



Τμήμα Χημείας Πανεπιστήμιο Κρήτης

Εργαστήριο Φυσικοχημείας Ι

ΧΗΜ-311

Γ' εξάμηνο 2024-25

Φως και Οπτική Οργανολογία φασματοσκοπίας

Βιβλιογραφία

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

ΧΗΜ-017, Φυσική-II 2023-24, Σχετικές διαλέξεις, διαφάνειες, ασκήσεις
AtΦΧ Φυσικοχημεία, (P.W. Atkins, J. de Paula, J. Keeler)

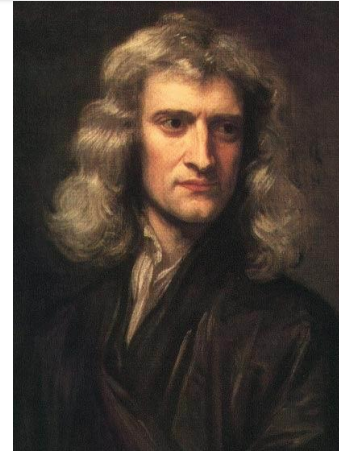
Η φύση του φωτός

5^{ος} αι. π.Χ. – 19^{ος} αι. μ.Χ.

- Το φως είναι μια δέσμη σωματίων, τα οποία εκπέμπονται από φωτοβολούσα πηγή.
- Κύριος αρχιτέκτονας της **σωματιδιακής θεώρησης** του φωτός είναι ο **Isaac Newton**.
- Η σωματιδιακή φύση του φωτός ερμηνεύει πειραματικά ιδιότητες του φωτός όπως η **ανάκλαση** και η **διάθλαση**.

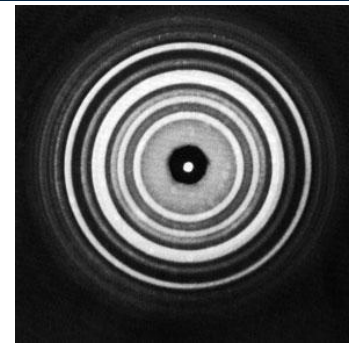
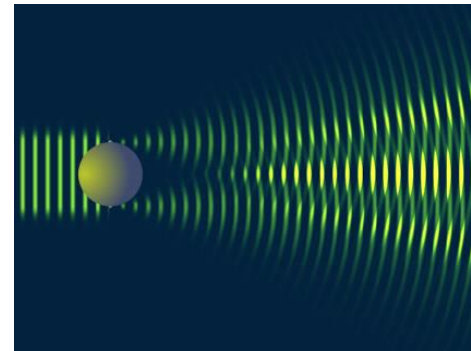
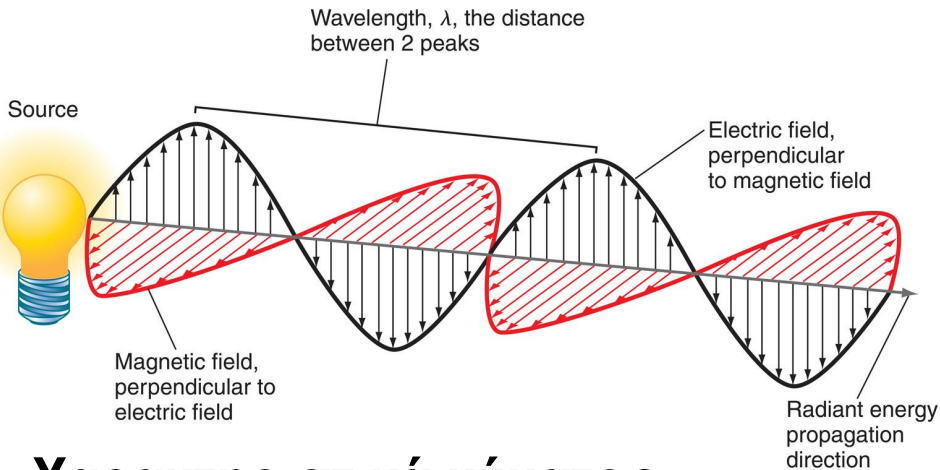
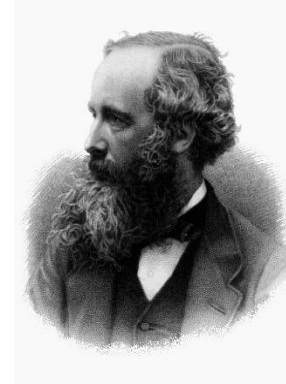
Το 1678 έγινε η «ανατροπή»

- Ο **Christian Huygens** απέδειξε τους νόμους της ανάκλασης και της διάθλασης βασιζόμενος στη θεώρηση ότι το φως αποτελεί 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 (κενό), διότι θα χρειαζόταν κάποιο μέσο.
 - Αν ήταν κύμα θα έπρεπε να παρακάμπτει τυχόν εμπόδια (**περίθλαση**).
- Το 1660 ο Francesco Grimaldi απέδειξε πειραματικά ότι το φως περιθλάται.



Η φύση του φωτός

- Η επιβεβαίωση ήρθε το **1801** από τον **Thomas Young**. Απέδειξε σαφέστατα ότι υπό ορισμένες συνθήκες το φως συμβάλλει σαν να είναι κύμα.
- Το **1873** ο **Maxwell** εισήγαγε την έννοια ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό (H/M) 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 H/M κύματα ανακλώνται, διαθλώνται και έχουν όλες τις ιδιότητες των κυμάτων.

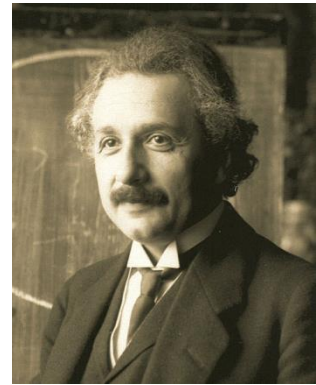


Χαρακτηριστικά κύματος

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 της ηλεκτρομαγνητικής προσέγγισης, ορισμένα φαινόμενα δεν ήταν δυνατό 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 είναι αποδεκτή η διττή φύση του φωτός
 - Κυματική φύση → διάδοση, συμβολή, περίθλαση
 - Σωματιδιακή φύση → φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, φαινόμενο Compton, φωτοχημεία



ΦΩΣ : Η/Μ κύμα ↔ **σωματίδιο (φωτόνιο)**

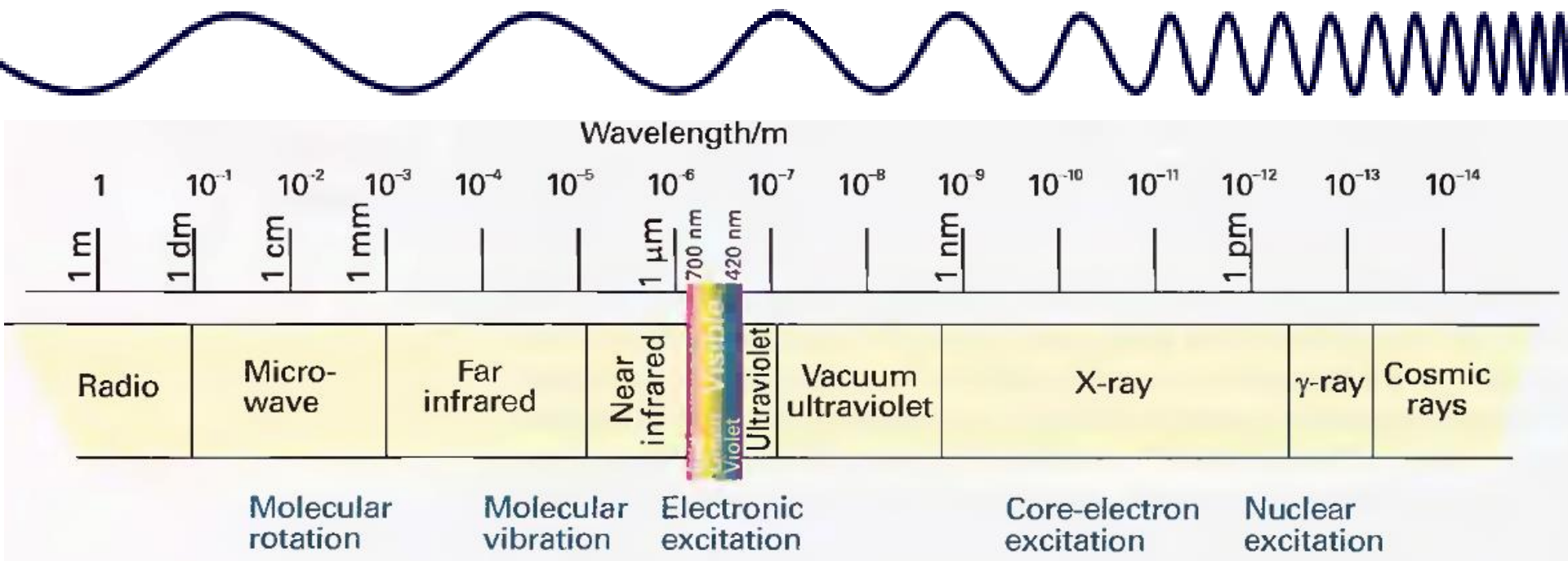
$$E = h\nu \quad \nu = c / \lambda$$

Φύση και χαρακτηριστικά του φωτός, οπτικά φαινόμενα

1. Φύση του φωτός (κύματική, σωματιδιακή (φωτόνια))
2. Φάσμα της Η/Μ ακτινοβολίας
3. Διάδοση Η/Μ κύματος
4. Πόλωση
5. Ανάκλαση
6. Διάθλαση
7. Περίθλαση
8. Συμβολή
9. Απορρόφηση ακτινοβολίας

Φως = Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία / φωτόνια

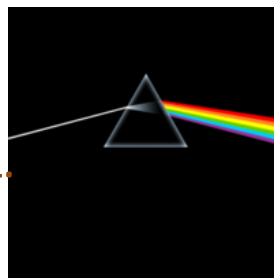
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Το **ΦΩΣ** συμπεριφέρεται ως ηλεκτρομαγνητικό **ΚΥΜΑ**, συχνότητας ν και μήκους κύματος λ .

Ισοδύναμα όμως μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τη μορφή **ΣΩΜΑΤΙΩΝ** (ΦΩΤΟΝΙΩΝ)

ενέργειας $E = h\nu$



E : ενέργεια φωτονίου

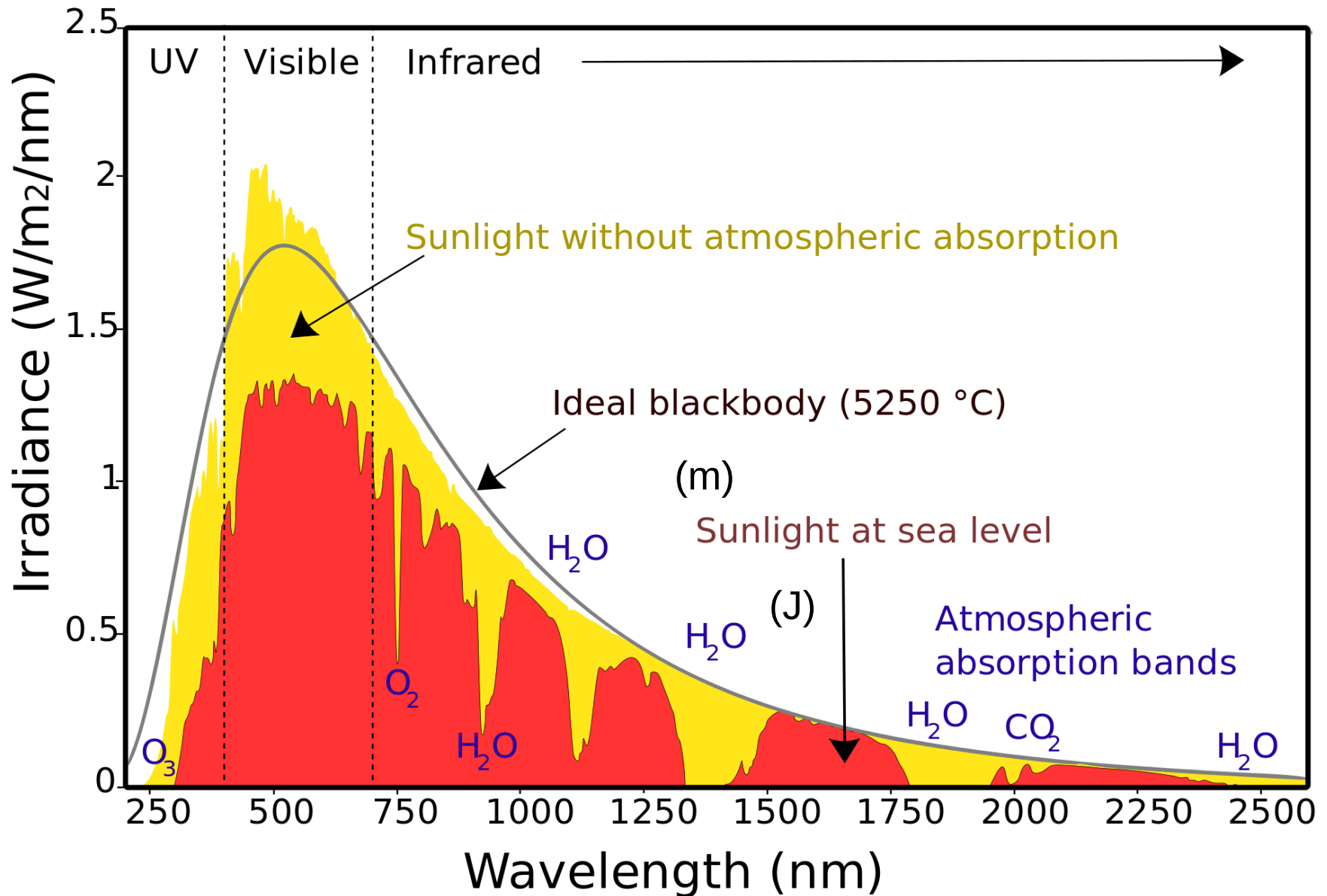
ν : συχνότητα η/μ κύματος

λ : μήκος κύματος

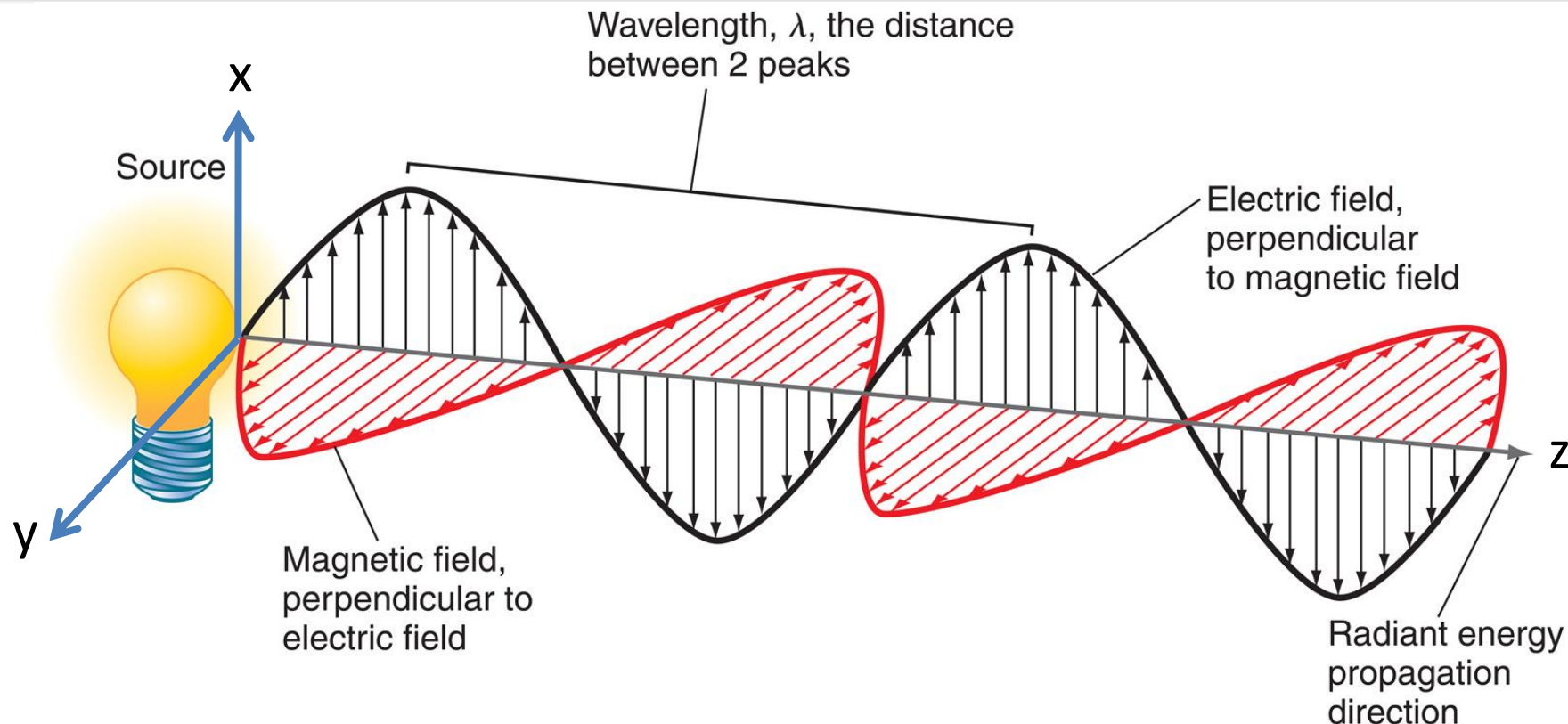
$$E = h\nu$$

$$\nu = c / \lambda$$

Φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της Γης



Το φως ως Η/Μ κύμα



© 2010 Pearson Education, Inc.

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

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

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

$$k = 2\pi/\lambda$$

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

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

$$\omega = 2\pi\nu$$

δ : φάση

Ένταση φωτός

Πυκνότητα ενέργειας Η/Μ πεδίου :

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

Για μονοχρωματικό επίπεδο κύμα ισχύει :

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 :

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

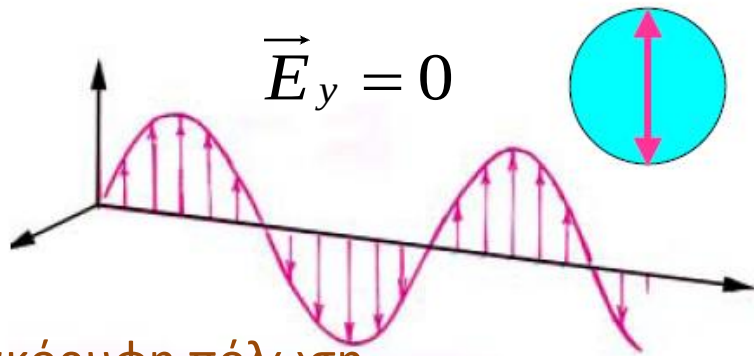
Μέση ροή ενέργειας :

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

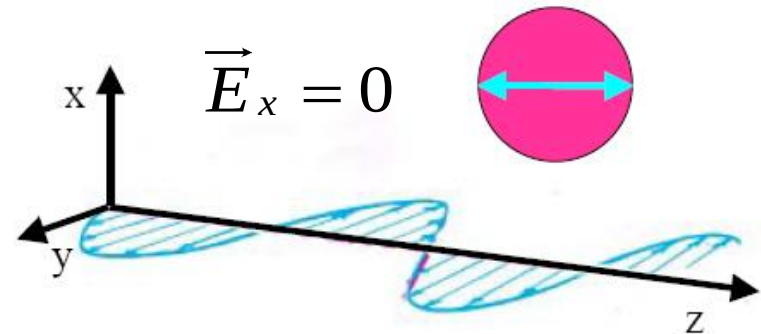
Ένταση = Μέτρο της μέσης ροής ενέργειας : $I = \langle S \rangle = (1/2)c \epsilon_0 E_0^2$

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**.



Κατακόρυφη πόλωση
(vertical polarization)

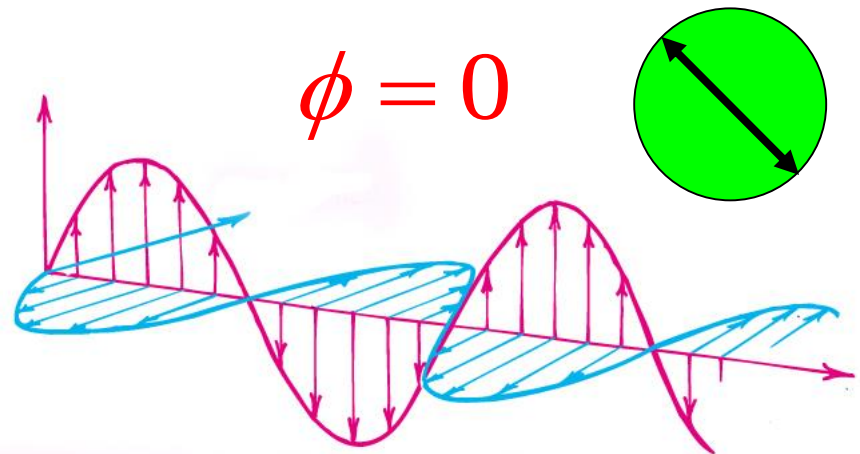


Οριζόντια πόλωση
(horizontal polarization)

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

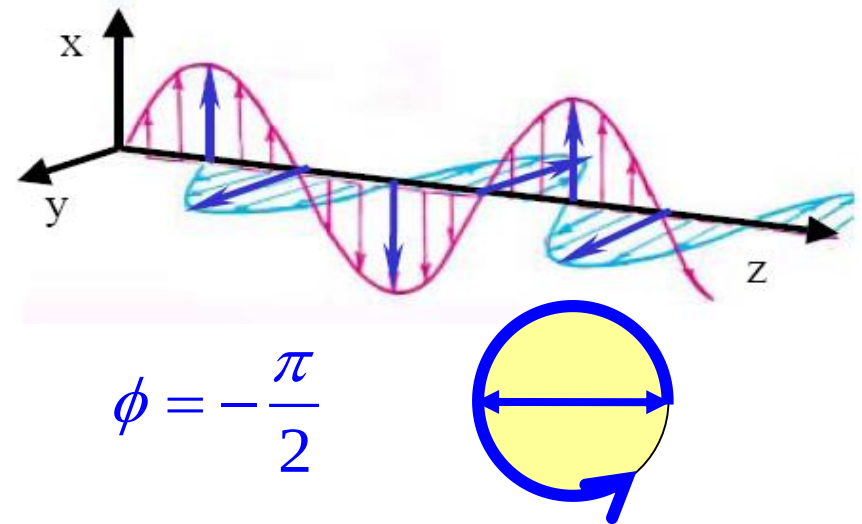
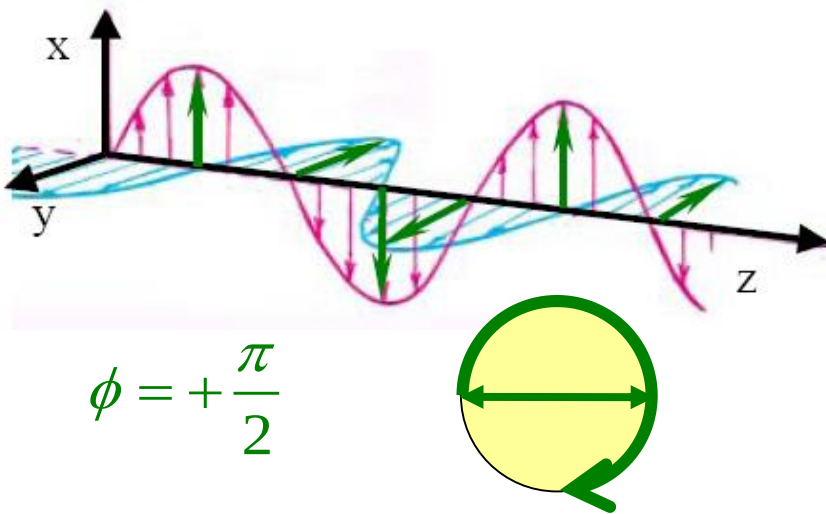
$$\vec{E}_x = \hat{i}E_0 \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(z - ct)\right]$$

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



Πόλωση του φωτός (Polarisation)

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



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

Αντικείμενο

Προσδιορισμός οπτικής ενεργότητας μορίων και εφαρμογή μετρήσεων στροφής επιπέδου πόλωσης του φωτός για την κινητική παρακολούθηση αντιδράσεων

Πειραματική διάταξη – Μετρήσεις

Πολωσίμετρο (αρχή λειτουργίας και χρήση)

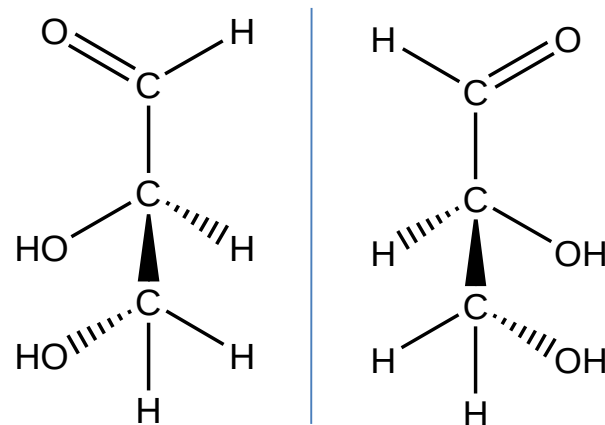
Μελέτη της χρονικής εξέλιξης (κινητικής) απλής χημικής αντίδρασης

Θεωρητικό υπόβαθρο

Κλασσική οπτική

Διανυσματικά χαρακτηριστικά H/M κυμάτων. Πόλωση.

