

## 7α Γεωμετρική οπτική - οπτικά όργανα

- Εισαγωγή –ορισμοί
- Φύση του φωτός
- Πηγές φωτός
- Δείκτης διάθλασης
- Ανάκλαση
- Δημιουργία ειδώλων από κάτοπτρα

Μαρία Κασικίνη  
katsiki@auth.gr  
users.auth.gr/katsiki

## Η φύση του φωτός

Το φως είναι  
δέσμη  
σωματιδίων

Το φως είναι  
κύμα



# Η φύση του φωτός

J. C. Maxwell



1831 - 1879

Πρόβλεψε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και υπολόγισε την ταχύτητά τους

H. Hertz



1857 - 1894

Παρήγαγε και ανίχνευσε ηλεκτρομαγνητικά κύματα (UHF)

# Η φύση του φωτός

T. Young



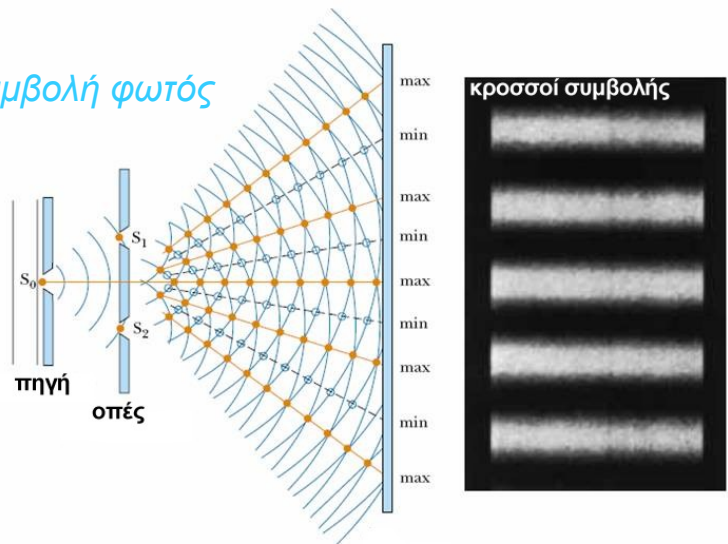
1773 - 1829

Συμβολή του φωτός



**Επιβεβαίωση της κυματικής φύσης του φωτός**

συμβολή φωτός



συμβολή επιφανειακών κυμάτων στο νερό



# Η φύση του φωτός

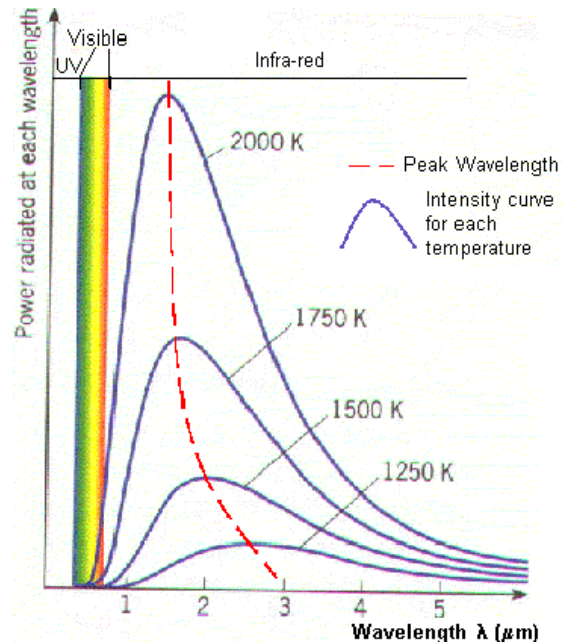


Εκπομπή μέλανος σώματος



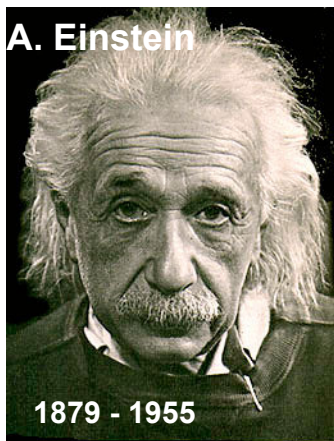
Επιβεβαίωση της σωματιδιακής φύσης του φωτός

Κβάντωση της ενέργειας:  $E=hf$



Stefan-Boltzmann, Wien, Planck

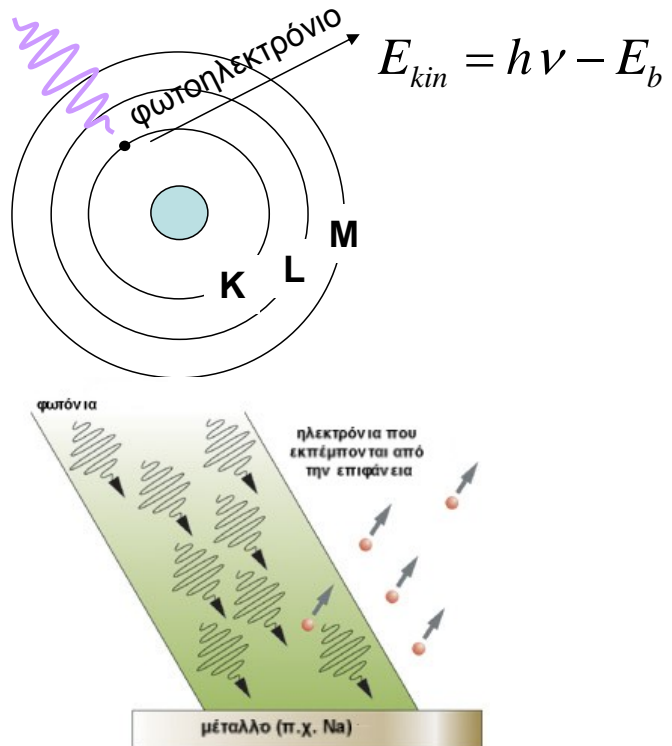
# Η φύση του φωτός



Εξήγηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου



Επιβεβαίωση της σωματιδιακής φύσης του φωτός



Γιατί όταν αυξάνεται η ένταση του προσπίπτοντος φωτός δεν αυξάνεται η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων αλλά ο αριθμός τους???

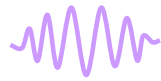
# Η φύση του φωτός

## Δυισμός του φωτός (Einstein) Κυματοσωματιδιακή φύση

Φαινόμενα όπως η εκπομπή και η απορρόφηση εξηγούνται με τη σωματιδιακή φύση του φωτός

