

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 33

ΦΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Μέχρι την εποχή του Isaac Newton (Ισαάκ Νεύτωνας, 1642-1727), οι περισσότεροι επιστήμονες πίστευαν ότι το φως συνίσταται από δέσμες σωματιδίων (που τα ονόμαζαν *corpuscles*) τα οποία εξέπεμπαν οι φωτεινές πηγές. Κατά τις αρχές του 19ου αιώνα οι πειραματικές ενδείξεις της κυματικής φύσης του φωτός είχαν ήδη καταστεί ιδιαίτερα πειστικές.

Το 1873 ο Τζέιμς Κλαρκ Μάξγουελ προέβλεψε την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και υπολόγισε την ταχύτητα διάδοσής τους. Η εξέλιξη αυτή, καθώς και η πειραματική έρευνα του Χάινριχ Χερτς, που ξεκίνησε το 1887, απέδειξαν καθοριστικά ότι το φως είναι πράγματι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Οι Δύο Φύσεις του Φωτός

Παρ' όλα αυτά, η κυματική αναπαράσταση του φωτός δεν αποτελεί την πλήρη εικόνα του θέματος. Αρκετά φαινόμενα που σχετίζονται με την εκπομπή και την απορρόφηση του φωτός αφήνουν να διαφανεί και η σωματιδιακή του φύση, με την έννοια ότι η ενέργεια που μεταφέρεται από τα φωτεινά κύματα είναι «συσκευασμένη» σε διακριτές δεσμίδες που ονομάζονται *φωτόνια* ή *κβάντα*. Αυτή η φαινομενική αντίφαση μεταξύ της κυματικής και της σωματιδιακής φύσης υπερκεράστηκε από το 1930 με την ανάπτυξη της Κβαντικής Ηλεκτροδυναμικής, μιας ευρύτερης θεωρίας που εμπεριέχει τόσο τις κυματικές όσο και τις σωματιδιακές ιδιότητες του φωτός. Η *διάδοση* του φωτός περιγράφεται κάλλιστα από το κυματικό μοντέλο, αλλά η κατανόηση της εκπομπής και της απορρόφησης απαιτεί τη σωματιδιακή προσέγγιση.

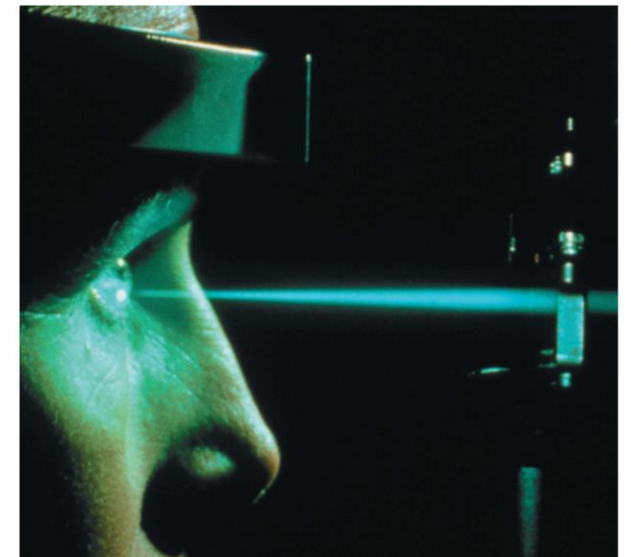
Η ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Οι στοιχειώδεις πηγές όλης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι τα επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία. Όλα τα σώματα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω της θερμικής κίνησης των μορίων τους. Φως παράγεται επίσης κατά τη διάρκεια ηλεκτρικών εκκενώσεων διαμέσου ιονισμένων αερίων. Στις περισσότερες φωτεινές πηγές το φως εκπέμπεται ανεξάρτητα από διαφορετικά άτομα μέσα στην πηγή· αντίθετα, σε ένα λέιζερ τα άτομα αναγκάζονται να εκπέμψουν φως κατά έναν συνεργατικό και σύμφωνο τρόπο. Το αποτέλεσμα είναι μια πολύ λεπτή δέσμη ακτινοβολίας.

33.1 Ένα ηλεκτρικό θερμαντικό στοιχείο εκπέμπει κυρίως υπέρυθη ακτινοβολία. Αν όμως η θερμοκρασία του είναι αρκετά υψηλή, εκπέμπει επίσης ένα σημαντικό ποσοστό ορατού φωτός.



33.2 Οι χειρουργοί οφθαλμιάτροι χρησιμοποιούν λέιζερ για την αποκατάσταση αποκολλημένων αμφιβληστροειδών χιτών και για την καυτηρίαση των αιμοφόρων αγγείων στην αμφιβληστροπάθεια. Παλμοί γαλαζοπράσινου φωτός από ένα λέιζερ αργού είναι ιδανικοί για τον σκοπό αυτό, αφού διέρχονται αβλαβώς από το διαφανές τμήμα του ματιού, απορροφώνται όμως από τις ερυθρές χρωστικές του αμφιβληστροειδούς.



Κύματα, Μέτωπα Κύματος και Ακτίνες

Χρησιμοποιούμε συχνά την έννοια του **μετώπου κύματος** για την περιγραφή της διάδοσης ενός κύματος. Ορίζουμε το μέτωπο κύματος ως *τον γεωμετρικό τόπο όλων των γειτονικών σημείων στα οποία η φάση της ταλάντωσης μιας φυσικής ποσότητας συνδεδεμένης με το κύμα είναι η ίδια*. Αυτό σημαίνει ότι κάθε χρονική στιγμή όλα τα σημεία ενός μετώπου κύματος βρίσκονται στο ίδιο μέρος του κύκλου της περιοδικής τους μεταβολής.

Όταν ρίχνουμε ένα βότσαλο σε μια ήρεμη δεξαμενή, οι εξαπλούμενοι κύκλοι που σχηματίζονται από τις κορυφές του κύματος, καθώς και οι κύκλοι που διαμορφώνονται από τις κοιλάδες μεταξύ τους, αποτελούν μέτωπα κύματος.

Ένα διάγραμμα ηχητικών κυμάτων δείχνει πιθανόν μόνο τις «κορυφές πίεσης», δηλαδή τις επιφάνειες σε όλη την έκταση των οποίων η πίεση είναι μέγιστη, ενώ ένα διάγραμμα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων θα έδειχνε μόνο τις «κορυφές» στις οποίες το ηλεκτρικό ή το μαγνητικό πεδίο είναι μέγιστο.

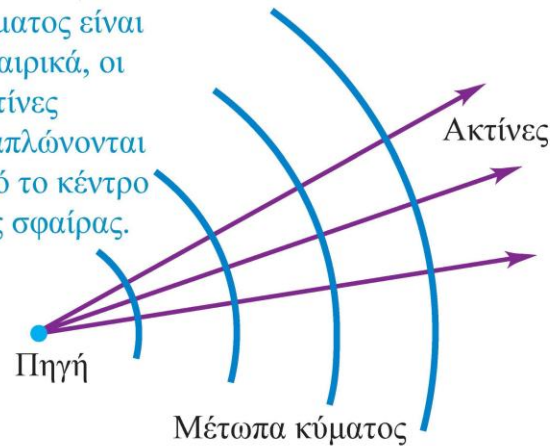
Ακτίνες διάδοσης

Όταν ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται από μια μικρή φωτεινή πηγή, μπορούμε να αναπαραστήσουμε τα μέτωπα κύματος με σφαιρικές επιφάνειες ομόκεντρες προς την πηγή ή, όπως στο Σχ. 33.4a, με τις κυκλικές τομές των επιφανειών αυτών με το επίπεδο του διαγράμματος. Για να περιγράψουμε τις διευθύνσεις διάδοσης του φωτός, είναι συχνά πρόσφορο να παριστάνουμε ένα φωτεινό κύμα με τη βοήθεια **ακτίνων**, σε αντιδιαστολή με την αναπαράστασή του από μέτωπα κύματος. Σύμφωνα με τη σωματιδιακή θεωρία του φωτός, οι ακτίνες είναι οι τροχιές των σωματιδίων. Από την κυματική σκοπιά, *μία ακτίνα είναι μια φανταστική γραμμή κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος*.

33.4 Μέτωπα κύματος (γαλάζια) και ακτίνες (μοβ).

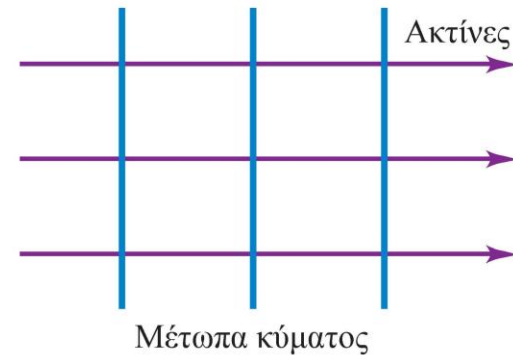
(a)

Όταν τα μέτωπα κύματος είναι σφαιρικά, οι ακτίνες εξαπλώνονται από το κέντρο της σφαίρας.



(b)

Όταν τα μέτωπα κύματος είναι επίπεδα, οι ακτίνες είναι κάθετες στα μέτωπα κύματος και παράλληλες μεταξύ τους.



Ο κλάδος της Οπτικής στον οποίο είναι επαρκής η περιγραφή με βάση τις οπτικές ακτίνες ονομάζεται **Γεωμετρική Οπτική**. ο κλάδος που πραγματεύεται ειδικά την κυματική συμπεριφορά ονομάζεται **Φυσική Οπτική**.

