

## 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.**

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.

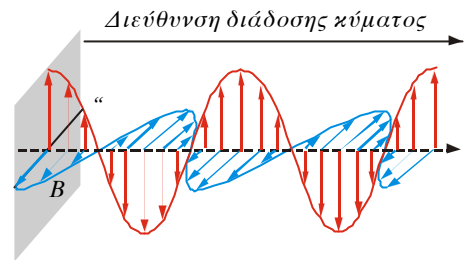
Το φυσικό φως απεικονίζεται παραστατικά στο σχήμα 1-19α, ενώ το γραμμικά πολωμένο φως στο σχήμα 1-19β, γ.

### Πολωτικό φίλτρο - Πολωτής

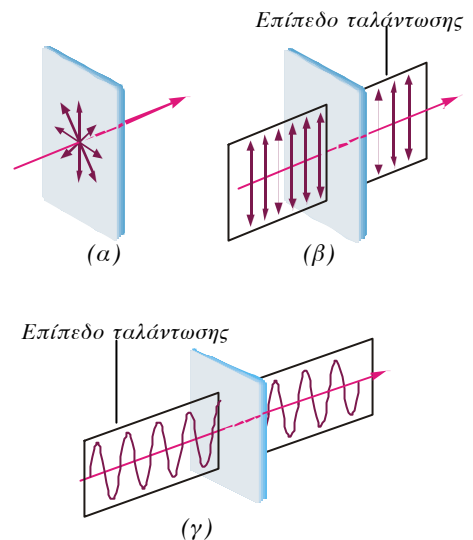
Το φυσικό φως είναι δυνατόν, περνώντας από κατάλληλα φίλτρα (πολωτές) ή παθαίνοντας κατάλληλη ανάκλαση, να μετατραπεί σε γραμμικά πολωμένο φως.

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

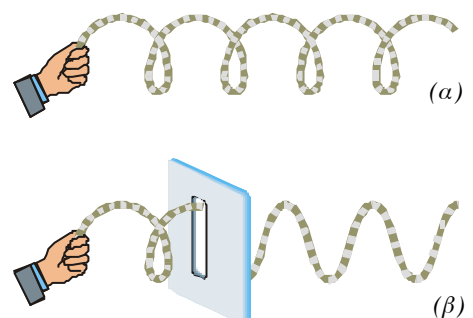
Αν παρεμβάλουμε ένα πέτασμα με κατακόρυφη σχισμή στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος (σχήμα 1-20β), έτσι ώστε το σχοινί



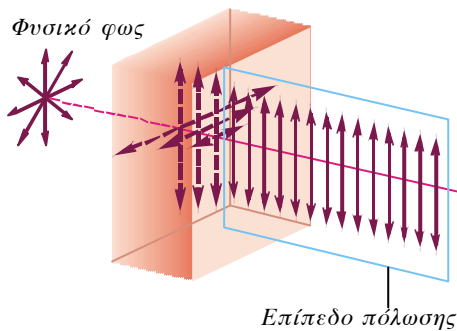
**1-18** Στιγμιότυπο ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όπως γνωρίζουμε, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από δύο εγκάρσια κύματα κάθετα μεταξύ τους, ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό.



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



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

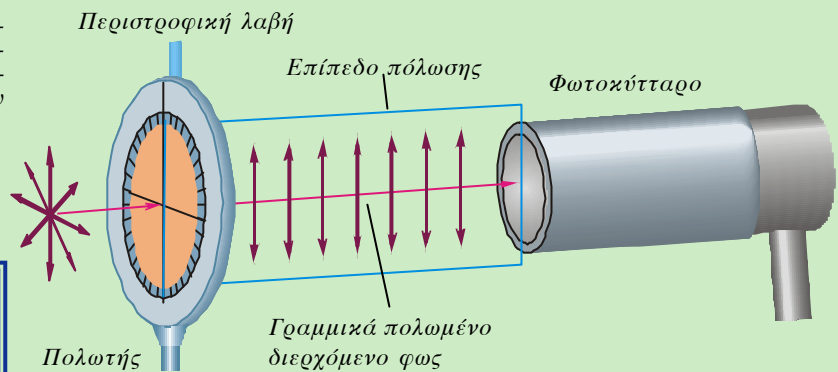


**1-21** Φυσικό φως διέρχεται από πολωτικό φίλτρο. Οι οριζόντιες ταλαντώσεις έχουν απορροφηθεί ολοσχερώς, ενώ οι κατακόρυφες μερικώς.

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**.

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 στρέφουμε το πολωτικό φίλτρο, που έχει μορφή πλακιδίου, γύρω από άξονα κάθετο προς το επίπεδό του (σχήμα 1-22).

