

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

ΦΥΣΙΚΗ

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ

Γ' ΤΑΞΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ

ΦΥΣΙΚΗ

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ
Γ ΤΑΞΗΣ ΕΝΙΑΙΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

Τόμος 1ος

ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

**Πέτρος Γεωργακάκος, φυσικός,
καθηγητής 3ου Λυκείου**

Ηλιούπολης

**Αθανάσιος Σκαλωμένος, φυσικός,
καθηγητής 1ου Λυκείου Ζωγράφου**

**Νικόλαος Σφαρνάς, φυσικός,
καθηγητής 56ου Λυκείου Αθηνών**

**Ιωάννης Χριστακόπουλος,
φυσικός, καθηγητής του Ε.Π.Λ.**

**Νέας Φιλαδέλφειας «Μίλτος
Κουντουράς»**

ΟΜΑΔΑ ΚΡΙΣΗΣ

**Ευάγγελος Κούκλης, φυσικός,
καθηγητής 6ου Λυκείου Ζωγράφου**

**Σπύρος Τζαμαρίας, φυσικός
στοιχειωδών σωματιδίων. Κύριος
ερευνητής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»**

**Χρήστος Χρονόπουλος, φυσικός,
καθηγητής 4ου Λυκείου
Αμαρουσίου**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ
Χρήστος Δούκας, πάρεδρος
Παιδαγωγικού Ινστιτούτου, τομέας
Φυσικών Επιστημών**

**ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ
Μαιρίτα Κλειδωνάρη, φιλόλογος,
καθηγήτρια Λυκείου Αγίου
Στεφάνου**

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΓΙΑ
ΜΑΘΗΤΕΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΟΡΑΣΗ
Ομάδα Εργασίας Ινστιτούτο
Εκπαιδευτικής Πολιτικής (Ι.Ε.Π.) –
(Ιουστίνα Φλεμοτόμου)
(επιμέλεια:
Γεωργία Παπασταυρινίδου)**

**ΠΕΤΡΟΣ ΓΕΩΡΓΑΚΑΚΟΣ
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΣΚΑΛΩΜΕΝΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΦΑΡΝΑΣ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΧΡΙΣΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Φ Υ Σ Ι Κ Η

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ

Γ ΤΑΞΗΣ ΕΝΙΑΙΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

Τόμος 1ος

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στην ανάπτυξη της βασικής επιστήμης και των εφαρμογών της έχει μικρύνει τα τελευταία χρόνια. Η βάση της τεχνολογίας είναι σήμερα, σε μεγάλο βαθμό, επιστημονική. Η ανάγκη να τονιστούν οι βασικές επιστημονικές αρχές, αντί των ειδικών εφαρμογών, οδηγεί στη διδασκαλία σύγχρονων γνώσεων και όχι ξεπερασμένων, ώστε να εξοικειωθεί ο μαθητής με την ατμόσφαιρα της αλλαγής που συμβαίνει με ραγδαίο ρυθμό γύρω του. Αυτές οι εξελίξεις απαιτούν αναθεώρηση του παραδοσιακού μαθήματος της γενικής Φυσικής, το οποίο μάλιστα απευθύνεται για πρώτη φορά μετά από αρκετά χρόνια σε μαθητές της Γ' τάξης Λυκείου όλων των κατευθύνσεων.

Οι κριτικές που ακούγονται πιο συχνά για σχολικά βιβλία της Φυσικής είναι οι ακόλουθες:

- Το περιεχόμενο είναι εγκυκλοπαιδικό ως προς το ότι τα θέματα δεν εξετάζονται σε μεγάλο βάθος, οι συζητήσεις είναι σε μεγάλο βαθμό περιγραφικές και όχι επεξηγηματικές και αναλυτικές, ενώ εξετάζονται πάρα πολλά θέματα.**
- Το περιεχόμενο δεν είναι αρκετά μοντέρνο και οι εφαρμογές δεν προέρχονται από τη σύγχρονη Φυσική.**
- Η οργάνωση της ύλης γίνεται με στεγανά χωρίσματα και έτσι δεν αποκαλύπτεται η ουσιαστική ενότητα της Φυσικής και των αρχών της. Δεν πιστεύουμε ότι έχει γραφτεί κάποιο διδακτικό βιβλίο Φυσικής που να μην έχει δεχτεί κριτική σε κάποια**

από τις παραπάνω βάσεις. Γράφοντας το βιβλίο αυτό γνωρίζαμε τις κριτικές αυτές και επιδιώξαμε:

- Ο μαθητής να γνωρίσει και να εξοικειωθεί με έννοιες και γνώσεις που ήδη βρίσκονται στο προσκήνιο της επιστήμης και των εφαρμογών της.**
- Χωρίς να προχωρήσουμε σε μεγάλο βάθος, να δοθούν σύγχρονες επιστημονικές έννοιες με απλό και κατανοητό τρόπο, που όμως να παραμένει επιστημονικά ακριβής.**
- Να καταστήσουμε το μαθητή ικανό να αντιμετωπίζει με κριτική ματιά τα κοινωνικά προβλήματα που συνοδεύουν την ανάπτυξη της σύγχρονης επιστήμης.**

Μερικά θέματα που περιέχονται στο βιβλίο αυτό επεκτείνονται, ώστε να

αποτελέσουν σημείο αφετηρίας μιας παραπέρα αναζήτησης για όσους από τους μαθητές έχουν βαθύτερα ενδιαφέροντα στα θέματα αυτά. Τα θέματα αυτά επισημαίνονται στο βιβλίο με έγχρωμο φόντο (πράσινο) και δεν αποτελούν υποχρεωτική διδακτέα ύλη.

Τέλος θα θέλαμε να τονίσουμε ότι η συγγραφή και η έκδοση ενός καινούριου διδακτικού βιβλίου θα πρέπει να αποτελεί το πρώτο σκαλοπάτι για μια συνεχή βελτίωσή του, η οποία θα προκύψει με τις παρατηρήσεις των μαθητών και των διδασκόντων.

Σε όσους καθηγητές Φυσικής διδάξουν το βιβλίο και στους μαθητές που θα το διδαχθούν επαφίεται να κρίνουν κατά πόσο πέτυχε η προσπάθειά μας.

Αθήνα, Ιανουάριος 1999

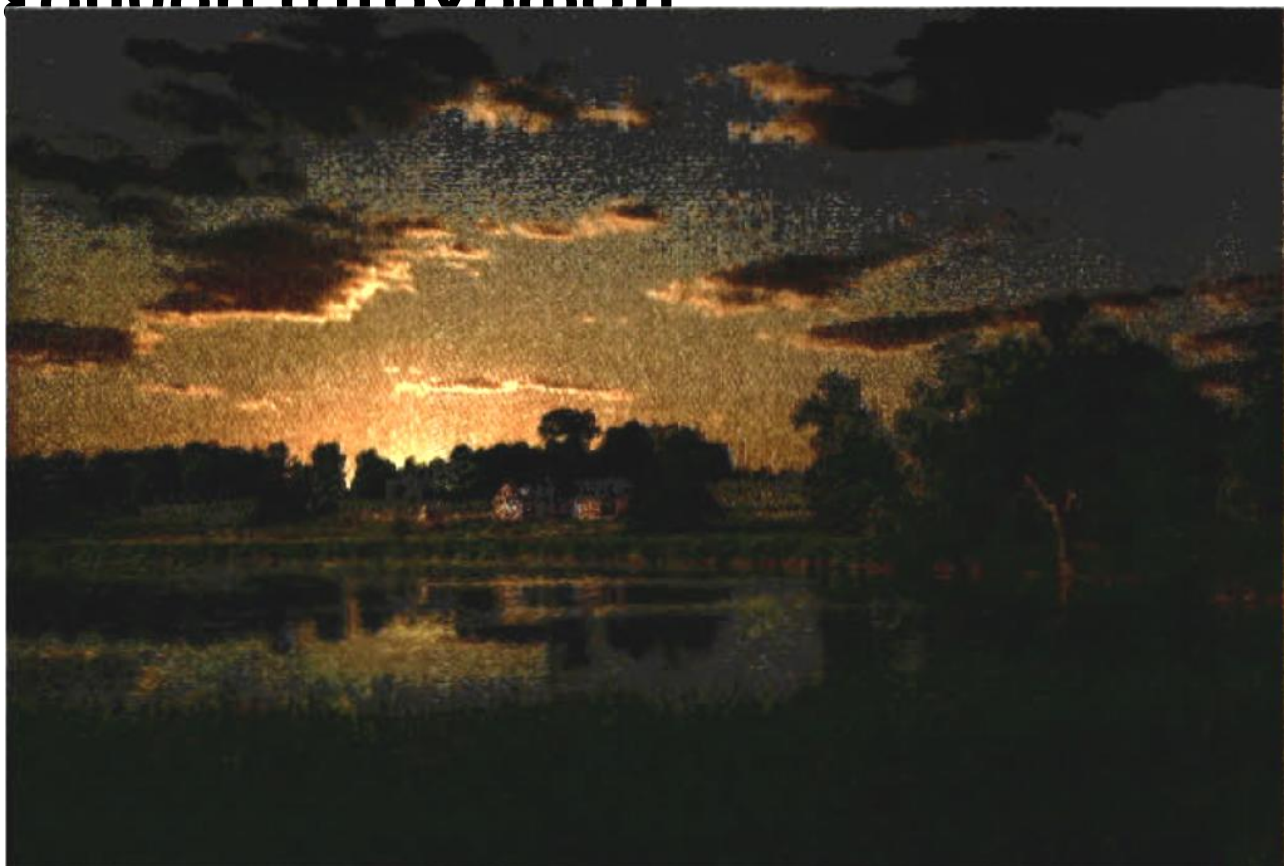
Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

1

Τ Ο Φ Ω Σ

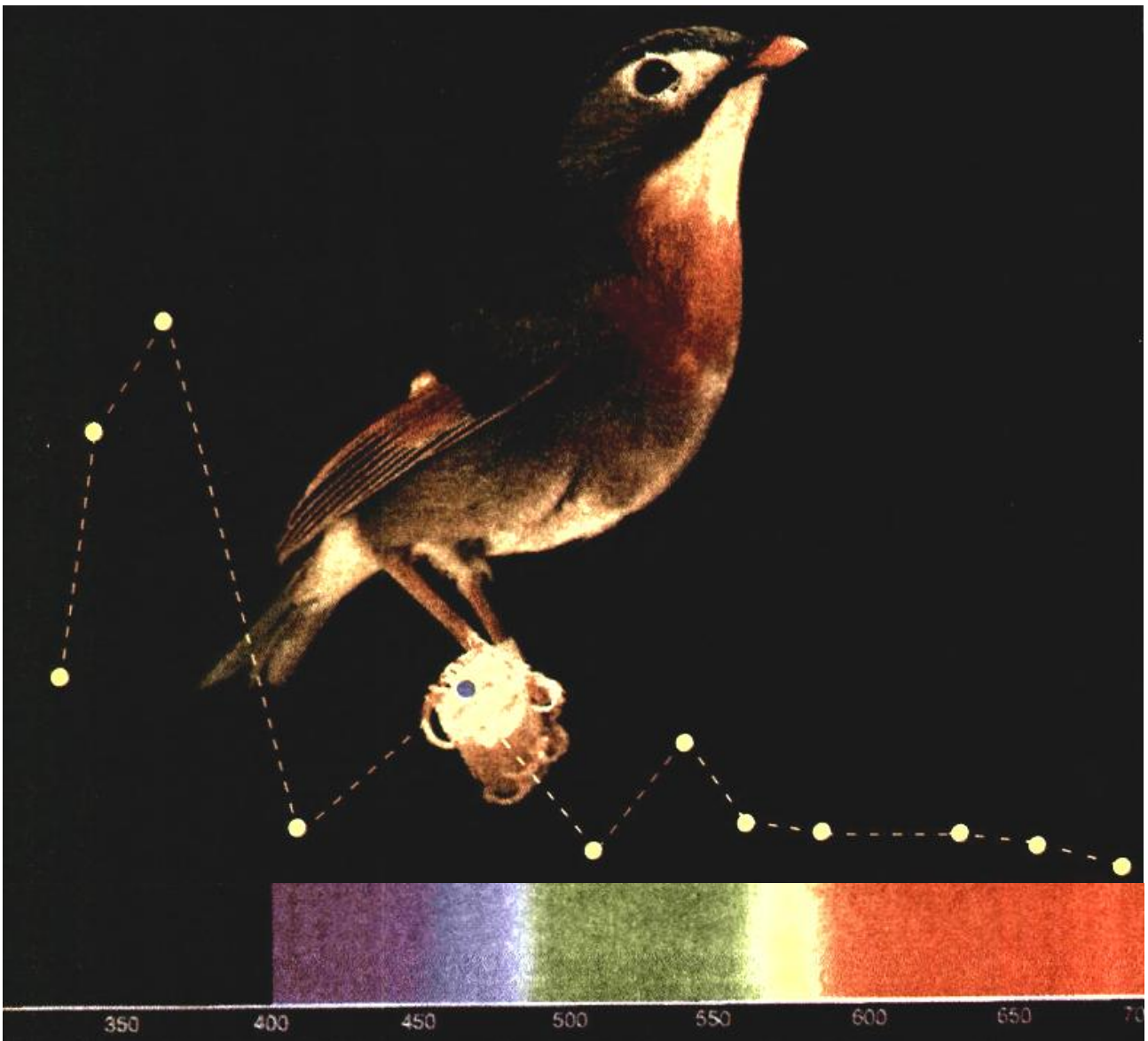
- Η φύση του φωτός
- Η ταχύτητα του φωτός
- Μήκος κύματος και συχνότητα φωτός
- Ανάλυση λευκού φωτός και χρώματα
- Πόλωση του φωτός

Το φως κατά το σούρουπο διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεπάζεται. 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.





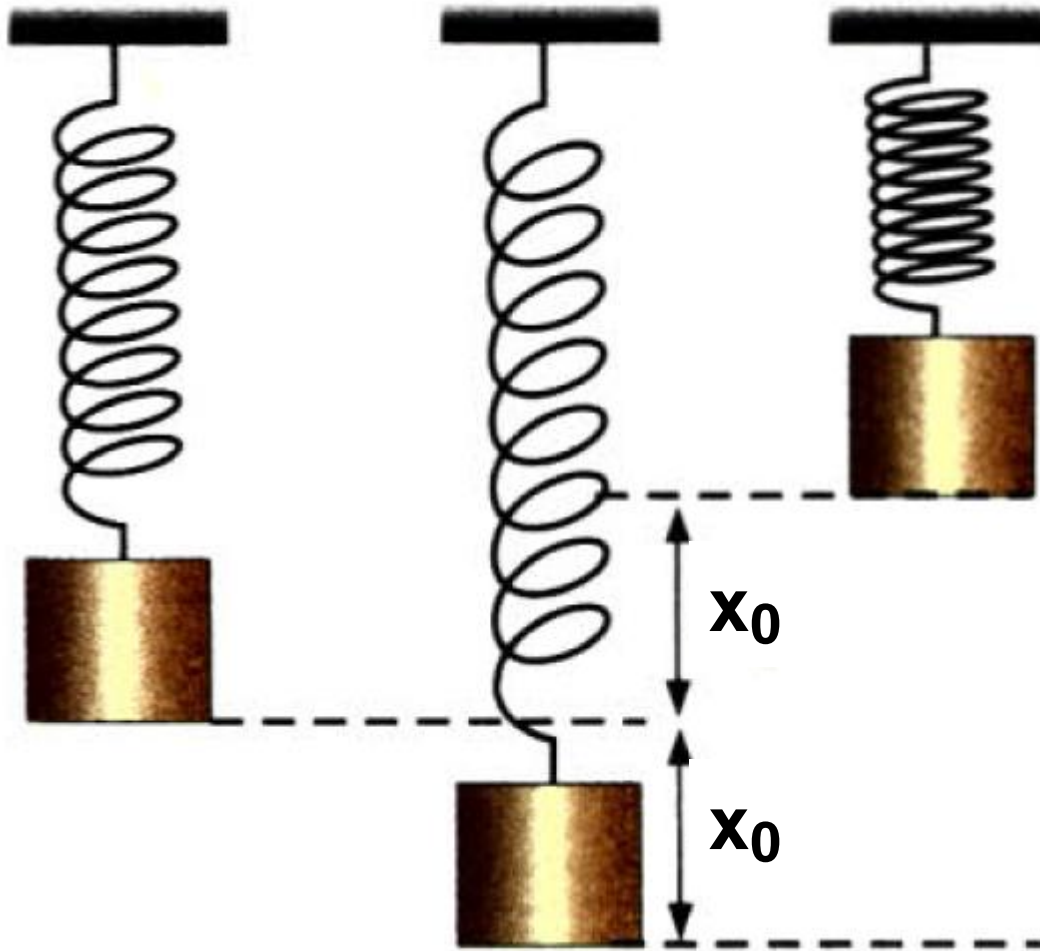
Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού όσον αφορά την αντίληψη των χρωμάτων κυμαίνεται από τα 400nm περίπου (ιώδες φως) έως τα 700nm περίπου (ερυθρό φως). Αυτή η ευαισθησία καθορίζεται κυρίως από τους υποδοχείς που υπάρχουν

στα αισθητήρια όργανα της όρασης του ανθρώπου.

Το ερώτημα είναι αν και τα άλλα ζωικά είδη υπόκεινται σε παρόμοιους περιορισμούς της όρασης 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 απόμακρύνουμε 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:

$f = N/t$, για $t = T$ και $N = 1$,
παίρνουμε: $f = 1/T$

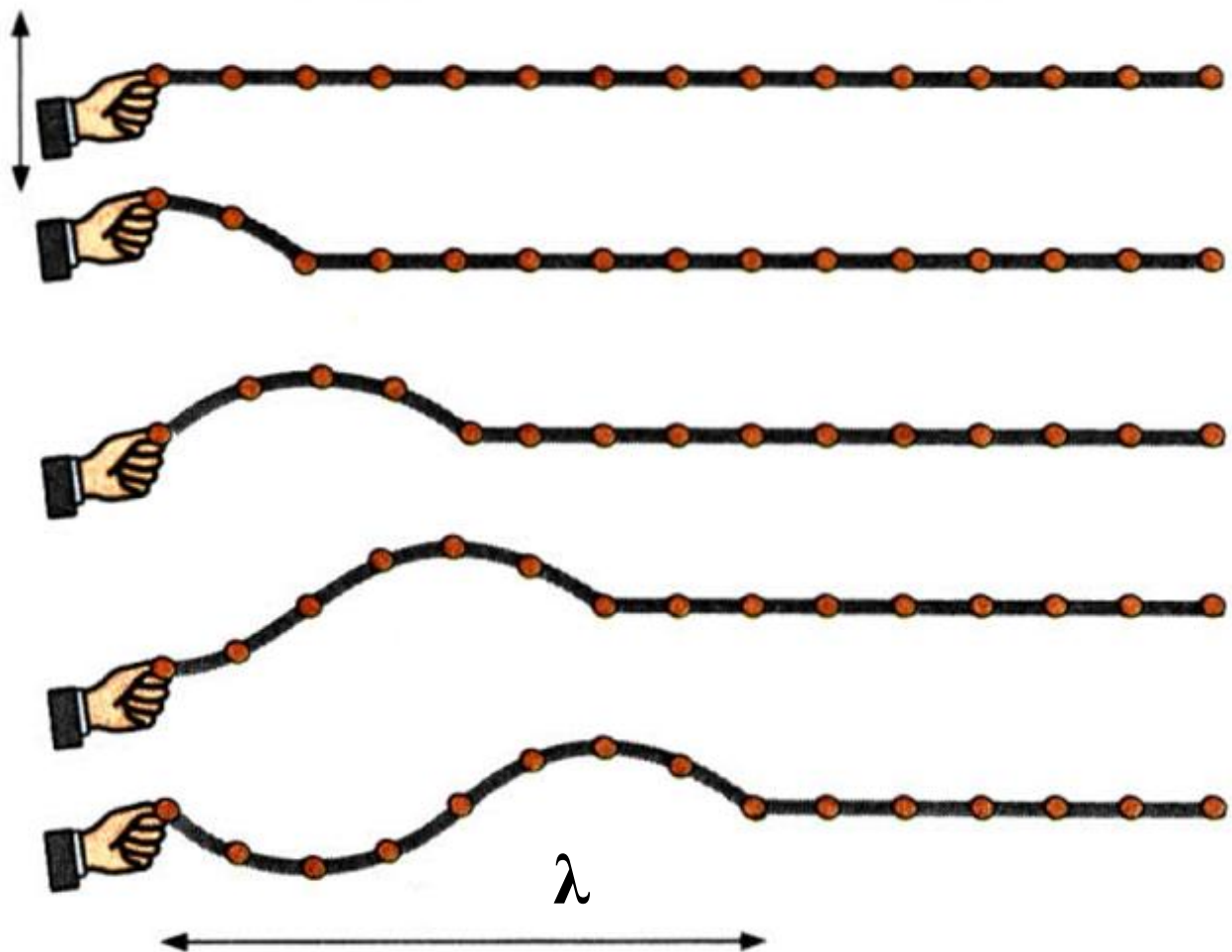
• Επίσης εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι η ενέργεια του ταλαντωτή εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης και δίνεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{2} kx_0^2.$$

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 πεπερα-
σμένη ταχύτητα, η οποία ονομά-
ζεται ταχύτητα διάδοσης της
διαταραχής.**



**Στο παραπάνω σχήμα το χέρι μας
κρατάει το ένα άκρο οριζόντιου
σχοινιού και εκτελεί αρμονική ταλά-
ντωση 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:

$$c = x / t \quad (1)$$

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:

$$c = \lambda / T \text{ και,}$$

αν θέσουμε όπου $T = 1 / f$,
παίρνουμε:

$$c = \lambda f$$

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 ταλα-

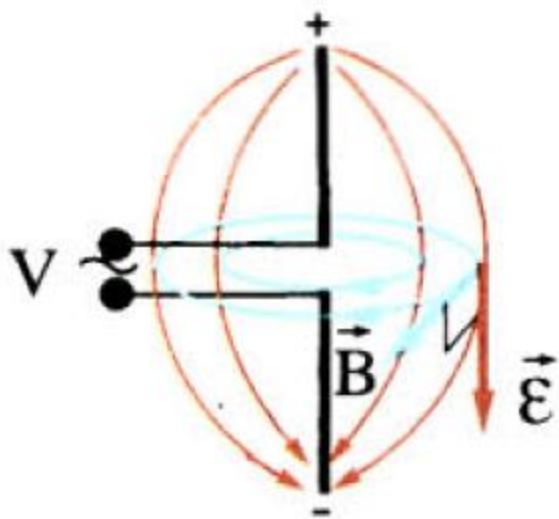
ντώνονται όλα τα σωματίδια του ελαστικού μέσου κατά τη διάδοση του κύματος. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ένα ορισμένο κύμα, που διαδίδεται σε διαφορετικά ελαστικά μέσα, θα έχει την ίδια συχνότητα σε όλα τα μέσα, αλλά διαφορετικές τιμές μήκους κύματος και ταχύτητας διάδοσής του.

