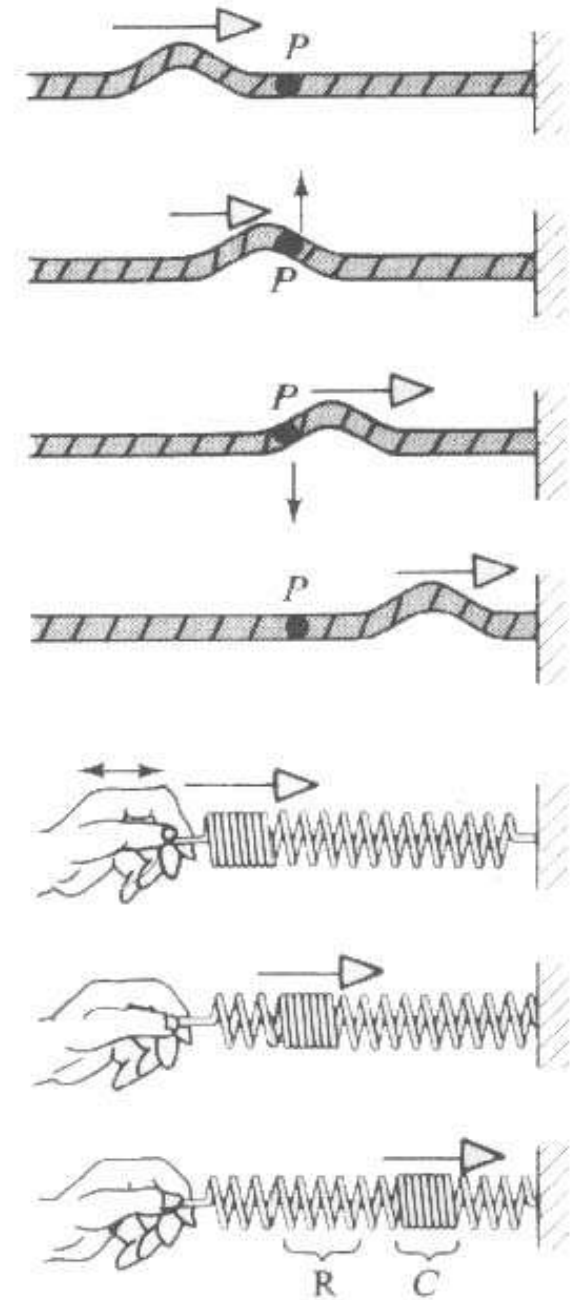


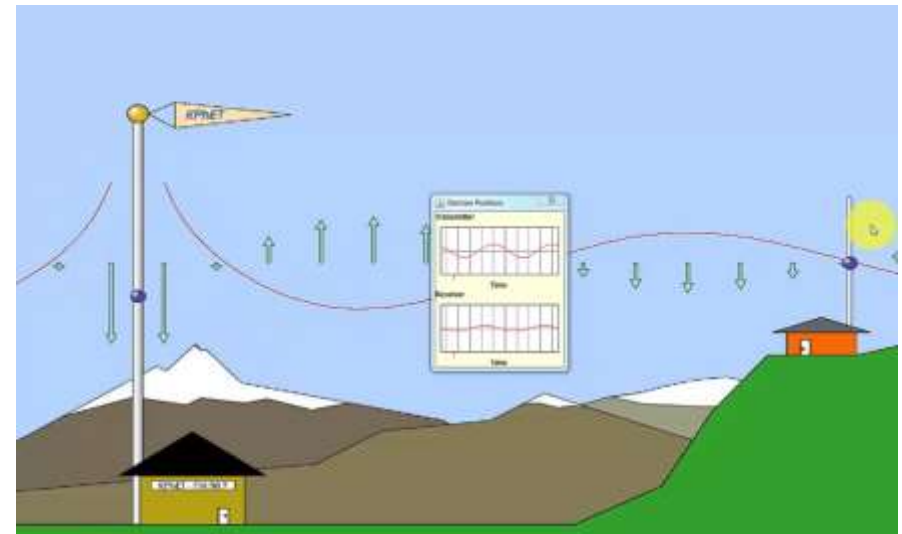
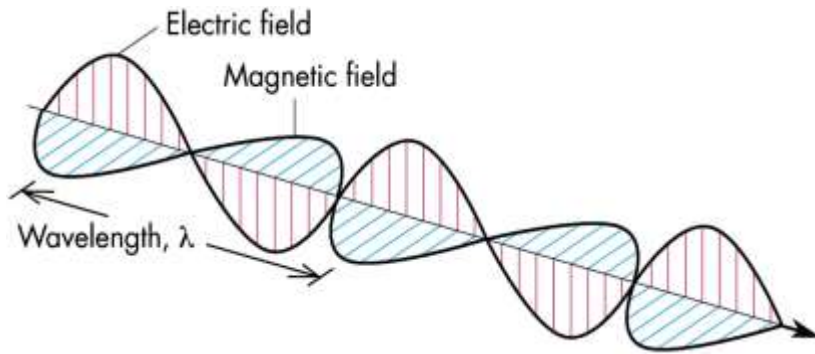
# ΕΙΔΗ ΚΥΜΑΤΩΝ

Τα οδεύοντα κύματα στα οποία η διαταραχή της μεταβλητής ποσότητας (πίεση, στάθμη, πεδίο κλπ) συμβαίνει **κάθετα** προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος ονομάζονται **εγκάρσια** κύματα

Αντίθετα, τα οδεύοντα κύματα στα οποία η διαταραχή της μεταβλητής ποσότητας συμβαίνει **παράλληλα** προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος ονομάζονται **διαμήκη** κύματα

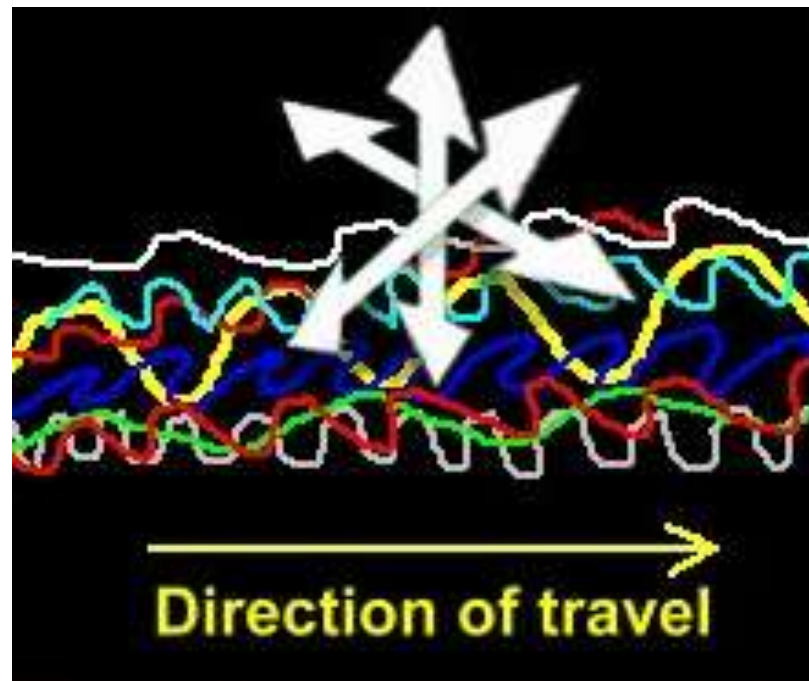


# Ημιτονοειδές επίπεδο Η/Μ κύμα

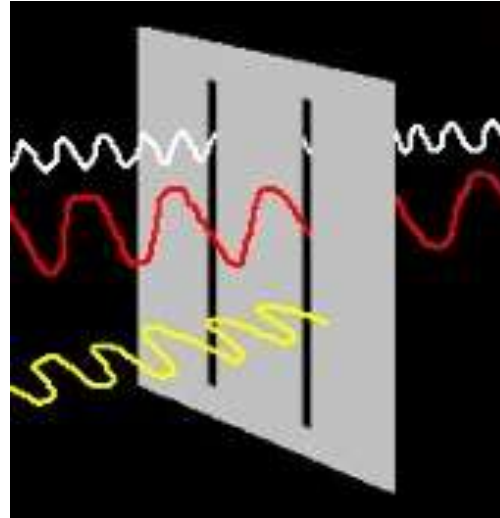
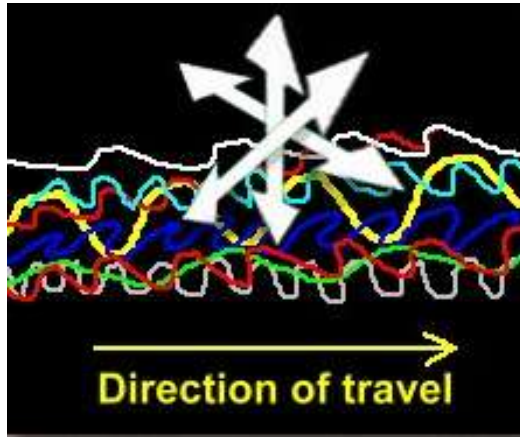


# Σύνηθες ορατό φως:

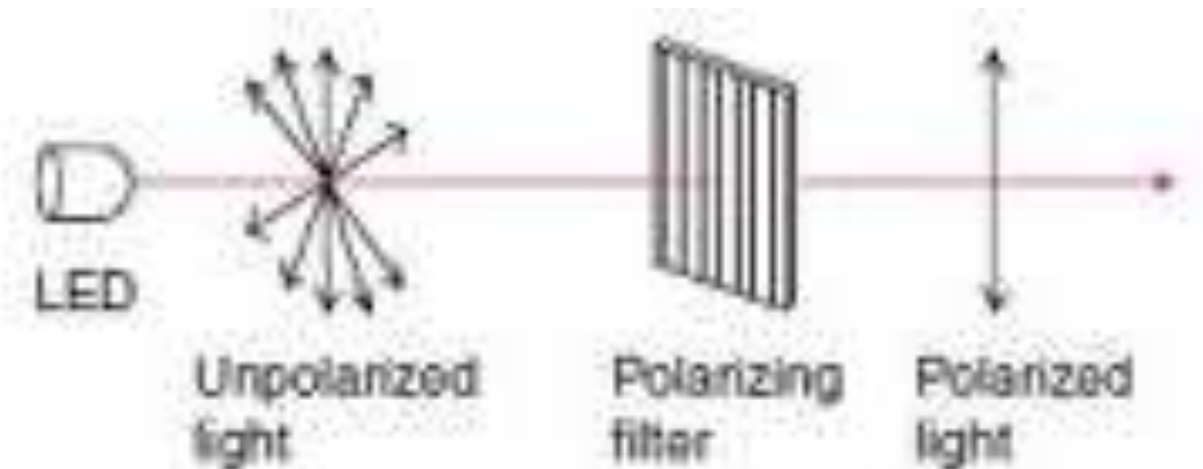
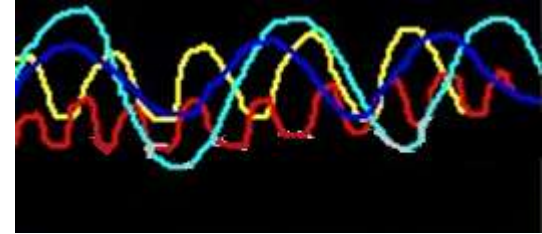
Το ηλιακό φως, το φως από μια φλόγα ή από έναν λαμπτήρα πυράκτωσης ή φθορισμού προέρχεται από μια πληθώρα ανεξαρτήτων ατόμων ή μορίων και των κινήσεων που αυτά εκτελούν, και έτσι δεν εμφανίζει συγκεκριμένη διεύθυνση πόλωσης. Αυτό το φως ονομάζεται **μη πολωμένο**, και αυτό σημαίνει ότι η υπέρθεση όλων των διανυσμάτων των ηλεκτρικών πεδίων που προέρχονται από όλες τις επιμέρους πηγές φωτός (που είναι τα άτομα ή τα μόρια) οδηγεί σε μια κατεύθυνση, για τη συνολική ένταση, η οποία αλλάζει τυχαία με τον χρόνο.



# ΠΟΛΩΣΗ (Χαρακτηριστικό γνώρισμα μόνο των εγκάρσιων κυμάτων)

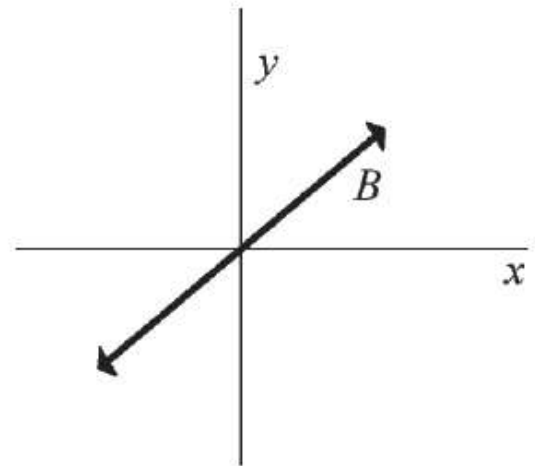
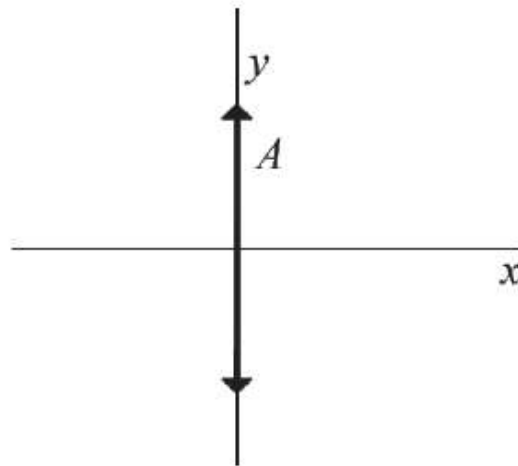
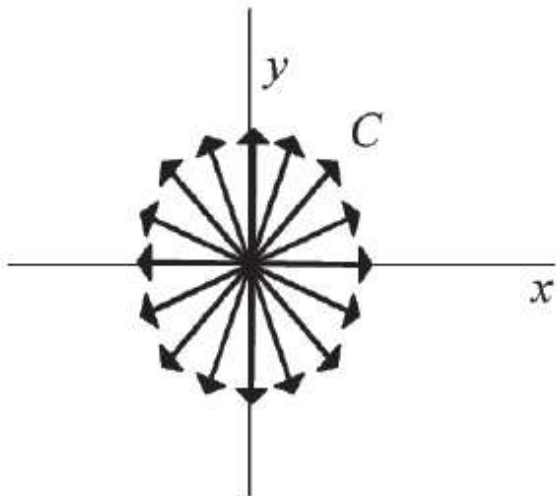
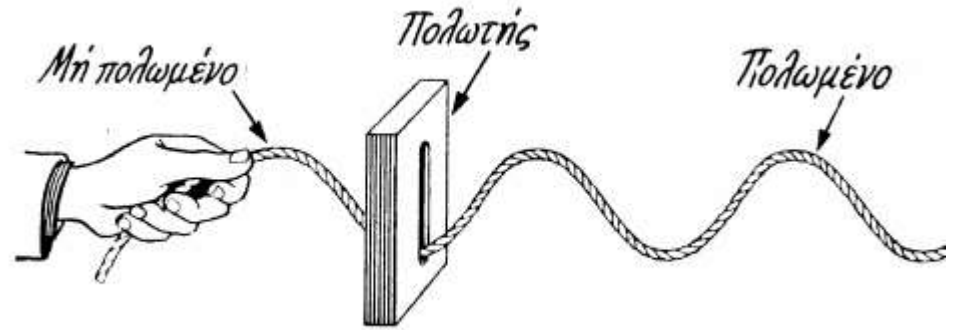
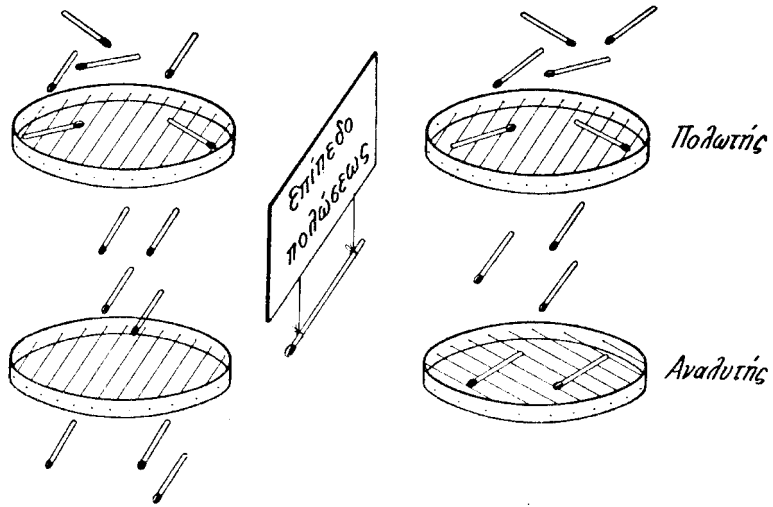


*Πολωμένο φως:*



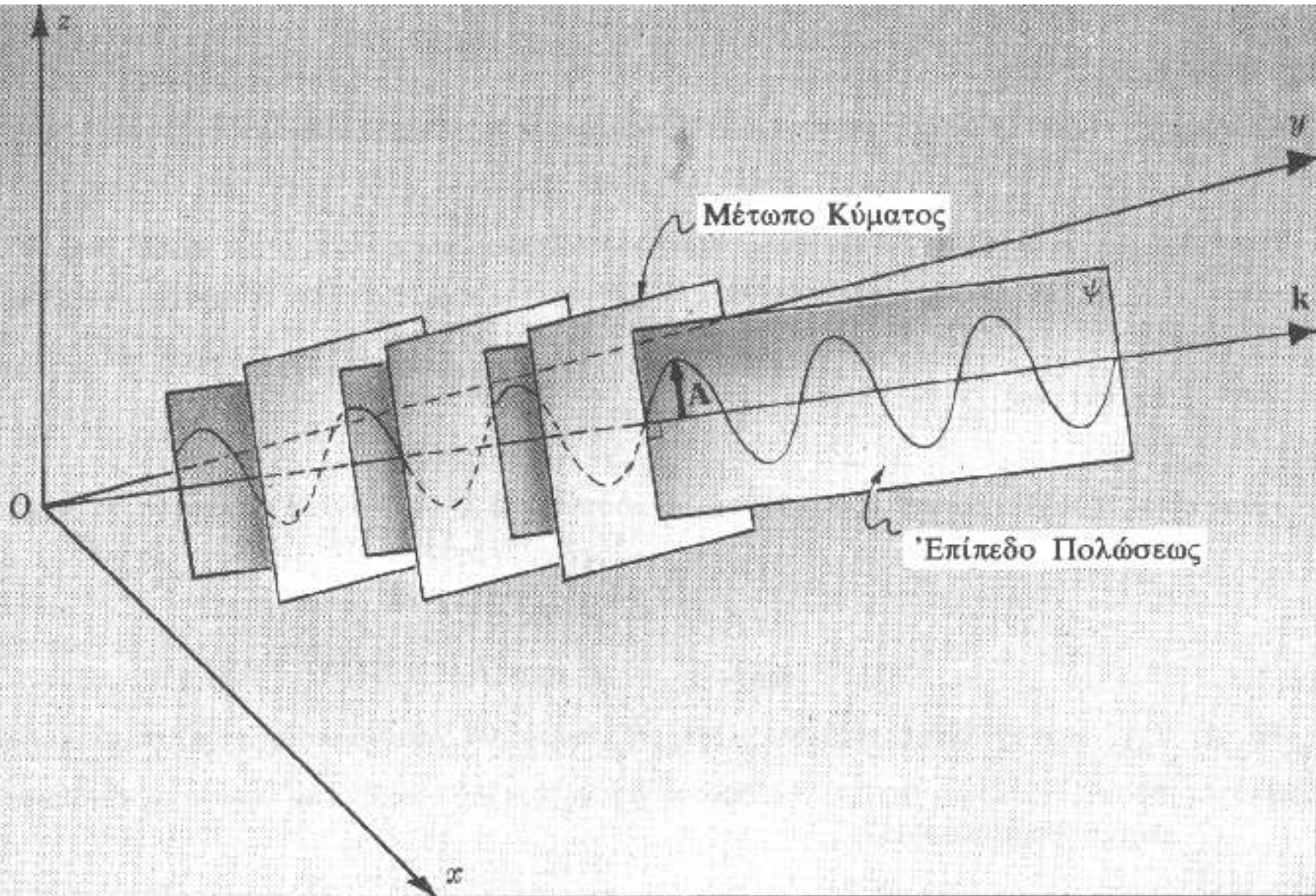
# ΠΟΛΩΣΗ

Μηχανικά ανάλογα:





