

## B. Ηλεκτρομαχνητικά (Η/Μ) κύματα

§ 2-6, 2-8, 2-9, 2-10

Ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο: σύστημα δύο αχών που όταν είναι συνδεδεμένοι με τους πόλους πηγήτριας εναλλαβόμενης τάσης έχουν φορτία  $+q$  και  $-q$  αντίστοιχα, που μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο, με συνέπεια να διαρρέονται από εναλλαβόμενο ρεύμα.

Ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο αποτελεί την κεραία εκπομπής των Η/Μ κυμάτων σε ραδιοφωνικούς και τηλεοπτικούς σταθμούς.

### Παραχωχή Η/Μ κυμάτων

Όταν ένα ηλεκτρικό δίπολο, π.χ. μία κεραία, τροφοδοτείται με εναλλαβόμενη τάση, τότε τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του εκτελούν Α.Α.Τ και το δίπολο διαρρέεται από εναλλαβόμενο ρεύμα.

Έτσι, γύρω από το δίπολο, δημιουργείται ένα μαχνητικό και ένα ηλεκτρικό πεδίο τα οποία μεταβάλλονται ημιτονοειδώς με το χρόνο και αυτή η μεταβολή διαδίδεται απλώνεται στο χώρο απομακρυνόμενη από το δίπολο, κατά μήκος νοητής ευθείας  $x'x$  που αποτελεί τη διεύθυνση διάδοσης της μεταβολής.

Αυτή η διαδιδόμενη μεταβολή ονομάζεται Η/Μ κύμα.

Κατά τη διάδοση ενός Η/Μ κύματος η διαταραχή συντηρείται διότι αν σε κάποια περιοχή του χώρου μεταβληθεί το ηλεκτρικό πεδίο (Η.Π) τότε άσ αυτή την περιοχή θα δημιουργηθεί, λόγω επαγωγής, μεταβαλλόμενο μαχνητικό πεδίο (Μ.Π).

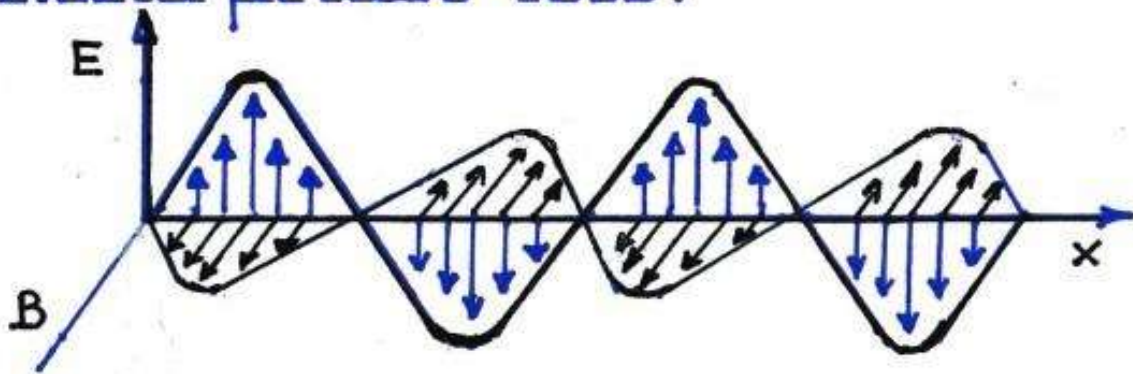
Το μεταβαλλόμενο Μ.Π με τη σειρά του προ-

καλεί νέα μεταβολή του Η.Π, η οποία προκαλεί νέα μεταβολή του Μ.Π κ.ό.κ.

Δηλαδή, η διαδόση ενός Η/Μ κύματος σε μεγάλες αποστάσεις οφείλεται στη συνεχή παραχωχή, λόγω επαγωγής, Η.Π από χρονικά μεταβαλλόμενο Μ.Π και, αντίστροφα, Μ.Π από χρονικά μεταβαλλόμενο Η.Π.

Μετά από όσα αναφέρθηκαν μπορούμε να πούμε ότι:

Η/Μ κύμα είναι ονομάζεται η ταυτόχρονη διαδόση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου τα οποία είναι αλληλένδετα μεταξύ τους.



Στιχμιότυπο αρμονικού Η/Μ κύματος που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση  $x$ , σε μεγάλη απόσταση από την κεραία εκπομπής —  $E, B$  ερμηνεύονται —.

## Παρατηρήσεις

1. Κάθε Η/Μ κύμα εκπορεύεται — έχει σαν αφετηρία, προέρχεται — από μία πηγή (πομπή), π.χ μία κεραία,

διαδίδεται σε κάποιο μέσο ή στο κενό και είναι δυνατόν να ανιχνευτεί από κάποιο δέκτη.

τη. Η πηγή ενός Η/Μ κύματος μπορεί να είναι ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο, ένα κύκλωμα ηλεκτρικών ταλαντώσεων, ένα άτομο που αποδιεχέεται κ.τ.λ, ενώ ο ανιχνευτής — δέκτης είναι ένας ταλαντωτής που διεχειρείται από αυτό.

2. Από μία κεραία τα Η/Μ κύματα εκπέμ-

πονται προς κάθε κατεύθυνση στο χώρο χύρω από την κεραία. Το κάθε ένα από αυτά όμως διαδίδεται προς ορισμένη διεύθυνση που είναι κάθετη στην κεραία, αν η κεραία είναι ευθύγραμμη.

## Αιτία δημιουργίας Η/Μ κύματος

Η διάδοση ενός Η/Μ κύματος οφείλεται στη συνεχή παραγωγή, λόγω επαγωγής, ηλεκτρικού πεδίου από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και, αντίστροφα, μαγνητικού πεδίου από χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Όμως, τα ακίνητα φορτία και τα φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα - σταθερά συνεχή ρεύματα - δεν μπορούν να δημιουργήσουν μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία αντίστοιχα.

Επομένως,

η αιτία δημιουργίας ενός Η/Μ κύματος είναι η επιταχυνόμενη κίνηση ηλεκτρικών φορτίων.

## Παρατήρηση

Την ύπαρξη Η/Μ κυμάτων συμπεράνει πρώτος ο Maxwell το 1864, ο οποίος αρχότερα, το 1873, διατύπωσε τη θεωρία της Η/Μ ακτινοβολίας.

Ο Maxwell, εκτός των άλλων, απέδειξε ότι, όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται παράγει Η/Μ κύμα.

## ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΤΟΥ Η/Μ ΚΥΜΑΤΟΣ.

Τα φυσικά μεγέθη που μεταβάλλονται περιοδικά κατά τη διάδοση ενός Η/Μ κύματος εί-

ναί η ένταση  $\vec{E}$  του Η.Π και η ένταση  $\vec{B}$  του Μ.Π.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ενός αρμονικού Η/Μ κύματος που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση  $x'x$  είναι

$$E = E_{\max} \cdot \eta \mu 2\pi (t/T - x/\lambda),$$

$$B = B_{\max} \cdot \eta \mu 2\pi (t/T - x/\lambda)$$

Οι εξισώσεις αυτές περιγράφουν ένα αρμονικό Η/Μ κύμα σε μεγάλη απόσταση από την πηγή του κύματος όπου, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις του Maxwell, τα πεδία αυτά είναι συμφασικά.

Κοντά στην κεραία το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο έχουν διαφορά φάσης  $\pi/2$  διότι, σε κάθε κύκλο λειτουργίας ενός ταλαντούμενου ηλεκτρικού διπόλου, όπως είναι η κεραία εκπομπής Η/Μ κυμάτων, όταν το ρεύμα κατά την ταλάντωση του φορτίου στην κεραία δίνεται μέγιστο το φορτίο στα άκρα της μηδενίζεται, ενώ όταν τα φορτία στα άκρα της έχουν μέγιστη τιμή, το ρεύμα μηδενίζεται.

### Χαρακτηριστικά - Ιδιότητες Η/Μ κυμάτων

Από τη μελέτη των Η/Μ κυμάτων διαπιστώνεται ότι:

**1.** Τα Η/Μ κύματα διαδίδονται τόσο στο κενό όσο και σε ορισμένα υλικά μέσα.

Όλα τα Η/Μ κύματα στο κενό διαδίδονται με την ίδια ταχύτητα που ονομάζεται ταχύτητα του φωτός  $c_0$  στο κενό  $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ , ενώ στα υλικά μέσα που διαδίδονται, διαδίδονται με ταχύτητα  $c$  μικρότερη της  $c_0$ .

Η ταχύτητα διάδοσης  $c$  των Η/Μ κυμάτων ε' ένα υλικό μέσο εξαρτάται από το είδος του υλικού και το μ. κύματος του διαδιδόμενου Η/Μ κύματος - φαινόμενο διασκεδασμού του φωτός.

**2.** Τα Η/Μ κύματα υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας.

**3.** Σε ένα μέσο διάδοσης, κάθε στιγμή, το πηλίκο των μέτρων των εντάσεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ισούται με την ταχύτητα του φωτός  $c$  στο συγκεκριμένο μέσο διάδοσης,  $E/B = c$ .

**4.** Στα Η/Μ κύματα τα διανύσματα των εντάσεων  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  είναι:

**α.** κάθε στιγμή κάθετα μεταξύ τους και ταυτόχρονα κάθετα προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Τα Η/Μ κύματα είναι εγκάρσια.

**β.** χρονικά και τοπικά μεταβαλλόμενα, δηλαδή, οι τιμές τους μεταβάλλονται από θέση σε θέση και από στιγμή σε στιγμή.

**5.** Το Η.Π και το Μ.Π που συναπαρτίζουν ένα Η/Μ κύμα:

**α.** έχουν το ίδιο μ. κύματος και την ίδια συχνότητα.

**β.** ενώ κοντά στο δίπολο που τα παράγει έχουν διαφορά φάσης  $\pi/2$ , σε μεγάλη απόσταση από αυτό είναι συμφασικά.

**6.** Ένα Η/Μ κύμα κατά τη διαδογή του μεταφέρει ενέργεια:

**α.** ηλεκτρικού πεδίου,

**β.** μαγνητικού πεδίου.

Οι ενέργειες αυτές παράγονται από την πηγή και μεταφέρονται σαν Η/Μ κύμα - με τη μορφή Η/Μ κύματος.

Αυτός ο τρόπος μεταφοράς ενέργειας χαρακτηρίζεται σαν H/M ακτινοβολία

## Το φάσμα της H/M ακτινοβολίας

Γενικά, ως φάσμα χαρακτηρίζεται η εικόνα ενός συνόλου - ή μιας κατάστασης - που είναι ταξινομημένο ως προς κάποιο/οια χαρακτηριστικό/κά του, όπως διαμορφώνεται πραχματικά ή όπως αποτυπώνεται εχηματικά πάνω σε μια επιφάνεια. Έτσι,

### σαν H/M φάσμα

χαρακτηρίζεται το σύνολο των H/M κυμάτων που υπάρχουν, ανεξάρτητα από τον τρόπο παραγωγής τους, ταξινομημένο με βάση τη συχνότητα ή το μ. κύματος όπως είναι πραχματικά ή όπως αποτυπώνεται εχηματικά πάνω σε μια επιφάνεια.

Η έκτασή του σήμερα κυμαίνεται στην περιοχή συχνοτήτων από  $10^{-2}$  Hz έως  $10^{24}$  Hz.

Το H/M φάσμα χωρίζεται σε επτά βασικές περιοχές, χωρίς να υπάρχει σαφής διαχωρισμός της κάθε περιοχής από τις υπόλοιπες, ανάλογα με το μ. κύματος  $\lambda_0$  που έχουν οι ακτίνες στο κενό.

Ακολουθεί σύντομη περιγραφή των επτά βασικών περιοχών κατά σειρά αυξανόμενου μήκους κύματος ή ελαττούμενης συχνότητας.

**1. Ακτίνες X** με μήκη κύματος από 0 έως 0,01 pm.

Παράγονται κατά την αποδιέγερση ατομικών πυρήνων - ραδιενεργών πυρήνων - στις πυρηνικές αντιδράσεις και κατά τη διάσπαση στοιχειωδών βιοματιδίων.

**2. Ακτίνες X** με μήκη κύματος από 0,01 pm

έως 60nm.

Παράχονται από την αποδιέξερση ατόμων και από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια.

Η πιο κοινή αιτία παραγωγής ακτίνων X είναι η επιβράδυνση ηλεκτρονίων που προσκρούουν με μεγάλη ταχύτητα σε μεταλλικό στόχο.

**3. Υπεριώδεις** με μήκη κύματος από 60nm έως 400nm.

Παράχονται από την αποδιέξερση ατόμων και με ειδικές λυχνίες.

**4. Ορατές** με μήκη κύματος από 400nm έως 700nm.

Παράχονται από την αποδιέξερση ατόμων.

**5. Υπέρυθρες** με μήκη κύματος από 700nm έως 1mm.

Παράχονται από ταλαντευόμενα ηλεκτρικά δίπολα και από την αποδιέξερση ατόμων.

Χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμοχές - σε φωτογραφίες, στην ιατρική, στην αστρονομία κ.τ.λ. -.

**6. Μικροκύματα** με μήκη κύματος από 1mm έως 30cm.

Παράχονται από ταλαντευόμενα ηλεκτρικά δίπολα και ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες και σε διάφορες εφαρμοχές, όπως φούρνος μικροκυμάτων και άλλα.