Φαινόμενα όπως η σκέδαση, συμβολή, περίθλαση εξηγούνται με την κυματική φύση

Κβαντική οπτική

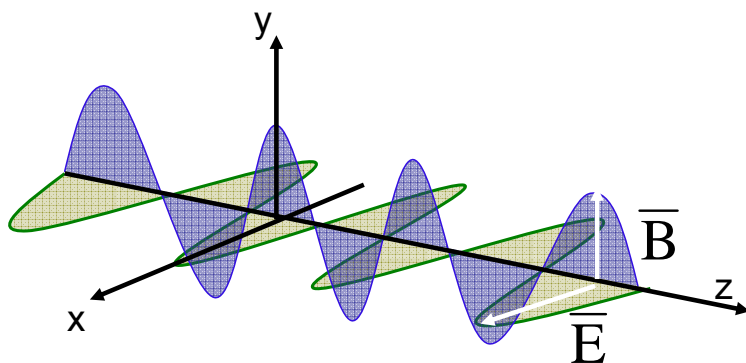


κυματοπακέτο

φωτόνιο

## Το φως ως κύμα

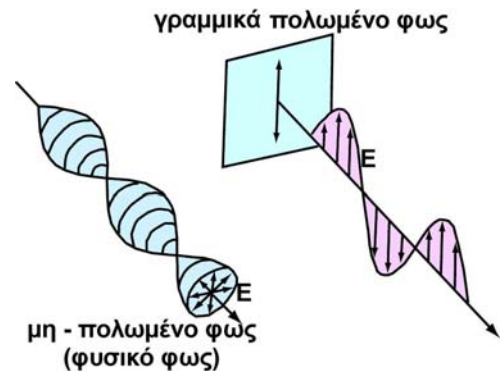
### Ηλεκτρομαγνητικό (εγκάρσιο) κύμα



$$\bar{E} = \bar{E}_0 \hat{x} \cos(\omega t - kz)$$

$$\bar{B} = \bar{B}_0 \hat{y} \cos(\omega t - kz)$$

διεύθυνση  
διάδοσης



### Πολωμένο φως:

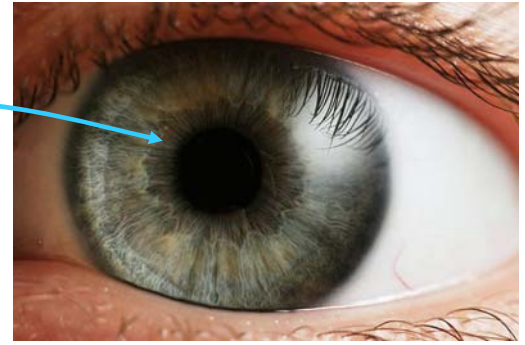
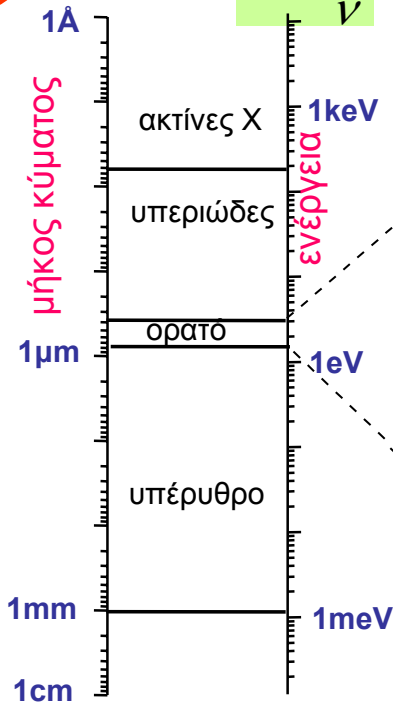
Το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται με καθορισμένο τρόπο

### Γραμμικά πολωμένο φως:

Το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ταλαντώνεται σε ένα επίπεδο

# Το φως ως κύμα

**Εξ.1**  $c = \lambda \nu \Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu}$



**Εξ.2**  $E = h\nu$

$E$ : ενέργεια  
 $h$ : σταθερά του Planck  $6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$   
 $\nu$ : συχνότητα

μονάδα μέτρησης της ενέργειας  
 $1 \text{ Joule} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$

## Άσκηση

Να βρεθούν οι οριακές συχνότητες του ορατού φάσματος (1.7-3.1eV)

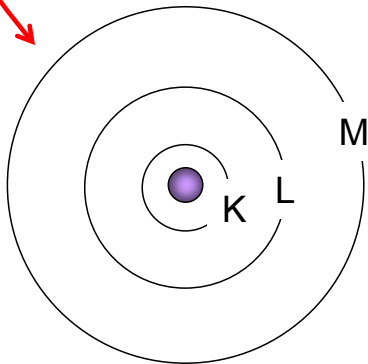
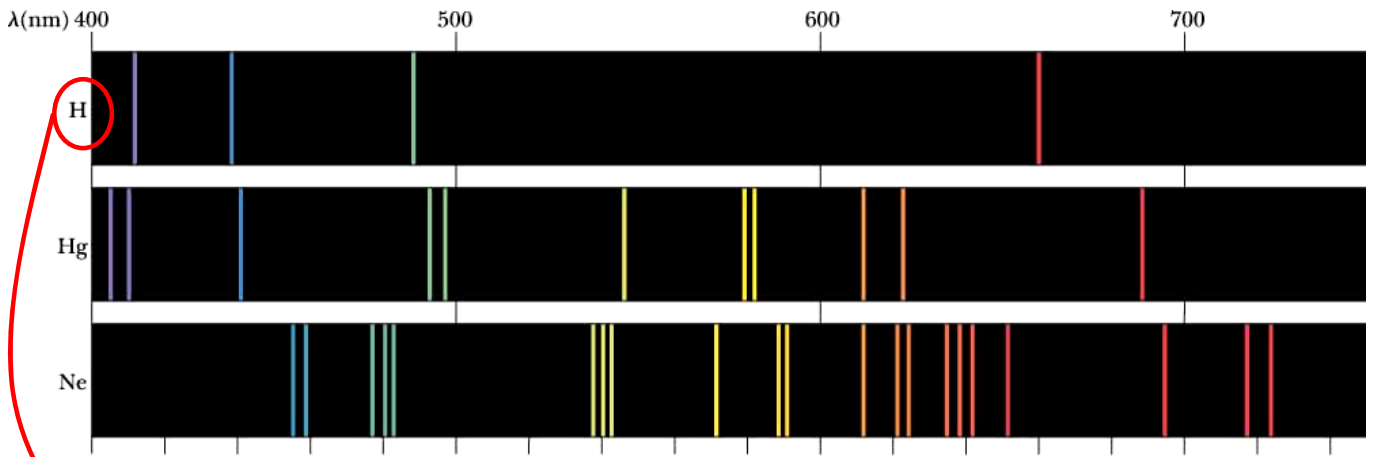
$$E = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{E}{h} = \frac{1.7 \times \frac{1}{6.24 \times 10^{18}}}{6.62 \times 10^{-34}} = 4.1 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

$$E = h\nu \Rightarrow \nu = \frac{E}{h} = \frac{3.1 \times \frac{1}{6.24 \times 10^{18}}}{6.62 \times 10^{-34}} = 7.5 \times 10^{14} \text{ Hz}$$

Πολύ μεγάλη συχνότητα

$1 \text{ Joule} = 6.24 \times 10^{18} \text{ eV}$   
 $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ Js}$

# Εκπομπή του φωτός

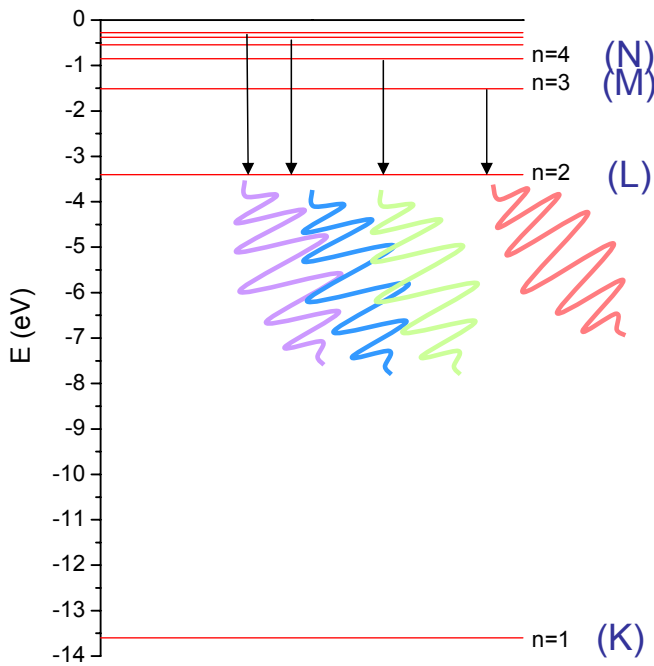


Ενεργειακές στάθμες ηλεκτρονίων στο άτομο του H (μοντέλο Bohr)

$$E_n \text{ (eV)} = -\frac{13.6}{n^2}$$



# Εκπομπή του φωτός



- Τα άτομα εκπέμπουν φως όταν αποδιεγείρονται
- Τα ηλεκτρόνια μεταπίπτουν από κατάσταση υψηλότερης ενέργειας σε κατάσταση χαμηλότερης

410.2nm

434.1nm

486.1nm

656.3nm

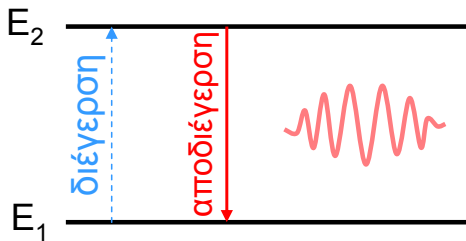
$$E_n \text{ (eV)} = -\frac{13.6}{n^2}$$



# Εκπομπή του φωτός

Τα άτομα σε μία λυχνία αερίου διεγείρονται με:

- Θέρμανση
- Ηλεκτρική εκκένωση
- Απορρόφηση φωτονίων



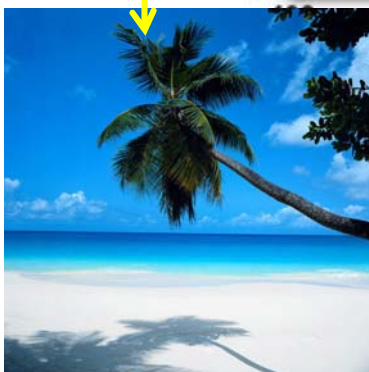
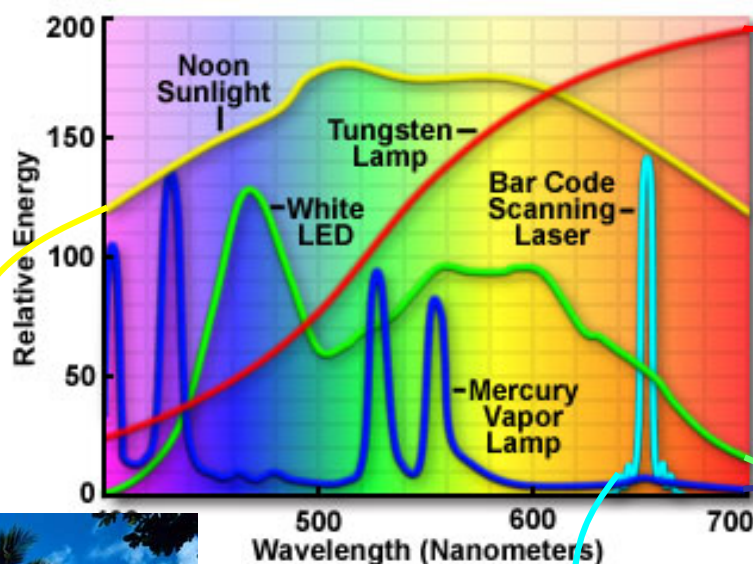
$$\Delta E = h \nu = E_2 - E_1$$

*Εκπομπή φωτός με συχνότητα που καθορίζεται από την ενεργειακή διαφορά των καταστάσεων  $E_1$  και  $E_2$*

Ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ διέγερσης και αποδιέγερσης είναι πολύ μικρός ( $10^{-9} - 10^{-5}$  sec)

# Εκπομπή του φωτός

Spectra From Common Sources of Visible Light

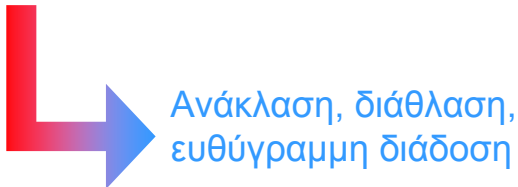


# ΟΠΤΙΚΗ

Η οπτική μελετά το φως, τις ιδιότητές του και τις εφαρμογές του

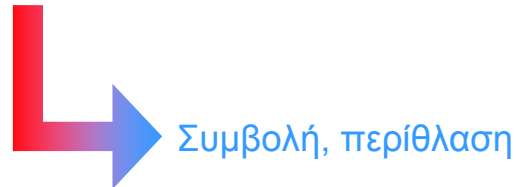
## Γεωμετρική οπτική

Οι διαστάσεις των εμποδίων είναι μεγάλες σε σχέση με το μήκος κύματος του φωτός  
→ Αγνοείται η κυματική φύση του φωτός



## Φυσική οπτική

Οι διαστάσεις των εμποδίων είναι συγκρίσιμες με το μήκος κύματος του φωτός  
→ Το φως θεωρείται ως κύμα



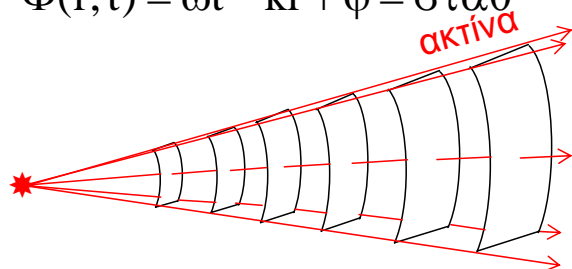
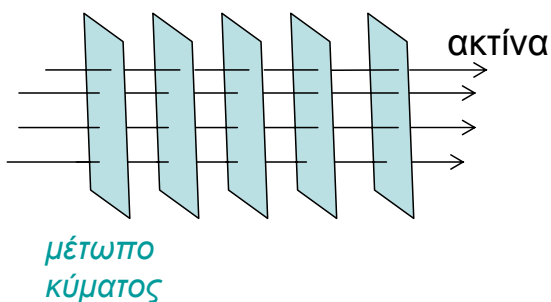
# Γεωμετρική οπτική

Διαστάσεις εμποδίων μεγάλες:  $\lambda \rightarrow 0$

- Η ενέργεια της ακτινοβολίας διαδίδεται κατά μήκος των **ΟΠΤΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ**
- Οι οπτικές ακτίνες είναι κάθετες στα μέτωπα κύματος
- Το μέτωπο κύματος είναι ο γεωμετρικός τόπος των σημείων ίσης φάσης.  
Σχήμα = σχήμα του  $\Gamma$ .  $T$ . για  $\Phi = \text{σταθ.}$  σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή

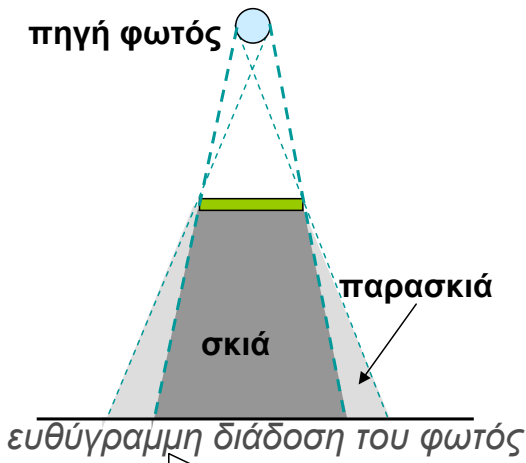
$$\Phi(x, t) = \omega t - kx + \varphi = \text{σταθ}$$

$$\Phi(\vec{r}, t) = \omega t - \vec{k}\vec{r} + \varphi = \text{σταθ}$$





# Σκιά - παρασκιά



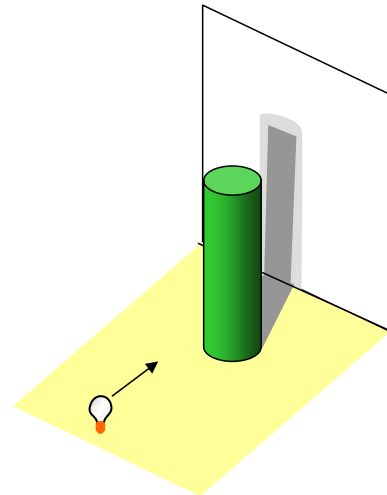
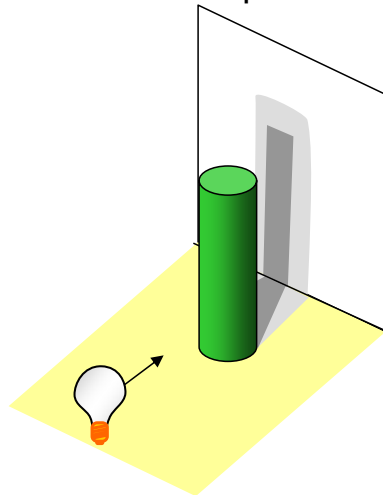
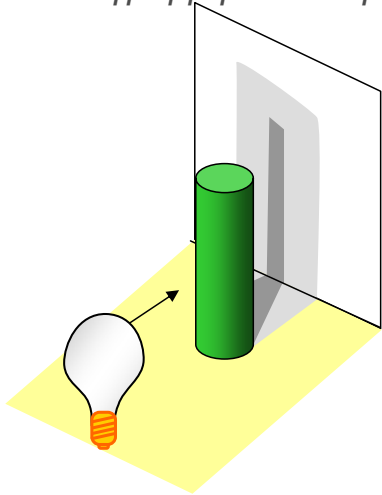
Το φως διαδίδεται ευθύγραμμα

