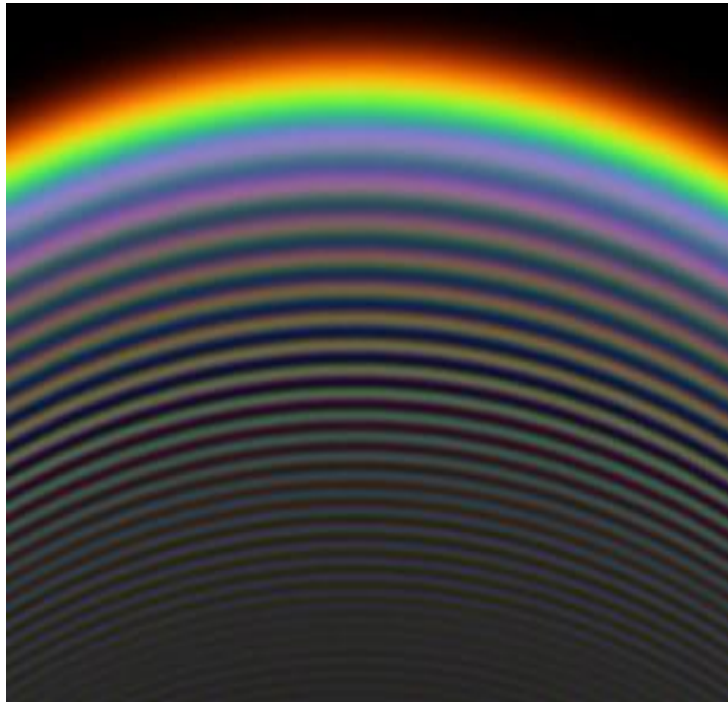


# κύματα

$$E = E_{\max} \eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

εξισώσεις ηλεκτρομαγνητικού κύματος

$$B = B_{\max} \eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$



$$\eta\mu A + \eta\mu B = 2\sigma\upsilon\upsilon(A - B)/2 \eta\mu(A+B)/2$$

εξίσωση κύματος:  $\psi = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right)$

εξίσωση συμβολής:  $\psi = 2A\sigma\upsilon\upsilon 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda}\right)$

εξίσωση στάσιμου:  $\psi = 2A\sigma\upsilon\upsilon \frac{2\pi x}{\lambda} \eta\mu \frac{2\pi t}{T}$

## Κύμα

είναι η διάδοση μιας διαταραχής (από μια πηγή) στο χώρο.

Προσοχή: Κατά τη διάδοση ενός κύματος μεταφέρεται **ενέργεια** και **ορμή** από το ένα σημείο του μέσου στο άλλο, **όχι όμως και ύλη**.

## Ταχύτητα διάδοσης

ενός κύματος είναι η σταθερή ταχύτητα με την οποία διαδίδεται ένα κύμα σε ένα μέσον και εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του μέσου που διαταράσσεται (πχ την πυκνότητα ή τη θερμοκρασία) και όχι από το πόσο ισχυρή είναι η διαταραχή.

$$U = \frac{\chi}{t} = \text{σταθ}$$

Προσοχή: Η ταχύτητα διάδοσης του κύματος δεν έχει καμία σχέση με την μεταβαλλόμενη ταχύτητα, με την οποία ταλαντώνονται τα μόρια του ελαστικού μέσου.

## Αρμονικό

ή ημιτονοειδές **κύμα** είναι εκείνο στο οποίο η πηγή, αλλά και τα μόρια του ελαστικού μέσου εκτελούν απλή αρμονική ταλάντωση.

Τελικά το κύμα δεν είναι παρά ένα άπειρο πλήθος μορίων του ελαστικού μέσου, που εκτελούν ΓΑΤ ίδιας συχνότητας και πλάτους με την πηγή, με χρονική όμως καθυστέρηση ή **διαφορά φάσης** το ένα από το άλλο.

## Περίοδος (T)

του κύματος είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο επαναλαμβάνεται η κυματική εικόνα.

## Μήκος κύματος ( $\lambda$ )

ονομάζεται η απόσταση στην οποία διαδίδεται το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου.



