



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](mailto: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



**Σε τι υπερέχει το Η.Μ. έναντι του Ο.Μ.???**

**Μεγέθυνση**

**ή**

**Διακριτική Ικανότητα**



## Σε τι υπερέχει το Η.Μ. έναντι του Ο.Μ.???

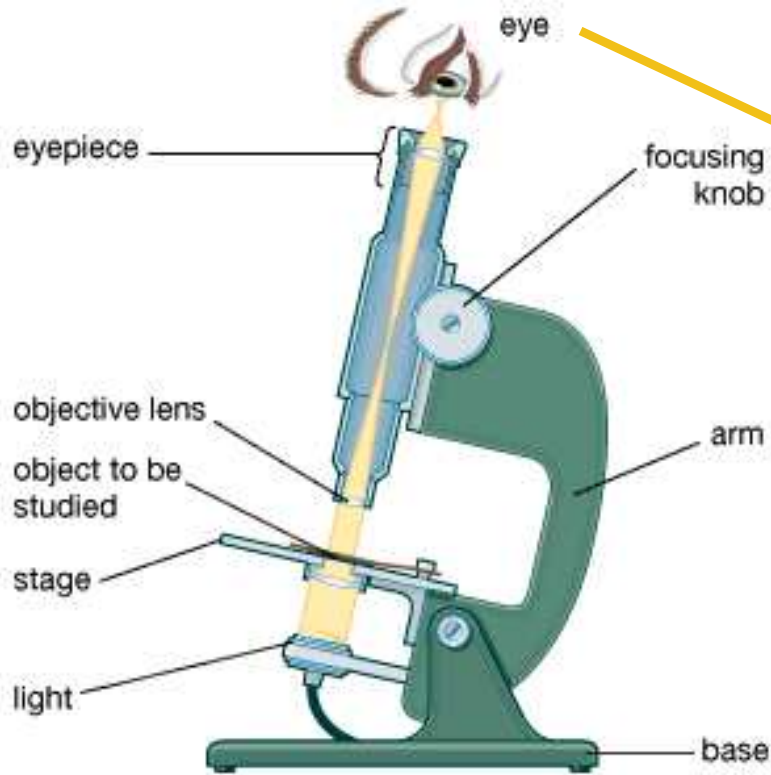
Μεγέθυνση

ή

**Διακριτική Ικανότητα**

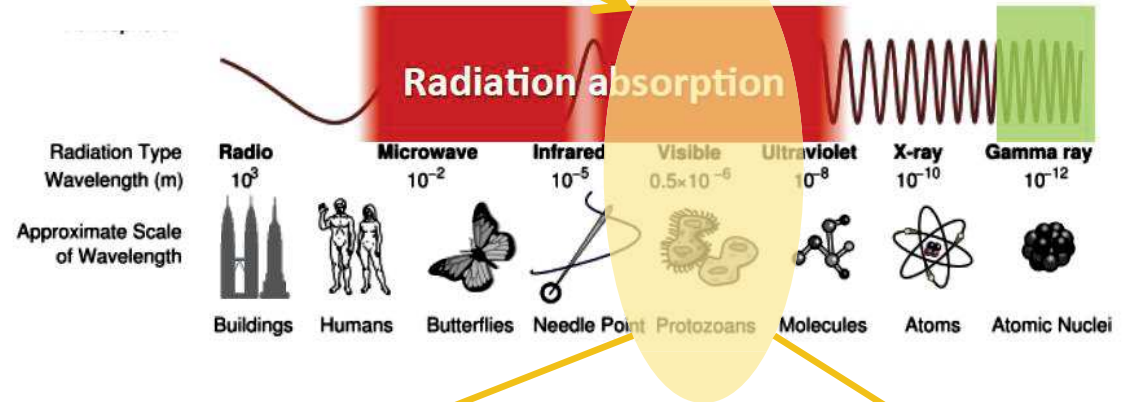
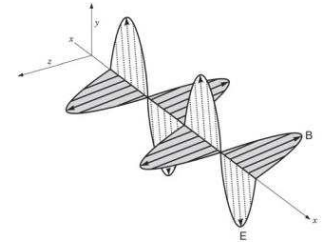


# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ, Ο.Μ.



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

- Όριο Ο.Μ. : φύση του φωτός
- Το φως είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



400 nm 700 nm



Οι πληροφορίες που μπορούμε να συλλέξουμε περιορίζεται από το μήκος κύματος του φωτός





# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ, Ο.Μ.

Μπορούμε να διακρίνουμε μόνο αντικείμενα με μέγεθος μεγαλύτερο του μισού μήκους κύματος του κύματος

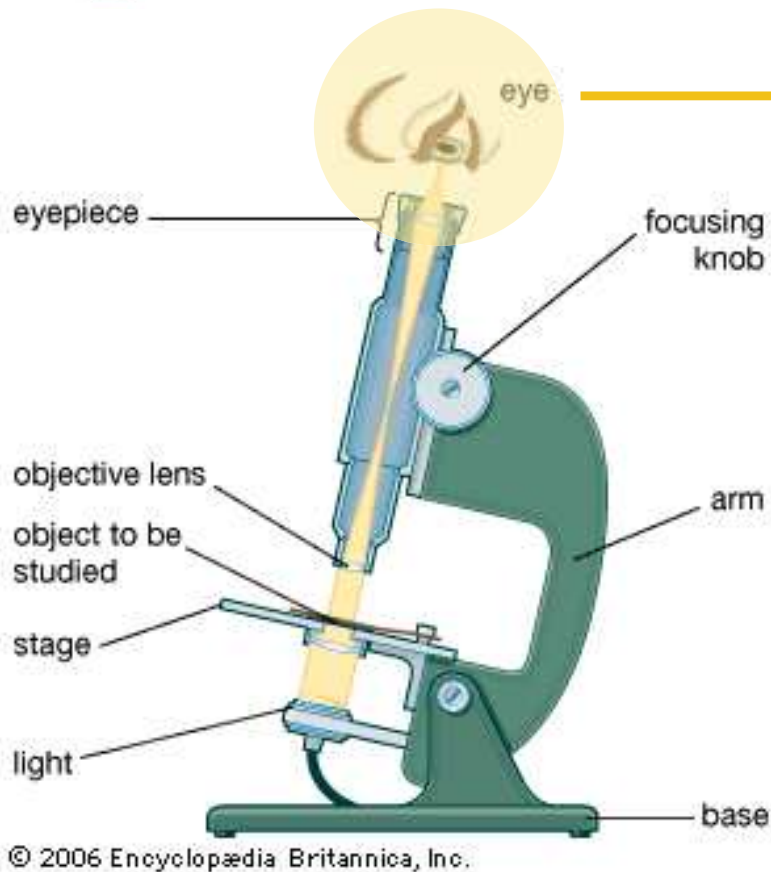
Δεν μπορούμε να δούμε αντικείμενα σε μέγεθος μικρότερο από το  $\frac{1}{2}$  του  $\lambda$  του φωτός δηλ.

$$\frac{1}{2} \sim 500 \text{ nm} = 250 \text{ nm}$$





# ΟΠΤΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ, Ο.Μ.



Περιορισμένη Δ.Ι. ματιού  $\sim 1/4$  ή  $0.25 \text{ mm}$  φάρδος αντικειμένου (υπό κανονικές συνθήκες παρατήρησης, άνετη θέση, φωτισμός)

**Μέγιστη χρήσιμη μεγέθυνση με Ο.Μ.**

$$\frac{\text{Διακρ. Ικαν. Ματιού}}{\text{Διακρ. Ικαν. Φωτός}} = \frac{0.25 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.25 \times 10^{-6} \text{ m}}$$

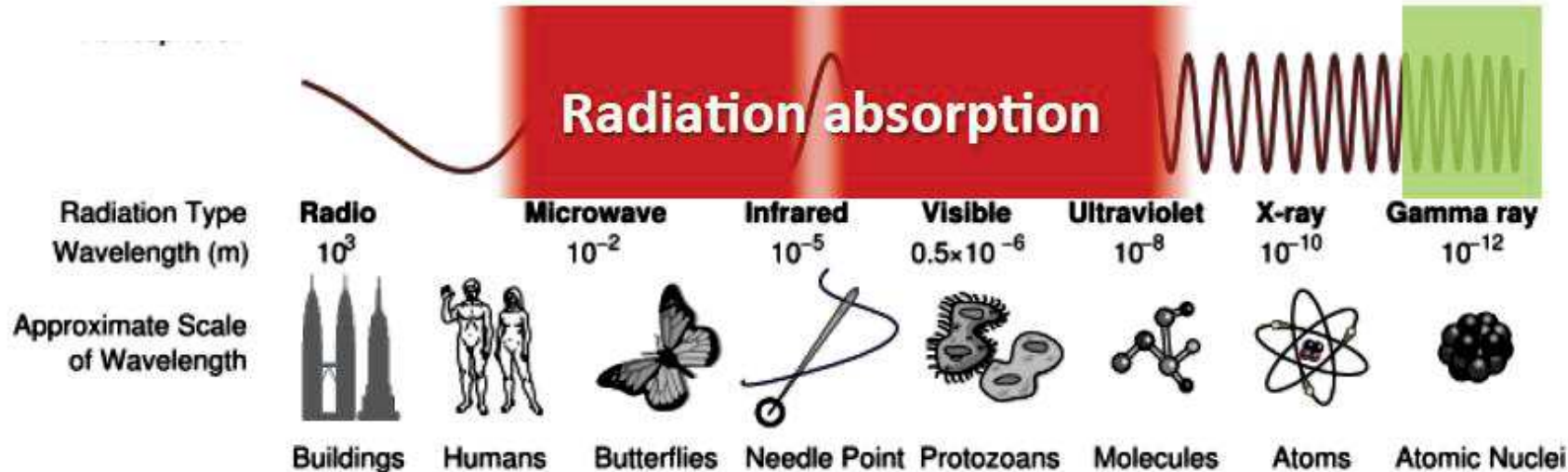
**1.000 φορές**

*Μεγεθύνσεις πέραν του 1000 χαρακτηρίζονται άχρηστες ή κενές μεγεθύνσεις*



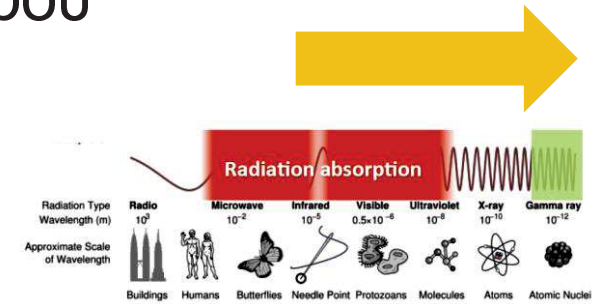
Πως μπορούμε να αυξήσουμε την διακριτική ικανότητα με στόχο την συλλογή περισσότερων πληροφοριών????

## Λύση





## Προβλήματα χρήσης ακτινοβολίας μικρότερου μήκους κύματος



- Το μάτι δεν είναι ευαίσθητο σ' αυτές τις ακτινοβολίες
- Για  $\lambda < UV$  όλες οι ακτινοβολίες δεν ανακλώνται ούτε κάμπτονται για τον σχηματισμό ειδώλων.
- Είναι μεγάλης ενέργειας  $E = h\nu = hc/\lambda$  επομένως ακατάλληλες για π.χ. βιολογικά δείγματα



## Χρήση Ηλεκτρονίων

- Η δέσμη e- διαθλάται και κάμπτεται
- Το  $\lambda$  της δέσμης e- είναι  $\sim 100.000$  φορές μικρότερο του αντίστοιχου της ορατής ( $\lambda_{\text{vis}} = 10^5 \times \lambda_e$ )
- Οι οπτικές αρχές είναι οι ίδιες με το Ο.Μ.



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*.