άμεση συνέπεια

δημιουργία σκιάς

**σημειακή πηγή :** δημιουργείται σαφώς καθορισμένη σκιά.

**εκτεταμένη πηγή :** δημιουργείται σκιά και παρασκιά.



# Ταχύτητα του φωτός – Δείκτης διάθλασης

Θεμελιώδης εξίσωση της κυματικής

$$v = \lambda \cdot \nu$$

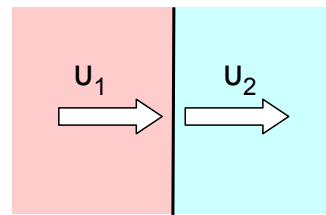
**συχνότητα**  
χαρακτηριστικό της πηγής

**ταχύτητα**  
εξάρτηση από το μέσο

**μήκος κύματος**  
εξάρτηση από το μέσο

Δείκτης διάθλασης:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}$$



Απόλυτος δείκτης διάθλασης:

$$n = \frac{c}{v}$$

→ ταχύτητα φωτός στο κενό

→ ταχύτητα φωτός στο μέσο

$$3 \times 10^8 \frac{m}{s}$$

# Ταχύτητα του φωτός – Δείκτης διάθλασης

Σχέση δείκτη διάθλασης με τους απόλυτους δείκτες διάθλασης:

$$\eta_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{\eta_1}}{\frac{c}{\eta_2}} \Rightarrow \eta_{21} = \frac{\eta_2}{\eta_1}$$

Σχέση δείκτη διάθλασης με τα μήκη κύματος:

$$\eta_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1 \nu}{\lambda_2 \nu} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Rightarrow \eta_{21} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

Ο δείκτης διάθλασης είναι αδιάστατος αριθμός (δεν έχει μονάδες)

## Ανάκλαση του φωτός

**Ανάκλαση:** αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης του φωτός όταν προσπίπτει σε ανακλαστική επιφάνεια.

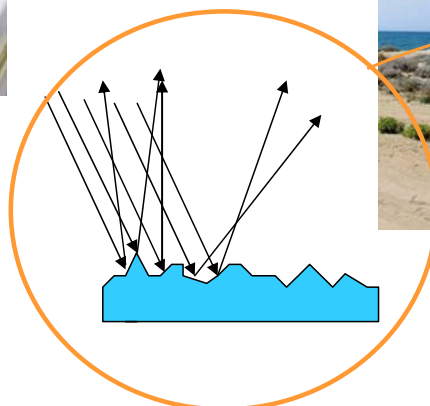
Ανάκλαση σε λεία επιφάνεια



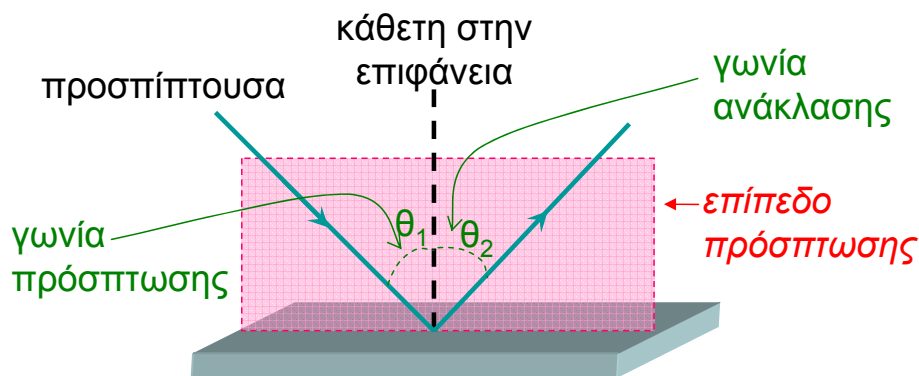
**Κάτοπτρο:** Αντικείμενο με λεία επιφάνεια κατασκευασμένο από υλικό που ανακλά ισχυρά το φως (π.χ. μέταλλο)

Ανάκλαση σε ανώμαλη επιφάνεια

Διάχυτη ανάκλαση (διάχυση του φωτός)



# Ανάκλαση του φωτός



## Νόμοι της ανάκλασης

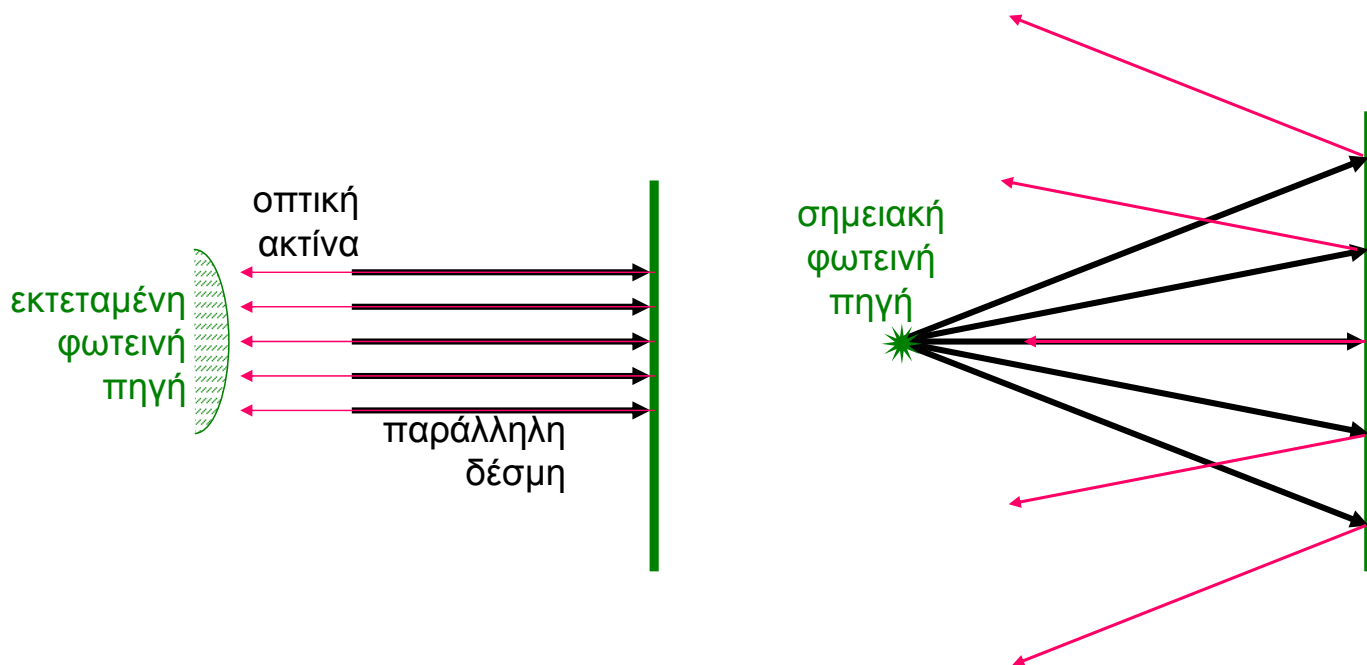
**A.** Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η κάθετη στο σημείο πρόσπτωσης είναι συνεπίπεδες και βρίσκονται πάνω στο επίπεδο πρόσπτωσης.