- Ορίζουμε επίσης το μήκος κύματος ως την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σημείων του μέσου, που απέχουν το ίδιο από τη θέση ισορροπίας τους και κινούνται κατά την ίδια φορά (πχ μεταξύ δύο διαδοχικών όρων).

- **Θεμελιώδης εξίσωση κύματος:**  $c = \lambda \cdot f = \lambda / T$

## Εξίσωση κύματος

- ♦ Η εξίσωση ενός απλού αρμονικού κύματος είναι:

$$\Psi_M = A \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

αν το κύμα διαδίδεται από τα αριστερά προς τα δεξιά ( $U > 0$ ), για σημείο M δηλαδή που βρίσκεται στα δεξιά της πηγής (με  $x > 0$ )

ενώ 
$$\Psi_M = A \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

αν το κύμα διαδίδεται κατά την αντίθετη φορά ( $U < 0$ ), για σημείο M δηλαδή που βρίσκεται αριστερά από τη πηγή (με  $x < 0$ )

• Η εξίσωση του κύματος προκύπτει από την εξίσωση ταλάντωσης της πηγής:  $\Psi_{\Pi} = A \eta \mu \omega t$ , αν εισάγουμε χρονική καθυστέρηση  $t_1 = x / U$ , για ένα σημείο M του ελαστικού μέσου, που απέχει απόσταση  $x$  από αυτήν, άρα  $\psi = A \eta \mu \omega (t - t_1)$

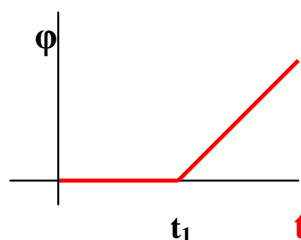
- Η εξίσωση (1) ισχύει μόνον για  $t > t_1$  (να έχει φτάσει το κύμα στο σημείο M).

- **Φάση**

ονομάζεται η γωνία  $2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$  ή  $2\pi \left( \frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$  {σε rad}

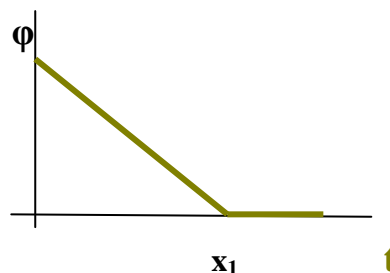
**προσοχή:** η φάση είναι συνάρτηση 2 μεταβλητών και μπορεί να παρασταθεί γραφικά μόνον αν μιλάμε για ένα συγκεκριμένο σημείο {οπότε έχω  $\varphi = f(t)$ } ή για μια ορισμένη χρονική στιγμή {οπότε έχω  $\varphi = f(x)$ }

Διάγραμμα της φάσης τυχαίου σημείου M, που απέχει απόσταση  $x_1$  από την πηγή  
**συναρτήσει του χρόνου**



παρατηρήστε ότι η φάση του σημείου M στο διάγραμμα  $\varphi = f(t)$  είναι αρχικά μηδέν, αφού μέχρι να φτάσει το κύμα στο σημείο M, αυτό ήταν ακίνητο

Διάγραμμα της φάσης τυχαίου σημείου M, που απέχει απόσταση  $x$  από την πηγή, για κύμα που διαδίδεται προς τα δεξιά, ( $U > 0$ )  
**συναρτήσει της θέσης**



παρατηρήστε ότι η φάση ενός σημείου M στο διάγραμμα  $\varphi = f(t)$  είναι μετά από μια απόσταση  $x_1$  μηδέν, αφού μέχρι εκεί έχει φτάσει το κύμα τη στιγμή  $t_1$ .