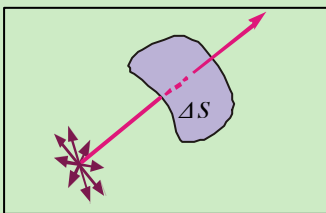
**1-22** Για οποιαδήποτε γωνία προσανατολισμού του επιπέδου πόλωσης το φωτοκύτταρο μετράει την ίδια ένταση φωτός και τη βρίσκει ίση ακριβώς με το μισό της έντασης του προσπίπτοντος στο πλακίδιο του πολωτή.



**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  $\Delta S$ , κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, που δέχεται συνεχώς ενέργεια  $\Delta W$  σε χρόνο  $\Delta t$ . Το πηλίκο  $\Delta W/\Delta t$  ονομάζεται ισχύς. Η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας ορίζεται ως **ένταση** του κύματος. Δηλαδή:

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

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



Αποδεικνύεται ότι η ένταση του κύματος είναι ανάλογη προς το τετράγωνο του πλάτους “ $a$ ” του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

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 πολωμένα σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο αυτό.

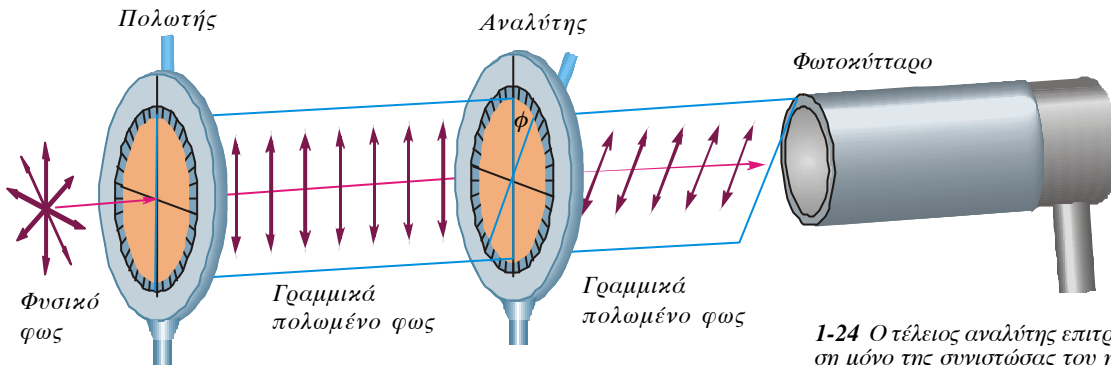
Το επίπεδο πόλωσης του πολωτή είναι **χαρακτηριστικό του πλακιδίου** και η διεύθυνσή του καθορίζεται κάθε φορά από την περιστροφική λαβή, που βρίσκεται στην κορυφή του. Άρα, περιστρέφοντας τη λαβή, καθορίζουμε τη θέση του χαρακτηριστικού επιπέδου πόλωσης του πολωτή.

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 βγαίνει 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.

## Συνδυασμός δύο πολωτικών φίλτρων - Αναλύτης

Ας υποθέσουμε ότι 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 ονομάζουμε **αναλύτη**, σχηματίζει γωνία  $\phi$  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  $\phi$ . Το τι θα συμβεί κατά τη διέλευση του πολωμένου φωτός από τον αναλύτη εξαρτάται από τη γωνία  $\phi$ .

Όταν τα χαρακτηριστικά επίπεδα του πολωτή και του αναλύτη συμπίπτουν ( $\phi=0^\circ$ ), το πολωμένο φως θα διέλθει από τον αναλύτη χωρίς να υποστεί μεταβολή.

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

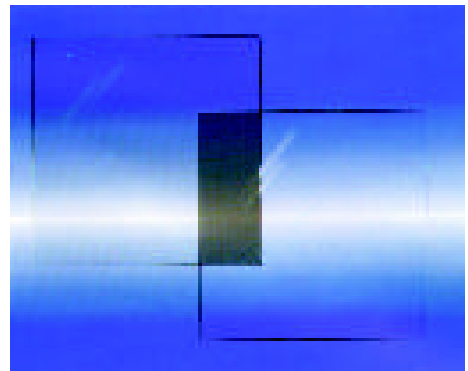
Για οποιαδήποτε άλλη γωνία  $\phi$  μεταξύ των χαρακτηριστικών επιπέδων του πολωτή και του αναλύτη το πολωμένο φως θα διέρχεται εν μέρει.

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.

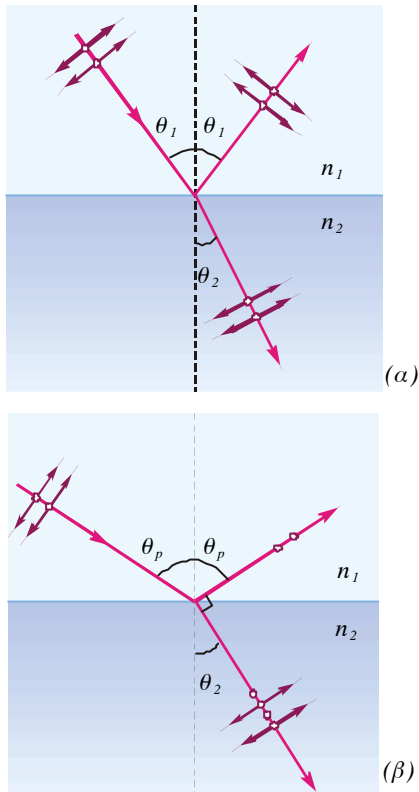
Χρησιμοποιώντας τον αναλύτη μπορούμε να διαπιστώσουμε αν μία δέσμη φωτός είναι πολωμένη ή όχι.

