

# **ΓΕΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ ΙΙ**

## **ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΟΠΤΙΚΗ**

**Υπό**

**Μ. Χανιά**

**Αν. Καθηγητή**

**Τμήμα Φυσικής ΔΙ.ΠΑ.Ε.**

**Καβάλα 2020**  
**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8**

**ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ**

Όπως προκύπτει από τις εξισώσεις του Maxwell ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει μαγνητικό πεδίο και ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο παράγει με την σειρά του ένα ηλεκτρικό πεδίο. Επομένως η χρονική μεταβολή του ενός επάγει στο χώρο πεδίο του άλλου είδους. Έτσι με το τρόπο αυτό μπορεί να διαδοθεί στο κενό μία Ηλεκτρομαγνητική διαταραχή δηλαδή ένα Ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Το 1887, ο Heinrich Hertz παρήγαγε στο εργαστήριο, για πρώτη φορά, ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μακροσκοπικά μήκη κύματος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποίησε ταλαντώνόμενα κυκλώματα Tomson L-C. Για την ανίχνευση των κυμάτων χρησιμοποίησε άλλα κυκλώματα, συντονισμένα στην ίδια συχνότητα. Ο Hertz δημιούργησε επίσης ηλεκτρομαγνητικά στάσιμα κύματα και μέτρησε την απόσταση μεταξύ διαδοχικών δεσμών (μισό μήκος κύματος) προκειμένου να καθορίσει το μήκος κύματος. Εφόσον γνώριζε τη συχνότητα, βρήκε την ταχύτητα των κυμάτων από την σχέση

$$u = \lambda f \quad (8.1)$$

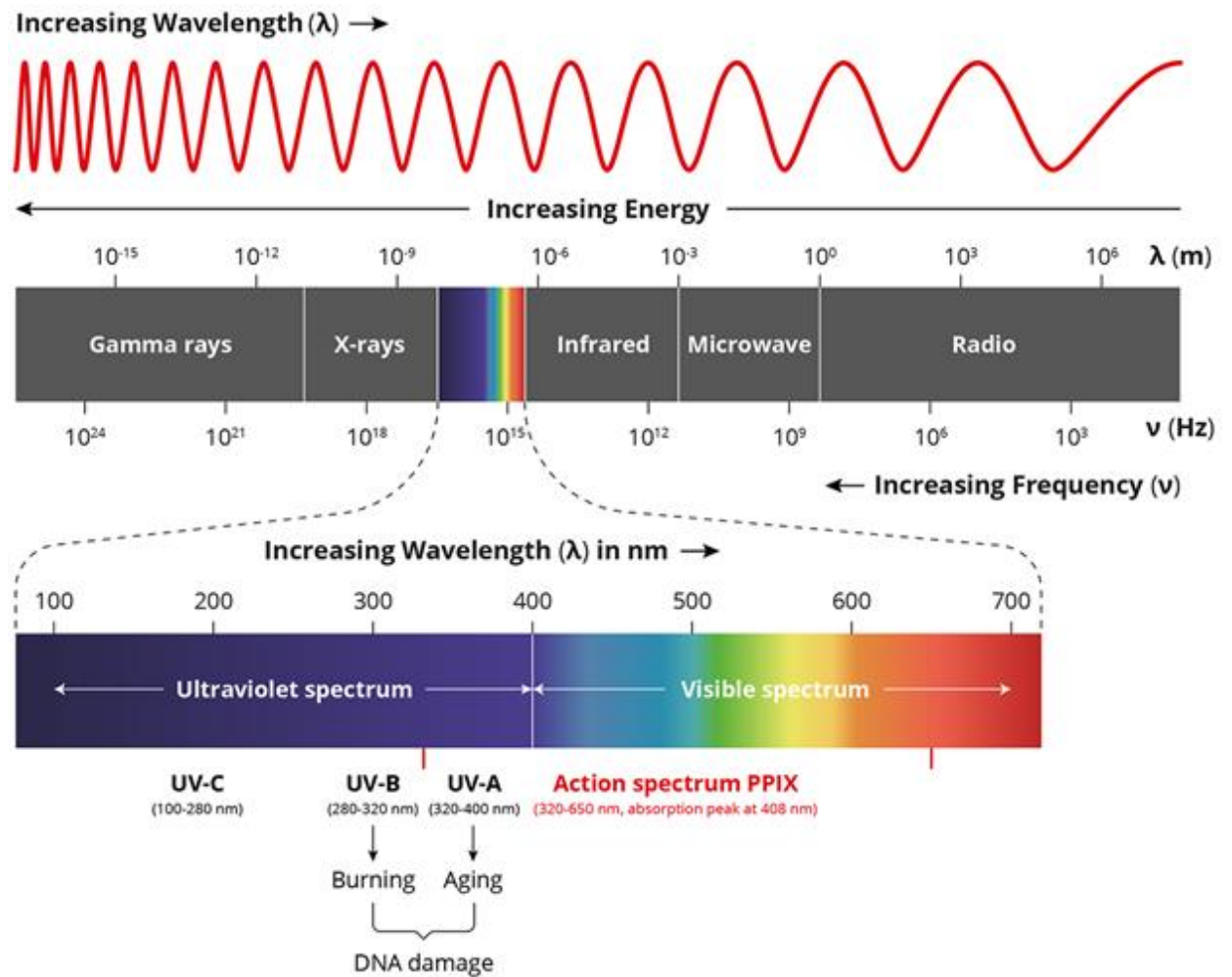
Η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο κενό βρέθηκε ίδια με την ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό όπως είχε προβλεφθεί θεωρητικά από τις εξισώσεις του Maxwell που έβρισκαν θεωρητικά την ταχύτητα του φωτός  $c$  από την σχέση

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (8.2)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία παράγεται πάντα από ένα επιταχυνόμενο ηλεκτρικό φορτίο.

### 8.1 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Στο Σχήμα 8.1 παριστάνεται η κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στα διάφορα μήκη κύματος ή τις διάφορες συχνότητες δηλαδή το **Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**. Η ενέργεια αυξάνει προς τα δεξιά.

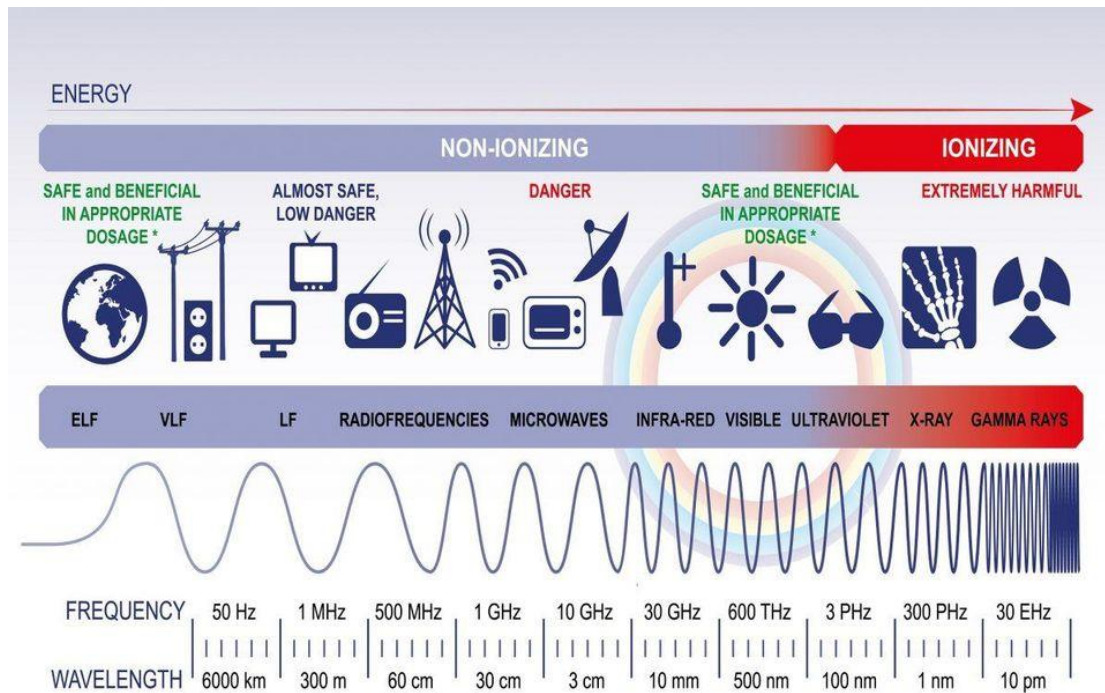


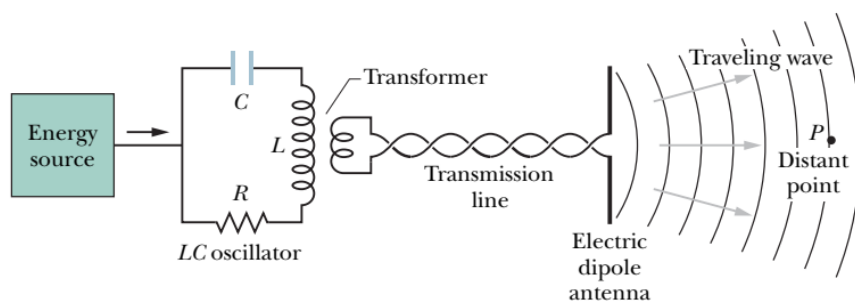
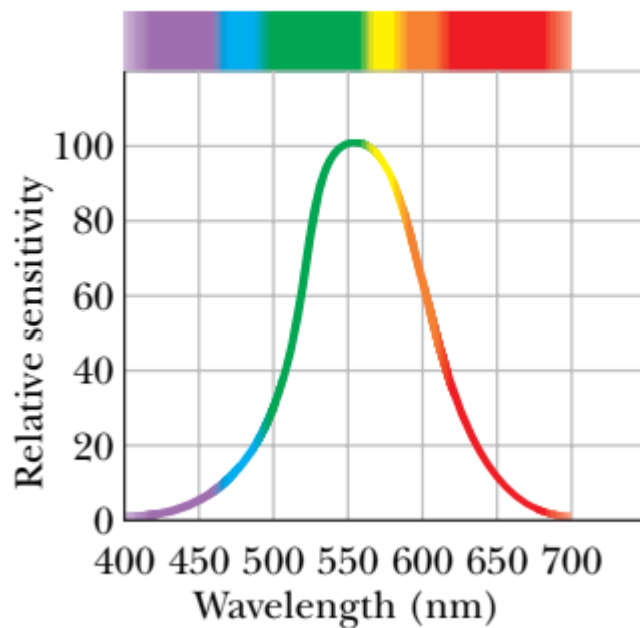
Σχήμα 8.1 Το Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Ενώ στον Πίνακα I φαίνεται η ονομασία, το μήκος κύματος ο τρόπος παραγωγής και ανίχνευσης της Ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καθώς και οι χρήσεις της.

## ΠΙΝΑΚΑΣ Ι

Όνομασία	Μήκος κύματος	Πώς παράγονται	Πώς ανιχνεύονται	Χρήσεις
<b>Ραδιοκύματα</b>	Από $10^3$ m έως μερικά εκατοστά περίπου	Από ηλεκτρονικά κυκλώματα, όπως το κύκλωμα LC	Με κεραιές ραδιοφώνου, τηλεόρασης κ.λπ.	Ραδιοφωνία, τηλεόραση, τηλεφωνία κ.λπ.
<b>Μικροκύματα</b>	Από 30 cm έως 1 mm περίπου	Από ηλεκτρονικά κυκλώματα	Με ραντάρ	Φούρνοι μικροκυμάτων, ραδιοαστρονομία, ραντάρ
<b>Υπέρυθρη ακτινοβολία</b>	Από 1 mm έως $7 \cdot 10^{-7}$ m (700 nm) περίπου	Εκπέμπεται από θερμά σώματα	Με φωτογραφικά φιλμ, με θέρμανση του δέρματος κ.λπ.	Ειδικές φωτογραφίες τη νύχτα ή μέσα στα σύννεφα
<b>Ορατή ακτινοβολία</b>	Από 400 nm έως 700 nm περίπου	Από τις αποδιεγέρσεις των ατόμων	Από το ανθρώπινο μάτι, φωτοκτύπαρα, φωτογραφικά φιλμ κ.λπ.	Όραση, φωτοσύνθεση, οπτικές ίνες, φασματοσκοπία κ.λπ.
<b>Υπεριώδης ακτινοβολία</b>	Από 400 nm έως $6 \cdot 10^{-8}$ m περίπου	Από τον Ήλιο και από τις αποδιεγέρσεις ορισμένων ατόμων	Με φωτογραφικά φιλμ και φωτοκτύπαρα	Αισθητική Ιατρική, αποστείρωση ιατρικών εργαλείων κ.λπ.
<b>Ακτίνες X (ή ακτίνες Roentgen)</b>	Από $10^{-8}$ m έως $10^{-13}$ m περίπου	Από την επιβράδυνση ταχέως κινούμενων ηλεκτρονίων καθώς προσκρούουν σε μεταλλικό στόχο	Με φωτογραφικά φιλμ	Στην Ιατρική για διαγνωστικούς σκοπούς και στη μελέτη της δομής των κρυστάλλων

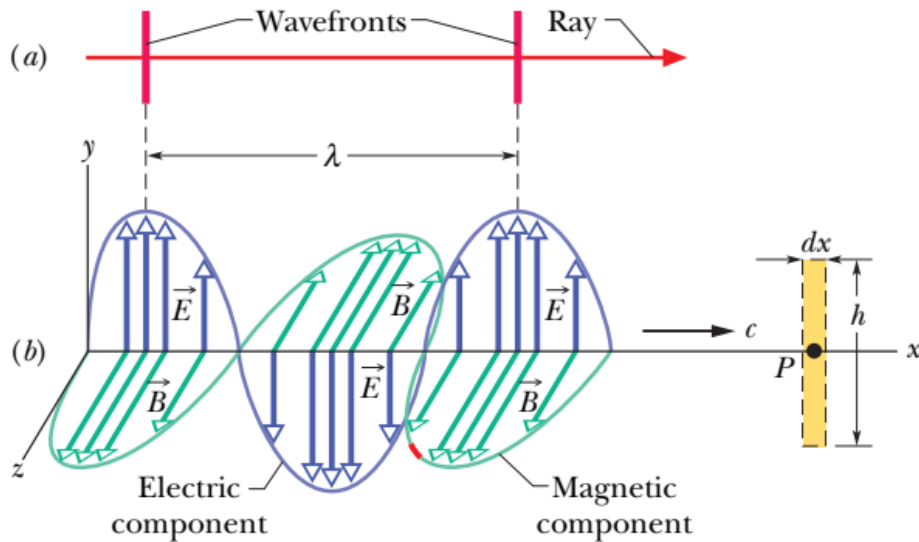




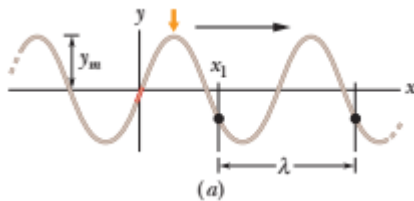
Μπορούμε να παρασιτήσουμε ένα κύμα με μία ακτίνα που δείχνει την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος ή με ένα μέτωπο κύματος το οποίο είναι μία φανταστική επιφάνεια στην οποία το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου έχει το ίδιο μέτρο) Μία ακτίνα είναι κάθετη σε δύο μέτωπα κύματος.

Επίσης μπορούμε να περιγράψουμε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ως ένα στιγμιότυπο

## του Ηλεκτρικού και Μαγνητικού πεδίου σε μία δεδομένη χρονική στιγμή.



Δεν πρέπει να συνδέουμε την εικόνα με το στιγμιότυπο ενός μηχανικού κύματος



Στο μηχανικό κύμα κινείται πάνω κάτω μέρος της χορδής

**Στο ηλεκτρομαγνητικό κύμα τα βέλη του Ηλεκτρικού και Μαγνητικού πεδίου παραστούν τιμές του Ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στα σημεία που βρίσκονται πάνω στον άξονα  $x$  και πουθενά αλλού**

Το μέσο διάδοσης εδώ είναι το κενό αρά δεν ταλαντώνεται μέσο όπως στο μηχανικό κύμα.

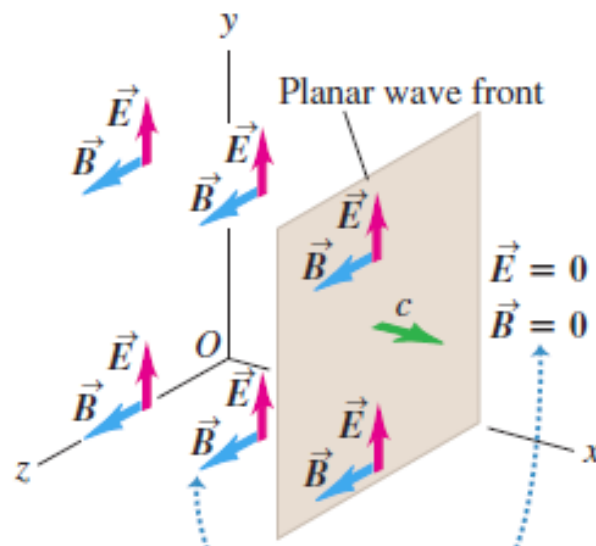
Τα Ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα  $c$  σε οποιοδήποτε σύστημα αναφοράς.

### 8.2 Επίπεδο κύμα

Για να ικανοποιηθούν οι εξισώσεις του Maxwell τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα πρέπει να έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά

1. Το κύμα είναι εγκάρσιο. Το  $\vec{E}$  και το  $\vec{B}$  είναι κάθετα στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος και επίσης κάθετα μεταξύ τους. Η κατεύθυνση διάδοσης είναι η κατεύθυνση του διανυσματικού γινομένου  $\vec{E} \times \vec{B}$
2. Ο λόγος των μέτρων του  $\vec{E}$  και του  $\vec{B}$  είναι καθορισμένος και ίσος με την ταχύτητα του φωτός στο κενό  $E=cB$
3. Το κύμα διαδίδεται στο κενό με μια ορισμένη και σταθερή ταχύτητα  $c$

Το πιο απλό και στοιχειώδες ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι το επίπεδο κύμα που απεικονίζεται στο Σχήμα 8.2.



Σχήμα 8.2

Αυτό δημιουργείται από ηλεκτρικό πεδίο μόνο με συνιστώσα  $y$  και ένα μαγνητικό πεδίο μόνο με συνιστώσα  $z$ . Τα δύο πεδία κινούνται μαζί στην κατεύθυνση  $+x$  με ταχύτητα  $c$  και βρίσκονται σε φάση. Τα πεδία  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  είναι ομογενή στην περιοχή που βρίσκεται αριστερά του επιπέδου αλλά είναι μηδέν οπουδήποτε δεξιά του. Το επίπεδο απεικονίζει το μέτωπο κύματος που κινείται προς τα δεξιά με ταχύτητα  $c$ .



$$E = E_m \sin(kx - \omega t), \quad (8.3)$$

$$B = B_m \sin(kx - \omega t), \quad (8.4)$$

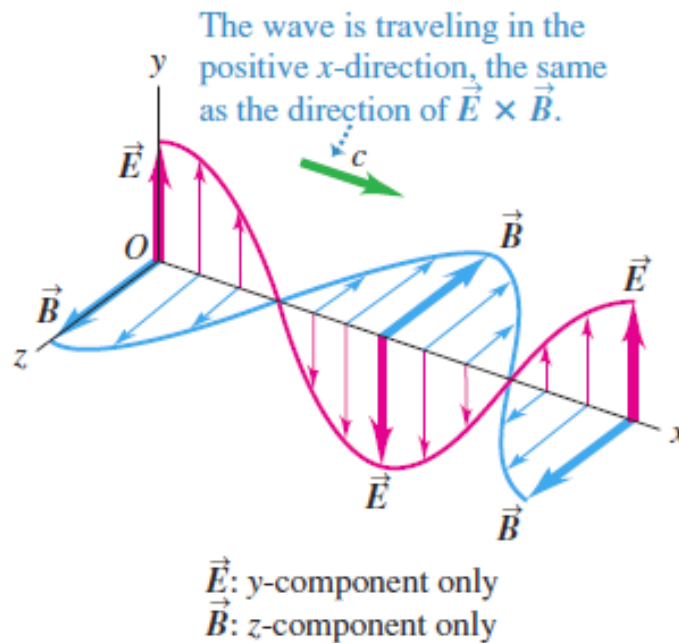
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (\text{wave speed}), \quad (8.5)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = c \quad (\text{amplitude ratio}). \quad (8.6)$$

$$\frac{E}{B} = c \quad (\text{magnitude ratio}). \quad (8.7)$$

### 8.3 Γραμμικά πολωμένο επίπεδο Ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Για χάριν απλότητας θεωρούμε ότι οι εξαρτήσεις των  $E$  και  $B$  σε κάθε σημείο του χώρου είναι ημιτονοειδής συναρτήσεις του χρόνου. Επίσης σε κάθε χρονική στιγμή η χωρική τους μεταβολή είναι ημιτονοειδής. Τα πεδία σε κάθε χρονική στιγμή είναι ομογενή πάνω σε οποιοδήποτε επίπεδο κάθετο στην κατεύθυνση και δεν αλλάζουν θέση, επίσης έχουν μετατοπίσεις μόνο κατά μήκος της διεύθυνσης  $y$  και  $z$  για το Ηλεκτρικό και Μαγνητικό πεδίο αντίστοιχα είναι δηλαδή **γραμμικά πολωμένα**. Τέτοια κύματα παριστάνονται στο Σχήμα 8.3



Σχήμα 8.3

Και περιγράφονται από τις εξισώσεις

$$\vec{E}(y, t) = E_{max} \cos(\omega t - kx) \vec{j} \quad (8.8)$$

$$\vec{B}(y, t) = B_{max} \cos(\omega t - kx) \vec{k} \quad (8.9)$$

Όπου  $\omega$  είναι η **γωνιακή ταχύτητα** ή **κυκλική συχνότητα**

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (8.10)$$

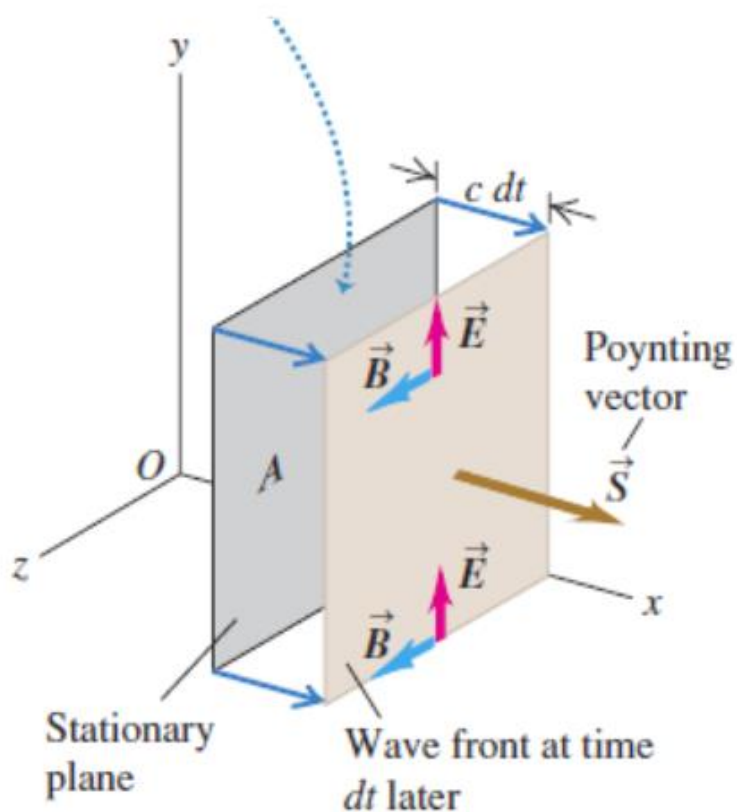
Και  $T, f$  είναι η περίοδος και η συχνότητα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος,

Ενώ  $k$  είναι ο **κυματάριθμος**

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (8.11)$$

### 8.4 Το διάνυσμα Poynting

Το διάνυσμα Poynting  $\vec{S}$  περιγράφει την ηλεκτρομαγνητική ισχύ ανά επιφάνεια σε μονάδες  $\left(\frac{W}{m^2}\right)$  παριστάνεται στο Σχήμα 8.4



Σχήμα 8.4

Το διάνυσμα Poynting ορίζεται από την σχέση,

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (8.12)$$

Ισχύει

$$\begin{aligned} \vec{S} &= \frac{1}{\mu_0} E_{max} \cos(\omega t - kx) B_{max} \cos(\omega t - kx) \hat{j} \times \hat{k} = \frac{1}{\mu_0} E_{max} B_{max} \cos^2(\omega t - kx) \hat{i} \\ &= c^2 \epsilon_0 E_{max} B_{max} \cos^2(\omega t - kx) \hat{i} \end{aligned} \quad (8.13)$$

Επειδή στις οπτικές συχνότητες τα μεγέθη  $E, B$  ταλαντώνονται με εξαιρετικά υψηλές συχνότητες είναι αδύνατο να μετρήσουμε στιγμιαίες τιμές του  $S$ . Για αυτό προσδιορίζουμε την μέση τιμή του  $S$  κατά την διάρκεια ενός καταλλήλου χρονικού διαστήματος. **Η μέση τιμή του  $S$  ταυτίζεται με το μέγεθος ένταση ακτινοβολίας  $J_e$ . Η ένταση ακτινοβολίας ορίζεται ως**

$$J_e = \frac{d\Phi_e}{dA} \quad (8.14)$$

Οπου,

$$d\Phi_e = \frac{dE_e}{dt} \quad (8.15)$$

Είναι η ροή ακτινοβολίας ή ενεργειακή ροή σε (W) και

$E_e$  είναι η ενέργεια ακτινοβολίας.