- **Διαφορά φάσης**

1. ενός σημείου σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta t / T$$

2. δύο διαφορετικών σημείων την ίδια χρονική στιγμή

$$\Delta\varphi = 2\pi\Delta x / \lambda \quad (\text{όπου } \Delta x \text{ η μεταξύ τους απόσταση})$$

Παρατηρήστε ότι είναι **σταθερή**, δεν μεταβάλλεται δηλαδή με τον χρόνο

Δύο σημεία του ελαστικού μέσου είναι **συμφασικά** (σε συμφωνία φάσης), έχουν δηλαδή κάθε στιγμή την ίδια απομάκρυνση από τη Θ.Ι., ίδια ταχύτητα, ίδια επιτάχυνση κλπ αν  $\Delta\varphi = 2k\pi$ , όταν δηλαδή απέχουν μεταξύ τους κατά

$$d = \Delta x = k\lambda$$

Ενώ δύο σημεία του ελαστικού μέσου βρίσκονται σε **αντίθεση φάσης** αν  $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$ , όταν δηλαδή απέχουν μεταξύ τους κατά

$$d = \Delta x = (2k+1)\lambda/2$$

- Αν η πηγή έχει αρχική φάση ( $\varphi_0$ ), είναι δηλαδή  $\psi_\pi = A\eta\mu(\omega t + \varphi_0)$ , τότε η εξίσωση του κύματος γράφεται:

$$\psi = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} + \frac{\varphi_0}{2\pi}\right)$$

- Η εξίσωση του κύματος περιγράφει την κίνηση κάθε σημείου του ελαστικού μέσου συναρτήσει του χρόνου, που δεν είναι παρά μια ταλάντωση με την ίδια συχνότητα και το ίδιο πλάτος με την πηγή (αν δεχθούμε ότι δεν έχουμε απώλειες ενέργειας), αλλά με διαφορά φάσης:  $\Delta\varphi = 2\pi x/\lambda$

- Η εξίσωση του κύματος είναι μια συνάρτηση με **δύο** ανεξάρτητες **μεταβλητές**: το χρόνο  $t$  και την απόσταση  $x$  από την πηγή, άρα δεν μπορεί να παρασταθεί στο επίπεδο (θα μπορούσαμε να το δούμε σε video).

- Αν διατηρήσουμε τη μία μόνο μεταβλητή, τον χρόνο  $t$ , θέτοντας  $x = \text{σταθ}$ , η εξίσωση (1) μας δίνει την ταλάντωση ενός σημείου του μέσου.

$$\psi = A\eta\mu 2\pi\left(\frac{t}{T} - \text{σταθ}\right)$$

Πρόκειται για μια εξίσωση της ΓΑΤ, την οποία εκτελεί ένα συγκεκριμένο σημείο του ελαστικού μέσου, που απέχει απόσταση  $x$  από την πηγή και εκτελεί την ίδια ταλάντωση με την πηγή, αλλά με ορισμένη διαφορά φάσης.

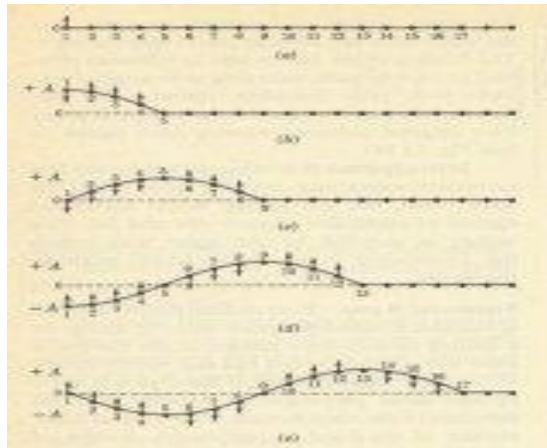
- **Στιγμιότυπο**

του κύματος λέγεται η γραφική παράσταση της εξίσωσης (1) του κύματος, αν «παγώσουμε» τον χρόνο θέτοντας  $t = \text{σταθ}$ , οπότε έχουμε μοναδική μεταβλητή το  $x$ .

Είναι δηλαδή η γραφική παράσταση της συνάρτησης:

$$\psi = A \eta \mu 2\pi \left( \text{σταθ} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

που μας δίνει τη θέση κάθε σημείου του ελαστικού μέσου τη στιγμή αυτή.

