

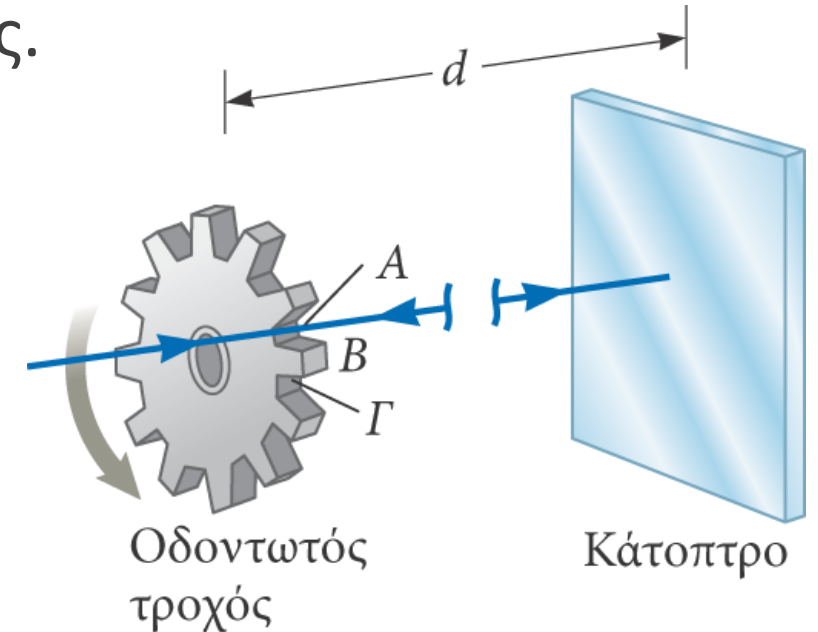
# Η Φύση του φωτός

---

- Σωματίδιο ή κύμα;;;;;
- Παλαιότερη θεώρηση (Νεύτωνα): το φως είναι ροή σωματιδίων.
- Ο Huygens υπέθεσε ότι το φως είναι ένα είδος κυματικής κίνησης.
- Η πρώτη πειραματική απόδειξη για την κυματική φύση του φωτός δόθηκε από τον Young το 1801 με το πείραμα της διπλής σχισμής όπου απέδειξε ότι οι ακτίνες του φωτός συμβάλλουν κάτι αδιανόητο κατά τη σωματιδιακή αντίληψη για το φως.
- Ο Maxwell ισχυρίστηκε ότι το φως είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικού κύματος υψηλής συχνότητας.
- Ο Hertz επιβεβαίωσε πειραματικά τη θεωρία του Maxwell.
- Το 1905, ο Αϊνστάιν πρότεινε μια εξήγηση για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιώντας την έννοια της κβάντωσης που ταιριάζει σε σωματίδια.
- Με βάση τα παραπάνω, πρέπει να θεωρήσουμε ότι το φως έχει διττή φύση.

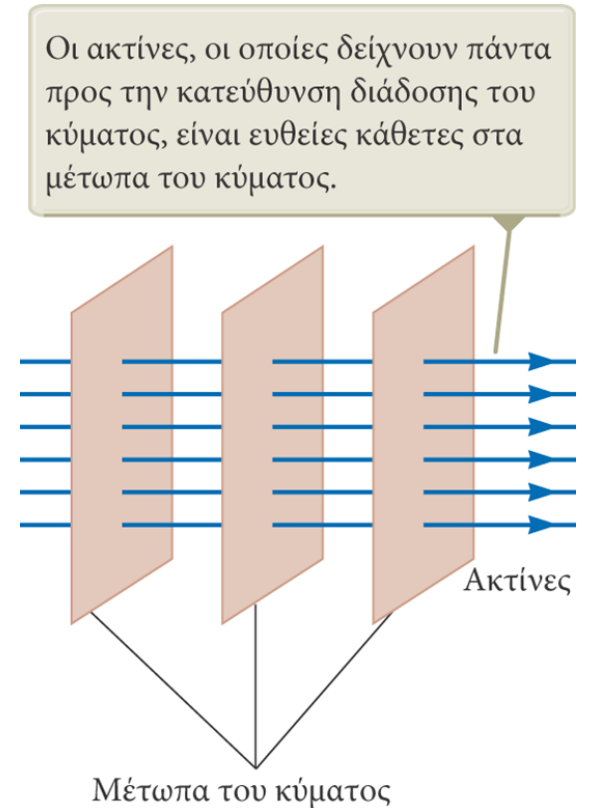
# Η ταχύτητα του φωτός

- Το 1849 ο Γάλλος Armand Fizeau ανέπτυξε μια μέθοδο για να μετρήσει την ταχύτητα του φωτός.
- Αυτή ήταν η πρώτη επιτυχής μέθοδος για τη μέτρηση της ταχύτητας του φωτός με χρήση αποκλειστικά επίγειων τεχνικών.
- Ο Fizeau χρησιμοποίησε έναν περιστρεφόμενο οδοντωτό τροχό με την απόσταση μεταξύ του τροχού και ενός κατόπτρου  $d$  να είναι γνωστή.
- Αν  $\Delta t = \Delta \varphi / \omega$  είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα που εμποδίζει το φως από ένα δόντι, τότε  $c = 2d / \Delta t$ .
- Ο Fizeau βρήκε έτσι το μέτρο της ταχύτητας του φωτός:  $c = 3.1 \times 10^8 \text{ m/s}$ .



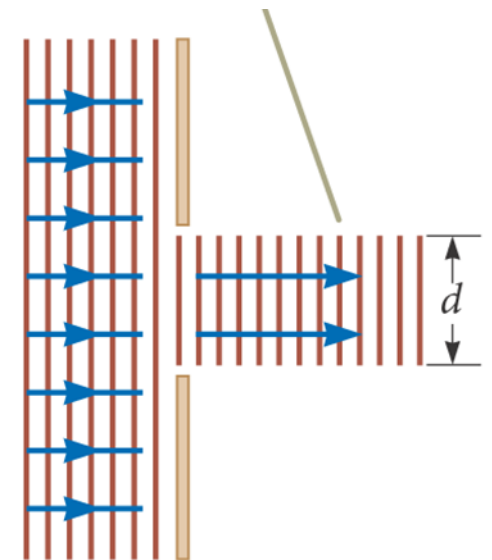
# Η προσέγγιση των ακτίνων στη γεωμετρική οπτική

- Στη γεωμετρική οπτική ισχύει η παραδοχή ότι, όταν το φως διέρχεται μέσα από ένα ομογενές μέσο, διαδίδεται ευθύγραμμα, και αλλάζει κατεύθυνση όταν έρθει σε επαφή με την επιφάνεια ενός διαφορετικού μέσου ή όταν οι οπτικές ιδιότητες του μέσου μεταβάλλονται.
- Στην προσέγγιση των ακτίνων, υποθέτουμε ότι η κίνηση ενός κύματος το οποίο διαδίδεται σε κάποιο μέσο είναι ευθύγραμμη και έχει την κατεύθυνση των ακτίνων του.



