μέλαν σώμα.



Σχήμα 1

Λέμε ότι η κοιλότητα βρίσκεται σε θερμική ισορροπία όταν η ακτινοβολία που απορροφά είναι ίση με την ακτινοβολία που εκπέμπει στον ίδιο χρόνο. Αυτό γίνεται όταν έχει αποκατασταθεί σταθερή θερμοκρασία στην κοιλότητα. Τότε το μικρό ποσό ακτινοβολίας το οποίο εξέρχεται από την οπή  $a$ , λέγεται **ακτινοβολία μέλανος σώματος** και μπορεί να αναλυθεί σε μήκη κύματος και να αποδοθεί γραφικά η ενέργεια που ακτινοβολείται ανά second από το μέλαν σώμα, σε συνάντηση με το μήκος κύματος  $\lambda$ .

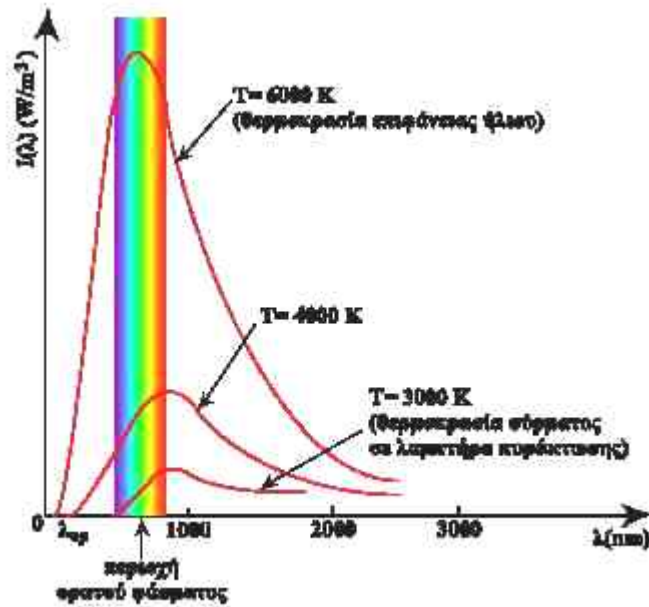
Αν σε συνάρτηση  $f(\lambda, T)$  παραστήσουμε το ποσόν της ακτινοβολίας μέλανος σώματος ανά μονάδα επιφανείας, ανά μονάδα χρόνου και με μήκη κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $\lambda + \Delta\lambda$  τότε οι καμπύλες του Σχήματος 2 παριστάνουν την μεταβολή της  $f(\lambda, T)$  σε συνάρτηση με το μήκος κύματος  $\lambda$ . Από το σχήμα φαίνεται ότι η μορφή των καμπύλων εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του μέλανος σώματος.

Το εμβαδόν μεταξύ κάθε καμπύλης και του άξονα των  $\lambda$  παριστάνει την ακτινοβολούμενη ισχύ  $R$  ανά μονάδα επιφάνειας του μέλανος σώματος, που περιέχει όλα τα μήκη κύματος και που αντιστοιχεί σε ορισμένη θερμοκρασία αυτού.

Η ακτινοβολούμενη ισχύς  $R$  βρέθηκε ότι ακολουθεί ένα νόμο που είναι γνωστός ως **νόμος Stefan-Boltzmann** και ο οποίος έχει την μορφή

$$R = \sigma T^4$$

όπου  $\sigma$  μια σταθερά που έχει μονάδες  $W/m^2 (K)^4$



Σχήμα 2

Πράγματι το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη των 6000 K είναι 16 φορές μεγαλύτερο από το εμβαδόν που αντιστοιχεί στην καμπύλη των 3000 K.

Επίσης βρέθηκε ότι μεταξύ του μήκους κύματος  $\lambda_m$  που αντιστοιχεί στο μέγιστο της καμπύλης και της θερμοκρασίας της οποίας έχει ληφθεί η καμπύλη, υπάρχει σχέση:

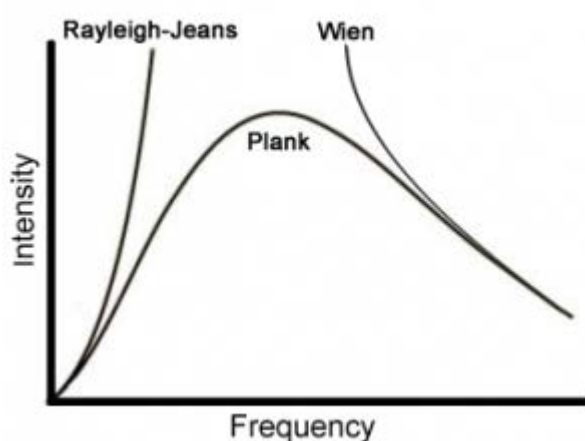
$$\lambda_m T = \text{σταθ.}$$

Που είναι γνωστή ως **νόμος του Wien**. Δηλαδή τα μεγέθη  $\lambda_m$  και  $T$  είναι αντίστροφα ανάλογα. Αυτό σημαίνει ότι όταν η θερμοκρασία του μέλανος σώματος αυξάνεται, τότε το μήκος του κύματος στο οποίο εκπέμπεται το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας μικραίνει.

## Προσπάθειες ερμηνείας της ακτινοβολίας μέλανος σώματος.

Στα τέλη του περασμένου αιώνα έγιναν σοβαρές προσπάθειες να ερμηνευθούν οι καμπύλες του Σχήματος 2, δηλαδή να βρεθεί η αναλυτική μορφή της συνάρτησης  $f(\lambda, T)$ . Θα αναφέρουμε τις κυριότερες απ' αυτές.

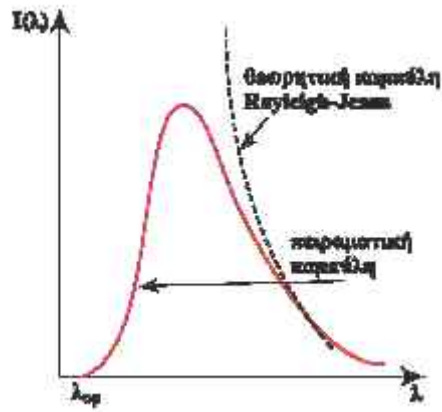
Το 1893 ο γερμανός φυσικός Wien στηριζόμενος σε κλασσικούς θερμοδυναμικούς συλλογισμούς βρήκε μία μορφή για την συνάρτηση  $f(\lambda, T)$  η οποία συμφωνούσε με τις πειραματικές καμπύλες μόνο στο τμήμα που αφορά τα μικρά μήκη



Σχήμα 3

Το 1900 αναπτύχθηκε για την ερμηνείας της  $f(\lambda, T)$  η θεωρία των Rayleigh-Jeans . Σύμφωνα με αυτή, πηγή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος είναι τα ηλεκτρικά φορτία που υπάρχουν στα τοιχώματα της κοιλότητας. Αυτά συμπεριφέρονται ως απλοί αρμονικοί ταλαντωτές και μπορούν να εκπέμπουν και να απορροφούν ακτινοβολία καθένας με την χαρακτηριστική του

συχνότητα ταλάντωσης. Επειδή λοιπόν στα τοιχώματα της κοιλότητας υπάρχει πολύ μεγάλο πλήθος από τέτοιους ταλαντωτές με ανάλογο πλήθος συχνοτήτων, η ακτινοβολία εμφανίζεται να έχει συνεχές φάσμα συχνοτήτων. Όπως ένας απλός αρμονικός ταλαντωτής ορισμένης συχνότητας μπορεί να έχει οποιαδήποτε ενέργεια μεταξύ 0 και μίας ανώτατης τιμής, έτσι και οι ταλαντωτές της κοιλότητας μπορούσαν να εκπέμπουν ή να απορροφούν ακτινοβολία με οποιαδήποτε ενέργεια μεταξύ 0 και μιας ανώτατης τιμής. Η μορφή της  $f(\lambda, T)$  που πρόκυψε βάσει της θεωρίας αυτής εξηγούσε μόνο το τμήμα των καμπύλων που αντιστοιχεί στα μεγάλα μήκη κύματος, του μέλανος σώματος είναι τα ηλεκτρικά φορτία που υπάρχουν στα τοιχώματα της κοιλότητας. Αυτά συμπεριφέρονται ως απλοί αρμονικοί ταλαντωτές και μπορούν να εκπέμπουν και να απορροφούν ακτινοβολία καθένας με την χαρακτηριστική του συχνότητα ταλάντωσης. Επειδή λοιπόν στα τοιχώματα της κοιλότητας υπάρχει πολύ μεγάλο πλήθος από τέτοιους ταλαντωτές με ανάλογο πλήθος συχνοτήτων, η ακτινοβολία εμφανίζεται να έχει συνεχές φάσμα συχνοτήτων. Όπως ένας απλός αρμονικός ταλαντωτής ορισμένης συχνότητας μπορεί να έχει οποιαδήποτε ενέργεια μεταξύ 0 και μίας ανώτατης τιμής, έτσι και οι ταλαντωτές της κοιλότητας μπορούσαν να εκπέμπουν ή να απορροφούν ακτινοβολία με οποιαδήποτε ενέργεια μεταξύ 0 και μιας ανώτατης τιμής. Η μορφή της  $f(\lambda, T)$  που πρόκυψε βάσει της θεωρίας αυτής εξηγούσε μόνο το τμήμα των καμπύλων που αντιστοιχεί στα μεγάλα μήκη κύματος,



Σχήμα 4.