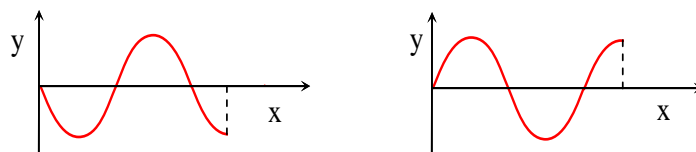


Στην παραπάνω εικόνα βλέπετε τα στιγμιότυπα ενός απλού εγκάρσιου αρμονικού κύματος, που αντιστοιχούν στις χρονικές στιγμές  $0$ ,  $T/4$ ,  $T/2$ ,  $3T/4$  και  $T$

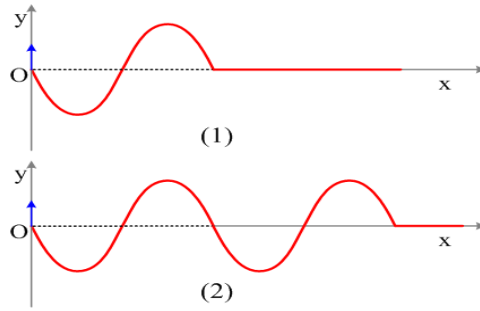
- **Σχεδιασμός στιγμιότυπου**

Για να σχεδιάσω το στιγμιότυπο ενός κύματος σε μια ορισμένη χρονική στιγμή, θα πρέπει να υπολογίσω την απόσταση  $x_1$  στην οποία έχει φτάσει το κύμα, τον αριθμό των κυμάτων ( $N = x_1 / \lambda$ ) που έχουν παραχθεί ως τη στιγμή εκείνη, αλλά και τη θέση και την κατεύθυνση της ταχύτητας της πηγής τη χρονική στιγμή εκείνη.

Προσοχή: **Μην** σχεδιάσετε ποτέ στιγμιότυπο όπως στα παρακάτω σχήματα.



αλλά όπως παρακάτω:



Στιγμιότυπα εγκάρσιου κύματος για  $t=T$  και  $t=2T$

Το άκρο δεξιά πρέπει πάντα να είναι σημείο ισοροπίας ( $\psi=0$ ) και όχι κάποιου πλάτους, αφού το ελαστικό μέσο **δεν σπάει** στο σημείο που έχει φτάσει το κύμα!!!

## Είδη κυμάτων

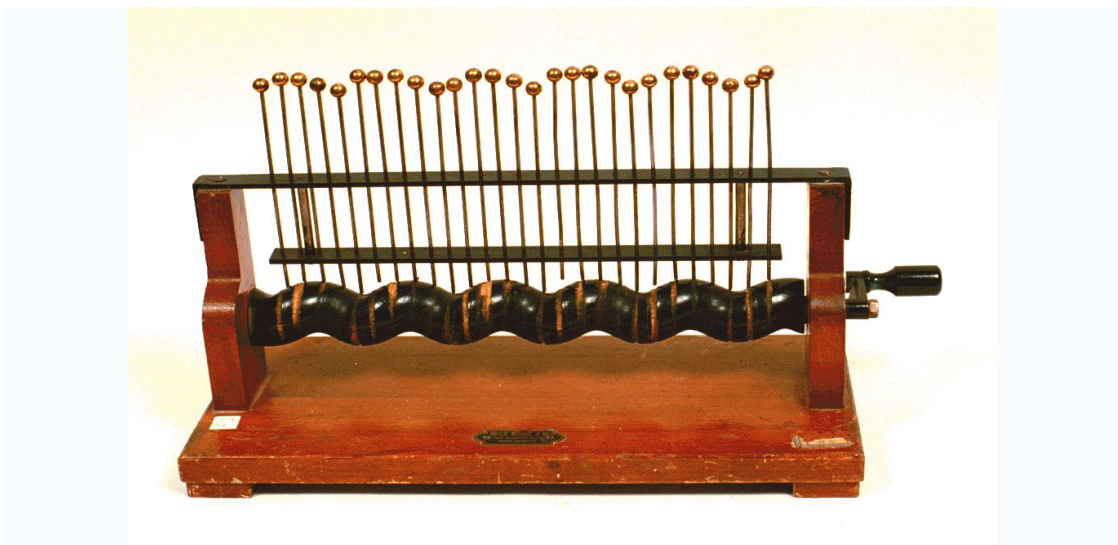
Τα κύματα διακρίνονται σε **διαμήκη** και **εγκάρσια**, αλλά και σε **μηχανικά** και **ηλεκτρομαγνητικά**.

