

# ΣΥΜΒΟΛΗ - ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ ΦΩΤΟΣ

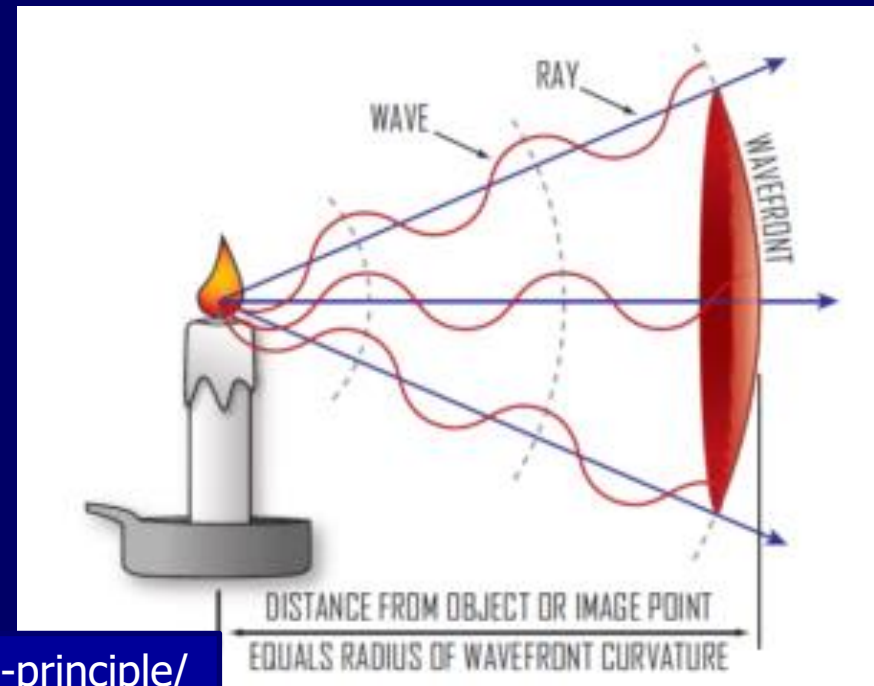
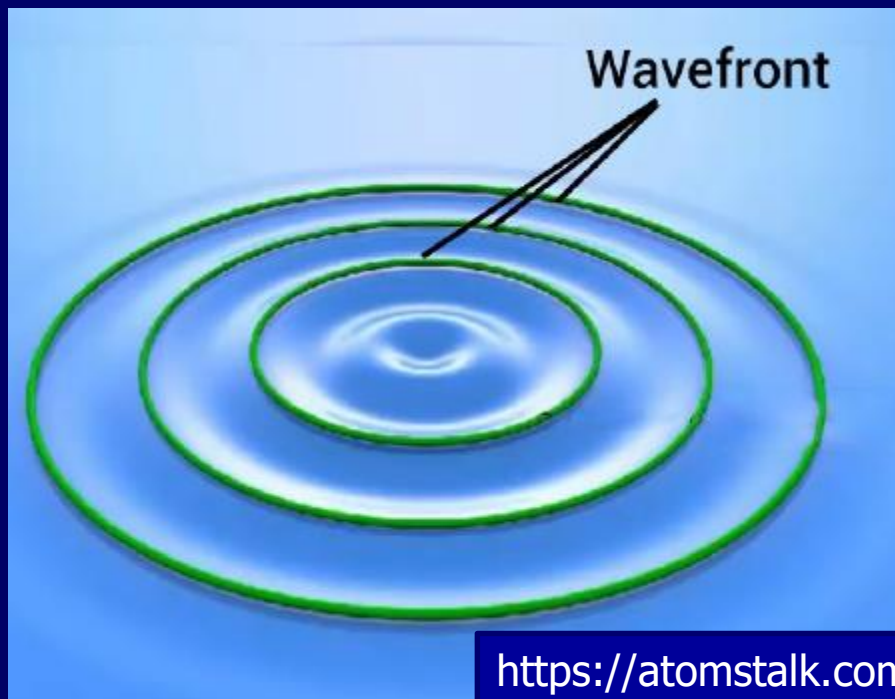
Καθ. Α. ΑΡΑΒΑΝΤΙΝΟΣ  
Ακαδ. Υπ. Μ. ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗ

# Φως - Κύμα

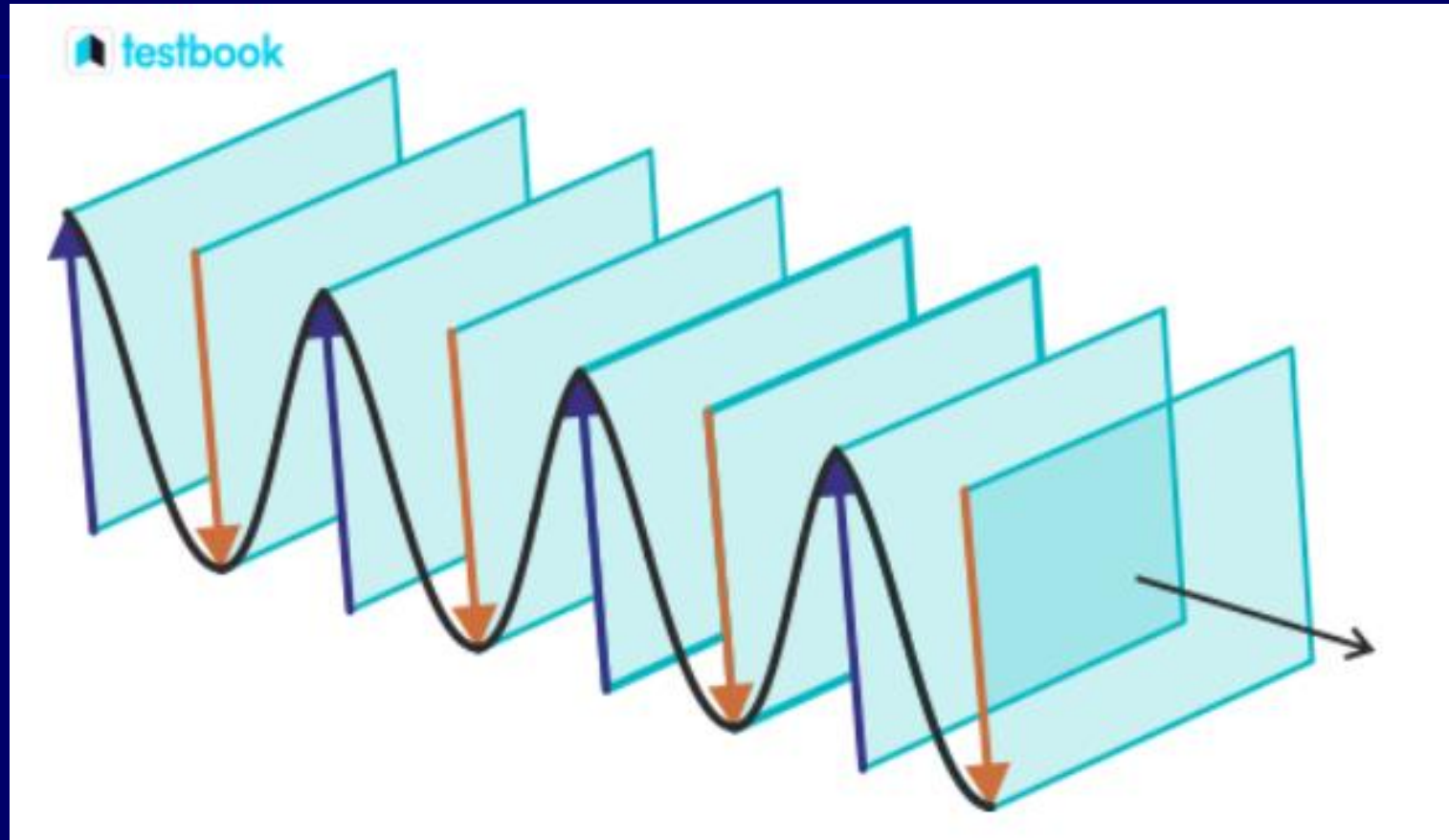
- Η Συμβολή και η Περίθλαση είναι δυο φυσικά φαινόμενα που δηλώνουν ότι το φως έχει και Κυματικές ιδιότητες.
- Η γεωμετρική οπτική αδυνατεί να εξηγήσει τα δυο αυτά φαινόμενα.

# Μέτωπο Κύματος

- Τα σημεία στα οποία η διαταραχή φτάνει την ίδια χρονική στιγμή, άρα έχει την ίδια φάση :  
Όλα τα σημεία του μετώπου κύματος εκτελούν ταυτόχρονα την ίδια κίνηση



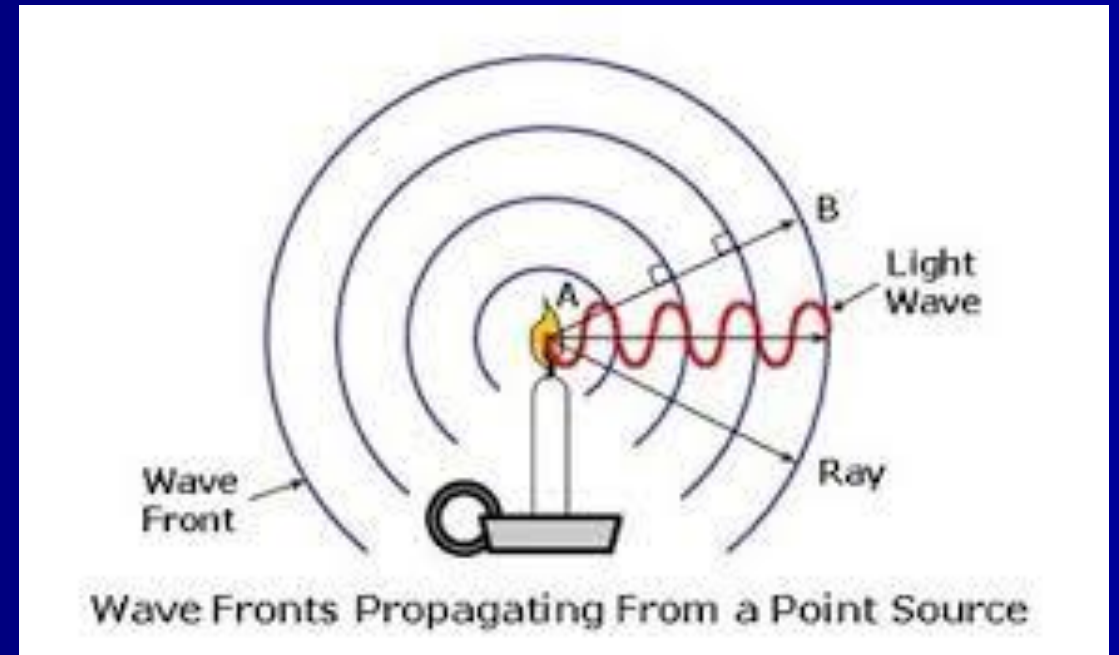
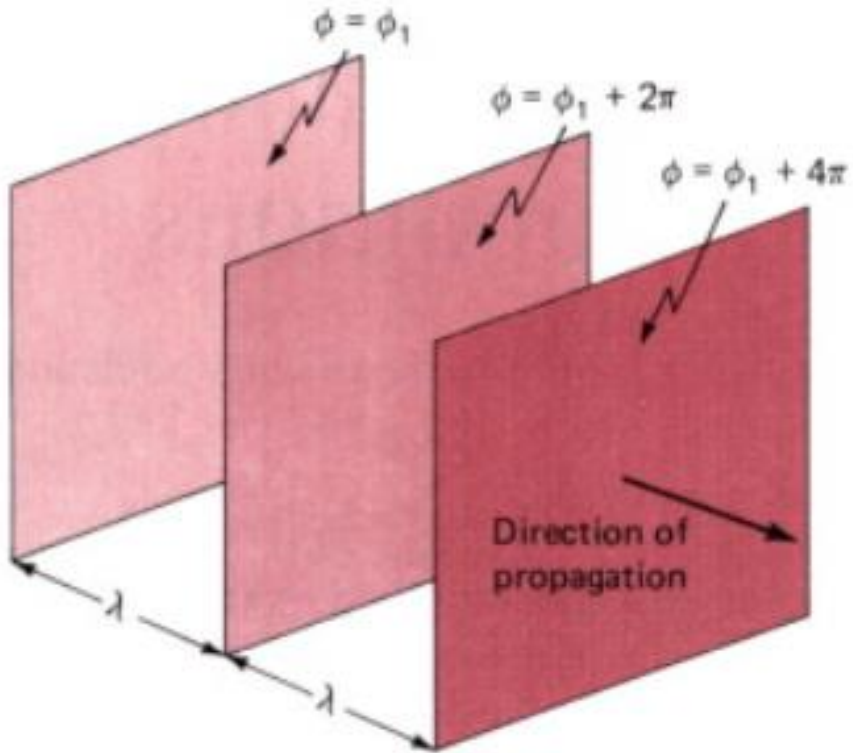
# Μέτωπο Κύματος – Τι είναι



<https://testbook.com/physics/wavefront>



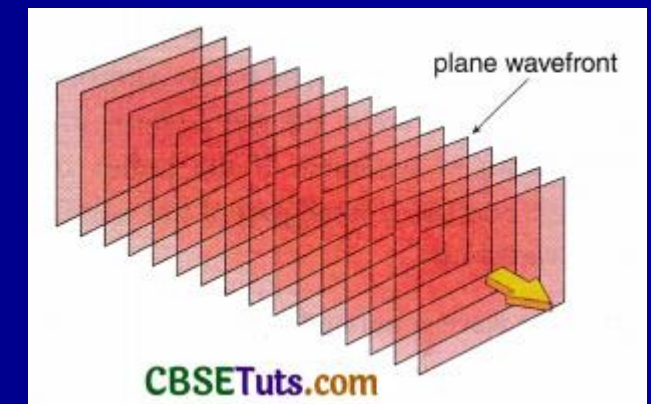
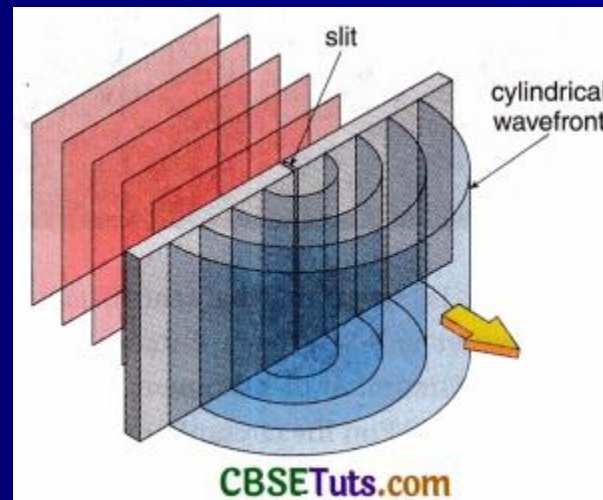
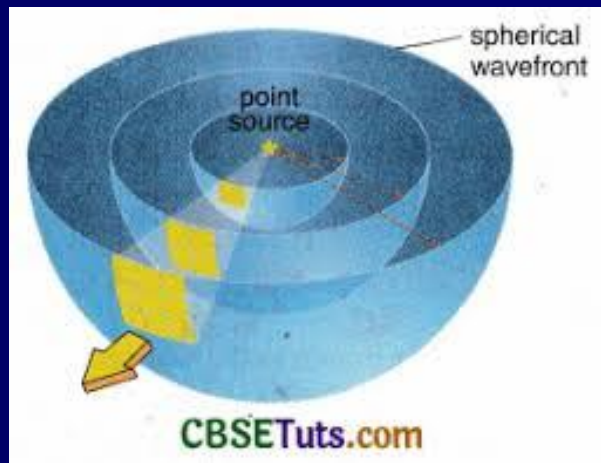
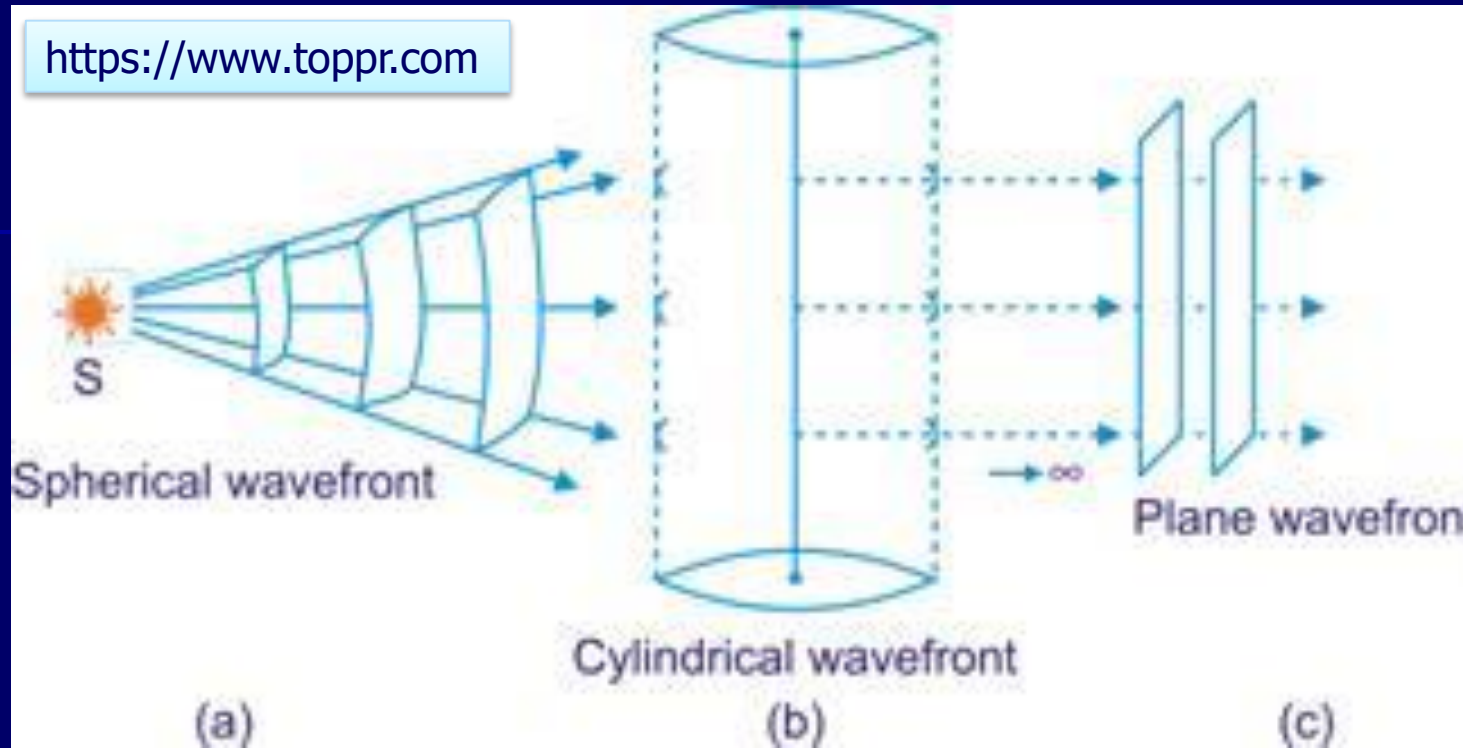
# Μέτωπο Κύματος – Τι είναι