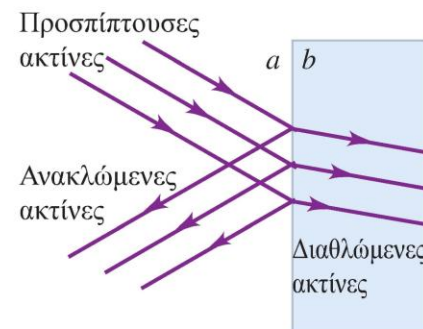
ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

33.5 (α) Ένα επίπεδο κύμα εν μέρει ανακλάται και εν μέρει διαθλάται στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ δύο μέσων (στην παρούσα περίπτωση του αέρα και του γυαλιού). Το φως που φθάνει στο εσωτερικό της καφετέριας διαθλάται δύο φορές, μία κατά την είσοδό του στο γυαλί και μία κατά την έξοδό του από το γυαλί. (β), (γ) Πώς το φως συμπεριφέρεται στη διεπιφάνεια μεταξύ του αέρα έξω από την καφετέρια (υλικό a) και του γυαλιού (υλικό b); Για την περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ, το υλικό b έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το υλικό a ($n_b > n_a$) και η γωνία θ_b είναι μικρότερη από τη γωνία θ_a .

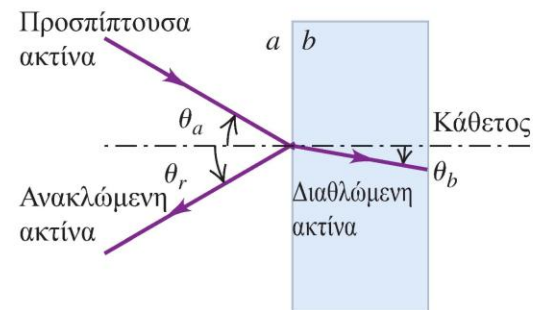
(α) Επίπεδα κύματα ανακλώνται και διαθλώνται από ένα παράθυρο



(β) Τα κύματα στον αέρα και το γυαλί αναπαριστούνται με ακτίνες



(γ) Η αναπαράσταση απλοποιείται με τη σχεδίαση ενός μόνο συνόλου αντιπροσωπευτικών ακτίνων



Περιγράφουμε τις διευθύνσεις της προσπίπτουσας, της ανακλώμενης και της διαθλώμενης (διαδιδόμενης) ακτίνας σε μια λεία διαχωριστική επιφάνεια (διεπιφάνεια) μεταξύ δύο οπτικών μέσων συναρτήσει των γωνιών που σχηματίζουν με την κάθετο προς την επιφάνεια στο σημείο πρόσπτωσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 33.5c.

ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΘΛΑΣΗ

Αν η διεπιφάνεια είναι τραχεία, τόσο το διαδιδόμενο όσο και το ανακλώμενο φως σκεδάζονται προς διάφορες διευθύνσεις, και δεν υπάρχει μία μόνη γωνία διάθλασης ή ανάκλασης. Η ανάκλαση υπό συγκεκριμένη γωνία από μία εντελώς λεία επιφάνεια ονομάζεται **κατοπτρική ανάκλαση**: η ανάκλαση λόγω σκέδασης από μια ανώμαλη επιφάνεια ονομάζεται **διάχυτη ανάκλαση** (Σχ. 33.6).

Ο **δείκτης διάθλασης** ενός οπτικού υλικού, που συμβολίζεται με n , παίζει καθοριστικό ρόλο στη Γεωμετρική Οπτική και ορίζεται ως:

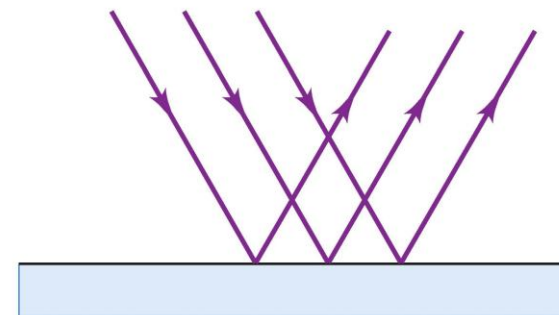
$$\text{Δείκτης διάθλασης ενός οπτικού υλικού} \quad n = \frac{c}{v} \quad (33.1)$$

c ← Ταχύτητα του φωτός στο κενό
 v ← Ταχύτητα του φωτός στο υλικό

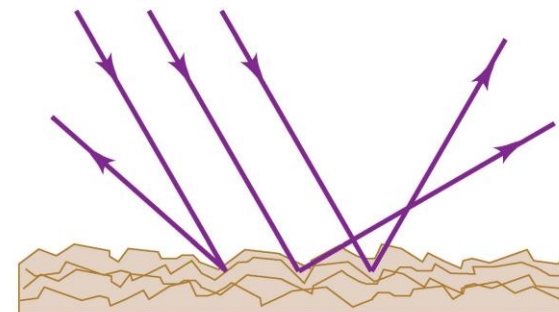
Το φως πάντοτε διαδίδεται *πιο αργά* μέσα σε ένα υλικό απ' ό,τι στο κενό, άρα η τιμή του n για οποιοδήποτε μέσο πλην του κενού είναι πάντα μεγαλύτερη της μονάδας. Για το κενό, $n = 1$. Αφού ο n είναι ο λόγος δύο ταχυτήτων, είναι ένας καθαρός αριθμός χωρίς μονάδες.

33.6 Δύο τύποι ανάκλασης.

(a) Κατοπτρική ανάκλαση



(b) Διάχυτη ανάκλαση



Οι Νόμοι της Ανάκλασης και της Διάθλασης

1. Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα, καθώς και η κάθετος προς την επιφάνεια, βρίσκονται όλες στο ίδιο επίπεδο. Το επίπεδο αυτό ονομάζεται **επίπεδο πρόσπτωσης** και είναι κάθετο προς το επίπεδο της συνοριακής επιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών.
2. Η γωνία ανάκλασης θ_r είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης θ_a για οποιοδήποτε μήκος κύματος και για οποιοδήποτε ζεύγος υλικών.

Νόμος της ανάκλασης:

$$\theta_r = \theta_a \quad \text{(33.2)}$$

Γωνία ανάκλασης (μετρούμενη από την κάθετο) Γωνία πρόσπτωσης (μετρούμενη από την κάθετο)

3. Για μονοχρωματικό φως και για ένα δεδομένο ζεύγος υλικών a και b εκατέρωθεν της διεπιφάνειας, ο λόγος των ημίτονων των γωνιών θ_a και θ_b , οι οποίες μετρώνται και οι δύο από την κάθετο στην επιφάνεια, ισούται με το αντίστροφο του λόγου των δύο δεικτών διάθλασης:

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \quad \text{(33.3)}$$

ή

Νόμος της διάθλασης:

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b \quad \text{(33.4)}$$

Γωνία πρόσπτωσης (μετρούμενη από την κάθετο) Γωνία διάθλασης (μετρούμενη από την κάθετο)

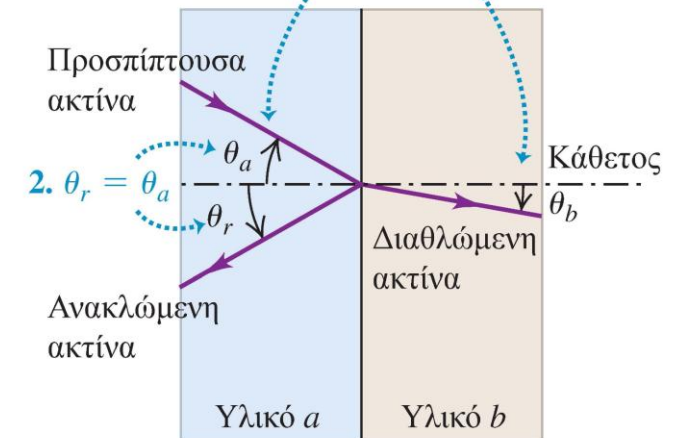
Δείκτης διάθλασης του υλικού στην πλευρά του προσπίπτοντος φωτός Δείκτης διάθλασης του υλικού στην πλευρά του διαθλώμενου φωτός

Ενώ τα αποτελέσματα αυτά παρατηρήθηκαν πρώτα πειραματικά, μπορούν να εξαχθούν και θεωρητικά με χρήση της κυματικής περιγραφής του φωτός.

[Σελίδες 1191-1192]

33.7 Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης.

1. Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα, καθώς και η κάθετος προς την επιφάνεια βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Οι γωνίες θ_a , θ_b , και θ_r μετρώνται από την κάθετο.



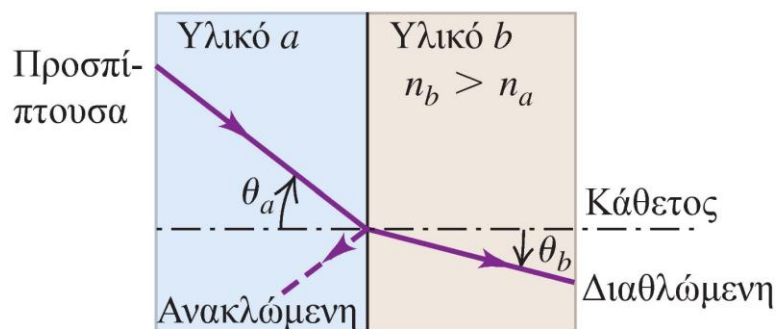
2. $\theta_r = \theta_a$
3. Όταν μονοχρωματικό φως διέρχεται από μια διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα σε δύο υλικά a και b , οι γωνίες θ_a και θ_b συνδέονται με τους δείκτες διάθλασης των a και b μέσω της σχέσης.

$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a}$$

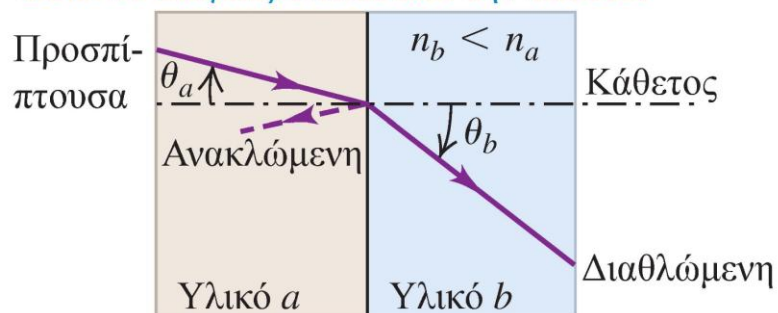
Οι Νόμοι της Ανάκλασης και της Διάθλασης

33.8 Ανάκλαση και διάθλαση σε τρεις περιπτώσεις. (a) Το υλικό b έχει μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης από το υλικό a . (b) Το υλικό b έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από το υλικό a . (c) Η προσπίπτουσα φωτεινή ακτίνα είναι κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των υλικών.