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.



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



**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.

## Πόλωση από ανάκλαση - Φυσική πόλωση

Όταν μη πολωμένο φως προσπίπτει πάνω σε διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών υλικών μέσων 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  $0^\circ$  ή περίπου  $90^\circ$ , 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** ( $\theta_p$ ), 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.

Υποθέτουμε τώρα ότι μεταβάλλουμε τη γωνία πρόσπτωσης, ώσπου η ανακλώμενη και η διαθλώμενη δέσμη να σχηματίζουν γωνία  $90^\circ$ , δηλαδή να ισχύει  $\theta_2 + \theta_p = 90^\circ$ . Τότε η ανακλώμενη δέσμη είναι πλήρως πολωμένη, ενώ η διαθλώμενη είναι μερικώς πολωμένη (σχήμα 1-26β).

Η γωνία ολικής πόλωσης  $\theta_p$  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 ημιτόνων των γωνιών πρόσπτωσης  $\theta_1$  και διάθλασης  $\theta_2$ , δηλαδή:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu \theta_1}{\eta\mu \theta_2} \quad (1.6)$$

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:  $\eta\mu (90^\circ - \theta_p) = \sigma\upsilon\nu \theta_p$ . Άρα τελικά προκύπτει:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\eta\mu \theta_p}{\sigma\upsilon\nu \theta_p} \quad \text{ή} \quad \frac{n_2}{n_1} = \epsilon\phi \theta_p \quad (1.7)$$

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:  **$n = \epsilon\phi \theta_p$** .

## Νόμος του Snell

## Νόμος του Brewster

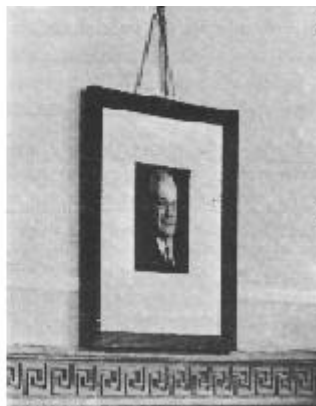
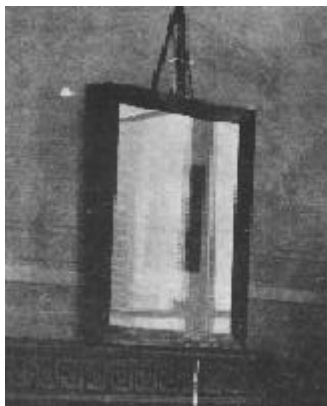
## Πόλωση και πολωτικά φίλτρα στην καθημερινή μας ζωή

Η πόλωση από ανάκλαση είναι ένα σύννηθες 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 ανακλώμενου ηλεκτρικού πεδίου θα έχει μεγάλη οριζόντια συνιστώσα, δηλαδή το ανακλώμενο φως θα περιέχει περίσσεια πολωμένου φωτός στην οριζόντια διεύθυνση.

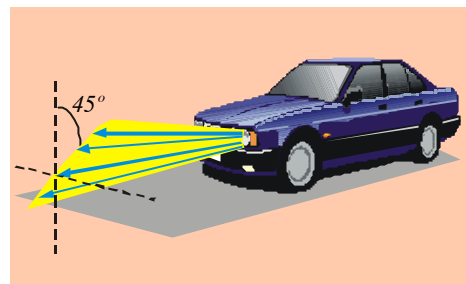
Τα γυαλιά ηλίου λοιπόν που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης τους να είναι κατακόρυφο και να απορροφούν στο μέγιστο δυνατό την οριζόντια συνιστώσα του ανακλώμενου φωτός. Έτσι στα μάτια φτάνει ένα μικρό ποσοστό του πολωμένου φωτός.

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  $45^\circ$  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 ανάλυτης 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.



Για την πόλωση του 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.



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 στιλπνότητα.

1-27 Πολωτικό φίλτρο έχει χρησιμοποιηθεί στη φωτογράφιση των διπλών εικόνων, που προφνιάσσονται 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.