# ΠΟΛΩΣΗ



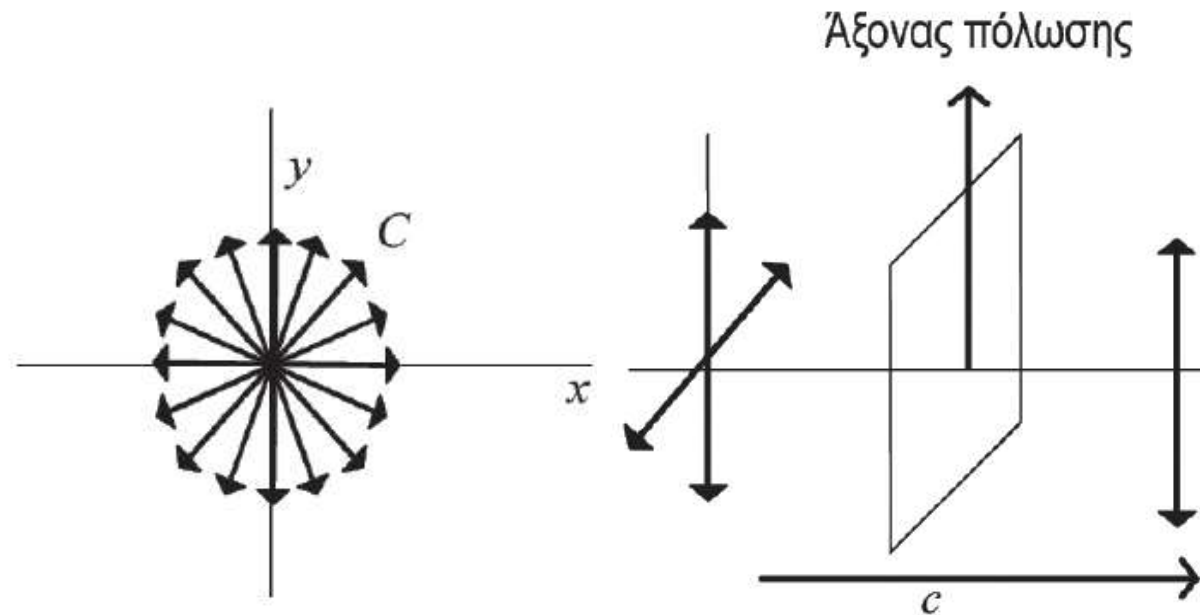
# ΠΟΛΩΣΗ

Καθώς η κατανομή των επιπέδων πόλωσης γύρω από τη διεύθυνση διάδοσης είναι συμμετρική, παριστάνουμε το φυσικό φως με το σχήμα στα αριστερά

ή

μπορούμε να παραστήσουμε το φυσικό φως με τη βοήθεια δύο *ΑΣΥΜΦΩΝΩΝ* και σε ορθογώνια διεύθυνση (κατά μήκος δύο αξόνων στο εγκάρσιο, στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, επίπεδο) γραμμικά πολωμένων κυμάτων ίδιας έντασης.

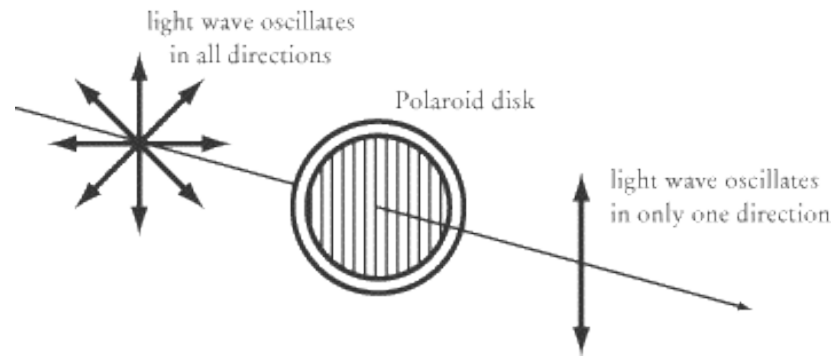
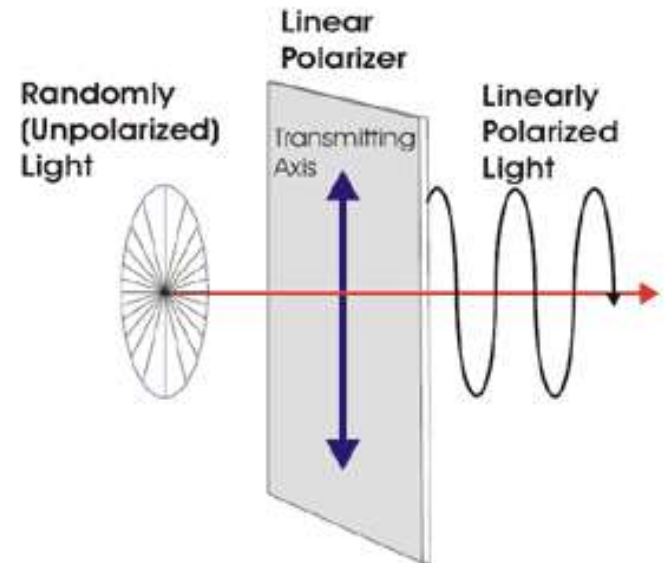
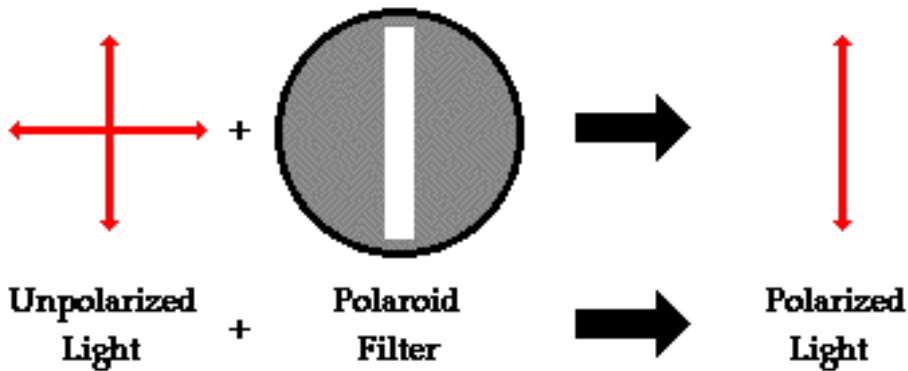
Κατακόρυφα πολωμένο φως μπορεί να προκύψει από μια μη πολωμένη δέσμη, που διαδίδεται προς τα δεξιά, όταν αυτή προσπέσει σε ένα πολωτικό φύλλο Polaroid, το οποίο είναι προσανατολισμένο με τον άξονα πόλωσης να είναι π.χ. κατακόρυφος.



# ΠΟΛΩΣΗ

Τα φύλλα Polaroid, παρουσιάζουν διχρωισμό, δηλ. επιλεκτική απορρόφηση μιας από τις συνιστώσες πόλωσης σε πολύ έντονο βαθμό ενώ η άλλη συνιστώσα απορροφάται ελάχιστα.

Το μη πολωμένο φως, κατά τη διόδό του μέσα από ένα φύλλο Polaroid, πολώνεται γραμμικά κατά μήκος του άξονα του Polaroid.



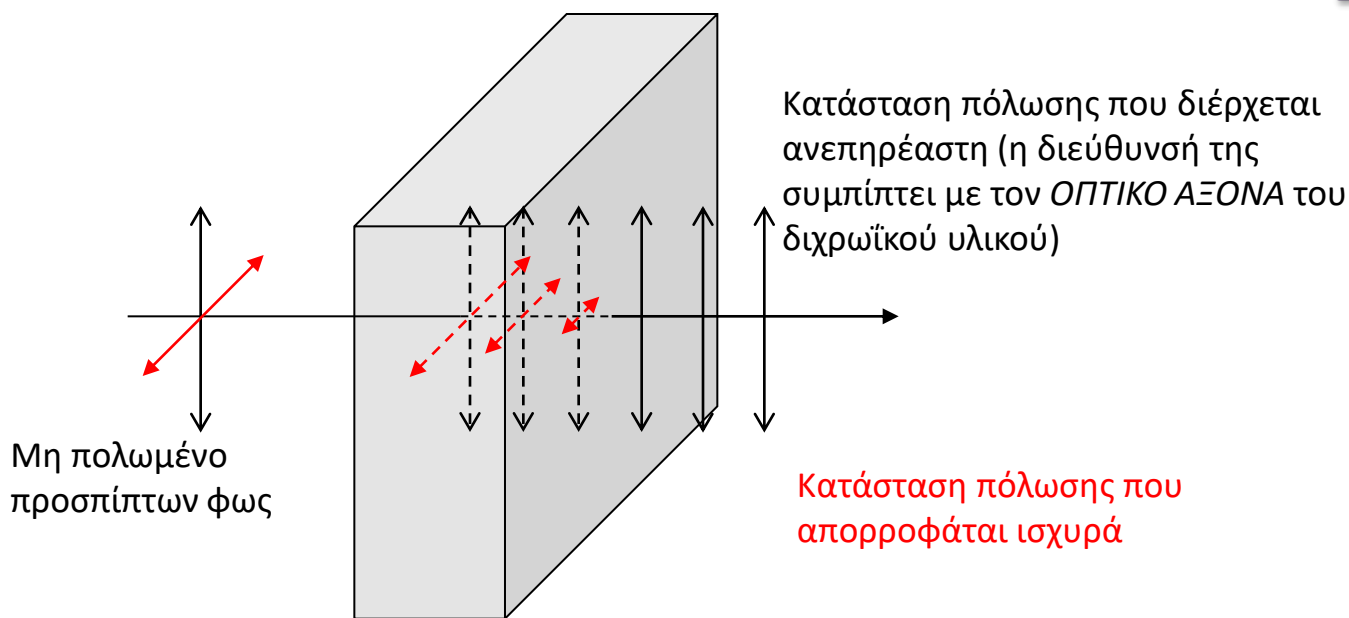


# Γραμμικός Διχρωϊσμός(\*)

## Πόλωση με επιλεκτική απορρόφηση

Τα διχρωϊκά υλικά (όπως τα φύλλα polaroid) απορροφούν ισχυρά το φως όταν αυτό είναι γραμμικά πολωμένο σε μια διεύθυνση που είναι χαρακτηριστική για το υλικό, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση του φωτός στην κάθετη διεύθυνση

**EMANIM**

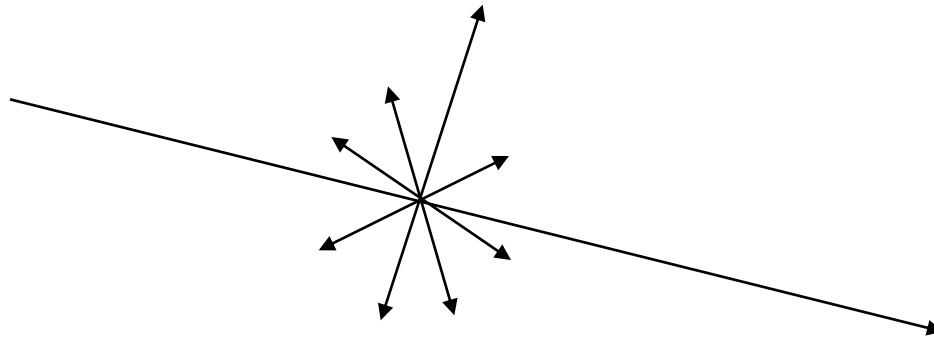


Στη περίπτωση τέλει διχρωϊσμού το εξερχόμενο φως είναι γραμμικά πολωμένο. Αλλιώς είναι μερικώς μόνο πολωμένο.

(\*) Μια σύντομη ερμηνεία του γραμμικού διχρωϊσμού μπορείτε να βρείτε στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

# Μερικώς πολωμένο φως

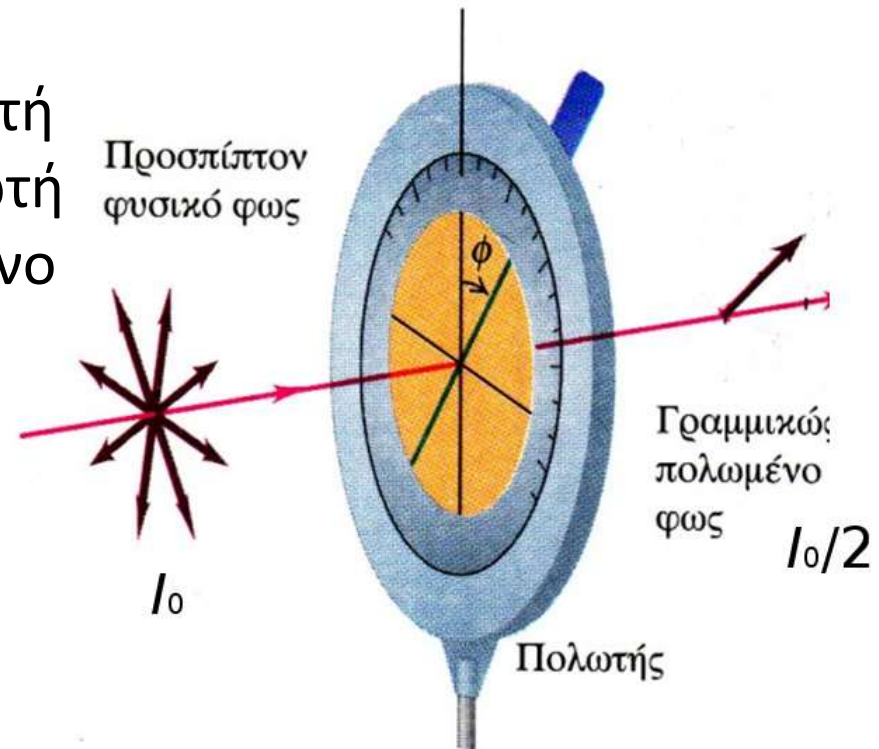
- Το πλήρως πολωμένο φως και το φυσικό φως που είναι μη πολωμένο είναι οι δύο ακραίες περιπτώσεις. Συνήθως το φως είναι *μερικώς πολωμένο*.
- Το φως αυτό παριστάνεται από την επαλληλία φυσικού (μη πολωμένου) και πλήρως πολωμένου φωτός.



# ΠΟΛΩΣΗ

*Μελέτη της κατάστασης πόλωσης κύματος με χρήση πολωτή-αναλυτή  
(δύο πολωτές σε σειρά)*

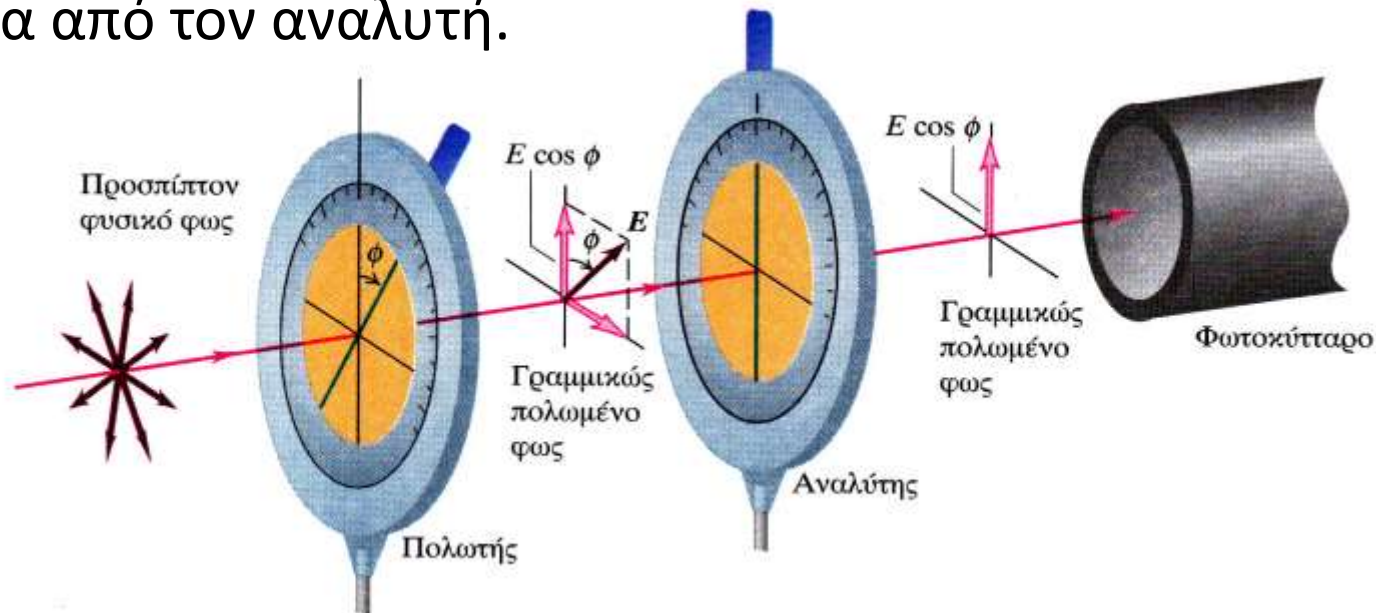
Αν η προσπίπτουσα δέσμη, έντασης  $I_0$  δεν είναι πολωμένη και την αναλύσουμε σε δύο ορθογώνιες συνιστώσες εκ των οποίων η μία είναι παράλληλη στον άξονα του πολωτή, τότε (υποθέτοντας ότι ο πολωτής είναι ιδανικός) μόνο αυτή η συνιστώσα θα διέλθει από τον πολωτή και το φως θα είναι γραμμικά πολωμένο σε αυτήν την διεύθυνση ενώ η ένταση του (δεδομένου ότι οι δύο αρχικές συνιστώσες συνυπάρχουν στην ίδια αναλογία) θα είναι πάντα:  $I_0/2$



# ΠΟΛΩΣΗ

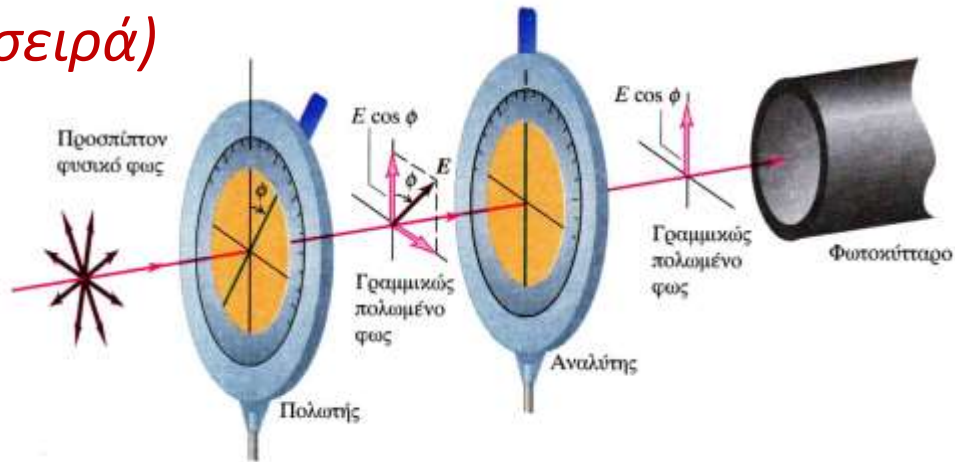
*Μελέτη της κατάστασης πόλωσης κύματος με χρήση πολωτή-αναλυτή (δύο πολωτές σε σειρά)*

Ένας δεύτερος πολωτής, (συνήθως ονομάζεται **αναλυτής**), τοποθετείται στην πορεία του πολωμένου κύματος που διήλθε από τον πρώτο πολωτή. Μπορούμε να αναλύσουμε και αυτό με τη σειρά του σε δύο συνιστώσες: μιας παράλληλης και μιας κάθετης στον άξονα του αναλυτή, ο οποίος άξονας υποθέτουμε ότι σχηματίζει **γωνία  $\phi$**  με τον αντίστοιχο άξονα του πολωτή. Μόνο η παράλληλη συνιστώσα θα διέλθει μέσα από τον αναλυτή.