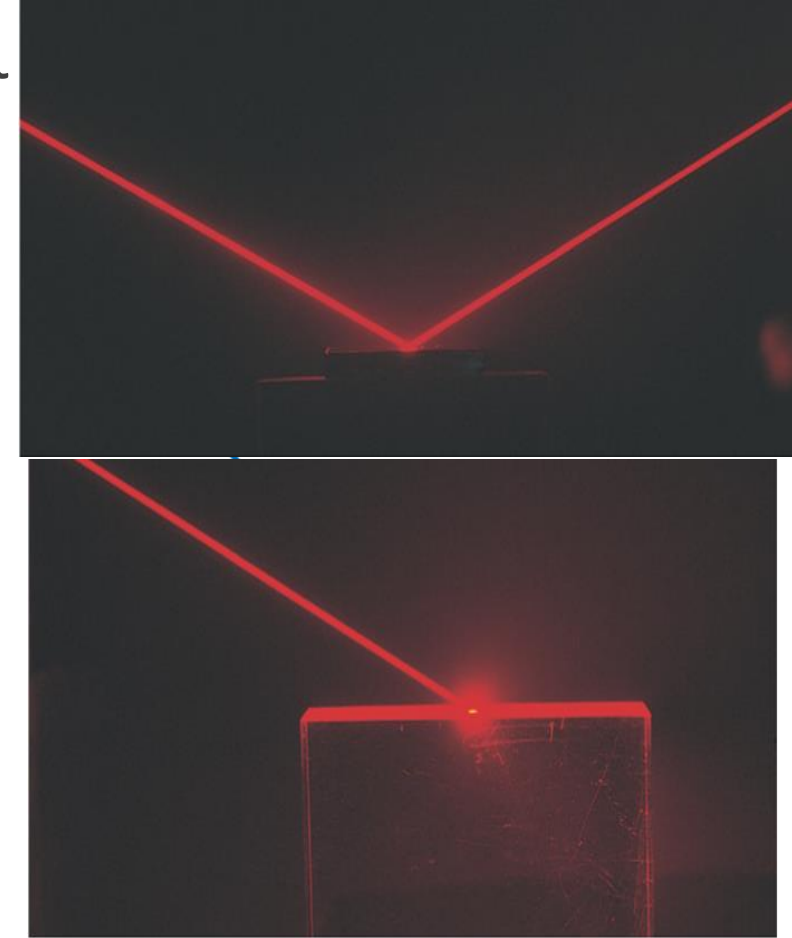
# Η προσέγγιση των ακτίνων στη γεωμετρική οπτική

- Στη γεωμετρική οπτική με την προσέγγιση των ακτίνων αγνοούμε κάποια κυματικά φαινόμενα όπως π.χ. η περίθλαση.
- Δεχόμαστε ότι το φως συνεχίζει να κινείται ευθύγραμμα ακόμα και όταν περνάει από σχισμές με άνοιγμα συγκρίσιμο ή μικρότερου του μήκους κύματος. Επίσης το φως δεν καμπυλώνεται όταν συναντήσει ακμές.
- Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι χρήσιμη στη μελέτη κατόπτρων, φακών και πρισμάτων.



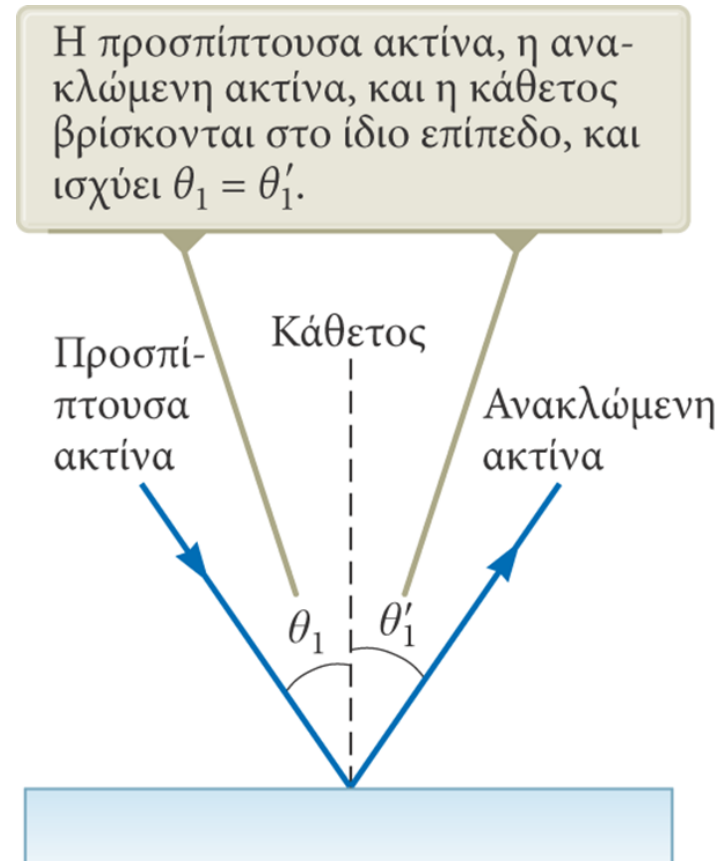
# Ανάκλαση του φωτός (reflection)

- Όταν μία ακτίνα φωτός (προσπίπτουσα) διαδίδεται σε ένα μέσο και φτάσει στο όριο με ένα δεύτερο μέσο, τότε ένα μέρος της ή ολόκληρη ανακλάται και επιστρέφει στο πρώτο μέσο.
- Η ανάκλαση του φωτός σε μια λεία επιφάνεια ονομάζεται κατοπτρική ανάκλαση. Στην περίπτωση αυτή οι ανακλώμενες ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους.
- Η ανάκλαση του φωτός σε μια τραχιά επιφάνεια ονομάζεται διάχυτη ανάκλαση. Οι ανακλώμενες ακτίνες διαδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις.