Έτσι η προσπάθεια να ερμηνευθούν οι καμπύλες με βάση έννοιες της κλασικής φυσικής οδήγησε σε αδιέξοδο.

Το 1900 ο Γερμανός φυσικός Planck Max παρατήρησε ότι αν και οι αρμονικοί ταλαντωτές που υπέθεσε ο Rayleigh, εκπέμπουν ή απορροφούν ενέργεια όχι **συνεχώς** αλλά **διακριτά**, τότε η συνάρτηση  $f(\lambda, T)$  που προκύπτει από θεωρητικούς υπολογισμούς έχει τέτοια μορφή που ερμηνεύει τις καμπύλες του Σχήματος 2 σε όλη την έκταση.

Η βασική αυτή υπόθεση του Planck περιγράφεται από τον τύπο:

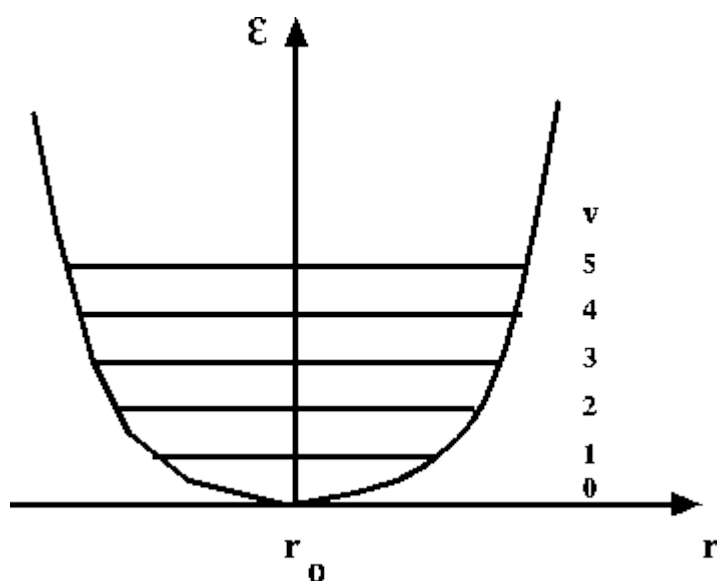
$$E_n = nh\nu \quad n=1, 2, 3, \dots$$

Όπου  $E_n$  η ενέργεια που έχει ένας αρμονικός ταλαντωτής συχνότητας  $\nu$  και  $h$  μια σταθερά η οποία ονομάζεται σταθερά του Planck είναι ίση με  $6,626 \cdot 10^{-34}$  Joule /s.

Επομένως η ενέργεια του αρμονικού ταλαντωτή μπορεί να πάρει τις τιμές  $0, h\nu, 2h\nu, \dots$ . Οι τιμές της ενέργειας ενός ταλαντωτή είναι **διακριτές** και ονομάζονται **ενεργειακές στάθμες του ταλαντωτή.**

Έτσι στην κλασική φυσική ένας απλός αρμονικός ταλαντωτής με πλάτος  $x_0$  έχει ολική ενέργεια  $E = \frac{1}{2} D x_0^2$ . Η  $E$

μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή μεταξύ 0 και μιας μέγιστης. Αποδίδεται με γραφικά από την συνεχή καμπύλη τους



Σχήμα 5.

Σύμφωνα με τον Planck η ενέργεια ενός αρμονικού ταλαντωτή παίρνει μόνο διακριτές τιμές (είναι δηλαδή κβαντισμένη) οι οποίες είναι πολλαπλάσια της ποσότητας  $h\nu$  (quantum). Κατά την απορρόφηση ενέργειας ο απλός αρμονικός ταλαντωτής μεταπήδα από μία τιμή ενέργειας παραδείγματος  $3h\nu$  σε μία ανώτερη π.χ.  $4h\nu$ . Κατά την εκπομπή ενέργειας ο ταλαντωτής μεταπηδά από μία τιμή ενέργειας ανώτερη σε μία τιμή ενέργειας κατώτερη π.χ.  $5h\nu$  σε  $4h\nu$ . Συνεπώς η απορρόφηση και η εκπομπή ενέργειας από ένα αρμονικό ταλαντωτή γίνεται από ποσά  $h\nu$ , σε αντίθεση με την κλασσική φυσική που δέχεται ότι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια σαν κύμα εκπέμπεται και απορροφάτε κατά συνεχή τρόπο από τα άτομα.



Παρόλο που κάθε ταλαντωτής της κοιλότητας εκπέμπει ή απορροφά ακτινοβολία σε ορισμένες συχνότητες, το φάσμα της ακτινοβολίας είναι συνεχές λόγω των μεγάλων πλήθους των ταλαντωτών.

Ο Planck σύζευξε κατά κάποιο τρόπο τις δύο κλασικές θεωρίες των Wien και Rayleigh-Jeans, κάνοντας μία ριζοσπαστική τομή στις ιδέες που υπήρχαν ως τότε για την ενέργεια που μπορεί να έχει ένα σύστημα. Παρόλα αυτά όμως ο ίδιος δεν αμφισβήτησε το κυματικό χαρακτήρα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, πράγμα που έγινε από τον Einstein στην ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

### 1.3. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός αγωγού όταν προσπίπτει το φως. Τα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται απορροφούν ενέργεια από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και κατορθώνουν έτσι να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που κανονικά τα περιορίζει στο εσωτερικό του αγωγού.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1887 από τον Hertz, εντελώς τυχαία. Παρατήρησε ότι ένας σπινθήρας μπορούσε να προκληθεί πιο εύκολα μεταξύ δύο ηλεκτρικά φορτισμένων σφαιρών, αν οι επιφάνειες τους φωτίζονται με το φως ενός άλλου σπινθήρα. Η ύπαρξη του φράγματος δυναμικής ενέργειας στην επιφάνεια ήταν ήδη γνωστή. Το 1883, ο Thomas Edison είχε ανακαλύψει την θερμιονική εκπομπή κατά την οποία η ενέργεια διαφυγής παρέχεται με θέρμανση του υλικού σε πολύ υψηλή θερμοκρασία ελευθερώνοντας ηλεκτρόνια με μια διαδικασία ανάλογη του βρασμού ενός υγρού. Η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να αποκτήσει ένα ηλεκτρόνιο για να διαφύγει από μια ορισμένη επιφάνεια ονομάζεται έργο εξαγωγής της επιφάνειας. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μελετήθηκε λεπτομερώς από τον Wilhelm Hallwachs και Philipp Lenard στην περίοδο 1886-1900 τα αποτελέσματα τους ήταν τελείως απρόσμενα. Οι Hallwachs και Lenard μελέτησαν πως μεταβάλλεται αυτό το ρεύμα με την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και με την συχνότητα και με την ένταση του φωτός. Μετά την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου το 1897, έγινε σαφές ότι το φως προκαλεί την εκπομπή ηλεκτρονίων από την κάθοδο. Μετά την εκπομπή τους τα

ηλεκτρόνια ωθούνται προς την άνοδο από το ηλεκτρικό πεδίο. Οι Hallwachs και Lenard βρήκαν ότι όταν πάνω στην κάθοδο προσπίπτει μονοχρωματικό φως, δεν εκπέμπεται κανένα φωτοηλεκτρόνιο αν η συχνότητα του φωτός δεν είναι μεγαλύτερη από μια ελάχιστη τιμή που ονομάζεται συχνότητα κατωφλίου.