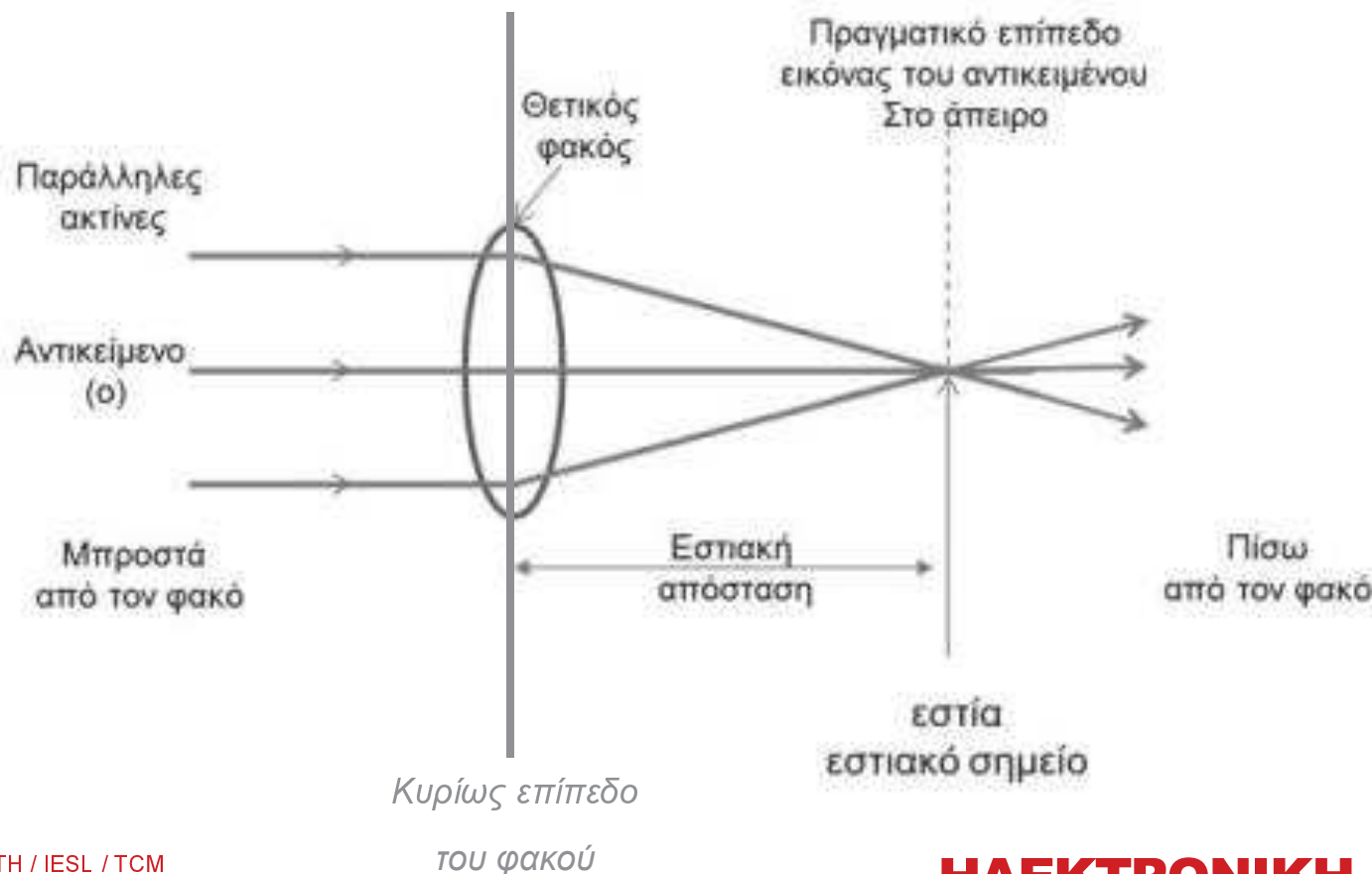


# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Γυάλινοι και Ηλεκτρονικοί Φακοί

Οι **φακοί** χρησιμοποιούνται για να εκτρέψουν μία οπτική ή ηλεκτρονική δέσμη κατά προκαθορισμένο τρόπο.

*Επιτυγχάνεται με ελάττωση της ταχύτητας της δέσμης που τους διαπερνά*



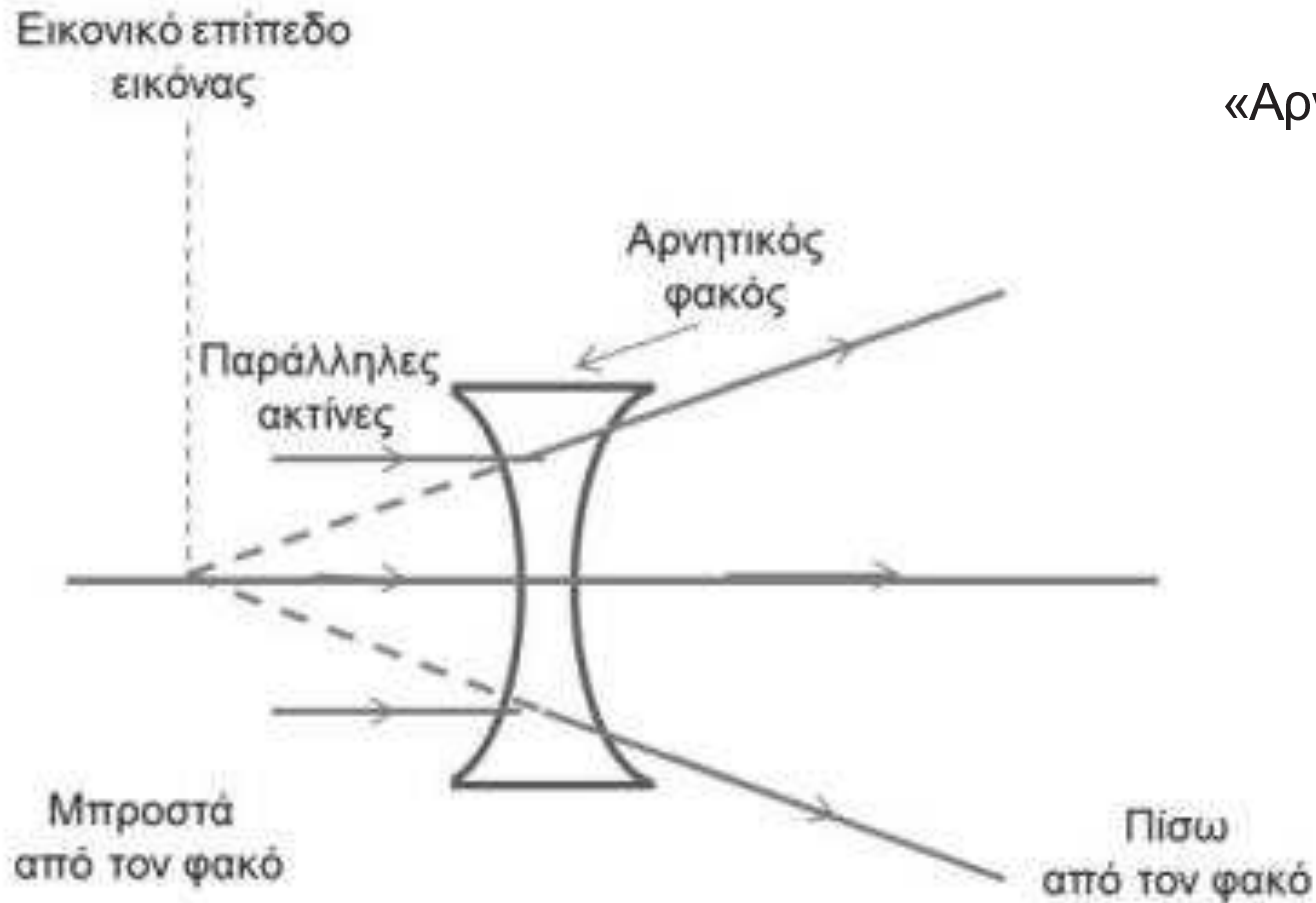
«ΘΕΤΙΚΟΙ» –  
Συγκλίνοντες –  
Αμφίκυρτοι –  
Συμπύκνωσης





# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Γυάλινοι και Ηλεκτρονικοί Φακοί



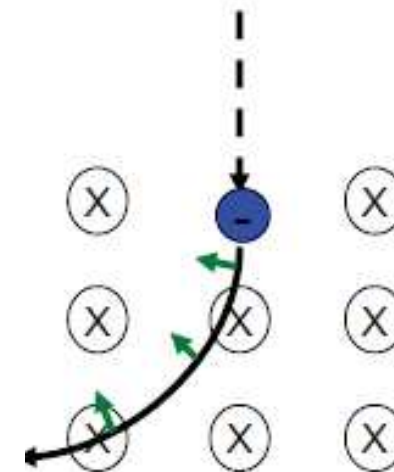
«Αρνητικοί» – Αποκλίνοντες



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Γυάλινοι και Ηλεκτρονικοί Φακοί

- «Θετικοί» – Συγκλίνοντες (**O.M.**, **H.M.**)
- «Αρνητικοί» – Αποκλίνοντες (**OM**)
- Οι μαγνητικοί φακοί δεν αλλάζουν την ταχύτητα της δέσμης ηλεκτρονίων σε αντίθεση με τους οπτικούς.



Lorentz force

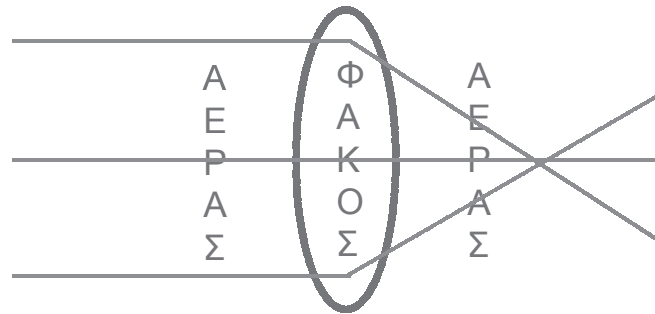
$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \otimes \mathbf{B}$$



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Γυάλινοι και Ηλεκτρονικοί Φακοί

- Στους **οπτικούς φακούς** η αλλαγή της πορείας της οπτικής δέσμης γίνεται στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο μέσων (αέρα/φακού, φακού/αέρα), ενώ στους **μαγνητικούς φακούς** η δύναμη αυτή επιδρά καθόλη την διάρκεια που το ηλεκτρόνιο βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