# ΠΟΛΩΣΗ

Μελέτη της κατάστασης πόλωσης κύματος με χρήση πολωτή-αναλυτή (δύο πολωτές σε σειρά)



Αν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου του προσπίπτοντος κύματος στον αναλυτή είναι  $E$ , η διερχόμενη συνιστώσα, κατά μήκος του άξονα του αναλυτή, θα είναι:

$$E_{\text{διερχ}} = E \cos \varphi$$

Καθώς, η ένταση του κύματος είναι ανάλογη με το τετράγωνο της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η διερχόμενη ένταση  $I_{\text{διερχ}}$  συνδέεται με την προσπίπτουσα  $I$  (του πολωμένου φωτός από τον 1<sup>ο</sup> πολωτή για την οποία είπαμε ότι:  $I = I_0/2$ ) σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{\text{διερχ}} = I \cos^2 \varphi = \frac{I_0}{2} \cos^2 \varphi$$

εξίσωση που είναι γνωστή ως **νόμος του Malus**.



# ΠΟΛΩΣΗ

**Παράδειγμα:** Αν ο πρώτος πολωτής είναι τοποθετημένος με τον άξονά του κατακόρυφο, τότε ανεξαρτήτως της κατάστασης πόλωσης της προσπίπτουσας δέσμης, μόνο κατακόρυφα πολωμένα κύματα θα διέρθουν από τον πολωτή, υποθέτοντας βέβαια ότι αυτός είναι ιδανικός. Αν η προσπίπτουσα δέσμη έχει ένταση  $I_0$ , η γραμμικά πολωμένη (στην κατακόρυφη διεύθυνση) που εξέρχεται από τον πρώτο πολωτή θα έχει:  $I_0/2$

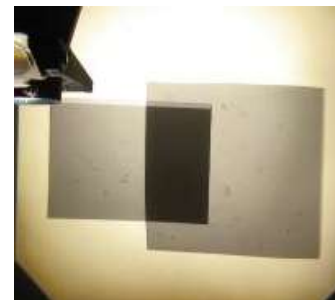
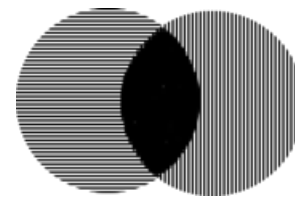
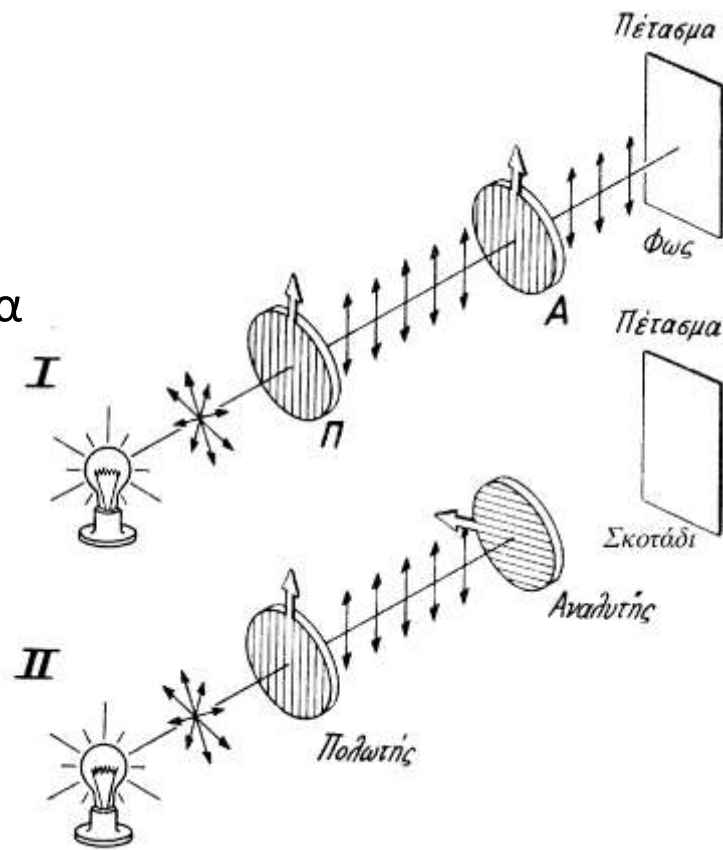
Τοποθετείται δεύτερος πολωτής (αναλυτής) στην πορεία του κατακόρυφα πολωμένου κύματος που διήλθε από τον πρώτο πολωτή.

- Αν ο άξονας του αναλυτή είναι και αυτός στην κατακόρυφη διεύθυνση τότε  $\varphi = 0^\circ$  και επομένως, αφού  $\sin\varphi = 1$ , η διερχόμενη ακτινοβολία διέρχεται αναλλοίωτη από αυτόν και η ένταση της θα είναι:

$$I_{\text{διερχ}} = I_0/2$$

- Αν ο άξονας του αναλυτή είναι στην οριζόντια διεύθυνση τότε  $\varphi = 90^\circ$  και  $\sin\varphi = 0$ , και επομένως δεν διέρχεται ακτινοβολία από τον αναλυτή  $I_{\text{διερχ}} = 0$ .

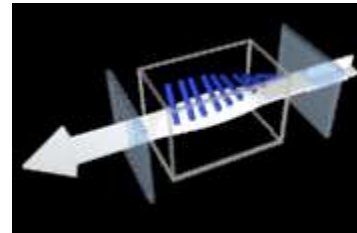
- Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση:  $I_{\text{διερχ}} = (I_0/2) \sin^2\varphi$



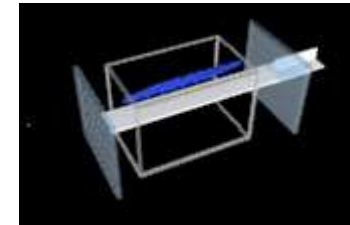
Δείτε το video στους "Συνδέσμους -> Οπτική --> Polarization and Polarizers"

## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

1) Η λειτουργία των επίπεδων οθονών σε laptop, LCD τηλεοράσεις βασίζεται σε μεταβολές του επιπέδου πόλωσης με χρήση υγρών κρυστάλλων

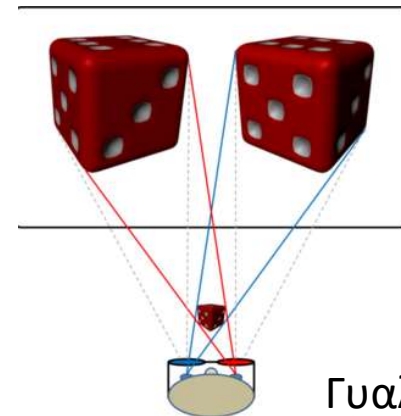


Περνάει φως  
Φωτεινό pixel



Δεν περνάει φως  
Σκοτεινό pixel

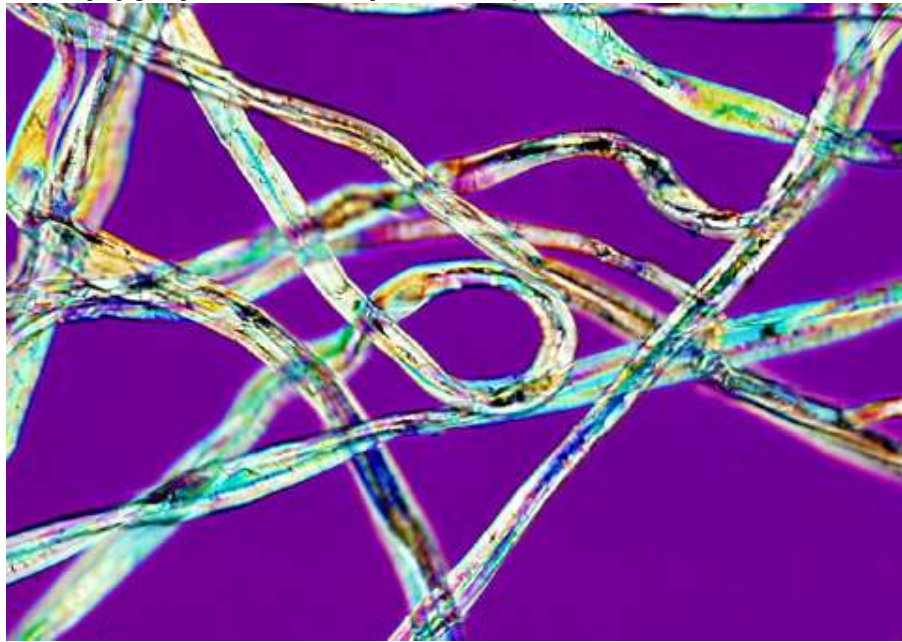
2) 3D σινεμά, TV κλπ



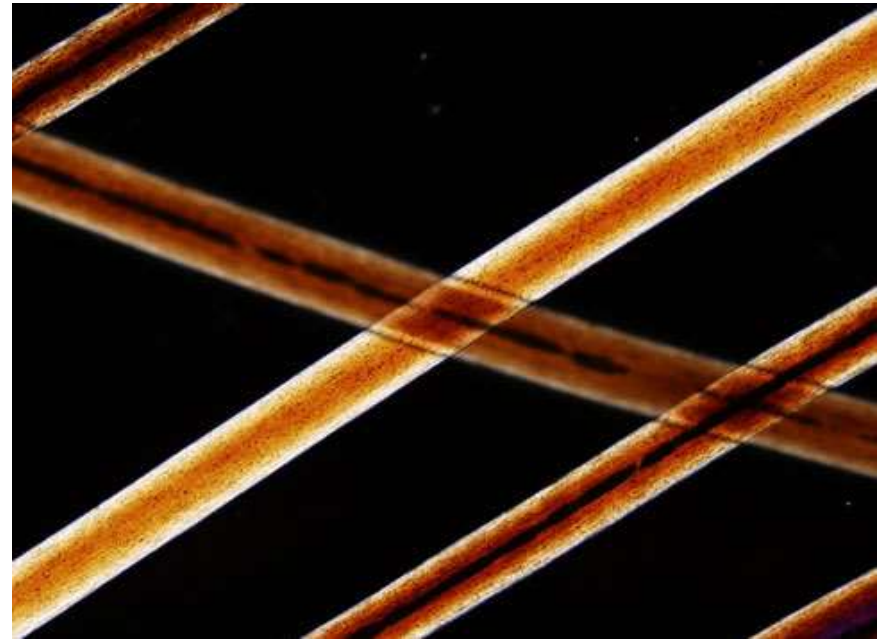
Γυαλιά polaroid

# Πολωτικό μικροσκόπιο

Πολλά βιολογικά συστήματα περιέχουν στοιχεία που είναι ανισοτροπικά. Η δομή αυτών των στοιχείων χαρακτηρίζεται από διατάξεις που εμφανίζουν διαφορές σε διαφορετικές διευθύνσεις, (π.χ. τα ινίδια των μυϊκών ινών ή η διάταξη των αλυσίδων των πρωτεϊνών του κρυσταλλοειδή φακού του οφθαλμού). Εξαιτίας της ανισοτροπίας των στοιχείων αυτών θα παρατηρούνται μεταβολές στην πόλωση του διερχόμενου φωτός από αυτά.



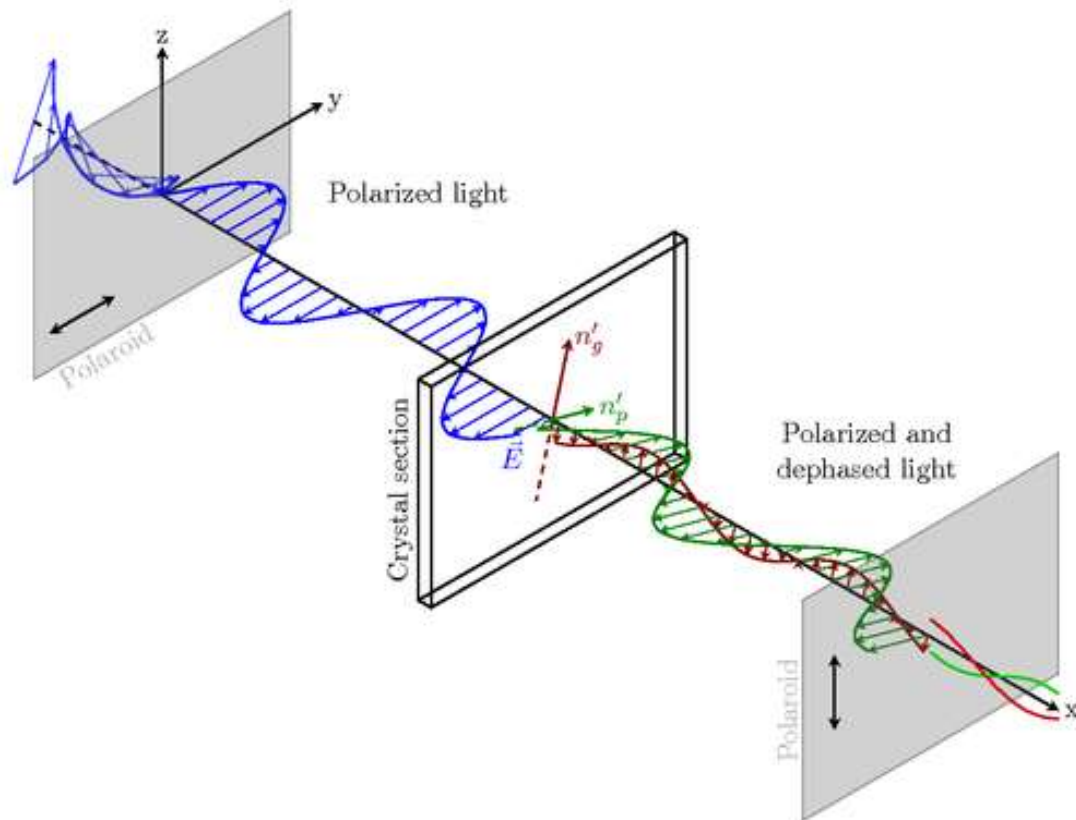
Ίνες βαμβακιού



Ανθρώπινες τρίχες

# Πολωτικό μικροσκόπιο

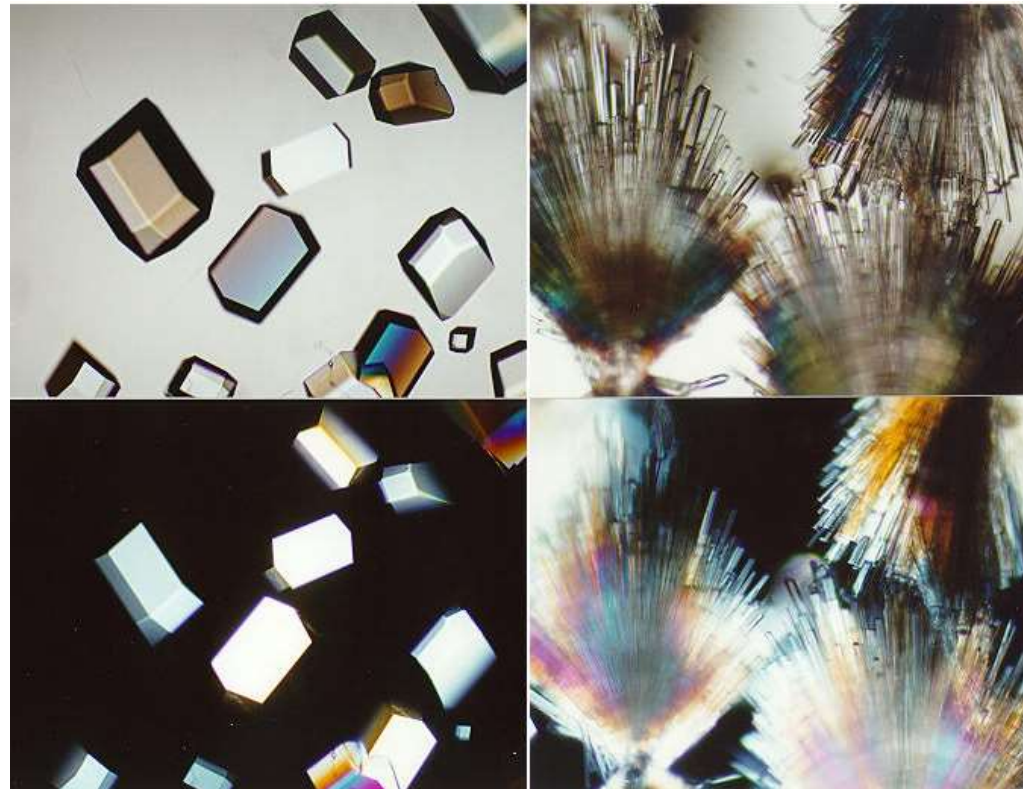
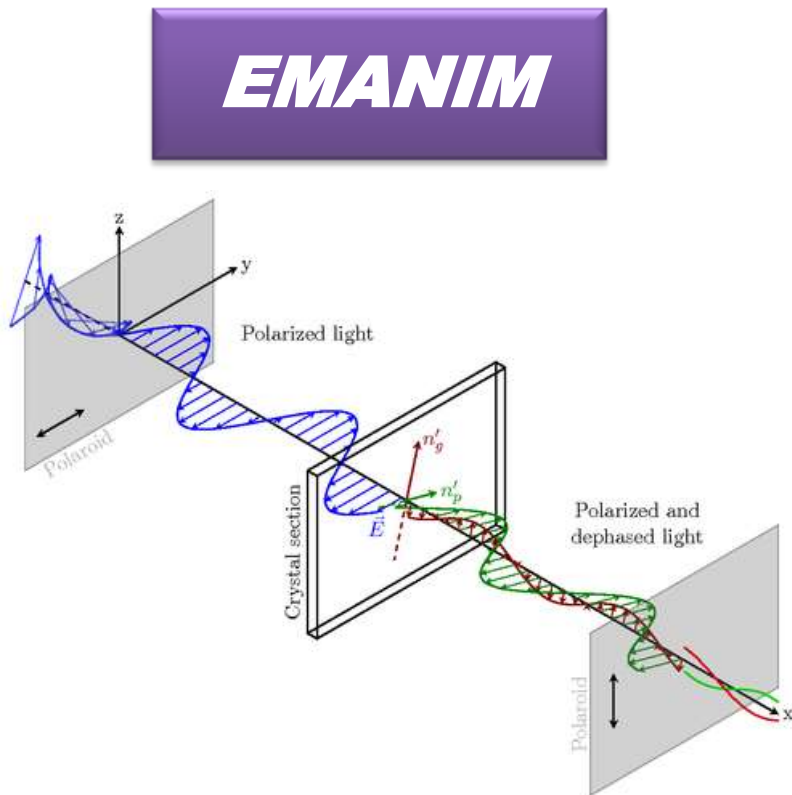
Η μικροσκοπία πόλωσης είναι ένας ακόμα τρόπος απεικόνισης τέτοιων ανισοτροπικών δομών. Σε αυτή, στο δείγμα προσπίπτει γραμμικά πολωμένο φως, το οποίο, αφού διέλθει από το δείγμα, διασταυρώνεται με άλλον πολωτή του οποίου ο άξονας πόλωσης είναι κάθετος με τη διεύθυνση πόλωσης του αρχικά προσπίπτοντος φωτός. Έτσι, απουσία δείγματος, το φως του υπόβαθρου σβήνει εντελώς.