# Ο Νόμος της ανάκλασης

- Ως κάθετο θεωρούμε μια ευθεία η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια.
- Θεωρούμε ότι είναι κάθετη στο σημείο όπου η προσπίπτουσα ακτίνα έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια.
- Η προσπίπτουσα ακτίνα σχηματίζει γωνία  $\vartheta_1$  με την κάθετο ενώ η ανακλώμενη σχηματίζει γωνία  $\vartheta_1'$ .
- Σύμφωνα με τον νόμο της ανάκλασης  $\vartheta_1 = \vartheta_1'$ .
- Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα, και η κάθετος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο



SOS

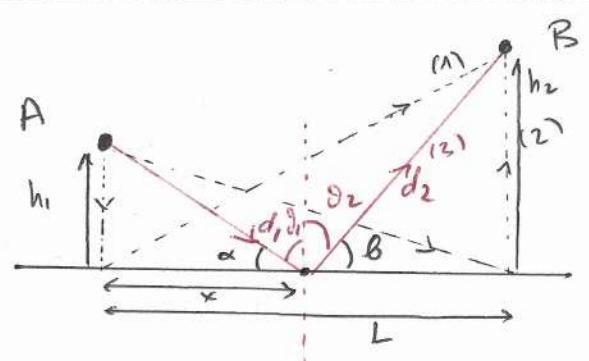
Η αρχή του Fermat - Η' αρχή του ελαχίστου χρόνου.

► Η αρχή του Fermat είναι η πιο βασική αρχή που χρειάζεται να γνωρίζεις κάποιος σε όλα τα προβλήματα γεωμετρικής οπτικής. Συμπέρασμα με αυτή:

" Το φως κατά τη διαδρομή του από ένα σημείο A σε ένα σημείο B διαλέγει (ακολουθεί) τη διαδρομή με το μικρότερο χρόνο "

► Από αυτή την αρχή απορρέουν όλοι οι νόμοι και οι νόμοι της γεωμετρικής οπτικής.

1 | Ο νόμος της ανάκλασης ( $\theta_1 = \theta_2$ )



Ερώση: Ποια διαδρομή θα ακολουθήσει το φως για να πάει από το A στο B; Την (1), την (2) ή την (3);

Απάνση: Αρχή Fermat. Ακολουθεί αυτή που ελαχιστοποιεί το χρόνο να φτάσει από το A στο B.

Ο χείονο για τα ραχια διαδρομή (3) γίνεται είναι:

$$T = \frac{d_1}{c} + \frac{d_2}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{x^2 + h_1^2} + \frac{1}{c} \sqrt{(L-x)^2 + h_2^2}$$

Παρατηρούμε ότι ο συνολικός χείονο εξαρτάται από το αντικείμενο  $x$ .

$\Rightarrow T = T(x)$ . Αρκεί να βρούμε το  $x$  για το οποίο

δίνεται ελάχιστος.

$$\Rightarrow \frac{dT(x)}{dx} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{1}{c} \left[ \frac{x}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} - \frac{(L-x)}{\sqrt{(L-x)^2 + h_2^2}} \right] = 0$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{\cos \alpha} \qquad \qquad \qquad \underbrace{\hspace{10em}}_{\cos \beta}$

$$\Rightarrow \cos \alpha = \cos \beta$$

$$\Rightarrow \alpha = \beta$$

Όμως

$$\alpha + \theta_1 = \frac{\pi}{2}$$

$$\beta + \theta_2 = \frac{\pi}{2}$$

}  $\Rightarrow$

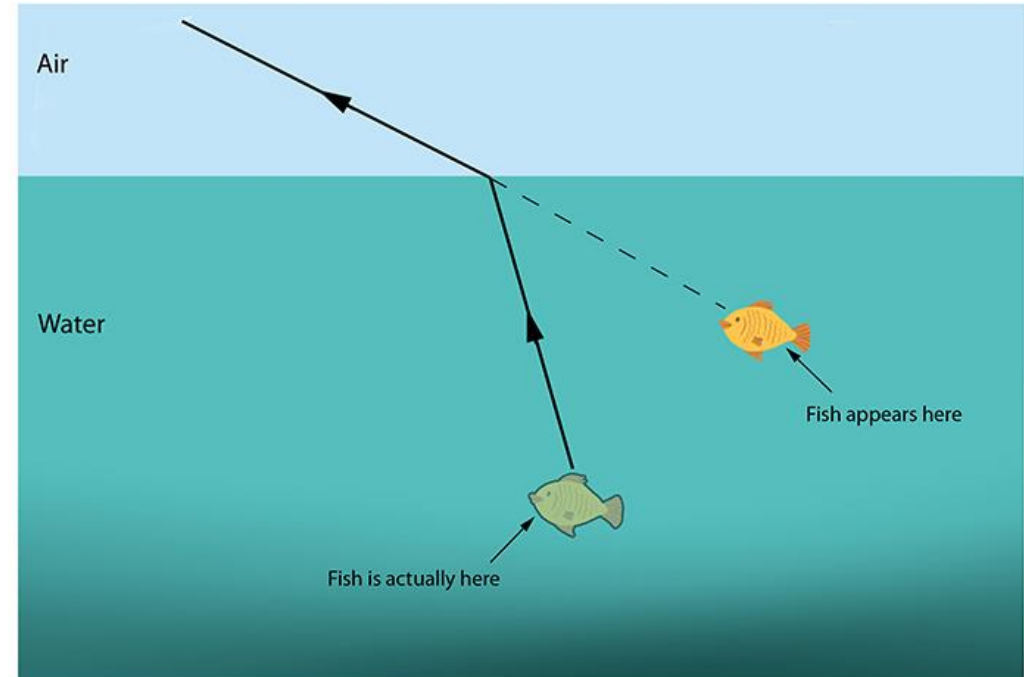
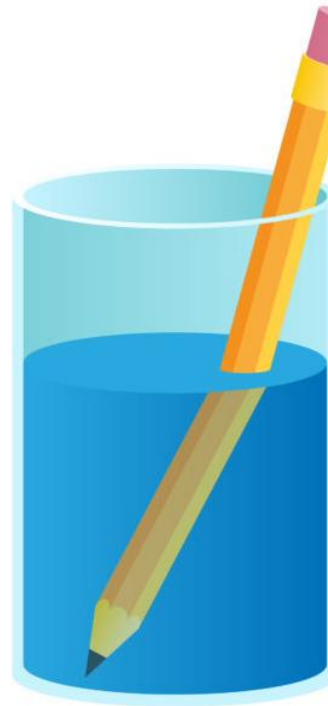
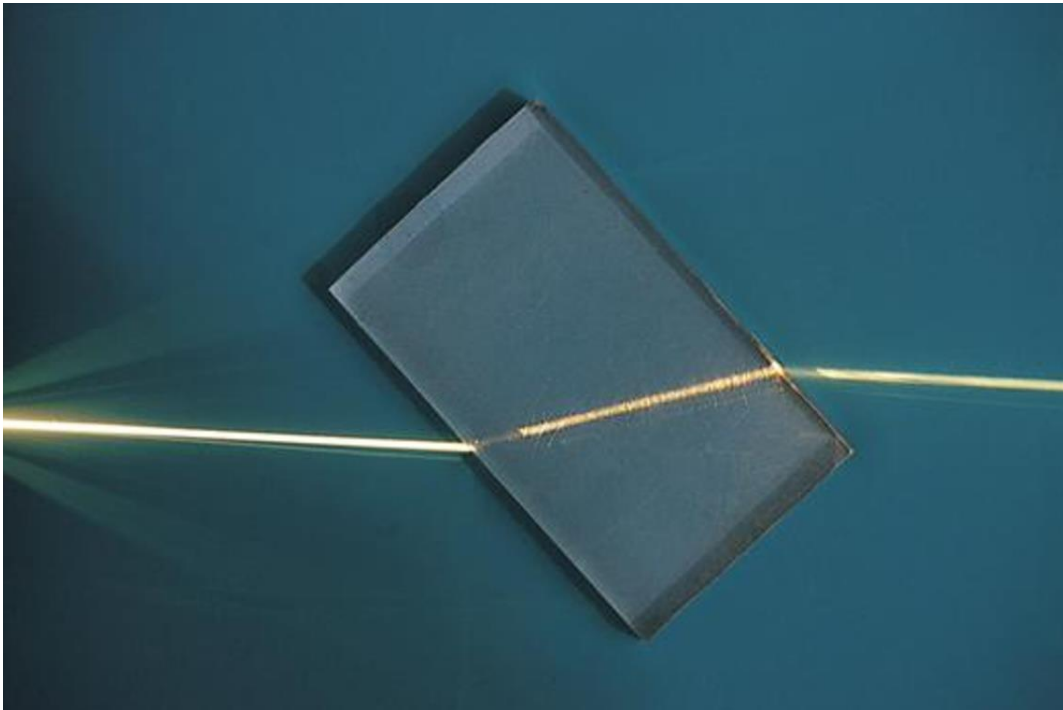
$$\boxed{\theta_1 = \theta_2}$$