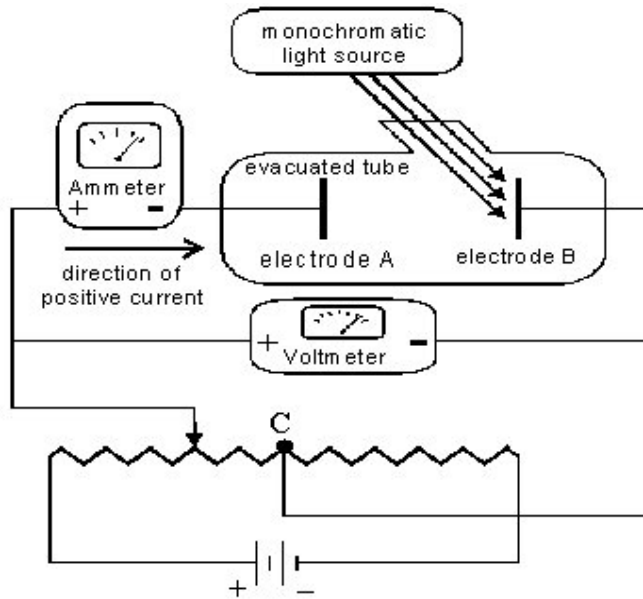
Όταν η συχνότητα  $f$  είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα κατωφλίου, κάποια ηλεκτρόνια εκπέμπονται από την κάθοδο με αρκετά μεγάλες αρχικές ταχύτητες. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι ακόμη και χωρίς ηλεκτρεγερτική δύναμη στο εξωτερικό κύκλωμα κάποια ηλεκτρόνια φθάνουν στον συλλέκτη προκαλώντας ένα μικρό ρεύμα στο εξωτερικό κύκλωμα. Η αντίστροφη τάση που απαιτείται για να σταματήσει εντελώς τη ροή ηλεκτρονίων ονομάζεται δυναμικό αποκοπής.

Όταν η ένταση του φωτός αυξάνεται ενώ η συχνότητα παραμένει ίδια, το ρεύμα σταθεροποιείται σε μια μεγαλύτερη τιμή πράγμα που δείχνει ότι εκπέμπονται περισσότερα ηλεκτρόνια. Όταν η ένταση του φωτός αυξάνεται τα ηλεκτρόνια θα έπρεπε να είναι ικανά να αποκτήσουν περισσότερη ενέργεια, προκαλώντας αύξηση του δυναμικού αποκοπής. Το δυναμικό αποκοπής όμως βρέθηκε ότι είναι ανεξάρτητο της έντασης. Η ορθή ανάλυση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου έγινε από τον Αϊνστάιν το 1905. Επεκτείνοντας μια πρόταση που είχε γίνει 4 χρόνια νωρίτερα από τον Max Planck, ο Αϊνστάιν πρότεινε ως αξίωμα ότι μια δέσμη φωτός αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας που ονομάζονται κβάντα ή φωτόνια.

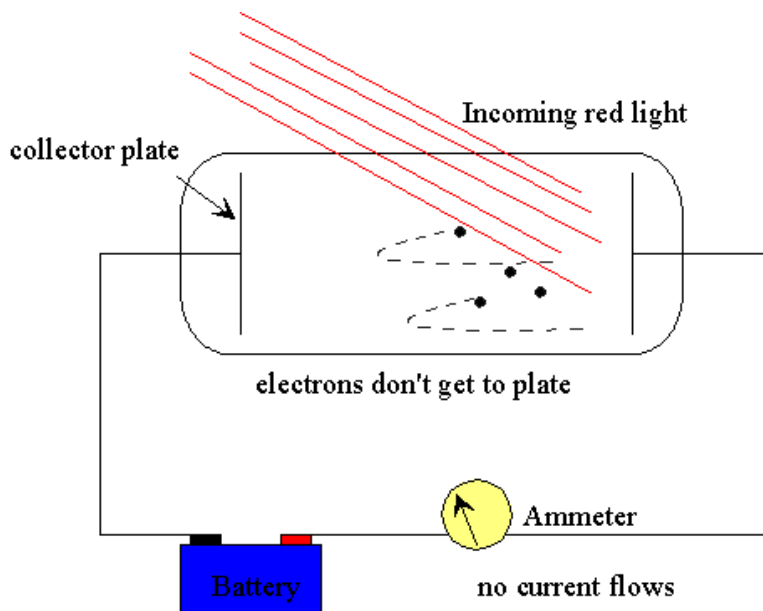
## Φωτοηλεκτρική Εξίσωση του Αϊνστάιν

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W_{\text{εξ}}$$

## Φωτογραφίες



Εικόνα1

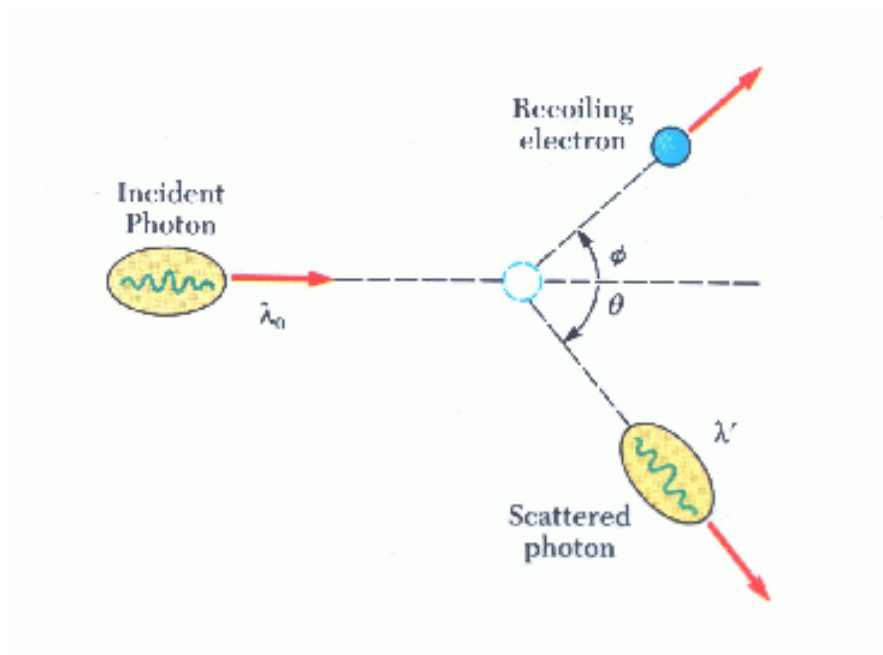


Εικόνα 2

## 1.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ COMPTON

Το φαινόμενο Compton είναι η σκέδαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (φωτονίων) από φορτισμένα σωμάτια. Κατά τη σκέδαση αυτή η συχνότητα της σκεδαζόμενης δέσμης ( $\alpha$ ) είναι μικρότερη από εκείνη της προσπίπτουσας και ( $\beta$ ) η μείωση αυτή εξαρτάται από τη γωνία σκέδασης. (Σύμφωνα με την κλασική θεωρία, σκεδαζόμενη και προσπίπτουσα δέσμη θα έπρεπε να έχουν την ίδια συχνότητα.)

Το φαινόμενο Compton ανακαλύφθηκε από τους Debye και Compton, ανεξάρτητα, στις αρχές του 20ου αι. (1923) μελετώντας σκέδαση ακτίνων-Χ από ελεύθερα ηλεκτρόνια. Η σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου δείχνεται στο παρακάτω σχήμα:



Ο Compton ερμήνευσε το φαινόμενο ως ελαστική κρούση ηλεκτρονίου-φωτονίου (θεωρώντας τα φωτόνια "σημειακά" σωμάτια), και εφαρμόζοντας αρχή διατήρησης

ενέργειας και ορμής (σχετικιστικά) κατέληξε στην εξής **εξίσωση του φαινομένου Compton:**

$$\lambda' - \lambda_0 = (h / m_e c) (1 - \cos \theta).$$

$\lambda_c = (h / m_e c) = 0.0243 \text{ \AA}$  είναι το μήκος κύματος Compton του ηλεκτρονίου.

Η ανακάλυψη και η ερμηνεία του φαινομένου Compton έδωσαν στον Compton, το 1927, το βραβείο Nobel.

