



Τμήμα Χημείας Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εργαστήριο Φυσικοχημείας Ι

ΧΗΜ-311

Γ' εξάμηνο 2019-20

Φως και Οπτική Οργανολογία φασματοσκοπίας

Βιβλιογραφία

Serway II 34, III 35, 36, 37, 38 -- Young 34-38

Διαφάνειες Φ-II (Θ. Κιτσόπουλος)

AtΦΧ : Κεφ.17, AtΦΧ2 : Κεφ. 24 (δείκτης διάθλασης)

Δ. Άγγλος, Θ. Κιτσόπουλος, Δ. Ζαούρης

Γ. Ασημέλλης, 'Μαθήματα Οπτικής' (Σύγχρονη Γνώση, 2007)

Serway II 34, III 35, 36, 37, 38

Young 34-38

AtΦΧ : Κεφ.17, AtΦΧ2 : Κεφ. 24 (δείκτης διάθλασης)

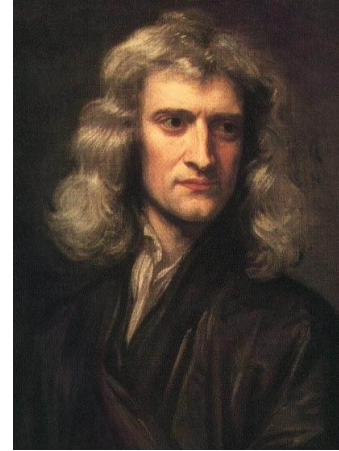
Η φύση του φωτός

5^{ος} αι. π.Χ. – 19^{ος} αι. μ.Χ.

- Το φως είναι μια δεσμη από σωματίδια, τα οποία εκπέμπει μια φωτοβολούσα πηγή.
- Κύριος αρχιτέκτονας της σωματιδιακής θεώρησης του φωτός είναι ο Isaac Newton.
- Με την σωματιδιακή φύση του φωτός ερμηνεύτηκαν πειραματικά ιδιότητες του φωτός όπως η **ανάκλαση** και η **διάθλαση**.

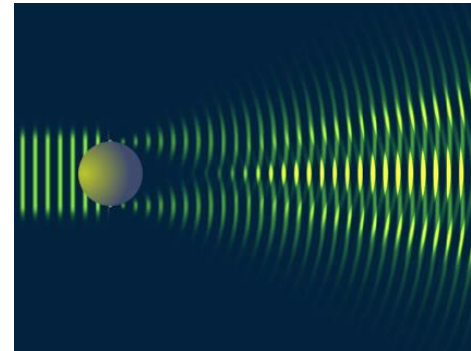
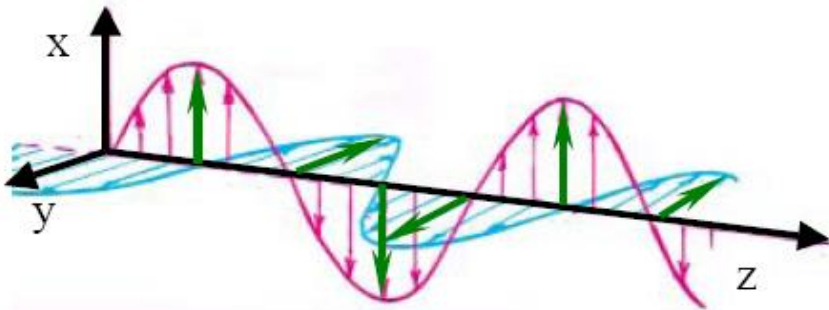
Το 1678 έγινε η ανατροπή

- Ο Christian Huygens απέδειξε τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης βασιζόμενος στο ότι το φως είναι ένα είδος κυματικής κίνησης.
- Αλλά : Οι απόψεις του δεν έγιναν αποδεκτές για τους παρακάτω λόγους:
 - Αν το φως ήταν κύμα δεν θα μπορούσε να διαδοθεί στο διάστημα, διότι θα χρειαζόταν κάποιο μέσο.
 - Αν ήταν κύμα θα έπρεπε να παρακάμπτει τυχόν εμπόδια (**περίθλαση**).
- Το 1660 ο Francesco Grimaldi είχε αποδείξει πειραματικά ότι το φως περιθλάται.



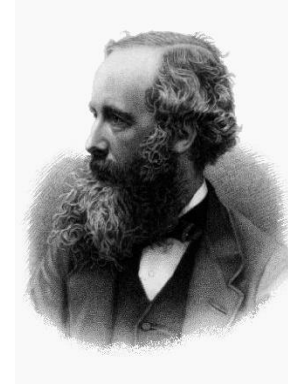
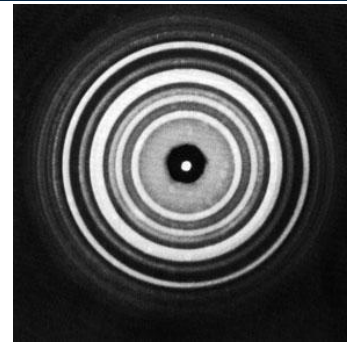
Η φύση του φωτός

- Η επιβεβαίωση ήρθε το 1801 από τον Thomas Young
- Απόδειξε σαφέστατα ότι κάτω από ορισμένες συνθήκες το φως συμβάλλει σαν να είναι κύμα.
- Το 1873 ο Maxwell είπε ότι το φως είναι Η/Μ κύμα και έχει ταχύτητα **$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec}$**
- Το 1887 ο Hertz απέδειξε την θεωρία του Maxwell
- Ο Hertz απέδειξε ότι τα Η/Μ κύματα ανακλώνται, διαθλώνται και έχουν όλες τις ιδιότητες των κυμάτων.



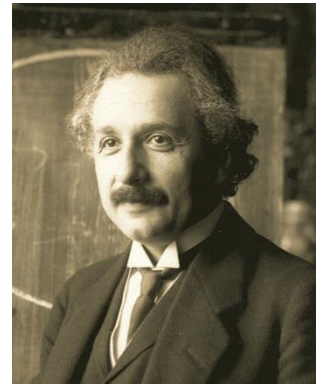
Χαρακτηριστικά κύματος

ν , λ , E_0 , φ (φάση), k (κατεύθυνση),
πόλωση, ένταση $I = (1/2)c \epsilon_0 E_0^2$

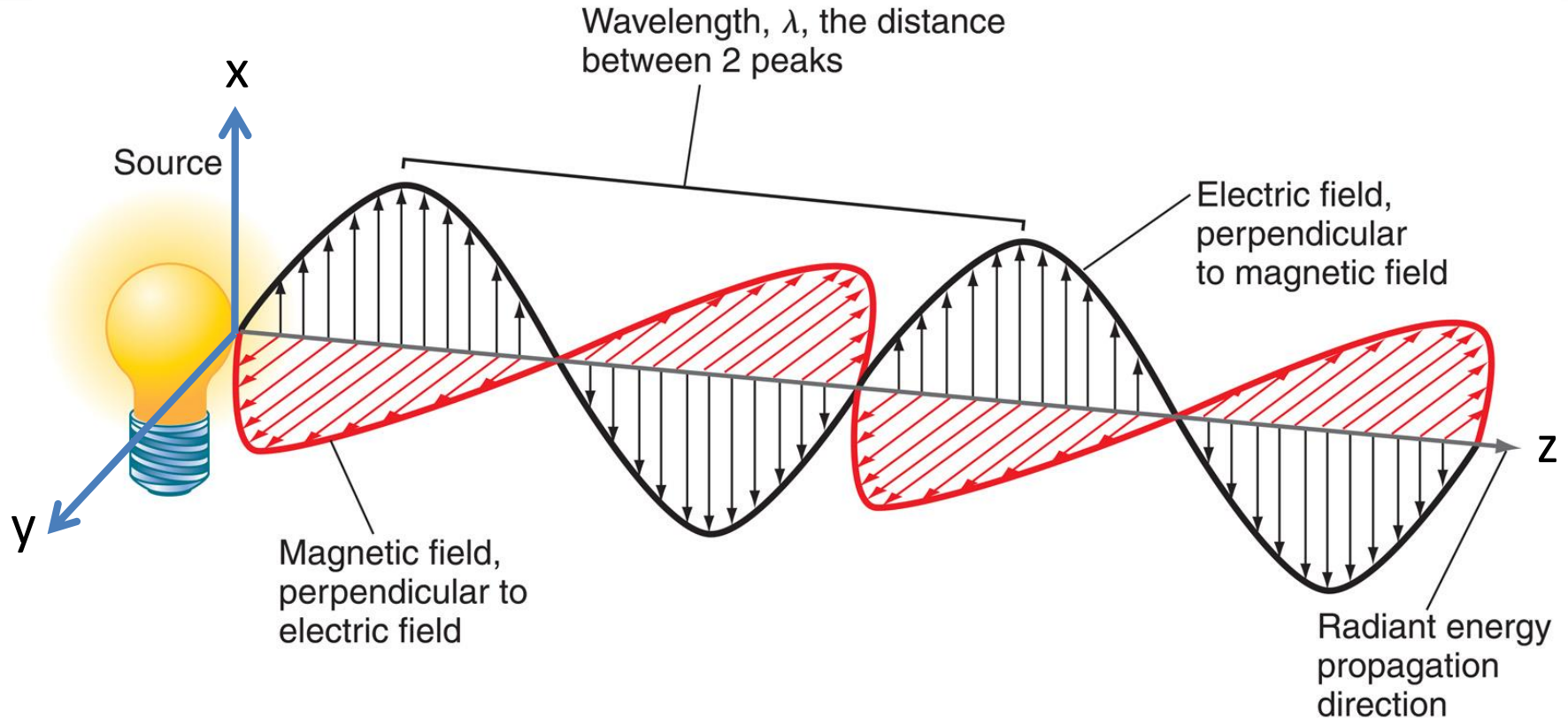


Η φύση του φωτός

- Παρά την επιτυχία του Η/Μ ορισμένα φαινόμενα δεν μπορούσαν να εξηγηθούν.
- Το 1900 ο Max Planck διατύπωσε την θεωρία των κβάντων.
- Με την θεωρία των κβάντων το 1905 ο Albert Einstein ερμήνευσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.
- Σήμερα πιστεύουμε στην διττή φύση του φωτός
 - Κυματική φύση → διάδοση, συμβολή, περίθλαση
 - Σωματιδιακή φύση → φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton



Το φως ως Η/Μ κύμα



© 2010 Pearson Education, Inc.

Επίπεδο κύμα διαδιδόμενο κατά τον άξονα z (πολωμένο κατά τον άξονα x)

$$\vec{\tilde{E}}(z, t) = \hat{x} \tilde{E}_o e^{i(kz - \omega t)}$$

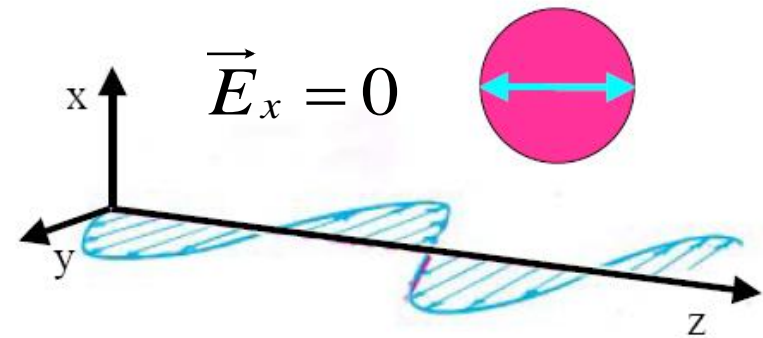
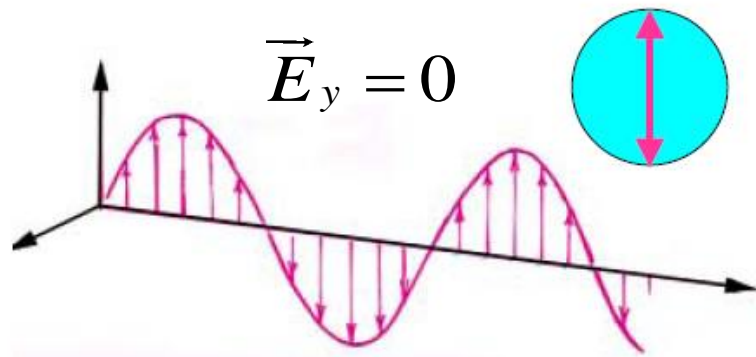
$$\vec{E}(z, t) = \hat{x} E_o \cos(kz - \omega t + \delta)$$

$$\vec{\tilde{B}}(z, t) = \hat{y} \frac{\tilde{B}_o}{c} e^{i(kz - \omega t)}$$

$$\vec{B}(z, t) = \hat{y} \frac{E_o}{c} \cos(kz - \omega t + \delta)$$

Πόλωση του φωτός (Polarisation)

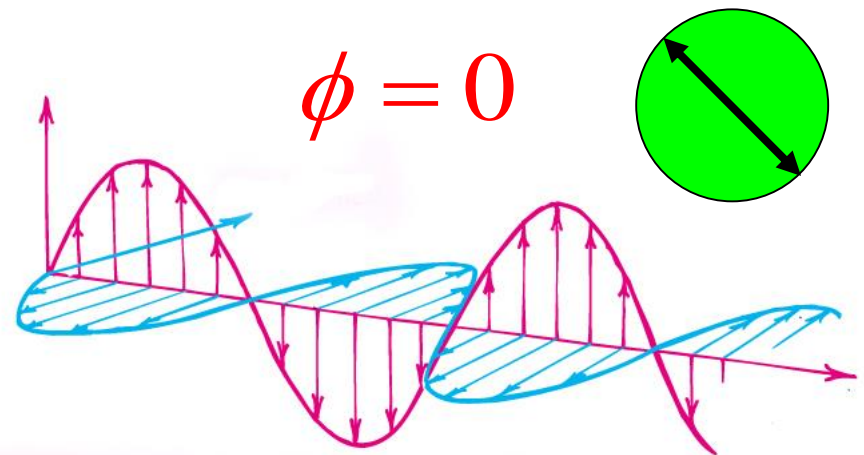
- Το φως αποτελεί την σύνθεση μεγάλου αριθμού Η/Μ κυμάτων, που ταλαντώνονται προς κάθε δυνατή διεύθυνση, κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- **Γραμμικά πολωμένο φως** : η **διεύθυνση ταλάντωσης** του ηλεκτρικού πεδίου **παραμένει σταθερή**.



$$\vec{E} = \vec{E}_x + \vec{E}_y$$

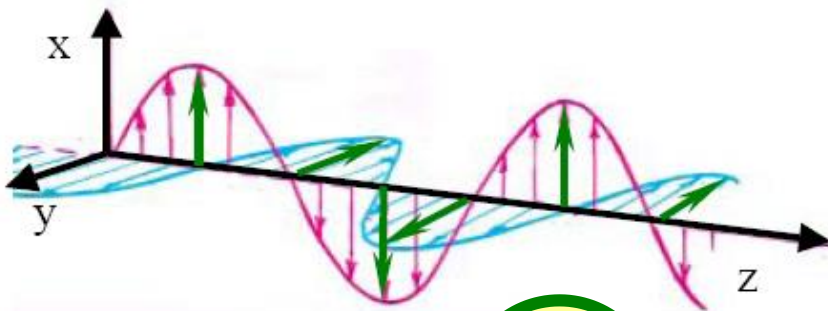
$$\vec{E}_x = \hat{i}E_0 \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(z - ct)\right]$$

$$\vec{E}_y = \hat{j}E_0 \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(z - ct + \phi)\right]$$

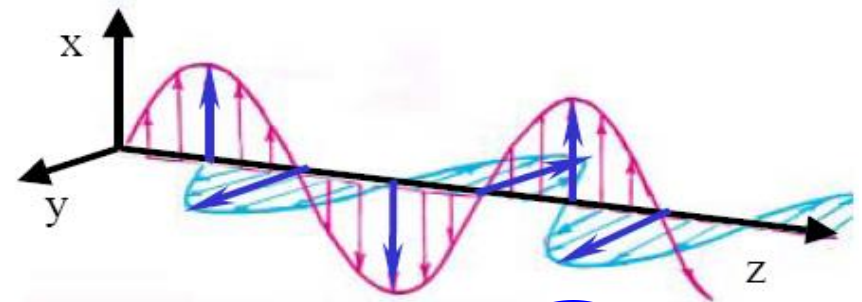
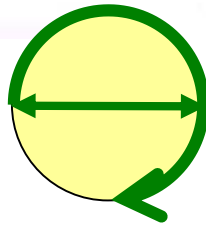


Πόλωση του φωτός (Polarisation)

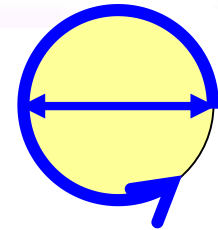
- Κυκλικά πολωμένο φως : η διεύθυνση ταλάντωσης του ηλεκτρικού πεδίου περιστρέφεται γύρω από τον άξονα διάδοσης



$$\phi = +\frac{\pi}{2}$$



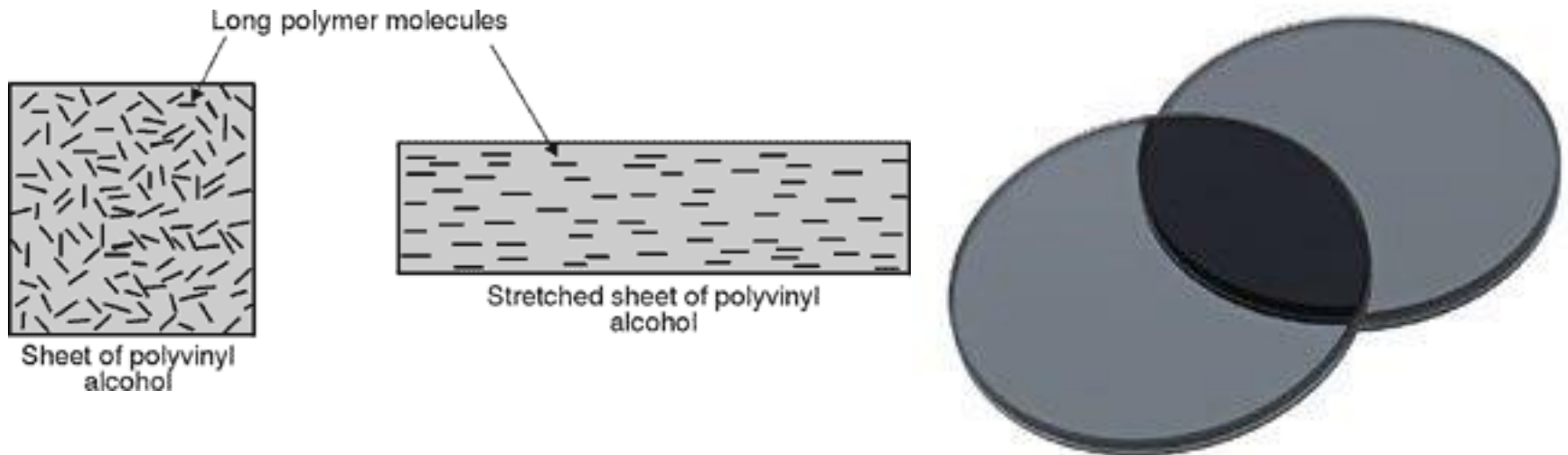
$$\phi = -\frac{\pi}{2}$$



$$\vec{E} = E_0 \left\{ \hat{i} \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (z - ct) \right] + j \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} \left(z - ct \pm \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\}$$

Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

Διέλευση μέσω λεπτών υμενίων (φίλμ) πολυμερών, που περιέχουν κατάλληλα προσανατολισμένα χρωμοφόρα [Διχρωικοί Πολωτές]