$\rightarrow$  Νόμος ανάκλαση  
Η γωνία πρόσπτωσης  
 $\theta_1 =$  γωνία ανάκλαση  
 $\theta_2$ .

$\rightarrow$  Συμπερασματικά για να πάει το φως από το Α στο Β θα ακολουθήσει την πορεία για την οποία η γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια ( $\theta_1$ ) είναι ίση με την γωνία ανάκλασης ( $\theta_2$ ).  
Έτσι θα έχουμε ελάχιστο χείονο.

# Διάθλαση (refraction)

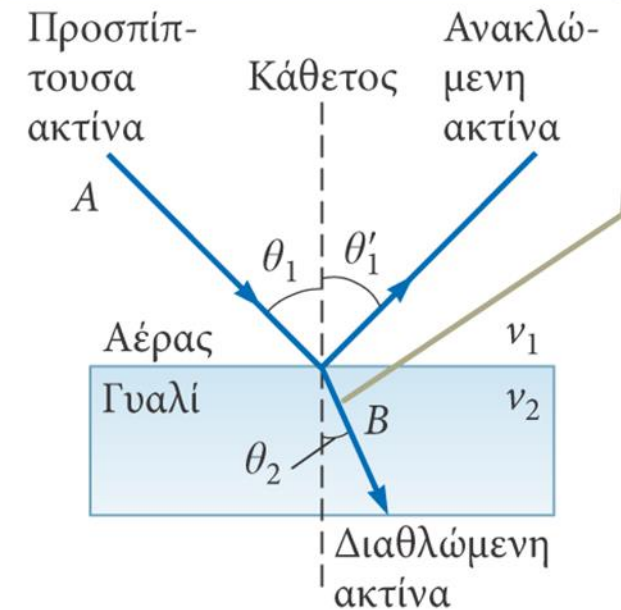
---



# Διάθλαση του φωτός

- Όταν μια ακτίνα φωτός που διαδίδεται σε ένα διαφανές μέσο φτάσει στο όριο κάποιου άλλου διαφανούς μέσου, τότε ένα μέρος της ενέργειάς της ανακλάται και το υπόλοιπο εισέρχεται στο δεύτερο μέσο.
- Η ακτίνα που εισέρχεται στο δεύτερο μέσο αλλάζει κατεύθυνση στο όριο μεταξύ των δύο μέσων. Αυτή η εκτροπή της ακτίνας ονομάζεται διάθλαση.
- Η προσπίπτουσα, η ανακλώμενη και η διαθλώμενη ακτίνα, καθώς και η κάθετος, βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

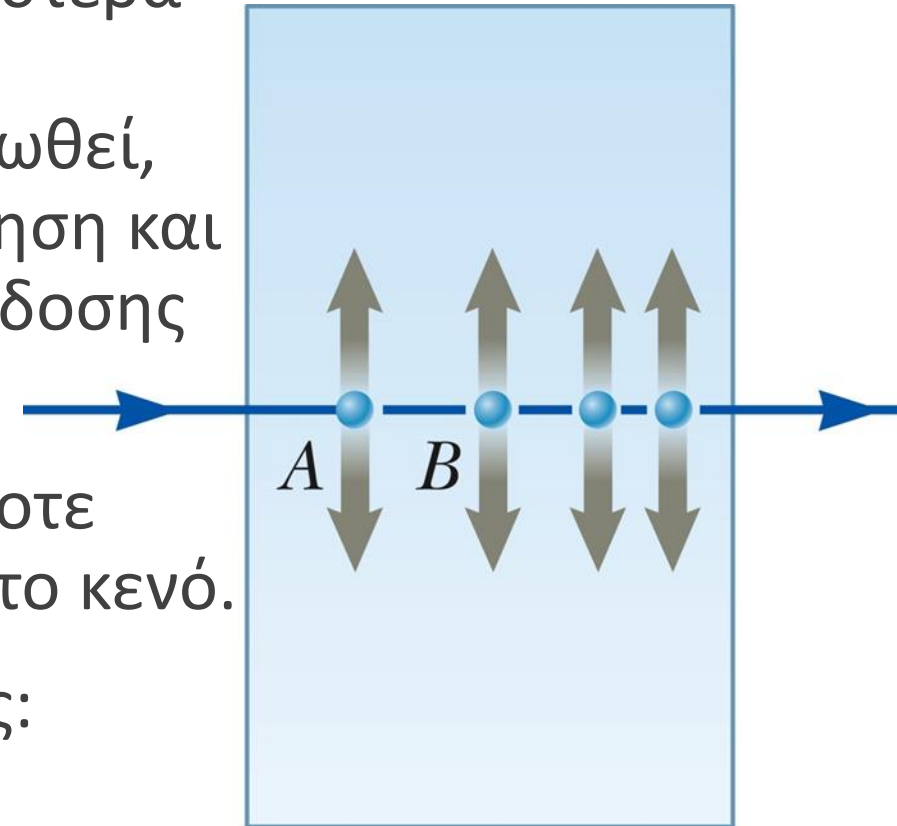
Όλες οι ακτίνες και η κάθετος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η διαθλώμενη ακτίνα εκτρέπεται προς την κάθετο επειδή  $v_2 < v_1$ .