Για την μέση τιμή του διανύσματος Poynting ισχύει

$$S_{av} = J_e = \frac{c\epsilon_0 E_{max}^2}{2} \quad (8.16)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ή ισοδύναμα το φωτόνιο μεταφέρει ορμή όπως και στροφορμή. Η ορμή  $p$  δίνεται από την σχέση

$$\vec{p} = \frac{\vec{s}}{c^2} \quad (8.17)$$

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επίσης ασκεί πίεση σε μία επιφάνεια. Όταν η επιφάνεια απορροφά την ακτινοβολία τότε η πίεση  $p_{rad}$  δίνεται από την σχέση,

$$p_{rad} = \frac{S_{av}}{c} \quad (8.18)$$

Ενώ όταν η επιφάνεια είναι ανακλαστική δίνεται από την σχέση

$$p_{rad} = \frac{2S_{av}}{c} \quad (8.19)$$

### 8.5 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από κεραία.

Ένα ταλαντώμενο ηλεκτρικό δίπολο παράγει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η μορφή του πεδίου ακτινοβολίας είναι αρκετά πολύπλοκη. Όμως σε σημεία απομακρυσμένα από το δίπολο, σχετικά με τις διαστάσεις του διπόλου η μορφή του πεδίου απλουστεύεται. Το αντίστοιχο ηλεκτρομαγνητικό κύμα δεν είναι επίπεδο αλλά σφαιρικό. Στο Σχήμα 8.5 παριστάνεται το ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από ένα ταλαντώμενο ηλεκτρικό πεδίο.



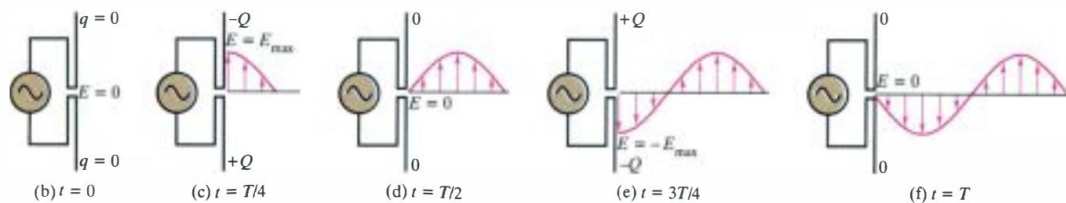
Σχήμα 8.5

Τα πεδία E,B σε ένα σημείο του χώρου με σφαιρικές συντεταγμένες (r,θ,φ) δίνονται από τις σχέσεις,

$$E = \frac{pk^2 \sin\theta}{4\pi\epsilon_0 r} \sin(\omega t - kr) \tag{8.20}$$

$$B = \frac{pk^2 \sin\theta}{4\pi\epsilon_0 r} \sin(\omega t - kr) \tag{8.21}$$

Το Σχήμα 5.6 παριστάνει ένα στιγμιότυπο μιας μεσημβρινής διατομής .Το E βρίσκεται πάνω στο επίπεδο της τομής ενώ το B είναι κάθετο. Και τα δύο πεδία είναι κάθετα προς την ακτινική κατεύθυνση. Οι μέγιστες τιμές των E και B παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους για  $\theta=\pi/2$  δηλαδή σε διευθύνεις κάθετες στο δίπολο, ενώ για  $\theta=0$  δηλαδή κατά μήκος του άξονα του διπόλου τα E,B μηδενίζονται. Στο Σχήμα 5.6 παριστάνεται η λειτουργία του διπόλου σε μία περίοδο.



Σχήμα 6.6

Από τις σχέσεις (6.10) και (6.14) προκύπτει ότι το η μέση τιμή του διανύσματος Poynting δηλαδή η ένταση ακτινοβολίας είναι ανάλογη του  $1/r^2$  και ανάλογη του  $\sin^2\theta$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

### ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

Η γεωμετρική οπτική στηρίζεται σε τρεις θεμελιώδεις εμπειρικούς νόμους :

A) Η φωτεινή ενέργεια διαδίδεται ευθύγραμμα σε ομογενές οπτικό μέσο

B) Η ευθύγραμμη πορεία αποκλίνει στην διαχωριστική επιφάνεια δύο μέσων

Γ) Η γεωμετρική πορεία του φωτός είναι αντιστρεπτή.

#### 9.1 Δείκτης διάθλασης

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{index of refraction})$$

(9.1)

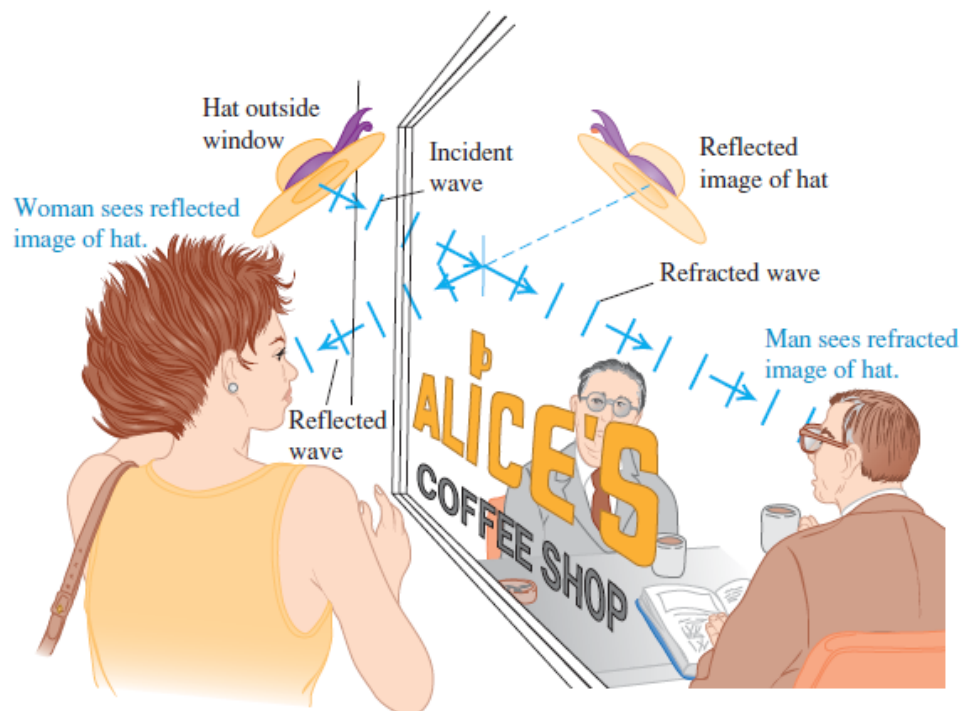
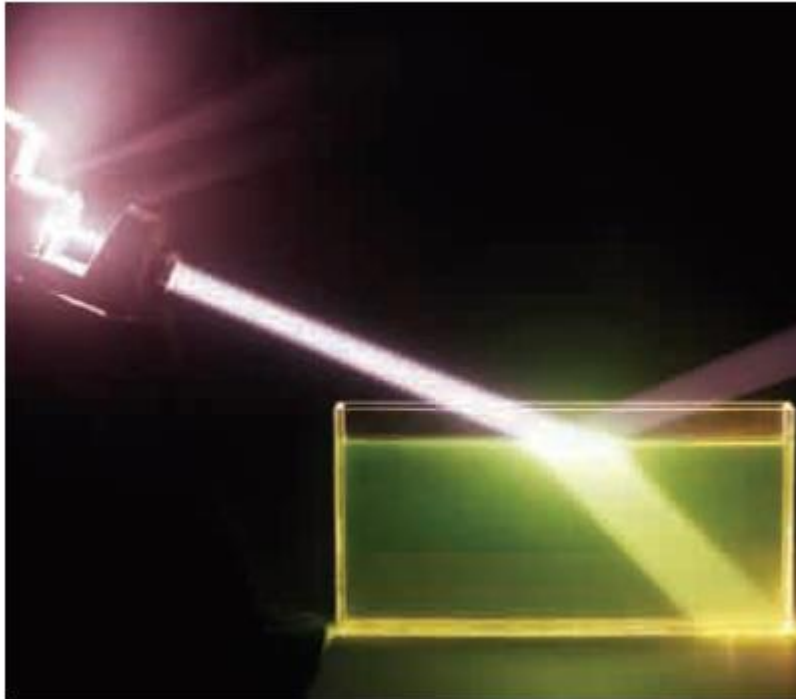
$$n > 1$$

$$v < c$$

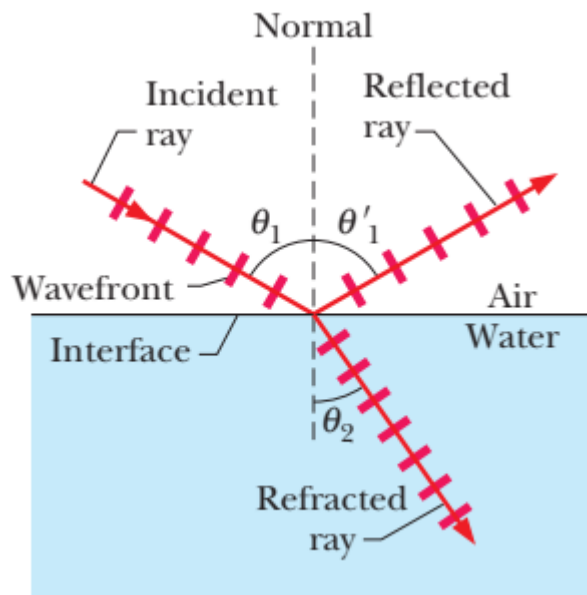
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad u = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$
$$\eta = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{K_e K_m}$$

## 9.2 Ανάκλαση και διάθλαση του φωτός

Στην περίπτωση που  $\lambda \rightarrow 0$  τότε μπορούμε να μελετήσουμε τα φαινόμενα διάδοσης του φωτός με τις αρχές της γεωμετρικής οπτικής δηλαδή να μελετάμε την διάδοση του φωτός με τις ακτίνες δηλαδή ευθείες κάθετες στα μέτωπα κύματα. Η διάδοση του φωτός είναι ευθύγραμμη







### Νόμος της Ανάκλασης

$$\theta'_1 = \theta_1 \quad (\text{reflection}).$$

(9.3)

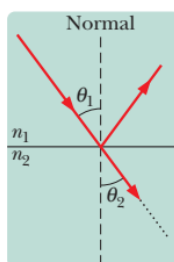
### Νόμος της διάθλασης – Νόμος του Snell

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1 \quad (\text{refraction}).$$

(9.4)

**ΠΙΝΑΚΑΣ 34-1 Δείκτης διάθλασης για την κίτρινη γραμμή του νατρίου ( $\lambda_0 = 589 \text{ nm}$ )**

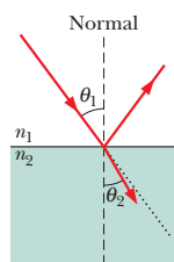
Υλικό	Δείκτης διάθλασης, $n$
<b>Στερεά</b>	
Πάγος ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,309
Φθορίτης (Αργυραδάμας) ( $\text{CaF}_2$ )	1,434
Πολυστυρόλιο	1,49
Ορυκτό άλας (Λιθάλας) ( $\text{NaCl}$ )	1,544
Χαλαζίας ( $\text{SiO}_2$ )	1,544
Ορυκτό Ζιρκόνιο ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ )	1,923
Αδάμας (C)	2,417
Φαβουλίτης ( $\text{SrTiO}_3$ )	2,409
Ρουτίλιο ( $\text{TiO}_2$ )	2,62
<b>Υαλοί (γυαλιά, τυπικές τιμές)</b>	
Στεφανιάλος (Βοημική ύαλος)	1,52
Μολυβδύαλος (μικρής οπτικής πυκνότητας)	1,58
Μολυβδύαλος (μέσης οπτικής πυκνότητας)	1,62
Μολυβδύαλος (μεγάλης οπτικής πυκνότητας)	1,66
Μολυβδύαλος λανθανίου	1,80
<b>Υγρά σε θερμοκρασία 20° C</b>	
Μεθανόλη ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )	1,329
Νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,333
Αιθανόλη ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	1,36
Τετραχλωράνθρακας ( $\text{CCl}_4$ )	1,460
Ρητίνη πεύκης (Τερεβινθίνη)	1,472
Γλυκερίνη	1,473
Βενζόλιο	1,501
Διθειάνθρακας ( $\text{CS}_2$ )	1,628



$$n_2 = n_1$$

(a)

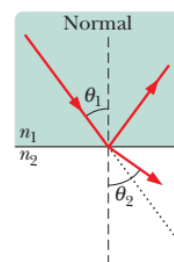
If the indexes match, there is no direction change.



$$n_2 > n_1$$

(b)

If the next index is greater, the ray is bent *toward* the normal.



$$n_2 < n_1$$

(c)

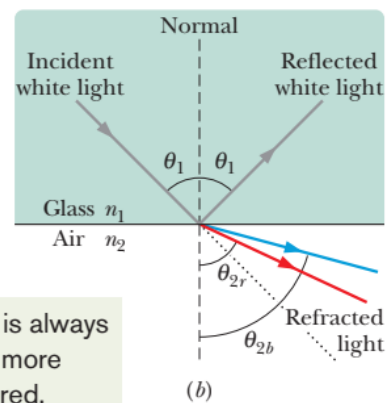
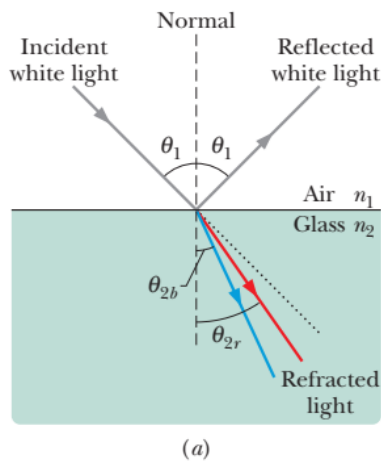
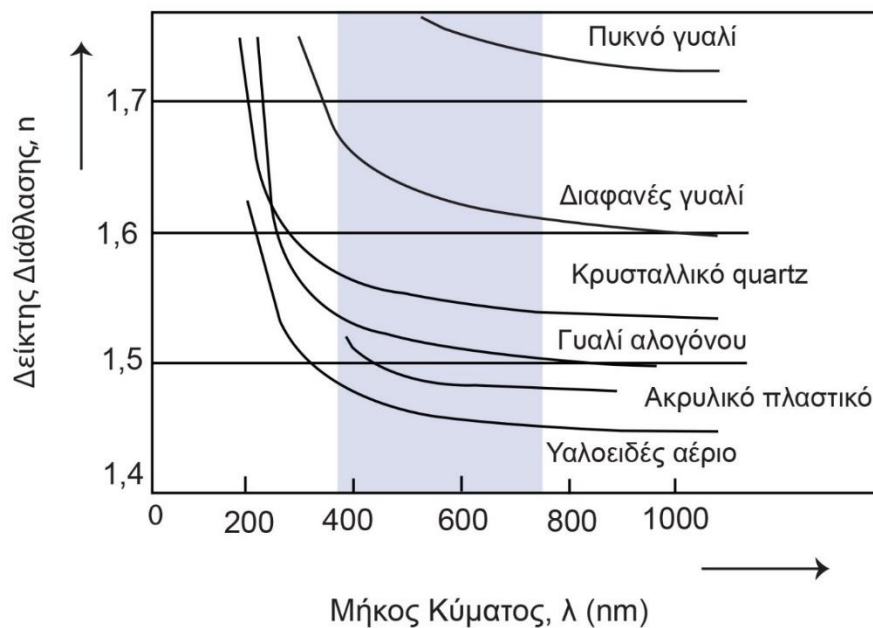
If the next index is less, the ray is bent *away from* the normal.

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1$$

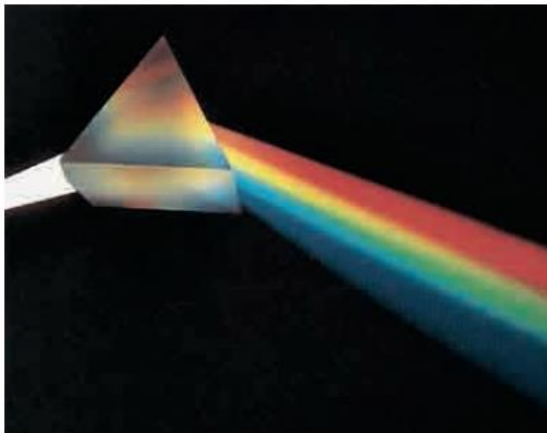
(9.5)

- Εάν πηγαίνουμε από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο  $n_1 < n_2$  τότε η διαθλώμενη πλησιάζει την κάθετο.
- Εάν πηγαίνουμε από οπτικά πυκνότερο σε οπτικά αραιότερο  $n_1 > n_2$  τότε η διαθλώμενη απομακρύνεται από την κάθετο.

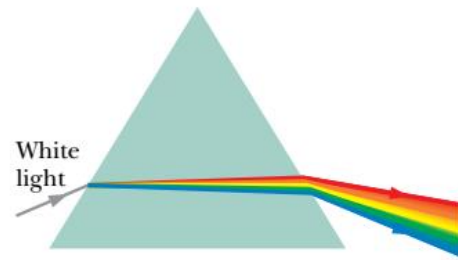
## Διασκεδασμός του φωτός



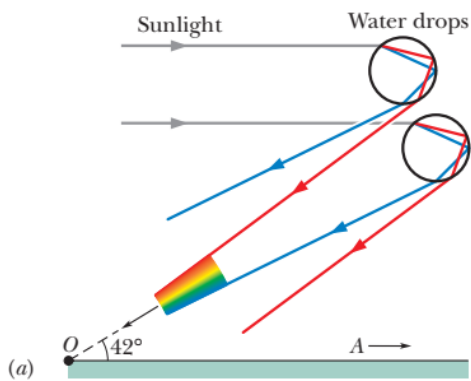
Blue is always bent more than red.



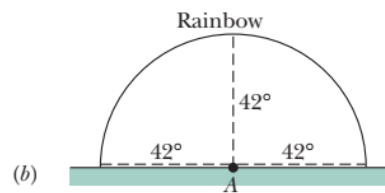
(a)



(b)



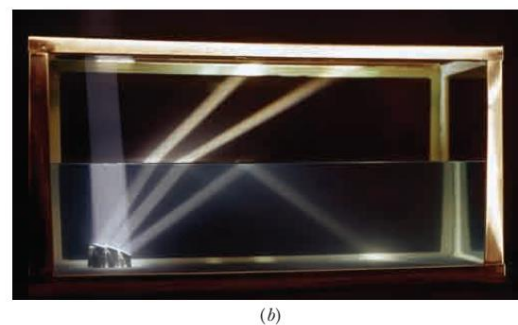
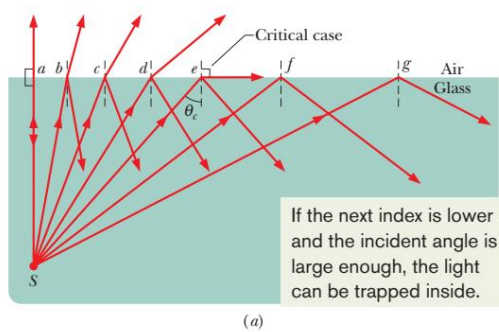
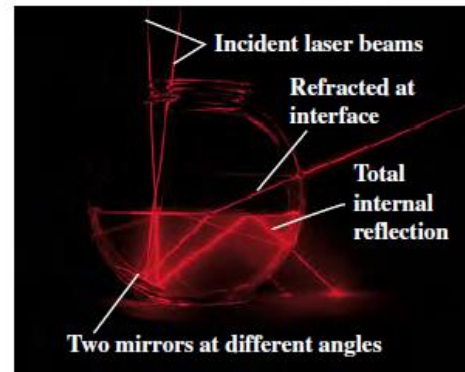
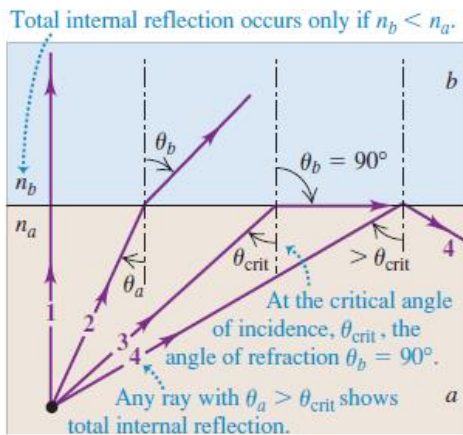
(a)



(b)

Ο παρατηρητής κοιτά αντίθετα με τον ήλιο.