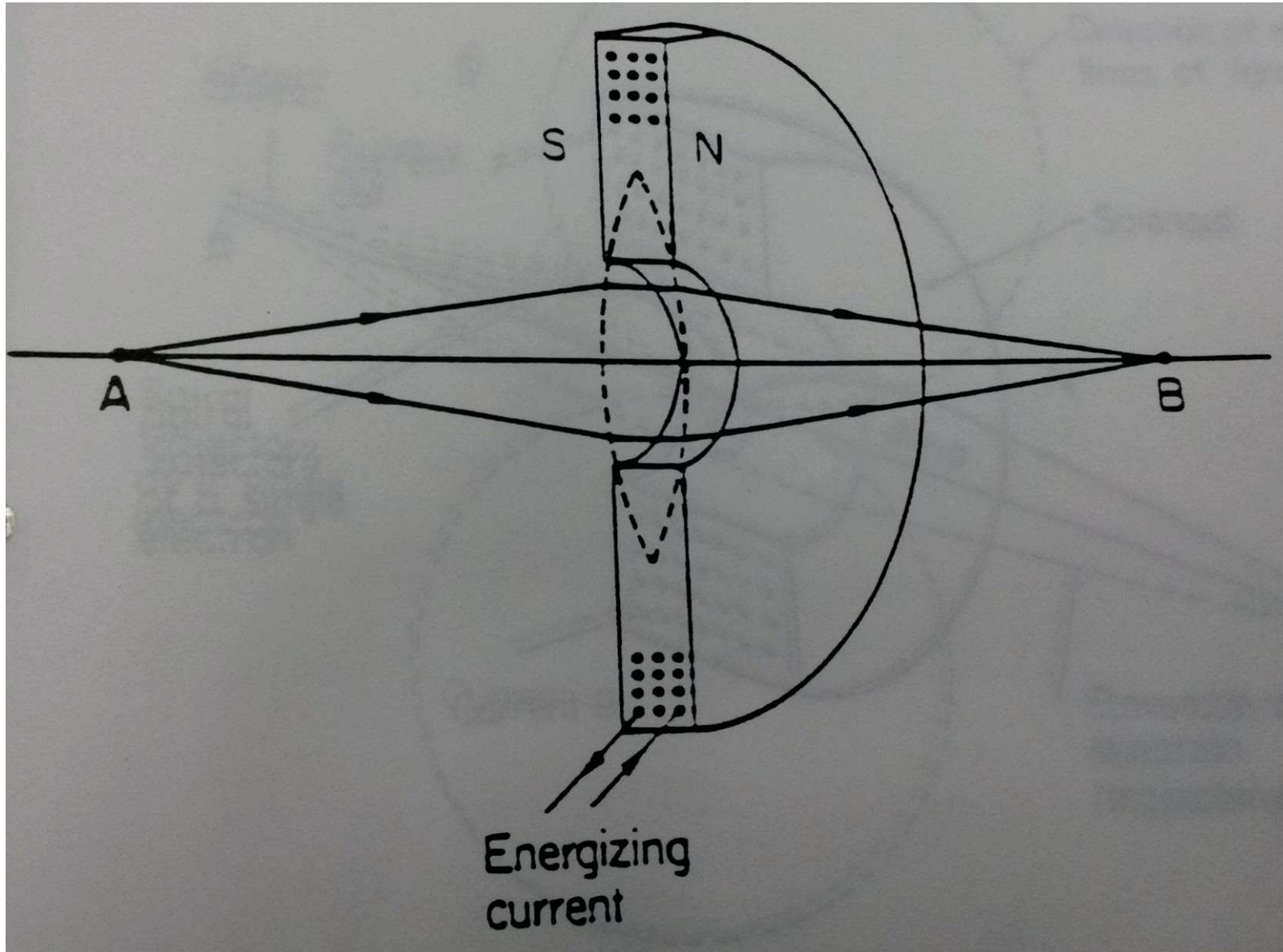


- Η εκτροπή είναι συνεχής με σπειροειδή διαδρομή και όχι απότομη



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

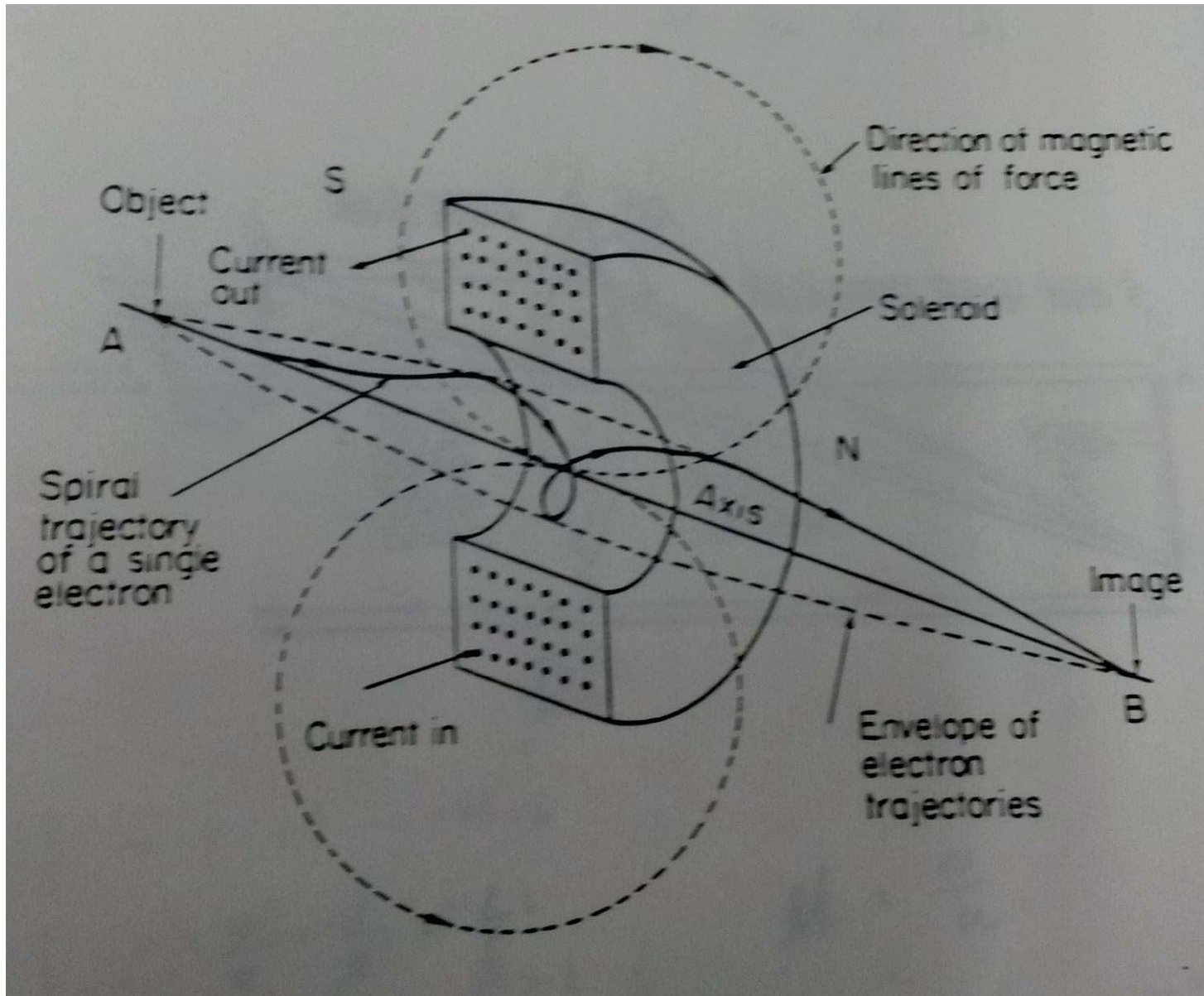
## Μαγνητικόί Φακοί





# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Μαγνητικοί Φακοί

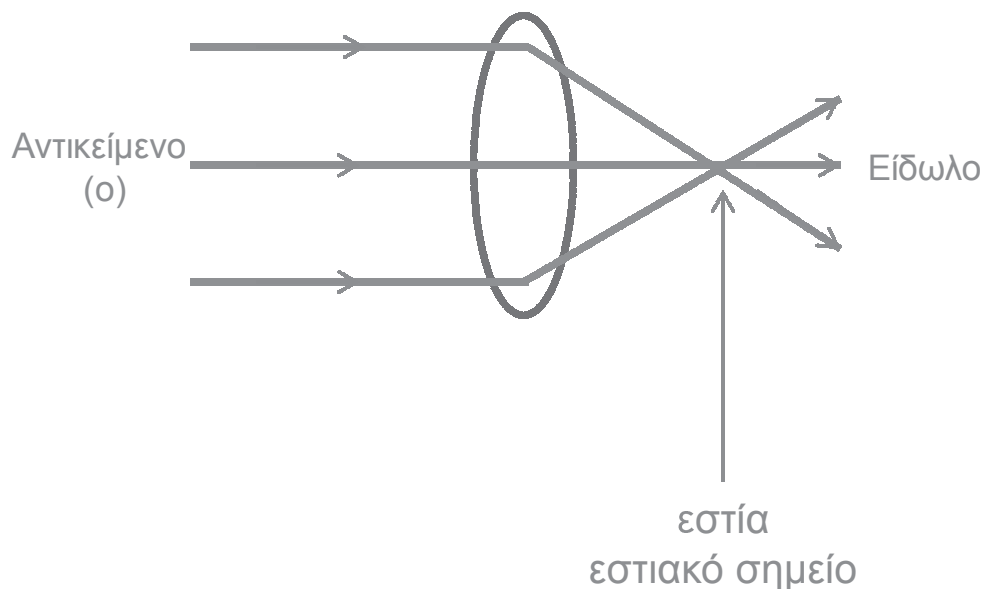






Η μέθοδος κατασκευής της διαδρομής ακτίνων υπακούει στις εξής δύο αρχές:

- Όλες οι ακτίνες που εισέρχονται μέσα στον φακό παράλληλα εξέρχονται διερχόμενες από ένα σημείο του άξονα που λέγεται **εστία**



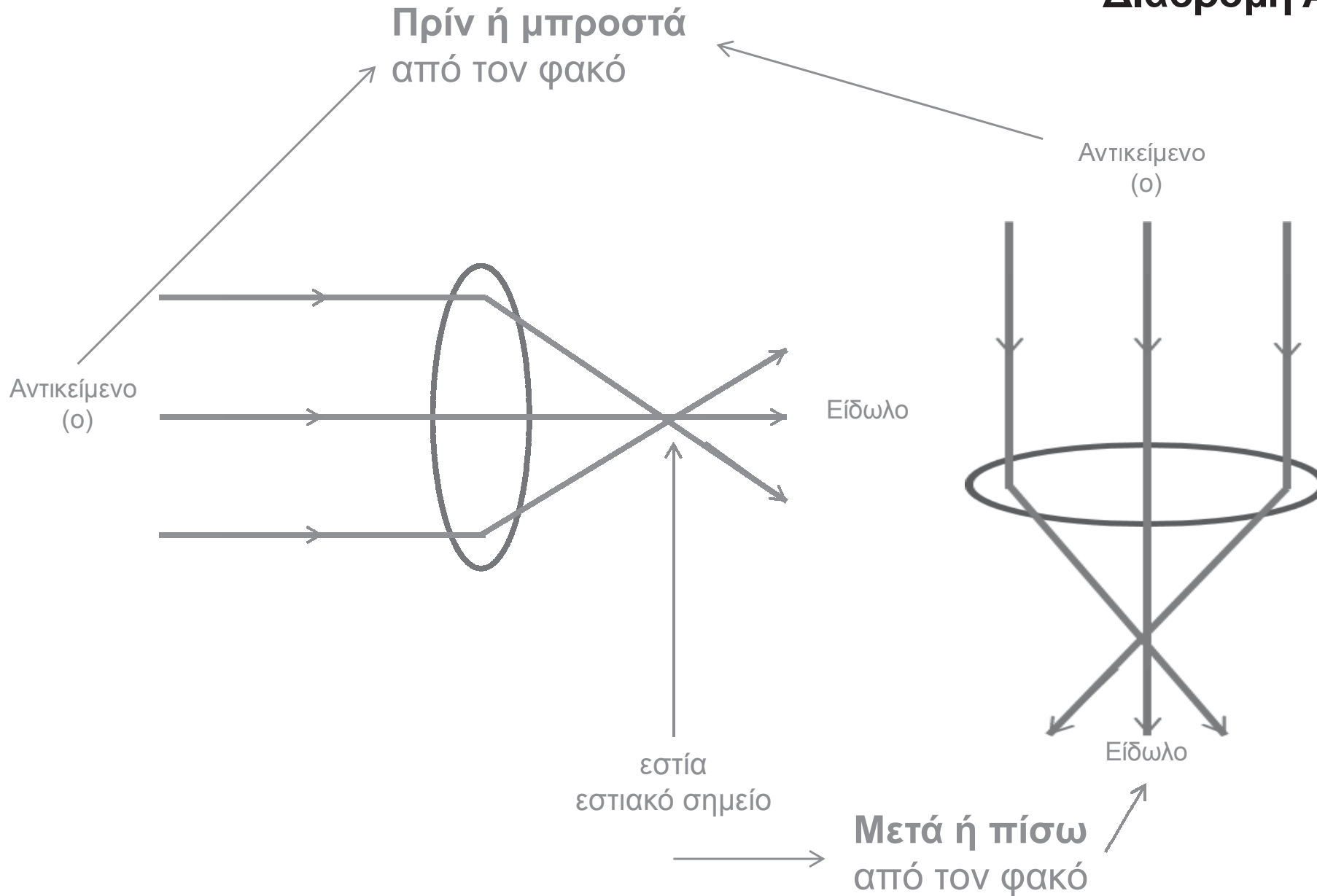
- Όλες οι ακτίνες που εισέρχονται από το γεωμετρικό κέντρο του φακού, εξέρχονται στην ίδια διεύθυνση (**δεν κάμπτονται**) ανεξάρτητα από την γωνία με την οποία προσπίπτουν στον φακό.





# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

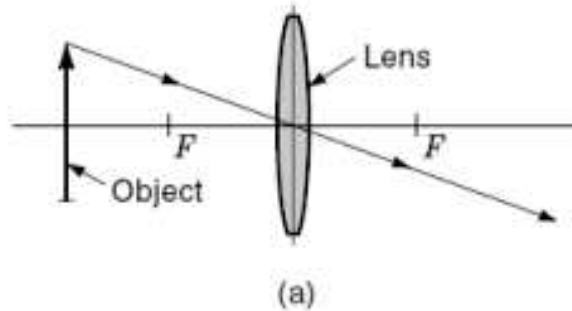
## Διαδρομή Ακτίνων



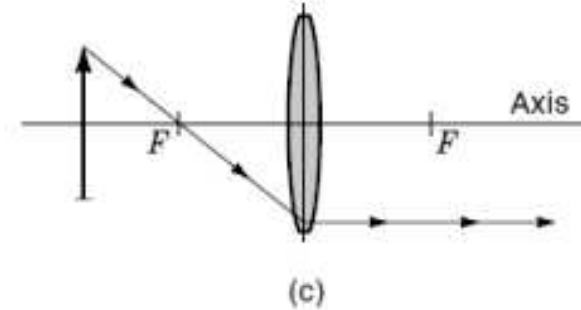


# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

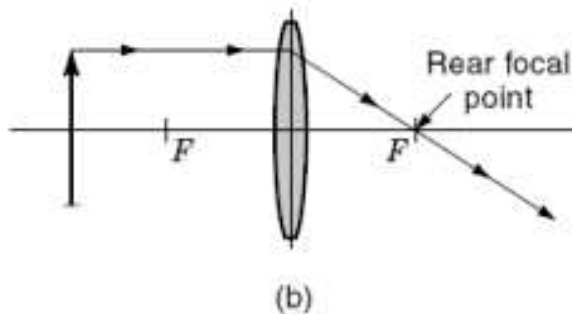
## Διαδρομή Ακτίνων



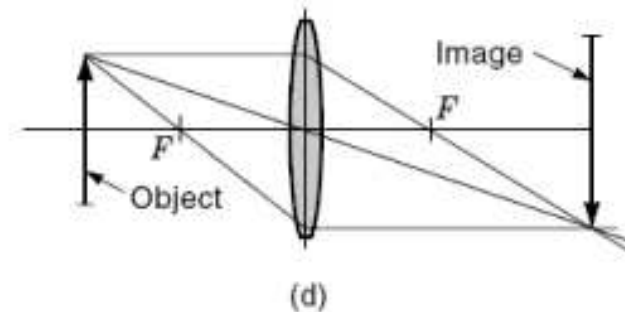
(a) Ακτίνα που περνά από το οπτικό κέντρο δεν διαθλάται



(c) Ακτίνα που διέρχεται από το εμπρός εστιακό κέντρο διαθλάται παράλληλα με τον οπτικό άξονα



(b) Ακτίνα που προσπίπτει παράλληλα με τον οπτικό άξονα διαθλάται και περνά από το πίσω εστιακό κέντρο

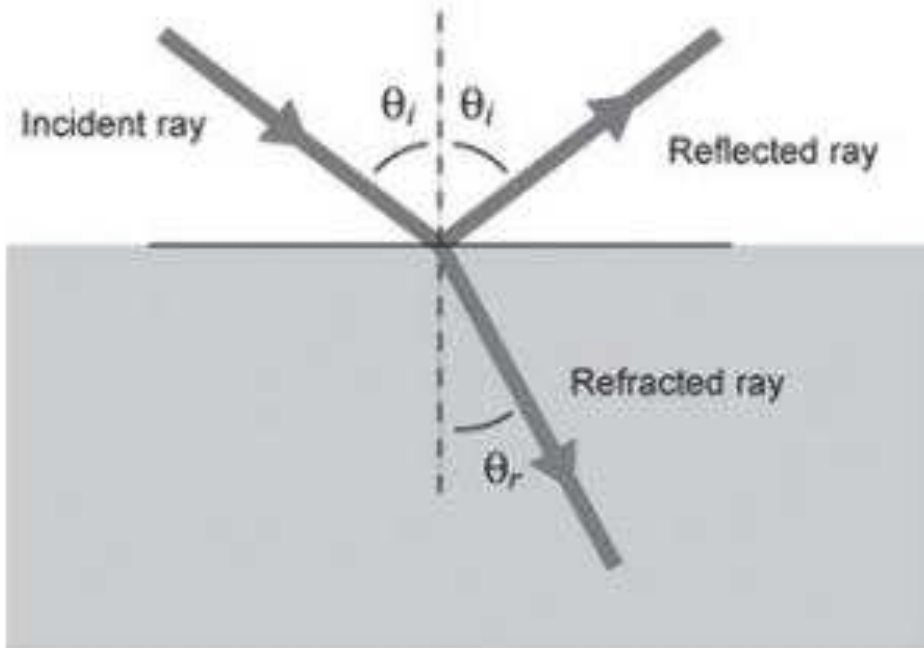


(d) Το επίπεδο του ειδώλου (εικόνας) καθορίζεται από την τομή δύο από των τριών παραπάνω ακτινών



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Εκτροπές Ακτίνων



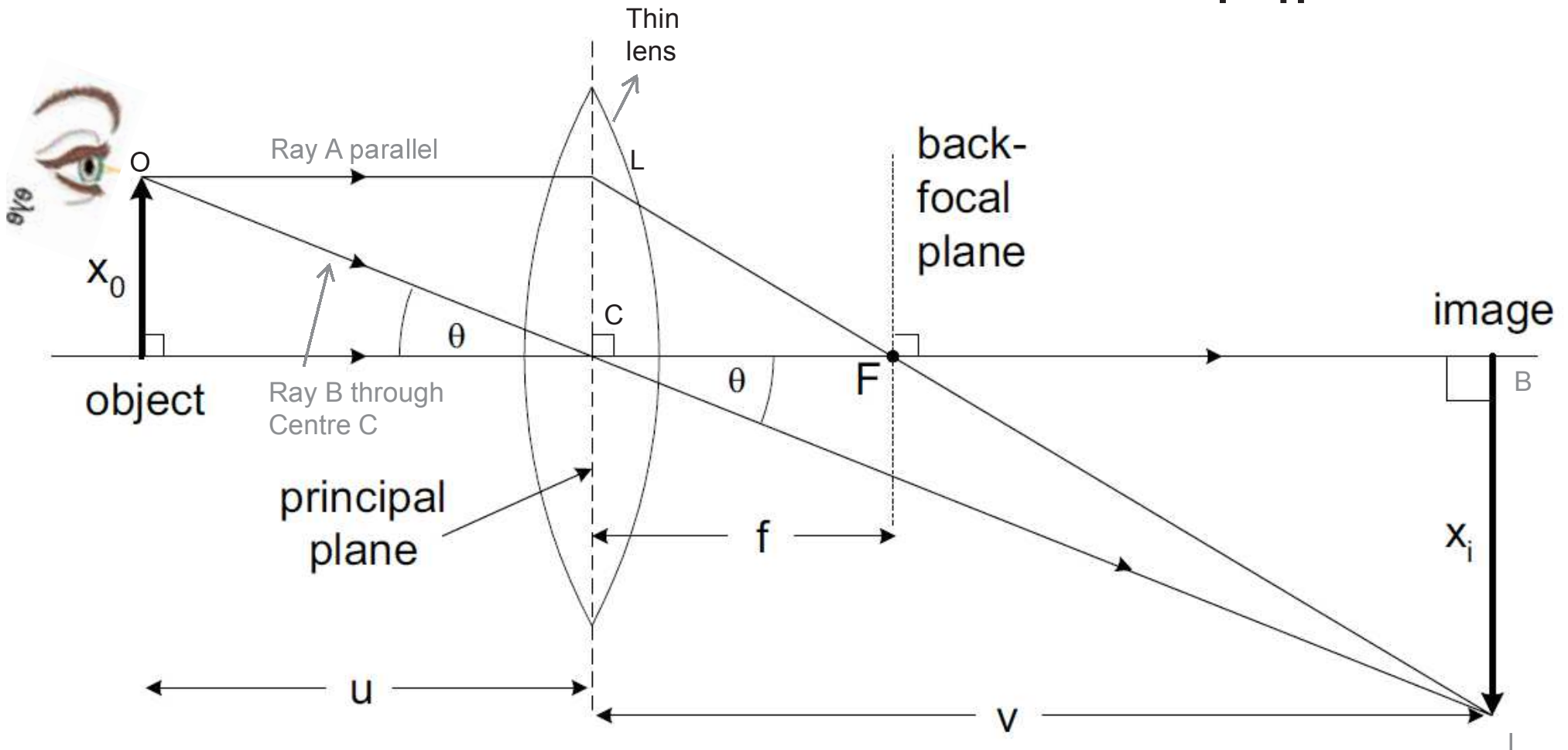
**Ανάκλαση (reflection):** ακτίνα φωτός η οποία προσπίπτει σε επιφάνεια, αλλάζει πορεία αλλά δεν διέρχεται μέσα από αυτό. Η γωνία ανάκλασης ισούται με την γωνία πρόσπτωσης

**Διάθλαση (refraction):** ακτίνα φωτός η οποία προσπίπτει σε επιφάνεια, αλλάζει πορεία και διέρχεται μέσα από αυτό. Η γωνία διάθλασης εξαρτάται από το είδος υλικού