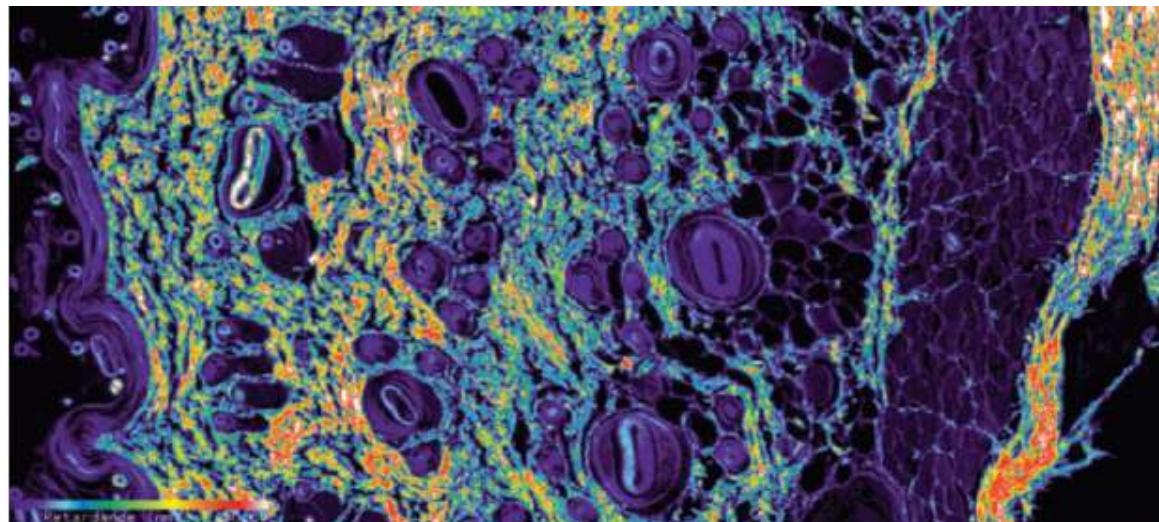
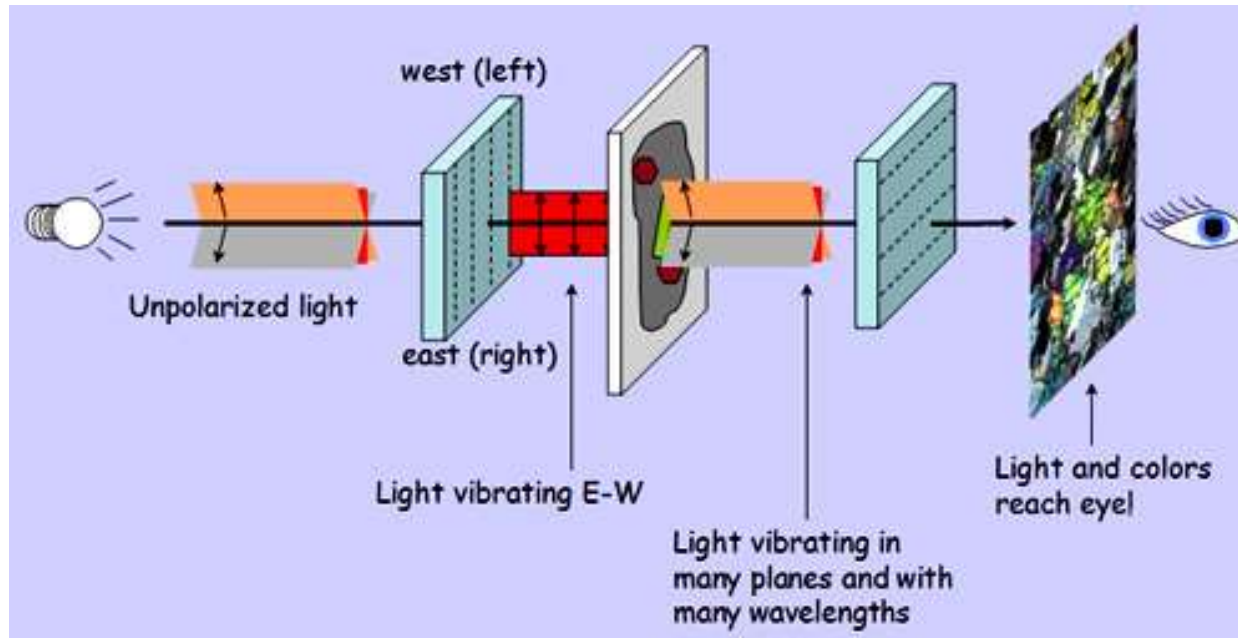
# Πολωτικό μικροσκόπιο

Αν στο δείγμα υπάρχουν δομές στοιχείων που προκαλούν κάποια απώλεια της πόλωσης του προσπίπτοντος φωτός, ο διασταυρωμένος πολωτής δεν θα σβήνει το φως που διέρχεται από αυτές και έτσι θα παράγεται κάποια φωτεινή απεικόνισή τους.





# Πολωτικό μικροσκόπιο

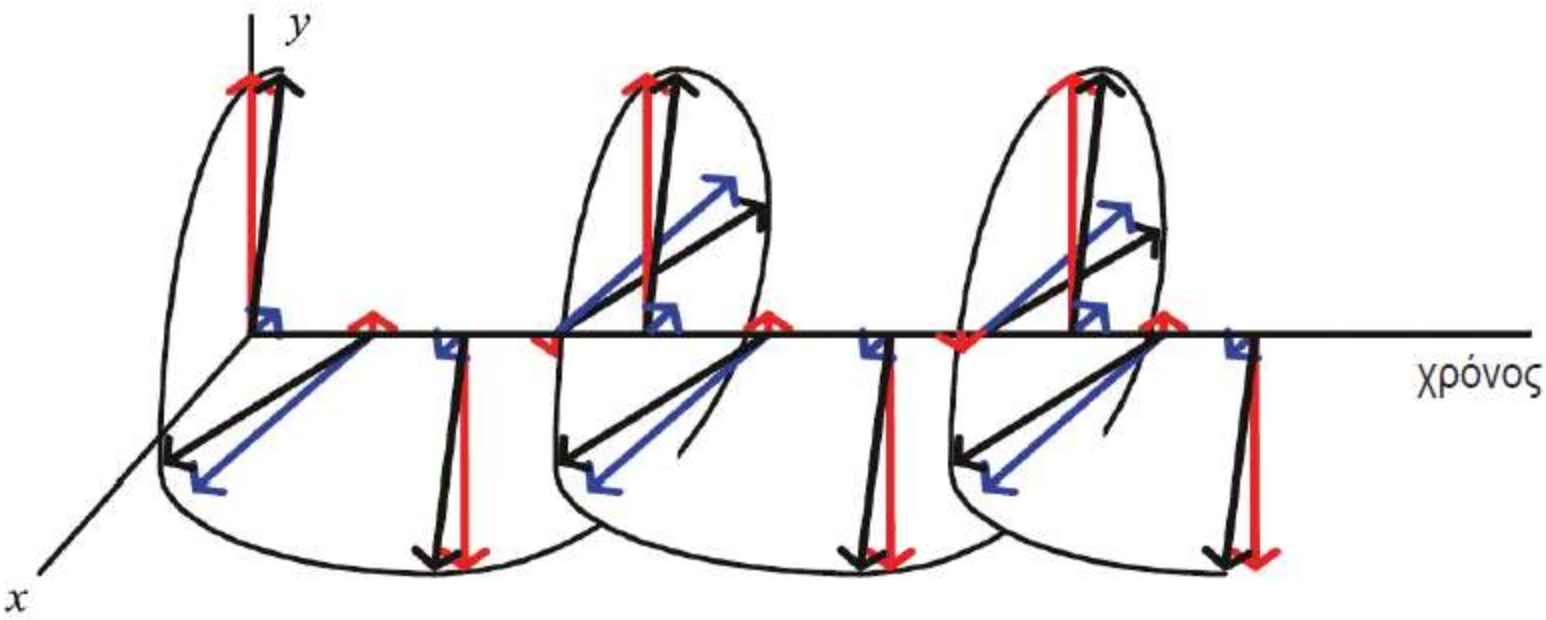


Εικόνα από πολωτικό μικροσκόπιο του δέρματος αρουραίου. Τα χρώματα οφείλονται σε καθυστέρηση εξαιτίας της διπλοδιαθλαστικότητας των στοιχείων του δέρματος η οποία προκαλεί απώλεια της πόλωσης σε διάφορους βαθμούς του προσπίπτοντος φωτός μετά τη διέλευσή του από αυτά.

# ΚΥΚΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΑ ΠΟΛΩΜΕΝΟ ΦΩΣ

Κυκλική (ελλειπτική) πόλωση: το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου κινείται στο εγκάρσιο προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος επίπεδο, ώστε η άκρη του να διαγράφει κύκλο (ή έλλειψη).

Η συγκεκριμένη κατάσταση πόλωσης προκύπτει από τις  $x$  και  $y$  συνιστώσες του διανύσματος όταν αυτές έχουν διαφορά φάσης ίση με  $90^\circ$  (αν κάποια στιγμή η  $y$  συνιστώσα έχει μέγιστη τιμή, τότε η  $x$  συνιστώσα είναι ίση με το μηδέν, και καθώς η  $y$  συνιστώσα μειώνεται, η  $x$  θα αυξάνεται, φθάνοντας μάλιστα τη μέγιστη τιμή της όταν η  $y$  μηδενίζεται κ.ο.κ.)



**Ε  
Μ  
Α  
Ν  
Ι  
Μ**

# ΚΥΚΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΑ ΠΟΛΩΜΕΝΟ ΦΩΣ

**Κυκλική πόλωση:** Τα μέτρα των  $x$  και  $y$  συνιστωσών είναι ίσα. Το πέρασ του διανύσματος του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου διαγράφει κύκλο στο εγκάρσιο στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος επίπεδο.

**Ελλειπτική πόλωση:** οι δύο συνιστώσες  $x$  και  $y$  δεν είναι ίσες.

Η πραγματική διαδρομή που διαγράφει το πέρασ του ηλεκτρικού πεδίου στον χώρο είναι μια κυκλική (ή αντιστοίχως ελλειπτική) έλικα, καθώς ταυτόχρονα με την περιστροφή του  $E$ , το κύμα διαδίδεται προς μια κατεύθυνση.

$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \cos(\omega t) && \text{όπου } E_{0x}, E_{0y} \text{ είναι τα πλάτη των ηλεκτρικών πεδίων.} \\ E_y &= E_{0y} \sin(\omega t) && \text{Θεωρούμε ότι το } E_x \text{ προηγείται του } E_y \text{ κατά } 90^\circ. \\ &&& \text{Χρησιμοποιώντας την: } \cos^2\theta + \sin^2\theta = 1 \end{aligned}$$

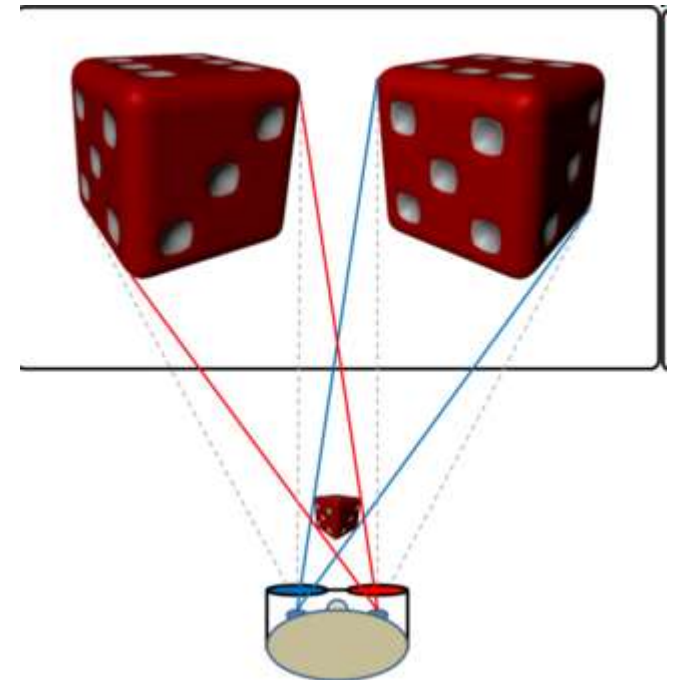
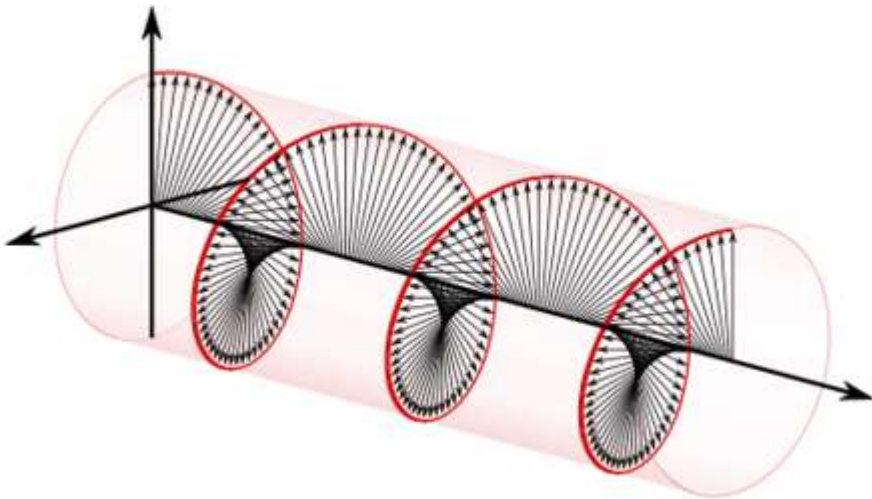
$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 = 1$$

η οποία είναι εξίσωση έλλειψης. Αν τα δύο πλάτη είναι ίσα μεταξύ τους ( $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ ), τότε γίνεται εξίσωση κύκλου: ( $E_x^2 + E_y^2 = E_0^2$ , με ακτίνα  $E_0$ )

# ΚΥΚΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΛΛΕΙΠΤΙΚΑ ΠΟΛΩΜΕΝΟ ΦΩΣ

Αν η διαφορά φάσης των δύο αρχικών κυμάτων είναι θετική ή αρνητική, το προκύπτον κυκλικά πολωμένο φως θα είναι δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο.

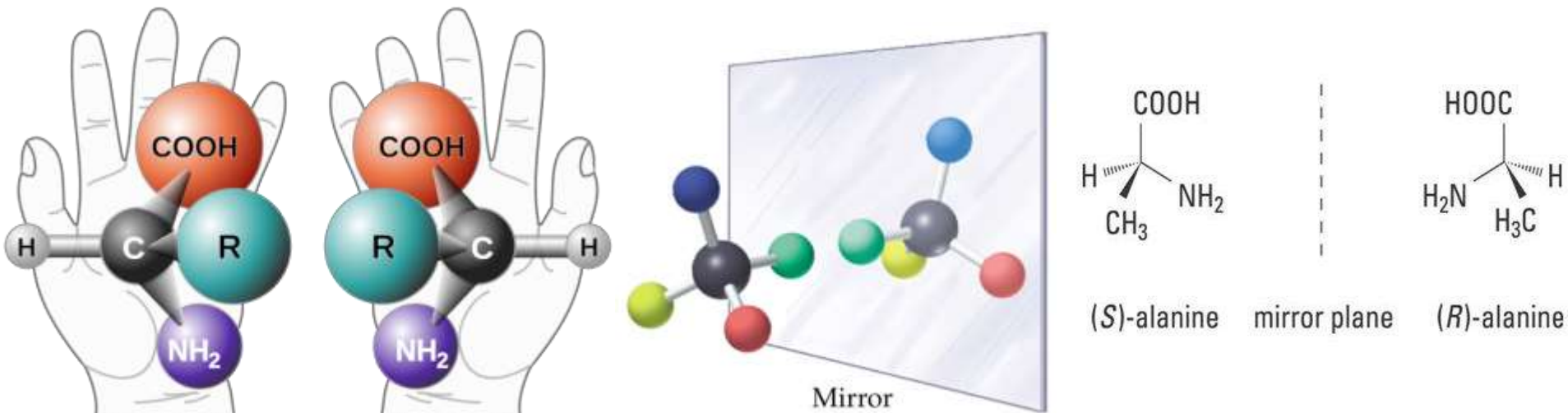
**Δεξιόστροφο:** το κυκλικά πολωμένο φως του οποίου το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου,  $E$ , για έναν παρατηρητή που βλέπει το κύμα να κατευθύνεται προς αυτόν, στρέφεται κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού (**αριστερόστροφο** όταν στρέφεται κατά την αντίθετη φορά).





# Οπτικώς Ενεργά Υλικά

Ένα διάλυμα τυχαία προσανατολισμένων ασύμμετρων μορίων δεν παράγει εικόνα σε ένα πολωτικό μικροσκόπιο, αφού ως όλον είναι ισοτροπικό. Ωστόσο, τα ασύμμετρα μόρια έχουν κάποια επίδραση στην πόλωση του φωτός που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση πληροφοριών σχετικών με τη δομή τους. Τα ασύμμετρα μόρια έχουν αυτό που ονομάζουμε **οπτική ενεργότητα** και χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για αριστερόστροφο και δεξιόστροφο κυκλικά πολωμένο φως. Τα ασύμμετρα μόρια αλληλεπιδρούν διαφορετικά με το αριστερόστροφο από ότι με το δεξιόστροφο κυκλικά πολωμένο φως, εξαιτίας της χειρομορφίας τους.