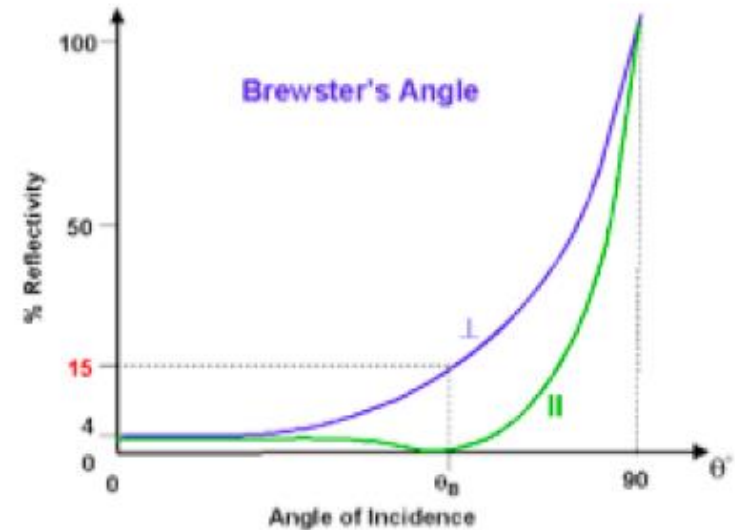
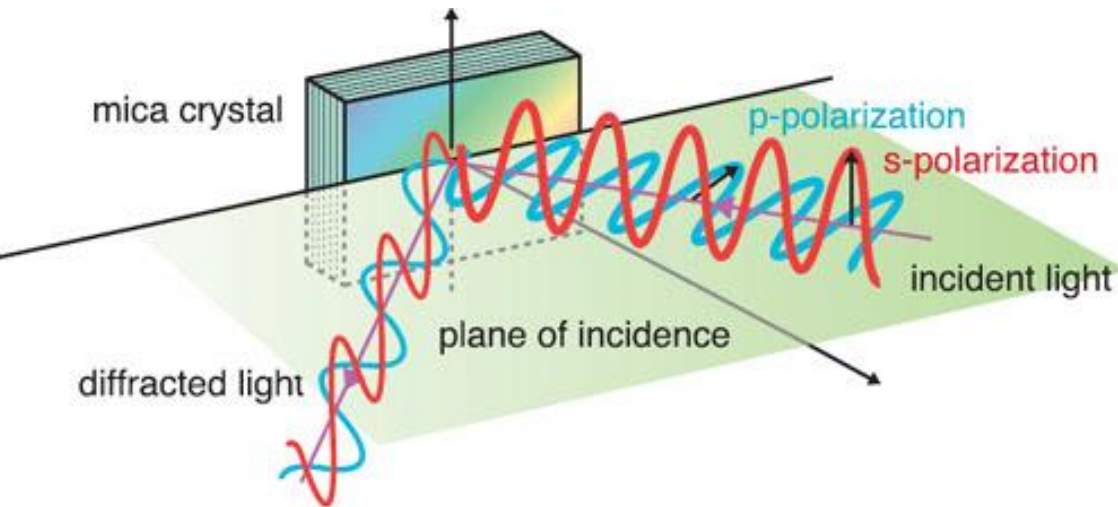
http://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-902-LaserCourse/c06-10/mod06_10.htm

<https://en.wikipedia.org/wiki/Polarizer>

Πόλωση του φωτός (Polarisation)

Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

Ανάκλαση υπό γωνία Brewster



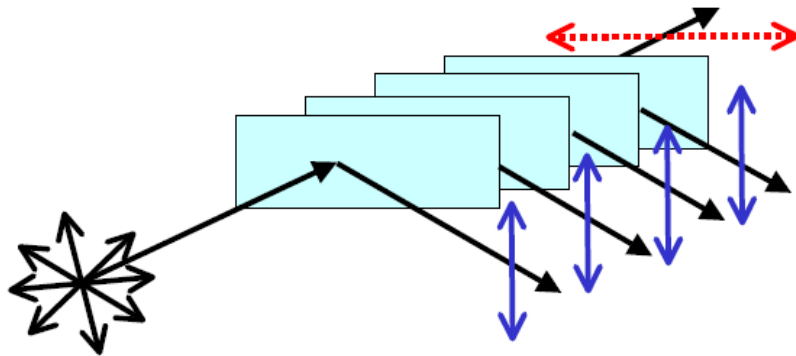
$$\tan \theta_B = \frac{n_{glass}}{n_{air}}$$

Για αέρα/γυαλί
 $\theta_B \approx 56,3^\circ$

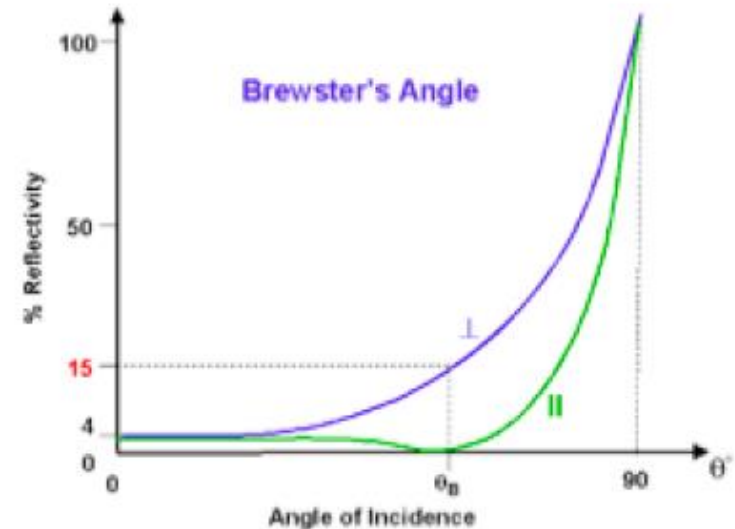
Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

Ανάκλαση υπό γωνία Brewster

- Η ανακλώμενη δέσμη είναι πολωμένη **ΚΑΘΕΤΑ** στο επίπεδο πρόσπτωσης.
- Το **επίπεδο πρόσπτωσης** ορίζεται από την διεύθυνση της αρχικής δέσμης και της καθέτου στο επίπεδο στο σημείο πρόσπτωσης.



Η γωνία πρόσπτωσης **Brewster, θ_B** , είναι εκείνη κατά την οποία η συνιστώσα της προσπίπτουσας δέσμης που ταλαντώνεται εντός του επιπέδου πρόσπτωσης (**s**) έχει μηδενική ανακλαστικότητα. Κατα συνέπεια παρατηρείται ανάκλαση μόνο της κάθετης προς το επίπεδο πρόσπτωσης συνιστώσας (**p**)



$$\tan \theta_B = \frac{n_{glass}}{n_{air}}$$

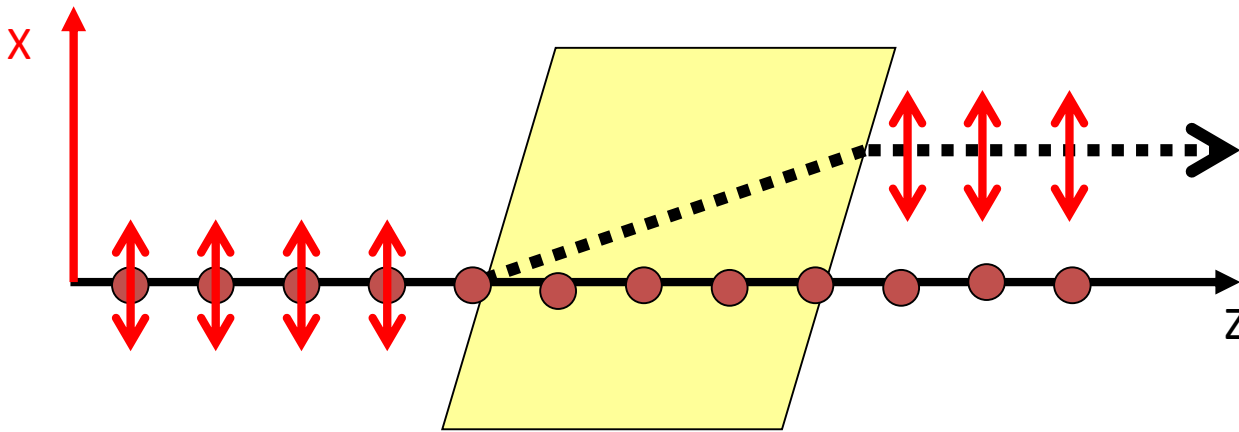
Για αέρα/γυαλί
 $\theta_B \approx 56,3^\circ$

Πόλωση του φωτός (Polarisation)

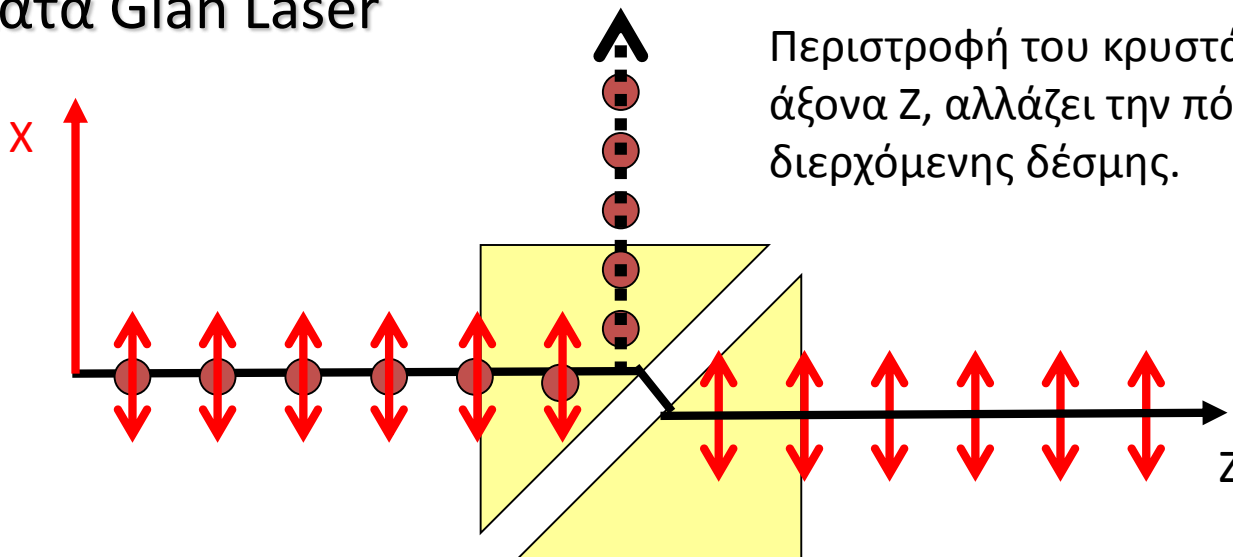
Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

Διπλοθλαστικοί κρύσταλλοι

Κρύσταλλοι που διαχωρίζουν χωρικά τις κατά Y- και κατά X- πολωμένες συνιστώσες



Πρίσματα Glan Laser



Το φως ως Η/Μ κύμα

Ένταση φωτός

Πυκνότητα ενέργειας Η/Μ πεδίου :

$$U = \frac{1}{2} \left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0} \right) \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} U = \epsilon_0 E^2 = \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kx - \omega t + \delta)$$

Για μονοχρωματικό επίπεδο κύμα ισχύει :

$$B^2 = \frac{E^2}{c^2} = \mu_0 \epsilon_0 E^2$$

Ροή ενέργειας (διάνυσμα Poynting) :

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{E} \times \vec{B})$$

Για μονοχρωματικό επίπεδο κύμα ισχύει :

$$\vec{S} = \hat{z} c \epsilon_0 E_0^2 \cos^2(kx - \omega t + \delta) = cU\hat{z}$$

Ορμή Η/Μ πεδίου :

$$\vec{p} = \frac{1}{c^2} \vec{S}$$

Μέση ενέργεια Η/Μ πεδίου :

$$\langle U \rangle = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

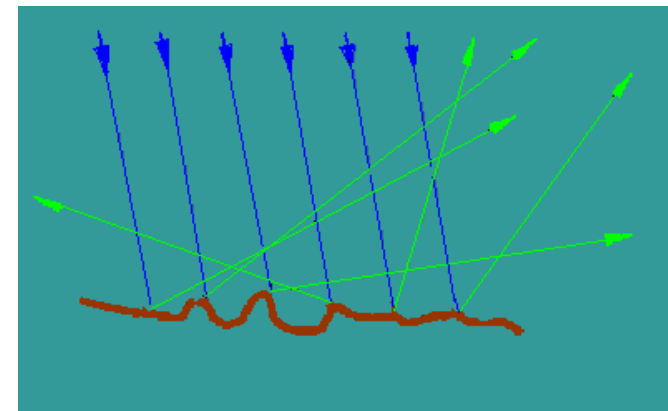
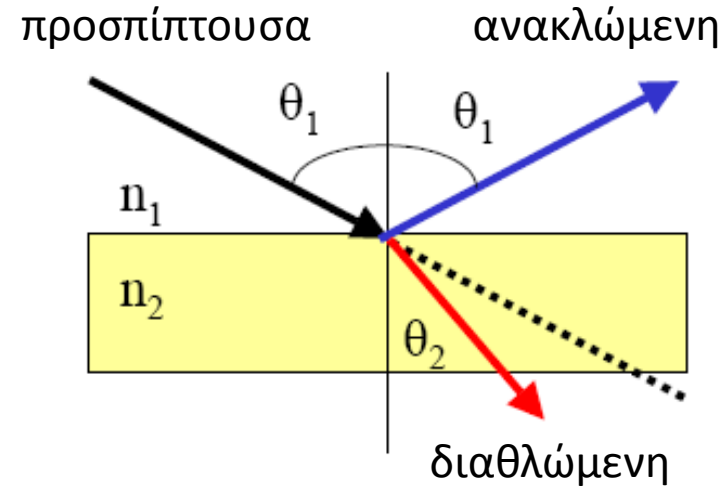
Μέση ροή ενέργειας :

$$\langle \vec{S} \rangle = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \hat{z} = c \langle U \rangle \hat{z}$$

Ένταση = Μέτρο της μέσης ροής ενέργειας : **$I = \langle S \rangle = (1/2)c \epsilon_0 E_0^2$**

Ανάκλαση του φωτός (Reflection)

- Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει σε μια λεία επιφάνεια μέρος αυτής ανακλάται
 - Η γωνία πρόσπτωσης είναι ίδια με την γωνία ανάκλασης.
 - Οι ανακλώμενες ακτίνες παραμένουν παράλληλες.
 - Αν η επιφάνεια δεν είναι λεία, τότε οι ανακλώμενες ακτίνες διαδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις οπότε έχουμε το φαινόμενο της διάχυσης (διάχυτη ανάκλαση).



Ειδική περίπτωση : κάθετη πρόσπτωση

I_0 : προσπίπτουσα

$$R = \frac{I_R}{I_0} = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}} \right)^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

I_R : ανακλώμενη

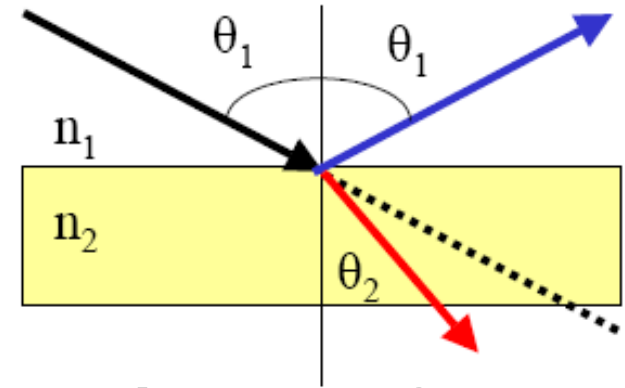
$$T = \frac{I_T}{I_0} = \left(\frac{E_{0T}}{E_{0I}} \right)^2 = \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{2n_1}{n_1 + n_2} \right)^2$$

I_T : διερχόμενη

$$R + T = 1$$

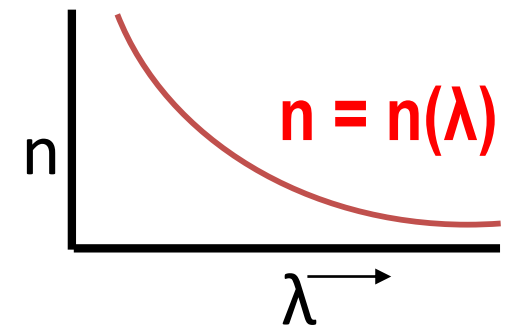
Διάθλαση του φωτός (Refraction)

- Όταν μια ακτίνα φωτός που διαδίδεται σ' ένα διαφανές μέσο, συναντήσει μια διαχωριστική επιφάνεια με άλλο διαφανές μέσο, μέρος αυτής ανακλάται ενός το υπόλοιπο διαθλάται στο δεύτερο μέσο.
- Η διαθλώμενη ακτίνα δεν συνεχίζει την πορεία της προσπίπτουσας αλλά σχηματίζει μια γωνία με την κάθετο στην διαχωριστική επιφάνεια των δυο μέσων.
- Οι ακτίνες ανακλώμενου , προσπίπτοντος και διαθλώμενου φωτός ευρίσκονται στο ίδιο επίπεδο



Νόμος του Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



Δείκτης διάθλασης (refractive index)

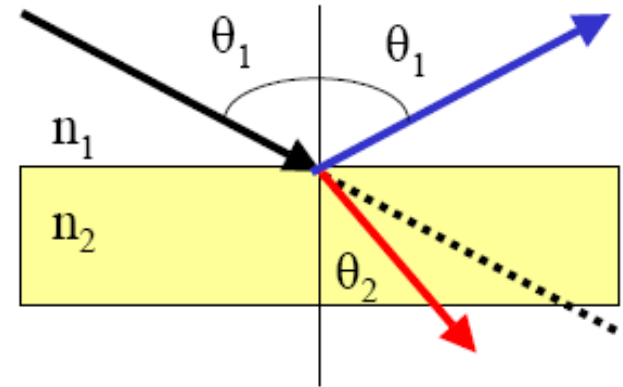
$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

Ο δείκτης διάθλασης ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του φωτός σε ένα μέσο ως προς την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Σε μοριακό επίπεδο συνδέεται με την επαγόμενη μοριακή πόλωση (P_m) υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του φωτός και κατα συνέπεια με την ηλεκτρονική πολωσιμότητα α . ($P_m = \alpha \cdot E$)

Ανάκλαση - Διάθλαση του φωτός – Εξισώσεις Fresnel

- Όταν μια ακτίνα φωτός που διαδίδεται σ' ένα διαφανές μέσο, συναντήσει μια διαχωριστική επιφάνεια με άλλο διαφανές μέσο, μέρος αυτής ανακλάται ενός το υπόλοιπο διαθλάται στο δεύτερο μέσο.
- Το ποσοστό της ανακλώμενης και διαθλώμενης δέσμης προσδιορίζεται από τις :



Νόμος του Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Εξισώσεις Fresnel

$$r_p = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}}\right)_p = \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad r_s = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}}\right)_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}$$

$$t_p = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}}\right)_p = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad t_s = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}}\right)_s = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1}$$

$$R + T = 1$$

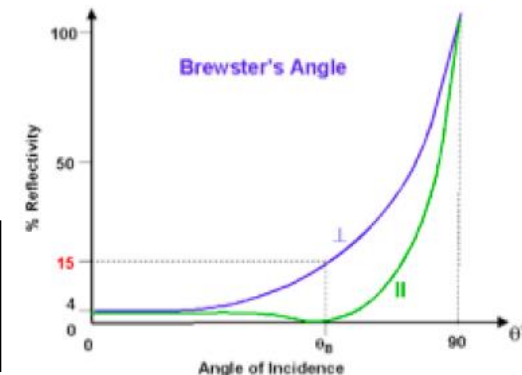
s : το ΗΠ ταλαντώνεται κάθετα στο επίπεδο πρόσπτωσης

p : το ΗΠ ταλαντώνεται εντός του επιπέδου πρόσπτωσης (parallel)