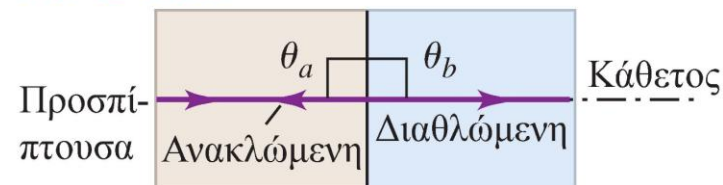
(a) Μία ακτίνα που εισέρχεται σε ένα υλικό με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης κάμπτεται ώστε να προσεγγίζει την κάθετο.



(b) Μία ακτίνα που εισέρχεται σε ένα υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης κάμπτεται ώστε να απομακρύνεται από την κάθετο.



(c) Μία ακτίνα με διεύθυνση κατά μήκος της κάθετου δεν κάμπτεται, ανεξάρτητα από τα υλικά.



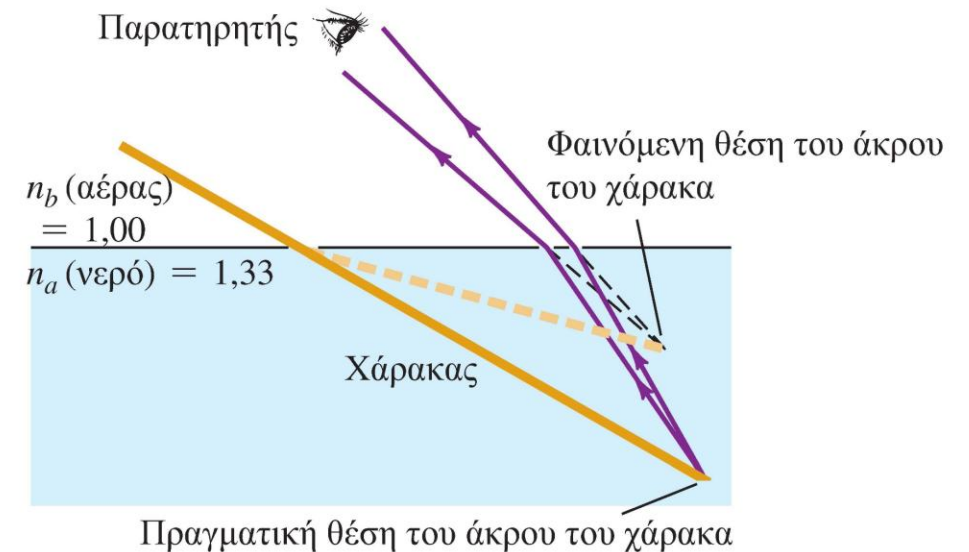
Οι Νόμοι της Ανάκλασης και της Διάθλασης

33.9 (a) Αυτός ο χάρακας είναι στην πραγματικότητα ευθύς, αλλά μοιάζει να κάμπτεται στην επιφάνεια του νερού. (b) Οι φωτεινές ακτίνες από οποιοδήποτε βυθισμένο αντικείμενο κάμπτονται απομακρυνόμενες από την κάθετο όταν εισέρχονται στον αέρα. Όπως φαίνεται από παρατηρητή πάνω από την επιφάνεια του νερού, το αντικείμενο δείχνει να βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια απ' ό,τι είναι στην πραγματικότητα.

(a) Ένας ευθύς χάρακας μισοβυθισμένος στο νερό



(b) Γιατί ο χάρακας φαίνεται λυγισμένος



Δείκτης Διάθλασης και Κυματικά Χαρακτηριστικά του Φωτός

Πρώτον, η συχνότητα f του κύματος δεν αλλάζει όταν το φως περνά από ένα υλικό σε ένα άλλο. Δηλαδή, ο αριθμός των κυματικών κύκλων που φθάνουν ανά μονάδα χρόνου πρέπει να είναι ίσος με τον αριθμό των κύκλων που αφήνουν τη διεπιφάνεια ανά μονάδα χρόνου.

Δεύτερον, το μήκος κύματος λ είναι γενικά διαφορετικό σε διαφορετικά υλικά. Αυτό συμβαίνει γιατί σε κάθε υλικό ισχύει $v = \lambda f$ αφού η f είναι η ίδια σε κάθε υλικό, όπως και στο κενό, και καθώς η v είναι πάντοτε μικρότερη από την ταχύτητα του κύματος στο κενό c , το λ μειώνεται επίσης αναλόγως.

$$\text{Μήκος κύματος του φωτός σε ένα υλικό} \quad \lambda = \frac{\lambda_0}{n} \quad \text{Μήκος κύματος του φωτός στο κενό} \quad \text{Δείκτης διάθλασης του υλικού} \quad (33.5)$$

Όταν ένα κύμα διέρχεται από ένα υλικό σε ένα δεύτερο υλικό με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, έτσι ώστε $n_b > n_a$, η κυματική ταχύτητα μειώνεται.

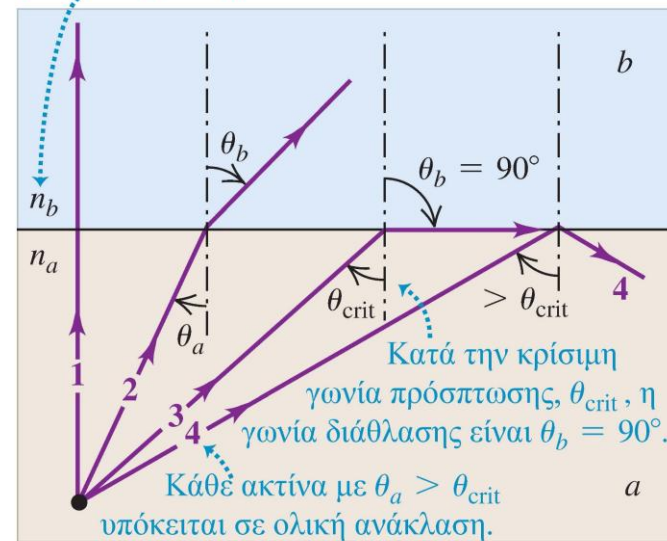
ΟΛΙΚΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗ ΑΝΑΚΛΑΣΗ

Υπό ορισμένες προϋποθέσεις, το φως ανακλάται εξ *ολοκλήρου* στη διεπιφάνεια, χωρίς να λαμβάνει χώρα καθόλου διάδοση του φωτός, μολονότι το δεύτερο υλικό είναι διαφανές. Το Σχ. 33.13α δείχνει πώς μπορεί να συμβεί αυτό. Εκεί φαίνονται διάφορες ακτίνες που εκπέμπονται από μια σημειακή πηγή μέσα σε ένα υλικό a με δείκτη διάθλασης n_a . Οι ακτίνες προσπίπτουν στην επιφάνεια ενός δεύτερου υλικού b με δείκτη διάθλασης n_b , όπου $n_a > n_b$. Από τον νόμο της διάθλασης του Snell, προκύπτει ότι θ με δείκτη a μικρότερο του θ_b .

33.13 (α) Ολική εσωτερική ανάκλαση. Η γωνία πρόσπτωσης, για την οποία η γωνία διάθλασης είναι 90° , ονομάζεται κρίσιμη ή ορική γωνία: Αυτή είναι η περίπτωση για την ακτίνα 3. Τα ανακλώμενα ποσοστά των ακτίνων 1, 2 και 3 έχουν παραλειφθεί για λόγους ευκρίνειας. (b) Ακτίνες λείζερ εισέρχονται από το πάνω μέρος του νερού στο ενυδρείο· ανακλώνται στον πυθμένα από κάτοπτρα που έχουν τοποθετηθεί εκεί υπό κλίσεις που διαφέρουν λίγο μεταξύ τους. Μία ακτίνα υφίσταται ολική ανάκλαση στη διαχωριστική επιφάνεια αέρα-νερού.

(α) Ολική εσωτερική ανάκλαση

Η ολική εσωτερική ανάκλαση λαμβάνει χώρα μόνο αν $n_b < n_a$.



(b) Μία φωτεινή ακτίνα εισέρχεται από πάνω αριστερά στο δοχείο.



Είναι δυνατόν να βρούμε την κρίσιμη γωνία για δύο δεδομένα υλικά a και b αν θέσουμε στον νόμο του Snell $\theta_b = 90^\circ$ ($\sin \theta_b = 1$).

Κρίσιμη γωνία για ολική εσωτερική ανάκλαση

$$\sin \theta_{\text{crit}} = \frac{n_b}{n_a}$$

Δείκτης διάθλασης του δεύτερου υλικού
Δείκτης διάθλασης του πρώτου υλικού

(33.6)

Εφαρμογές της Ολικής Εσωτερικής Ανάκλασης

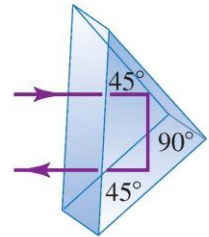
Η ολική εσωτερική ανάκλαση βρίσκει πολυάριθμες εφαρμογές στην οπτική τεχνολογία. Για παράδειγμα, θεωρήστε ένα γυαλί με δείκτη διάθλασης $n = 1,52$. Όταν φως διαδίδεται μέσα σε αυτό το γυαλί και συναντήσει μια διεπιφάνεια γυαλιού-αέρα, η κρίσιμη γωνία είναι

$$\sin \theta_{\text{crit}} = \frac{1}{1,52} = 0,658 \quad \theta_{\text{crit}} = 41,1^\circ$$

Το φως θα ανακλαστεί ολικά όταν προσπίπτει στη διεπιφάνεια γυαλιού-αέρα υπό γωνία $41,1^\circ$ ή μεγαλύτερη.