Κινητική μελέτη χημικών αντιδράσεων (με οπτικές / φασματοσκοπικές τεχνικές)



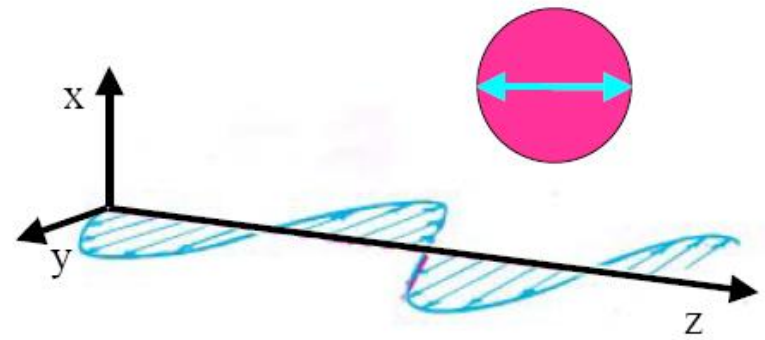
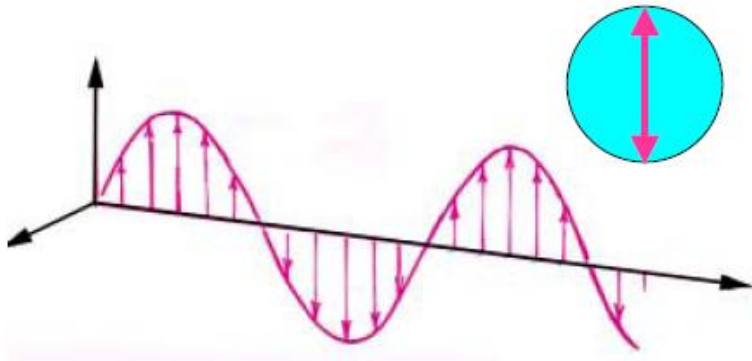
Βιβλιογραφία : AtΦΧ Φυσικοχημεία, (P.W. Atkins, J. de Paula, J. Keeler), Κεφ.17

ΑΣ-ΜΟπτ Μαθήματα Οπτικής (Γ. Ασημέλλης) Κεφ. 3

EG Γενική Χημεία (Ebbing, Gammon), Κεφ. 13

Άσκηση Α7 : Πολωσιμετρία

Γραμμική πόλωση φωτός

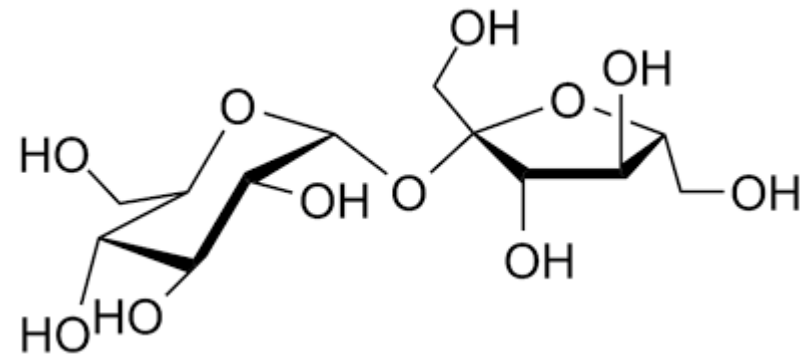
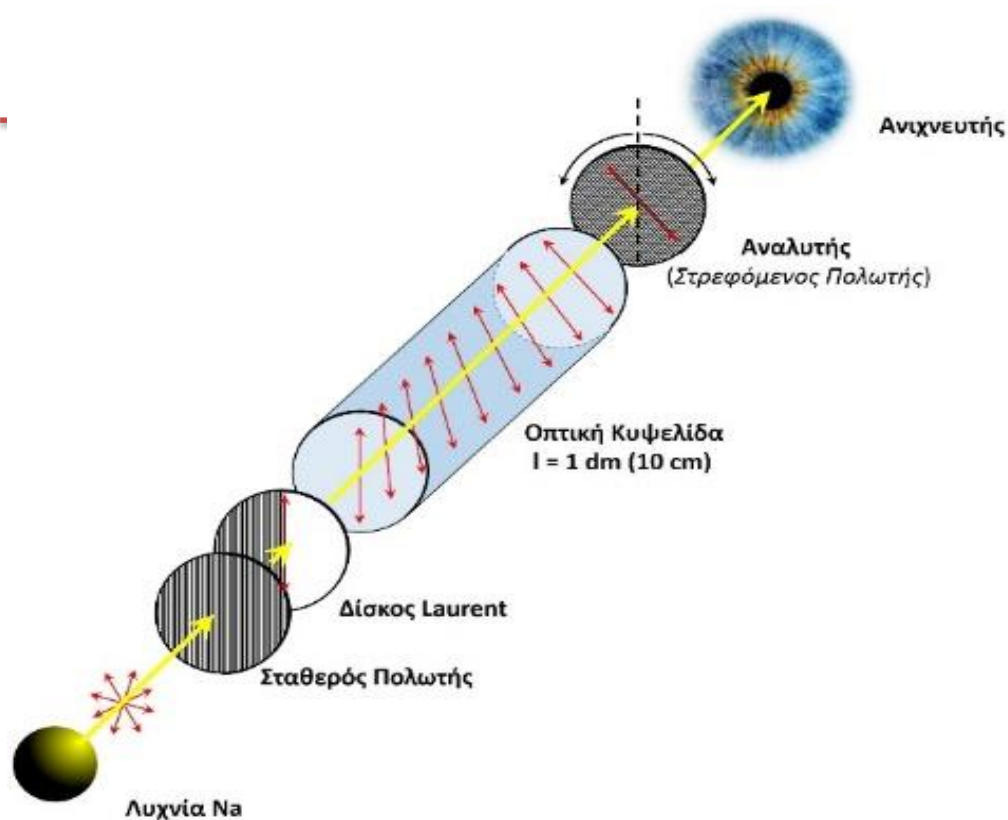


Πειραματική διάταξη



- Πολωσίμετρο
- Υδατόλουτρο
- Ζυγός
- Ογκομετρική φιάλη
- Χρονόμετρο
- Κυψελίδα

Άσκηση Α7 : Πολωσιμετρία

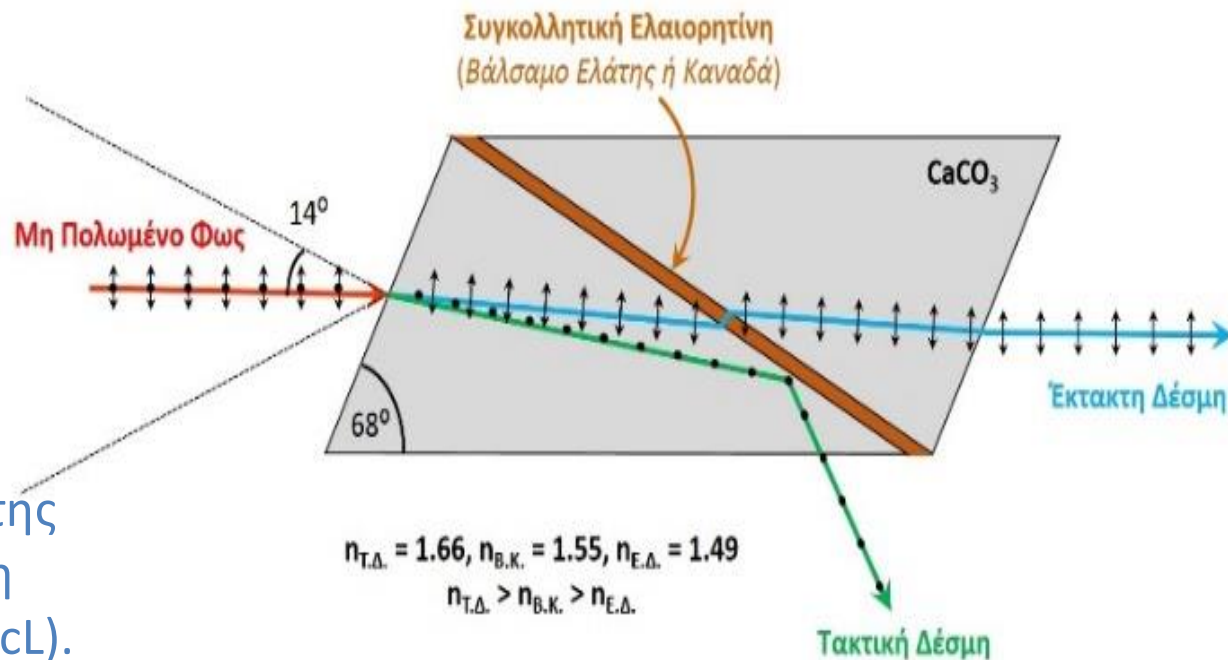


Ο-α-γλυκοπυρανόζυλο-(1→2)-β-φρουκτοφουρανόζη

Γωνία στροφής
πολωμένου φωτός

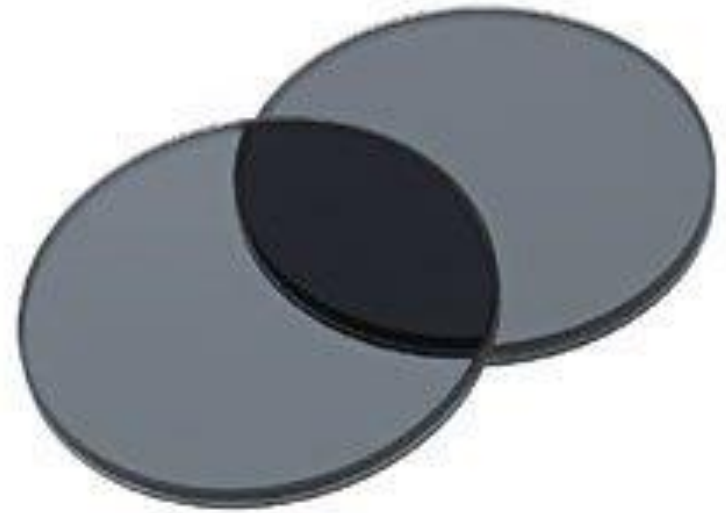
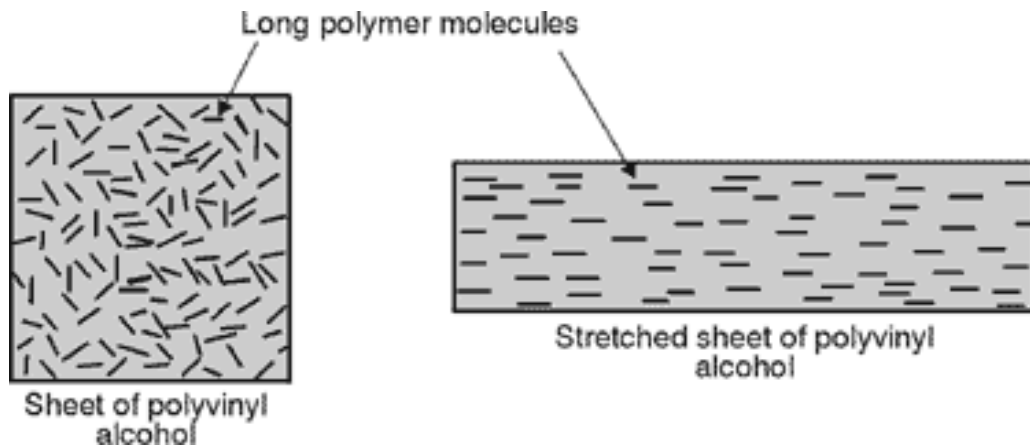
$$\alpha = [\alpha]_{\lambda}^{20} \frac{cL}{100}$$

Παρατηρήστε την ομοιότητα της σχέσης με τη γνωστή έκφραση του νόμου Beer-Lambert ($A = \epsilon cL$).



Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

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



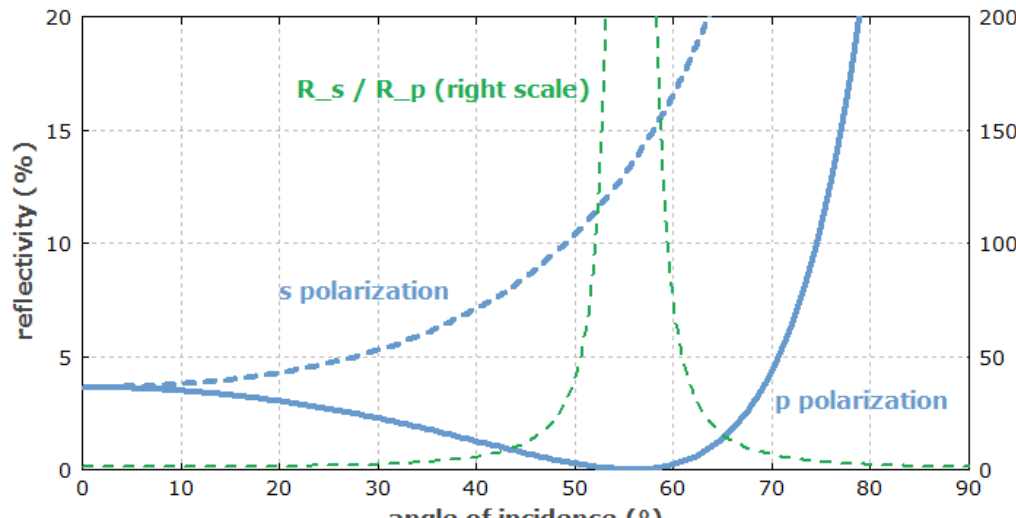
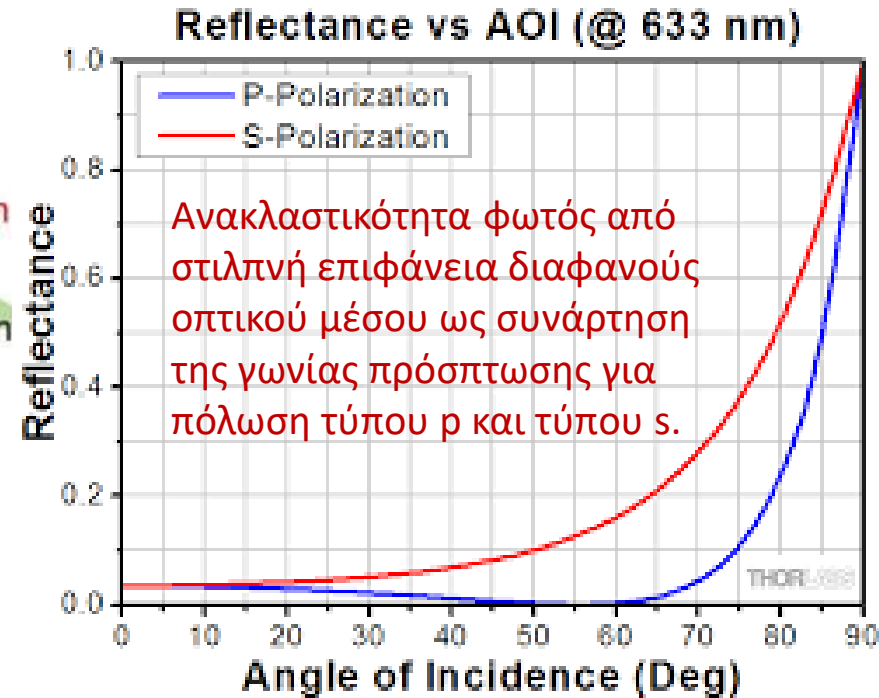
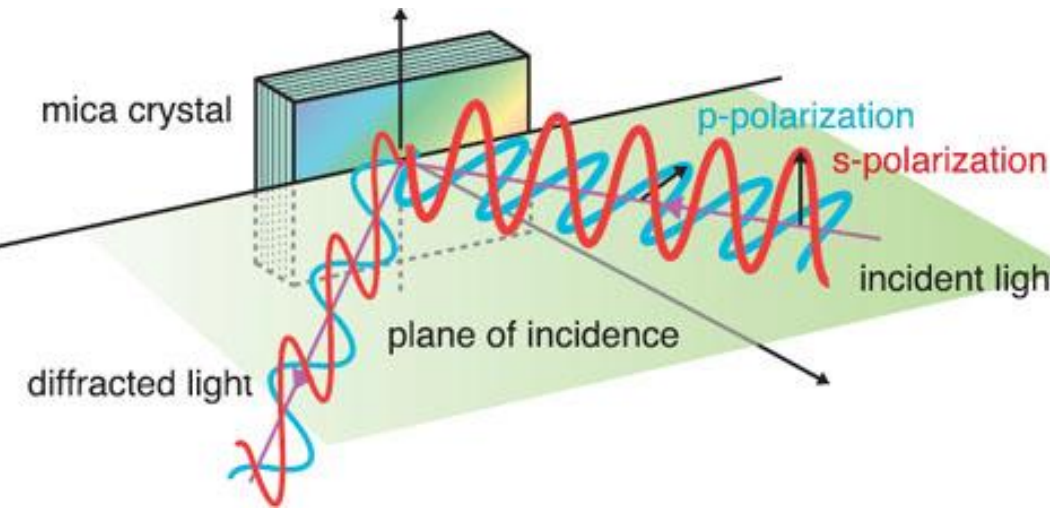
http://pe2bz.philpem.me.uk/Lights/-%20Laser/Info-902-LaserCourse/c06-10/mod06_10.htm

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

Πόλωση του φωτός (Polarisation)

Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

Ανάκλαση υπό γωνία Brewster



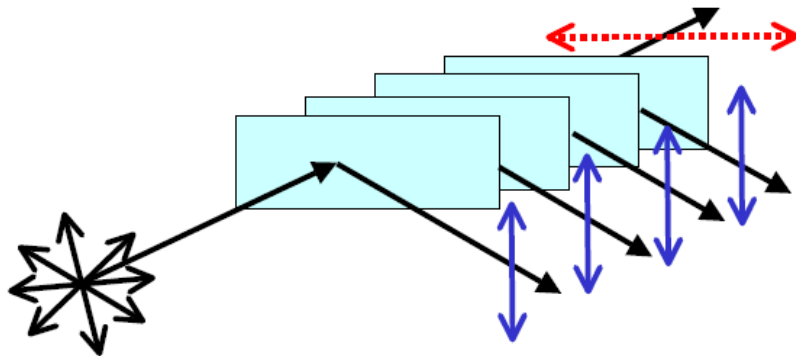
$$\tan \theta_B = \frac{n_{\text{glass}}}{n_{\text{air}}}$$

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

Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

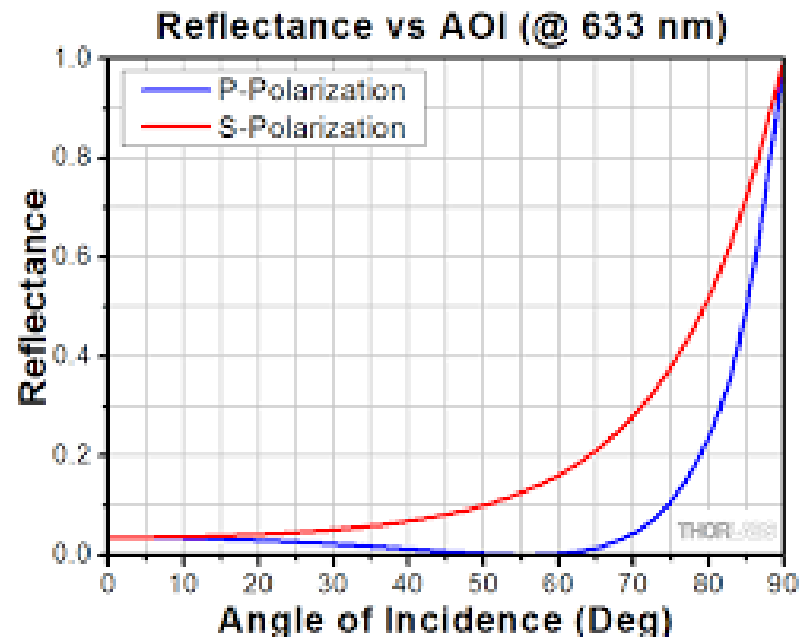
Ανάκλαση υπό γωνία Brewster

- 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**)



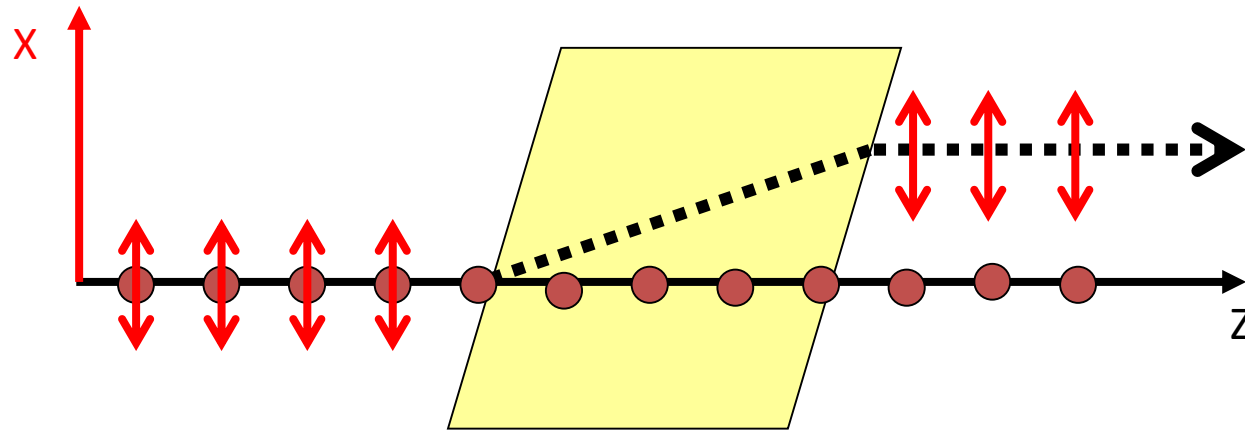
$$\tan \theta_B = \frac{n_{\text{glass}}}{n_{\text{air}}}$$

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

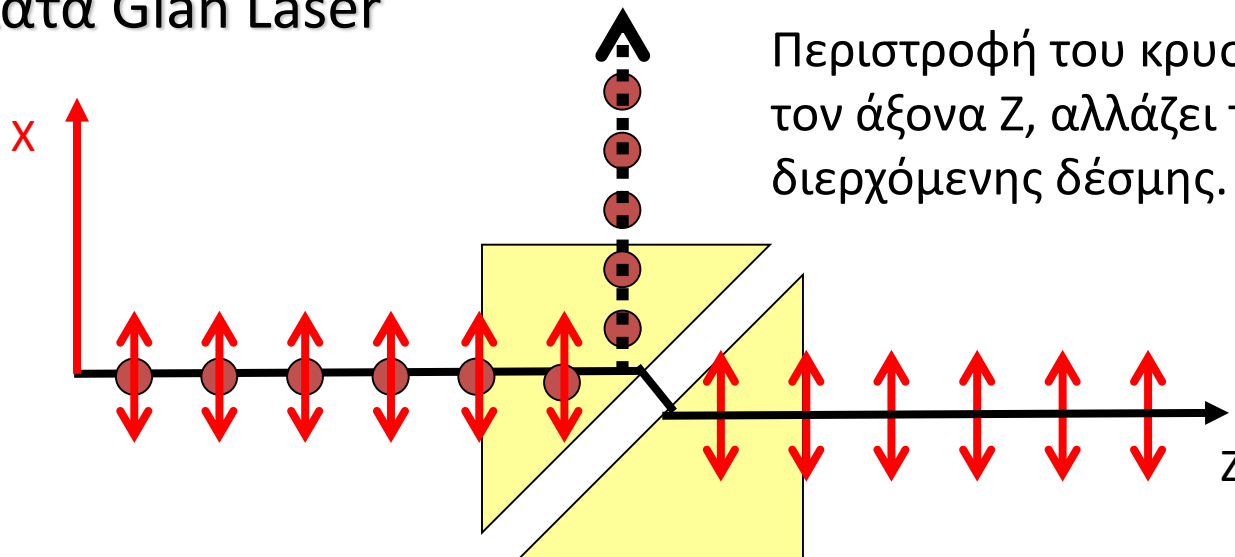
Παραγωγή γραμμικά πολωμένου φωτός

Διπλοθλαστικοί κρύσταλλοι

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



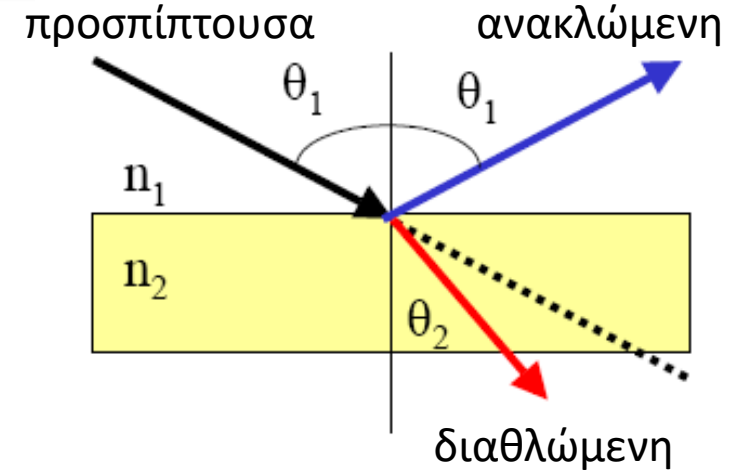
Πρίσματα Glan Laser



Περιστροφή του κρυστάλλου γύρω από τον άξονα Z, αλλάζει την πόλωση της διερχόμενης δέσμης.