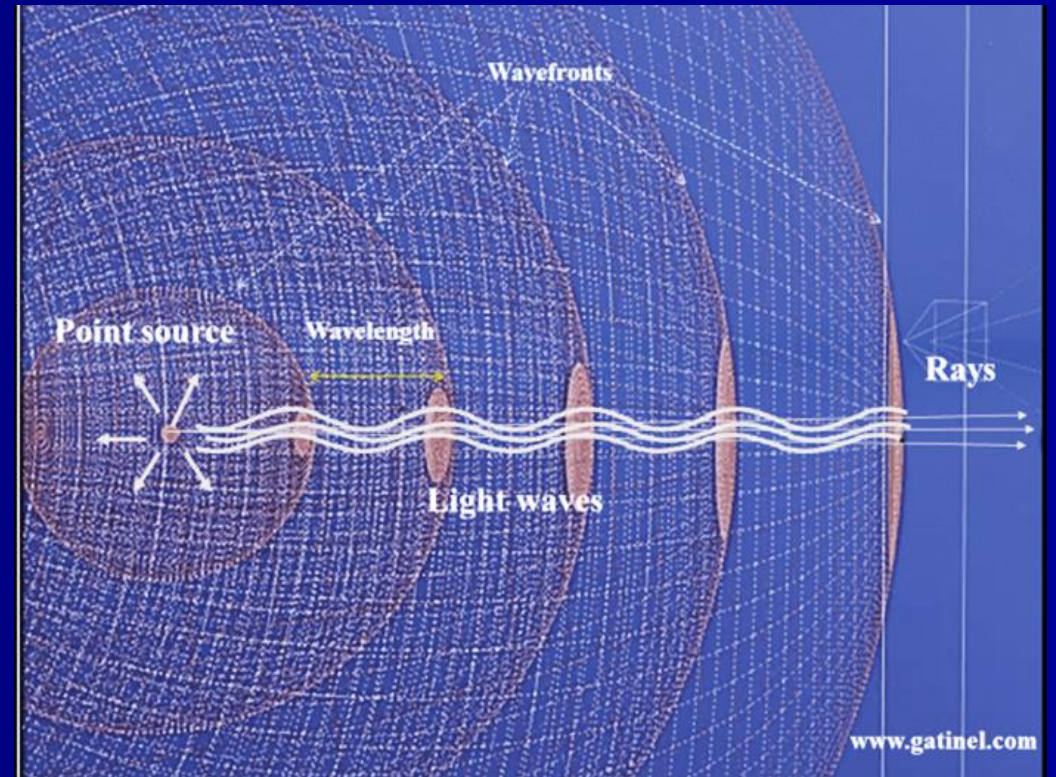
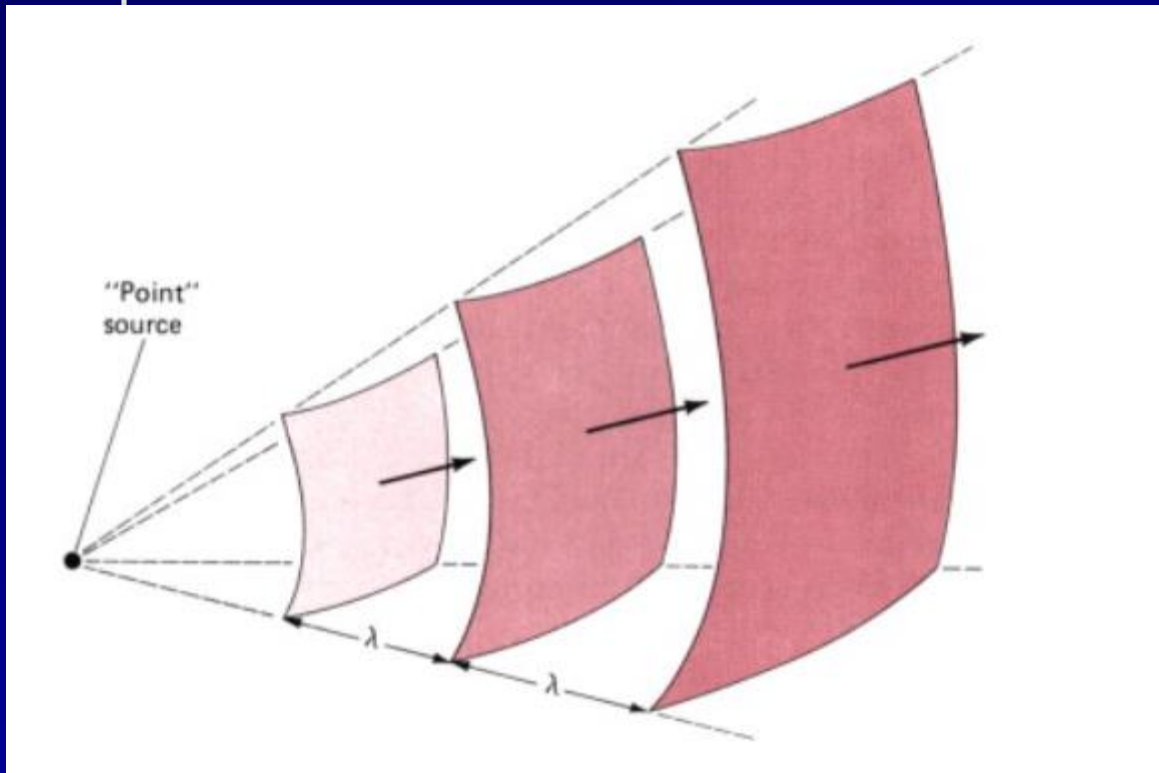
<https://www.quora.com/What-is-a-plane-wavefront-a-spherical-wavefront-and-a-cylindrical-wavefront>

<https://doi.org/10.1016/B978-0-120-59858-8.X5001-8>

# Μέτωπα Κύματος - κατηγορίες

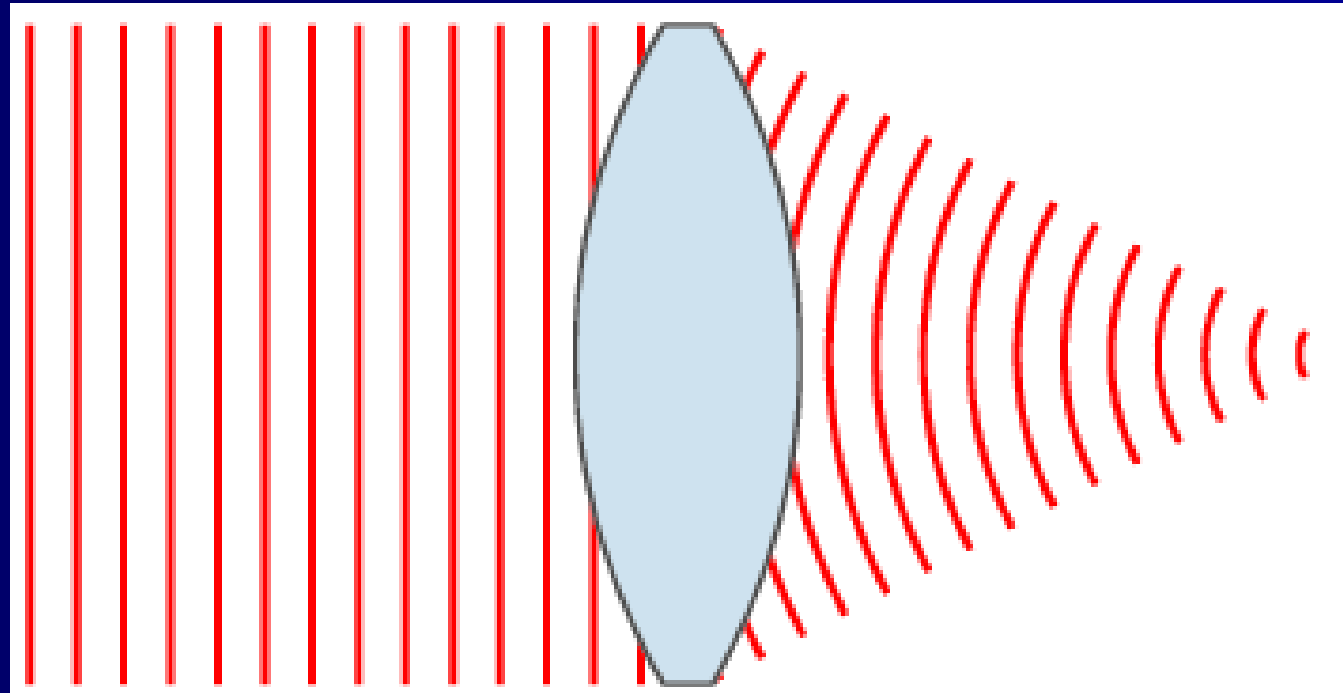


# Σε μεγάλη απόσταση από την πηγή: Επίπεδα κύματα



<https://doi.org/10.1016/B978-0-120-59858-8.X5001-8>

# Διέλευση από φακό



By Oleg Alexandrov - self-made with MATLAB, Public Domain,  
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3135623>



# Συμβολή κυμάτων

Το φαινόμενο της συμβολής βασίζεται στην

Αρχή της ανεξαρτησίας των κινήσεων

ή

στην αρχή της γραμμικής επαλληλίας.

# Συμβολή κυμάτων

- Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο δυο διαφορετικά κύματα συναντιούνται στην ίδια ακριβώς περιοχή του χώρου.
- Στη συμβολή ενδιαφέρει το πώς τροποποιείται η ένταση που προέρχεται από την επιπρόσθεση των δυο αυτών κυμάτων.

# Συμβολή κυμάτων

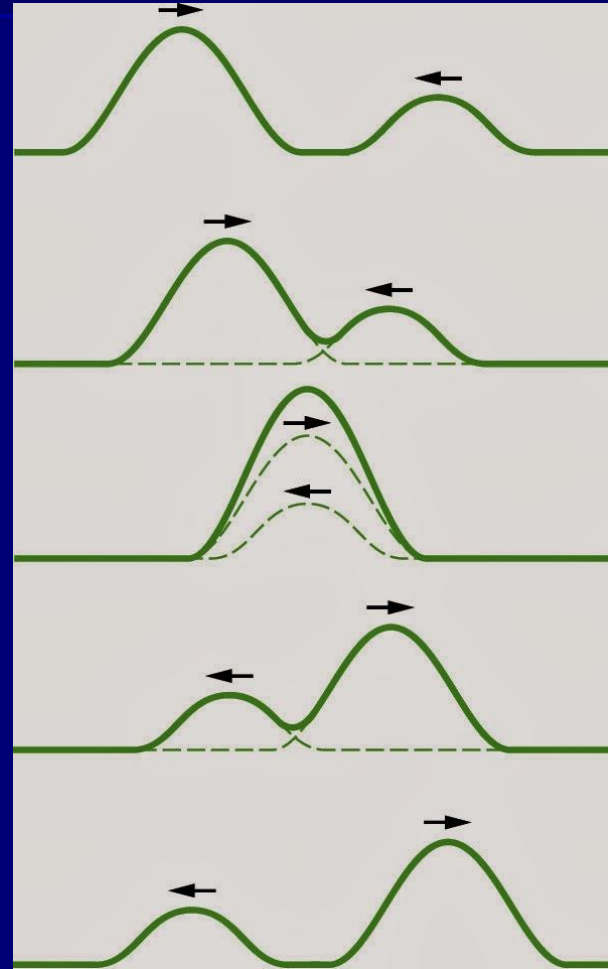
- Η συνολική απομάκρυνση σε ένα σημείο βρίσκεται προσθέτοντας τις απομακρύνσεις που θα υπήρχαν εκεί ξεχωριστά εάν το κύμα διαδιδόταν μόνο του.

# Απομάκρυνση σημαίνει :

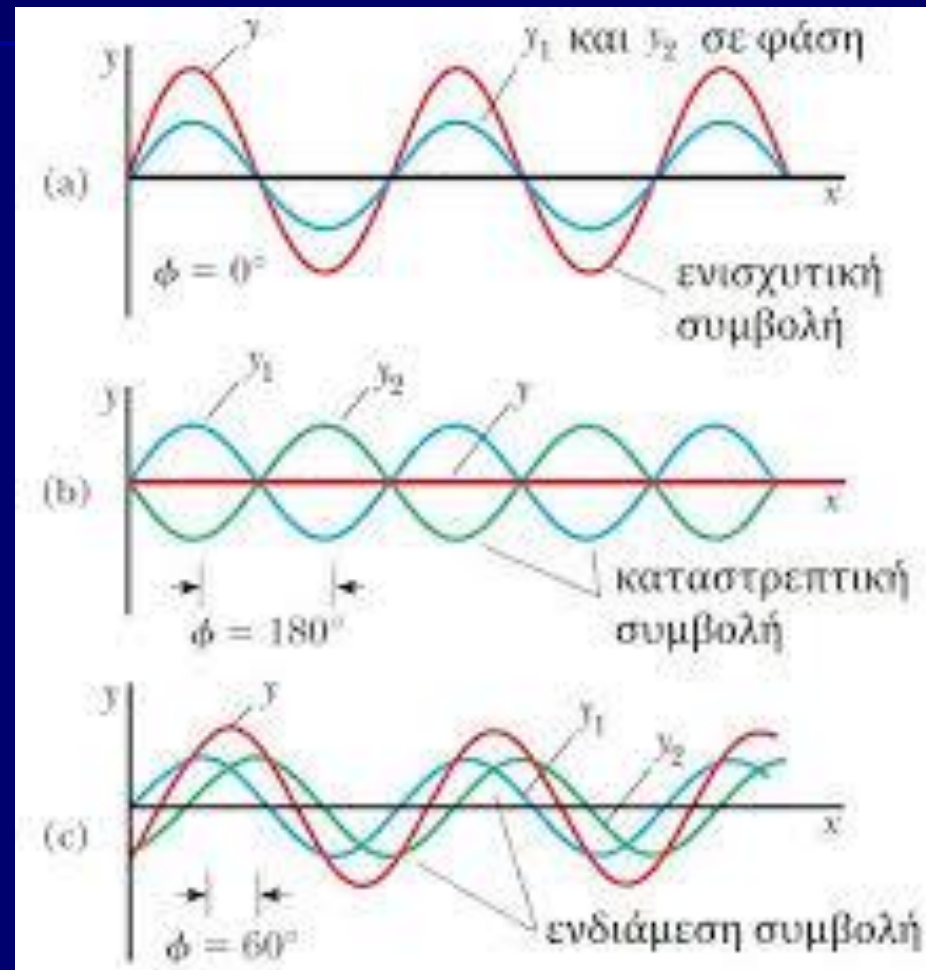
- Σε υδάτινα κύματα : Ύψος ή βάθος επιφάνειας υγρού από τη μέση στάθμη.
- Σε ηχητικά κύματα : Αύξηση ή ελάττωση της μέσης πίεσης του μέσου.
- Σε φωτεινά κύματα : Αύξηση ή ελάττωση στις εντάσεις του ηλεκτρικού ή μαγνητικού πεδίου.



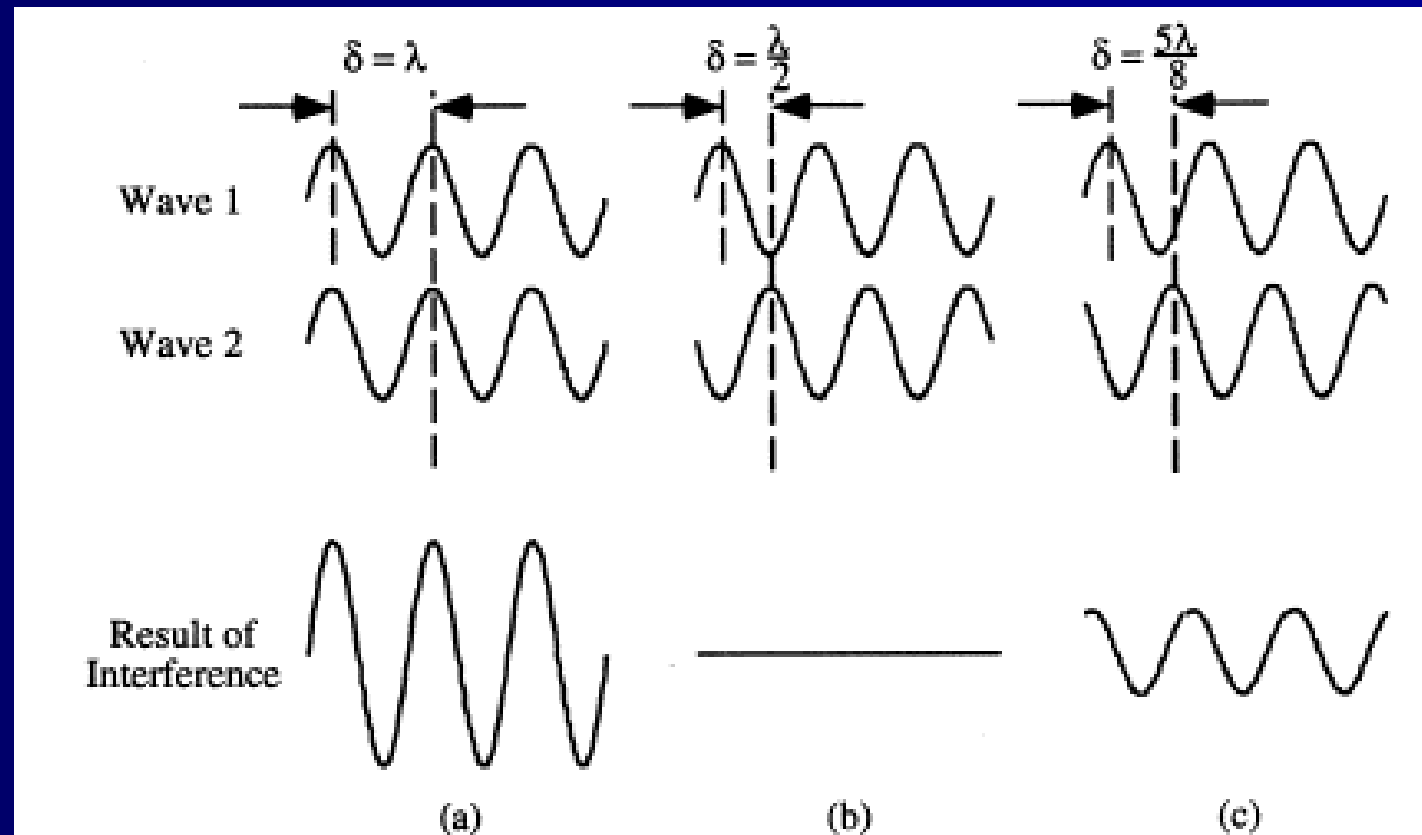
# Συμβολή κυμάτων (κίνηση επί ευθείας)