### 9.3 Ολική Εσωτερική Ανάκλαση



Από τον νόμο του Snell ,

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

Η μεγαλύτερη τιμή του  $\sin$  είναι 1 για  $\theta_b = 90^\circ$  για κάποια τιμή της  $\theta_a = \theta_c$  πολύ λέγεται **ορική** ή **κρίσιμη γωνία** οπότε

$$n_a \sin\theta_c = n_b \rightarrow \sin\theta_c = \frac{n_b}{n_a} \quad (9.6)$$

για  $\theta_a > \theta_{cr}$  δεν υπάρχει διάθλαση και το φαινόμενο ονομάζεται **εσωτερική ανάκλαση**

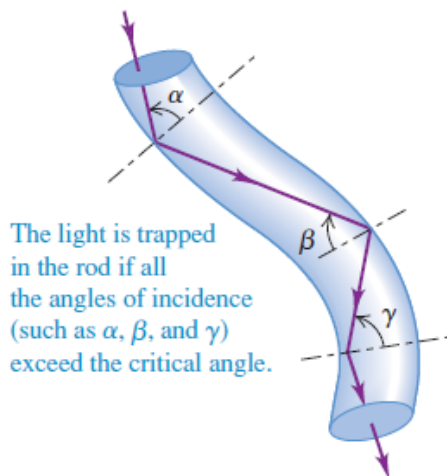
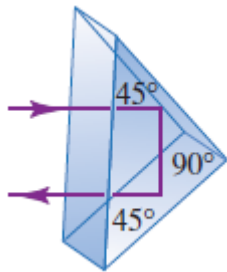
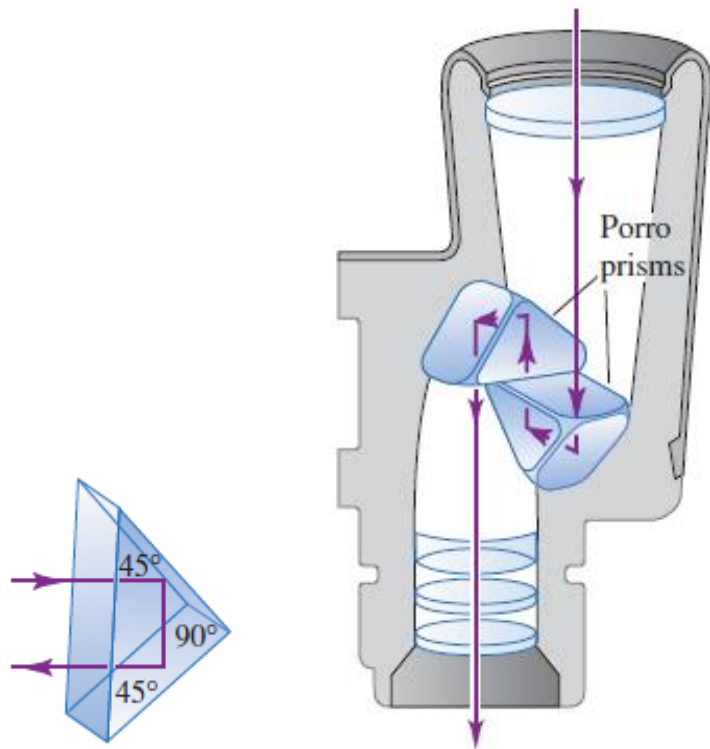
**Ολική εσωτερική ανάκλαση ΜΟΝΟ από Οπτικά Πυκνότερο σε Οπτικά αραιότερο**

Για το σύστημα Γυαλί αέρα έχουμε

$$n_a = 1.52, n_b = 1$$

$$\sin \theta_{crit} = \frac{1}{1.52} = 0,658, \quad \theta_{crit} = 41,1^\circ.$$

$$\theta_{cr} < 45^\circ$$

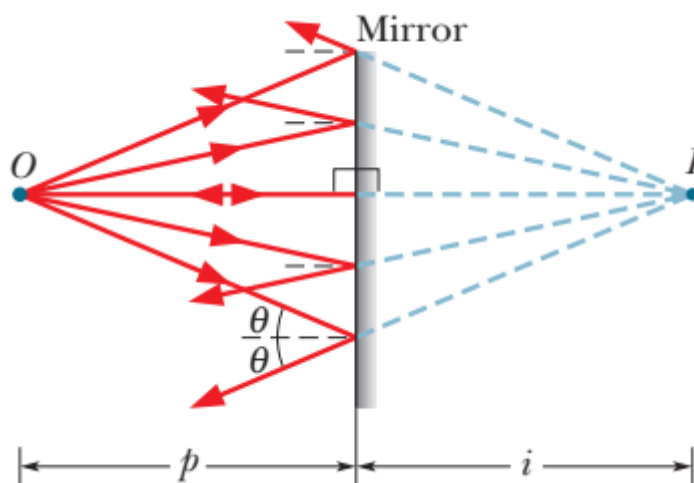


## 9.4 Κατοπτρα

Ένα κάτοπτρο είναι μία επιφάνεια που ανακλά το φως προς μία μόνο κατεύθυνση. Μία στιλπνή και λεία μεταλλική επιφάνεια είναι ένα κάτοπτρο

Όταν το η επιφάνεια είναι επίπεδη τότε έχουμε **επίπεδο κάτοπτρο**

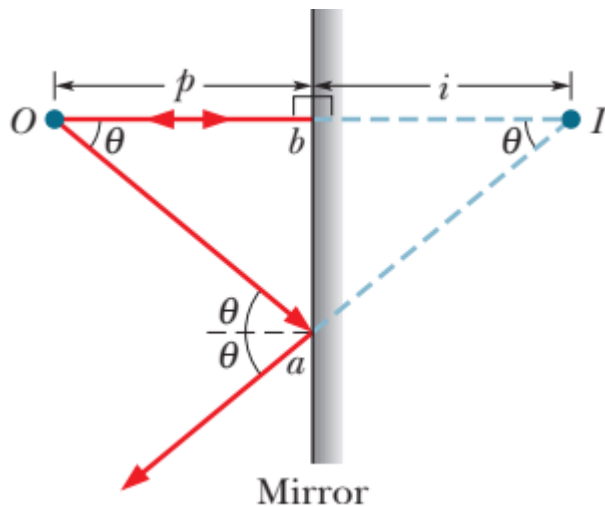
### 9.4.1 Επίπεδο κάτοπτρο



$O$  :σημειακό αντικείμενο

$I$ :σημειακό είδωλο





Τα τρίγωνα  $\alpha O b$  και  $\alpha I b$  έχουν 3 γωνίες ίσες άρα είναι όμοια οπότε

$$Ib = Ob$$

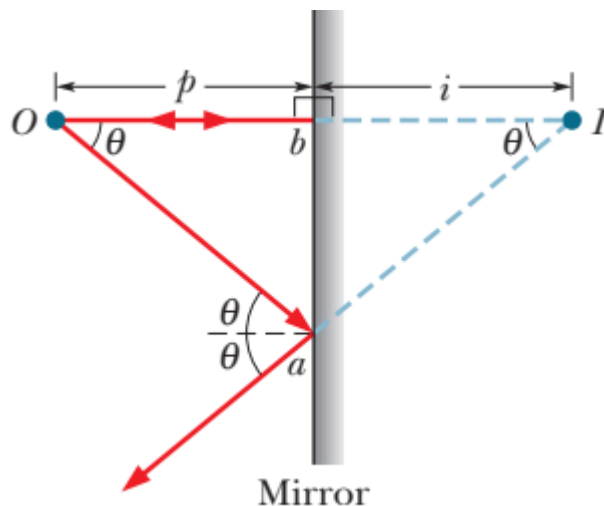
Οι εξερχόμενες ακτίνες δεν εξέρχονται πραγματικά από το  $I$  για αυτό το είδωλο αυτό λέγεται **φανταστικό σημειακό είδωλο**

Αν το κάτοπτρο είναι αδιαφανές δεν υπάρχει φώς από την πίσω πλευρά του

Τα είδωλα που αποτυπώνονται σε μία οθόνη ονομάζονται **πραγματικά είδωλα**

**Κατά σύμβαση**

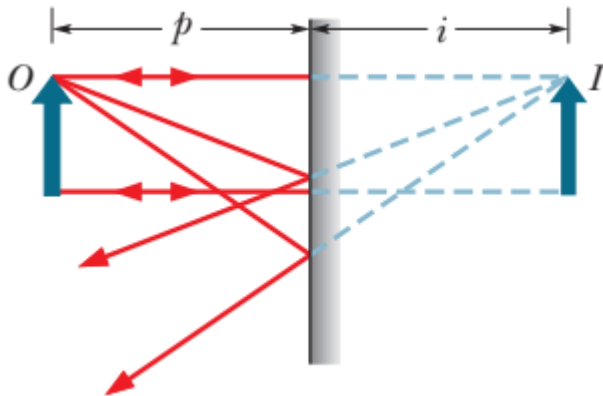
1. Όταν το αντικείμενο βρίσκεται στην ίδια πλευρά της ανακλαστικής η διαθλαστικής επιφάνειας με το προσπίπτον φως (πλευρά εισόδου) η απόσταση του αντικειμένου είναι θετική, διαφορετικά είναι αρνητική
2. Όταν το είδωλο βρίσκεται στην ίδια πλευρά της ανακλαστικής η διαθλαστικής επιφάνειας με το εξερχόμενο φως (πλευρά εξόδου) η απόσταση του ειδώλου είναι θετική, διαφορετικά είναι αρνητική
3. Στα κοίλα κάτοπτρα η ακτίνα καμπυλότητας λαμβάνεται θετική
4. Στα κυρτά κάτοπτρα η ακτίνα καμπυλότητας λαμβάνεται αρνητική



Οι αποστάσεις των αντικειμένων λαμβάνονται θετικές ενώ των ειδώλων αρνητικές οπότε,

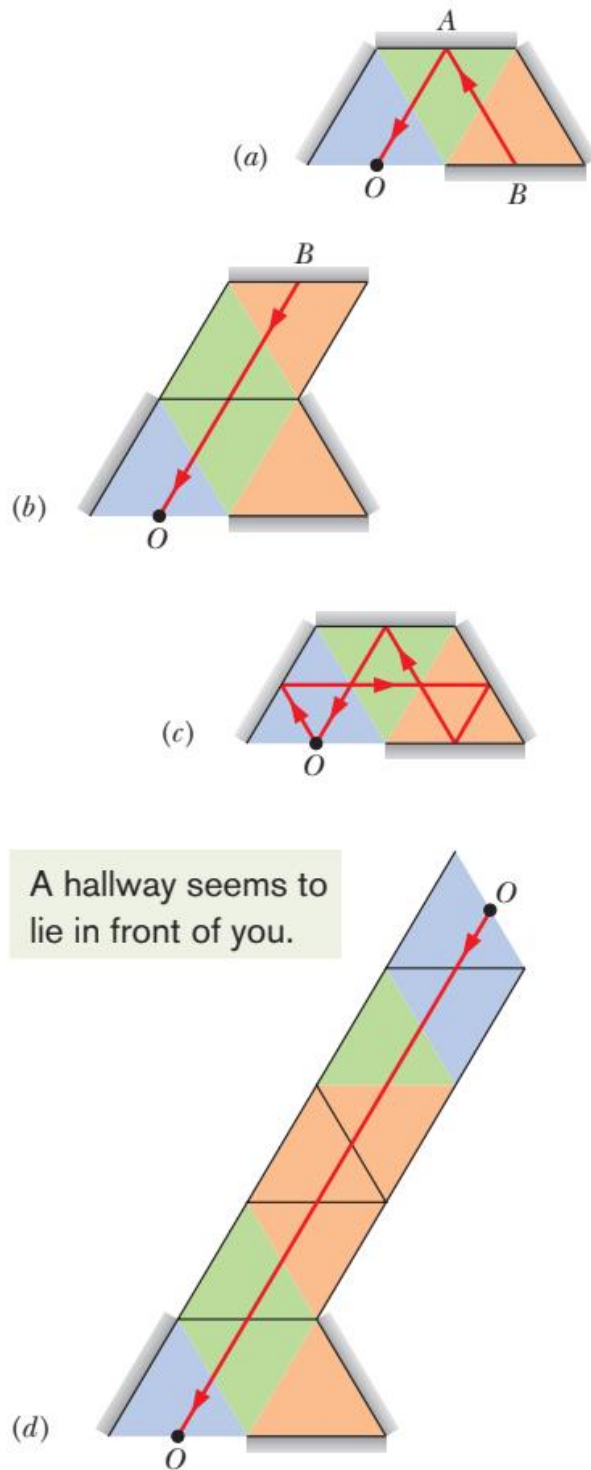
$$p = -i$$

Εκτεταμένο Αντικείμενο



- Ίδιο ύψος
- Ίδιος προσανατολισμός
- Το είδωλο είναι φανταστικό
- Το είδωλο είναι συμμετρικό ως προς κάτοπτρο (Το είδωλο του δεξιού χεριού είναι το αριστερό).





**Fig. 34-7** (a) Overhead view of a mirror maze. A ray from mirror  $B$  reaches you at  $O$  by reflecting from mirror  $A$ . (b) Mirror  $B$  appears to be behind  $A$ . (c) The ray reaching you comes from you. (d) You see a virtual image of yourself at the end of an apparent hallway.

## 9.5 Σφαιρικά Κάτοπτρα

### Κοίλα – Κυρτά

Στο κοίλο κατοπτρο η ανακλώσα επιφάνεια είναι στο εσωτερικό της σφαίρας. Στο κυρτό κατοπτρο η ανακλώσα επιφάνεια είναι στο εξωτερικό της σφαίρας.

#### Χαρακτηριστικά Σφαιρικών κατόπτρων

A) **Κέντρο Καμπυλότητας C**, είναι το κέντρο της σφαίρας που ανήκει η σφαιρική επιφάνεια. (στο επιπεδο κάτοπτρο βρίσκεται στο άπειρο)

B) Η ακτίνα της σφαίρας είναι η **ακτίνα καμπυλότητας** του κατόπτρου

Γ) Το μέσο του τόξου που σχηματίζει το κάτοπτρο είναι η **κορυφή του κατόπτρου**.

Δ) Η γωνία με κορυφή το κέντρο καμπυλότητάς που βλέπει στο τόξο του κατόπτρου είναι το **άνοιγμα του κατόπτρου**

E) **Το οπτικό πεδίο**

Z) **Η θέση του ειδώλου**

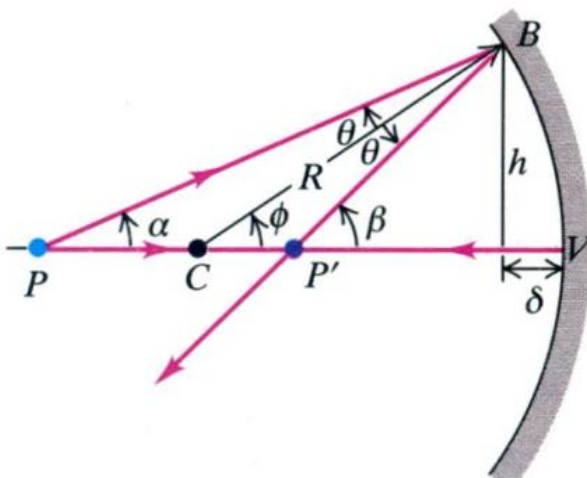
Δ) **Το υψος του ειδώλου**

H) Ο **κεντρικός ή κύριος άξονας** είναι η ευθεία που ορίζεται από το κέντρο καμπυλότητος και την κορυφή του κατόπτρου

Θ) Οποιαδήποτε ευθεία που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας και δεν συμπίπτει με τον κύριο άξονα ονομάζεται **δευτερεύων αξονας**

Ι) Η **κύρια εστία**

Κ) Η **εστιακή απόσταση**



### Κοίλο Κάτοπτρο

το οπτικό πεδίο μικραίνει σε σχέση με το επίπεδο κάτοπτρο

Το είδωλο απομακρύνεται από το κάτοπτρο

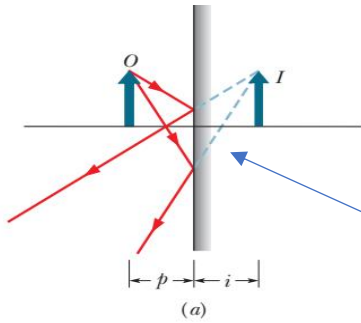
Το ύψος του ειδώλου είναι μεγαλύτερο

### Κυρτό Κάτοπτρο

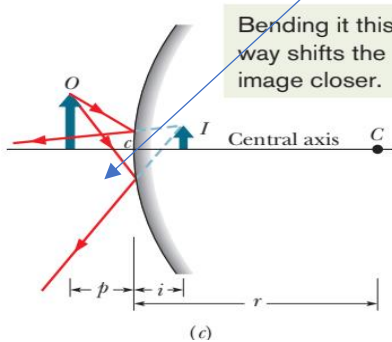
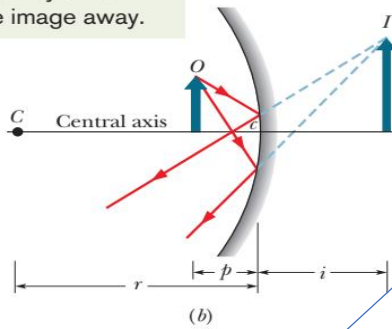
το οπτικό πεδίο μεγαλώνει σε σχέση με το επίπεδο κάτοπτρο

Το είδωλο πλησιάζει στο κάτοπτρο

Το ύψος του ειδώλου είναι μικρότερο



Bending the mirror this way shifts the image away.



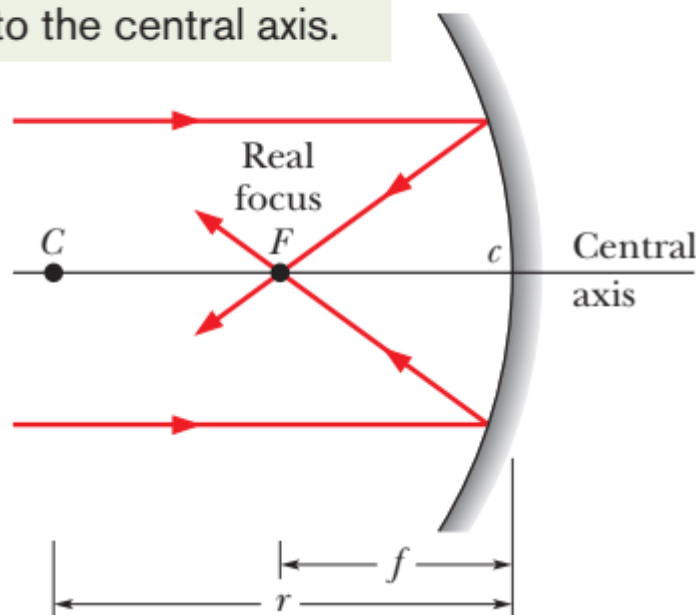
Οπτικό πεδίο



## Χαρακτηριστική εξίσωση κατόπτρων

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{2}{r} \quad (9.7)$$

To find the focus, send in rays parallel to the central axis.



Θεωρούμε ότι το σημειακό αντίκείμενο βρίσκεται πολύ μακριά από το κάτοπτρο ( $p=\infty$ ) τότε

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{i} = \frac{2}{r} \quad (9.8)$$

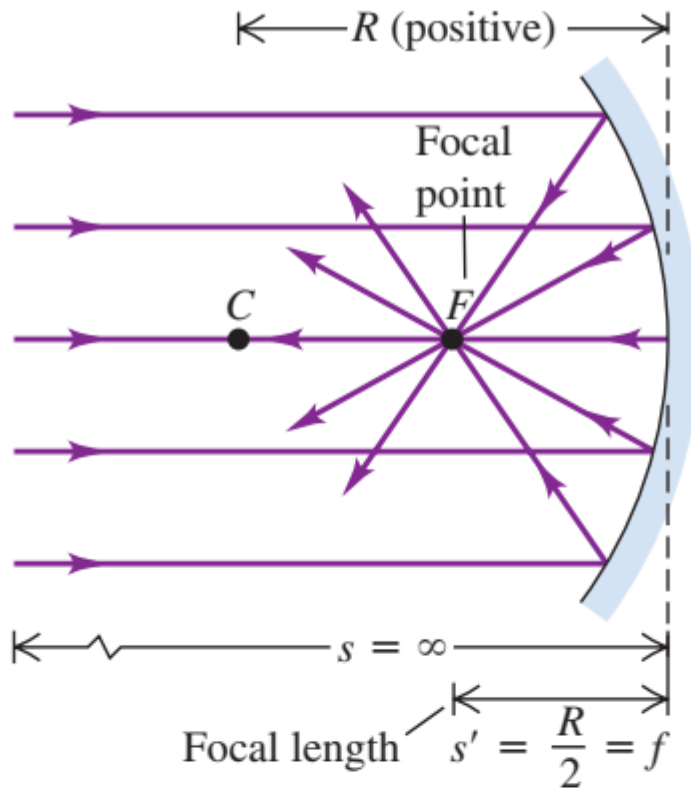
Το σημείο F ονομάζεται **εστιακό σημείο** ή **κύρια εστία** και η απόσταση από την κορυφή του κατόπτρου **εστιακή απόσταση f**

Από την προκύπτει

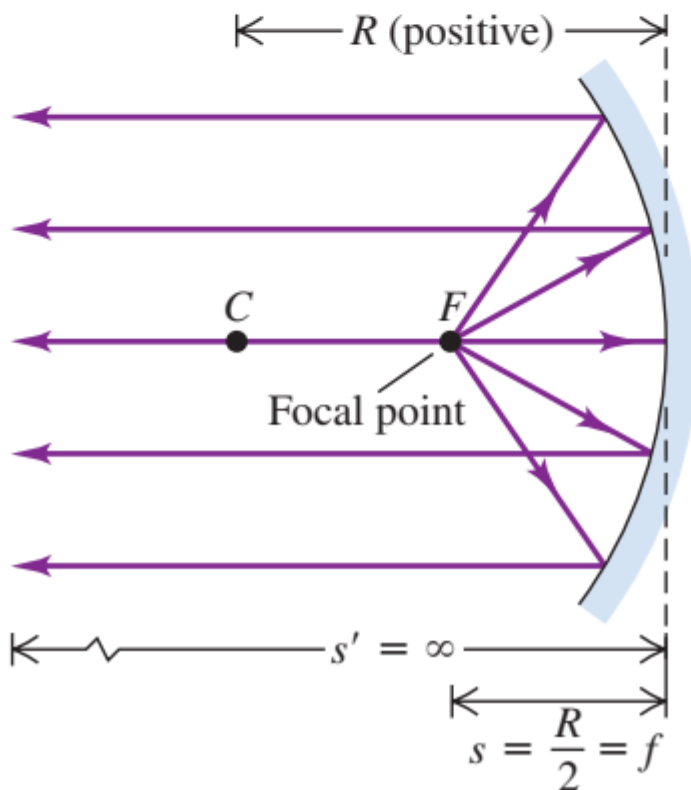
$$f = \frac{1}{2}r \quad (\text{spherical mirror}), \quad (9.9)$$

Και η (9.7) γίνεται

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f} \quad (\text{spherical mirror}). \quad (9.10)$$



(b) Rays diverging from the focal point reflect to form parallel outgoing rays.



