

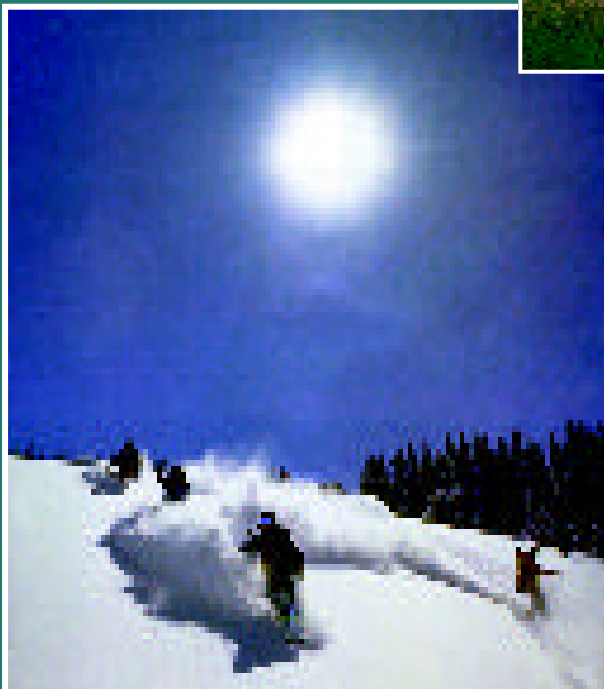
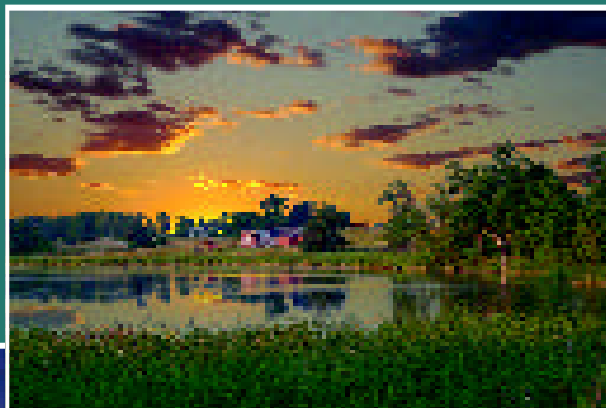
Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

1

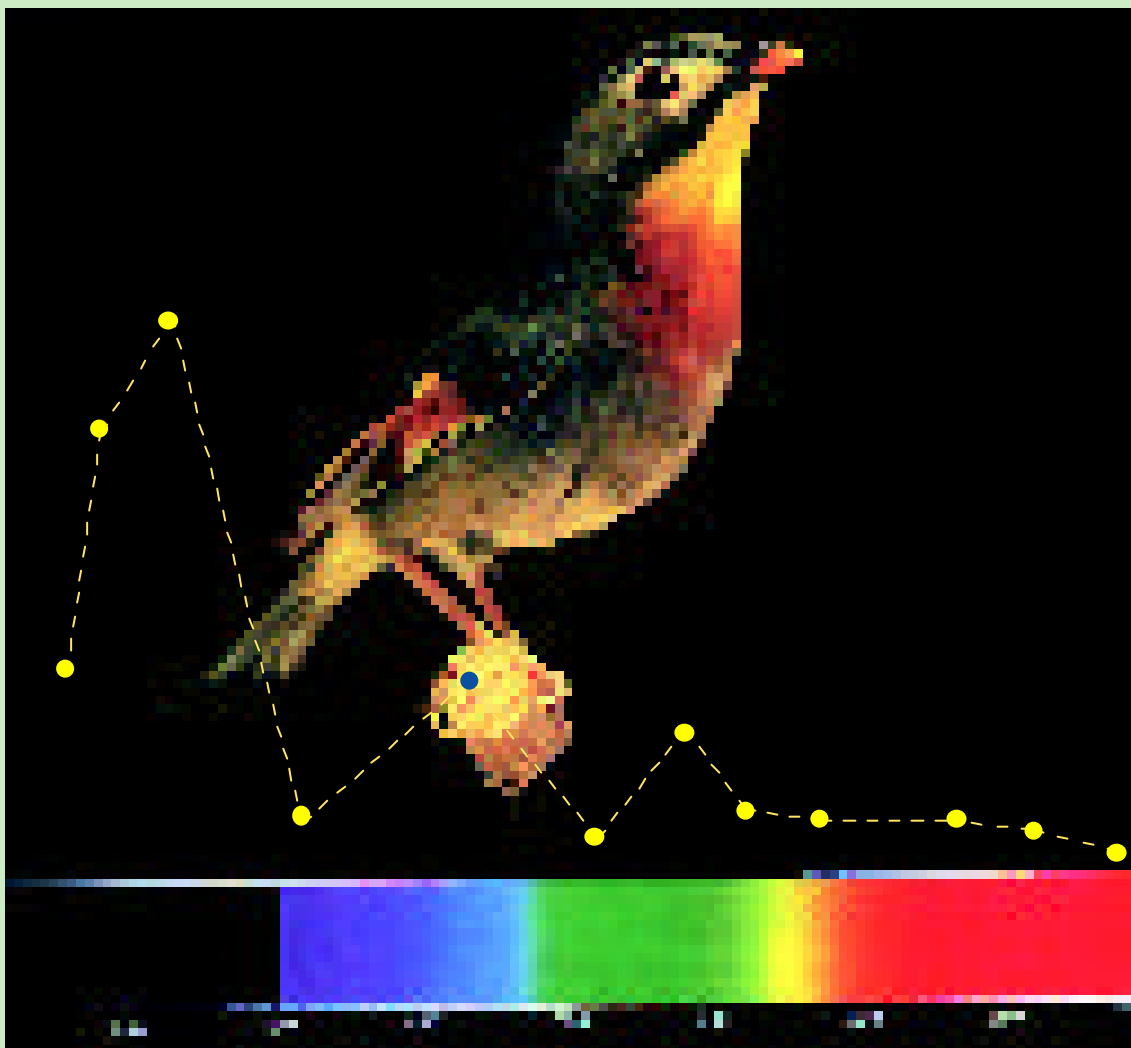
Τ Ο Φ Ω Σ

- Η φύση του φωτός
- Η ταχύτητα του φωτός
- Μήκος κύματος και συχνότητα φωτός
- Ανάλυση λευκού φωτός και χρώματα
- Πόλωση του φωτός

Το φως κατά το σούρουπο διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, όταν ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.



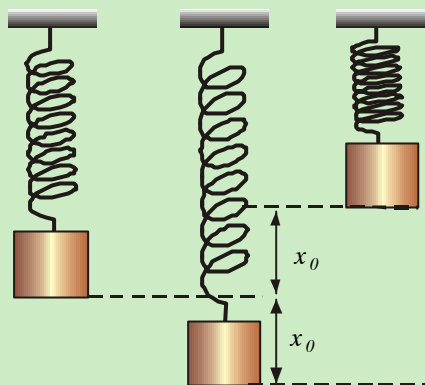
Ένας πολωτής τύπου polaroid, που έχει προσαρτηθεί στο φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, επιλέγει τα κύματα με μία συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης και εμποδίζει όλα τα άλλα κύματα. Έτσι ο φωτογράφος κατάφερε να αποτυπώσει το στιγμιότυπο της διπλανής εικόνας και φωτογράφησε ακόμα και τον Ήλιο.



Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού όσον αφορά την αντίληψη των χρωμάτων κυμαίνεται από τα 400nm περίπου (ιώδες φως) έως τα 700nm περίπου (ερυθρό φως). Αυτή η ευαισθησία καθορίζεται κυρίως από τους υποδοχείς που υπάρχουν στα αισθητήρια όργανα της όρασης του ανθρώπου.

Το ερώτημα είναι αν και τα άλλα ζωικά είδη υπόκεινται σε παρόμοιους περιορισμούς της όρασής τους. Πιστεύεται πάντως ότι τα ημερόβια πουλιά διαθέτουν μηχανισμούς που τους επιτρέπουν να βλέπουν το υπεριώδες φως. Συγκεκριμένα, το «πουλί του Ήλιου» της παραπάνω εικόνας έχει ευαισθησία από τα 330nm (υπεριώδες φως) έως τα 680nm (ερυθρό φως).

Εισαγωγικό ένθετο



Ταλάντωση

Το σώμα του διπλανού σχήματος είναι εξαρτημένο από το άκρο του ελατηρίου σταθεράς k . Αν το απομακρύνουμε από τη θέση ισορροπίας του κατά x_0 και ύστερα το αφήσουμε ελεύθερο, θα εκτελέσει μια κίνηση η οποία θα επαναλαμβάνεται σε ίσα χρονικά διαστήματα. Μια τέτοια κίνηση, όπως αυτή του συστήματος ελατηρίου - μάζας, ονομάζεται **απλή αρμονική ταλάντωση**.

- Η μέγιστη απομάκρυνση x_0 του σώματος από τη θέση ισορροπίας του ονομάζεται **πλάτος** της ταλάντωσης.
- Ο χρόνος που χρειάζεται το σώμα, για να περάσει διαδοχικά δύο φορές από το ίδιο σημείο της τροχιάς του και με την ίδια φορά, ονομάζεται **περίοδος** T . Είναι φανερό ότι σε χρόνο μιας περιόδου το σώμα εκτελεί μια πλήρη ταλάντωση.