# Ταχύτητα του φωτός και δείκτης διάθλασης

- Καθώς ο φως εισέρχεται στο γυαλί από τα αριστερά μπορεί να συναντήσει ένα ηλεκτρόνιο. Αυτό ενδέχεται να απορροφήσει το φως, να ταλαντωθεί, και να το εκπέμψει ξανά. Η συνεχής απορρόφηση και επανεκπομπή μειώνουν τη μέση ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα στο υλικό.
- Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός σε οποιοδήποτε υλικό είναι μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό.
- Ο δείκτης διάθλασης  $n$  ενός μέσου ορίζεται ως:

$$n \equiv \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο}} \equiv \frac{c}{v}$$



# Δείκτης διάθλασης για διάφορα υλικά

- Στο κενό έχουμε  $n=1$ . Στον αέρα  $n \cong 1$  και γενικά στα υλικά  $n > 1$ .
- Παραδείγματα υλικών και ο δείκτης διάθλασής τους:

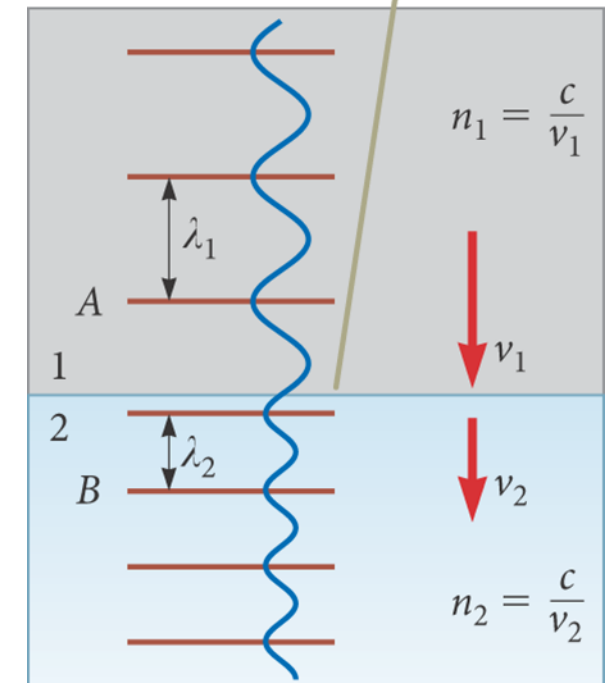
Υλικό	Δείκτης διάθλασης	Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Στερεά στους 20°C		Υγρά στους 20°C	
Κυβική ζirkονία	2.20	Βενζόλιο	1.501
Διαμάντι (C)	2.419	Διθειάνθρακας	1.628
Φθορίτης (CaF <sub>2</sub> )	1.434	Τετραχλωράνθρακας	1.461
Τηγμένος χαλαζίας (SiO <sub>2</sub> )	1.458	Αιθυλική αλκοόλη	1.361
Φωσφορούχο γάλλιο	3.50	Γλυκερίνη	1.473
Στεφανύαλος	1.52	Νερό	1.333
Πυριτύαλος	1.66		
Πάγος (H <sub>2</sub> O)	1.309	Αέρια (0°C, 1 atm)	
Πολυστυρένιο	1.49	Αέρας	1.000 293
Χλωριούχο νάτριο (NaCl)	1.544	Διοξείδιο του άνθρακα	1.000 45

Σημείωση: Όλες οι τιμές αντιστοιχούν σε φως το οποίο έχει μήκος κύματος 589 nm στο κενό.

# Μεταβολές του φωτός από μέσο σε μέσο

- Η συχνότητα του φωτός δεν μεταβάλλεται όταν το φως περνά από ένα μέσο σε ένα άλλο.
- Όμως, τόσο η ταχύτητα του κύματος όσο και το μήκος του μεταβάλλονται.
- Ξέρουμε ότι  $v = f \cdot \lambda$ ,  $f_1 = f_2$  αλλά  $v_1 \neq v_2$ , άρα  $\lambda_1 \neq \lambda_2$ .
- Γενικά όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης διάθλασης, τόσο πιο αργά διαδίδεται το κύμα φωτός.

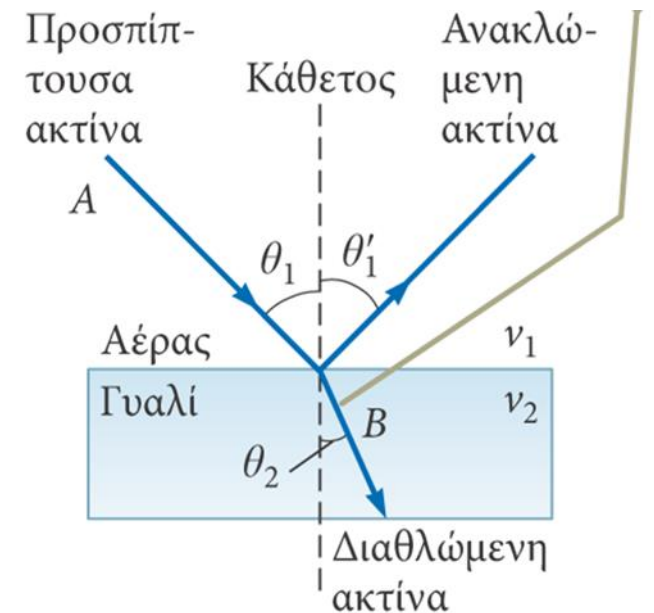
Καθώς το κύμα περνά από το ένα μέσο στο άλλο, το μήκος του μεταβάλλεται, αλλά η συχνότητά του παραμένει σταθερή.