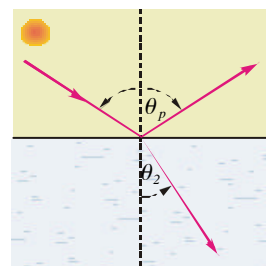
## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1 - 3

**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.

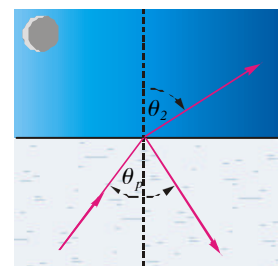
Το χλωριωμένο νερό της πισίνας έχει δείκτη διάθλασης  $n_2=1,35$ , ενώ ο αέρας  $n_1=1$ .

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

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



Ηλιακό φως την ημέρα



Φως προβολών τη νύχτα

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

$$(γ) \frac{n_1}{n_2} = \frac{\eta \mu \theta_p}{\sigma \nu \nu \theta_p} = \epsilon \phi \theta_p \Rightarrow \frac{1}{1,35} = \epsilon \phi \theta_p \quad \Xi \quad \theta_p = 36,5^\circ$$

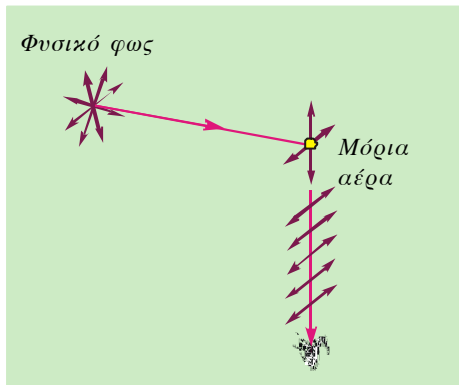
**ΛΥΣΗ** (α) Το φως προσπίπτει από τον αέρα στην επιφάνεια του νερού. Η γωνία ολικής πόλωσης δίνεται από τη σχέση:

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

$$(β) \theta_2 + \theta_p = 90^\circ \quad \Xi \quad \theta_2 + 53,5^\circ = 90^\circ \quad \Xi \quad \theta_2 = 36,5^\circ$$

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

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



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

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

### 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**.

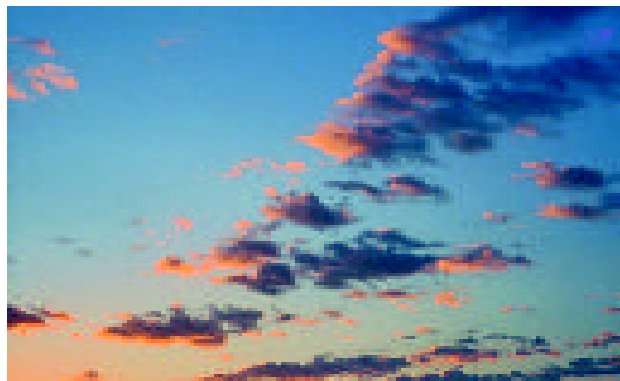
Επειδή το σκεδαζόμενο φως εκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις, βλέπουμε φως στον ουρανό, έστω κι αν δεν κοιτάμε κατευθείαν τον ηλιακό δίσκο. Μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι το φως αυτό είναι μερικώς πολωμένο (σχήμα 1-28).

Αν πάρουμε ένα πλακίδιο τύπου polaroid και το τοποθετήσουμε έτσι, ώστε το επίπεδό του να είναι οριζόντιο, θα διαπιστώσουμε ότι για διαφορετικές γωνίες του επιπέδου πόλωσης 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 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.

