



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Ηλεκτρονική Μικροσκοπία

Β. Μπίνας, Γ. Κυριακίδης
Τμήμα Φυσικής



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Άδειες Χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται στην άδεια χρήσης Creative Commons και ειδικότερα

Αναφορά – Μη εμπορική Χρήση – Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 Ελλάδα
(Attribution – Non Commercial – Non-derivatives 4.0 Greece)



CC BY-NC-ND 4.0 GR

[ή επιλογή ενός άλλου από τους έξι συνδυασμούς]

[και αντικατάσταση λογότυπου άδειας όπου αυτό έχει μπει (σελ. 1, σελ. 2 και τελευταία)]

- Εξαιρείται από την ως άνω άδεια υλικό που περιλαμβάνεται στις διαφάνειες του μαθήματος, και υπόκειται σε άλλου τύπου άδεια χρήσης. Η άδεια χρήσης στην οποία υπόκειται το υλικό αυτό αναφέρεται ρητώς.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ



ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΑ

ΔΡ. ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΜΠΙΝΑΣ

*Post Doc Researcher, Chemist
Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης
Email: binasbill@iesl.forth.gr
Thl. 1269*

Crete Center for Quantum Complexity and
Nanotechnology
Department of Physics, University of Crete

Transparent Conductive Materials (Head prof. G. Kiriakidis)
Institute of Electronic Structure & Laser – IESL
Foundation for Research and Technology - FORTH



Το Η.Μ. ακολουθεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας με το Ο.Μ. με την μόνη διαφορά ότι οι φακοί είναι ηλεκτρομαγνητικοί.

Βασικές Αρχές Θεωρίας του Φωτός

- **Γεωμετρική Οπτική:** εξετάζει την πορεία του φωτός σαν ακτίνα μέσα από φακούς και υπολογίζει την *θέση*, το *είδος* και το *μέγεθος* του ειδώλου και του αντικειμένου
- **Φυσική Οπτική:** εξετάζει και ερμηνεύει φαινόμενα όπως η *συμβολή* και *περίθλαση*.



Το Η.Μ. ακολουθεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας με το Ο.Μ. με την μόνη διαφορά ότι οι φακοί είναι ηλεκτρομαγνητικοί.

Βασικές Αρχές Θεωρίας του Φωτός

- **Γεωμετρική Οπτική:** εξετάζει την πορεία του φωτός σαν ακτίνα μέσα από φακούς και υπολογίζει την *θέση*, το *είδος* και το *μέγεθος* του ειδώλου και του αντικειμένου
- **Φυσική Οπτική:** εξετάζει και ερμηνεύει φαινόμενα όπως η *συμβολή* και *περίθλαση*.



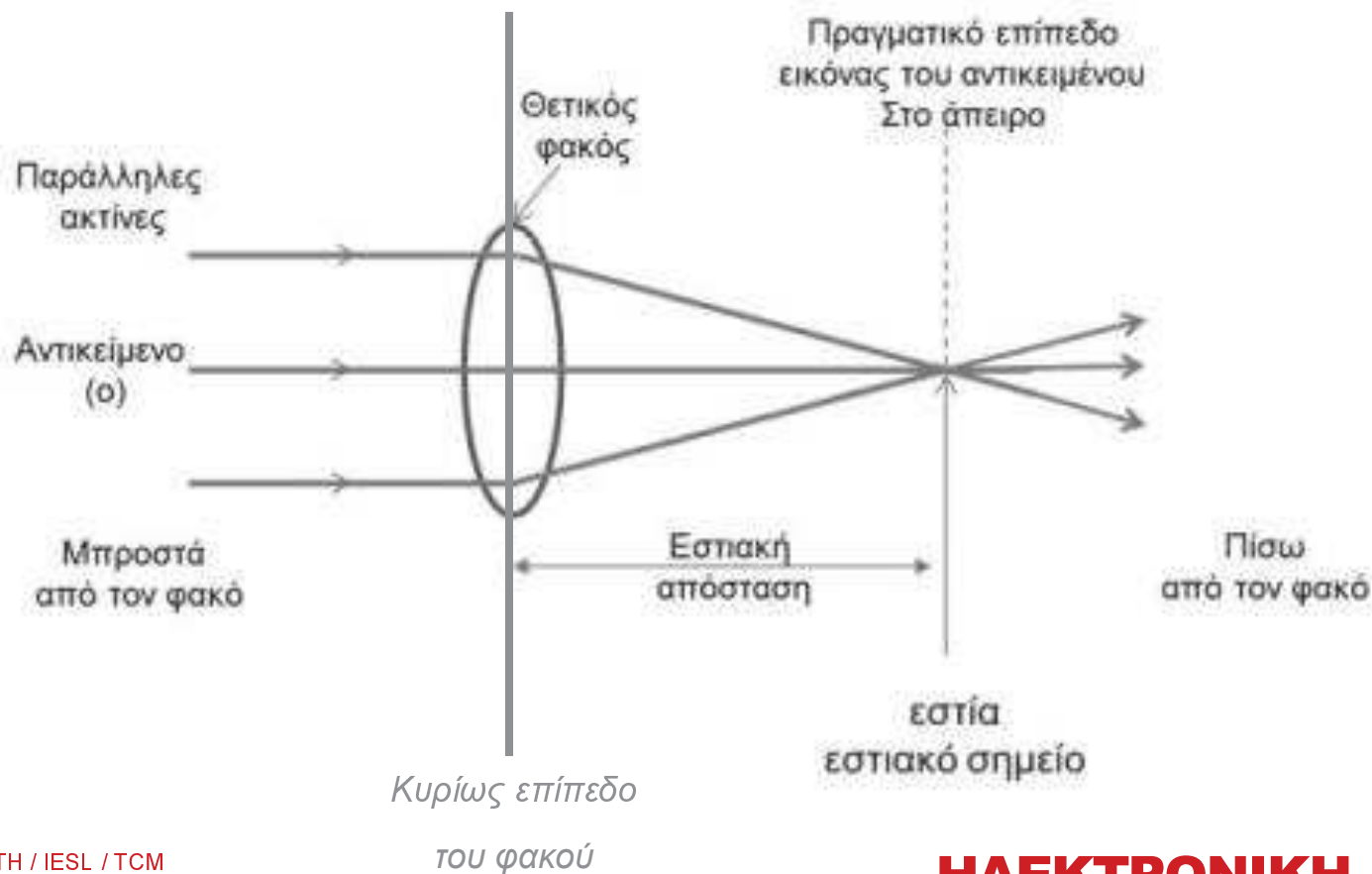
Το Η.Μ. ακολουθεί τις ίδιες αρχές λειτουργίας με το Ο.Μ. με την μόνη διαφορά ότι οι φακοί είναι ηλεκτρομαγνητικοί.

Βασικές Αρχές Θεωρίας του Φωτός

- **Γεωμετρική Οπτική:** εξετάζει την πορεία του φωτός σαν ακτίνα μέσα από φακούς και υπολογίζει την θέση, το είδος και το μέγεθος του ειδώλου και του αντικειμένου
- **Φυσική Οπτική:** εξετάζει και ερμηνεύει φαινόμενα όπως η συμβολή και περίθλαση.

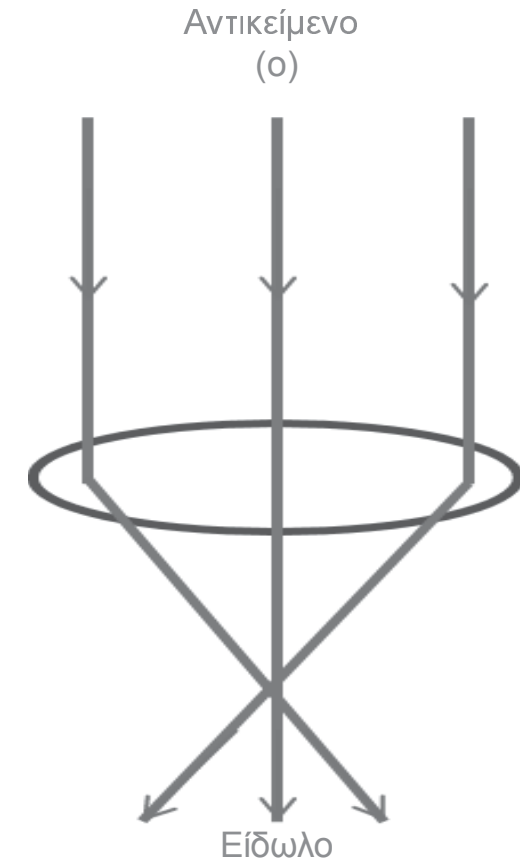
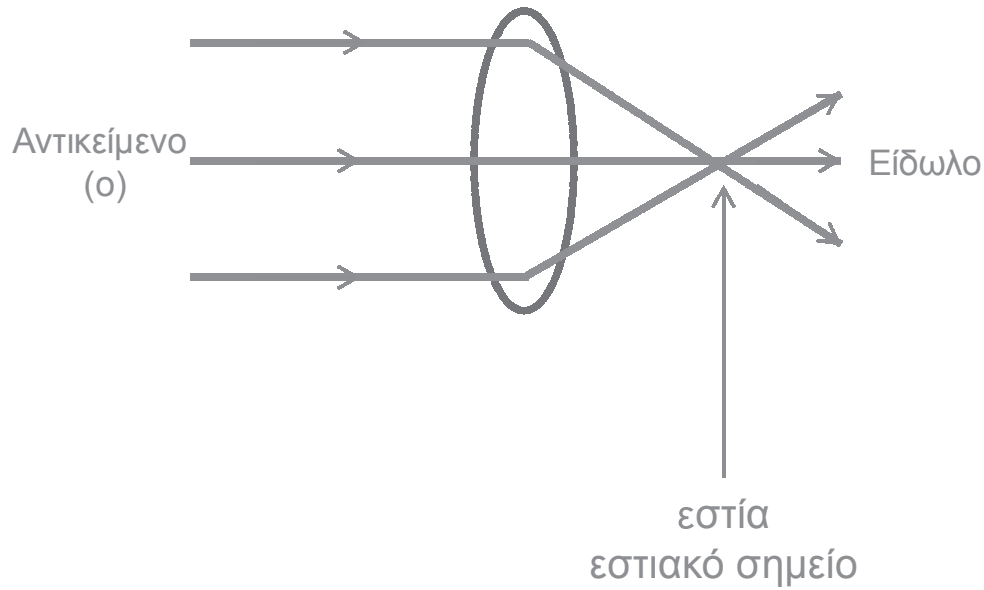


Με την ΓΟ μπορούμε να σχηματίσουμε μία ικανοποιητική εικόνα του πώς δουλεύουν οι φακοί και τα μικροσκόπια, απλώς ακολουθώντας της γεωμετρικές διαδρομές των οπτικών ακτίνων ή των ακτίνων (δέσμης) ηλεκτρονίων.

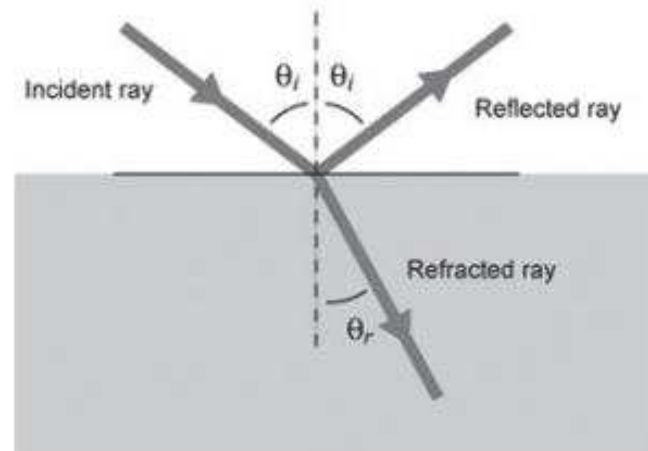




Διαδρομή Ακτίνων



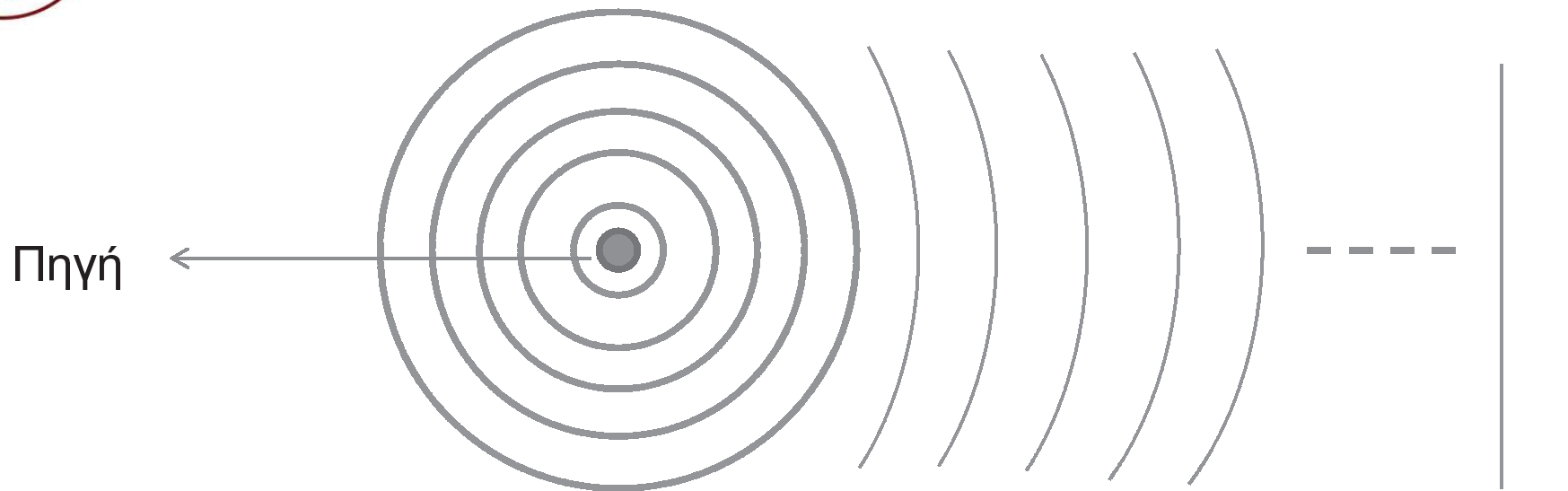
Εκτροπές Ακτίνων





Η Γεωμετρική Οπτική **δεν** απαντά σε ερωτήματα όπως:

- Γιατί η $\Delta.I.$ του μικροσκοπίου στην ουσία **περιορίζεται** στο $\frac{1}{2}$ του μήκους κύματος της χρησιμοποιούμενης ακτινοβολίας?
- Γιατί το φώς **δεν διαδίδεται** σε ευθεία γραμμή??
- Που οφείλονται ορισμένα ιδιόμορφα φαινόμενα όπως ο **σχηματισμός κροσσών** ?
(π.χ. στα Η.Μ. τα αντικείμενα περιβάλλονται από ‘**φωτοστέφανα**’ που είναι ευρύτερα γνωστά σαν “**κροσσοί Fresnel**”)

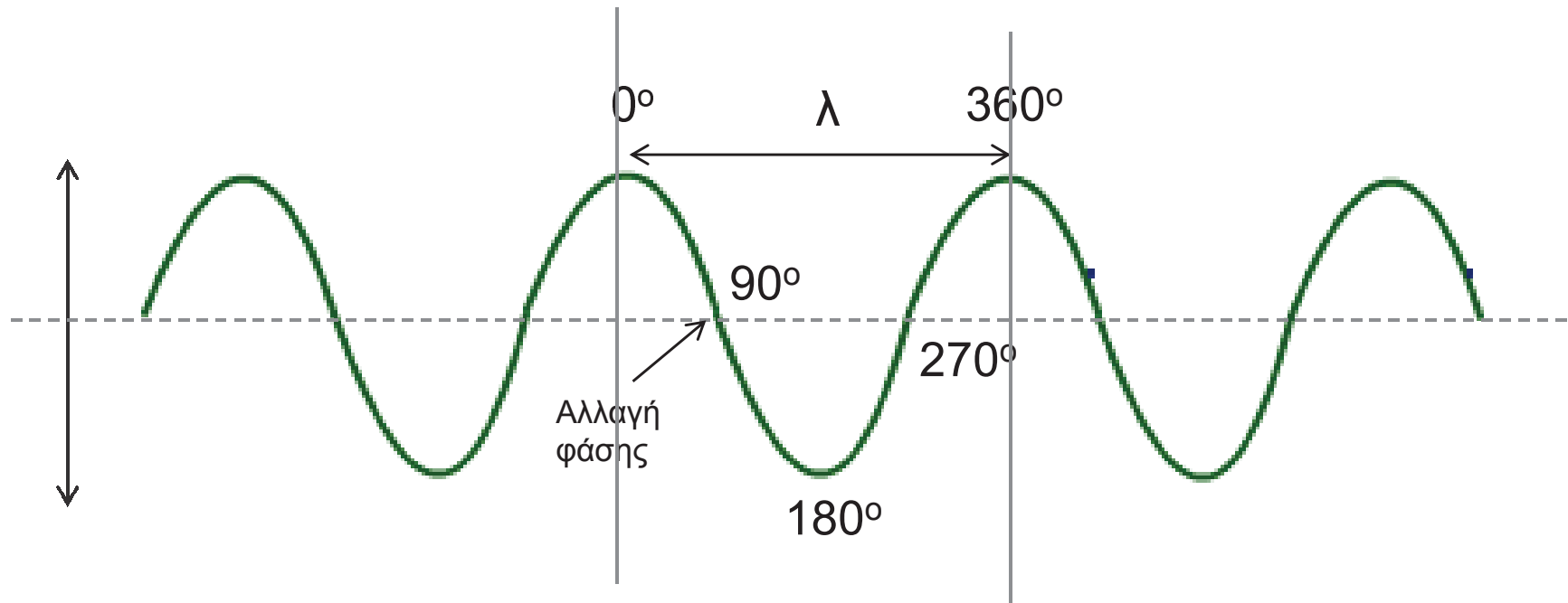


- Τα κύματα διαδίδονται σφαιρικά στον χώρο
- Τομή σφαιρικών κυμάτων είναι κύκλοι με όλο και αυξανόμενη ακτίνα
- Τμήματα των κύκλων (**τομές κύκλου**) σε πολύ μεγάλη απόσταση από την πηγή είναι σχεδόν **επίπεδα**