## 2. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΣΥΝΗΓΟΡΟΥΝ ΥΠΕΡ ΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΦΥΣΗΣ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

- ❖ ΣΥΜΒΟΛΗ
- ❖ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ
- ❖ ΠΟΛΩΣΗ

### 2.1. Περιγραφή κύματος

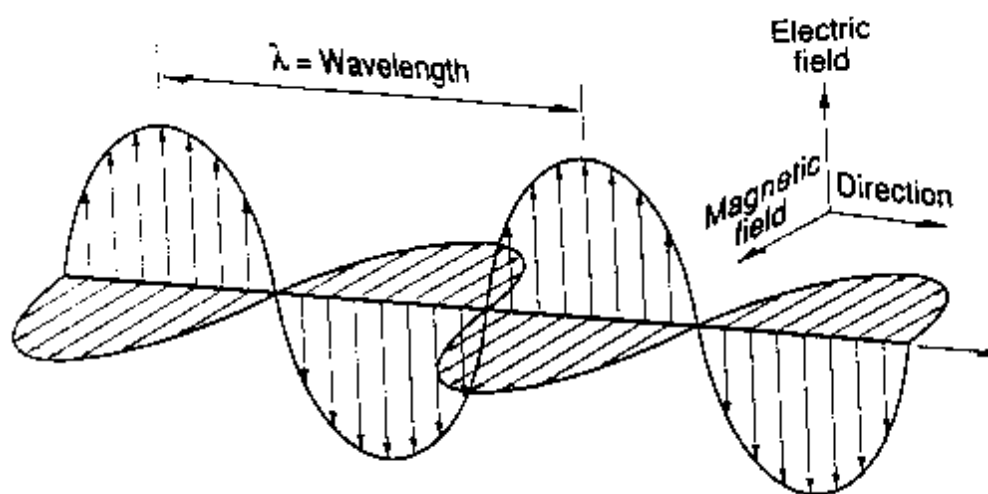
#### ➤ **Η περιοδικότητα του κύματος.**

**Κύμα** ονομάζεται μια διαταραχή που μεταδίδεται στο χώρο και το χρόνο. Ο όρος **Κύμα** (από το αρχαίο ελληνικό ρήμα "κύω" = φουσκώνομαι) χαρακτηρίζει τη μεταφορά της διαταραχής συνήθως διαμέσου ενός μέσου. Η μεταφορά αυτή (μετάδοση) γίνεται, στα υλικά μέσα, ως παλμική κίνηση μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του μέσου, όμως ορισμένα είδη κυμάτων, όπως τα ηλεκτρομαγνητικά, μπορούν να διαδίδονται και στο κενό.

Η διαταραχή αφορά ένα συγκεκριμένο φυσικό μέγεθος, ανάλογα με το είδος του κύματος. Για παράδειγμα σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα η διαταραχή αφορά την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Στα κύματα της θάλασσας

αυτό που διαταράσσεται είναι το επιφανειακό στρώμα νερού. Υπάρχουν πολλά ακόμη είδη κυμάτων, όλα όμως έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό: μεταφέρουν ενέργεια. Για παράδειγμα ένα κύμα που κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας αναγκάζει κάθε σώμα που επιπλέει ν' ανεβοκατεβαίνει. Τούτο συμβαίνει από την ενέργεια που μεταφέρει το κύμα και η οποία τελικά προκαλεί ταλαντώσεις στο σώμα που επιπλέει. Το ίδιο συμβαίνει και στον αέρα. Όταν ένα ηχητικό κύμα "ταξιδεύει" τα μόρια του αέρα ταλαντώνονται.

Τα κύματα είναι περιοδικά φαινόμενα, δηλαδή επαναλαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση των κυμάτων αυτό που επαναλαμβάνεται είναι η διαταραχή. Κάθε κύμα μπορεί να περιγραφεί με μαθηματικό τρόπο από την κυματική του εξίσωση.



### ➤ **Μεγέθη των κυμάτων**

Στη φυσική έχουν οριστεί τα εξής μεγέθη που αφορούν όλα τα κύματα. Ο κλάδος της που τα μελετάει ονομάζεται κυματική. Τα δύο πρώτα μεγέθη ορίζονται σε όλα τα περιοδικά φαινόμενα:

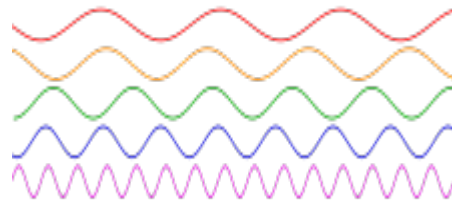
### ➤ **Περίοδος**

Περίοδος ονομάζεται το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών, ή της διέλευσης δύο διαδοχικών χαρακτηριστικών μιας διαταραχής, για παράδειγμα δυο κορυφών του κύματος από ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου. Συμβολίζεται με  $T$  και μετριέται σε  $s$  (δευτερόλεπτα). Εξ' ορισμού προκύπτει ότι  $T = \Delta t / N$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Για παράδειγμα, έστω ότι μετράμε την περίοδο των κυμάτων της θάλασσας. Σε χρόνο πέντε δεύτερα μετρήσαμε δύο κύματα που έσκασαν στην παραλία, άρα η περίοδος των κυμάτων της θάλασσας της συγκεκριμένης παραλίας είναι  $5/2 = 2,5$  δευτερόλεπτα

### ➤ **Συχνότητα**

Ημιτονοειδή κύματα διαφορετικών συχνοτήτων.

Συχνότητα ονομάζεται ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν ή πέρασαν από ένα συγκεκριμένο σημείο ανά μονάδες χρόνου, δηλαδή ο αριθμός των διαταραχών διά του χρονικού διαστήματος στο οποίο μετρήσαμε τον αριθμό των διαταραχών. Συμβολίζεται με  $f$  (frequency που σημαίνει συχνότητα στα Αγγλικά) και μετριέται σε *δευτερόλεπτα εις τη μείον ένα* ή  $s^{-1}$ , ή  $Hz$ . Έτσι, ισχύει  $f = N / \Delta t$ , όπου  $N$  είναι ο αριθμός των διαταραχών που πέρασαν σε χρονικό διάστημα  $\Delta t$ . Η συχνότητα είναι αντίστροφο μέγεθος της περιόδου και ισχύει:  $fT = (N / \Delta t)(\Delta t / N) = (N\Delta t / \Delta t N) = 1$



### ➤ **Μήκος κύματος**

Μήκος κύματος είναι η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Το κύμα είναι περιοδικό φαινόμενο,

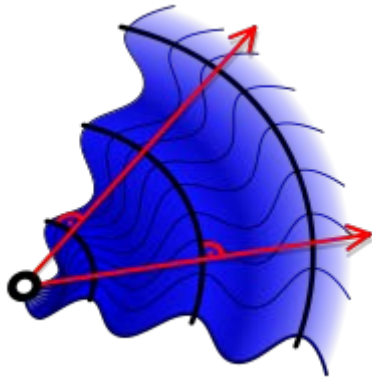


ουσιαστικά η επανάληψη μιας διαταραχής. Το μήκος αυτής της διαταραχής είναι το μήκος κύματος. Συμβολίζεται με  $\lambda$  και μετριέται όπως και το πλάτος του κύματος σε μονάδες μήκους, συνήθως σε μέτρα. Το μήκος κύματος είναι ίσο με την ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ δύο διαφορετικών συμφασικών σημείων.

### ➤ **Ταχύτητα κύματος**

Το κύμα μεταδίδεται στο χώρο. Η ταχύτητα της διαταραχής ονομάζεται ταχύτητα του κύματος. Συνήθως συμβολίζεται με  $u$ , και μετριέται ανάλογα με τις μονάδες μετρήσεις των μεγεθών μήκος του κύματος και περίοδος, συνήθως σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s). Από τον ορισμό του μήκους κύματος προκύπτει ότι  $u = \lambda/T = \lambda f$ . Η εξίσωση  $u = \lambda f$  ονομάζεται *θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής* και ισχύει σε όλα τα κύματα. Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα μέσο διάδοσης έχουν ταχύτητα χαρακτηριστική του συγκεκριμένου μέσου και του συγκεκριμένου είδους κύματος. Αυτό το γεγονός είναι υπεύθυνο για διάφορα φαινόμενα στην κυματική κατά την αλλαγή μέσου διάδοσης ή κατά τη διάδοση στο ίδιο μέσο κυμάτων με ίδια όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά που διαφέρουν στον τρόπο μετάδοσης. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται και μέσα στην ύλη, αλλά και στο κενό, δε χρειάζονται ειδικό μέσο διάδοσης όπως τα υπόλοιπα κύματα. Η ταχύτητά τους στο κενό θεωρείται μία από τις σημαντικότερες σταθερές στη Φυσική.

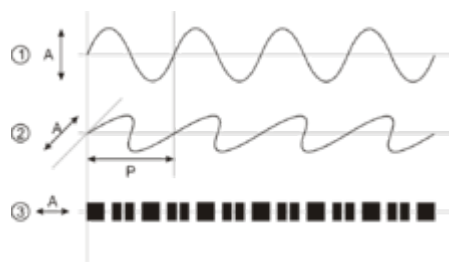
Επιφανειακό κύμα. Είναι σημειωμένα τα μέτωπα και μερικές



ακτίνες του κύματος.

- **Είδη κυμάτων**
- **Κατά την κατεύθυνση της διαταραχής**
- 

Σχηματική αναπαράσταση εγκάρσιου, διαμήκους κύματος και ενός συνδυασμού τους.