Γωνία Brewster

$$\tan \theta_B = \frac{n_{glass}}{n_{air}}$$

Για αέρα/γυαλί
 $\theta_B \approx 56,3^\circ$

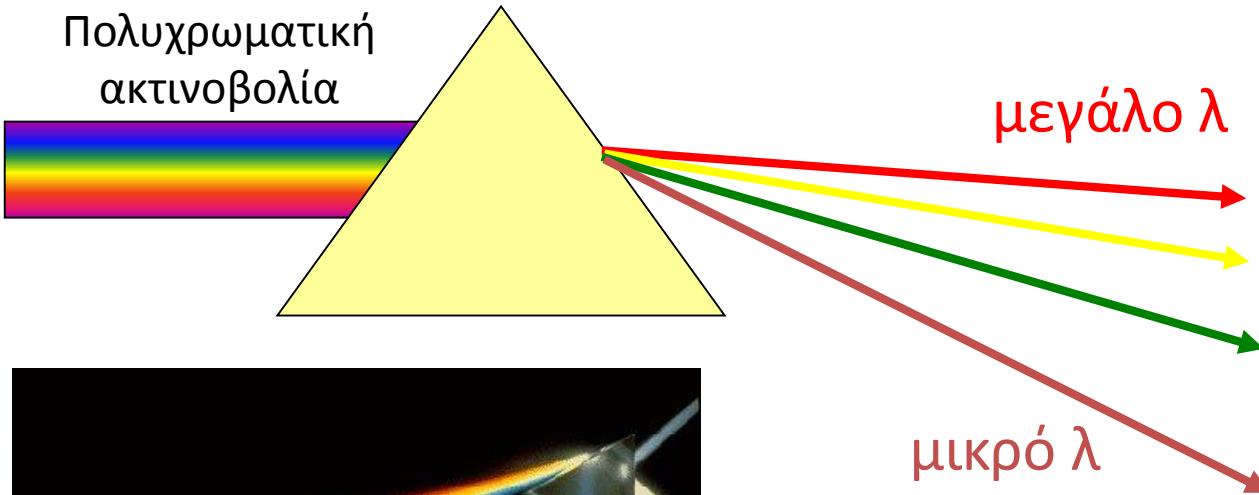


Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εφαρμογή στην οπτική και φασματοσκοπία : Πρίσματα

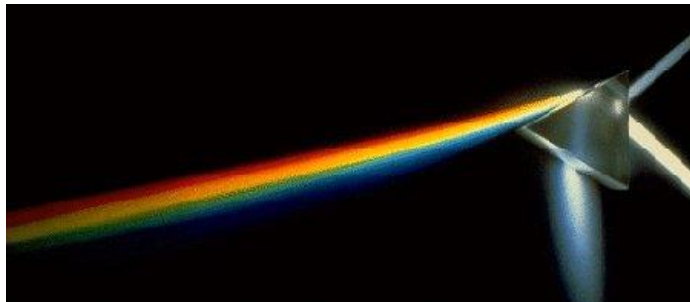
- Στην οπτική, πρίσμα είναι ένα διαφανές οπτικό στοιχείο, το οποίο έχει την ιδιότητα να διαθλά το φως.
- Διαχωρίζει το λευκό φως στα χρώματα της ίριδας.
- Γωνία εκτροπής : η γωνία που σχηματίζει η δέσμη (δεδομένου λ) καθώς εξέρχεται από το πρίσμα σε σχέση με την εισερχόμενη (μονο- ή πολυ-χρωματική) δέσμη.
- Η γωνία εκτροπής μειώνεται με αύξηση του λ

Πολυχρωματική
ακτινοβολία



$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = b \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|$$

b : βάση του πρίσματος



Εφαρμογή στην οπτική και φασματοσκοπία : Πρίσματα

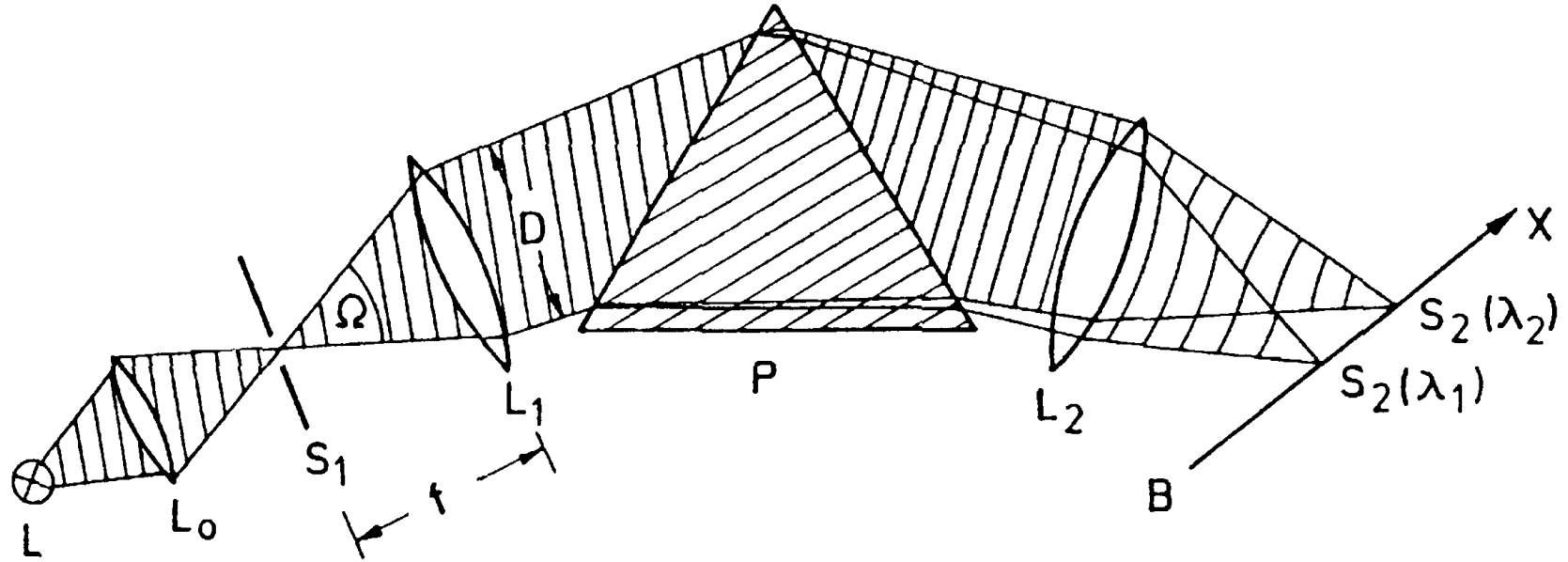


Fig. 4.1. Prism spectrograph

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = b \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|$$

b : βάση του πρίσματος

THE USE OF THE AO Spencer SPECTROMETER

by
Roger S. Estey, Ph. D.
Research Physicist

American  Optical
COMPANY
Instrument Division
Buffalo 15, New York
COPYRIGHT 1938

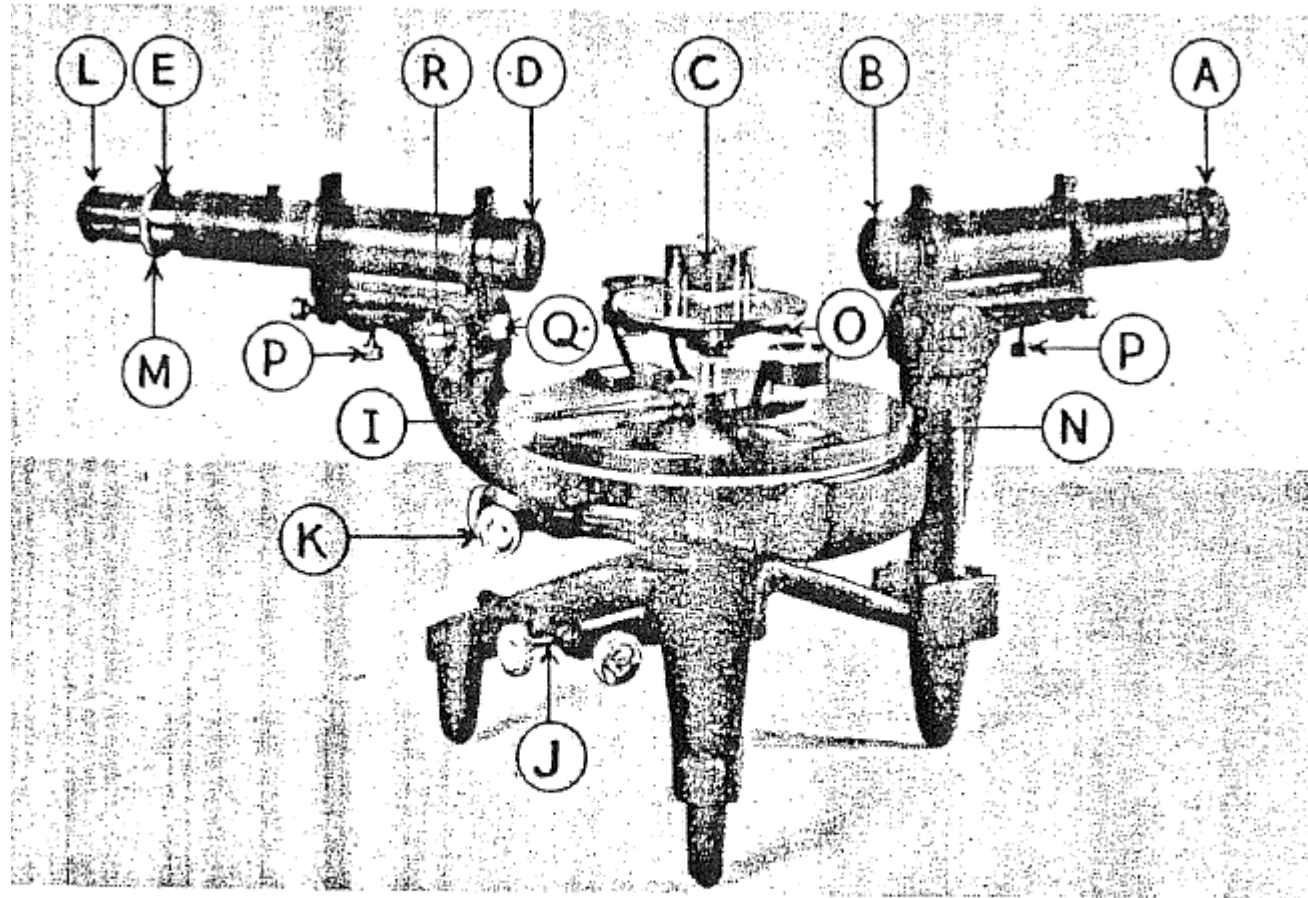
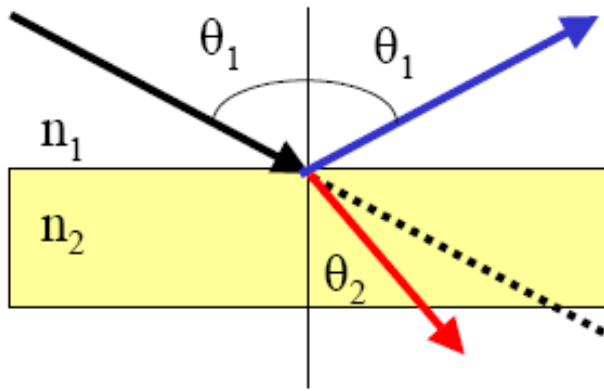


Fig. 1. The Spencer Spectrometer. A—Slit; B—Collimator Objective; C—Dispersing Prism; D—Telescope Objective; E—Position of Cross Hairs; I—Prism Table Clamping Screw; J—Prism Table Clamping and Tangent Screws; K—Telescope Arm Clamping and Tangent Screws; L—Eyepiece Ring; M—Telescope Focusing Ring; N—Divided Circle Dust Cover; O—Prism Table Leveling Screws; P—Collimator and Telescope Leveling Screws; Q—Telescope Bearing Front Screw; R—Telescope Bearing Side Screws.

Διάθλαση

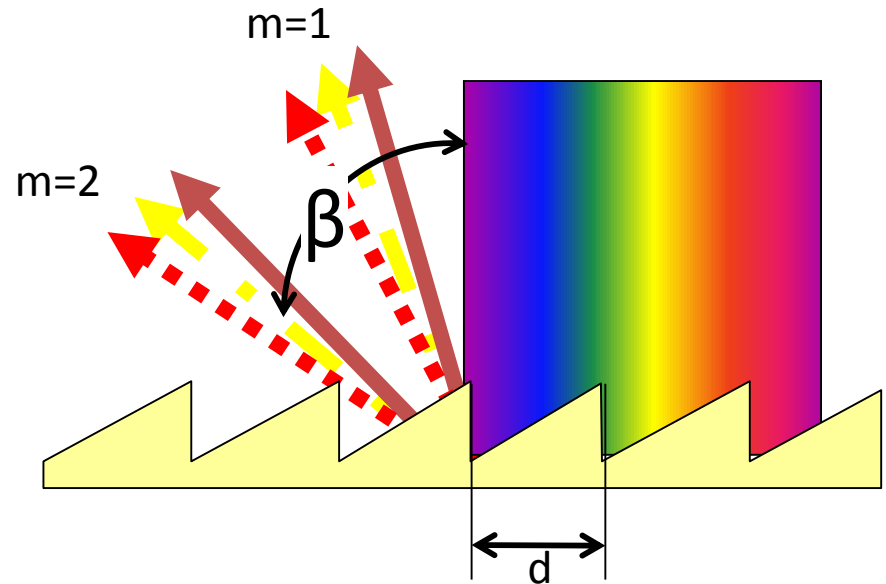
Νόμος του Snell $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



Πειραματική διάταξη



Περίθλαση



Συνθήκη ενισχυτικής συμβολής

$$d \sin \beta = m \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$

- Διαθλασίμετρο
- Λυχνία υδραργύρου
- Τροφοδοτικό
- Πρίσματα γυαλιού, flint crown, μεθανόλη
- Φράγμα περίθλασης

Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία

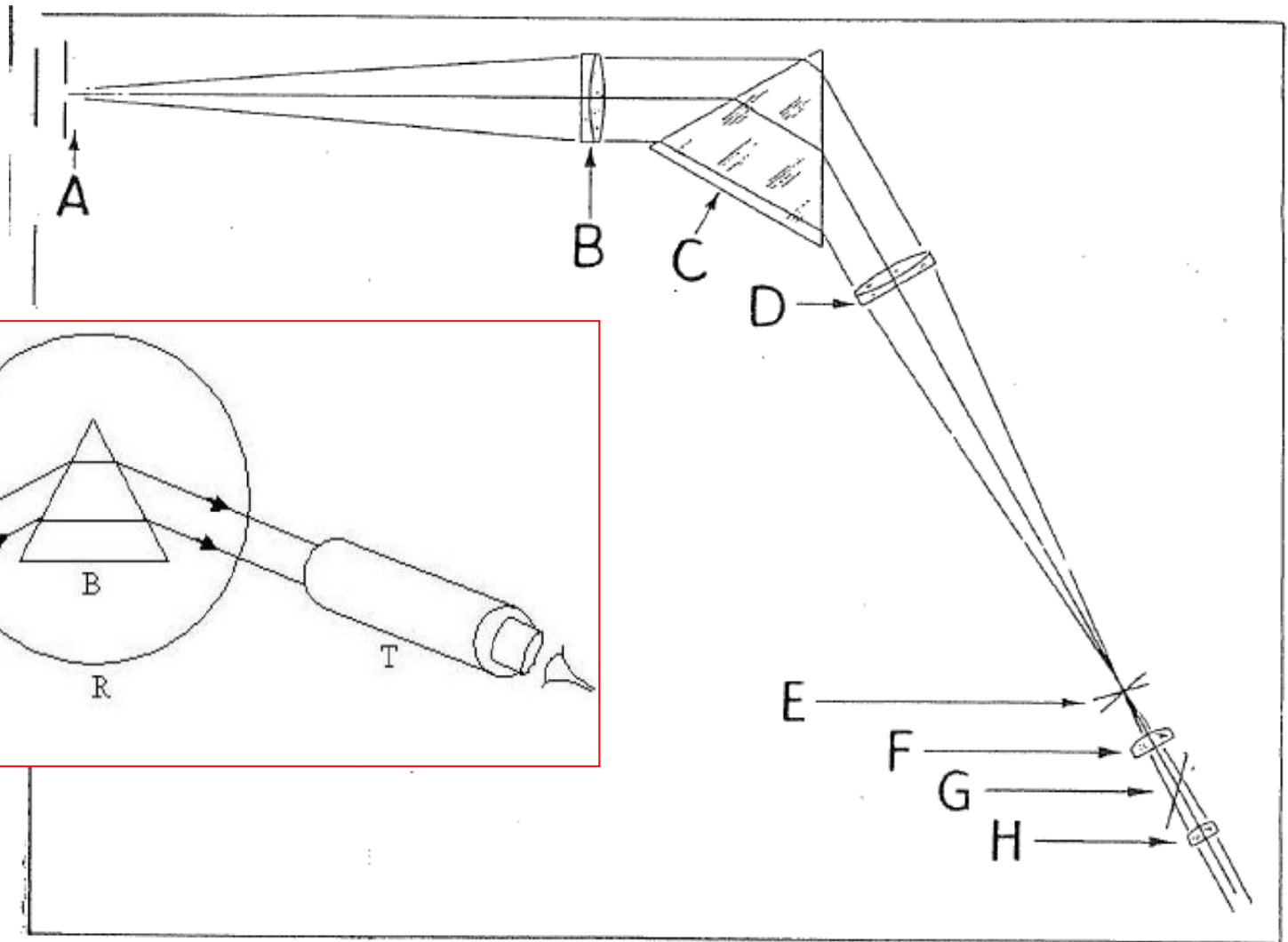


Fig. 7. Path of Rays through the Spencer Spectrometer. A—Slit; B—Collimator Objective; C—Dispersing Prism; D—Telescope Objective; E—Position of Cross Hairs; F—Eyepiece Field Lens; G—Semi-transparent Diagonal Mirror; H—Eyepiece Lens.

Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία

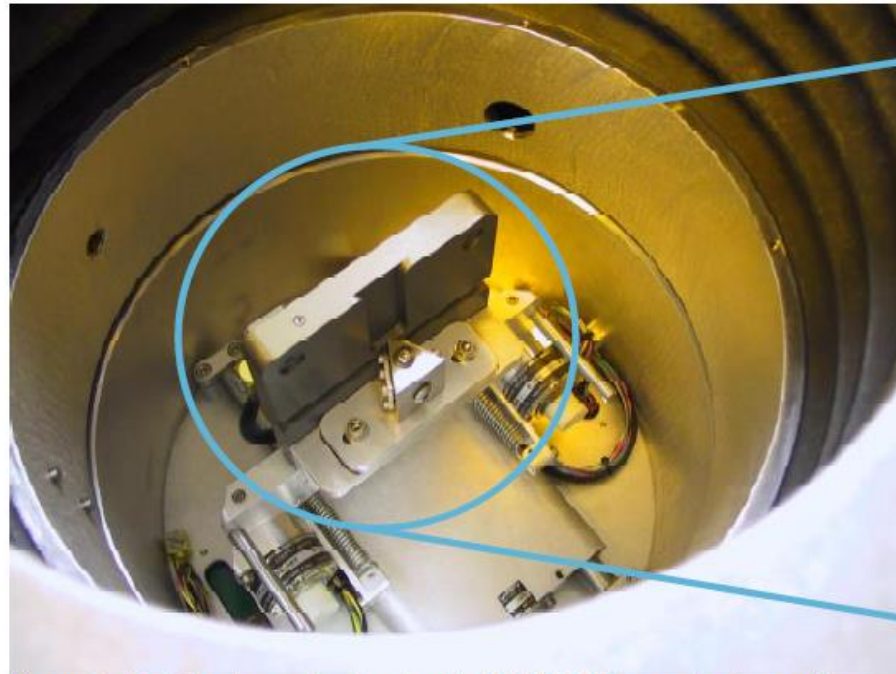


Figure 2. Liquid prism cell attached to VUV-VASE sample stage. The hollow stainless steel prism can be fitted with windows of either fused silica or calcium fluoride.