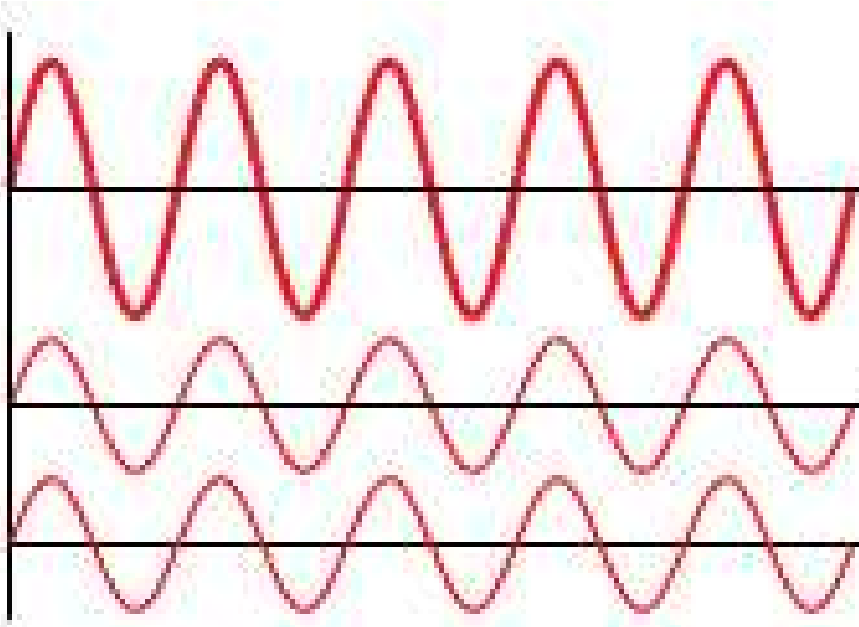
Κάτοψη των κυμάτων οδηγεί σε ένα ημιτονοειδές κύμα διάδοσης το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί από

- Μήκος κύματος, λ
- Πλάτος του κύματος
- Χρόνος ή φάση



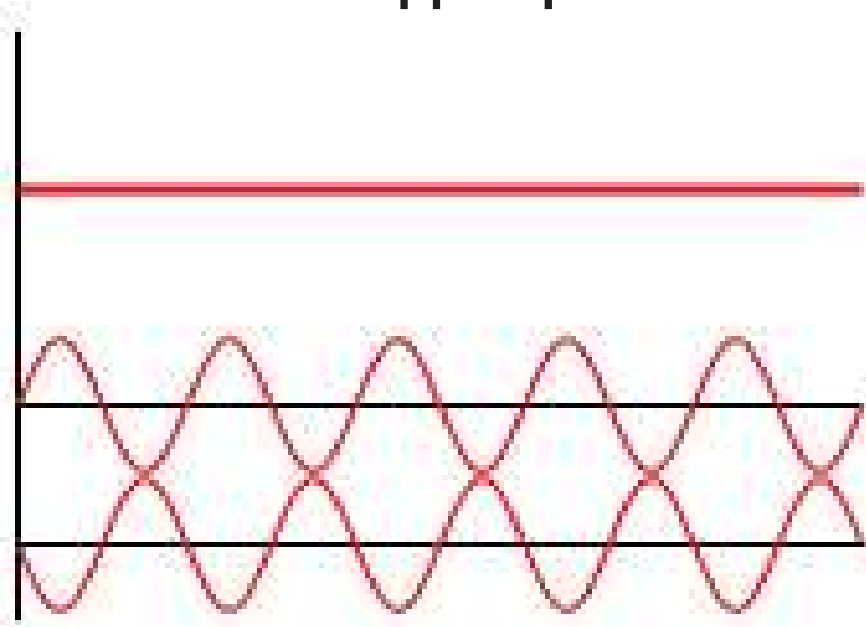


Ενισχυτική συμβολή



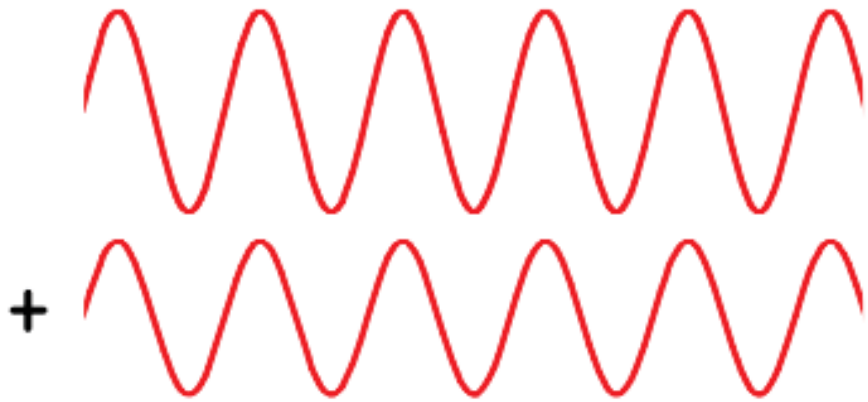
διαφορά φάσης των δυο κυμάτων είναι **ακέραιο πολλαπλάσιο του 2π** , $\varphi=0$

Ακυρωτική ή Καταστρεπτική συμβολή

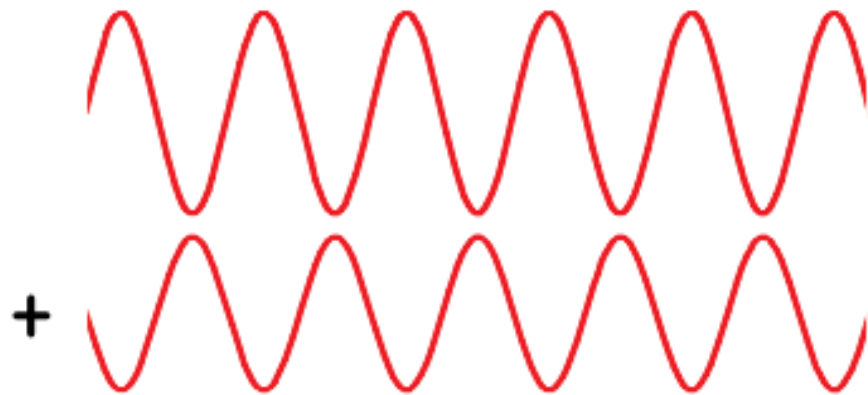
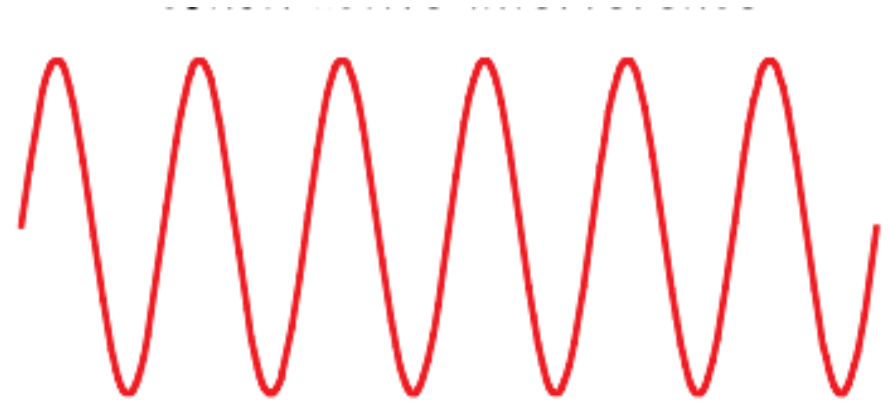


η διαφορά φάσης των δυο κυμάτων είναι **περιττό πολλαπλάσιο της γωνίας π** , $0 < \varphi < 180$

Φάση είναι η χρονική καθυστέρηση του ενός κύματος σε σχέση με το άλλο και μπορεί να εκφραστεί σε μονάδες χρόνου ή μήκους κύματος ή συνηθέστερα σε μονάδες γωνίας (μοίρες).



=



=

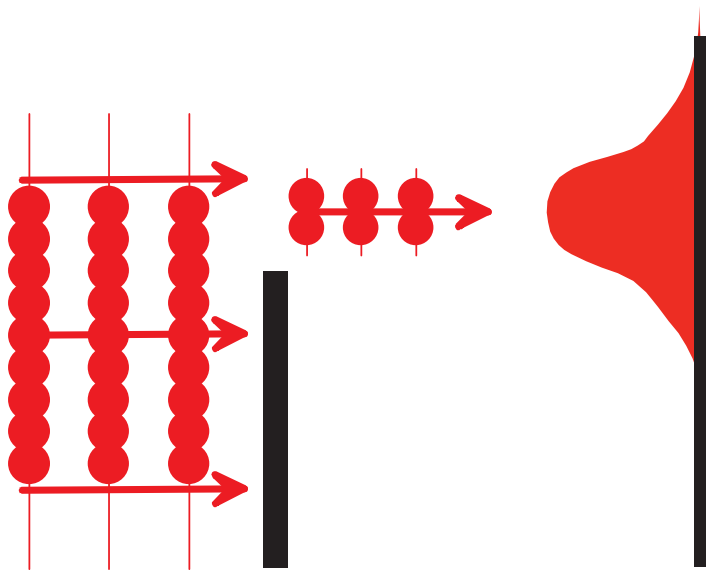
destructive interference





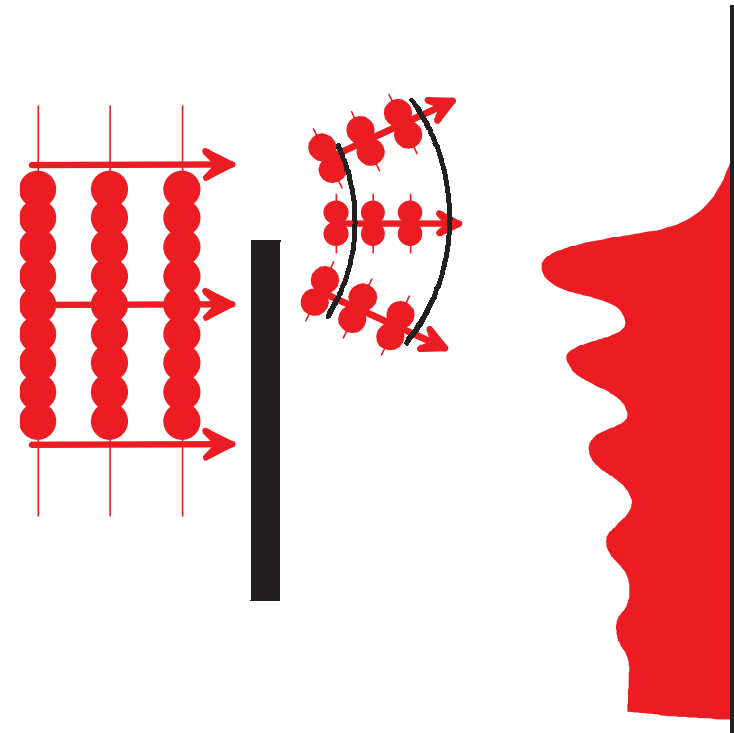
Η ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Σωματίδια