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 κεραίες 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 τρο-

φοδοτείται 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).



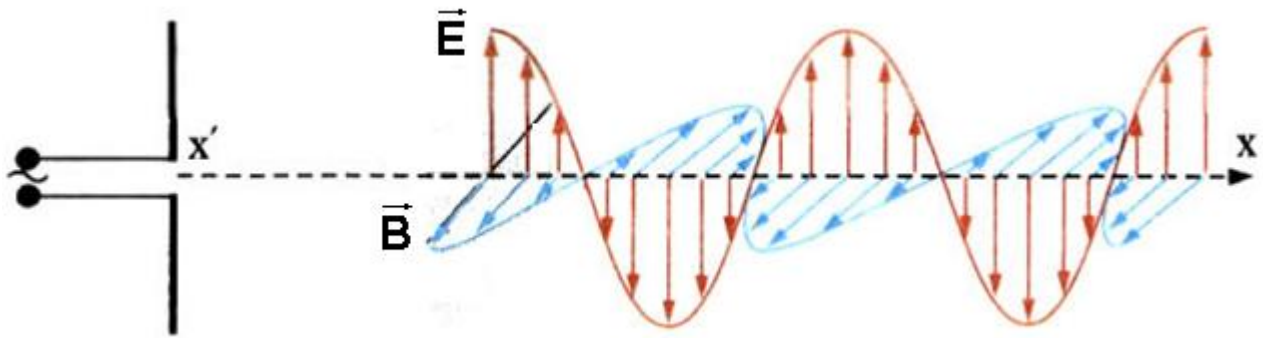
Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αυτή η μεταβολή διαδίδεται, απομακρυνόμενη από την κεραία, κατά μήκος της ευθείας $x'x$, που αποτελεί και τη διεύθυνση διά-

δοσης του κύματος. Η διαδιδόμενη αυτή διαταραχή ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό κύμα.**

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα δε χρειάζεται κάποιο ελαστικό μέσο για να διαδοθεί. Διαδίδεται ακόμα και στο κενό με ταχύτητα c_0 , γνωστή ως ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό. Σε κάθε θέση της ευθείας $x'x$ 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 ηλεκτρομα-

γνητικό κύμα η ένταση \vec{E} του ηλεκτρικού και η ένταση \vec{B} του μαγνητικού πεδίου, σε κάθε σημείο, ταλαντώνονται αρμονικά.



Τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;

1.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Aπό πολύ παλιά, στους αρχαιότατους χρόνους, φιλόσοφοι και φυσιοδίφες προσπαθούσαν να κατανοήσουν και να ερμηνεύσουν τη «φύση» του φωτός. Για πολλά χρόνια ήταν αντικείμενο μακρόπνων 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).

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 κίνηση τον αυτή λόγω της ταχύτητάς του.

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.

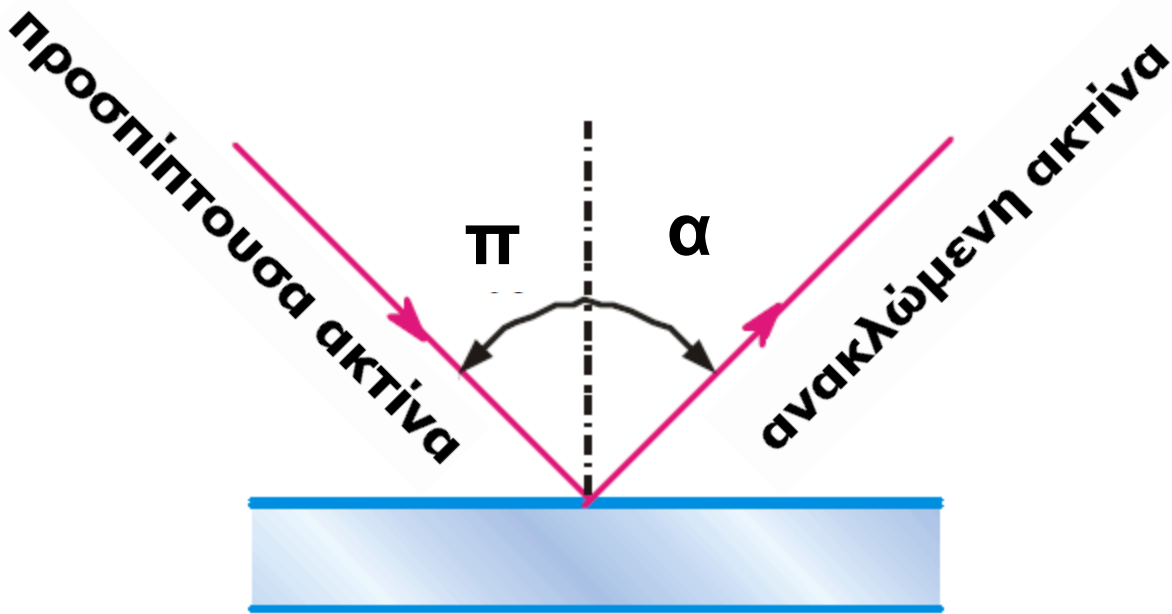


Isaac Newton

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

δηλαδή:

γωνία πρόσπτωσης (π) =
= γωνία ανάκλασης (α)



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



James Clerk Maxwell

**Το φως είναι εγκάρσια
ηλεκτρομαγνητικά 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 σωματίδιο 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

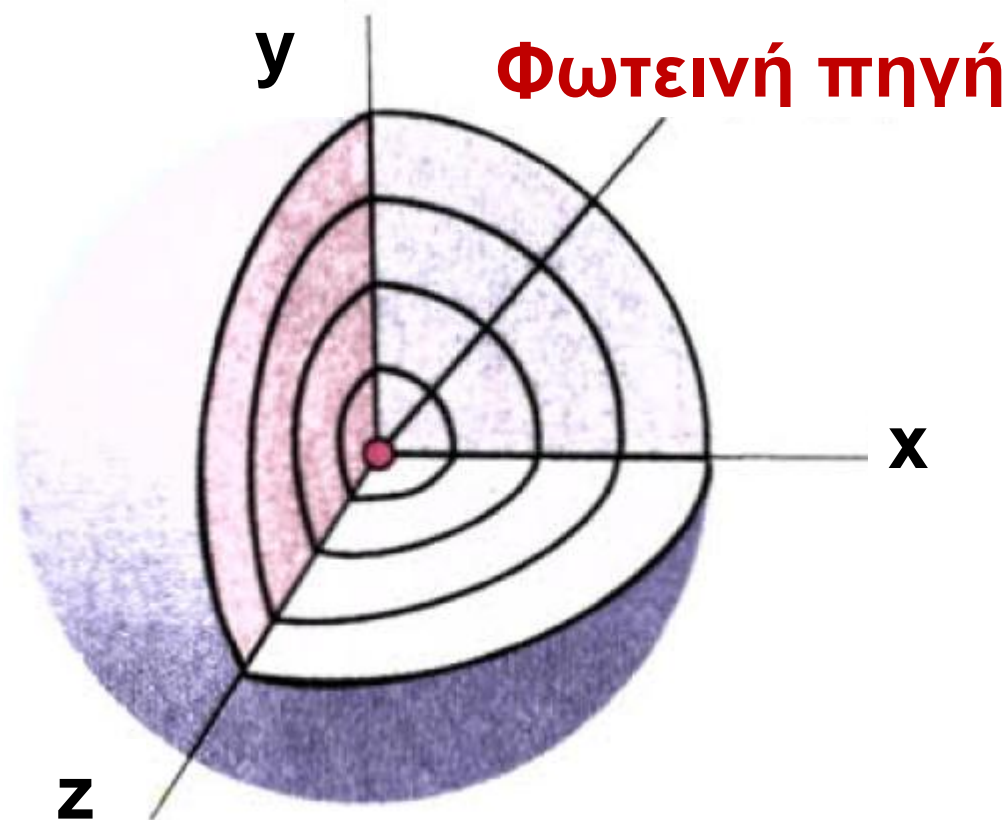
την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός.

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

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.**

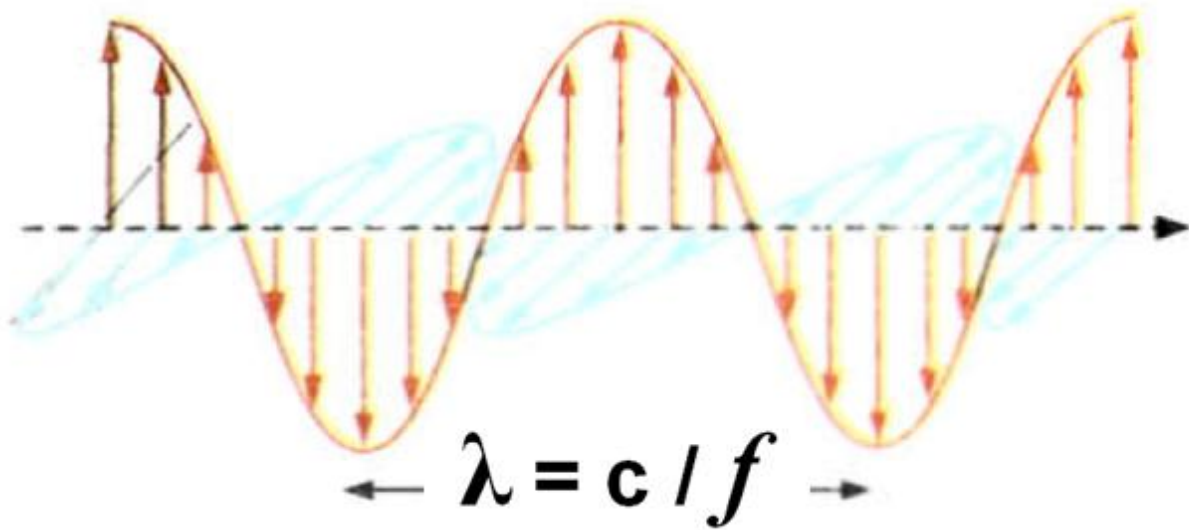


**1-1 Σφαιρικά μέτωπα κύματος
διαδίδονται ομοιόμορφα προς όλες
τις κατευθύνσεις ξεκινώντας από μία
πηγή φωτός.**

**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 \mathbf{E} του ηλεκτρικού πεδίου και την ένταση \mathbf{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 (\mathbf{E} και \mathbf{B}). Οι εντάσεις των πεδίων \mathbf{E} και \mathbf{B} παίρνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή, δηλαδή έχουν την ίδια φάση και διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα c (σχήμα 1-2).

Διεύθυνση διάδοσης του κύματος



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

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.

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.

$$c = \lambda f$$

Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής
(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 πει-

ράματα 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.



Max Planck (1858-1947).

Μία δέσμη φωτός αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια. 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.

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.

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 .

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 οποιοσδήποτε τιμές, αλλά μόνο ακέραια πολλαπλάσια της τιμής του φορτίου ή ηλεκτρονίου:

$$1,6 \times 10^{-19} \text{ C.}$$

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 $E = h f$.

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

(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.

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 τον πρώτον.

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 μεγαλύτε-

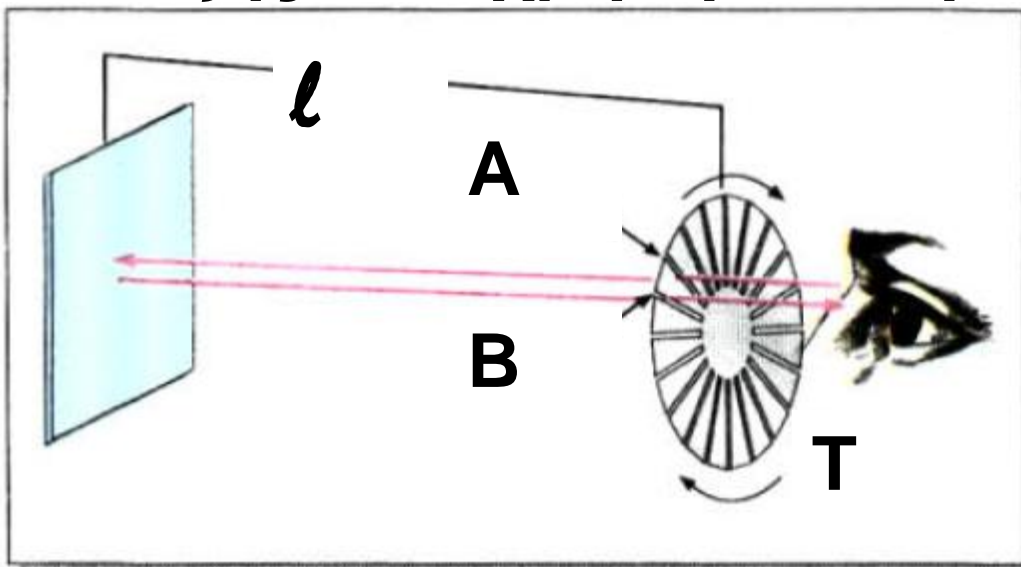
ρος από το χρόνο που χρειαζόταν το φως για να διανύσει τη μεταξύ τους απόσταση και έτσι η μέθοδος αυτή δεν ήταν εφαρμόσιμη και οδήγησε σε αποτυχία. Έδειξε όμως ότι η ταχύτητα του φωτός είναι τόσο μεγάλη, ώστε είναι αδύνατο να μετρηθεί με τέτοια χονδροειδή μηχανικά μέσα.

Οι πρώτες επιτυχείς μέθοδοι για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός ήταν βασισμένες σε αστρονομικές παρατηρήσεις. Πρώτος μέτρησε 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 2×10^8 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.

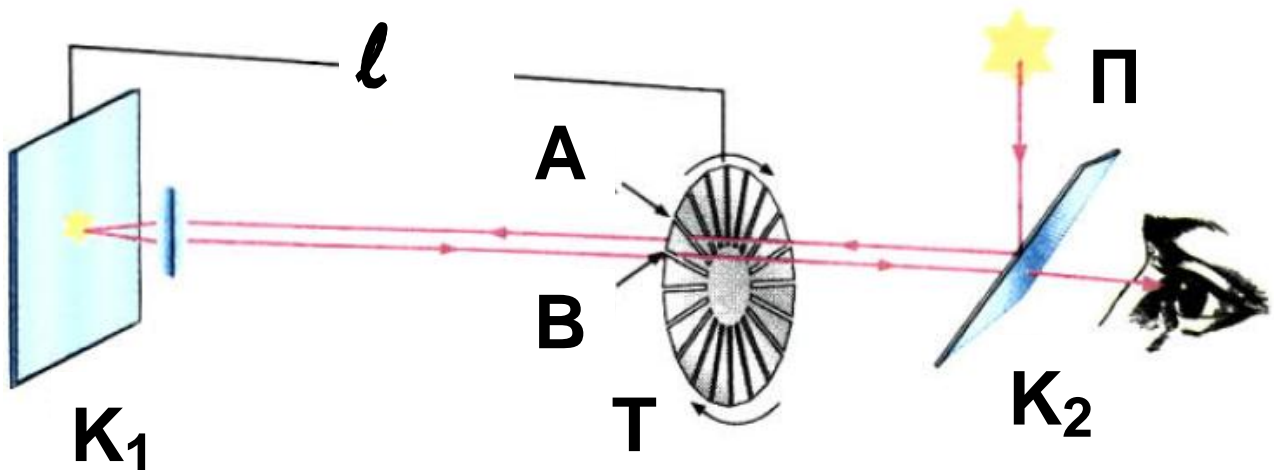
Η μέθοδος του Fizeau

Το 1849 ο H.L. Fizeau (Φιζό), ένας Γάλλος φυσικός, κατάφερε να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός με απλά μηχανικά μέσα. Στο παρακάτω 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 κατόπ-

τρού K_1 , που βρισκόταν σε μεγάλη απόσταση από την πηγή (σχήμα 1-3).



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.

Η ακτίνα που προέρχεται από τη φωτεινή πηγή Π ανακλάται στο «ημιεπαργυρωμένο κάτοπτρο» K_2 και, αφού διανύσει την απόσταση

ℓ , 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 T , 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.

Αυτό θα συμβεί, όταν το φως, που θα διέλθει από το διάκενο A του τροχού, αφού ανακλαστεί στο κά-

τοπτρο 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:

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

Στο χρόνο αυτό το φως έχει διανύσει την απόσταση 2ℓ «πήγαινε - έλα». Άρα η ταχύτητα του φωτός θα είναι:

$$c = \frac{\text{απόσταση}}{\text{χρόνος}} = \frac{2\ell}{t}$$

και λόγω της (1)

$$c = 2\ell \cdot f \cdot N \quad (1.3)$$

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

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

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 είναι $3,1 \times 10^8 \text{ m/s}$. Ακριβέστερα πειράματα που έγιναν αργότερα, έδωσαν την τιμή $2,9979 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Για την ταχύτητα του φωτός γνωρίζουμε σήμερα ότι:

- Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου 3×10^8 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).

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:

$c = 2\ell \cdot f \cdot N$, οπότε

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

ή $f = 48,28 \text{ Hz}$.