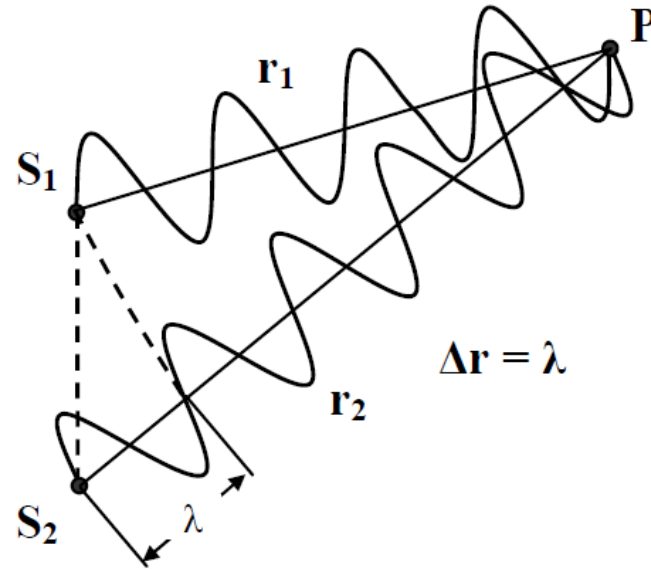
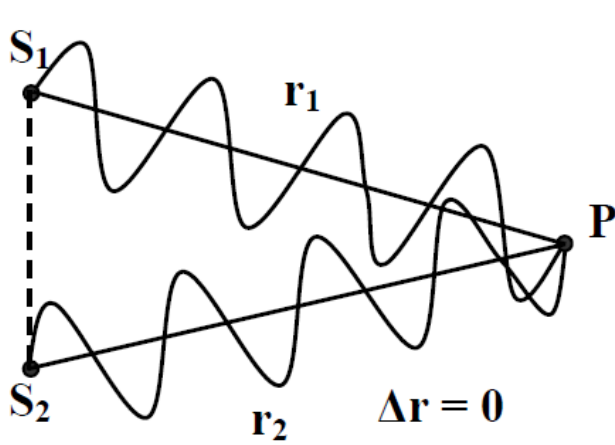


# Συμβολή κυμάτων

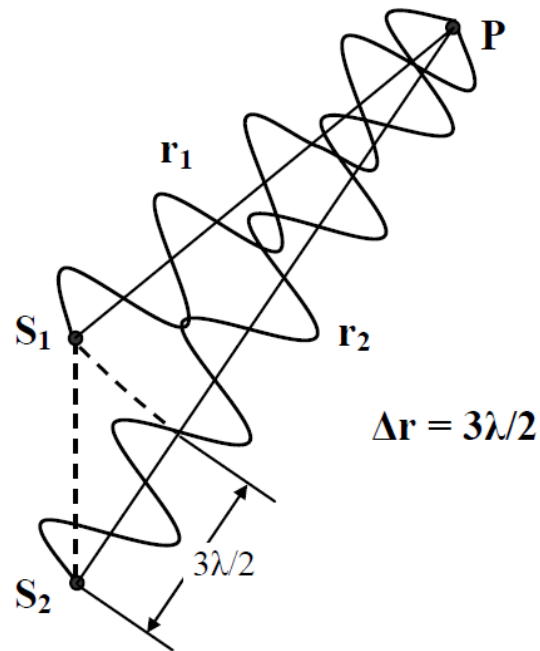
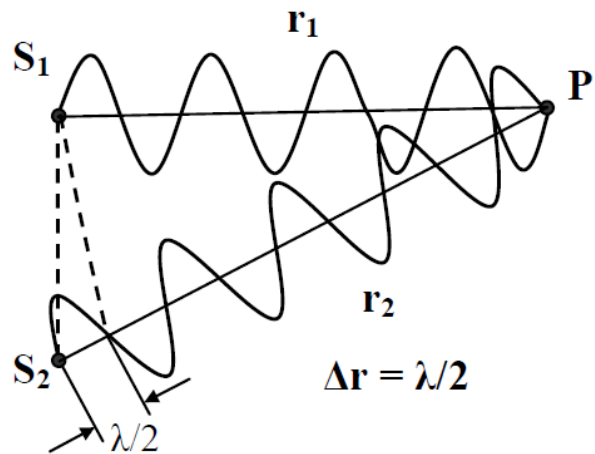


# Αποτέλεσμα συμβολής κυμάτων





**Ενίσχυση**



**Απόσβεση**

# Συμβολή κυμάτων

- Ενίσχυση : Άρτιο πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος,  $2κ (\lambda/2)$ .
- Απόσβεση : Περιττό πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος,  $(2κ+1) (\lambda/2)$ .
- Ο ακέραιος  $κ$  παίρνει τις τιμές  $0,1,2 \dots$

# Συμβολή κυμάτων σε υδάτινη επιφάνεια



# Συμβολή φωτεινών κυμάτων

- Η συνολική ένταση σε κάθε περιοχή του πεδίου δεν ισούται με το άθροισμα των εντάσεων αλλά εξαρτάται και από την μεταξύ τους φάση κατά την στιγμή της ταυτόχρονης παρουσίας των δυο κυμάτων σε εκείνη τη περιοχή.

# Κατηγορίες Συμβολής Φωτεινών Κυμάτων

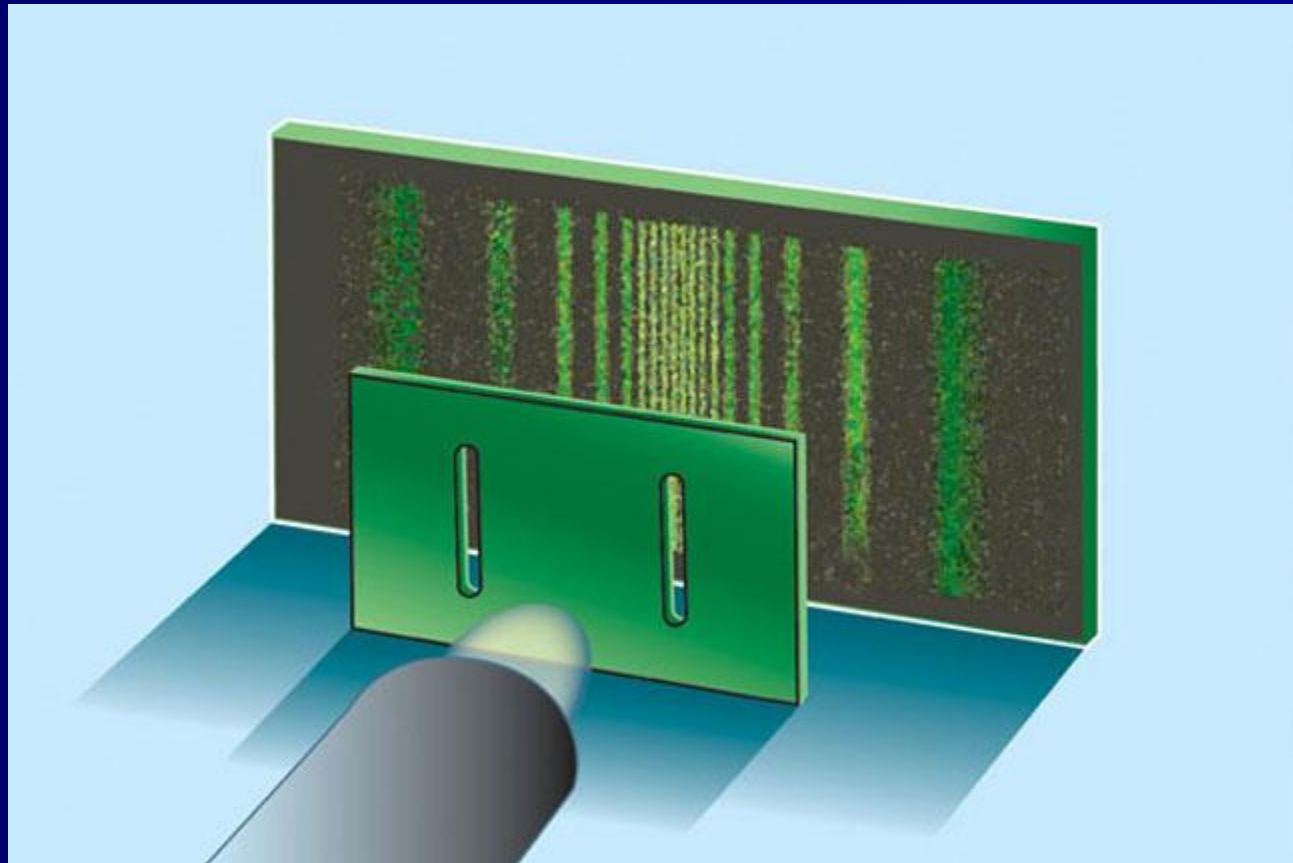
- Πρόκειται για δυο κατηγορίες και έχουν σχέση με τον τρόπο που δημιουργήθηκε η εικόνα συμβολής, δηλαδή από :
- Διαχωρισμό μετώπου φωτεινού κύματος.  
ή
- Διαχωρισμό πλάτους σε φωτεινό κύμα.



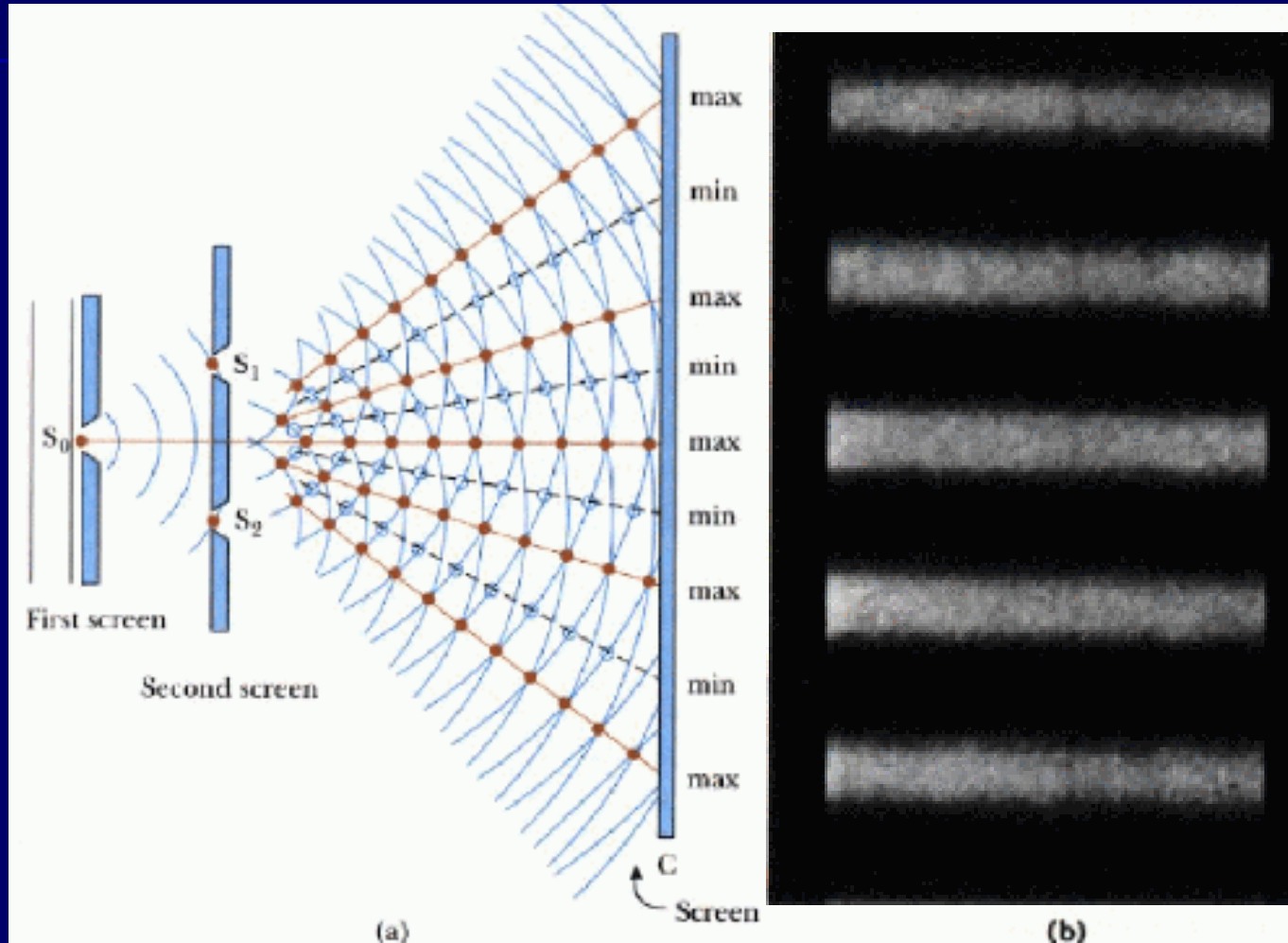
# Διαχωρισμός μετώπου

- Απαιτείται σημειακή φωτεινή πηγή ή πολύ στενή φωτεινή δέσμη.
- Δεν δημιουργείται «συμπληρωματική» εικόνα συμβολής με αντεστραμμένα χαρακτηριστικά.
- Παραδείγματα : Πείραμα Young, Fresnel.

# Πείραμα Young (1801)



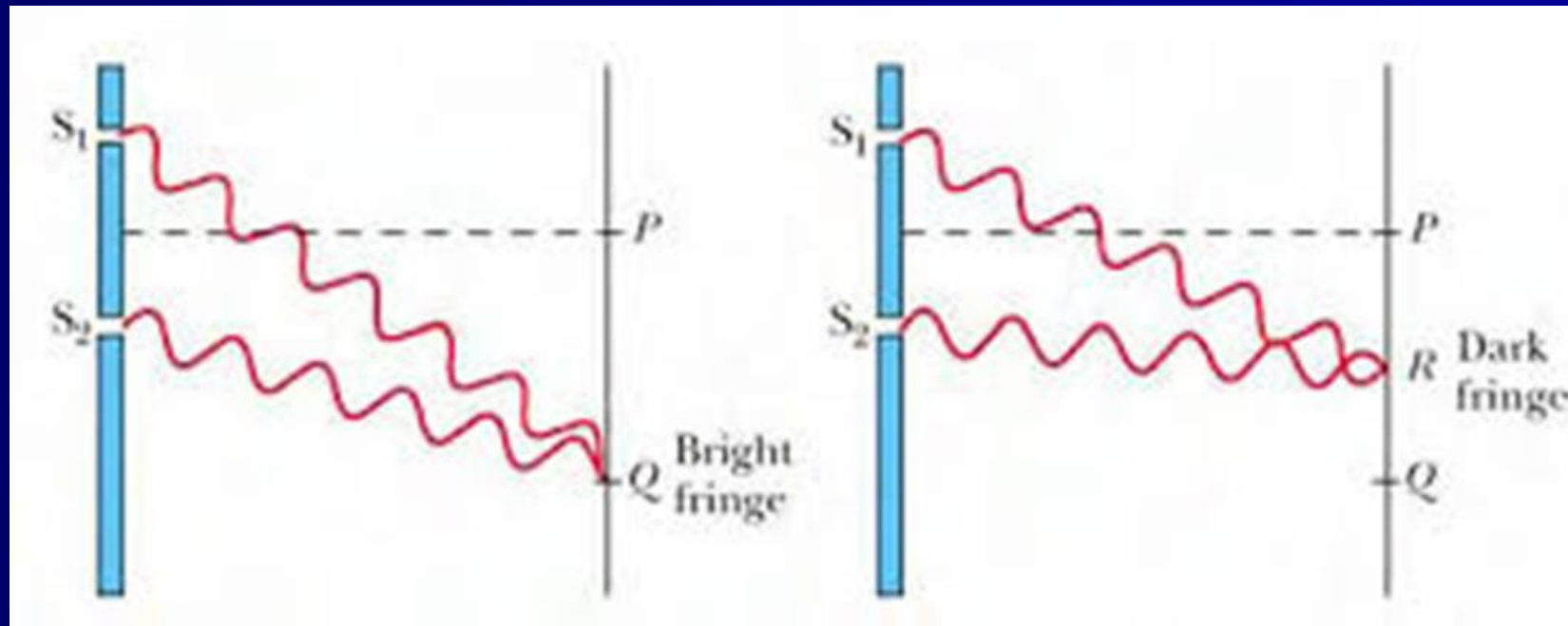
# Πειραματική διάταξη



# Πείραμα Young

- Προσοχή, οι σκοτεινές περιοχές στο τελικό πέτασμα δημιουργούνται όχι επειδή τάχα εκεί δεν φθάνει φως. Το φως εκεί φθάνει, και από τις δυο πηγές, αλλά με αντίθετες φάσεις.
- Η συνολική ενέργεια των δύο κυμάτων που προσπίπτει στο πέτασμα παραμένει σταθερή.