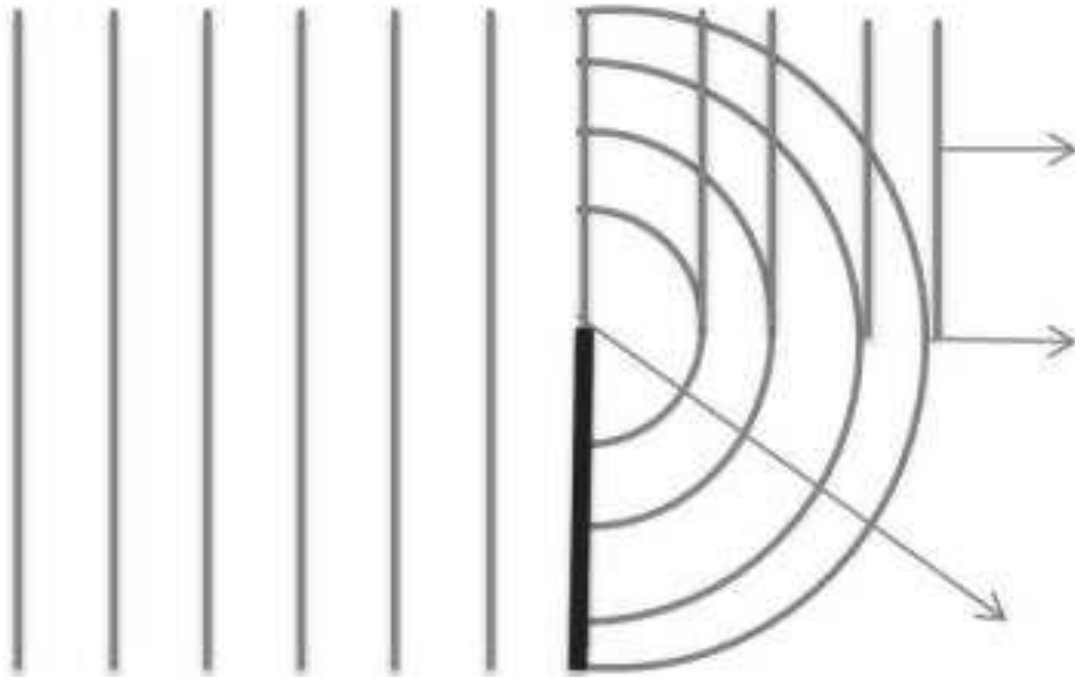


δεν αποκλίνουν όταν συναντήσουν εμπόδιο

Κύματα

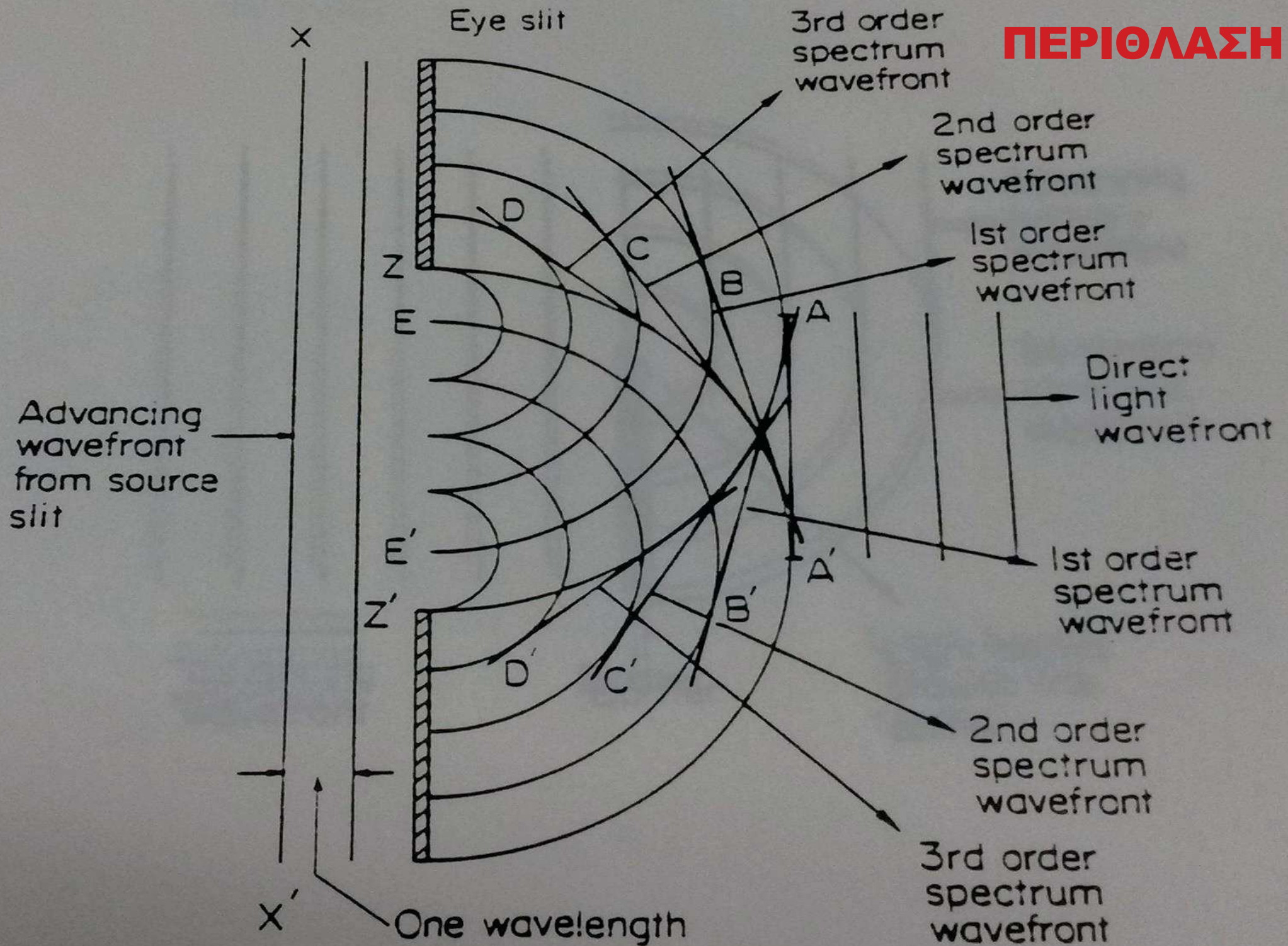


- αποκλίνουν γύρω από εμπόδιο.
- Αρχή Huygens / Αρχή Γραμμικής Επαλληλίας



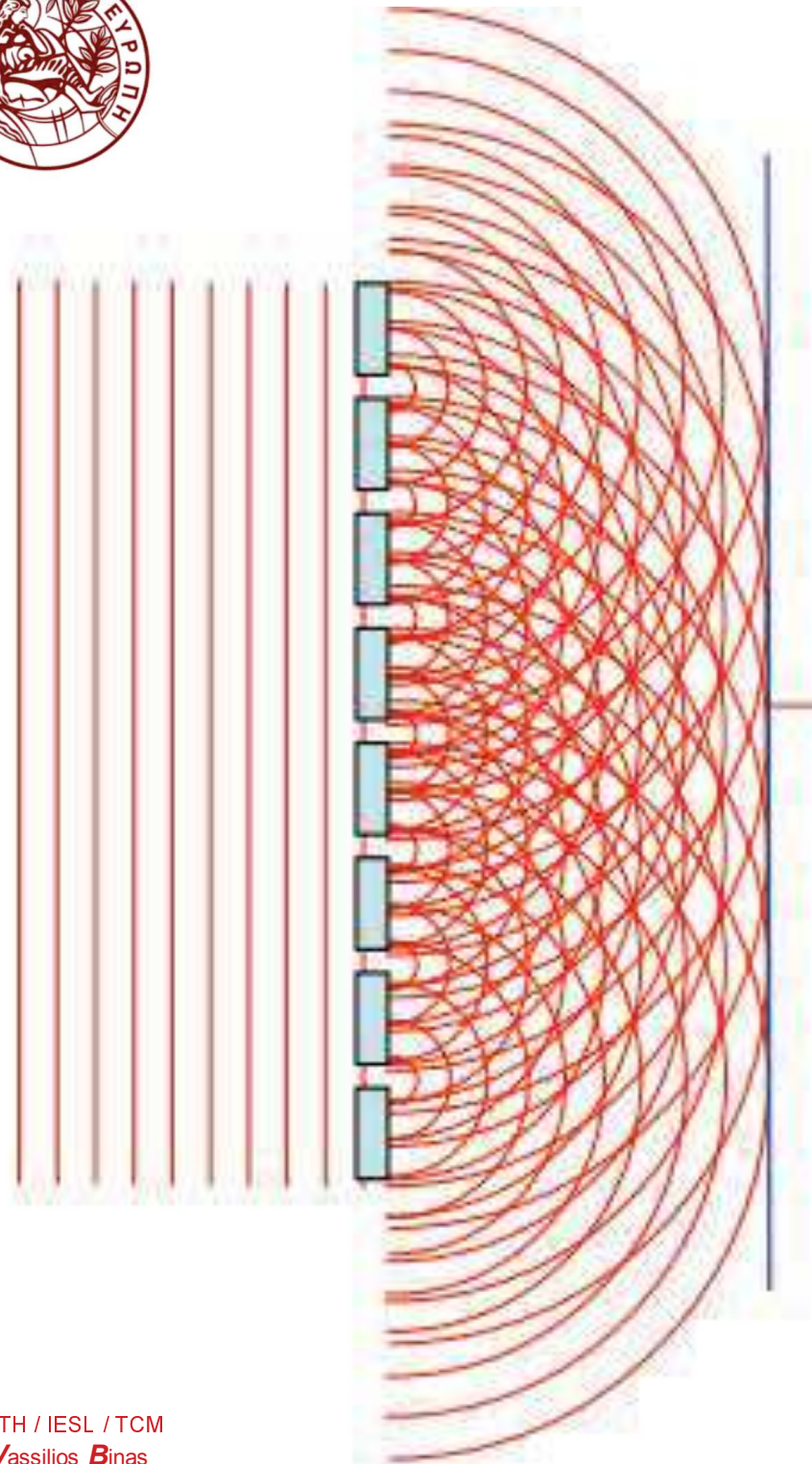
Αρχή Huygens

Επίπεδο κύμα προσπίπτει σε πέτασμα, μέρος του κύματος συνεχίζει να διαδίδεται ευθύγραμμα, και η **άκρη του πετάσματος αποτελεί μια νέα πηγή** φωτός και το κύμα διαδίδεται κυκλικά με κέντρο την άκρη του πετάσματος





ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

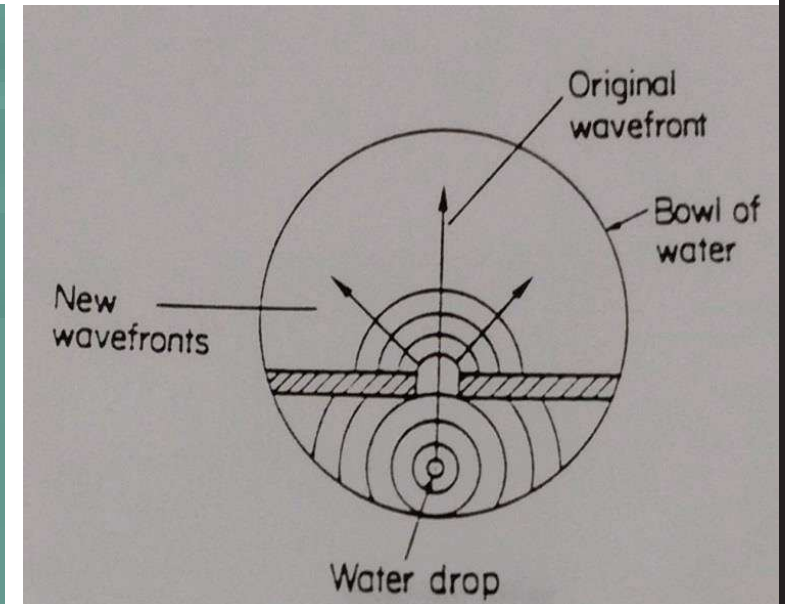
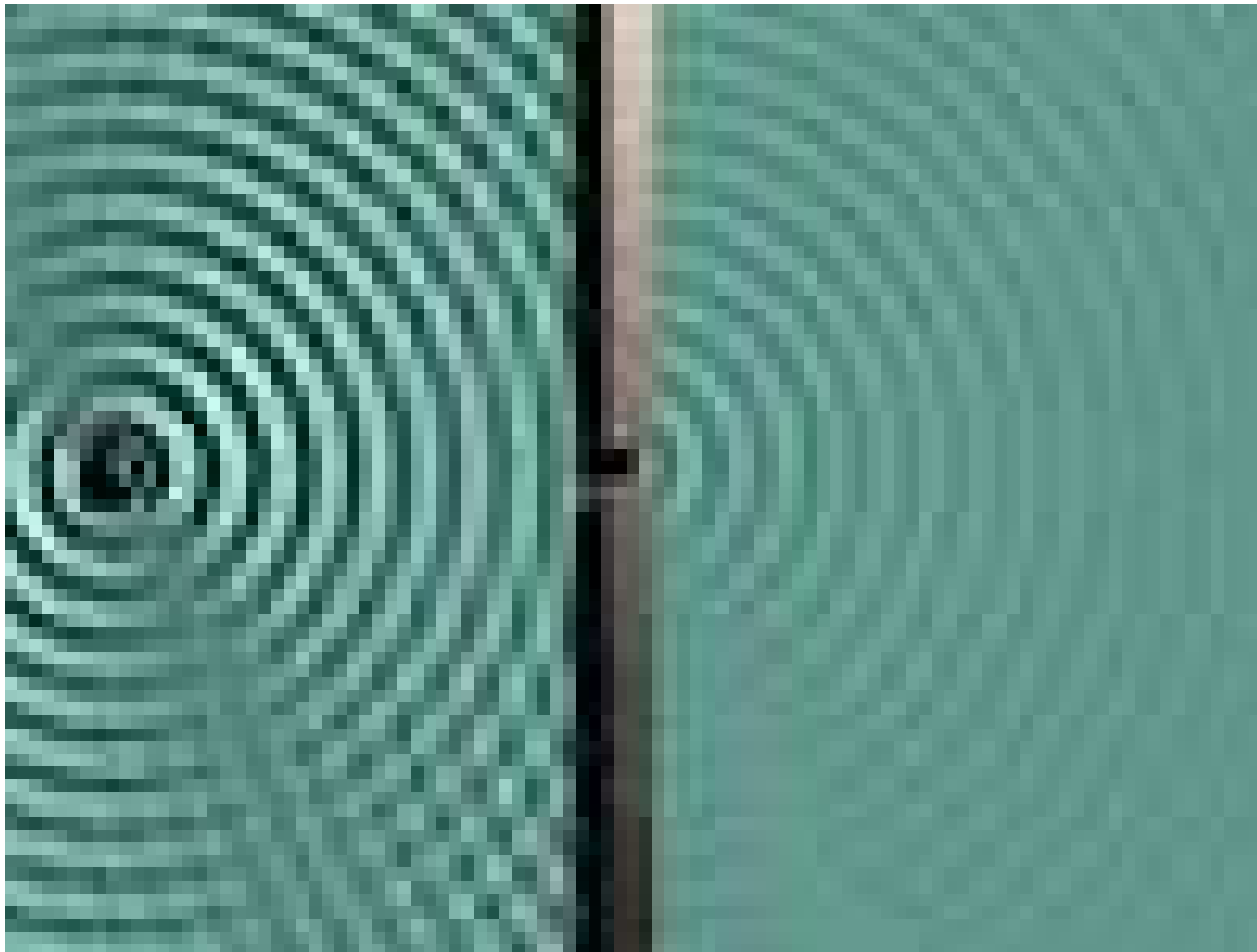


- Κάθε σημείο μετώπου κύματος συμπεριφέρεται σαν πηγή ενός δευτερεύοντος σφαιρικού κύματος (ταχύτητα και συχνότητα ίδια με το πρωτεύον)
- Επακόλουθο του φαινομένου είναι η φαινομενική αλλοίωση του ειδώλου μετά την σχισμή με την εμφάνιση δευτερογενών, τριτογενών κλπ ειδώλων εκατέρωθεν του κεντρικού λόγω συμβολής

*Μεγαλύτερο διάφραγμα και μικρό
μήκος κύματος*

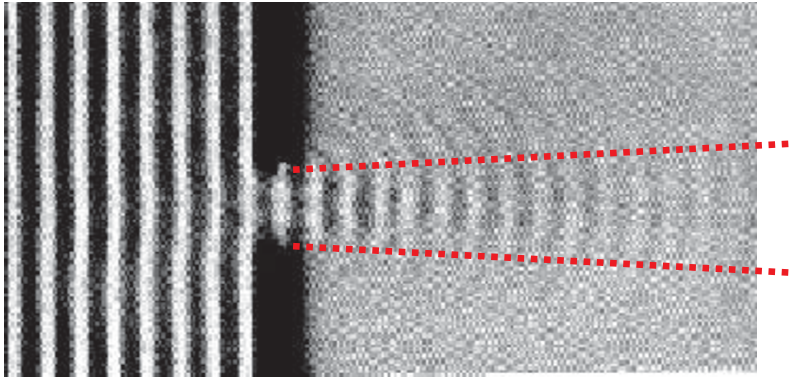


Περίθλαση κυμάτων στην επιφάνεια νερού καθώς αυτά περνούν από στενή σχισμή



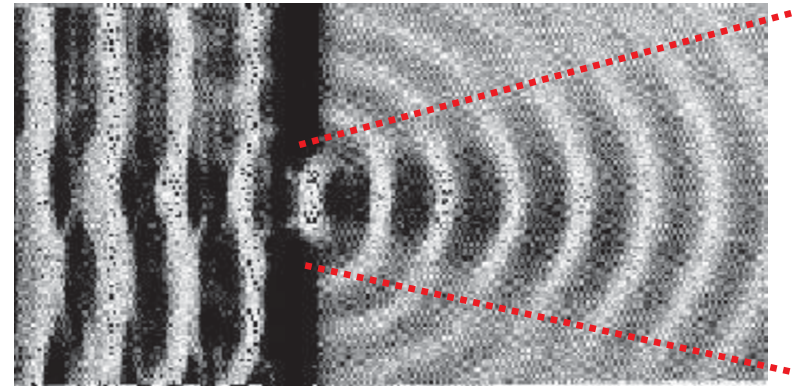
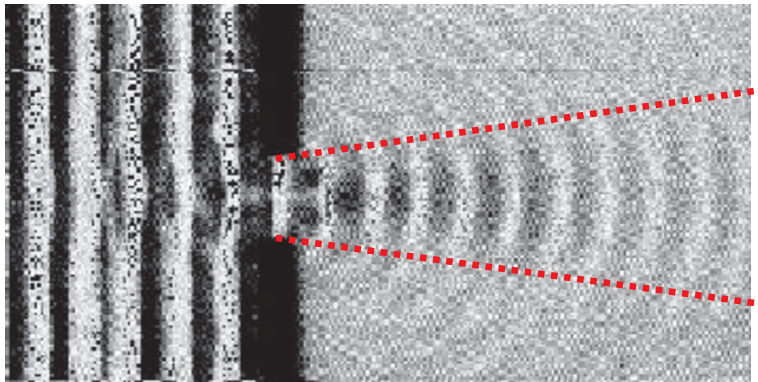