**7. Ραδιοκύματα** με μήκη κύματος από 30cm έως  $10^5m$ .

Παράχονται από ταλαντευόμενα ηλεκτρικά δίπολα και ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως κυκλώματα LC.

## το Φως και η διαδόση του Φωτός

Όταν μιλάμε για φως αναφερόμαστε σε Η/Μ ακτινοβολίες - Η/Μ κύματα - οι οποίες όταν φτάνουν στο μάτι ενός παρατηρητή διεκείρουν το αίσθητήριο όργανο της όρασης, προκαλούν δηλαδή διέξερση των οπτικών κυττάρων.

Τέτοιου είδους Η/Μ ακτινοβολίες έχουν μήκη κύματος από 400nm έως 700nm περίπου και κάθε πηγή Η/Μ ακτινοβολίας αυτού του είδους ονομάζεται φωτεινή πηγή ή φωτοβολόδα πηγή.

Οι Η/Μ ακτινοβολίες με μήκη κύματος μικρότερα από 400nm ή μεγαλύτερα από 700nm δεν δίνονται αντιληπτές από έναν παρατηρητή.

Στο φάσμα των Η/Μ ακτινοβολιών η περιοχή, στο σύνολο των τιμών για τα μήκη κύματος, από 400nm έως 700nm χαρακτηρίζεται ως ορατή περιοχή ή περιοχή του ορατού.

Το φως διαδίδεται στο κενό - π.χ το ηλιακό φως - και μέσα σε ορισμένα υλικά σώματα - οπτικά μέσα - και τα διάφορα υλικά σώματα με κριτήριο το πως διαδίδεται το φως σε αυτά διακρίνονται σε διαφανή, ημιδιαφανή και αδιαφανή.

Διαφανή χαρακτηρίζονται τα σώματα μέσα στα οποία το φως διαδίδεται ολοκληρωτικά - πλήρως. Ολοκληρωτικά σημαίνει ότι ολόκληρη η ποσότητα της μεταφερόμενης από το φως ενέργειας μεταφέρεται από μία περιοχή του διαφανούς υλικού σώματος σε μία άλλη.

Πίσω από τα διαφανή σώματα μπορούμε να διακρίνουμε πλήρως ένα αντικείμενο.

Ημιδιαφανή χαρακτηρίζονται τα σώμα-



τα μέσα στα οποία το φως διαδίδεται κατά ένα μέρος.

Πίσω από τα ημιδιαφανή σώματα μπορούμε να διακρίνουμε μόνο το περίγραμμα των αντικειμένων.

Αδιαφανή χαρακτηρίζονται τα σώματα μέσα στα οποία δεν διαδίδεται το φως.

Πίσω από τα αδιαφανή σώματα δεν μπορούμε να διακρίνουμε τα αντικείμενα.

Το φως τόσο στο κενό όσο και σε ένα ομοιογενές οπτικό μέσο διαδίδεται ευθύγραμμα.

Σ' αυτή την περίπτωση κάθε Η/Μ κύμα φωτός με συχνότητα εκπομπής  $f$  - κάθε κυματοσειρά φωτονίων με συχνότητα εκπομπής  $f$ , δηλαδή φωτόνια που εκπέμπονται διαδοχικά το ένα μετά το άλλο από μια φωτεινή πηγή με συχνότητα εκπομπής  $f$  - κινείται καθώς απομακρύνεται από την πηγή εκπομπής κατά μήκος μιας νοητής ευθείας και συνιστά μια ακτίνα φωτός - μια ακτίνα φωτεινής Η/Μ ακτινοβολίας. \*

Κάθε φωτεινή ακτίνα με ορισμένο μήκος κύματος, άρα και ορισμένη συχνότητα, που φτάνει στο μάτι ενός παρατηρητή, του δημιουργεί την αίσθηση μιας συγκεκριμένης χρωματικής απόρρωσης, και χαρακτηρίζεται ως μονοχρωματική ακτίνα/ακτινοβολία.

Γενικότερα, ως μονοχρωματική χαρακτηρίζεται μια λεπτή φωτεινή δέσμη που αποτελείται από φωτεινές ακτίνες με παραλλήλες συχνότητες - από φωτεινές ακτίνες με συχνότητες σε μία πολύ μικρή περιοχή συχνοτήτων. Π.χ μία λεπτή φωτει-

\* Ένας αριθμός από παράλληλες φωτεινές ακτίνες συνιστά μια δέσμη φωτός/φωτεινή δέσμη.  
Η σχηματική απεικόνιση μιας ακτίνας φωτός ή μιας λεπτής δέσμης φωτός με μία ευθεία γραμμή χρησιμεύει στο να σχεδιάσουμε την πορεία διάδοσης του φωτός.

νή δέσμη με φωτεινές ακτίνες από 490 έως 491 nm είναι μία πράσινη μονοχρωματική ακτινοβολία.

Στην περιοχή του ορατού του Η/Μ φάσματος διακρίνουμε έξι υποπεριοχές ή επιμέρους περιοχές - τμήματα, χωρίς όμως να υπάρχει σαφής διαχωρισμός των επιμέρους περιοχών μεταξύ τους.

Κάθε υποπεριοχή αντιστοιχεί σε μήκη κύματος φωτεινών ακτίνων που προκαλούν ε' ένα παρατηρητή την αίσθηση κάποιου συγκεκριμένου χρώματος ή μίας απόχρωσης του χρώματος αυτού.

Τα χρώματα που αντιστοιχούν στις επιμέρους περιοχές της περιοχής του ορατού, κατά σειρά ελαττούμενου μήκους κύματος ή αυξανόμενης συχνότητας είναι το,

κόκκινο / ερυθρό  
πορτοκαλί  
κίτρινο  
πράσινο  
μπλέ / κυανό  
ιώδες / μώβ

### το λευκό φως

Το λευκό φως είναι σύνθετο.

Αποτελεί δέσμη μονοχρωματικών φωτεινών ακτίνων που αντιστοιχούν:

**α.** σε κάθε είδος χρώματος - από το ιώδες μέχρι και το κόκκινο, χωρίς να απουσιάζει κανένα χρώμα - και σε όλες τις ενδιάμεσες αποχρώσεις τους.

**β.** σε όλα τα μήκη κύματος της περιοχής το ορατού του Η/Μ φάσματος.

### Παρατήρηση

Στην περίπτωση των Η/Μ κυμάτων δια

τη θεμελιώδη εξίσωση της κυματικής ευνή-  
θως χράφουμε  $c_0 = \lambda_0 \cdot f$  όταν διαδίδονται  
στο κενό και  $c = \lambda \cdot f$  όταν διαδίδονται σε  
ένα διαφανές οπτικό μέσο.