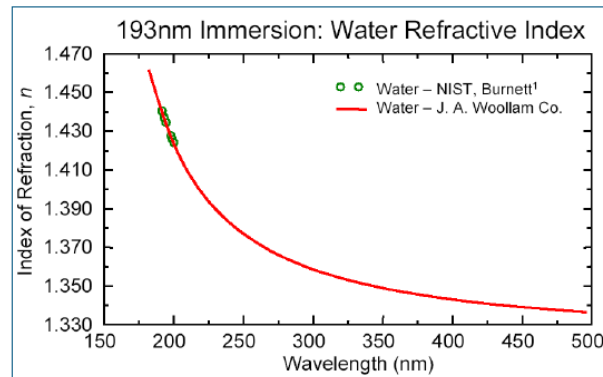
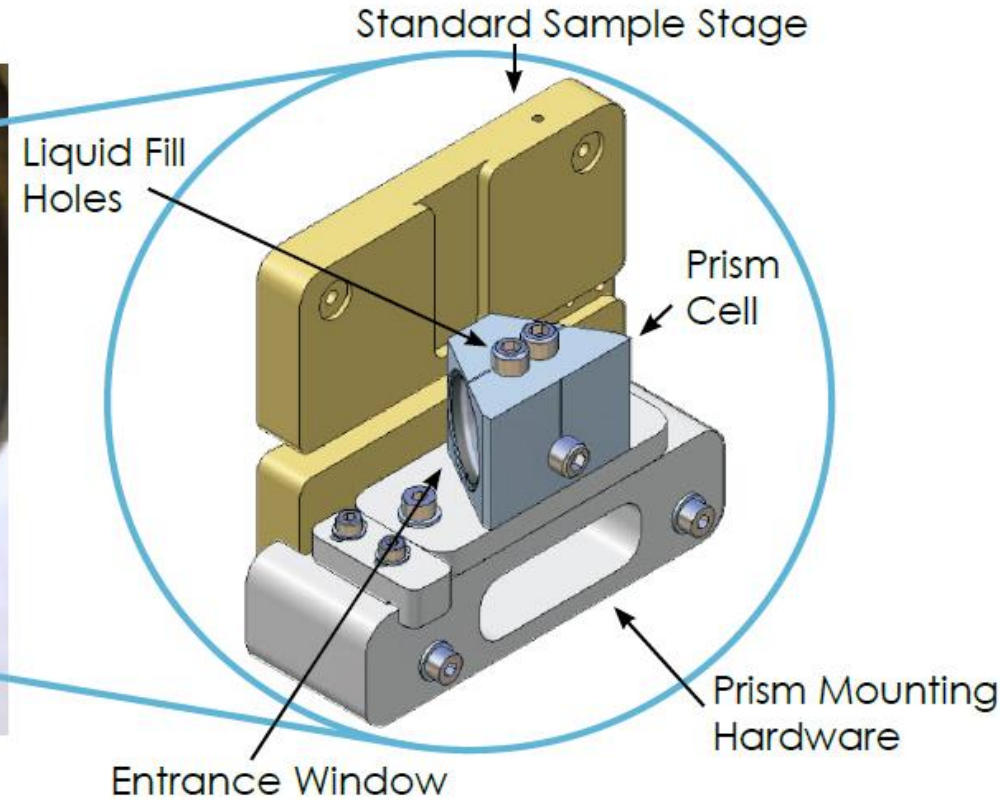


Figure 3. Refractive index of water at 21.5° C measured on the VUV-VASE. NIST reference values from Burnett are also shown. Excellent agreement was achieved with the NIST values.

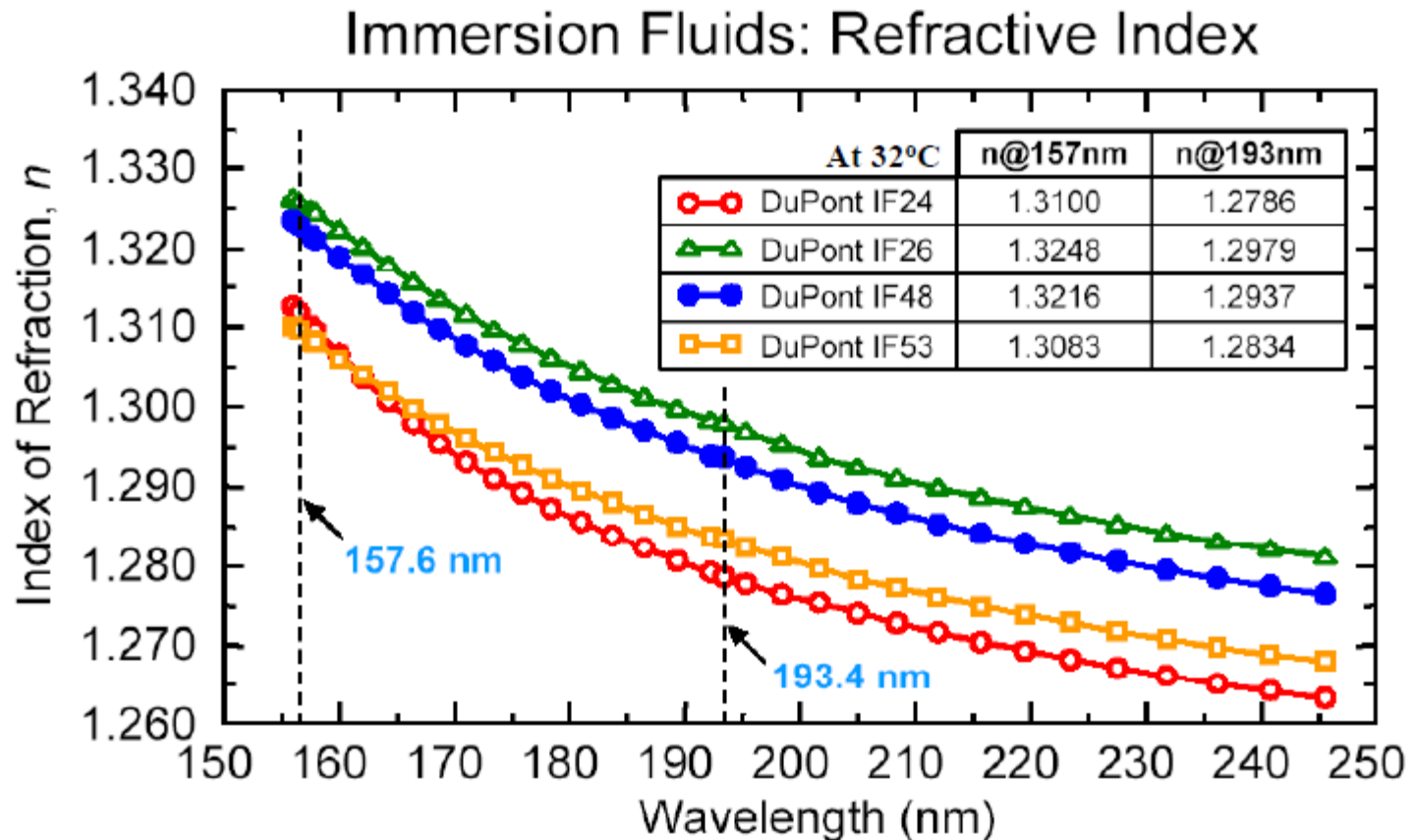


Figure 4. Refractive index n of four DuPont 157 nm immersion fluids at 32° C measured by the prism minimum deviation angle method. Measurements were made using a Woollam VUV-VASE[®] ellipsometer. Results for both 157 nm and 193 nm are shown. Measurements were performed at nominal temperature of 32° C

Εσωτερική ολική ανάκλαση (total internal reflection)

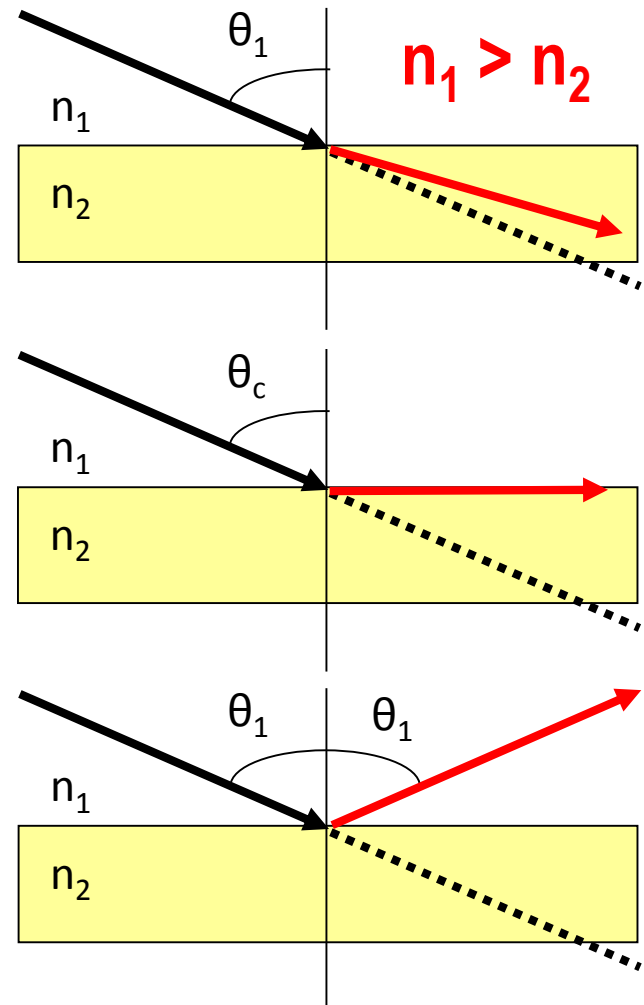
- Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι : $\theta_i > \theta_c$ (η υπολογιζόμενη γωνία διάθλασης είναι $\geq 90^\circ$) τότε δεν παρατηρείται διάθλαση, αλλά **ολική ανάκλαση**.
- Συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από n_1 προς $n_2 < n_1$
- Εφαρμογή στις οπτικές ίνες

Κρίσιμη γωνία θ_c όταν $\theta_2=90^\circ$

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin \frac{\pi}{2} = n_2$$

$$\theta_c = \sin^{-1} \left[\frac{n_2}{n_1} \right]$$

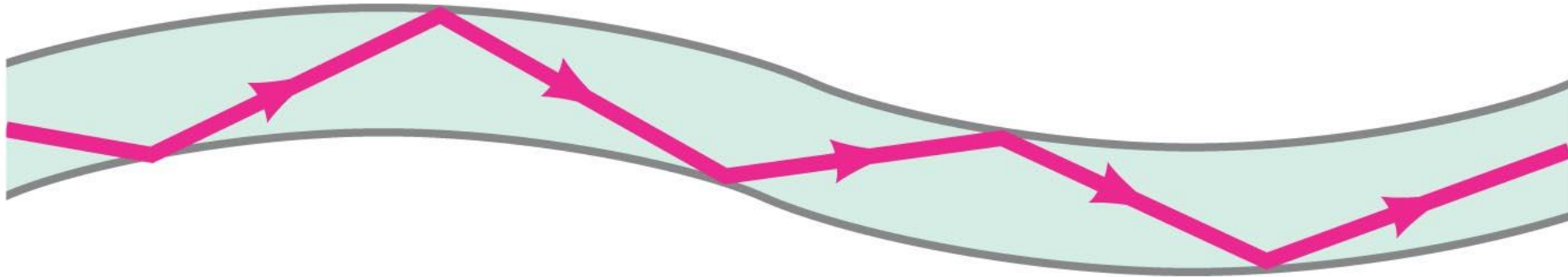
Ολική ανάκλαση όταν $\theta_i > \theta_c$



Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εσωτερική ολική ανάκλαση (total internal reflection)

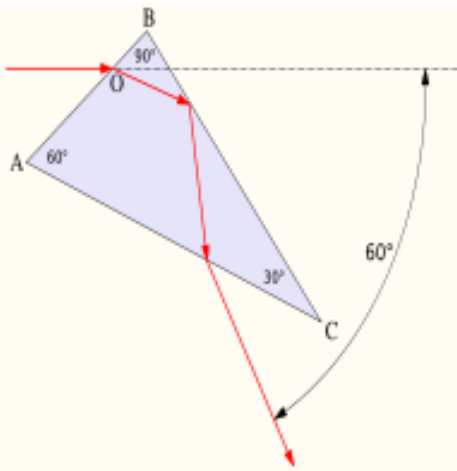
- Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι : $\theta_i > \theta_c$ (η υπολογιζόμενη γωνία διάθλασης είναι $\geq 90^\circ$) τότε δεν παρατηρείται διάθλαση, αλλά **ολική ανάκλαση**.
- Συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από n_1 προς $n_2 < n_1$
- **Εφαρμογή στις οπτικές ίνες**



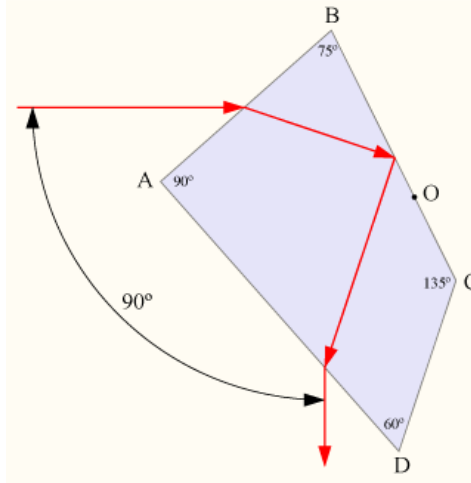
Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εφαρμογή στην οπτική και φασματοσκοπία : Πρίσματα

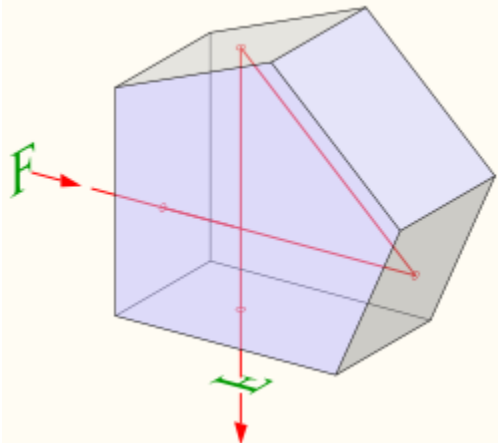
Διάφορα είδη πρισμάτων



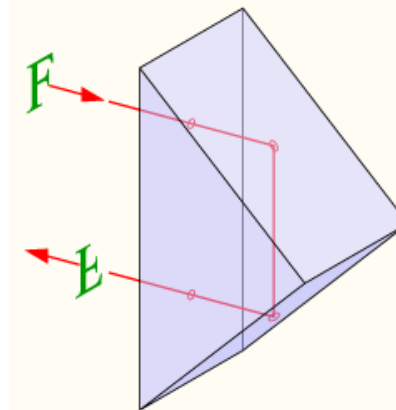
Abbe prism



Pelin Broca prism



Penta prism

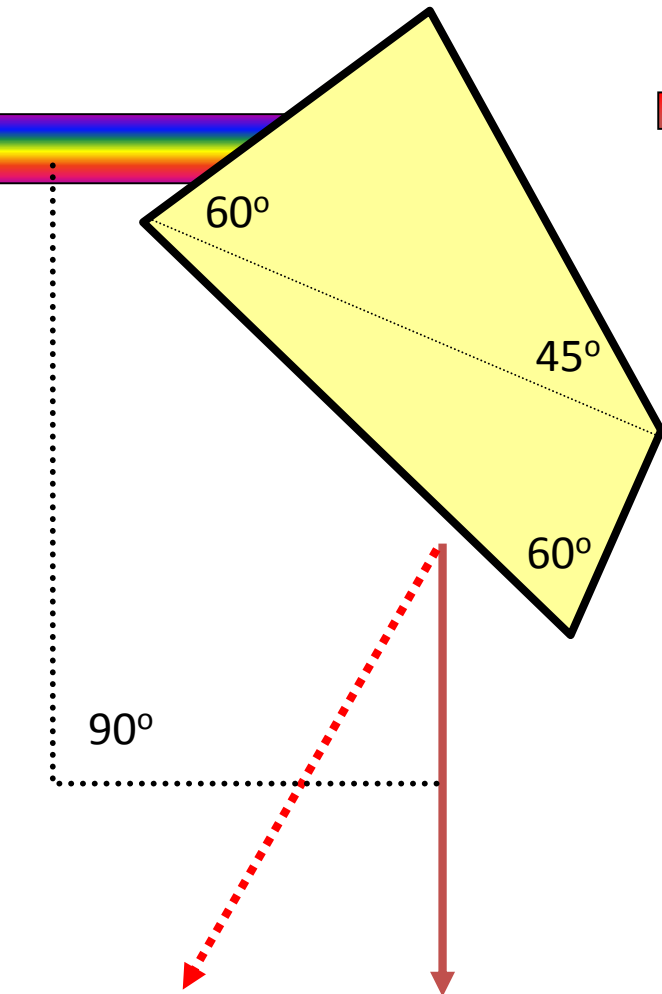


Porro prism

Διάθλαση του φωτός (Refraction)

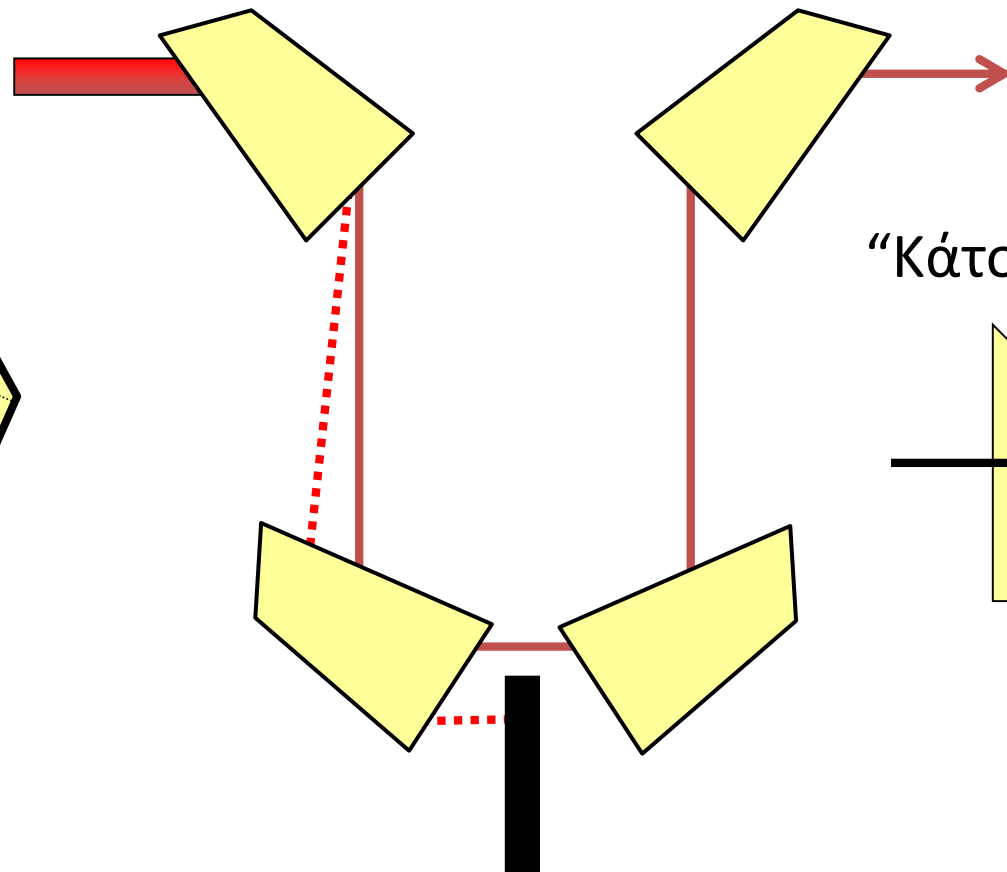
Pellin - Broca

Στις 90° από την αρχική διεύθυνση μεταφέρεται ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος



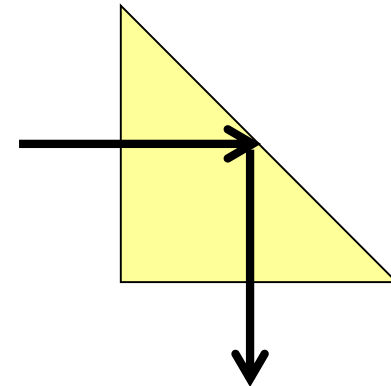
Διαχωρισμός λ και $\lambda/2$

Η τελική πορεία της δέσμης είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη του λ



Οπτικό Διάφραγμα

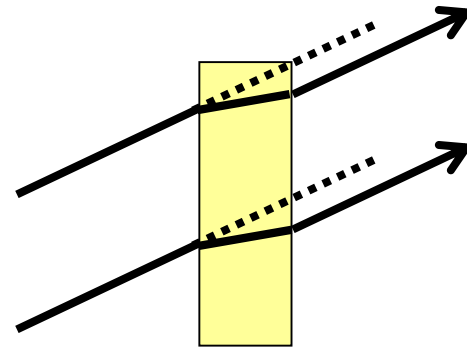
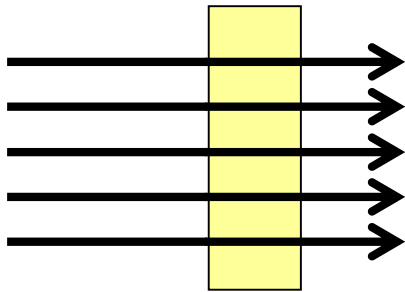
“Κάτοπτρο” 90°



Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Διάδοση του φωτός

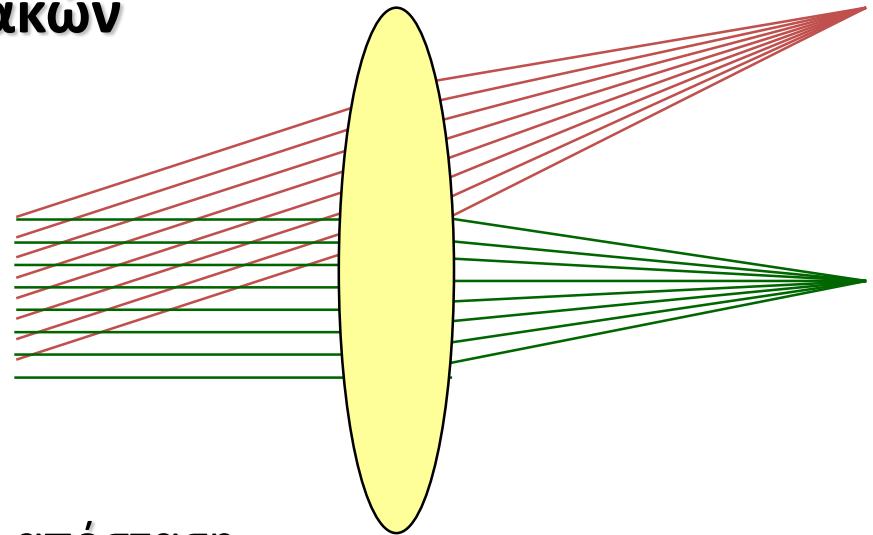
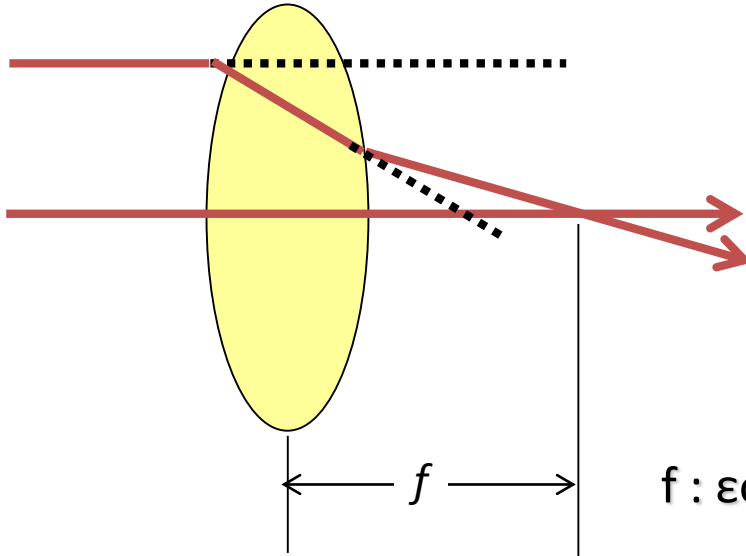
Εφαρμόζουμε το Νόμο του Snell σε όλες τις διαχωριστικές επιφάνειες



Διάθλαση του φωτός (Refraction)

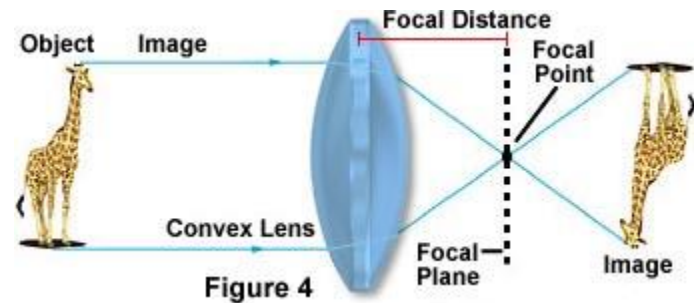
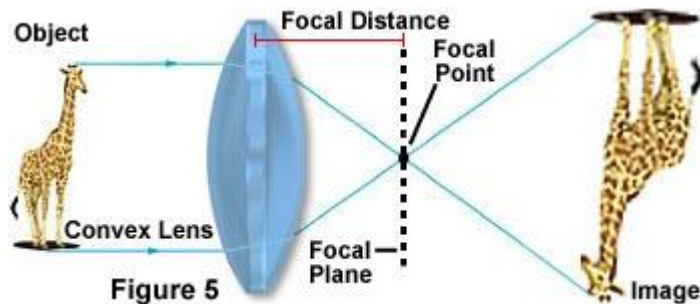
Εφαρμογή στην οπτική : **Φακοί**

Εστίαση Φακών



f : εστιακή απόσταση

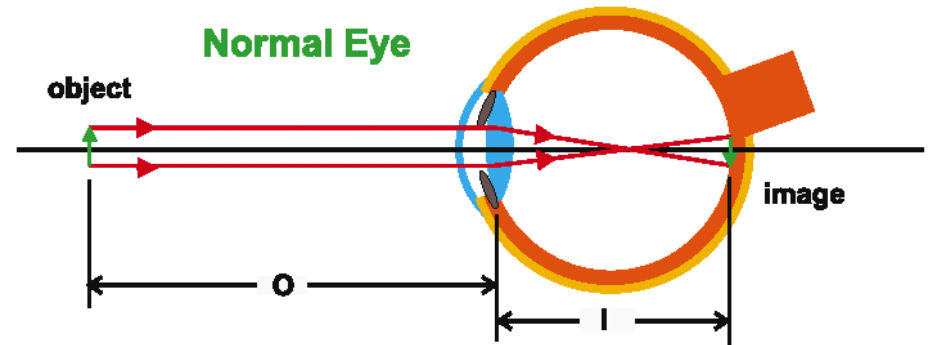
Οπτική απεικόνιση (σμίκρυνση, μεγέθυνση)



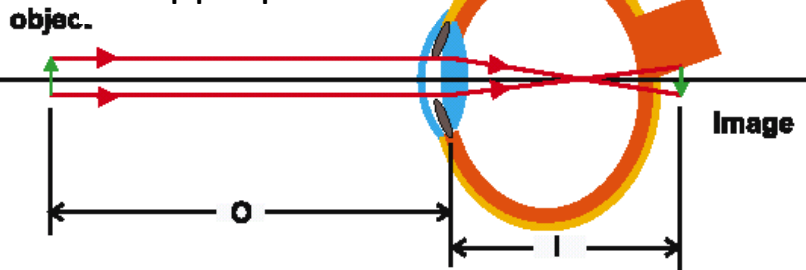
Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Η οπτική της όρασης

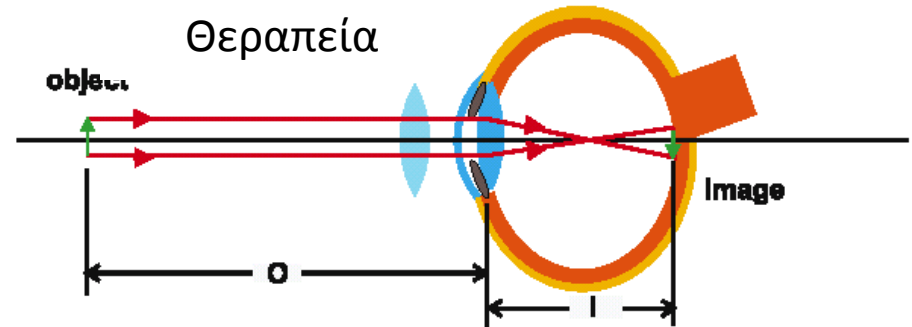
Normal Eye



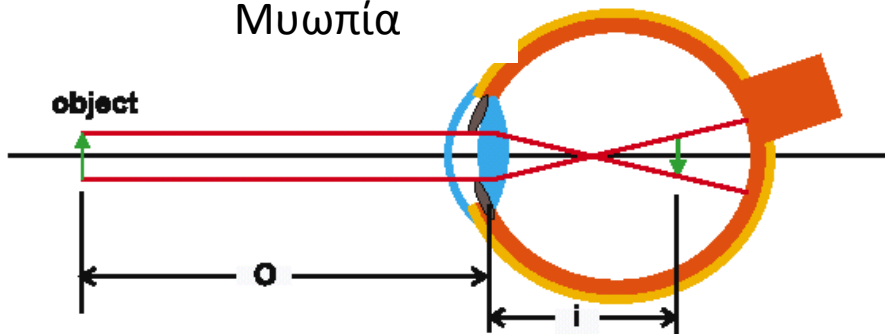
Υπερμετρωπία



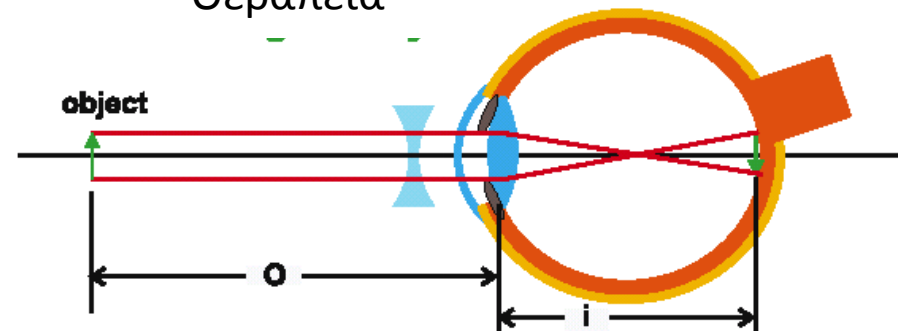
Θεραπεία



Μυωπία



Θεραπεία



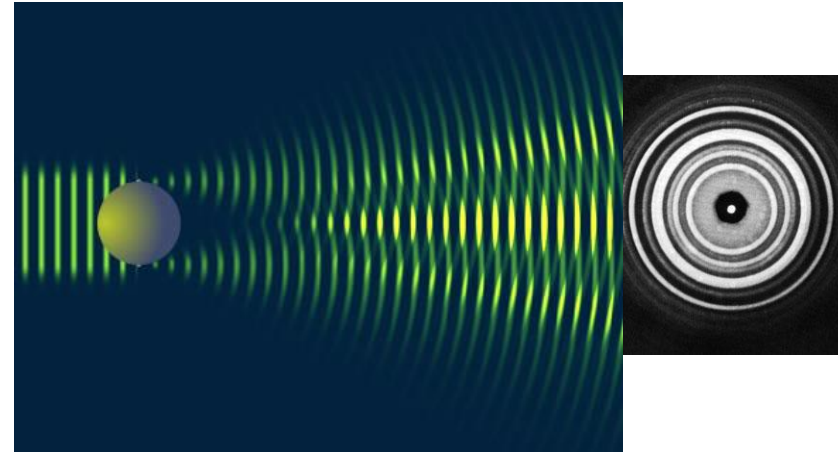
Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

- Το φως μπορεί κάτω από ορισμένες συνθήκες να αποκλίνει από την ευθύγραμμη πορεία του.
- Αυτή η απόκλιση ονομάζεται περίθλαση του φωτός.

$d \gg \lambda \rightarrow$ ευθύγραμμη διάδοση

$d \cong \lambda \rightarrow$ περίθλαση

Δημιουργία μεγίστων και ελαχίστων περίθλασης



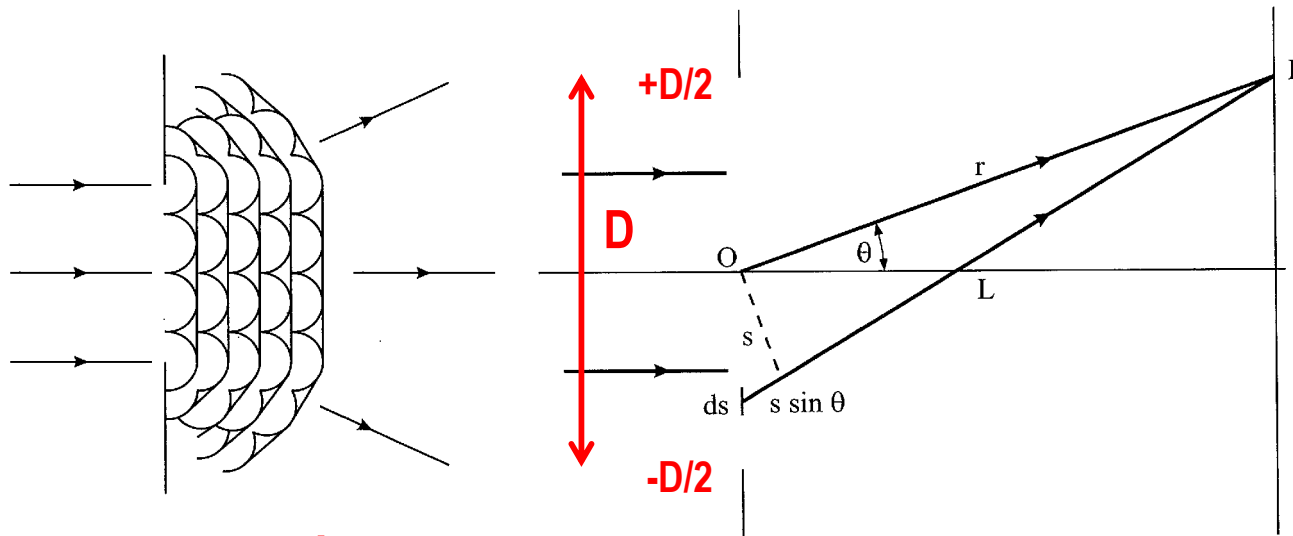
Serway, Φυσική(III), Κεφ. 38

H.D. Young, Φυσική(B), Κεφ. 38

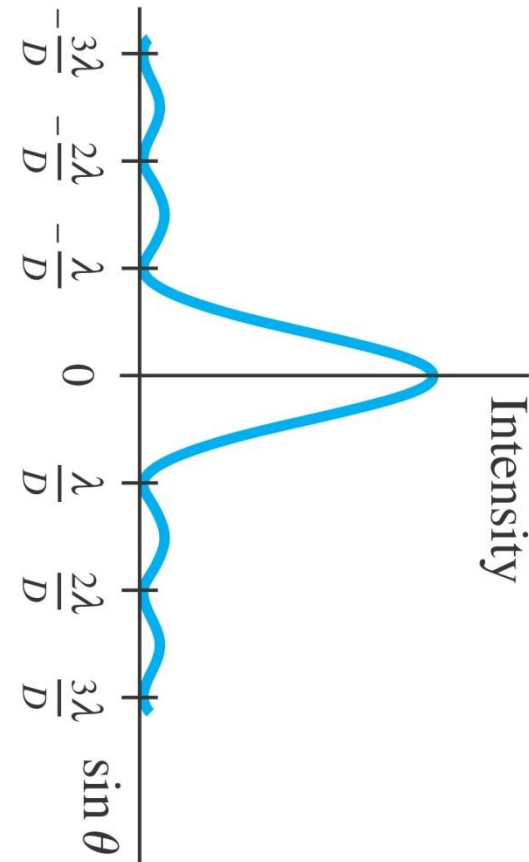
Φυσική-II (Κιτσόπουλος)_Lectures 35

Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

Περίθλαση από απλή σχισμή



Αρχή Huygens



$$I_{\theta} = I_o \left(\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right)^2$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta$$

Ελάχιστα

$$m\lambda = D \sin \theta$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

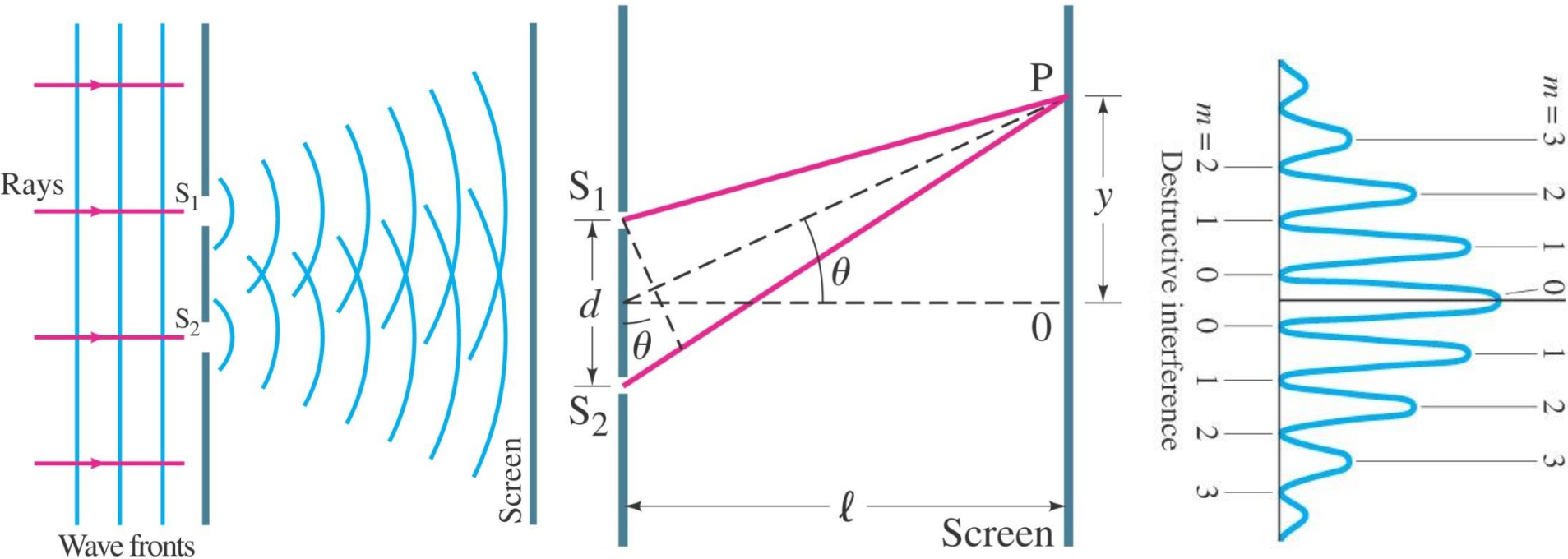
Μέγιστα

$$(m + 1/2)\lambda = D \sin \theta$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Συμβολή του φωτός (Interference)

Το πείραμα των 2 σχισμών (Young)



$$I_{\theta} = I_o \cos^2(\delta / 2) = I_o \cos^2\left(\frac{\pi d \sin \theta}{\lambda}\right)$$

Μέγιστα $m\lambda = d \sin \theta$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Ελάχιστα $(m + 1/2)\lambda = d \sin \theta$ $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$



Συμβολή του φωτός (Interference)

Πολλαπλές σχισμές (N)

$$I_{\theta} = I_o \left(\frac{\sin(N\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)} \right)^2$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

Μέγιστα

$$m\lambda = d \sin \theta$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

**Εξίσωση φράγματος
περίθλασης (Bragg)**

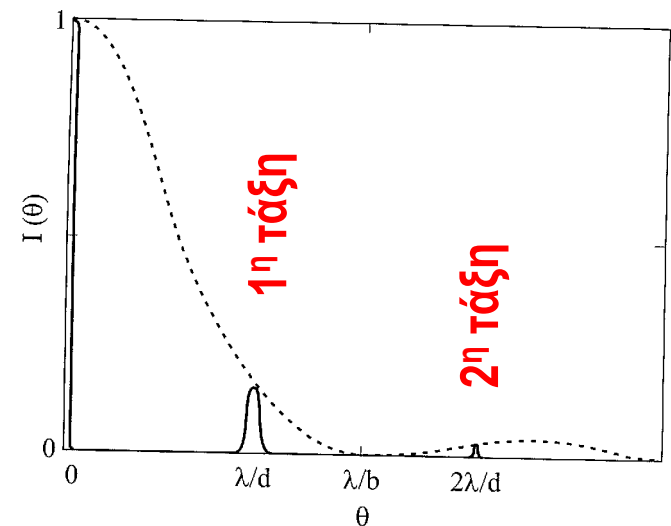
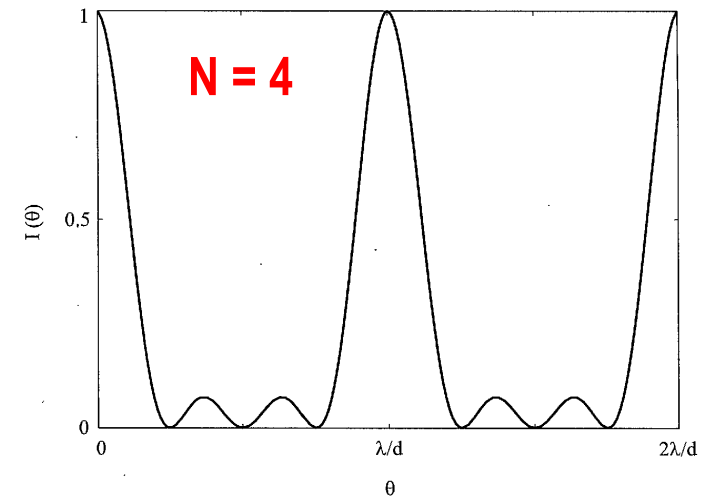
Λαμβάνοντας υπόψη και την περίθλαση από καθεμιά σχισμή προκύπτει η συνολική εικόνα για τη λειτουργία του φράγματος περίθλασης

$$I_{\theta} = I_o \left(\frac{\sin(N\varphi/2)}{\sin(\varphi/2)} \right)^2 \left(\frac{\sin(\beta/2)}{\beta/2} \right)^2$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta$$