Η περίοδος δίνεται από τη σχέση

$$T = 1 / f.$$

Άρα:

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

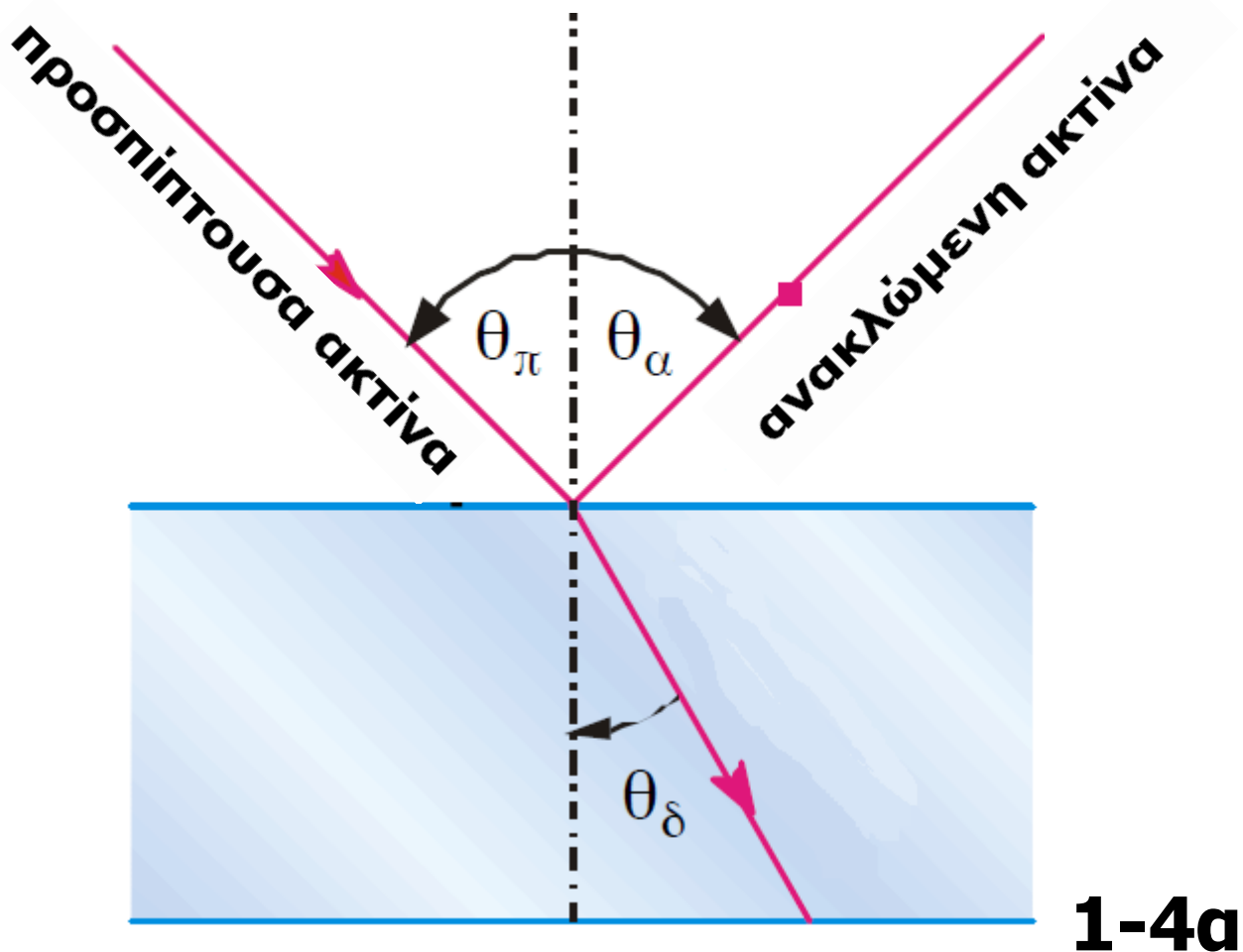
1.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ

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.



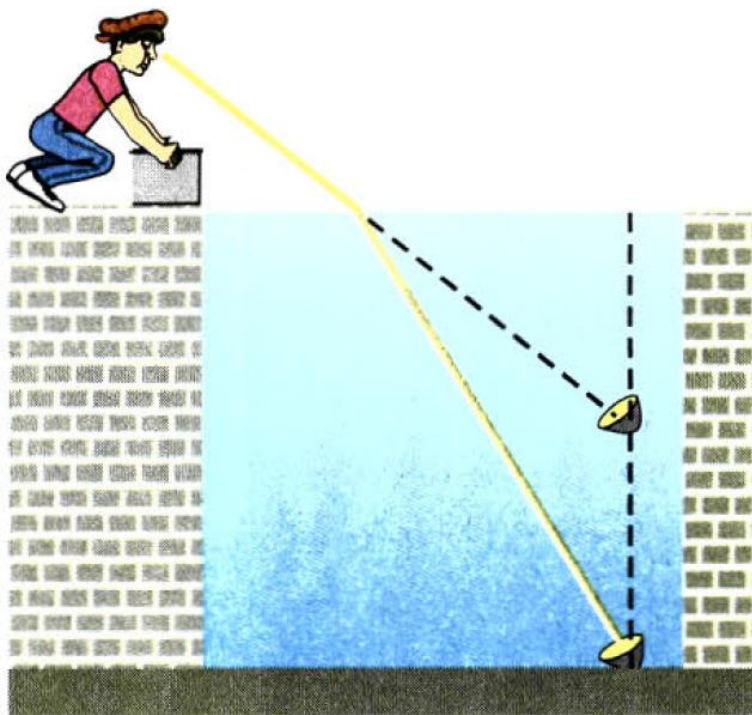
Ανάκλαση και διάθλαση από οπτικά αραιότερο σε οπτικό πυκνότερο μέσο. θ_{π} είναι η γωνία πρόσπτωσης, θ_{δ} η γωνία διάθλασης και θ_{α} η γωνία ανάκλασης. Ισχύει: $\theta_{\delta} < \theta_{\pi}$.

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 φακός 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.



1-4β Το φως, κατά τη διάδοση 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.

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:

$$n = \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός στο μέσο}} = \frac{c_0}{c} \quad (1.4)$$

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 παρα-

μένει 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. Διαιρώντας τις δύο σχέσεις κατά μέλη προκύπτει:

$$\frac{c_0}{c} = \frac{\lambda_0}{\lambda} \quad \text{και, λόγω της 1.4, είναι:}$$

$$n = \frac{\lambda_0}{\lambda}. \quad \text{Τελικά ισχύει:}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

(1.5)

Η τελευταία σχέση μάς πληροφορεί ότι φως με μήκος κύματος λ_0 στο κενό υφίσταται μεταβολή του μήκους κύματος 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:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1} \quad (1) \quad \text{και} \quad \lambda_2 = \frac{\lambda_0}{n_2} \quad (2)$$

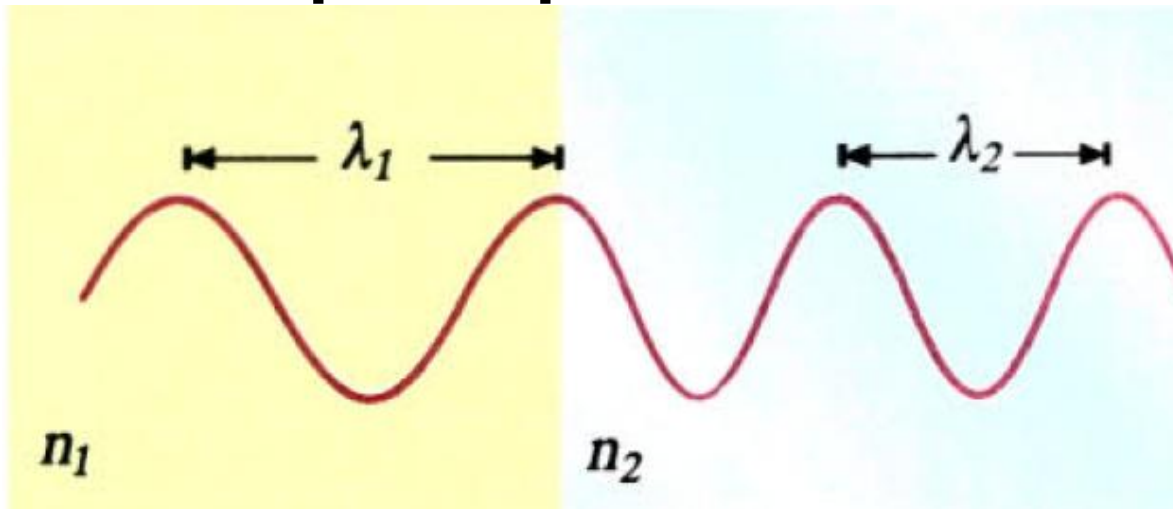
Διαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε:

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

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.



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.

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 υποπολλαπλάσιο του 1m, το 1νανόμετρο ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$).

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.

Υλικό	Δείκτης Διάθλασης
Αέρια (0°C, 1Atm)	
Αέρας	1,000293
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)	1,00045

Στερεά	
Πάγος (H₂O)	1,309
Ορυκτό άλας (NaCl)	1,544
Χαλαζίας (SiO₂)	1,544
Φθορίτης (CaF₂)	1,434
Ορυκτό ζιρκόνιο (ZrO₂. SiO₂)	1,923
Αδάμας(C)	2,417
Ύαλοι (τυπικές τιμές)	1,5 - 1,9
Υγρά σε θερμοκρασία 20°C	
Μεθανόλη (CH₃OH)	1,329
Νερό (H₂O)	1,333
Αιθανόλη (C₂H₅OH)	1,360
Τετραχλωράνθρακας (CCl₄)	1,460
Γλυκερίνη	1,473
Βενζόλιο	1,501

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).

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 μηκος 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:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n} \Rightarrow n = \frac{\lambda_0}{\lambda} \Rightarrow$$
$$\Rightarrow n = \frac{589\text{nm}}{439\text{nm}} \Rightarrow n = 1,34$$

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:

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

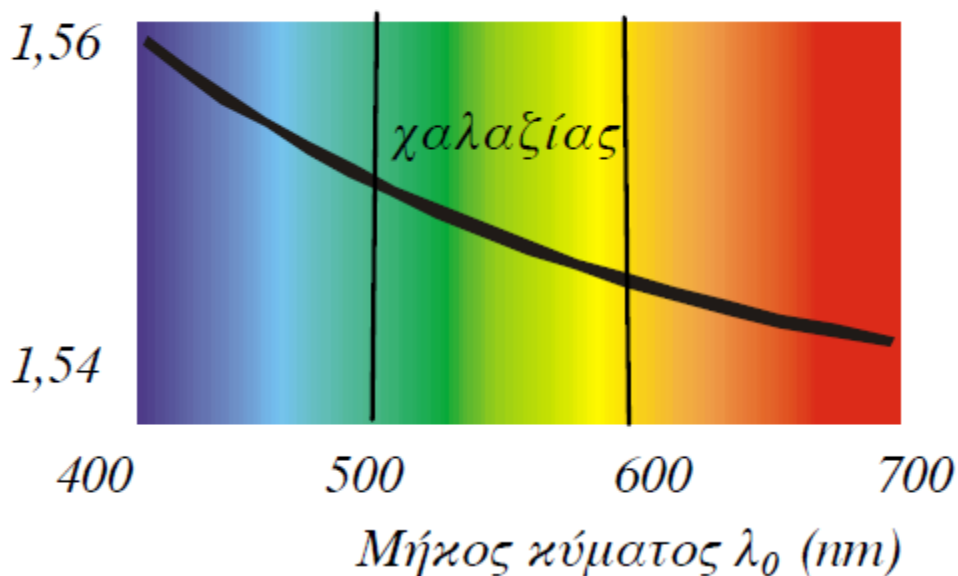
1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ

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.

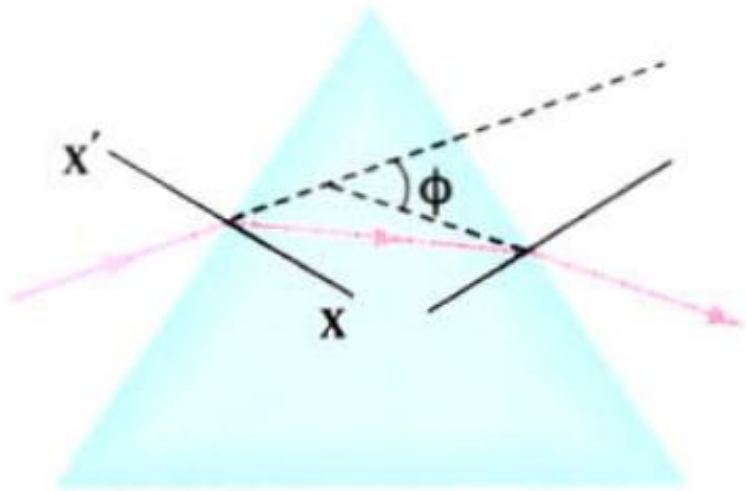
Δείκτης διάθλασης (n)



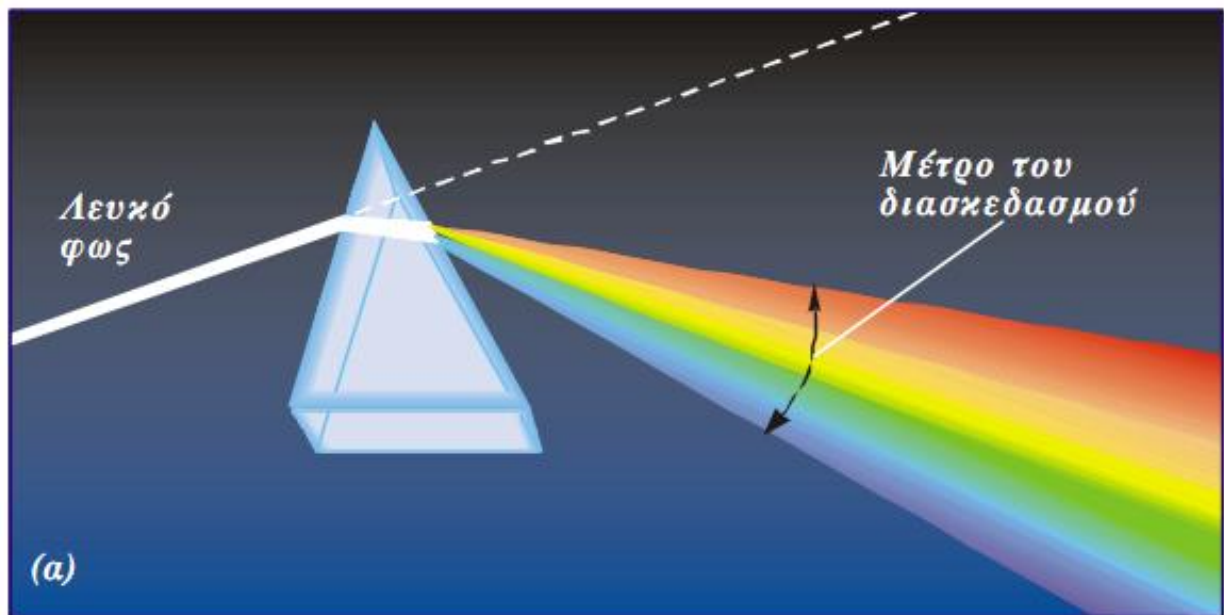
1-5 Εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος.

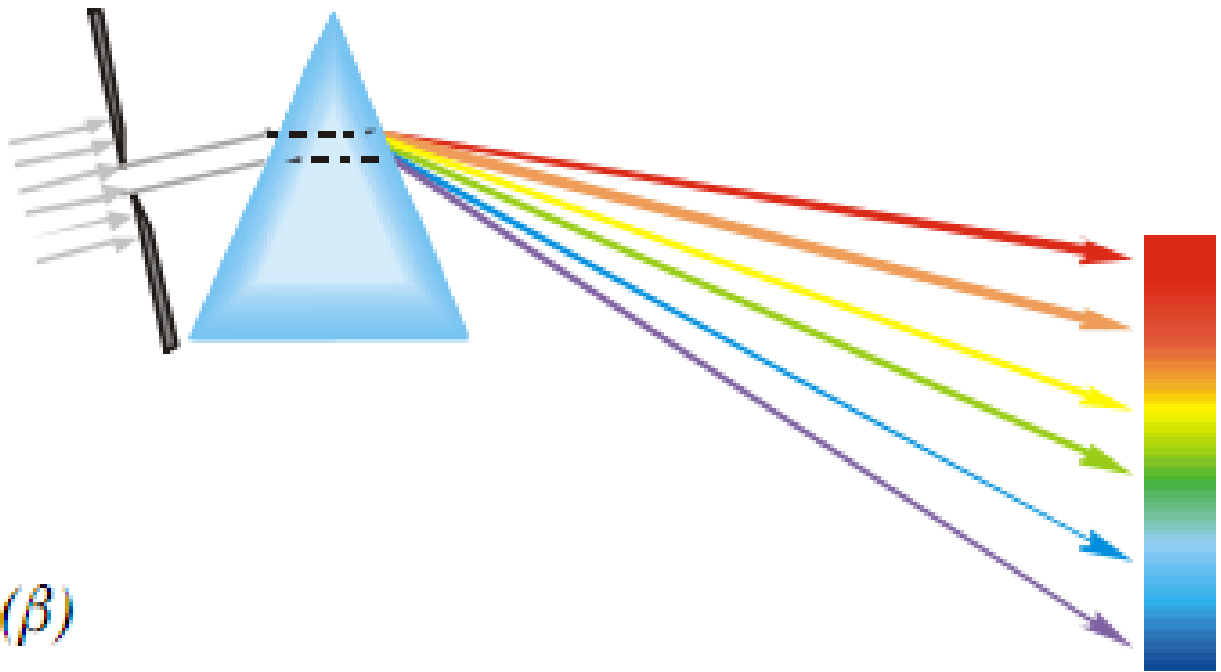
Ανάλυση του λευκού φωτός

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.



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





(β)

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

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 διασκορ-
πίζονται στο χώρο εξόδου, ενώ
ταυτόχρονα το λευκό φως αναλύ-
εται σε μία πολύχρωμη συνεχή ται-

νία, που περιλαμβάνει γνωστά χρώματα. Η ταινία αυτή ονομάζεται φάσμα του λευκού φωτός.

Το φαινόμενο «διασκεδασμός» μελετήθηκε για πρώτη φορά το 17ο αιώνα από το Ρενέ Ντεκάρτ και το Νεύτωνα.

Ο Νεύτωνα 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.

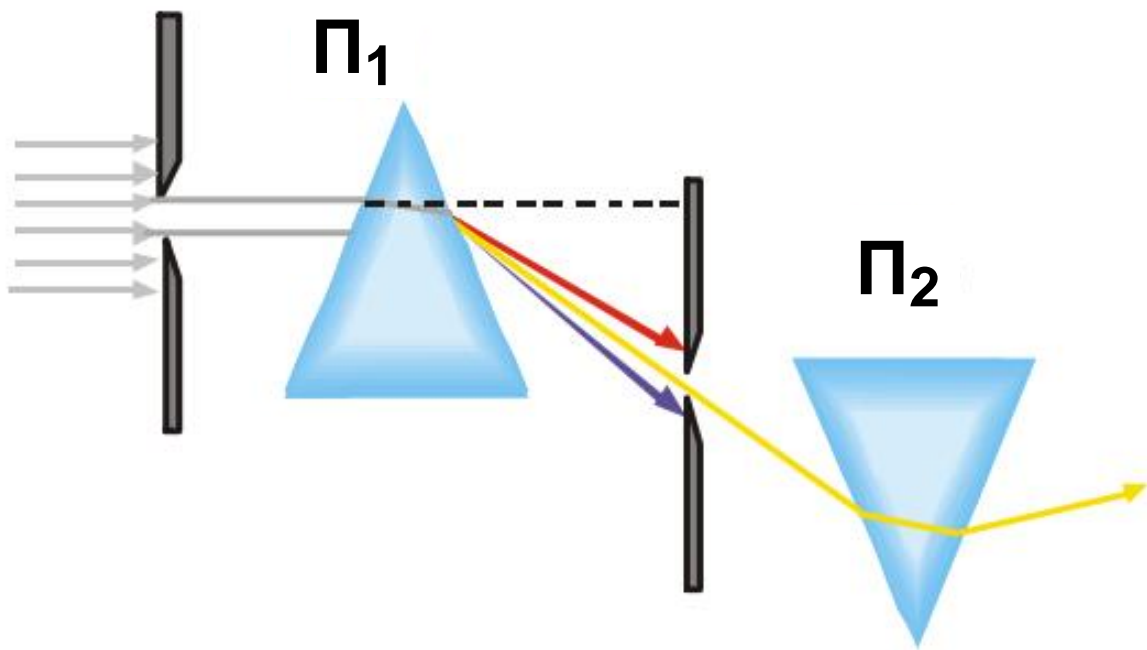
Τα χρώματα του φάσματος, κατά σειρά μείωσης του μήκους κύματος, είναι: ερυθρό, πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, κυανό και ιώδες (σχήμα 1-7β). Τα χρώματα αυτά δεν αναλύονται σε άλλα απλούστερα και, αν

τα ανασυνθέσουμε, θα αναπαράγα-
γουμε το λευκό φως.