**B.** Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίση με τη γωνία ανάκλασης :  $\theta_1 = \theta_2$

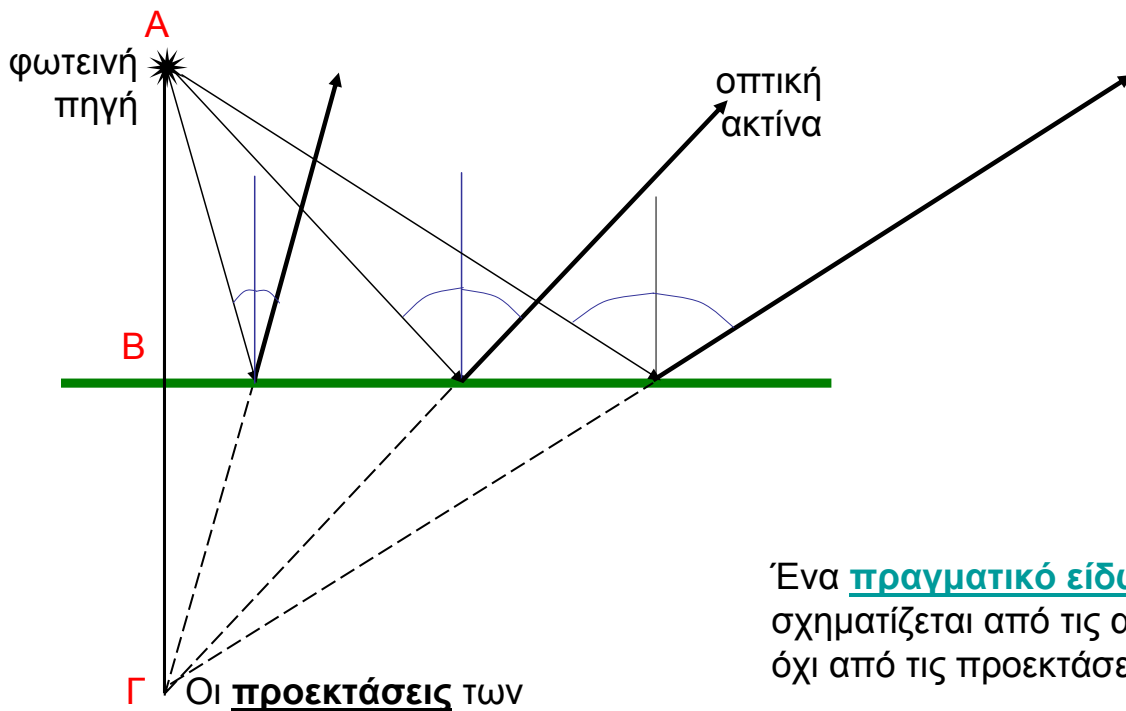
# Αρχή του ελαχίστου χρόνου (Fermat)

Το φως διαδίδεται ευθύγραμμα

Το φως ακολουθεί την πορεία που απαιτεί ελάχιστο χρόνο



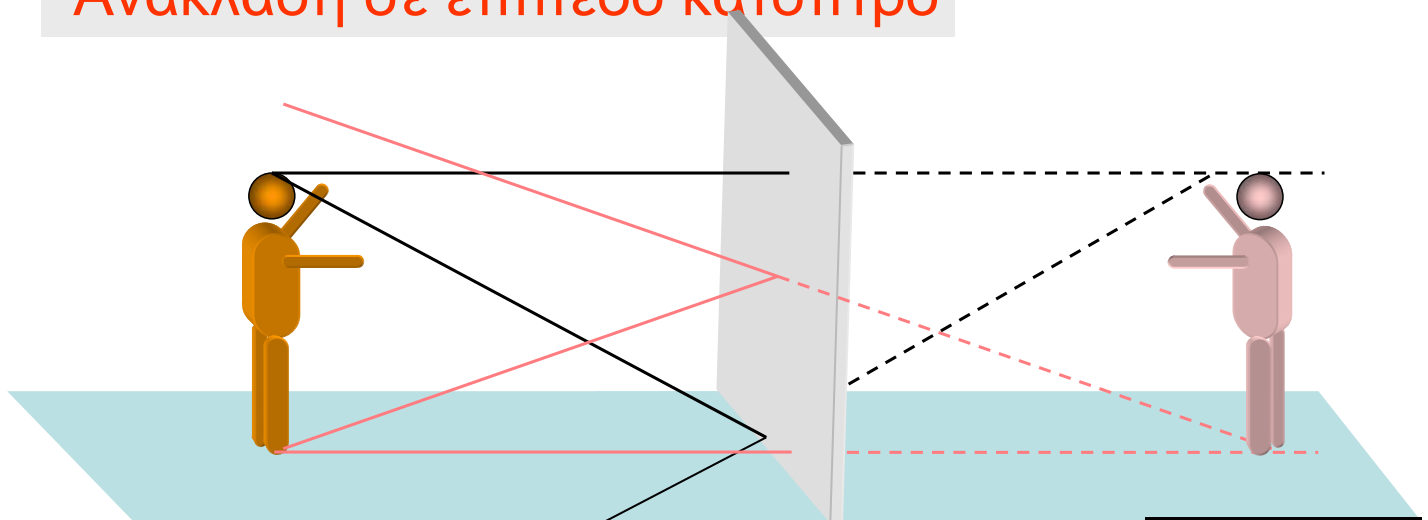
# Ανάκλαση του φωτός - είδωλα



Γ Οι προεκτάσεις των ανακλώμενων ακτίνων συναντώνται σε ένα σημείο που καλείται φανταστικό είδωλο της σημειακής φωτεινής πηγής

Ένα πραγματικό είδωλο σχηματίζεται από τις ακτίνες και όχι από τις προεκτάσεις τους.

# Ανάκλαση σε επίπεδο κάτοπτρο



## ΕΠΙΠΕΔΟ ΚΑΤΟΠΤΡΟ

Το είδωλο που σχηματίζεται:

- είναι φανταστικό
- έχει τις ίδιες διαστάσεις με το αντικείμενο
- είναι πλευρικώς ανεστραμμένο (ή κατοπτρικά ανεστραμμένο)
- το είδωλο απέχει εξίσου με το αντικείμενο από το κάτοπτρο
- η ευθεία που ενώνει συγκεκριμένο σημείο του αντικειμένου με το αντίστοιχο του ειδώλου είναι κάθετη στο κάτοπτρο

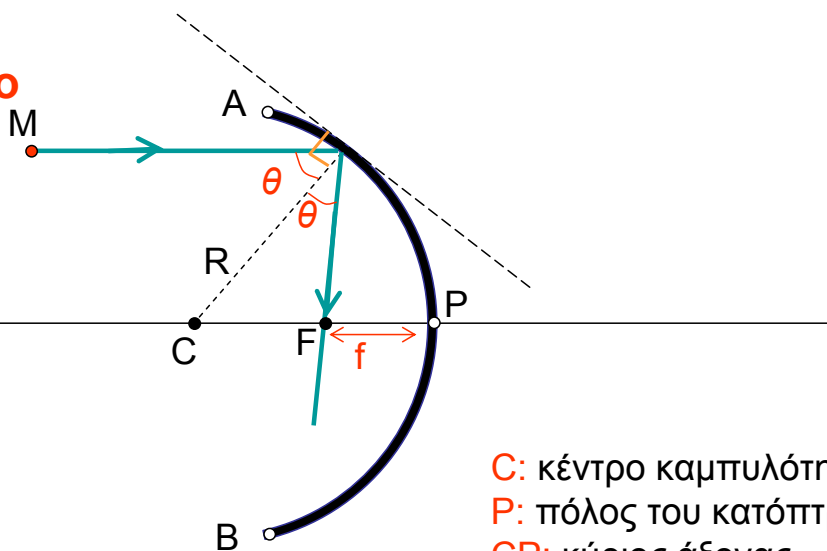


# Ανάκλαση σε σφαιρικό κάτοπτρο

Ορισμοί

## Κοίλο κάτοπτρο

$$f = \frac{R}{2}$$



- C: κέντρο καμπυλότητας
- P: πόλος του κατόπτρου
- CP: κύριος άξονας
- R: ακτίνα καμπυλότητας
- AB: άνοιγμα του κατόπτρου
- FP: εστιακή απόσταση

**F:** εστία του κατόπτρου

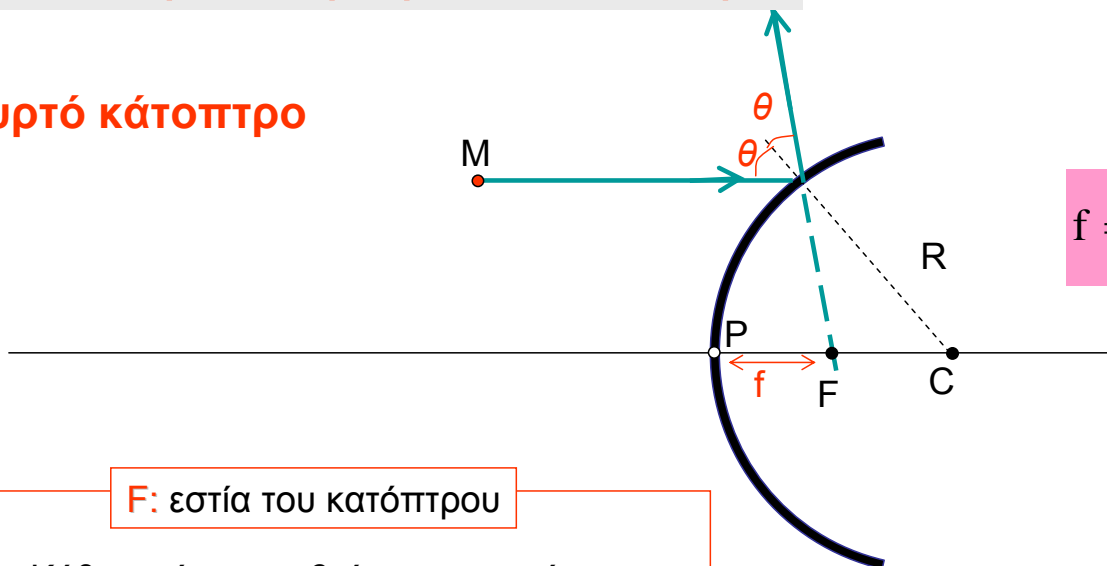
Κάθε ακτίνα που βρίσκεται κοντά και παράλληλα στον κύριο άξονα όταν ανακλαστεί στο κάτοπτρο διέρχεται από την **εστία** του