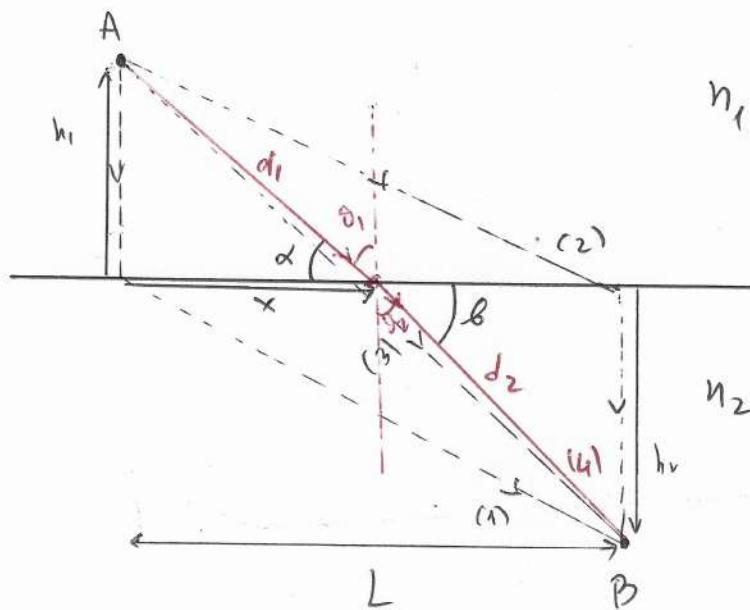
# Ο νόμος του Snell

$$n_1 \sin\vartheta_1 = n_2 \sin\vartheta_2$$

- $\vartheta_1$  είναι η γωνία πρόσπτωσης.
- $\vartheta_2$  είναι η γωνία διάθλασης.
- Η πειραματική ανακάλυψη αυτής της σχέσης αποδίδεται συνήθως στον Willebrord Snell και γι' αυτό η σχέση είναι γνωστή ως ο νόμος της διάθλασης του Snell.
- Ο νόμος του Snell μπορεί να αποδειχτεί και με την αρχή του Huygens.



2] Ο νόμος του Snell ( $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ )



$n_1$  ← Μέσο με δείκτη διάθλασης  $n_1 = \frac{c}{v_1}$

$n_2$  ← Μέσο με δείκτη διάθλασης  $n_2 = \frac{c}{v_2}$

Ερώση: Ποιά διαδρομή θα ακολουθήσει το φως για να πάει από το A στο B; Την (1), την (2) την (3) ή μια γενική (4);  
 Η απάντηση ποιά από αυτές τις διαδρομές ελαχιστοποιεί το χρόνο;

Απάντηση: Βρίσκουμε το χρόνο για μια γενική διαδρομή T(x).

$$\Rightarrow T = \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2} = \frac{n_1}{c} d_1 + \frac{n_2}{c} d_2 = \frac{1}{c} [n_1 d_1 + n_2 d_2]$$

$$= \frac{1}{c} [n_1 \sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{(L-x)^2 + h_2^2}]$$

Οπότε βρίσκουμε το ελάχιστο:

$$\frac{dT(x)}{dx} = \frac{1}{c} \left[ n_1 \frac{x}{\sqrt{x^2 + h_1^2}} - n_2 \frac{(L-x)}{\sqrt{(L-x)^2 + h_2^2}} \right] = 0$$

$$\Rightarrow n_1 \cos \alpha = n_2 \cos \beta \quad ; \text{ότι } \cos \alpha = \sin \theta_1$$

$$\Rightarrow \boxed{n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2} \quad \text{ή Νόμος του Snell}$$

$$\hat{n} \quad \frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$

► Σχόλιο: Αν φανούν ποτέ ξεδιάντροπα σε μια οθόνη και  
δείτε κάποιον σε νερό να κολυμπάει την λάμπα ερμού.  
Βεβαιώστε με ταχύτητα σας ότι αυτό  $v_1$ , ήτοι με  
ταχύτητα σας με νερό και ακολουθείτε με διαφάνεια με:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad \nabla$$

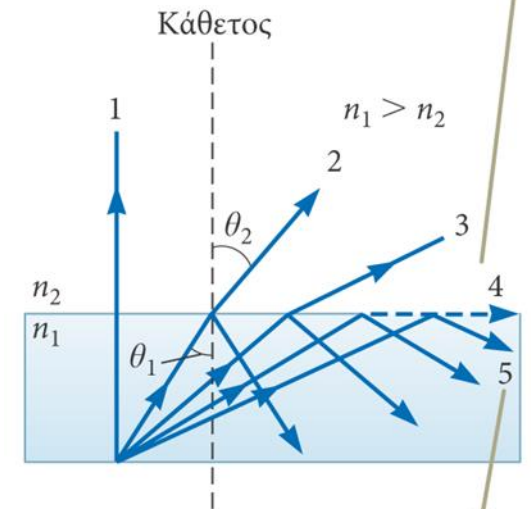
# Ολική ανάκλαση

- Όταν το φως κατευθύνεται από ένα μέσο με δεδομένο δείκτη διάθλασης σε ένα μέσο με μικρότερο δείκτη διάθλασης, τότε παρατηρείται ένα φαινόμενο που ονομάζεται ολική εσωτερική ανάκλαση.
- Για μια συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης (κρίσιμη γωνία  $\vartheta_c$ ), η γωνία διάθλασης ισούται με  $90^\circ$ :

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (\text{για } n_1 > n_2)$$

- Για γωνίες πρόσπτωσης  $> \vartheta_c$ , η δέσμη ανακλάται πλήρως στο όριο μεταξύ των δύο οπτικών μέσων και τότε η ακτίνα υπακούει στον νόμο της ανάκλασης.