Ανάκλαση του φωτός (Reflection)

- Όταν δέσμη ακτινοβολίας προσπίπτει σε λεία επιφάνεια, τμήμα αυτής ανακλάται.
- Η γωνία πρόσπτωσης ισούται με τη γωνία ανάκλασης.
- Οι ανακλώμενες ακτίνες παραμένουν παράλληλες μεταξύ τους.
- Αν η επιφάνεια δεν είναι λεία, τότε οι ανακλώμενες ακτίνες διαδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις οπότε έχουμε το φαινόμενο της σκέδασης ή διάχυσης (διάχυτη ανάκλαση).



Ειδική περίπτωση : κάθετη πρόσπτωση

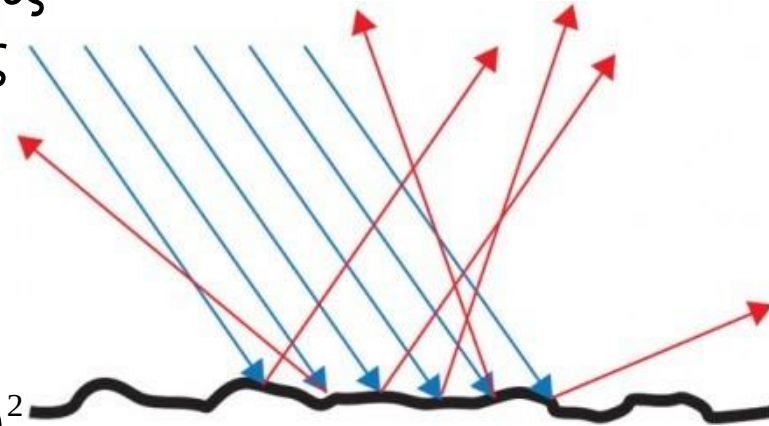
$$I_0 : \text{προσπίπτουσα} \quad R = \frac{I_R}{I_0} = \left(\frac{E_{0R}}{E_{0I}} \right)^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

I_R : ανακλώμενη

I_T : διερχόμενη

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

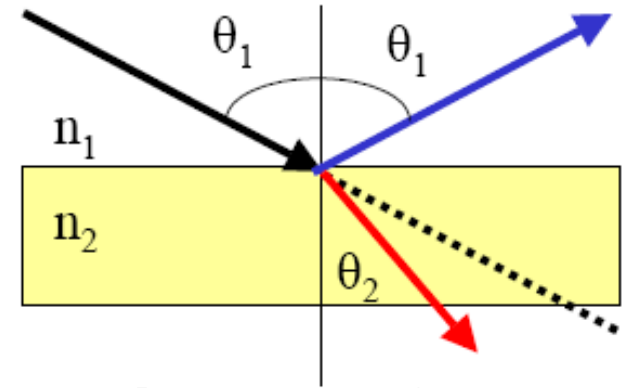
$$R + T = 1$$



Η ανάκλαση είναι συνέπεια της ασυνέχειας που εμφανίζει η τιμή του δείκτη διάθλασης κατά την πορεία μιας δέσμης φωτός.

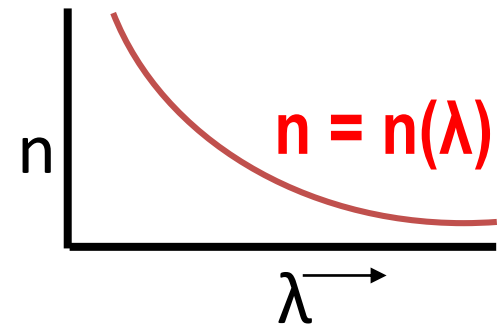
Διάθλαση του φωτός (Refraction)

- Όταν ακτίνα φωτός διαδιδόμενη σε διαφανές μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια ως προς άλλο διαφανές μέσο, τμήμα αυτής ανακλάται ενώ το υπόλοιπο διαθλάται στο δεύτερο μέσο.
- Η διαθλώμενη ακτίνα δεν συνεχίζει την πορεία της προσπίπτουσας αλλά σχηματίζει γωνία ως προς την κάθετο στη διαχωριστική επιφάνεια των δυο μέσων που δίδεται από το Νόμο του Snell. (Αρχή ελαχίστου χρόνου)
- 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)

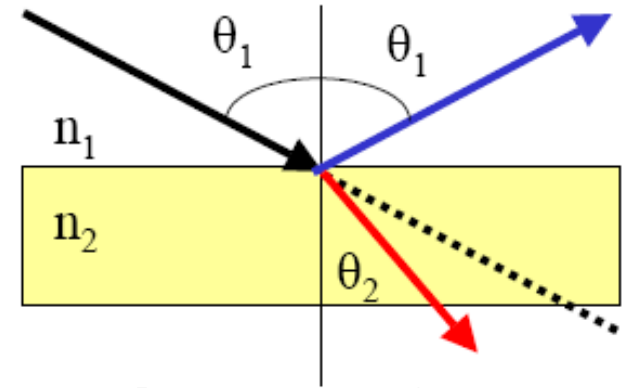
$$n = \frac{c}{u} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}}$$

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

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

Ανάκλαση - Διάθλαση του φωτός – Εξισώσεις Fresnel

- Όταν ακτίνα φωτός διαδιδόμενη σε διαφανές μέσο, συναντήσει τη διαχωριστική επιφάνεια ως προς άλλο διαφανές μέσο, τμήμα αυτής ανακλάται ενώ 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

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

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

$$R + T = 1$$

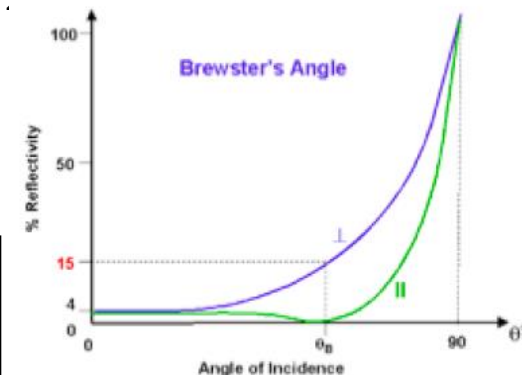
s : το ΗΠ ταλαντώνεται κάθετα στο επίπεδο πρόσπτωσης

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

Γωνία Brewster

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

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



Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εσωτερική ολική ανάκλαση (total internal reflection)

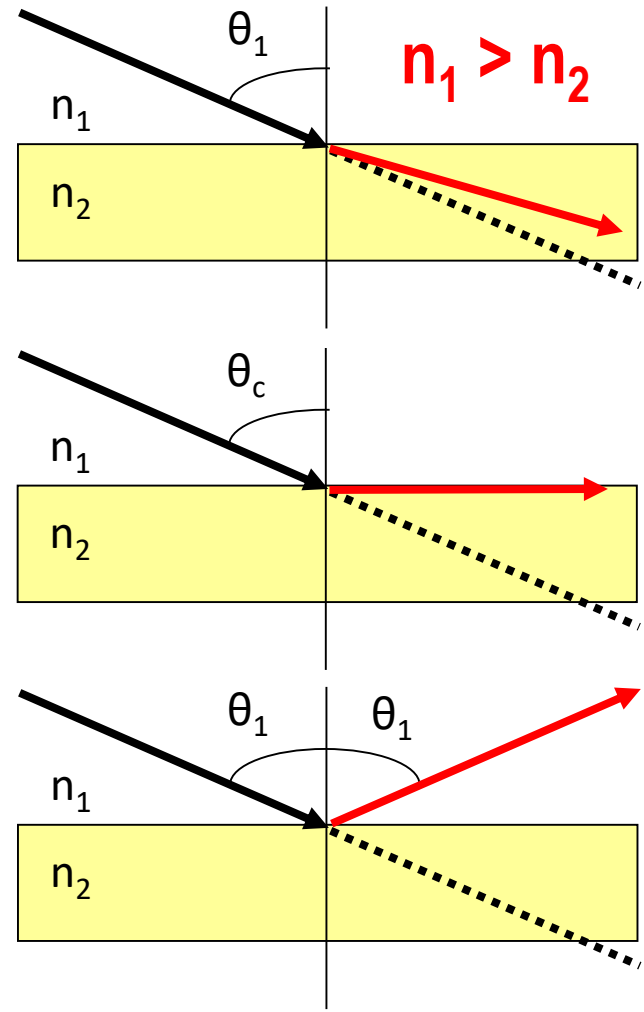
- Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι : $\theta_i > \theta_c$ (η υπολογιζόμενη γωνία διάθλασης είναι $\geq 90^\circ$) τότε δεν παρατηρείται διάθλαση, αλλά **ολική ανάκλαση**.
- Συμβαίνει όταν το φως διαδίδεται από n_1 προς $n_2 < n_1$
- Εφαρμογή στις οπτικές ίνες

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

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

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

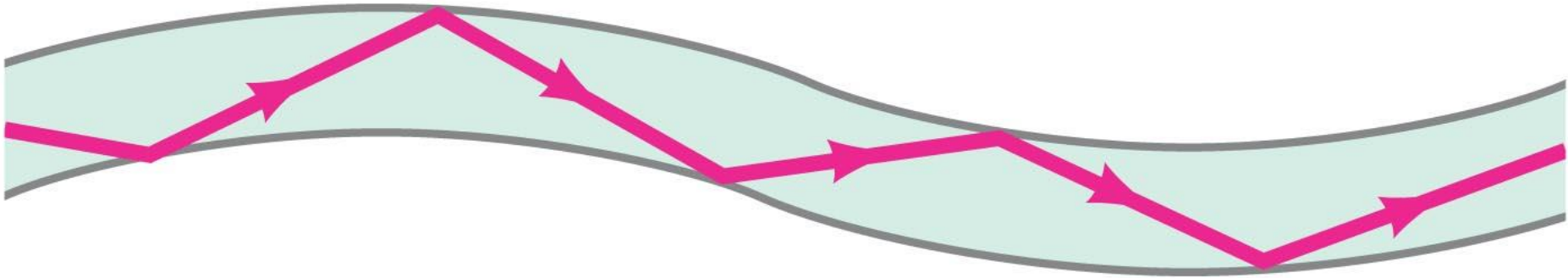
Ολική ανάκλαση όταν $\theta_i > \theta_c$



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



The masters of light

*The 2009 Nobel Prize in Physics honors three scientists, who have had important roles in shaping modern information technology, with one half to **Charles Kuen Kao** and with **Willard Sterling Boyle** and **George Elwood Smith** sharing the other half. Kao's discoveries have paved the way for optical fiber technology, which today is used for almost all telephony and data communication. Boyle and Smith have invented a digital image sensor – CCD, or charge-coupled device – which today has become an electronic eye in almost all areas of photography.*

6 October 2009

[The Royal Swedish Academy of Sciences](http://www.kva.se) has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2009 with one half to

Charles K. Kao

Standard Telecommunication Laboratories, Harlow, UK, and Chinese University of Hong Kong

“for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication”

and the other half jointly to

Willard S. Boyle and George E. Smith

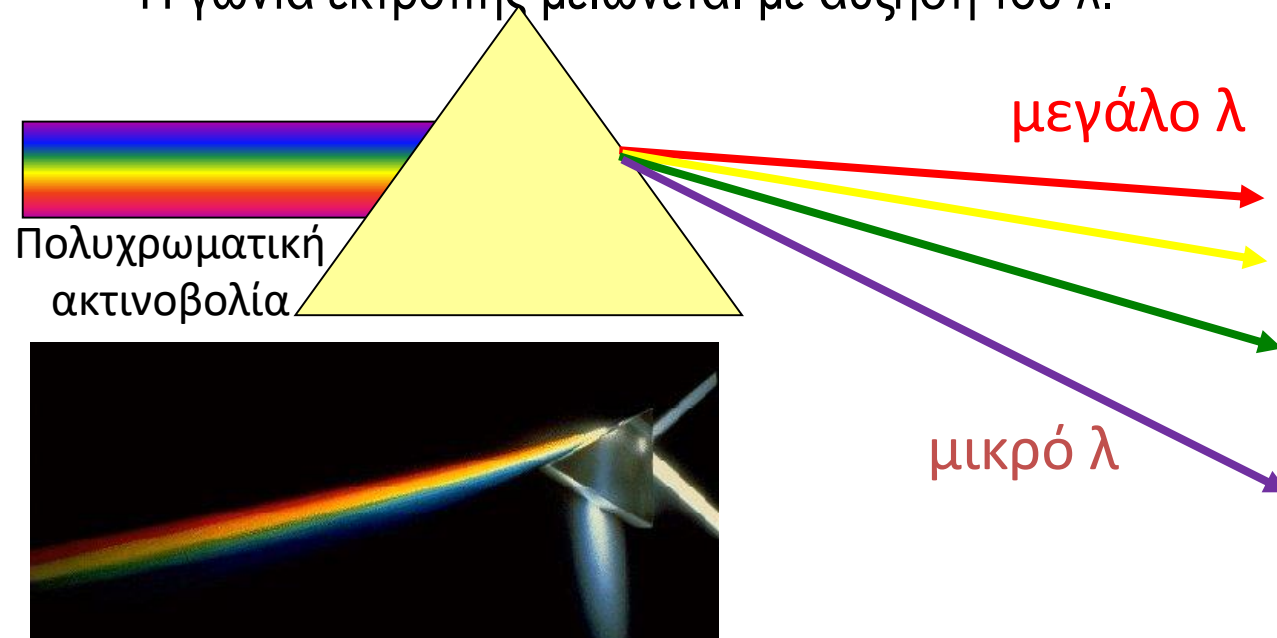
Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA

“for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor”

Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εφαρμογή στην οπτική και φασματοσκοπία : Πρίσματα

- Το πρίσμα είναι ένα διαφανές οπτικό στοιχείο, το οποίο έχει την ιδιότητα να διαθλά το φως (και εξαιτίας της γεωμετρίας του επιτυγχάνει να)
- Διαχωρίζει το λευκό φως στις χρωματικές του συνιστώσες (χρώματα της ίριδας).
- Γωνία εκτροπής : η γωνία που σχηματίζει η δέσμη φωτός (δεδομένου λ) καθώς εξέρχεται από το πρίσμα σε σχέση με την εισερχόμενη (μονο- ή πολυχρωματική) δέσμη.
- Η γωνία εκτροπής μειώνεται με αύξηση του λ .



R (resolution)

Διακριτική ικανότητα

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

b : βάση του πρίσματος

Εφαρμογή στην οπτική και φασματοσκοπία : Πρίσματα

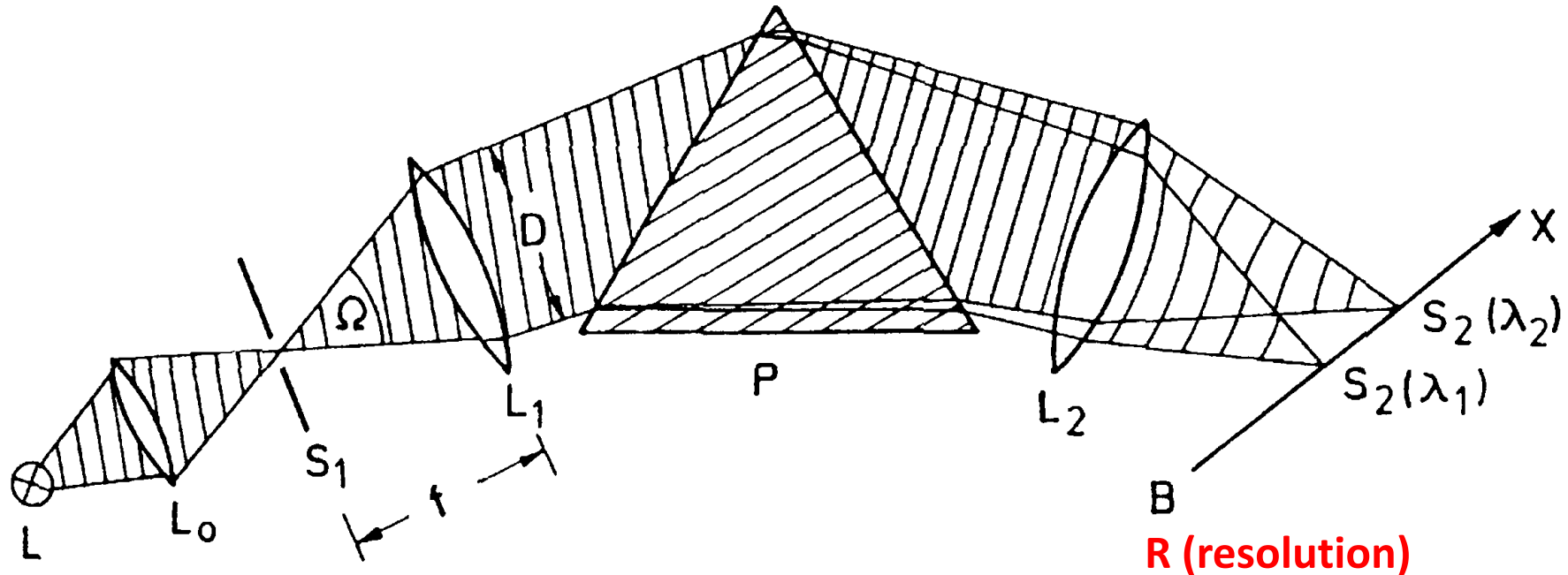


Fig. 4.1. Prism spectrograph

Η ανάλυση ακτινοβολίας σε ένα μονοχρωμάτορα (φασματογράφο) είναι μια διαδικασία απεικόνισης η οποία έγκειται σε έναν σύνθετο οπτικό-γεωμετρικό μετασχηματισμό μιας πολυχρωματικής σημειακής πηγής φωτός σε μια γραμμή που χαρακτηρίζεται από βαθμιαία μεταβολή του λ (αλληλουχία μονοχρωματικών σημείων).

R (resolution)

Διακριτική ικανότητα

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

b : βάση του πρίσματος

Αντικείμενο

Προσδιορισμός δείκτη διάθλασης (n) διαφανών στερεών, υγρών.

Εξάρτηση n από το μήκος κύματος (λ) του φωτός.

Μελέτη ατομικού φάσματος με οπτική διάταξη πρίσματος και φράγματος περίθλασης

Πειραματική διάταξη – Μετρήσεις

Φασματοσκόπιο πρίσματος / φράγματος περίθλασης

Λυχνία Υδραργύρου (Hg)

Θεωρητικό υπόβαθρο

Κλασσική οπτική, Διάθλαση (οπτική διασπορά), Περίθλαση

Βιβλιογραφία : ΑτΦΧ

Φυσικοχημεία, (P.W. Atkins, J. de Paula, J. Keeler), Κεφ. 14Α

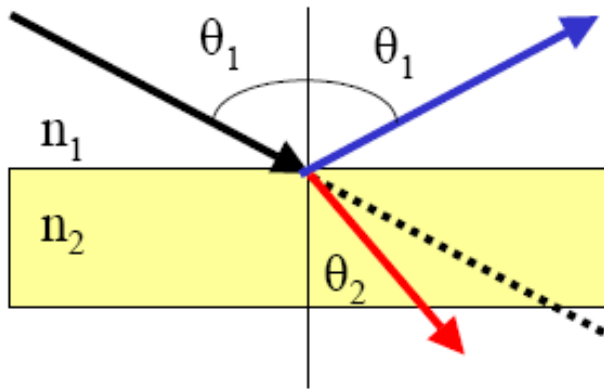
ΑΣ-ΜΟπτ

Μαθήματα Οπτικής (Γ. Ασημέλλης) Κεφ. 4, 6

Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία

Διάθλαση

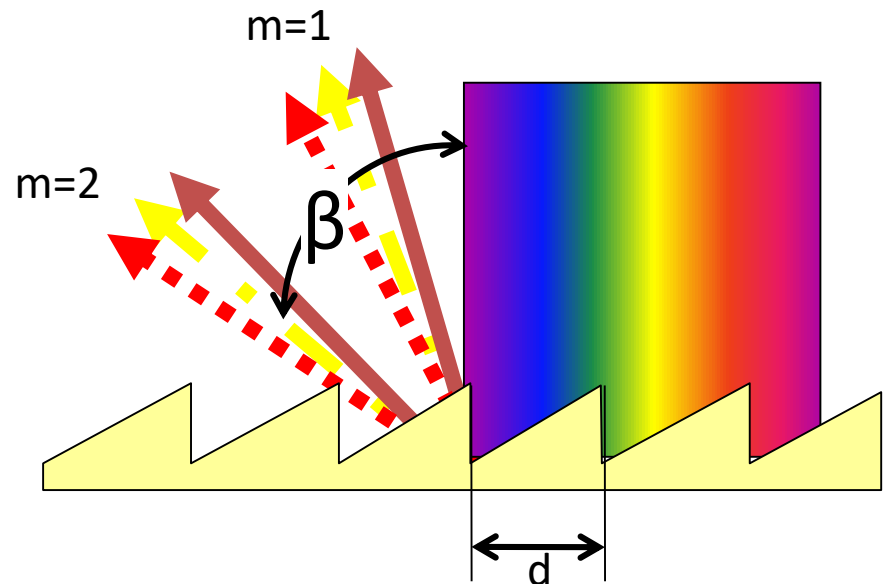
Νόμος του Snell $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



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

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

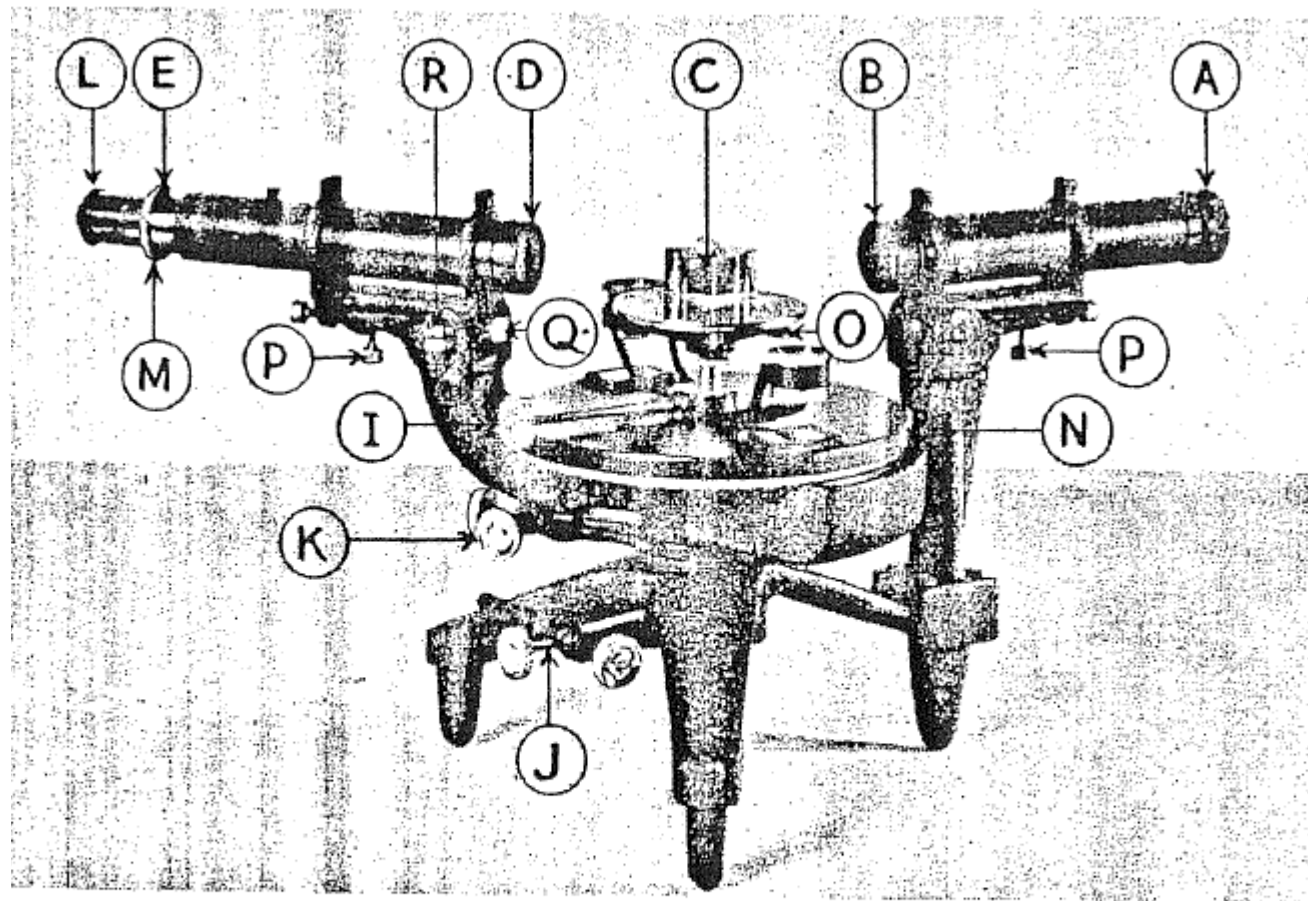


Fig. 1. The Spencer Spectrometer. A—Slit; B—Collimator Objective; C—Dispersing Prism; D—Telescope Objective; E—Position of Cross Hairs; I—Prism Table Clamping Screw; J—Prism Table Clamping and Tangent Screws; K—Telescope Arm Clamping and Tangent Screws; L—Eyepiece Ring; M—Telescope Focusing Ring; N—Divided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

Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία

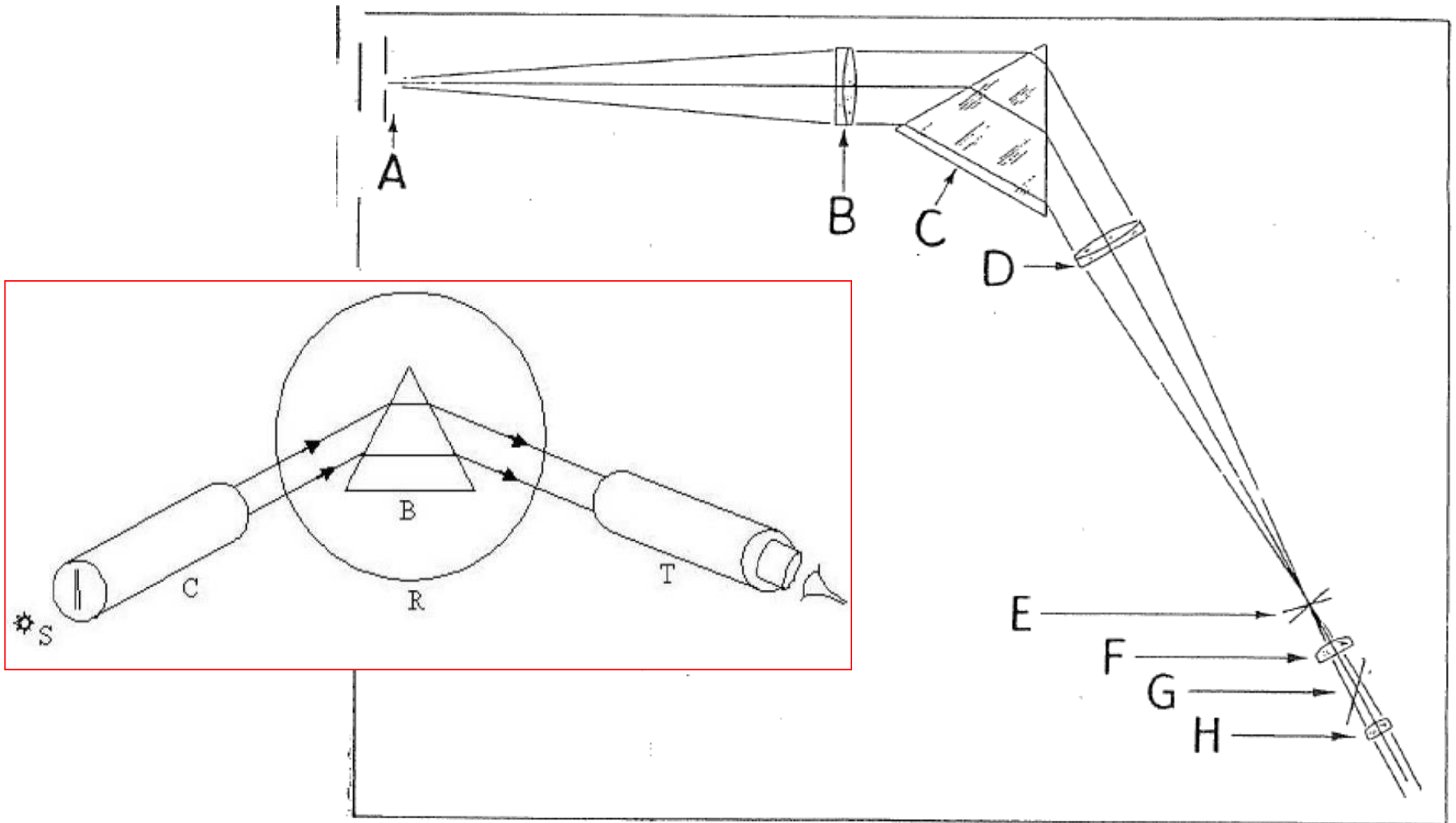
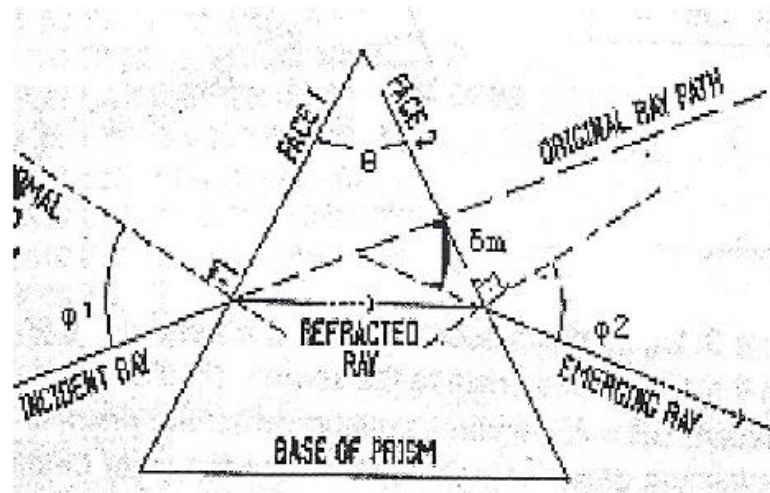
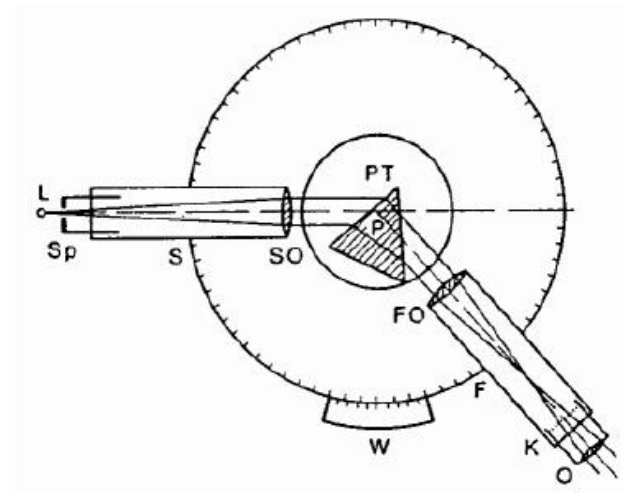


Fig. 7. Path of Rays through the Spencer Spectrometer. A—Slit; B—Collimator Objective; C—Dispersing Prism; D—Telescope Objective; E—Position of Cross Hairs; F—Eyepiece Field Lens; G—Semi-transparent Diagonal Mirror; H—Eyepiece Lens.

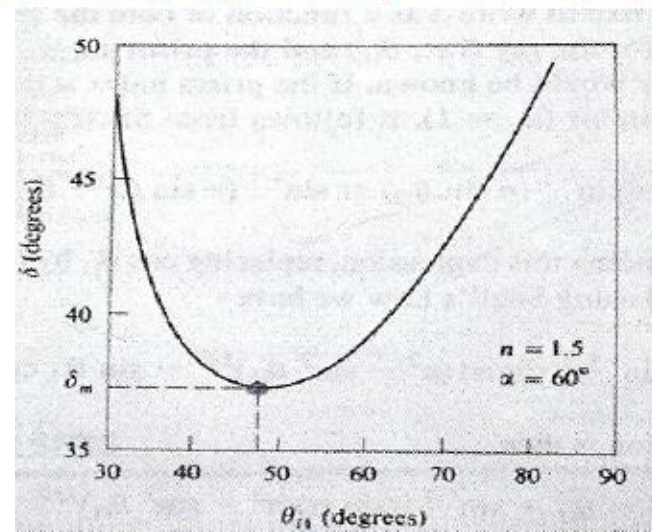
Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία



Σχ. 1 Διάθλαση μιας ακτίνας από πρίσμα όταν η ακτίνα ακολουθεί συμμετρική πορεία διαδρομής (θέση ελάχιστης απόκλισης εκτροπής).



Σχ. 2 Σχηματικό διάγραμμα πορείας ακτίνας στο φασματοσκόπιο.

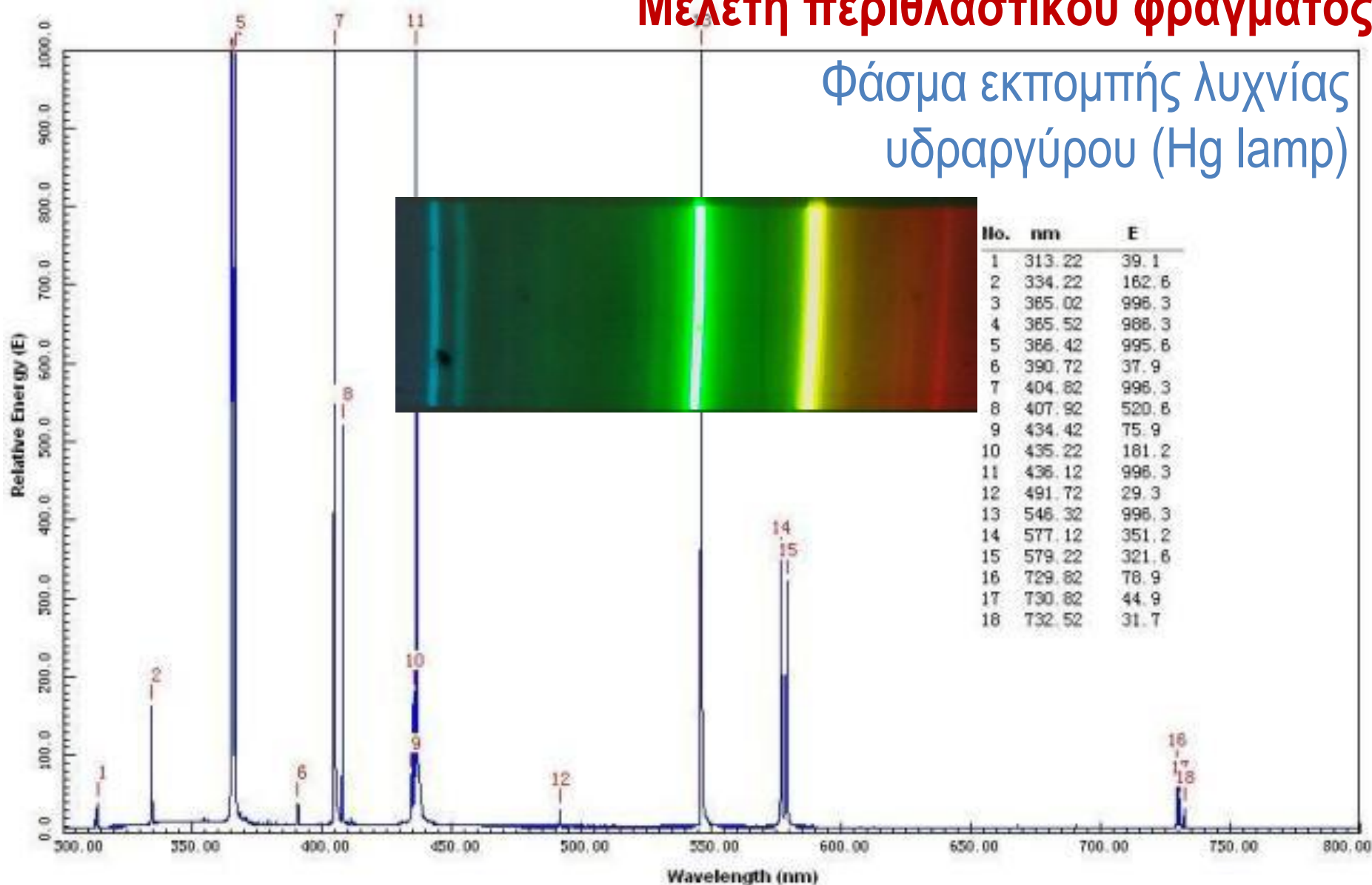


Σχ. 3 Εξάρτηση της γωνίας απόκλισης (δ / μοίρες) από τη γωνία πρόσπτωσης (θ / μοίρες)

Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία – Περίθλαση - Φασματοσκοπία

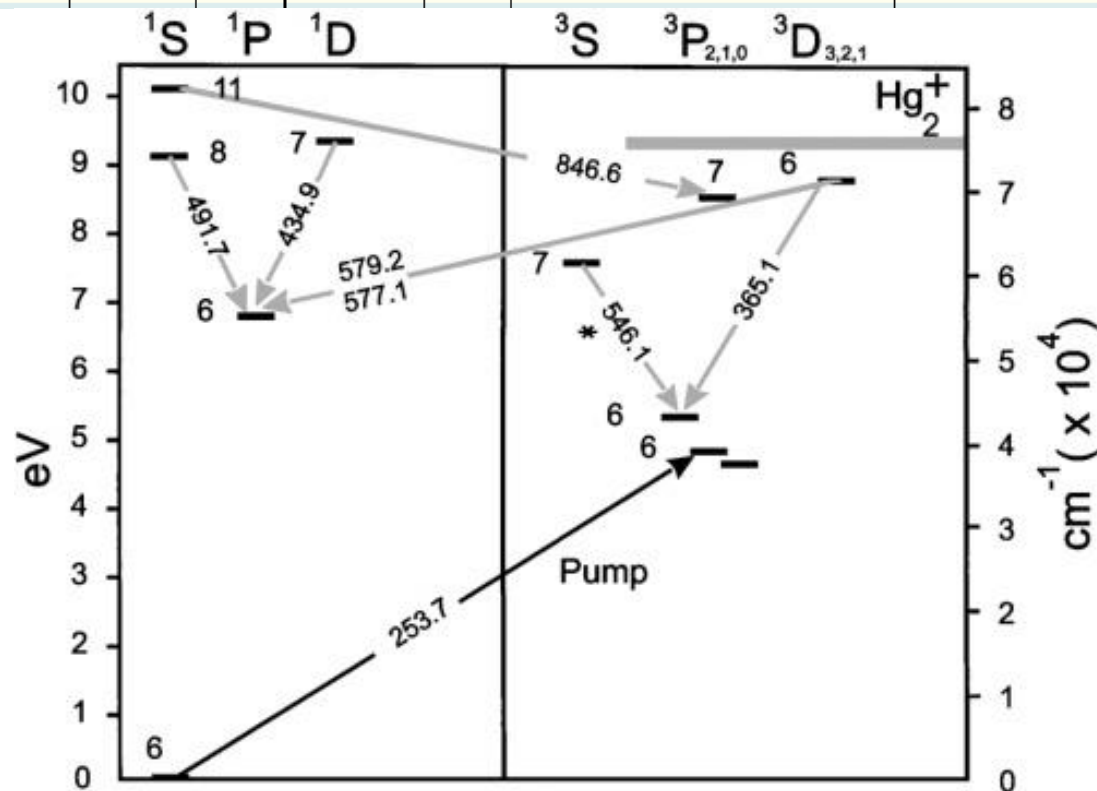
Μελέτη περιθλαστικού φράγματος

Φάσμα εκπομπής λυχνίας
υδραργύρου (Hg lamp)



Άσκηση Α8 : Διαθλασιμετρία – Περίθλαση - Φασματοσκοπία

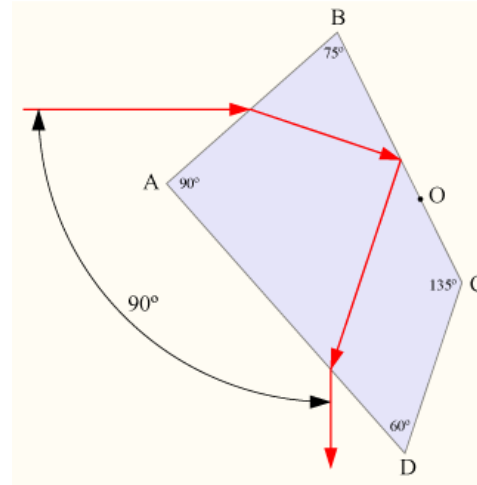
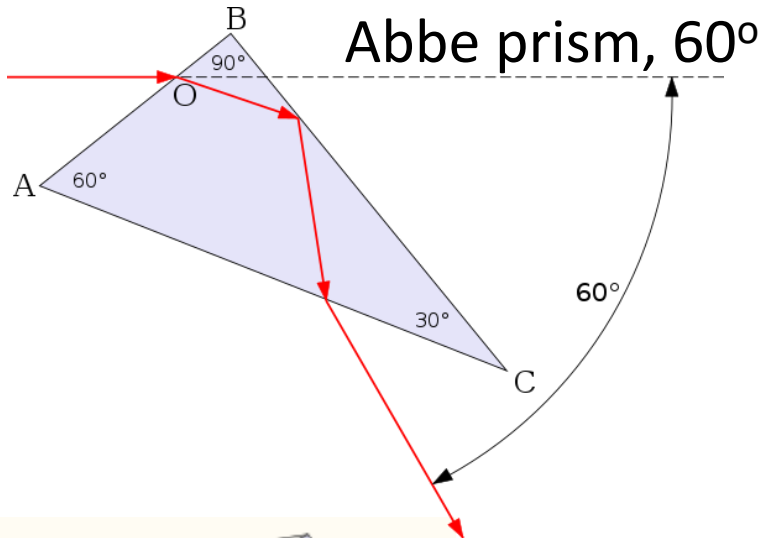
Observed Wavelength Air (nm)	Unc. (nm)	Ritz Wavelength Air (nm)	Unc. (nm)	Rel. Int. (?)	A_{ki} (s ⁻¹)	Acc.	E_i (cm ⁻¹)	E_k (cm ⁻¹)	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J
365.01580	0.00010	365.01579	0.00009	9000	1.29e+08	B+	44 042.909	- 71 431.180	5d ¹⁰ 6s6p 3p° 2	5d ¹⁰ 6s6d 3D 3
365.48420	0.00010	365.48429	0.00007	3000	1.84e+07	B	44 042.909	- 71 396.073	5d ¹⁰ 6s6p 3p° 2	5d ¹⁰ 6s6d 3D 2
366.28870	0.00010	366.28869	0.00008	500	3.6e+06	C	44 042.909	- 71 336.005	5d ¹⁰ 6s6p 3p° 2	5d ¹⁰ 6s6d 3D 1
366.32840	0.00010	366.32831	0.00007	2000			44 042.909	- 71 333.053	5d ¹⁰ 6s6p 3p° 2	5d ¹⁰ 6s6d 1D 2
368.0211	0.0014	368.02427	0.00012				44 042.909	- 71 207.296	5d ¹⁰ 6s6p 3p° 2	5d ¹⁰ 6s7p 3p° 2



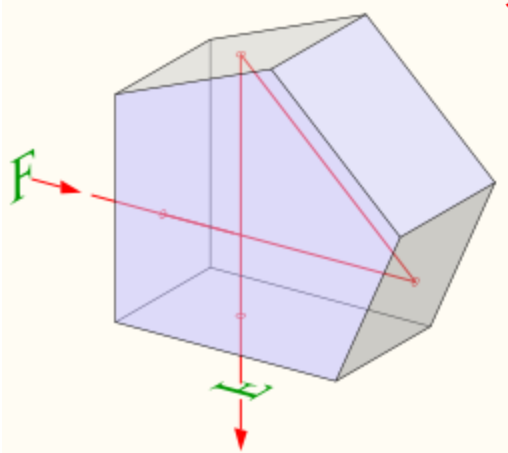
Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εφαρμογή στην οπτική και φασματοσκοπία : Πρίσματα

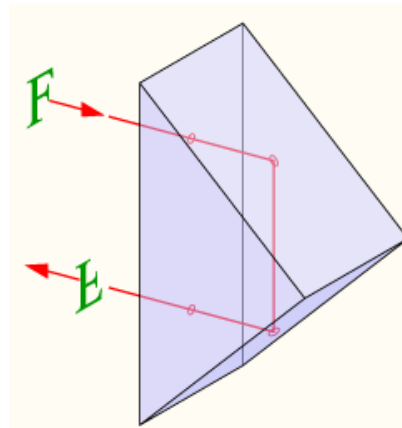
Διάφορα είδη πρισμάτων



Penta prism



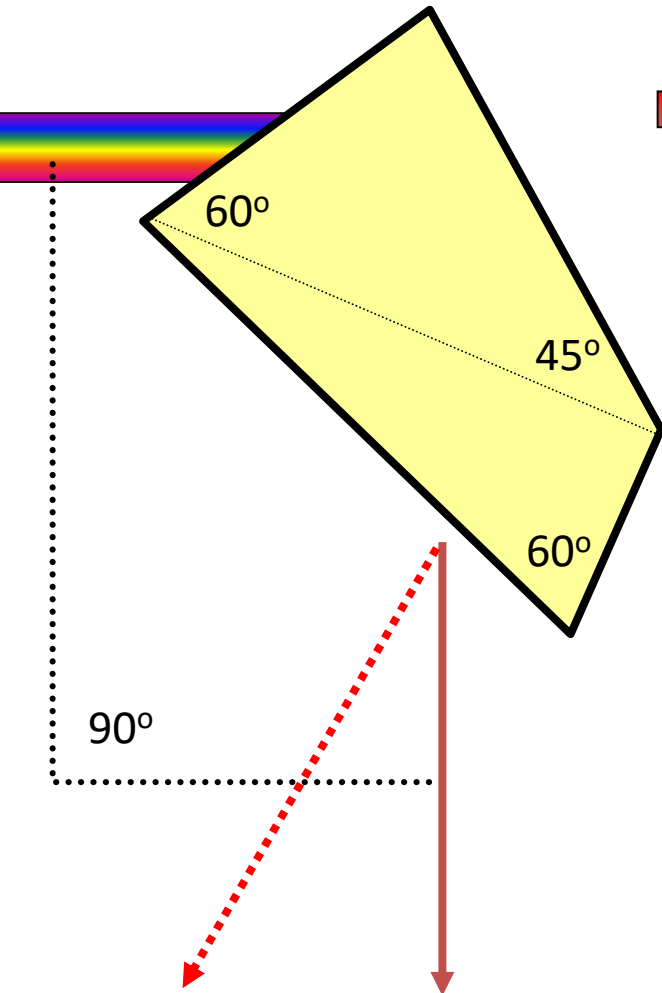
Porro prism



Διάθλαση του φωτός (Refraction)