Επίδραση διαφράγματος στην διάδοση των κυμάτων



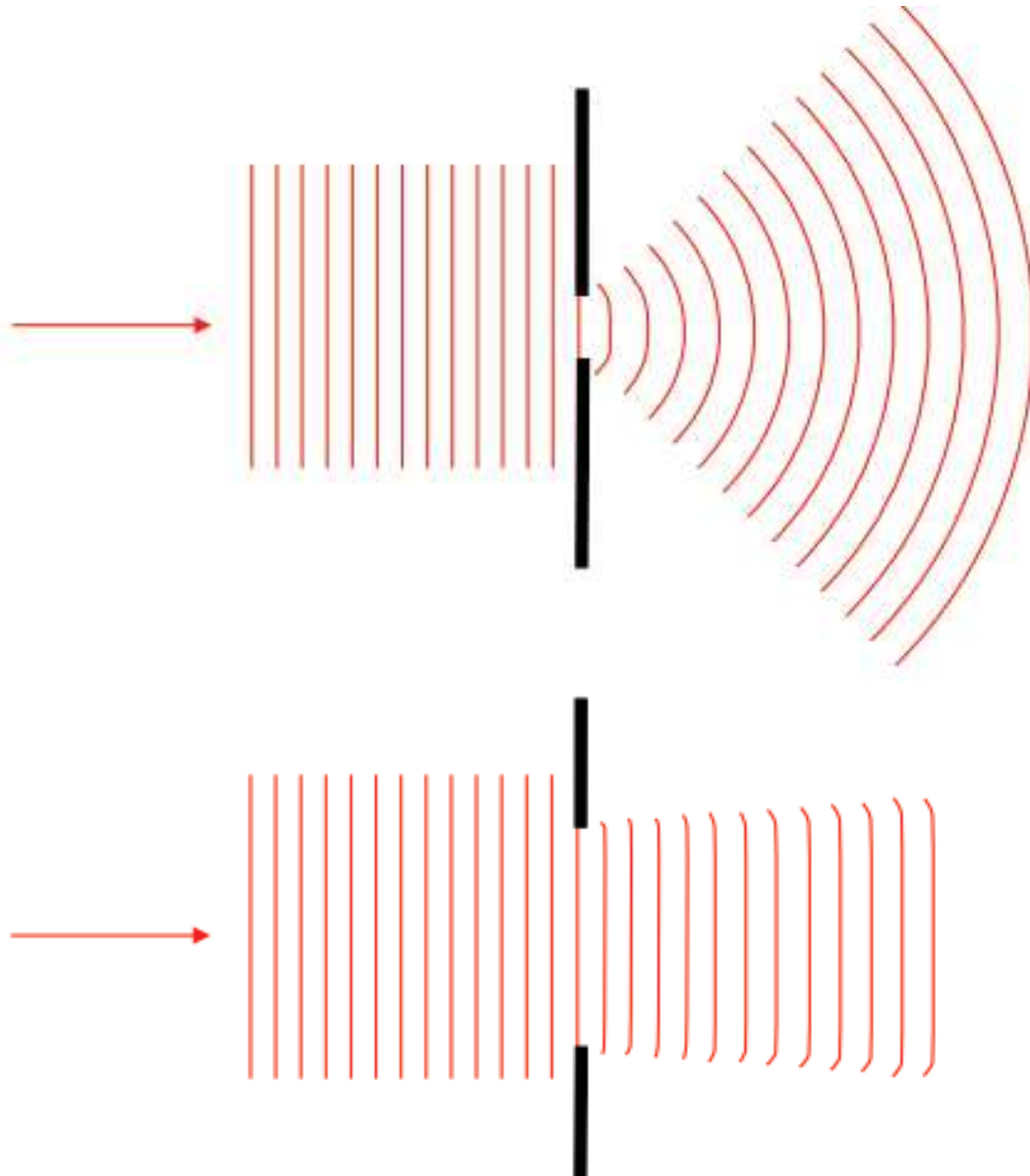
Η «απόκλιση» εξαρτάται από

- ✓ Μήκος κύματος
- ✓ Μέγεθος ανοίγματος





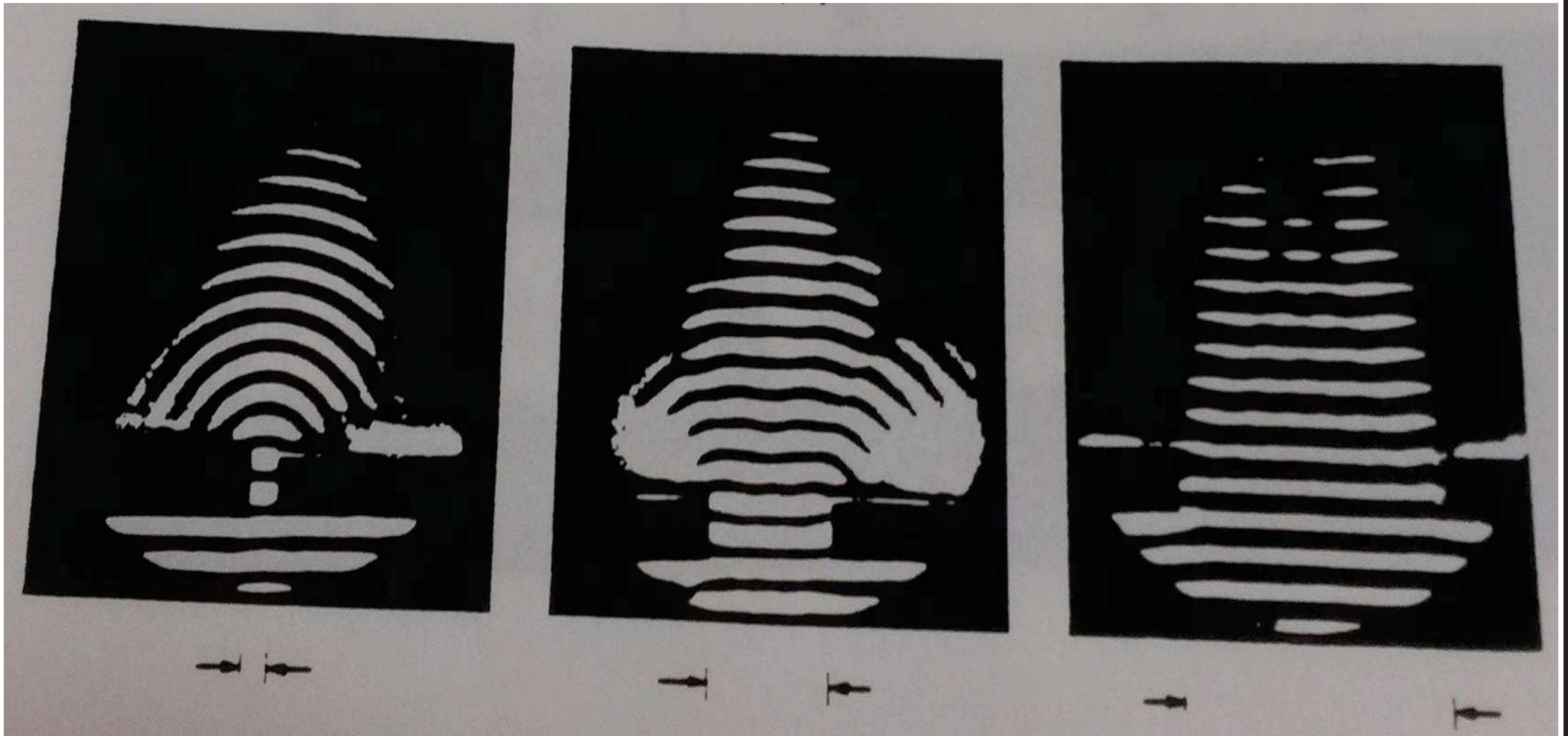
Επίδραση διαφράγματος στην διάδοση των κυμάτων



Larger aperture
⇔
weaker diffraction



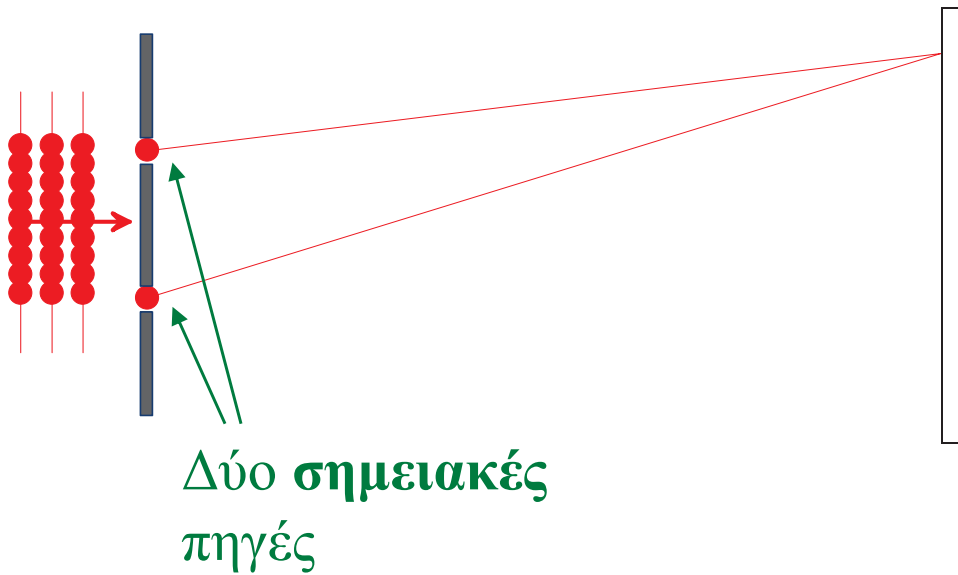
Επίδραση διαφράγματος στην διάδοση των κυμάτων





ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΜΒΟΛΗΣ - ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ

Συμβολή



Σε κάθε σημείο παρατήρησης γίνεται γραμμική άθροιση ηλεκτρικών πεδίων από τις δύο σημειακές 'πηγές'

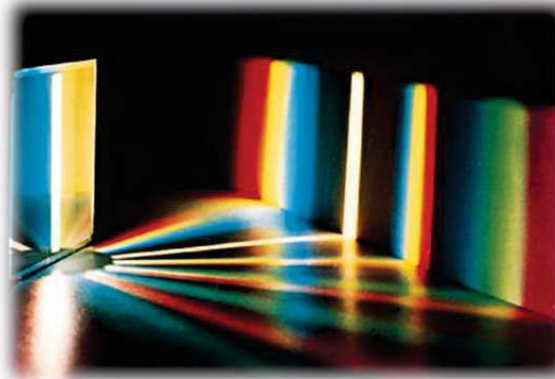
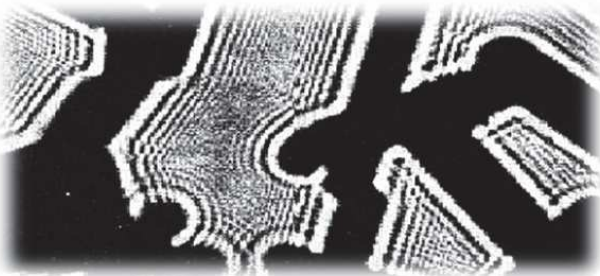
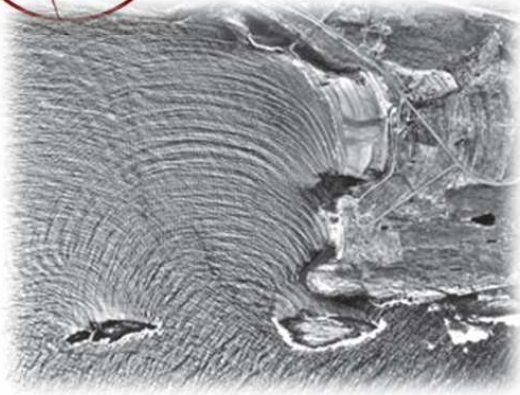
Περίθλαση



Σε κάθε σημείο παρατήρησης γίνεται γραμμική ολοκλήρωση ηλεκτρικών πεδίων από όλες τις 'πηγές'

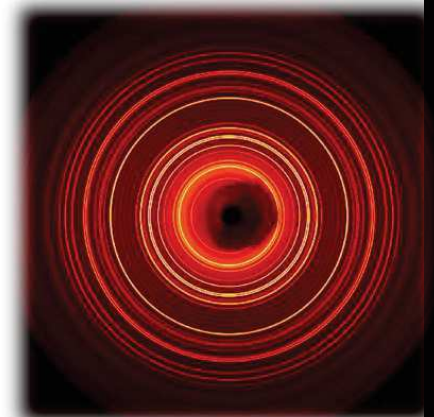
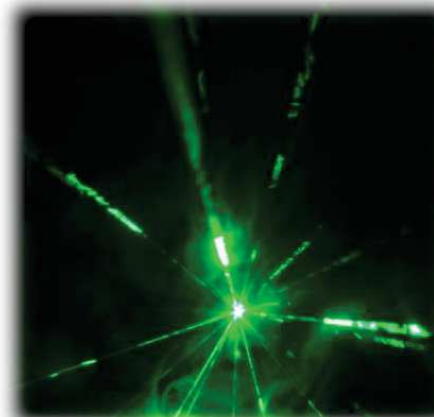
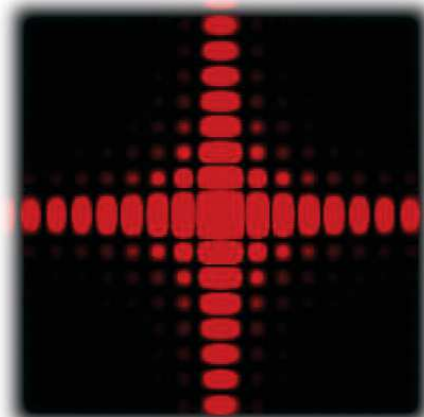


ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ & ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΟΤΗΤΑ



Περίθλαση εμφανίστηκε και σε «Κύματα» ηλεκτρονίων! Σκιά κρυστάλλου «φωτισμένου» με ηλεκτρόνια.

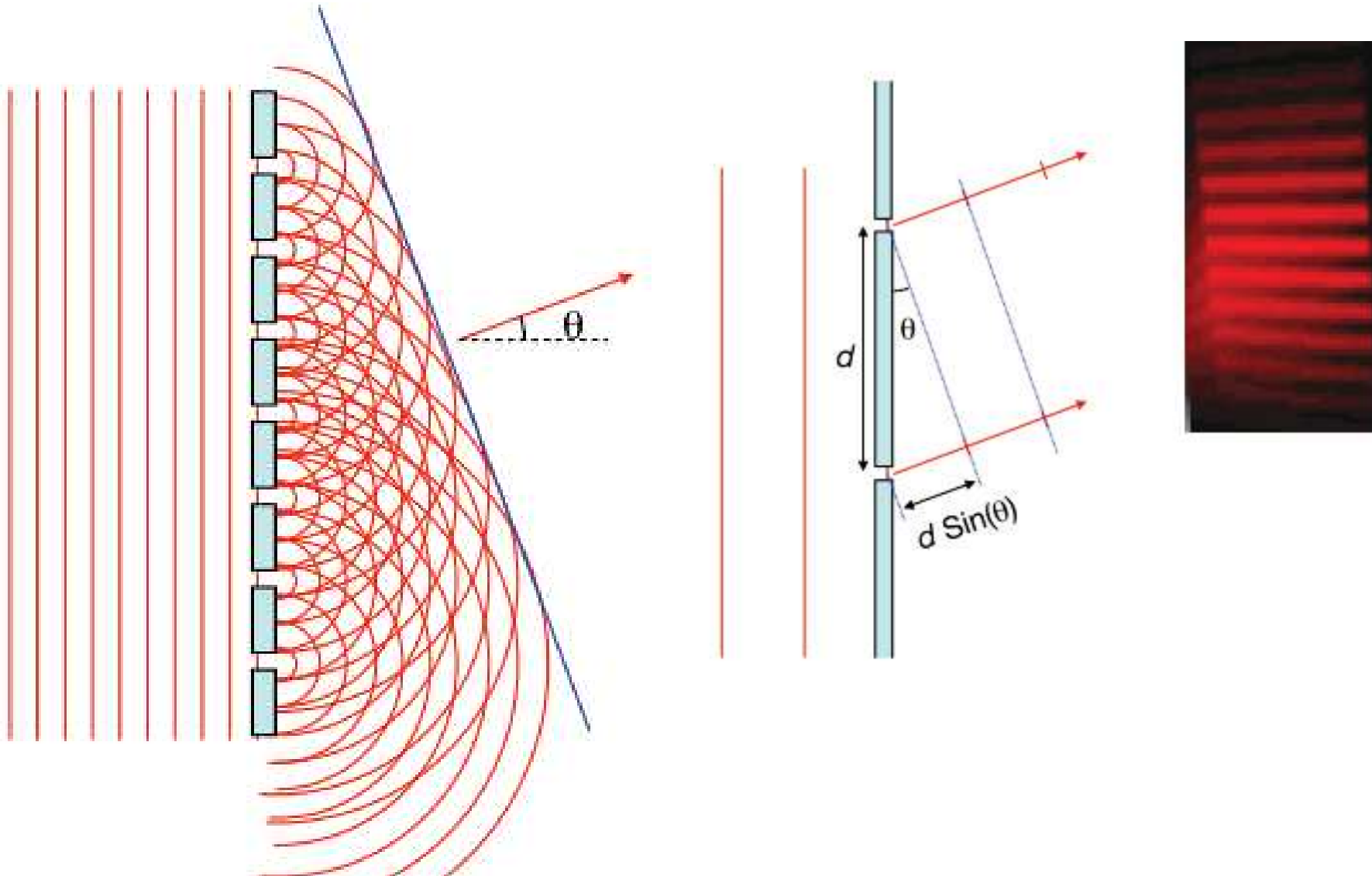
Φαινόμενα Περίθλασης όταν ακτινοβολία Laser φωτίζει μια ακμή





ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

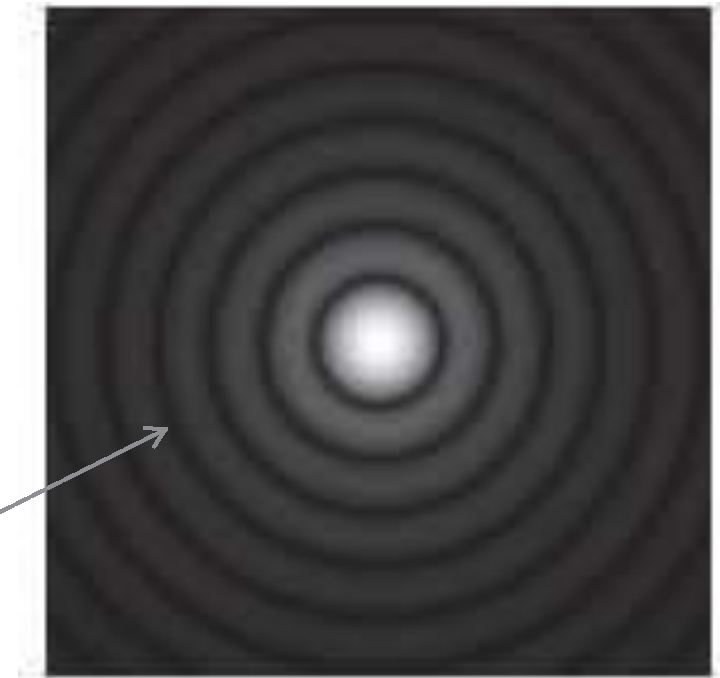
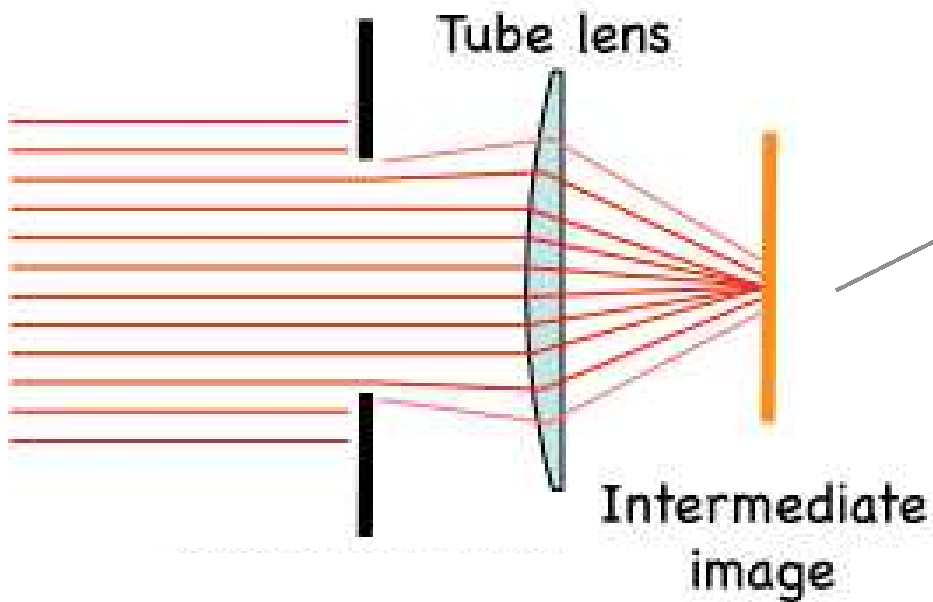
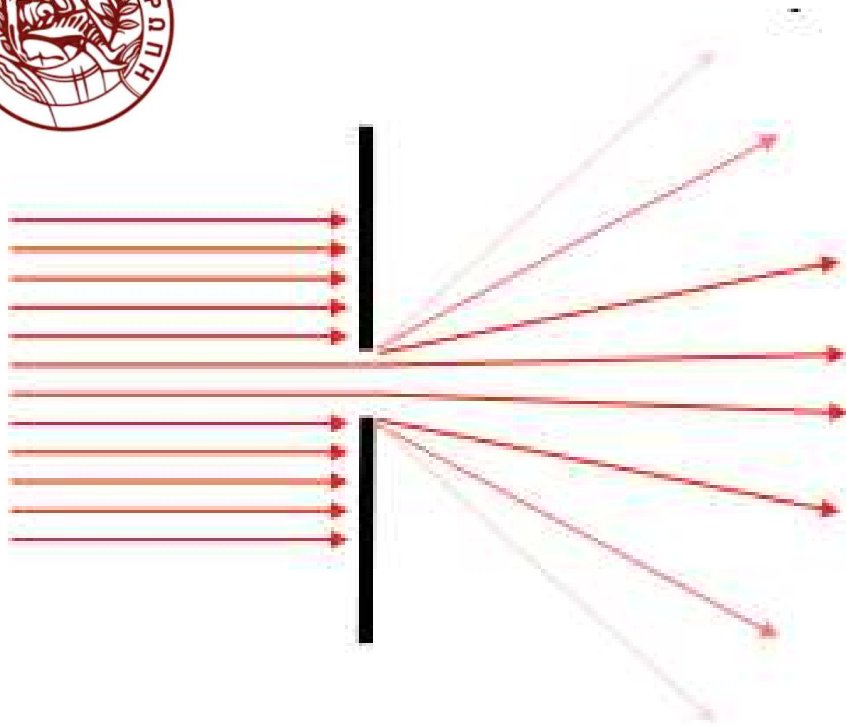
Περίθλαση από περιοδικές δομές (πλέγμα)