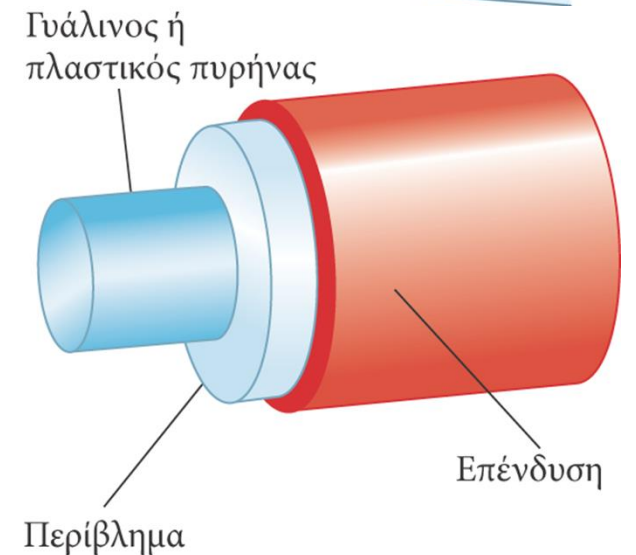
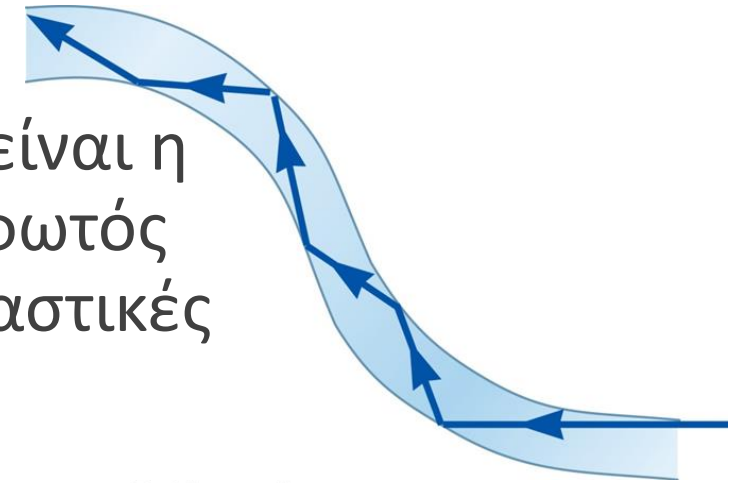
Καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης  $\theta_1$ , η γωνία διάθλασης  $\theta_2$  αυξάνεται μέχρι με την τιμή των  $90^\circ$  (ακτίνα 4). Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει ότι σε αυτή τη διεύθυνση δεν μεταδίδεται ενέργεια.



Για ακόμα μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης, παρατηρείται ολική εσωτερική ανάκλαση (ακτίνα 5).

# Οπτικές ίνες

Μια εφαρμογή της εσωτερικής ολικής ανάκλασης είναι η μετάδοση (ή «διοχέτευση» ή κυματοδότηση) του φωτός από ένα σημείο σε ένα άλλο, χρησιμοποιώντας πλαστικές ή γυάλινες ράβδους (τις οπτικές ίνες).



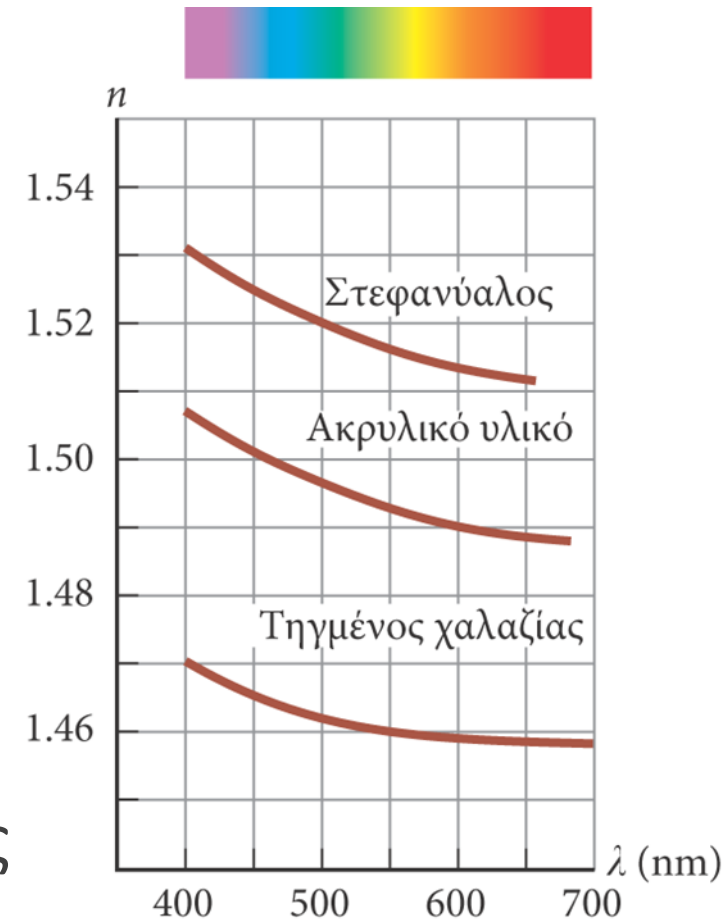
# Ολική ανάκλαση

---



# Διασπορά

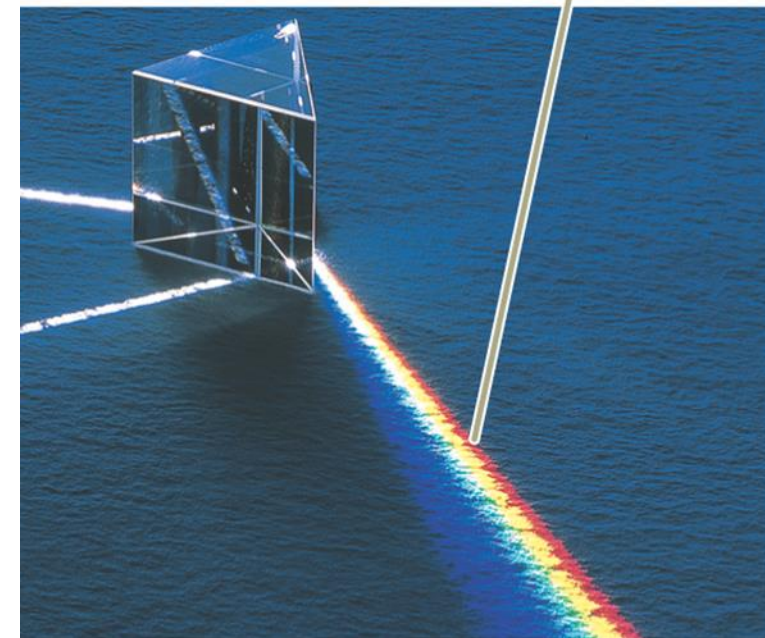
- Για ένα δεδομένο υλικό, ο δείκτης διάθλασης μεταβάλλεται συναρτήσει του μήκους κύματος του φωτός το οποίο διέρχεται από το υλικό.
- Αυτή η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης  $n$  από το μήκος κύματος  $\lambda$  ονομάζεται διασπορά.
- Σύμφωνα με τον νόμο του Snell, όταν σε ένα υλικό με διασπορά προσπίπτει φως με διαφορετικά μήκη κύματος, τότε εκτρέπεται υπό διαφορετικές γωνίες.
- Γενικά, ο δείκτης διάθλασης ενός υλικού μειώνεται όταν αυξάνεται το μήκος κύματος. Έτσι το ιώδες φως εκτρέπεται περισσότερο σε σχέση με το κόκκινο.