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

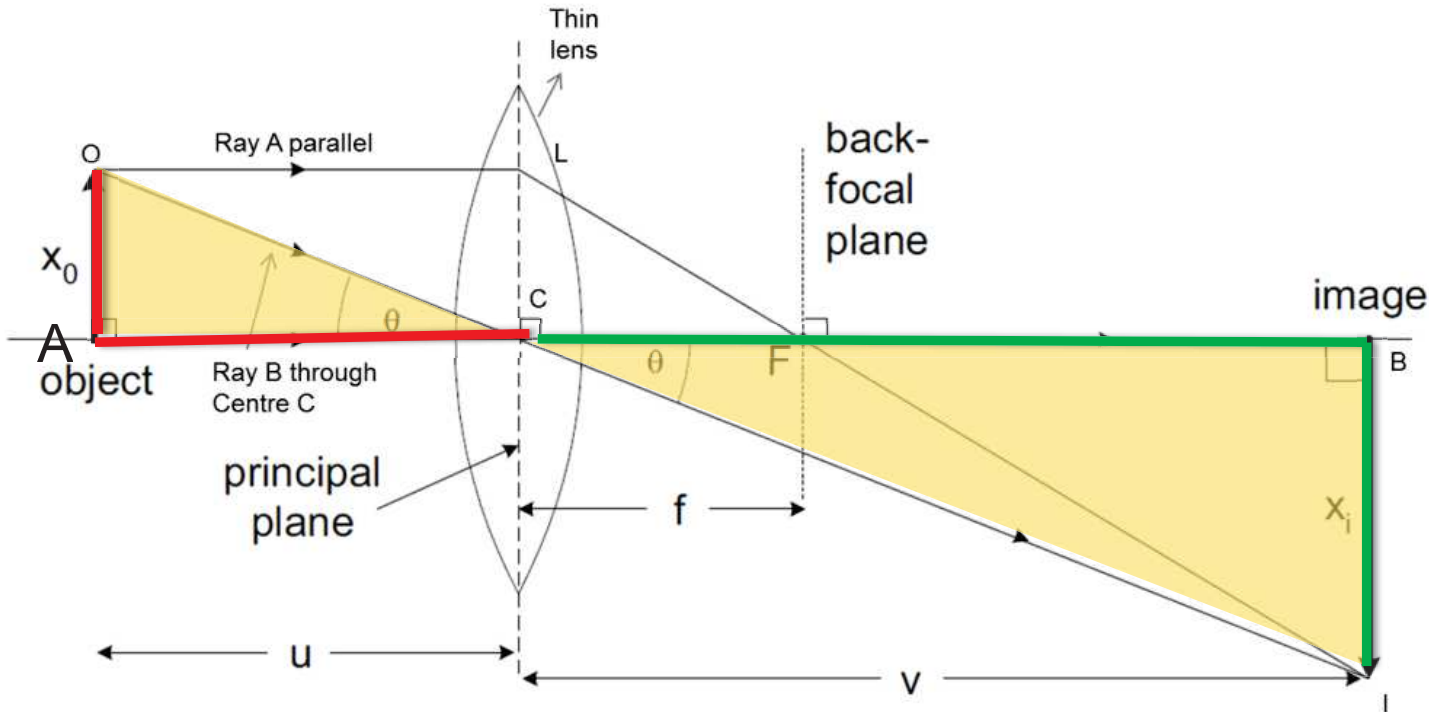
## Πραγματικά Είδωλα





# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Πραγματικά Είδωλα

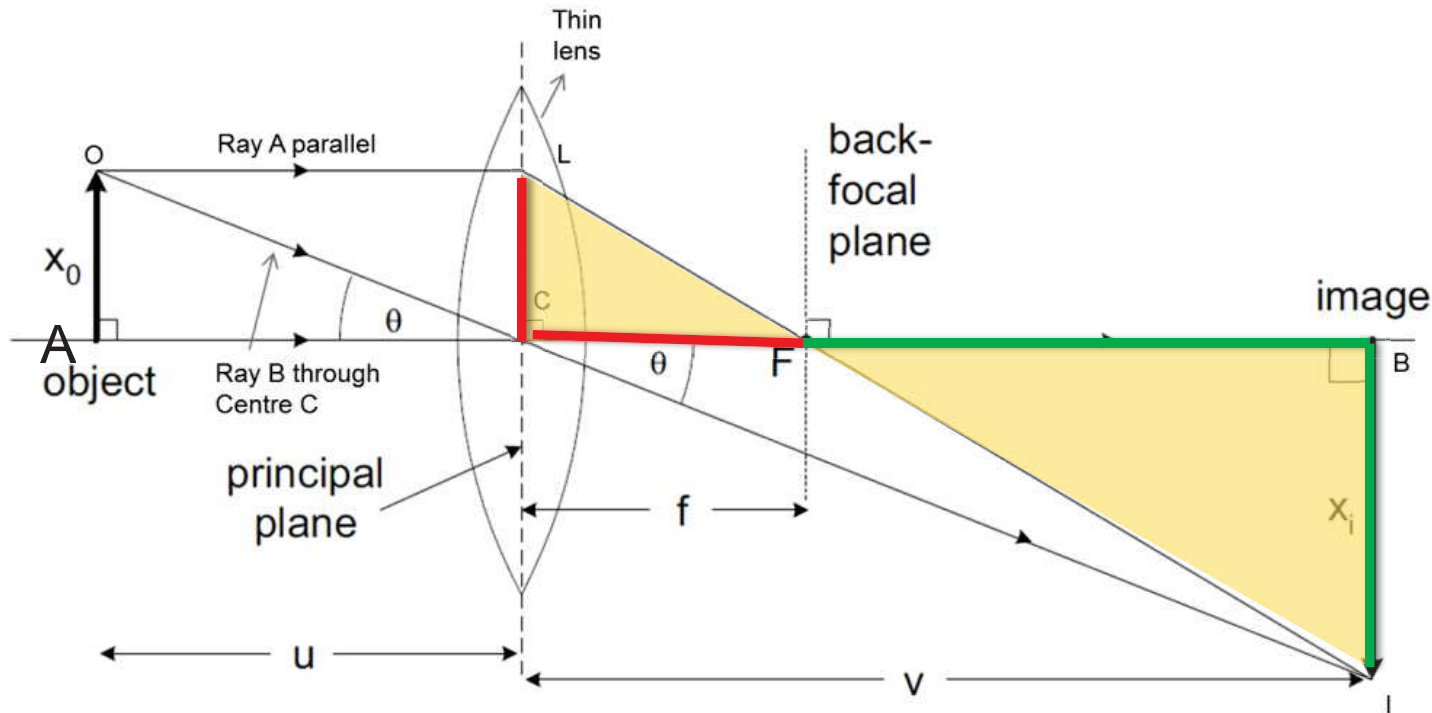


$$\triangle AOC + \triangle CBI \Rightarrow \frac{O}{-u} = \frac{I}{v} \Rightarrow O = -\frac{u}{v} I$$



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Πραγματικά Είδηλα



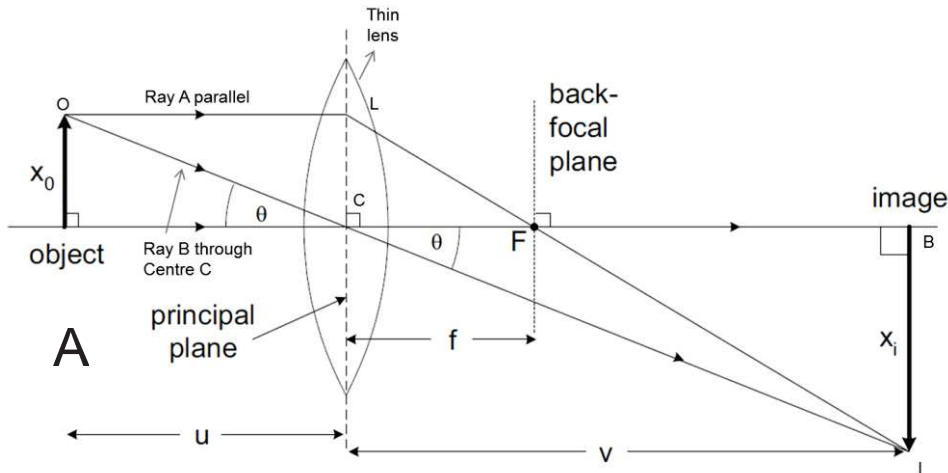
$$C \overset{\Delta}{D} F + F \overset{\Delta}{B} I \Rightarrow \frac{O}{f} = \frac{I}{v-f}$$





# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Πραγματικά Είδωλα



$$\triangle AOC + \triangle CBI \Rightarrow \frac{O}{-u} = \frac{I}{v} \Rightarrow O = -\frac{u}{v}I$$

$$\triangle CDF + \triangle FBI \Rightarrow \frac{O}{f} = \frac{I}{v-f}$$

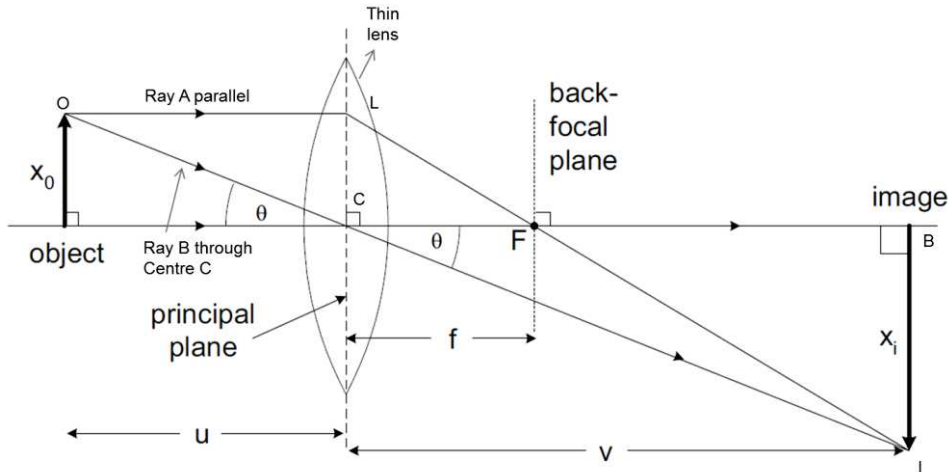
$$-\frac{uI}{fv} = \frac{I}{v-f} \Rightarrow -\frac{u}{f} = \frac{v}{v-f} \Rightarrow -\frac{f}{u} = 1 - \frac{f}{v} \Rightarrow f \left( \frac{1}{v} - \frac{1}{u} \right) = 1 \Rightarrow \frac{1}{v} - \frac{1}{u} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{u} = \frac{1}{f}, \quad u < 0$$



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Πραγματικά Είδωλα



$$M = \frac{v}{u}$$

1. αν  $u = v = 2f$  τότε  $M = 1$  Είδωλο ίσο με αντικείμενο

2. αν  $u > 2f$   $M < 1$  Είδωλο μικρότερο αντικειμένου

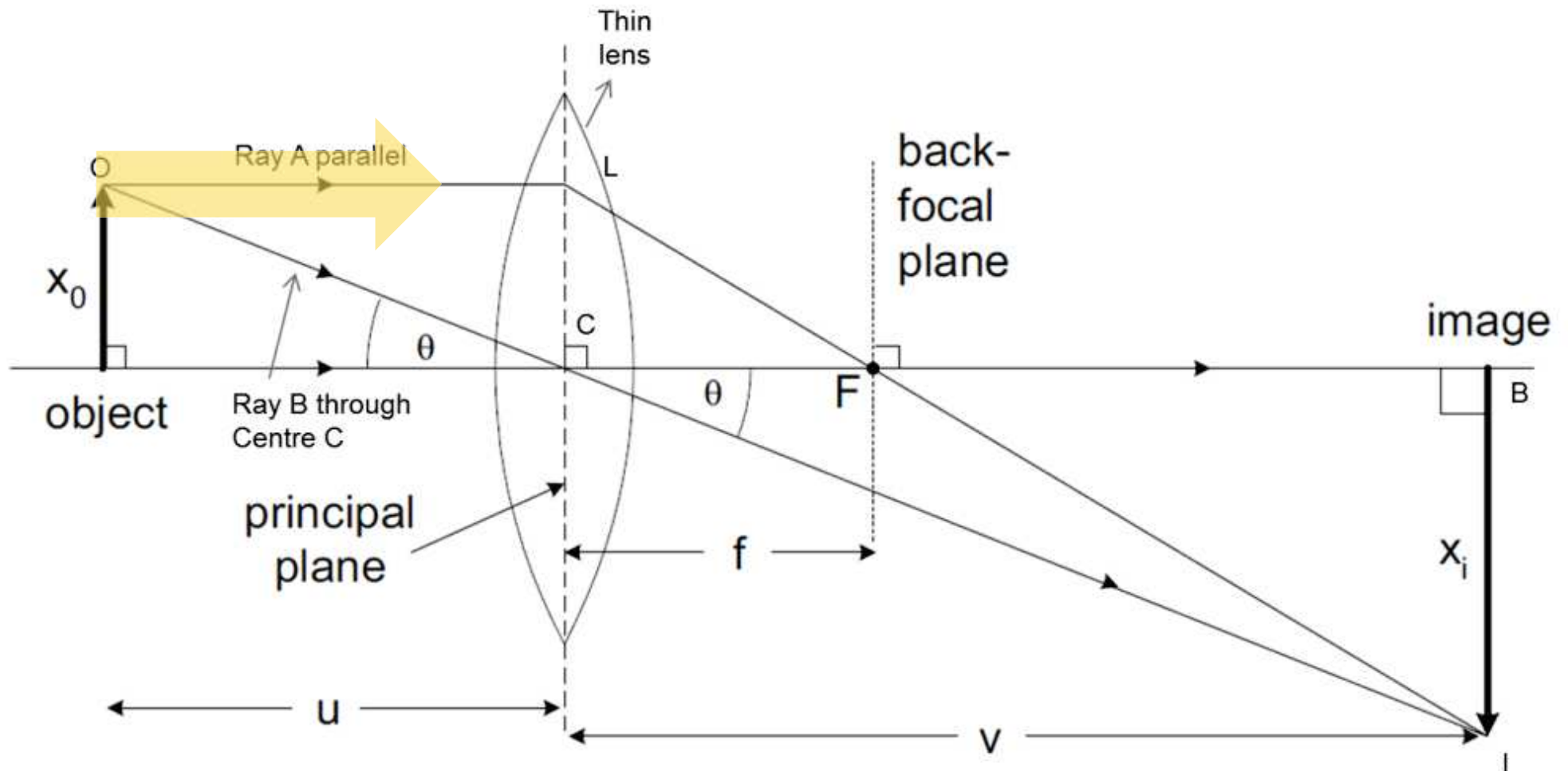
3. αν  $f < u < 2f$   $M > 1$  Είδωλο μεγαλύτερο αντικειμένου και ο φακός μεγεθύνει

Θεωρητικά, πολύ μεγάλες μεγεθύνσεις μπορούν να επιτευχθούν με ένα απλό συγκλίνοντα φακό σε τεράστιες αποστάσεις απεικόνισης ειδώλου