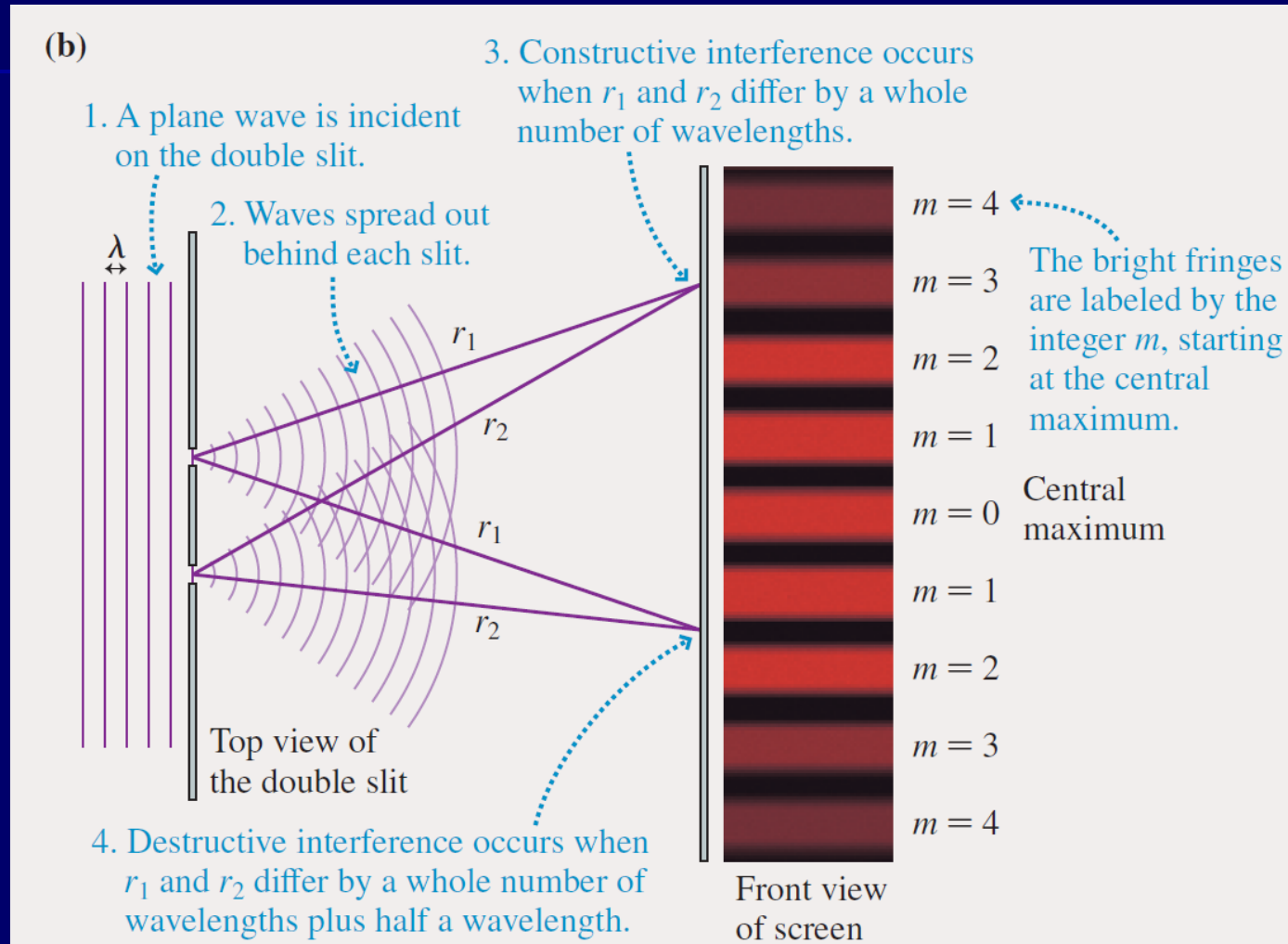
# Πείραμα Young



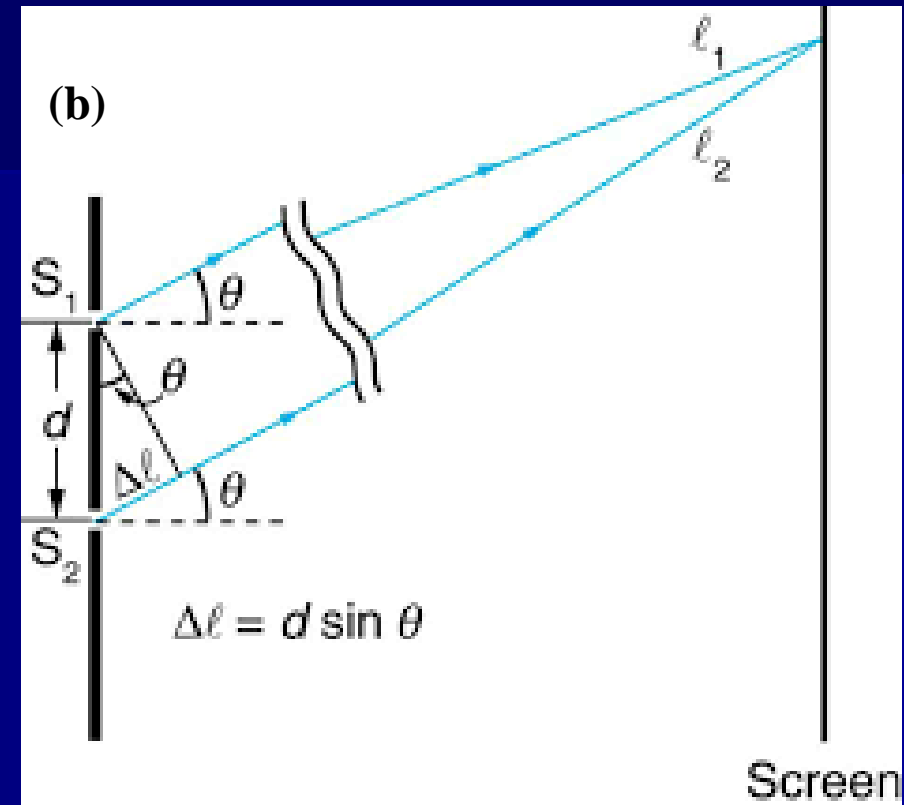
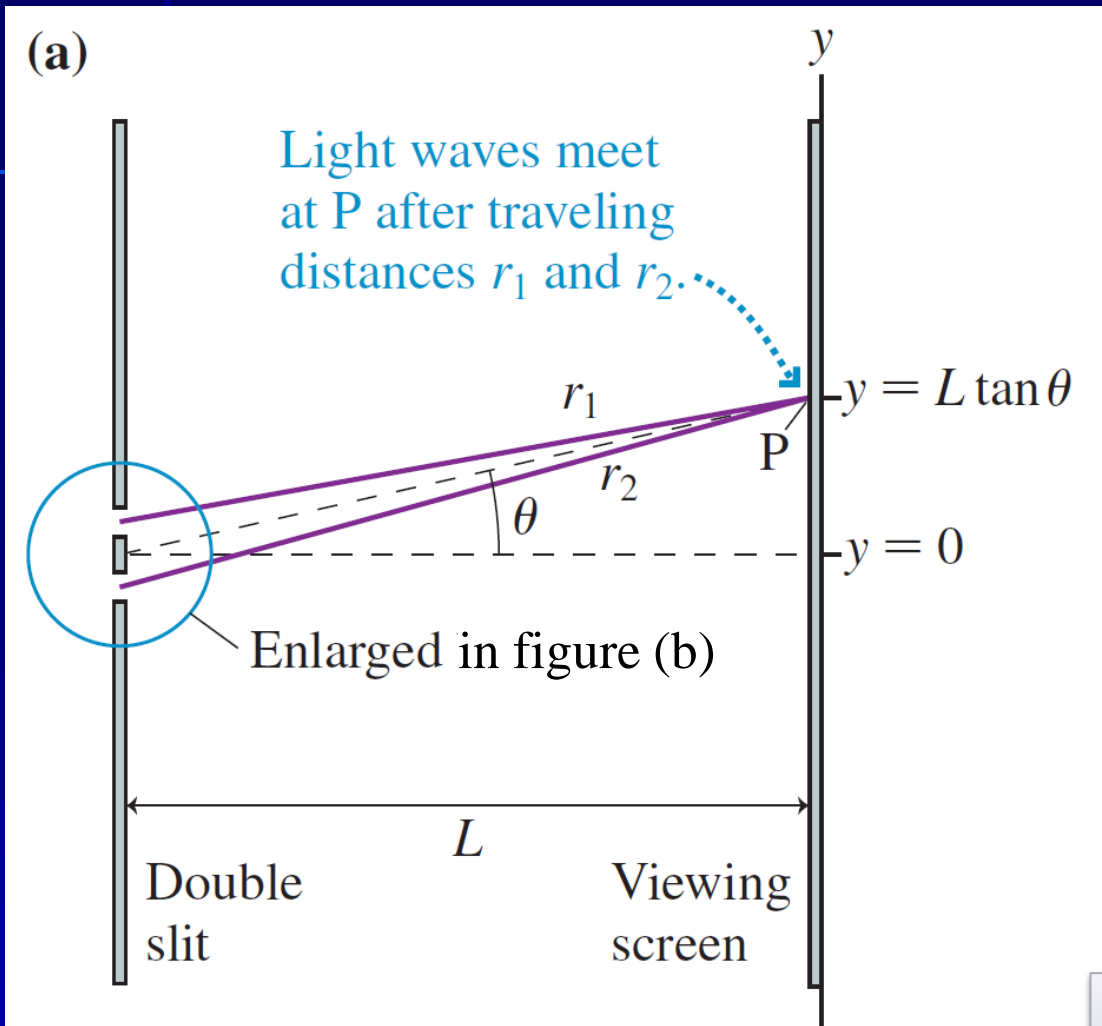
# Σύμφωνες φωτεινές πηγές

- Οι δυο πηγές να εκπέμπουν μονοχρωματικά φωτεινά κύματα με ίδιο ακριβώς πλάτος.
- Τα κύματα που συμβάλουν να έχουν την ίδια πάντα διαφορά φάσης κατά την συνάντηση.
- Οι πηγές να έχουν μικρή διάσταση και να βρίσκονται κοντά η μια στην άλλη.

# Πείραμα Young (διάταξη)



# Πείραμα Young (διάταξη)



$$\theta < 1^\circ \rightarrow \theta \text{ (rad)} \approx \varepsilon\varphi\theta \approx \eta\mu\theta = \frac{\Delta \ell}{d}$$

E  
A

$$\Delta \ell = \kappa \lambda = 2\kappa \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta \ell = (2\kappa - 1) \frac{\lambda}{2}$$



# Πείραμα Young (υπολογισμοί)

- Απόσταση πρώτου φωτεινού από τον κεντρικό φωτεινό κροσσό.

$$y = L (\lambda / d)$$

L : απόσταση πετάσματος - σχισμών

$\lambda$  : μήκος κύματος φωτός και

d : απόσταση μεταξύ των δυο σχισμών.

# Διερεύνηση σχέσης

- Η απόσταση  $y$  του πρώτου φωτεινού κροσσοῦ από τον κεντρικό αυξάνει όταν :
- Αυξάνει η απόσταση  $L$  πετάσματος.
- Αυξάνει το μήκος κύματος  $\lambda$  του φωτός.
- Μικραίνει η απόσταση  $d$  των δυο σχισμών

# Πείραμα Young (θέσεις κροσσών)

- Φωτεινοί κροσσοί :

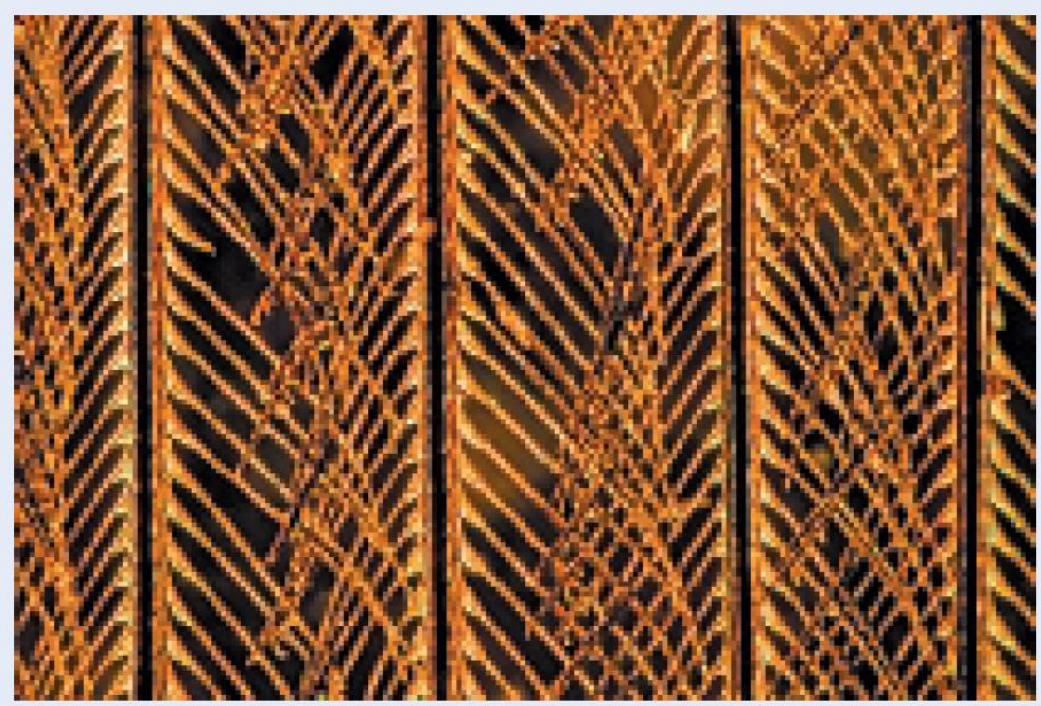
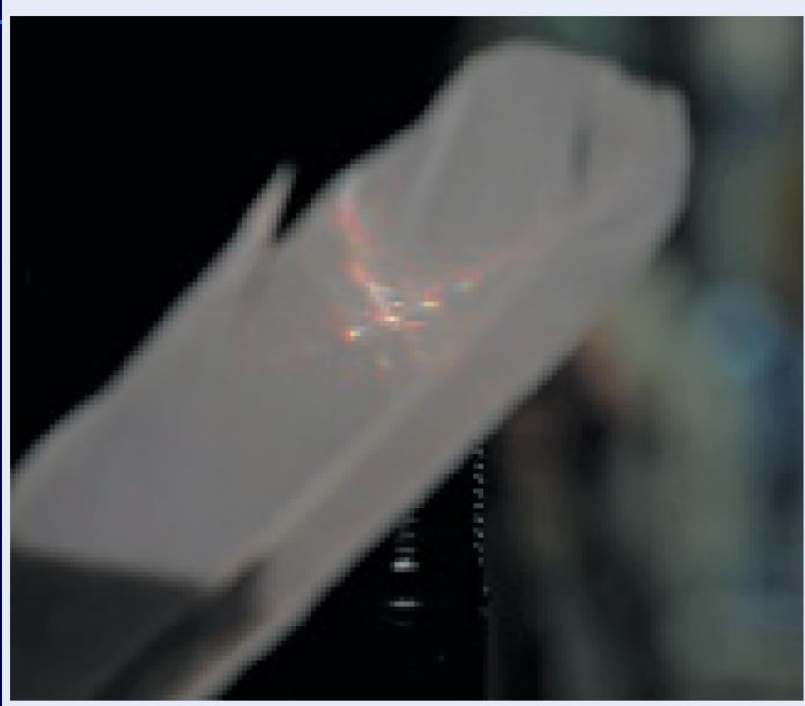
$$y = 2κ (L / d) λ / 2$$

όπου κ η τάξη του κροσσοῦ δηλ. 0,1,2,3,...

- Σκοτεινοί κροσσοί :

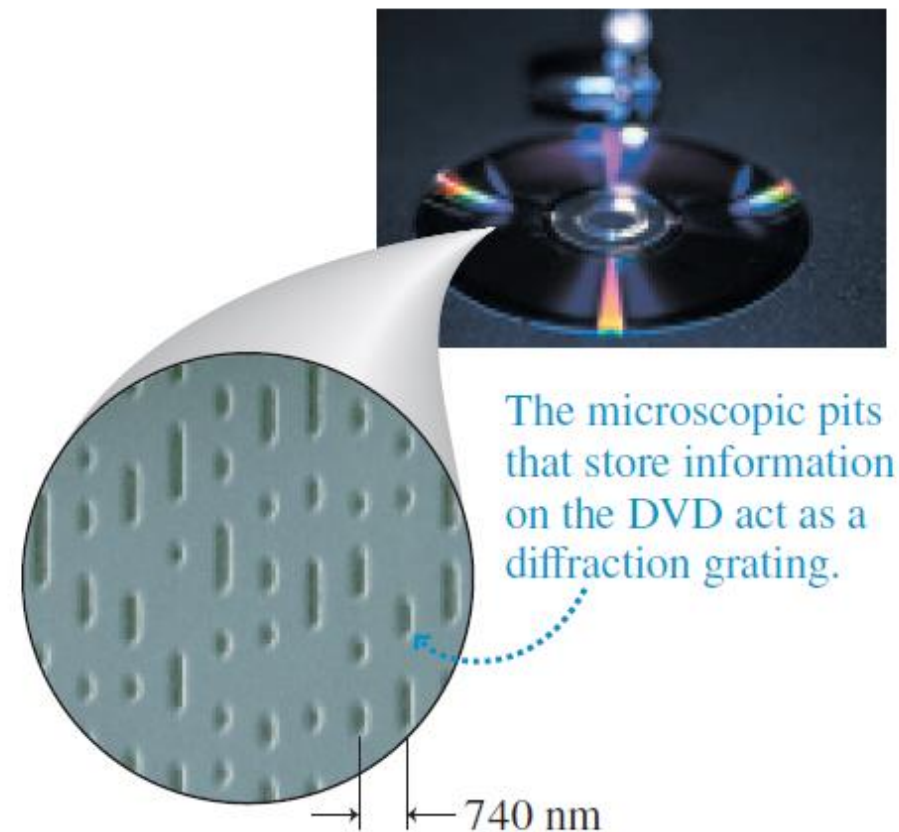
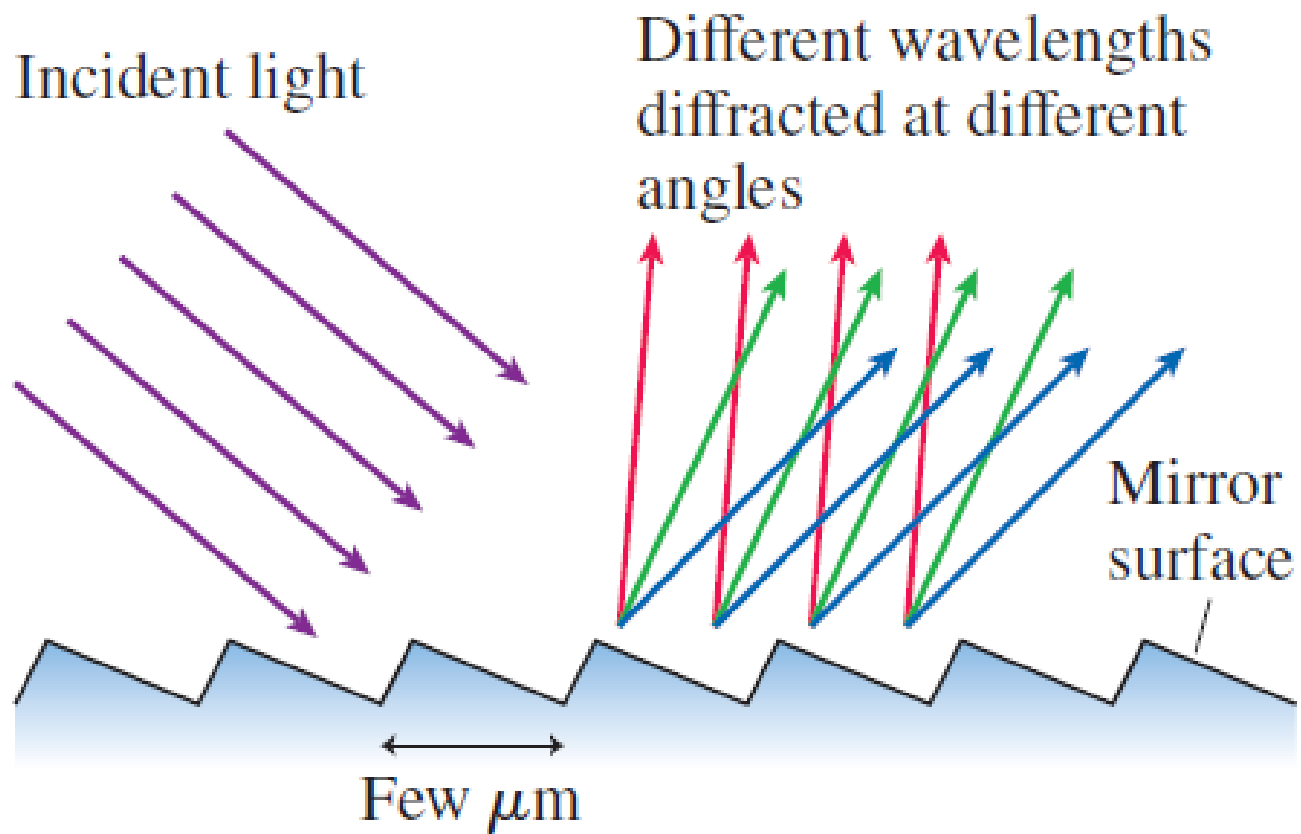
$$y = (2κ - 1) (L / d) λ / 2$$

όπου κ η τάξη του κροσσοῦ δηλ. 1,2,3,...