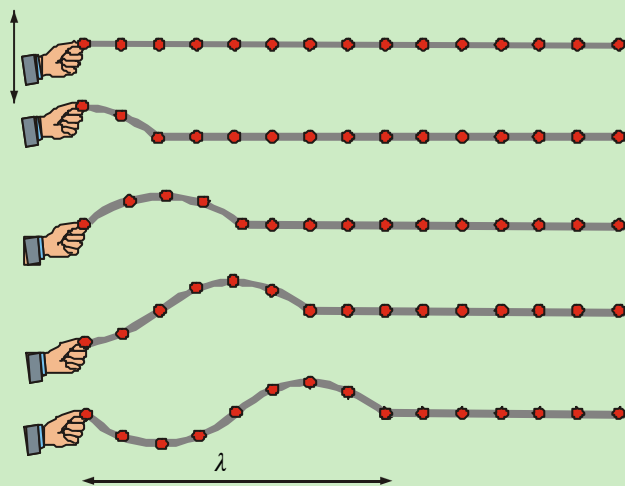
- Το πηλίκο του αριθμού των ταλαντώσεων (N), που κάνει το σώμα σε χρόνο t , προς το χρόνο t ονομάζεται **συχνότητα** f . Δηλαδή:

$$f = \frac{N}{t}, \text{ για } t=T \text{ και } N=1, \text{ παίρνουμε: } f = \frac{1}{T}$$

- Επίσης εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι η **ενέργεια** του ταλαντωτή εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης και δίνεται από τη σχέση: $E = P k x_0^2$

Κύμα

Ονομάζουμε **μηχανικό κύμα** κάθε διαταραχή που διαδίδεται με πεπερασμένη ταχύτητα σε ένα υλικό ελαστικό μέσο. Το ελαστικό υλικό μέσο φανταζόμαστε ότι αποτελείται από στοιχειώδεις δομικές μονάδες που έχουν ελαστική σύζευξη μεταξύ τους, δηλαδή συνδέονται με ελαστικές δυνάμεις. Αν προκαλέσουμε μια διαταραχή σε ένα σημείο του ελαστικού μέσου, αυτή μεταδίδεται στην επόμενη, στη μεθεπόμενη κ.ο.κ. δομική μονάδα με πεπερασμένη ταχύτητα, η οποία ονομάζεται **ταχύτητα διάδοσης της διαταραχής**.



Στο διπλανό σχήμα το χέρι μας κρατάει το ένα άκρο οριζόντιου σχοινιού και εκτελεί αρμονική ταλάντωση σε κατακόρυφη διεύθυνση με συχνότητα f . Παρατηρούμε ότι αυτή η ταλάντωση διαδίδεται από το χέρι μας σε κάθε δομική μονάδα του σχοινιού προς τα δεξιά. Τέτοια κύματα στα οποία τα μόρια του μέσου ταλαντώνονται σε διεύθυνση κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος ονομάζονται **εγκάρσια κύματα**.

Η συχνότητα ταλάντωσης των μορίων του μέσου είναι ίδια με τη συχνότητα ταλάντωσης του χεριού μας, που στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί την πηγή του κύματος. Η συχνότητα αυτή είναι η συχνότητα του κύματος.

- **Ταχύτητα διάδοσης (c)** του κύματος σε κάποιο μέσο ονομάζουμε το πηλίκο της απόστασης x , που διανύει το κύμα (διαταραχή) κατά μήκος μιας διεύθυνσης διάδοσης, σε χρόνο t προς το χρόνο αυτό. Δηλαδή ισχύει:

$$c = \frac{x}{t} \quad (1)$$

Η ταχύτητα διάδοσης c εξαρτάται από τη φύση του ελαστικού μέσου διάδοσης.

- **Μήκος κύματος (λ)** ονομάζουμε την απόσταση που διατρέχει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου. Αν στην (1) θέσουμε όπου $x=\lambda$ και $t=T$, παίρνουμε:

$$c = \frac{\lambda}{T} \text{ και, αν θέσουμε όπου } \hat{O} = \frac{1}{f}, \text{ παίρνουμε: } c = \lambda \cdot f$$

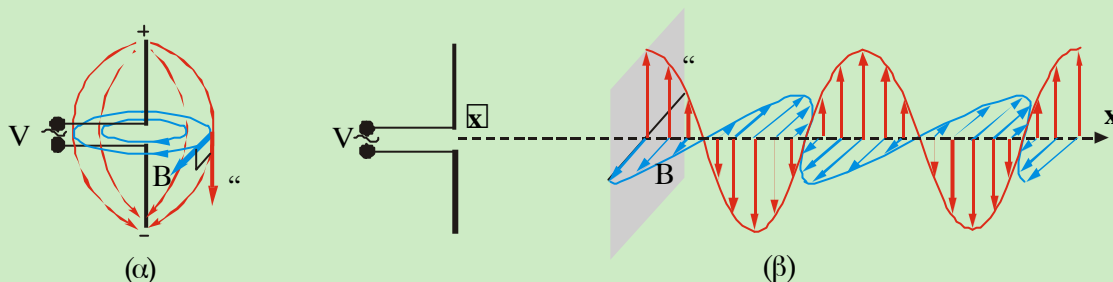
Η σχέση $c = \lambda f$ ισχύει για οποιοδήποτε αρμονικό κύμα και ονομάζεται **θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής**. Τονίζουμε εδώ ότι η συχνότητα f καθορίζεται από την πηγή και ότι με τη συχνότητα αυτή ταλαντώνονται όλα τα σωματίδια του ελαστικού μέσου κατά τη διάδοση του κύματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ένα ορισμένο κύμα, που διαδίδεται σε διαφορετικά ελαστικά μέσα, θα έχει την ίδια συχνότητα σε όλα τα μέσα, αλλά διαφορετικές τιμές μήκους κύματος και ταχύτητας διάδοσης του.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Ο ήχος στο ραδιόφωνο και ο ήχος και η εικόνα στην τηλεόραση λαμβάνονται από αυτές τις συσκευές χάρη στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που στέλνονται από τις κεραιές των ραδιοφωνικών και των τηλεοπτικών σταθμών αντίστοιχα.

Όμως τι είναι και πώς παράγονται αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

Ας θεωρήσουμε μια κεραία, δηλαδή ένα συρμάτινο αγωγό, η οποία τροφοδοτείται από εναλλασσόμενη τάση V . Η κεραία διαρρέεται από εναλλασσόμενο ρεύμα και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα σ' αυτήν εκτελούν αρμονική ταλάντωση. Γύρω από την κεραία δημιουργείται ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, των οποίων οι δυναμικές γραμμές, κάποια χρονική στιγμή, εικονίζονται στο σχήμα (α).



Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αυτή η μεταβολή διαδίδεται, απομακρυνόμενη από την κεραία, κατά μήκος της ευθείας $x \parallel x$, που αποτελεί και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διάδοση αυτή της διαταραχής ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό κύμα**.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δε χρειάζεται κάποιο ελαστικό μέσο για να διαδοθεί. Διαδίδεται ακόμα και στο κενό και μάλιστα με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό. Σε κάθε θέση της ευθείας $x \parallel x$ οι εντάσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι κάθετες μεταξύ τους, καθώς επίσης και προς τη διεύθυνση διάδοσης (σχήμα β). Γι' αυτό λέμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι εγκάρσιο κύμα.

Όπως στο μηχανικό κύμα τα μόρια του μέσου εκτελούν αρμονικές ταλαντώσεις, έτσι και στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα η ένταση E του ηλεκτρικού και η ένταση B του μαγνητικού πεδίου, σε κάθε σημείο, ταλαντώνονται αρμονικά.

Τι είναι το φως, σωματίο ή κύμα;

1.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Από πολύ παλιά, στους αρχαιότετους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνοων συζητήσεων, διαφωνιών, επιχειρημάτων και αντεπιχειρημάτων.

Το φως ήταν και είναι μια βασική αιτία της ύπαρξης ζωής στον πλανήτη μας. Ας μην ξεχνάμε ότι τα φυτά, με τη φωτοσύνθεση, μετατρέπουν την ενέργεια που παρέχει το φως του Ήλιου σε χημική ενέργεια, την οποία χρησιμοποιούν στη συνέχεια για την ανάπτυξή τους. Το φως είναι αυτό που κάνει ορατά τα αντικείμενα που βρίσκονται στον πλανήτη μας, τη Γη, και στο Σύμπαν. Με τη βοήθεια του φωτός «επικοινωνούμε» με τα άστρα και τους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος αντλώντας χιλιάδες πληροφορίες για τη σύστασή τους (φασματοσκοπική μέθοδος).

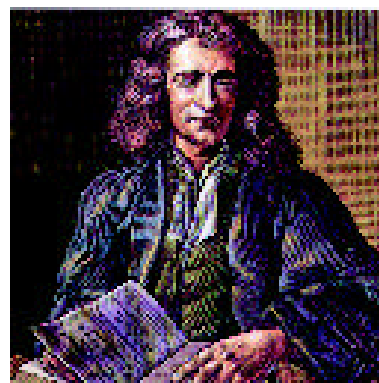
Πρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβολούσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης.