Η εξίσωση ισχύει για παραξονικές ακτίνες δηλαδή ακτίνες που σχηματίζουν μικρή γωνία με τον κύριο άξονα είναι δηλαδή σχεδόν παράλληλες. Τα μεγέθη στην λαμβάνουν αλγεβρικές τιμές ανάλογα την περίπτωση

Ορίζουμε σαν **εγκάρσια μεγέθυνση  $m$**  τον λόγο

$$m = \frac{h'}{h} = -\frac{i}{p} \quad (9.11)$$

### Γραφικές μέθοδοι εύρεσης του ειδώλου

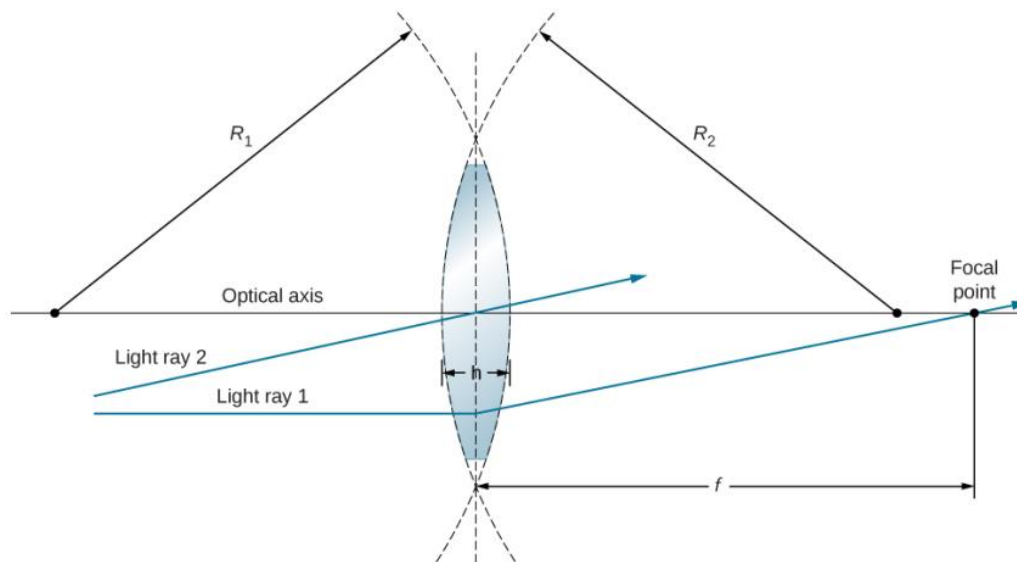
- 1) Από ένα σημείο του αντικειμένου που δεν βρίσκεται στον κύριο άξονα φέρνουμε ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα. Μετά την ανάκλαση η ακτίνα διέρχεται από την κύρια εστία. Στο κυρτό κάτοπτρο φαίνεται σαν να προέρχεται από την κύρια εστία
- 2) Μία ακτίνα που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας προσπίπτει κάθετα στην

επιφάνεια και μετά την ανάκλαση ακολουθεί την ίδια τροχιά

3) Από την τομή των δύο ακτίνων προσδιορίζεται η θέση του ειδώλου

## 9.6 Φακοί

Ονομάζουμε **σφαιρικό φακό** κάθε διαφανές σώμα το οποίο περιορίζεται από δύο σφαιρικές επιφάνειες ή από μία σφαιρική και μία επίπεδη επιφάνεια.

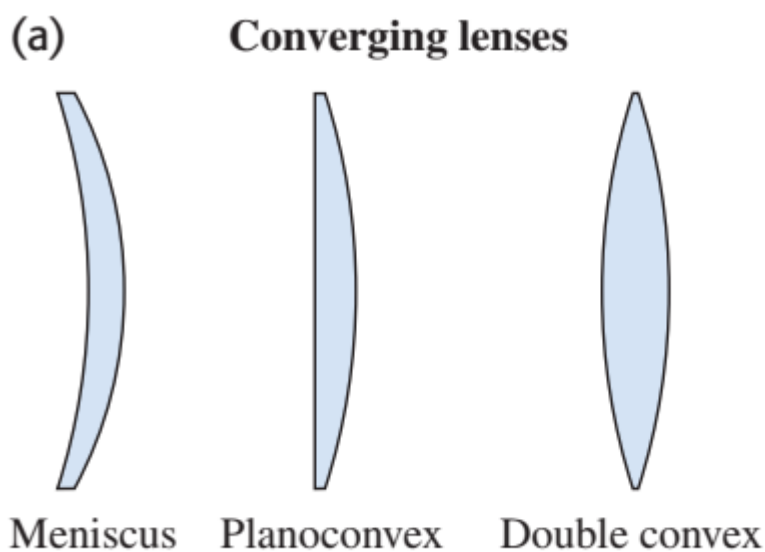


Οι ακτίνες  $R_1$  και  $R_2$  των σφαιρικών επιφανειών καλούνται **ακτίνες καμπυλότητας**. Η ευθεία που διέρχεται από τα κέντρα καμπυλότητας ή από το κέντρο καμπυλότητας και είναι κάθετος στην επίπεδη

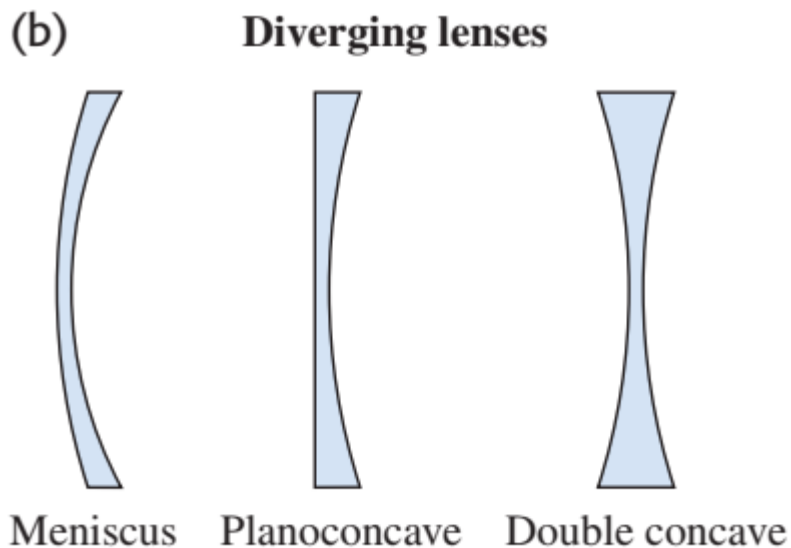
επιφάνεια είναι άξονας συμμετρίας εκ περιστροφής και ονομάζεται **κύριος άξονας**.

Λεπτός χαρακτηρίζεται ο φακός όταν το πάχος του επί του κυρίου άξονα είναι μικρό συγκρινόμενο με τις ακτίνες καμπυλότητας

**Συγκλίνων φακός** είναι φακός που είναι λεπτός στα άκρα και παχύς στο μέσον



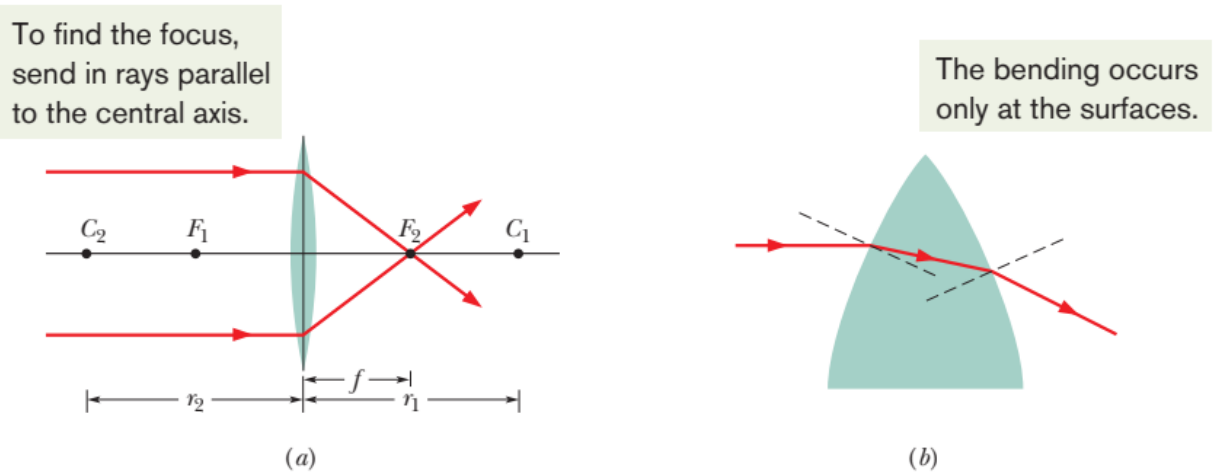
**Αποκλίνων φακός** είναι φακός που είναι παχύς στα άκρα και λεπτός στο μέσον



Αν ο δείκτης διάθλασης του περιβάλλοντος μέσου είναι μεγαλύτερος από τον δείκτη διάθλασης του φακού τότε οι συγκλίνοντες λειτουργούν σαν αποκλίνοντες και οι αποκλίνοντες λειτουργούν σαν συγκλίνοντες

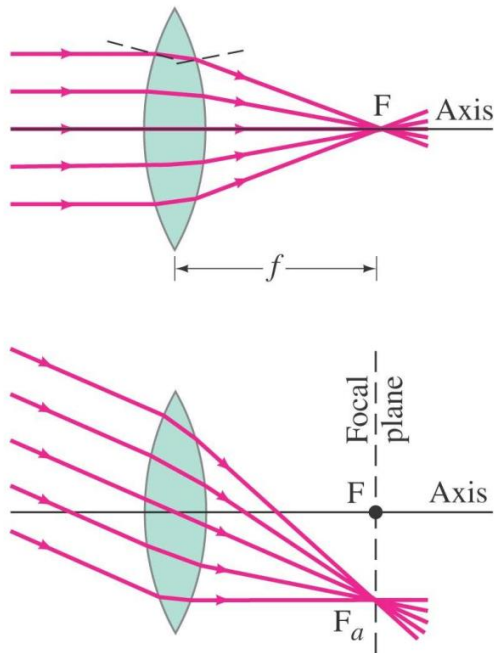
**Οπτικό κέντρο** του φακού είναι το σημείο που ο κύριος άξονας τέμνει τον φακό. Κάθε ακτίνα που διέρχεται από το οπτικό κέντρο αναδύεται χωρίς να υφίσταται εκτροπή. Οποιοσδήποτε ευθεία που διέρχεται από το οπτικό κέντρο και δεν συμπίπτει με τον κύριο άξονα λέγεται **δευτερεύων άξονας**.

**Συγκλίνων φακός**

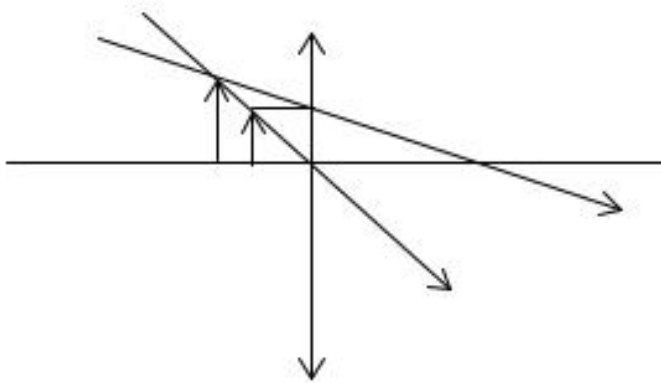


Μία δέσμη παράλληλων ακτίνων προς τον κύριο άξονα αναδυομένη συγκλίνει σε ένα σημείο  $F_2$  που ονομάζεται **κύρια εστία**. Η ακτίνες που συγκλίνουν στην κύρια εστία είναι πραγματικές και η κύρια εστία είναι πραγματική. Ένας συγκλίνων φακός οποιουδήποτε σχήματος έχει δύο κύριες πραγματικές εστίες συμμετρικές προς το οπτικό κέντρο.



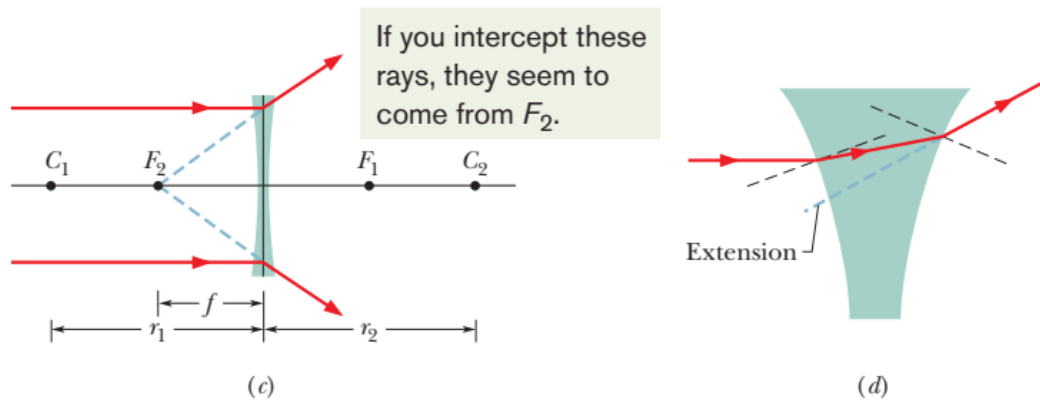


Εάν δέσμη ακτίνων παράλληλη προς δευτερεύοντα άξονα προσπέση σε συγκλίνοντα φακό αναδυομένη συγκεντρώνεται σε σημείο  $F_a$  που το λέμε δευτερεύουσα εστία

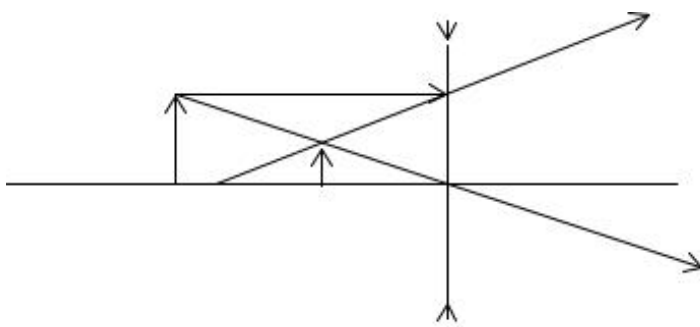


Σύμβολο συγκλίνοντα φακού

## Αποκλίνων φακός



Μία δέσμη παράλληλων ακτίνων προς τον κύριο άξονα αναδυομένη αποκλίνει και φαίνεται ότι προέρχεται από ένα σημείο  $F_2$  που ονομάζεται **κύρια εστία**. Ένας αποκλίνων φακός οποιουδήποτε σχήματος έχει δύο κύριες φανταστικές εστίες συμμετρικές προς το οπτικό κέντρο.



Σύμβολο αποκλίνοντα φακού

Η απόσταση ανάμεσα στο οπτικό κέντρο και την κύρια εστία ονομάζεται **εστιακή απόσταση  $f$**

Για τους φακούς ισχύει

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{i} \quad (\text{thin lens}), \quad (9.12)$$

Η μεγέθυνση του φακού δίνεται από

$$m = -\frac{i}{p} \quad (9.13)$$

Οι αλγεβρικές τιμές των  $f, p, i$  ακολουθούν τους εξής κανόνες

Αντικείμενο πραγματικό,  $p > 0$

Είδωλο πραγματικό  $i > 0$

Αντικείμενο φανταστικό,  $p < 0$

Είδωλο φανταστικό  $i < 0$

$f > 0$  για συγκλίνοντα φακό

$f < 0$  για αποκλίνοντα φακό

Ονομάζουμε **ισχύ  $P$**  του φακού το μέγεθος

$$P = \frac{1}{f} \quad (9.14)$$

(Μονάδα ισχύς φακού είναι η διοπτρία  
 $1D=1m^{-1}$ )

Για την εστιακή απόσταση των λεπτών φακών  
**ισχύει ο τύπος των κατασκευαστών φακών**

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{thin lens in air}),$$

(9.15)

Όταν το περιβάλλον μέσο είναι ο αέρας.

Για τις ακτίνες ισχύει

$r_1 > 0$ ,  $r_2 > 0$  για κοίλες επιφάνειες

$r_1 < 0$ ,  $r_2 < 0$  για κυρτες επιφάνειες

$r_1, r_2 \rightarrow \infty$  για επίπεδες επιφάνειες

Συγκεκριμένα

α) Αμφίκυρτος

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (9.16)$$

β) Επιπεδόκυρτος

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} \right) \quad (9.17)$$

γ) Αμφίκυβλος

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{-r_1} + \frac{1}{-r_2} \right) \quad (9.18)$$

δ) Επιπεδόκυβλος

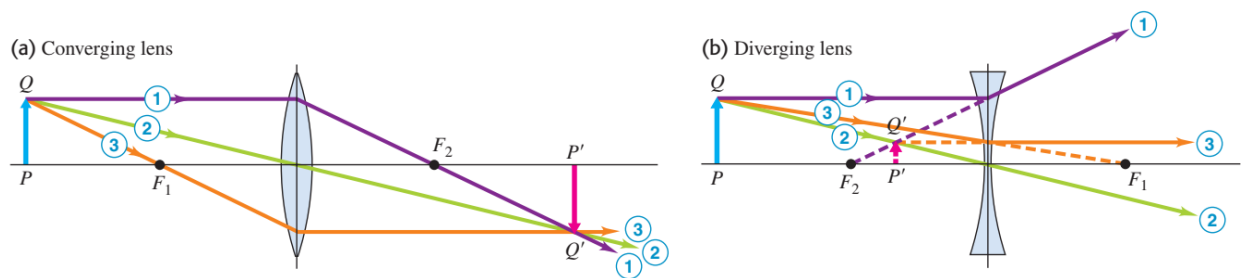
$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{-r_1} \right) \quad (9.19)$$

### Γραφικές μέθοδοι εύρεσης του ειδώλου

1) Από ένα σημείο του αντικειμένου που δεν βρίσκεται στον κύριο άξονα φέρνουμε ακτίνα παράλληλη με τον κύριο άξονα. Μετά την ανάδυση η ακτίνα διέρχεται από την κύρια εστία. Στον αποκλίνοντα φακό φαίνεται σαν να προέρχεται από την κύρια εστία

2) Μία ακτίνα που διέρχεται από το οπτικό κέντρο του φακού ακολουθεί την ίδια τροχιά

3) Από την τομή των δύο ακτίνων προσδιορίζεται η θέση του ειδώλου

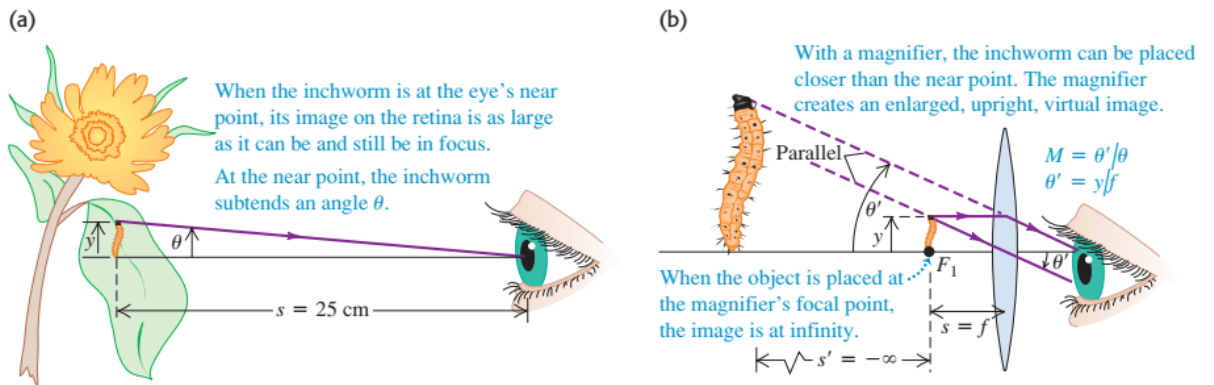


### Σύστημα λεπτών φακών σε επαφή

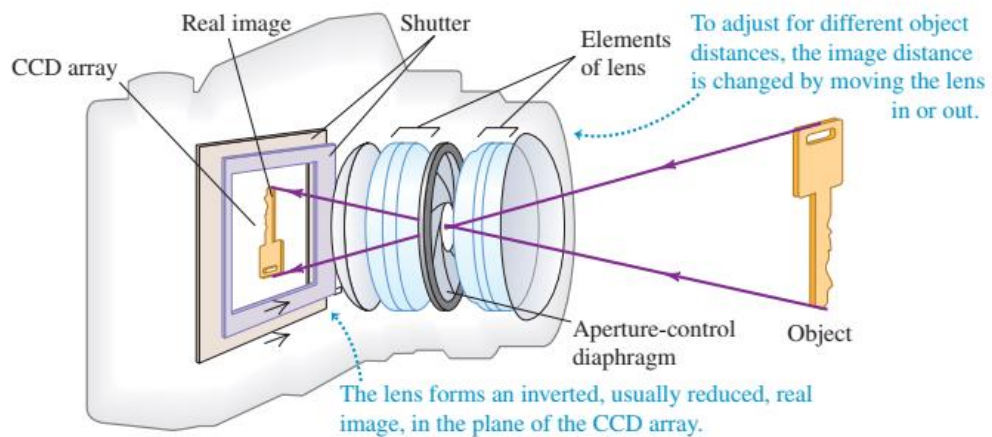
Το σύστημα δύο φακών με εστιακές αποστάσεις  $f_1$  και  $f_2$  αντίστοιχα μπορεί να αντικατασταθεί από ένα φακό με εστιακή απόσταση  $f$  έτσι ώστε

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \quad (9.20)$$

## Μεγεθυντικός φακός



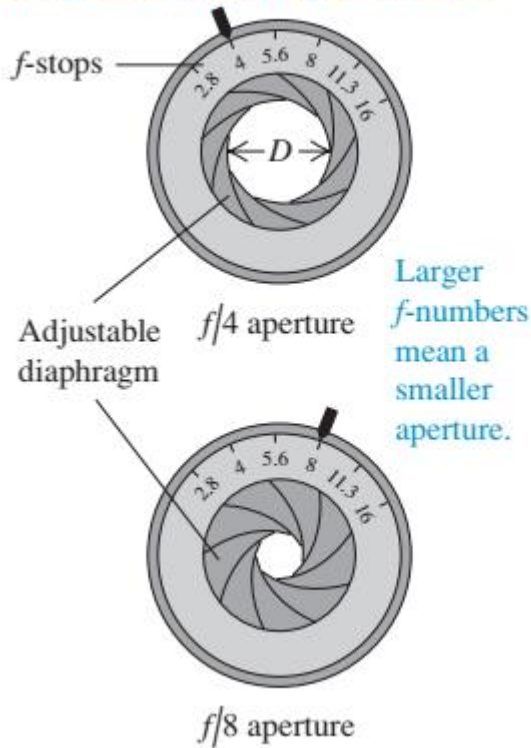
## Φωτογραφική Μηχανή – Camera



$$\text{αριθμός-}f = \frac{\text{Εστιακή απόσταση}}{\text{Διάμετρος ανοίγματος}} = \frac{f}{D}$$

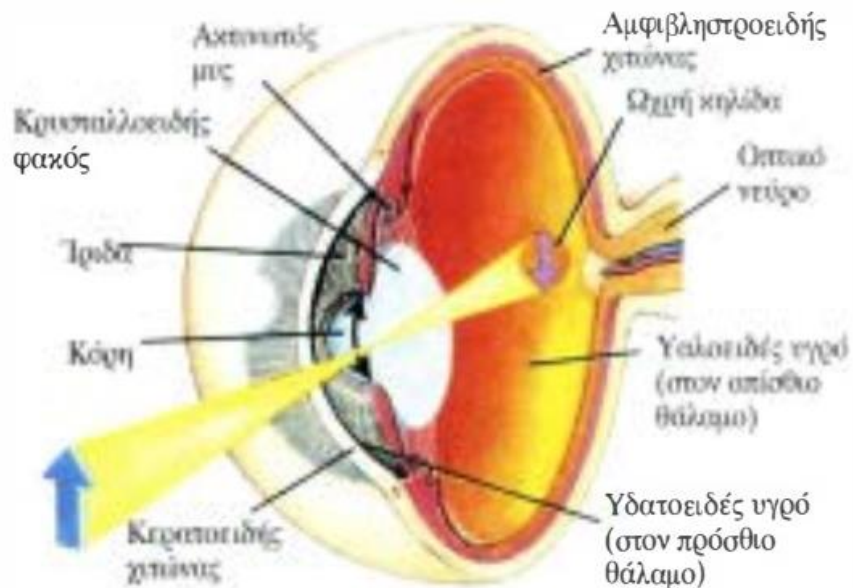
(9.21)

Changing the diameter by a factor of  $\sqrt{2}$  changes the intensity by a factor of 2.