Παρατηρώντας την εικόνα του σχή-
ματος 1-7β βλέπουμε ότι οι ιώδεις
ακτίνες εκτρέπονται περισσότερο,
ενώ οι ερυθρές λιγότερο από τις
άλλες που βρίσκονται ανάμεσά
τους. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέ-
ρασμα ότι η γωνία εκτροπής εξαρ-
τάται 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, χαρα-
κτηρίζεται από ένα μοναδικό μη-
κος κύματος, που είναι η ταυτό-
τητα του χρώματος για το μέσο
αυτό.



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.

- 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.

Η Αντίληψη ενός χρώματος παραμένει η ίδια σε οποιοδήποτε μέσο διάδοσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η συχνότητα, η οποία είναι υπεύθυνη για το ερέθισμα στο μάτι, είναι αμετάβλητη σε όλα τα μέσα διάδοσης του φωτός. Δηλαδή το κόκκινο χρώμα φαίνεται κόκκινο απ' όσα οπτικά μέσα και αν περάσει το φως πριν φτάσει στο μάτι.

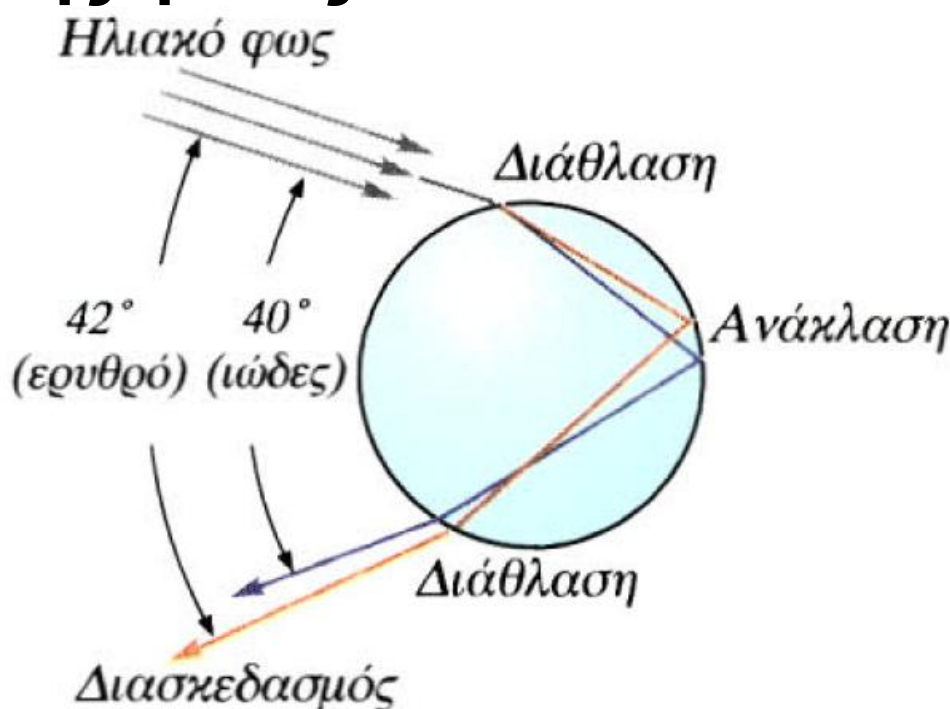
Πίνακας 1.2	
Δείκτης διάθλασης στεφανύαλου	
Χρώμα	Δείκτης διάθλασης
Ιώδες	1,532
Μπλε	1,528
Πράσινο	1,519
Κίτρινο	1,517
Πορτοκαλί	1,514
Κόκκινο	1,513

Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης

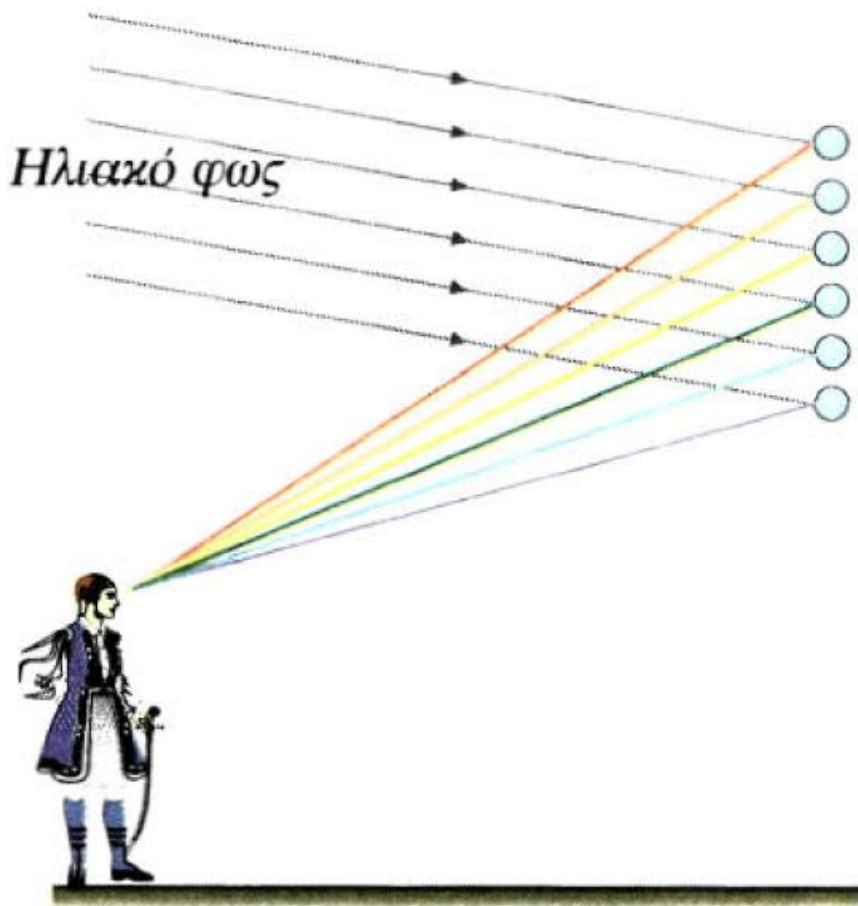
Έχουμε παρατηρήσει πολλές φορές, τις βροχερές μέρες με λίγο Ήλιο, να εμφανίζεται στον ουρανό το ουράνιο τόξο. Εκείνη τη στιγμή η φύση συνδυάζει δύο φαινόμενα, το διασκεδασμό και την ολική ανάκλαση, και μας δίνει την ευκαιρία να χαρούμε την ωραιότητα των από-

τελεσμάτων 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.



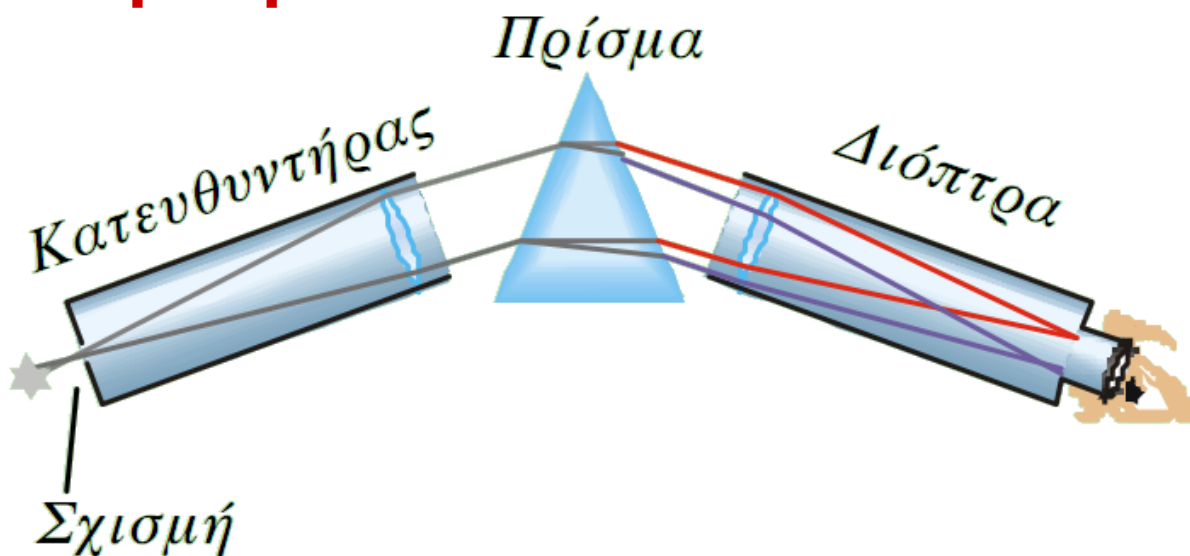
1-9 Διάθλαση ηλιακού φωτός σε σταγόνα βροχής.





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

Το φασματοσκόπιο



1-11 Αρχή λειτουργίας του φασματοσκοπίου.

Με τη δίοπτρα παρατηρούμε τα διάφορα χρώματα του φάσματος. Αν θέλουμε να αποτυπώσουμε το φάσμα, υπάρχουν ειδικές φωτογραφικές μηχανές που προσαρμόζονται στο προσοφθάλμιο σύστημα της δίοπτρας.

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 δίοπτρα. Το φως μίας πηγής εισέρχεται στον κατευθυντήρα, εξέρχεται από αυτόν, έτσι ώστε οι ακτίνες να είναι μεταξύ τους παράλ-

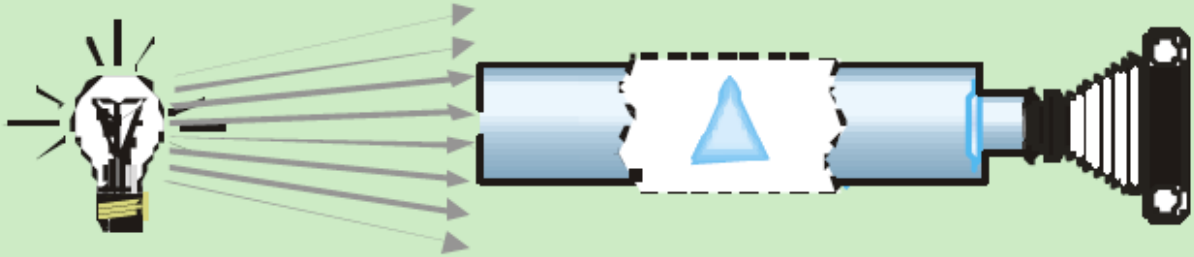
ληλες, προσπίπτει στο πρίσμα και αναλύεται στο φάσμα του. Οι εξερχόμενες ακτίνες παρατηρούνται από τη διόπτρα. Περιστρέφοντας το πρίσμα ή τη διόπτρα μπορούμε να παρατηρήσουμε τα διάφορα μήκη κύματος.

Αν στη διόπτρα προσαρμόσουμε το φακό μιας φωτογραφικής μηχανής, το φάσμα αποτυπώνεται στο φιλμ (φασματογράφος) 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.

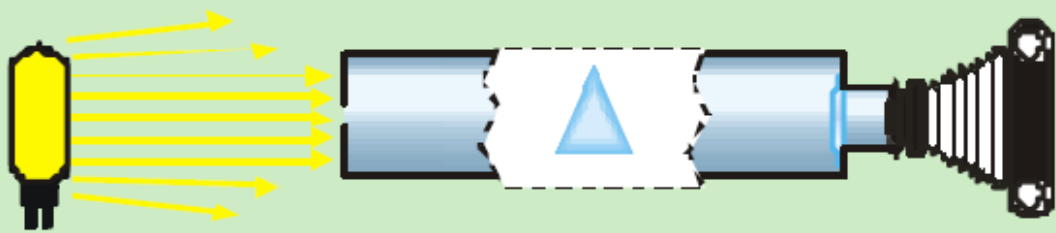
Φάσματα εκπομπής

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)



(β)



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

(α) Συνεχή φάσματα εκπομπής.
Συνεχή φάσματα παίρνουμε, όταν εξετάζουμε με το φασματογράφο 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 λιωμένος σίδηρος, ο λιωμένος 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

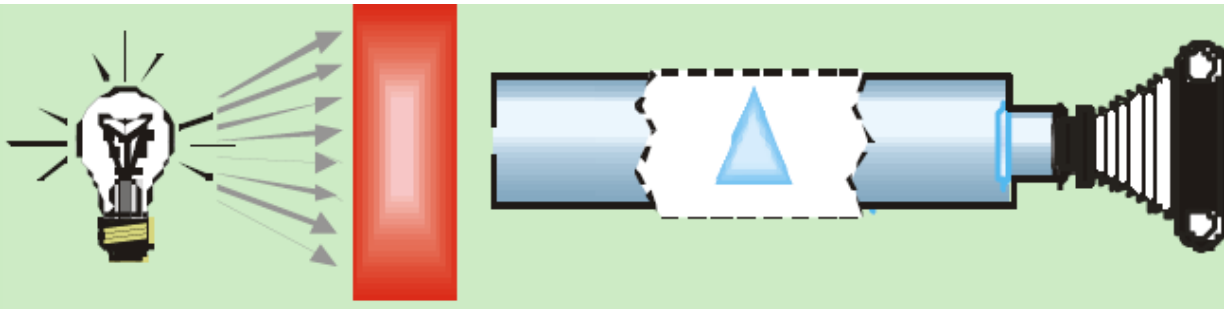
π.χ. σίδηρο, χαλκό κτλ. Η μοναδική πληροφορία που παίρνουμε είναι για τη θερμοκρασία του υλικού.

(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, λόγου 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).

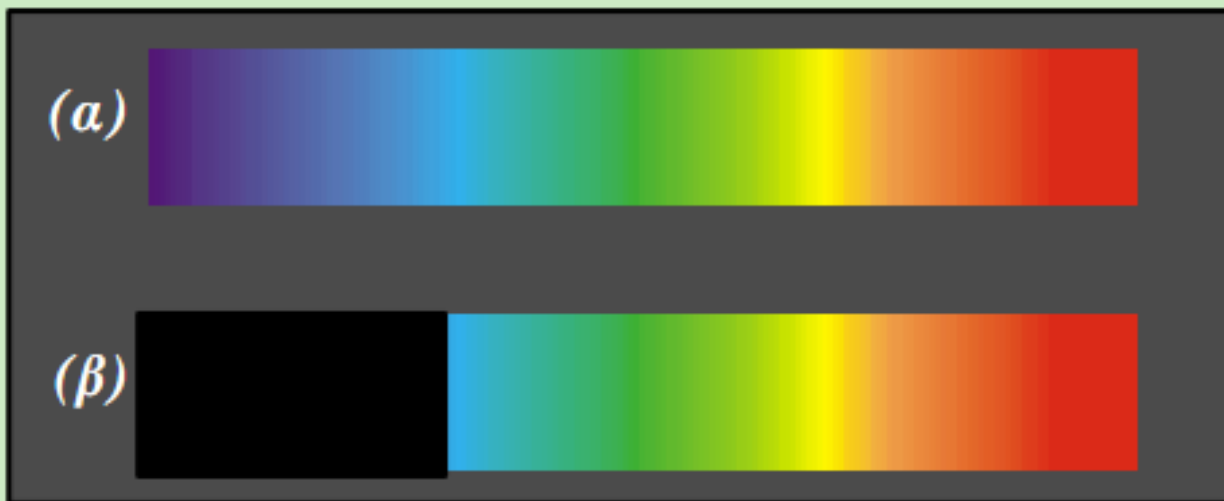
Στις αρχές του 19ου αιώνα είχε ανακαλυφθεί ότι κάθε στοιχείο παρουσιάζει ένα συγκεκριμένο σύνολο μηκών κύματος στο γραμμικό του φάσμα. Με την πάροδο του χρόνου η αναγνώριση στοιχείων από τα φάσματά τους εξελίχθηκε σε μια χρήσιμη τεχνική ανάλυσης. Το χαρακτηριστικό φάσμα ενός ατόμου φαινόταν να σχετίζεται 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.

Φάσματα απορρόφησης

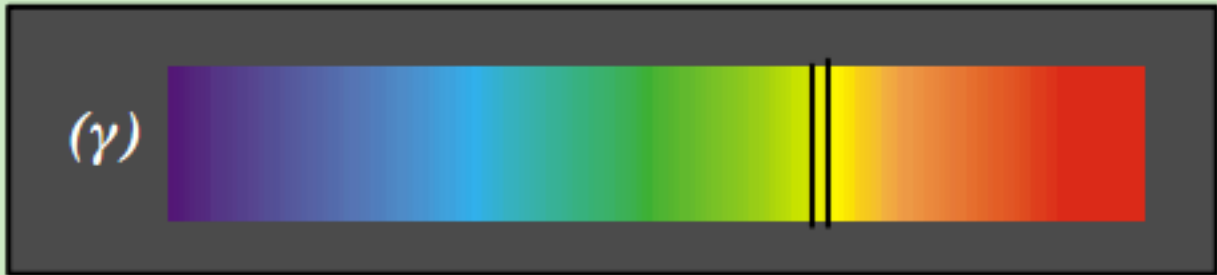
Αν μεταξύ μίας φωτεινής πηγής που εκπέμπει λευκό φως και του κατευθυντήρα ενός φασματογράφου παρεμβάλουμε ένα υλικό μέσο, λόγω χάρη ένα δοχείο που να περιέχει έγχρωμο υγρό ή μια έγχρωμη γυάλινη πλάκα (σχήμα 1-13), θα διαπιστώσουμε ότι ορισμένες περιοχές του συνεχούς φάσματος λείπουν και στη θέση τους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



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



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



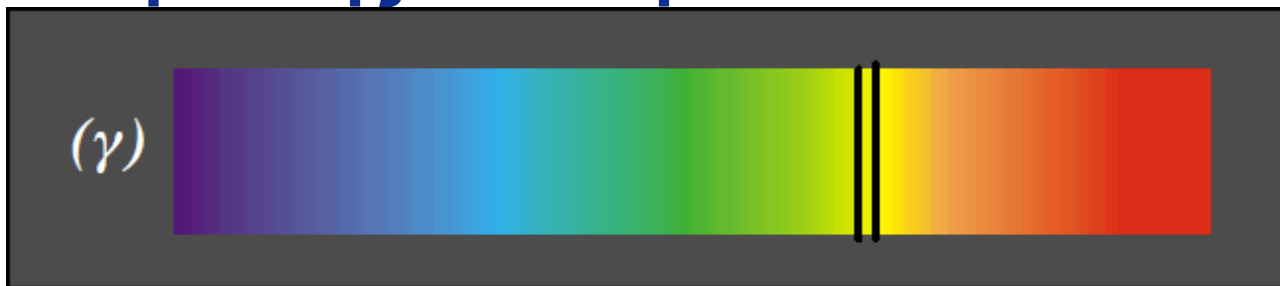
(γ) Γραμμικό φάσμα απορρόφησης ατμών Na.

(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.

Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία

Υπεριώδης ακτινοβολία



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

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 εκπέ-

μπει 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 αμαυρωθεί. 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.



(α)

(β)

1-15 Δύο φωτογραφίες του ίδιου αγαλματιδίου τραβηγμένες η (α) στο ορατό φως και η (β) στο υπεριώδες. 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 ιδιότητες της μας πληροφορούν για την ύπαρξή της:

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



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

**Επειδή η υπέρυθρη ακτινοβολία
είναι αόρατη, για την ανίχνευσή της
υπάρχουν ειδικά όργανα, οι φωρα-
τές υπερύθρου. Η αρχή λειτουρ-
γίας των φωρατών βασίζεται στην
απορρόφηση ενέργειας των υπέρυ-
θρων ακτινοβολιών και στη συνέ-**

χεια στη μετατροπή της σε άλλες μορφές. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 700nm και 10^6 nm.