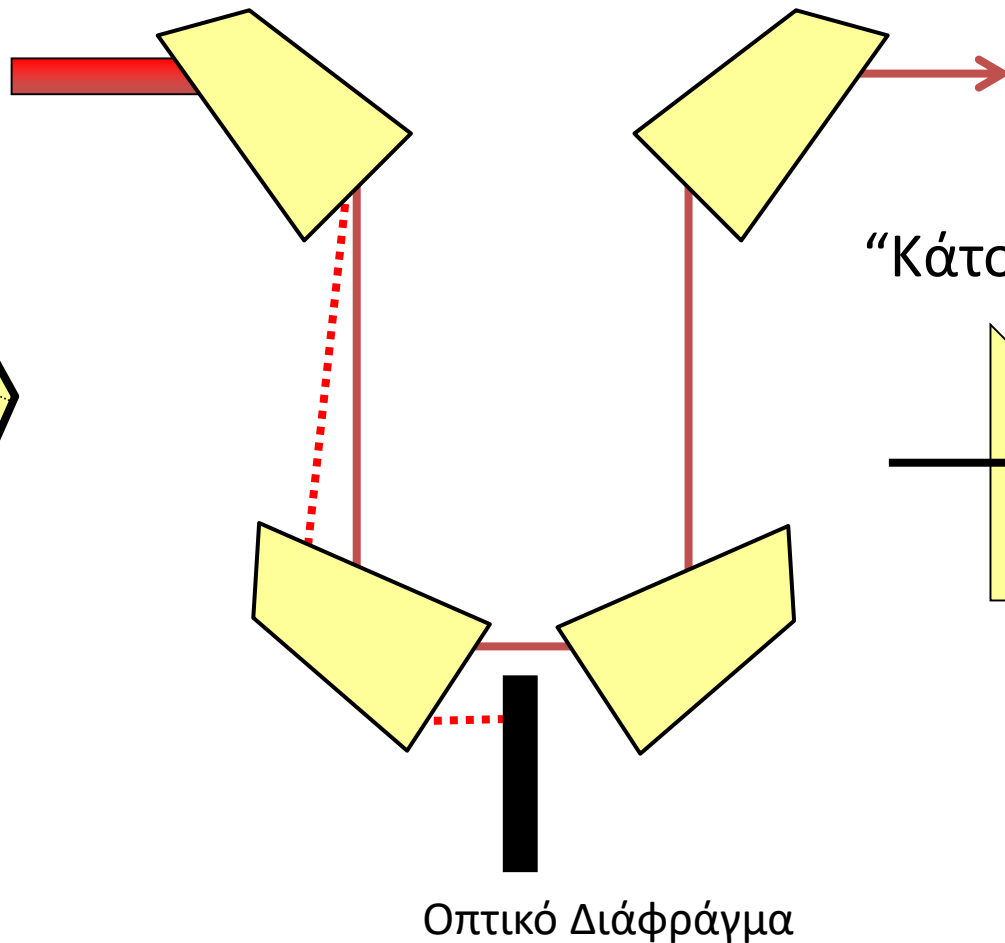
Pellin - Broca

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



Διαχωρισμός λ και $\lambda/2$

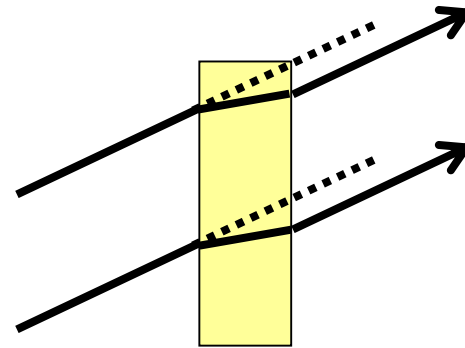
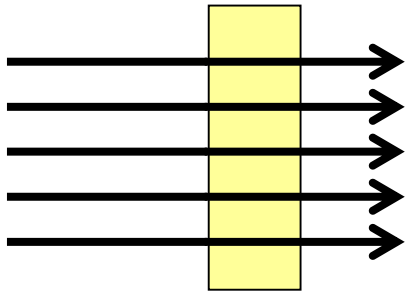
Η τελική πορεία της δέσμης είναι ουσιαστικά ανεξάρτητη του λ



Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Διάδοση του φωτός

Εφαρμόζουμε το Νόμο του Snell σε όλες τις διαχωριστικές επιφάνειες



Ερωτήσεις

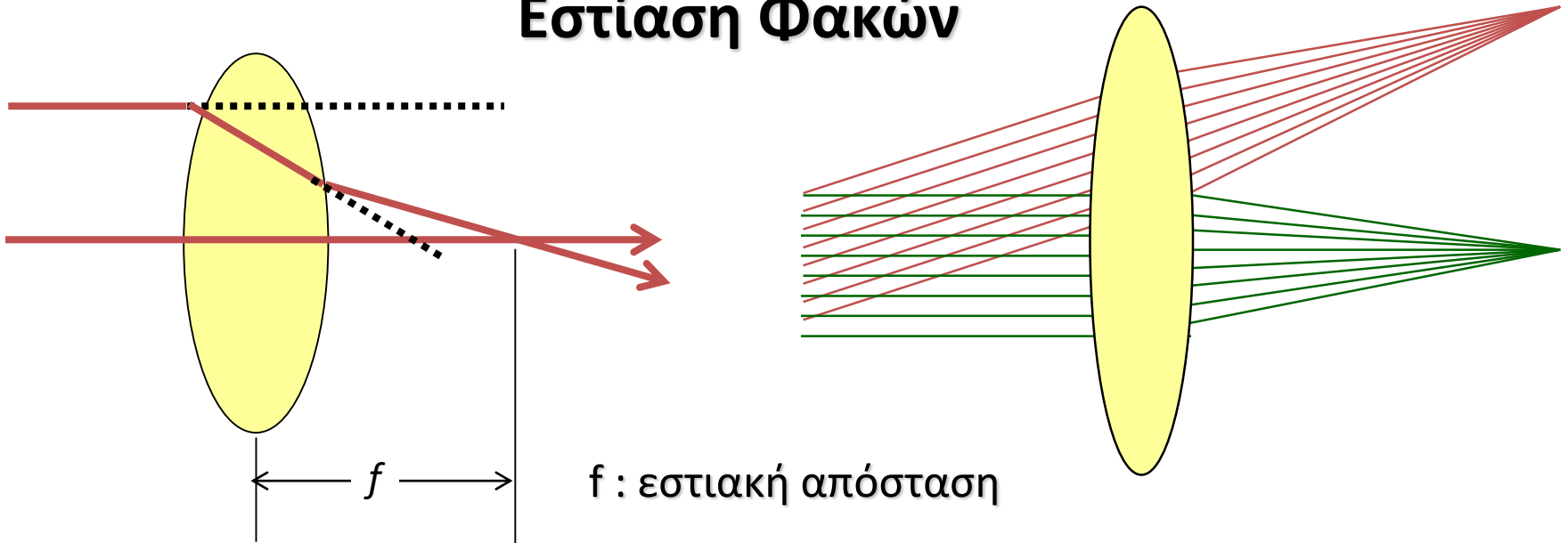
Να εξετάσετε αν αναλύεται πολυχρωματική ακτινοβολία κατά τη διέλευση της από οπτικό μέσο (γυαλί) παραλληλεπίπεδου σχήματος.

Να υπολογίσετε τη διαπερατότητα οπτικής κυψελίδας (όμοιας με αυτήν που χρησιμοποιείτε στην Άσκηση της φασματοσκοπίας οργανικών χρωστικών, όταν η κυψελίδα περιέχει μεθανόλη και όταν είναι κενή).

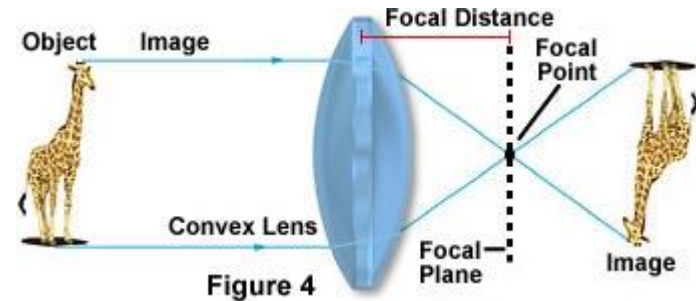
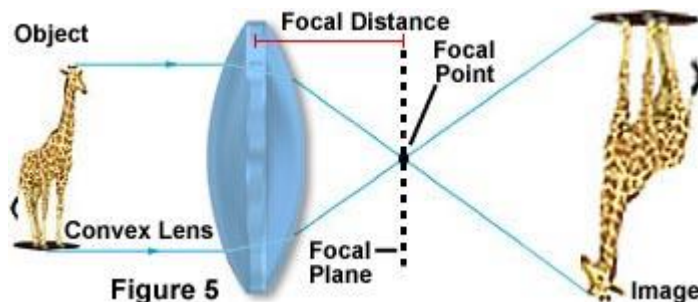
Διάθλαση του φωτός (Refraction)

Εφαρμογή στην οπτική : **Φακοί**

Εστίαση Φακών

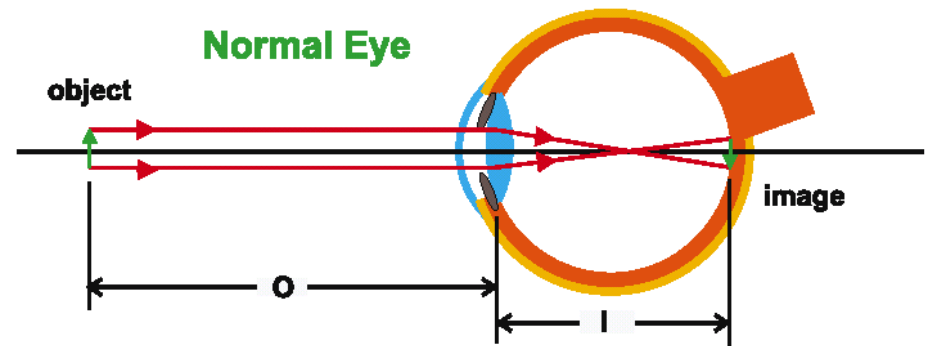


Οπτική απεικόνιση (σμίκρυνση, μεγέθυνση)

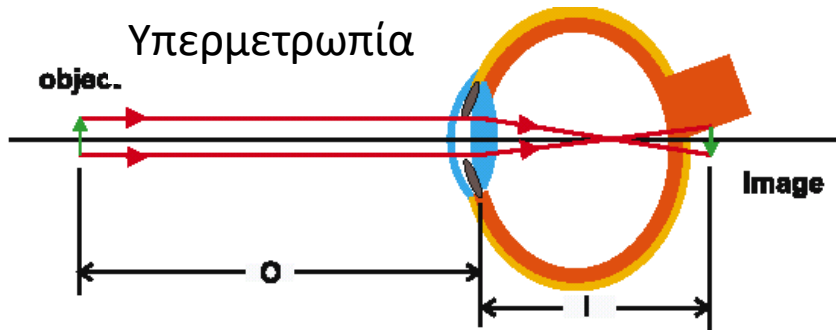


Η οπτική της όρασης

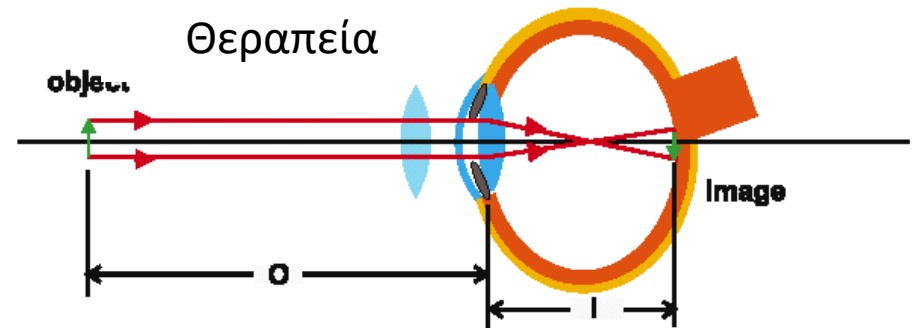
Normal Eye



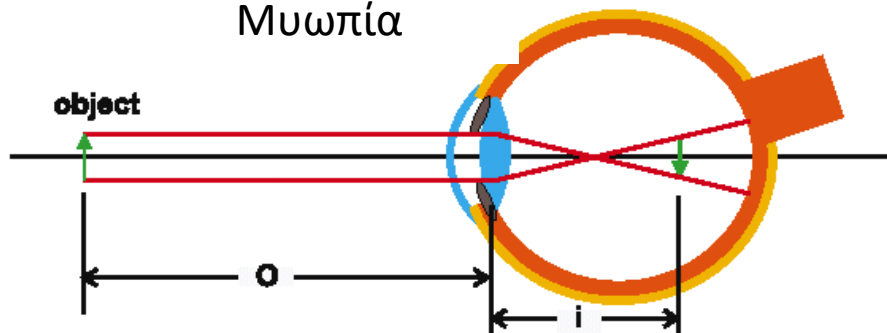
Υπερμετρωπία



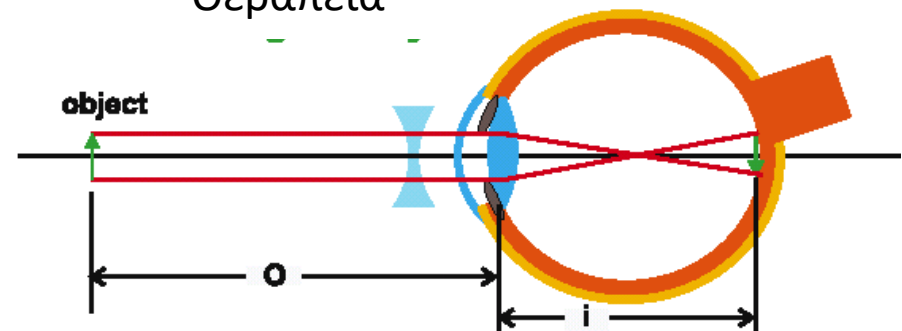
Θεραπεία



Μυωπία



Θεραπεία

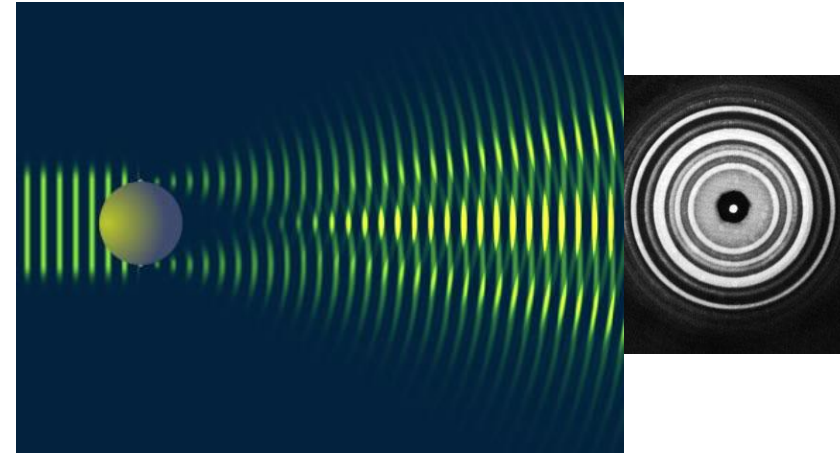


Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

- Το φως υπό ορισμένες συνθήκες (π.χ. διέλευση μέσω πολύ λεπτής σχισμής, εύρους d , παράκαμψη εμποδίου πολύ μικρών διαστάσεων, d) αποκλίνει από την ευθύγραμμη πορεία του.
- Αυτή η απόκλιση ονομάζεται περίθλαση του φωτός.

$d \gg \lambda \rightarrow \text{ευθύγραμμη διάδοση}$

$d \cong \lambda \rightarrow \text{περίθλαση}$



Δημιουργία μεγίστων και ελαχίστων περίθλασης λόγω συμβολής

Serway, Φυσική(III), Κεφ. 38

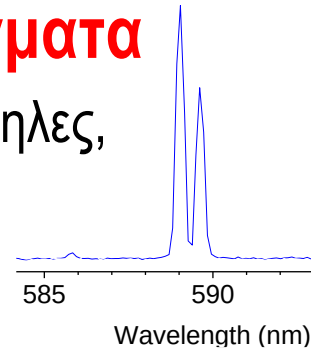
H.D. Young, Φυσική(B), Κεφ. 38

Διαλέξεις: Φυσική-II

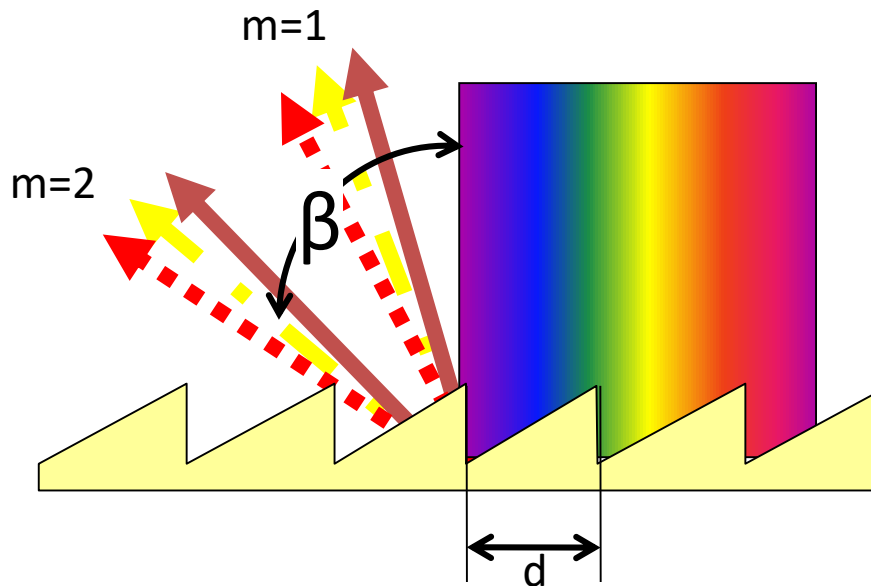
Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

Εφαρμογή στη φασματοσκοπία : Περιθλαστικά φράγματα

- Διαφανή ή ανακλαστικά οπτικά στοιχεία που φέρουν πολλές παράλληλες, ισαπέχουσες χαραγές πολύ μικρών διαστάσεων
- Σημαντικό μέγεθος : αριθμός χαραγών / ανά mm
- Απόσταση d : $1/\text{αριθμός χαραγών ανά mm}$
- Μέγιστο περίθλασης : $d \sin \beta = m\lambda \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$
- d η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών χαραγών
- 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 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$

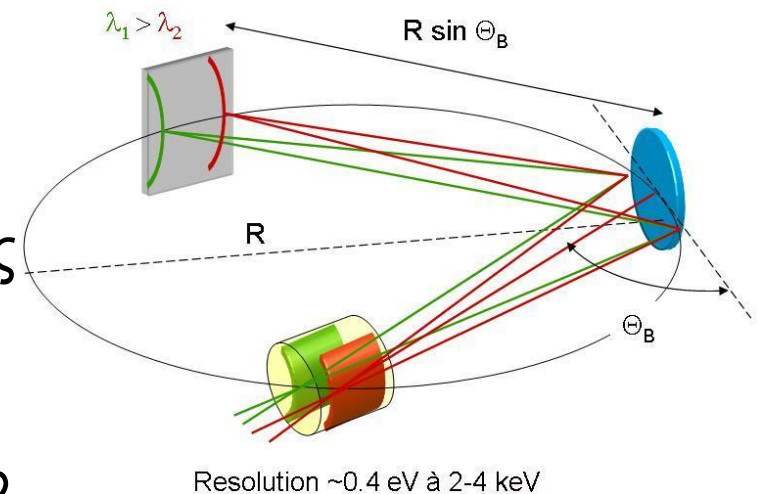
Τα φράγματα περίθλασης επιτυγχάνουν υψηλότερη διακριτική ικανότητα σε σχέση με τα πρίσματα

$R \sim Nm$ N : ο αριθμός των σχισμών που ακτινοβολούνται.

Περίθλαση του φωτός (Diffraction)

X-Ray Diffraction (XRD) – Bragg's Law

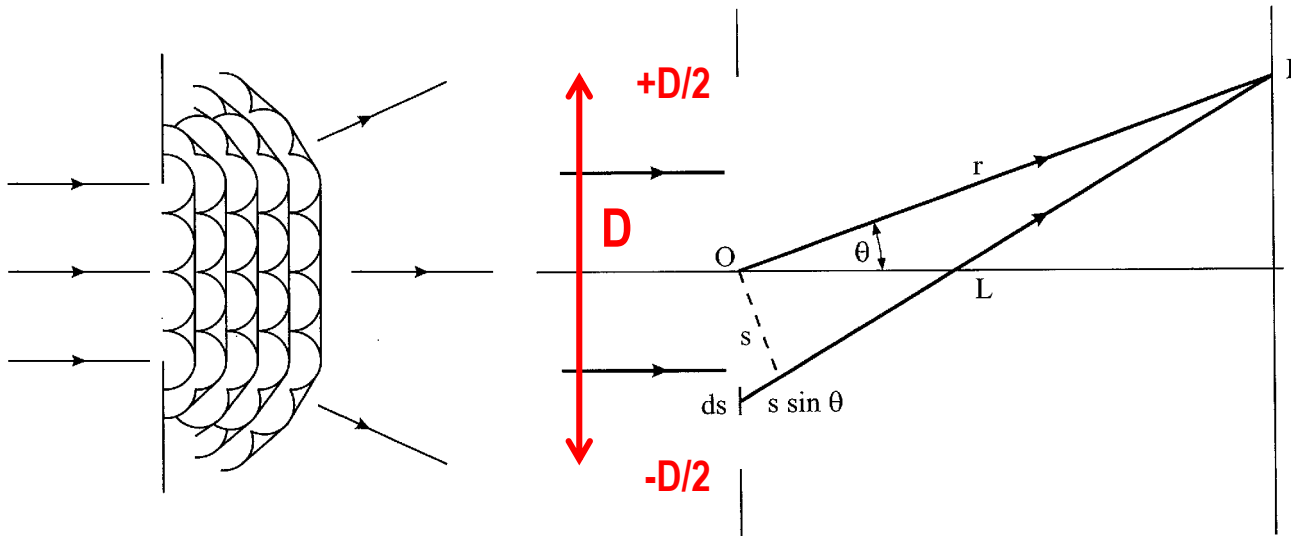
- Οι ακτίνες X έχουν μήκος κύματος της τάξεως των ενδοατομικών αποστάσεων σε κρυσταλλικά υλικά.
- Οι περιθλώμενες ακτίνες από ένα κρυσταλλικό υλικό συμβάλλουν παράγοντας ένα χαρακτηριστικό μοτίβο κροσσών συμβολής (diffraction pattern).
- Αυτή ήταν η παρατήρηση του Bragg το 1912.
- Ο νόμος του Bragg συνδέει:
 - Την απόσταση μεταξύ παρόμοιων ατομικών επιπέδων (d-spacing)
 - Την γωνία περίθλασης
 - Το μήκος κύματος των ακτίνων X.