# Διάθλαση σε πρίσμα

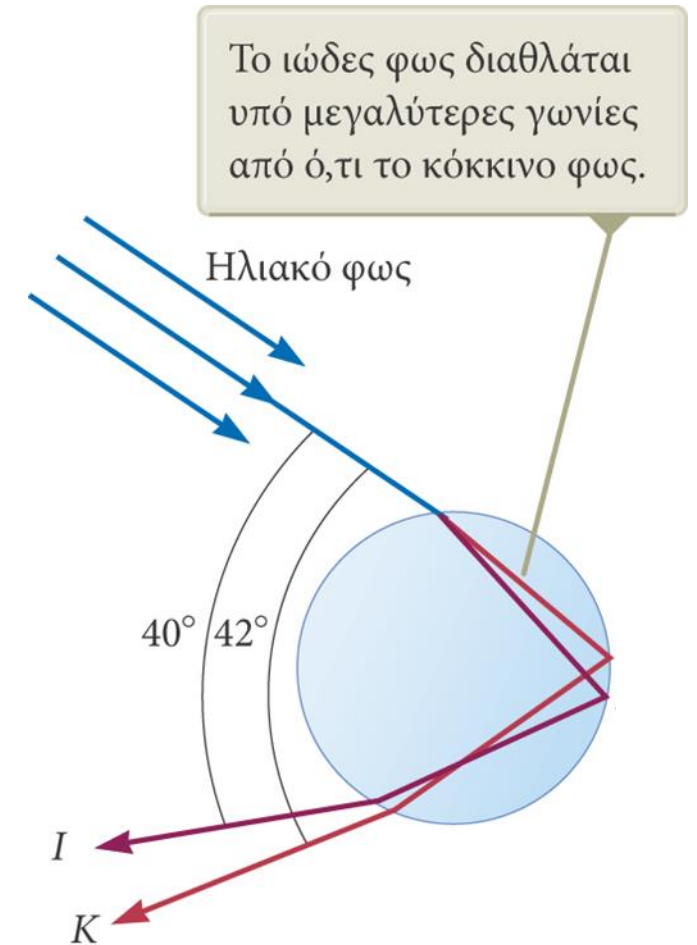
- Το λευκό φως περιλαμβάνει όλα τα μήκη κύματος του ορατού φάσματος.
- Επειδή κάθε χρώμα έχει διαφορετική γωνία εκτροπής, το λευκό φως αναλύεται σε ένα φάσμα.
- Το ιώδες φως παρουσιάζει τη μεγαλύτερη εκτροπή.
- Το κόκκινο φως παρουσιάζει τη μικρότερη εκτροπή.
- Τα υπόλοιπα χρώματα βρίσκονται μεταξύ αυτών των δύο χρωμάτων.

Τα χρώματα της διαθλώμενης δέσμης διαχωρίζονται, επειδή η διασπορά στο εσωτερικό του πρίσματος κάνει το φως διαφορετικών μηκών κύματος να διαθλάται κατά διαφορετικές γωνίες.



# Το ουράνιο τόξο

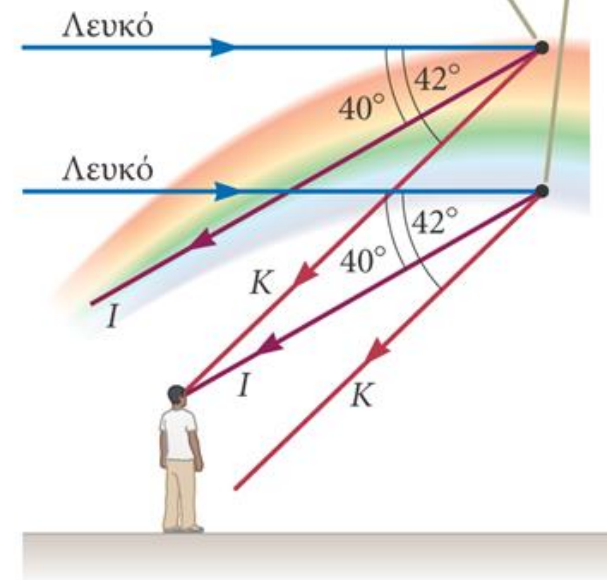
- Το φως αρχικά ανακλάται στην πίσω επιφάνεια της σταγόνας.
- Κατόπιν, επιστρέφει στην μπροστινή επιφάνεια, όπου διαθλάται ξανά και περνά στον αέρα.
- Οι ακτίνες εξέρχονται από τη σταγόνα υπό διάφορες γωνίες.
- Η γωνία που σχηματίζει το λευκό φως με την πιο έντονη ιώδη ακτίνα είναι  $40^\circ$ .
- Η γωνία που σχηματίζει το λευκό φως με την πιο έντονη κόκκινη ακτίνα είναι  $42^\circ$ .



# Το ουράνιο τόξο

- Αν κάποιος παρατηρεί μία σταγόνα βροχής που βρίσκεται ψηλά στον ουρανό, θα δει την κόκκινη ακτίνα.
- Αν παρατηρεί μια σταγόνα που βρίσκεται πιο χαμηλά στον ουρανό, τότε θα δει το ιώδες φως που κατευθύνεται προς αυτόν καθώς αυτό έχει μεγαλύτερη συνολική εκτροπή.
- Τα υπόλοιπα χρώματα του φάσματος βρίσκονται στην ενδιάμεση περιοχή μεταξύ του κόκκινου και του ιώδους χρώματος.

Το φως της μέγιστης έντασης, το οποίο διαδίδεται προς τα μάτια του παρατηρητή από σταγόνες που βρίσκονται ψηλότερα, είναι κόκκινο, ενώ το φως μεγαλύτερης έντασης, το οποίο διαδίδεται από σταγόνες που βρίσκονται χαμηλότερα, είναι ιώδες.



# Το διπλό ουράνιο τόξο...

---

- Το δευτερεύον ουράνιο τόξο είναι πιο αχνό από το κύριο.
- Τα χρώματά του είναι αντεστραμμένα.
- Το δευτερεύον ουράνιο τόξο σχηματίζεται επειδή το φως ανακλάται δύο φορές στην εσωτερική επιφάνεια της σταγόνας προτού εξέλθει από αυτήν.
- Μπορούν να σχηματιστούν ουράνια τόξα «μεγαλύτερης τάξης», αλλά η έντασή τους είναι μικρή