Σ' αυτή ακριβώς τη σκέψη, δηλαδή τη σωματιδιακή φύση του φωτός, στηρίχτηκε, πολύ μεταγενέστερα, ο Newton (Νεύτωνας), για να διατυπώσει, με βάση την αρχή διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός, δηλαδή:

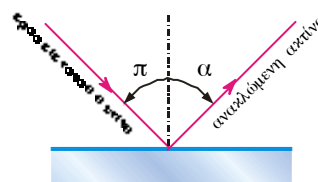
$$\text{γωνία πρόσπτωσης } (\pi) = \text{γωνία ανάκλασης } (\alpha)$$

Δύο σημαντικά φαινόμενα, η περίθλαση και η συμβολή του φωτός, απασχόλησαν τους φυσικούς Christian Huygens (Κρίστιαν Χούχενς, 1629-1695) και Tomas Young (Τόμας Γιανγκ, 1773-1829)

Ο Αριστοτέλης αναφέρει: Ο Εμπεδοκλής ... έλεγε ότι το φως, όντας κάτι το σωματιδιακό, που απορρέει από το φωτίζον σώμα, φθάνει πρώτα στο μεταξύ της Γης και τον ουρανού χώρο και ύστερα σε μας. Μας διαφεύγει όμως η κίνησή του αυτή λόγω της ταχύτητάς του.



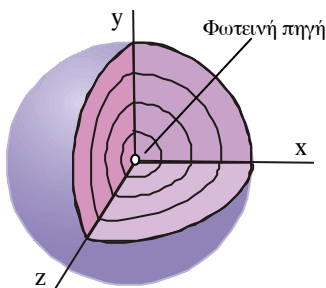
Isaac Newton





James Clerk Maxwell

Το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.



1-1 Σφαιρικά μέτωπα κύματος διαδίδονται ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις ξεκινώντας από μία πηγή φωτός.

το 1670 και 1803 αντίστοιχα. Οι Huygens και Young, μέσα από πειραματικές διαδικασίες πάνω στα φαινόμενα αυτά, απέδειξαν ότι το φως έχει κυματική φύση και συγκεκριμένα ότι είναι εγκάρσια κύματα.

Το αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865, όταν ο Maxwell (Μάξγουελ), αναπτύσσοντας τη μεγαλειώδη θεωρία του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή συναντάμε στις αρχές του 20ού αιώνα το Max Planck (Μαξ Πλανκ, 1858-1947), ο οποίος χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα.

Στην πιο σύγχρονη εποχή ο Einstein (Αϊνστάιν) χρησιμοποιώντας τη σωματιδιακή φύση του φωτός ερμηνεύει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (εκπομπή ηλεκτρονίων από μέταλλα, όταν πάνω σ' αυτά προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία).

Σήμερα πιστεύουμε στη διπλή φύση του φωτός, δηλαδή ότι το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

Η ερώτηση λοιπόν «τι είναι το φως, σωματίο ή κύμα;» είναι εσφαλμένη, γιατί **το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίο.**

Η κυματική φύση του φωτός.

Ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell

Η πιο σημαντική εξέλιξη του 19ου αιώνα στη μελέτη παραγωγής και διάδοσης του φωτός υπήρξε το έργο του Maxwell, ο οποίος το 1873 διατύπωσε τη θεωρία της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, **το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.**

Ο Maxwell απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται, παράγει ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό κύμα. Δηλαδή είναι ένα πεδίο με δύο χαρακτηριστικά, την ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση B του μαγνητικού πεδίου, των οποίων τα διανύσματα είναι κάθετα μεταξύ τους και μεταβάλλονται από θέση σε θέση και από στιγμή σε στιγμή. Γι' αυτό το λόγο χαρακτηρίζονται ως **δύο τοπικά και χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη** (E και B). Οι εντάσεις των πεδίων E και B παίρνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή, δηλαδή έχουν την ίδια φάση και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα c (σχήμα 1-2).

Οι συνηθισμένες πηγές ορατού φωτός δίνουν τέτοιες συχνότητες (ή μήκη κύματος) ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ώστε να γίνονται αντιληπτά από το μάτι. Το μήκος κύματος των κυμάτων αυτών κυμαίνεται από 400nm έως και 700nm περίπου.

Επίσης εύκολα διαπιστώνουμε ότι το φως μεταφέρει ενέργεια (π.χ. ένα οποιοδήποτε σώμα, όταν εκτεθεί σε ηλιακή ακτινοβολία,

θερμαίνεται). Η ενέργεια αυτή είναι ενέργεια ηλεκτρικού και ενέργεια μαγνητικού πεδίου, η οποία παράγεται από τις πηγές και μεταφέρεται ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Την ορθότητα της θεωρίας του Maxwell απέδειξε πειραματικά ο Hertz (Χερτς) το 1887, ο οποίος παρήγαγε, μέσω ταχέων ηλεκτρικών ταλαντώσεων, κύματα της ίδιας φύσης με αυτήν του φωτός αλλά με μικρότερη συχνότητα. Επειδή το φως έχει πολύ μεγάλη συχνότητα, την εποχή εκείνη ήταν αδύνατο να δημιουργηθούν τεχνητά υψίσυχνες ταλαντώσεις σε ηλεκτρικά κυκλώματα.

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (c), η συχνότητα (f) και το μήκος κύματος (λ) συνδέονται με τη σχέση $c = \lambda f$, η οποία ονομάζεται θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής.

$$c = \lambda \cdot f \quad \text{Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής} \quad (1.1)$$

Η σωματιδιακή φύση του φωτός.

Θεωρία των κβάντα

Παρ' όλο που η κλασική θεωρία (αυτή που αναπτύχθηκε πριν από το 1922) του ηλεκτρομαγνητισμού ερμήνευσε ορισμένα φαινόμενα του φωτός, όπως η συμβολή, η περίθλαση, η πόλωση κ.ά., δεν κατόρθωσε να ερμηνεύσει κάποια άλλα φαινόμενα που σχετίζονται με την **αλληλεπίδραση της φωτεινής ακτινοβολίας με την ύλη**.

Πολλά πειραματικά δεδομένα δεν μπορούσαν να ερμηνευτούν με την παραδοχή ότι το φως είναι μόνο κύμα. Το πιο σημαντικό από τα πειράματα αυτά ήταν εκείνο της μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Για την ερμηνεία της εκπομπής και της απορρόφησης του φωτός δεν αρκούσαν μόνο κάποιες επεκτάσεις της κλασικής θεωρίας. Στην πραγματικότητα χρειάστηκε κάτι πιο ριζικό από μια απλή επέκταση.

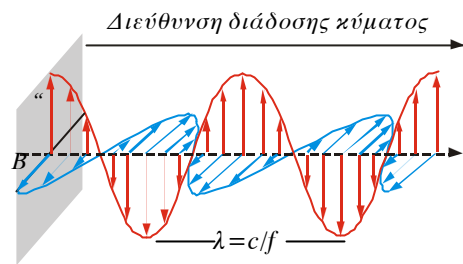
Το 1900 ο Planck, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που παράγει ένα θερμαινόμενο σώμα, εισήγαγε τη θεωρία των **κβάντα φωτός**, την οποία εφάρμοσε αργότερα ο Einstein, για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Σύμφωνα με την **κβαντική θεωρία του Planck**, το φως (και γενικότερα κάθε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) εκπέμπεται και απορροφάται από τα άτομα της ύλης όχι κατά συνεχή τρόπο αλλά **ασυνεχώς**. Δηλαδή κάθε άτομο εκπέμπει ή απορροφά στοιχειώδη ποσά ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός** ή **φωτόνια**. Από το άτομο λοιπόν δεν εκπέμπονται συνεχώς κύματα αλλά φωτόνια, καθένα από τα οποία χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη συχνότητα και έχει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας E .

Όταν το φως προσπίπτει πάνω στην ύλη, τα άτομα της ύλης απορροφούν την ακτινοβολία ασυνεχώς, που σημαίνει ότι κάθε άτομο απορροφά μεμονωμένα φωτόνια. Κάθε φωτόνιο μιας ακτινοβολίας έχει ενέργεια που δίνεται από τη σχέση $E = hf$.

$$E = h \cdot f \quad \text{Ενέργεια φωτονίου} \quad (1.2)$$

Το h είναι μια σταθερά, που ονομάζεται **σταθερά του Planck**, και έχει τιμή $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ και f η συχνότητα.



1-2 Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος μακριά από την πηγή, που διαδίδεται οριζόντια. Οι εντάσεις E και B των πεδίων είναι κάθετες στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και γι' αυτό τα κύματα αυτά ονομάζονται εγκάρσια.



Max Planck (1858-1947). Μία δέσμη φωτός αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται **κβάντα φωτός** ή **φωτόνια**.

Με τον όρο **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** περιγράφουμε την εκπομπή ηλεκτρονίων από την επιφάνεια των μετάλλων, όταν προσπίπτει πάνω τους κατάλληλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ορατή ή υπεριώδης, κτλ.

Ο όρος **κβάντα** προέρχεται από τη λατινική λέξη **quantum = ποσό**

Όταν μια ποσότητα είναι **κβαντωμένη**, σημαίνει ότι παίρνει μόνο διακριτές (ορισμένες) τιμές, δηλαδή το σύνολο τιμών δεν είναι συνεχές. Ας θυμηθούμε το ηλεκτρικό φορτίο. Αυτό είναι **κβαντωμένο**, διότι δεν παίρνει οποιεσδήποτε τιμές, αλλά μόνο ακέραια πολλαπλάσια της τιμής του φορτίου ηλεκτρονίου: $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Όταν προσπίπτει φως πάνω στα μέταλλα, τότε μεταφέρεται ενέργεια από ένα φωτόνιο σε ένα από τα ηλεκτρόνια του ατόμου του μετάλλου. Δηλαδή το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά με ένα από τα φωτόνια του φωτός σαν να είναι το φωτόνιο σωματίδιο.