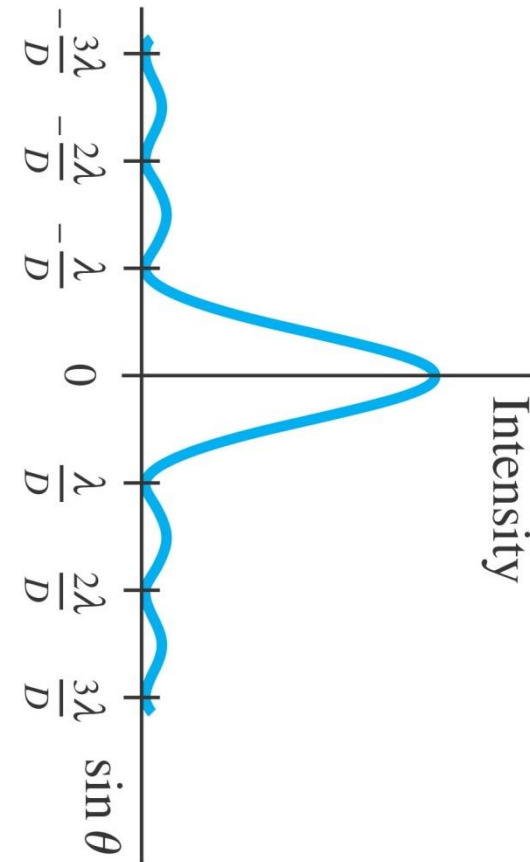
$$n \frac{hc}{E} = 2d \sin \Theta_{\text{Bragg}}$$

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

Περίθλαση από απλή σχισμή



Αρχή Huygens



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

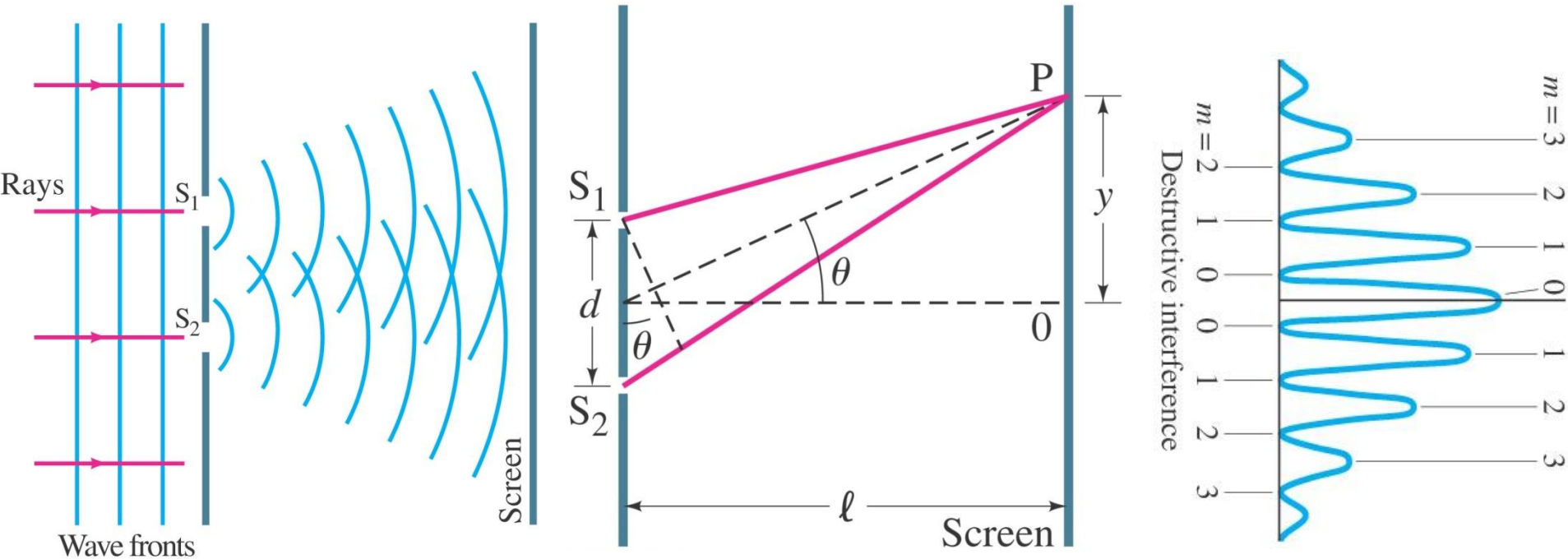
$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta$$

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

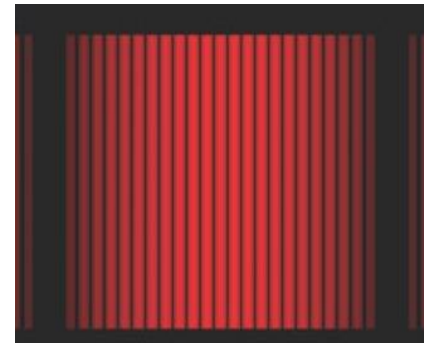
$$m\lambda = d \sin \theta$$

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

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)**

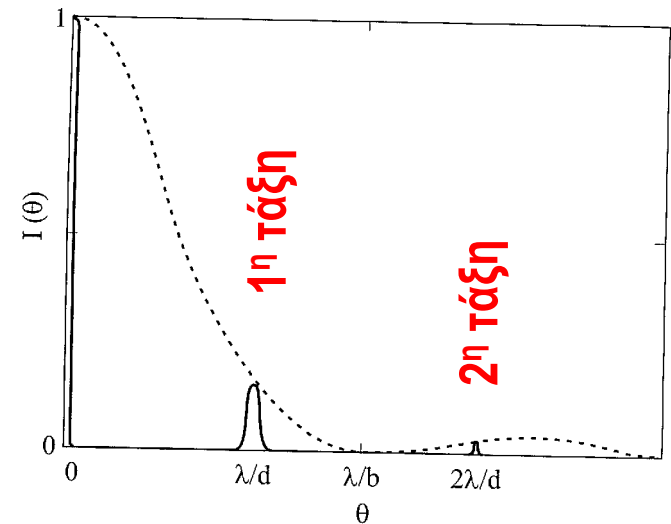
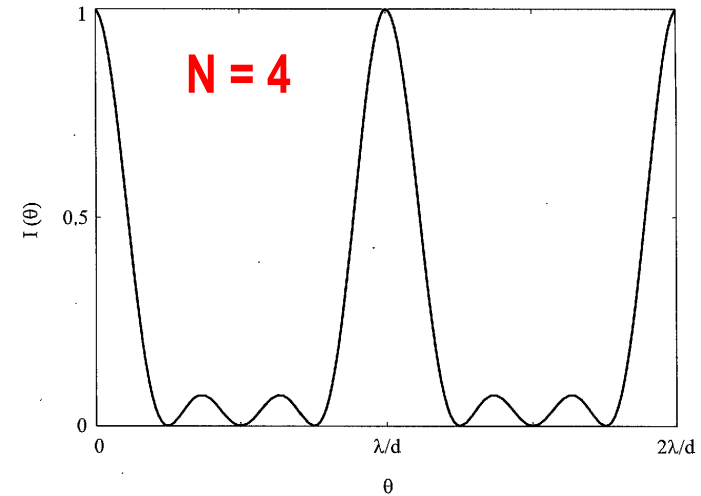
Λαμβάνοντας υπόψη και την περίθλαση από
καθεμιά σχισμή προκύπτει η συνολική εικόνα
για τη λειτουργία του φράγματος περίθλασης

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

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

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

Κροσσοί συμβολής



Άσκηση B17 : Φάσμα απορρόφησης χρωστικής

Αντικείμενο

Λήψη φασμάτων απορρόφησης (UV-Vis) οργανικών χρωστικών.

Ερμηνεία φασματικών χαρακτηριστικών με βάση το απλό μοντέλλο του σωματιδίου σε πηγάδι δυναμικού

Πειραματική διάταξη – Μετρήσεις

Φασματοφωτόμετρο απορρόφησης υπεριώδους-ορατού

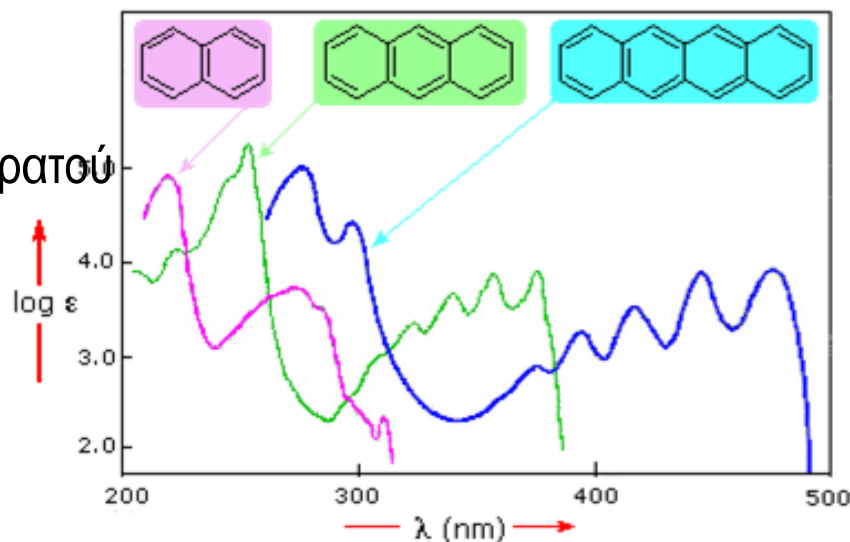
Καταγραφή φασμάτων απορρόφησης

Θεωρητικό υπόβαθρο

Μοριακή φασματοσκοπία

Ενεργειακά επίπεδα, Φωτοφυσικές διεργασίες (διέγερση, αποδιέγερση)

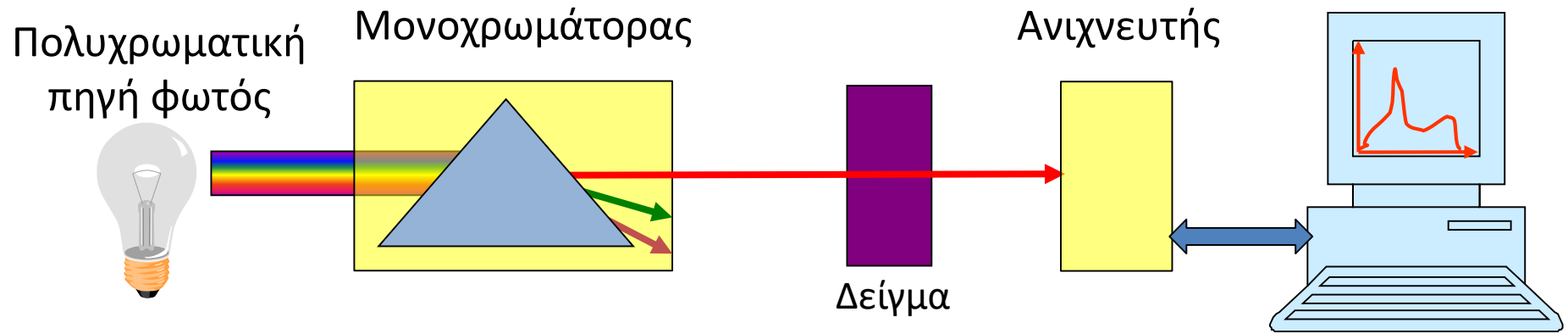
Κβαντομηχανικό μοντέλλο σωματιδίου σε πηγάδι δυναμικού



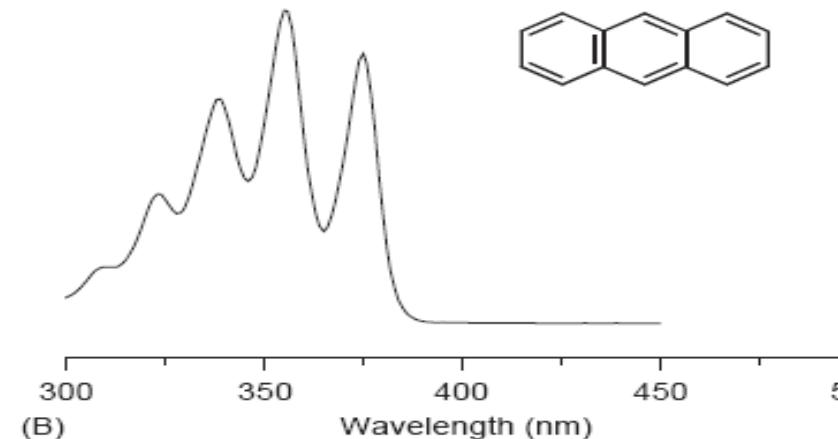
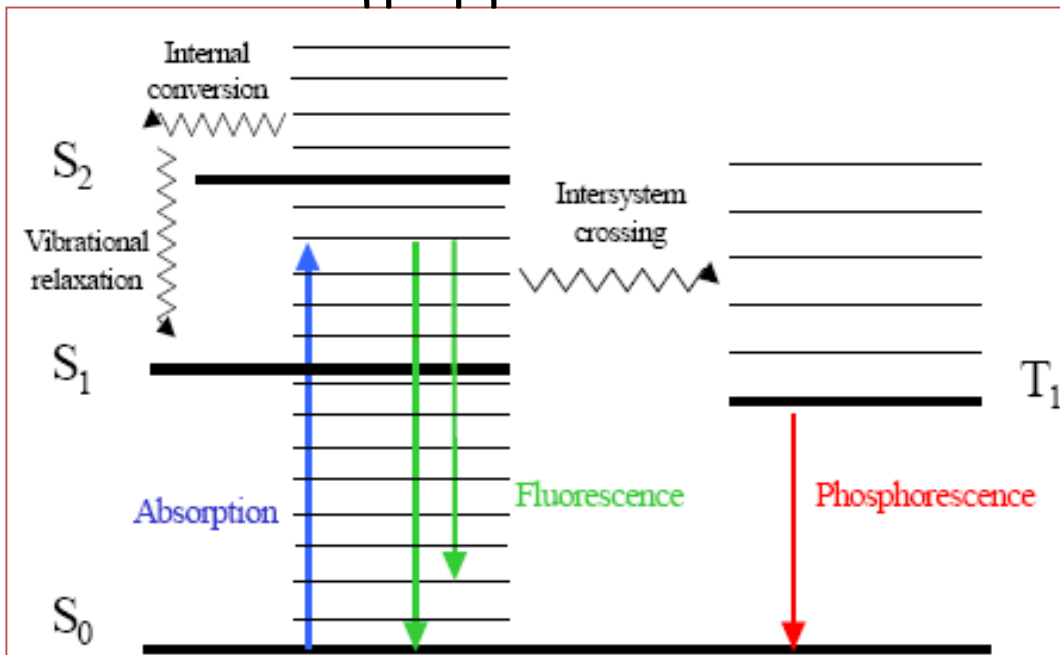
Βιβλιογραφία : AtΦΧ – Φυσικοχημεία (P.W. Atkins, J. de Paula, J. Keeler), Κεφ. 11A, ΣΤ, Ζ

Άσκηση B17 : Φάσμα απορρόφησης χρωστικής

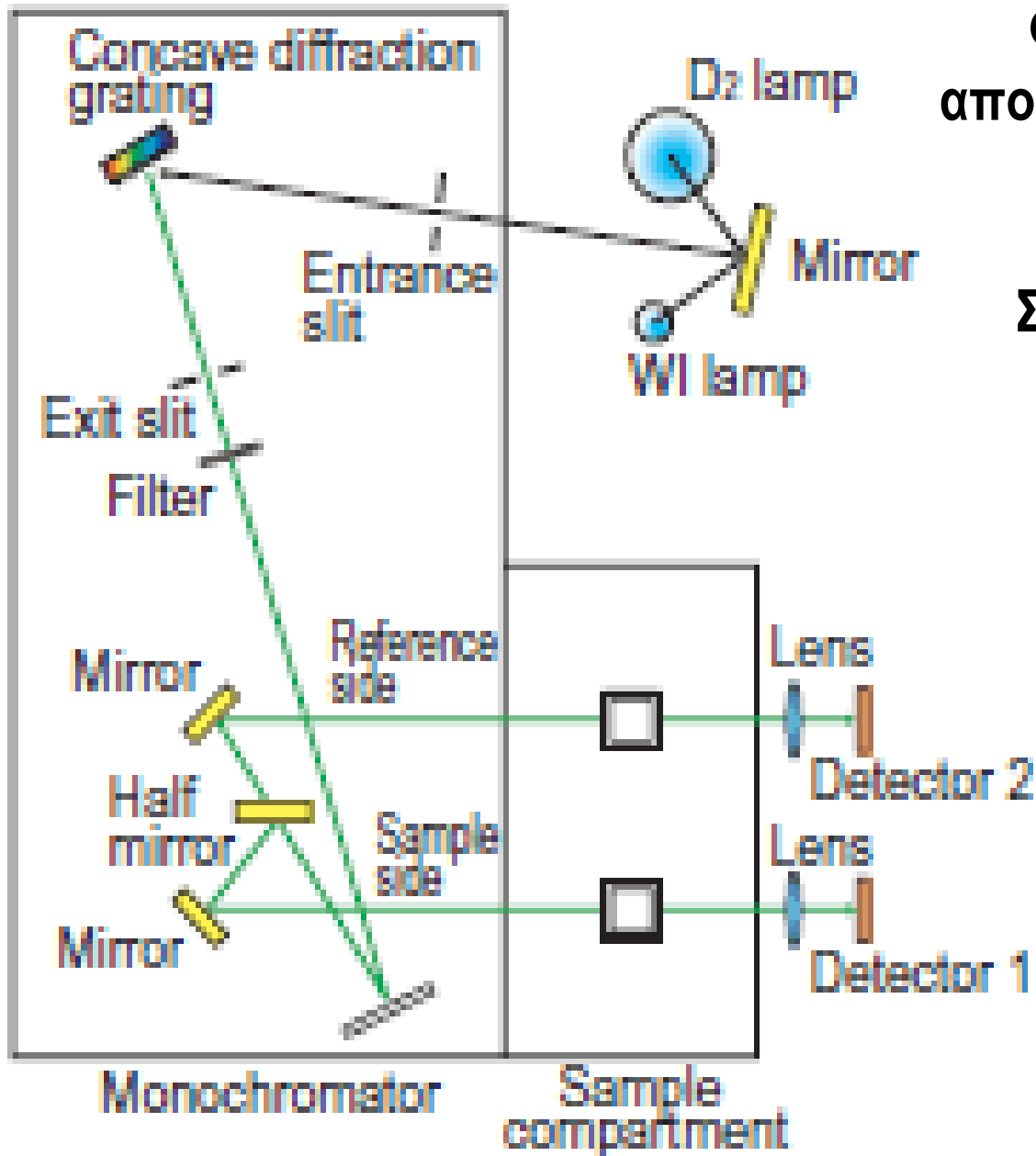
Καταγραφή φάσματος απορρόφησης διαλύματος χρωμοφόρου



Διάγραμμα Jablonski



Φασματοφωτόμετρο απορρόφησης UV-Vis

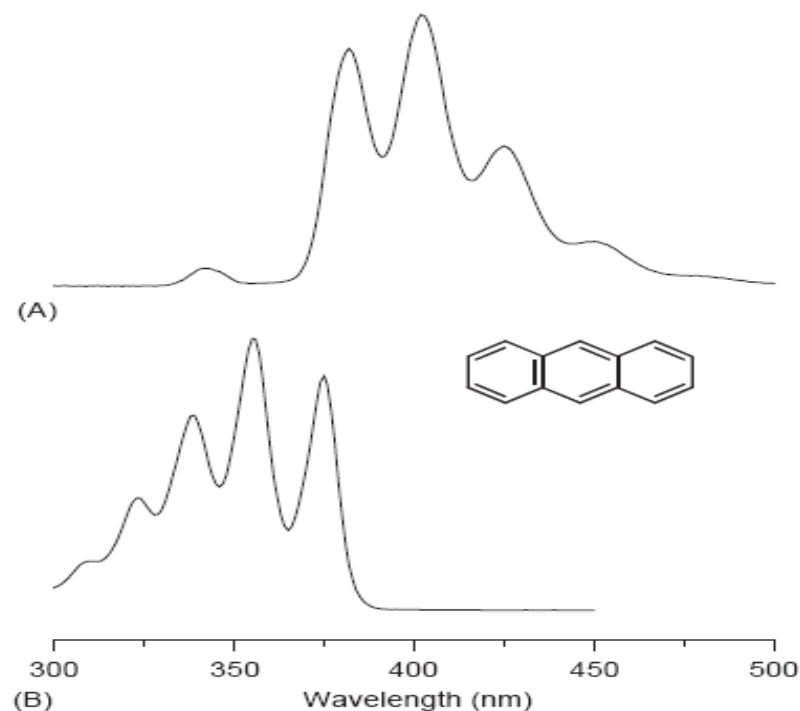
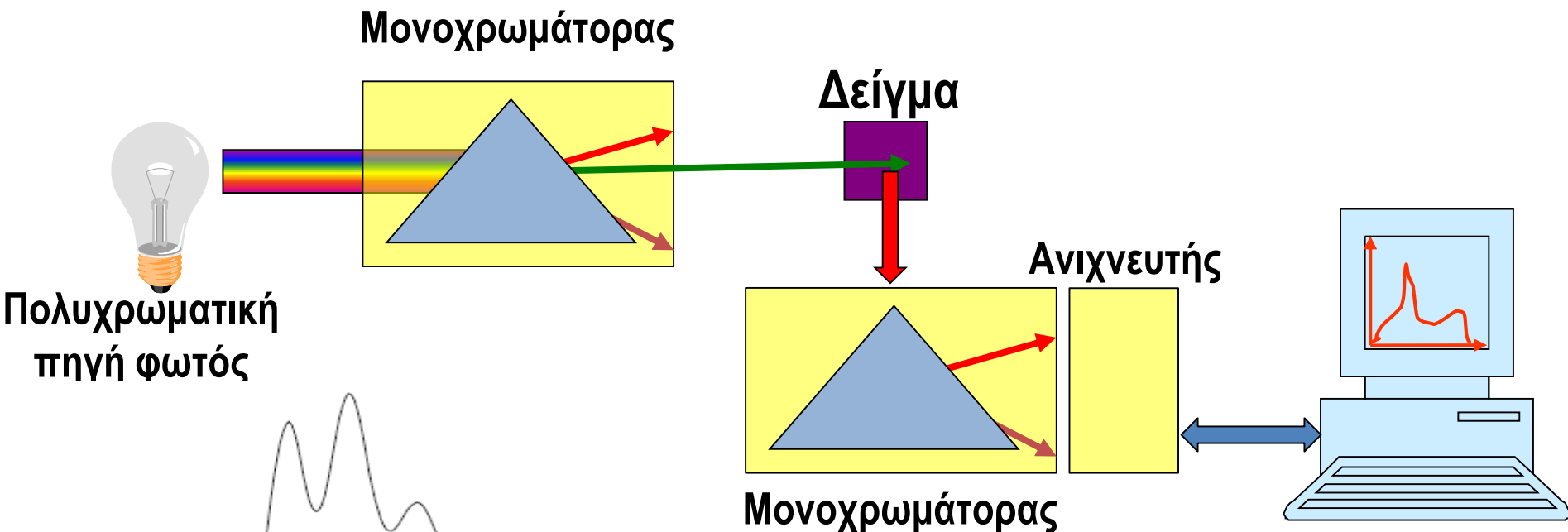


Φασματοφωτόμετρο
απορρόφησης υπεριώδους-
ορατού (UV-Vis).

Σχηματικό διάγραμμα

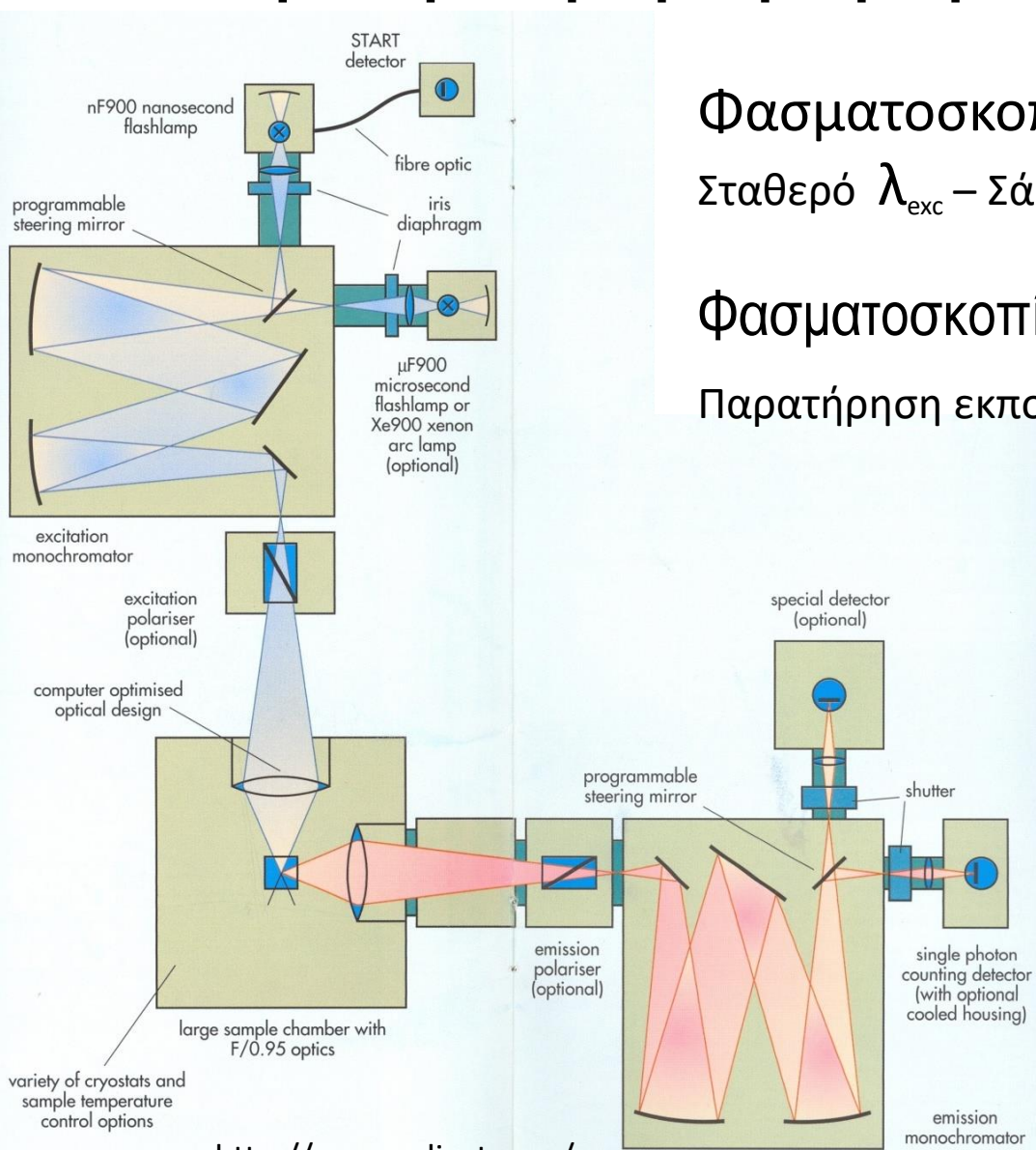
Άσκηση B17 : Φάσμα εκπομπής φθορισμού χρωστικής

Καταγραφή φάσματος εκπομπής φθορισμού διαλύματος χρωμοφόρου



Η καταγραφή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας φθορισμού πραγματοποιείται συνήθως υπό γωνία 90° ως προς τη διεγείρουσα διότι έτσι ελαχιστοποιείται η σκέδαση (Rayleigh).