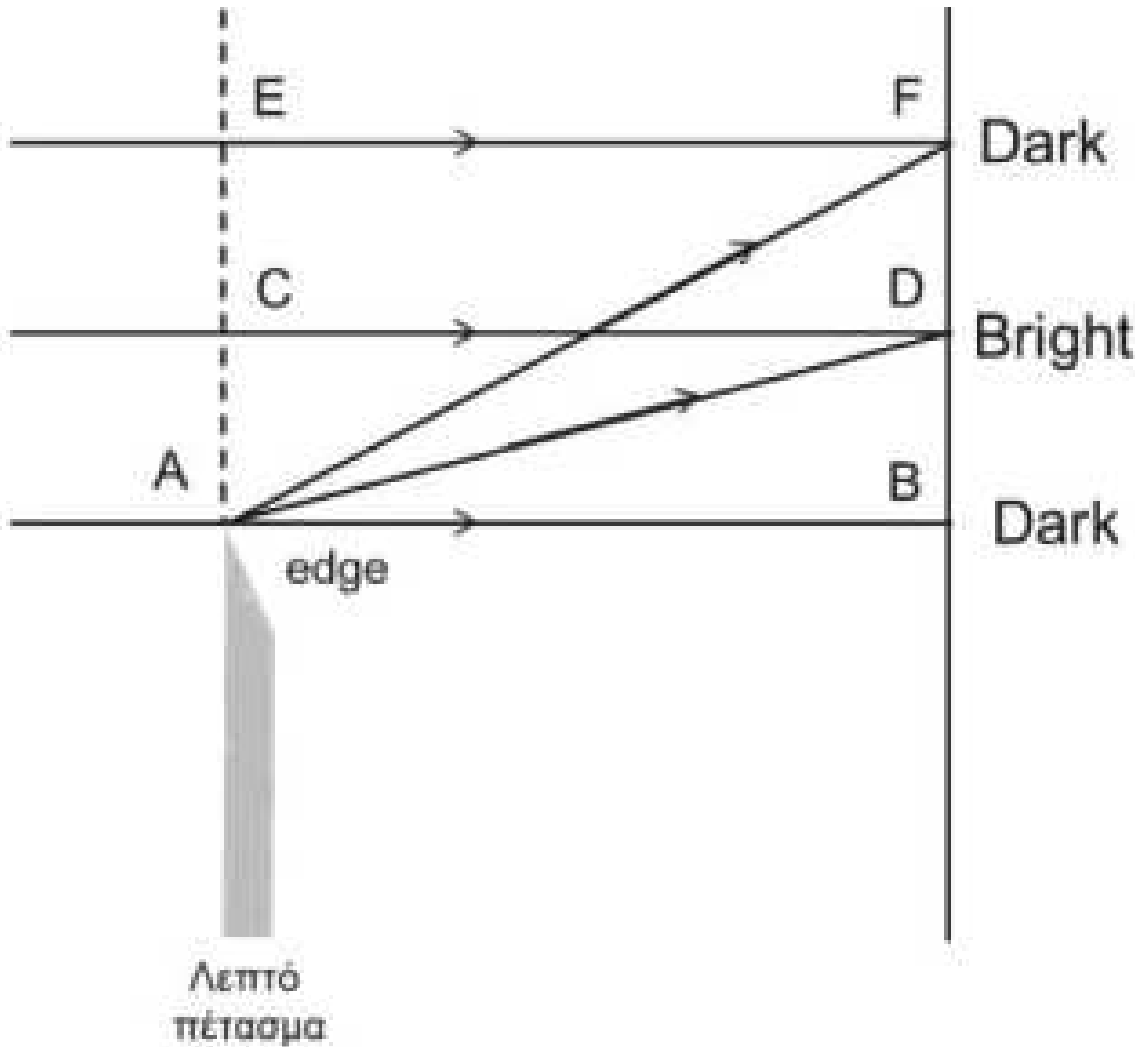




ΠΕΡΙΘΛΑΣΗ

Περίθλαση από ένα διάφραγμα





ΚΡΟΣΣΟΙ FRESNEL

- οι ακτίνες μονοχρωματικού φωτός περιθλώνται στην σχισμή A και συμβάλλουν με τις απευθείας ακτίνες
- Αν οι διαδρομές ακτίνων

$(AF) - (AB) = 1/2 \lambda$,
εξάλειψη φωτός δηλαδή σκοτεινό σημείο

$(AD) - (AB) = n \lambda$,
ενισχυτική συμβολή δηλαδή φωτεινή κηλίδα

Στο Η.Μ. παρατηρείται κυρίως ο πρώτος φωτεινός κροσσός, ο οποίος είναι μεγάλης σημασίας για την ευθυγράμμιση και χρήση του Η.Μ.

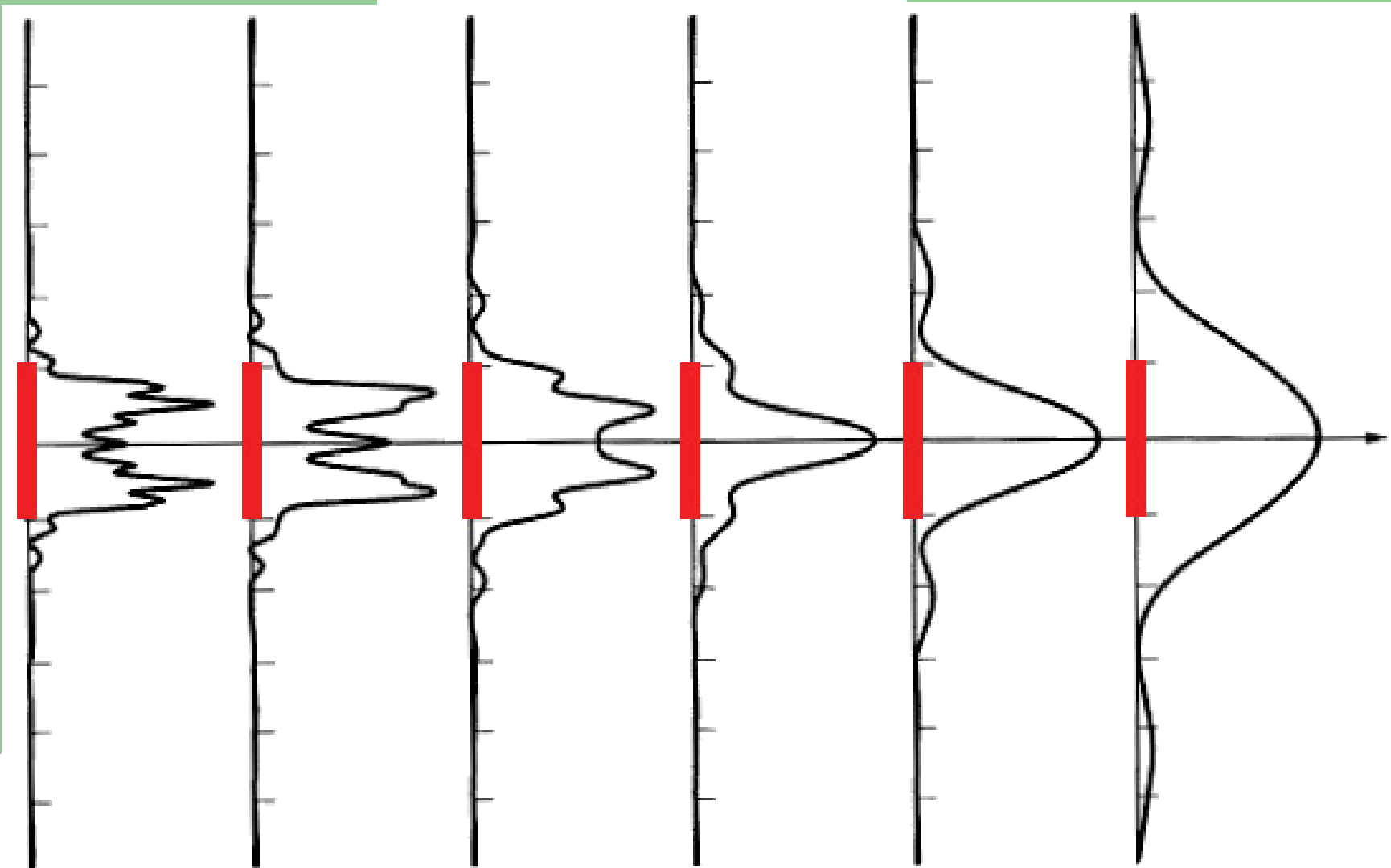


ΚΡΟΣΣΟΙ FRESNEL

Κοντά στο άνοιγμα

Μακριά από το άνοιγμα

Σχήμα μεταβάλλεται έντονα



Διαμόρφωση αποκτά σταθερό σχήμα



- Η διόρθωση της εμφάνισης του πρώτου κροσσού επιτυγχάνεται με συνθήκες καλής εστίασης με τον αντικειμενικό φακό.
- **Υπερεστίαση** και **Υποεστίαση** του αντικειμενικού φακού οδηγούν σε εξάλειψη του κροσσού

Σημαντικές εφαρμογές

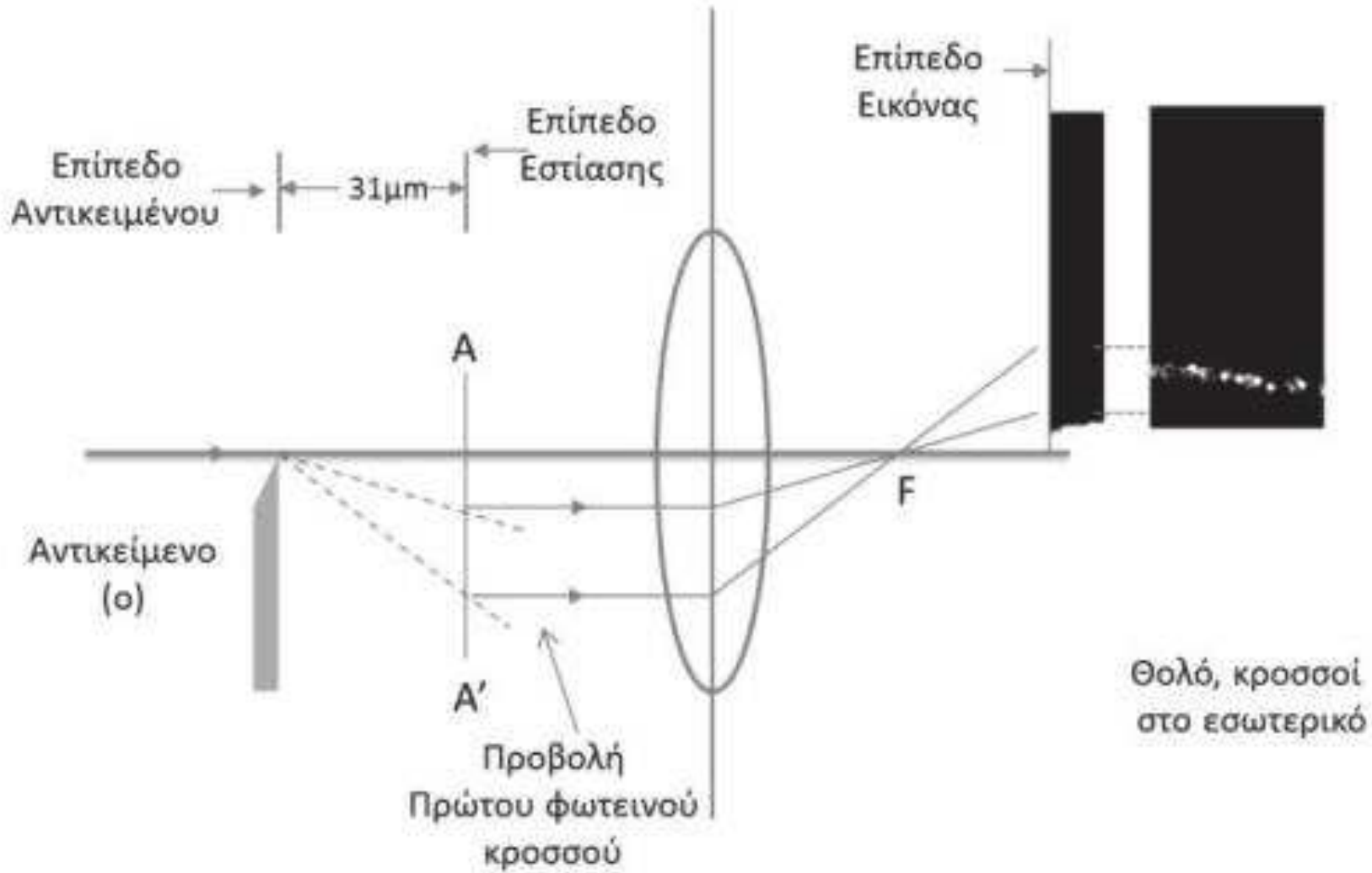
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξακρίβωση αν οι φακοί είναι ακτινικά **συμμετρικοί**, αν δεν είναι τότε ο φακός παρουσιάζει αστιγματισμό που εξακριβώνεται από το φάρδος του κροσσού
- Μέτρο της Δ.Ι.

Ο Κροσσός αποτελεί ένα τέλειο δείγμα ελέγχου *'test specimen'*



ΚΡΟΣΣΟΙ FRESNEL

Επίδραση του μέτρου «υπερεστίασης» και «υποεστίασης»

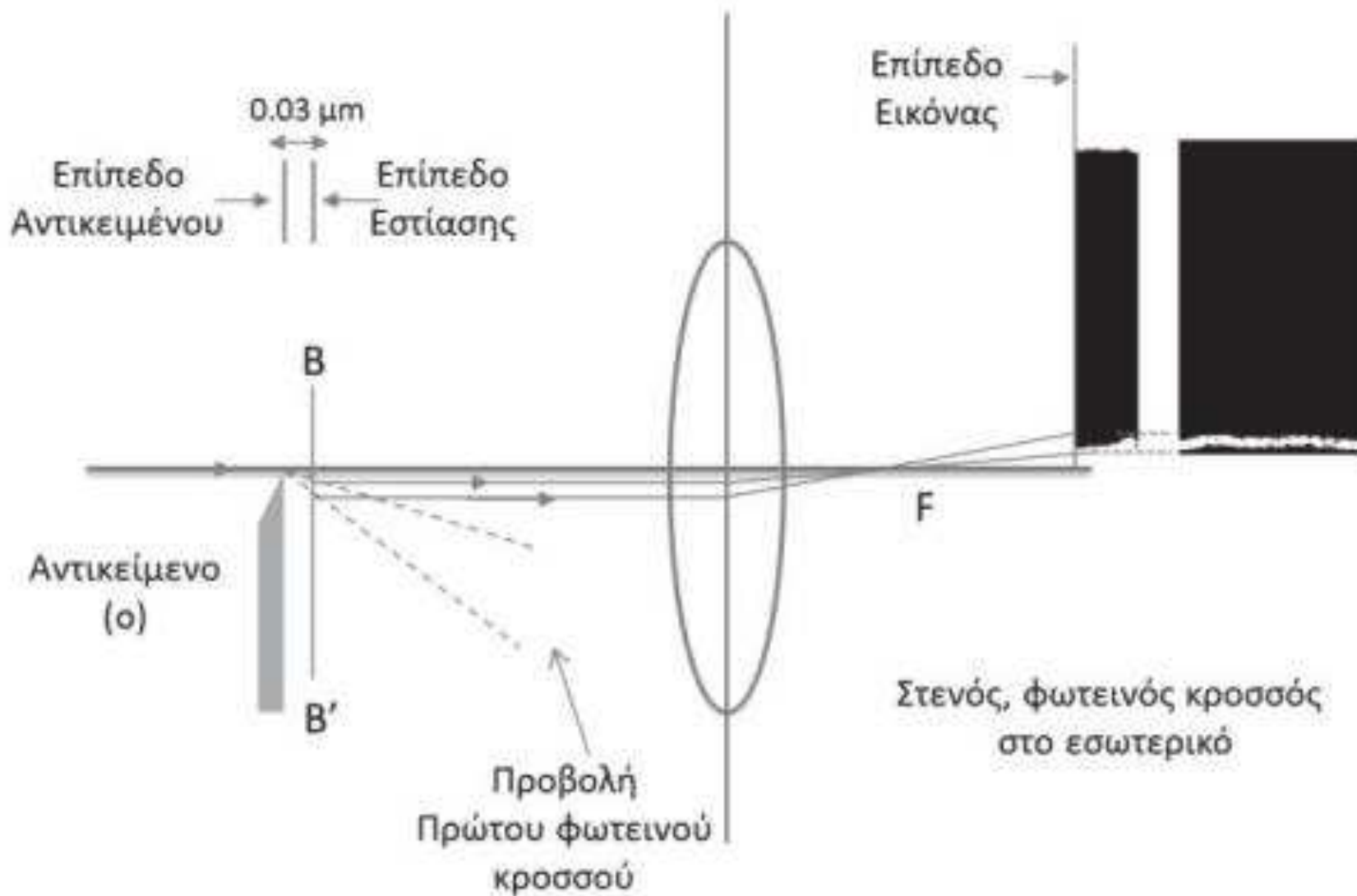


υπερεστίαση



ΚΡΟΣΣΟΙ FRESNEL

Επίδραση του μέτρου «υπερεστίασης» και «υποεστίασης»