$f/2$     $f/2.8$     $f/4$     $f/5.6$     $f/8$     $f/11$     $f/16$

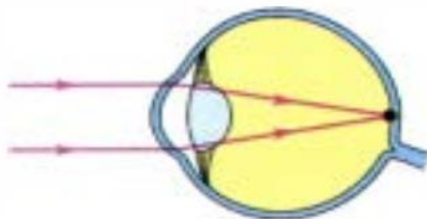
## Το ανθρώπινο μάτι



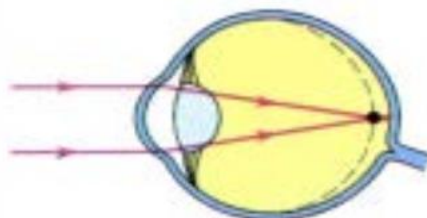


**ΠΙΝΑΚΑΣ 36-1** Απομάκρυνση του εγγύτατου σημείου ευκρινούς όρασης με την ηλικία

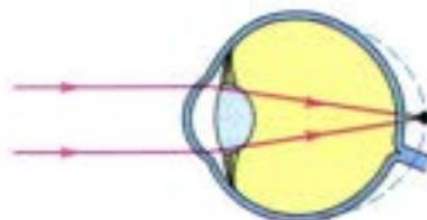
Ηλικία (έτη)	Εγγύτατο σημείο (cm)
10	7
20	10
30	14
40	22
50	40
60	200



(a) Κανονικός οφθαλμός



(b) Μυωπικός οφθαλμός

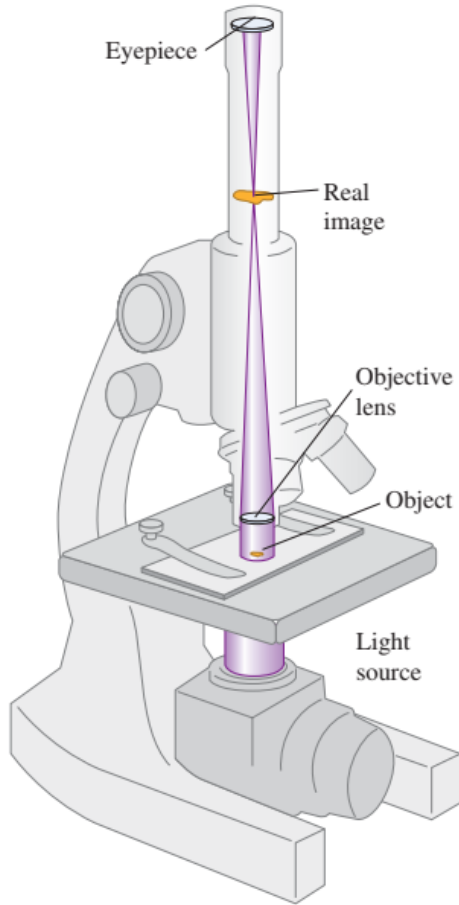


(c) Υπερμετρωπικός οφθαλμός

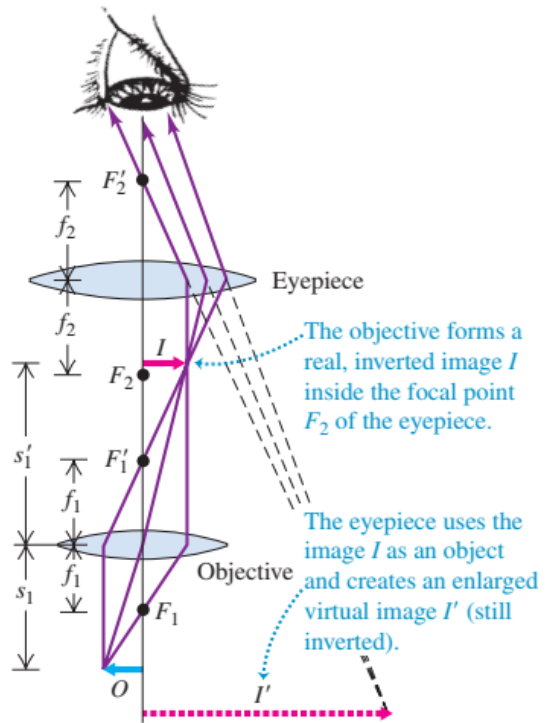
**36-6** Διαθλαστικά σφάλματα μυωπικού και υπερμετρωπικού οφθαλμού καθώς παρατηρεί ένα πολύ απομακρυσμένο αντικείμενο. Η διακεκομμένη κυανή γραμμή υποδεικνύει τη σωστή θέση του αιωβλυστοειδούς.

# Αρχή λειτουργίας Μικροσκοπίου

(a) Elements of a microscope

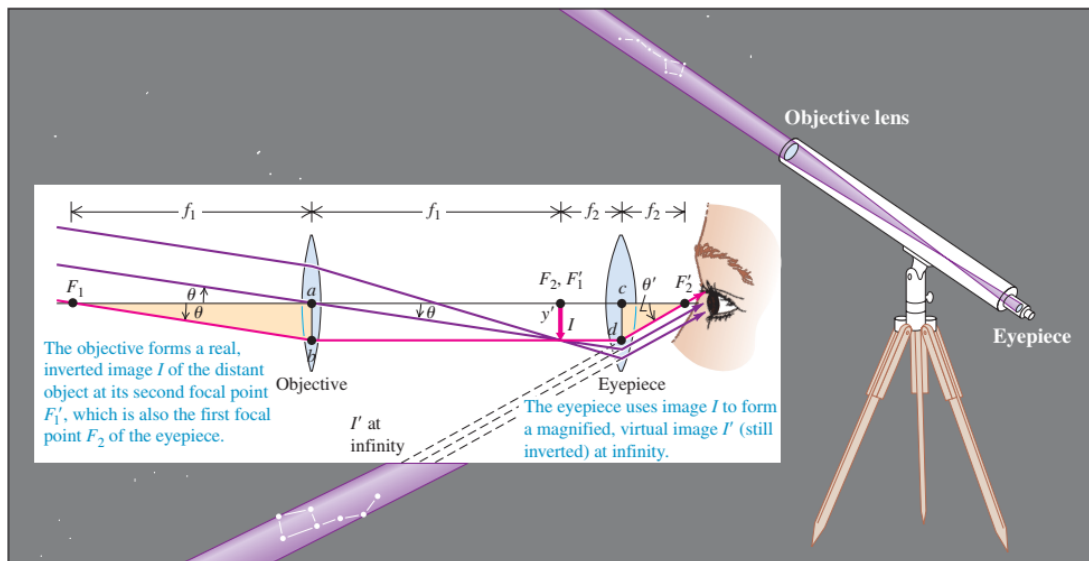


(b) Microscope optics



$$M = m_1 M_2 = \frac{(25 \text{ cm})s_1'}{f_1 f_2} \quad (9.22)$$

# Αρχή λειτουργίας Τηλεσκοπίου



$$M = \frac{\theta'}{\theta} = -\frac{y'/f_2}{y'/f_1} = -\frac{f_1}{f_2} \quad (\text{angular magnification for a telescope})$$

(9.23)

Όπου  $M$  είναι η γωνιακή μεγέθυνση του τηλεσκοπίου

Το αρνητικό πρόσημο δηλώνει ότι το είδωλο είναι ανεστραμμένο.

Τα τηλεσκόπια και τα κιάλια χαρακτηρίζονται από δύο αριθμούς.

**Γωνιακή μεγέθυνση x διάμετρος αντικειμενικού φακού** (σε mm)

, π.χ. 7x50.

Η διάμετρος του αντικειμενικού εκφράζει την ποσότητα του φωτός που συλλέγει το τηλεσκόπιο και επομένως την λαμπρότητα του ειδώλου.

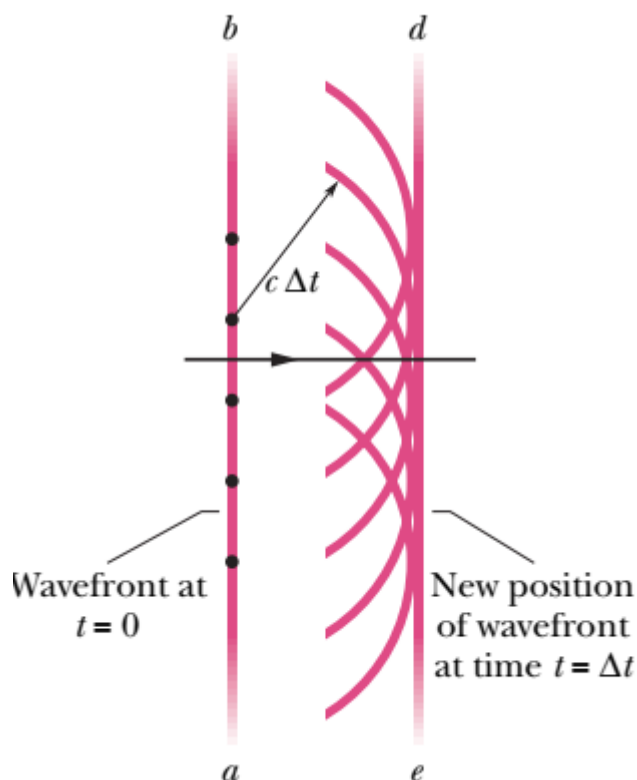
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

### ΣΥΜΒΟΛΗ

Η κυματική φύση του φωτός υιοθετήθηκε από τον Cristian Huygens το 1678. Με την κυματική φύση ο Huygens ερμήνευσε το φαινόμενο της ανάκλασης και της διάθλασης χωρίς να γνωρίζει αν το φως είναι εγκάρσιο ή διαμήκες κύμα παρά μόνο κύμα.

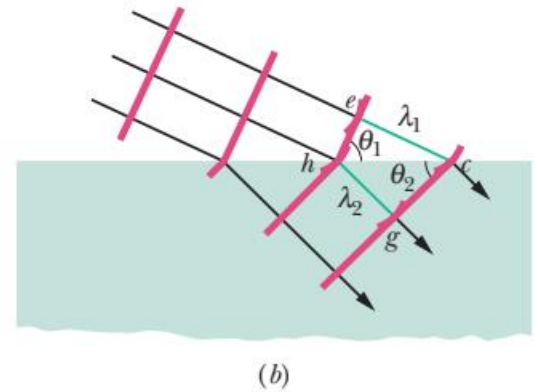
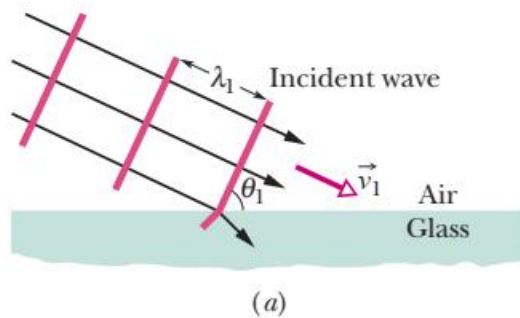
#### Η αρχή του Huygens :

Κάθε σημείο του μετώπου κύματος, μπορεί να θεωρηθεί σαν μια δευτερεύουσα πηγή σφαιρικού κύματος. Η νέα θέση του κύματος θα είναι η κοινή περιβάλλουσα, όλων αυτών των σφαιρικών κυμάτων.



## 10.1 Ο νόμος της διάθλασης

Refraction occurs at the surface, giving a new direction of travel.



Τα σημεία e και h γίνονται δευτερογενείς πηγές κυμάτων. Το κύμα που ξεκινά από το e μέχρι να φτάσει στο c διανύει μία απόσταση

$$\lambda_1 = v_1 t \quad (10.1)$$

Στο ίδιο χρόνο t το κύμα που ξεκίνησε από το σημείο h διάνυσε μία απόσταση  $\lambda_2$ ,

$$\lambda_2 = v_2 t \quad (10.2)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις 10.1 και 10.2

Λαμβάνουμε

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (10.3)$$

Από το τρίγωνο  $hce$

$$\sin \theta_1 = \frac{\lambda_1}{hc} \quad (\text{for triangle } hce) \quad (10.4)$$

Από το τρίγωνο  $hcg$

$$\sin \theta_2 = \frac{\lambda_2}{hc} \quad (\text{for triangle } hcg). \quad (10.5)$$

Διαιρώντας κατά μέλη τις 10.4 και 10.5

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (10.6)$$

Από τον ορισμό του δείκτη διάθλασης

$$n = \frac{c}{v} \quad (\text{index of refraction}). \quad (10.7)$$

Για κάθε μέσον

Έχουμε

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad (10.8)$$

$$n_2 = \frac{c}{v_2}. \quad (10.9)$$

Από 10.6, 10.8, 10.9

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (10.10)$$

Δηλαδή

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (\text{law of refraction}), \quad (10.11),$$

προκύπτει ο νόμος του Snell.

Στην περίπτωση που μονοχρωματικό φως μήκους κύματος  $\lambda$  διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα  $c$  και συναντά μέσο με δείκτη διάθλασης  $n$  τότε διαδίδεται στο μέσο με ταχύτητα  $v$ . Η σχέση 10.3 δίνει

$$\frac{\lambda_n}{\lambda} = \frac{v}{c} \longrightarrow \lambda_n = \lambda \frac{v}{c} = \frac{\lambda}{n} \quad (10.12)$$

Αν θεωρήσουμε ότι στο μέσο αλλάζει και η συχνότητα και γίνεται  $f_n$  τότε

$$v = \lambda_n f_n \Rightarrow f_n = \frac{v}{\lambda_n} \quad (10.13)$$

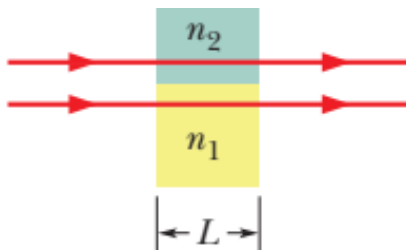
Από 10.7, 10.12 και 10.13

$$f_n = \frac{c/n}{\lambda/n} = \frac{c}{\lambda} = f, \quad (10.14)$$

Δηλαδή η συχνότητα δεν επηρεάζεται από το μέσον.

Επειδή η ταχύτητα και το μήκος κύματος αλλάζει στο μέσο, το μέσο εισάγει μια διαφορά φάσης.

Έστω ότι παράλληλη δέσμη διέρχεται από 2 μέσα διαφορετικών δεικτών διάθλασης και ίδιου πάχους  $L$ , με  $n_2 > n_1$





Εστω  $N_1$  ο αριθμός μηκών κύματος στο μέσο 1 και  $N_2$  ο αριθμός μηκών κύματος στο μέσο 2. Τότε επειδή γενικά  $\lambda_n = \lambda/n$

$$N_1 = \frac{L}{\lambda_{n1}} = \frac{Ln_1}{\lambda}. \quad (10.15)$$

$$N_2 = \frac{L}{\lambda_{n2}} = \frac{Ln_2}{\lambda}. \quad (10.16)$$

$$N_2 - N_1 = \frac{Ln_2}{\lambda} - \frac{Ln_1}{\lambda} = \frac{L}{\lambda} (n_2 - n_1). \quad (10.17)$$

$$\Delta N = \frac{L}{\lambda} \Delta n \quad (10.18)$$

Για την διαφορά φάσης ισχύει

$\lambda$	$T$	$2\pi$
$\Delta x$	$\Delta t$	$\Delta \phi$
$\Delta N$	$\Delta t$	$\Delta \phi$

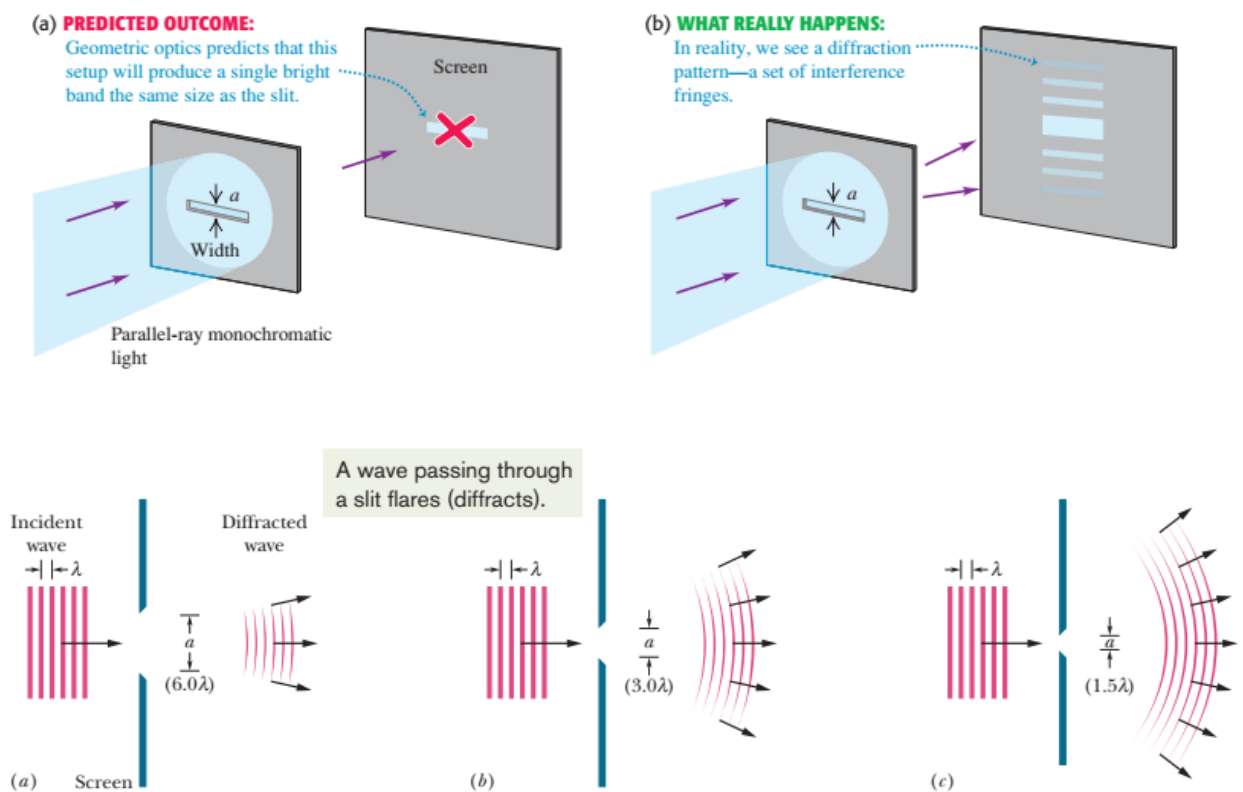
$$\frac{\Delta N}{\lambda} = \frac{\Delta \phi}{2\pi} \longrightarrow \Delta \phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta N \quad (10.19)$$

Για  $\Delta N=1$ ,  $\Delta \phi=2\pi$ .