## Ανάκλαση και Διάθλαση

Γενικά, όταν μια λεπτή δέσμη μονοχρω-  
ματικού φωτός που διαδίδεται ε' ένα διαφα-  
νές μέσο συναντήσει τη διαχωριστική επιφά-  
νεια του μέσου στο οποίο διαδίδεται με ένα  
άλλο διαφανές μέσο ένα μέρος της φωτεινής  
δέσμης αλλάζει πορεία διάδοσης, παραμένον-  
τας όμως στο μέσο στο οποίο διαδίδεται, δηλα-  
δή ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο μέρος της δέ-  
σμης περνάει στο άλλο μέσο αλλάζοντας πορεία  
διάδοσης, δηλαδή διάθλάται.

### Παρατηρήσεις

Στα πλαίσια της κλασικής ηλεκτροδυναμι-  
κής θεωρίας - θεωρία Η/Μ του Maxwell - κάθε  
μονοχρωματική ακτινοβολία θεωρείται Η/Μ  
κύμα που κατά τη διάδοσή του μεταφέρει ενέρ-  
χεια ηλεκτρικού πεδίου και ενέργεια μαχνητι-  
κού πεδίου.

Η ενέργεια που μεταφέρει η ακτινοβολία  
κάθε στιγμή, ισούται με το άθροισμα της ενέρ-  
χειας του ηλεκτρικού και του μαχνητικού πε-  
δίου που συναπαρτίζουν το Η/Μ κύμα.

Λέχοντας μάλιστα ότι ένα μέρος της μο-  
νοχρωματικής ακτινοβολίας ανακλάται και το  
υπόλοιπο μέρος της διαθλάται εννοούμε ότι  
ένα μέρος της ενέργειας που μεταφέρεται από  
τη μονοχρωματική ακτινοβολία συνεχίζει να  
διαδίδεται, με τη μορφή Η/Μ κύματος, στο αρ-  
χικό μέσο διάδοσης ενώ το υπόλοιπο αυτής της  
ενέργειας συνεχίζει τη διάδοσή του, με τη μορ-

φή Η/Μ κύματος, στο άλλο μέσο.

Το άθροισμα της ενέργειας του Η.Π και το Μ.Π που ανακλάται συν το άθροισμα της ενέργειας του Η.Π και του Μ.Π που διαθλάται ισούται με το άθροισμα της ενέργειας του Η.Π και του Μ.Π της μονοχρωματικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο διαφανών οπτικών μέσων.

Τα ποσοστά της ενέργειας ηλεκτρικού και μαχνητικού πεδίου που θα ανακλαστούν ή θα διαθλαστούν εξαρτώνται από:

α. τη δομή και τις διαστάσεις των δομικών μονάδων του κάθε οπτικού μέσου.

β. από την ηλεκτρική συμπεριφορά του κάθε οπτικού μέσου (αχώς, μονωτής κ.τ.λ).

γ. από τη μαχνητική συμπεριφορά του κάθε οπτικού μέσου (διηρημαχνητικό, παραμαχνητικό υλικό κ.τ.λ).

δ. από ορισμένους άλλους παράχοντες.

Τέλος το χιατί ένα μέρος μιας μονοχρωματικής ακτινοβολίας ανακλάται και ένα μέρος της διαθλάται στη διαχωριστική επιφάνεια δύο διαφανών οπτικών μέσων ερμηνεύεται με την κυματική θεωρία Huygens (χόϋχενς) και του "οπτικού δρόμου"  $\Sigma$  κλασική φυσική.

## Α. Ανάκλαση του φωτός

Ανάκλαση του φωτός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα μέρος μιας λεπτής μονοχρωματικής δέσμης φωτός που διαδίδεται σε ένα διαφανές οπτικό μέσο, αλλάζει πορεία διαδοχώς παραμένοντας όμως στο οπτικό μέσο που διαδίδεται, όταν συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια του οπτικού μέσου που διαδίδεται με ένα άλλο οπτικό μέσο.

Όταν η διαχωριστική επιφάνεια των δύο διαφανών οπτικών μέσων είναι λεία και ομογενή

είναι δηλαδή κάτοπτρο, οι παράλληλες ακτίνες της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης εξακολουθούν να είναι παράλληλες και μετά την ανάκλασή τους. Η ανάκλαση αυτή ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση.



Εάν όμως η διαχωριστική επιφάνεια έχει δομικές ανωμαλίες οι παράλληλες ακτίνες της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης ανακλώνται σε διάφορες διευθύνσεις και σκορπίζονται στο χώρο.



Η ανάκλαση αυτή στην οποία οι ανακλώμενες ακτίνες δεν είναι πια παράλληλες, ονομάζεται διάχυση.

### Σημείωση.

Στη συνέχεια όταν χρησιμοποιούμε τον όρο ανάκλαση θα εννοούμε κατοπτρική ανάκλαση.

### Στο φαινόμενο της ανάκλασης ως:

**α. γωνία πρόσπτωσης -  $\theta_a$** , χαρακτηρίζεται η γωνία ανάμεσα στη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας και στην κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια.

**β. γωνία ανάκλασης -  $\theta_r$** , χαρακτηρίζεται η γωνία ανάμεσα στην κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια και στη διεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας.

**γ. γωνία εκτροπής -  $\epsilon_a$** , χαρακτηρίζεται η γωνία ανάμεσα στη διεύθυνση της προσπίπτουσας και στη διεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας.



### ο Νόμος της ανάκλασης

Πειραματικά προκύπτει ότι:

1. Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα

τίνα και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο της πρόσπτωσης, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

2. Η γωνία ανάκλασης  $\theta_r$  είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a$ .

Επομένως, στο φαινόμενο της ανάκλασης για τη γωνία εκτροπής ισχύει ότι

$$\epsilon_a = 180 - 2\theta_a$$

### Παρατήρηση

Ο Νεύτωνας - 17<sup>ος</sup> αιώνας - βασιζόμενος στην άποψη ότι το φως έχει σωματιδιακή φύση διατυπώνει, με βάση τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός, ενώ την ίδια περίπου περίοδο ο Χόιχενς, το 1670, μέσα από πειραματικές διαδικασίες αποδεικνύει ότι το φως έχει κυματική φύση και διατυπώνει την κυματική του θεωρία με την οποία ερμηνεύεται η ανάκλαση και η διάθλαση του φωτός - το χιαστί το φως ανακλάται και διαθλάται ταυτόχρονα - και αποδεικνύονται οι σχετικοί νόμοι!