Φασματοφωτόμετρο φθορισμού. Σχηματικό διάγραμμα



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

Φασματοσκοπία διέγερσης φθορισμού

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

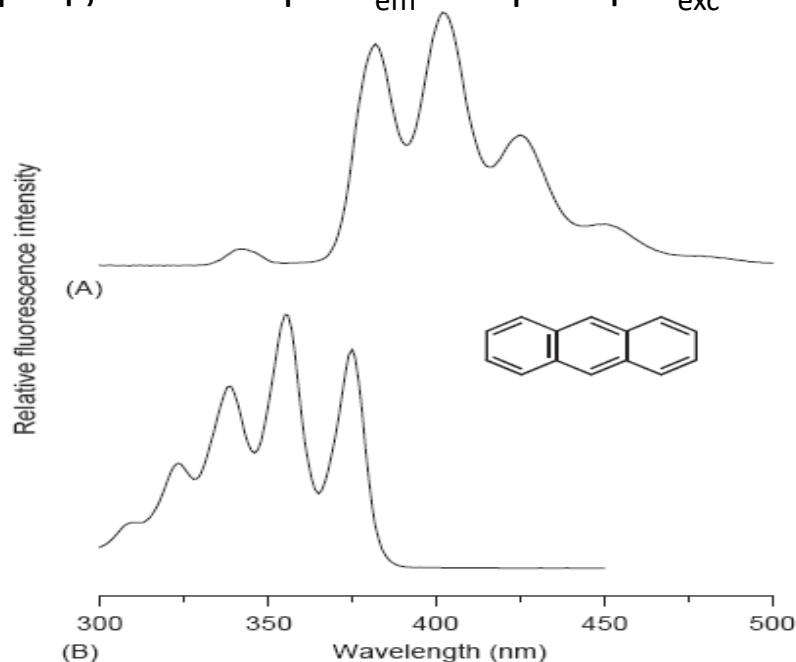
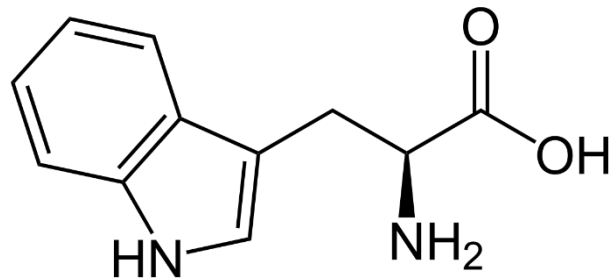
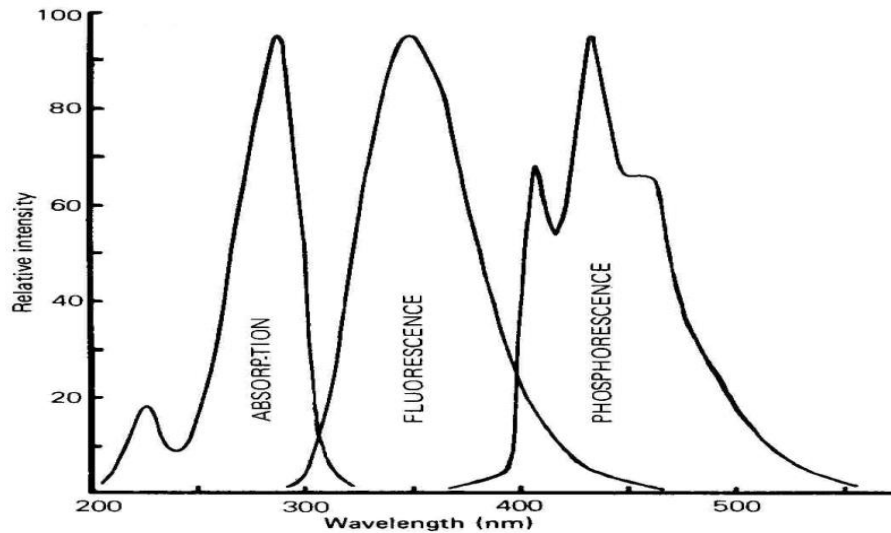


Figure 4 Fluorescence spectra of anthracene (1 $\mu\text{g ml}^{-1}$) in ethanol. The emission spectrum (A) was obtained with $\lambda_{\text{ex}} = 340 \text{ nm}$ and the excitation spectrum (B) was obtained with $\lambda_{\text{em}} = 379 \text{ nm}$.

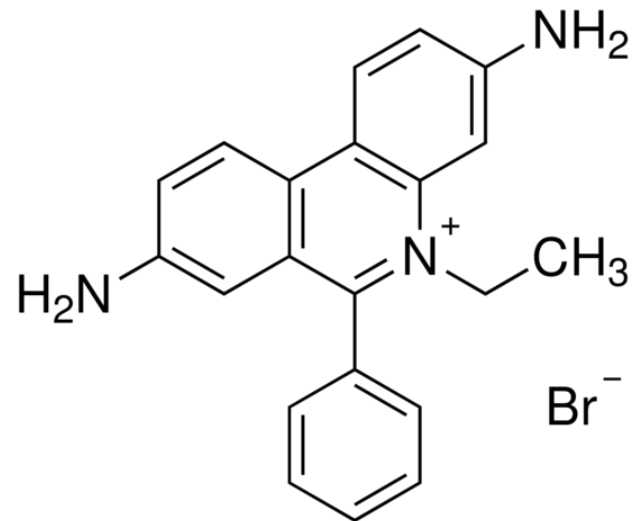
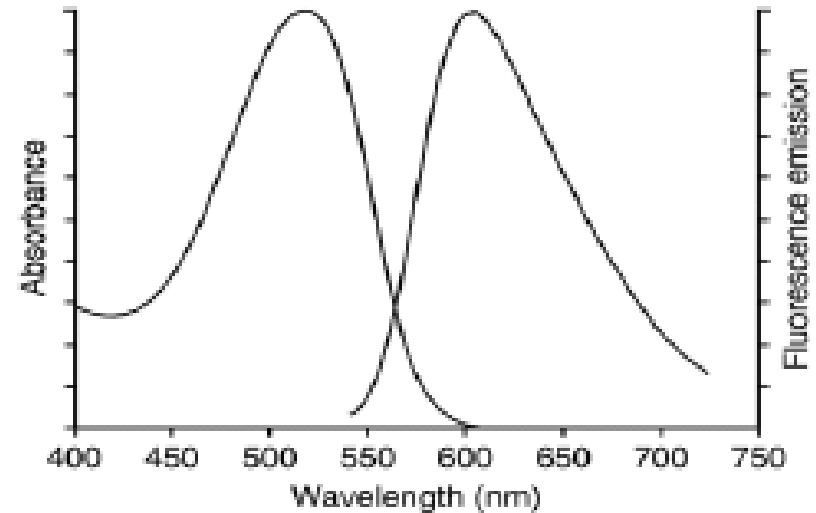
Απορρόφηση – Φθορισμός - Φωσφορισμός

Tryptophan (Trp)



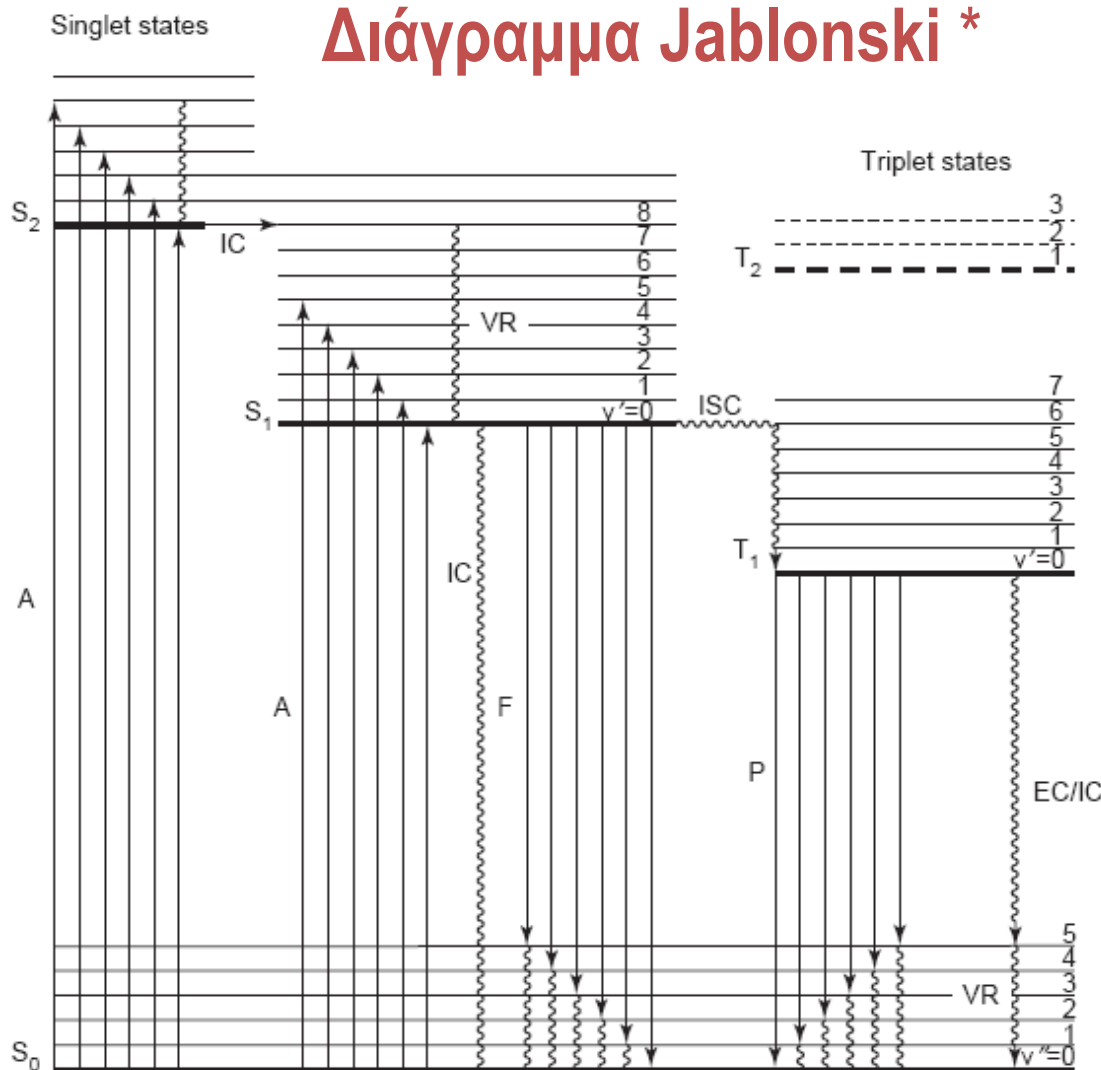
Η θέση (λ) και η υφή των φασματικών ταινιών απορρόφησης και εκπομπής σε πολυατομικά μόρια ερμηνεύεται ποιοτικά μέσω απλοποιημένων ενεργειακών διαγραμμάτων Jablonski και βασικών φωτοφυσικών διεργασιών.

Ethidium Bromide (DNA bound)



Ηλεκτρονική φασματοσκοπία πολυατομικών μορίων

Διάγραμμα Jablonski *



Βασικές φωτοφυσικές διεργασίες

A : Απορρόφηση (Διέγερση)

Ακτινοβολική αποδιέγερση
(Radiative processes)

F : Φθορισμός ($\Delta S = 0$)

P : Φωσφορισμός ($\Delta S \neq 0$)

Μη-ακτινοβολική αποδιέγερση
(Non-radiative processes)

VR : Δονητική χαλάρωση

IC : Εσωτερική μετατροπή

ISC: Δια-συστηματική
διασταύρωση

Φωτοχημεία

Διάσπαση δεσμών ή χημικές
αντιδράσεις μέσω διεγερμένων
καταστάσεων

* <https://fizyka.umk.pl/~lum98/aj.html>

Ηλεκτρονική φασματοσκοπία πολυατομικών μορίων

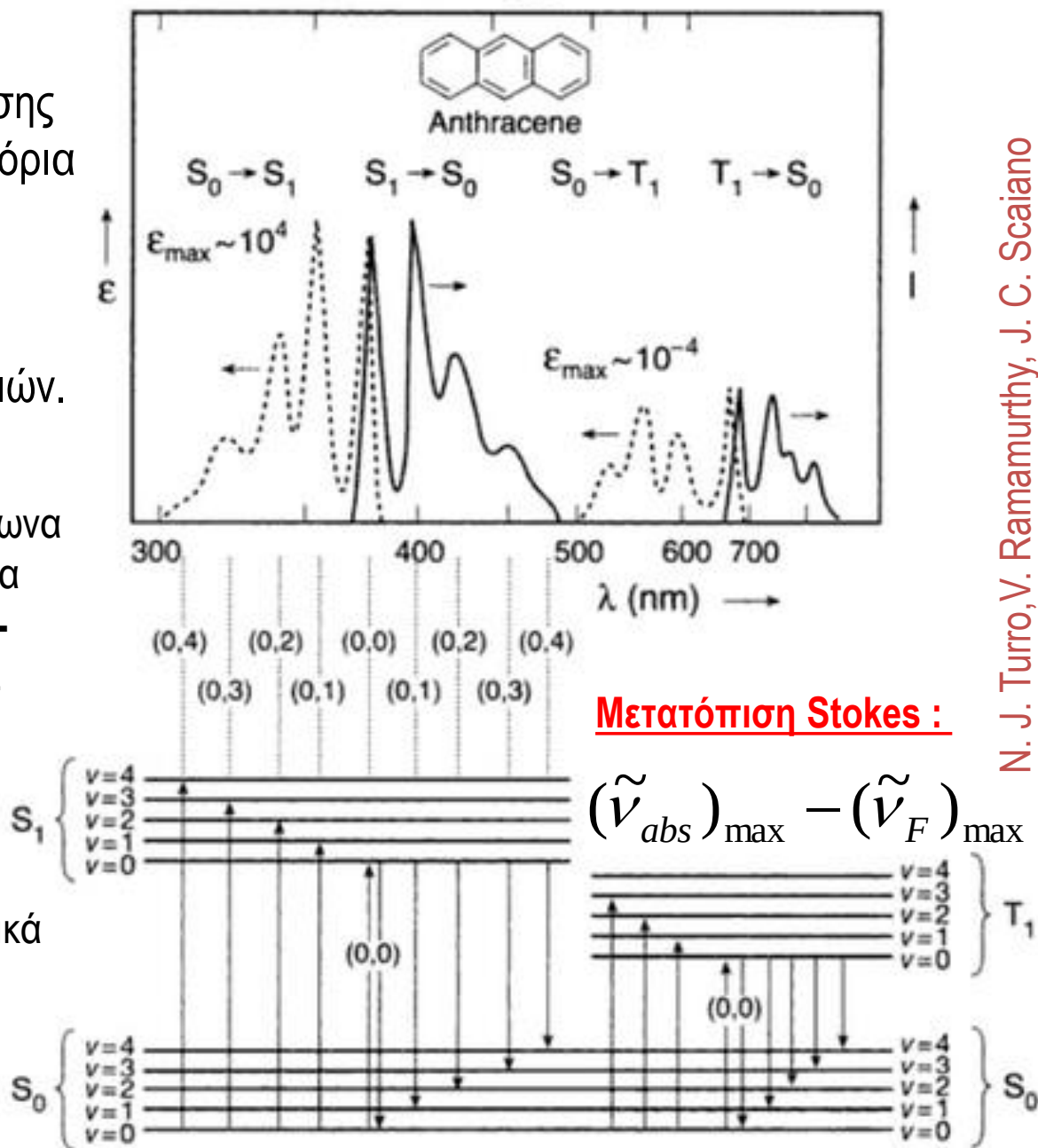
Η θέση (λ) και η υφή των φασματικών ταινιών απορρόφησης και εκπομπής σε πολυατομικά μόρια ερμηνεύεται ποιοτικά μέσω απλοποιημένων ενεργειακών διαγραμμάτων Jablonski και βασικών φωτοφυσικών διεργασιών.

Αρχή Franck-Condon

Ηλεκτροδονητικές μεταβάσεις σύμφωνα με τους κανόνες επιλογής (συμμετρία καταστάσεων) και την αρχή **Franck-Condon** (κατακόρυφες μεταβάσεις).

Κανόνας του Kasha

Σε διαλύματα οργανικών μορίων παρατηρείται εκπομπή φθορισμού μόνο από την χαμηλότερη ηλεκτρονικά διεγερμένη, μοναδιαία (singlet) κατάσταση και το χαμηλότερο ταλαντωτικό επίπεδο αυτής.



Οργανολογία Φασματοσκοπίας – Συμπληρωματικά στοιχεία

- Πηγές ακτινοβολίας (τύποι και χαρακτηριστικά αυτών)
- Μονοχρωμάτορες – Φασματογράφοι
- Ανιχνευτές

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

Βασικά χαρακτηριστικά :

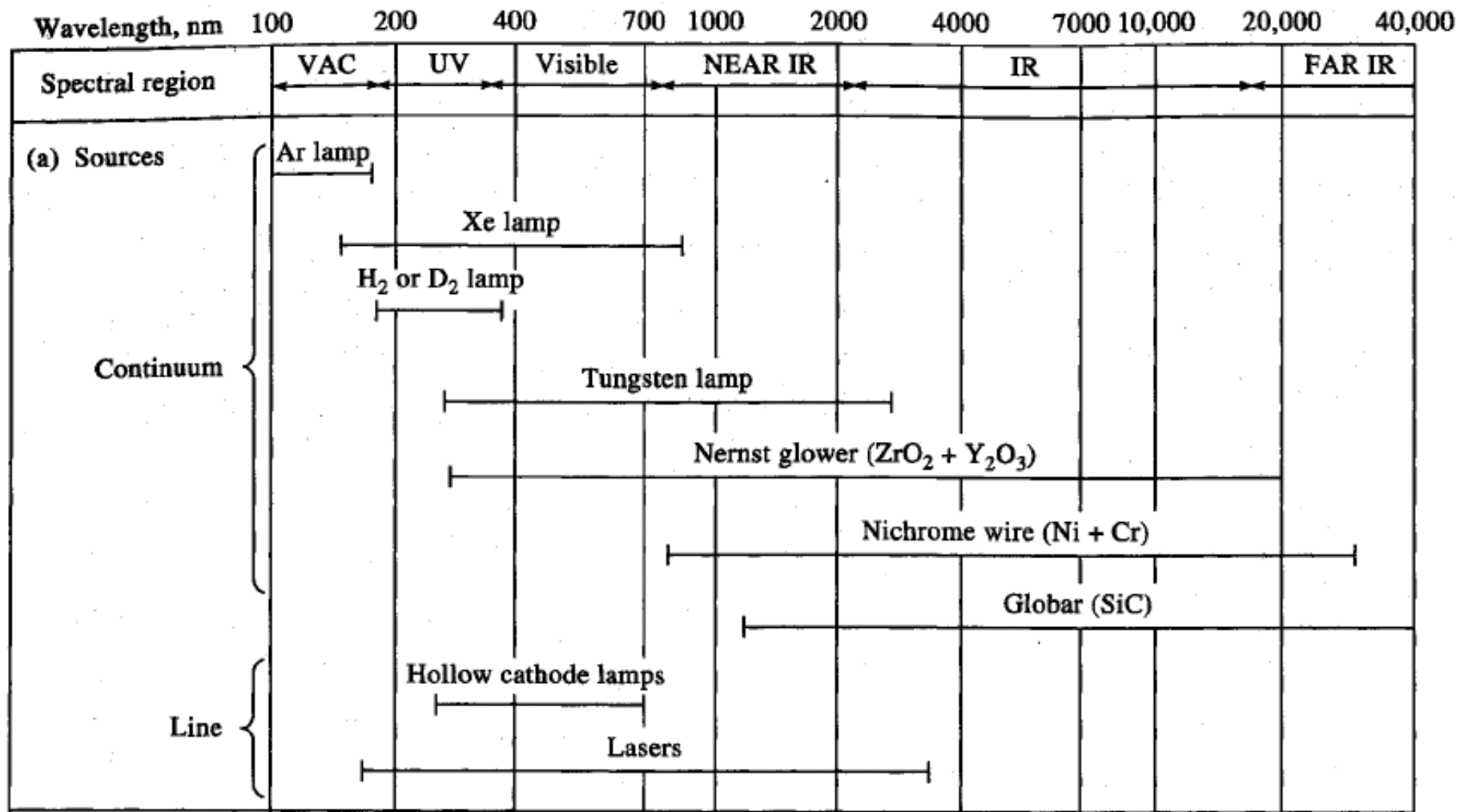
- Ένταση (λαμπρότητα)
- Σταθερότητα
- Φασματική κατανομή (UV, Vis, IR) ή μονοχρωματικότητα (λείζερ)

$$I = I(\lambda)$$

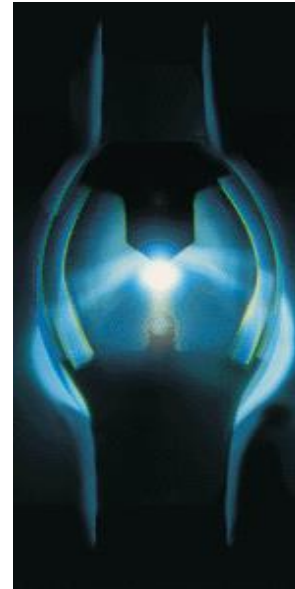
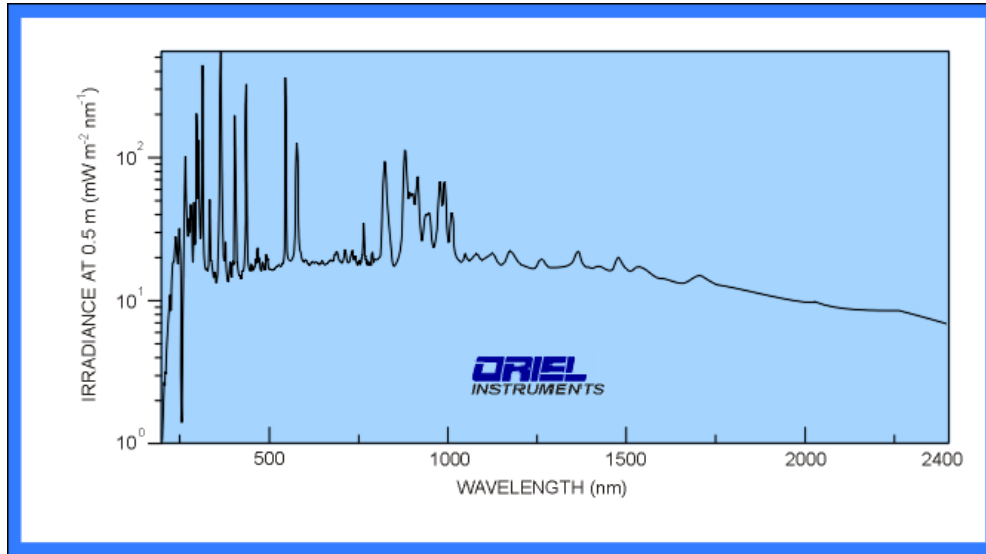
Είδη λυχνιών

- **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)

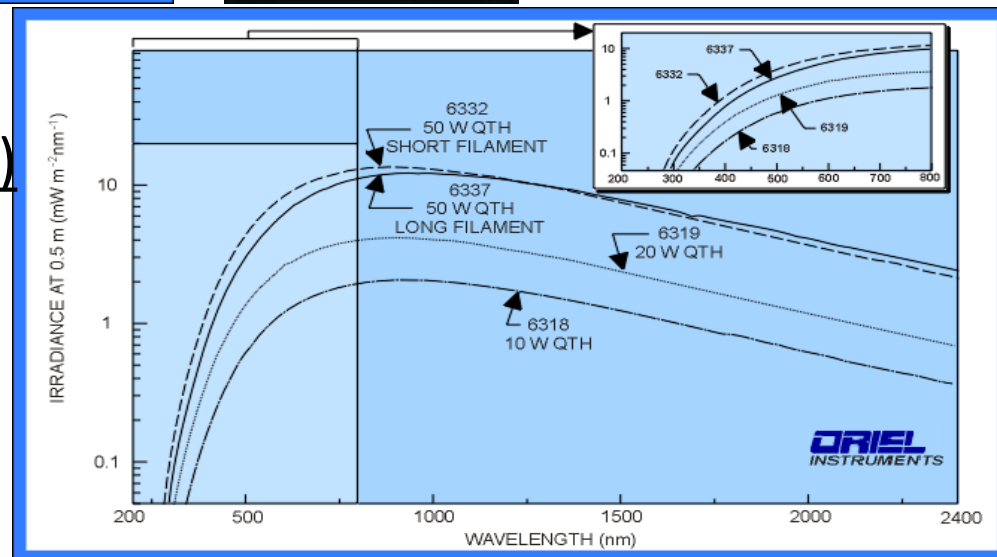
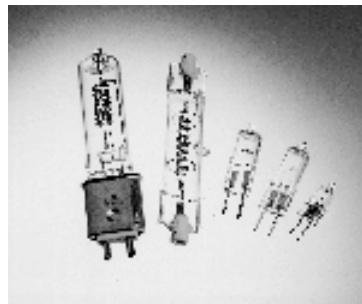
Τύποι λυχνιών και φασματική περιοχή λειτουργίας τους



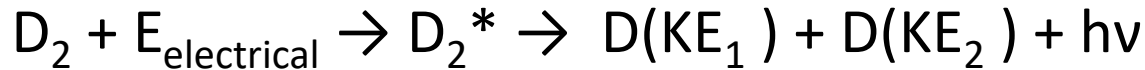
Λυχνία Τόξου Xe (Xe arc lamp)



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



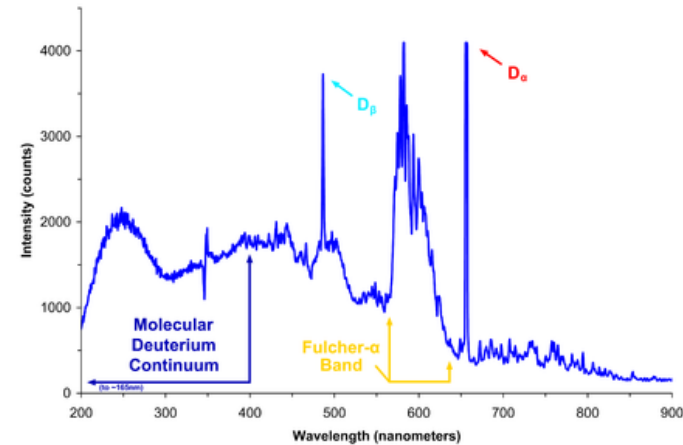
Λυχνία Δευτερίου (D_2)



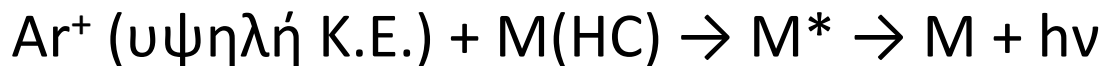
$$KE_1 + KE_2 + h\nu = E_{\text{electrical}} - E\Delta(D_0)$$

$E\Delta$: ενέργεια διάσπασης δεσμού

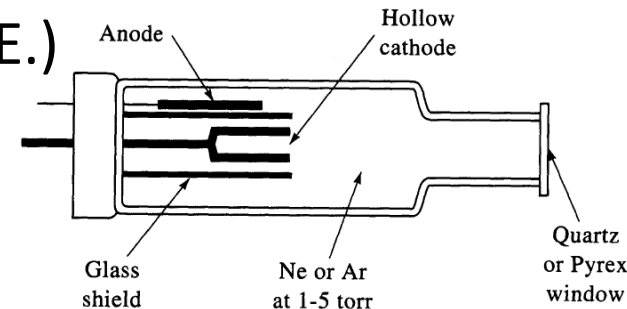
http://en.wikipedia.org/wiki/Deuterium_arc_lamp



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**.