# Ανάκλαση σε σφαιρικό κάτοπτρο

Ορισμοί

## Κυρτό κάτοπτρο

$$f = \frac{R}{2}$$



**F:** εστία του κατόπτρου

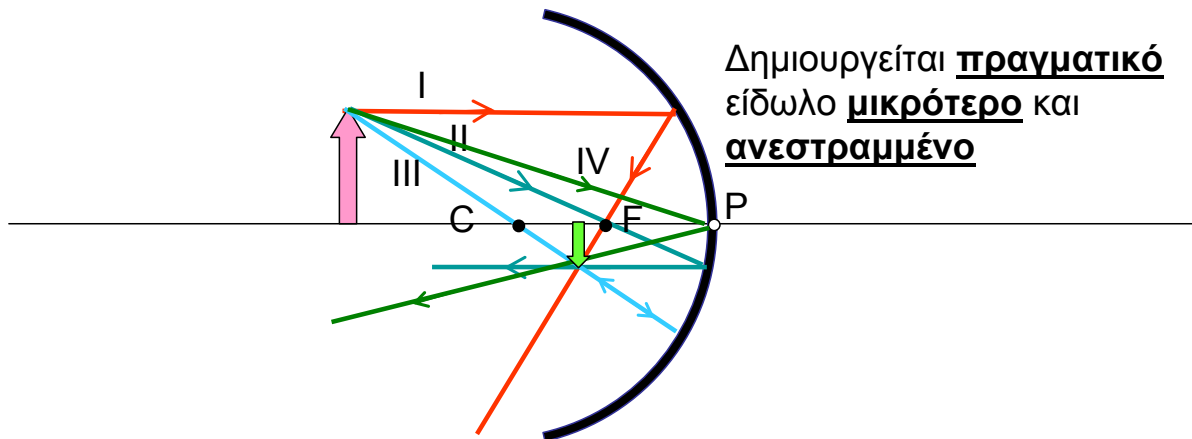
Κάθε ακτίνα που βρίσκεται κοντά και παράλληλα στον κύριο άξονα όταν ανακλαστεί στο κάτοπτρο φαίνεται να προέρχεται από την **εστία** του

- C: κέντρο καμπυλότητας
- P: πόλος του κατόπτρου
- CP: κύριος άξονας
- R: ακτίνα καμπυλότητας
- AB: άνοιγμα του κατόπτρου
- FP: εστιακή απόσταση

# Ανάκλαση σε σφαιρικό κάτοπτρο

Σχηματισμός  
ειδώλων

## Κοίλο κάτοπτρο



Δημιουργείται πραγματικό  
είδωλο μικρότερο και  
ανεστραμμένο

Για το σχηματισμό του ειδώλου ενός αντικειμένου αρκούν δύο ακτίνες

Προσπίπτουσα ακτίνα (I) που είναι παράλληλη στον κύριο άξονα ανακλάται ώστε να διέρχεται από την εστία του κατόπτρου

Προσπίπτουσα ακτίνα (II) που διέρχεται από την εστία ανακλάται παράλληλα προς τον κύριο άξονα

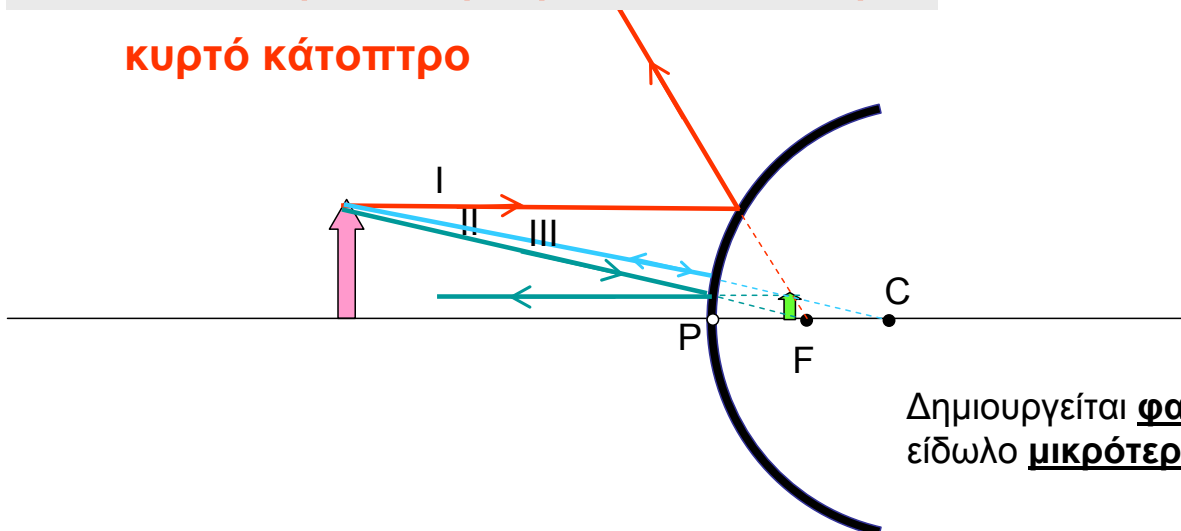
Προσπίπτουσα ακτίνα (III) που διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας ανακλάται προς την ίδια διεύθυνση

Προσπίπτουσα ακτίνα (IV) στον πόλο του κατόπτρου ανακλάται με την ίδια γωνία

# Ανάκλαση σε σφαιρικό κάτοπτρο

Σχηματισμός  
ειδώλων

## κυρτό κάτοπτρο



Δημιουργείται φανταστικό  
είδωλο μικρότερο και ορθό

Για το σχηματισμό του ειδώλου ενός αντικειμένου αρκούν δύο ακτίνες

Προσπίπτουσα ακτίνα (I) που είναι παράλληλη στον κύριο άξονα ανακλάται ώστε να φαίνεται ότι προέρχεται από την εστία

Προσπίπτουσα ακτίνα (II) που φαίνεται να διέρχεται από την εστία ανακλάται παράλληλα προς τον κύριο άξονα

Προσπίπτουσα ακτίνα (III) που φαίνεται να διέρχεται από το κέντρο καμπυλότητας ανακλάται προς την ίδια διεύθυνση