Η θεωρία των κβάντα δεν αναιρεί την κυματική φύση του φωτός. Το φωτόνιο έχει και κυματικές ιδιότητες, για παράδειγμα η ενέργειά του εξαρτάται από τη συχνότητά του, που είναι κατ' εξοχήν κυματική ιδιότητα.

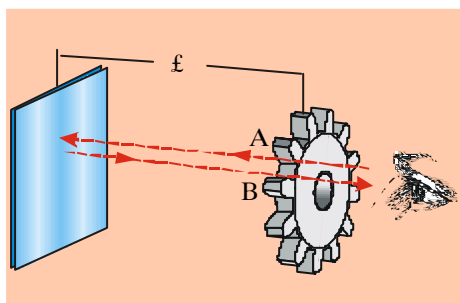
1.2 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Επειδή το φως διαδίδεται στο κενό και στον αέρα με πολύ μεγάλη ταχύτητα, περίπου $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, οι πρώτες προσπάθειες για τη μέτρησή της απέτυχαν. Ο Γαλιλαίος ήταν από τους πρώτους που προσπάθησε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός χρησιμοποιώντας απλά μέσα για την εποχή εκείνη. Έτσι τοποθέτησε δύο παρατηρητές πάνω σε δύο πύργους των τειχών της Πίζας, οι οποίοι απείχαν μεταξύ τους 5 μίλια. Κάθε παρατηρητής κρατούσε από ένα φανάρι που ήταν κλειστό και, όποτε χρειαζόταν, άνοιγε το παραθυράκι. Όταν ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι του φαναριού του, ο δεύτερος ήταν συνεννοημένος να ανοίξει το δικό του αμέσως μόλις έβλεπε το φως του πρώτου.

Αν λοιπόν μετρούσε κανείς το χρόνο που περνούσε από τη στιγμή που ο πρώτος άνοιγε το παραθυράκι έως τη στιγμή που έβλεπε το φως του δεύτερου παρατηρητή (και με γνωστή τη μεταξύ τους απόσταση), με μια απλή διαίρεση θα μπορούσε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός. Όμως ο χρόνος αντίδρασης των δύο παρατηρητών ήταν πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειαζόταν το φως για να διανύσει τη μεταξύ τους απόσταση και έτσι η μέθοδος αυτή δεν ήταν εφαρμόσιμη και οδήγησε σε αποτυχία. Έδειξε όμως ότι η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη, ώστε είναι αδύνατο να μετρηθεί με τέτοια χονδρική μηχανικά μέσα.

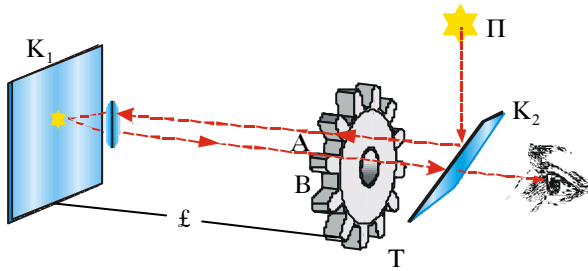
Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Πρώτος μετρήσε χονδρικά την ταχύτητα του φωτός ο Δανός αστρονόμος Ole Roemer (Όλε Ρέμερ, 1644-1710). Ο Roemer υπολόγισε ότι η τιμή της ταχύτητας του φωτός είναι περίπου $2 \times 10^8 \text{ m/s}$. Η μέτρηση αυτή έχει ιστορική αξία, διότι, εκτός του ότι προσέγγιζε αρκετά την πραγματική τιμή της ταχύτητας, έδειξε για πρώτη φορά ότι η ταχύτητα του φωτός έχει πεπερασμένη τιμή.

Η μέθοδος του Fizeau



Το 1849 ο H.L. Fizeau (Φιζό), ένας Γάλλος φυσικός, κατάφερε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με απλά μηχανικά μέσα. Στο διπλανό σχήμα παριστάνεται μια απλουστευμένη μορφή της διάταξης που χρησιμοποίησε. Η βασική ιδέα της μεθόδου ήταν να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται το φως, για να διανύσει την απόσταση «πήγαινε - έλα» μεταξύ μιας φωτεινής πηγής Π και ενός κατόπτρου K_1 , που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (σχήμα 1-3).

Η ακτίνα που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή Π ανακλάται στο «ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο» K_2 και, αφού διανύσει την απόσταση ξ , προσπίπτει στο κάτοπτρο K_1 . Η ανακλώμενη ακτίνα επιστρέφει από την ίδια διαδρομή, μεταφέροντας το είδωλο της πηγής Π, οπότε γίνεται αντιληπτή από κάποιο παρατηρητή που βρίσκεται πίσω από το K_2 . Μεταξύ του παρατηρητή και του κατόπτρου K_1 παρεμβάλλεται οδοντωτός τροχός Τ, ο οποίος περιστρέφεται με τέτοιο τρόπο, ώστε άλλοτε η ακτίνα φωτός να διακόπτεται και άλλοτε όχι. Όταν ο τροχός περιστρέφεται αργά, ο παρατηρητής θα βλέπει φως και σκοτάδι. Αυξάνοντας διαρκώς την ταχύτητα του τροχού θα έλθει η στιγμή που ο παρατηρητής δε θα βλέπει φως.



1-3 Στο πείραμα Fizeau, που εικονίζεται δίπλα, η απόσταση L μεταξύ του οδοντωτού τροχού T και του κατόπτρου K_1 ήταν περίπου $8630m$ ή $5,36miles$. Απλοποιήσαμε τη διάταξη παραλείποντας τη σειρά των φακών και κατόπτρων που χρησιμοποίησε ο Fizeau.

Αυτό θα συμβεί, όταν το φως, που θα διέλθει από το διάκενο A του τροχού, αφού ανακλαστεί στο κάτοπτρο K_1 , συναντήσει το επόμενο δόντι του τροχού.

Αν αυξήσουμε ακόμα περισσότερο την ταχύτητα του τροχού, το φως θα γίνει πάλι ορατό, γιατί θα διέλθει από το επόμενο διάκενο B . Ας υποθέσουμε τώρα ότι ο τροχός έχει N δόντια και περιστρέφεται με συχνότητα f (στροφές ανά δευτερόλεπτο). Τότε ο χρόνος t , για να περιστραφεί ο τροχός κατά ένα δόντι, είναι:

$$t = \frac{\text{πρόσθετο χρόνος}}{\text{αριθμός δοντιών}} = \frac{T}{N} = \frac{\frac{1}{f}}{N} = \frac{1}{f \cdot N} \quad (1)$$

Στο χρόνο αυτό το φως έχει διανύσει την απόσταση $2L$ «πήγα-νε - έλα». Άρα η ταχύτητα του φωτός θα είναι:

$$c = \frac{\text{απόσταση}}{\text{χρόνος}} = \frac{2L}{t} \text{ και λόγω της (1) } c = 2L \cdot f \cdot N \quad (1.3)$$

Με γνωστά τα μεγέθη L , f , N υπολογίζουμε την ταχύτητα c .

Ο Fizeau γνώριζε την απόσταση L , τον αριθμό των δοντιών του τροχού και τη συχνότητα περιστροφής και έτσι υπολόγισε ότι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός είναι $3,1 \times 10^8 m/s$. Ακριβέστερα πειράματα, που έγιναν αργότερα, έδωσαν την τιμή **$2,9979 \times 10^8 m/s$** .

Για την ταχύτητα του φωτός γνωρίζουμε σήμερα ότι:

- Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου $3 \times 10^8 m/s$.
- Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.
- Η ταχύτητα του φωτός έχει την ίδια τιμή σε όλα τα συστήματα αναφοράς και είναι ανεξάρτητη από την κίνηση της φωτεινής πηγής (αξίωμα του Einstein).

Το τέχνασμα της «διακοπόμενης δέσμης», τροποποιούμενο κατάλληλα, χρησιμοποιείται σήμερα για τη μέτρηση της ταχύτητας των νετρονίων και άλλων σωματιδίων.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1-1

Υποθέτουμε ότι ο οδοντωτός τροχός του πειράματος Fizeau έχει 360 δόντια. Αυξάνοντας διαρκώς (έχουμε αρχίσει από το μηδέν) τη συχνότητα περιστροφής του τροχού, ο παρατηρητής βλέπει συνεχώς, για κάποια τιμή συχνότητας, το είδωλο της φωτεινής πηγής. Υπολογίστε τη συχνότητα και την περίοδο περιστροφής του τροχού.