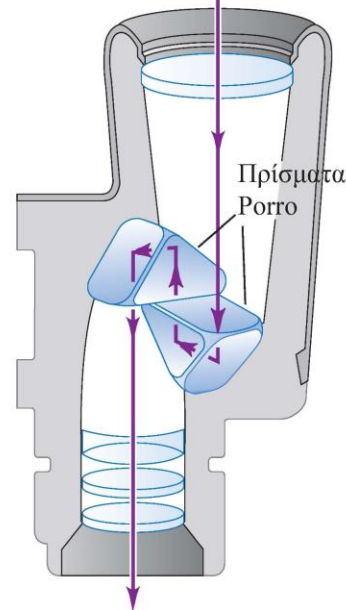
33.14

(α) Ολική εσωτερική ανάκλαση σε ένα πρίσμα Porro.

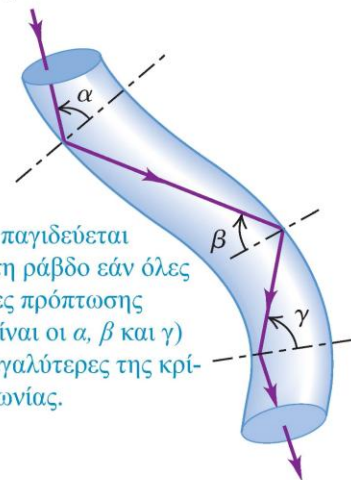


Αν η προσπίπτουσα δέσμη κατευθύνεται όπως φαίνεται στο σχήμα, η ολική εσωτερική ανάκλαση λαμβάνει χώρα στις έδρες των 45° (διότι, για μια διεπιφάνεια γυαλιού-αέρα, $\theta_{\text{crit}} = 41,1^\circ$).

(β) Στη διόπτρα (κιάλια) χρησιμοποιούνται πρίσματα Porro για την ανάκλαση του φωτός σε κάθε προσοφθάλμιο.

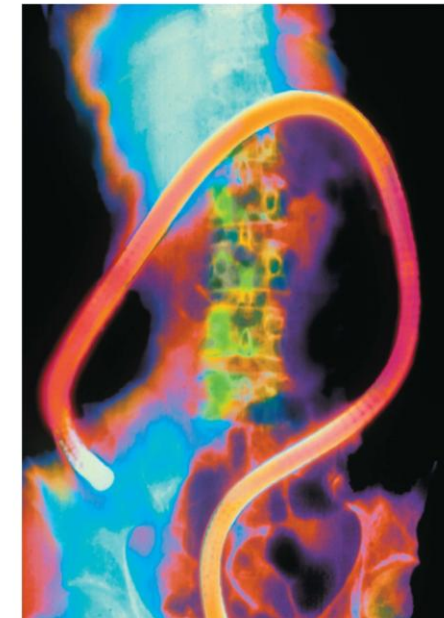


33.15 Μια διάφανη ράβδος με δείκτη διάθλασης μεγαλύτερο από αυτόν του υλικού που την περιβάλλει.



Το φως παγιδεύεται μέσα στη ράβδο εάν όλες οι γωνίες πρόσπτωσης (όπως είναι οι α , β και γ) είναι μεγαλύτερες της κρίσιμης γωνίας.

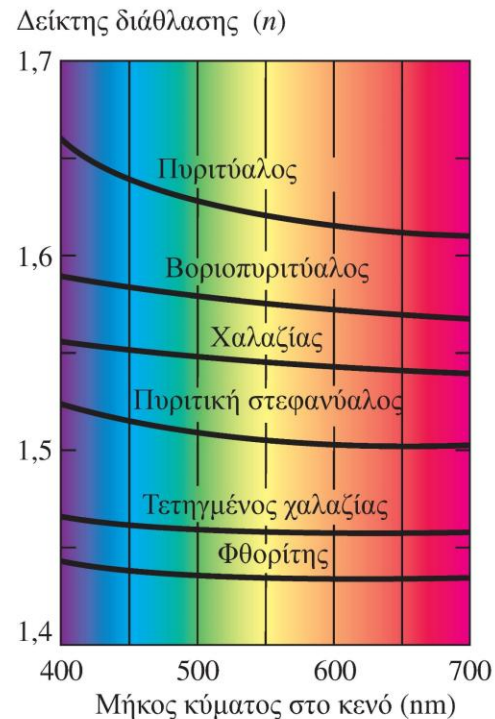
33.16 Αυτή η έγχρωμη εικόνα ακτίνων Χ της κοιλιάς ενός ασθενή δείχνει την ελίκωση του ενδοσκοπίου μέσα στο παχύ έντερο.



ΔΙΑΣΚΕΔΑΣΜΟΣ

Το φυσικό λευκό φως είναι μια υπέρθεση κυμάτων με μήκη κύματος που εκτείνονται σε όλο το ορατό φάσμα. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι η ίδια για όλα τα μήκη κύματος, αλλά η ταχύτητά του σε ένα υλικό μέσο είναι διαφορετική για διαφορετικά μήκη κύματος. Επομένως, ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού εξαρτάται από το μήκος κύματος. Η εξάρτηση της ταχύτητας του κύματος και του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος ονομάζεται **διασκεδασμός**.

33.17 Μεταβολή του δείκτη διάθλασης n συναρτήσει του μήκους κύματος για διάφορα διαφανή υλικά. Ο οριζόντιος άξονας δείχνει το μήκος κύματος λ_0 του φωτός στο κενό· το μήκος κύματος στο υλικό είναι ίσο με $\lambda = \lambda_0/n$.



33.18 Διασκεδασμός του φωτός από ένα πρίσμα. Η ταινία των χρωμάτων ονομάζεται φάσμα.



Ουράνια τόξα

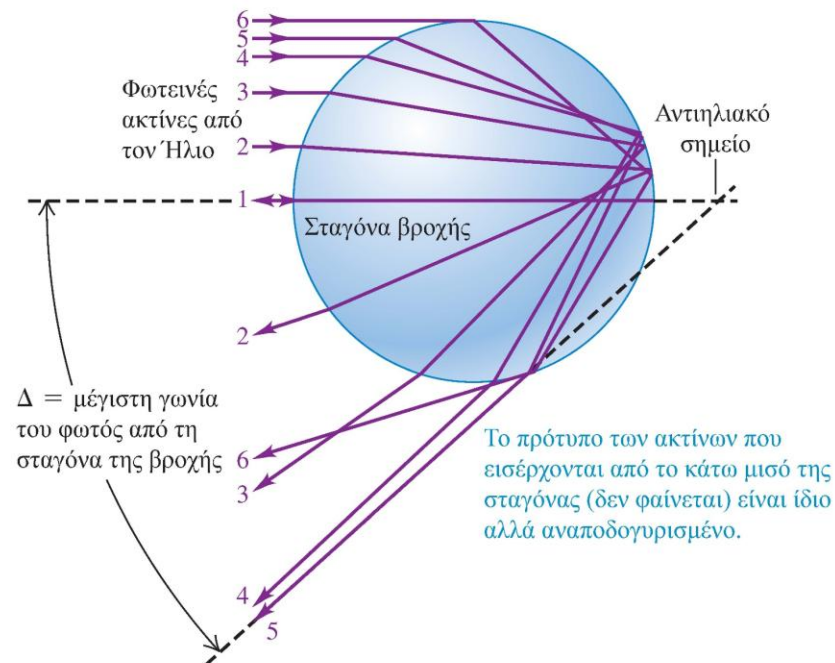
Στο Σχ. 33.19a, βλέπετε τον συνδυασμό των φαινομένων του διασκεδασμού, της διάθλασης και της ανάκλασης. Το φως του Ήλιου έρχεται από πίσω σας, εισέρχεται μέσα σε ένα σταγονίδιο νερού, υφίσταται (μερική) ανάκλαση στην πίσω επιφάνεια του σταγονιδίου και διαθλάται και πάλι εξερχόμενο από το σταγονίδιο (Σχ. 33.19b).

33.19 Πώς σχηματίζονται τα ουράνια τόξα.

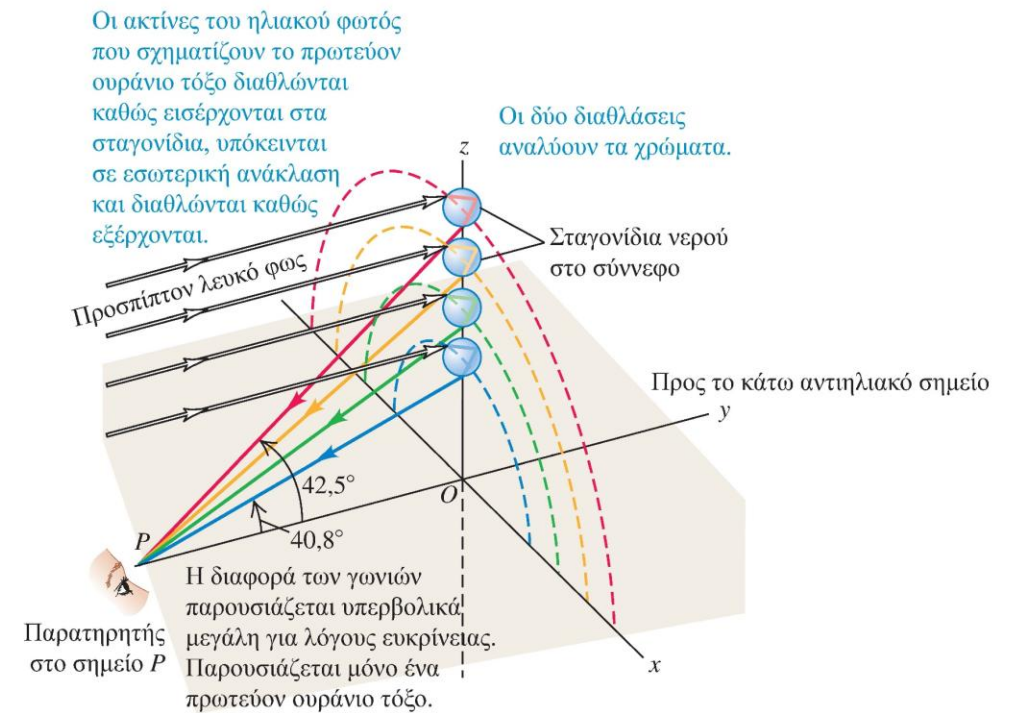
(a) Ένα διπλό ουράνιο τόξο.