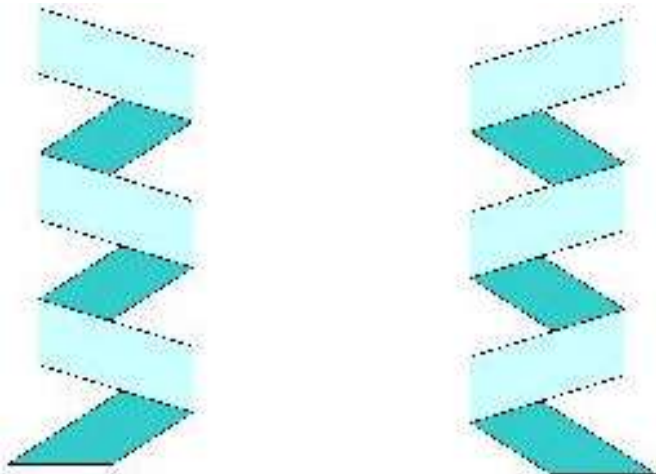
# Οπτικώς Ενεργά Υλικά

Μια ουσία για να είναι οπτικά ενεργή θα πρέπει να υπάρχουν χρωμόφορες που:

1) Θα εμφανίζουν χειρομορφία

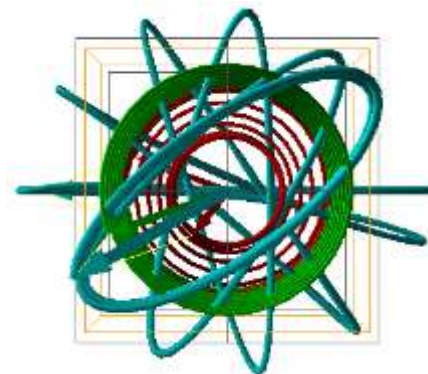
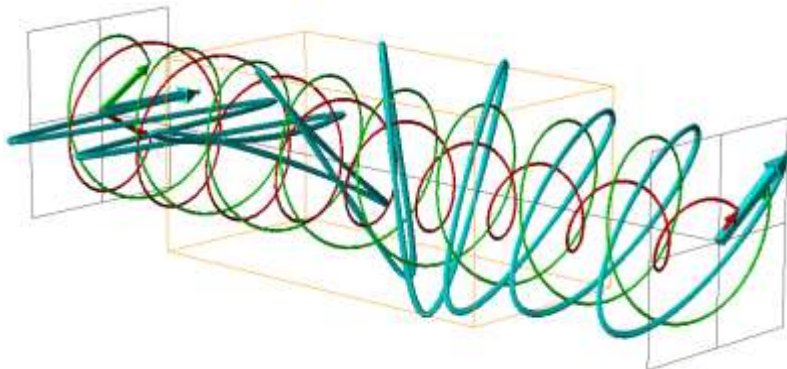
ή

2) Χωρίς να εμφανίζουν χειρομορφία οι ίδιες, είναι τοποθετημένες σε μια χειρόμορφη διάταξη.



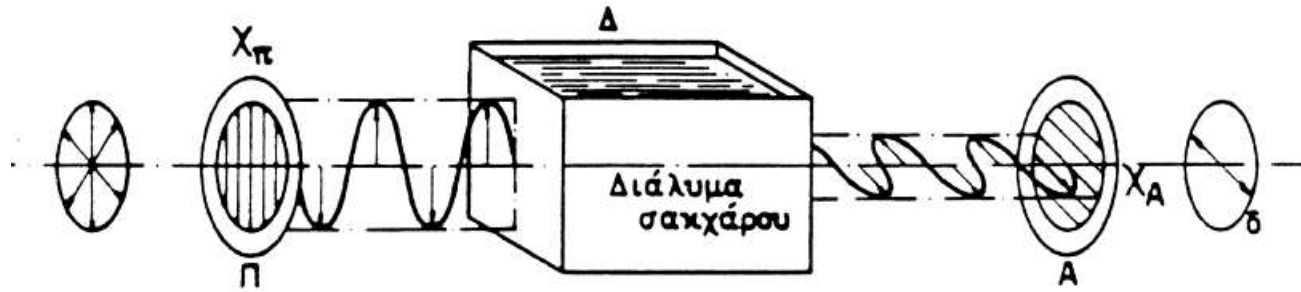
# Οπτικώς Ενεργά Υλικά

- Κάθε ουσία που εμφανίζει κυκλικό διχρωϊσμό ή κυκλική διπλοθλαστικότητα (\*) ονομάζεται ΟΠΤΙΚΑ ΕΝΕΡΓΗ. Στην πραγματικότητα είναι σπάνιες οι περιπτώσεις που μια ουσία εμφανίζει τη μια ιδιότητα και όχι την άλλη. Έτσι αυτό που συμβαίνει είναι ότι αν σε μια τέτοια ουσία προσπέσει γραμμικά πολωμένο φως τότε:
  - 1) Αφενός μεν το φως μετατρέπεται σε ελλειπτικά πολωμένο.
  - 2) Αφετέρου ο μεγάλος ημιάξονας της έλλειψης έχει στραφεί και σχηματίζει γωνία με την κατεύθυνση πόλωσης του προσπίπτοντος φωτός.



(\*) Περισσότερα για τον κυκλικό διχρωϊσμό και την κυκλική διπλοδιαθλαστικότητα μπορείτε να βρείτε στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

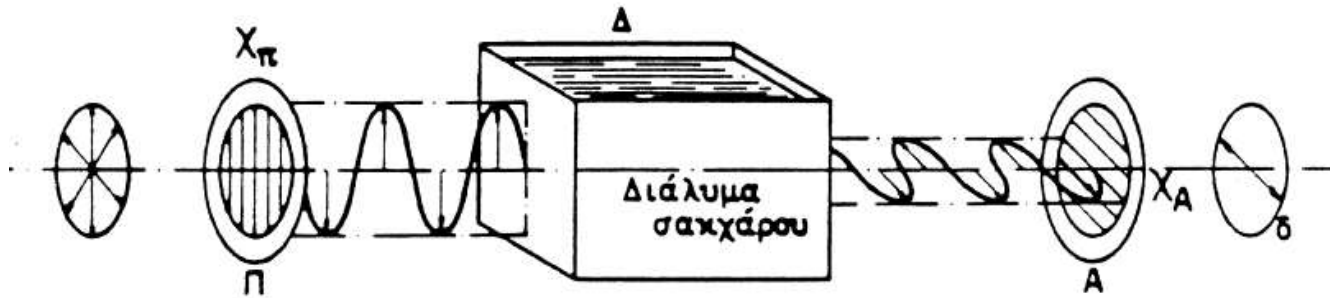
# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση



Το γραμμικά πολωμένο φως μπορεί να θεωρηθεί ως άθροισμα αριστερόστροφου και δεξιόστροφου κυκλικά πολωμένου φωτός. Όταν γραμμικά πολωμένο φως προσπέσει σε διάλυμα οπτικά ενεργών μορίων, η αριστερόστροφη συνιστώσα του θα αλληλεπιδρά με το διάλυμα διαφορετικά από ότι η δεξιόστροφη. Επομένως, μετά τη διέλευσή τους μέσα από το διάλυμα, οι συνιστώσες αυτές θα έχουν μεταβληθεί και επανασυνδεόμενες θα δώσουν διαφορετική πόλωση για το εξερχόμενο φως, σε σχέση με το εισερχόμενο.

Αν το δείγμα δεν απορροφά φως, τότε το φως παραμένει γραμμικά πολωμένο, αλλά η διεύθυνση πόλωσής του στρέφεται, λόγω των διαφορετικών ενεργών οπτικών δρόμων για κάθε συνιστώσα της πόλωσης.

# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση

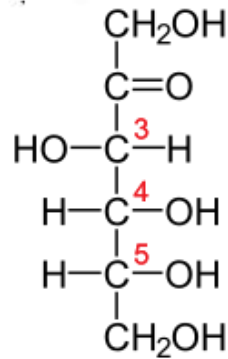
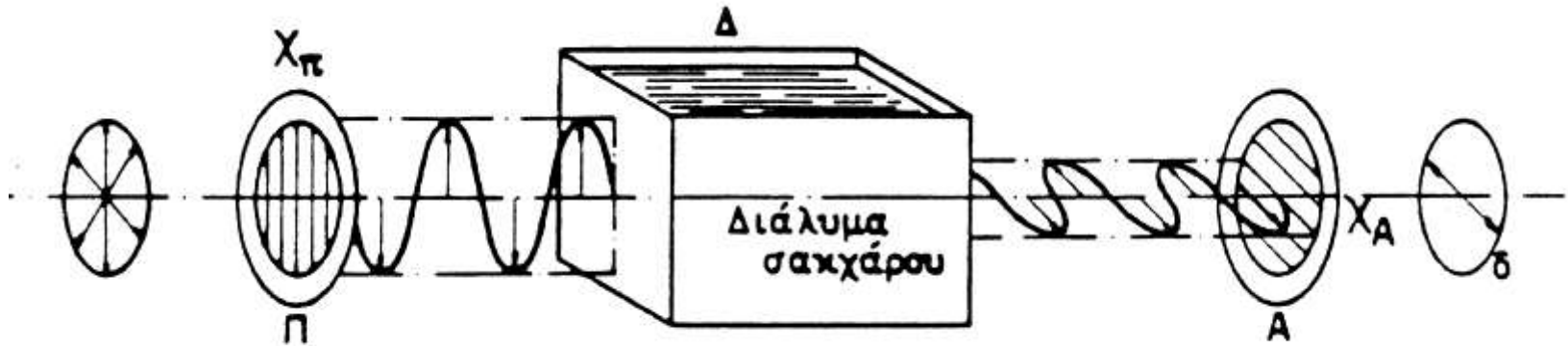


Σύστημα, που αποτελείται από πολωτή και αναλυτή, των οποίων τα χαρακτηριστικά επίπεδα είναι κάθετα μεταξύ τους.

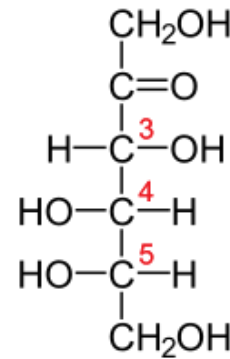
Μετά απ' τον αναλυτή δεν εμφανίζεται φωτεινή δέσμη γιατί σημειώνεται απόσβεση.

Αν μεταξύ πολωτή και αναλυτή τοποθετηθεί διάλυμα σακχάρου (οπτικώς ενεργή ουσία), μετά τον αναλυτή θα εμφανιστεί φωτεινή δέσμη παρά το ότι τα δύο χαρακτηριστικά επίπεδα εξακολουθούν να είναι κάθετα. Αυτό οφείλεται στην στροφή του επιπέδου του πολωμένου φωτός από το διάλυμα του σακχάρου.

# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση



D-Fructose



L-Fructose

Τα μόρια που στρέφουν το πολωμένο φως προς τα αριστερά ονομάζονται **αριστερόστροφα** (levorotatory ή L) ενώ προς τα δεξιά **δεξιόστροφα** (dextrorotatory ή D).

Όλες οι πρωτεΐνες και τα περισσότερα άλλα βιολογικά μόρια, βρίσκονται στη φύση μόνο στη μορφή L.

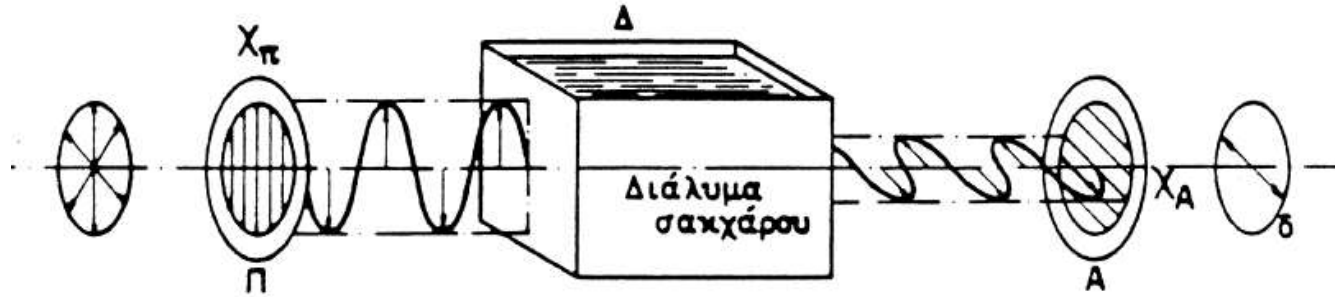


# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση

Οπτικώς ενεργά υλικά είναι:

- Κρύσταλλοι οργανικών και ανόργανων ενώσεων που οφείλουν τη στροφική τους ικανότητα στην εσωτερική δομή του κρυστάλλου.
  - Οργανικές ενώσεις υγρές, ή διαλύματα που οφείλουν τη στροφική τους ικανότητα στην δομή του μορίου.
- 
- Δεξιόστροφα υλικά είναι π.χ. τα: καλμοσάκχαρο, μαλτόζη, δεξτρόζη, άμυλο, δεξτρίνη, γλυκογόνο, τρυγικό οξύ (δ) και τα άλατά του, μηλικό οξύ κ.λ.π.
  - Αριστερόστροφα είναι π.χ. τα: λεβουλόζη, μανίτης, τρυγικό οξύ (α) και τα άλατά του, κινίνη, μορφίνη, στρυχνίνη, νικοτίνη κ.λ.π.

# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση



Για να εξαφανιστεί πάλι το φως πρέπει ο αναλυτής να στραφεί κατά γωνία  $\Delta\theta$ . Αν η στροφή αυτή γίνει κατά τη φορά των δεικτών του ρολογιού, το υλικό ονομάζεται **δεξιόστροφο**, ενώ στην αντίθετη περίπτωση **αριστερόστροφο**. Το πείραμα απέδειξε ότι η γωνία στροφής  $\Delta\theta$  είναι ανάλογη του μήκους  $\ell$  που διανύει το φως μέσα στην ενεργό ουσία:

$$\Delta\theta = \beta \ell$$

Ο συντελεστής  $\beta$  ονομάζεται **στροφική ικανότητα** και εξαρτάται από το μήκος κύματος του φωτός που χρησιμοποιήθηκε και τη φύση της ουσίας. Αν η οπτικά ενεργός ουσία είναι διάλυμα, το  $\beta$  εξαρτάται και από τη συγκέντρωση του διαλύματος. Δηλαδή:

$$\beta = \alpha C$$

# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση

Το  $\alpha$  ονομάζεται **ειδική στροφική ικανότητα** και εξαρτάται από τη φύση της διαλυμένης ουσίας, το μήκος κύματος του φωτός και τη θερμοκρασία. Αν το  $\beta$  αντικατασταθεί στην προηγούμενη σχέση προκύπτει:

$$\Delta\vartheta = \alpha \ell C$$

Αν  $\vartheta_0$  και  $\vartheta$  είναι οι ενδείξεις του γωνιομετρικού κύκλου του οργάνου για πλήρη απόσβεση του φωτός χωρίς διάλυμα και με διάλυμα, αντίστοιχα, τότε:

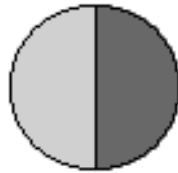
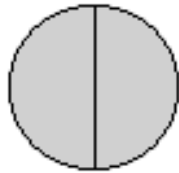
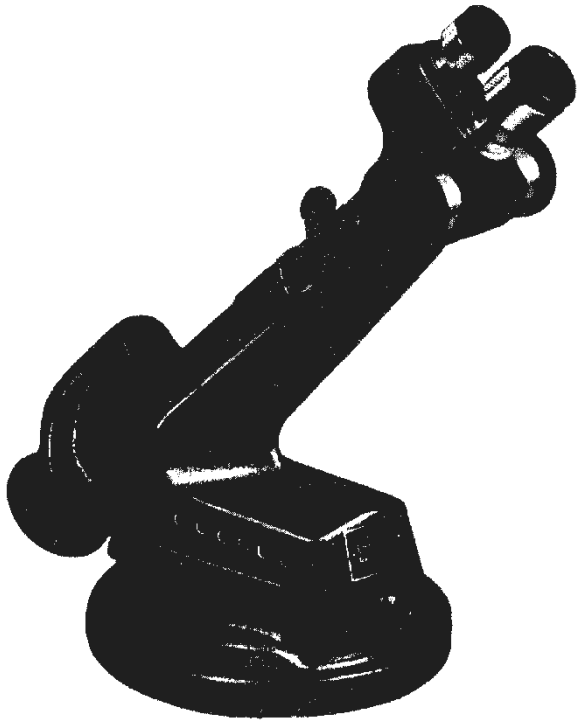
$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$$

και η τελευταία σχέση γίνεται:

$$\vartheta = \vartheta_0 + \alpha\ell C$$

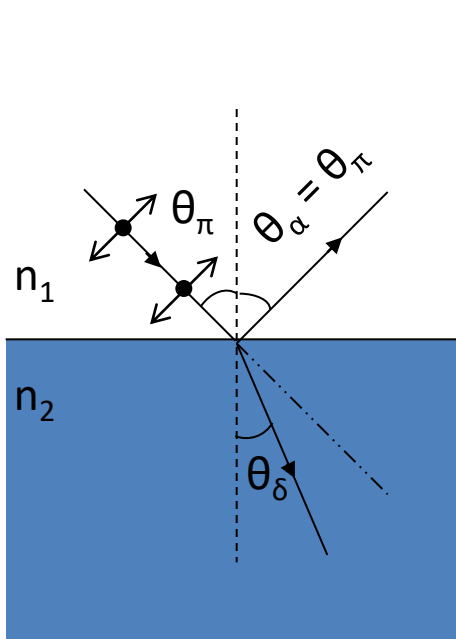
Επειδή συνήθως το  $\vartheta$  εκφράζεται σε μοίρες, το  $\ell$  σε cm και το  $C$  σε M (moles/lit, π.χ. 0.5 M, 1.0 M, κ.λ.π), το  $\alpha$  εκφράζεται σε:  $\frac{\text{μοιρες}}{\text{cm(moles / lit)}}$

# Οπτικώς Ενεργά Υλικά – Εργαστηριακή Άσκηση

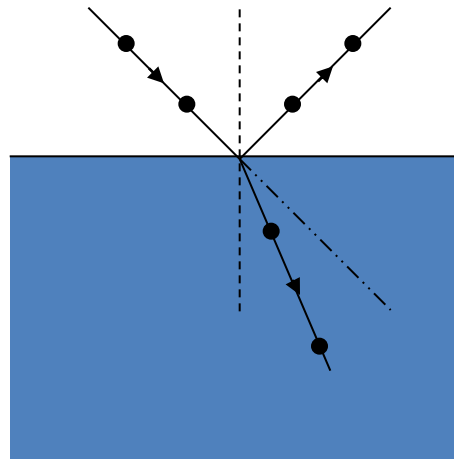


# 1) Πόλωση από ανάκλαση σε διηλεκτρικό υλικό

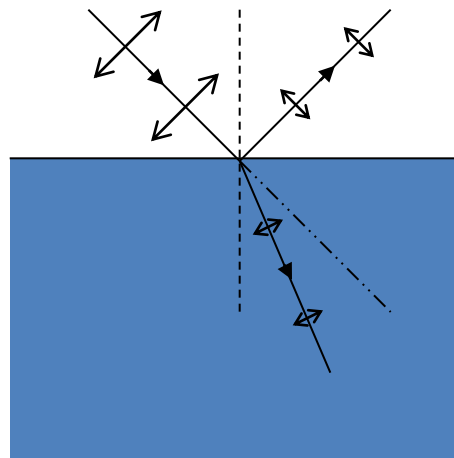
- Έστω ότι μη πολωμένο φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια και ανακλάται κατοπτρικά από αυτή.



Το μη πολωμένο φως παρίσταται από δύο κάθετες μεταξύ του καταστάσεις πόλωσης που είναι ασύμφωνες.



Κατάσταση πόλωσης **κάθετη** στο επίπεδο της ανάκλασης. "Διέρχεται" ανεπηρέαστη.