ΛΥΣΗ Χρησιμοποιώντας τη σχέση 1.3 υπολογίζουμε πρώτα τη συχνότητα περιστροφής. Έχουμε:

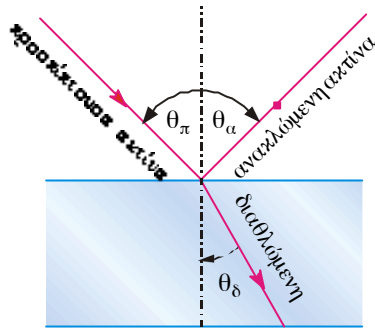
$$c = 2L \cdot f \cdot N, \text{ οπότε } f = \frac{c}{2L \cdot N} = \frac{3 \cdot 10^8 m/s}{2 \cdot 8630 m \cdot 360} \text{ ή}$$

$$f = 48,28 \text{ Hz.}$$

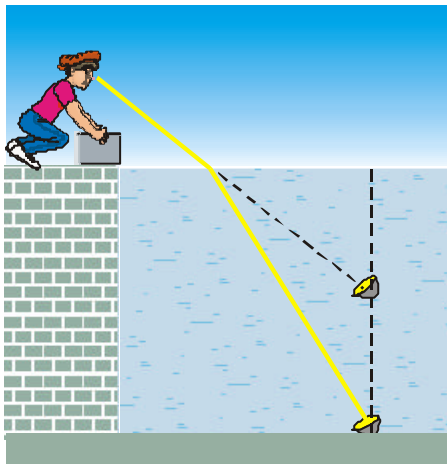
Η περίοδος δίνεται από τη σχέση $T = 1/f$.

$$\text{Άρα: } T = \frac{1}{48,28} s = 0,0207 s$$

1.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ



1-4α Ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πνικνότερο μέσο. θ_{π} είναι η γωνία πρόσπτωσης, θ_{δ} η γωνία διάθλασης και θ_{α} η γωνία ανάκλασης. Ισχύει: $\theta_{\delta} < \theta_{\pi}$.



1-4β Το φως, κατά τη διάδοσή του σε δύο διαφορετικά οπτικά μέσα, αλλάζει διεύθυνση διάδοσης. Έτσι αντικείμενα ορατά στο μάτι φαίνονται τελικά ότι προέρχονται από διαφορετική θέση. Το φαινόμενο οφείλεται στη διάθλαση του φωτός.

Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός

Όταν μία φωτεινή δέσμη, που διαδίδεται σε ένα μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια που χωρίζει το αρχικό μέσο διάδοσης από ένα άλλο οπτικό μέσο, τότε ένα μέρος της ανακλάται προς το αρχικό μέσο διάδοσης, ενώ ένα άλλο μέρος συνεχίζει να διαδίδεται στο δεύτερο μέσο. Στο σχήμα 1-4α βλέπουμε πώς ανακλώνται οι ακτίνες, όταν προσπίπτουν σε μια λεία επιφάνεια, για παράδειγμα από τον αέρα στην επιφάνεια ενός γυαλιού. Η προσπίπτουσα και η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζουν, στο σημείο ανάκλασης, γωνίες θ_{π} και θ_{α} , αντίστοιχα, με την κάθετο προς την ανακλώσα επιφάνεια. Πειραματικά αποδεικνύεται ότι $\theta_{\pi} = \theta_{\alpha}$.

Οι ακτίνες που εισέρχονται στο γυαλί αλλάζουν διεύθυνση διάδοσης. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται διάθλαση. Όταν οι ακτίνες εισέρχονται από τον αέρα στο γυαλί, τότε οι διαθλώμενες ακτίνες πλησιάζουν την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια (σχήμα 1-4α), ενώ, όταν εισέρχονται από το γυαλί στον αέρα, απομακρύνονται από την κάθετο.

Στο πείραμα του σχήματος 1-4β βλέπουμε ότι οι ακτίνες φωτός που εκπέμπονται από μία φωτεινή πηγή η οποία βρίσκεται στον πυθμένα της πισίνας, όταν εξέρχονται από το νερό στον αέρα, εκτρέπονται από την πορεία τους και μας κάνουν να βλέπουμε τη φωτεινή πηγή πιο ψηλά από ό,τι πραγματικά βρίσκεται.

Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη

Ο λόγος για τον οποίο το φως διαθλάται, καθώς διέρχεται από το ένα υλικό μέσο στο άλλο, είναι ότι η ταχύτητά του έχει διαφορετικές τιμές στα δύο μέσα.

Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Μέσα όμως σε κάποιο υλικό η ταχύτητα του φωτός είναι πάντα μικρότερη από τη c_0 . Για διευκόλυνσή μας ορίζουμε ένα συντελεστή που ισούται με το πηλίκο της ταχύτητας c_0 του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα c μέσα σε κάποιο υλικό και ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** n του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (1.4)$$

Επειδή η ταχύτητα του φωτός μέσα σε ένα υλικό είναι πάντα μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό, από τον ορισμό προκύπτει ότι ο δείκτης διάθλασης για οποιοδήποτε υλικό είναι πάντα μεγαλύτερος από τη μονάδα, ενώ για το κενό ισχύει $n=1$.

Όταν το φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων (π.χ. από τον αέρα στο γυαλί), η συχνότητα f παραμένει αμετάβλητη. Τούτο γίνεται σαφές, αν σκεφτούμε το εξής: το φως είναι κύμα, άρα ο αριθμός των μηκών κύματος που προσπίπτουν στη διαχωριστική επιφάνεια, ανά μονάδα χρόνου, είναι ίσος με τον αριθμό των μηκών κύματος που διέρχονται από αυτήν ανά μονάδα χρόνου. Αν δε συνέβαινε αυτό, η διαχωριστική επιφάνεια έπρεπε να δημιουργεί νέα κύματα ή να εξαφανίζει τα ήδη υπάρχοντα. Δεν έχει

παρατηρηθεί όμως τέτοιος μηχανισμός, που σημαίνει ότι η συχνότητα παραμένει σταθερή, καθώς το φως διέρχεται από τη διαχωριστική επιφάνεια.

Εφαρμόζοντας τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής έχουμε διαδοχικά: $c_0 = \lambda_0 \cdot f$ για το κενό και $c = \lambda \cdot f$ για οπτικό μέσο διαφορετικό του κενού. Διαχωρίζοντας τις δύο σχέσεις κατά μέλη προκύπτει: $\frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda}$ και, λόγω της 1.4, είναι: $n = \frac{\lambda_0}{\lambda}$. Τελικά ισχύει:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\tilde{\epsilon}_0}{n} \quad (1.5)$$

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος λ_0 στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματός του, όταν εισέρχεται σε ένα μέσο με δείκτη διάθλασης n .

Ας δούμε τι συμβαίνει, όταν το φως διαδίδεται σε δύο διαφορετικά υλικά με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 , αντίστοιχα, με $n_2 > n_1$. Εφαρμόζοντας την 1.5 για τα δύο οπτικά μέσα, έχουμε:

$$\tilde{\epsilon}_1 = \frac{\tilde{\epsilon}_0}{n_1} \quad (1) \quad \text{και} \quad \tilde{\epsilon}_2 = \frac{\tilde{\epsilon}_0}{n_2} \quad (2)$$

Διαχωρίζοντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε:

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad \text{και, επειδή } n_2 > n_1, \text{ προκύπτει } \lambda_1 > \lambda_2$$

Η τελευταία ανισότητα μας πληροφορεί ότι το μήκος κύματος στο οπτικά πυκνότερο μέσο, δηλαδή στο μέσο που έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, έχει μικρότερη τιμή από αυτή στο οπτικά αραιότερο.

Επειδή για το κενό είναι εξ ορισμού $n=1$, γίνεται κατανοητό ότι το μήκος κύματος θα έχει τη μεγαλύτερη τιμή λ_0 στο κενό. Ως μονάδα μέτρησης του μήκους κύματος για το ορατό φως χρησιμοποιείται το υποπολλαπλάσιο του 1m, που είναι το 1nanometre ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$).

Συμπερασματικά λοιπόν μπορούμε να πούμε ότι: όταν το φως διαδίδεται σε ένα οπτικό μέσο, διατηρεί αμετάβλητα την ταχύτητα (c), το μήκος κύματος (λ) και τη συχνότητα (f), ενώ, όταν αλλάζει οπτικό μέσο, τότε αλλάζουν τα μεγέθη c και λ , αλλά διατηρείται σταθερό το f , που είναι και η συχνότητα της πηγής που παράγει το φως.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 - 2

Υπολογισμός του δείκτη διάθλασης στο εσωτερικό του ανθρώπινου ματιού: Φωτεινή ακτίνα μήκους κύματος $\lambda_0=589\text{nm}$, που παράγεται από λυχνία νατρίου, προσπίπτει από τον αέρα σε ανθρώπινο μάτι. Στο υδατοειδές υγρό μέσα στο βολβό του ματιού το μήκος κύματος έχει τιμή $\lambda=439\text{nm}$. Να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του υδατοειδούς υγρού, καθώς και την ταχύτητα και τη συχνότητα της φωτεινής ακτίνας στο υγρό αυτό.

ΛΥΣΗ Χρησιμοποιούμε τη σχέση 1.5. Με το σκεπτικό ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι περίπου ένα, τα μήκη κύματος στον αέρα και στο κενό έχουν την ίδια τιμή λ_0 . Άρα:

$$\tilde{\epsilon} = \frac{\tilde{\epsilon}_0}{n} \Rightarrow n = \frac{\tilde{\epsilon}_0}{\tilde{\epsilon}} \Rightarrow n = \frac{589\text{nm}}{439\text{nm}} \Rightarrow n = 1,34$$

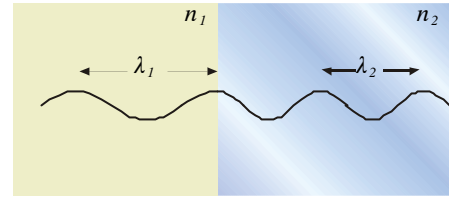
Βλέποντας τον πίνακα 1.1 διαπιστώνουμε ότι ο δείκτης διάθλασης n έχει περίπου την ίδια τιμή με το νερό.