# Ανάκλαση του φωτός

## Reflection from Convex and Concave Surfaces



εξωτερικό του  
κουταλιού



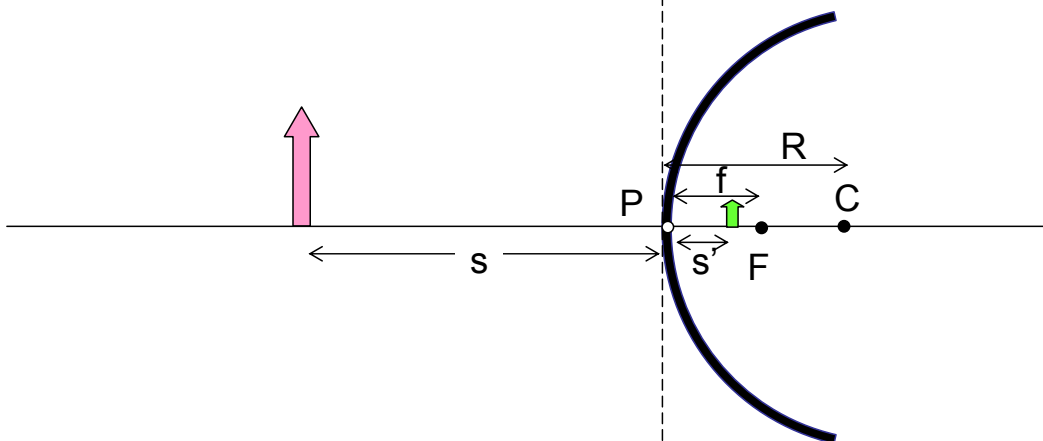
εσωτερικό του  
κουταλιού



# Ανάκλαση σε σφαιρικό κάτοπτρο

Εξίσωση των κατόπτρων

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$$

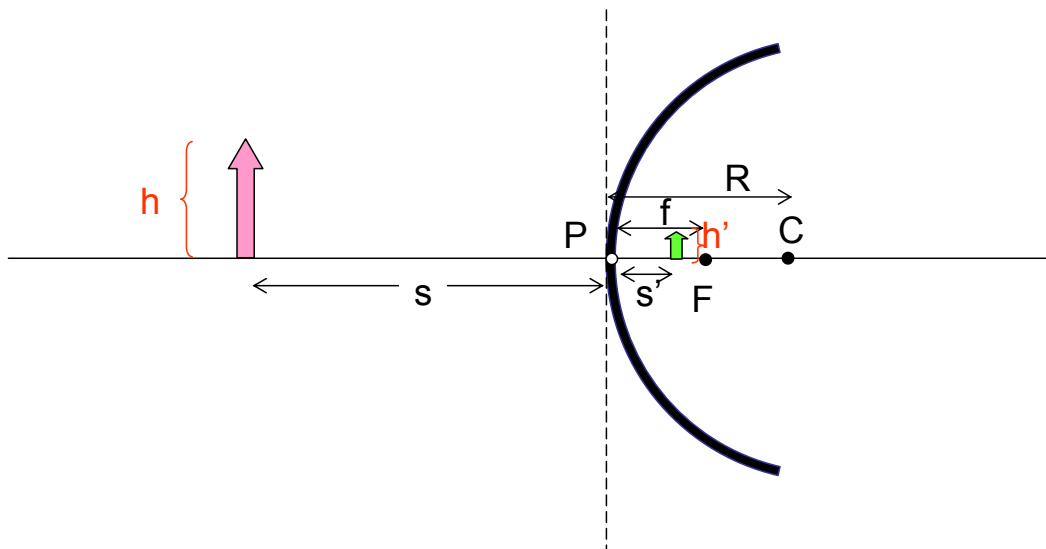


## ΣΥΜΒΑΣΗ ΠΡΟΣΗΜΟΥ

Η εστιακή απόσταση και η ακτίνα καμπυλότητας των **κοίλων** κατόπτρων λαμβάνεται **θετική** ενώ των **κυρτών αρνητική**

Αποστάσεις **πραγματικών αντικειμένων** και **ειδώλων** από τα κάτοπτρα θεωρούνται **θετικές** ενώ **φανταστικών αντικειμένων** και **ειδώλων** θεωρούνται **αρνητικές**

# Μεγέθυνση



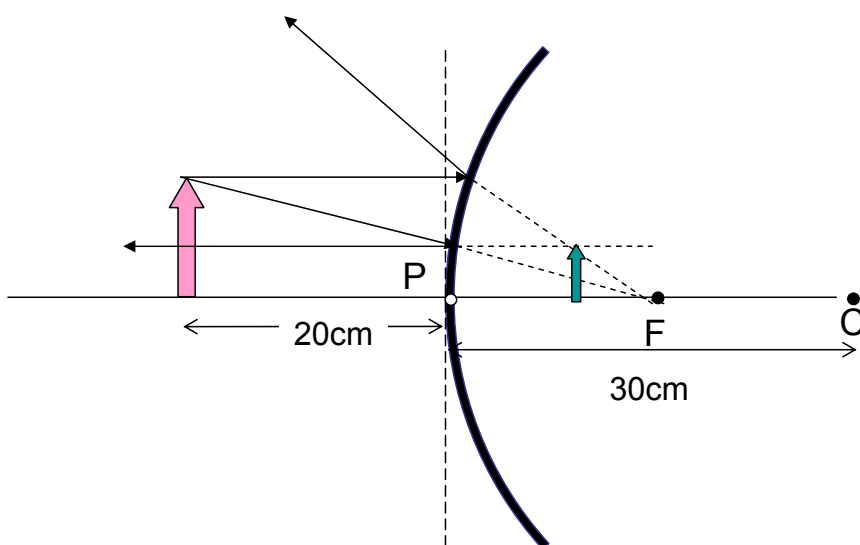
$$M = -\frac{s'}{s} = \frac{h'}{h}$$

$M > 0 \rightarrow$  ορθό είδωλο

$M < 0 \rightarrow$  ανεστραμμένο είδωλο

# Άσκηση

Ένα κυρτό κάτοπτρο του οποίου η ακτίνα καμπυλότητας είναι 30cm σχηματίζει είδωλο ενός αντικειμένου το οποίο βρίσκεται σε απόσταση 20cm από το κάτοπτρο. Να υπολογιστεί η απόσταση του ειδώλου από το κάτοπτρο καθώς και η μεγέθυνση.



$$\begin{aligned} \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} &= \frac{2}{R} \Rightarrow \\ \Rightarrow \frac{1}{20} + \frac{1}{s'} &= \frac{2}{-30} \Rightarrow \\ \Rightarrow s' &= -8.6\text{cm} \end{aligned}$$

Φανταστικό είδωλο  
πίσω από το κάτοπτρο

Μεγέθυνση:  $M = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s} = -\frac{-8.6}{20} = +0.43$



## Άσκηση

Ένα κοίλο κάτοπτρο με ακτίνα καμπυλότητας 40cm σχηματίζει το είδωλο ενός αντικειμένου που βρίσκεται σε απόσταση 25cm από το κάτοπτρο

- Ποια είναι η εστιακή απόσταση του κατόπτρου;
- Πόση είναι η απόσταση του ειδώλου από το κάτοπτρο; Είναι το είδωλο πραγματικό ή φανταστικό;
- Πόση είναι η μεγέθυνση; Είναι το είδωλο ορθό ή ανεστραμμένο

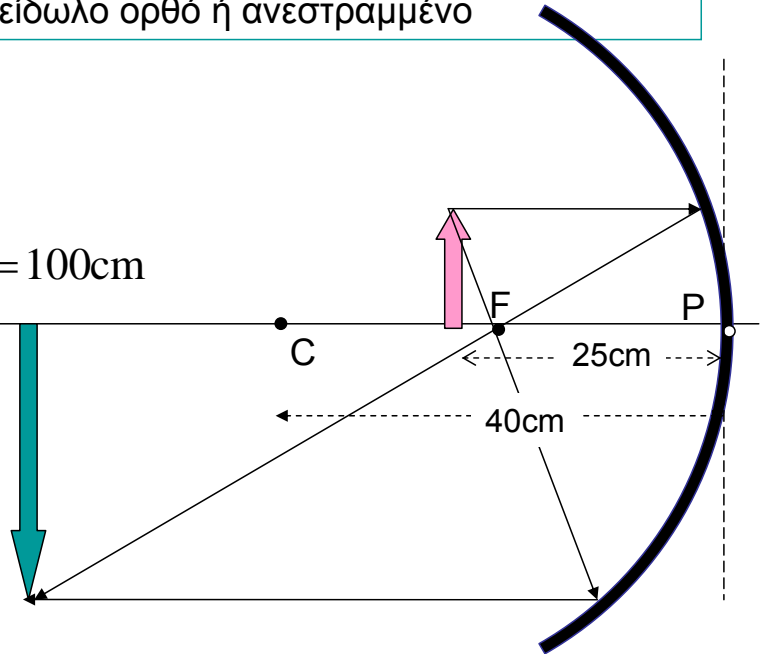
$$f = \frac{R}{2} \Rightarrow f = 20\text{cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{1}{25} + \frac{1}{s'} = \frac{2}{40} \Rightarrow s' = 100\text{cm}$$