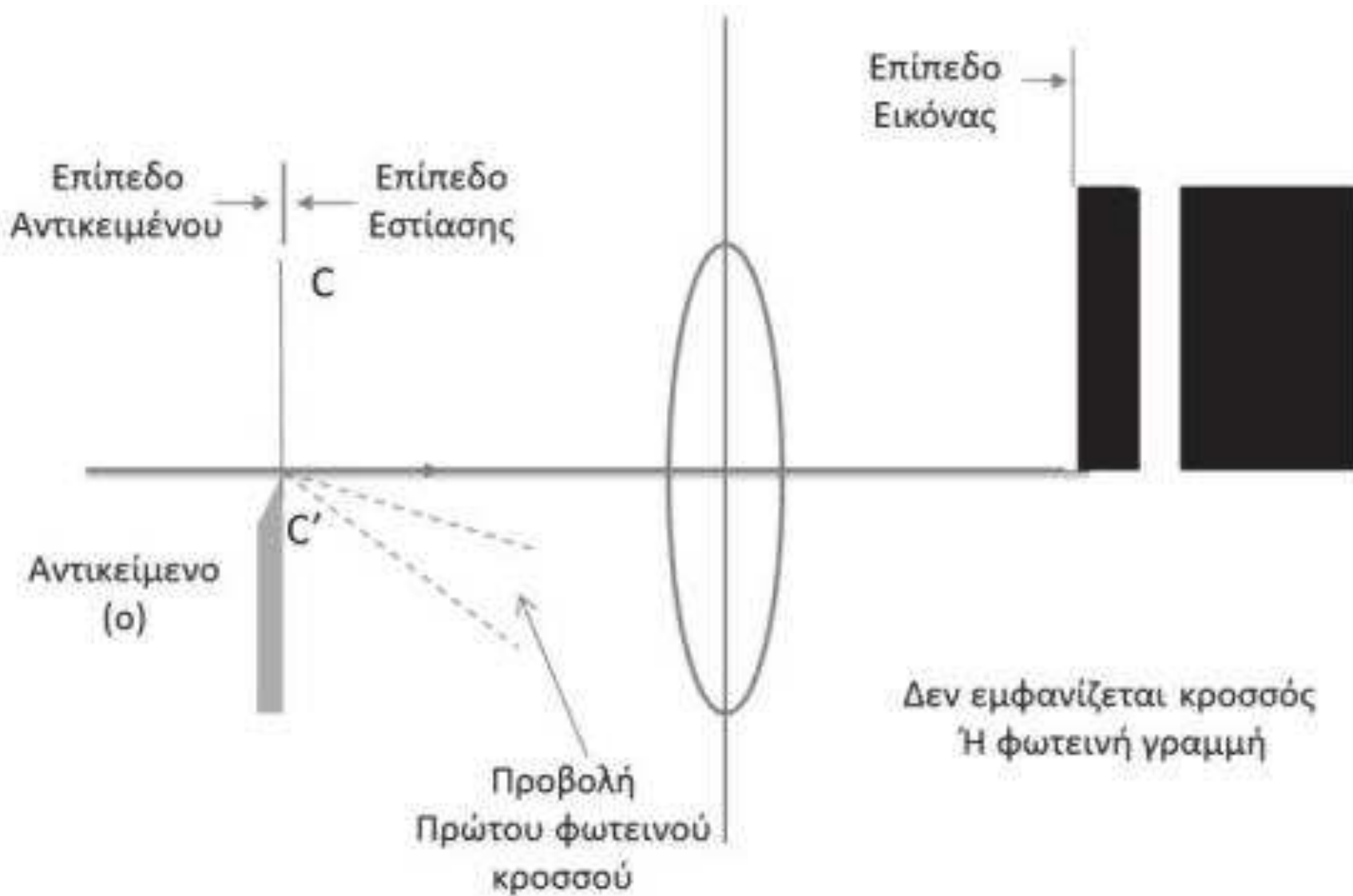


Μικρή υπερεστίαση



ΚΡΟΣΣΟΙ FRESNEL

Επίδραση του μέτρου «υπερεστίασης» και «υποεστίασης»

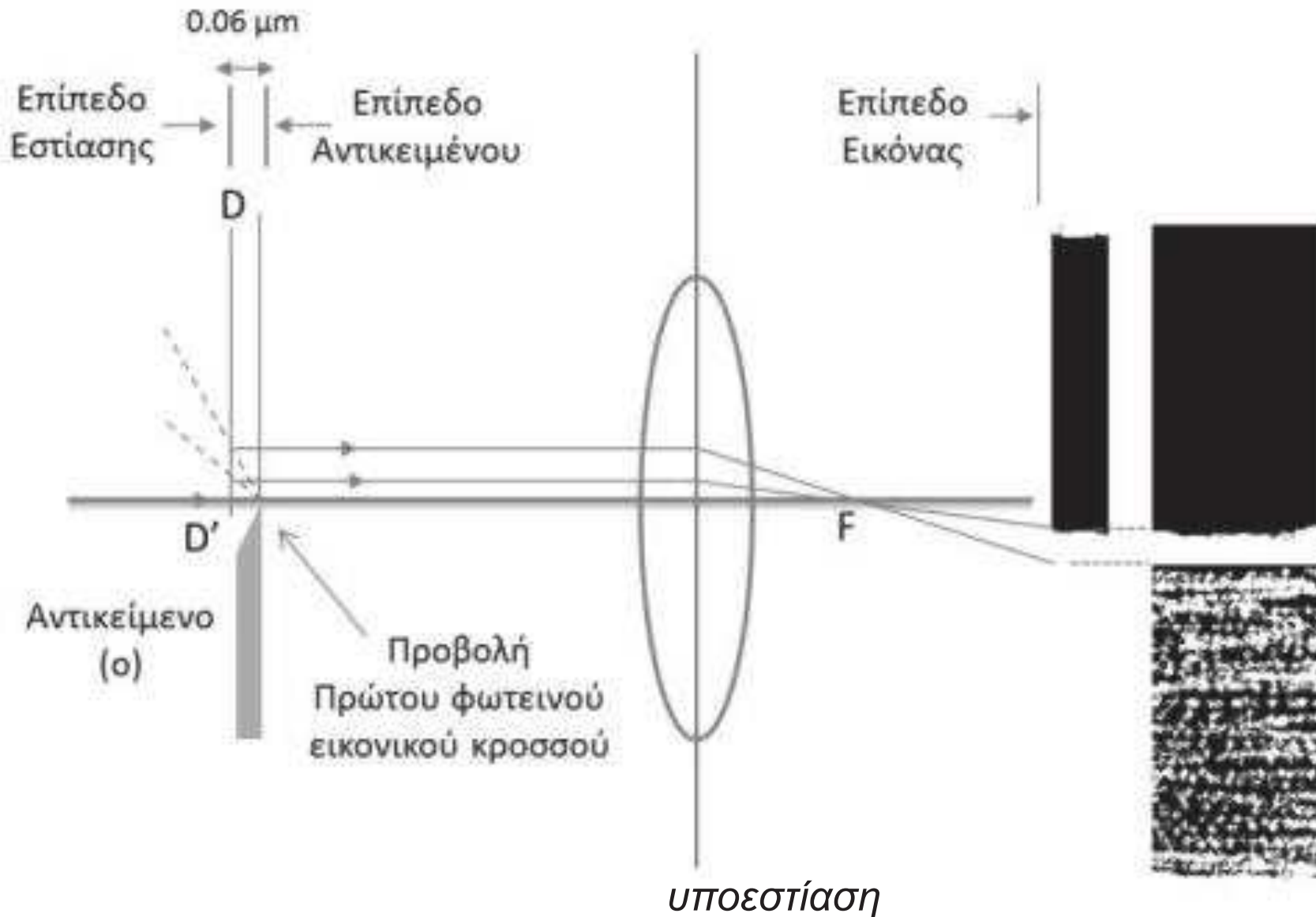


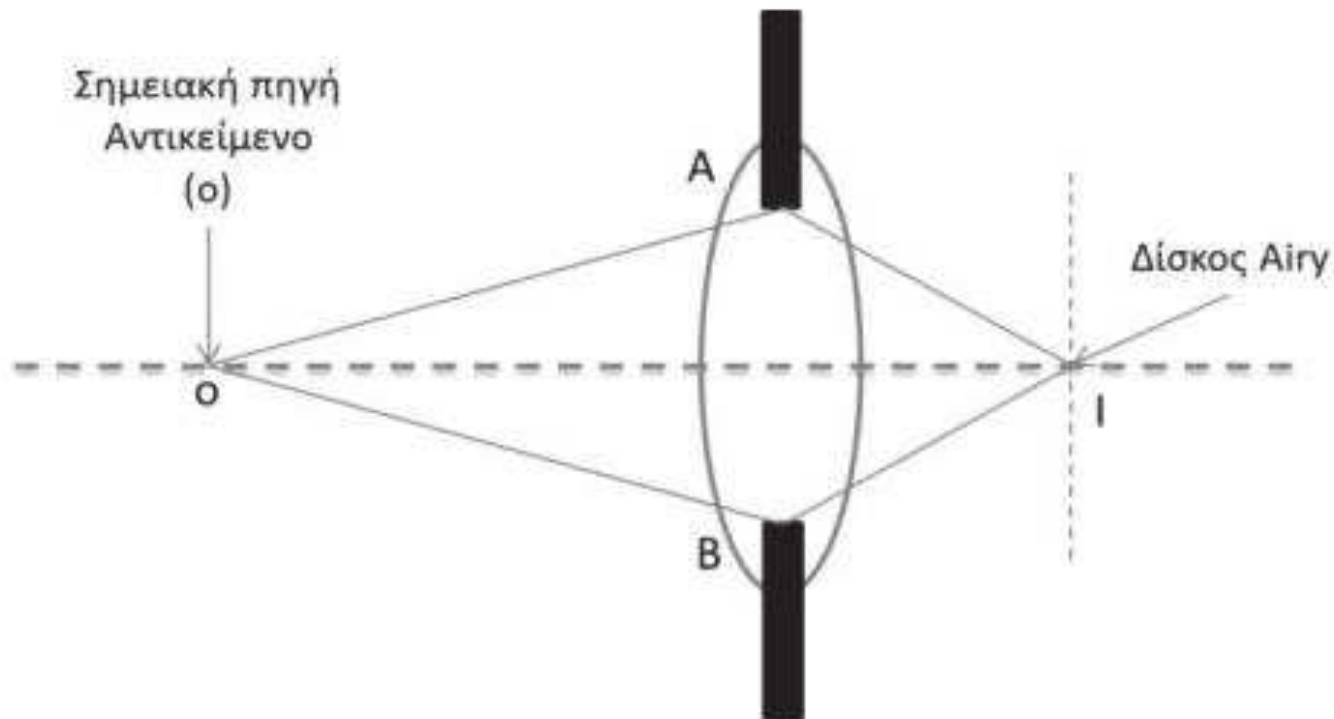
Ακριβής εστίαση



ΚΡΟΣΣΟΙ FRESNEL

Επίδραση του μέτρου «υπερεστίασης» και «υποεστίασης»

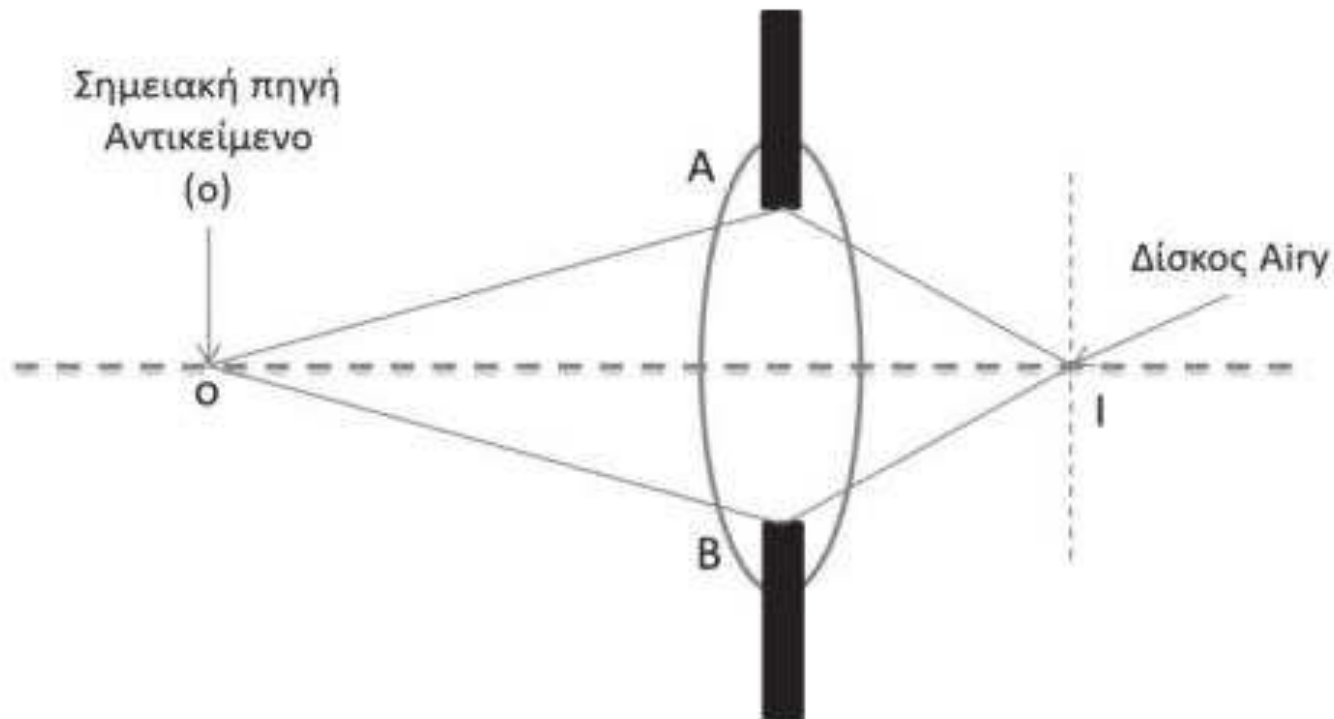




- Το διάφραγμα του φακού AB περιορίζει την οπτική δέσμη του αντικειμένου
- Ακόμη και σε απουσία διαφράγματος ο φακός δέχεται περιορισμένου ανοίγματος οπτική δέσμη που καθορίζεται από την καμπυλότητα του φακού
- Λόγω περιορισμού του φακού το σχηματιζόμενο είδωλο δεν είναι τέλειο



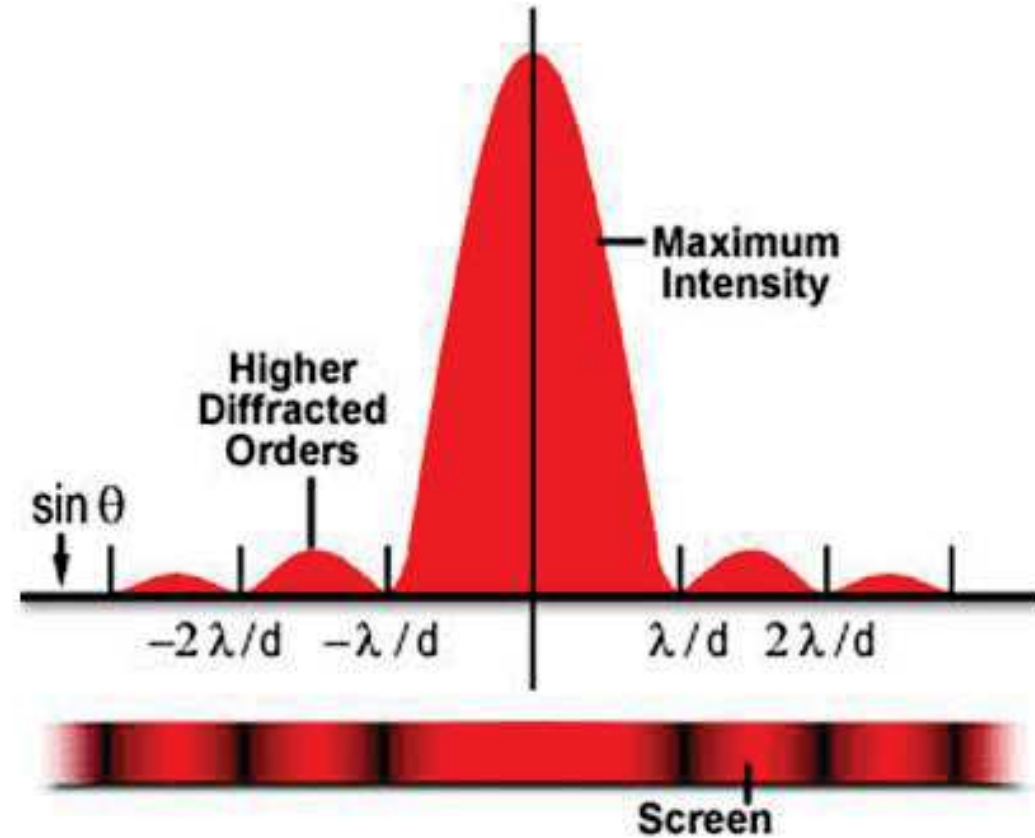
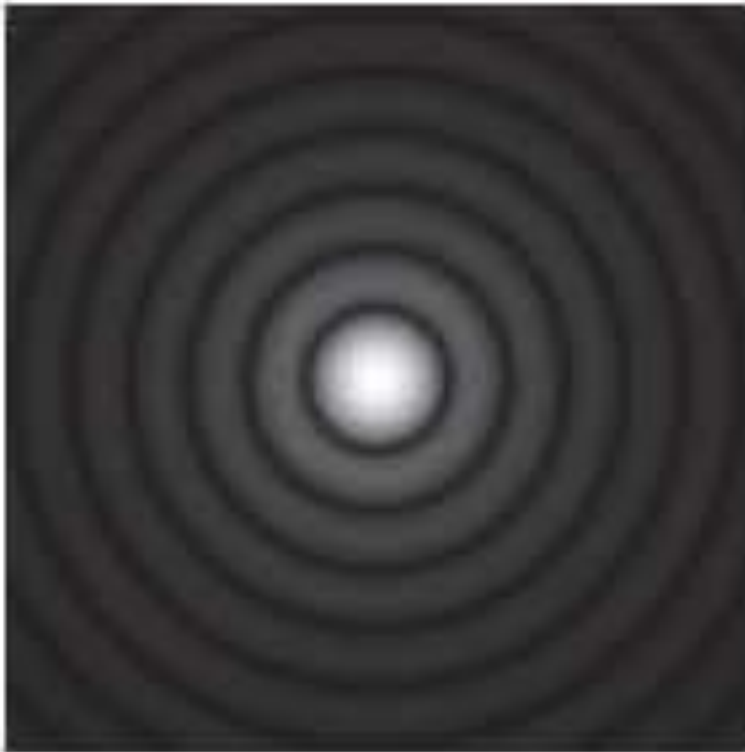
ΔΙΣΚΟΣ AIRY