(b) Πορείες των φωτεινών ακτίνων που εισέρχονται στο πάνω μισό μιας σταγόνας βροχής.



(c) Σχηματισμός ενός ουράνιου τόξου. Ο Ήλιος σε αυτήν την εικόνα είναι ακριβώς πίσω από τον παρατηρητή στο σημείο P.



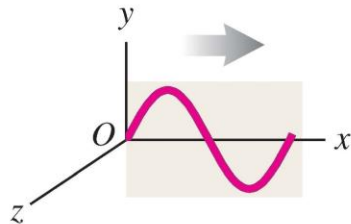
ΠΟΛΩΣΗ

Η *πόλωση* είναι ένα χαρακτηριστικό όλων των εγκάρσιων κυμάτων.

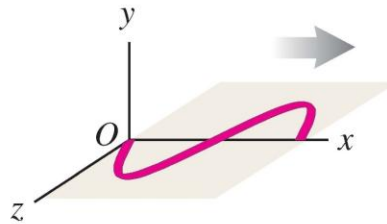
Όταν ένα κύμα έχει μετατοπίσεις μόνο κατά τη διεύθυνση y , λέμε ότι είναι **γραμμικά πολωμένο** στη διεύθυνση y . Ένα κύμα με μετατοπίσεις μόνο στη διεύθυνση z είναι γραμμικά πολωμένο στη διεύθυνση z . Για μηχανικά κύματα μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα **πολωτικό φίλτρο** ή έναν **πολωτή** που να επιτρέπει να διέρχονται μόνο κύματα με ορισμένη διεύθυνση πόλωσης.

33.20 (a), (b) Πολωμένα κύματα σε μία χορδή. (c) Παραγωγή ενός πολωμένου κύματος σε μία χορδή από ένα μη πολωμένο με τη χρήση πολωτικού φίλτρου.

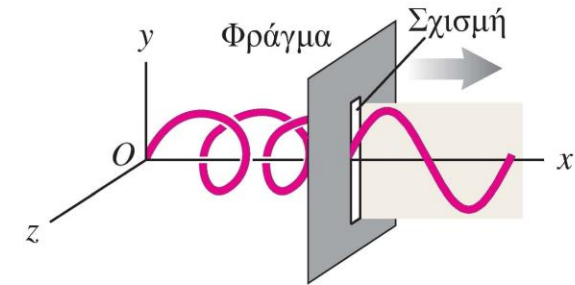
(a) Εγκάρσιο κύμα που είναι γραμμικά πολωμένο στη διεύθυνση y



(b) Εγκάρσιο κύμα που είναι γραμμικά πολωμένο στη διεύθυνση z



(c) Η σχισμή λειτουργεί ως πολωτικό φίλτρο, επιτρέποντας μόνο τη διέλευση συνιστωσών που είναι πολωμένες στη διεύθυνση y



Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι ένα εγκάρσιο κύμα· τα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία είναι κάθετα τόσο μεταξύ τους όσο και προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Ορίζουμε πάντοτε ως διεύθυνση πόλωσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος τη διεύθυνση του διανύσματος του *ηλεκτρικού πεδίου* $\mathbf{E}$. Έτσι, το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που περιγράφεται

$$\mathbf{E}(x, t) = jE_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\mathbf{B}(x, t) = kB_{\max} \cos(kx - \omega t)$$

λέγεται ότι είναι πολωμένο στη διεύθυνση y , επειδή το ηλεκτρικό πεδίο έχει μόνο συνιστώσα y .

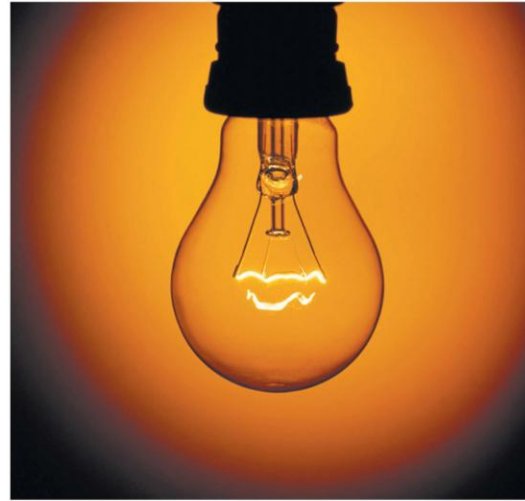
Πολωτικά Φίλτρα

33.21 (a) Τα ηλεκτρόνια στην κόκκινη και λευκή κεραία αναμετάδοσης ταλαντώνονται κατακόρυφα, παράγοντας κατακόρυφα πολωμένα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται μακριά από την κεραία στην οριζόντια διεύθυνση. (Οι μικρές γκρι κεραίες είναι για την αναμετάδοση σημάτων κινητής τηλεφωνίας.) (b) Ανεξάρτητα από το πώς αυτή η λάμπα είναι προσανατολισμένη, η τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων στο νήμα παράγει μη πολωμένα φωτεινά κύματα.

(a)

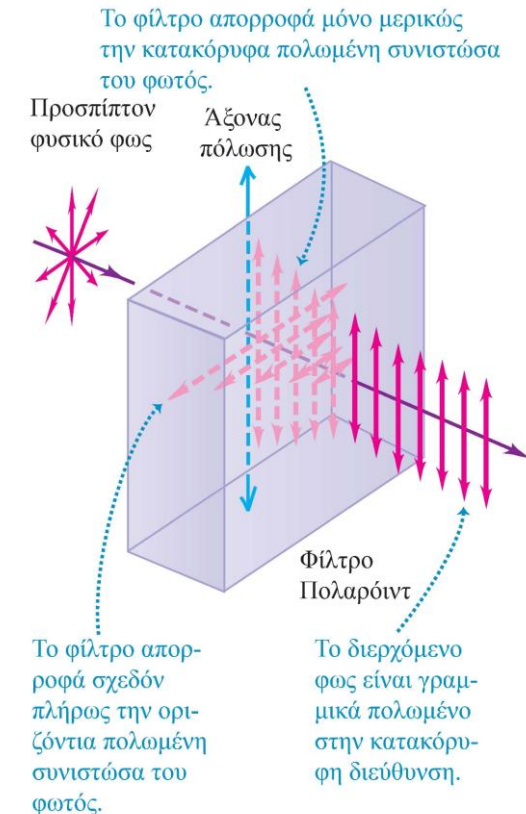


(b)



Το φως που εκπέμπεται από τους λαμπτήρες πυρακτώσεως και τις λυχνίες φθορισμού δεν είναι πολωμένο (Σχ. 33.21b). Οι «κεραίες» που ακτινοβολούν εδώ τα φωτεινά κύματα είναι τα μόρια που συνιστούν τις πηγές. Τα κύματα που εκπέμπονται από κάθε μόριο είναι πιθανόν γραμμικά πολωμένα, όπως συμβαίνει και με τα κύματα από μια κεραία ραδιοκυμάτων. Αλλά μια οποιαδήποτε πραγματική φωτεινή πηγή αποτελείται από έναν τεράστιο αριθμό μορίων με τυχαίους προσανατολισμούς, έτσι το εκπεμπόμενο φως είναι ένα τυχαίο μείγμα κυμάτων που είναι γραμμικά πολωμένα σε όλες τις δυνατές εγκάρσιες διευθύνσεις. Ένα τέτοιο φως ονομάζεται **μη πολωμένο φως** ή **φυσικό φως**.

33.22 Ένα φίλτρο Πολαρόιντ φωτίζεται με μη πολωμένο, φυσικό φως (που σχεδιάζεται με διανύσματα E , τα οποία κατευθύνονται προς όλες τις διευθύνσεις κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης). Το διερχόμενο φως είναι γραμμικά πολωμένο κατά μήκος του άξονα πόλωσης (σχεδιάζεται με διανύσματα E κατά μήκος μόνο της διεύθυνσης πόλωσης).