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 εκλεκτικότητά 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

**ΠΕΤΥΧΑΙΝΕΤΑΙ ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΣΗ ΑΚΟΜΗ
ΚΑΙ ΟΤΑΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΥΝΝΕΦΙΑ Ή ΟΜΙ-
ΧΛΗ (ΣΧΗΜΑ 1-17).**

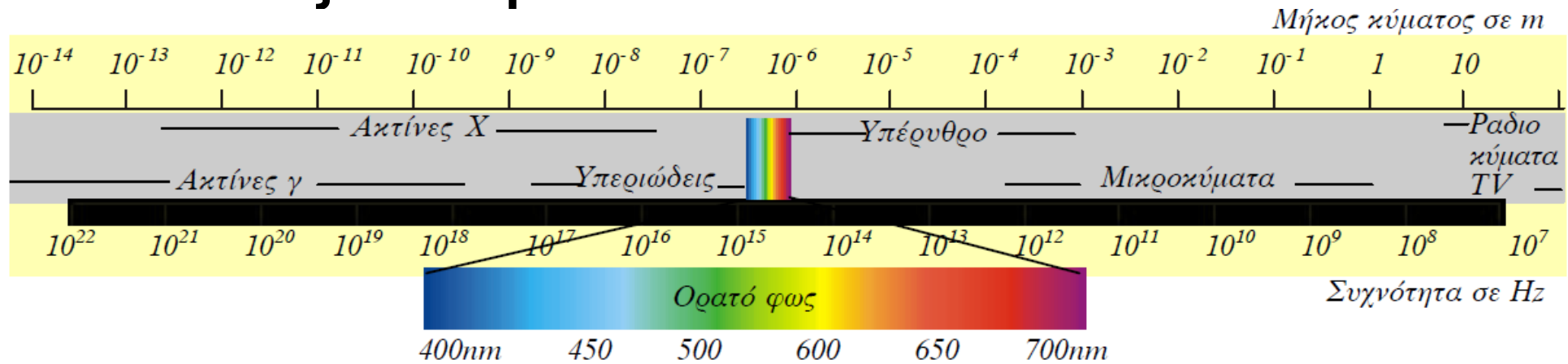


(α)

(β)

1-17 Δύο φωτογραφίες του ίδιου τοπίου, την ίδια στιγμή. Η (α) έχει ληφθεί με φιλμ του εμπορίου, ενώ η (β) με φιλμ ευαίσθητο στην υπέρυθρη ακτινοβολία και με χρήση φίλτρου που επιτρέπει μόνο τη διέλευση υπέρυθρου φωτός.

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



1.5 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Φυσικό φως και γραμμικά πολωμένο φως

Όπως είδαμε σε προηγούμενη ενότητα, το φως (όπως άλλωστε ολόκληρη η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από μία φωτεινή πηγή και κινούνται ευθύγραμμα προς όλες τις κατευθύνσεις.

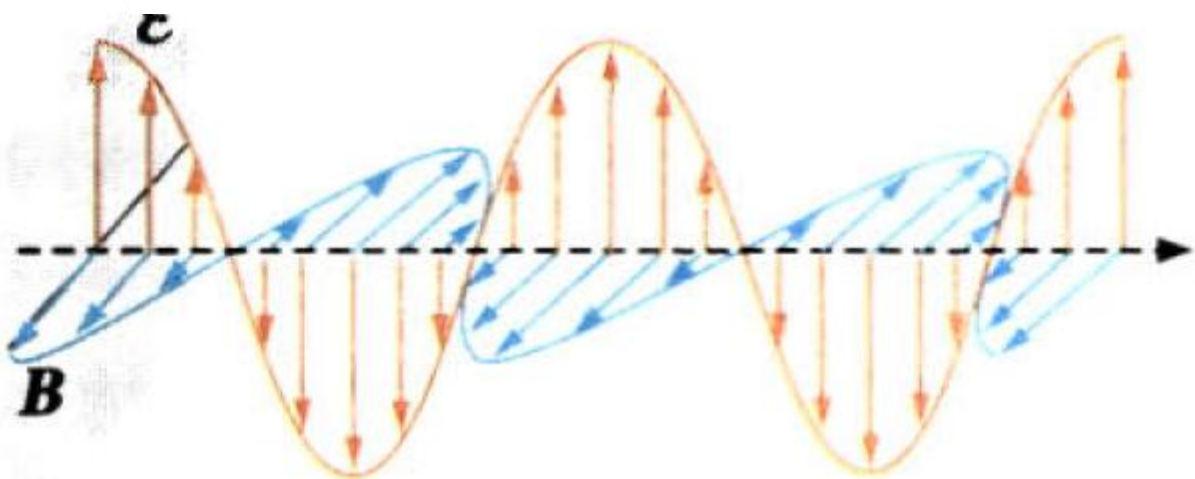
Οι συνήθεις φωτεινές πηγές (π.χ. λαμπτήρας πυρακτώσεως, Ήλιος κτλ.) αποτελούνται από μεγάλο αριθμό ατόμων ή μορίων. Τα φωτεινά κύματα παράγονται από όλα τα άτομα και μόρια του υλικού που εκπέμπει το φως. Κάθε άτομο ή μόριο εκπέμπει ένα μεμονωμένο κύμα.

Σε κάθε τέτοιο κύμα το ηλεκτρικό πεδίο έχει διεύθυνση ταλάντωσης

κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η διεύθυνση ταλάντωσης και η διεύθυνση διάδοσης καθορίζουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο ταλάντωσης για κάθε μεμονωμένο κύμα (σχήμα 1-18). Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι:

Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης.

Διεύθυνση διάδοσης κύματος



1-18 Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όπως γνωρίζουμε, το ηλεκτρομαγνητικό

κύμα αποτελείται από δύο εγκάρσια κύματα κάθετα μεταξύ τους, ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό.

Για να κατανοήσουμε το φαινόμενο της πόλωσης, αρκεί να περιοριστούμε στη μελέτη μόνο του ηλεκτρικού κύματος. Αν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σταθερό με το χρόνο, τότε το κύμα ονομάζεται γραμμικά πολωμένο.

Άρα:

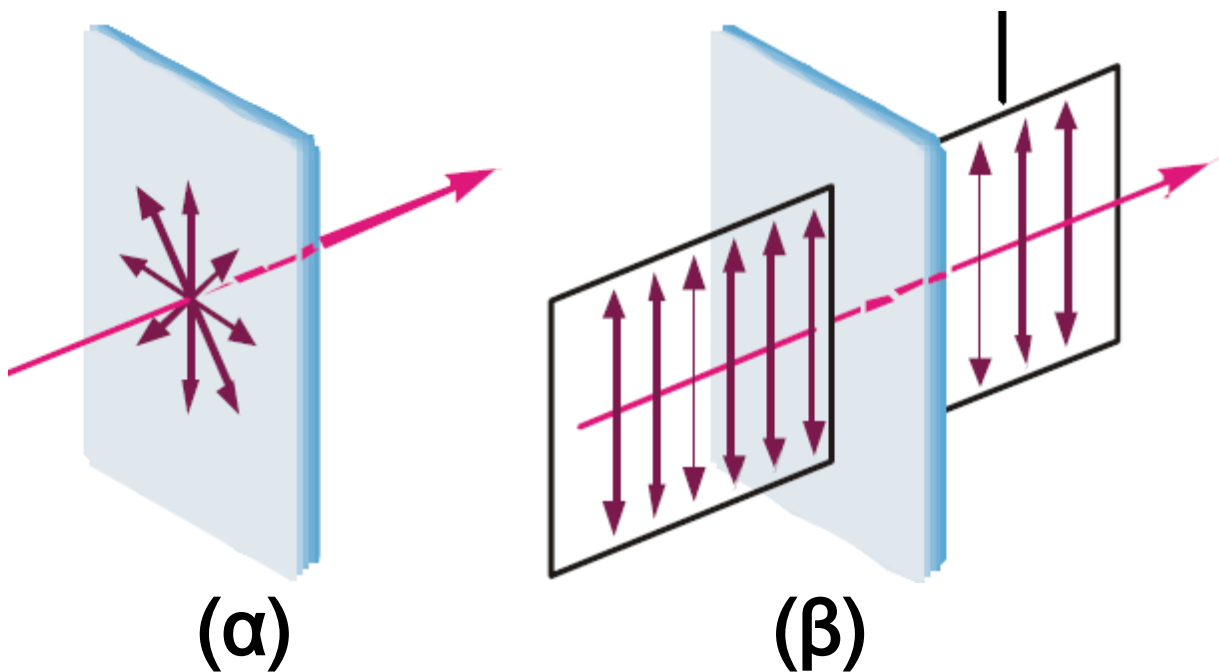
Το φως είναι γραμμικά πολωμένο, όταν το επίπεδο ταλάντωσης του ηλεκτρικού του πεδίου έχει έναν καθορισμένο προσανατολισμό στο χώρο και μία καθορισμένη διεύθυνση διάδοσης.

Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μια φωτεινή πηγή,

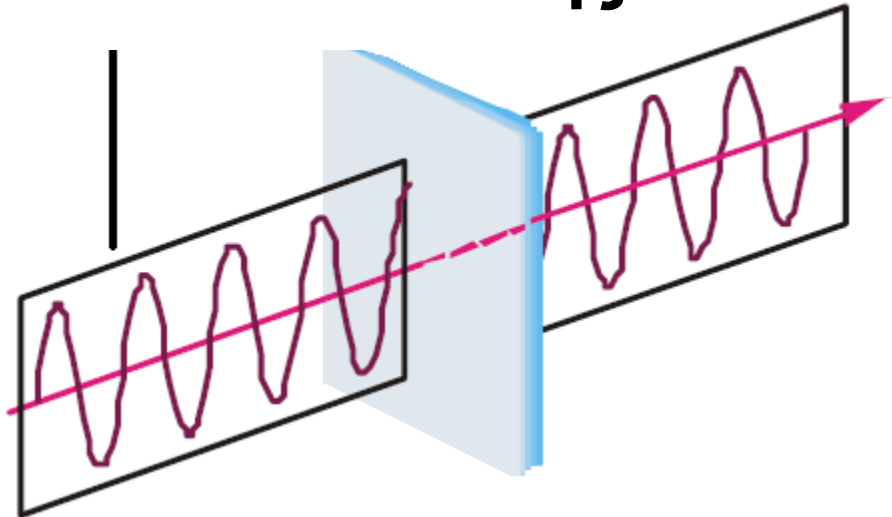
επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

Το φυσικό φως απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 1-19α, ενώ το γραμμικά πολωμένο φως στο σχήμα 1-19β, γ.

Επίπεδο Ταλάντωσης



Επίπεδο Ταλάντωσης



(γ)

1-19 (α) Το φυσικό φως και (β), (γ) το γραμμικά πολωμένο φως

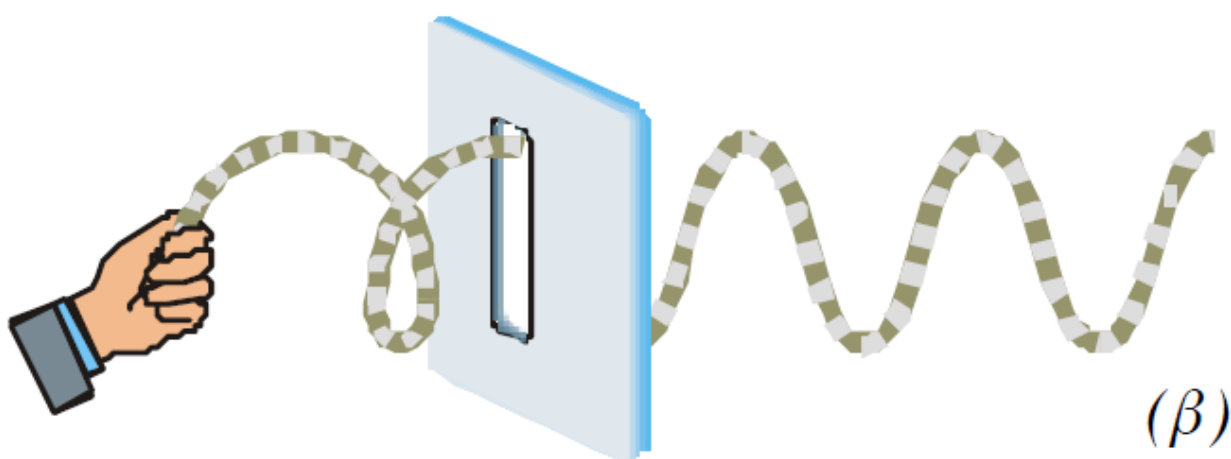
Πολωτικό φίλτρο - Πολωτής

Το φυσικό φως είναι δυνατόν, περνώντας από κατάλληλα φίλτρα (πολωτές) ή παθαίνοντας κατάλληλη ανάκλαση, να μετατραπεί σε γραμμικά πολωμένο φως.

Για να κατανοήσουμε τι είναι ακριβώς το πολωτικό φίλτρο, ας παρακολουθήσουμε τη διαδικασία πόλωσης ενός μηχανικού κύματος. Θυμίζουμε ότι ένα από τα μηχανικά

κύματα είναι και αυτό που παράγεται, όταν αναγκάζουμε την άκρη ενός σχοινιού να πάλλεται.

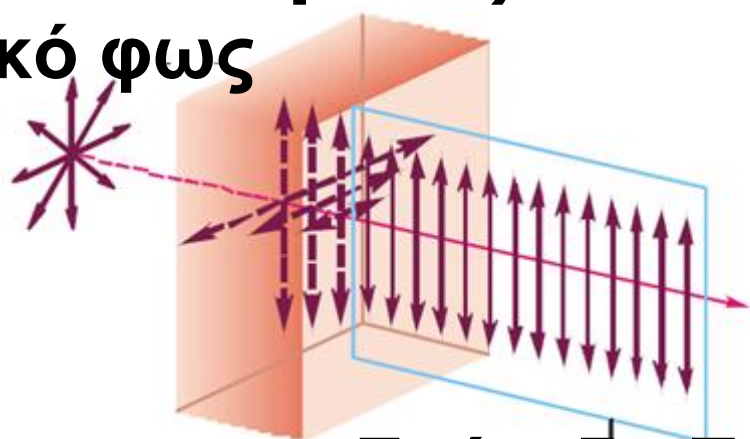
Δημιουργούμε έτσι ένα εγκάρσιο κύμα (σχήμα 1-20α), το οποίο διαδίδεται ακανόνιστα. Δηλαδή κάθε στοιχειώδες κομμάτι του σχοινιού πάλλεται σε διαφορετικά επίπεδα.



1-20 Πίσω από τη σχισμή το κύμα είναι πολωμένο.

Αν παρεμβάλουμε ένα πέτασμα με κατακόρυφη σχισμή στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 1-20β), έτσι ώστε το σχοινί να διέρχεται από αυτό, τότε τα στοιχειώδη κομμάτια του σχοινιού που βρίσκονται μετά το πέτασμα πάλλονται σε ένα και μόνο επίπεδο, το χαρακτηριστικό επίπεδο που ορίζει η σχισμή με τη διεύθυνση διάδοσης. Η σχισμή στην παραπάνω διαδικασία αποτέλεσε το **πολωτικό φίλτρο**. Το φαινόμενο ονομάζεται **πόλωση του μηχανικού κύματος**.

Φυσικό φως



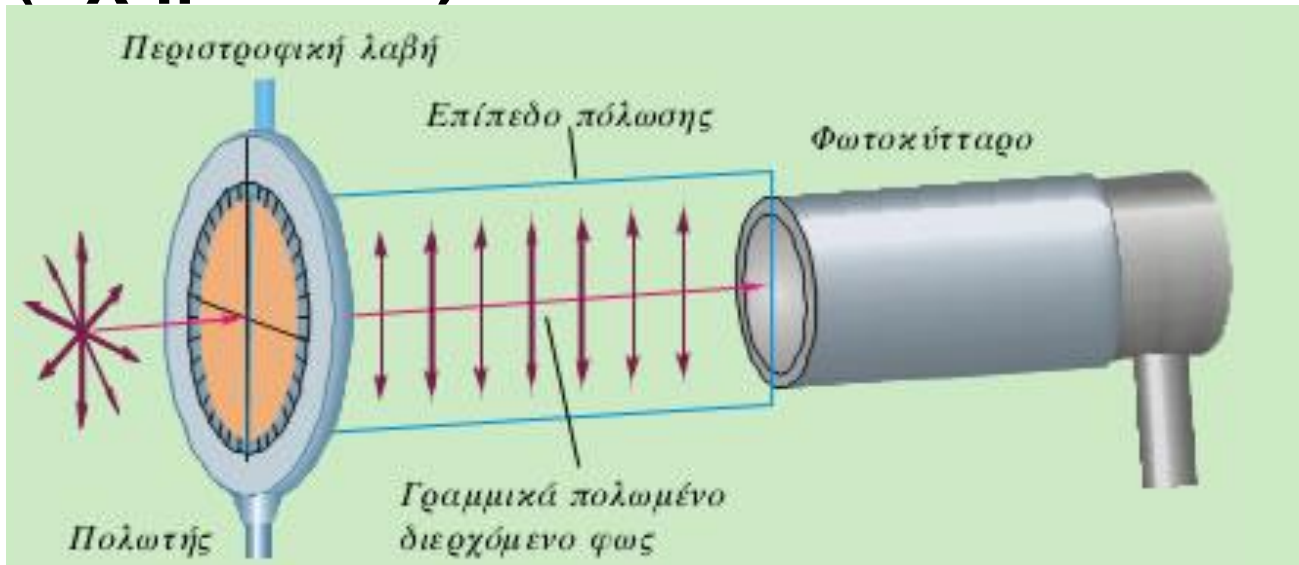
Επίπεδο Πόλωσης

1-21 Φυσικό φως διέρχεται από πολωτικό φίλτρο. Οι οριζόντιες

ταλαντώσεις έχουν απορροφηθεί ολοσχερώς, ενώ οι κατακόρυφες μερικώς.

Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Όταν το φως προσπέσει σε πολωτικό φίλτρο, τότε το φως που εξέρχεται από αυτό είναι πολωμένο. Το επίπεδο ταλάντωσης είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Τα κύματα με επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο που καθορίζει το φίλτρο ανακόπτονται κατά μεγάλο ποσοστό (σχήμα 1-21). Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται πολωτής. Είναι μια διάταξη κατασκευασμένη έτσι, ώστε να μπορούμε να στρέψουμε το πολωτικό φίλτρο, που έχει μορφή πλακιδίου, γύρω από άξονα

κάθετο προς το επίπεδο του
(σχήμα 1-22).



1-22 Για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης το φωτοκύτταρο μετράει την ίδια ένταση φωτός και τη βρίσκει ίση ακριβώς με το μισό της έντασης τον προσπίπτοντος στο πλακίδιο του πολωτή.

Ένας τέλειος πολωτής επιτρέπει τη διέλευση κατά 100% του προσπίπτοντος φωτός, όταν αυτό είναι πολωμένο στο επίπεδο πόλωσης του φίλτρου, και ανακόπτει τελείως τα κύματα φωτός που είναι πολω-

μένα σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο αυτό.

Το επίπεδο πόλωσης του πολωτή είναι χαρακτηριστικό του πλακιδίου και η διεύθυνσή του καθορίζεται κάθε φορά από την περιστροφική λαβή, που βρίσκεται στην κορυφή του. Άρα, περιστρέφοντας τη λαβή, καθορίζουμε τη θέση του χαρακτηριστικού επιπέδου πόλωσης του πολωτή.

Έτσι, στο σχήμα 1-22, φυσικό φως προερχόμενο από λαμπτήρα πυρακτώσεως προσπίπτει σε έναν πολωτή. Το επίπεδο πόλωσης και η περιστροφική λαβή είναι σημειωμένα με μπλε χρώμα. Ο πολωτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο των κυμάτων φωτός που έχουν ένταση ηλεκτρικού πεδίου παράλληλη προς το επίπεδο πόλωσης του πλακιδίου. Έτσι το φως που βγαί-

νει από τον πολωτή είναι γραμμικά πολωμένο παράλληλα προς το επίπεδο πόλωσης.

Αν τώρα επιχειρήσουμε να μετρήσουμε την ένταση του εξερχόμενου φωτός με ένα φωτοκύτταρο, θα παρατηρήσουμε ότι, για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης, η ένταση του φωτός έχει την ίδια τιμή, η οποία μάλιστα είναι ίση με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος φωτός.

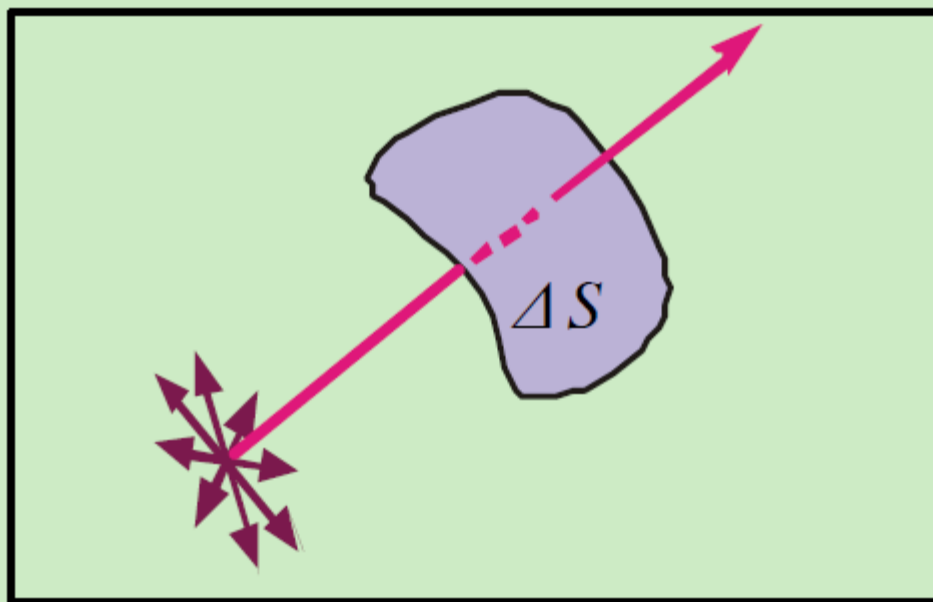
1-23 Με τον όρο «ένταση του προσπίπτοντος φωτός» εννοούμε την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας. Ας το δούμε αναλυτικά: Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ενέργεια, όπως για παράδειγμα η ακτινοβολία του Ήλιου και η ακτινοβολία των φούρνων μικροκυμάτων. Έστω

λοιπόν ότι έχουμε μια στοιχειώδη επιφάνεια ΔS , κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, που δέχεται συνεχώς ενέργεια ΔW σε χρόνο Δt . Το πηλίκο $\Delta W/\Delta t$ ονομάζεται ισχύς.

Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως ένταση του κύματος. Δηλαδή:

$$I = \frac{\frac{\Delta W}{\Delta t}}{\Delta S} = \frac{P}{\Delta S}$$

Η μονάδα μέτρησης της έντασης στο S.I. είναι το 1 W/m^2 .

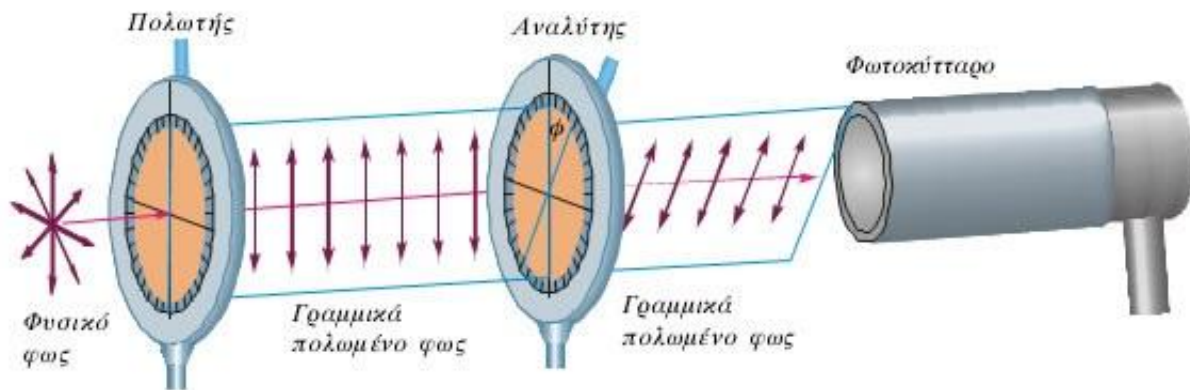


Αποδεικνύεται ότι η ένταση του κύματος είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους E_0 του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων - Αναλυτής

Ας υποθέσουμε όχι μεταξύ του φωτοκύτταρου και του πρώτου πολωτή τοποθετούμε ένα δεύτερο, όμοιο κατασκευαστικά. Το επίπεδο πόλωσης του πρώτου πολωτή έστω ότι παραμένει κατακόρυφο, ενώ του δεύτερου, τον οποίο ονο-

μάζουμε αναλύτη, σχηματίζει γωνία φ με την κατακόρυφο (σχήμα 1-24).



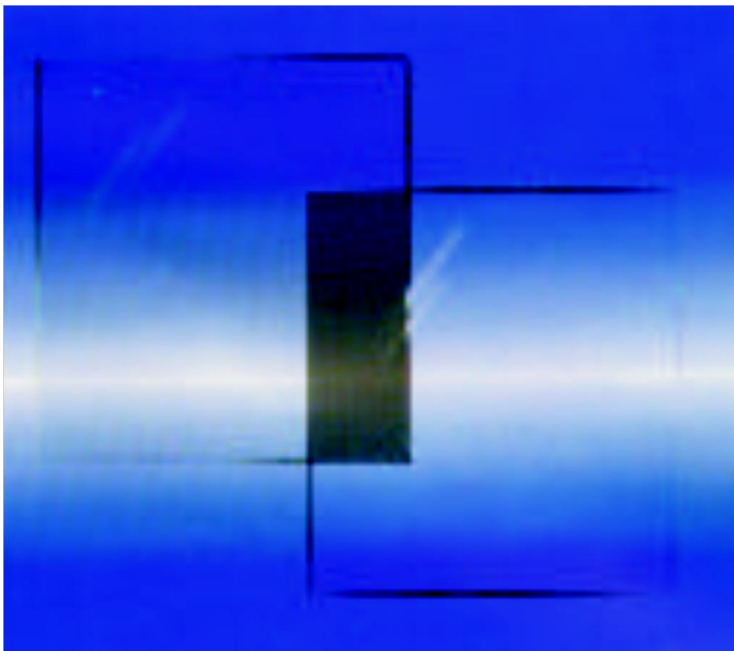
1-24 Ο τέλειος αναλύτης επιτρέπει τη διέλευση μόνο της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη προς το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης του.

Αυτό σημαίνει ότι η γωνία μεταξύ των δύο επιπέδων πόλωσης είναι φ . Το τι θα συμβεί κατά τη διέλευση του πολωμένου φωτός από τον αναλύτη εξαρτάται από τη γωνία φ .

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη συμπίπτουν ($\varphi = 0$), το πολωμένο

φως θα διέλθει από τον αναλύτη χωρίς να υποστεί μεταβολή.

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη είναι κάθετα ($\varphi = 90^\circ$), το πολωμένο φως θα ανακοπεί εντελώς από τον αναλύτη. Το φωτοκύτταρο τότε δεν ανιχνεύει φως.



1-25 Ένας πολωτής και ένας αναλυτής με επίπεδα πόλωσης κάθετα μεταξύ τους ανακόπτουν το φως (σκοτεινή περιοχή).

Για οποιαδήποτε άλλη γωνία φ μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέ-

δων του πολωτή και του αναλύτη το πολωμένο φως θα διέρχεται εν μέρει.

Παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη εντοπίζεται μόνο στους σκοπούς τους οποίους αυτοί εξυπηρετούν, δηλαδή σε ένα πείραμα ο πολωτής μπορεί να παίξει το ρόλο του αναλύτη και αντίστροφα.

Χρησιμοποιώντας τον αναλύτη μπορούμε να διαπιστώσουμε αν μία δέσμη φωτός είναι πολωμένη ή όχι.

Αφήνουμε τη δέσμη να πέσει στον αναλύτη κάθετα προς αυτόν. Με την περιστροφική λαβή καθορίζουμε διάφορες γωνίες στο επίπεδο πόλωσης του αναλύτη. Αν παρατηρήσουμε ότι δεν υπάρχει γωνία για την οποία ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε αυτό είναι φυσικό.

Αν όμως συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή υπάρχουν γωνίες για τις οποίες ανακόπτεται το διερχόμενο φως, τότε το φως είναι γραμμικά πολωμένο.

Τα υλικά που έχουν την ιδιότητα να αφήνουν να τα διαπερνά μόνο το φως του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται σε συγκεκριμένη διεύθυνση λέγονται **διχροϊκά. Το 1938 ο E.H. Land ανακάλυψε ένα υλικό που ονόμασε **polaroid**. Το polaroid πολώνει το φως, γιατί τα προσανατολισμένα μόριά του έχουν την ιδιότητα να απορροφούν επιλεκτικά τη διερχόμενη ακτινοβολία από μέσα του.**

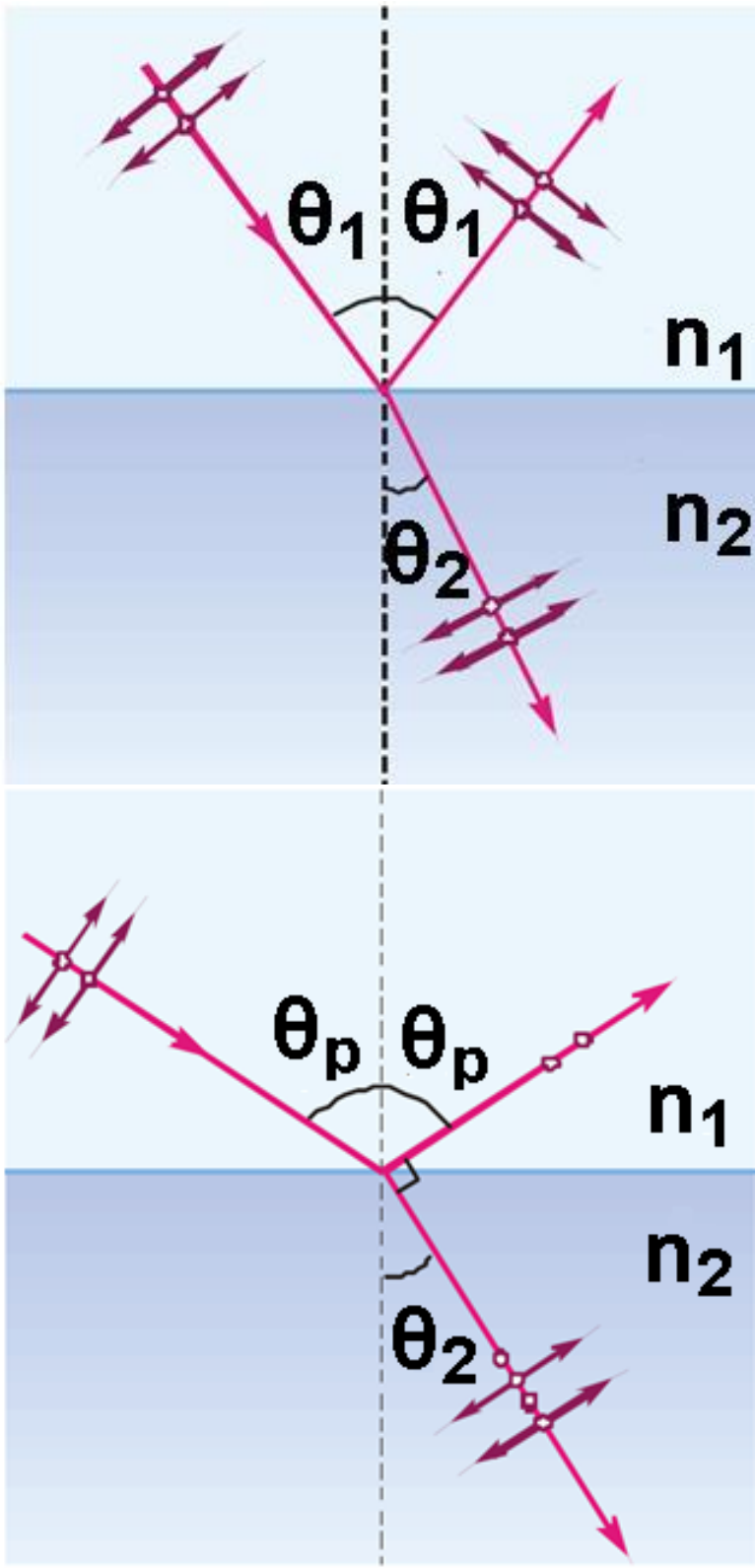
Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση

Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει πάνω σε διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών υλικών μεσων με δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 , τότε εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται.

Αν εξετάσουμε με αναλύτη την ανακλώμενη δέσμη, θα παρατηρήσουμε ότι, όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι περίπου 0° ή περίπου 90° , το ανακλώμενο φως δεν είναι πολωμένο. Για ενδιάμεσες γωνίες πρόσπτωσης το ανακλώμενο φως είναι μερικώς πολωμένο, δηλαδή αποτελείται από γραμμικά πολωμένο φως και μη πολωμένο φως. Υπάρχει μία συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται γωνία ολικής πόλωσης (θ_p), για την

οποία το ανακλώμενο φως είναι πλήρως πολωμένο.

Ας προσπαθήσουμε να παραστήσουμε γραφικά το φαινόμενο χρησιμοποιώντας δύο συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου, μία παράλληλη προς την ανακλώσα επιφάνεια (με τελείες) και μία κάθετη προς την πρώτη και τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (με βέλη). Έτσι στο σχήμα 1-26α έχουμε μερική πόλωση του προσπίπτοντος φωτός, δηλαδή η ανακλώμενη δέσμη και η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένες.



1-26 α) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών, η ανακλώμενη και η

διαθλώμενη ακτίνα είναι μερικώς πολωμένες, (β) Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει σε ανακλώσα επιφάνεια υπό γωνία ίση με τη γωνία ολικής πόλωσης, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα είναι κάθετες μεταξύ τους

Υποθέτουμε τώρα ότι μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης, ώσπου η ανακλώμενη και η διαθλωμένη δέσμη να σχηματίζουν γωνία 90° , δηλαδή να ισχύει $\theta_2 + \theta_p = 90^\circ$. Τότε η ανακλώμενη δέσμη είναι πλήρως πολασμένη, ενώ η διαθλωμένη είναι μερικώς πολωμένη (σχήμα 1-26β). Η γωνία ολικής πόλωσης θ_p συνδέεται με τους δείκτες διάθλασης n_1 και n_2 των δύο οπτικών υλικών. Η σύνδεση αυτή προκύπτει από το νόμο του Snell (Σνελ), σύμφωνα με τον οποίο ο λόγος n_2/n_1 , των

δεικτών διάθλασης είναι αντιστρόφως ανάλογος των ημίτων των γωνιών πρόσπτωσης θ_1 και διάθλασης θ_2 , δηλαδή:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta\mu \theta_1}{\eta\mu \theta_2}$$

(1.6)

Νόμος του Snell

Εφαρμόζοντας λοιπόν την παραπάνω σχέση για $\theta_1 = \theta_p$ και για $\theta_2 = 90^\circ - \theta_p$ έχουμε:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu\theta_p}{\eta\mu(90^\circ - \theta_p)}$$

Όμως από την τριγωνομετρία ισχύει: $\eta\mu(90^\circ - \theta_p) = \sigma\upsilon\nu\theta_p$. Αρα τελικά προκύπτει:

Νόμος του Brewster

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\theta_p} \quad \text{ή} \quad \frac{n_2}{n_1} = \varepsilon\varphi\theta_p$$

(1.7)

Η τελευταία σχέση είναι γνωστή ως νόμος του Brewster (Μπρούστερ) και η γωνία ολικής πόλωσης ονομάζεται γωνία του Brewster.

Άρα: Η γωνία ολικής πόλωσης του φωτός, για κάθε μέσο, είναι εκείνη η γωνία πρόσπτωσης για την οποία η ανακλώμενη ακτίνα και η διαθλώμενη είναι κάθετες μεταξύ τους.

Αν τώρα το ένα οπτικό υλικό είναι το κενό ή ο ξηρός αέρας, οπότε $n_1=1$, τότε $n_2=n$ και η σχέση παίρνει τη μορφή: $n=\varepsilon\varphi\theta_p$.

Πόλωση και πολωτικά φίλτρα στην καθημερινή μας ζωή

Η πόλωση από ανάκλαση είναι ένα σύνηθες φαινόμενο στη φύση. Το φως που ανακλάται από επιφάνειες

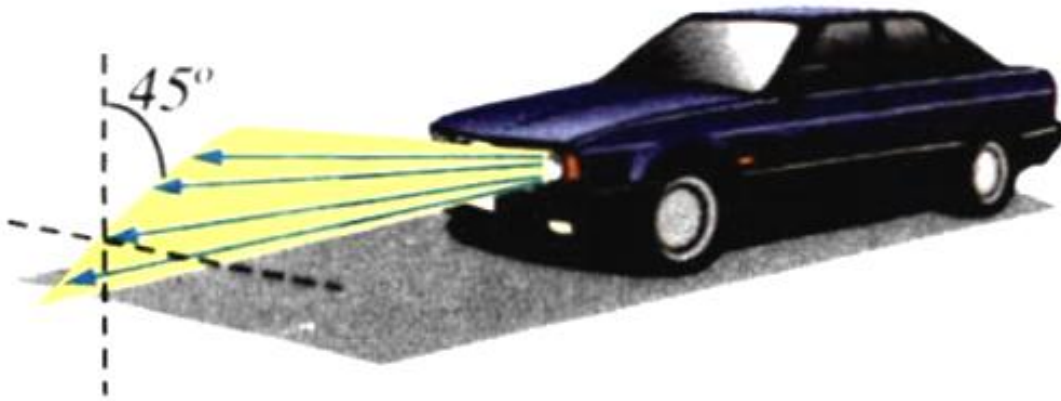
λιμνών και θαλασσών, καθώς και από το χιόνι, είναι μερικώς πολωμένο. Όταν λοιπόν η ανάκλαση προέρχεται από μια τέτοια επιφάνεια, προκαλεί στα μάτια μας μια ανεπιθύμητη δυνατή «αντηλιά». Επειδή οι ανακλώσες επιφάνειες που αναφέραμε είναι συνήθως οριζόντιες, το διάνυσμα του ανακλασμένου ηλεκτρικού πεδίου θα έχει μεγάλη οριζόντια συνιστώσα, δηλαδή το ανακλώμενο φως θα περιέχει περίσσεια πολωμένου φωτός στην οριζόντια διεύθυνση. Τα γυαλιά ηλίου λοιπόν που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσής τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα

μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

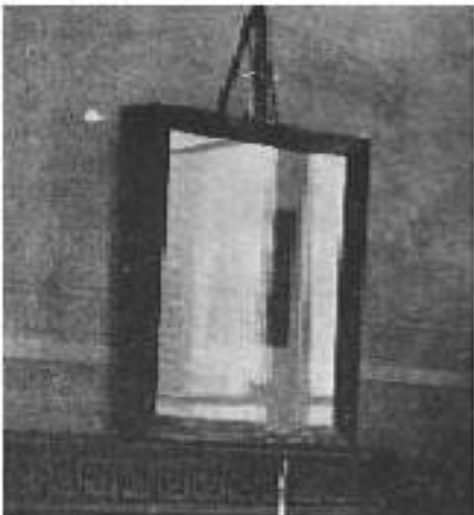
Για την πόλωση τον φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά φίλτρα, που είναι γνωστά με την εμπορική τους ονομασία ως polaroid (πολαρόιντ). Στην καθημερινότητα είναι γνωστά για τη χρήση τους στα γυαλιά ηλίου και στους φακούς φωτογραφικών μηχανών.

Ένα τέτοιο φίλτρο επιτρέπει τη διέλευση φωτεινών κυμάτων έντασης μέχρι και ποσοστό 80%, μόνο αυτών που είναι γραμμικά πολωμένα με το καθορισμένο από το υλικό επίπεδο πόλωσης, και απορροφά περίπου το 99% της έντασης των κυμάτων που είναι πολωμένα κάθετα προς το επίπεδο αυτό.

Μία άλλη συνηθισμένη χρήση των πολωτικών φίλτρων είναι στα κρύσταλλα που καλύπτουν τα φώτα των αυτοκινήτων και στα παρμπρίζ. Και στα κρύσταλλα των φώτων και στα παρμπρίζ υπάρχουν πολωτικά φίλτρα των οποίων το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης σχηματίζει γωνία 45° με το οριζόντιο επίπεδο και έχει τον ίδιο προσανατολισμό σε όλα τα αυτοκίνητα. Όταν δύο αυτοκίνητα διασταυρώνονται τη νύχτα, το παρμπρίζ του ενός λειτουργεί ως αναλυτής για το φως των φαναριών του άλλου αυτοκινήτου, που είναι πολωμένο. Έτσι μειώνεται η ένταση του φωτός που δέχεται ο οδηγός και αποφεύγεται αισθητά η ενόχληση.



Σημείωση: Η πόλωση του φωτός κατά την ανάκλαση παρουσιάζεται μόνο, όταν ταυτόχρονα γίνεται και διάθλαση του φωτός. Για να εμφανίζεται επομένως κατά την ανάκλαση το φαινόμενο της πόλωσης, δεν πρέπει η ανάκλαση να γίνεται σε μεταλλικές επιφάνειες και σε επιφάνειες που παρουσιάζουν μεταλλική σιλ-πνότητα.