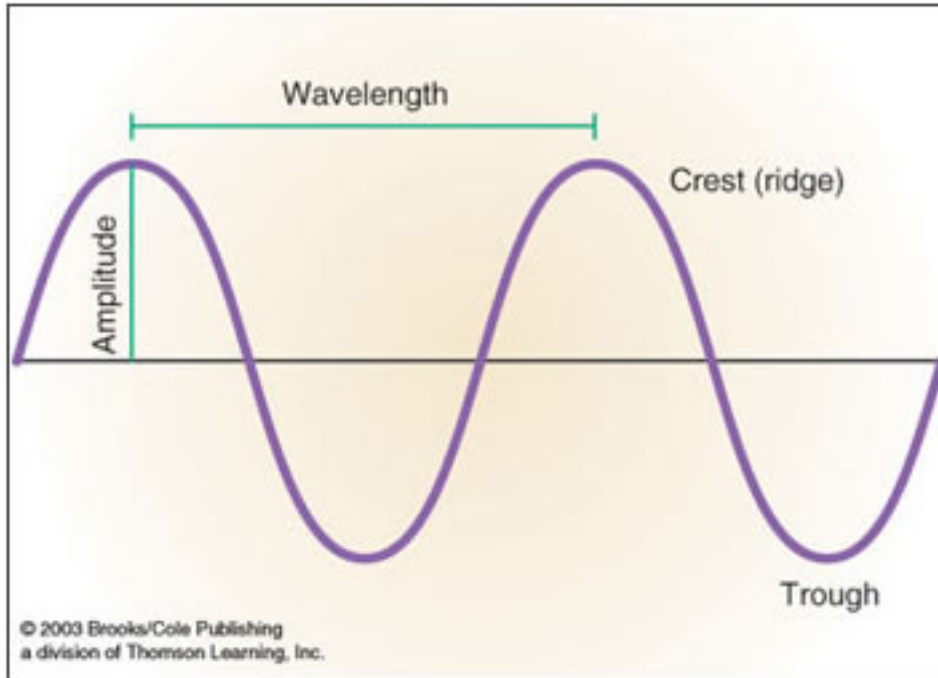


κυμάτων.

Η κατεύθυνση του διαταρασσόμενου μεγέθους μπορεί να είναι κάθετη ή παράλληλη ως προς την κατεύθυνση διάδοσης των

- **Διαμήκη κύματα**

Διαμήκη ονομάζονται τα κύματα στα οποία η κατεύθυνση του διαταρασσόμενου μεγέθους είναι παράλληλη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στα διαμήκη κύματα ορίζονται *πυκνώματα* και *αραιώματα*. Παράδειγμα τέτοιου κύματος είναι μια διαταραχή που διαδίδεται στις σπείρες ενός ελατηρίου:

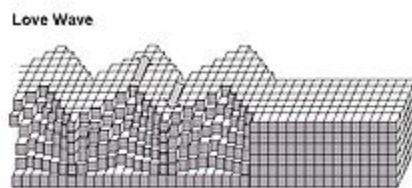


➤ **Πύκνωμα** είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η μέγιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους. Στο παράδειγμα του ελατηρίου αντιστοιχεί σε πύκνωμα στις σπείρες.

➤ **Αραίωμα** είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η ελάχιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους. Στο παράδειγμα του ελατηρίου αντιστοιχεί σε αραίωμα στις σπείρες.

➤ **Εγκάρσια κύματα**

Απεικόνιση εγκάρσιου κύματος. Σημειώνεται και το μήκος



του κύματος.

Εγκάρσια ονομάζονται τα κύματα στα οποία η κατεύθυνση του διαταρασσόμενου

μεγέθους είναι κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Στα εγκάρσια κύματα χαρακτηρίζονται σε αντιστοιχία με τα *πυκνώματα* και τα *αραιώματα* τα *όρη* και οι *κοιλιάδες*.

Παράδειγμα εγκάρσιου κύματος είναι μία λέμβος στη θάλασσα:

➤ **Όρος ή Κορυφή** είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η μέγιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους. Για παράδειγμα, λέμε όρος του κύματος είναι στη λέμβο αν αυτή βρίσκεται στο ανώτερο σημείο που μπορεί να βρεθεί.

➤ **Κοιλία** είναι το σημείο στο οποίο υπάρχει η ελάχιστη τιμή του διαταρασσόμενου μεγέθους. Για παράδειγμα, λέμε κοιλία του κύματος είναι στη λέμβο αν αυτή βρίσκεται στο κατώτερο σημείο που μπορεί να βρεθεί.

Κύματα ίδιας συχνότητας, ίδιου πλάτους, στην ίδια περιοχή του ίδιου μέσου όπου το ένα είναι εγκάρσιο και το άλλο διαμήκες, το διαμήκες έχει μεγαλύτερη ταχύτητα από το εγκάρσιο.

Σεισμικό κύμα

Στην επιστήμη της σεισμολογίας παρατηρούνται εκτός από εγκάρσια και διαμήκη κύματα και μια σειρά από *επιφανειακά κύματα*. Η διαφορά τους είναι ότι οι δύο πρώτες κατηγορίες διαδίδονται σε όλη τη Γη (συμπεριλαμβανομένου και του εσωτερικού της), ενώ τα επιφανειακά διαδίδονται μόνο στην επιφάνεια της γης. Επειδή, όλη η ενέργεια είναι συγκεντρωμένη σε μικρότερες περιοχές, αυτά είναι και τα πιο επικίνδυνα και καταστροφικά κύματα.

Στάσιμο κύμα μέσα σε κουτί πλάτους  $W$ . Τα στάσιμα κύματα που σχηματίζονται έχουν μήκος κύματος ανάλογο του πλάτους του κουτιού. Τα κύματα έχουν αύξουσα συχνότητα από κάτω προς τα πάνω.

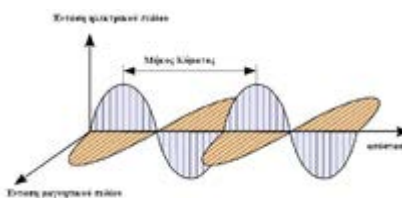
➤ **Κατά το μέσο διάδοσης**

Τα κύματα διαδίδονται μέσα σε μέσο, ή χωρίς μέσο, στο

κενό. Ανεξάρτητα που διαδίδονται, απαραίτητη προϋπόθεση για τη διάδοση ενός κύματος σε κάποια περιοχή είναι να μπορεί να διαταραχθεί το διαταρασσόμενο μέγεθος, που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο κύμα. Τα είδη των κυμάτων με βάση το μέσο διάδοσης στα οποία μπορούν να διαδοθούν είναι:

### ➤ Μηχανικό κύμα

Διαδίδονται σε ελαστικό μέσο. Το διαταρασσόμενο μέγεθος είναι η θέση των μορίων του μέσου. Τα κύματα αυτά μπορούν να είναι εγκάρσια ή διαμήκη (ή επιφανειακά).



Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

### ➤ Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

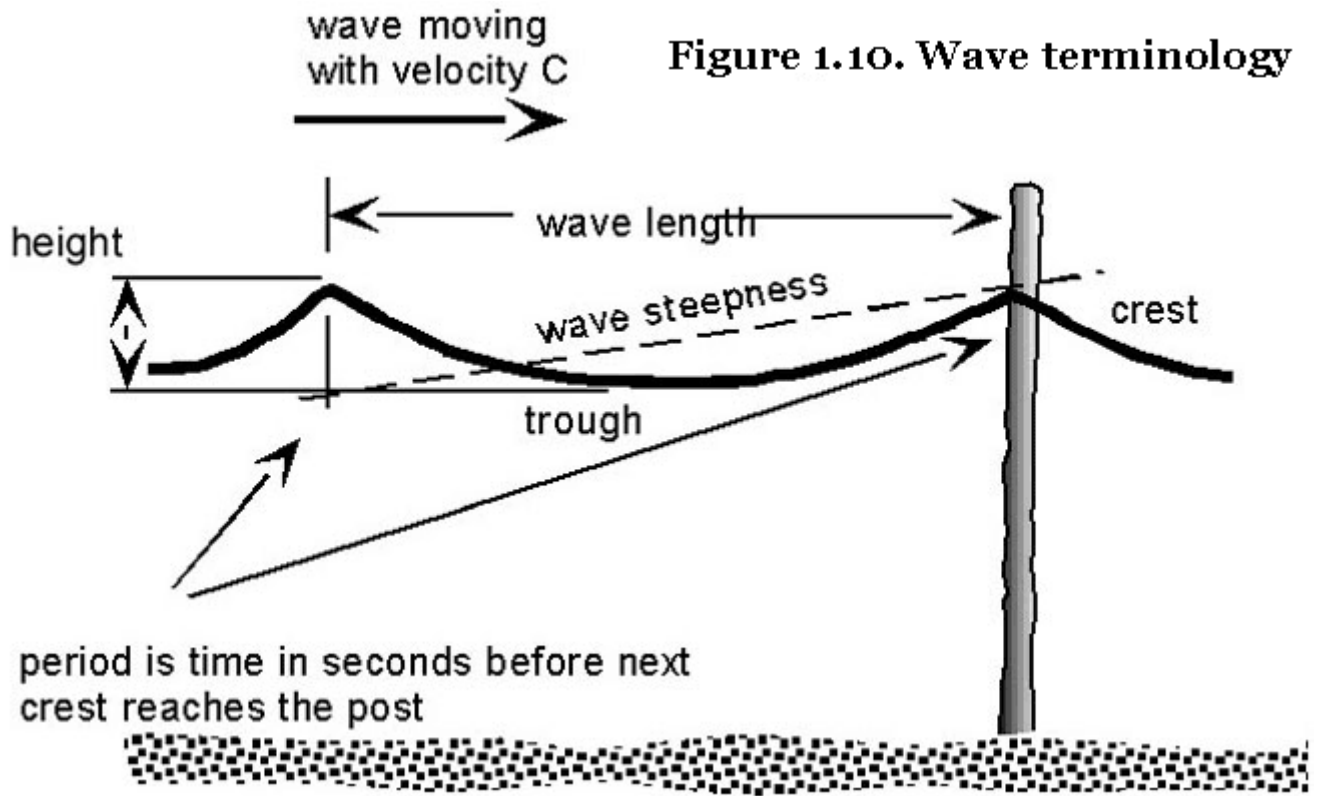
Διαδίδονται στην ύλη και το κενό. Το διαταρασσόμενο μέγεθος είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Οι διαταραχές στα δύο πεδία είναι συμφασικές, ώστε να λαμβάνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους. Τα κύματα αυτά είναι εγκάρσια.