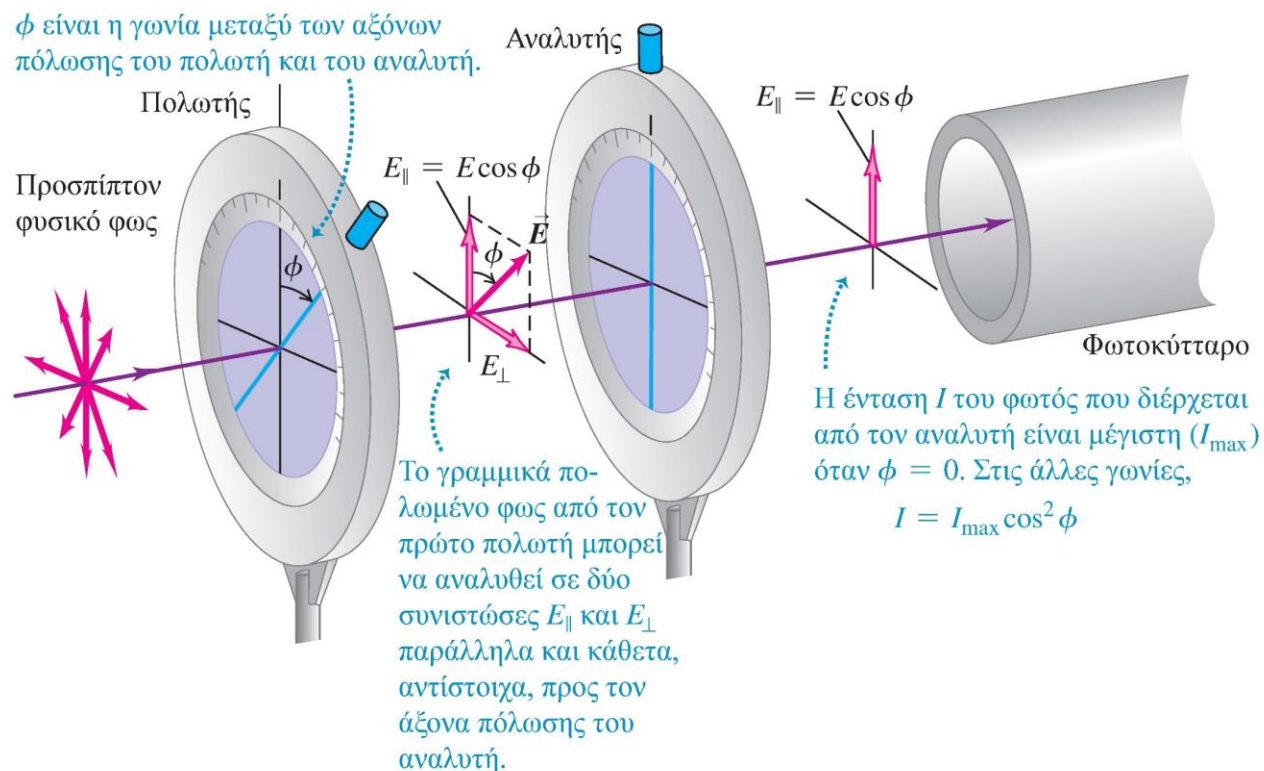
Χρήση των Πολωτικών Φίλτρων

33.23 Μη πολωμένο, φυσικό φως προσπίπτει σε ένα πολωτικό φίλτρο. Το φωτοκύτταρο μετρά την ένταση του διερχόμενου, γραμμικά πολωμένου φωτός.



Η ένταση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους του κύματος.

33.24 Ένας ιδανικός αναλυτής επιτρέπει τη διέλευση μόνο της συνιστώσας του ηλεκτρικού πεδίου που είναι παράλληλη προς τη διεύθυνση διάδοσής του (δηλαδή προς τον άξονα πόλωσης του).



Ένταση του πολωμένου φωτός που διέρχεται από έναν αναλυτή

Νόμος του Malus: $I = I_{\max} \cos^2 \phi$

Μέγιστη διερχόμενη ένταση

Γωνία μεταξύ του άξονα πόλωσης του φωτός και του άξονα πόλωσης του αναλυτή

(33.7)

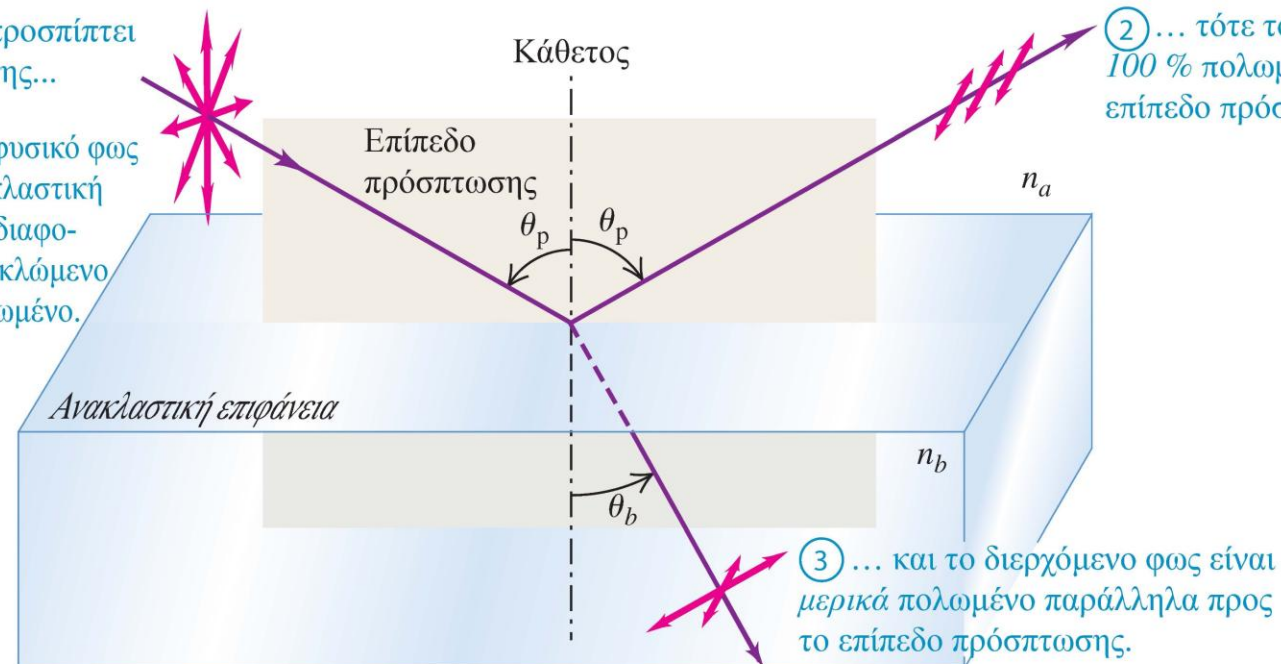
Πόλωση από Ανάκλαση

Το φυσικό φως μπορεί να πολωθεί, μερικά ή ολικά, με ανάκλαση. Για τις περισσότερες γωνίες πρόσπτωσης, κύματα των οποίων το ηλεκτρικό πεδίο E είναι κάθετο προς το επίπεδο πρόσπτωσης (δηλαδή είναι παράλληλο προς την ανακλαστική επιφάνεια) ανακλώνται ισχυρότερα από τα κύματα των οποίων το E βρίσκεται πάνω στο επίπεδο αυτό. Στην περίπτωση αυτή, το ανακλώμενο φως είναι *μερικά πολωμένο* στη διεύθυνση που είναι κάθετη προς το επίπεδο πρόσπτωσης. Αλλά για μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, που ονομάζεται **γωνία πόλωσης** θ_p , το φως του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο E βρίσκεται πάνω στο επίπεδο πρόσπτωσης δεν ανακλάται καθόλου, αλλά διαθλάται πλήρως. Στην ίδια αυτή γωνία πρόσπτωσης, το φως του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο E είναι κάθετο προς το επίπεδο πρόσπτωσης ανακλάται μερικώς.

33.26 Όταν φυσικό φως προσπίπτει σε μια ανακλαστική επιφάνεια υπό τη γωνία πόλωσης, το ανακλώμενο φως είναι γραμμικά πολωμένο.

① Αν φυσικό φως προσπίπτει υπό τη γωνία πόλωσης...

④ Εναλλακτικά, αν φυσικό φως προσπίπτει στην ανακλαστική επιφάνεια υπό γωνία διαφορετική της θ_p , το ανακλώμενο φως είναι μερικά πολωμένο.



Πόλωση από Ανάκλαση

$$n_a \sin \theta_p = n_b \sin \theta_b = n_b \sin(90^\circ - \theta_p) = n_b \cos \theta_p$$

Γωνία πόλωσης (γωνία πρόσπτωσης για την οποία το ανακλώμενο φως είναι 100 % πολωμένο)

Νόμος του Brewster για τη γωνία πόλωσης:

$$\tan \theta_p = \frac{n_b}{n_a}$$

Δείκτης διάθλασης του δεύτερου υλικού

Δείκτης διάθλασης του πρώτου υλικού

(33.8)

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως **νόμος του Brewster**. Αν και ανακαλύφθηκε πειραματικά, είναι δυνατόν να εξαχθεί και από το κυματικό πρότυπο με χρήση των εξισώσεων του Maxwell.

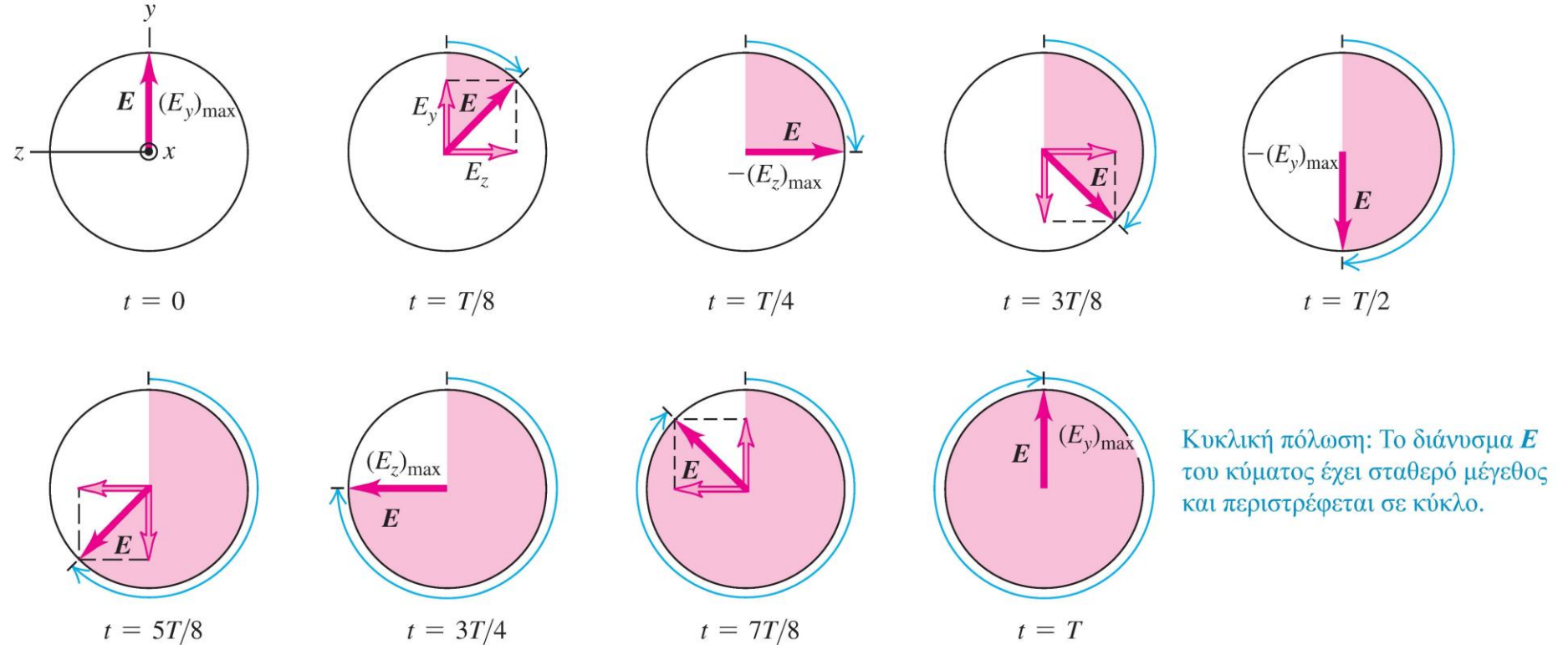
Η πόλωση από ανάκλαση είναι ο λόγος για τον οποίο τα πολωτικά φίλτρα χρησιμοποιούνται ευρέως στα γυαλιά ηλίου