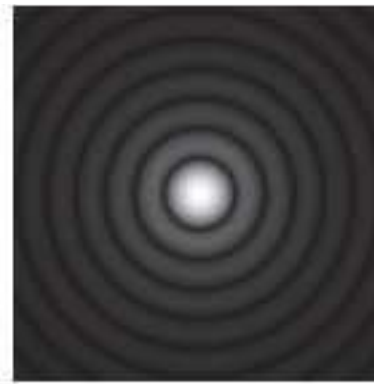
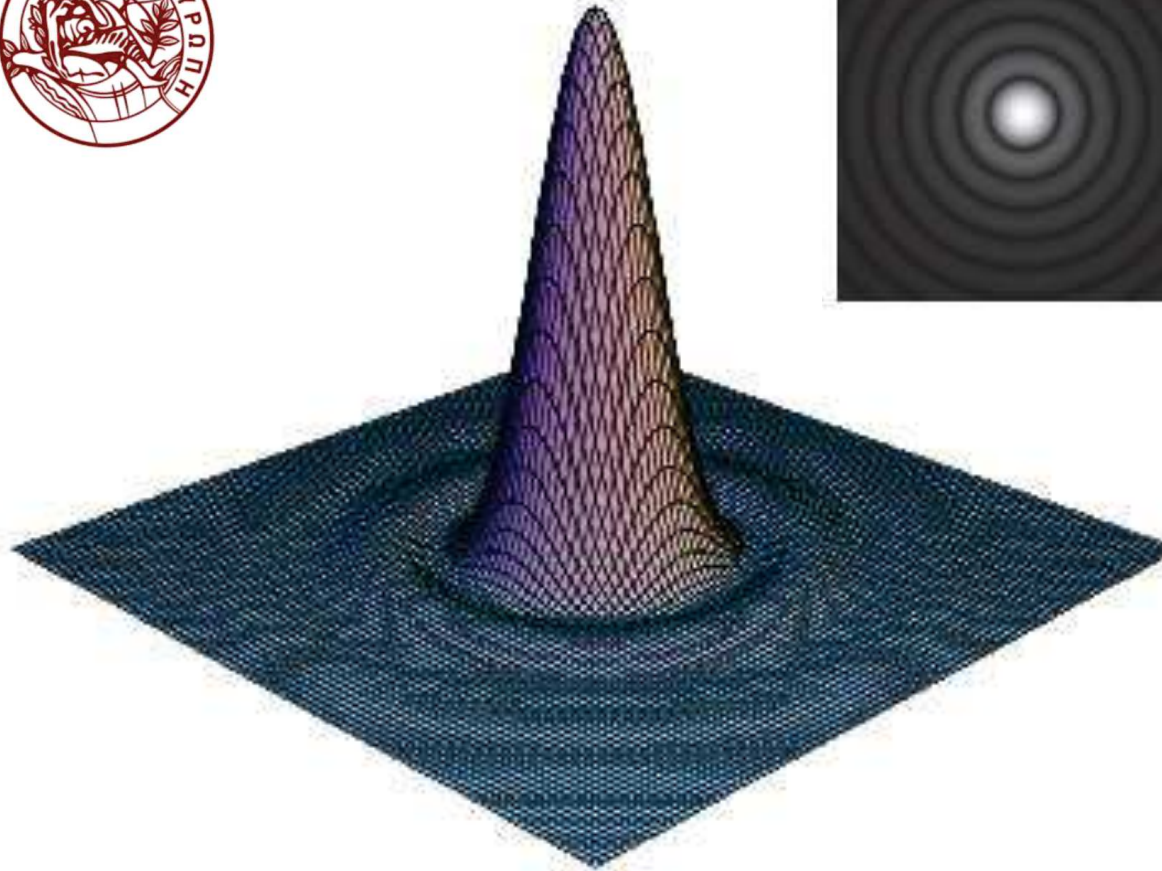
- Οι ατέλειες δημιουργούνται λόγω περίθλασης στα A και B που οδηγούν στην ύπαρξη κροσσών συμβολής
- Μία σημιακή πηγή απεικονίζεται με έναν φωτεινό δίσκο ο οποίος περικλείεται εναλλακτικά από σκοτεινούς και φωτεινούς δίσκους (Airy)



ΔΙΣΚΟΣ AIRY



- Οι ατέλειες δημιουργούνται λόγω περίθλασης στα A και B που οδηγούν στην ύπαρξη κροσσών συμβολής
- Μία σημιακή πηγή απεικονίζεται με έναν φωτεινό δίσκο ο οποίος περικλείεται εναλλακτικά από σκοτεινούς και φωτεινούς δίσκους (Airy)



ΔΙΣΚΟΣ AIRY

Διάμετρος δίσκου Airy

$$r = \frac{0.612\lambda}{n \sin \alpha}$$

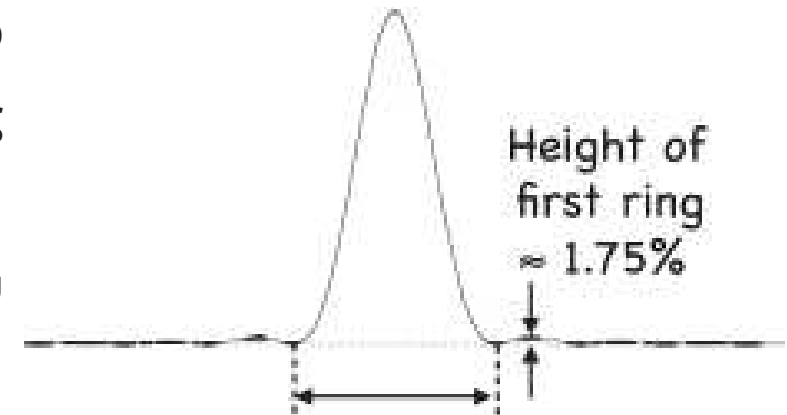
όπου λ : μήκος κύματος του φωτός στο κενό

α : είναι το μισό του γωνιακού ανοίγματος του φακού

και n : ο δείκτης διάθλασης του μέσου

Η διάμετρος των δίσκων Airy καθορίζεται από το διάφραγμα του φακού και από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας

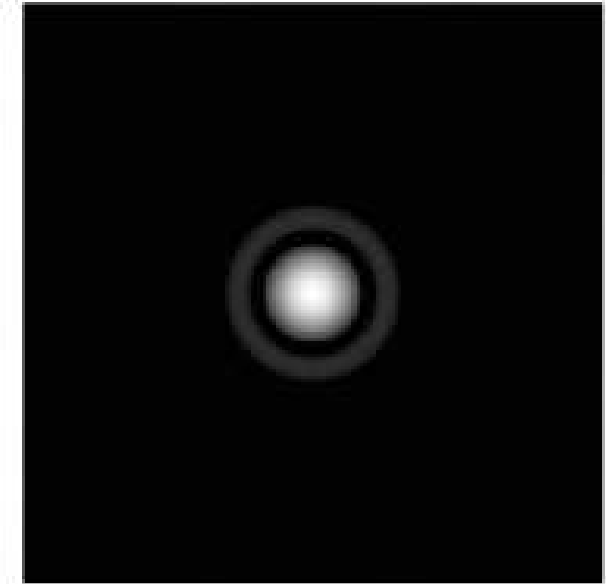
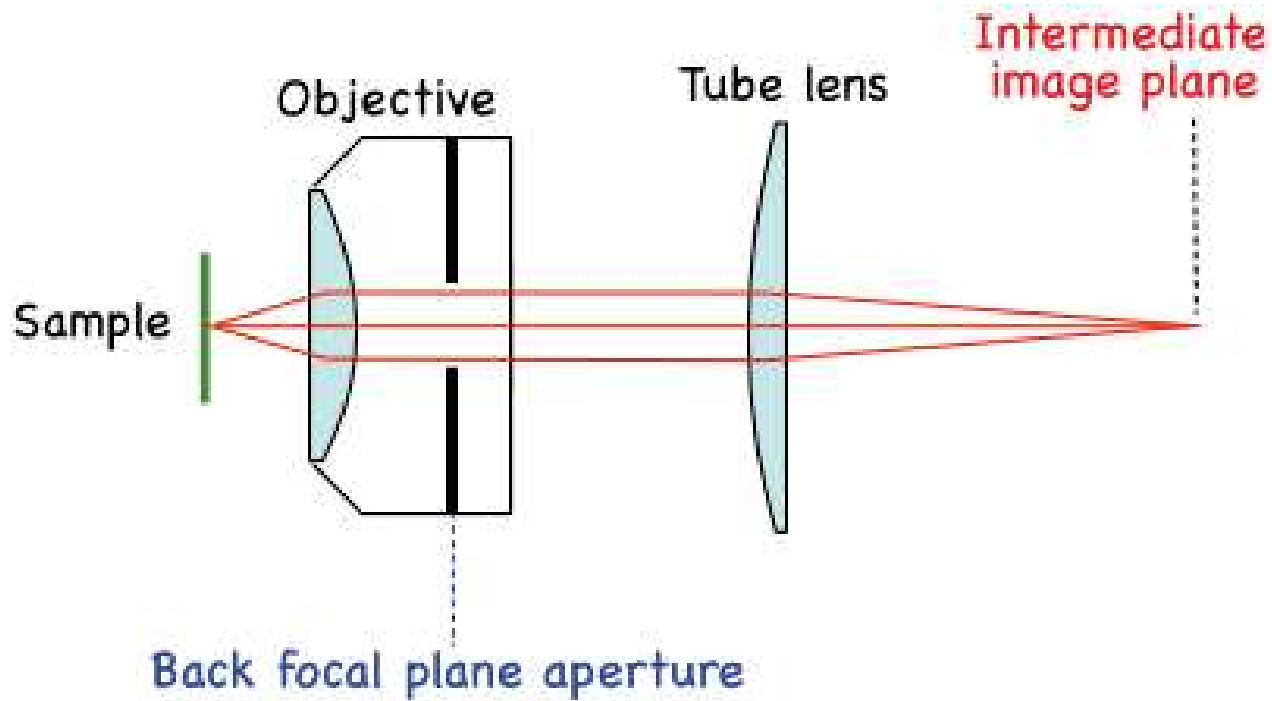
- από τον δείκτη διάθλασης του μέσου (π.χ. αέρα) που υπάρχει μεταξύ φακού και αντικειμένου,
- από την ταχύτητα,
- και το μήκος κύματος του φωτός.





ΔΙΣΚΟΣ AIRY

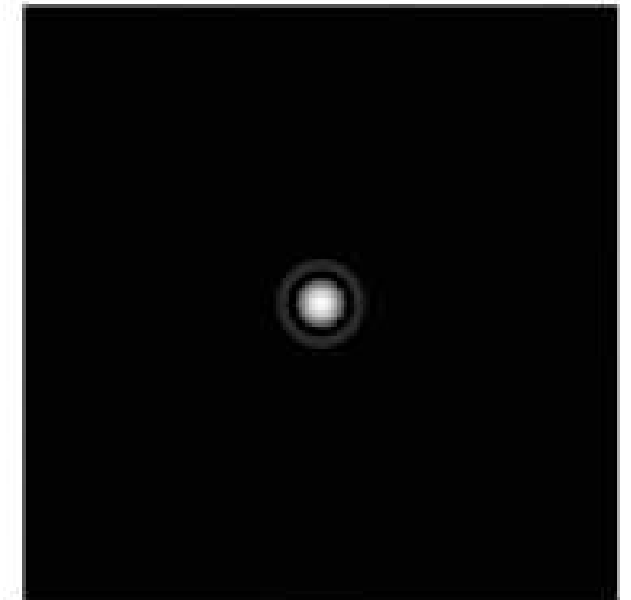
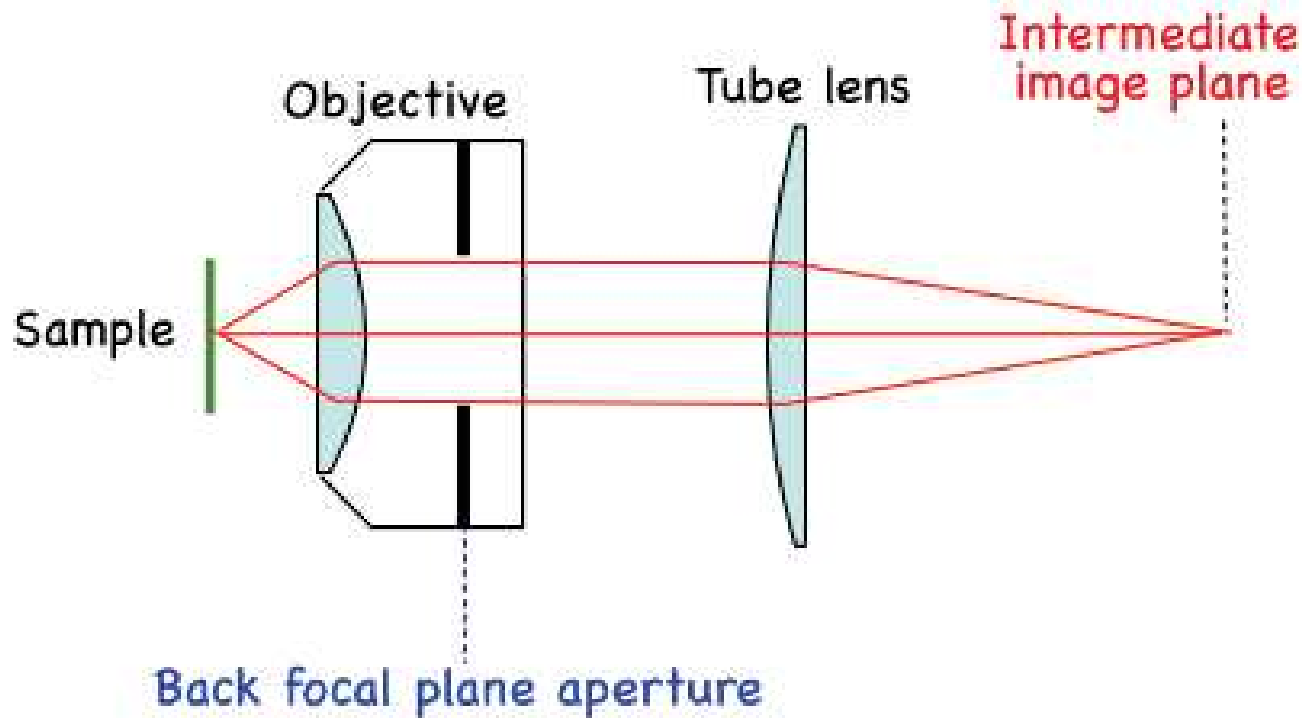
Διαφράγματα και Διακριτική Ικανότητα