## 10.2 Το Πείραμα του Young

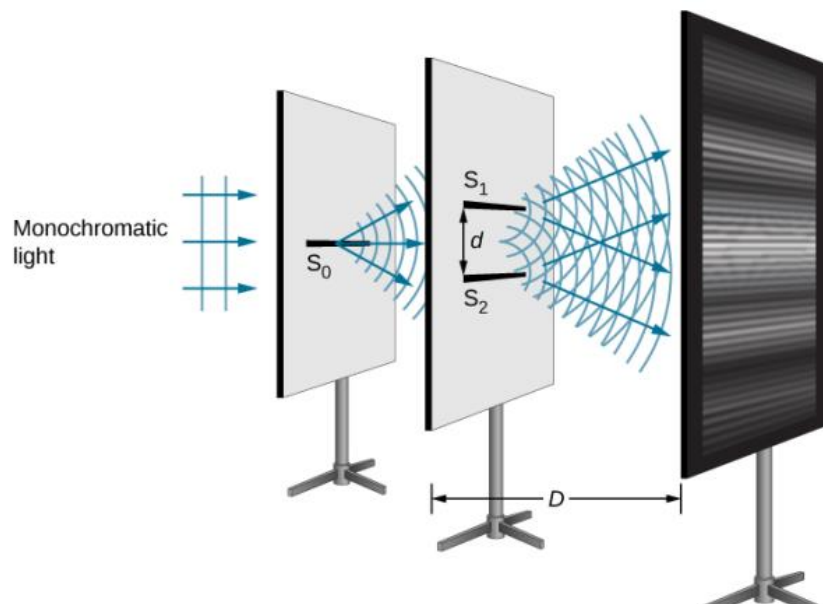
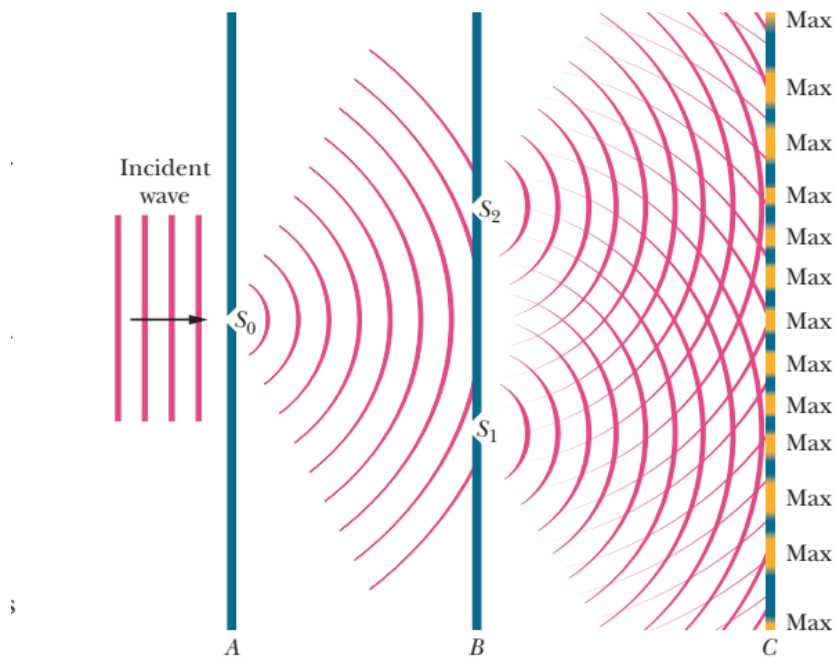
Το 1801 απέδειξε ότι το φως είναι κύμα μέσω πειραμάτων συμβολής. Βρήκε το  $\lambda=570\text{nm}$  για το ηλιακό φως με σημερινή τιμή  $\lambda=552\text{nm}$

### Το φαινόμενο της Περίθλασης



**Περίθλαση** είναι το φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται απόκλισης της ευθύγραμμης πορείας του φωτός συνοδευόμενη από ανακατανομή της ενέργειας προς τις διάφορες κατευθύνσεις

Το φαινόμενο της περίθλασης περιορίζει την γεωμετρική απεικόνιση της διάδοσης του φωτός με ακτίνες, το οποίο ισχύει για σχισμές και αντικείμενα μεγαλύτερου μήκους κύματος από εκείνο του φωτός.



## Προϋποθέσεις

A) Οι σχισμές  $S_1$  και  $S_2$  να είναι πολύ λεπτές,  $a \ll \lambda$ , όπου  $a$  το εύρος της σχισμής.

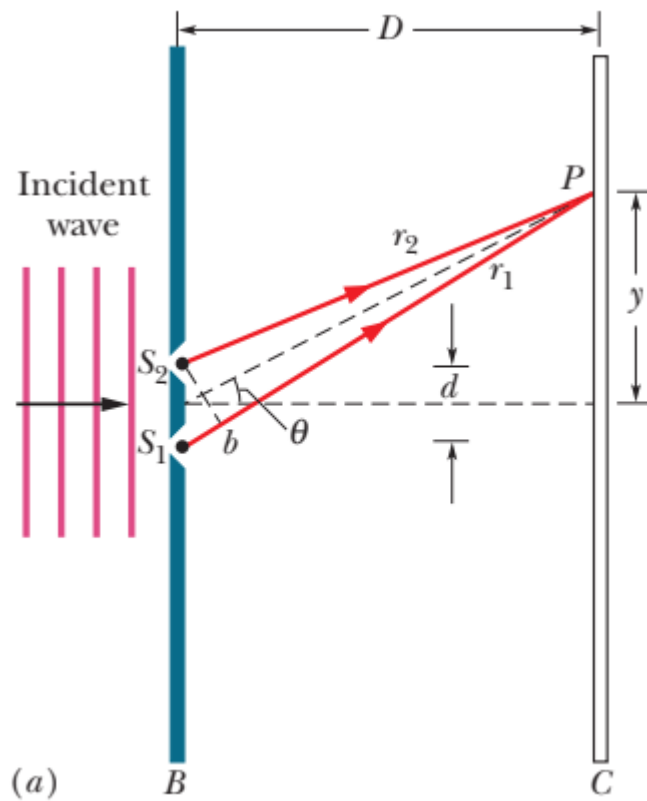
B) Η απόσταση του πετάσματος B και της οθόνης C να είναι πολύ μεγαλύτερη της απόστασης των δύο σχισμών.

Δημιουργείται εικόνα συμβολής (συμβολογράφημα) με κροσσούς φωτεινούς (εποικοδομητική συμβολή) ή σκοτεινούς (καταστρεπτική συμβολή)

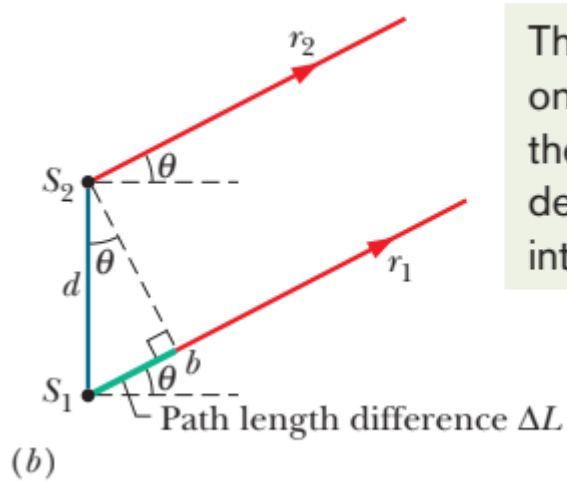


$m$ (constructive interference, bright regions)	$m + 1/2$ (destructive interference, dark regions)
5 →	← 11/2
4 →	← 9/2
3 →	← 7/2
2 →	← 5/2
1 →	← 3/2
0 →	← 1/2
-1 →	← -1/2
-2 →	← -3/2
-3 →	← -5/2
-4 →	← -7/2
-5 →	← -9/2
	← -11/2

### Συνθήκες συμβολής



$D \gg d$



The  $\Delta L$  shifts one wave from the other, which determines the interference.

Πρέπει να συνδέσουμε την γωνία  $\theta$  που δίνει την θέση του κροσσού συμβολής με το  $\Delta L$  που ανάλογα με την διαφορά φάσης που εισάγει θα έχουμε φωτεινό ή σκοτεινό κροσσό. Επειδή  $D \gg d$  οι ακτίνες μπορεί να θεωρηθούν παράλληλες. Τότε

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (\text{path length difference}). \quad (10.20)$$

Φωτεινός κροσσός

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{integer})(\lambda), \quad (10.21)$$

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{maxima—bright fringes}). \quad (10.22)$$

Σκοτεινός κροσσός

$$\Delta L = d \sin \theta = (\text{odd number})\left(\frac{1}{2}\lambda\right), \quad (10.23)$$

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{minima—dark fringes}). \quad (10.24)$$

Από την (10.22)

Για  $m=0$ ,  $\theta=0$ ,  $\Delta L=0$  φωτεινός κροσσός (κεντρικό μέγιστο)

Π.χ για  $m=2$  ο φωτεινός κροσσός βρίσκεται σε γωνία

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{2\lambda}{d}\right) \quad (10.25)$$

Πάνω και κάτω από τον κεντρικό κροσσό. Η διαφορά φάσης είναι  $\Delta L=2\lambda$  και οι κροσσοί λέγονται δεύτερης τάξης φωτεινή κροσσοί.

Γενικά η απόσταση μεταξύ διαδοχικών φωτεινών κροσσών είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης των σχισμών Όσο πιο κοντά είναι οι σχισμές τόσο πιο εκτεταμένη είναι η εικόνα

Από την (10.24)

Για  $m=1$  έχουμε σκοτεινούς κροσσούς σε γωνία

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1.5\lambda}{d}\right) \quad (10.26)$$

Οι κροσσοί λέγονται δεύτερης τάξης σκοτεινοί κροσσοί

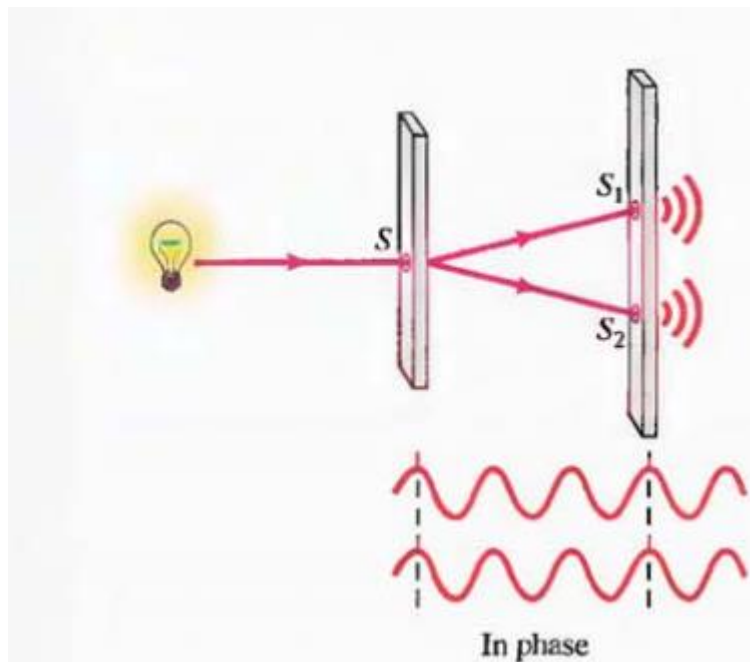
Για  $m=0$ , έχουμε τον πρώτης τάξης σκοτεινό κροσσό στη γωνία

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2d}\right), \quad (10.27)$$

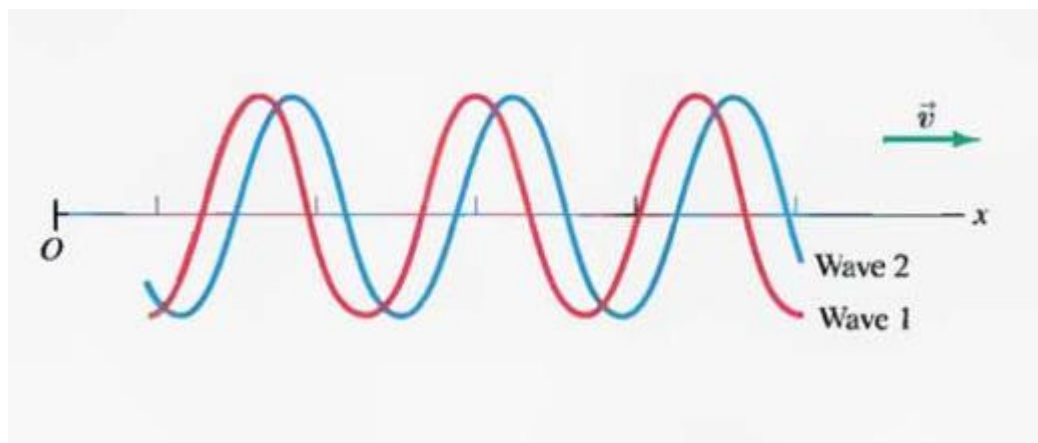
### Η έννοια της συμφωνίας

Όταν η διαφορά φάσης ανάμεσα σε δύο φωτεινές πηγές παραμένει σταθερή τότε οι πηγές λέμε ότι είναι **σύμφωνες**. Πηγές φωτός μπορεί να είναι μερικώς σύμφωνες ή ασύμφωνες.

Στο πείραμα του Young οι σχισμές  $S_1, S_2$  πρέπει να είναι πολύ κοντά ώστε να είναι σύμφωνες.



$$\tau = 10^{-8} \text{ s}$$

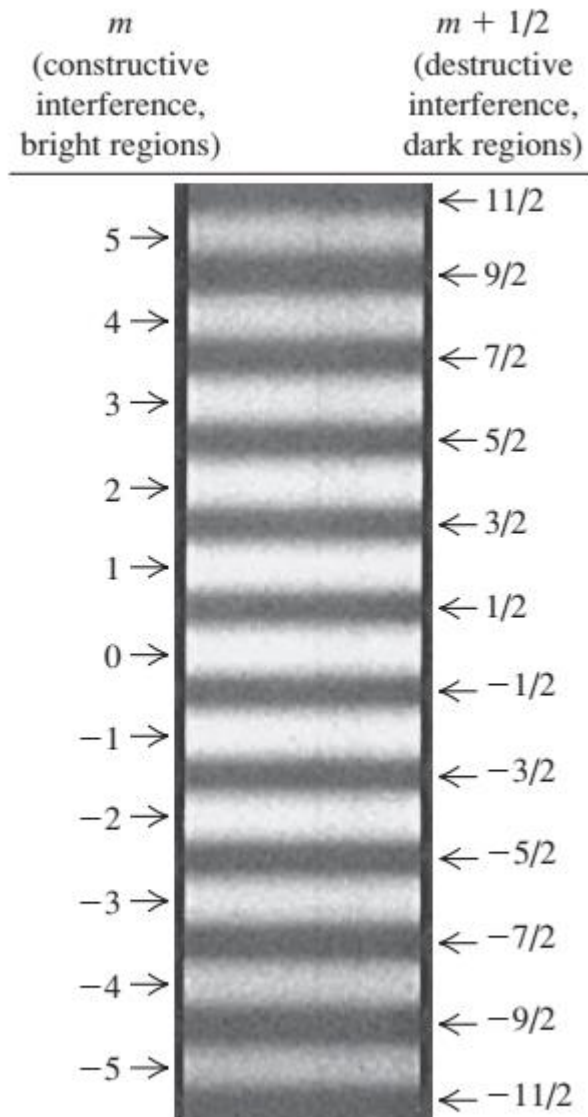


Γιατί δεν χρησιμοποιούμε 2 σημειακές μονοχρωματικές πηγές αντί για τις σχισμές;

Αν οι πηγές ήταν Laser?

<https://www.youtube.com/watch?v=9D8cPrEAGyc>





### Ένταση σε συμβολή δύο σχισμών

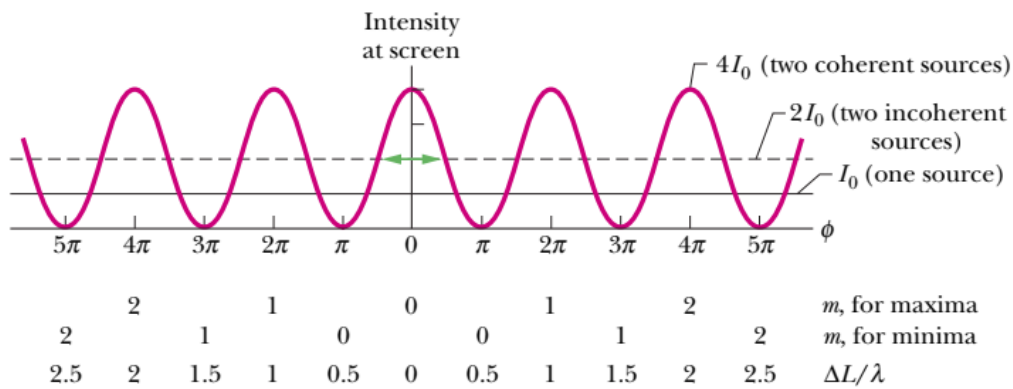
$$E_1 = E_0 \sin \omega t \quad (10.28)$$

$$E_2 = E_0 \sin(\omega t + \phi), \quad (10.29)$$

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \phi, \quad (10.30).$$

Στην σχέση 10.30 η  $I_0$  είναι η ένταση του φωτός εάν υπήρχε μία μόνο σχισμή.

Η 10.30 μας δίνει και την θέση των φωτεινών και σκοτεινών κροσσών.



$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta.$$

(10.31)

Η 10.30 μας δίνει και την θέση των φωτεινών και σκοτεινών κροσσών.

Για

$$\frac{1}{2}\phi = m\pi, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (10.32)$$

Η 10.31

$$2m\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (10.33)$$

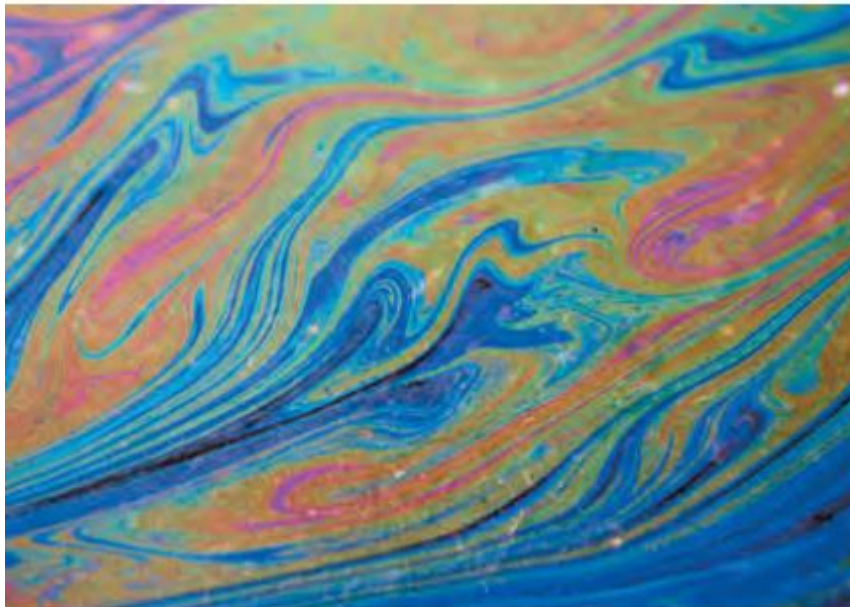
$$d \sin \theta = m\lambda, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{maxima}), \quad (10.34)$$

Ομοίως για τους σκοτεινούς κροσσούς

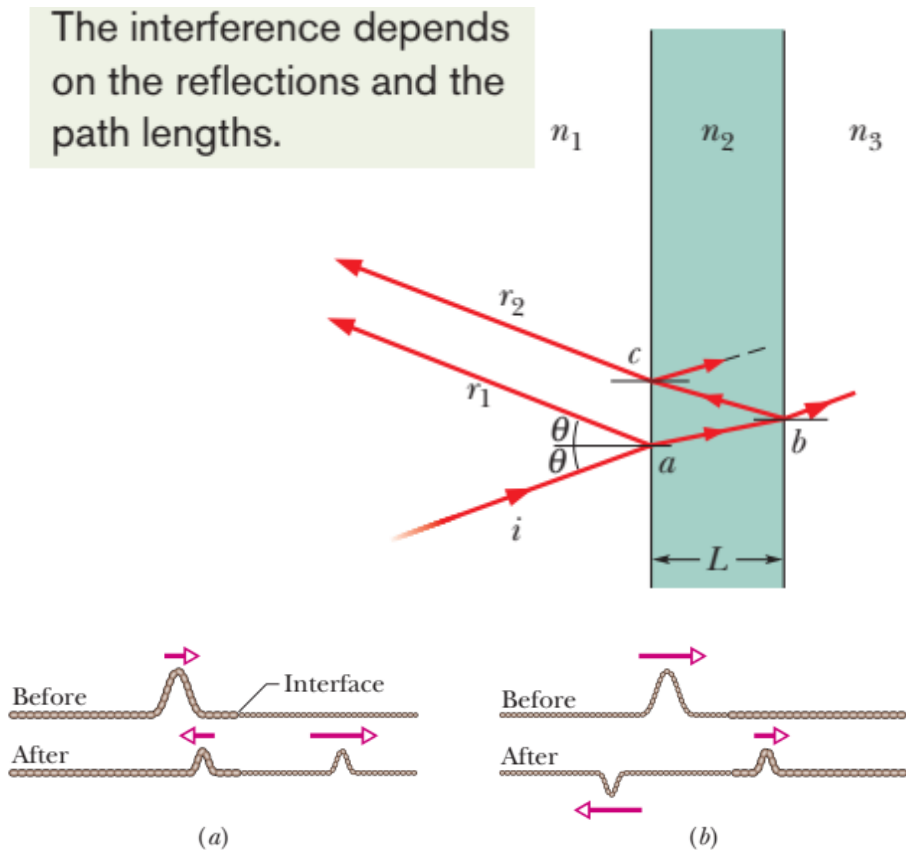
$$\frac{1}{2}\phi = (m + \frac{1}{2})\pi, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (10.35)$$

$$d \sin \theta = (m + \frac{1}{2})\lambda, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{minima}), \quad (10.36)$$

### Συμβολή από λεπτά υμένια



Το πάχος του υμενίου από σαπούνι η λαδι είναι της τάξεως του μήκους κύματος του ορατού φωτός.



Το φως υφίσταται αλλαγή φάσης όταν διαδίδεται από ένα μέσο στο οποίο η ταχύτητα είναι μεγάλη και υφίσταται ανάκλαση μέσα σε ένα μέσο με μικρή ταχύτητα διάδοσης, δηλαδή

$v_1 > v_2$  ή  $n_1 < n_2$  δηλαδή από οπτικά αραιότερο σε οπτικά πυκνότερο.

Επομένως μετά την ανάκλαση η μεταβολή της φάσης θα είναι  $\pi$  ή  $0.5\lambda$ . Η διαθλώμενη ακτίνα δεν υφίσταται αλλαγή φάσης.