Ας βρούμε την ταχύτητα τώρα. Ισχύει: $n = \frac{c_0}{c} \Rightarrow$

$$c = \frac{c_0}{n} \Rightarrow c = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,34} \Rightarrow c = 2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Τέλος, από τη σχέση $c = \lambda f$, έχουμε διαδοχικά:

$$c = \tilde{\epsilon} \cdot f \Rightarrow f = \frac{c}{\tilde{\epsilon}} = \frac{2,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{439 \text{ nm}} \Rightarrow f = 5,1 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$



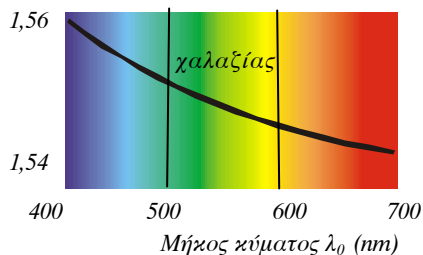
1-4γ Εικόνα που δείχνει τη μείωση του μήκους κύματος, όταν το φως διέρχεται από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο μέσο. Ισχύει στην περίπτωση αυτή $n_2 > n_1$ και $\lambda_2 < \lambda_1$. Το οπτικά πυκνότερο μέσο είναι αυτό που έχει το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.

Πίνακας 1.1. Δείκτες διάθλασης διάφορων υλικών που έχουν υπολογιστεί με φως μήκους κύματος $\lambda_0=589\text{nm}$ (κίτρινο χρώμα του νατρίου στο κενό)

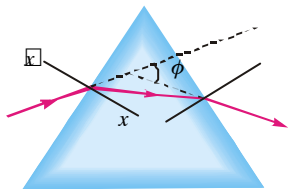
Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Αέρια (0°C, 1Atm)	
Αέρας	1,000293
Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	1,00045
Στερεά	
Πάγος (H ₂ O)	1,309
Ορυκτό άλας (NaCl)	1,544
Χαλαζίας (SiO ₂)	1,544
Φθορίτης (CaF ₂)	1,434
Ορυκτό ξιρκόνιο (ZrO ₂ · SiO ₂)	1,923
Αδάμας (C)	2,417
Υαλοι (τυπικές τιμές)	1,5 - 1,9
Υγρά σε θερμοκρασία 20°C	
Μεθανόλη (CH ₃ OH)	1,329
Νερό (H ₂ O)	1,333
Αιθανόλη (C ₂ H ₅ OH)	1,360
Τετραχλωράνθρακας (CCl ₄)	1,460
Γλυκερίνη	1,473
Βενζόλιο	1,501

1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ

Δείκτης διάθλασης (n)

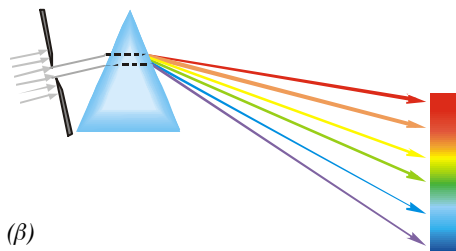


1-5 Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος.



1-6 Ακτίνα φωτός που διαθλάται από πρίσμα εκτρέπεται κατά γωνία ϕ .

Το φαινόμενο «διασκεδασμός» μελετήθηκε για πρώτη φορά το 17ο αιώνα από το Ρενέ Ντεκάρτ και το Νεύτωνα. Ο Νεύτωνας προσπάθησε να αναλύσει περαιτέρω τις μονοχρωματικές ακτίνες του φάσματος σε άλλες απλούστερες, αλλά δεν τα κατάφερε. Το μόνο που παρατήρησε ήταν ότι το χρώμα διαχεόταν περισσότερο, αλλά παρέμενε ως έχει.



1-7 (α) Απεικόνιση του διασκεδασμού που προκαλείται σε δέσμη λευκού φωτός από ένα πρίσμα. Η ταινία των εξερχόμενων χρωμάτων ονομάζεται φάσμα. (β) Τα βασικά χρώματα του φάσματος.

Διασκεδασμός και πρίσματα

Στην προηγούμενη υποενότητα είδαμε ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι ίδια για όλα τα μήκη κύματος. Σε ένα υλικό οπτικό μέσο η ταχύτητα του φωτός είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Ο δείκτης διάθλασης του μέσου δεν είναι σταθερός, αλλά εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός.

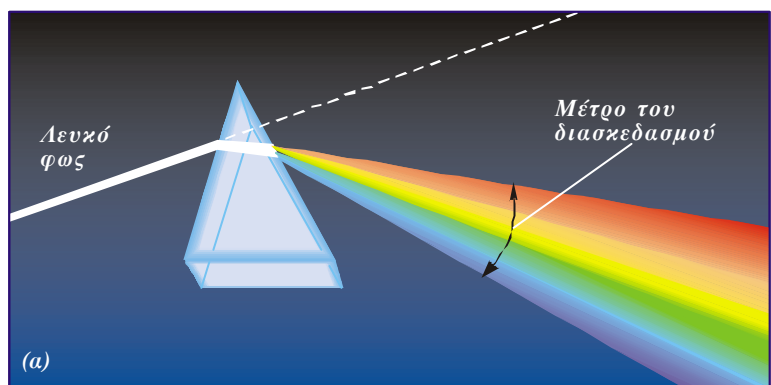
Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η **εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος**, ονομάζεται **διασκεδασμός**. Στο σχήμα 1-5 απεικονίζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης ενός οπτικού υλικού (χαλαζία) από το μήκος κύματος λ_0 στο κενό. Η τιμή του n , όπως βλέπουμε, μειώνεται, καθώς αυξάνεται η τιμή του μήκους κύματος. Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος.

Ανάλυση του λευκού φωτός

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο ανάλυσης του λευκού φωτός, ας δούμε αρχικά πώς προκαλείται η εκτροπή (αλλαγή κατεύθυνσης) μιας μονοχρωματικής ακτίνας φωτός από ένα πρίσμα. Στο σχήμα 1-6 έχουμε μία τέτοια ακτίνα φωτός, που προσπίπτει πλάγια στην αριστερή επιφάνεια ενός πρίσματος. Επειδή ο δείκτης διάθλασης του πρίσματος είναι μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του οπτικού μέσου που τον περιβάλλει, η ακτίνα διαθλάται προσεγγίζοντας την κάθετη xx' , ενώ, όταν η ακτίνα εξέρχεται από το πρίσμα, απομακρύνεται από την κάθετη. Βλέπουμε ότι η εξερχόμενη ακτίνα έχει εκτραπεί τελικά από την αρχική της πορεία κατά γωνία ϕ . Η γωνία ϕ ονομάζεται **γωνία εκτροπής**.

Έστω τώρα ότι έχουμε μία δέσμη λευκού φωτός που προσπίπτει πάνω σε ένα πρίσμα (σχήμα 1-7α). Οι ακτίνες που εξέρχονται από το πρίσμα εκτρέπονται και διασκορπίζονται στο χώρο εξόδου, ενώ ταυτόχρονα το λευκό φως αναλύεται σε μία πολύχρωμη συνεχή ταινία, που περιλαμβάνει γνωστά χρώματα. Η ταινία αυτή ονομάζεται **φάσμα του λευκού φωτός**.

Τα χρώματα του φάσματος, κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος, είναι: ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό και ιώδες (σχήμα 1-7β). Τα χρώματα αυτά δεν αναλύονται σε άλλα απλούστερα και, αν τα ανασυνθέσουμε, θα αναπαράγουμε το λευκό φως.



Παρατηρώντας την εικόνα του σχήματος 1-7β βλέπουμε ότι οι ιώδεις ακτίνες εκτρέπονται περισσότερο, ενώ οι ερυθρές λιγότερο από τις άλλες που βρίσκονται ανάμεσά τους. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η γωνία εκτροπής εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε χρώματος.

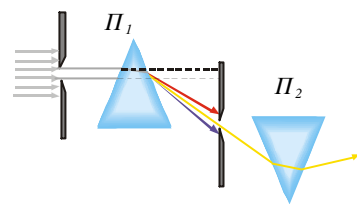
Συμπερασματικά, το φως εμφανίζει τα εξής χαρακτηριστικά σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα:

- Κάθε μονοχρωματική ακτίνα φωτός, όταν διαδίδεται σε ένα συγκεκριμένο οπτικό μέσο, χαρακτηρίζεται από ένα μοναδικό μήκος κύματος, που είναι η ταυτότητα του χρώματος για το μέσο αυτό.
- Ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου έχει διαφορετική τιμή για κάθε χρώμα (πίνακας 1.2).
- Η γωνία εκτροπής κάθε χρώματος, όταν αυτό διέρχεται από οπτικό μέσο, εξαρτάται από το μήκος κύματος του χρώματος και όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος τόσο μικρότερη είναι η γωνία εκτροπής.

Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης

Έχουμε παρατηρήσει πολλές φορές, τις βροχερές μέρες με λίγο Ήλιο, να εμφανίζεται στον ουρανό το ουράνιο τόξο. Εκείνη τη στιγμή η φύση συνδυάζει δύο φαινόμενα, το διασκεδασμό και την ολική ανάκλαση, και μας δίνει την ευκαιρία να χαρούμε την ωραιότητα των αποτελεσμάτων του συνδυασμού αυτού. Το φως, όπως έρχεται **πίσω από τον παρατηρητή**, αφού διαθλαστεί και υποστεί ολική ανάκλαση στις μικρές σταγόνες της βροχής, εξέρχεται από αυτές και κατευθύνεται προς τα μάτια του.