***College Physics 4e***, R. Knight, B. Jones, S. Field, Pearson ed. ; ISBN 10: 0-134-60903-4

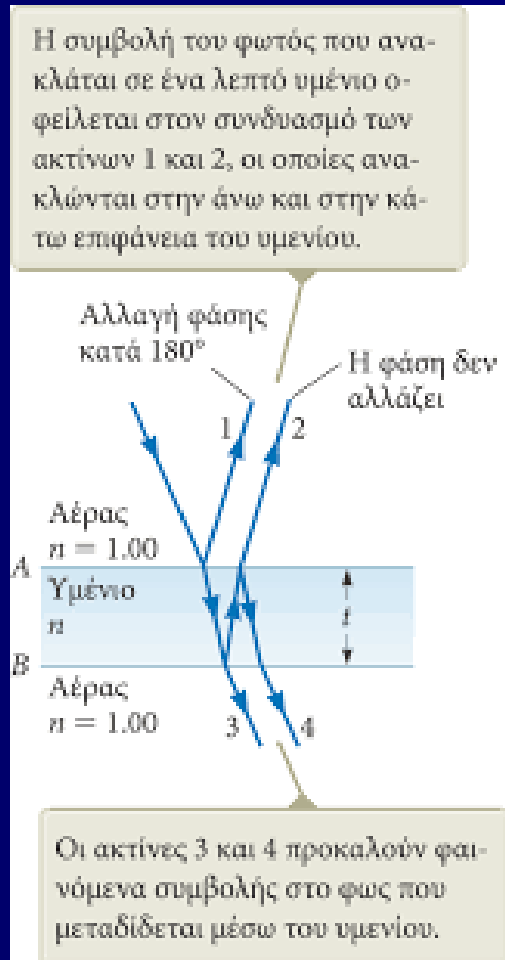
# Φράγμα Ανάκλασης



# Διαχωρισμός πλάτους

- Πραγματοποιείται με φωτεινή πηγή μεγάλων σχετικά διαστάσεων.
- Δημιουργείται η συμπληρωματική εικόνα των κροσσών συμβολής.
- Παραδείγματα : Λεπτά υμένα, δακτύλιοι Newton.

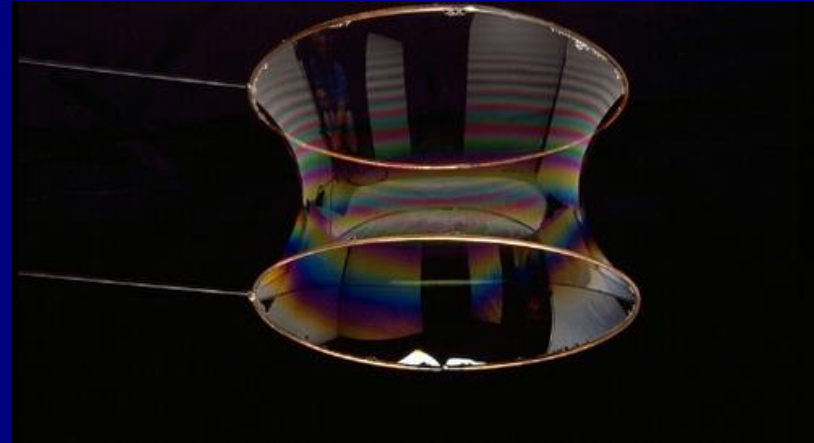
# Χρώματα από συμβολή



- Διαφορά οπτικών δρόμων 1, 2 :  
 $2nt \text{ συνδ} - (\lambda/2)$
- Διαφορά οπτικών δρόμων 3, 4 :  
 $2nt \text{ συνδ}$

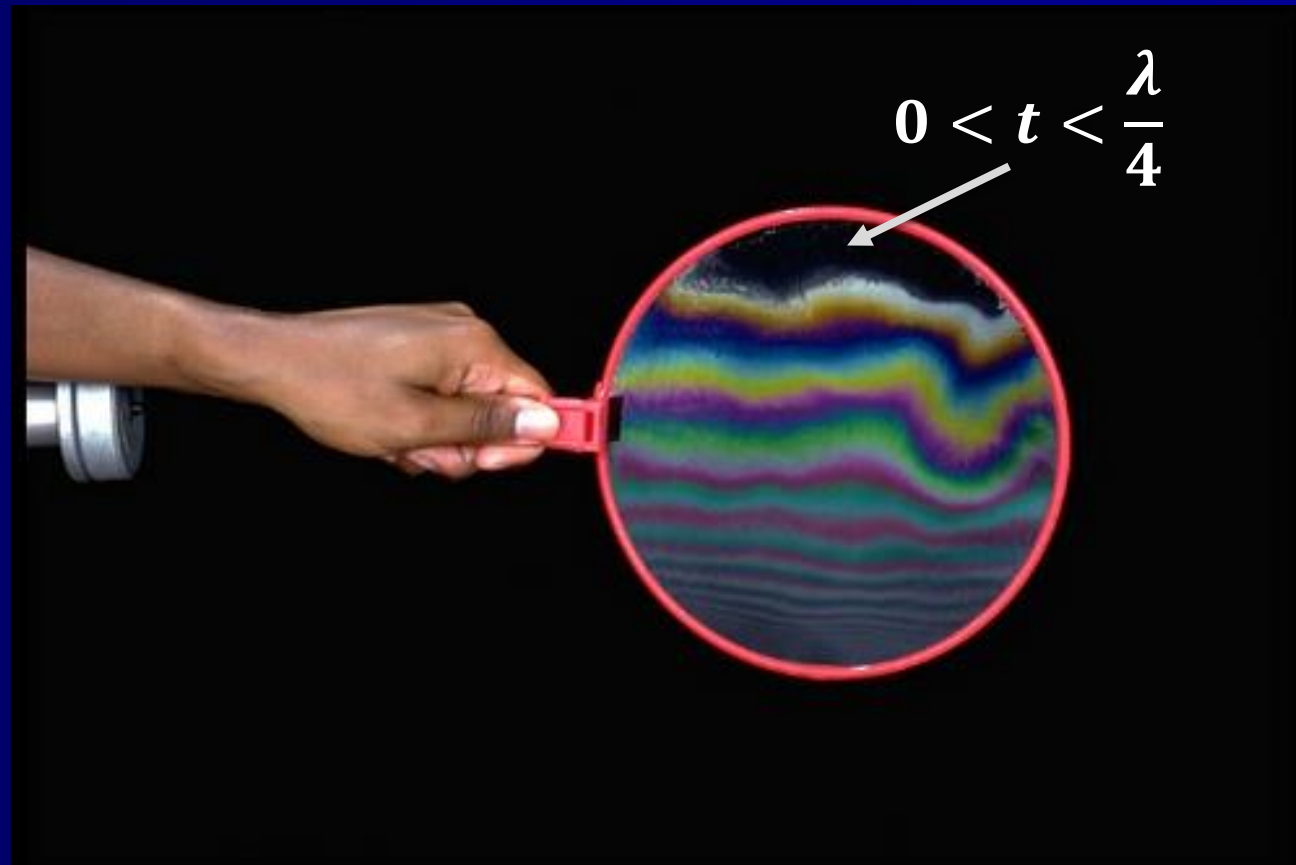


# Λεπτά υμένια, χρώματα από συμβολή

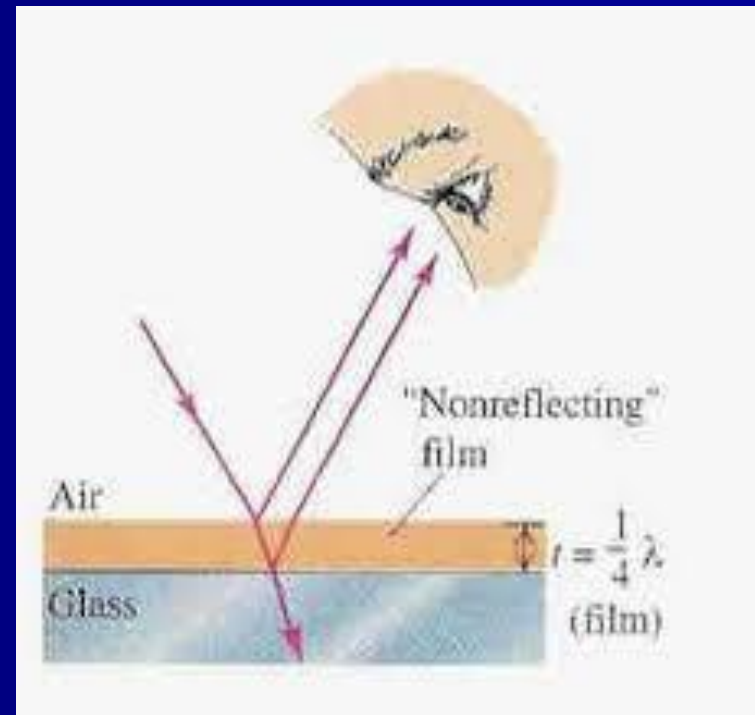
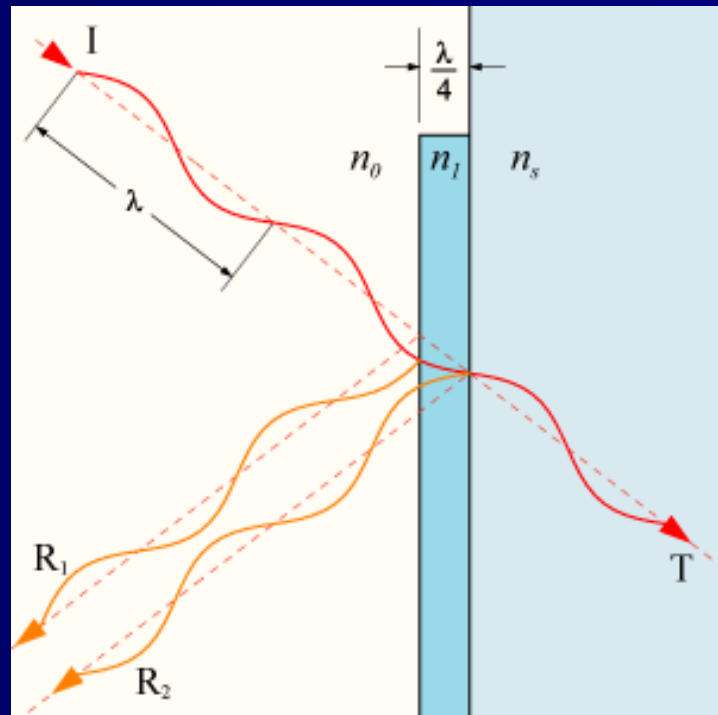




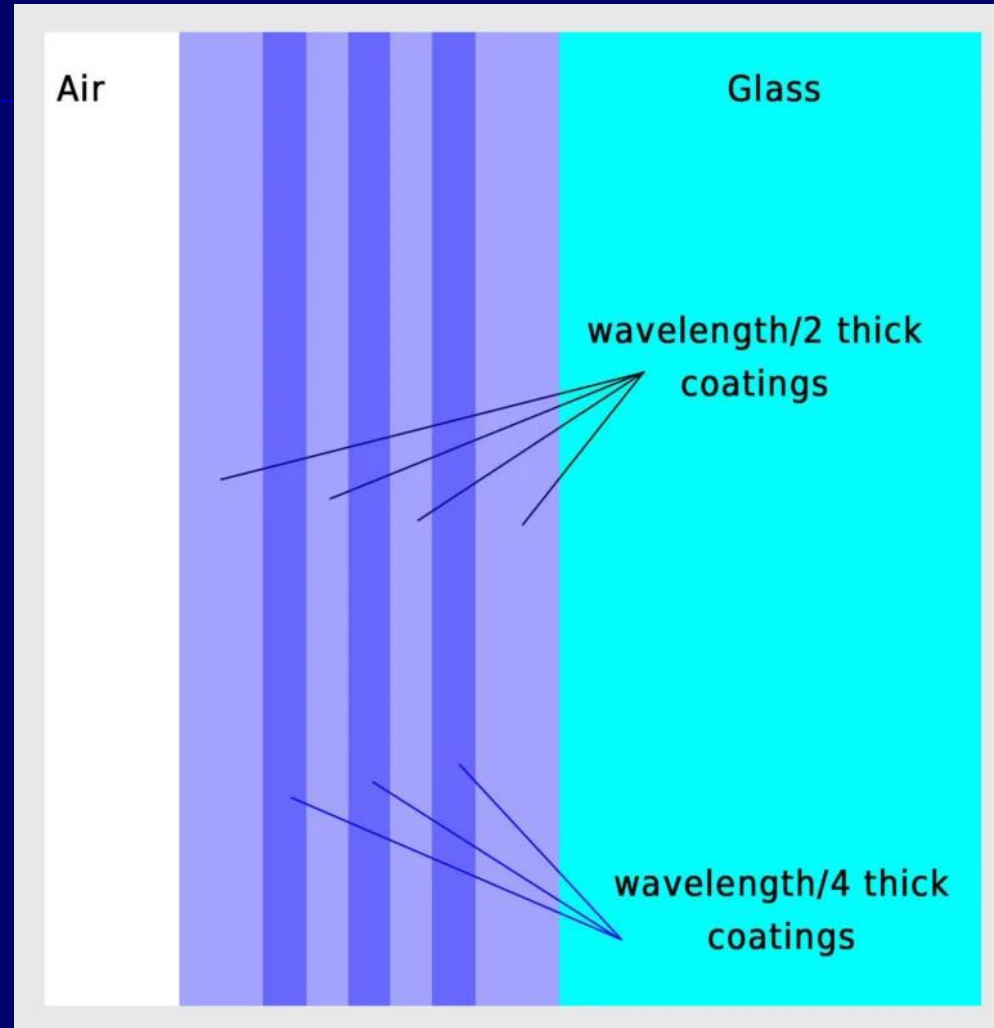
# Λεπτά υμένα, χρώματα από συμβολή



# Αντιανακλαστικές επιφάνειες φακών



# Πολυστρωματικές επιστρώσεις φακών



Πάχος κάθε επίστρωσης:  
~100 nm – 250 nm

# Οφθαλμικά κρύσταλλα, επιστρώσεις



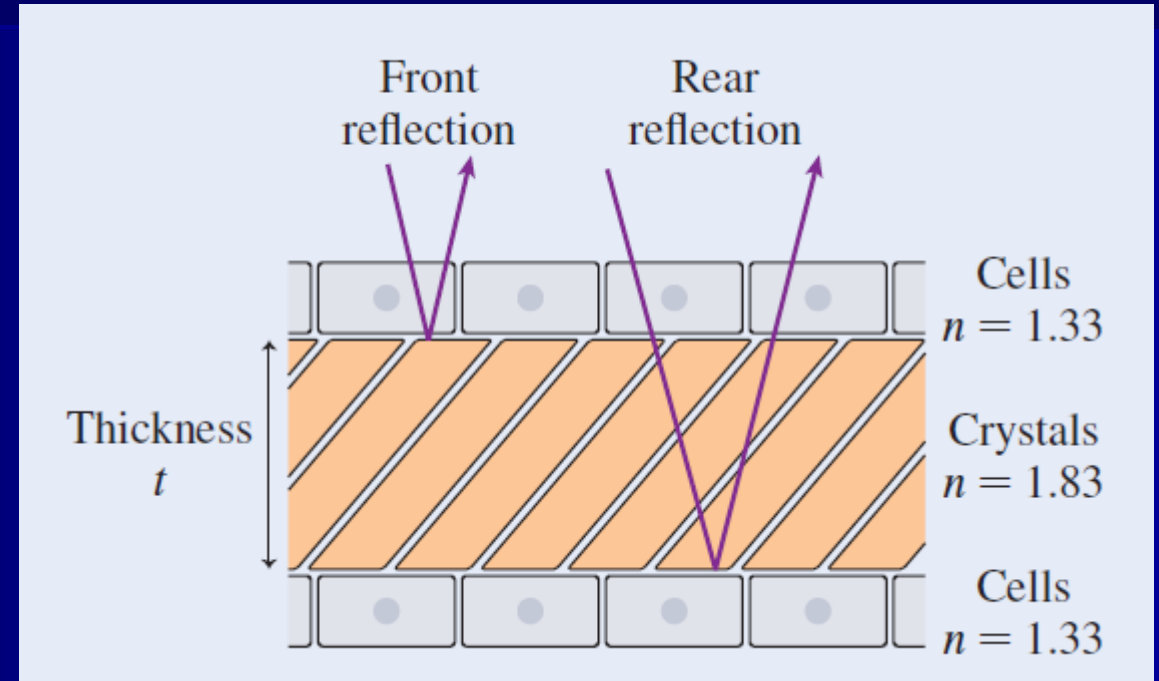
# 2016 Zeiss experiment



Photo by Andreas Bogenschütz and via Zeiss. <https://petapixel.com/science-of-lens-coatings/>