Έτσι η διαφορά φάσης στο λεπτό υμένιο μπορεί να αλλάξει από

- i) Ανάκλαση  
Εισάγει διαφορά φάσης  $0.5\lambda$
- ii) Από την διαφορά του οπτικού δρόμου  
Για εποικοδομητική συμβολή,

$$2L = \frac{\text{odd number}}{2} \times \text{wavelength} \quad (\text{in-phase waves}).$$

(10.37)

$$2L = \frac{\text{odd number}}{2} \times \lambda_{n2} \quad (\text{in-phase waves}).$$

(10.38)

$$2L = (m + \frac{1}{2}) \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{maxima—bright film in air}).$$

(10.39)

Για καταστροφική συμβολή

$$2L = \text{integer} \times \text{wavelength} \quad (\text{out-of-phase waves}).$$

(10.40)

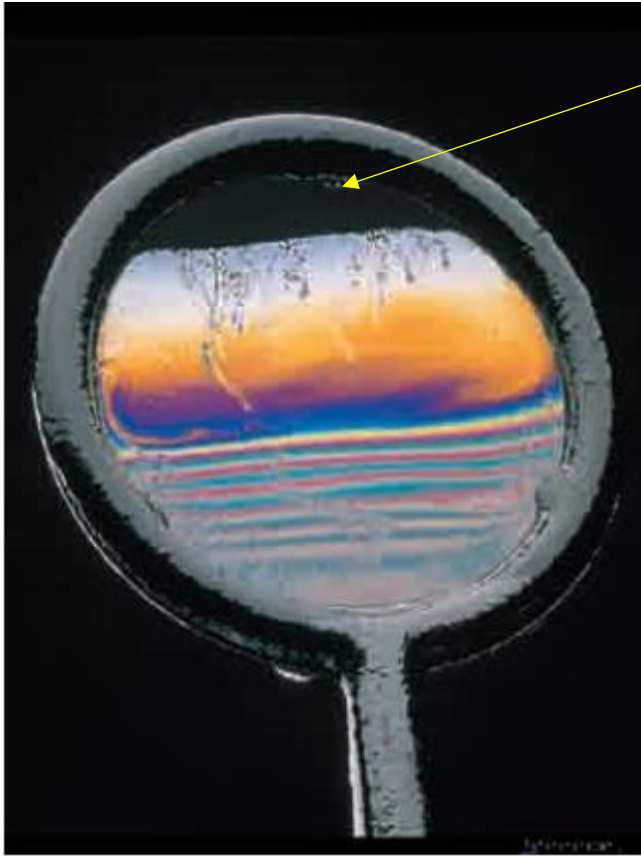
$$2L = \text{integer} \times \lambda_{n2} \quad (\text{out-of-phase waves}). \quad (10.41)$$

$$\lambda_{n2} = \frac{\lambda}{n_2}, \quad (10.42)$$

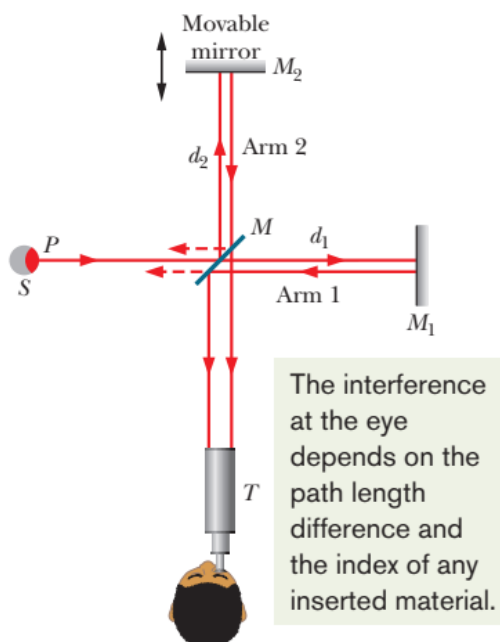
$$2L = m \frac{\lambda}{n_2}, \quad \text{for } m = 0, 1, 2, \dots \quad (\text{minima—dark film in air}).$$

(10.43)

Εάν  $L < 0.1\lambda$  τότε πρακτικά η διαδρομή  $2L$  μπορεί να αγνοηθεί και μόνο η ανάκλαση εισάγει διαφορά φάσης  $0.5\lambda$  δηλαδή καταστροφική συμβολή. Τότε η 10.43 αντιστοιχεί σε  $m=0$ . Ο επόμενος σκοτεινός κροσσός αντιστοιχεί στο  $m=1$ .



Το συμβολόμετρο του Michelson



$$N_m = \frac{2L}{\lambda_n} = \frac{2Ln}{\lambda}. \quad (10.44)$$

$$N_a = \frac{2L}{\lambda}. \quad (10.45)$$

$$N_m - N_a = \frac{2Ln}{\lambda} - \frac{2L}{\lambda} = \frac{2L}{\lambda} (n - 1). \quad (10.46)$$

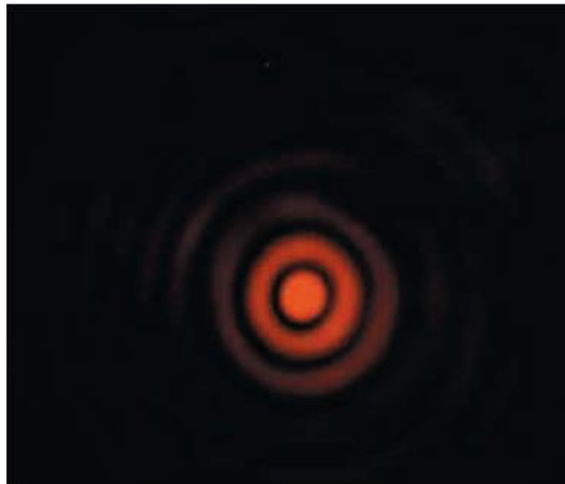
$N_m - N_a$  = αριθμός των κροσσών που μετακινήθηκαν.

Από την 10.46 βρίσκουμε το  $L$  σε μήκη κύματος.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

### ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

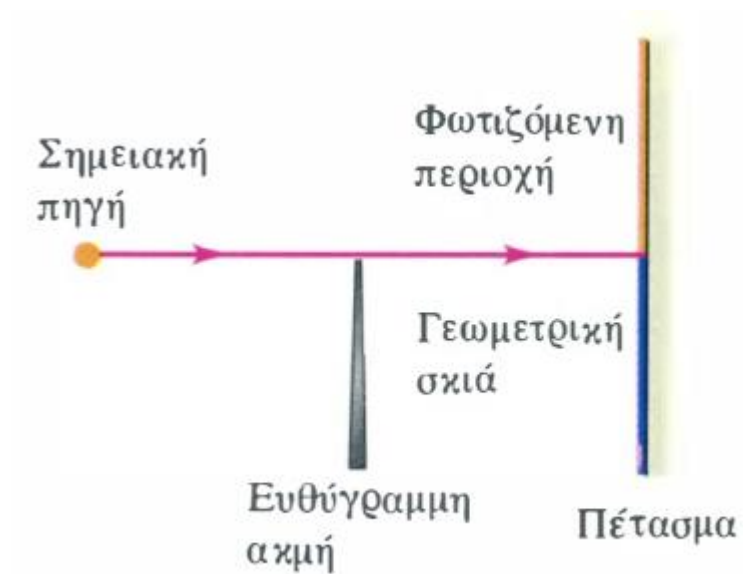
Φως διερχόμενο από λεπτή σχισμή. Εικόνα περίθλασης από μία σχισμή. Ομοιάζει με τις εικόνες συμβολής από 2 σχισμές.

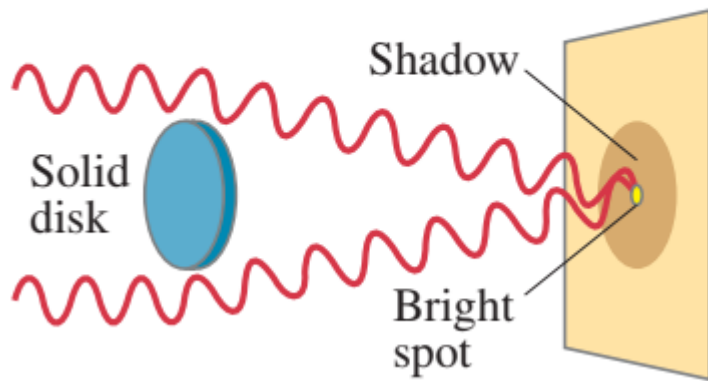






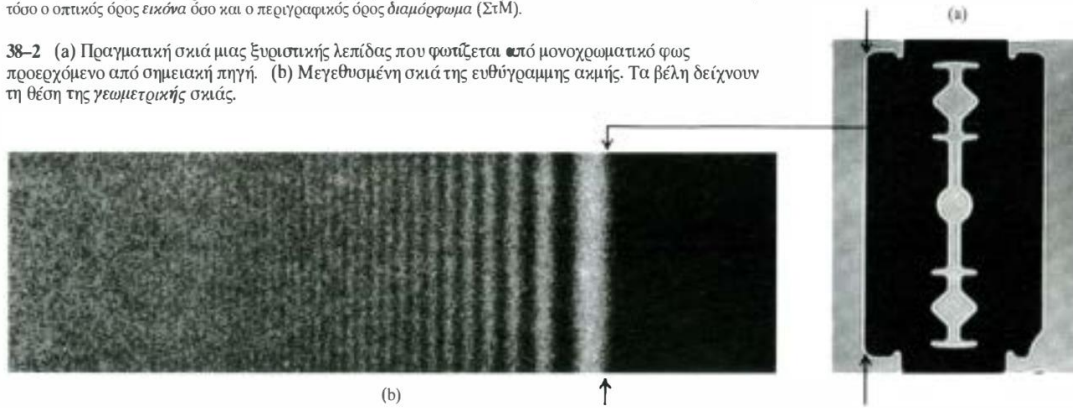
**Figure 4.2** Because of the diffraction of waves, ocean waves entering through an opening in a breakwater can spread throughout the bay. (credit: modification of map data from Google Earth)

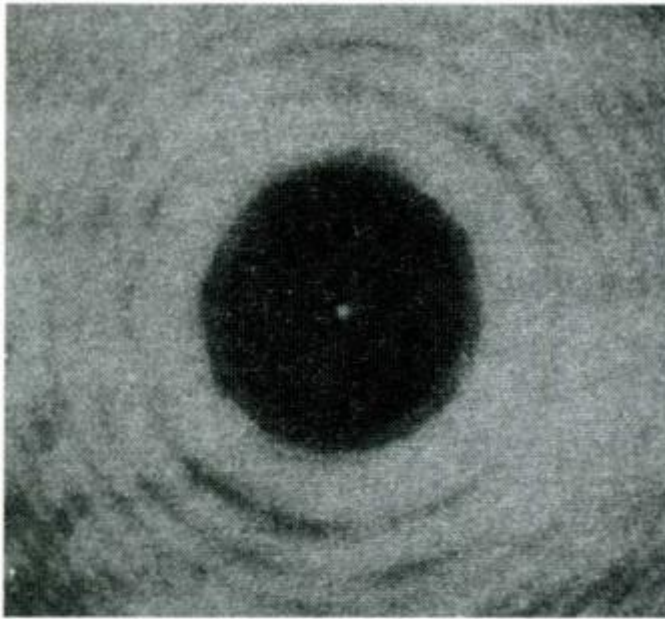




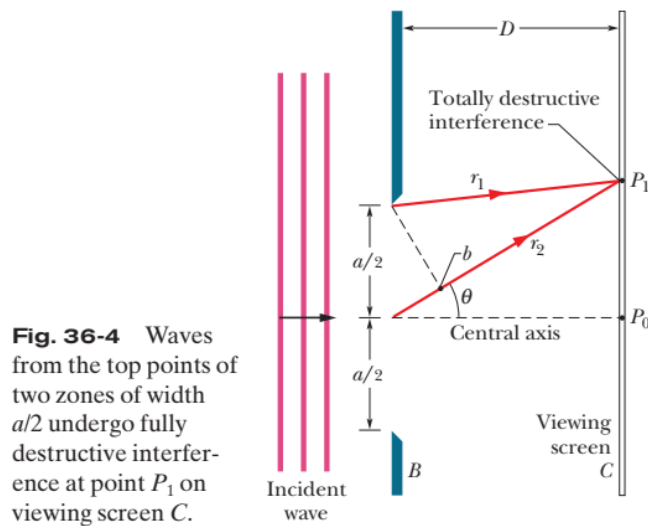
\* Για την απόδοση του όρου *pattern* στα ελληνικά χρησιμοποιούνται στο κεφάλαιο αυτό εναλλακτικά και ισοδύναμα τόσο ο οπτικός όρος *εικόνα* όσο και ο περιγραφικός όρος *διαμόρφωμα* (ΣΤΜ).

38-2 (α) Πραγματική σκιά μιας ξυριστικής λεπίδας που φωτίζεται από μονοχρωματικό φως προερχόμενο από σημειακή πηγή. (β) Μεγεθυσμένη σκιά της ευθύγραμμης ακμής. Τα βέλη δείχνουν τη θέση της γεωμετρικής σκιάς.



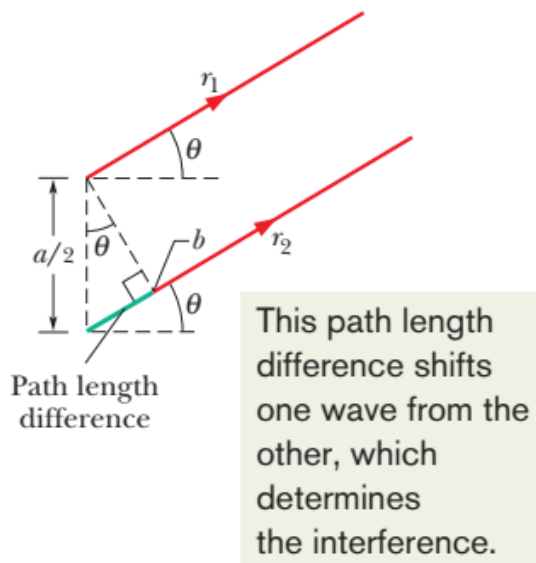


**38-3** Διαμόρφωμα περίθλασης Fresnel από χαλύβδινη σφαίρα διαμέτρου 3 mm. Η φωτεινή κηλίδα του Poisson διακρίνεται στο κέντρο της περιοχής της σκιάς.



**Fig. 36-4** Waves from the top points of two zones of width  $a/2$  undergo fully destructive interference at point  $P_1$  on viewing screen  $C$ .

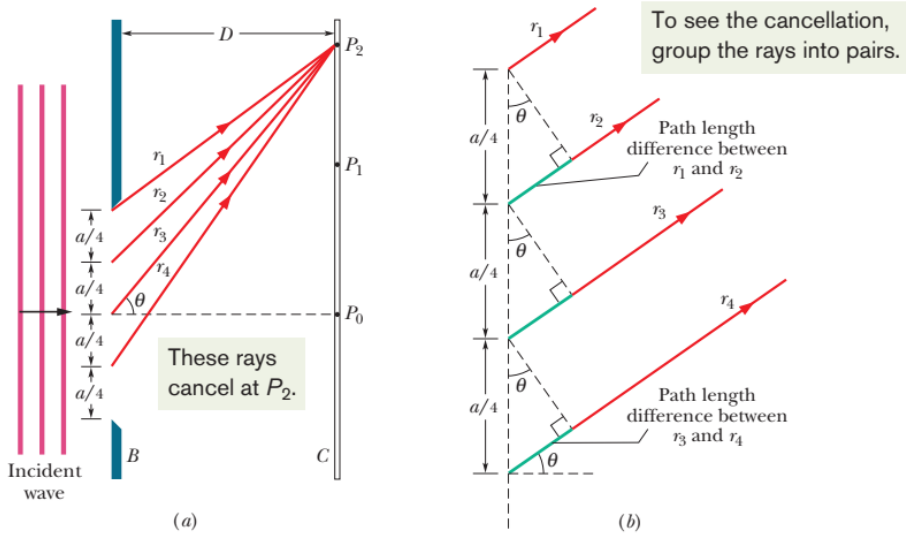
This pair of rays cancel each other at  $P_1$ . So do all such pairings.



$$\text{Διαφορά δρόμου} = \frac{a}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \quad (11.1)$$

$$a \sin \theta = \lambda \quad (\text{first minimum}). \quad (11.2)$$

Από την σχέση 11.2 όσο πιο στενή γίνεται η σχισμή, μικραίνει το  $a$  τότε αυξάνει η  $\theta$  δηλαδή διευρύνεται η έκταση των κροσσών. Για  $a = \lambda$  η γωνία εμφάνισης του πρώτου σκοτεινού κροσσού είναι  $\theta = 90^\circ$

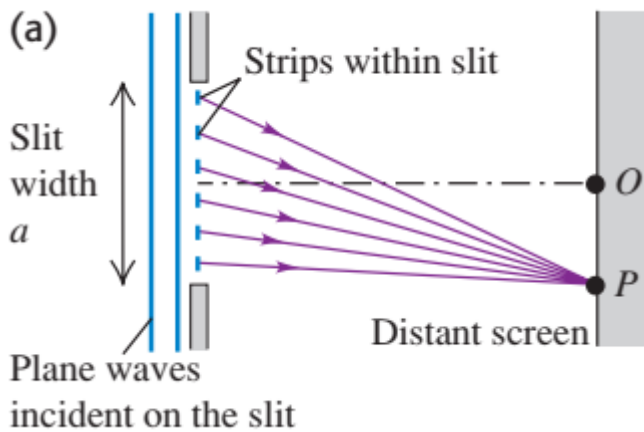


$$a \sin \theta = m\lambda, \quad \text{for } m = 1, 2, 3, \dots \text{ (minima — dark fringes).}$$

(11.3)

Η τιμή  $m=0$  εξαιρείτε

### 11. 1 ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ΣΕ ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΜΙΑΣ ΣΧΙΣΜΗΣ



Χωρίζουμε την σχισμή σε  $N$  ζώνες πάχους  $\Delta x$ . Κάθε ζώνη σύμφωνα με την αρχή του Huygens γίνεται δευτερογενής πηγή κυμάτων.

Η διαφορά φάσης ανάμεσα σε δύο γειτονικές ζώνες θα είναι

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\text{Διαφορα δρόμου}}{\lambda} = 2\pi \frac{\Delta x \sin\theta}{\lambda} \quad (11.3)$$

Και για  $\Delta x = a$

$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\text{Διαφορα δρόμου}}{\lambda} = 2\pi \frac{a \sin\theta}{\lambda} \quad (11.4)$$

Η ένταση σαν συνάρτηση της  $\theta$  δίνεται από την

$$I = I_0 \left[ \frac{\sin(\Delta\varphi/2)}{\Delta\varphi/2} \right]^2 \quad (11.5)$$

,

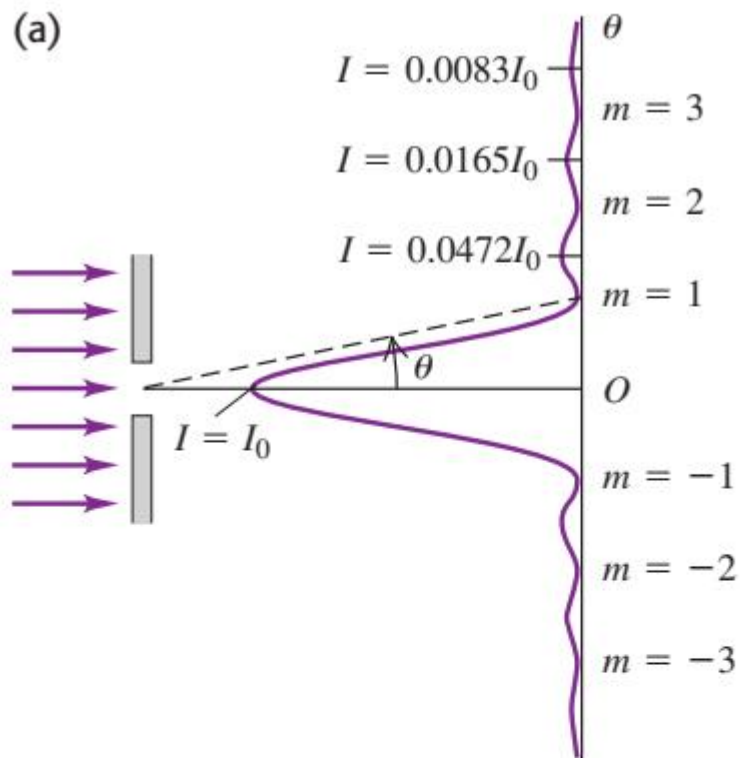
$$I = I_0 \left\{ \frac{\sin[\pi a(\sin\theta)/\lambda]}{\pi a(\sin\theta)/\lambda} \right\}^2$$

(11.6)

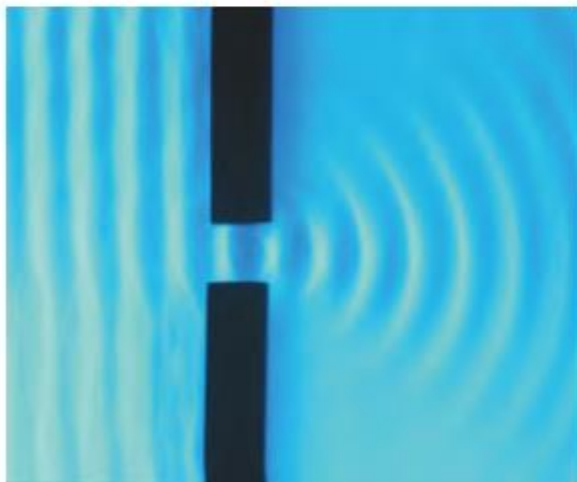
Για  $I=0$  έχουμε την θέση των **σκοτεινών κροσσών**.

$$\frac{a \sin\theta}{\lambda} = m \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$\sin\theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (11.7)$$



(b)



Για να βρούμε τα **φωτεινά μέγιστα** θα πρέπει στη 11.5 το  $\sin$  να λάβει τις τιμές  $\pm 1$  δηλαδή

$$\Delta\phi = \pm\pi, \pm 3\pi, \pm 5\pi \quad (11.8)$$

Και γενικά

$$\Delta\phi \sim \pm(2m+1)\pi, (m=0,1,2,\dots) \quad (11.9)$$

$$I_m \approx \frac{I_0}{\left(m + \frac{1}{2}\right)^2 \pi^2} \quad (11.10)$$

Εντάσεις από υπολογισμό

$$0.0450I_0 \quad 0.0162I_0 \quad 0.0083I_0$$

Πραγματικές εντάσεις

$$0.0472I_0 \quad 0.0165I_0 \quad 0.0083I_0$$

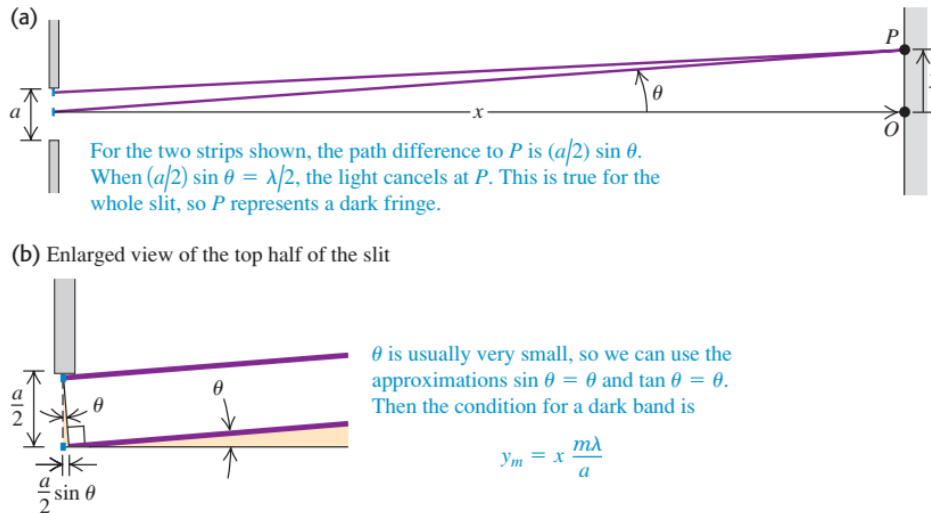
Στις σχέσεις

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{\text{Διαφορα δρόμου}}{\lambda} = 2\pi \frac{a \sin\theta}{\lambda} \quad (11.11)$$

$$I = I_0 \left\{ \frac{\sin[\pi a(\sin\theta)/\lambda]}{\pi a(\sin\theta)/\lambda} \right\}^2 \quad (11.12)$$