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

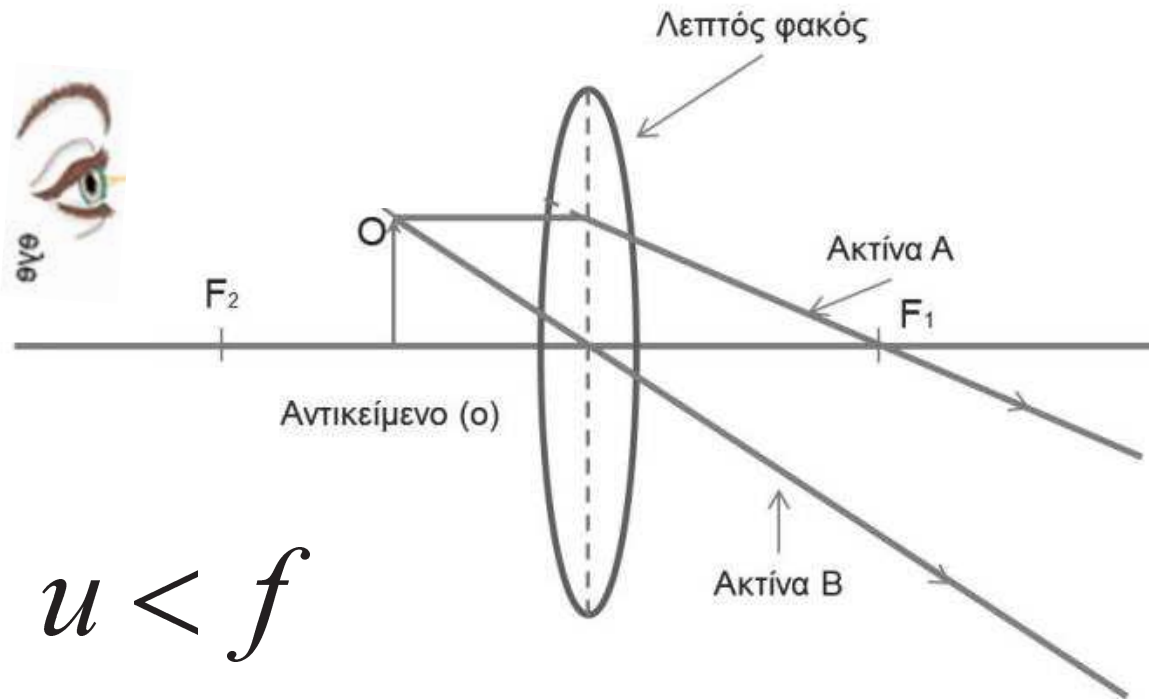
## Πραγματικά και Φανταστικά Είδωλα





# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Φανταστικά Είδωλα

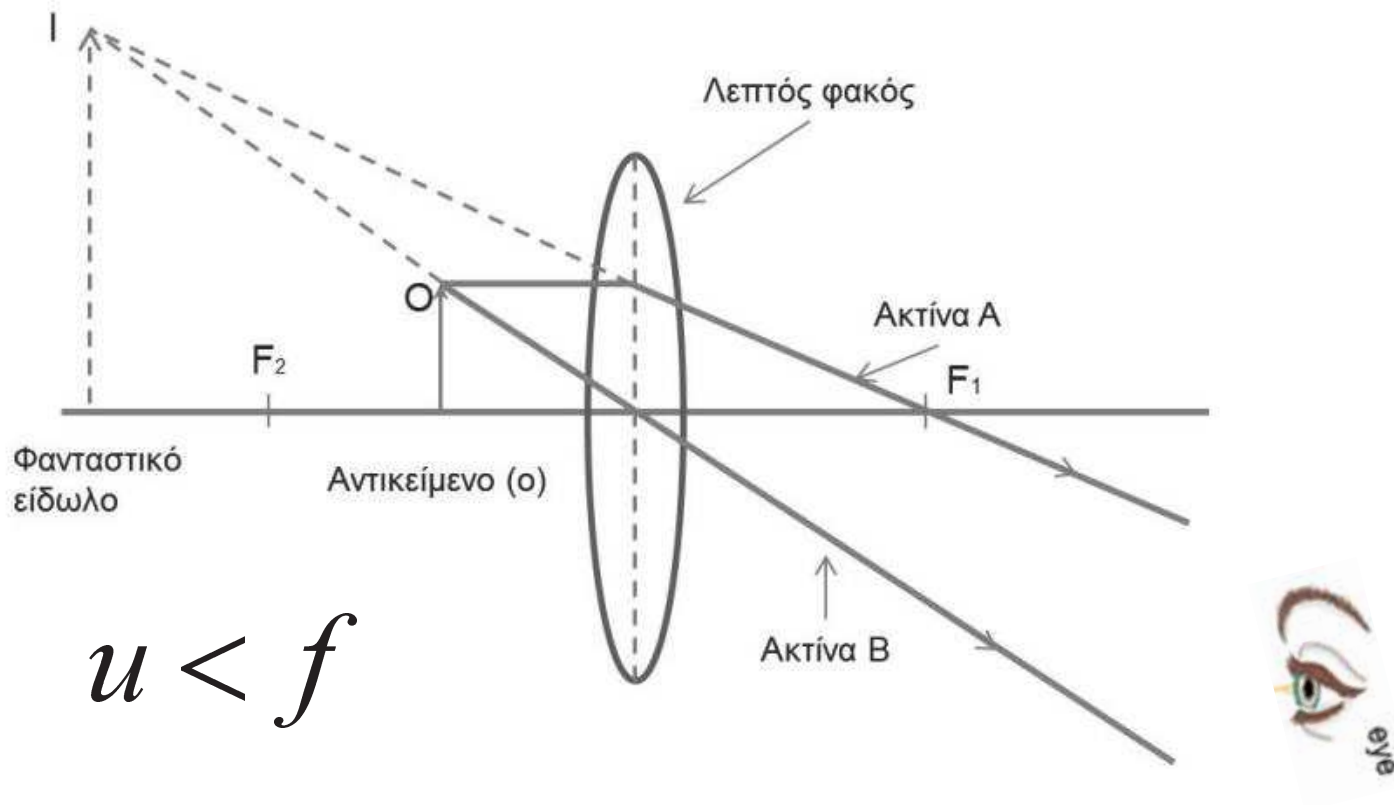


- Οι ακτίνες αποκλίνουν και δεν μπορεί να σχηματισθεί πραγματικό είδωλο



# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Φανταστικά Είδωλα



*Αποτελεί τον ενδιάμεσο φακό αρκετών Η.Μ.*

*που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της μεγέθυνσης*



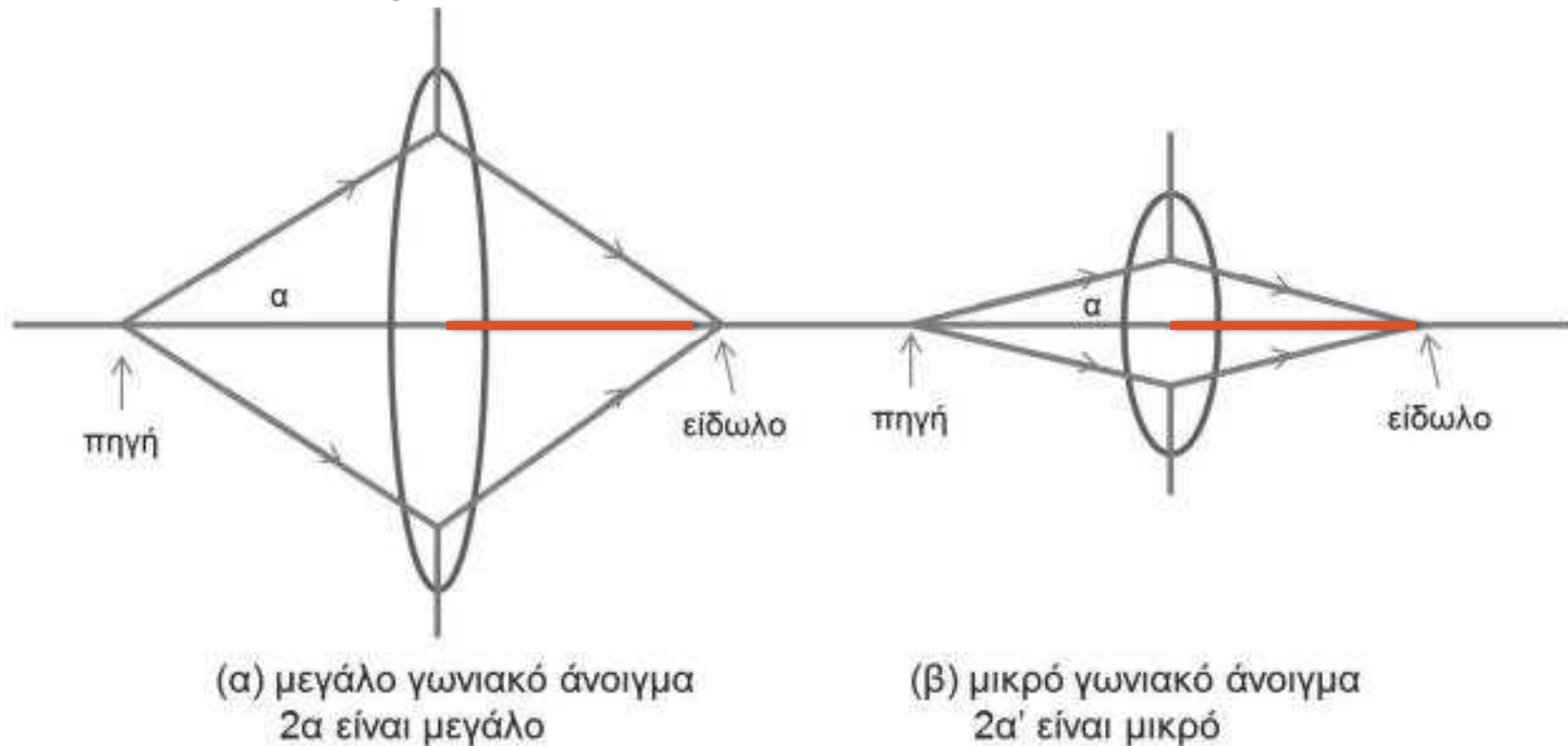
# ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΟΠΤΙΚΗ

## Χαρακτηριστικές Ιδιότητες Φακών

### Γωνιακό Άνοιγμα και Εστιακό μήκος

Το γωνιακό άνοιγμα βοηθάει στο να συλλεχθούν περισσότερες πληροφορίες για ένα αντικείμενο

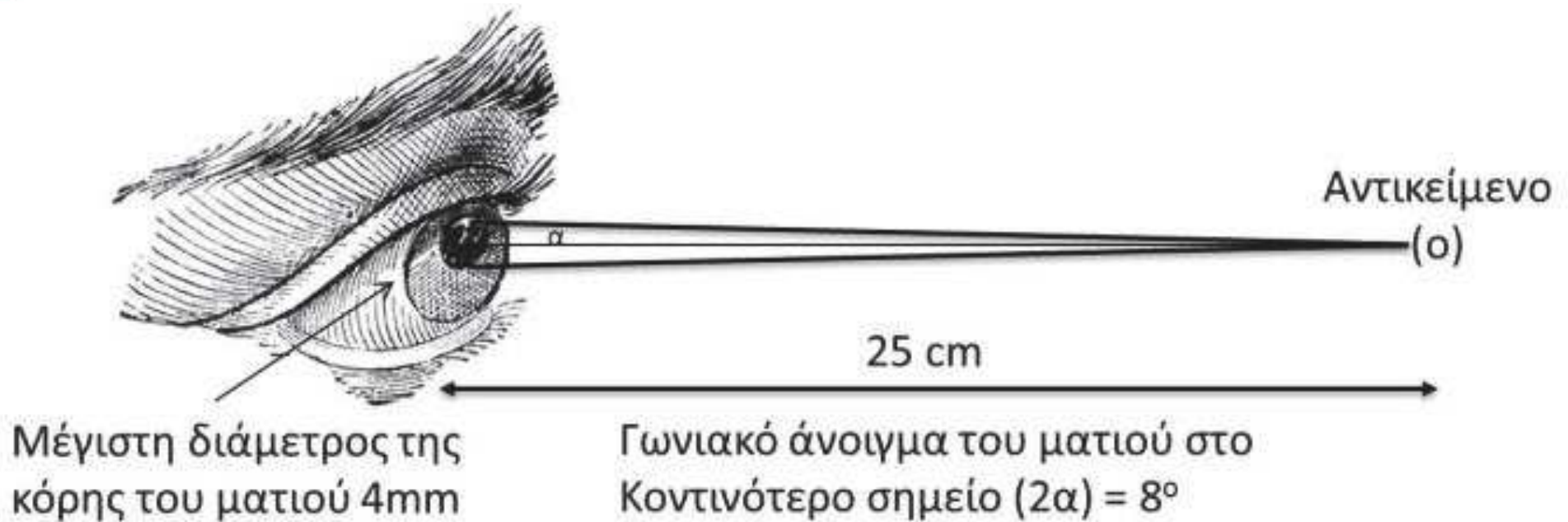
### Επίδραση Διαφράγματος στο γωνιακό άνοιγμα







# ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ



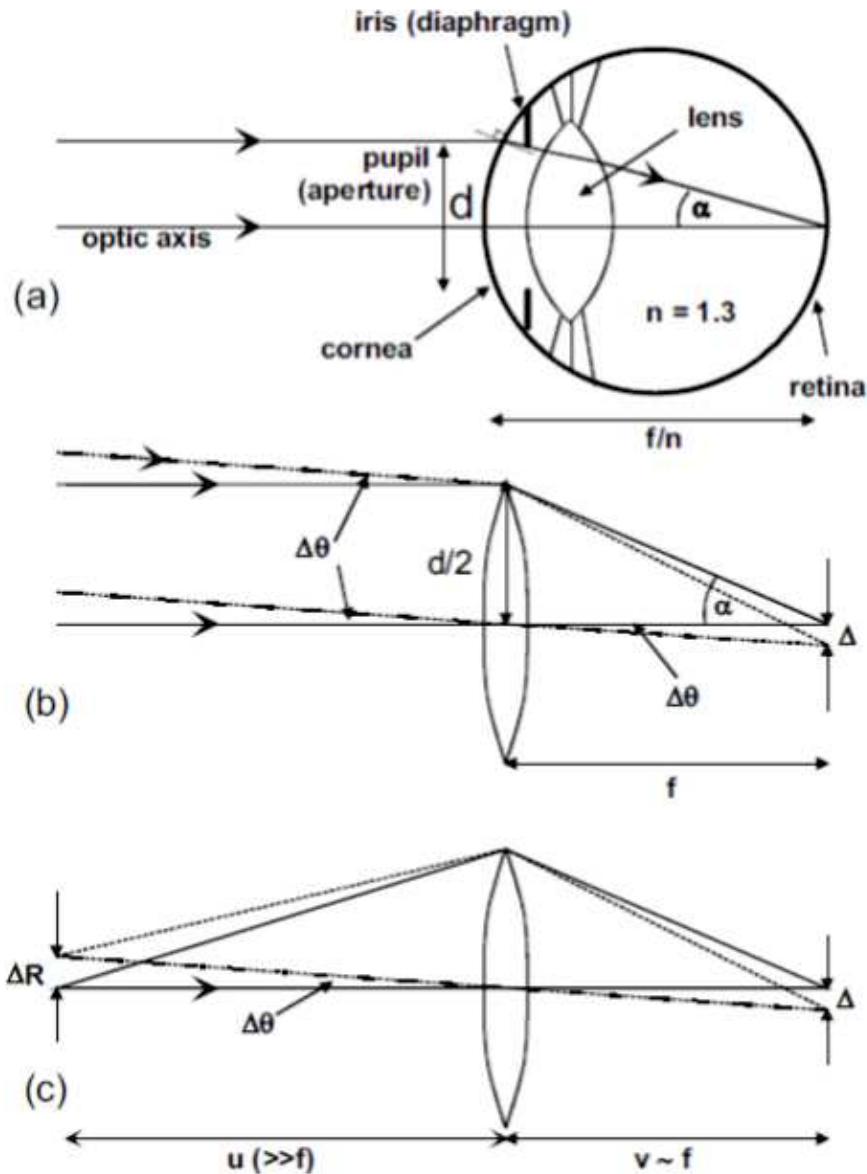
- Καλύτερες συνθήκες λειτουργίας του επιτυγχάνονται στα 25cm
- Γωνία εισόδου οπτικών πληροφοριών είναι μόνο  $8^\circ$  (Σε Ο.Μ. με αντικειμενικό φακό έχει μία γωνία εισόδου  $\sim 175^\circ$  )
- Μικρότερο μέγεθος πληροφορίας που μπορεί να ερεθίσει τα οπτικά νεύρα είναι  $\sim 0.25\mu\text{m}$  (κωνικά κύτταρα διάστασης  $\sim 2.5\mu\text{m}$ )



# ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟΥ

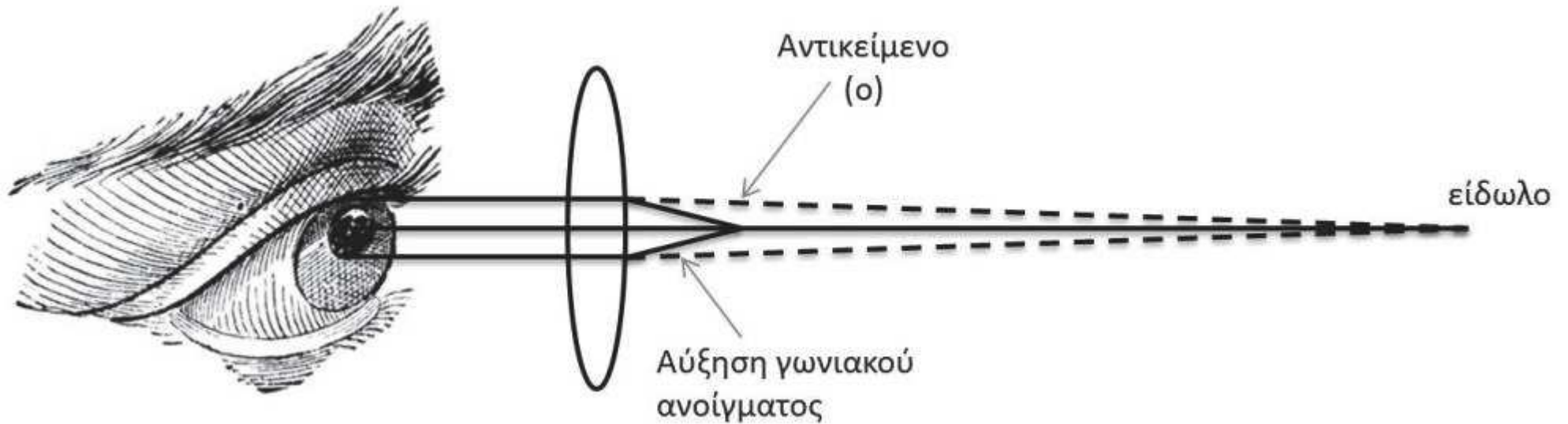
## Όρια Ανθρώπινου Ματιού

- Δύο φωτεινές ακτίνες εστιάζουν πάνω στον αμφιβληστροειδή
- Διάγραμμα ακτίνων ενός λεπτού φακού για ένα μακρινό αντικείμενο, παράλληλες ακτίνες που έρχονται και σχηματίζουν μια εικόνα (αέρα) σε μια απόσταση  $f$
- Διάγραμμα ακτίνων για ένα κοντινό αντικείμενο





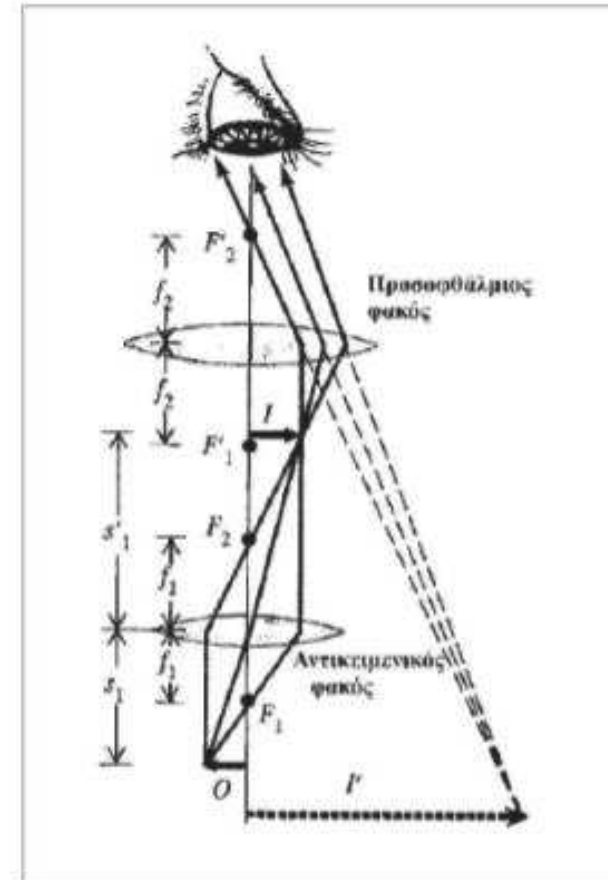
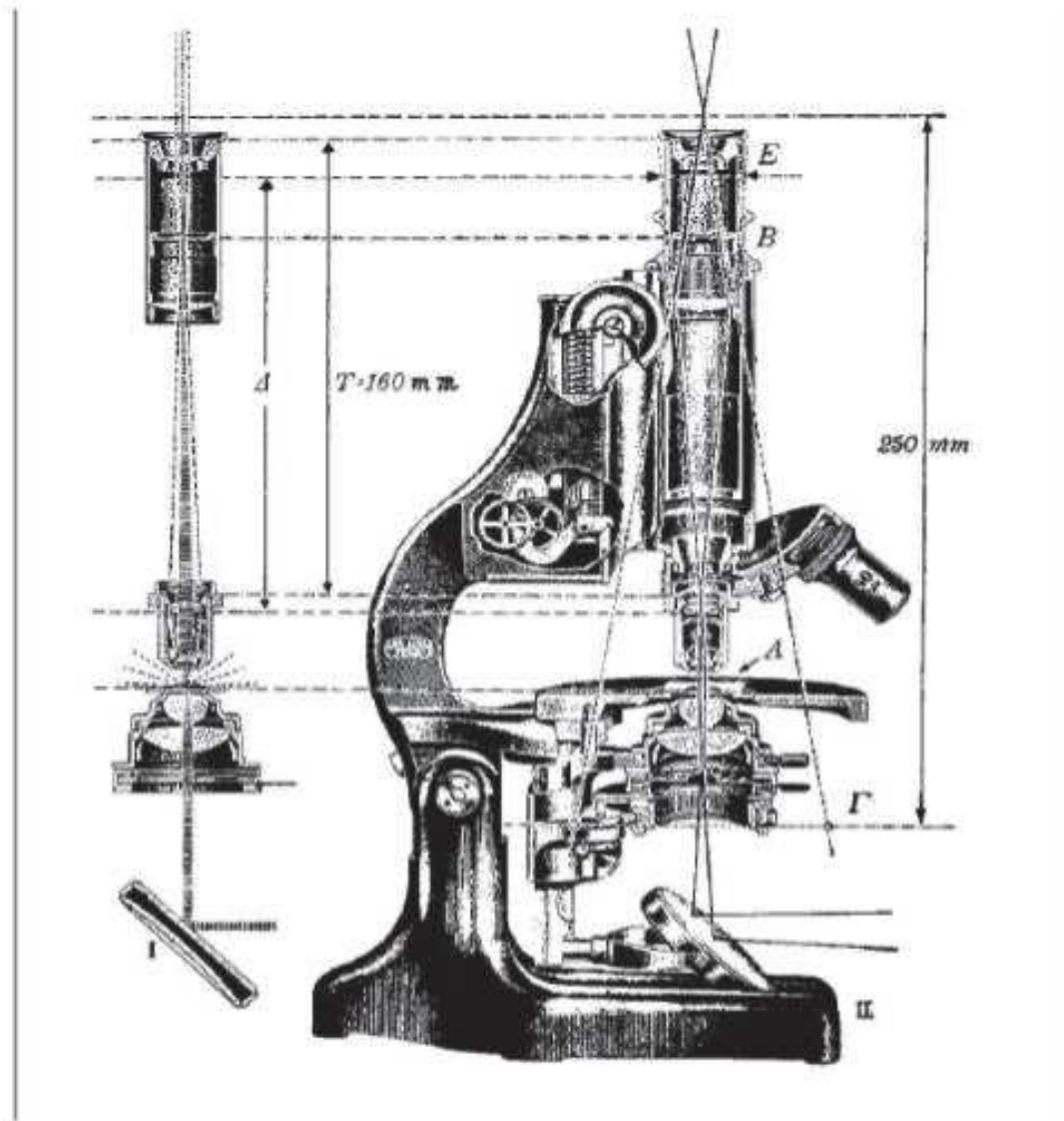
# ΑΠΛΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ



- Το αντικείμενο είναι μεγενθυμένο και με μεγαλύτερο γωνιακό άνοιγμα οπτικών ακτίνων, μεγαλύτερη  $\Delta.I.$



# ΑΠΛΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ





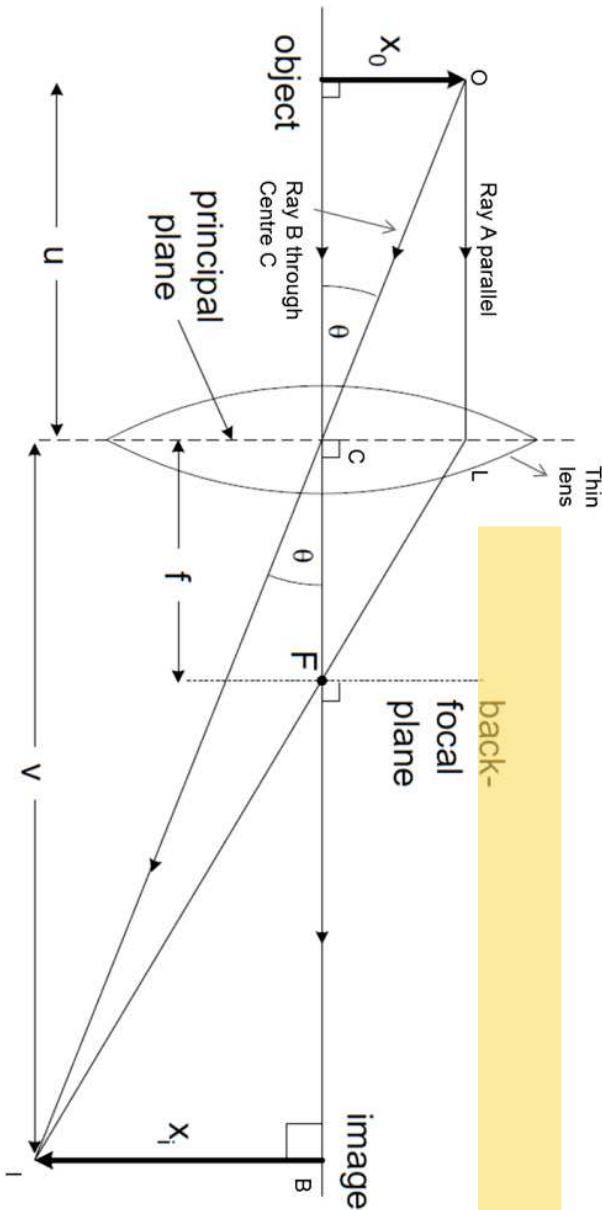
# ΣΥΝΘΕΤΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