1-27 Πολωτικό φίλτρο έχει χρησιμοποιηθεί στη φωτογράφιση των διπλανών εικόνων, που προφυλάσσονται από γυαλί. Η πρώτη έχει φωτογραφηθεί χωρίς φίλτρο και εμφανίζει έντονο φως από ανάκλαση. Με την παρεμβολή πολωτικού φίλτρου, στη δεύτερη φωτογραφία, το ανακλώμενο φως ανακόπτεται και εμφανίζεται η εικόνα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 – 3

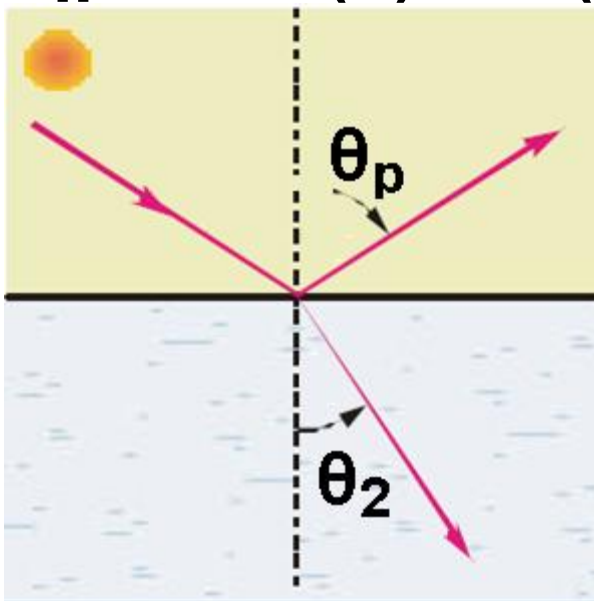
Υπολογισμός γωνίας ολικής πόλωσης από ανάκλαση στην ήρεμη επιφάνεια μιας πισίνας: Το ηλιακό φως εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται από την ήρεμη επιφάνεια του νερού μιας πισίνας.

Το χλωριωμένο νερό της πισίνας έχει δείκτη διάθλασης $n_2 = 1,35$, ενώ ο αέρας $n_1 = 1$.

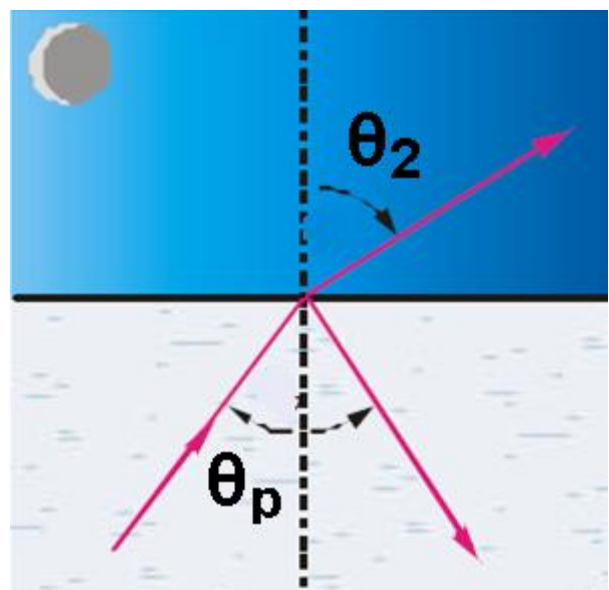
(α) Για ποια γωνία πρόσπτωσης το φως από ανάκλαση είναι ολικώς πολωμένο;

(β) Ποια είναι η γωνία διάθλασης του φωτός σ' αυτή την περίπτωση;

(γ) Αν το βράδυ η πισίνα φωτίζεται με προβολείς που είναι τοποθετημένοι στον πυθμένα της, ποιες είναι τότε οι τιμές των γωνιών των ερωτημάτων (α) και (β);



Ηλιακό φως
την ημέρα



Φως προβολέων
τη νύχτα

ΛΥΣΗ (α) Το φως προσπίπτει από τον αέρα στην επιφάνεια του νερού.

Η γωνία ολικής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\theta_p} = \epsilon\varphi\theta_p \Rightarrow 1,35 = \epsilon\varphi\theta_p \Rightarrow \\ \Rightarrow \theta_p = 53,5^\circ$$

$$(\beta) \theta_2 + \theta_p = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 + 53,5^\circ = 90^\circ \\ \Rightarrow \theta_2 = 36,5^\circ$$

$$(\gamma) \\ \frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta\mu\theta_p}{\sigma\upsilon\nu\theta_p} = \epsilon\varphi\theta_p \Rightarrow \frac{1}{1,35} = \epsilon\varphi\theta_p \Rightarrow \\ \Rightarrow \theta_p = 36,5^\circ$$

$$\theta_2 + \theta_p = 90^\circ \Rightarrow \theta_2 + 36,5^\circ = 90^\circ \Rightarrow \\ \Rightarrow \theta_2 = 53,5^\circ$$

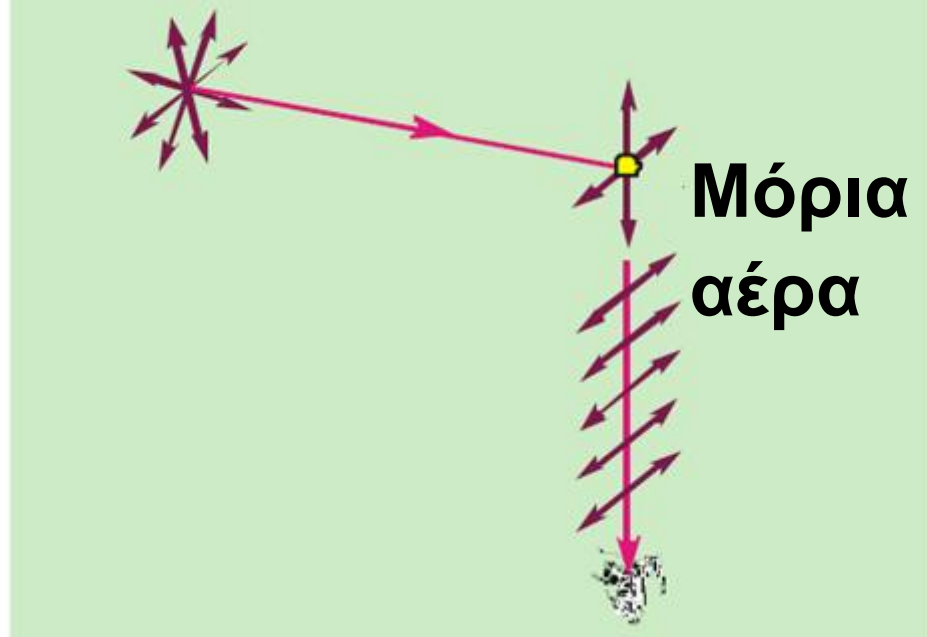
Παρατηρούμε ότι οι δύο γωνίες πόλωσης για τη διαχωριστική επιφάνεια νερού - αέρα είναι συμπληρωματικές.

Πόλωση από σκέδαση - Κυανό χρώμα του ουρανού

Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωματίων, απορροφάται από αυτά και επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις χωρίς να αλλάζει η συχνότητα των διάφορων ακτινοβολιών του. Η απορρόφηση και η επανεκπομπή αυτή του φωτός ονομάζεται σκέδαση.

Επειδή το σκεδαζόμενο φως εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, βλέπουμε φως στον ουρανό, έστω κι αν δεν κοιτάμε κατευθείαν τον ηλιακό δίσκο. Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι το φως αυτό είναι μερικώς πολωμένο (σχήμα 1-28).

Φυσικό φως



1-28 Το φως που σκεδάζεται από μόρια του αέρα είναι μερικώς πολωμένο.

Αν πάρουμε ένα πλακίδιο τύπου polaroid και το τοποθετήσουμε έτσι, ώστε το επίπεδο του να είναι οριζόντιο, θα διαπιστώσουμε ότι για διαφορετικές γωνίες του επιπέδου πόλωσής του περνάει φως διαφορετικής έντασης.

Το πολωμένο φως που προέρχεται από σκέδαση έχει επίπεδο ταλάντωσης κάθετο προς το επίπεδο

που ορίζεται από την αρχική ακτίνα και τη σκεδασθείσα ακτίνα.

Το σκεδαζόμενο φως περιέχει κατά προσέγγιση εννιά φορές περισσότερο κυανό χρώμα από το αντίστοιχο ερυθρό.

Το πόσο ισχυρό θα είναι το σκεδαζόμενο φως εξαρτάται από το μήκος κύματος κάθε μονοχρωματικής ακτινοβολίας. Δηλαδή οι ακτινοβολίες που έχουν μικρότερα μήκη κύματος σκεδάζονται περισσότερο. Επομένως τα μικρότερα μήκη κύματος του ορατού φάσματος του φωτός (κυανό) σκεδάζονται περισσότερο από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος (ερυθρό). Σ' αυτό το φαινόμενο οφείλεται το κυανό χρώμα του ουρανού.

Το φως που προσπίπτει σε ένα νέφος, χωρίς το κυανό χρώμα, όταν

ανακλάται από το νέφος και γίνεται τελικά ορατό από τον παρατηρητή, έχει κίτρινη έως ερυθρή απόχρωση.



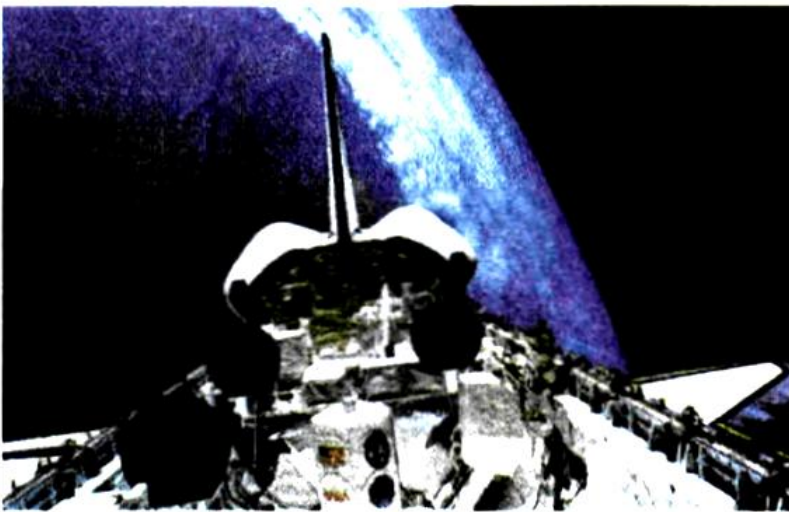
1-29 Τα σύννεφα όπως φαίνονται κατά την ανατολή και τη δύση του Ήλιου.

Κατά το σούρουπο το φως διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Έτσι το φως που φθάνει κατευθείαν στα μάτια μας από τον ορίζοντα είναι φτωχό σε κυανό χρώμα.

Επίσης, όταν η ατμόσφαιρα είναι πλούσια σε υδρατμούς, αυτοί

απορροφούν κυρίως το κυανό χρώμα. Έτσι έχουμε ενίσχυση της ερυθρής απόχρωσης του ουρανού.

Αν η Γη δεν είχε ατμόσφαιρα, δε θα μπορούσαμε να δούμε το χρώμα του ουρανού. Μαύρος θα ήταν την ημέρα, μαύρος και τη νύχτα. Οι αστροναύτες που βρίσκονται στο διάστημα βλέπουν μαύρο ουρανό, γιατί δεν υπάρχουν μόρια να σκεδάσουν το φως.



1-30 Η Γη και ο μαύρος ουρανός όπως φαίνονται από το διαστημικό λεωφορείο Coloumbia. Φωτογραφία της NASA.



1-31 Δύο εικόνες την ίδια στιγμή σε δύο τόπους με διαφορά 8 ωρών. Στην πρώτη το φως που φθάνει στους λουόμενους από σκέδαση είναι πολωμένο και περιέχει περίσσεια κυανού χρώματος. Στη δεύτερη το αρχικά λευκό φως υφίσταται την απώλεια αυτού τον κυανού χρώματος, καθώς διατρέχει την ατμόσφαιρα, και στον ορειβάτη φθάνει τελικά φως από το ερυθρό φάσμα του ορατού φωτός

Οπτικώς ενεργά σώματα.

Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός

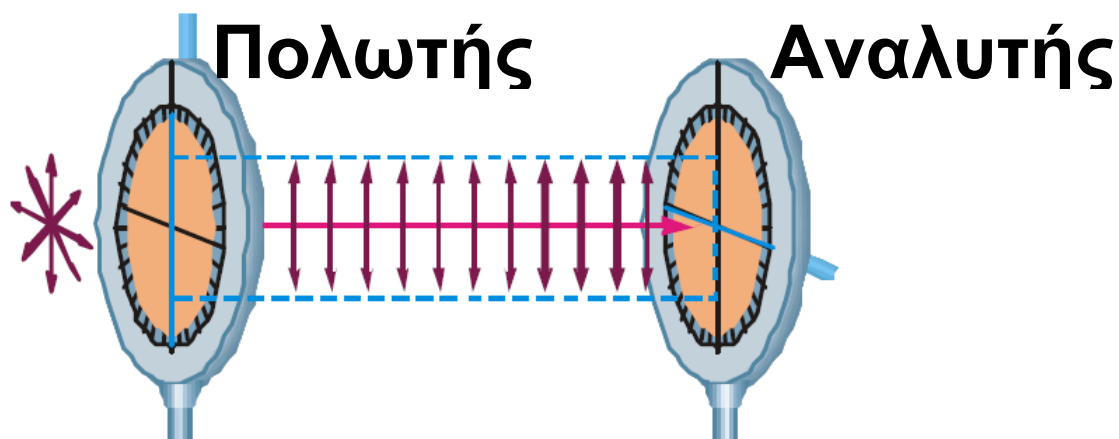
Υπάρχουν ορισμένα διαφανή σώματα που έχουν την ιδιότητα να

στρέφουν το επίπεδο του πολωμένου φωτός, όταν αυτό περάσει από μέσα τους. Τα σώματα αυτά λέγονται οπτικώς ενεργά. Τέτοια είναι, για παράδειγμα, οι κρύσταλλοι χαλαζία, το διάλυμα ζάχαρης, το διάλυμα γαλακτικού οξέος κτλ. Θεωρούμε πολωτή και αναλύτη (δεύτερο όμοιο πολωτή με τον πρώτο) διασταυρωμένους, ώστε η μονοχρωματική ακτίνα που προσπίπτει στον πολωτή να ανακόπτεται από τον αναλύτη (σχήμα 1-32α). Αν μεταξύ του πολωτή και του αναλύτη παρεμβάλουμε κρύσταλλο χαλαζία ή διάλυμα ζάχαρης, θα παρατηρήσουμε ότι από τον αναλύτη περνάει φως (1-32β). Αν στρίψουμε τον αναλύτη, τότε για

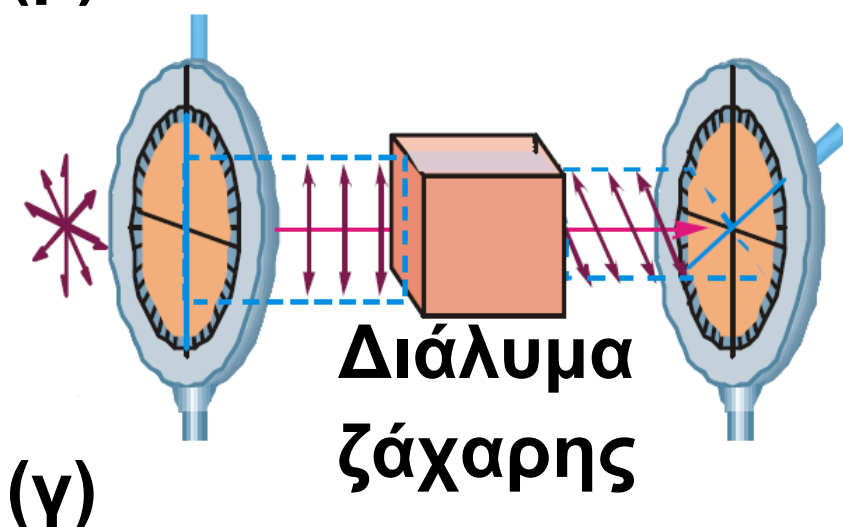
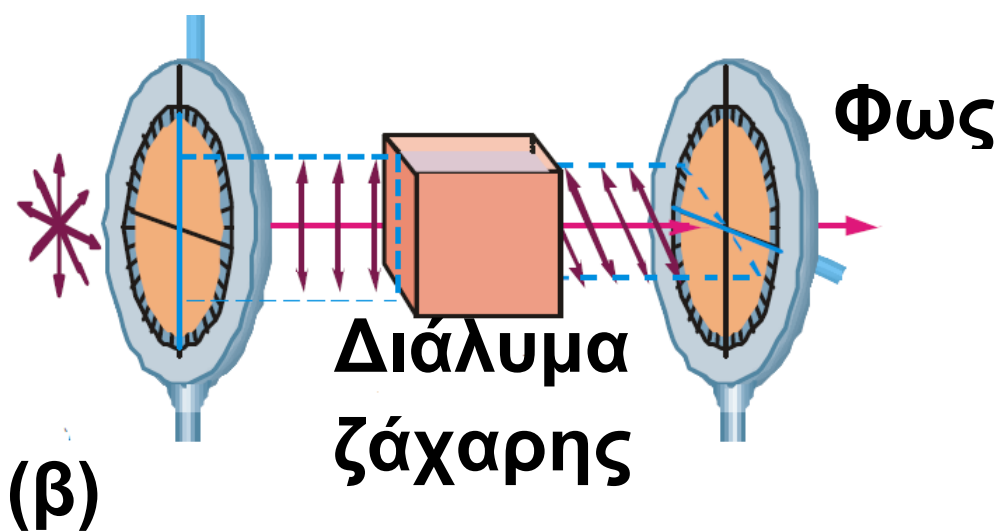
ορισμένη γωνία το φως
ανακόπτεται και πάλι (1-32γ).

Γίνεται φανερό ότι η παρεμβολή
ενός οπτικά ενεργού σώματος
έστρεψε το επίπεδο πόλωσης του
πολωμένου φωτός κατά ορισμένη
γωνία δεξιά ή αριστερά.

Διατάξεις που χρησιμοποιούνται
για τη μέτρηση της γωνίας στρέψης
του πολωμένου φωτός ονομάζονται
πολωσίμετρα.



(α)

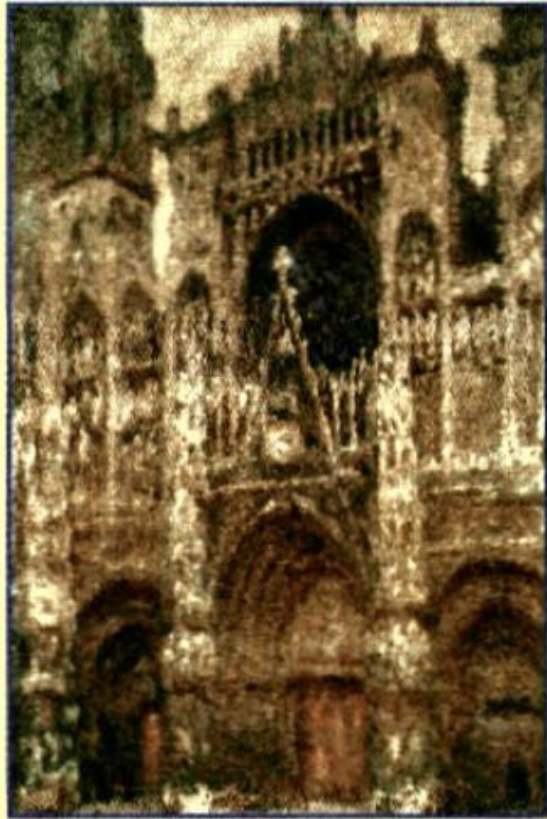
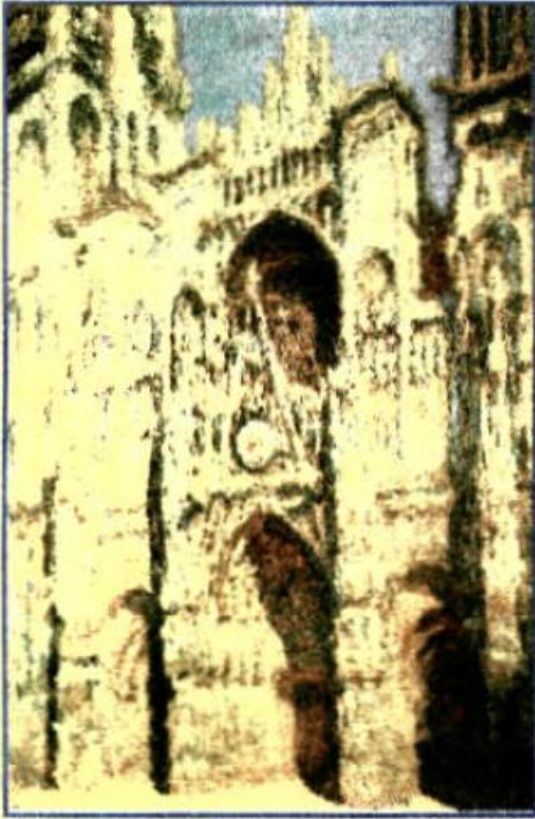


1-32 (α) Ο αναλύτης ανακόπτει το πολωμένο φως. (β) Το διάλυμα ζάχαρης προκαλεί στροφή τον επιπέδου ταλάντωσης του πολωμένου φωτός. Από τον αναλύτη περνάει φως. (γ) Με στροφή τον αναλύτη ανακόπτουμε πάλι το φως.