# Ενίσχυση ανάκλασης



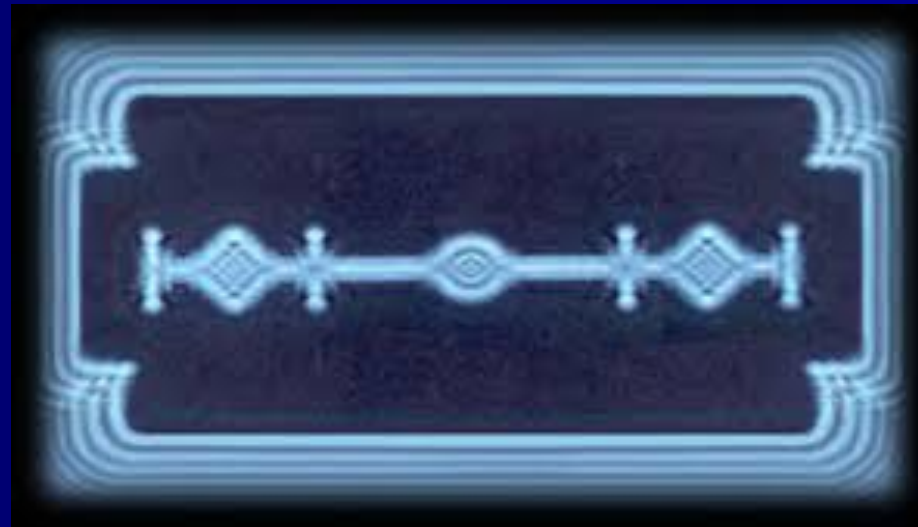
$$\lambda(\kappa=0) \sim 590 \text{ nm} \rightarrow \text{κίτρινο}$$

# Περίθλαση φωτός

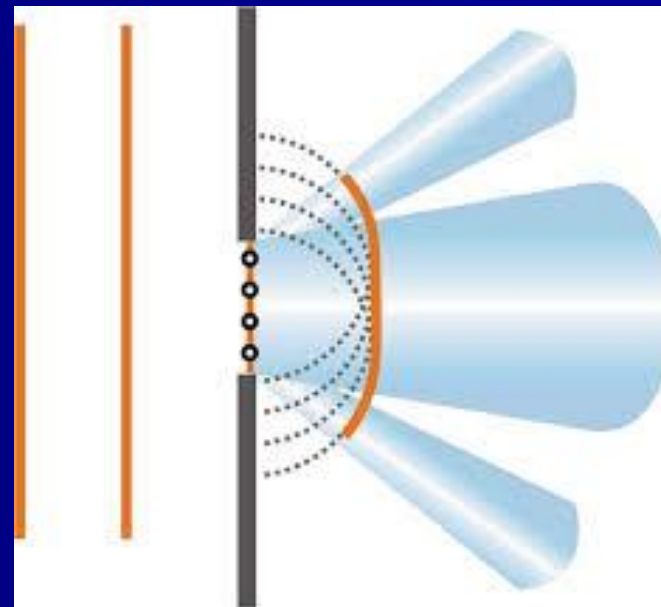
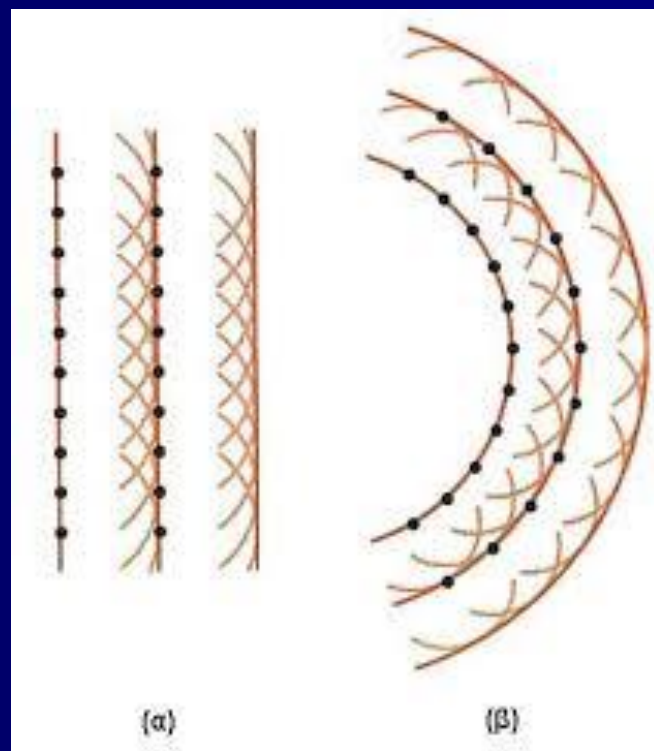
- Η «κάμψη» του φωτός στα όρια ενός αδιαφανούς εμπόδιου έχει σαν αποτέλεσμα την «αλλοίωση» των άκρων της γεωμετρικής σκιάς. Το φαινόμενο αυτό που καταστρατηγεί την λογική της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός καλείται **περίθλαση**.



# Εικόνες Περίθλασης



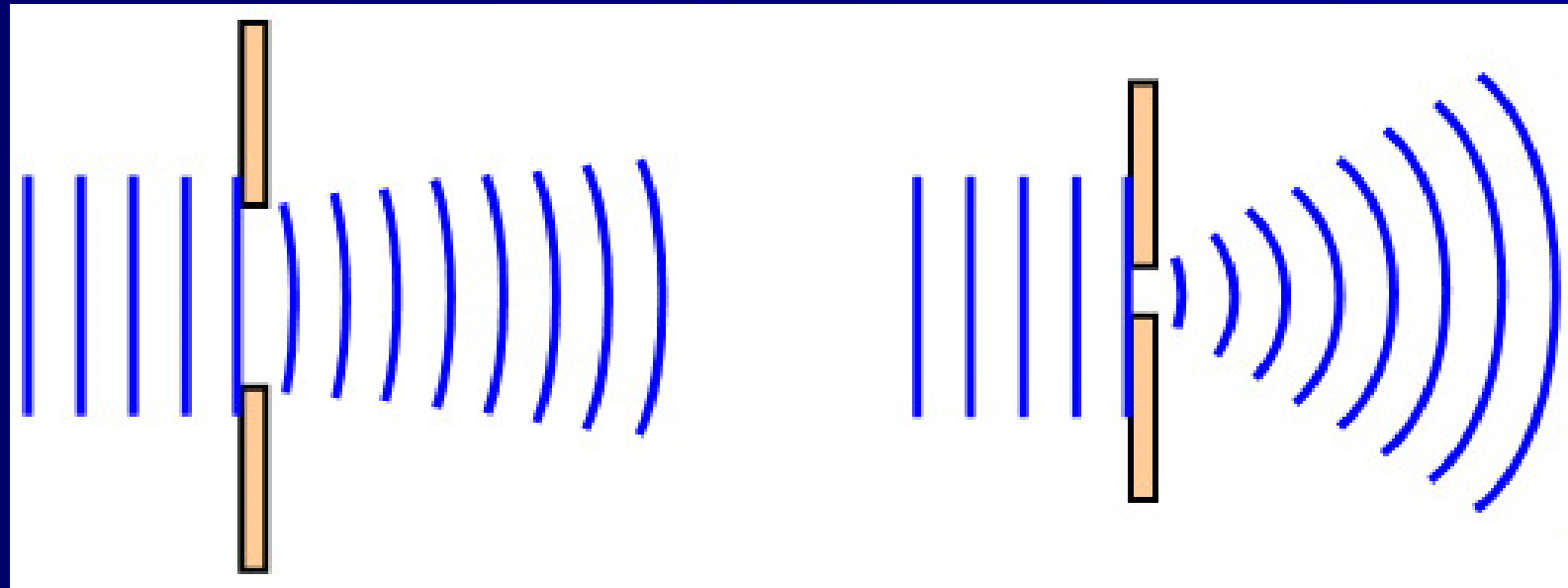
# Αρχή Huygens, Μέτωπα κύματος



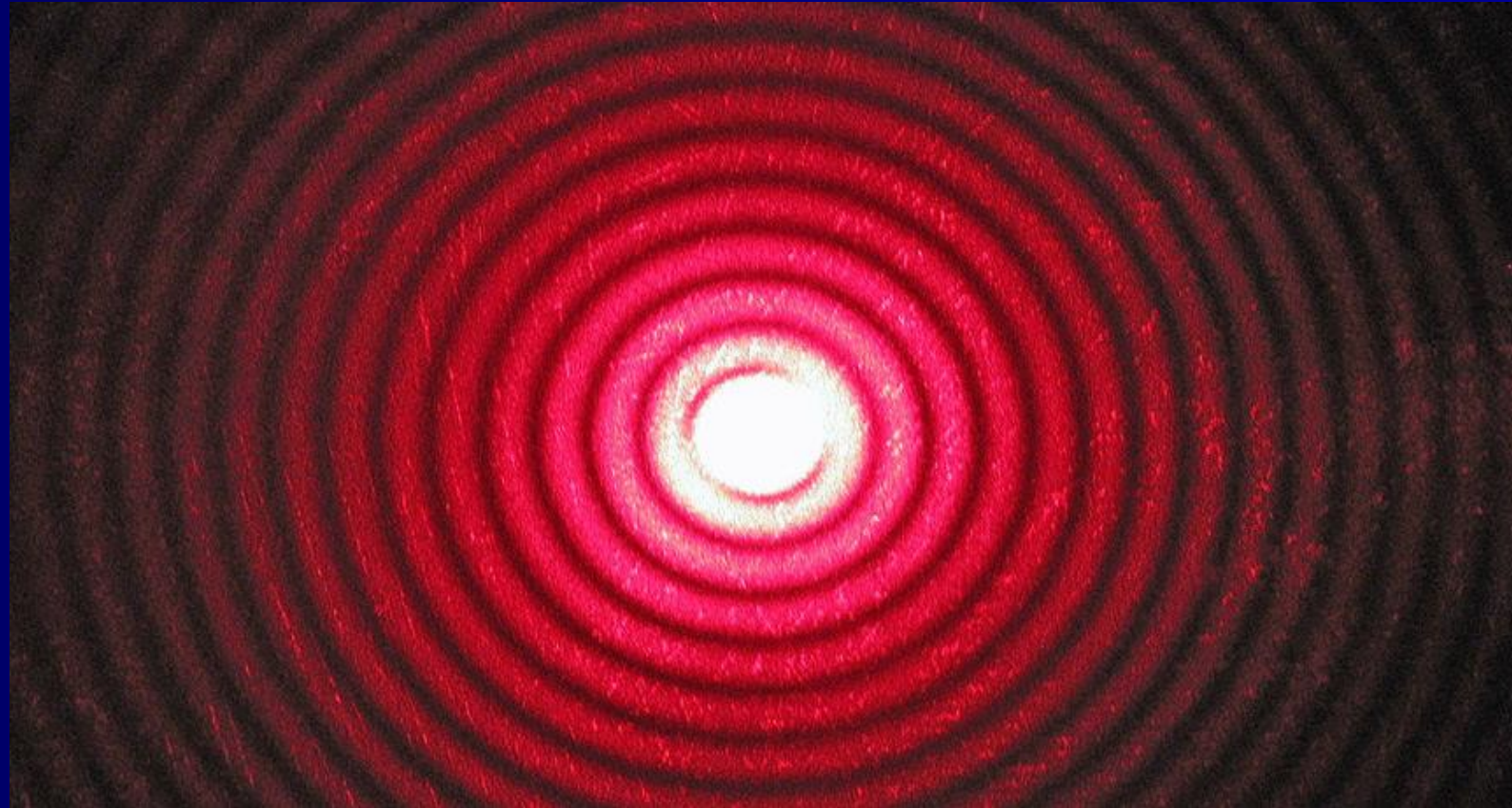
# Περίθλαση φωτός

- Η συμβολή και η περίθλαση είναι ουσιαστικά το ίδιο κυματικό φαινόμενο που όμως ενώ στη συμβολή αφορά μικρό σχετικά αριθμό φωτεινών πηγών (π.χ. δυο στο πείραμα του Young), στη περίθλαση αναφέρεται σε μια συνεχή κατανομή φωτεινών κυμάτων σύμφωνα με την θεωρία του Huygens.

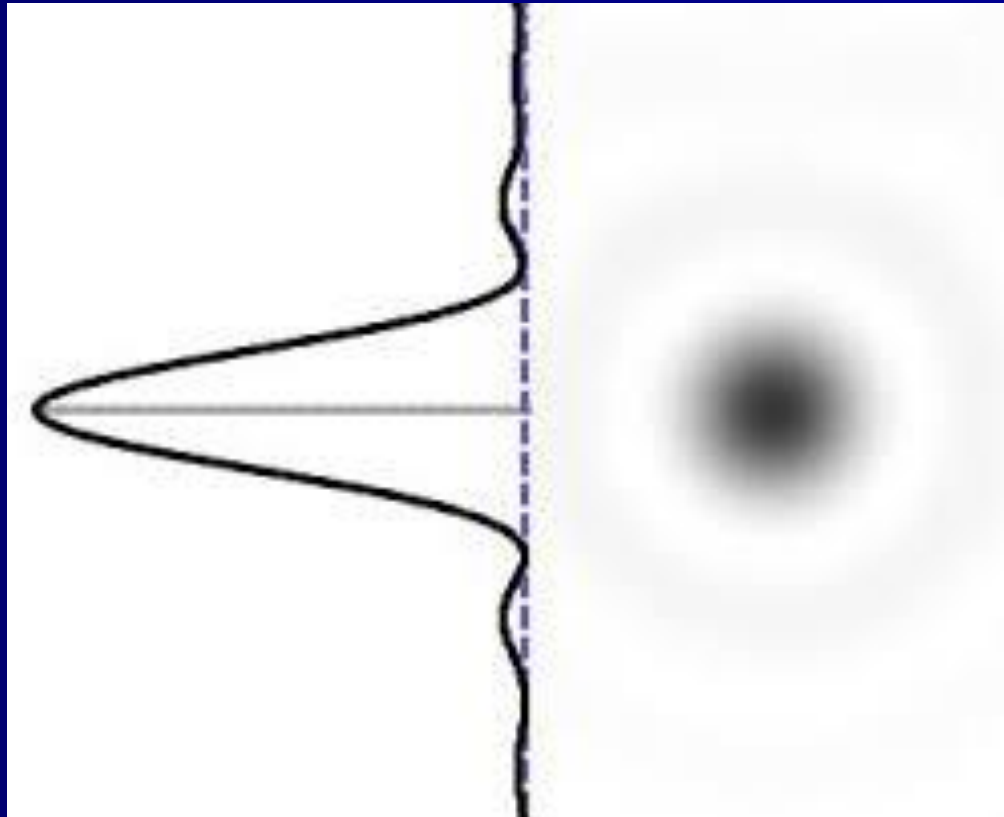
# Περίθλαση - Άνοιγμα

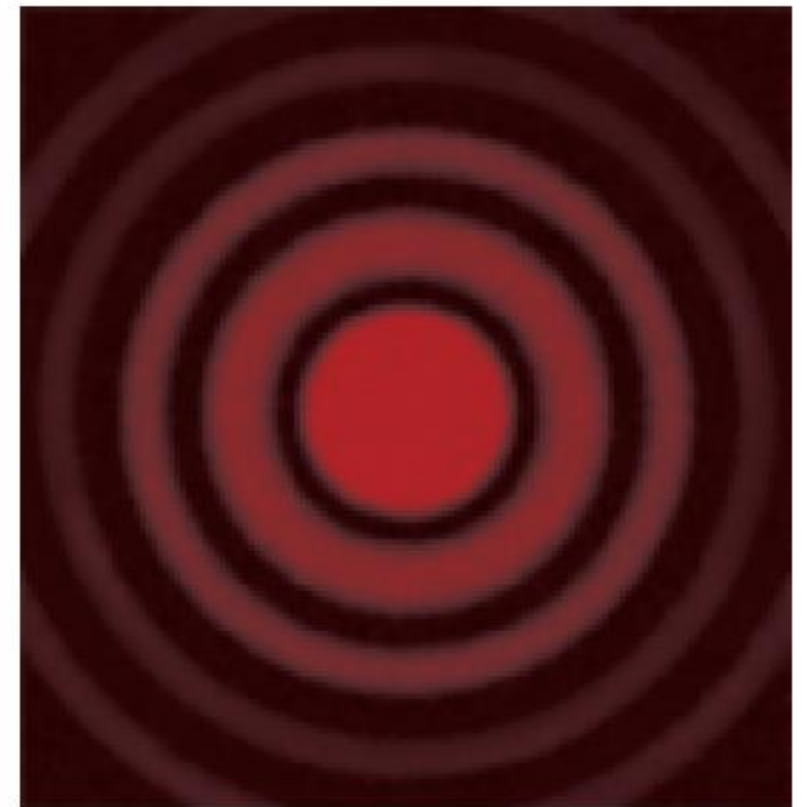
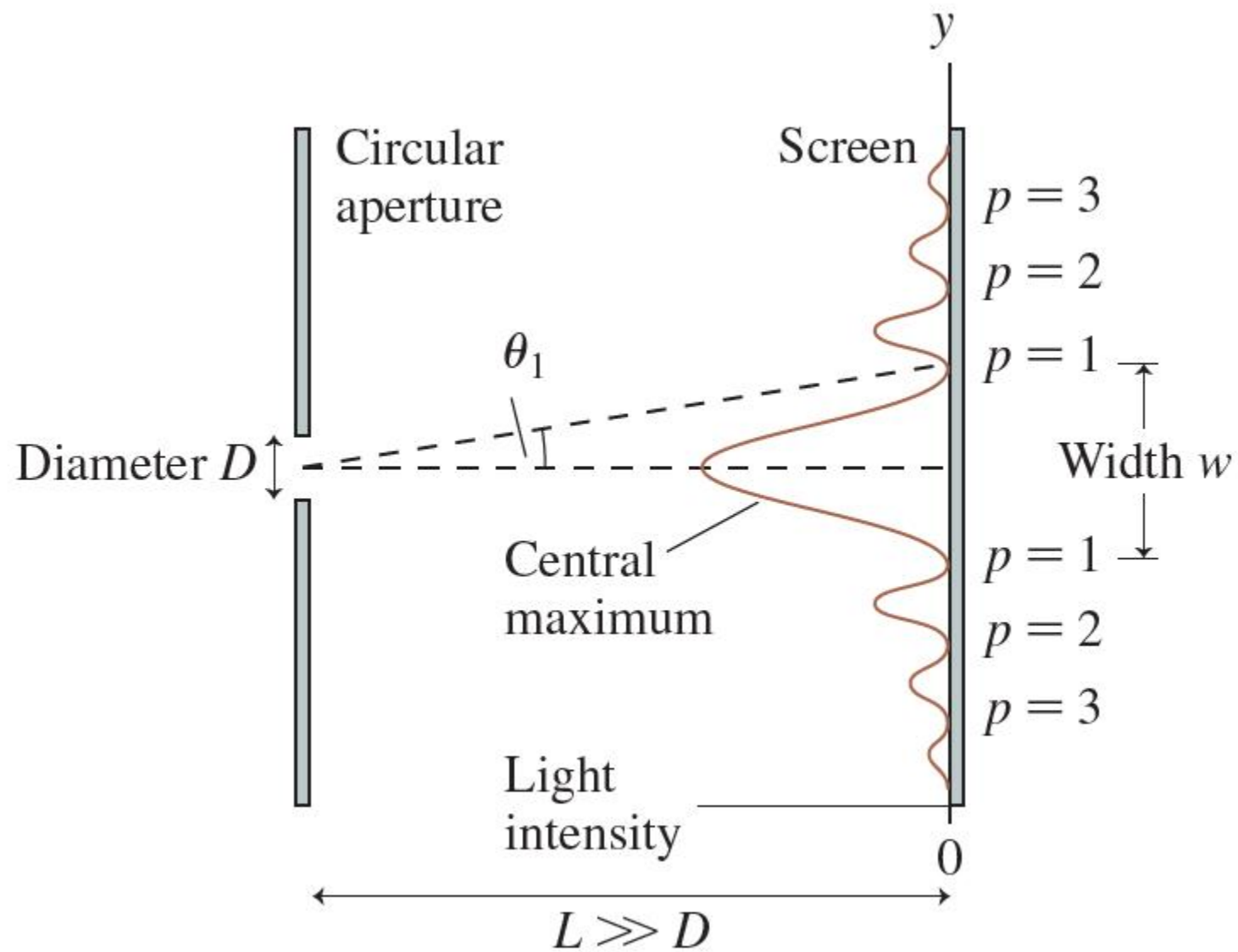