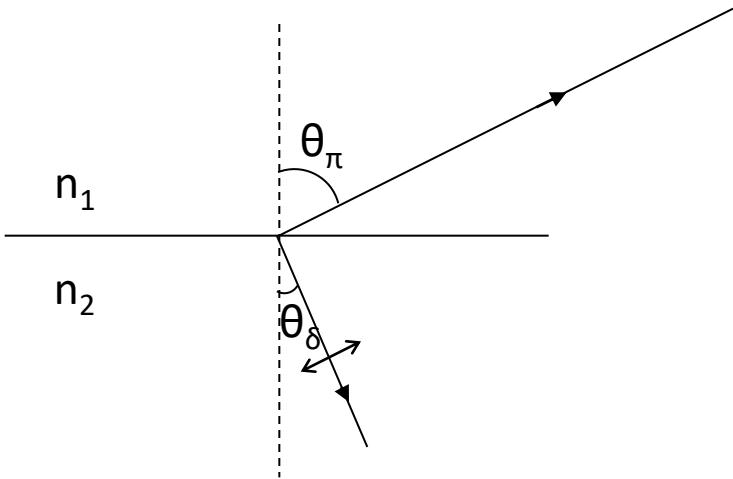
Κατάσταση πόλωσης **παράλληλη** στο επίπεδο της ανάκλασης. Ανακλάται "εξασθενημένη".

Στη γενική περίπτωση μετά την ανάκλαση προκύπτει μερικώς πολωμένο φως.



# Νόμος Brewster

- Αν συμβαίνει το διάνυσμα της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο δεύτερο υλικό να είναι παράλληλο με τη διεύθυνση της ανακλώμενης ακτίνας τότε η συγκεκριμένη κατάσταση πόλωσης δεν ανακλάται καθώς θα οδηγήσει σε διάμηκες ηλεκτρομαγνητικό κύμα.



$$\theta_{\pi} + 90^{\circ} + \theta_{\delta} = 180^{\circ}$$

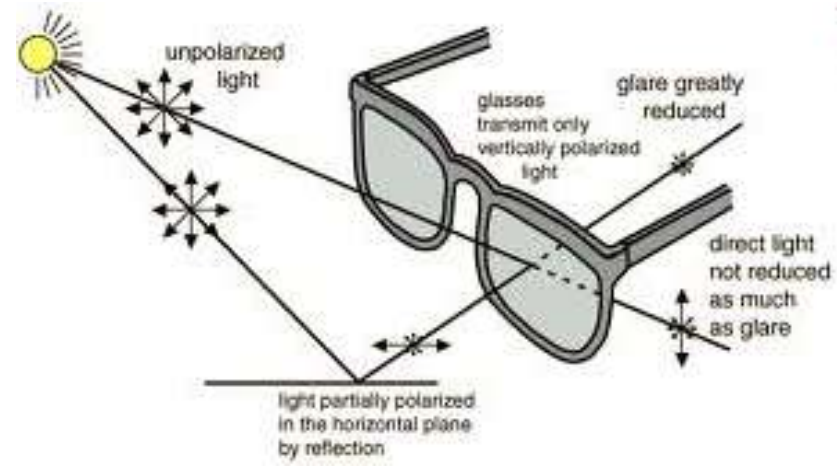
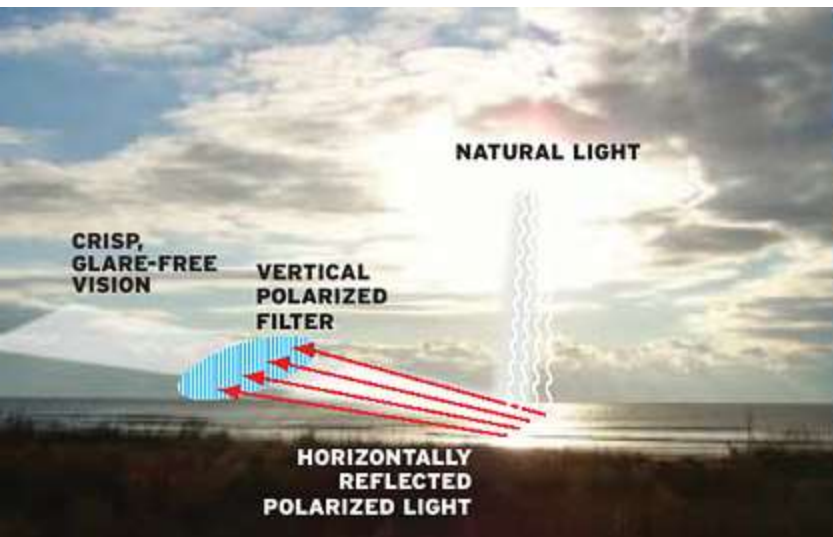
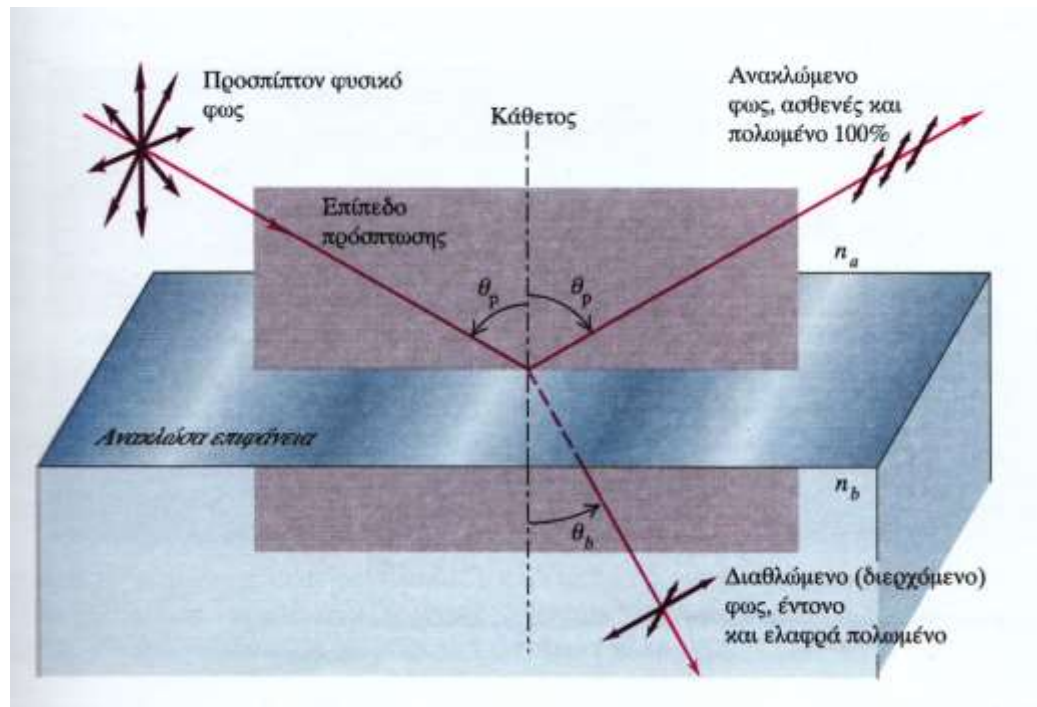
$$\text{Νόμος Snell: } n_1 \cdot \sin \theta_{\pi} = n_2 \cdot \sin \theta_{\delta}$$

$$\Rightarrow \tan \theta_{\pi} = \frac{n_2}{n_1}$$

**ΓΩΝΙΑ BREWSTER**

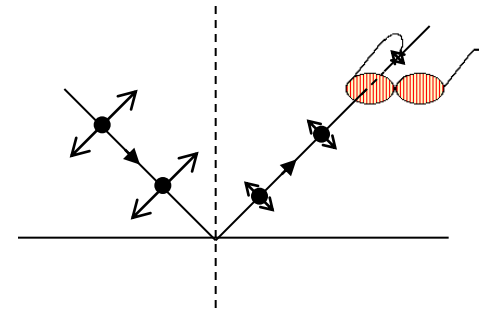
# ΣΥΝΟΠΤΙΚΑ

- Ανάλογα λοιπόν με την γωνία πρόσπτωσης του φωτός σε μια διηλεκτρική επιφάνεια το ανακλώμενο φως είναι:
  - ΜΗ ΠΟΛΩΜΕΝΟ: Αν  $\theta_{\pi} = 0^{\circ}$  ή  $90^{\circ}$ .
  - ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΓΡΑΜΜΙΚΑ ΠΟΛΩΜΕΝΟ: Αν  $\theta_{\pi} = \arctan \frac{n_2}{n_1}$   
(η πόλωση κάθετη στο επίπεδο της ανάκλασης)
  - ΜΕΡΙΚΩΣ ΠΟΛΩΜΕΝΟ: Για όλες τις υπόλοιπες τιμές της γωνίας πρόσπτωσης  $\theta_{\pi}$ .



# Ορισμένες εφαρμογές

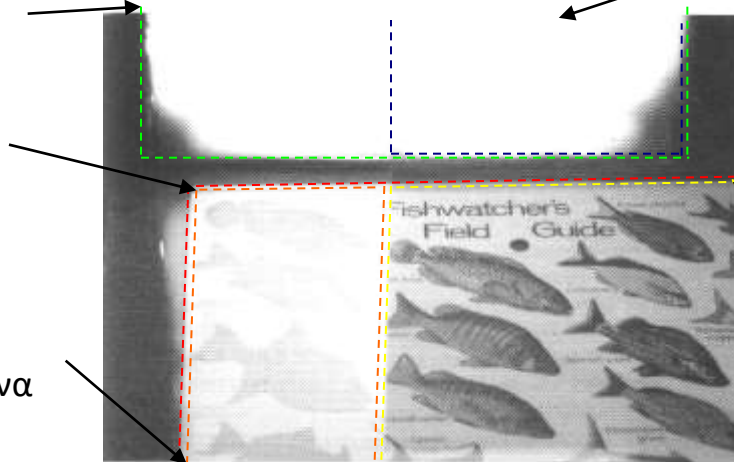
- Τα γυαλιά ηλίου με πολωτικά φίλτρα, σκοπεύουν στο να "αποκόψουν" το οριζόντια πολωμένο ανακλώμενο φως (που είναι κάθετο στο επίπεδο της ανάκλασης).
- Σε ορισμένες περιπτώσεις μάλιστα προκύπτουν "αναπάντεχα" αποτελέσματα.



Κατακόρυφη οθόνη που φωτίζεται από πίσω

Οριζόντια γυάλινη προθήκη

Στο τμήμα της γυάλινης προθήκης που προσπίπτει φυσικό φως δεν μπορούμε να δούμε εύκολα από κάτω

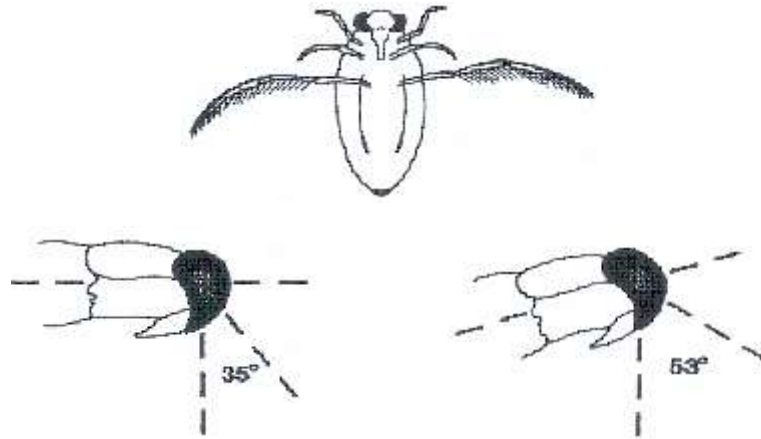


Φίλτρο που πολώνει κατακόρυφα το φως

Καθώς η φωτογράφιση έχει γίνει κοντά στη γωνία Brewster, στο τμήμα όπου προσπίπτει κατακόρυφα πολωμένο φως βλέπουμε κάτω από την επιφάνεια του γυαλιού

Υπάρχουν υποθέσεις σύμφωνα με τις οποίες ορισμένα πουλιά χρησιμοποιούν ένα παρόμοιο μηχανισμό προκειμένου να βλέπουν κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και να "ψαρεύουν".

Ο “ύπτιος κολυμβητής” (*Notonecta*) είναι ένα έντομο που ζεί στην επιφάνεια στάσιμων νερών και λιμνών



Κατά καιρούς πετά ψάχνοντας κάποια νέα κατοικία. (Η συνηθισμένη στάση του σώματος του εντόμου σε αυτές τις πτήσεις φαίνεται στο σχήμα)

Λίγο όμως πριν επιχειρήσει να κατέβει στην επιφάνεια της λίμνης το έντομο υιοθετεί τη διπλανή στάση

Η γωνία Brewster για την περίπτωση αέρα-νερού είναι περίπου  $53^\circ$ . Στη συγκεκριμένη θέση παρατήρησης λοιπόν, αναμένεται να έχουμε ανακλώμενο φως οριζόντια πολωμένο.

$$\tan \theta_{\pi} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$n_2 \text{ (νερό)} = 1,33 \quad n_1 \text{ (αέρας)} = 1$$

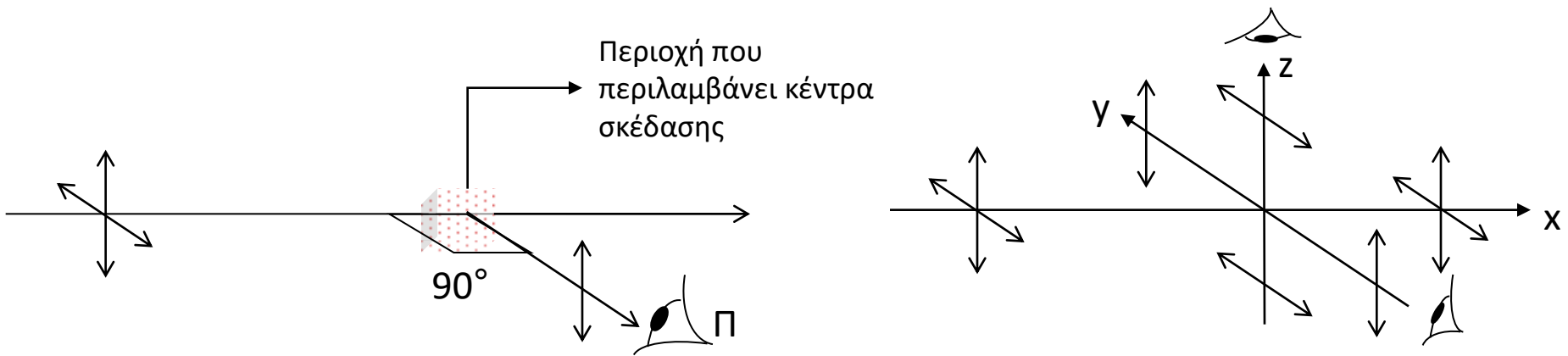
$$\tan \theta_{\pi} = 1,33 \Rightarrow \theta_{\pi} = 0,926 \text{ rad} \approx 53^\circ$$

Το έντομο ανιχνεύει με ειδικούς αισθητήρες που διαθέτει στο μάτι του το αν το φως είναι οριζόντια πολωμένο, και έτσι μπορεί να αντιληφθεί αν όντως η ανάκλαση προέρχεται από την επιφάνεια του νερού.

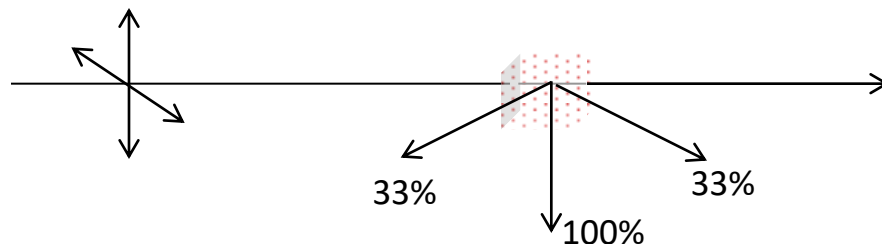


## 2) Πόλωση από σκέδαση

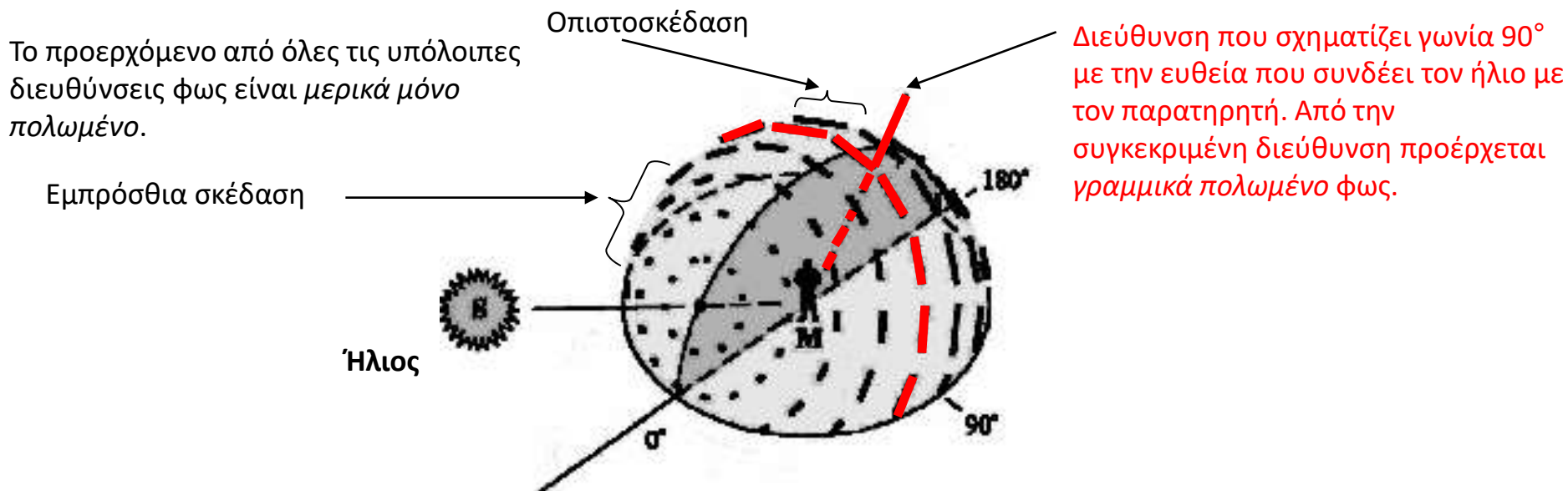
- Έστω ότι μη πολωμένο φως διέρχεται από μια περιοχή στην οποία υπάρχουν κάποια σκεδαστικά κέντρα. Τότε το φως που σκεδάζεται σε οποιαδήποτε διεύθυνση που σχηματίζει γωνία  $90^\circ$  με τη διεύθυνση διάδοσης θα είναι γραμμικά πολωμένο.



- Παρατηρώντας το φως σε οποιαδήποτε άλλη κατεύθυνση αντιλαμβανόμαστε μερικώς πολωμένο φως.



- Για την περίπτωση του ηλιακού φωτός, το επόμενο σχήμα δείχνει το βαθμό πόλωσης που αντιλαμβάνεται ένας παρατηρητής M ανάλογα με τη διεύθυνση από την οποία προέρχεται το φως.