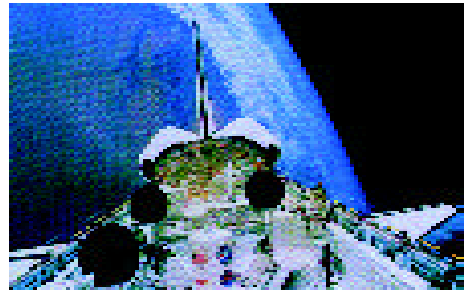


**1-29** Τα σύννεφα όπως φαίνονται κατά την ανατολή και τη δύση του Ήλιου.

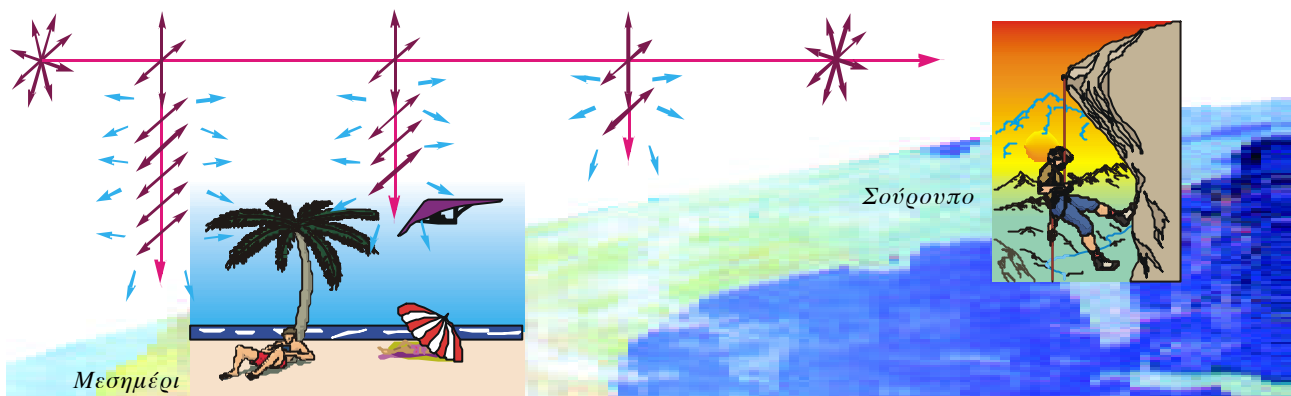
Κατά το σούρουπο το φως διανύει μεγάλη απόσταση μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα και ένα σημαντικό μέρος του κυανού χρώματος σκεδάζεται. Έτσι το φως που φθάνει κατευθείαν στα μάτια μας από τον ορίζοντα είναι φτωχό σε κυανό χρώμα.

Επίσης, όταν η ατμόσφαιρα είναι πλούσια σε υδατμούς, 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 λονόμενους από σκέδαση είναι πολωμένο και περιέχει περίσσεια κυανού χρώματος. Στη δεύτερη το αρχικά λευκό φως υφίσταται την απώλεια αυτού του κυανού χρώματος, καθώς διατρέχει την ατμόσφαιρα, και στον ορειβάτη φθάνει τελικά φως από το ερυθρό φάσμα του ορατού φωτός.

## Οπτικώς ενεργά σώματα.

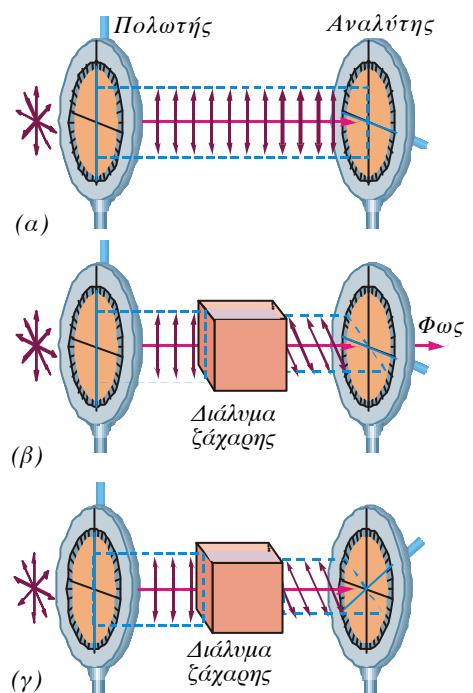
### Στροφή του επιπέδου πόλωσης του φωτός

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.

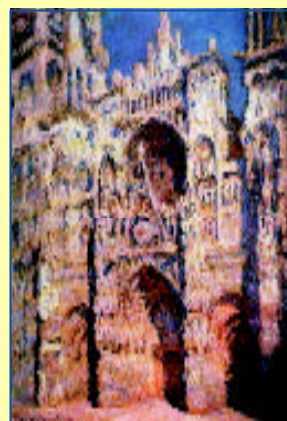
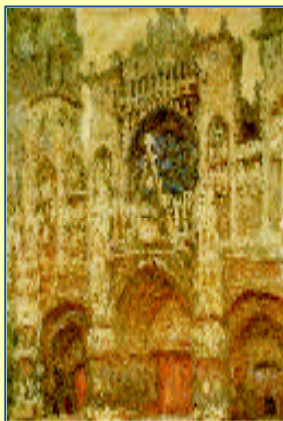
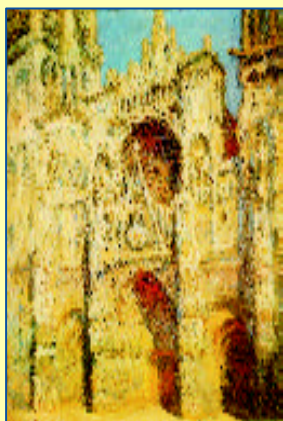
Διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της γωνίας στρέψης του πολωμένου φωτός ονομάζονται **πολωσίμετρα**.



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

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

**Το φως και οι μεγάλοι ζωγράφοι.** Το φως «ζωγραφίζεται» από τους μπρεσιονιστές 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 χρωματικότητα 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 «πουαντιγισμός».



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 ενασχολήσεις 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 αποφύγω 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 κατάστασή 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 δέση, 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 τις 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 ιδιοσυχνότητες 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 υπέρυθρου 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 αντιστοιχούν σε άτομα από ό,τι εκείνους που αντιστοιχούν σε μόρια (\*).

Τώρα λοιπόν μπορούμε να κατανοήσουμε 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 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 εξαναγκάζεται 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 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.