### Ερώτηση

Γιατί τη νύχτα, και με αναμένους τους προβολείς του αυτοκινήτου, ο δρόμος φαίνεται - διακρίνεται - καλύτερα όταν είναι βρεγμένος, παρά όταν είναι βρεχμένος;

### Απάντηση

Την νύχτα, όταν ο δρόμος είναι βρεγμένος, το φως από τους προβολείς του αυτοκινήτου διαχέεται λόγω των ανωμαλιών στην επιφάνεια του οδοστρώματος, με αποτέλεσμα στα μάτια του οδηγού ή των επιβατών να φτάνουν φωτεινές ακτίνες από κάθε σημείο του οδοστρώματος και έτσι ο δρόμος φαίνεται καλά.

Όταν όμως ο δρόμος είναι βρεχμένος, το νερό χεμίζει τις κοιλότητες που υπάρχουν στην επιφάνεια του οδοστρώματος με αποτέλεσμα το φως από τους προβολείς να ανακλάται κατοπτρικά πάνω στην επιφάνεια του νερού προς οριζόμενη κατεύθυνση. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μη φτάνουν στα μάτια του οδηγού φωτεινές ακτίνες από κάθε σημείο του δρόμου ο οποίος στην περίπτωση αυτή δε φαίνεται καλά.

## Β. Διάθλαση του φωτός

Διάθλαση του φωτός ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο ένα μέρος μιας λεπτής μονοχρωματικής δέσμης φωτός που διαδίδεται σε ένα διαφανές οπτικό μέσο, αλλάζει πορεία διάδοσης καθώς περνάει σε ένα άλλο διαφανές οπτικό μέσο.

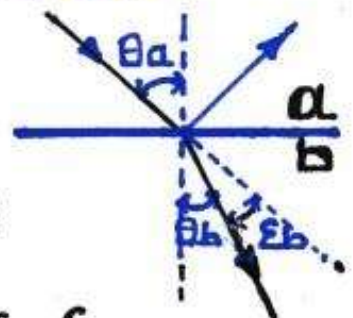
Ο λόγος για τον οποίο το φως διαθλάται αλλάζει πορεία διάδοσης καθώς διέρχεται από το ένα οπτικό μέσο στο άλλο είναι ότι η ταχύτητά του έχει διαφορετικές τιμές στα δύο μέσα.

Στο φαινόμενο της διάθλασης ως:

α. γωνία διάθλασης  $\theta_b$ , χαρακτηρίζεται η γωνία που σχηματίζει η διαθλωμένη ακτίνα με την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο της πρόσπτωσης.

β. γωνία εκτροπής  $\epsilon_b$ , χαρακτηρίζεται η γωνία που σχηματίζει η διαθλωμένη ακτίνα με τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτίνας.

Ισχύει ότι  $\epsilon_b = |\theta_b - \theta_a|$



Δείκτης διάθλασης  $n$  ενός οπτικού μέσου ονομάζεται ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό  $c_0$  προς την ταχύτητα του φωτός  $c$  στο μέσο αυτό. Δηλαδή,

$$n = c_0 / c$$

Ο δείκτης διάθλασης είναι καθαρός αριθμός και επειδή για οποιοδήποτε υλικό είναι  $c_0 > c$  ισχύει ότι  $n > 1$ .

### Παρατηρήσεις

1. Ο δείκτης διάθλασης του κενού  $n_0$  είναι εξ ορισμού ίσος με τη μονάδα. Δηλαδή  $n_0 = 1$ .

2. Επειδή η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο αέρα  $c_a$ , είναι περίπου ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό  $c_a \approx c_0$ , ο δείκτης διάθλασης στον αέρα θεωρείται ίσος με τη μονάδα.

3. Ένα διαφανές οπτικό μέσο Α είναι οπτικά πυκνότερο από ένα διαφανές οπτικό μέσο Β το οποίο χαρακτηρίζεται ως οπτικά αραιότερο του Α όταν:

$$a. \quad c_A < c_B$$

$$b. \quad n_A > n_B$$

4. Όταν μονοχρωματικό φως περνάει από ένα οπτικό μέσο σε κάποιο άλλο, η συχνότητά του διατηρείται.

$$\text{Είναι } c = \lambda \cdot f \iff \lambda = c / f$$

Αφού η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το φως είναι διαφορετική σε δύο διαφορετικά μέσα ενώ η συχνότητά του είναι η ίδια,

όταν μονοχρωματικό φως περνάει από ένα οπτικό μέσο σε άλλο το μήκος κύματος μεταβάλλεται.

### Άσκηση

Να αποδείξετε ότι το μ.κ,  $\lambda$ , μιας φωτεινής μονοχρωματικής ακτινοβολίας σε ένα οπτικό μέσο, είναι μικρότερο από το μ.κ,  $\lambda_0$ , της ακτινοβολίας αυτής στο κενό / αέρα.

### Απόδειξη



Αν  $c_0, c$  η ταχύτητα του μονοχρωματικού φωτός στο κενό/αέρα και  $\lambda$  ένα οπτικό μέσο αντίστοιχα και  $f$  είναι η συχνότητα του θα είναι

$$c_0 = \lambda_0 \cdot f \text{ και } c = \lambda \cdot f, \text{ οπότε}$$

$$c_0/c = \lambda_0/\lambda \text{ και επειδή } c_0/c = n,$$

όπου  $n$  ο δείκτης διάθλασης του οπτικού μέσου, είναι  $n = \lambda_0/\lambda$ .

$$\text{Είναι } n > 1 \rightarrow \lambda_0/\lambda > 1 \leftrightarrow \lambda < \lambda_0$$

### Άσκηση (Ε.2004)

Μονοχρωματικό φως εισέρχεται από ένα οπτικό μέσο (1) με δείκτη διάθλασης  $n_1$  σε ένα οπτικό μέσο (2) με δείκτη διάθλασης  $n_2$ . Αν το μ.κ του φωτός στο μέσο (1) είναι  $\lambda_1$  και στο μέσο (2) είναι  $\lambda_2$  να αποδείξετε ότι,  
 $\lambda_1/\lambda_2 = n_2/n_1$ .

Με τον ίδιο τρόπο αποδεικνύεται ότι μονοχρωματικό φως έχει μικρότερο μ.κ σε ένα οπτικά πυκνότερο μέσο από ότι σε ένα οπτικό αραιότερο.