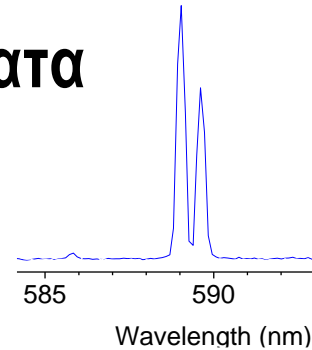
Κροσσοί συμβολής



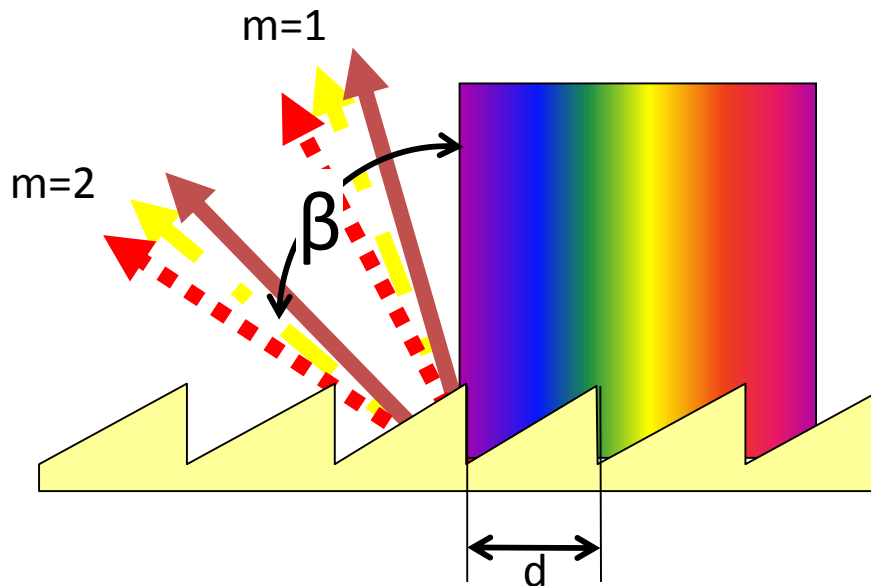
Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

Εφαρμογή στη φασματοσκοπία : Περιθλαστικά φράγματα

- Πολλές παράλληλες σχισμές (χαραγές) πολύ μικρών διαστάσεων
- Σημαντικό μέγεθος : αριθμός σχισμών/χαραγών ανά mm
- Απόσταση d : 1/αριθμός σχισμών/γραμμών ανά mm
- Μέγιστο περίθλασης : $d \sin \beta = m \lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$
- d η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών γραμμών
- Ελάχιστο περίθλασης $d \sin \beta = (m+1/2)\lambda \quad (m = 1, 2, 3)$



$$R = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$



Διακριτική ικανότητα (Resolution)

Τα φράγματα περίθλασης και τα πρίσματα διαχωρίζουν την Η/Μ ακτινοβολία στις επιμέρους συνιστώσες της $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$

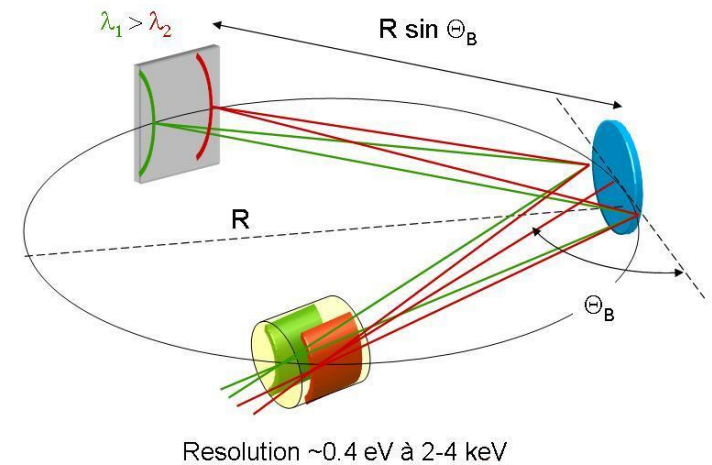
Τα φράγματα περίθλασης είναι μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας σε σχέση με τα πρίσματα

$R = Nm$ N : ο αριθμός των σχισμών που ακτινοβολούνται

Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

X-Ray Diffraction (XRD) – Bragg's Law

- Οι ακτίνες X έχουν μήκος κύματος της τάξεως των ενδοατομικών αποστάσεων σε κρυσταλλικά υλικά.
- Οι σκεδαζόμενες ακτίνες από ένα κρυσταλλικό υλικό μπορούν να αλληλεπιδράσουν, παράγοντας μια περιθλώμενη δέσμη.
- Αυτή ήταν η παρατήρηση του Bragg το 1912.
- Ο νόμος του Bragg συνδέει:
 - Την απόσταση μεταξύ παρόμοιων ατομικών επιπέδων (d-spacing)
 - Την γωνία περίθλασης
 - Το μήκος κύματος των ακτίνων X.

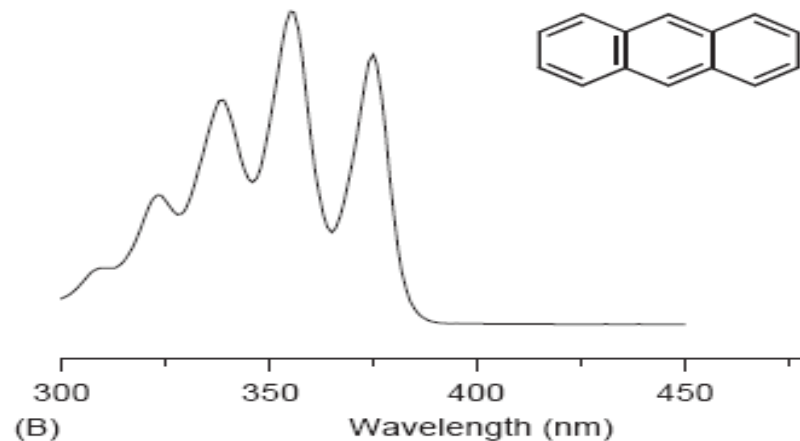
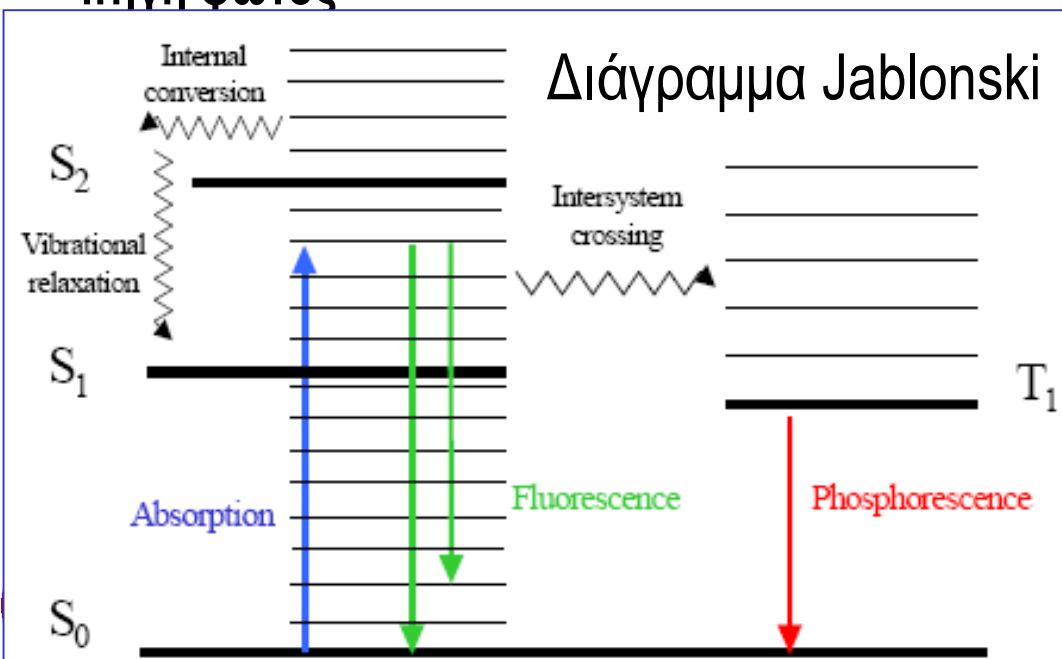
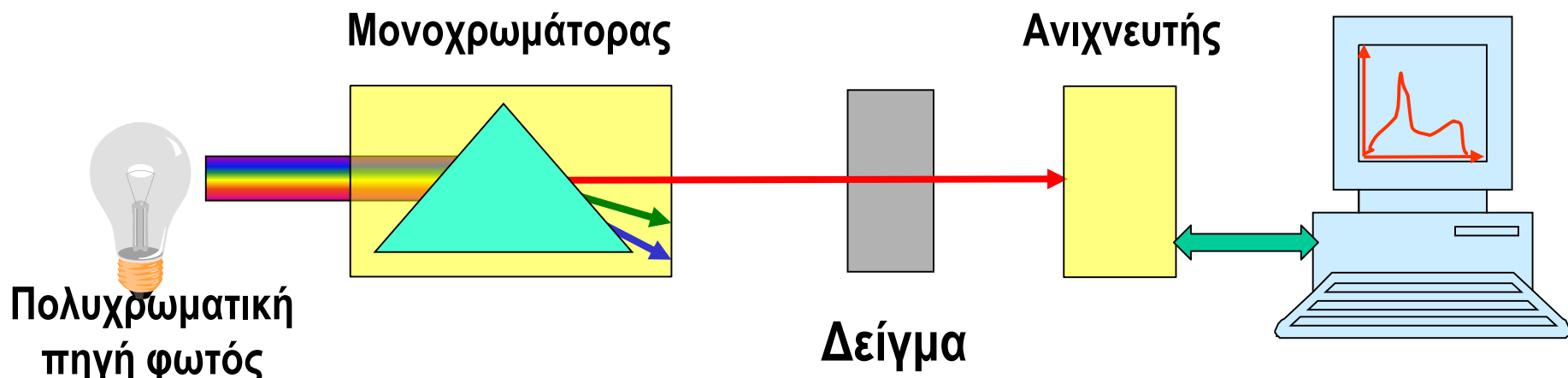


$$n \frac{hc}{E} = 2d \sin \Theta_{\text{Bragg}}$$

h : Planck constant
c : light velocity
d : crystal planes distance
n : diffraction order

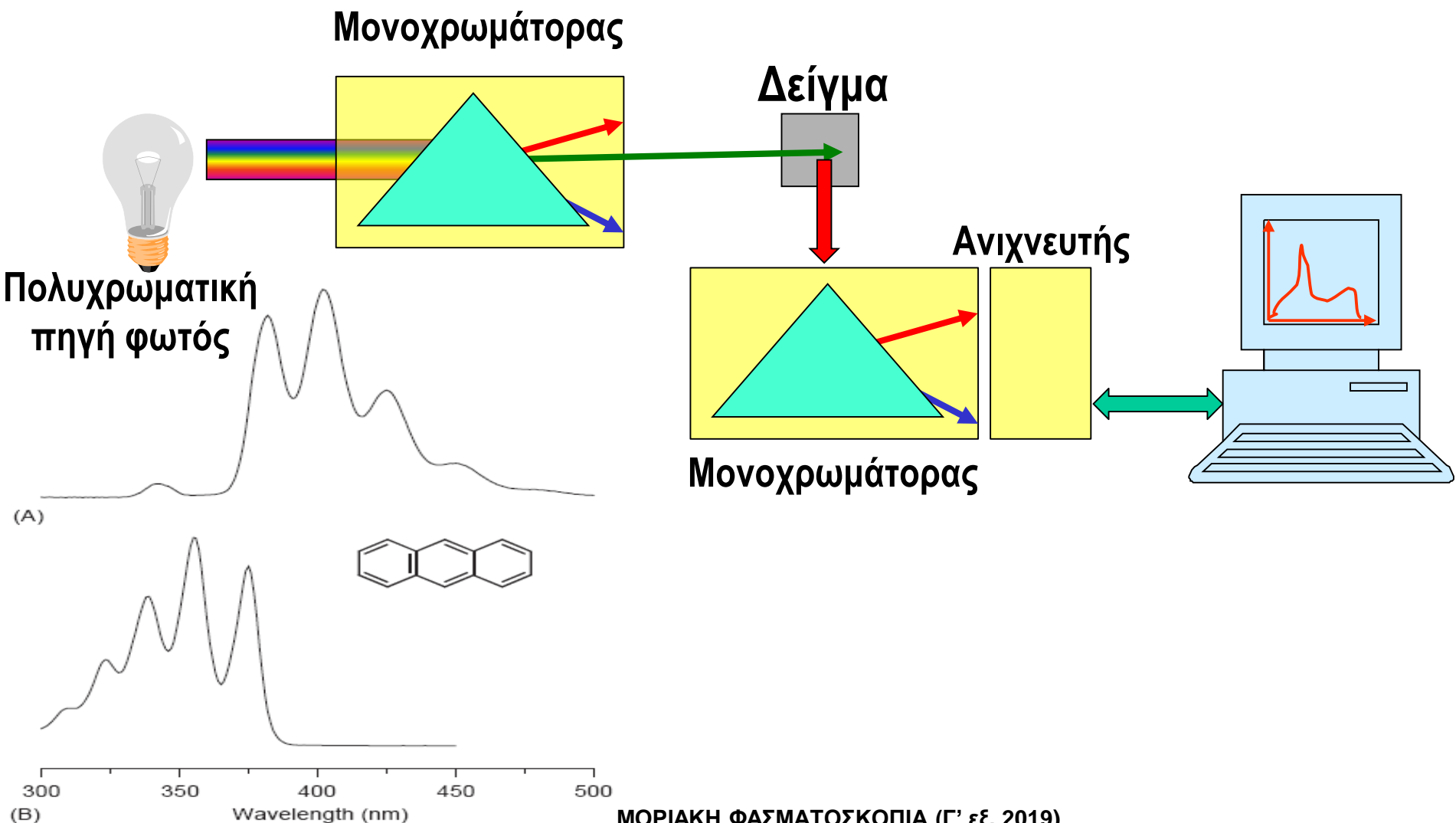
Οργανολογία φασματοσκοπίας

Καταγραφή του φάσματος απορρόφησης διαλύματος χρωμοφόρου



Οργανολογία φασματοσκοπίας

Καταγραφή του φάσματος εκπομπής φθορισμού διαλύματος χρωμοφόρου



Οι πηγές φωτός (H/M ακτινοβολίας), που χρησιμοποιούμε στη φασματοσκοπία είναι διαφόρων τύπων **ΛΥΧΝΙΕΣ** ή **ΛΕΙΖΕΡ**

Βασικά χαρακτηριστικά :

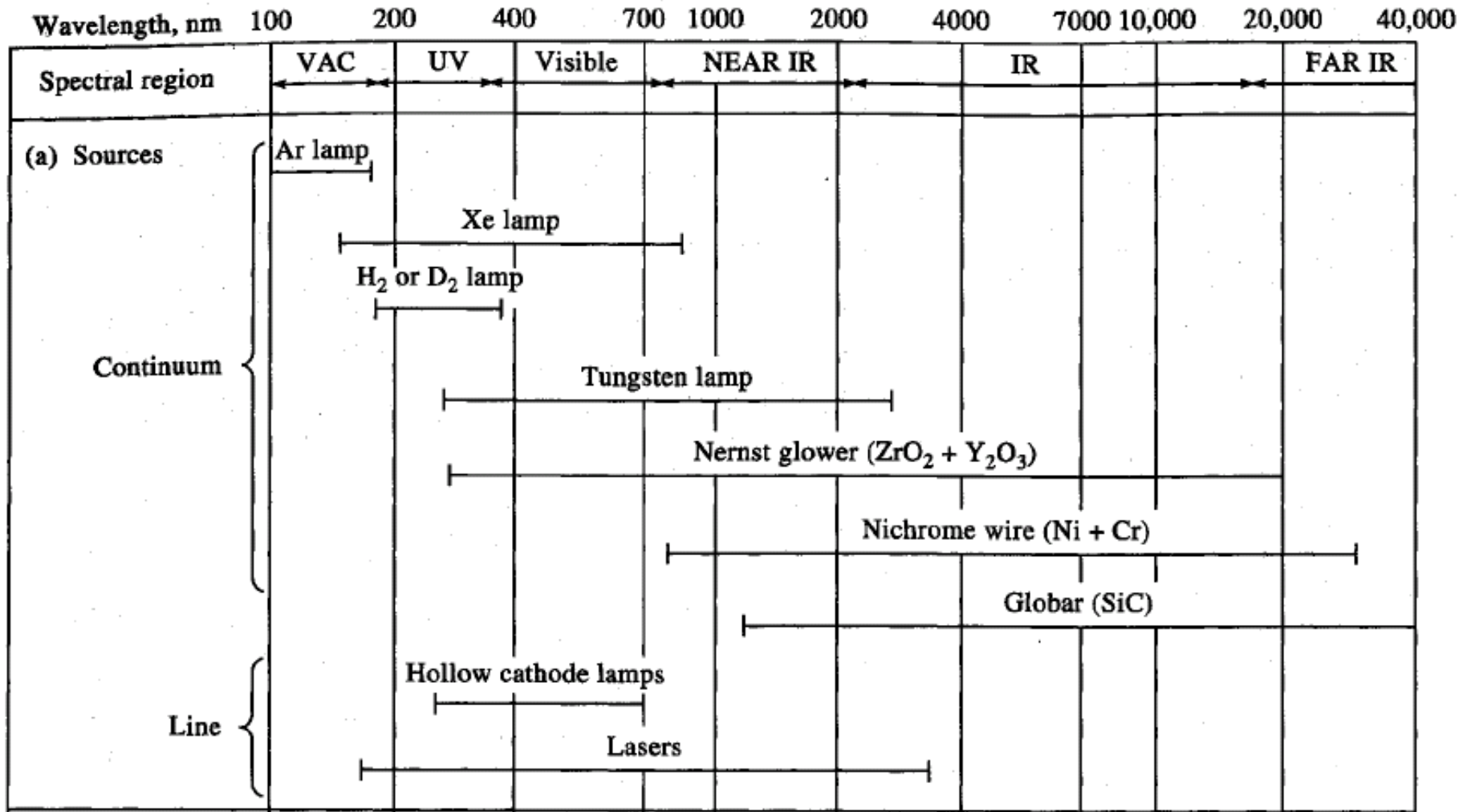
- Ένταση (λαμπρότητα)
- Σταθερότητα
- Φασματική κατανομή (UV, Vis, IR) ή μονοχρωματικότητα (λείζερ)

$$I = I(\lambda)$$

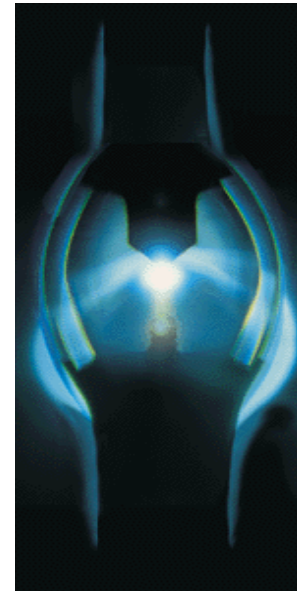
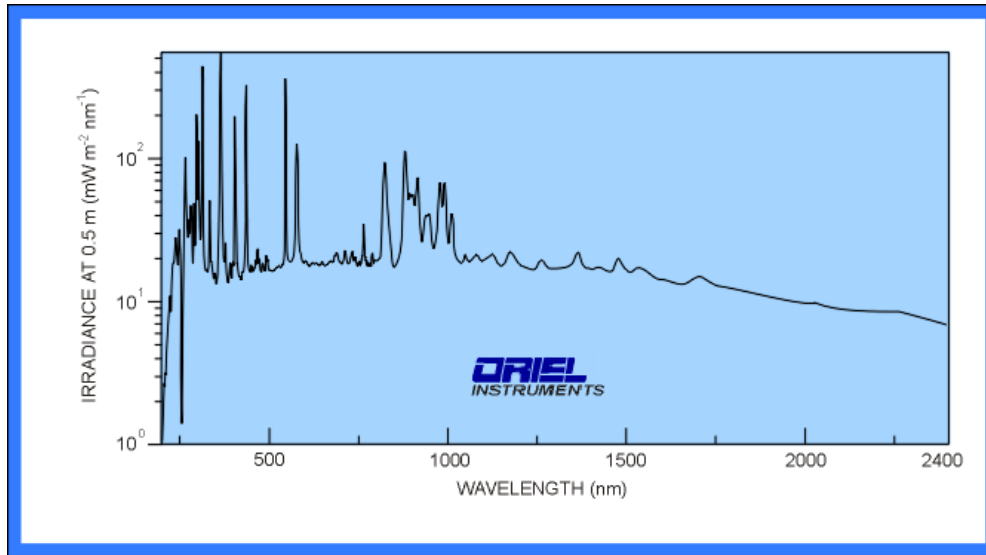
Είδη λυχνιών