Ο διασκεδασμός προκαλεί τη διάθλαση των χρωμάτων σε διαφορετικές γωνίες και έτσι έχουμε την ανάλυση του φωτός στα χρώματα της ίριδας.

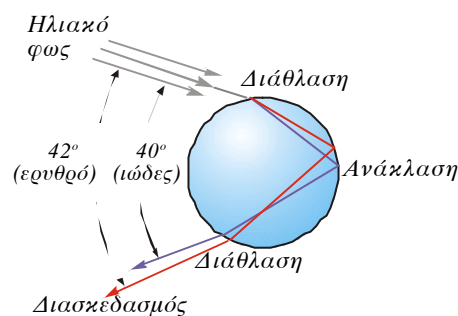


1-8 Το μονοχρωματικό φως δεν αναλύεται σε άλλες απλούστερες ακτινοβολίες. Το πρίσμα Π_1 αναλύει το λευκό φως, όμως το Π_2 απλώς εκτρέπει την κίτρινη ακτίνα.

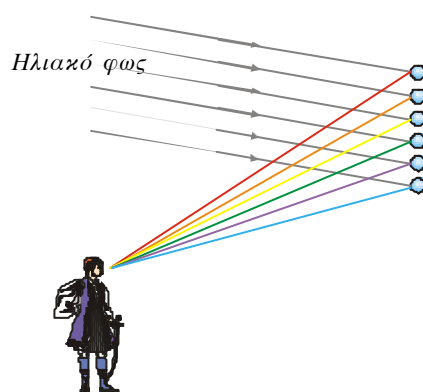
Πίνακας 1.2

Δείκτης διάθλασης γυαλιού crown

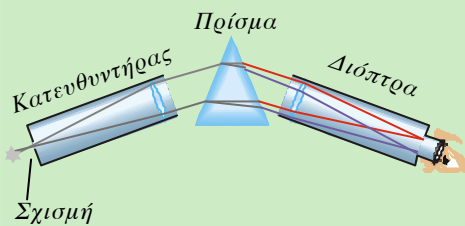
Χρώμα	Δείκτης διάθλασης
Ιώδες	1,532
Μπλε	1,528
Πράσινο	1,519
Κίτρινο	1,517
Πορτοκαλί	1,514
Κόκκινο	1,513



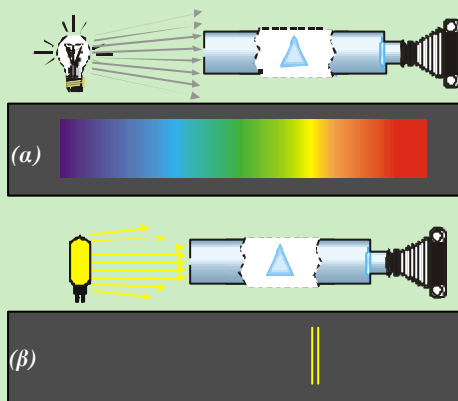
1-9 Διάθλαση ηλιακού φωτός σε σταγόνα βροχής.



1-10 Η Ισμήνη με το Φαίδωνα στο Μυστρά με φόντο το ουράνιο τόξο και την κοιλάδα του Ευρώτα.



1-11 Αρχή λειτουργίας του φασματοσκοπίου. Με τη διόπτρα παρατηρούμε τα διάφορα χρώματα του φάσματος. Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε το φάσμα, υπάρχουν ειδικές φωτογραφικές μηχανές που προσαρμόζονται στο προσφθάλμιο σύστημα της διόπτρας.



1-12 Φάσματα εκπομπής που αποτυπώνονται στο φιλμ του φασματογράφου: (α) λαμπτήρα πυρακτώσεως, (β) λαμπτήρα νατρίου.

Στις αρχές του 19ου αιώνα είχε ανακαλυφθεί ότι κάθε στοιχείο παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο σύνολο μηκών κύματος στο γραμμικό του φάσμα. Με την πάροδο του χρόνου η αναγνώριση στοιχείων από τα φάσματά τους εξελίχθηκε σε μια χρήσιμη τεχνική ανάλυσης. Το χαρακτηριστικό φάσμα ενός ατόμου φαινόταν να σχετίζεται με την εσωτερική του δομή, αλλά οι προσπάθειες να εξηγηθεί αυτό με την κλασική μηχανική και την ηλεκτροδυναμική δεν ήταν επιτυχείς. Τη λύση την έδωσε η εισαγωγή της κβαντομηχανικής στο παιχνίδι της έρευνας, η οποία οδήγησε σε δραστικές αλλαγές των απόψεων για τη φύση της ακτινοβολίας και την αλληλεπίδρασή της με την ύλη.

Το φασματοσκόπιο

Το **φασματοσκόπιο** (ή **φασματογράφος**) πρίσματος είναι ένα όργανο με το οποίο γίνεται η ανάλυση μίας δέσμης φωτός και η μελέτη του φάσματός της. Αποτελείται από τρία βασικά μέρη, τον **κατευθυντήρα**, το **πρίσμα** και τη **διόπτρα**. Το φως μίας πηγής εισέρχεται στον κατευθυντήρα, εξέρχεται από αυτόν, έτσι ώστε οι ακτίνες να είναι μεταξύ τους παράλληλες, προσπίπτει στο πρίσμα και αναλύεται στο φάσμα του. Οι εξερχόμενες ακτίνες παρατηρούνται από τη διόπτρα. Περιστρέφοντας το πρίσμα ή τη διόπτρα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα μήκη κύματος.

Αν στη διόπτρα προσαρμόσουμε το φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, το φάσμα αποτυπώνεται στο φιλμ (**φασματογρόφος**) και έτσι μπορούμε να μελετάμε τα μήκη κύματος του φωτός που εκπέμπει μία πηγή, λόγω χάρη το πυρακτωμένο νήμα ενός λαμπτήρα φωτισμού (λαμπτήρας πυρακτώσεως), ή μία λυχνία ατμών νατρίου.

Φάσματα εκπομπής

Το φάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπει μία φωτεινή πηγή ονομάζεται **φάσμα εκπομπής** της πηγής αυτής. Τα φάσματα εκπομπής των διάφορων πηγών διακρίνονται σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

(α) **Συνεχή φάσματα εκπομπής.** Συνεχή φάσματα παίρνουμε, όταν εξετάζουμε με το φασματογρόφο το φως που εκπέμπουν στερεά και υγρά σώματα τα οποία βρίσκονται σε μεγάλη θερμοκρασία (διάπυρα σώματα). Αν η πηγή του φωτός είναι, για παράδειγμα, ο λαμπτήρας πυρακτώσεως, τότε το φάσμα είναι μία συνεχής ταινία χρωμάτων, ακριβώς όπως την περιγράψαμε προηγουμένως. Επίσης συνεχές φάσμα εκπέμπουν ο λωμένος σίδηρος, ο λωμένος χαλκός κτλ.

Επειδή τα συνεχή φάσματα, που εκπέμπονται από διάφορα διάπυρα σώματα, δε διαφέρουν μεταξύ τους, η μελέτη τέτοιων φασμάτων δεν μπορεί να μας δώσει πληροφορίες για τη φύση του σώματος, αν δηλαδή το σώμα αποτελείται από κάποιο συγκεκριμένο υλικό, όπως π.χ. σίδηρο, χαλκό κτλ. Η μοναδική πληροφορία που παίρνουμε είναι για τη θερμοκρασία του υλικού.

(β) **Γραμμικά φάσματα εκπομπής.** Αν εξετάσουμε με το φασματοσκόπιο το φως που εκπέμπουν **θερμά αέρια** ή **ατμοί**, τότε διαπιστώνουμε ότι το φάσμα τους, που αποτυπώνεται στο φιλμ, αποτελείται από διακριτές χρωματιστές γραμμές, χαρακτηριστικές για το είδος των αερίων ή των ατμών. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο μήκος κύματος ή συχνότητα. Αν κάνουμε, λόγω χάρη, φασματοσκοπική ανάλυση του φωτός που εκπέμπει η λυχνία ατμών νατρίου, θα παρατηρήσουμε ότι το φάσμα του αποτελείται από δύο κίτρινες γραμμές πολύ κοντά μεταξύ τους (σχήμα 1-12).

Φάσματα απορρόφησης

Αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα υλικό μέσο, λόγω χάρη ένα δοχείο που να περιέχει έγχρωμο υγρό ή μια έγχρωμη γυάλινη πλάκα (σχήμα 1-13), θα διαπιστώσουμε ότι ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος λείπουν και στη θέση

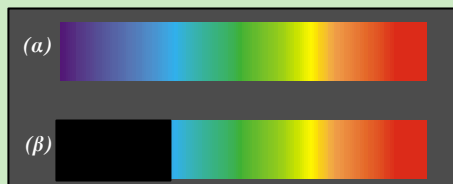
τους εμφανίζονται σκοτεινές περιοχές. Τα φάσματα αυτά τα ονομάζουμε **φάσματα απορρόφησης**, γιατί οι σκοτεινές περιοχές οφείλονται στο ότι οι ακτίνες ορισμένων χρωμάτων έχουν απορροφηθεί κατά τη διέλευσή τους από το υλικό μέσο. Τα φάσματα απορρόφησης τα διακρίνουμε σε **συνεχή** και **γραμμικά**.