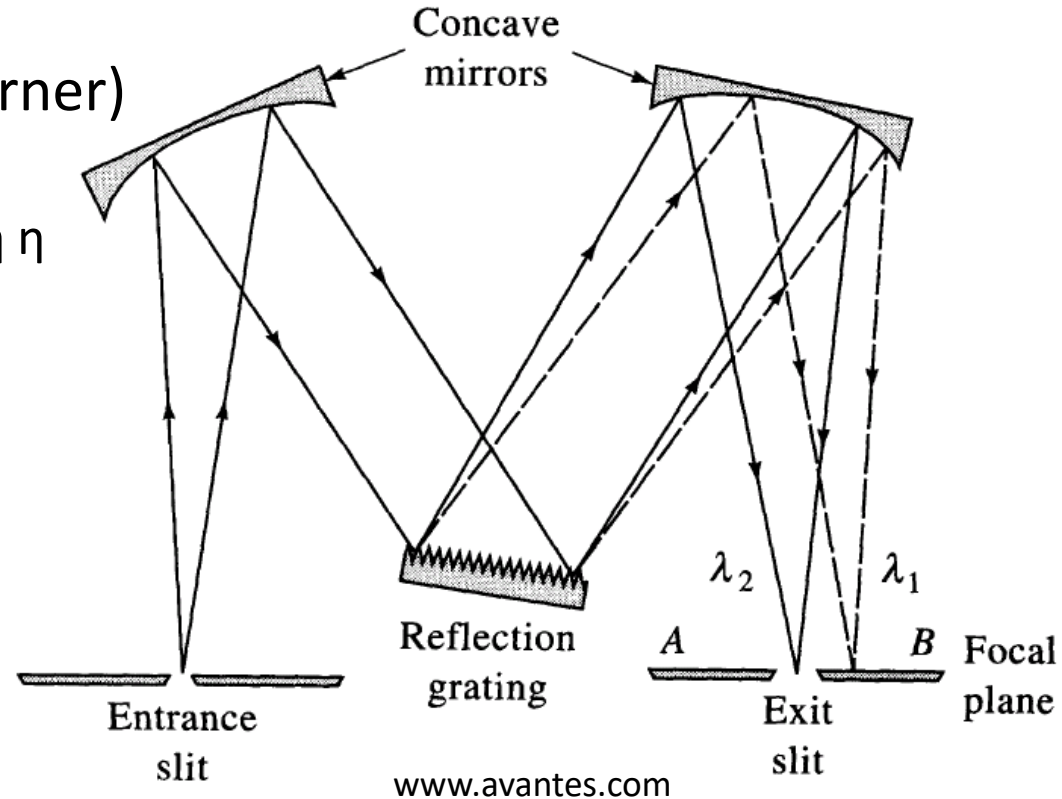
Σε ειδικές περιπτώσεις με χαμηλές απαιτήσεις σε φασματική ανάλυσης χρησιμοποιούνται **ΟΠΤΙΚΑ ΦΙΛΤΡΑ** (αποκοπής (long-/short-pass), ή διελεύσεως ζώνης (band-pass)).

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

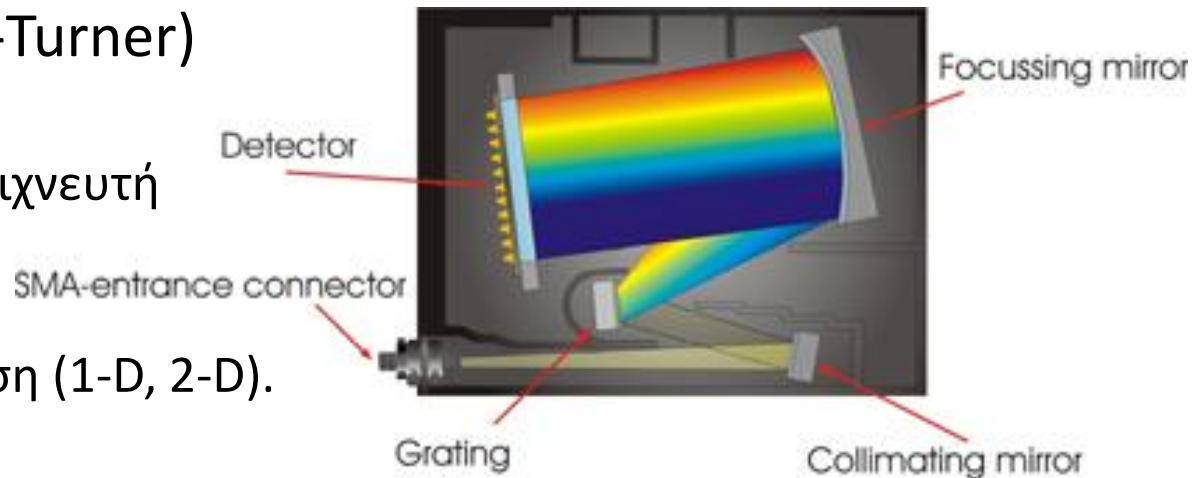
Μονοχρωμάτορας (Czerny-Turner)

Το φάσμα καταγράφεται μέ 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).



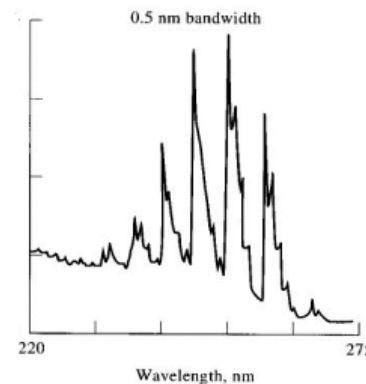
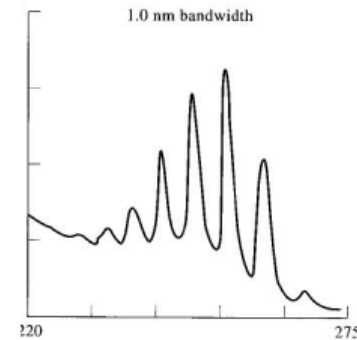
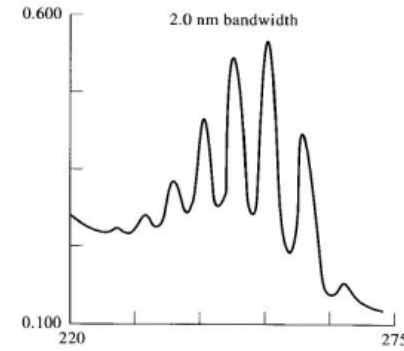
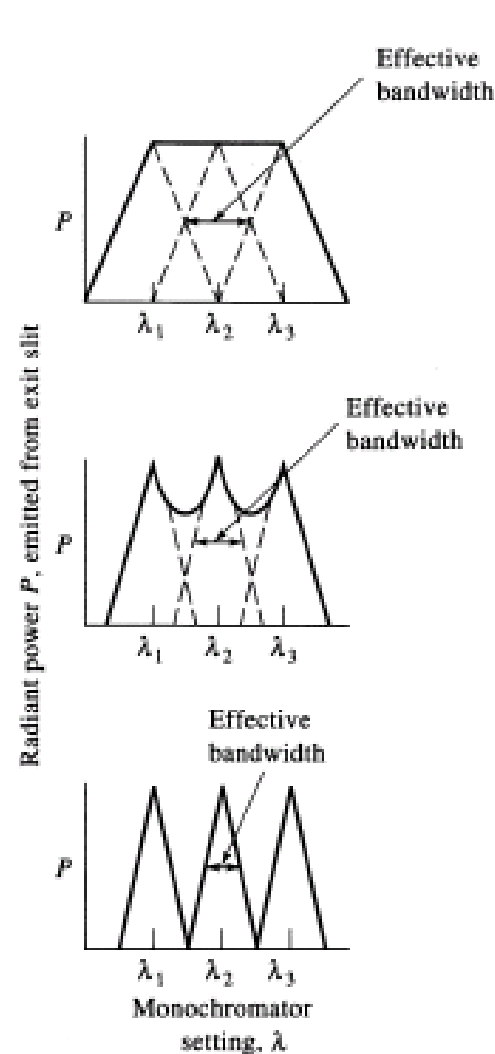
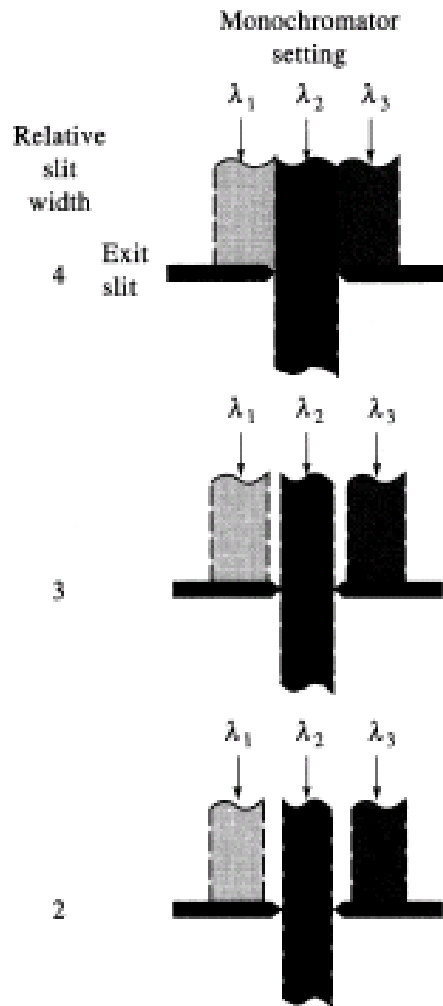
Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

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

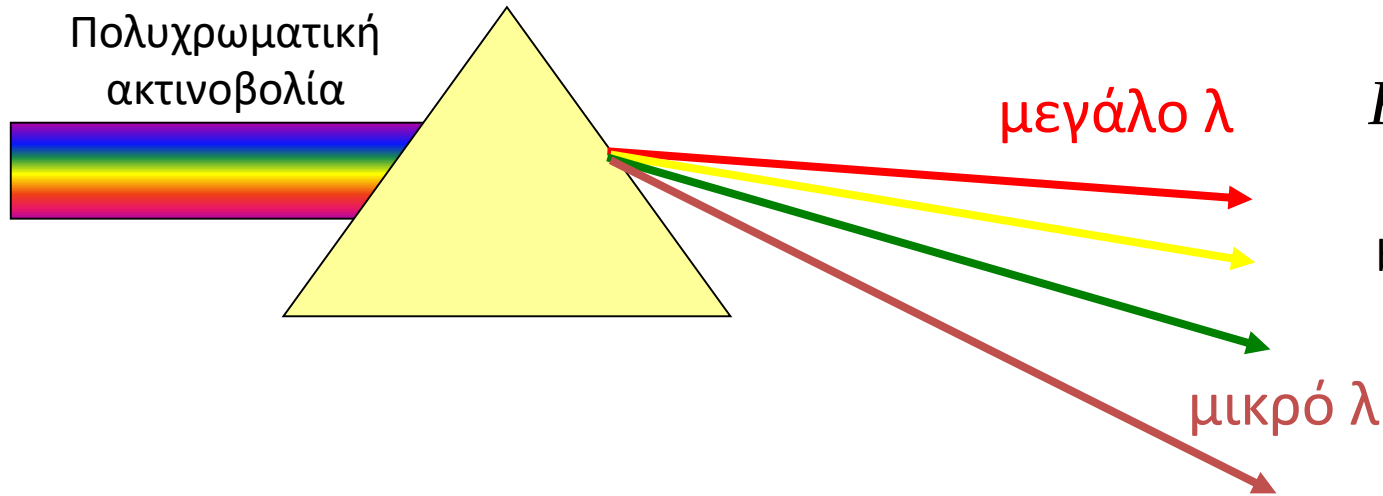
Επίδραση εύρους σχισμής μονοχρώματα στη διακριτική ικανότητα (spectral resolution, R)



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

Μονοχρωμάτορες - Φασματογράφοι

Διακριτική ικανότητα πρίσματος (spectral resolution, R)



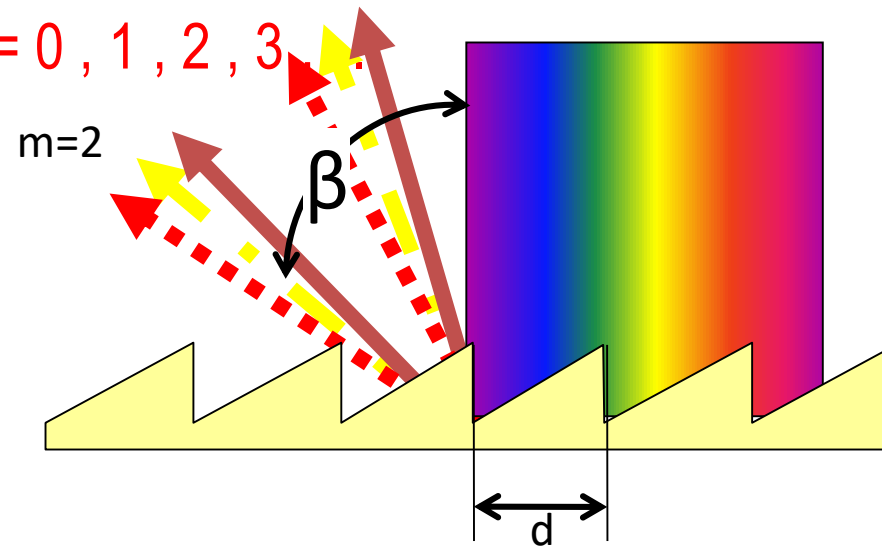
$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = b \left| \frac{dn}{d\lambda} \right|$$

b : βάση του πρίσματος

Διακριτική ικανότητα περιθλαστικού φράγματος _{$m \neq 1$}

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

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



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

Βασικά χαρακτηριστικά :

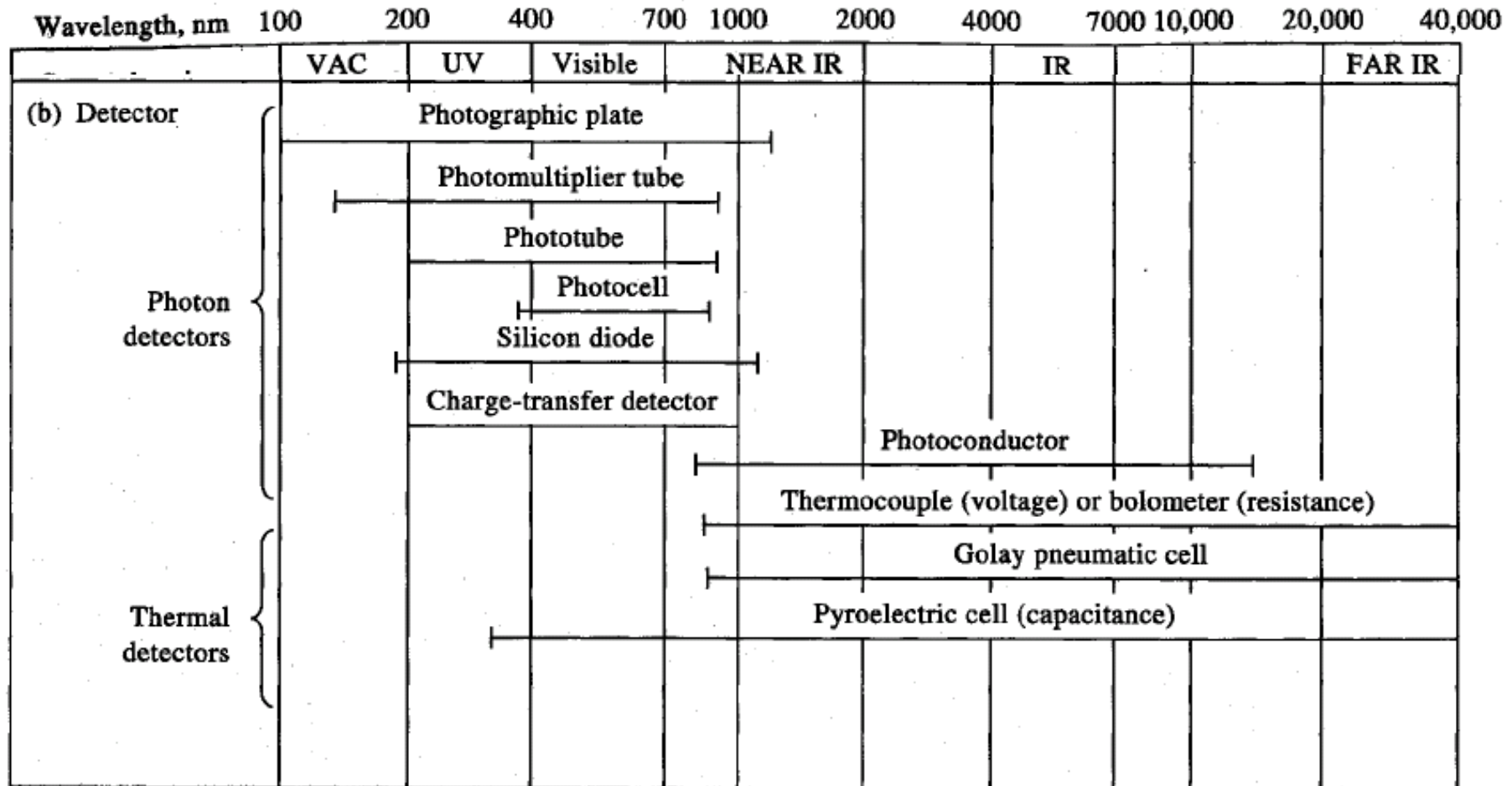
- Ευαισθησία και χαμηλός θόρυβος
- Απόκριση σε ευρεία περιοχή μηκών κύματος
- Γραμμική απόκριση ($S = k \cdot I$, σήμα ανάλογο της έντασης))
- Χαμηλή τιμή «σκοτεινού» σήματος (dark counts) ($S = k \cdot I + k_d$)

Είδη ανιχνευτών

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

Θερμοστοιχεία, Βολόμετρα, Πυροηλεκτρικά

Τύποι ανιχνευτών και φασματική περιοχή ευαισθησίας τους

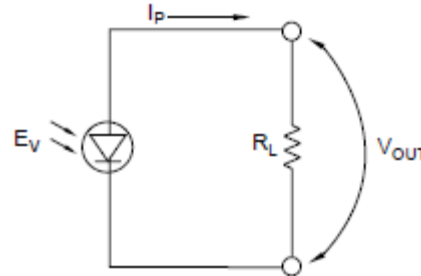
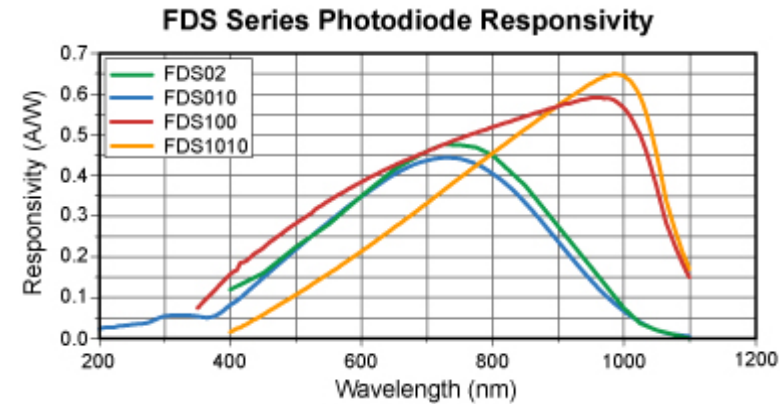


Φωτοδίοδος

Παραγωγή (φωτο)ρεύματος
σε ημιαγωγό

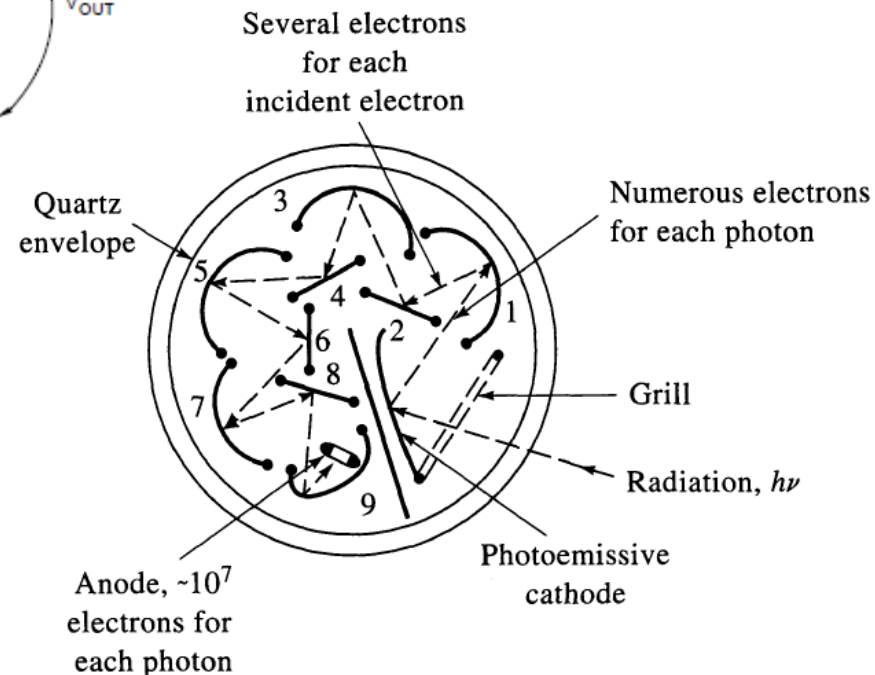
Si : UV-Vis-NIR

Ge, InGaAs, GaP : NIR



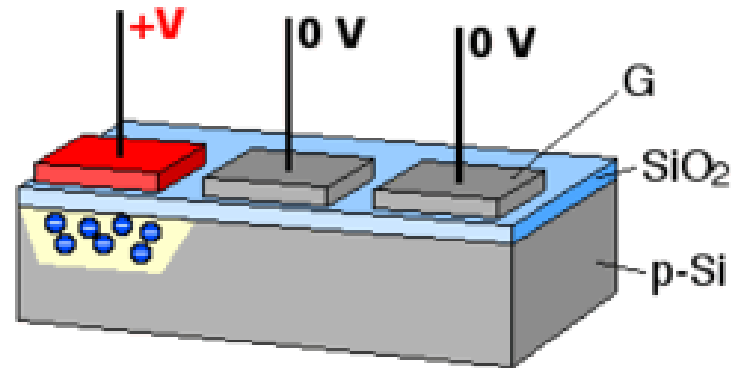
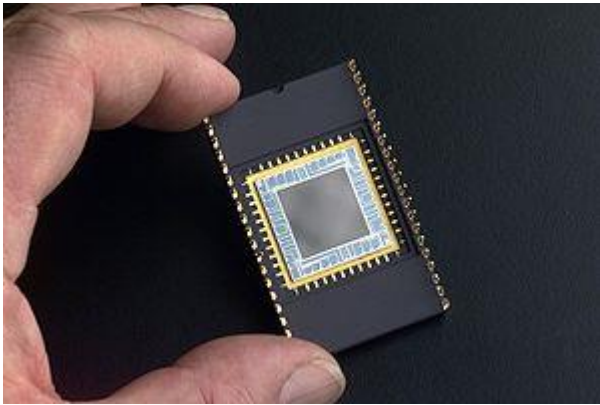
Φωτοπολλαπλασιαστής (PMT)

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 $q(\tau) = K\phi_\lambda n_\lambda(\tau)$

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