### Απόδειξη

Αν  $f$  είναι η συχνότητα του μονοχρωματικού φωτός και  $c_0, c_1, c_2$  οι ταχύτητες διάδοσής του στο κενό και στα μέσα (1) και (2) αντίστοιχα από τη θ.ε.κ προκύπτει ότι

$$c_0 = \lambda_0 \cdot f, \quad c_1 = \lambda_1 \cdot f, \quad c_2 = \lambda_2 \cdot f, \text{ οπότε}$$

$$c_0/c_1 = \lambda_0/\lambda_1 \rightarrow n_1 = \lambda_0/\lambda_1 \text{ και}$$

$$c_0/c_2 = \lambda_0/\lambda_2 \rightarrow n_2 = \lambda_0/\lambda_2.$$

$$\text{Επομένως, } \underline{n_2/n_1 = \lambda_1/\lambda_2}$$

Αν το οπτικό μέσο (1) είναι οπτικά πυκνότερο από το οπτικό μέσο (2) θα είναι  $n_1 > n_2$

$$\rightarrow n_2/n_1 < 1 \rightarrow \lambda_1/\lambda_2 < 1 \rightarrow \underline{\lambda_1 < \lambda_2}$$

Στο φαινόμενο της διάθλασης, πειραματικά προκύπτει ότι:

1. Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων στο σημείο της πρόσπτωσης, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

## 2. ο Νόμος του Snell (ενέλ)

Όταν το φως είναι μονοχρωματικό, ο λόγος του ημιτόνου της γωνίας πρόσπτωσης ( $\theta_a$ ) προς το ημίτονο της γωνίας διάθλασης ( $\theta_b$ ) είναι ίσος με τον αντίστροφο λόγο των δεικτών διάθλασης των δύο μέσων.

Δηλαδή, 
$$\frac{n_a \sin \theta_a}{n_b \sin \theta_b} = \frac{n_b}{n_a} \rightarrow$$

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

Από το νόμο του Snell προκύπτει ότι:

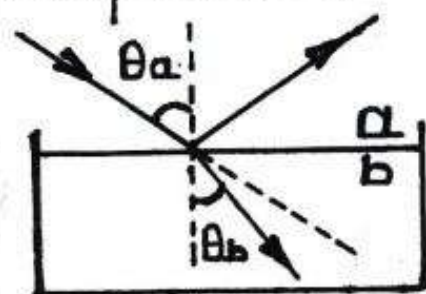
α. Αν το οπτικό μέσο α είναι ο αέρας θα είναι  $n_a = 1$ , οπότε  $n_a \sin \theta_a / n_b \sin \theta_b = n_b / 1 = n \rightarrow$   

$$\rightarrow \underline{n \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b}$$

β. Αν  $n_b > n_a \rightarrow n_b / n_a > 1$  θα είναι και  $n_a \sin \theta_a / n_b \sin \theta_b > 1 \rightarrow n_a \sin \theta_a > n_b \sin \theta_b \rightarrow$   

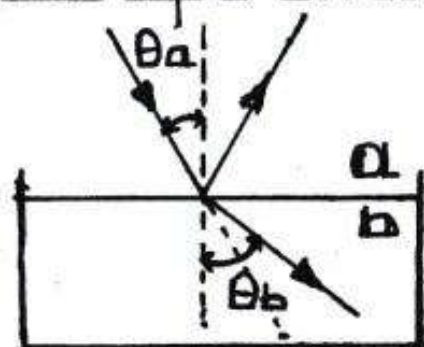
$$\underline{\theta_a > \theta_b}$$

Επομένως όταν μια μονοχρωματική ακτίνα περνάει από ένα αραιότερο οπτικό μέσο α σε ένα οπτικά πυκνότερο οπτικό μέσο β  $n_b > n_a$ , τότε η γωνία διάθλασης είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή η διαθλώμενη ακτίνα πλησιάζει στην κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο της πρόσπτωσης.



γ. Ομοίως αποδεικνύεται ότι όταν μια μονοχ

ρωματική ακτίνα περνάει από ένα πυκνότερο οπτικό μέσο  $a$  σε ένα αραιότερο οπτικό μέσο  $b$ .  $n_b < n_a$  - τότε η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης, δηλαδή η διαθλωμένη ακτίνα απομακρύνεται από την κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια στο σημείο της πρόσπτωσης. (Ε.2002)



**3.** Η πορεία που ακολουθεί μια μονοχρωματική ακτίνα είναι η ίδια είτε αυτή περνάει από ένα οπτικό μέσο  $a$  σε ένα οπτικό μέσο  $b$  είτε αντίστροφα.

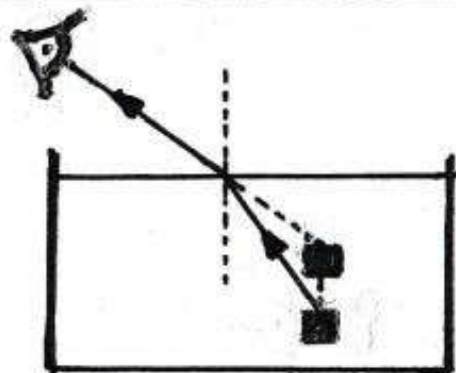
Αυτό σημαίνει ότι, αν η θέση της πηγής του φωτός και του παρατηρητή αλλάζουν αμοιβαία, το φως διαδίδεται αντίστροφα ακολουθώντας την ίδια πορεία.

### Διάθλαση και οφθαλμαπάτες.

Το φως μέσα σε ένα ομοιογενές οπτικό μέσο διαδίδεται ευθύγραμμα με συνέπεια όταν ένας παρατηρητής και ένα αντικείμενο βρίσκονται στο ίδιο οπτικό μέσο, το φως από το αντικείμενο να φτάνει στο μάτι του παρατηρητή ακολουθώντας ευθύγραμμη τροχιά, οπότε ο παρατηρητής αντιλαμβάνεται το αντικείμενο στη θέση που πραγματικά βρίσκεται.

Ένας παρατηρητής όμως, αντιλαμβάνεται το φως σαν να διαδίδεται ευθύγραμμα ακόμα και στην περίπτωση που ο παρατηρητής και το αντικείμενο βρίσκονται μέσα σε διαφορετικά οπτικά μέσα, με συνέπεια πολλές οφθαλμαπάτες να οφείλονται στο φαινόμενο της διάθλασης.

Π.χ ένας παρατηρητής βλέπει ένα αντικείμενο μέσα στο νερό στην προέκταση της ακτίνας που φτάνει στο μάτι του, πράγμα που έχει σαν συνέπεια το αντικείμενο να φαίνεται ότι βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια από όσο είναι πραγματικά.



Στο φαινόμενο της διάθλασης οφείλεται επίσης και το φαινομενικό σπασμένο τμήμα μιας ράβδου που ένα τμήμα της είναι βυθισμένο στο νερό.

Στην περίπτωση αυτή το τμήμα της ράβδου που βρίσκεται μέσα στο νερό φαίνεται να είναι πιο κοντά στην επιφάνεια από όσο είναι πραγματικά, φαίνεται δηλαδή σαν να έχει αποκοπεί από το τμήμα της ράβδου που είναι έξω από το νερό, πράγμα που έχει σαν συνέπεια η ράβδος να φαίνεται σπασμένη.