### ➤ Υλικό κύμα

Αυτού του είδους τα κύματα μελετώνται από την κβαντική φυσική.

Τα τελευταία χρόνια μερικοί φυσικοί θεωρούν ότι υπάρχουν και βαρυτικά κύματα. Συμπεριφέρονται όπως τα ηλεκτρομαγνητικά, με τη διαφορά ότι το μέσο διάδοσης είναι ο χωροχρόνος.

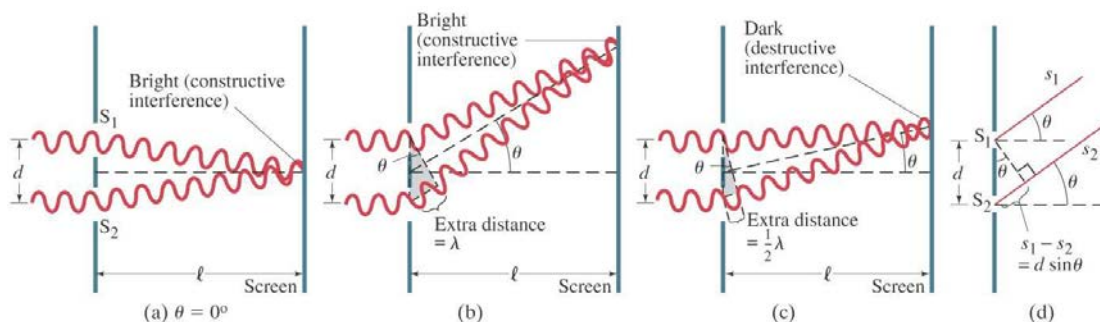
Figure 1.10. Wave terminology



## 2.2 Συμβολή – Περίθλαση

Ο όρος συμβολή αναφέρεται σε κάθε περίπτωση κατά την οποία δύο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται στο χώρο. Όταν υπάρχει αυτή η επικάλυψη, η ολική μετατόπιση σε οποιοδήποτε σημείο και σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή υπαγορεύεται από την αρχή της γραμμικής επαλληλίας. Αυτή είναι η πιο σπουδαία αρχή ολόκληρης της φυσικής οπτικής. Ορίζει τα εξής : Όταν δύο ή περισσότερα κύματα αλληλεπικαλύπτονται, η προκύπτουσα μετατόπιση σε οποιοδήποτε χρονική στιγμή μπορεί να βρεθεί αν προστεθούν οι στιγμιαίες μετατοπίσεις που θα παράγουν στο σημείο αυτό από τα κύματα, αν το καθένα από αυτά υφίστατο αφ' εαυτού. Χρησιμοποιούμε τον όρο μετατόπιση με τη γενική έννοια. Αν πρόκειται για κύματα στην επιφάνεια υγρού, εννοούμε την πραγματική μετατόπιση της επιφάνειας πάνω ή κάτω από το κανονικό επίπεδό της. Για κύματα ήχου, ο όρος αναφέρεται στην αύξηση και στη μείωση της πίεσης. Για ηλεκτρομαγνητικά κύματα, εννοούμε συνήθως μια ορισμένη συνιστώσα του ηλεκτρικού ή του μαγνητικού πεδίου. Για να εισαγάγουμε τις βασικές έννοιες της συμβολής, ας θεωρήσουμε πρώτα δύο πανομοιότυπες πηγές μονοχρωματικών κυμάτων που βρίσκονται σε ορισμένη απόσταση μεταξύ τους. Οι δύο πηγές είναι μόνιμα σε φάση δηλαδή ταλαντώνονται συγχρονισμένα. Μπορεί να είναι δύο αναδευτήρες σε δοχείο με υγρό, δυο ηχεία που τροφοδοτούνται από τον ίδιο ενισχυτή, δύο κεραίες ραδιοφώνου που τροφοδοτούνται από τον ίδιο πομπό, ή δύο μικρές οπές ή σχισμές σε αδιαφανές πέτασμα που φωτίζονται από την ίδια μονοχρωματική πηγή φωτός. Τοποθετούμε τις πηγές στα σημεία

$S_1$  και  $S_2$  κατά μήκος του άξονα  $y$ , ισαπέχοντα από την αρχή των αξόνων. Έστω  $P_0$  ένα σημείο του άξονα  $x$ . Οι δύο αποστάσεις του  $S_1$  από το  $P_0$  και του  $S_2$  από το  $P_0$  είναι ίσες λόγω συμμετρίας. Έτσι τα κύματα από τις δύο πηγές χρειάζονται ίσους χρόνους για να φθάσουν στο  $P_0$ . Κύματα που φεύγουν από τα  $S_1$  και  $S_2$  σε φάση φθάνουν στο  $P_0$  σε φάση. Τα δύο κύματα προστίθενται, και το ολικό πλάτος στο  $P_0$  είναι διπλάσιο του πλάτους ενός έκαστου κύματος. Παρομοίως, η απόσταση του  $P_1$  από το  $S_2$  είναι ακριβώς ένα μήκος κύματος μεγαλύτερη από την απόσταση του  $P_1$  από το  $S_1$ . Μια κορυφή κύματος από το  $S_1$  φθάνει στο  $P_1$  ακριβώς ένα κύκλο προηγουμένως από μια κορυφή που εκπέμπεται την ίδια χρονική στιγμή από το  $S_2$ , έτσι και πάλι τα δύο κύματα φθάνουν σε φάση. Για το σημείο  $P_2$  η διαφορά δρόμου είναι δύο μήκη κύματος, και πάλι τα δύο κύματα φθάνουν σε φάση κ. ο. κ. Η πρόσθεση των πλάτων που προκύπτει όταν κύματα από δύο ή περισσότερες πηγές φθάνουν σε ένα σημείο σε φάση ονομάζεται ενισχυτική συμβολή, ή ενίσχυση.



Το πείραμα διπλής σχισμής, που μερικές φορές ονομάζεται πείραμα του Young, είναι μια απόδειξη ότι η ύλη και η ενέργεια μπορεί να εμφανίζει χαρακτηριστικά και των δύο οντοτήτων, κυμάτων και σωματιδίων. Στη βασική έκδοση του πειράματος, μια συνεκτική πηγή φωτός όπως μια δέσμη λέιζερ, φωτίζει μια λεπτή



πλάκα στην οποία υπάρχουν δύο παράλληλες σχισμές, και το φως που διέρχεται από το σχισμές παρατηρείται σε μια οθόνη πίσω από την πλάκα. Η κυματική φύση του φωτός προκαλεί στα φωτεινά κύματα που διέρχονται από τις δύο σχισμές για να παρέμβει, που παράγουν φωτεινές και σκοτεινές ζώνες στην οθόνη - ένα αποτέλεσμα που δεν θα περίμενε κανείς αν το φως αποτελούνταν αποκλειστικά από σωματίδια. Ωστόσο, στην οθόνη το φως είναι πάντα βρεθεί να απορροφηθεί σαν να αποτελείται από διακριτά σωματίδια ή φωτόνια με το οποίο θεσπίζεται η αρχή που είναι γνωστή ως δυαδικότητα κύματος - σωματιδίου. Ομοίως, αν το φως αποτελούνταν αυστηρά της κλασικής σωματίδια και θα φωτίζεται δύο παράλληλες σχισμές, την αναμενόμενη εικόνα στην οθόνη, θα ήταν απλά το άθροισμα των δύο μονά-σχισμή μοτίβα. Στην πραγματικότητα, όμως, το μοτίβο γίνεται ευρύτερη και πιο λεπτομερή, που περιλαμβάνει σειρά από φωτεινές και σκοτεινές ζώνες. Όταν ο Thomas Young παρουσίασε την πρώτη αυτού του φαινομένου ανέφερε ότι το φως αποτελείται από κύματα.