Κυκλική και Ελλειπτική Πόλωση

Το φως, και γενικά η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μπορεί ακόμη να έχει *κυκλική* ή *ελλειπτική* πόλωση.

Δύο ημιτονοειδή κύματα ίσου πλάτους, πολωμένα κατά μήκος των διευθύνσεων y και z και με διαφορά φάσης ενός τεταρτοκυκλίου ($\pi/2$), έρχονται σε επαλληλία. Το αποτέλεσμα είναι ένα κύμα στο οποίο το διάνυσμα $\mathbf{E}$ σε κάθε σημείο έχει σταθερό μέγεθος, αλλά *περιστρέφεται* γύρω από τη διεύθυνση διάδοσης. Το κύμα στο Σχ. 33.29 διαδίδεται προς εσάς και το διάνυσμα $\mathbf{E}$ εμφανίζεται να περιστρέφεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, οπότε ονομάζεται *δεξιόστροφα κυκλικά* πολωμένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

33.29 Κυκλική πόλωση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος διαδιδόμενου προς εσάς, κατά μήκος του άξονα x . Η συνιστώσα y του $\mathbf{E}$ καθυστερεί, σε σχέση με τη συνιστώσα z , κατά ένα τεταρτοκύκλιο. Αυτή η διαφορά φάσης οδηγεί σε δεξιόστροφη κυκλική πόλωση.



Κυκλική πόλωση: Το διάνυσμα $\mathbf{E}$ του κύματος έχει σταθερό μέγεθος και περιστρέφεται σε κύκλο.

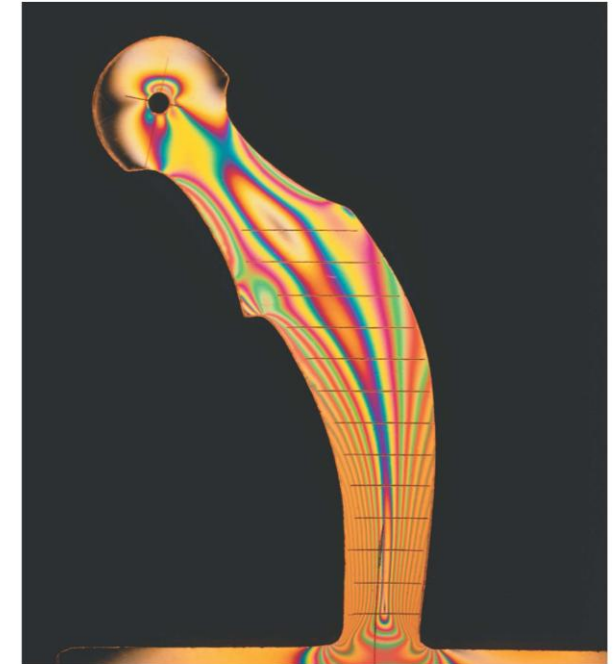
Αν η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο συνιστώντων κυμάτων είναι διαφορετική του τεταρτοκυκλίου, ή αν τα δύο συνιστώντα κύματα έχουν διαφορετικά πλάτη, τότε το συνιστάμενο πεδίο $\mathbf{E}$ κάθε σημείο της χορδής διαγράφει όχι μία περιφέρεια κύκλου αλλά μία *έλλειψη*. Το προκύπτον κύμα λέγεται ότι είναι *ελλειπτικά πολωμένο*.

Διπλοθλαστικότητα – Φωτοελαστικότητα

Για το φως, η διαφορά φάσης μπορεί να εισαχθεί αν χρησιμοποιηθεί ένα υλικό που εμφανίζει *διπλοθλαστικότητα* – δηλαδή παρουσιάζει διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για διαφορετικές διευθύνσεις πόλωσης. Όταν δύο κύματα ίσου πλάτους, τα οποία είναι πολωμένα σε κάθετες διευθύνσεις πόλωσης, εισέρχονται σε ένα τέτοιο υλικό, οδεύουν με διαφορετικές ταχύτητες. Αν έχουν την ίδια φάση όταν εισέρχονται στο υλικό, οι φάσεις τους γενικά δεν συμπίπτουν πλέον όταν εξέρχονται από το υλικό. Αν ο κρύσταλλος είχε ακριβώς το απαιτούμενο πάχος, ώστε να επιτυγχάνεται η εισαγωγή διαφοράς φάσης $\pi/2$ – η οποία αντιστοιχεί σε ένα τεταρτοκύκλιο –, τότε ο κρύσταλλος μετατρέπει γραμμικά πολωμένο φως σε κυκλικά πολωμένο. Ένας τέτοιος κρύσταλλος ονομάζεται *πλακίδιο $\lambda/4$* .

Μερικά οπτικά υλικά δεν είναι υπό φυσιολογικές συνθήκες διπλοθλαστικά, μπορούν όμως να γίνουν αν υποβληθούν σε μηχανική τάση. Αυτή είναι η βάση της επιστήμης της *φωτοελαστικότητας*. Οι τάσεις που αναπτύσσονται σε δοκούς, στα τοιχώματα ενός λέβητα, στο σύστημα δοντιών ενός γραναζιού, καθώς και στις κολόνες ενός καθεδρικού ναού μπορούν να αναλυθούν ως εξής: κατασκευάζεται ένα διαφανές ομοίωμα του αντικειμένου, συνήθως από ένα πλαστικό υλικό, υποβάλλεται σε μηχανική τάση και στη συνέχεια εξετάζεται μεταξύ ενός πολωτή και ενός αναλυτή με κάθετους τους άξονες πόλωσής τους (διασταυρωμένους). Με τις οπτικές αυτές μεθόδους μπορούν να μελετηθούν ιδιαίτερα πολύπλοκες κατανομές τάσεων.

33.30 Αυτό το πλαστικό ομοίωμα τεχνητής άρθρωσης ισχίου φωτογραφήθηκε μεταξύ δύο πολωτικών φίλτρων (ενός πολωτή και ενός αναλυτή) με κάθετους άξονες πόλωσης. Η έγχρωμη εικόνα συμβολής αποκαλύπτει τη διεύθυνση και το μέγεθος των τάσεων στο ομοίωμα. Οι μηχανικοί χρησιμοποιούν αυτά τα αποτελέσματα για να βοηθήσουν στον σχεδιασμό της ρεαλιστικής άρθρωσης του ισχίου (που χρησιμοποιείται στη χειρουργική επέμβαση αντικατάστασης ισχίου), η οποία είναι κατασκευασμένη από μέταλλο.

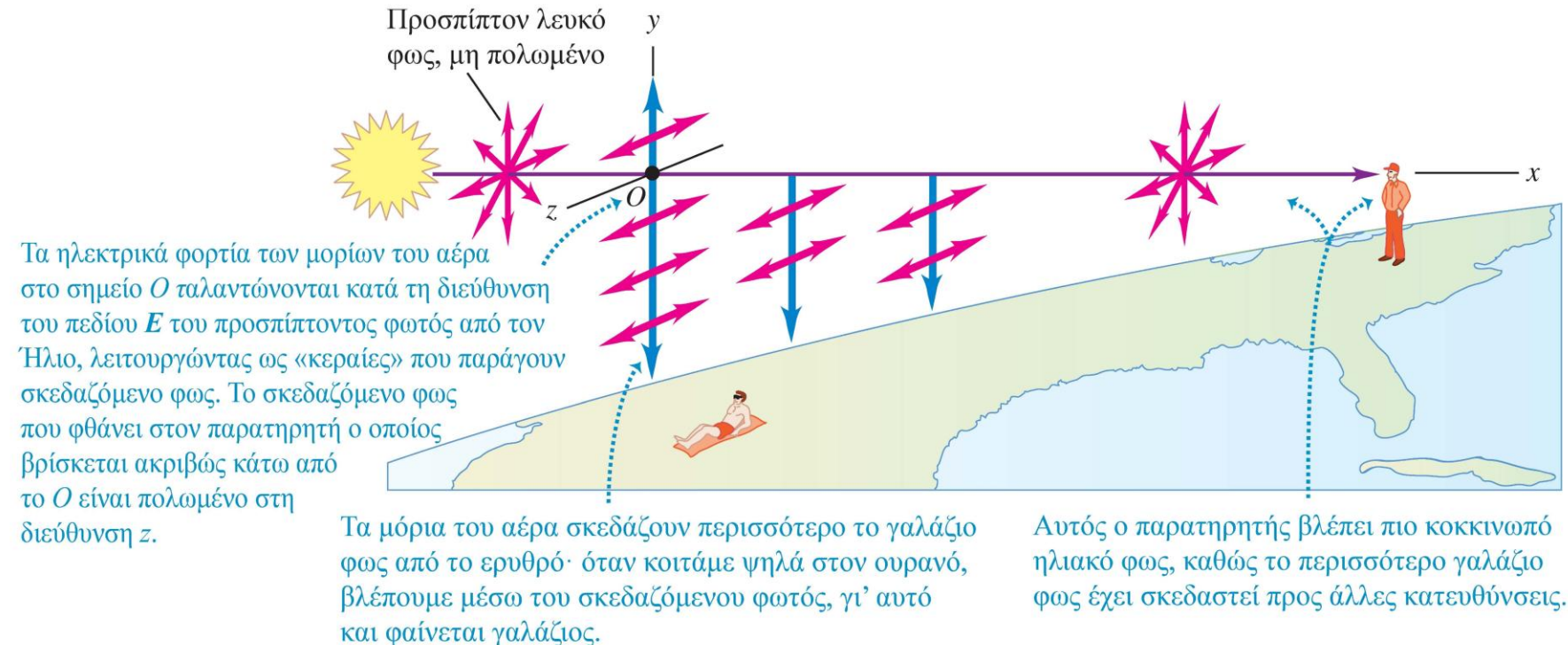


ΣΚΕΔΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Όταν βλέπετε τον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας, το φως που βλέπετε είναι ηλιακό φως το οποίο έχει υποστεί απορρόφηση και στη συνέχεια έχει επανακινοβοληθεί σε διάφορες διευθύνσεις. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **σκέδαση**.