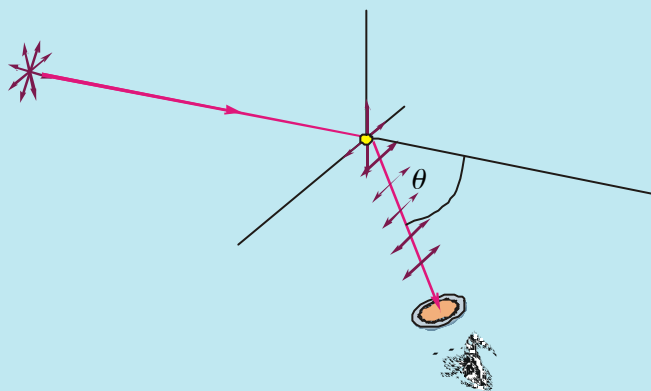
(\*) Σημείωση συγγραφέων: Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος ταλάντωσης των δομικών μονάδων των μορίων (άτομα) είναι μικρότερο από το πλάτος ταλάντωσης των ατομικών ταλαντωτών (ηλεκτρόνια) στην περίπτωση του συντονισμού.

## ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

### ΠΟΛΩΣΗ ΑΠΟ ΣΚΕΛΑΣΗ

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  $\theta$ . Θα πρέπει να βρείτε γωνία κοντά στις  $90^\circ$ .



Μπορείτε να μετρήσετε επίσης την κατεύθυνση του άξονα της πόλωσης 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.

## ΣΥΝΟΨΗ 1ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

❑ Το φως έχει διπλή φύση. 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.

❑ Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία ξεκινούν από τη φωτεινή πηγή και διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις.

❑ 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.

❑ Το φως, όπως και κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, διαδίδεται στο κενό με σταθερή ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Η τιμή της ταχύτητας του φωτός στο κενό είναι μια θεμελιώδης σταθερά της φύσης.

❑ Το πηλίκο της ταχύτητας  $c_0$  του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα  $c$  μέσα σε κάποιο υλικό ονομάζεται **δείκτης διάθλασης**  $n$  του υλικού μέσου. Ισχύει δηλαδή:

$$n = \frac{\text{δὰ ÷ ὃς δὰ ὀι ὃ οὐ ὀὐ ὀ ὀὐ ἔαι ὐ}}{\text{δὰ ÷ ὃς δὰ ὀι ὃ οὐ ὀὐ ὀ ὀὐ ἰ Ὀϊ}} = \frac{c_0}{c}$$

❑ 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 κύματος και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος, ονομάζεται διασκεδασμός.

❑ Το ορατό φως έχει όρια και τα χρώματά του έχουν μήκη κύματος που κυμαίνονται μεταξύ 400nm του ιώδους και 700nm του ερυθρού. Εκτός από την ακτινοβολία της ορατής περιοχής του φάσματος υπάρχει και ακτινοβολία αόρατη, η οποία βρίσκεται πέρα από την ιώδη περιοχή, με μήκη κύματος μικρότερα των 400nm. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπεριώδης ακτινοβολία. Μετά την ερυθρή περιοχή του φάσματος υπάρχει αόρατη ακτινοβολία με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 700nm, η οποία προκαλεί έντονη αύξηση της θερμοκρασίας των στερεών και υγρών σωμάτων. Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται υπέρυθη ακτινοβολία.

❑ Το φυσικό φως είναι σύνθεση πολλών κυμάτων με διάφορα επίπεδα ταλάντωσης των ηλεκτρικών τους πεδίων και τυχαίες διευθύνσεις διάδοσης. Το φυσικό φως που δεχόμαστε απευθείας από μία φωτεινή πηγή, επειδή προέρχεται από πολλά άτομα ή μόρια, έχει πολλά επίπεδα ταλάντωσης και συνεπώς δεν είναι πολωμένο.

❑ Για την πόλωση του φυσικού φωτός χρησιμοποιούμε ειδικά πολωτικά φίλτρα. Μετά τη χρήση του φίλτρου το επίπεδο ταλάντωσης του κύματος είναι αυτό που καθορίζεται από το υλικό του φίλτρου. Η συσκευή που περιέχει το πολωτικό φίλτρο ονομάζεται πολωτής.

❑ 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. Τα γυαλιά ηλίου που διαθέτουν απορροφητικό φίλτρο polaroid έχουν τέτοια κατασκευή, ώστε το χαρακτηριστικό επίπεδο πόλωσης 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.

❑ Όταν το ορατό φως προσπίπτει σε ένα σύστημα σωμάτων, 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.

## ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

**1.** Οι αστρονόμοι ισχυρίζονται ότι η σημερινή εικόνα ενός γαλαξία στο τηλεσκόπιο αφορά κάποια στιγμή του παρελθόντος του. Πώς εξηγείτε αυτό τον ισχυρισμό;

**2.** Τι είναι το φως σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell;

**3.** Πώς ερμηνεύει η κβαντική θεωρία του Planck την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός;

**4.** Εξηγήστε γιατί, όταν φως διαπερνά μία διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών μέσων, η συχνότητά του παραμένει αμετάβλητη.