Το φως από μια μόνο πηγή μπορεί να διαχωριστεί, έτσι ώστε τμήματα του να αναδύονται από δυο ή περισσότερες περιοχές του χώρου, σχηματίζοντας δυο ή περισσότερες δευτερεύουσες πηγές. Τότε, κάθε τυχαία αλλαγή φάσης στην πηγή επηρεάζει εξίσου αυτές τις δευτερογενείς πηγές και δεν μεταβάλλει τη σχετική τους φάση. Φως από δυο τέτοιες πηγές, παραγόμενο από μια μονή πρωτογενή πηγή και με καθορισμένη σταθερή σχέση φάσης, χαρακτηρίζεται με τον όρο σύμφωνο.

Το διακριτικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του φωτός ενός λέιζερ είναι ότι η εκπομπή φωτός από πολλά άτομα είναι συγχρονισμένη ως προς τη συχνότητα και τη φάση, με

αποτέλεσμα οι τυχαίες αλλαγές φάσης που αναφέρθηκαν παραπάνω να παρουσιάζονται λιγότερο συχνά. Καθορισμένες σχέσεις φάσεων διατηρούνται αντίστοιχα για πολύ μεγαλύτερα μήκη στη δέσμη και το φως του λέιζερ είναι πολύ πιο σύμφωνο από το σύνηθες φως.

## **ΣΥΜΒΟΛΗ ΑΠΟ ΔΥΟ ΠΗΓΕΣ /ΠΕΙΡΑΜΑ YOUNG**

Ένα από τα πρώτα ποσοτικά πειράματα συμβολής φωτός έγινε από τον Άγγλο επιστήμονα Thomas Young το 1800. Το πείραμα του αναφερόταν στη συμβολή από δυο πηγές. Το πείραμα περιγράφεται ως έξης : Μονοχρωματικό φως που προέρχεται από λεπτή σχισμή  $S_0$  προσπίπτει σε πέτασμα με δυο άλλες λεπτές σχισμές  $S_1$  και  $S_2$ , πλάτους 1  $\mu\text{m}$  περίπου, ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι λίγα μικρόμετρα. Σύμφωνα με την αρχή του Huygens , σφαιρικά μέτωπα κύματος εκκινούν από τη σχισμή  $S_0$  και φθάνουν στις σχισμές  $S_1$  και  $S_2$  με την ίδια φάση επειδή διανύουν ίσες αποστάσεις από το  $S_0$ . Τα κύματα που αναδύονται από τις σχισμές  $S_1$  και  $S_2$  είναι πάντοτε σε φάση, συνεπώς οι  $S_1$  και  $S_2$  είναι σύμφωνες πηγές. Όμως, τα κύματα που προέρχονται από αυτές τις πηγές δε φθάνουν υποχρεωτικά σε φάση στο σημείο P λόγω της διαφοράς δρόμου. Το πείραμα του Young αποτελεί την πρώτη άμεση μέτρηση μηκών κύματος φωτός.

## **ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ FRAUNHOFER ΚΑΙ FRENSEL**

Σύμφωνα με τη γεωμετρική οπτική, όταν ένα αδιαφανές

αντικείμενο τοποθετηθεί μεταξύ μιας σημειακής φωτεινής πηγής και ενός πετάσματος, η σκιά του αντικειμένου διαμορφώνει ένα περίγραμμα που διακρίνεται με απόλυτη σαφήνεια. Δεν προσπίπτει καθόλου φως στο πέτασμα σε σημεία μέσα στη σκιά, ενώ η εκτός σκιάς περιοχή φωτίζεται σχεδόν ομοιόμορφα. Όμως η κυματική φύση του φωτός προκαλεί φαινόμενα που δεν μπορούν να εξηγηθούν με βάση το απλό μοντέλο της γεωμετρικής οπτικής. Μια σημαντική κατηγορία των φαινομένων αυτών εκδηλώνεται όταν το φως προσπίπτει σε ένα εμπόδιο με ένα άνοιγμα ή ακμή. Τα διαμορφώματα συμβολής που προκύπτουν υπό τις συνθήκες αυτές συμπεριλαμβάνονται στα πειράματα που ταξινομούνται υπό τον τίτλο φαινόμενα περίθλασης.

## **ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ**

Τοποθετούμε μια ξυριστική λεπίδα στο μέσο της απόστασης μεταξύ μιας μικροσκοπικής οπής η οποία φωτίζεται από μονοχρωματικό φως, και ενός φωτογραφικού φιλμ. Το φιλμ αποτυπώνει τη σκιά που ρίχνει η λεπίδα. Η περιοχή εκτός της γεωμετρικής σκιάς πλαισιώνεται από εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ταινίες. Υπάρχει λίγο φως στη σκιασμένη περιοχή αλλά τα ίχνη αυτά δεν είναι διακριτά σε φωτογραφία. Η πρώτη φωτεινή ταινία στο χώρο έξω από τη γεωμετρική σκιά είναι στην πραγματικότητα φωτεινότερη από την περιοχή ομοιόμορφου φωτισμού της ακραίας αριστερής πλευράς της λεπίδας. Αυτό το πείραμα μας δείχνει το σχηματισμό της σκιάς από ένα αδιαφανές αντικείμενο.

Διαμορφώματα περίθλασης δεν παρατηρούνται συχνά στην

καθημερινή ζωή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότερες κοινές πηγές φωτός δεν είναι ούτε μονοχρωματικές, ούτε σημειακές φωτεινές πηγές. Αν χρησιμοποιήσουμε, αντί της σημειακής πηγής, ένα λαμπτήρα πυρακτώσεως με γαλακτώδες γυάλινο περίβλημα, κάθε μήκος κύματος προερχόμενο από κάθε σημείο του γαλακτοκόμου λαμπτήρα σχηματίζει ένα ξεχωριστό διαμόρφωμα περίθλασης, οι μεμονωμένες όμως αυτές εικόνες επικαλύπτονται σε τόσο μεγάλη έκταση, ώστε δεν είναι δυνατό ένα συγκεκριμένο, επιμέρους διαμόρφωμα περίθλασης. Η περίθλαση περιγράφεται πολλές φορές ως "η παράκαμψη του φωτός γύρω από ένα εμπόδιο". Η διαδικασία που προκαλεί φαινόμενα περίθλασης συμβαίνει στη διάδοση κάθε κύματος. Όταν ένα μέρος του κύματος αποκόπτεται από ένα εμπόδιο, παρατηρούμε φαινόμενα περίθλασης που προκύπτουν από τη συμβολή των υπολοίπων μερών των μετώπων του κύματος. Κάθε οπτικό όργανο χρησιμοποιεί ένα περιορισμένο τμήμα του κύματος, για παράδειγμα ένα τηλεσκόπιο χρησιμοποιεί μόνο το μέρος του κύματος που εισχωρεί στο σύστημα μέσω του αντικειμενικού φακού του. Επομένως η περίθλαση παίζει ρόλο σε όλα σχεδόν τα οπτικά φαινόμενα.

## **ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΑΠΟ ΜΙΑ ΣΧΙΣΜΗ**

Περίθλαση από μια σχισμή ονομάζεται το διαμόρφωμα περίθλασης που σχηματίζεται από επίπεδα κύματα (παράλληλες ακτίνες) μονοχρωματικού φωτός, όταν αυτό αναδύεται από μια σχισμή μεγάλου μήκους και μικρού εύρους. Σύμφωνα με τη γεωμετρική οπτική, η εξερχόμενη δέσμη θα έπρεπε να έχει ίδια