(α) **Συνεχή φάσματα απορρόφησης** δίνουν τα έγχρωμα διαφανή στερεά και υγρά. Αν το υλικό που φωτίζουμε είναι γυάλινη κόκκινη πλάκα, τότε παίρνοντας το φάσμα θα παρατηρήσουμε ότι έχουν απορροφηθεί ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος εκπομπής. Συγκεκριμένα, από την κόκκινη πλάκα διέρχονται μόνο οι ακτίνες που βρίσκονται στην περιοχή του ερυθρού (σχήμα 1-13β).

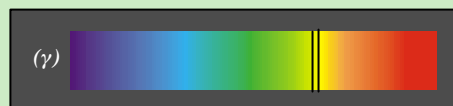
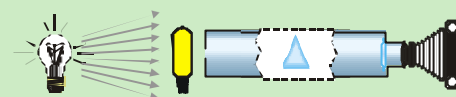
(β) **Γραμμικά φάσματα απορρόφησης** δίνουν τα αέρια ή οι ατμοί. Αποτελούνται από ένα συνεχές φάσμα στο οποίο υπάρχουν σκοτεινές γραμμές. Έτσι, αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα διαφανές δοχείο με ατμούς νατρίου (σχήμα 1-13γ), τότε στο συνεχές φάσμα του λευκού φωτός του λαμπτήρα θα παρατηρήσουμε σκοτεινές γραμμές, στις θέσεις ακριβώς εκείνες που θα εμφανίζονταν οι κίτρινες γραμμές του φάσματος εκπομπής των ατμών του νατρίου. Δηλαδή οι ατμοί του νατρίου έχουν απορροφήσει τις κίτρινες ακτινοβολίες που εκπέμπουν, όταν ακτινοβολούν.



1-13 Τυπική διάταξη για την αποτύπωση του φάσματος απορρόφησης. Το κόκκινο γυαλί επιτρέπει τη διέλευση ακτίνων με μήκη κύματος κοντά στην περιοχή του ερυθρού.



(α) Συνεχές φάσμα εκπομπής λευκού φωτός.
(β) Συνεχές φάσμα απορρόφησης κόκκινου γυαλιού.



(γ) Γραμμικό φάσμα απορρόφησης ατμών Na.

Υπεριώδης και υπέρυθη ακτινοβολία

Υπεριώδης ακτινοβολία

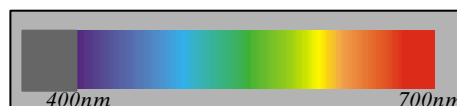
Το συνεχές φάσμα που παίρνουμε, όταν αναλύουμε με το φασματοσκόπιο το λευκό φως, τελειώνει στο ένα άκρο με ιώδες φως, ενώ στο άλλο με ερυθρό. Όπως φαίνεται από το σχήμα 1-14, το ορατό φως, δηλαδή τα μήκη κύματος που αντιλαμβάνεται το μάτι μας, έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Αυτό όμως δε σημαίνει ότι το φάσμα του λευκού φωτός, που εκπέμπει η φωτεινή πηγή, περιορίζεται σε αυτά τα όρια.

Αν παρατηρήσουμε με ειδικό φασματογράφο τη φωτογραφική πλάκα στην οποία αποτυπώνεται το φάσμα, θα διαπιστώσουμε ότι πέρα από το όριο της ιώδους περιοχής η πλάκα έχει αμυνρωθεί. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος, υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπεριώδης ακτινοβολία**.

Η υπεριώδης ακτινοβολία αποτελείται από ακτινοβολίες που έχουν μήκη κύματος μικρότερα των 400nm και μεγαλύτερα του 1nm περίπου.

Αν και η υπεριώδης ακτινοβολία δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι, μερικές από τις ιδιότητές της μας πληροφορούν για την ύπαρξή της:

1. Προκαλεί αμείρωση των φωτογραφικών πλακών.
2. Προκαλεί το φθορισμό σε διάφορα σώματα, όταν δηλαδή προσπίπτει σε ορισμένα σώματα, τότε αυτά εκπέμπουν χαρακτηριστικές ορατές ακτινοβολίες.



1-14 Φάσμα υπεριώδους - γκριζα περιοχή στο φιλμ πέρα από το ιώδες.



(α) (β)

1-15 Δύο φωτογραφίες του ίδιου αγαλματιδίου τραβηγμένες η (α) στο ορατό φως και η (β) στο υπεριώδες.



1-16 Η φωτογραφία έχει ληφθεί με φιλμ ευπαθές στο υπέρυθρο φως. Η αντίστοιχη του ορατού φωτός δεν ήταν δυνατό να ληφθεί, γιατί τη στιγμή της λήψης επικρατούσε σκοτάδι.



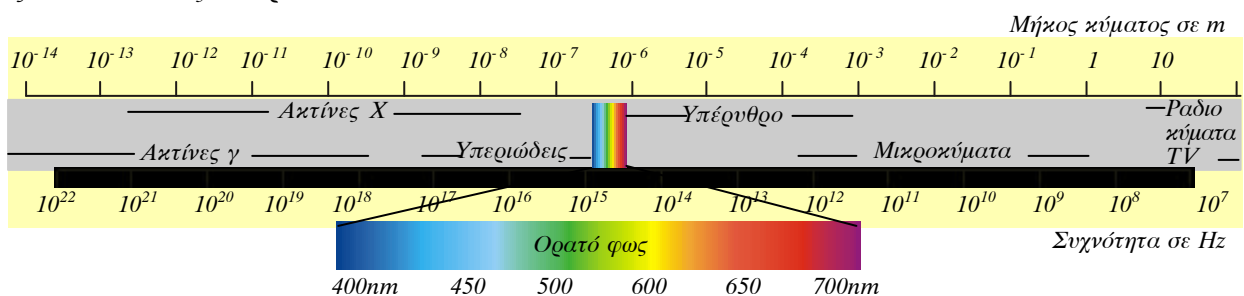
(α)



(β)

1-17 Δύο φωτογραφίες του ίδιου τοπίου. Η (α) έχει ληφθεί με φιλμ του εμπορίου, ενώ η (β) με φιλμ ευπαθές στην υπέρυθρη ακτινοβολία και μετά από χρήση φίλτρων που επιτρέπει μόνο τη διέλευση υπέρυθρων φωτός.

Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Τα όρια μεταξύ των ζωνών είναι κάπως αυθαίρετα.



3. Συμμετέχει στη μετατροπή του οξυγόνου της ατμόσφαιρας σε όζον.
4. Όταν απορροφάται από υλικά σώματα (όπως άλλωστε και οι ακτίνες οποιουδήποτε χρώματος), προκαλεί τη θέρμανσή τους.
5. Υπεριώδης ακτινοβολία με πολύ μικρό μήκος κύματος προκαλεί βλάβες στα κύτταρα του δέρματος, οι οποίες μπορεί να είναι τέτοιες, ώστε να οδηγήσουν και στην εμφάνιση καρκίνου. Κατά τη διάρκεια της ηλιοθεραπείας το μαύρισμα του δέρματος οφείλεται στη μελανίνη που παράγει ο οργανισμός, για να προστατευθεί από την υπεριώδη ακτινοβολία.
6. Χρησιμοποιείται στην Ιατρική για πλήρη αποστείρωση διάφορων εργαλείων.

Υπέρυθρη ακτινοβολία

Αναλύοντας το λευκό φως ενός λαμπτήρα πυρακτώσεως πάνω σε πέτασμα παίρνουμε το φάσμα του. Αν τοποθετήσουμε ένα ευαίσθητο θερμόμετρο πάνω στο πέτασμα και το μετακινήσουμε από το ιώδες προς το ερυθρό, θα παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία του να αυξάνεται. Πιο πέρα από το ερυθρό η ένδειξη είναι ακόμη μεγαλύτερη.

Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία, που προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **υπέρυθρη ακτινοβολία**.

Επειδή η υπέρυθρη ακτινοβολία είναι αόρατη, για την ανίχνευσή της υπάρχουν ειδικά όργανα, **οι φωρατές**. Η αρχή λειτουργίας των φωρατών βασίζεται στην απορρόφηση ενέργειας των υπέρυθρων ακτινοβολιών και στη συνέχεια στη μετατροπή της σε άλλες μορφές. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 700nm και 10⁶nm. Μερικές από τις ιδιότητες των υπέρυθρων είναι οι εξής:

1. Απορροφώνται επιλεκτικά από διάφορα σώματα και προκαλούν αύξηση της θερμοκρασίας τους.
2. Διέρχονται μέσα από την ομίχλη και τα σύννεφα (δεν απορροφώνται από αέρια, σχήμα 1-17).
3. Δεν έχουν χημική δράση και δεν προκαλούν φωσφορισμό.

Εφαρμογές: Η χρήση των υπέρυθρων βασίζεται στην εκλεκτικότητα τους να απορροφώνται από την ύλη. Στην Ιατρική, για παράδειγμα, δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταδίδει θερμότητα σε ορισμένη περιοχή του σώματος. Επίσης με ειδικές φωτογραφικές μηχανές πετυχαίνεται φωτογράφιση ακόμη και όταν υπάρχει συννεφιά ή ομίχλη (σχήμα 1-17).