**5.** Εξηγήστε γιατί το μήκος κύματος μίας μονοχρωματικής ακτινοβολίας, που διαδίδεται σε δύο οπτικά υλικά μέσα, έχει μικρότερη τιμή στο πυκνότερο μέσο σε σχέση με αυτήν που έχει στο αραιότερο.

**6.** Όταν το φως μεταβαίνει από ένα μέσο σε κάποιο άλλο, ποια από τα παρακάτω μεγέθη μεταβάλλονται:

- α. το μήκος κύματός του,
- β. η συχνότητά του,
- γ. η ταχύτητά του;

**7.** Σημειώστε με Σ ή Λ όποιες από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστές ή λάθος αντίστοιχα:

- α. Το φως διαδίδεται σε όλα τα οπτικά υλικά μέσα με ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- β. Το φως διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα περίπου  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .
- γ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από πυκνότερο σε αραιότερο οπτικό υλικό μέσο.
- δ. Η ταχύτητα του φωτός μικραίνει, όταν το φως περνά από αραιότερο σε πυκνότερο οπτικό υλικό μέσο.

**8.** Ποιο φαινόμενο ονομάζεται διασκεδασμός του φωτός;

**9.** Κατά την ανάλυση του λευκού φωτός παίρνουμε μία ταινία με διάφορα χρώματα. Μπορείτε να εξηγήσετε γιατί συμβαίνει αυτό;

**10.** Φως μεγαλύτερου μήκους κύματος (ερυθρό) έχει μεγαλύτερη ταχύτητα σε ένα μέσο από φως μικρότερου μήκους κύματος (ιώδες); Εξηγήστε γιατί.

**11.** Δύο μονοχρωματικές ακτίνες φωτός, η κόκκινη

και η κίτρινη, εκτρέπονται από γυάλινο πρίσμα. Ποιες από τις προτάσεις που ακολουθούν είναι σωστές;

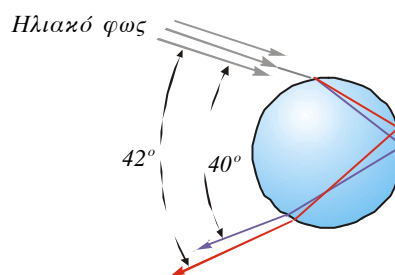
- α. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.
- β. Η γωνία εκτροπής της κόκκινης είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη της κίτρινης.
- γ. Η κόκκινη ακτίνα διαδίδεται στο γυαλί με μεγαλύτερη ταχύτητα από ό,τι η κίτρινη.
- δ. Η κόκκινη και η κίτρινη ακτίνα διαδίδονται στο γυαλί με την ίδια ταχύτητα.

**12.** Οι δείκτες διάθλασης ενός τυπικού γυαλιού, που ακολουθούν, αντιστοιχούν σε καθένα από τα χρώματα. Να κάνετε την αντιστοιχία χρώματος - δείκτη διάθλασης.

Ιώδες	1,530
Μπλε	1,520
Πράσινο	1,517
Κίτρινο	1,512
Πορτοκαλί	1,525
Κόκκινο	1,508

**13.** Ποια είναι τα χαρακτηριστικά του φωτός σε σχέση με τη διάδοσή του σε οπτικά μέσα;

**14.** Στο σχήμα βλέπουμε το ηλιακό φως να προσπίπτει σε σταγόνα βροχής. Ποια φαινόμενα παρατηρούνται κατά την πορεία των ακτίνων;



**15.** Το χρώμα του ουρανού είναι μπλε, γιατί...

- α. τα μόρια του αέρα είναι μπλε.
- β. η ίριδα των ματιών μας είναι μπλε.
- γ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μικρά μήκη κύματος.
- δ. η σκέδαση του φωτός είναι εντονότερη στα μεγάλα μήκη κύματος.

Ποια από τις παραπάνω προτάσεις είναι η σωστή;

**16.** Τι είναι τα πολωτικά φίλτρα ή πολωτές;

**17.** Χρησιμοποιούμε γυαλιά τύπου polaroid, για να «κόψουμε», όσο το δυνατόν, την αντηλιά (έντονη ανάκλαση) του φωτός που προκαλούν λείες επιφάνειες, όταν το φως προσπίπτει σ' αυτές (λόγου χάρη στην επιφάνεια της θάλασσας, όταν επικρατεί μπονάτσα). Ποια πρέπει να είναι η διεύθυνση της πόλωσης του υλικού polaroid, για να είναι τα γυαλιά αποτελεσματικά;

**18.** Να αναφέρετε τρεις τουλάχιστον ιδιότητες της υπεριώδους ακτινοβολίας οι οποίες μας πληροφορούν για την ύπαρξή της.