Τα **μηχανικά** διαδίδονται μόνον σε ελαστικά υλικά (πχ σε μία χορδή, ένα σχοινί ή στην ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού), με μικρή σχετικά ταχύτητα, όχι όμως και στο κενό, ενώ τα **ηλεκτρομαγνητικά** (πχ το φως) διαδίδονται και στο κενό, με την ταχύτητα του φωτός ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/sec).

Τα **εγκάρσια** διαδίδονται **μόνον στα** ελαστικά **στερεά** και (κατά προσέγγιση) στην ελεύθερη επιφάνεια των υγρών, ενώ τα διαμήκη (πχ ο ήχος) σε στερεά, υγρά και αέρια.

### Εγκάρσια

ονομάζονται τα κύματα στα οποία τα μόρια του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται **κάθετα** στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



## Συσκευή επίδειξης εγκάρσιου κύματος

Για παράδειγμα κουνώντας πάνω-κάτω την ελεύθερη άκρη ενός σχοινού δημιουργείται εγκάρσιο κύμα. Τέτοια εγκάρσια κύματα είναι και τα θαλάσσια κύματα. Καθώς το εγκάρσιο κύμα "ταξιδεύει" προς τα εμπρός το σχοινί ή η επιφάνεια του νερού αντίστοιχα ανεβοκατεβαίνει κάθετα προς τη διεύθυνση της διάδοσης. Σχηματίζονται δηλαδή "**όρη**" και "**κοιλιάδες**".

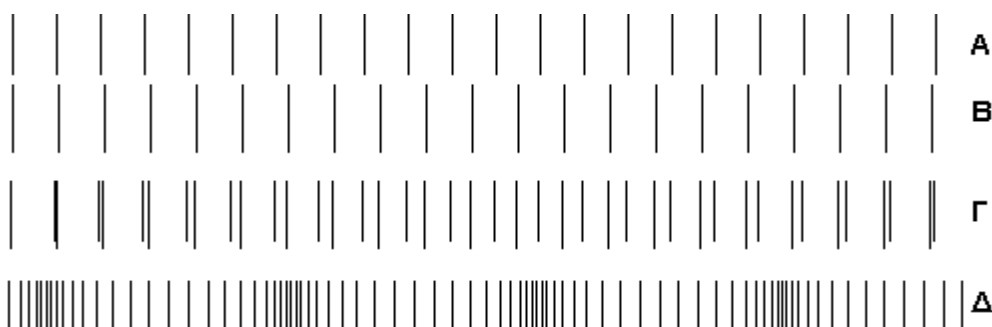
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα.

### Διαμήκη

ονομάζονται τα κύματα στα οποία τα μόρια του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται παράλληλα με τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος, σχηματίζοντας **πυκνώματα** και **αραιώματα**, τοπικές δηλαδή μεταβολές της πυκνότητας του μέσου.

### Επίδειξη διαμηκών κυμάτων

Την αίσθηση της διάδοσης των διαμηκών κυμάτων μπορούμε να την πετύχουμε χαράζοντας ισαπέχουσες γραμμές σε δύο διαφορετικές διαφάνειες.



Η απόσταση των γραμμών στην μία (A) είναι λίγο μικρότερη από την απόσταση που έχουν οι γραμμές στην άλλη (B). Όταν οι δύο διαφάνειες μπουν η μια πάνω στην άλλη προβάλλονται ταυτόχρονα (σχήμα Γ). Τότε μετακινώντας την πάνω διαφάνεια σιγά-σιγά κατά μήκος έχουμε την αίσθηση διάδοσης ενός διαμήκους κύματος (Δ).