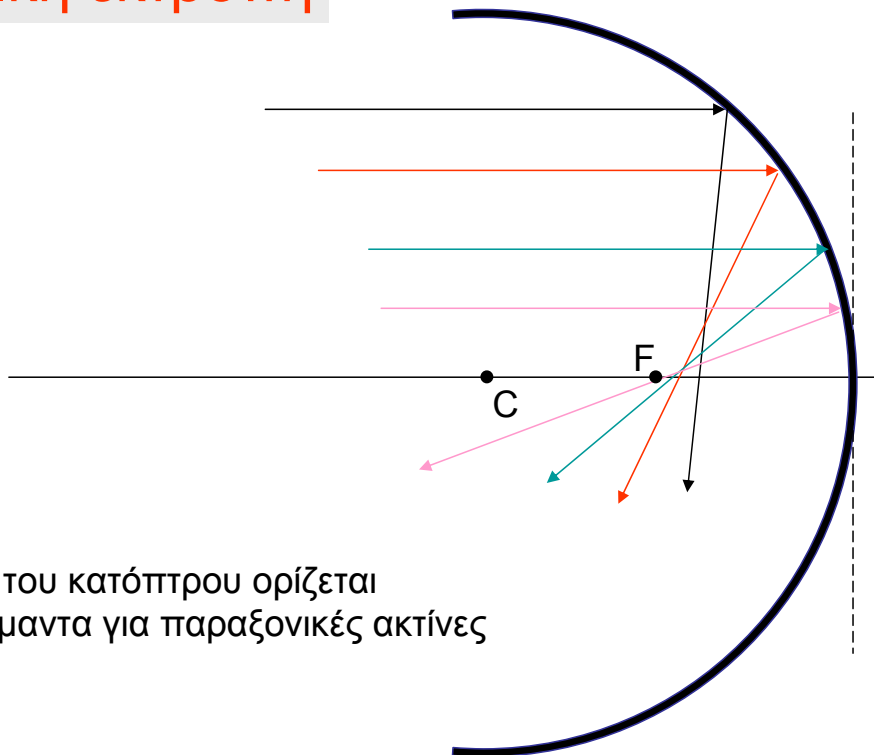
Μεγέθυνση:

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s} = -\frac{100}{25} = -4$$

Πραγματικό & ανεστραμμένο



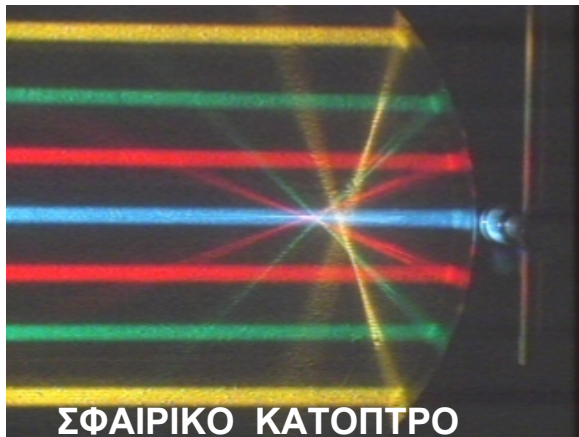
## Σφαιρική εκτροπή



● Η εστία του κατόπτρου ορίζεται μονοσήμαντα για παραξονικές ακτίνες

● Παράλληλες ακτίνες που βρίσκονται μακριά από τον κύριο άξονα εστιάζονται σε λίγο διαφορετικές θέσεις.

# Σφαιρική εκτροπή



[www.physics.montana.edu/demonstrations](http://www.physics.montana.edu/demonstrations)

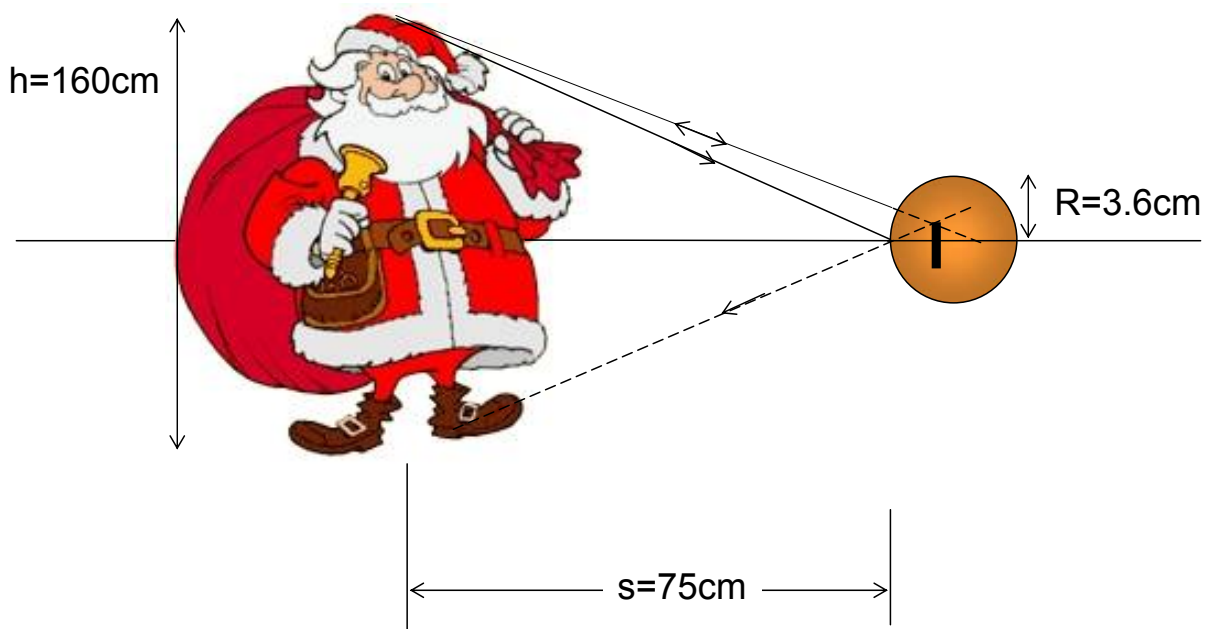


Παραβολοειδές εκ  
περιστροφής

Ένα παραβολικό κάτοπτρο είναι  
απαλλαγμένο από σφαιρική εκτροπή

## Άσκηση

Ο Αη Βασίλης, θέλοντας να διαπιστώσει αν το πρόσωπό του έχει κηλίδες καπνιάς από την καπνοδόχο, χρησιμοποιεί για καθρέφτη μια μπάλα του Χριστουγεννιάτικου δέντρου που απέχει απ' αυτόν 0.75m. Η διάμετρος της μπάλας είναι 7.2cm και το ύψος του Αη Βασίλη είναι 1.6m. Ποια είναι η θέση και το ύψος του ειδώλου του; Είναι ορθό ή ανεστραμμένο;



# Άσκηση

Η μπάλα δρα σαν σφαιρικό κυρτό κάτοπτρο

Ακτίνα καμπυλότητας :  $R = - 3.6\text{cm}$

Εστιακή απόσταση :  $f = R/2 = - 1.8\text{cm}$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{75} + \frac{1}{s'} = -\frac{1}{1.8} \Rightarrow s' = -1.76\text{cm}$$

Απόσταση ειδώλου – κατόπτρου  
είδωλο φανταστικό

$$M = \frac{h'}{h} = -\frac{s'}{s} \Rightarrow \frac{h'}{160} = -\frac{-1.76}{75} \Rightarrow h' = 3.75\text{cm} \quad \text{Ορθό είδωλο}$$



## Χρήσεις σφαιρικών κατόπτρων

- Κοίλο κάτοπτρο σε προβολέα αυτοκινήτου ή σε φακό δημιουργεί παράλληλη δέσμη
- Κυρτό κάτοπτρο αυτοκινήτου παρέχει ευρυγώνια θέα του δρόμου
- Κυρτό κάτοπτρο χρησιμοποιείται για αντικλεπτική επιτήρηση σε καταστήματα
- Κοίλο κάτοπτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συλλέξει την ηλιακή ενέργεια στο εστιακό του σημείο → Αφή της Ολυμπιακής Φλόγας
- Κοίλο κάτοπτρο με μεγάλη εστιακή απόσταση δρα μεγεθυντικά όταν το πρόσωπό μας βρίσκεται μεταξύ της εστίας και του κατόπτρου