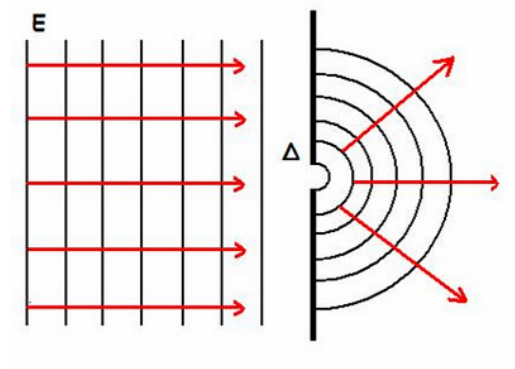
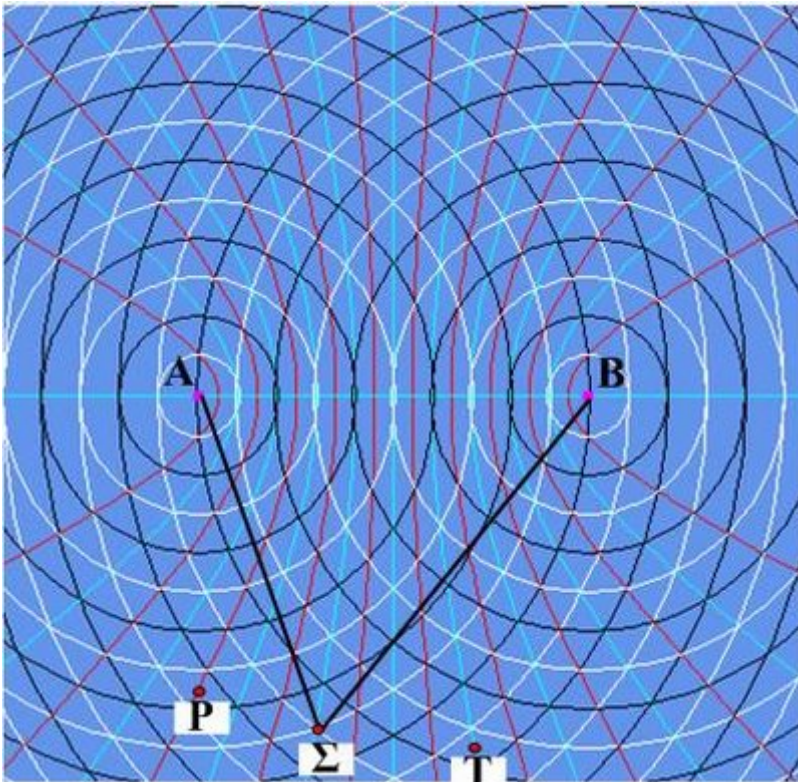
διατομή με τη σχισμή. Η δέσμη εξαπλώνεται στην κατακόρυφη διεύθυνση αφού διέλθει από τη σχισμή. Το διαμόρφωμα περίθλασης αποτελείται από μια κεντρική φωτεινή ταινία, η οποία ίσως να είναι πολύ ευρύτερη από το κατακόρυφο εύρος της σχισμής, πλαισιωμένη από εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ταινίες ταχέως μειούμενης έντασης. Το 85% περίπου της ολικής έντασης περιέχεται στην κεντρική φωτεινή ταινία. Όταν οι εξερχόμενες ακτίνες θεωρούνται παράλληλες, τότε αποτελούν αναπαραστάσεις της περίθλασης Fraunhofer.

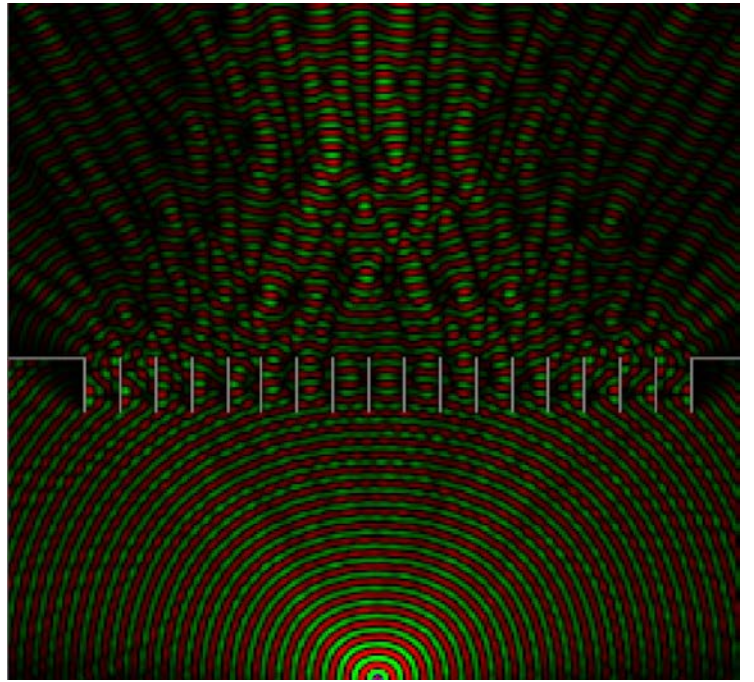
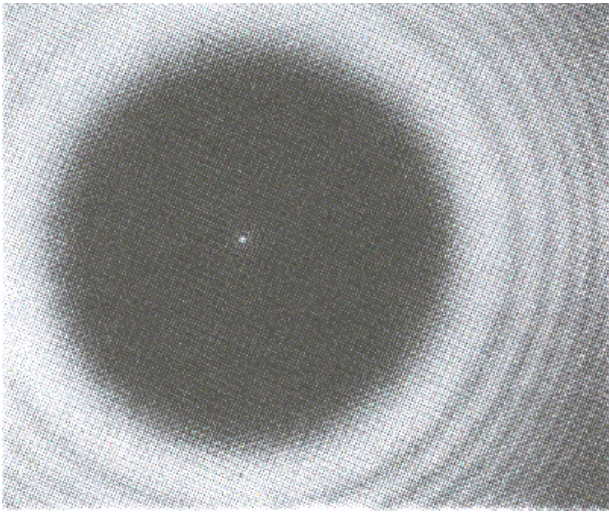
Τόσο η σημειακή πηγή, όσο και το πέτασμα απέχουν πεπερασμένες αποστάσεις από το εμπόδιο που σχηματίζει την εικόνα περίθλασης. Η συνθήκη αυτή περιγράφεται ως περίθλαση εγγύς (κοντινού) πεδίου ή περίθλαση Fresnel. Αν η πηγή, το εμπόδιο και το πέτασμα είναι αρκετά απομακρυσμένα μεταξύ τους ώστε όλες οι ευθείες από την πηγή προς το εμπόδιο να μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες, καθώς επίσης και όλες οι ευθείες από το εμπόδιο ως ένα σημείο του διαμορφώματος να μπορούν να θεωρηθούν παράλληλες, το φαινόμενο ονομάζεται περίθλαση μακρινού πεδίου ή περίθλαση Fraunhofer. Η λεπτομερής ανάλυση της περίθλασης Fraunhofer είναι συνήθως απλούστερη από την ανάλυση της περίθλασης Fresnel.

## **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Τέλος τονίζουμε ότι δεν υπάρχει καμία θεμελιώδης διαφορά μεταξύ συμβολής και περίθλασης. Γενικά χρησιμοποιούμε τον όρο συμβολή για φαινόμενα που αναφέρονται σε κύματα από μικρό αριθμό πηγών, συνήθως από δυο πηγές. Η περίθλαση συνήθως

αναφέρεται σε μια συνεχή κατανομή κυματίων του Huygens καθόλη την επιφάνεια ενός ανοίγματος ή σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό πηγών ή ανοιγμάτων. Οι ίδιες όμως φυσικές αρχές διέπουν και τις δυο αυτές κατηγορίες φαινομένων. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι τα παραπάνω φαινόμενα είναι αποτέλεσμα της κυματικής φύσης του φωτός.





## Βιβλιογραφία

«ΛΕΞΙΚΟ ΤΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ» Του Neil Ardley εκδόσεις  
ερευνητών

«ΘΕΜΕΛΙΩΔΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ» Του R.M Eisberg  
εκδόσεις Γ.Α Πνευματικού

«Η ΦΥΣΙΚΗ ΣΗΜΕΡΑ» Του Ε.Ν Οικονόμου  
Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης

«ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ» Του F. MANDL εκδόσεις Γ.  
Πνευματικού

«ΦΥΣΙΚΗ Γ΄ ΛΥΚΕΙΟΥ» Του Κ. Ζάχος, Ι. Βλάχος, Κόκκοτα  
Π. Τιμόθεου Γ. εκδόσεις 1996 Ο.Ε.Δ.Β



Συντελεστές

Υπεύθυνος καθηγητής : Βασιλακόπουλος Δημήτρης

Θεοφιλοπούλου Αναστασία

Καραγιάννης Θεόδωρος

Κούρλιου Κωνσταντίνα

Μετσοβίτης Χρήστος

Νέγκας Ευστάθιος

Παναγιωτόπουλος Ιωάννης

Γκούβελου Μαρία

Καραβασίλη Παναγιώτα

Κόλα Τζένη

Κόσκορη Γαρυφαλιά

Κωνσταντοπούλου Διονυσία

Λευκαδίτη Γεωργία-Μαρία

Λιναρδοπούλου Ελένη-Μαρία

Μαρινόπουλος Αναστάσιος

Τσαγρή Λιβερία

Τσερφόλια Μαρία

Φισέκου Σιντόρέλα

Χαραλαμπόπουλος Νικόλαος

Χρυσανθακοπούλου Αθανασία

Ψαρρά Αντωνία