# Laser – κυκλικό άνοιγμα

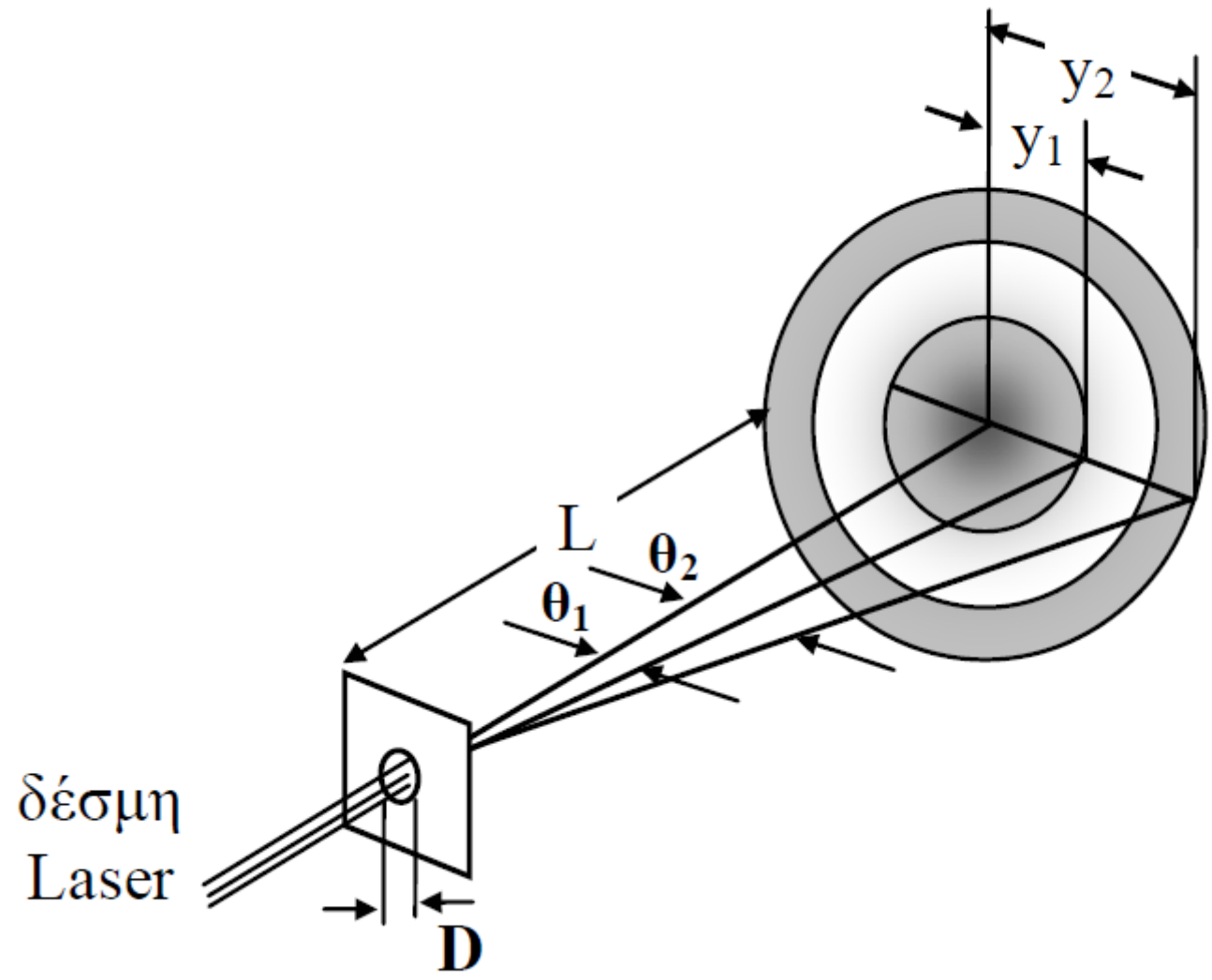


# Περίθλαση Δίσκος του Airy









# Δίσκος του Airy

Η ακτίνα του δίσκου Airy δίνεται από :

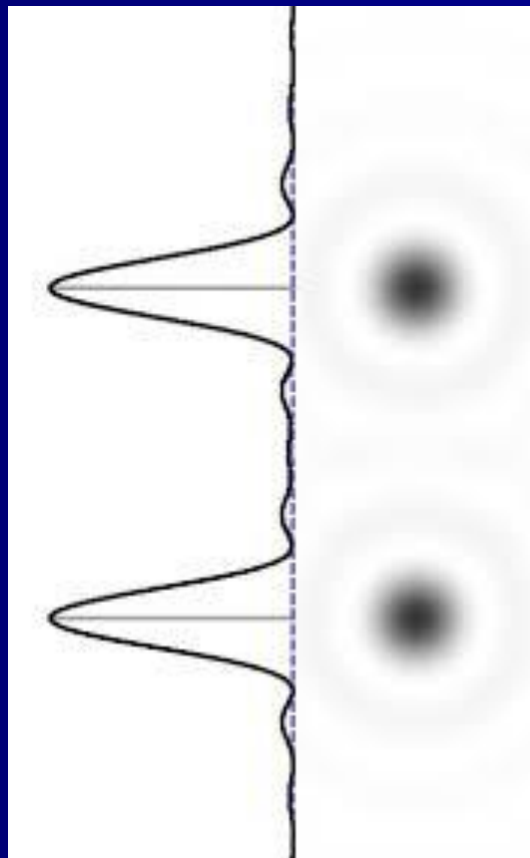
$$\text{ακτίνα} = 1.22 (f \lambda / d ), \text{ όπου :}$$

f : εστιακή απόσταση

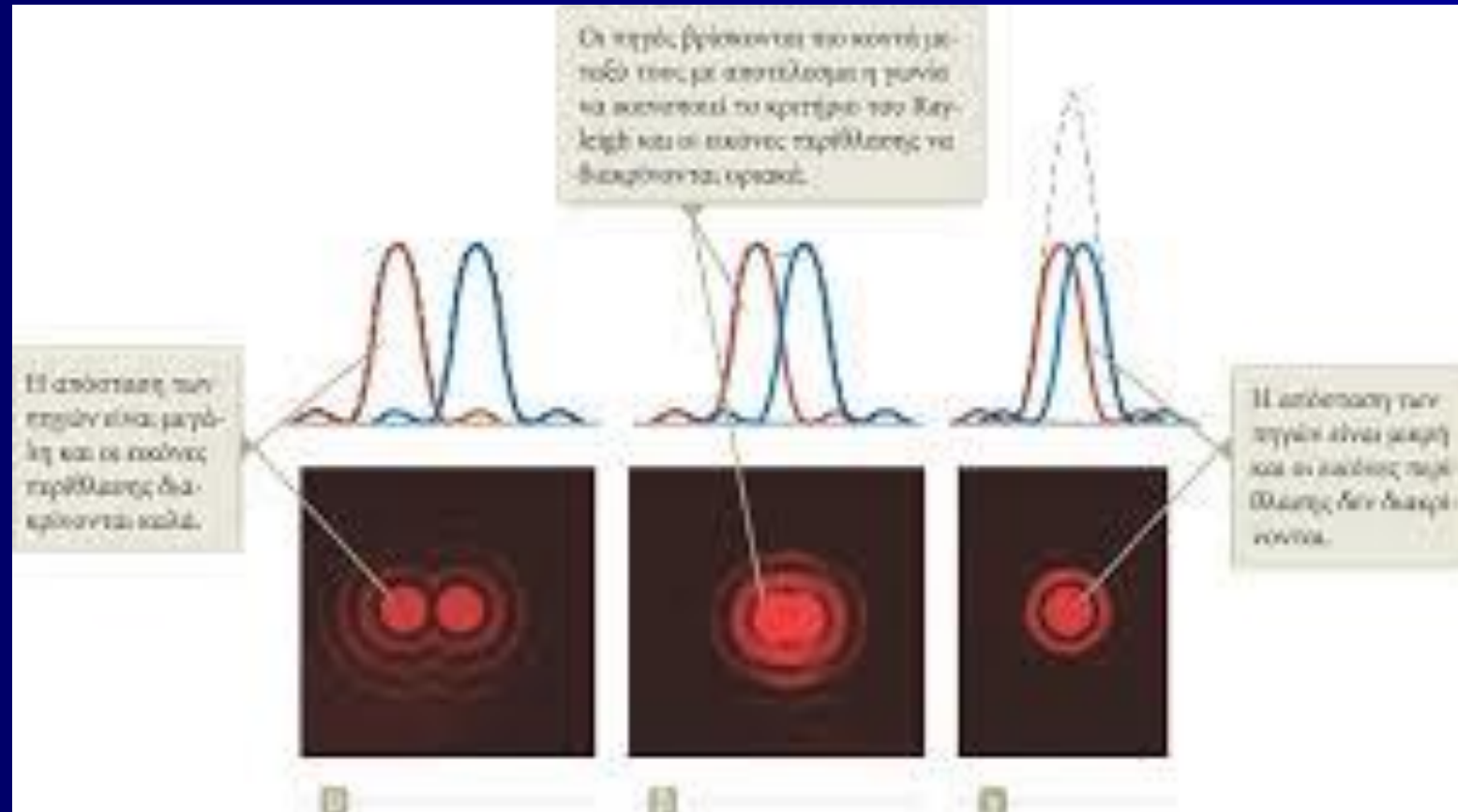
λ : μήκος κύματος φωτός και

d : διάμετρος ανοίγματος

# Περίθλαση, Δίσκοι του Airy



# Συνθήκη Rayleigh



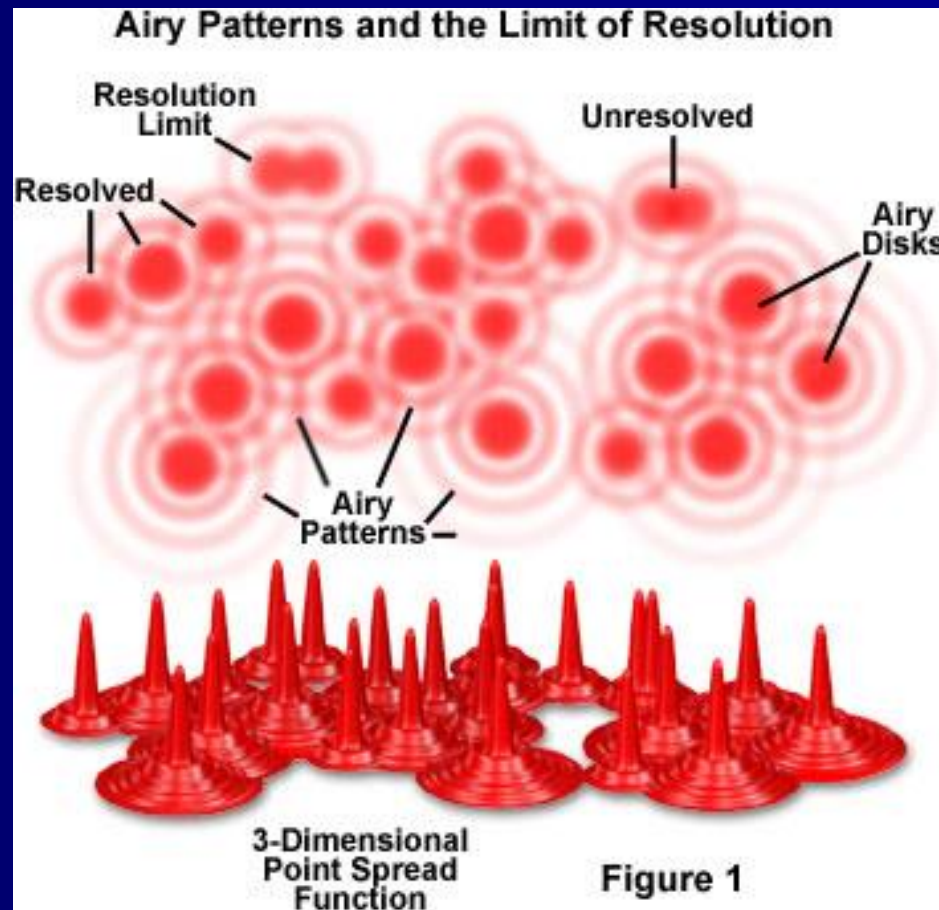
# Κριτήριο Rayleigh

- Για την παρατήρηση δυο γειτονικών σημείων σαν ξεχωριστά θα πρέπει να ισχύει :  
η γωνία οράσεως  $> 1.22 (\lambda / d)$ , όπου

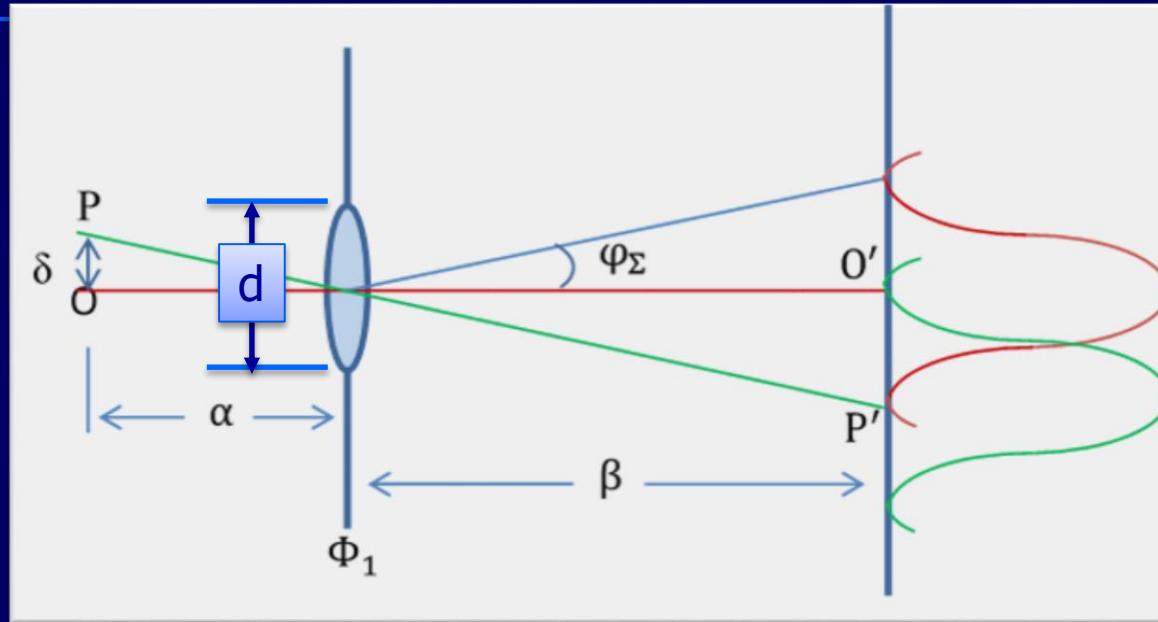
$\lambda$  : μήκος κύματος φωτός και

$d$  : διάμετρος ανοίγματος

# Δίσκοι Airy – Διακριτικό όριο



# Διακριτικό όριο ανθρώπινου οφθαλμού



$$\begin{aligned}d &= 2 \text{ mm} \\f = \beta &= 20 \text{ mm} \\ \lambda &= 500 \text{ nm}\end{aligned}$$

$$O'P' = 1.22 \cdot \frac{550 \text{ nm} \cdot 20 \text{ mm}}{2 \text{ mm}} = 6.7 \mu\text{m}$$

$$\Delta\varphi_{min} = 1.22 \cdot \frac{550 \text{ nm}}{2 \text{ mm}} \cong 0.3 \text{ mrad}$$