- **Συνεχείς** (ευρεία, συνεχής κατανομή φωτός ως προς λ)
 - Πυρακτώσεως (π.χ. Μεταλλικό νήμα / κεραμικό – ~ Μέλαν σώμα)
 - Εκκένωσης (π.χ. Πλάσμα ατομικού, μοριακού αερίου)
 - Φωτοεκπομποί δίοδοι /LED (GaAs, GaP, GaN κ.ά.)
- **Γραμμικού φάσματος**
 - Εκκένωσης
 - Κοίλης καθόδου
 - Λείζερ (υψηλή μονοχρωματικότητα)

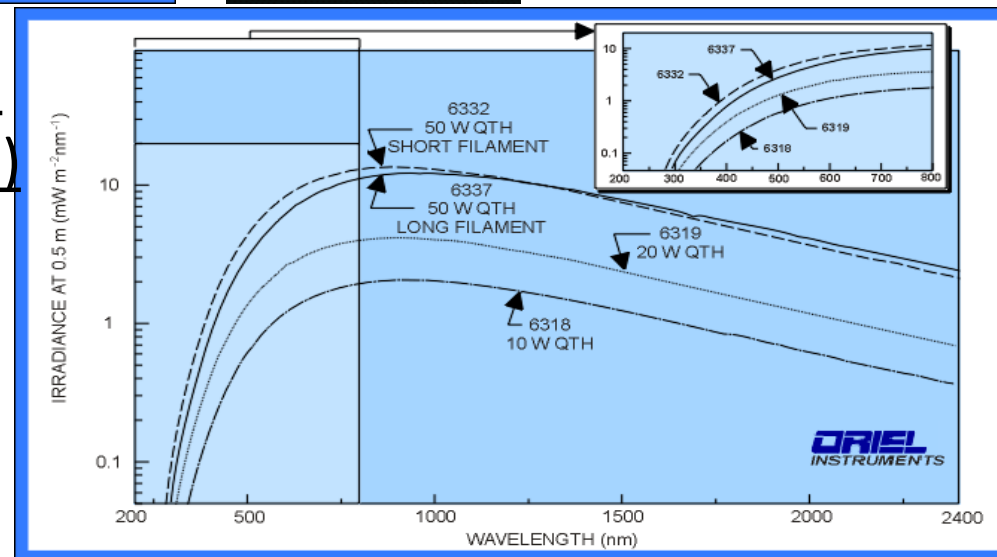
Τύποι λυχνιών και φασματική περιοχή λειτουργίας τους



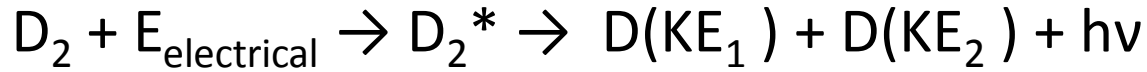
Λυχνία Τόξου Xe (Xe arc lamp)



Λυχνία Βολφραμίου – Αλογόνου (QTH : Quartz-Tungsten-Halogen)



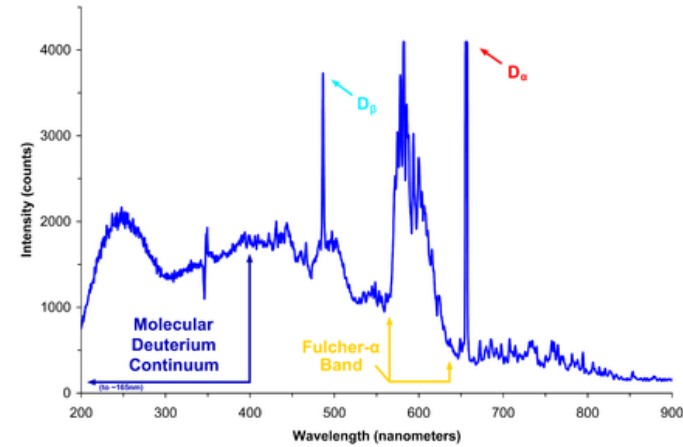
Λυχνία Δευτερίου (D_2)



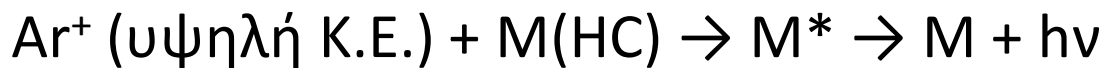
$$KE_1 + KE_2 + h\nu = E_{\text{electrical}} - E\Delta(D_0)$$

$E\Delta$: ενέργεια διάσπασης δεσμού

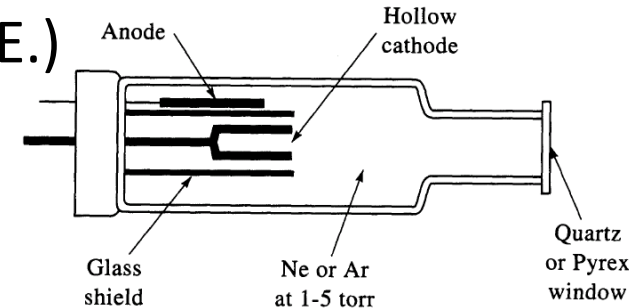
http://en.wikipedia.org/wiki/Deuterium_arc_lamp



Λυχνία κοίλης καθόδου (hollow cathode lamps)



Κύριο χαρακτηριστικό : Στενές φασματικές γραμμές ($\sim 0.02 \text{ \AA}$)



Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

Η ανάλυση του πολυχρωματικού φωτός στα διάφορα μήκη κύματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια κατάλληλων οπτικών (στοιχεία διασποράς) : **ΠΡΙΣΜΑΤΑ** ή **ΠΕΡΙΘΛΑΣΤΙΚΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ**.

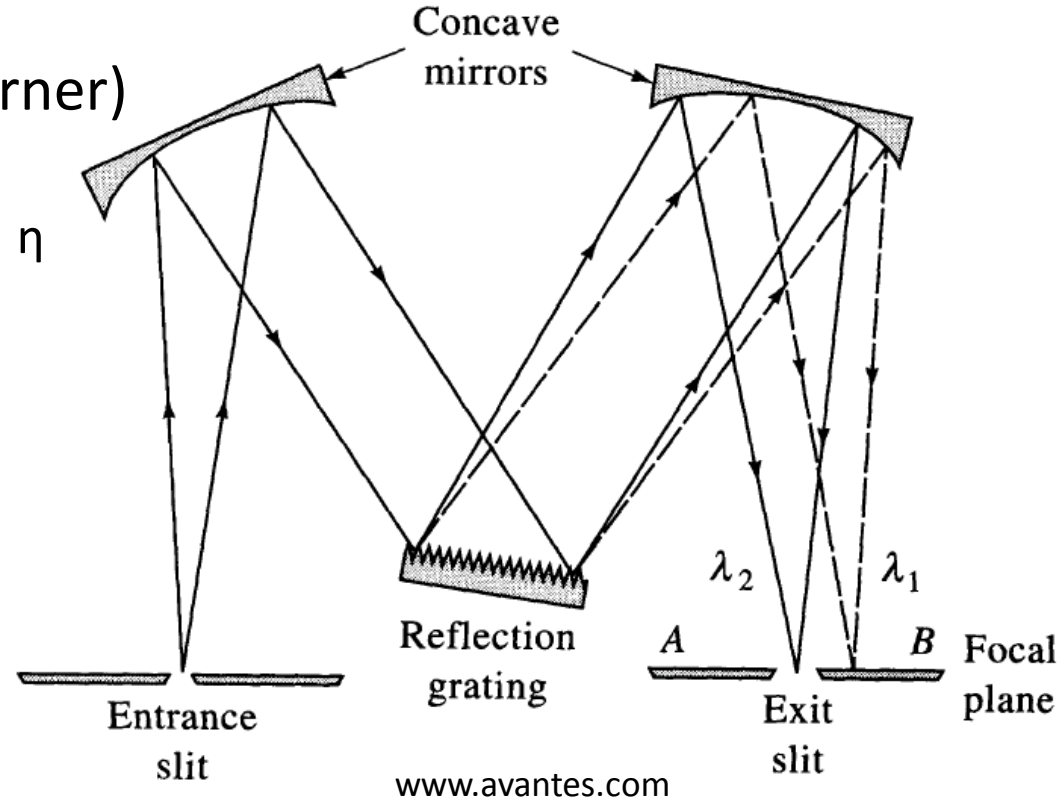
Σε ειδικές περιπτώσεις με χαμηλές απαιτήσεις σε φασματική ανάλυση χρησιμοποιούνται **ΟΠΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ** (αποκοπής (long-/short-pass), ή διελεύσεως ζώνης (band-pass)).

Ανάλυση φωτός επιτυγχάνεται και με συμβολομετρικές τεχνικές με τη βοήθεια μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων με βάση το μετασχηματισμό Fourier (π.χ. FT-IR : *Fourier-Transform InfraRed spectroscopy*)

Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

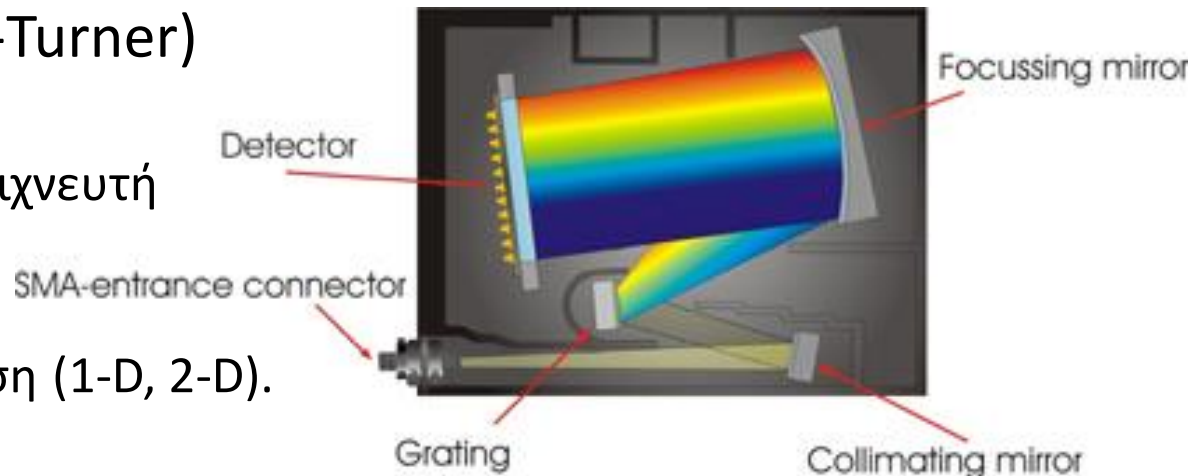
Μονοχρωμάτορας (Czerny-Turner)

Το φάσμα καταγράφεται με σάρωση η οποία επιτυγχάνεται με στροφή του φράγματος από ημιτονικό κινητήρα



Φασματογράφος (Czerny-Turner)

Το φάσμα καταγράφεται σε ανιχνευτή τύπου PDA (photodiode array) ή CCD (charge-coupled device) που προσφέρει χωρική ανάλυση (1-D, 2-D).



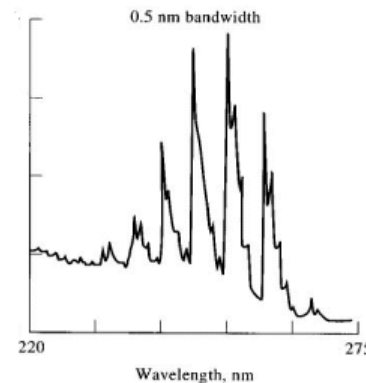
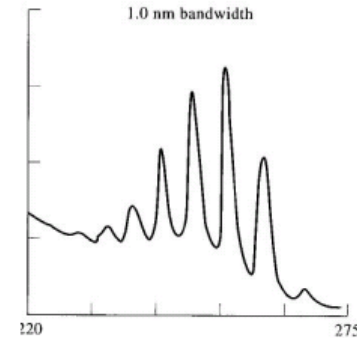
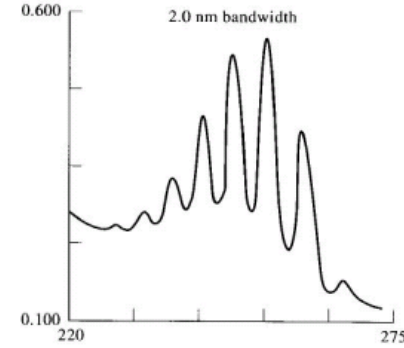
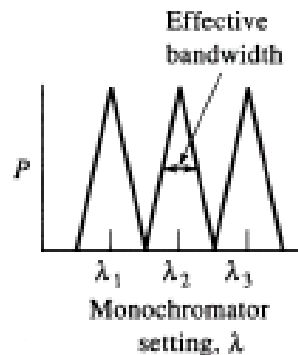
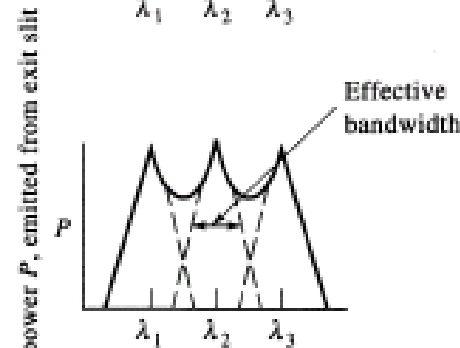
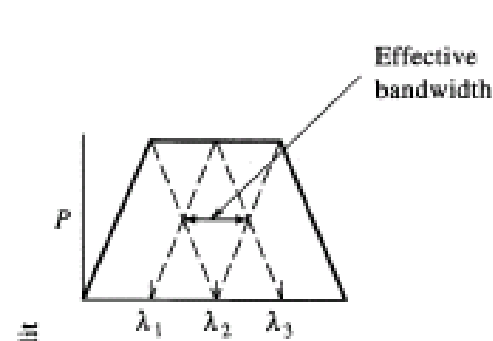
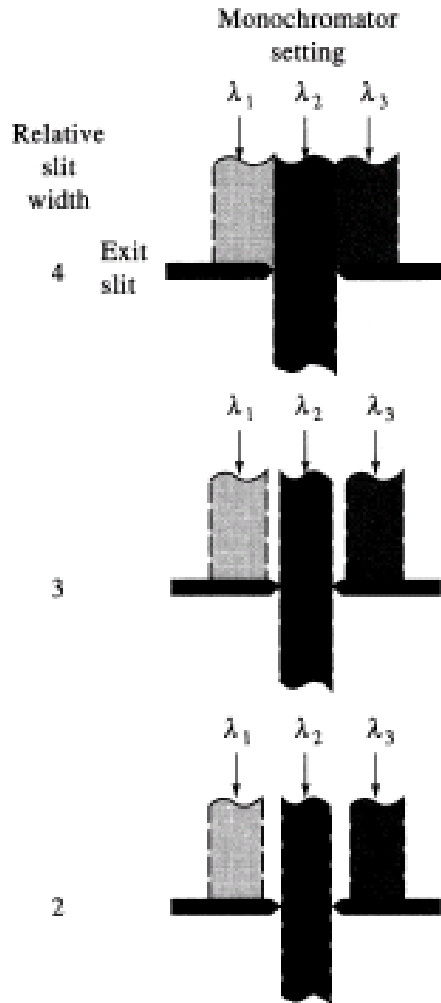
Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

Κύρια χαρακτηριστικά μονοχρωμάτορα/φασματογράφου

- Φασματική καθαρότητα (απουσία παράσιτης ακτινοβολίας)
- Διασπορά (ικανότητα διάκρισης μικρών διαφορών λ)
 - Γραμμική διασπορά : $D = dy/d\lambda$
 - Αντίστροφη γραμμική διασπορά : $D^{-1} = d\lambda/dy$ (nm/mm)
- Συλλογή φωτός (f/number ή f/#, αριθμητικό άνοιγμα) $N = f/d$
 - f: εστιακή απόσταση
 - d: εύρος σχισμής
- Φασματικό εύρος (band width)
 - Μονοχρωμάτορας : D^{-1} (σχισμή εξόδου/εισόδου)
 - Φασματογράφος : D^{-1} (σχισμή εισόδου, μέγεθος pixel)

Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

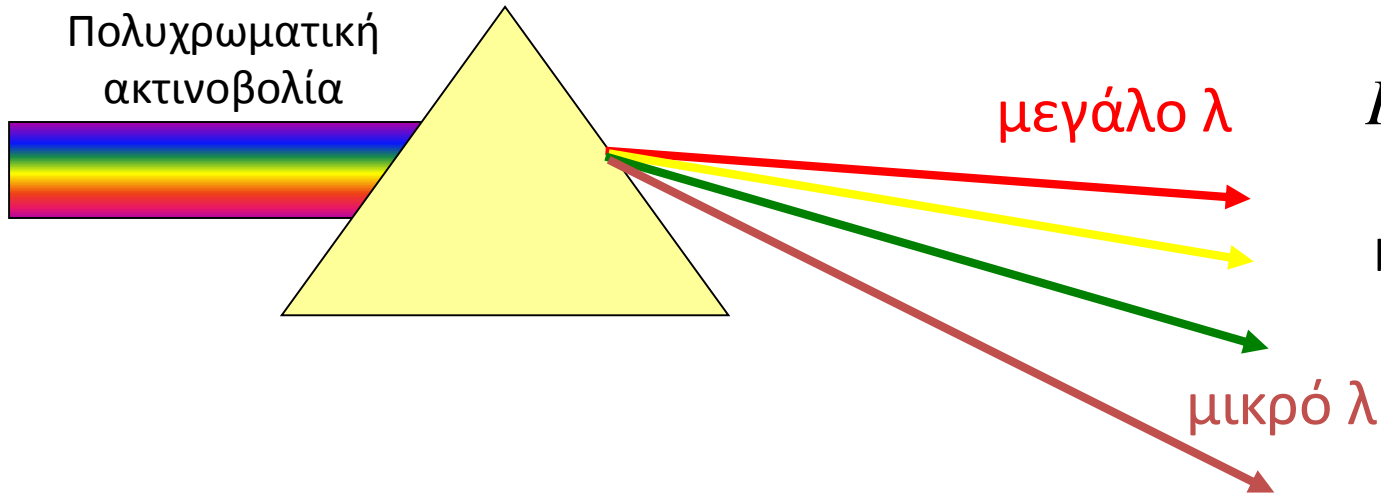
Επίδραση εύρους σχισμής μονοχρώματα στη διακριτική ικανότητα (spectral resolution, R)



$$R = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

Διακριτική ικανότητα πρίσματος (spectral resolution, R)