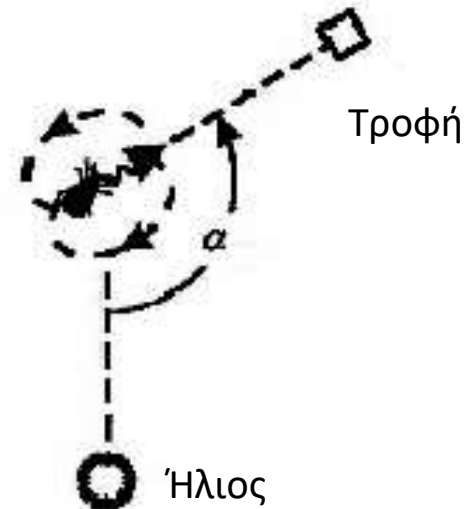
- Εξαιτίας των πολλαπλών σκέδασεων που υφίσταται το φως πριν φθάσει στον παρατηρητή, το τελικό αποτέλεσμα διαφέρει σημαντικά από την προηγούμενη θεωρητική κατανομή.



Δείτε το video στους "Συνδέσμους --> Οπτική --> Polarization of the Sky"

# Πως οι μέλισσες προσανατολίζονται με τη βοήθεια του πολωμένου φωτός

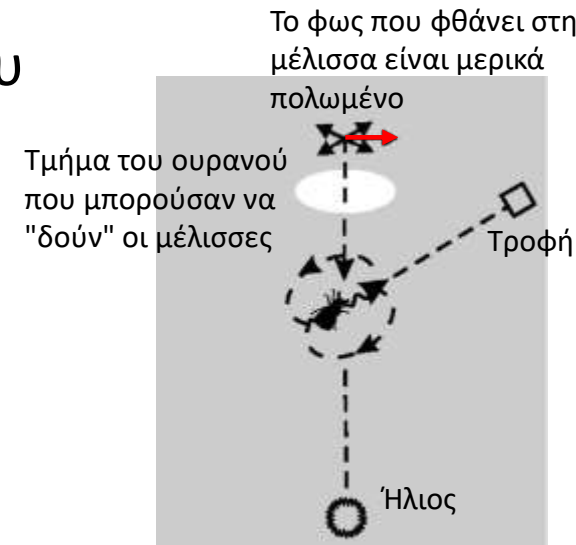
- Όταν οι εργάτριες μέλισσες γυρίζουν στην κυψέλη, χρησιμοποιούν ένα χορό προκειμένου να καθοδηγήσουν τις υπόλοιπες για το που βρίσκεται η τροφή.
- Αν ο ήλιος είναι ορατός, και ο χορός γίνεται σε οριζόντιο επίπεδο τότε το κεντρικό τμήμα του χορού δείχνει την κατεύθυνση, ως προς τον ήλιο, στην οποία βρίσκεται η τροφή.



- Ο Karl von Frisch παρατήρησε ότι οι μέλισσες μπορούσαν να πληροφορήσουν την κυψέλη για τη θέση της τροφής ακόμα και αν ο ήλιος δεν ήταν ορατός εφόσον όμως μπορούσαν να "βλέπουν" ένα τμήμα του ουρανού.
- Για να εξηγήσει την παρατήρηση έκανε την υπόθεση ότι οι μέλισσες μπορούσαν να ανιχνεύσουν και να χρησιμοποιήσουν το βαθμό πόλωσης του σκεδαζόμενου φωτός προκειμένου να "προσδιορίζουν" τη θέση του ήλιου.



**Karl von Frisch:** Βραβείο Νόμπελ στην Ιατρική και Φυσιολογία το 1973 (από κοινού με τους K. Lorenz και N. Tinbergen)

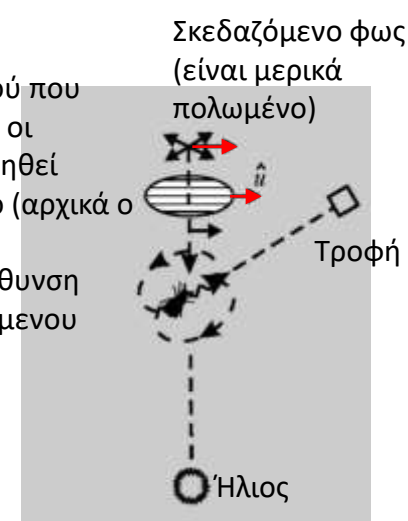


- Για να επιβεβαιώσει τη θεωρία του τοποθέτησε ένα πολωτικό φίλτρο στο άνοιγμα και παρατήρησε ότι:

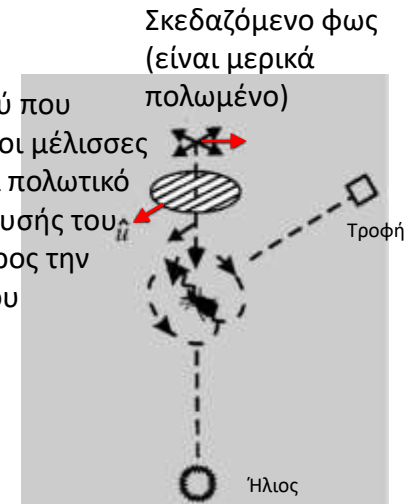
1) Όταν ο άξονας διέλευσης ήταν τέτοιος ώστε να διέρχεται η γραμμικά πολωμένη συνιστώσα του σκεδαζόμενου φωτός τότε ο χορός της μέλισσας έμενε ανεπηρέαστος.

2) Αντίθετα, αν ο άξονας διέλευσης του φίλτρου στρέφονταν, ώστε να αλλάξει η διεύθυνση του πολωμένου φωτός που έφθανε στη μέλισσα, τότε ο χορός της άλλαζε κατεύθυνση.

Στο τμήμα του ουρανού που μπορούσαν να "δούν" οι μέλισσες έχει τοποθετηθεί τώρα πολωτικό φίλτρο (αρχικά ο άξονας διέλευσής του ταυτίζεται με την διεύθυνση πόλωσης του σκεδαζόμενου φωτός)



Στο τμήμα του ουρανού που μπορούσαν να "δούν" οι μέλισσες έχει τοποθετηθεί τώρα πολωτικό φίλτρο (ο άξονας διέλευσής του έχει περιστραφεί ως προς την διεύθυνση πόλωσης του σκεδαζόμενου φωτός)





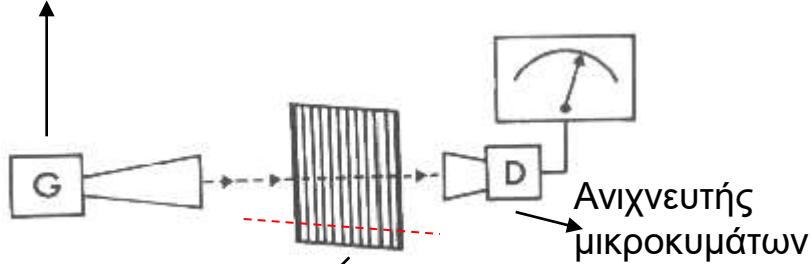
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

**Γραμμικός Διχρωϊσμός – Φίλτρα Polaroid**

# Μια εξήγηση του Διχρωϊσμού

## ΠΕΙΡΑΜΑ ΠΟΛΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ

Πηγή εκπομπής μικροκυμάτων



Συρμάτινο πλαίσιο το οποίο δρά ως πολωτής. Ο **άξονας διέλευσης** είναι κάθετος στα σύρματα δηλ. από τον πολωτή αυτό διέρχεται μόνο η κατάσταση πόλωσης όπου το διάνυσμα  $\vec{E}$  είναι κάθετο στα σύρματα.

- Τα ελεύθερα  $e^-$  των συρμάτων τίθενται σε κίνηση στη διεύθυνση που τους επιβάλλει το διάνυσμα  $\vec{E}$ .

1) Αν η κίνηση γίνεται κατά μήκος των συρμάτων, τότε η προσπίπτουσα ενέργεια μετατρέπεται σε θερμική.

2) Αν αντίθετα το διάνυσμα  $\vec{E}$

ασκεί δύναμη στα  $e^-$  κάθετα προς τα σύρματα, επειδή η κινητικότητά τους σε αυτή τη διεύθυνση είναι περιορισμένη, δεν έχουμε μετατροπή, σε μεγάλο ποσοστό, της προσπίπτουσας φωτεινής ενέργειας σε θερμική.

# Τα φίλτρα από polaroid

- Τα φίλτρα polaroid (ανακαλύφθηκαν από τον E. Ladd το 1932) μπορούν να θεωρηθούν σαν τέτοια πλέγματα τα οποία σχηματίζονται από πολυμερές που τείνεται (ώστε τα μόρια του πολυμερούς να διαταχθούν σε ευθείες παράλληλες γραμμές ακριβώς όπως τα σύρματα). Πάνω στα μόρια των υδρογονανθράκων προσροφώνται άτομα ιωδίου τα οποία παρέχουν τα απαραίτητα ελεύθερα ηλεκτρόνια.
- Ο πιο γνωστός κρύσταλλος που εμφανίζει αυτή την ιδιότητα είναι ημιπολύτιμος λίθος τουρμαλίνη.

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Κυκλικός Διχρωϊσμός & Κυκλική  
Διπλοθλαστικότητα

# Μια Αλλαγή Οπτικής

- Η μέχρι στιγμής ανάλυση βασίστηκε σε δύο ανεξάρτητες γραμμικές καταστάσεις πόλωσης (οριζόντια & κατακόρυφη) και τη σύνθεσή τους. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η ίδια ανάλυση μπορεί να επιτευχθεί στη βάση δύο ανεξάρτητων κυκλικών καταστάσεων πόλωσης (δεξιόστροφη & αριστερόστροφη).

ΚΑΡΤΕΣΙΑΝΗ ΑΝΑΛΥΣΗ: Ανάκλαση

ΚΥΚΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΠΟΛΩΣΗΣ: Διέλευση του φωτός από οπτικά ενεργές ουσίες.

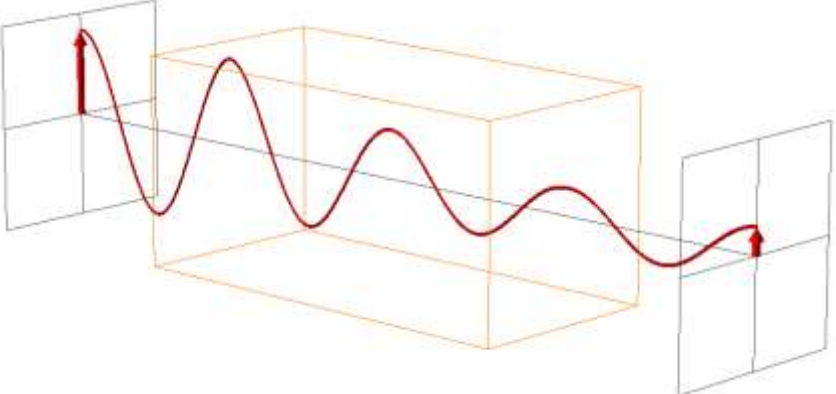
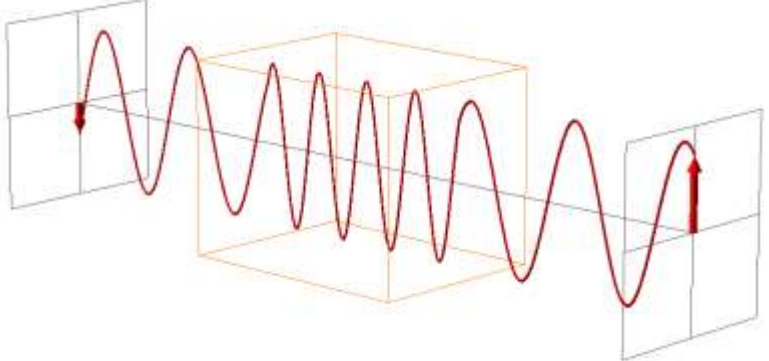
Το βασικότερο σημείο που μας ενδιαφέρει είναι ότι η **σύνθεση δεξιόστροφα και αριστερόστροφα πολωμένου φωτός με τα ίδια πλάτη** οδηγεί σε γραμμικά πολωμένο φως.

**EMANIM**

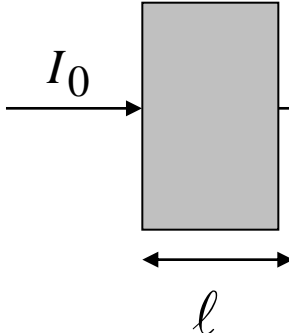


# Αλληλεπίδραση του Φωτός με την Ύλη I

- Κατά τη διέλευση του φωτός από την ύλη συμβαίνουν δύο βασικά φαινόμενα.

<b>ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ</b>	Η ένταση του φωτός (δηλ. ουσιαστικά το πλάτος του κύματος) μειώνεται.	
<b>ΕΛΑΤΤΩΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ</b>	Η ταχύτητα του φωτός μειώνεται.	

# Αλληλεπίδραση του Φωτός με την Ύλη ΙΙ

<b>ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ</b>	Το φαινόμενο περιγράφεται από την απορρόφηση $A$ .	 $A = \log \frac{I_0}{I} = C \cdot \varepsilon \cdot \ell$ <p>Νόμος Beer-Lambert.</p> <p>όπου: <math>C</math> η συγκέντρωση <math>\ell</math> το μήκος του δείγματος <math>\varepsilon</math> γραμμομοριακός συντελεστής απορρόφησης</p>
<b>ΕΛΑΤΤΩΣΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ</b>	Το φαινόμενο περιγράφεται από το δείκτη διάθλασης $n$ .	$n = \frac{c_0}{c}$ <p>όπου: <math>c_0</math> η ταχύτητα του φωτός στο κενό και <math>c</math> η ταχύτητα του φωτός στο υλικό.</p>

# Κυκλικός Διχρωϊσμός & Κυκλική Διπλοθλαστικότητα

ΜΕΣΟ ΔΙΑΔΟΣΗΣ

Το μέσο διάδοσης απορροφά σε διαφορετικό βαθμό το δεξιόστροφα και το αριστερόστροφα πολωμένο φως

Το μέσο διάδοσης εμφανίζει διαφορετικές απορροφήσεις για το δεξιόστροφα ( $A_R$ ) και το αριστερόστροφα ( $A_L$ ) πολωμένο φως

Η διαφορά των δύο αυτών απορροφήσεων  $A_R - A_L$  ονομάζεται **ΚΥΚΛΙΚΟΣ ΔΙΧΡΩΪΣΜΟΣ** (Circular Dichroism)

Το δεξιόστροφα και το αριστερόστροφα πολωμένο φως διαδίδονται με διαφορετική ταχύτητα στο μέσο

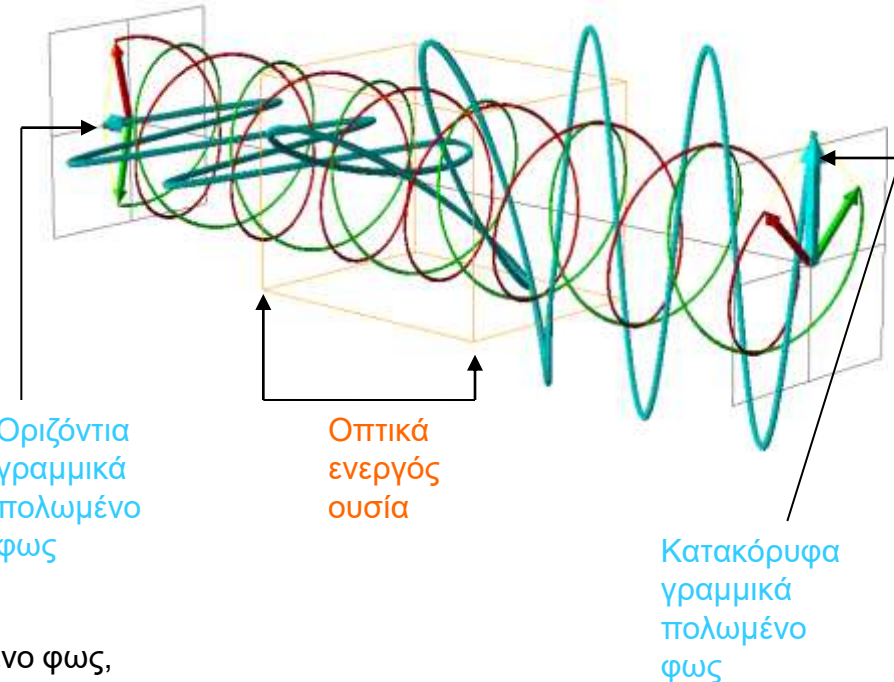
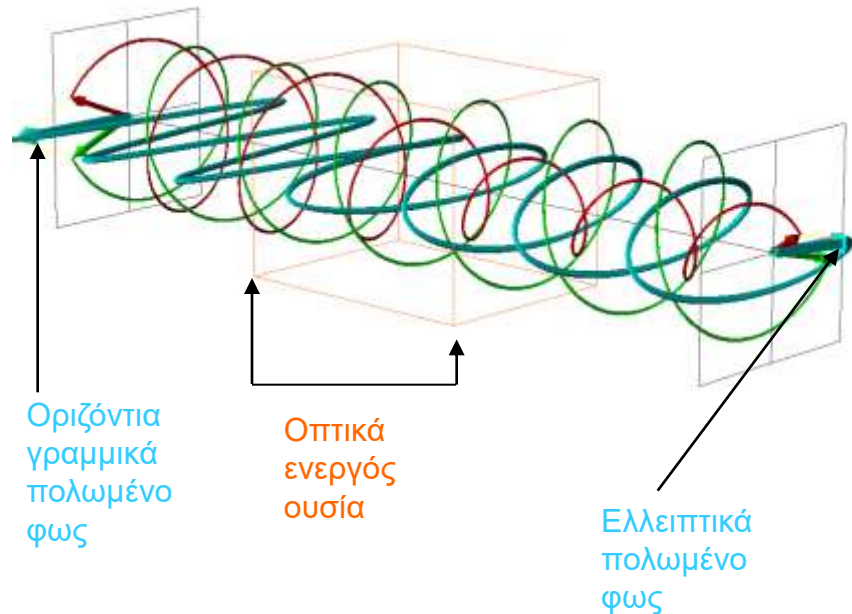
Το μέσο διάδοσης εμφανίζει διαφορετικούς δείκτες διάθλασης για το δεξιόστροφα ( $n_R$ ) και το αριστερόστροφα ( $n_L$ ) πολωμένο φως

Η διαφορά των δύο αυτών δεικτών διάθλασης  $n_R - n_L$  ονομάζεται **ΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΠΛΟΘΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ** (Circular Birefringence)

# Κυκλικός Διχρωϊσμός & Κυκλική Διπλοθλαστικότητα

Η ύπαρξη κυκλικού διχρωϊσμού έχει ως αποτέλεσμα αν στην ουσία προσπέσει γραμμικά πολωμένο φως αυτό να μετατραπεί σε ελλειπτικά πολωμένο

Η ύπαρξη κυκλικής διπλοθλαστικότητας έχει ως αποτέλεσμα αν στην ουσία προσπέσει γραμμικά πολωμένο φως να στραφεί το επίπεδο πόλωσής του



**ΚΟΚΚΙΝΟ:** Αριστερόστροφα πολωμένο φως,

**ΠΡΑΣΙΝΟ:** Δεξιόστροφα πολωμένο φως (θεωρούμε ότι δεν απορροφάται καθόλου)

# Πολωτές



Η λειτουργία όλων των γραμμικών πολωτών βασίζεται σε έναν από τους εξής τέσσερις μηχανισμούς:

- 1) *ΕΠΙΛΕΚΤΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ (ΔΙΧΡΩΪΣΜΟΣ)*
- 2) *ΔΙΠΛΟΘΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ*
- 3) *ΑΝΑΚΛΑΣΗ*
- 4) *ΣΚΕΔΑΣΗ*



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

## Φασματοσκοπική τεχνική κυκλικού διχρωϊσμού (Circular Dichroism - CD)

**Circular Dichroism  
J-810 Spectrometer**



JASCO has manufactured Circular Dichroism spectrometers for 60 years. The J-810 is the latest in a line of innovative products. It is the most advanced CD instrument on the market today and combines JASCO's 60 years of experience in the field of optical spectroscopy.