ΔΙΣΚΟΣ AIRY

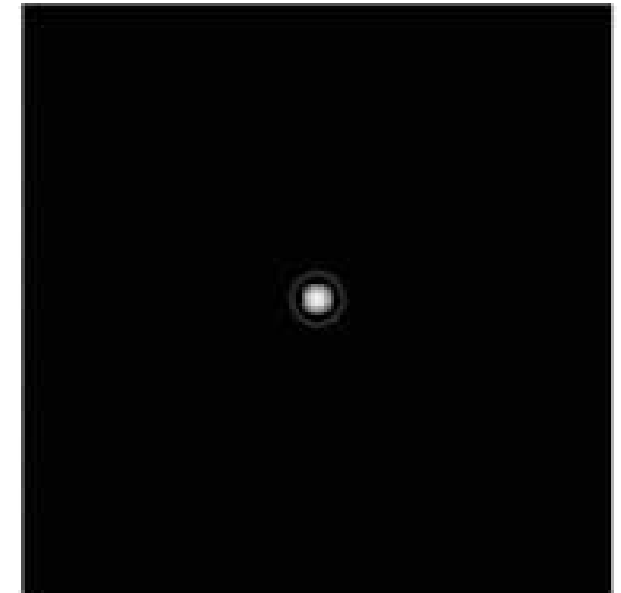
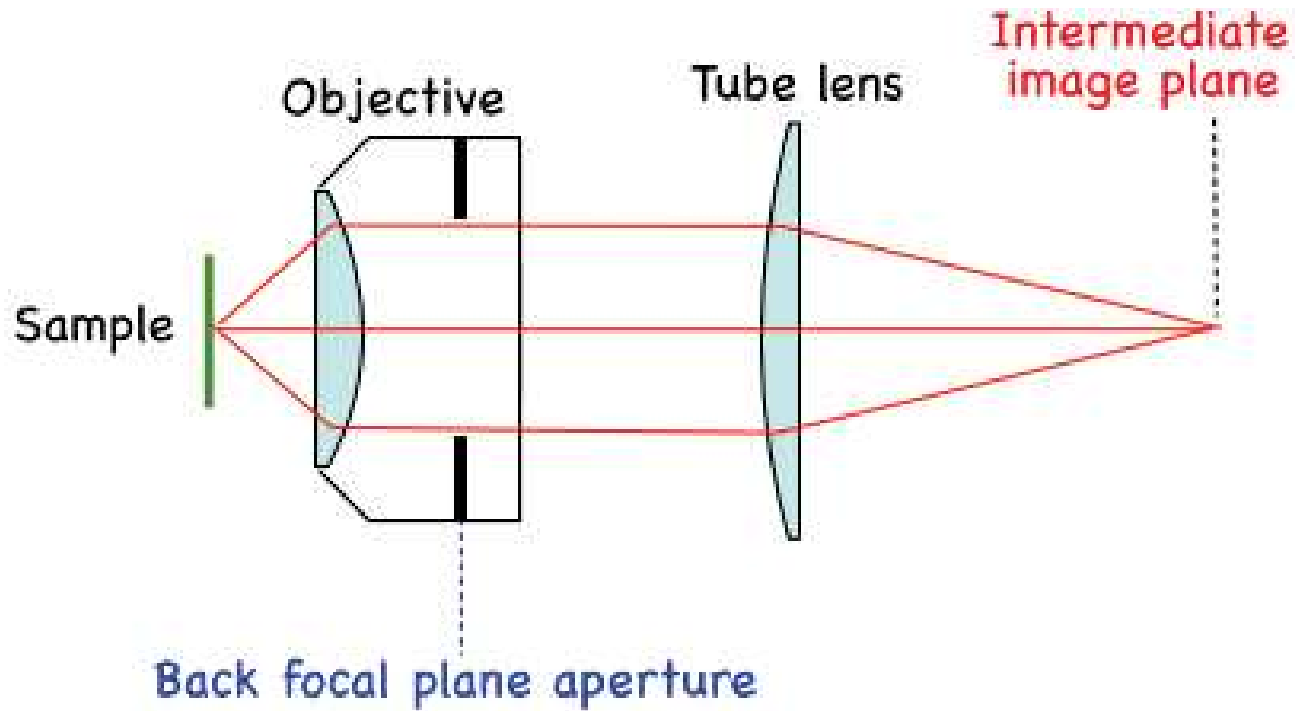
Διαφράγματα και Διακριτική Ικανότητα





ΔΙΣΚΟΣ AIRY

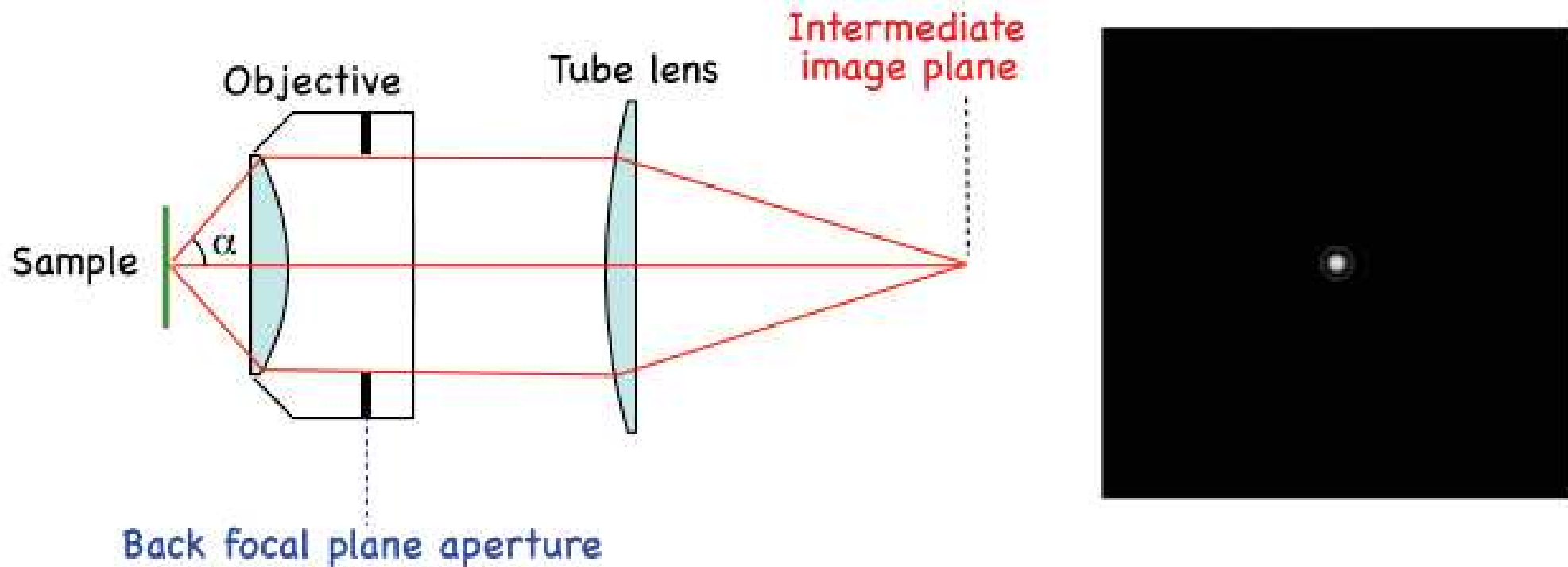
Διαφράγματα και Διακριτική Ικανότητα





ΔΙΣΚΟΣ AIRY

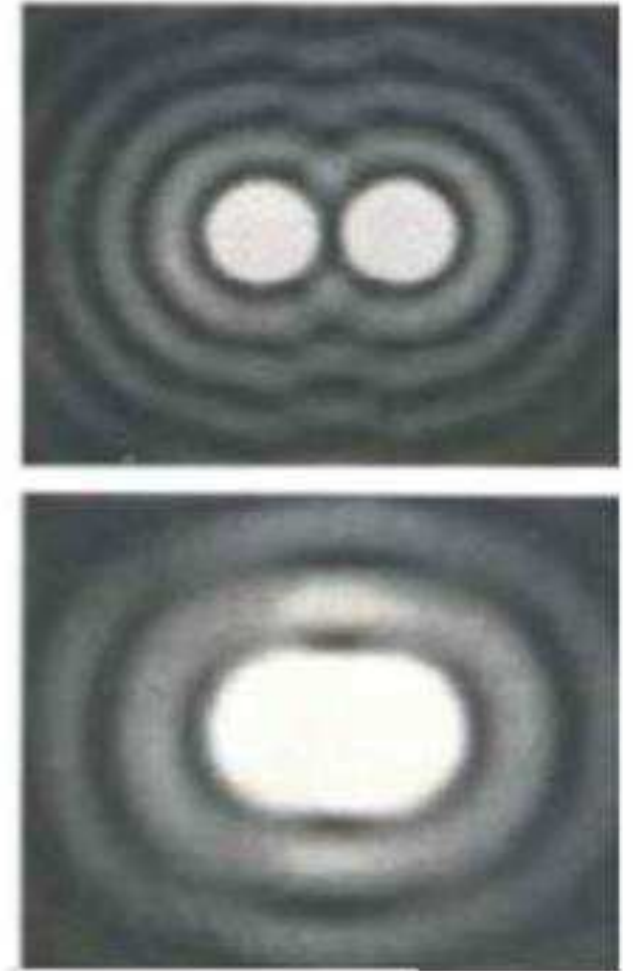
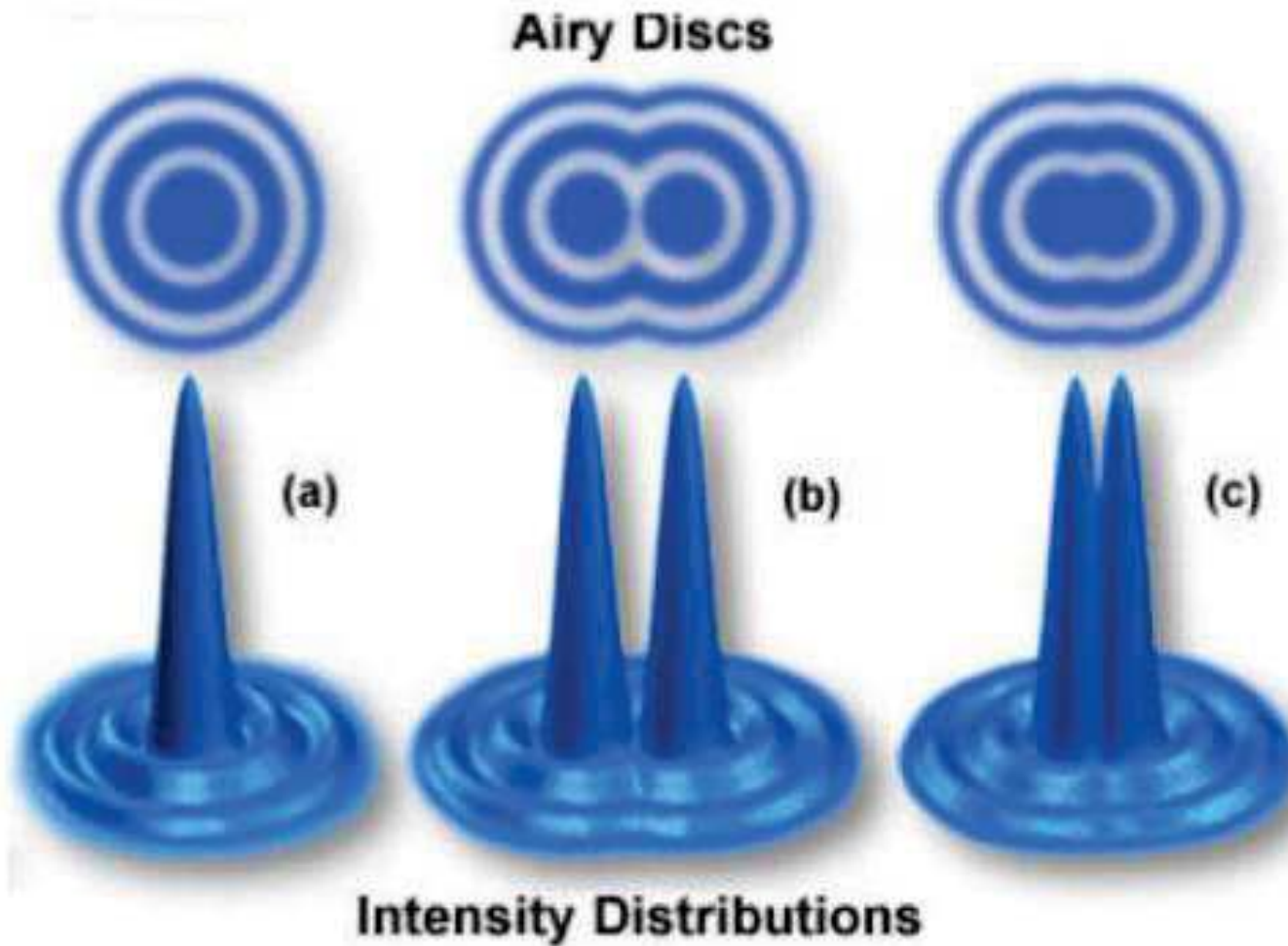
Διαφράγματα και Διακριτική Ικανότητα





ΔΙΣΚΟΣ AIRY

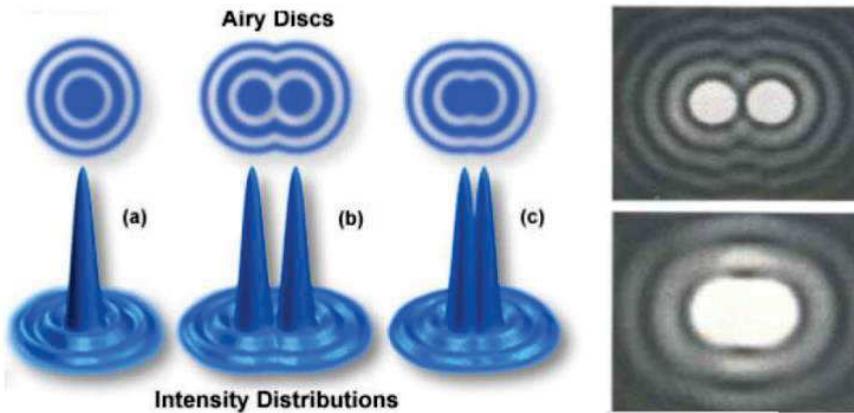
Εφαρμογή των δίσκων Airy στον ορισμό της Δ.Ι.





ΔΙΣΚΟΣ AIRY

Εφαρμογή των δίσκων Airy στον ορισμό της Δ.Ι.



Διακριτική Ικανότητα, Δ.Ι.: η δυνατότητα ενός οπτικού συστήματος να **ξεχωρίζει δύο αντικείμενα** και ορίζεται ως η **ελάχιστη απόσταση** για να φαίνονται δύο αντικείμενα σαν ξεχωριστά και όχι συγκεχυμένα σαν ένα.

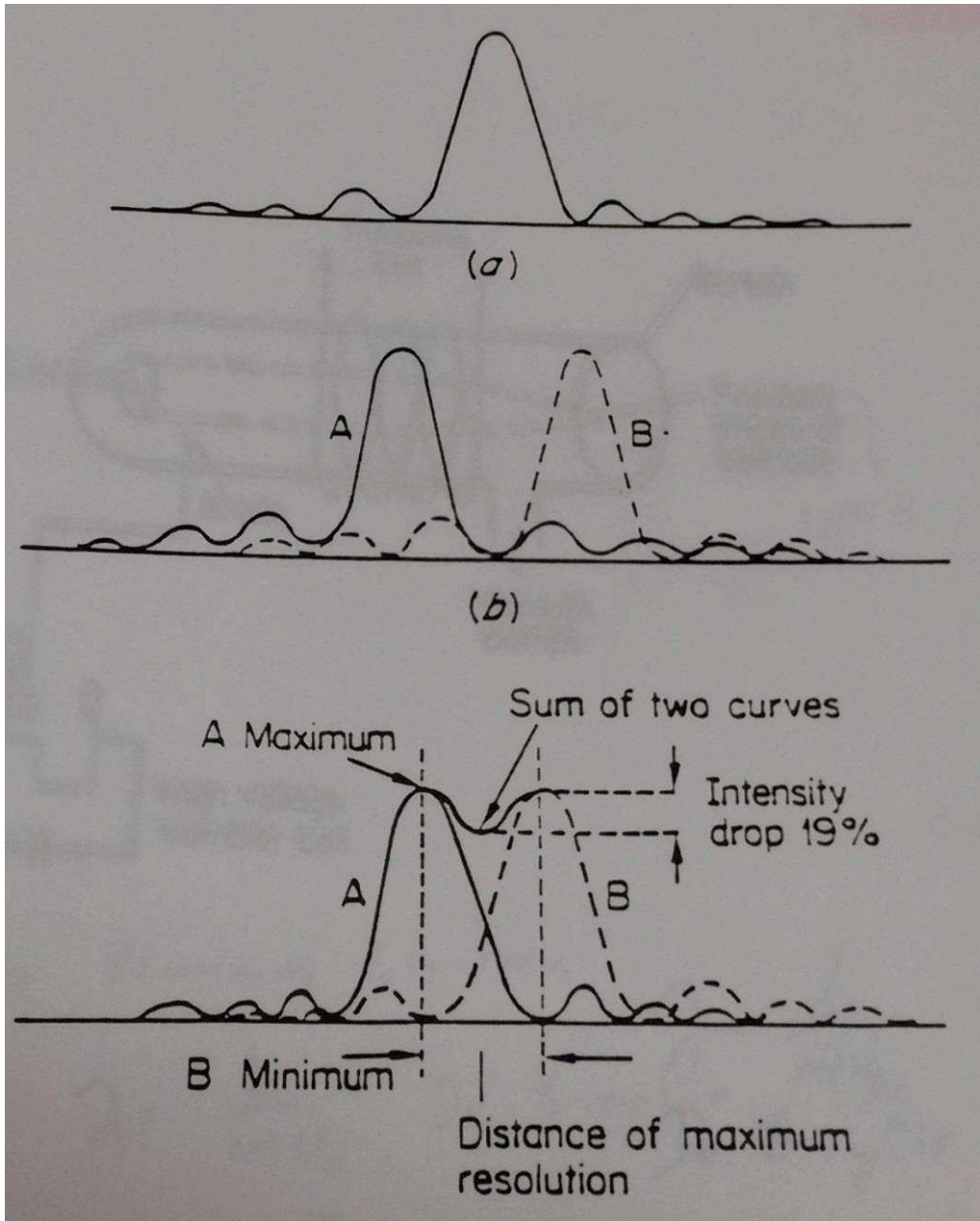
Όσο μικρότερη αυτή η απόσταση τόσο μεγαλύτερη η Δ.Ι.

Κριτήριο Rayleigh.: το όριο στο οποίο δύο δίσκοι μπορούν να διακριθούν σε δύο ξεχωριστές οντότητες.



ΚΡΙΤΗΡΙΟ RAYLEIGH

Το κριτήριο διαχωρισμού δύο ειδώλων που προέρχονται από δύο όμοιες πηγές που δημιουργούν **κύκλους Airy**, είναι η απόσταση μεταξύ των δύο κέντρων να συμπίπτει με την ακτίνα του πρώτου σκοτεινού κύκλου. **Η ένταση των δύο κορυφών A και B πέφτει κατά 19%.**



$$\Delta.I. = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

Για πράσινο (500 nm) φώς

$$\Delta.I._{OM} = \frac{0.61 \times 0.5}{1.5 \times \sin 69} = 0.2 \mu m \approx \frac{1}{2} \lambda$$