## Θέμα

Να εξηγήσετε ποιος είναι ο ρόλος του μεταλλικού κατοπτρου - παραβολικής μεταλλικής επιφάνειας - που φέρουν σε ορισμένες περιπτώσεις, τόσο οι κεραιές εκπομπής όσο και οι κεραιές λήψης ραδιοκυμάτων.

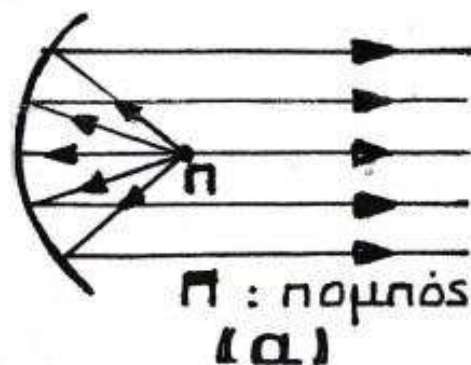
## Απάντηση

Οι μεταλλικές επιφάνειες παίρνουν χια τα ραδιοκύματα το ρόλο που παίρνουν οι καθρέφτες χια το φως.

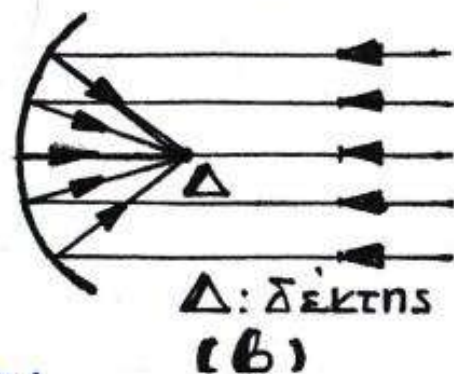
Στις κεραιές εκπομπής, χωρίς το κάτοπτρο, το κύμα που παράχεται από το ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο διασκορπίζεται απλώνεται - ε' όλο το χώρο γύρω του.

Με το κάτοπτρο, το παραχόμενο κύμα εκπομπής ανακλάται ε' αυτό και μετά την

ανάκλαση του διαδίδεται προς μία μόνο κατεύθυνση. Το κύμα έτσι ενισχύεται και χια το λόγο αυτό είναι κανό να φτάσει μακριά χωρίς σημαντική εξασθένηση.



Στις κεραιές λήψης, το κάτοπτρο ανακλά τα Η/Μ που πέφτουν πάνω του και τα εστιάζει στο δέκτη με αποτέλεσμα το σήμα στο δέκτη να είναι πιο ισχυρό και επομένως η λήψη να είναι περισσότερο "καθαρή".



### Παρατήρηση.

Τόσο ο πομπός - σχήμα α - όσο και ο δέκτης - σχήμα β - βρίσκονται στην εστία του κατόπτρου.

### Άσκηση

Μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα προσπίπτει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων.

Να αποδείξετε ότι:

- Δεν αλλάζει πορεία διάδοσης καθώς περνάει από το ένα οπτικό μέσο στο άλλο.
- Εκτρέπεται από την αρχική πορεία διάδοσής της κατά  $180^\circ$  καθώς αλλάζει πορεία διάδοσης παραμένοντας όμως στο ίδιο οπτικό μέσο.

### Απάντηση.

Και στις δύο περιπτώσεις η γωνία πρόσπτωσης στη διαχωριστική επιφάνεια είναι  $\theta_a = 0^\circ$ , ενώ  $\xi$  είναι η γωνία εκτροπής.

α. Έστω  $n_a, n_b$  οι δείκτες διάθλασης των δύο

οπτικών μέσων αντίστοιχα και έγω ότι η φωτεινή ακτίνα προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια προερχόμενη από το οπτικό μέσο με δείκτη διάθλασης  $n_a$ .

Αν  $\theta_b$  είναι η γωνία διάθλασης είναι  $\epsilon = |\theta_b - \theta_a|$   $\theta_a = 0^\circ \rightarrow \epsilon = \theta_b$ .

Από το νόμο του Snell  $\rightarrow$   
 $n_a \sin \theta_a / n_b \sin \theta_b = n_b / n_a \rightarrow n_a \sin \theta_b = n_a n \sin \theta_a / n_b$   
 και επειδή  $n_a \sin \theta_a = n_a \sin 0^\circ = 0 \rightarrow n_a \sin \theta_b = 0 \rightarrow \theta_b = 0$ , οπότε και  $\epsilon = 0$ .

β. Είναι  $\epsilon = 180 - 2\theta_a = 180 - 2 \cdot 0 = 180^\circ$ .

## Ολική ανάκλαση

Κατά τη διάθλαση μονοχρωματικού φωτός, σύμφωνα με το νόμο του Snell ισχύει ότι:

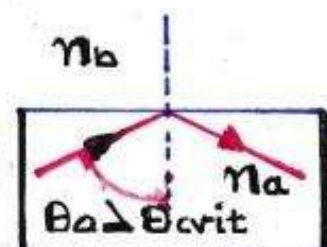
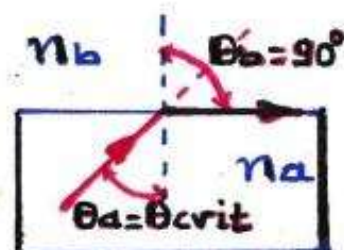
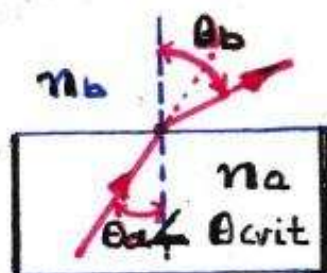
$$n_a \sin \theta_a / n_b \sin \theta_b = n_b / n_a \quad (1).$$

Αν η διαχωριστική επιφάνεια είναι επίπεδη και  $n_a > n_b$ , δηλαδή αν η μονοχρωματική ακτίνα που προσπίπτει στην επίπεδη διαχωριστική επιφάνεια προέρχεται από οπτικά πυκνότερο μέσο θα είναι  $n_b / n_a < 1$   $(1)$

$$n_a \sin \theta_a < n_b \sin \theta_b \rightarrow \theta_a < \theta_b < 90^\circ.$$

Επομένως, υπάρχει μία τιμή για τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a =$  καθώς αυξάνεται — μικρότερη από τις  $90^\circ$ , για την οποία η γωνία διάθλασης  $\theta_b = 90^\circ$ , με συνέπεια η διαθλωμένη ακτίνα να κινείται παράλληλα στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων.

Η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a$  για την οποία η διαθλωμένη ακτίνα κινείται παράλληλα προς τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο με-



γων, εφόσον η προσπίπτουσα ακτίνα προέρχεται από οπτικά πυκνότερο μέσο, ονομάζεται κρίσιμη γωνία ή οριακή γωνία και συμβολίζεται  $\theta_{crit}$ .