Συνήθως η γωνία  $\theta$  είναι πολύ μικρή





Οπότε η 11.7 γίνεται για την θέση του πρώτου σκοτεινού κρόσσου,  $m=1$

$$\frac{a \sin \theta}{\lambda} = m \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots)$$

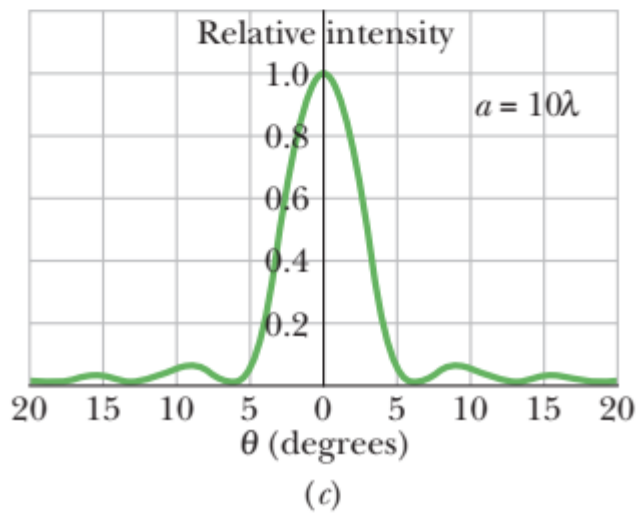
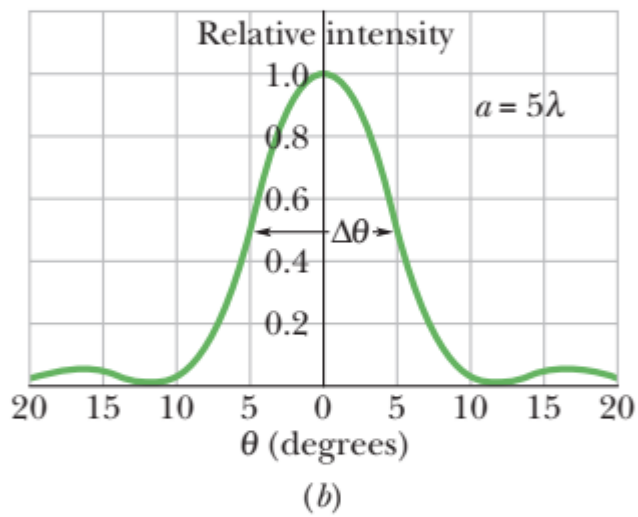
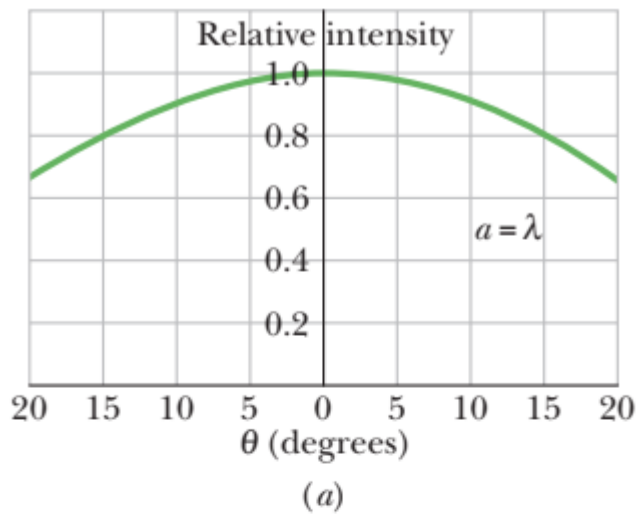
$$\theta_1 = \frac{\lambda}{a} \quad (11.13)$$

Η σχέση 11.3 χαρακτηρίζει το εύρος (γωνιακή εξάπλωση) του κεντρικού μέγιστου, το οποίο είναι αντιστρόφως ανάλογο με το πλάτος σχισμής. Όταν η γωνία είναι μικρή και η προσέγγιση  $\sin \theta = \theta$  είναι

έγκυρη, το κεντρικό μέγιστο είναι ακριβώς διπλάσιο από το καθένα γειτονικό μέγιστο

Όταν το  $a$  είναι της τάξης του ενός εκατοστού ή περισσότερο, η  $\theta_1$  είναι τόσο μικρή που

μπορούμε να θεωρήσουμε σχεδόν όλο το φως ακολουθεί την ευθύγραμμη διάδοση. Εάν  $a \ll \lambda$  τότε το εύρος εκτείνεται πάνω από  $180^\circ$  και εξαφανίζονται οι κροσσοί.



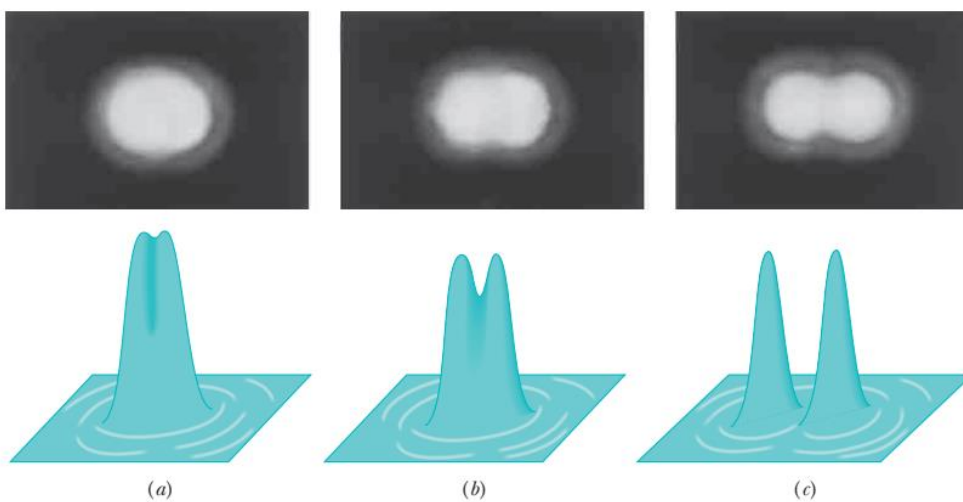
## 11.2 Περίθλαση από κυκλικό άνοιγμα

Ο πρώτος σκοτεινός κροσσός βρίσκεται από την σχέση

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{first minimum — circular aperture}).$$

(11.14)

Όπου  $d$  η διάμετρος της οπής



$$\theta_R = 1.22 \frac{\lambda}{d} \quad (\text{Rayleigh's criterion}).$$

Πρέπει  $\theta > \theta_R$  για να μπορούν να διακριθούν τα αντικείμενα.



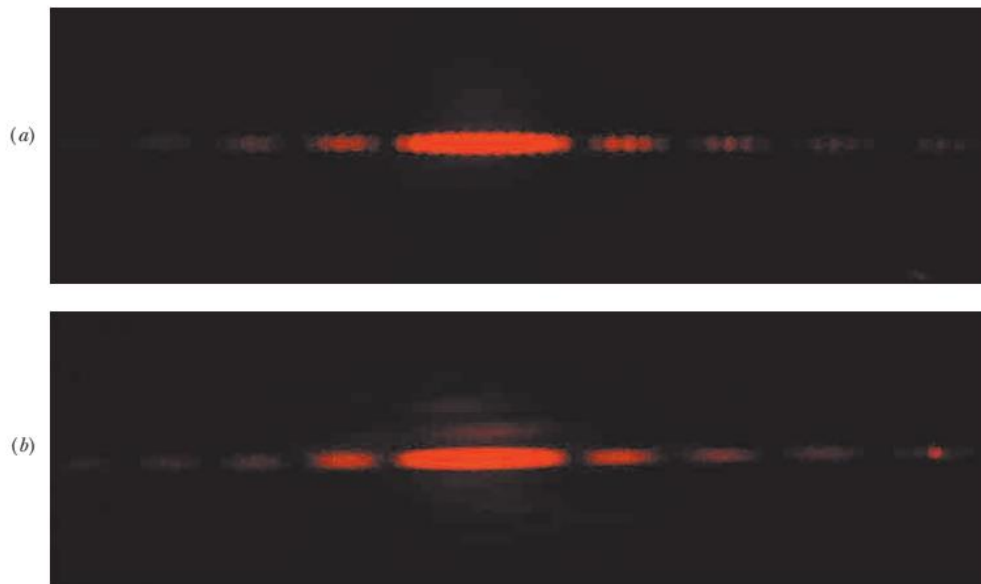
**Fig. 36-12** The pointillistic painting *The Seine at Herblay* by Maximilien Luce consists of thousands of colored dots. With the viewer very close to the canvas, the dots and their true colors are visible. At normal viewing distances, the dots are irresolvable and thus blend. (Maximilien Luce, *The Seine at Herblay*, 1890. Musee d'Orsay, Paris, France. Photo by Erich Lessing/Art Resource)

### 11. 3 Περίθλαση από διπλή σχισμή

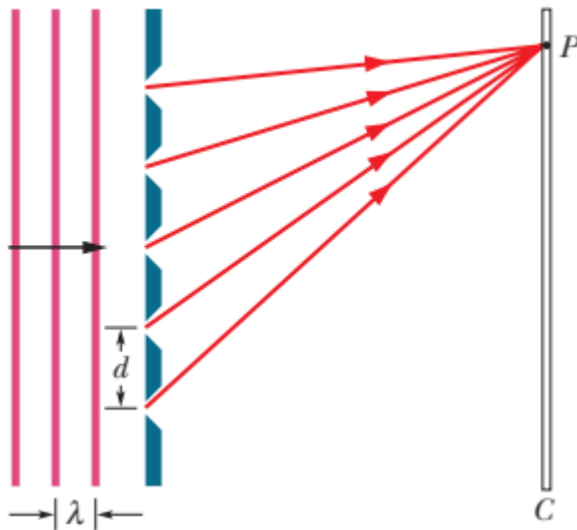
Στο πείραμα συμβολής δύο σχισμών υποθέσαμε ότι το για το εύρος κάθε σχισμής  $a$ , ισχύει  $a \ll \lambda$ .

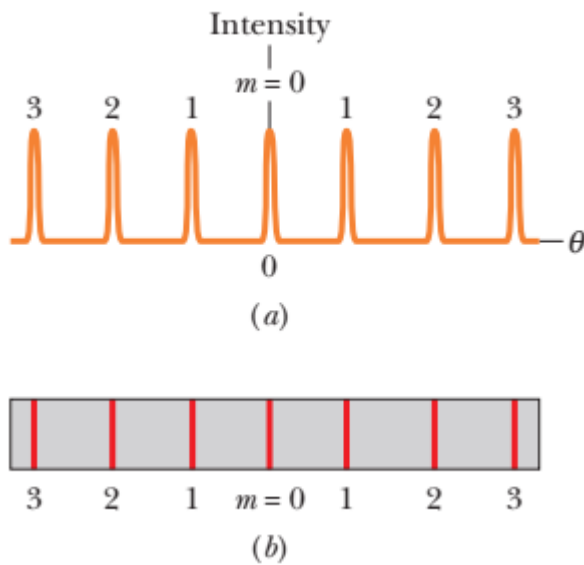
Στο ορατό μέρος του φάσματος η συνθήκη  $a \ll \lambda$  συχνά δεν ικανοποιείται.

Με αποτέλεσμα τα φαινόμενα περίθλασης να επηρεάζουν τους κροσσούς συμβολής



## 11. 4 Φράγμα περίθλασης





Οι φωτεινοί κροσσοί έχουν πολύ στενό εύρος και μετατρέπονται σε γραμμές. Διαχωρίζονται από ευρείς σκοτεινούς κροσσούς.

Η απόσταση  $d$  ανάμεσα σε δύο γειτονικές σχισμές (χαραγες) ονομάζεται **σταθερά του φράγματος**. Τυπική τιμή είναι  $0.002\text{mm}$

Η θέση των φωτεινών γραμμών δίνεται από την

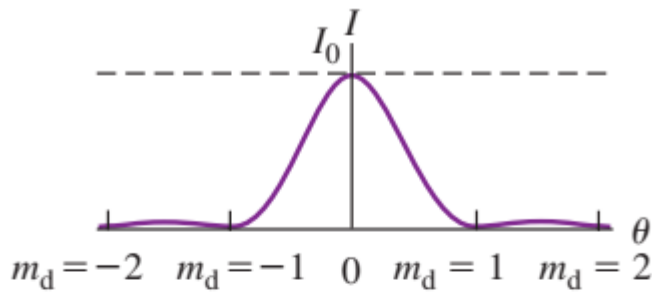
$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad \text{(intensity maxima, multiple slits)} \quad (36.13)$$

Οι γραμμες που αντιστοιχούν σε

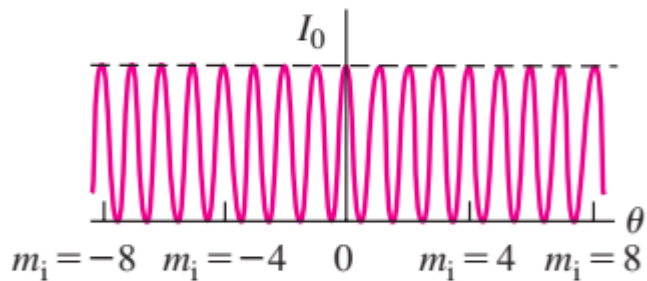
$m = \pm 1$  λέγονται γραμμές πρώτης τάξης

$m = \pm 2$  λέγονται γραμμές δεύτερης τάξης

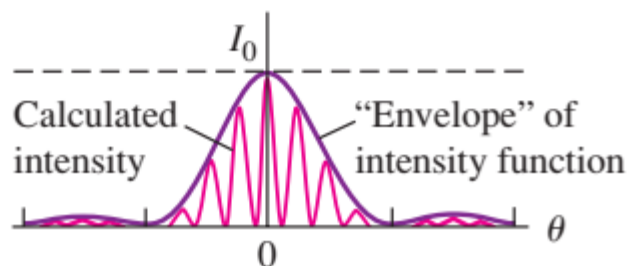
(a) Single-slit diffraction pattern for a slit width  $a$



(b) Two-slit interference pattern for narrow slits whose separation  $d$  is four times the width of the slit in (a)



(c) Calculated intensity pattern for two slits of width  $a$  and separation  $d = 4a$ , including both interference and diffraction effects



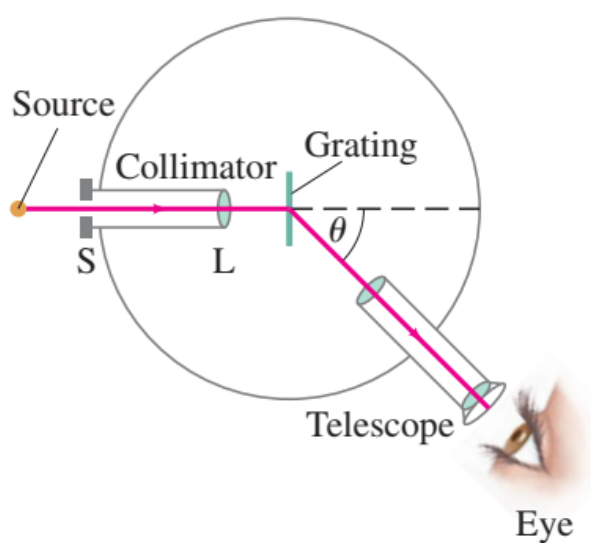
Ένας άλλος τύπος φράγματος περίθλασης είναι το **φράγμα περίθλασης από ανάκλαση**. Αυτό αποτελείται από λεπτές γραμμές σε ανακλώσα επιφάνεια από την οποία ανακλάται το φως. Η ανάλυση είναι βασικά η ίδια όπως για ένα κανονικό φράγμα περίθλασης.





The fine rulings, each  $0.5 \mu\text{m}$  wide, on a compact disc function as a diffraction grating. When a small source of white light illuminates a disc, the diffracted light forms colored “lanes” that are the composite of the diffraction patterns from the rulings.

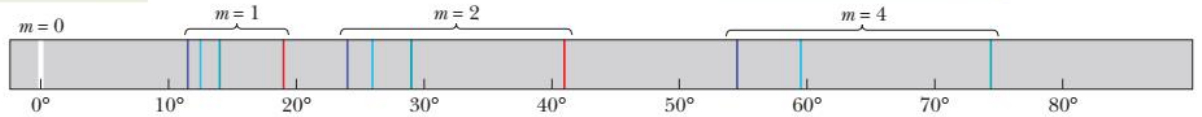
### 11. 5 Φασματοσκοπία και Φασματόμετρο φράγματος



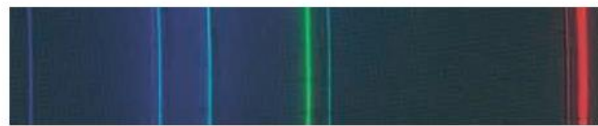
$$\lambda = \frac{d}{m} \sin \theta,$$

This is the center of the pattern.

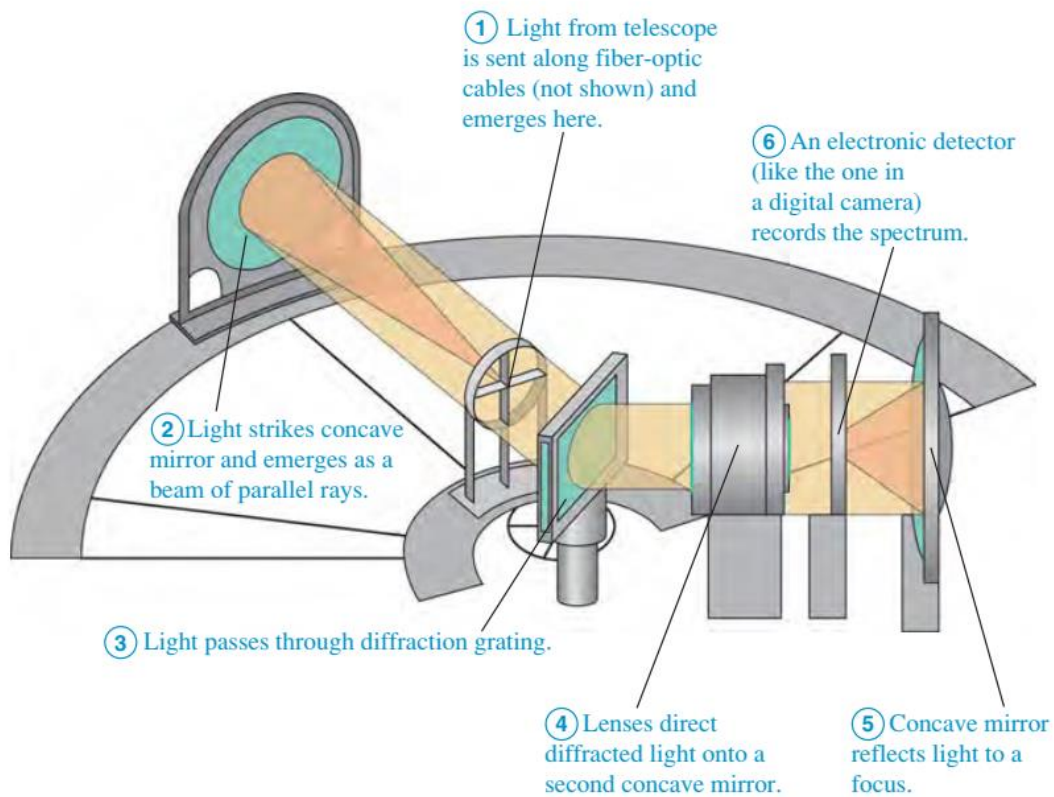
The higher orders are spread out more in angle.

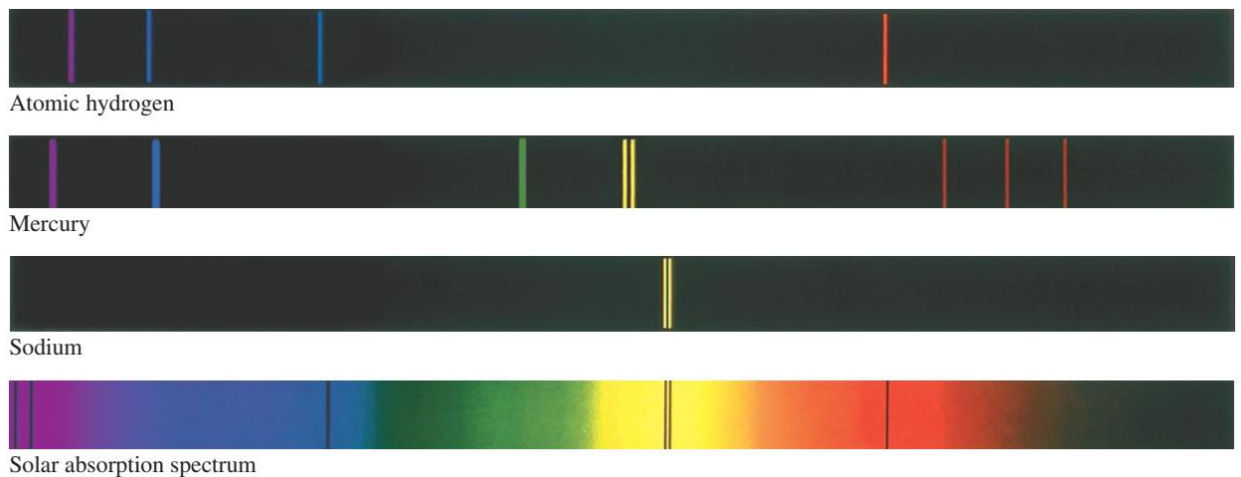


**Fig. 36-24** The zeroth, first, second, and fourth orders of the visible emission lines from hydrogen. Note that the lines are farther apart at greater angles. (They are also dimmer and wider, although that is not shown here.)



**Fig. 36-25** The visible emission lines of cadmium, as seen through a grating spectroscope. (Department of Physics, Imperial College/Science Photo Library/Photo Researchers)





### Διακριτική ικανότητα ενός φασματομέτρου φράγματος

Η ελάχιστη διαφορά μηκών κύματος  $\Delta\lambda$  που μπορεί να γίνει διακριτή από ένα φασματομέτρο περιγράφεται από την

Χρωματική διακριτική ικανότητα  $R$

$$R = \frac{\lambda_{avg}}{\Delta\lambda} \quad (\text{resolving power defined}).$$

$$\lambda_{avg} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}$$

$$R = Nm \quad (\text{resolving power of a grating}).$$

Για

$$\lambda_1 = 589\text{nm}, \lambda_2 = 589.59\text{nm}$$

$$R = \frac{589.3}{0.59} \sim 1000$$

Για την διπλή γραμμή του Na