Το Σχ. 33.31 δείχνει μερικές από τις λεπτομέρειες της διαδικασίας της σκέδασης.

33.31 Ο παρατηρητής που κάνει ηλιοθεραπεία στα αριστερά και κοιτάζει προς τα πάνω, βλέπει γαλάζιο πολωμένο φως που έχει σκεδαστεί από μόρια του αέρα. Ο παρατηρητής στα δεξιά βλέπει πιο κοκκινωπό, φυσικό φως όταν κοιτάζει προς τον Ήλιο.



33.32 Τα σύννεφα είναι λευκά γιατί σκεδάζουν σημαντικά το ηλιακό φως όλων των μηκών κύματος.

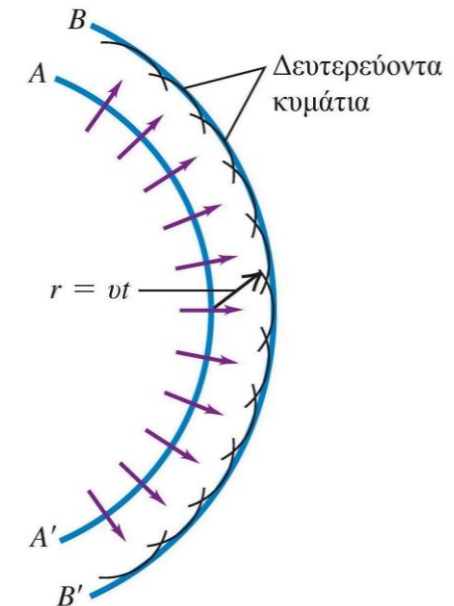


ΑΡΧΗ ΤΟΥ HUYGENS

Η αρχή αυτή, που διατυπώθηκε αρχικά από τον Ολλανδό επιστήμονα Christiaan Huygens (Κρίστιαν Χόιγκενς) το 1678, αποτελεί μια γεωμετρική μέθοδο εύρεσης, από τη γνωστή μορφή ενός μετώπου κύματος σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή, της μορφής του μετώπου κύματος σε μια μεταγενέστερη χρονική στιγμή. Ο Huygens υπέθεσε ότι **κάθε σημείο ενός μετώπου κύματος μπορεί να θεωρηθεί ως πηγή δευτερευόντων κυματίων που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος**. Το μέτωπο κύματος, σε κάποια μεταγενέστερη χρονική στιγμή, βρίσκεται αν κατασκευαστεί μια επιφάνεια *εφαπτομένη* στα δευτερεύοντα κυμάτια, ή –όπως ονομάζεται– η *περιβάλλουσα* των κυματίων.

Οι νόμοι της ανάκλασης και της διάθλασης των φωτεινών ακτίνων, που εισαγάγαμε στο Εδ. 33.2, ανακαλύφθηκαν πειραματικά πολύ πριν εδραιωθεί με ακλόνητες αποδείξεις η κυματική φύση του φωτός. Εντούτοις, είναι δυνατόν να *εξαγάγουμε* τους νόμους αυτούς χρησιμοποιώντας την κυματική θεώρηση και να δείξουμε ότι είναι συμβατοί με την κυματική φύση του φωτός.

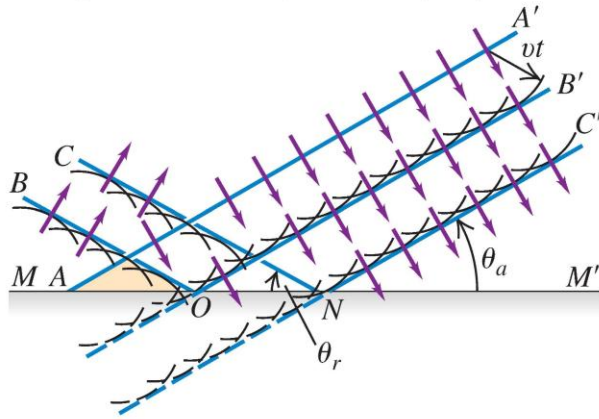
33.33 Εφαρμογή της αρχής του Huygens στο μέτωπο κύματος AA' για την κατασκευή ενός νέου μετώπου κύματος BB' .



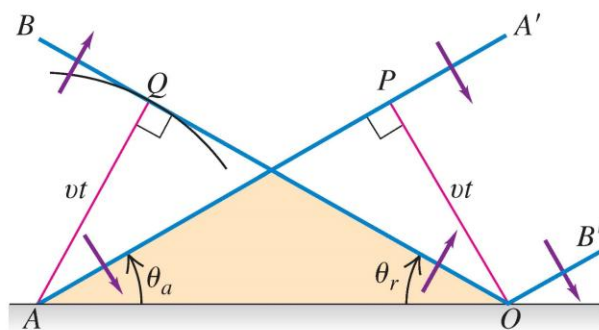
Ανάκλαση και Αρχή του Huygens

33.34 Χρήση της αρχής του Huygens για την εξαγωγή του νόμου της ανάκλασης.

(a) Διαδοχικές θέσεις του επιπέδου κύματος AA' καθώς ανακλάται από μια επίπεδη επιφάνεια.



(b) Μεγεθυμένο τμήμα του (a).

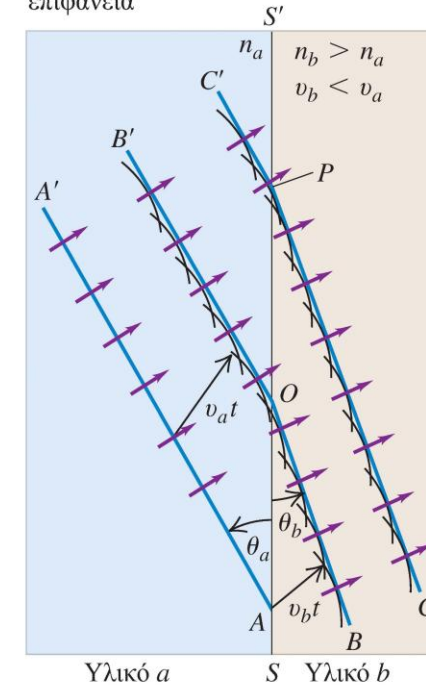


[Σελίδες 1213-1214]

Διάθλαση και Αρχή του Huygens

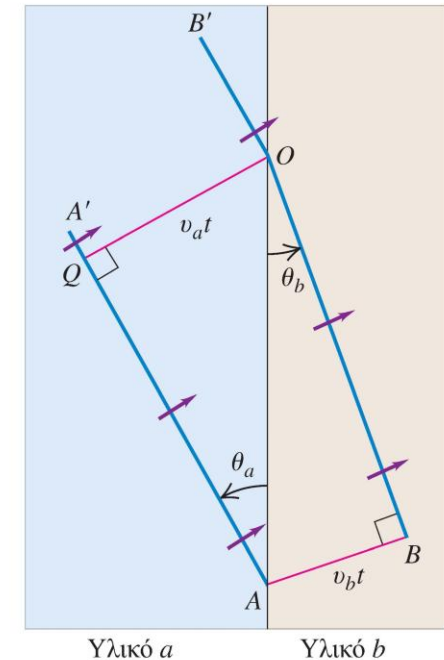
33.35 Χρήση της αρχής του Huygens για την εξαγωγή του νόμου της διάθλασης. Παρουσιάζεται η περίπτωση που $v_a < v_b$ ($n_b > n_a$).

(a) Διαδοχικές θέσεις του επιπέδου κύματος AA' καθώς διαθλάται από μια επίπεδη επιφάνεια



$$\sin \theta_a = \frac{v_a t}{AO} \quad \sin \theta_b = \frac{v_b t}{AO}$$

$$\frac{n_b}{n_a} = \frac{c/v_b}{c/v_a} = \frac{v_a}{v_b}$$



$$\frac{\sin \theta_a}{\sin \theta_b} = \frac{v_a}{v_b} \quad (33.9)$$

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

Αντικατοπτρισμοί

Η ταχύτητα του φωτός είναι λίγο μεγαλύτερη στον θερμότερο αέρα κοντά στο έδαφος, τα κυμάτια του Huygens έχουν λίγο μεγαλύτερες ακτίνες, τα μέτωπα κύματος «γέρνουν» ελαφρά και οι ακτίνες που κατευθύνονταν προς το έδαφος υπό μεγάλη γωνία πρόσπτωσης (κοντά στις 90°) είναι δυνατόν να κάμπτονται προς τα πάνω, όπως φαίνεται στο Σχ. 33.36.

33.36 Πώς σχηματίζονται οι αντικατοπτρισμοί.