Επομένως, αν  $\theta_a = \theta_{crit}$  είναι  $\theta_b = 90^\circ$ , οπότε και  $n_b \sin \theta_b = 1 \xrightarrow{(1)}$

$$\boxed{n_b \sin \theta_{crit} = n_b / n_a} \quad (2).$$

Η σχέση (2) ισχύει μόνο όταν  $n_a > n_b$  διαφορετικά θα εδινε  $n_b \sin \theta_{crit} > 1$ , που είναι αδύνατο.

Αν το οπτικό μέσο α έχει δείκτη διάθλασης  $n_a = n$  και το οπτικό μέσο β είναι ο αέρας, οπότε  $n_b = 1 \xrightarrow{(2)}$

$$\boxed{n_b \sin \theta_{crit} = 1/n}$$

Αν η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την οριακή γωνία, τότε η ακτίνα δε διαβλάται, αλλά ανακλάται ολικά από τη διαχωριστική επιφάνεια και το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ολική εσωτερική ανάκλαση.

Συγκεκριμένα ως ολική εσωτερική ανάκλαση χαρακτηρίζεται το φαινόμενο κατά το οποίο μια λεπτή μονοχρωματική φωτεινή δέσμη ανακλάται ολικά στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων όταν διαδίδεται από το οπτικά πυκνότερο προς το οπτικά αραιότερο και η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία.

### Προσοχή

Ολική εσωτερική ανάκλαση συμβαίνει μόνο όταν:

α. φωτεινή ακτίνα προσπίπτει στη διαχωριστική επιφάνεια δύο οπτικών μέσων προερχόμενη από το οπτικά πυκνότερο μέσο, δηλαδή το μέσο με το μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης.

β. η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την κριτική γωνία.

Η κριτική γωνία είναι γενικά μικρή -  $\theta_{crit} \angle 45^\circ$  - όταν ένα οπτικό μέσο έχει μεγάλο δείκτη διάθλασης -  $n \gg 1$  - και το άλλο είναι ο αέρας -  $n_{αερ} = 1$  -.

Στην περίπτωση αυτή είναι  $n \sin \theta_{crit} = 1/n$ , οπότε αν  $n \gg 1$  τότε  $n \sin \theta_{crit} \ll 1 = n \sin 90^\circ \rightarrow \theta_{crit} \ll 90^\circ$ .

Στο διαμάντι π.χ η κριτική γωνία είναι ενώ στο χυαλί είναι  $41^\circ$ .

Η μικρή κριτική γωνία είναι ο λόγος που ένα κατεργασμένο διαμάντι με πολλές έδρες λαμπρόκοπιά στο φως πολύ περιβότερο από ένα όμοιο κομμάτι χυαλί.

Το μεγαλύτερο μέρος του φωτός που εισέρχεται στο διαμάντι, όταν αυτό φωτίζεται, υφίσταται ολική ανάκλαση στις διάφορες έδρες του, και αυτό γιατί προκειμένου να εξέλθει πρέπει να προσπέσει σχεδόν κάθετα στις έδρες του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να εξέρχεται, μετά από πολλές ανακλάσεις στο εσωτερικό του, από πάρα πολλές κατευθύνσεις και να φτάνει στο μάτι ενός παρατηρητή από παντού.

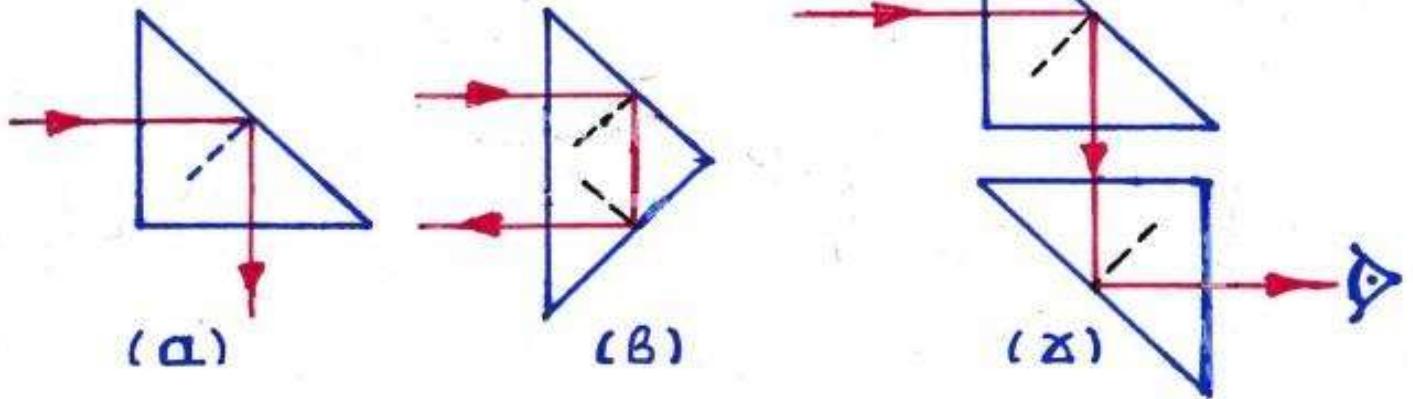
Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης αξιοποιείται σε πάρα πολλές εφαρμογές στην καθημερινή ζωή. Π.χ, η μετάδοση των Η/Μ κυμάτων στις οπτικές ίνες στηρίζεται στο φαινόμενο της ολικής ανάκλασης.

Αν χρησιμοποιήσουμε το κατάλληλο πρίσμα, μπορούμε, με το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης, να μεταβάλλουμε την κατεύθυνση μιας φωτεινής ακτίνας. Ένα τέτοιο πρίσμα χαρακτηρίζεται συνήθως ως πρίσμα ολικής ανάκλασης!

Στα παρακάτω σχήματα παρατηρούμε πε-



ριπτώσεις τέτοιων πρισμαίων.



Στο σχήμα (α) η φωτεινή ακτίνα, με ολική ανάκλαση, εκτρέπεται κατά  $90^\circ$  ενώ στο σχήμα (β) εκτρέπεται κατά  $180^\circ$  — αντίστροφη πορεία —.

Στο σχήμα (z) ο συνδυασμός των δύο πρισμαίων έχει σαν αποτέλεσμα την παράλληλη μετατόπιση της φωτεινής ακτίνας.

Σε ένα τέτοιο συνδυασμό πρισμαίων στηρίζεται, π.χ., η λειτουργία των περιεκοπίων στα υποβρυχία, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα στο πλήρωμα του υποβρυχίου να βλέπει τι χίνεταί πάνω από την επιφάνεια του νερού.

A. Ζαφειρόπουλος