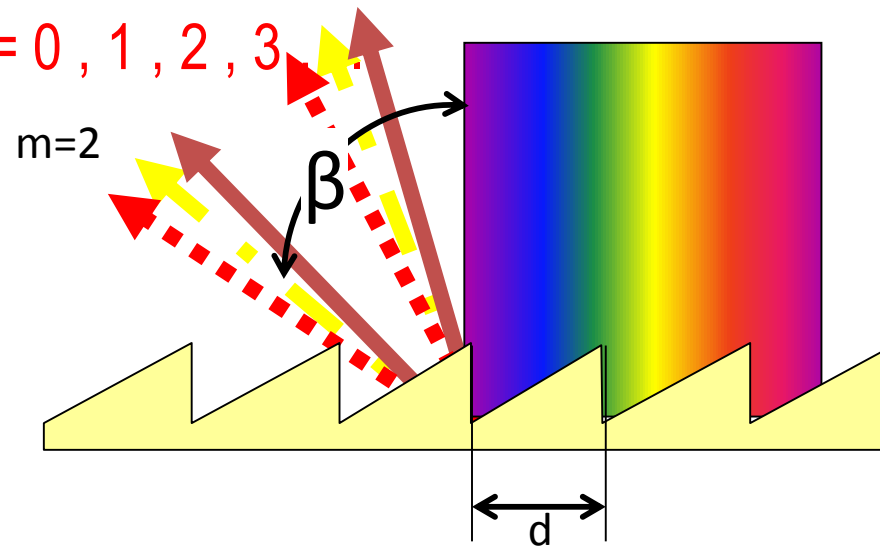
$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = b \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|$$

b : βάση του πρίσματος

Διακριτική ικανότητα περιθλαστικού φράγματος

Μέγιστο περίθλασης : $d \sin \beta = m\lambda$ $m = 0, 1, 2, 3$

$$D^{-1} = \frac{\partial \lambda}{\partial y} = \frac{d}{m} \frac{\partial \sin \beta}{\partial y} = \frac{d}{m} \cos \beta \frac{\partial \beta}{\partial y}$$
$$= \frac{d \cos \beta}{mf}$$



Για τη μέτρηση της έντασης του φωτός (H/M ακτινοβολίας) χρησιμοποιούνται κατάλληλοι **ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ**

Βασικά χαρακτηριστικά :

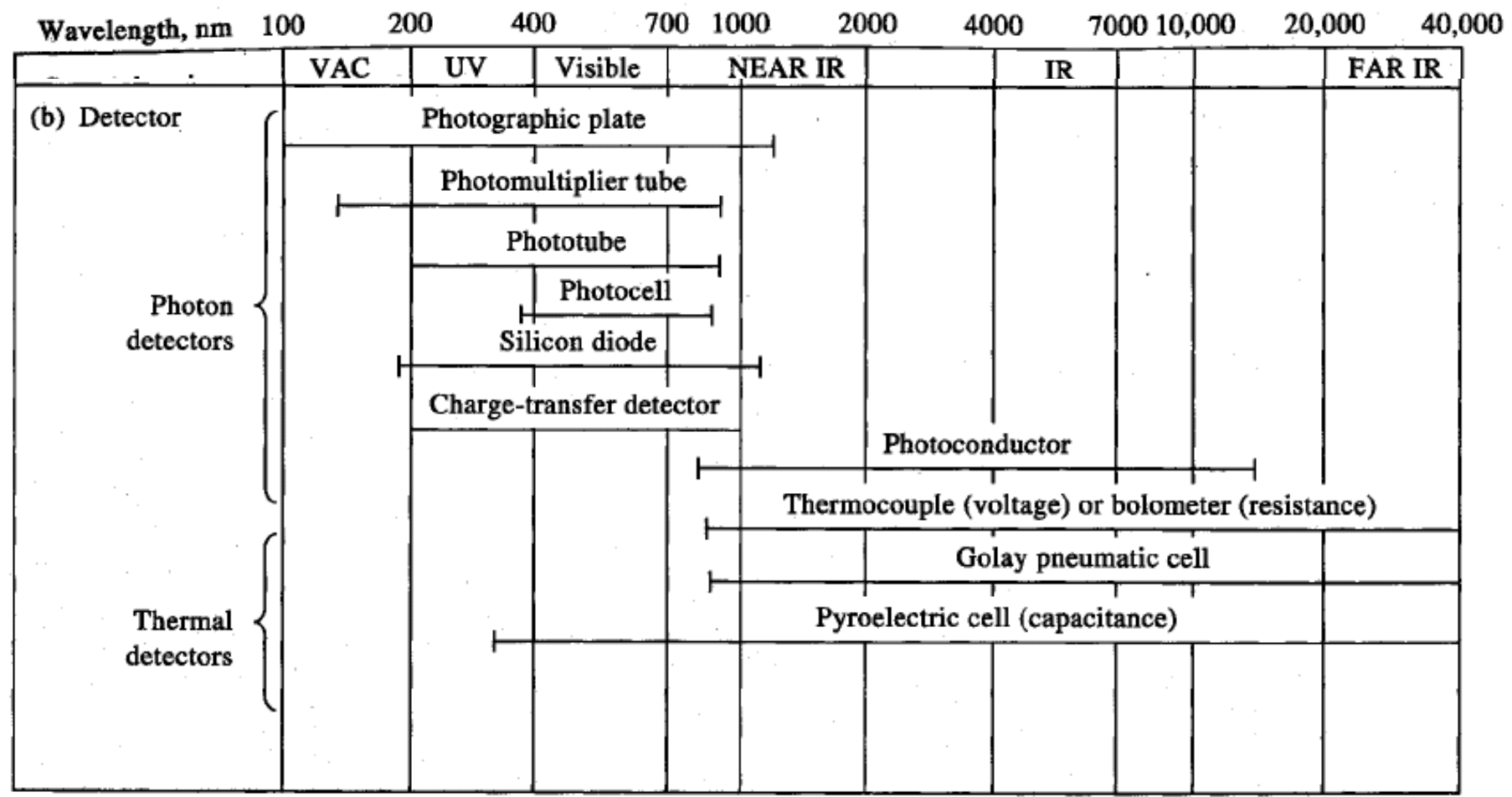
- Ευαισθησία και χαμηλός θόρυβος
- Απόκριση σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος
- Γραμμική απόκριση ($S = k \cdot I$, σήμα ανάλογο της έντασης))
- Χαμηλή τιμή «σκοτεινού» σήματος (dark counts) ($S = k \cdot I + k_d$)

Είδη ανιχνευτών

- Φωτοδίοδοι (Ημιαγωγοί σε φωτοαγώγιμη ή φωτοβολταϊκή λειτουργία)
- Φωτο-λυχνίες / πολλαπλασιαστές
- Θερμικοί (IR)

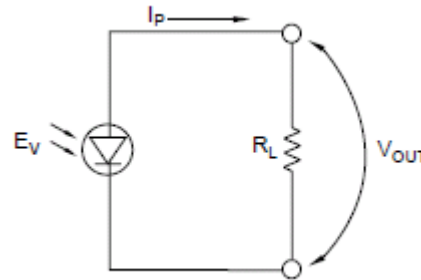
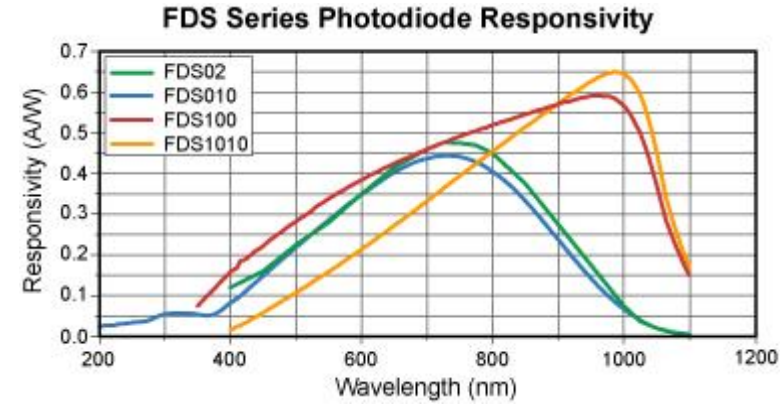
Θερμοστοιχεία, Βολόμετρα, Πυροηλεκτρικά

Τύποι ανιχνευτών και φασματική περιοχή ευαισθησίας τους



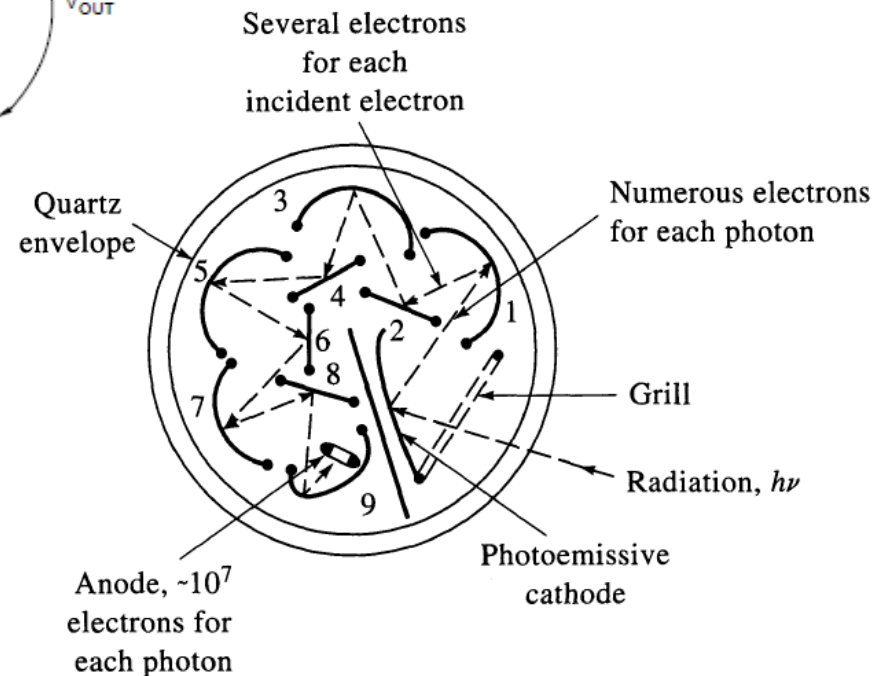
Φωτοδίοδος

Παραγωγή (φωτο)ρεύματος
σε ημιαγωγό
Si : UV-Vis-NIR
Ge, InGaAs, GaP : NIR



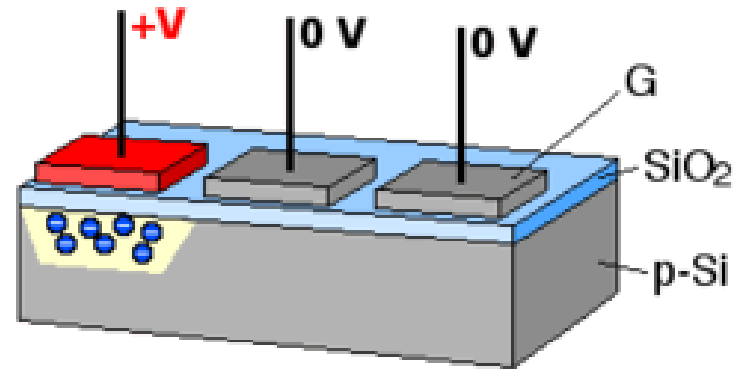
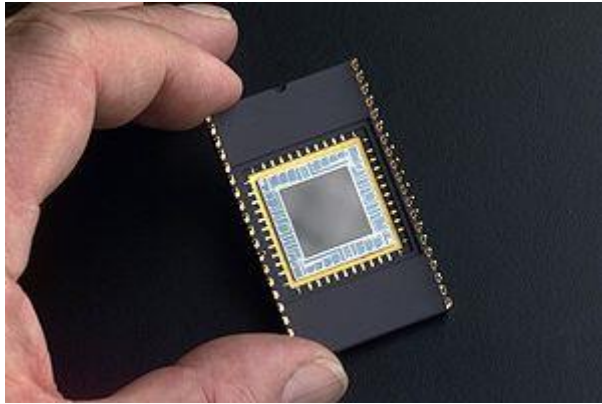
Φωτοπολλαπλασιαστής (PMT)

Εκπομπή ηλεκτρονίων από φωτοκάθοδο
(φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) και
πολλαπλασιασμός (ενίσχυση) τους μέσω
διαδοχικών δυνόδων.



Ανιχνευτές σύζευξης φορτίου CCD (charge coupled device)

Έχουν υψηλή ευαισθησία και παρέχουν χωρική (2-d) πληροφορία



Μέτρηση της έντασης, I , ακτινοβολίας εκπεμπόμενης από πηγή

Ένταση πηγής $I(\lambda) = \frac{dn_\lambda}{dt}$

Δυναμικό/pixel $V(\tau) = \frac{q(\tau)}{C}$

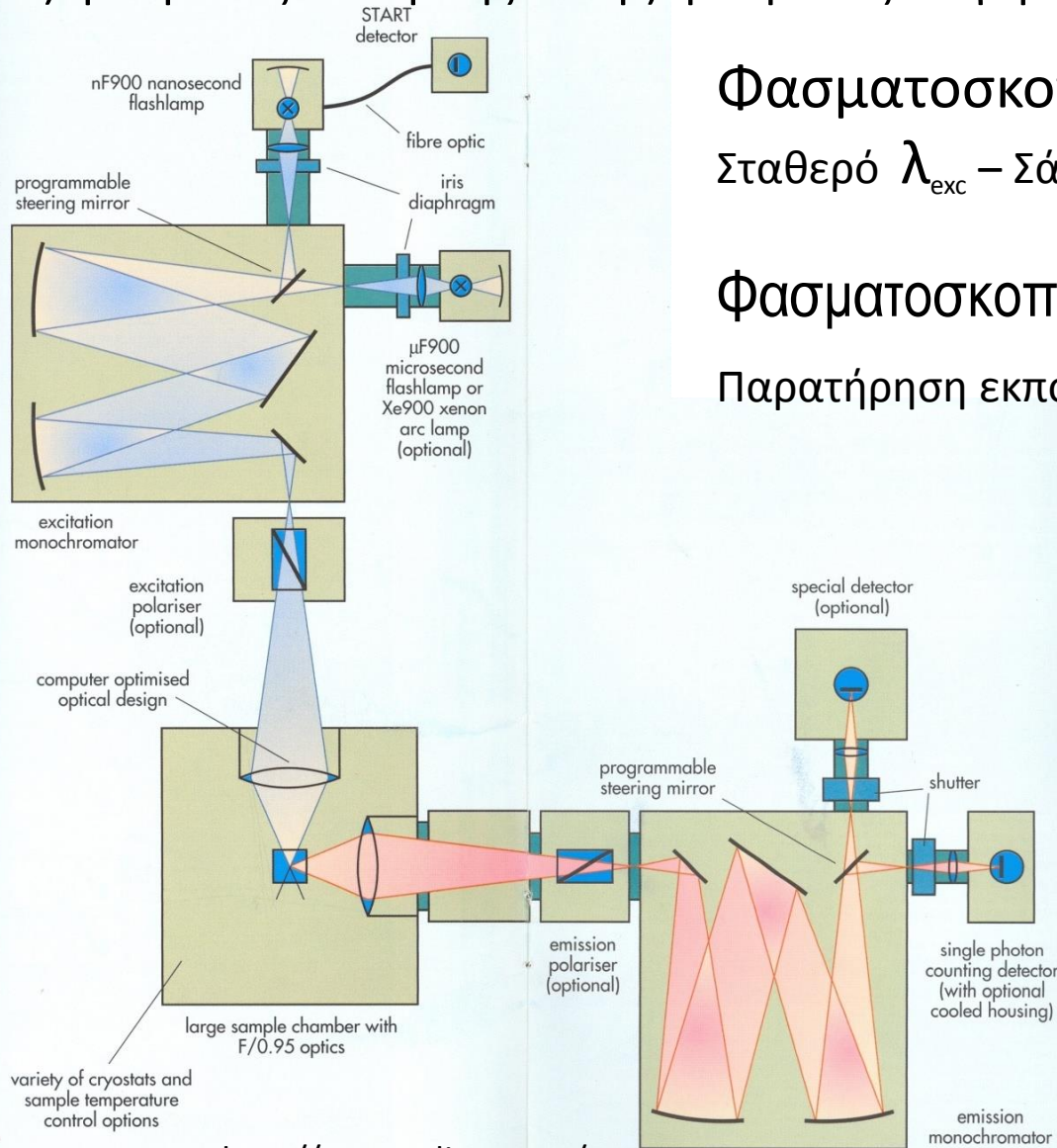
Αριθμός φωτονίων $n_\lambda(\tau) = \int_0^\tau I(\lambda)dt$

Σήμα $S \propto V(\tau) \propto n_\lambda(\tau)$

Φορτίο/pixel $q(\tau) = K\phi_\lambda n_\lambda(\tau)$

Φασματοφωτόμετρο φθορισμού

Να περιγραφεί λεπτομερώς η λειτουργία του φθορισμομέτρου για καταγραφή :
α) φάσματος εκπομπής και β) φάσματος διέγερσης



Φασματοσκοπία εκπομπής φθορισμού
σταθερό λ_{exc} – Σάρωση λ_{em}

Φασματοσκοπία διέγερσης φθορισμού

Παρατήρηση εκπομπής σε σταθερό λ_{em} – Σάρωση λ_{exc}

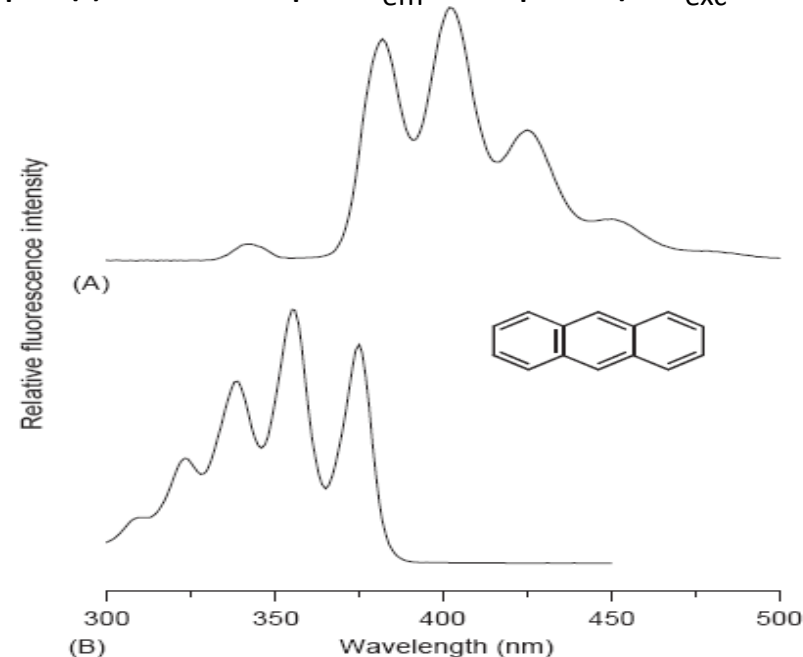


Figure 4 Fluorescence spectra of anthracene ($1 \mu\text{g ml}^{-1}$) in ethanol. The emission spectrum (A) was obtained with $\lambda_{exc} = 340 \text{ nm}$ and the excitation spectrum (B) was obtained with $\lambda_{em} = 379 \text{ nm}$.

Χαρακτηριστικά Φασματογράφου-Ανιχνευτή CCD

Τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή CCD που συνδέεται με το φασματογράφο (βλ. εικόνα) παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Αν η αντίστροφη γραμμική διασπορά του φασματογράφου είναι : $D^{-1} = 2.6 \text{ nm/mm}$, να προσδιορίσετε :

α) το εύρος φάσματος που καταγράφεται στον ανιχνευτή,

β) την «διακριτική ικανότητα» του συστήματος σε nm/pixel .

γ) πώς θα αλλάξει η τιμή που υπολογίζετε στο (β) αν χρησιμοποιηθεί φράγμα περίθλασης με τετραπλάσιο αριθμό χαραγών/mm?

Active Pixels	1024 x 1024
Pixel Size (WxH; μm)	13 x 13
Image Area (mm)	13.3 x 13.3
Pixel Well Depth (e^- , typical)	80,000
Register Well Depth (e^- , typical) ^{*2}	200,000
Max full frames per sec @ 1MHz digitization (typical)	0.9
Read Noise (e^- , typical)	7.5 @ 1 MHz



- **Στοιχεία Οπτικής – Μικροσκοπία**

- Microscopy <http://www.olympusmicro.com/>
- Interactive tutorials <http://www.olympusmicro.com/primer/java/index.html>
- Light and color <http://www.olympusmicro.com/primer/lightandcolor/java.html>
- Light Microscopy http://www.olympus.co.uk/microscopy/images/Basics_of_Light_microscopy.pdf