**19.** Με ποιο τρόπο αντιλαμβανόμαστε ότι πέρα από την ερυθρή περιοχή του φάσματος του ορατού φωτός υπάρχει αόρατη υπέρυθη ακτινοβολία;

**20.** Πώς ονομάζονται τα όργανα με τα οποία ανιχνεύεται η υπέρυθη ακτινοβολία και σε ποια αρχή

βασίζεται η λειτουργία τους;

**21.** Τι ονομάζουμε φυσικό και τι γραμμικά πολωμένο φως;

**22.** Γιατί οι αστροναύτες, όταν βρίσκονται στη Σελήνη, βλέπουν μαύρο τον ουρανό;

**23.** Μπορούμε με έναν πολωτή να αντιληφθούμε ότι το φως κάποιας πηγής που φθάνει στα μάτια μας είναι πολωμένο ή όχι; Μήπως είναι απαραίτητο να έχουμε δύο όμοιους πολωτές; Εξηγήστε γιατί.

**24.** Τι ονομάζουμε γωνία ολικής πόλωσης; Να γράψετε το νόμο του Brewster.

**25.** Το φως του ουρανού είναι:

- α. μερικώς πολωμένο,
- β. μόνο γραμμικά πολωμένο,
- γ. μη πολωμένο.

## ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

**1.** Σε ένα πείραμα μέτρησης της ταχύτητας του φωτός με τη μέθοδο του Fizeau η απόσταση μεταξύ της φωτεινής πηγής και του κατόπτρου είναι 12945m και ο τροχός έχει 720 διάκενα. Να υπολογίσετε την ελάχιστη συχνότητα περιστροφής του τροχού αυτού, αν η πειραματική ταχύτητα του φωτός που προέκυψε ήταν  $2,982 \times 10^8 \text{ m/s}$

**2.** Μία δέσμη φωτός που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος 600nm:

(α) Να υπολογίσετε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της δέσμης σε γυαλί με δείκτη διάθλασης 1,6.

(β) Ποια τιμή έχει το μήκος κύματος της δέσμης, όταν αυτή διαδίδεται στο γυαλί; Δίνεται ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι  $300000 \text{ km/s}$ .

**3.** Μονοχρωματική ακτίνα φωτός ορισμένης συχνότητας έχει μήκος κύματος 500nm, όταν διαδίδεται στο νερό. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος αυτού του φωτός, όταν διαδίδεται στο βενζόλιο. Οι δείκτες διάθλασης του νερού και του βενζολίου είναι αντίστοιχα 1,333 και 1,501.

**4.** Φως έχει μήκος κύματος 560nm στο κενό. Όταν διαδίδεται στο νερό, έχει ταχύτητα  $2,25 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Αν το φως αυτό διαδιδόταν στο νερό, ποιο θα ήταν τότε το μήκος κύματός του; Δίνεται ότι η ταχύτητα στο κενό είναι  $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ .

**5.** Φως που διαδίδεται στο κενό έχει μήκος κύματος  $\lambda_0$ . Όταν το ίδιο φως διαδίδεται στην αιθανόλη, έχει μήκος κύματος 440nm και στη γλυκερίνη 405nm. Ποιος είναι ο λόγος του δείκτη διάθλασης της αιθανόλης προς το δείκτη διάθλασης της γλυκερίνης σε μήκος κύματος  $\lambda_0$ ;

**6.** Φυσικό φως που διαδίδεται στον αέρα συναντά λεία επιφάνεια πάγου. Η ανακλώμενη ακτίνα βρέθηκε ολικώς πολωμένη. Να προσδιορίσετε τη γωνία πρόσπτωσης. Ο δείκτης διάθλασης του πάγου είναι 1,309.

**7.** Μονοχρωματική δέσμη φωτός που διαδίδεται στο νερό προσπίπτει σε γυάλινο κύβο, ο οποίος είναι βυθισμένος εξ ολοκλήρου στο νερό, υπό γωνία πρόσπτωσης  $50^\circ$ . Ένα μέρος της δέσμης ανακλάται, ενώ το άλλο διαθλάται. Αν η γωνία διάθλασης και η γωνία ανάκλασης έχουν άθροισμα  $90^\circ$ , να υπολογίσετε το δείκτη διάθλασης του γυάλινου κύβου για το φως αυτό, αν ο δείκτης διάθλασης του νερού είναι 1,333.

**8.** Μονοχρωματική δέσμη φυσικού φωτός που διαδίδεται στον αέρα προσπίπτει στη λεία επιφάνεια ενός κρυστάλλου χαλαζία υπό γωνία  $57^\circ$  (ως προς την κάθετο στο σημείο πρόσπτωσης). Η ανακλώμενη δέσμη βρέθηκε ότι είναι ολικώς πολωμένη:

- (α) Πόσος είναι ο δείκτης διάθλασης του χαλαζία;
- (β) Πόση είναι η γωνία διάθλασης;