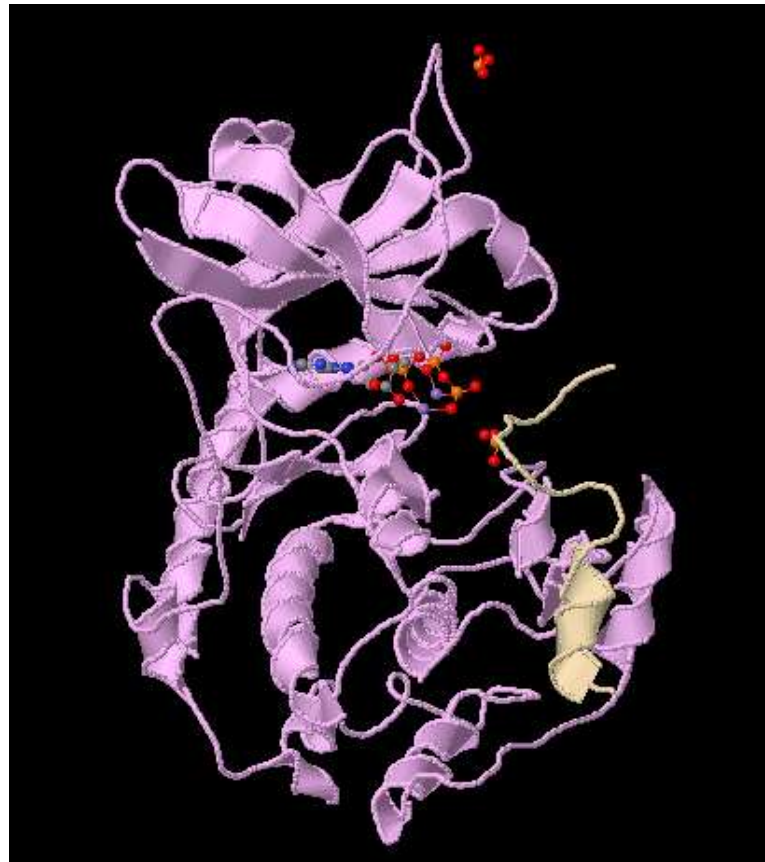
- Circular Dichroism (CD) Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer
- J-810 JASCO CD Spectrometer

**Refolding measurement of Cytochrome**



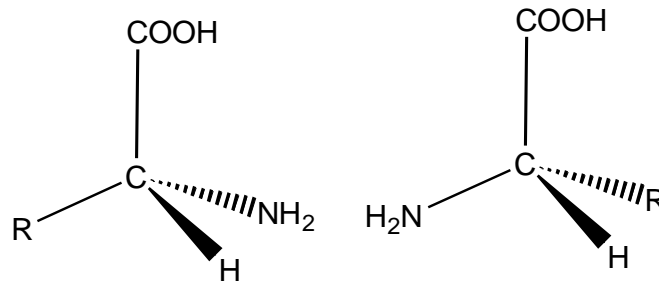
Cytochrome c is an integral membrane protein. The protein is synthesized in the cytosol of the cell and is transported to the mitochondria where it is inserted into the outer mitochondrial membrane. The protein is then imported into the intermembrane space where it is inserted into the inner mitochondrial membrane. The protein is then inserted into the inner mitochondrial membrane and is inserted into the inner mitochondrial membrane.

# ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΠΡΩΤΕΪΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΟΥ CD



# Που οφείλεται ο κυκλικός διχρωϊσμός στις πρωτεΐνες;

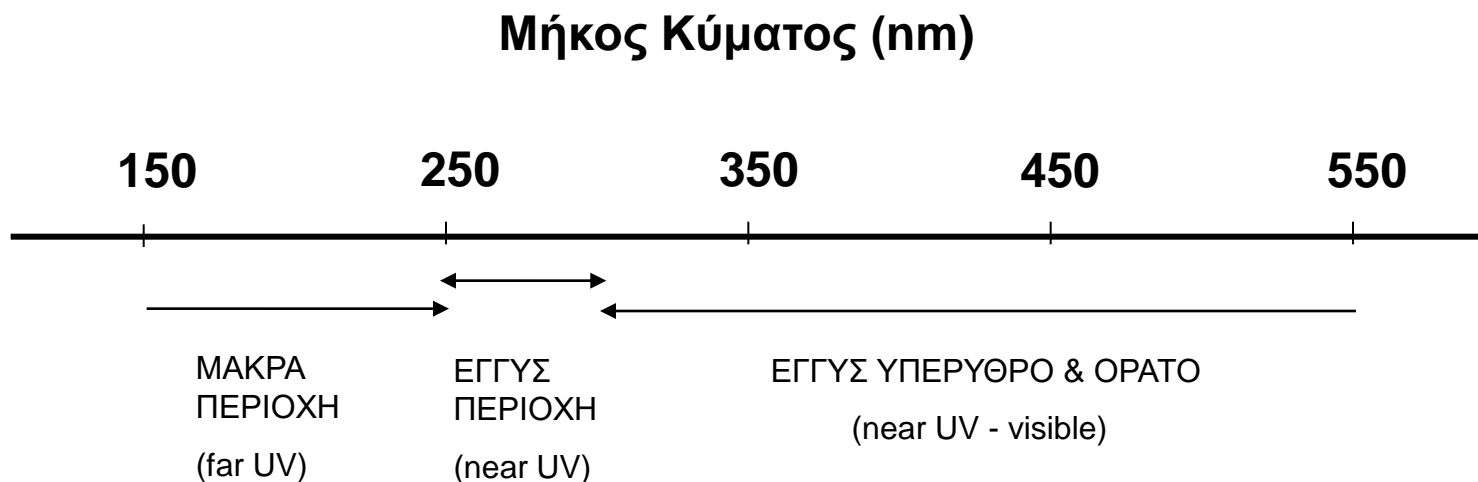
- Οι πρωτεΐνες αποτελούνται από αμινοξέα που (με την εξαίρεση της γλυκίνης) είναι οπτικά ενεργά καθώς έχουν ασύμμετρο άτομο C.



- Εκτός όμως από τα αμινοξέα, τα στοιχεία της δευτεροταγούς δομής (α-έλικα, β πτυχωτή επιφάνεια) επιβάλλουν επιπλέον χειρομορφία στο μόριο της πρωτεΐνης.
- Επιπλέον, είναι δυνατόν να δώσουν σήμα κυκλικού διχρωϊσμού πρόσθετες ομάδες που συνδέονται σε μια πρωτεΐνη (π.χ. ομάδα της αίμης κ.ο.κ.)
- Τέλος σε ορισμένες περιοχές του φάσματος είναι δυνατόν να δίνουν σήμα κυκλικού διχρωϊσμού οι πλευρικές ομάδες των αμινοξέων (κυρίως η τρυπτοφάνη και η τυροσίνη).

# «Παράθυρα» του φάσματος στα οποία μελετάμε τις πρωτεΐνες

- Όλες αυτές οι συνεισφορές εμφανίζονται σε διαφορετικά τμήματα του φάσματος όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.

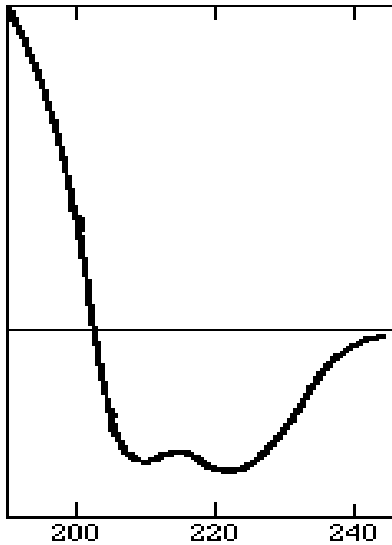


<b>ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΧΡΩΜΟΦΟΡΑ</b>	ΔΕΥΤΕΡΟΤΑΓΗΣ ΔΟΜΗ	ΑΡΩΜΑΤΙΚΕΣ ΠΛΕΥΡΙΚΕΣ ΑΛΥΣΙΔΕΣ	ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΟΜΑΔΕΣ
---------------------------	-------------------	-------------------------------	------------------

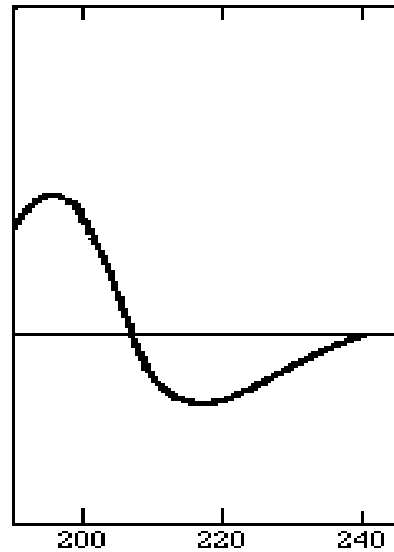
# Μελέτη της δευτεροταγούς δομής των πρωτεϊνών I

- Στα παρακάτω τρία σχήματα φαίνεται το CD φάσμα για την περίπτωση πολυπεπτιδικών αλυσίδων όταν η δευτεροταγής δομή αυτών είναι γνωστή.

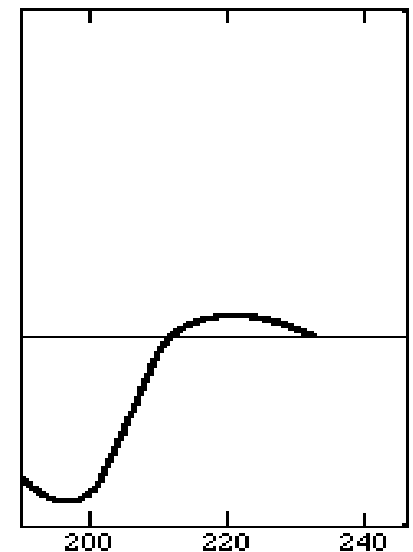
**α - έλικα**

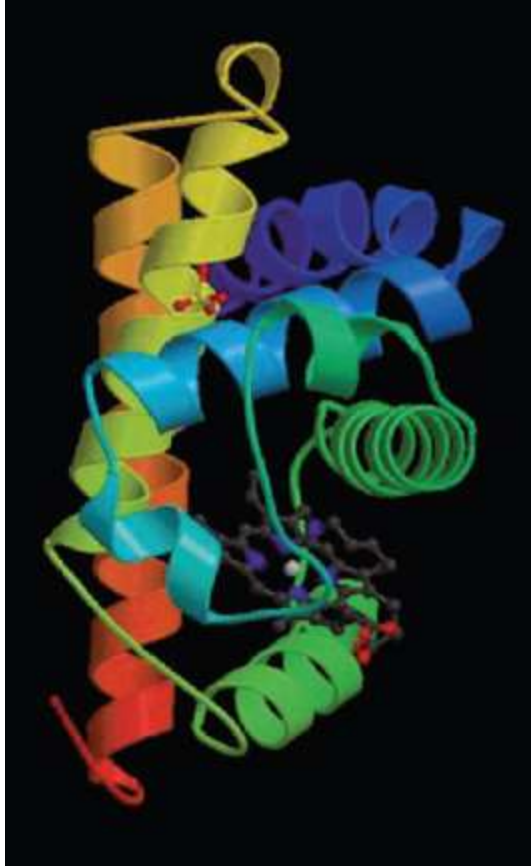


**β - πτυχωτή επιφάνεια**

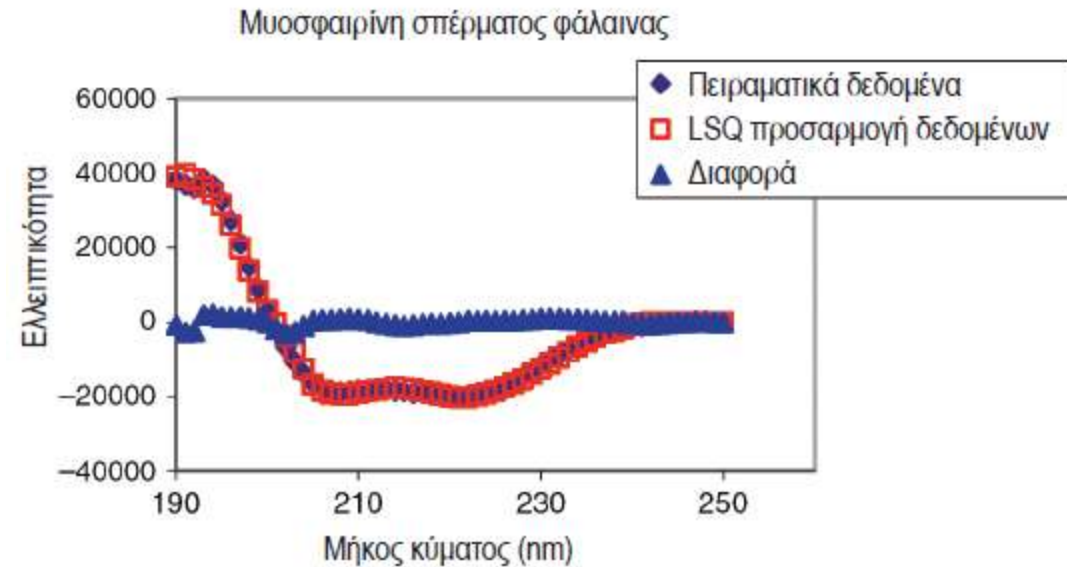
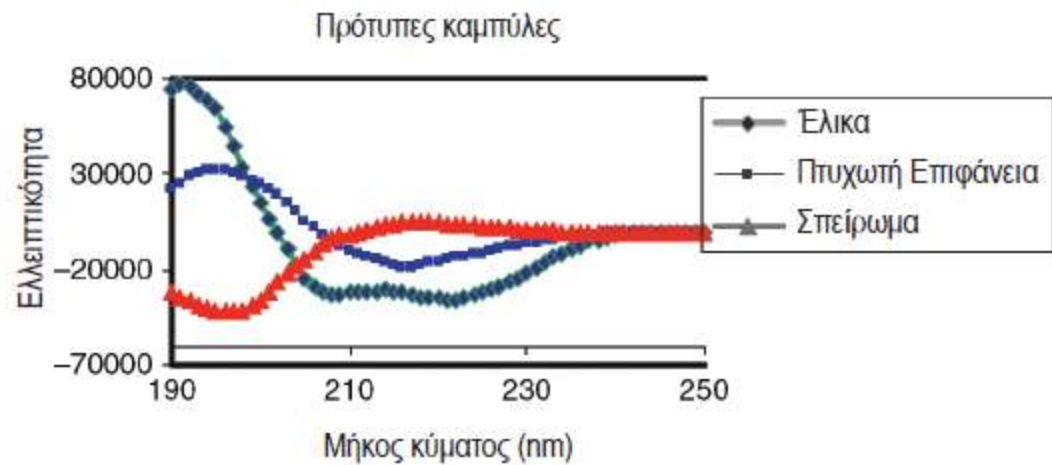


**τυχαίο σπείραμα**





πρωτεΐνη μυοσφαιρίνη  
από σπέρμα φάλαινας

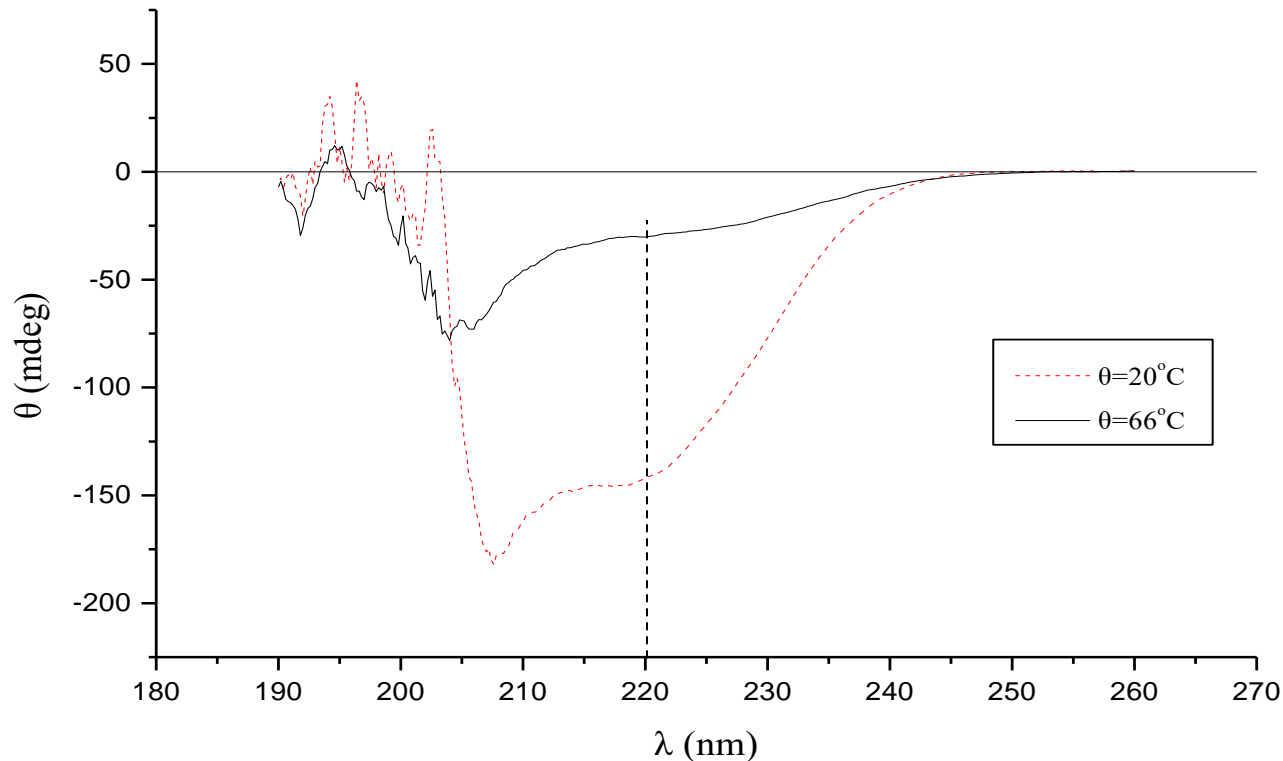


Η βέλτιστη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα επιτυγχάνεται με τον κατάλληλο συνδυασμό των τριών πρότυπων καμπύλων που αποκαλύπτει την αναλογία, στη δευτεροταγή δομή της πρωτεΐνης, των δομικών στοιχείων που αυτές περιγράφουν.



# Παρακολούθηση δομικών αλλαγών στις πρωτεΐνες I

- Αν μεταβάλλουμε το pH ή τη θερμοκρασία συμβαίνει μετουσίωση της πρωτεΐνης (δηλ. η πρωτεΐνη χάνει τη λειτουργικότητά της αποδιατασσόμενη). Όμως η αποδιατεταγμένη πρωτεΐνη έχει διαφορετικό CD φάσμα από το φάσμα που έχει η λειτουργική μορφή.



# Παρακολούθηση δομικών αλλαγών στις πρωτεΐνες ΙΙ

- Μπορούμε λοιπόν να επιλέξουμε ένα ορισμένο μήκος κύματος (και πιο συγκεκριμένα εκείνο στο οποίο η διαφορά στην ελλειπτικότητα είναι μέγιστη) και να παρακολουθήσουμε πως αλλάζει η τιμή της ελλειπτικότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (ή του pH).