Ελεύθερο ανάγνωσμα

«Κατά βάθος τα πάντα είναι ζήτημα φωτός»...

Το φως και οι μεγάλοι ζωγράφοι. Το φως «ζωγραφίζεται» από τους ιμπρεσιονιστές ζωγράφους παράλληλα με τις πρώτες επιστημονικές παρατηρήσεις για τη φύση του (Γαλλία, μέσα του 18ου αιώνα). Στο πέρασμά του τα υλικά αντικείμενα διαλύονται και καταγράφεται η στιγμιαία εντύπωση (impression). Το φως αναλύεται στα χρωματικά συστατικά του. Έτσι το ίδιο θέμα μπορεί να ξαναζωγραφιστεί, αφού αλλάζει η χρωματικότητά του στο πέραςμα της ημέρας.



**Κλοντ Μονέ (1840-1926),
«Ο καθεδρικός ναός της Ρουέν»
(1892-1893).**

Ο ζωγράφος Ζορζ Σερά (1859-1891), φοιτητής ακόμα, διαβάζει τις παρατηρήσεις πάνω στα οπτικά φαινόμενα του φυσικού Σαρλ Ανρύ. Στη ζωγραφική του η εικόνα συντίθεται από πολλές μικρές χρωματικές κουκκίδες (point). Σε κάθε περιοχή βρίσκονται κουκκίδες διαφορετικών καθαρών χρωμάτων. Από ορισμένη απόσταση τα χρωματικά συστατικά αναμειγνύονται οπτικά στον αμφιβληστροειδή, διατηρώντας την ένταση και τη λάμψη που έχει το φως εκείνη τη στιγμή. Ο ζωγραφικός αυτός τρόπος ονομάστηκε «πλουαντιγισμός».



Το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε ονομάζονται κύρια προσθετικά

χρώματα του φωτός. Όταν συνδυάζονται κατάλληλα, μπορούν να δημιουργήσουν όλα τα χρώματα. Όταν συνδυάζονται ίδιες ποσότητες του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε, το αποτέλεσμα είναι λευκό φως.



Ζορζ Σερά, «Κυριακάτικος περίπατος στην Γκραντ Ζατ» (1884-1886)

**Απόσπασμα από το βιβλίο του
Victor Weisskopf (Βίκτορ Βάισκοφ)
Η κβαντική επανάσταση.**

ΓΙΑΤΙ Ο ΟΥΡΑΝΟΣ ΕΙΝΑΙ ΓΑΛΑΝΟΣ;

... η κβαντική θεωρία δεν είναι καθόλου απομακρυσμένη από τις ένασχολήσεις μας, αγγίζει τον ίδιο τον κόσμο όπου ζούμε και επιτρέπει να κατανοήσουμε τις πιο λεπτές δομές της ύλης. Καλώς ή κακώς, μας έχει παράσχει τη δυνατότητα ελέγχου μερικών ενεργειακών διαδικασιών από τις πιο ισχυρές του σύμπαντος.

Εντούτοις θα ήθελα να προσθέσω στην επιχειρηματολογία μου ένα επιπλέον στοιχείο, το οποίο είμαι βέβαιος ότι θα δείξει πως η κβαντική θεωρία της αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη επιτρέπει να

απαντήσουμε σε ερωτήσεις πολύ συνηθισμένες, του τύπου:
Γιατί ο ουρανός είναι γαλανός;
Γιατί το νερό είναι διαφανές;
Τι είναι αυτό που κάνει το αντικείμενο να φαίνεται χρωματιστό;
Ή ακόμη, γιατί το μέταλλο είναι στιλπνό;
Ο αναγνώστης θα μου επιτρέψει να μη θίξω παρά μόνο την περίπτωση του γαλανού ουρανού, για να απόφυγω μια περίπλοκη παρουσίαση, που, ακόμη και στη μοναδική αυτή περίπτωση, θα παραμείνει σχηματική. Πώς η κβαντική θεωρία εξηγεί την απορρόφηση του φωτός από ένα σώμα, με άλλα λόγια, από ένα άτομο ή ένα μόριο;
Ας φανταστούμε ένα άτομο ή ένα μόριο βυθισμένο στο πεδίο ενός φωτεινού κύματος σαφώς καθορισμένου χρώματος. Με κβαντικούς

όρους, ένα τέτοιο κύμα περιγράφεται ως ένα σύνολο φωτονίων που έχουν όλα την ίδια ενέργεια hf , η συχνότητα f αντιστοιχεί στο χρώμα του εν λόγω φωτός. Όσο για το άτομο, η κβαντική θεωρία το περιγράφει ως ένα σύστημα του οποίου η ενέργεια είναι κβαντωμένη, δηλαδή παρουσιάζει μια αλληλουχία ενεργειακών επιπέδων, διαχωρισμένων μεταξύ τους: η ενέργεια ενός ατόμου δεν μπορεί να λάβει παρά ορισμένες τιμές, τις τιμές αυτών των επιπέδων, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές γι' αυτό το άτομο ή, ακριβέστερα, για το είδος στο οποίο ανήκει (άνθρακας, άζωτο κτλ.). Στην κανονική κατάσταση, που ονομάζεται μη διεγερμένη, το άτομο βρίσκεται σ' αυτήν από τις επιτρεπόμενες καταστάσεις που χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη ενέργεια.

Λέμε ότι βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση του. Όταν δέχεται φωτεινή ενέργεια, που μεταφέρουν τα φωτόνια συχνότητας f , μπορεί να περάσει σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση, υπό τον όρο πάντοτε η ενέργεια των φωτονίων hf να είναι ακριβώς ίση με τη διαφορά μεταξύ ενός από τα επιτρεπόμενα ενεργειακά επίπεδα και του θεμελιώδους.

Αν είναι έτσι τα πράγματα, το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο, το οποίο εξαφανίζεται από την προσπίπτουσα δέσμη, και οδηγείται σε μια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση. Ονομάζουμε αυτές τις απορροφήσεις «συντονισμένες απορροφήσεις» ή απλώς «συντονισμούς».

Θα εισαγάγω τώρα, για άλλη μία φορά, ένα μοντέλο εύχρηστο για την περιγραφή του ατόμου. Ας

φανταστούμε τα ηλεκτρόνιά του ως μικρούς ταλαντωτές, ικανούς να πάλλονται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος και των οποίων οι ιδιοσυχνότητες (δηλαδή οι συχνότητες για τις οποίες το ηλεκτρόνιο συντονίζεται παλλόμενο με μέγιστο πλάτος) αντιστοιχούν σε μεταβάσεις του ατόμου από τη θεμελιώδη κατάσταση σε μια από τις διεγερμένες. Με άλλα λόγια, οι ιδιοσυχνότητες του ταλαντωτή, που μας χρησιμεύει ως μοντέλο του ατόμου, είναι ίσες με τις συχνότητες του κβαντικού συντονισμού.

Ας εξετάσουμε την επίδραση του φωτός στα άτομα μέσω του παραπάνω μοντέλου. Μπορούμε στο εξής να αγνοήσουμε τα φωτόνια και τις κβαντικές καταστάσεις του ατόμου: αυτό το μοντέλο επιτρέπει

πράγματι να θεωρήσουμε το φως ως ένα κλασικό ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που επιδρά σε κλασικούς ταλαντωτές, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από ης ιδιοσυχνότητές τους. Υπό την επίδραση ενός φωτεινού κύματος ο ταλαντωτής αρχίζει να πάλλεται. Η απόκριση του ταλαντωτή είναι ασήμαντη (αλλά μη μηδενική), όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος κύματος είναι διαφορετική από τις ιδιοσυχνότητές του, ενώ αντίθετα γίνεται πολύ σημαντική, όταν οι συχνότητες του κύματος και του ταλαντωτή συμπίπτουν, όταν έχουμε συντονισμό.

Ποιες είναι λοιπόν οι συχνότητες συντονισμού των διάφορων ατόμων και μορίων; Για την πλειονότητα των απλών ατόμων (O, N, H) είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που χαρακτηρίζουν το ορατό φως.

Ανήκουν στην περιοχή του φάσματος η οποία ονομάζεται υπεριώδης. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ένα αέριο είναι διαφανές.

Για τα μόρια (O_2 , N_2 , H_2O) οι συχνότητες συντονισμού είναι χαμηλότερες από τις ορατές συχνότητες του υπερύθρου και μέσα στο υπεριώδες, άρα, και σ' αυτή την περίπτωση, βρίσκονται έξω από το ορατό φάσμα. Υπάρχει όμως μια σημαντική διαφορά: στην περίπτωση των ατόμων οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των μορίων, οι μάζες που ταλαντώνονται είναι αυτές των ατόμων και συνεπώς είναι πολύ βαρύτερες από ό,τι στην πρώτη περίπτωση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα και το αυτό κύμα να θέτει πολύ ευκολότερα σε κίνηση τους ταλαντωτές που αντι-

στοιχούν σε άτομα από ό,τι εκεί-
νους που αντιστοιχούν σε μόρια (*).
Τώρα λοιπόν μπορούμε να κατάνοήσουμε ένα από τα ωραιότερα χρώματα της φύσης: το γαλανό του ουρανού. Το ηλιακό φως αποτελείται, όπως είναι γνωστό, από ένα σύνολο ακτινοβολιών που περιλαμβάνει όλες τις δυνατές συχνότητες του φάσματος, από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο, μέσω του ορατού. Ας εξετάσουμε την επίδραση αυτών των ποικίλων ακτινοβολιών στους ταλαντωτές που απαρτίζουν τα άτομα και τα μόρια μέσα στην

(*) Σημείωση συγγραφέων: Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος ταλάντωσης των δομικών μονάδων των μορίων (άτομα) είναι μικρότερο από το πλάτος ταλάντωσης των ατομικών ταλαντωτών (ηλεκτρόνια) στην περίπτωση του συντονισμού.

ατμόσφαιρα. Οι υπέρυθρες ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των μορίων, αλλά τα αντίστοιχα πλάτη είναι μικρά, όπως μόλις αναφέρθηκε. Αντίθετα οι υπεριώδεις ακτινοβολίες προκαλούν το συντονισμό των ατόμων και τα αντίστοιχα πλάτη είναι σημαντικά. Όσο για το ορατό φως, θέτει σε κίνηση τους ταλαντωτές με ένα πλάτος ταλάντωσης σχετικά μικρό, αλλά το ίδιο για όλους, αφού οι ταλαντωτές που περιλαμβάνονται δε συντονίζονται στο ορατό. Συνολικά, το ηλιακό φως προκαλεί ταλαντώσεις μέσου ή μικρού πλάτους στο ορατό, αμελητέου στο υπέρυθρο και πολύ μεγάλου στο υπεριώδες.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη μας ότι ένα ταλαντούμενο φορτίο, όπως συμβαίνει να είναι το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου που εξα-

ναγκάζεται σε ταλάντωση, είναι επίσης πομπός φωτός. Εδώ έχουμε ένα από τα θεμελιώδη συμπεράσματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell. Ένα ταλαντούμενο ηλεκτρόνιο εκπέμπει προς όλες τις κατευθύνσεις ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα (με άλλα λόγια, φως), του οποίου η συχνότητα είναι ίση με την ιδιοσυχνότητα της ταλάντωσής του, αυτό που ονομάζεται σκέδαση Rayleigh. Εξάλλου αποδεικνύεται ότι η ένταση της εν λόγω εκπομπής είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη αυτής της συχνότητας.

Αντιλαμβανόμαστε λοιπόν ότι τα μόρια του αέρα που φωτίζονται από τον Ήλιο εκπέμπουν φως και ακόμη ότι αυτή η εκπομπή είναι εντονότερη στο κυανό από ό,τι στο ερυθρό, αφού η συχνότητα του κυανού

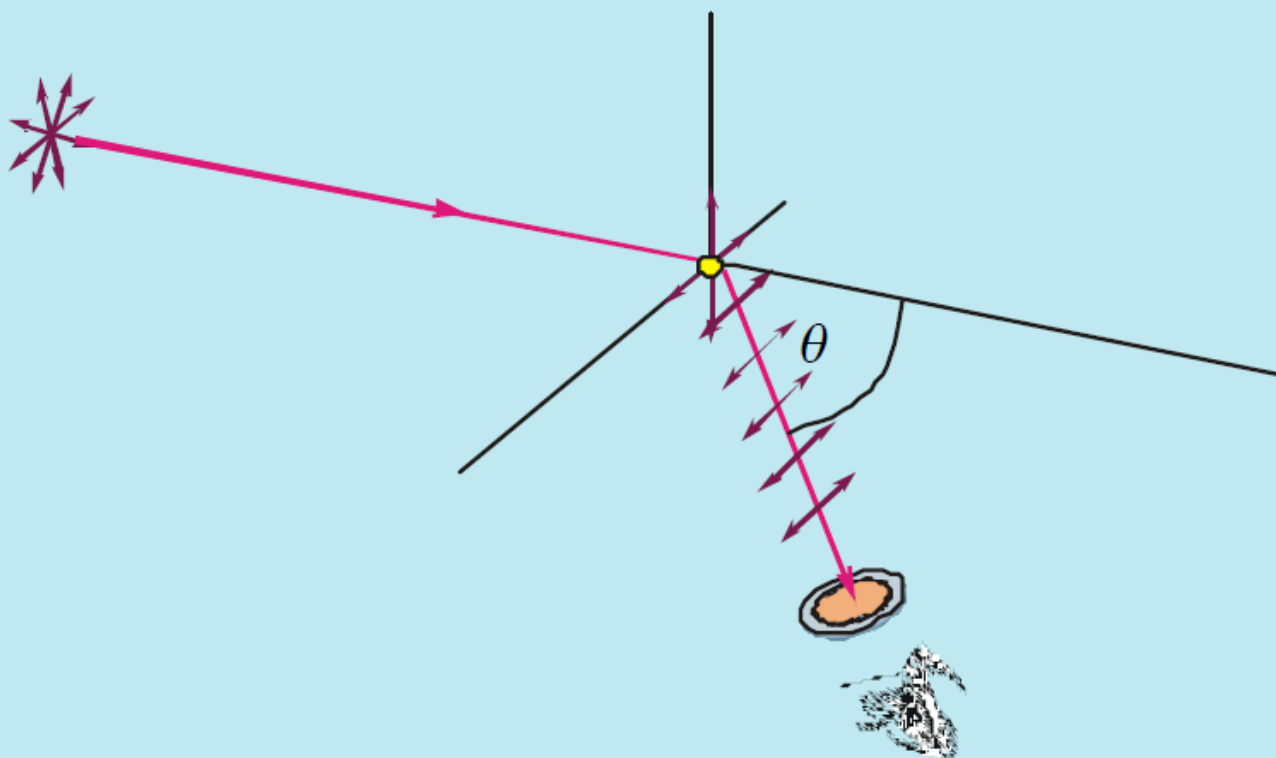
νού φωτός είναι περίπου διπλάσια από εκείνη του ερυθρού. Έτσι, όταν βλέπουμε τον ουρανό, χωρίς να κοιτάμε τον ηλιακό δίσκο, τον βλέπουμε γαλανό: είναι το αποτέλεσμα της δύναμης του 4.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

ΠΟΛΩΣΗ ΑΠΟ ΣΚΕΔΑΣΗ

Ο σκοπός της δραστηριότητας αυτής είναι να διαπιστώσουμε ότι το φως που προέρχεται από τον ουρανό είναι μερικώς πολωμένο. Μια ηλιόλουστη, ανέφελη μέρα κοιτάξτε το γαλανό ουρανό πίσω από ένα φύλλο polaroid, που το κρατάτε κοντά στο ένα μάτι, ώστε να βλέπετε ένα μεγάλο τμήμα του ουρανού. Κατευθύνετε στη συνέχεια το polaroid, ώστε να βλέπετε μια περιοχή του ουρανού με ένα ελάχιστο της έντασης του φωτός. Το φως που φτάνει στο μάτι σας

από αυτό το τμήμα του ουρανού
είναι ισχυρά πολωμένο.



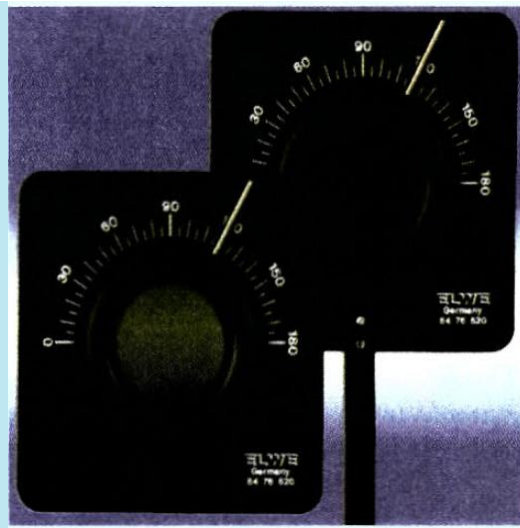
Μετρήστε στο περίπου τη γωνία που σχηματίζεται από τη γραμμή που συνδέει το κεφάλι σας και την περιοχή του ουρανού με το φως μέγιστης πόλωσης, καθώς και τη γραμμή που συνδέει τον Ήλιο με την ίδια περιοχή του ουρανού, δηλαδή τη γωνία θ . Θα πρέπει να βρείτε γωνία κοντά στις 90° .

Μπορείτε να μετρήσετε επίσης την κατεύθυνση του άξονα της πόλω-

σης του φωτός που φτάνει στα μάτια σας από την περιοχή του ουρανού με μέγιστη πόλωση. Αυτή την κατεύθυνση σας τη φανερώνει ο οπτικός άξονας του φύλλου Polaroid που χρησιμοποιείτε. Αρκεί επομένως να γνωρίζετε τον οπτικό άξονα του polaroid σας.

Αν δεν τη γνωρίζετε, μπορείτε να τη βρείτε κοιτάζοντας μία φωτεινή πηγή γνωστής πόλωσης, π.χ. το φως που ανακλάται από ένα τζάμι ή από ένα γυαλιστερό πάτωμα.

Όπως γνωρίζουμε, το ανακλώμενο φως είναι πολωμένο παράλληλα προς την επιφάνεια ανάκλασης, π.χ. το γυαλιστερό μαρμάρινο πάτωμα.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ 1ου ΤΟΜΟΥ ΦΥΣΙΚΗΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ Γ' ΛΥΚΕΙΟΥ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΤΟ ΦΩΣ

1.1 Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	20
Η κυματική φύση του φωτός. Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell.....	26
Η σωματιδιακή φύση του φωτός. Θεωρία των κβάντα	31
1.2 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ..	36
Η μέθοδος του Fizeau	39

1.3 ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ.....	46
Ανάκλαση και διάθλαση . του φωτός	46
Ταχύτητα και μήκος κύματος του φωτός μέσα στην ύλη	49
1.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΥΚΟΥ ΦΩΤΟΣ ΚΑΙ ΧΡΩΜΑΤΑ.....	59
Διασκεδασμός και πρίσματα.....	59
Ανάλυση του λευκού φωτός	61
Ουράνιο τόξο - Τα χρώματα της φύσης	68
Υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία.....	82
1.5 ΠΟΛΩΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ.....	91
Φυσικό φως και γραμμικά πολωμένο φως.....	91
Πολωτικό φίλτρο - Πολωτής	95
Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων - Αναλύτης	103

Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση.....	108
Πόλωση από σκέδαση - Κυανό χρώμα του ουρανού.....	121
Οπτικώς ενεργά σώματα - Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός	126
Ελεύθερο ανάγνωσμα.....	130
Γιατί ο ουρανός είναι γαλανός; ..	134
Δραστηριότητα	144

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του Νόμου 1129 της 15/21 μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946, 108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Διά Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.