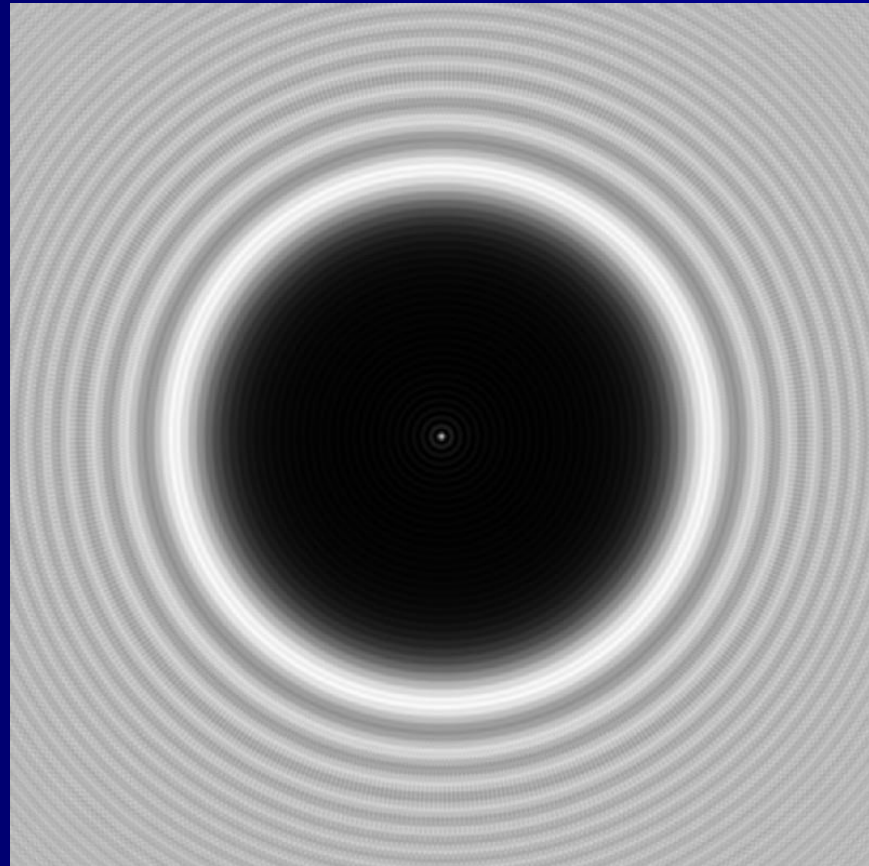
Μέση απόσταση φωτοκυττάρων στον αμφιβληστροειδή  $\sim 2\text{-}3\mu\text{m}$



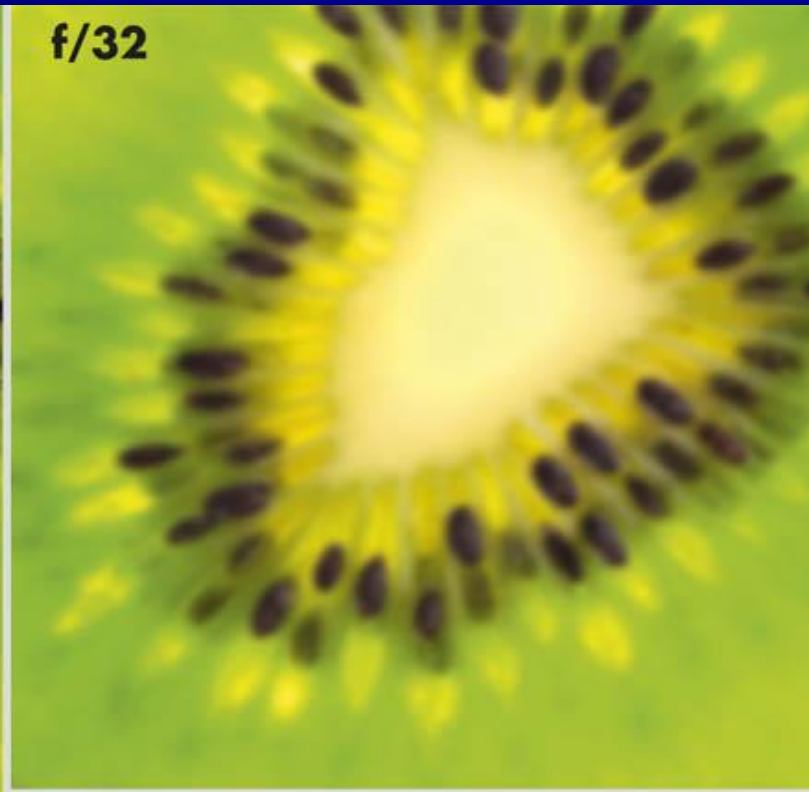
# Ζωγράφοι, έγχρωμες κουκίδες



# Poisson/Arago spot (1820)



# 'Ανοιγμα - Resolution



# Συμβολή – Περίθλαση (διαφορές)

- Δυο φωτεινές πηγές.
- Μέγιστα με ίδιες εντάσεις.
- Μεγάλος αριθμός κροσσών.
- Καλό contrast.
- Διάσταση κροσσών σχεδόν σταθερή.
- Αρκεί και μια πηγή.
- Μεταβλητές εντάσεις.
- Μικρός αριθμός κροσσών.
- Μέτριο contrast.
- Κροσσοί με μεταβλητό μέγεθος.

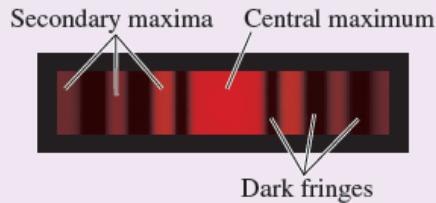


## Diffraction from a single slit

A single slit of width  $a$  has a bright **central maximum** of width

$$w = \frac{2\lambda L}{a}$$

that is flanked by weaker **secondary maxima**.



Dark fringes are located at angles such that

$$a \sin \theta_p = p\lambda \quad p = 1, 2, 3, \dots$$

If  $\lambda/a \ll 1$ , then from the small-angle approximation,

$$\theta_p = \frac{p\lambda}{a} \quad y_p = \frac{p\lambda L}{a}$$

## Circular aperture of diameter $D$

A bright central maximum of diameter

$$w = \frac{2.44\lambda L}{D}$$



is surrounded by circular secondary maxima.

The first dark fringe is located at

$$\theta_1 = \frac{1.22\lambda}{D} \quad y_1 = \frac{1.22\lambda L}{D}$$

For an aperture of any shape, a smaller opening causes a greater spreading of the wave behind the opening.

## Interference from multiple slits

Waves overlap as they spread out behind slits. Bright fringes are seen on the viewing screen at positions where the path-length difference  $\Delta r$  between successive slits is equal to  $m\lambda$ , where  $m$  is an integer.

### Double slit with separation $d$



Equally spaced bright fringes are located at

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d} \quad y_m = \frac{m\lambda L}{d} \quad m = 0, 1, 2, \dots$$

The fringe spacing is  $\Delta y = \frac{\lambda L}{d}$

### Diffraction grating with slit spacing $d$



Very bright and narrow fringes are located at angles and positions

$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d} \quad y_m = L \tan \theta_m$$

## Thin-film interference

Interference occurs between the waves reflected from the two surfaces of a thin film with index of refraction  $n$ . A wave that reflects from a surface at which the index of refraction increases has a phase change.

Interference	0 or 2 phase changes	1 phase change
Constructive	$2t = m\frac{\lambda}{n}$	$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{n}$
Destructive	$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{n}$	$2t = m\frac{\lambda}{n}$

## Double-slit interference

Wavelength (m)  $\lambda$       Distance between slits (m)  $d$

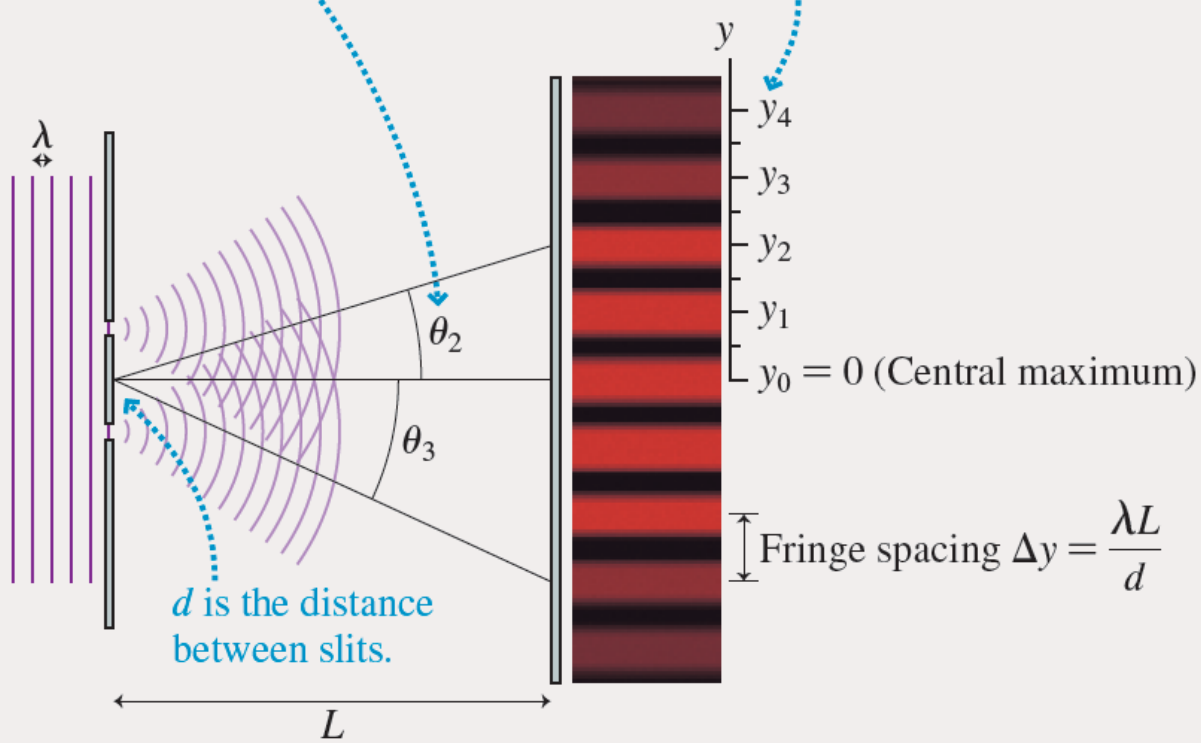
$$\sin\theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

Distance to screen (m)  $L$

$$y_m = \frac{m\lambda L}{d}$$

$\theta_m$  is the angle of the  $m$ th bright fringe.

$y_m$  is the position of the  $m$ th bright fringe.



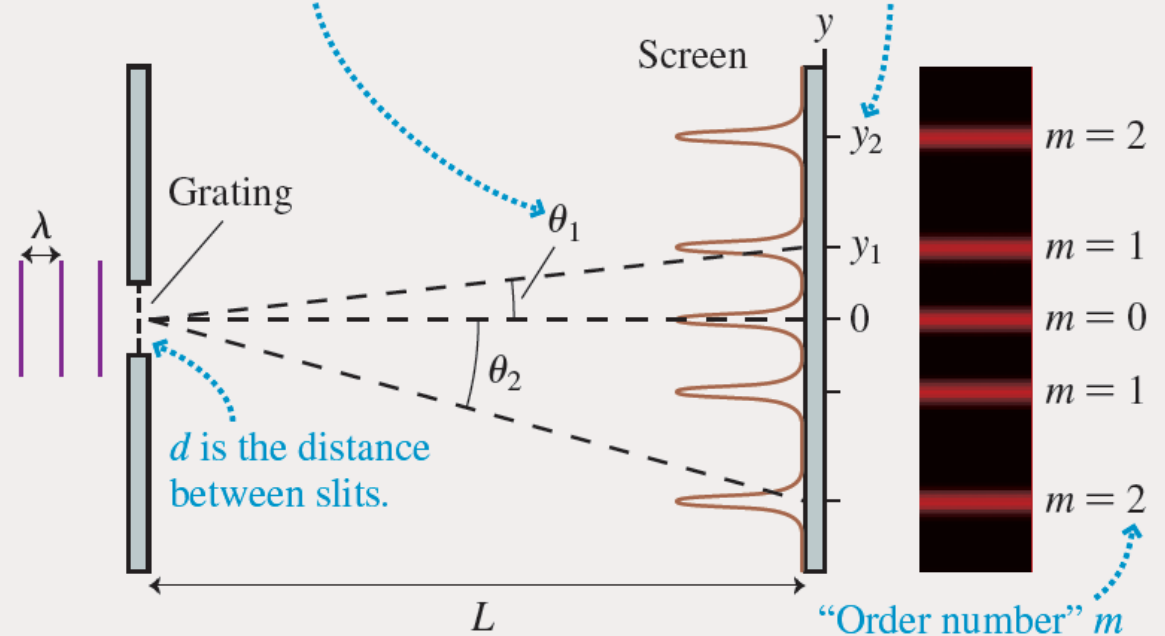
## Diffraction gratings

$$\sin\theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

$$y_m = L \tan\theta_m$$

$\theta_m$  is the angle of the  $m$ th bright fringe.

$y_m$  is the position of the  $m$ th bright fringe.



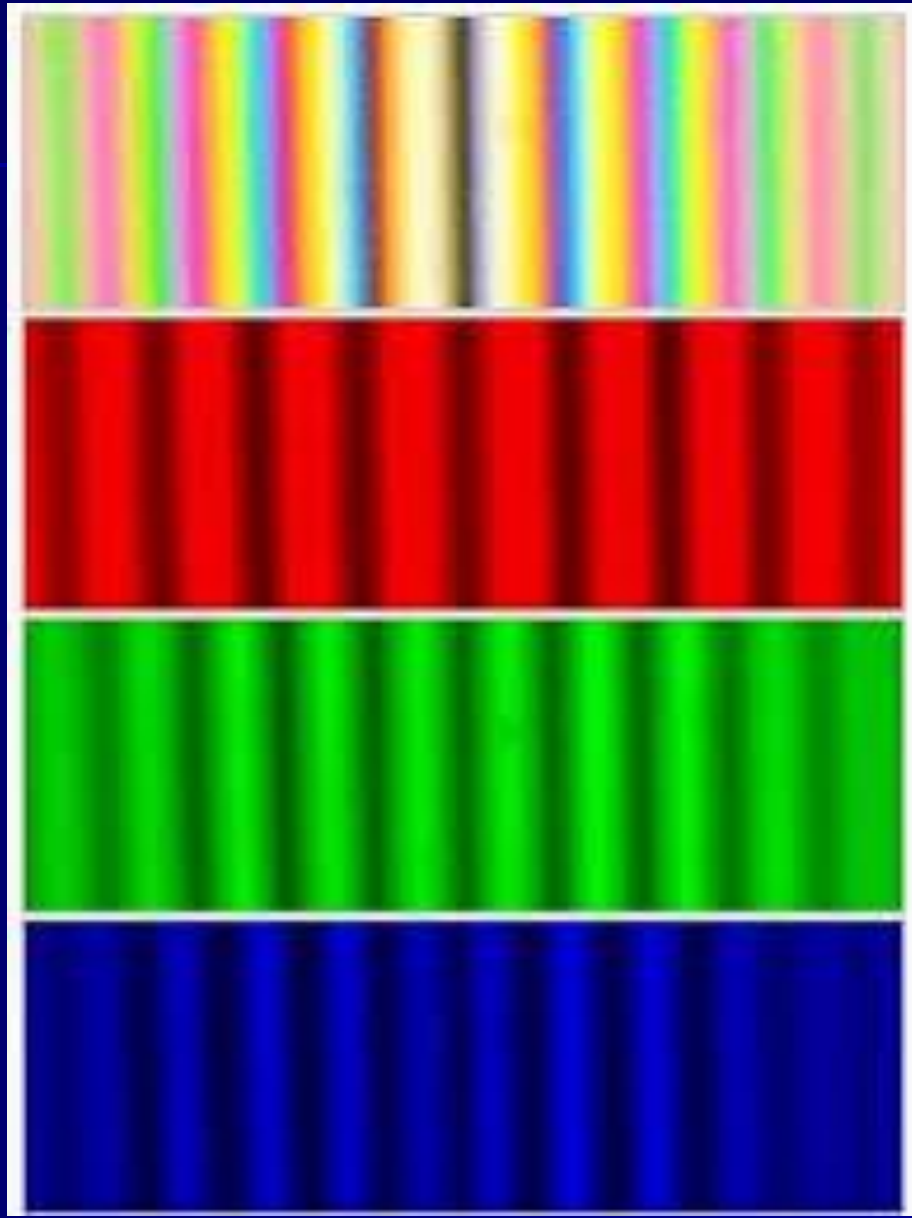
A grating with  $N$  slits or lines per mm has slit spacing  $d = (1 \text{ mm})/N$ .

# Συμβολή, Περίθλαση - Ερωτήσεις

- Στο πείραμα Young αν οι δυο σχισμές φωτίζονταν με κόκκινο φως οι κροσσοί θα ήταν πυκνότεροι ή αραιότεροι από ότι εάν ο φωτισμός της ίδιας διάταξης γινόταν με μπλε φως ;
- Στο πείραμα Young χρησιμοποιείται λευκό φως τι ακριβώς θα παρατηρηθεί στο τελικό πέτασμα ;



# Πείραμα Young



# Συμβολή, Περίθλαση - Ερωτήσεις

- Τι συμβαίνει στο πείραμα Young όταν οι δυο σχισμές απομακρύνονται μεταξύ τους ; Πως μεταβάλλονται οι κροσσοί ;
- Το μπλε φως προκαλεί μικρότερη ή μεγαλύτερη περίθλαση από κάθε άλλο ορατό φως ;
- Ο ήχος υφίσταται το φαινόμενο της περίθλασης ή όχι ; της συμβολής ;

# Συμβολή, Περίθλαση - Ερωτήσεις

- Γιατί σε συνηθισμένο γυαλί δεν παρουσιάζονται χρώματα από συμβολή ;
- Ποιος ο λόγος που οι συνηθισμένες φωτεινές πηγές δεν παρουσιάζουν φαινόμενα περίθλασης ;
- Έστω ότι το πείραμα Young συμβαίνει μέσα στο νερό, τι παρατηρείτε ;

# Συμβολή, Περίθλαση - Ερωτήσεις

- Τι χρώμα εμφανίζεται να έχει η επιφάνεια σαπουνόφουσκας όταν φωτίζεται με λευκό φως και το πάχος του στρώματος εξουδετερώνει το πράσινο φως ;
- Στις σκοτεινές περιοχές της συμβολής τι γίνεται με την ενέργεια ; Πως κατανέμεται ;
- Πού μπορεί να οφείλεται το μωβ χρώμα φακού με αντανακλαστική επίστρωση ; Οι φωτογραφίες που λαμβάνονται με τέτοιο φακό θα έχουν άραγε μωβ απόχρωση;

Ευχαριστώ πολύ  
για  
την προσοχή σας