- Θεωρητικά μπορούν να επιτευχθούν μεγάλες μεγεθύνσεις με έναν συγκεντρωτικό φακό



## Προβλήματα

- Τεράστιο μικροσκόπιο σε διαστάσεις λόγω μεγάλης απόστασης φακού – ειδώλου
- Το γωνιακό άνοιγμα θα ήταν πολύ μικρό (μικρό πλήθος πληροφοριών)

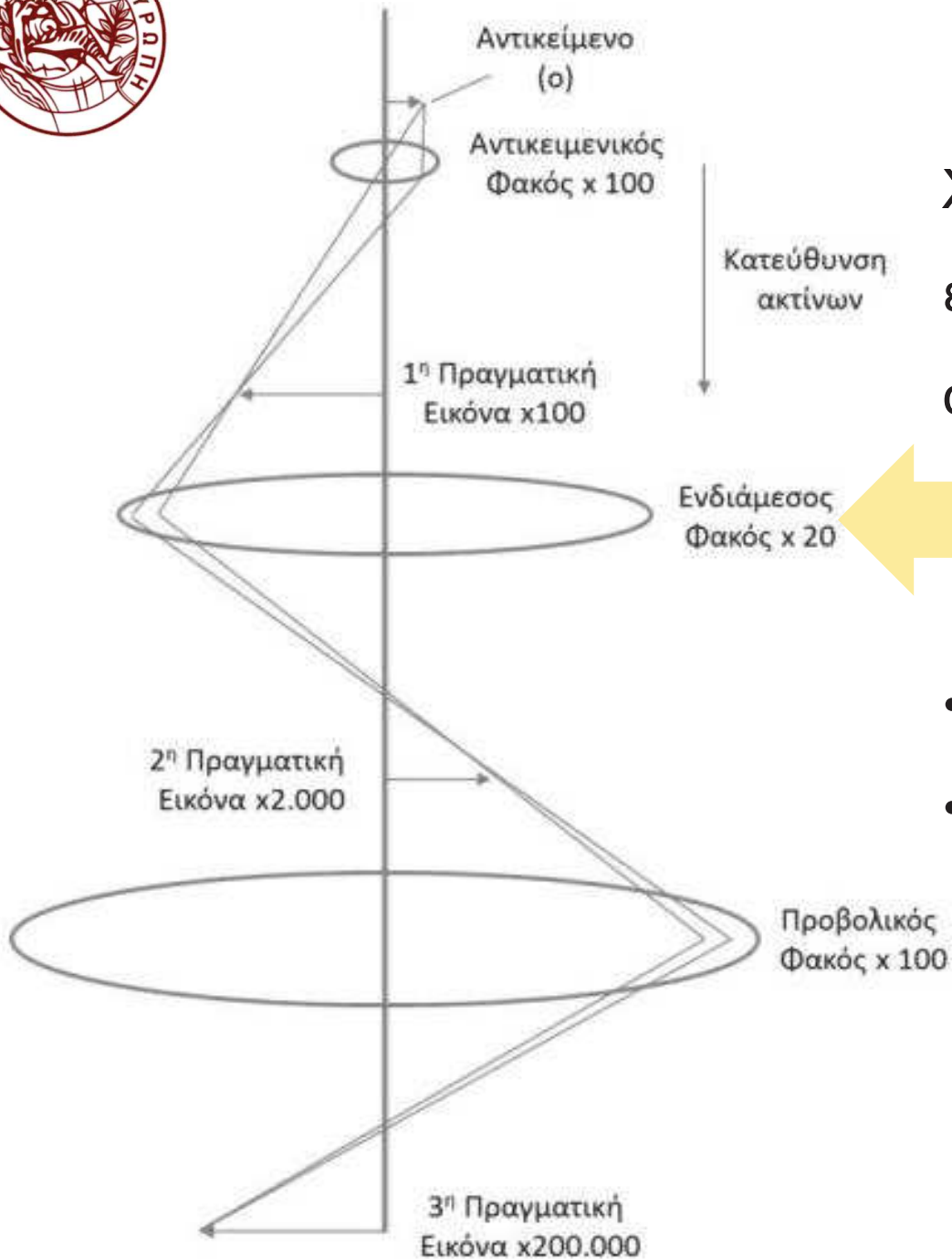






# ΣΥΝΘΕΤΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

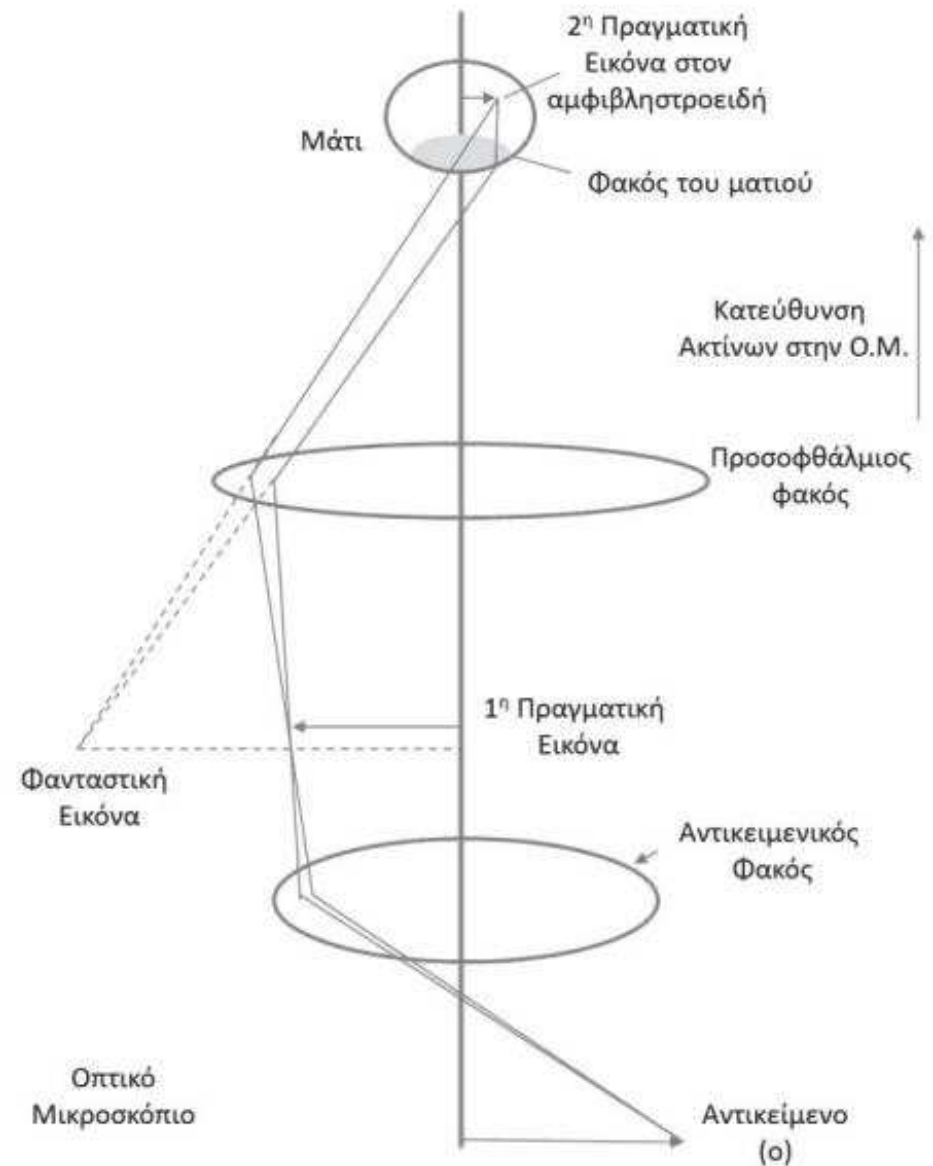
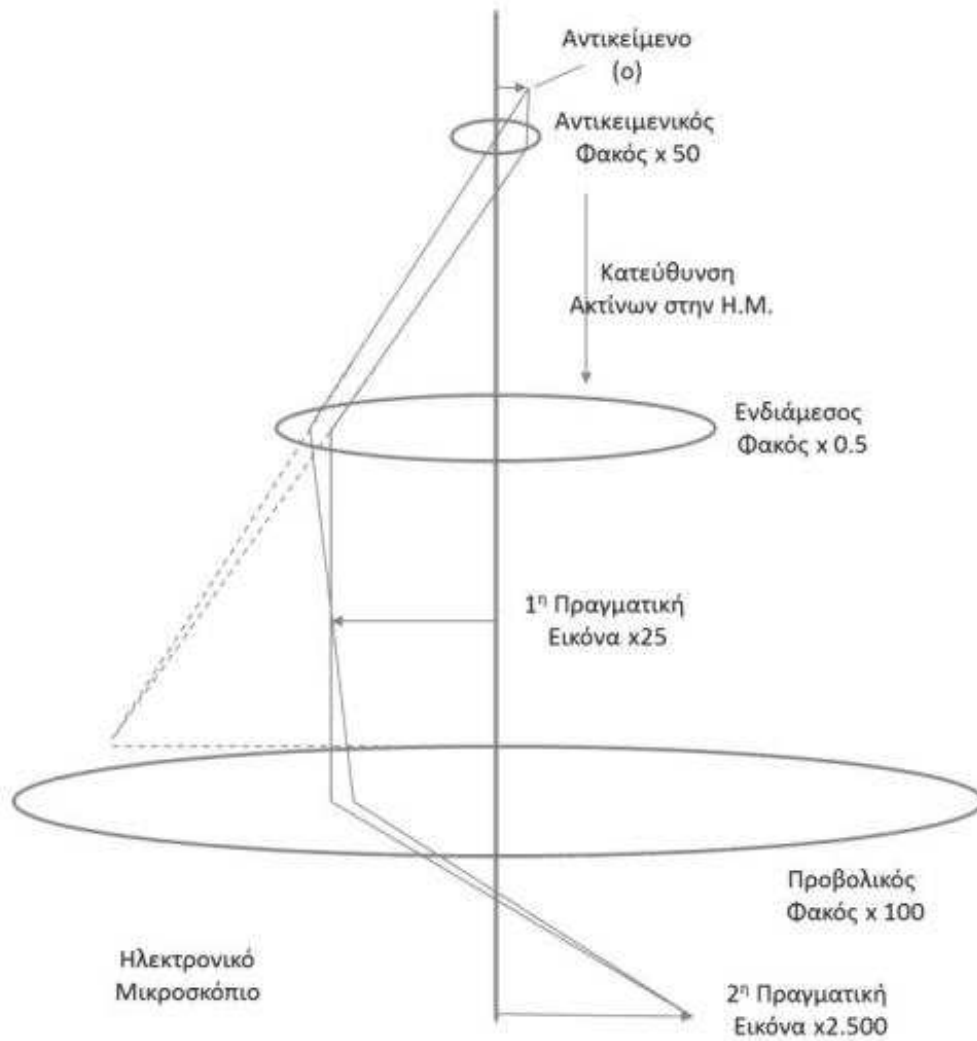
Χρήση ενδιάμεσου φακού για  
εξάλειψη του εμποδίου της  
απόστασης



- Επιπλέον βαθμίδα μεγέθυνσης
- Τελική μεγέθυνση είναι το γινόμενο των μεγεθύνσεων των φακών



# ΣΥΝΘΕΤΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ







# ΣΥΝΘΕΤΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ

## Μέρη Οπτικού Μικροσκοπίου