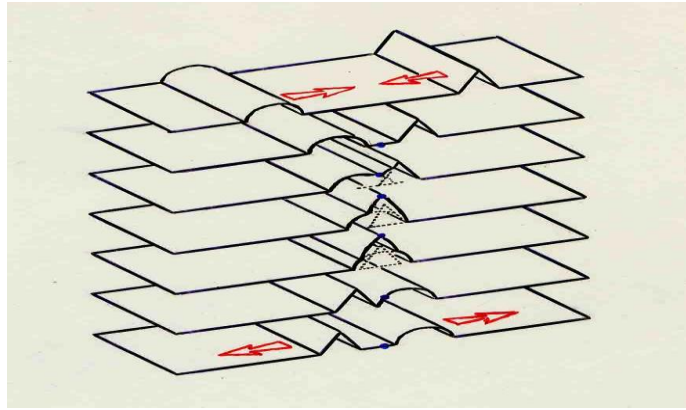
### Επαλληλία

ή

υπέρθεση κυμάτων :

### Αρχή της επαλληλίας:

Όταν στο ίδιο ελαστικό μέσο συμβάλλουν, δηλαδή διαδίδονται ταυτόχρονα δύο ή περισσότερα κύματα, **κάθε κύμα διαδίδεται σαν να μην υπήρχε το άλλο.**

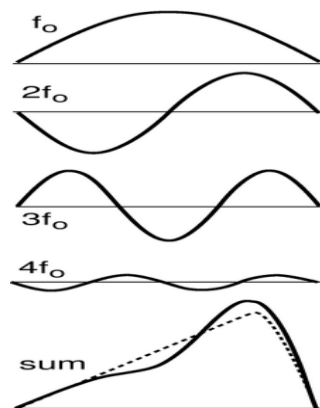


Στο παραπάνω σχήμα φαίνονται δύο κύματα, τα ένα ημικυκλικό και το άλλο τριγωνικό, που διαδίδονται ταυτόχρονα με αντίθετη φορά στο ίδιο μέσο. Διέρχονται το ένα μέσα από το άλλο χωρίς να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Όταν έχουν πια προσπεράσει το ένα το άλλο, διατηρεί το καθένα τα χαρακτηριστικά του.

#### Προσοχή:

Μοναδική **εξαιρέση** στην αρχή της επαλληλίας αποτελούν τα κύματα μεγάλης έντασης (πχ τα κύματα μιας **έκρηξης**), που μεταβάλλουν τις ιδιότητες του μέσου.

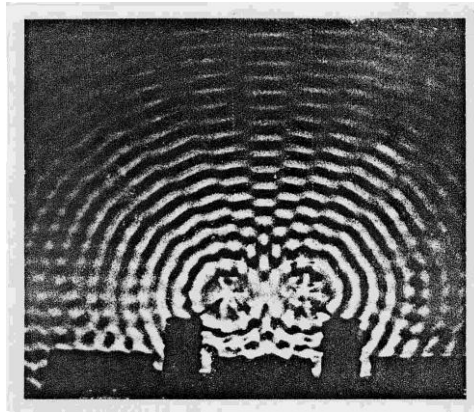
#### **Ανάλυση κατά Fourier:**



Ο Γάλλος μαθηματικός J. Fourier έδειξε, με βάση την αρχή της επαλληλίας, ότι κάθε περιοδικό μη αρμονικό κύμα συχνότητας  $f_0$ , οσοδήποτε πολύπλοκο κι αν είναι, μπορεί να θεωρηθεί σαν άθροισμα ενός αριθμού απλών αρμονικών κυμάτων, με διάφορα πλάτη και συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της πρώτης ( $f_0$ ).

#### **Συμβολή:**

ονομάζεται η ταυτόχρονη διάδοση δύο ή περισσότερων κυμάτων στην ίδια περιοχή ενός ομογενούς και ισότροπου ελαστικού μέσου.



## Εξίσωση της συμβολής

(δύο αρμονικών κυμάτων) :

$$\psi = 2A\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda} \eta\mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1 + r_2}{2\lambda} \right) \quad (2)$$

Είναι το άθροισμα δύο κυμάτων, που προέρχονται από **σύγχρονες πηγές** (δηλαδή συμφασικές  $\Delta\phi=0$ , που δημιουργούν δηλαδή ταυτόχρονα μέγιστα και ελάχιστα), με εξισώσεις:

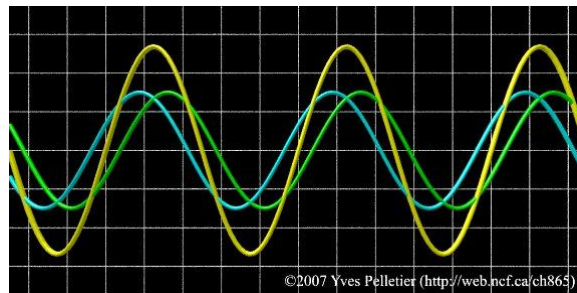
$$\Psi_1 = A\eta\mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_1}{\lambda} \right) \quad \text{και} \quad \Psi_2 = A\eta\mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{r_2}{\lambda} \right)$$

όπου  $r_1$  και  $r_2$  οι αποστάσεις του σημείου, του οποίου την κίνηση (ΓΑΤ) περιγράφει η εξίσωση (2), από τις δύο πηγές αντίστοιχα. Η διαφορετική απόσταση του σημείου από τις δύο πηγές δημιουργεί και διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο κύματα.

Η εξίσωση (2) ισχύει βέβαια με την προϋπόθεση ότι έχουν φτάσει στο σημείο Μ και τα δύο κύματα, άρα μόνον για  $t \geq t_2 > t_1$ , όπου και οι απαιτούμενοι χρόνοι για να φτάσει το καθένα από τα 2 κύματα στο Μ.

Από την εξίσωση (2), φαίνεται ότι τα σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται όλα με την ίδια συχνότητα, αλλά όχι με το ίδιο πλάτος.

Για ένα ορισμένο σημείο όμως το πλάτος  $A' = 2A\sigma\upsilon\nu 2\pi \frac{r_1 - r_2}{2\lambda}$  είναι σταθερό.



Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε ότι από την σύνθεση δύο απλών αρμονικών κυμάτων (το πράσινο και το γαλάζιο), με ίδιο πλάτος και την ίδια συχνότητα, αλλά με

διαφορά φάσης (δεν έχουν ταυτόχρονα μέγιστο) προκύπτει ένα απλό αρμονικό κύμα (το κίτρινο), της ίδιας συχνότητας, αλλά μεγαλύτερου πλάτους.

- Στα σημεία των οποίων οι αποστάσεις  $r_1$  και  $r_2$ , από τις δύο πηγές, διαφέρουν κατά ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$ , έχουμε **ενίσχυση**, ταλαντώνονται δηλαδή με **μέγιστο πλάτος** ( $|A'| = 2A$ ).

$$|r_1 - r_2| = N\lambda \quad (3) \quad \text{όπου } N = 0, 1, 2, 3, 4, \dots \quad (\text{συνφ} = \pm 1, \quad \varphi = N\pi)$$

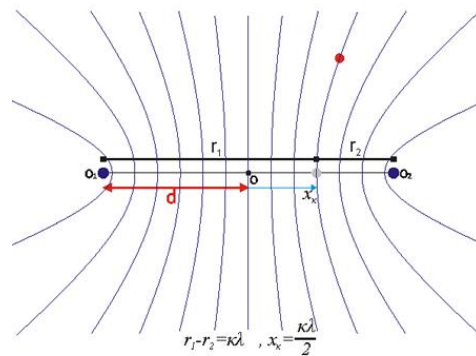
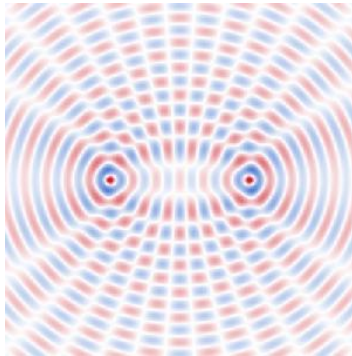
$$\text{ή } r_1 - r_2 = k\lambda \quad \text{όπου } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

- Στα σημεία των οποίων οι αποστάσεις  $r_1$  και  $r_2$ , από τις δύο πηγές, διαφέρουν κατά περιττό πολλαπλάσιο του μήκους κύματος  $\lambda$ , έχουμε **απόσβεση**, μένουν δηλαδή **διαρκώς ακίνητα** ( $|A'| = 0$ ).

$$|r_1 - r_2| = (2N + 1)\frac{\lambda}{2} \quad (4) \quad \{ \text{συνφ} = 0, \quad \varphi = (2N + 1)\pi/2 \}$$

$$\text{ή } r_1 - r_2 = (2k + 1)\lambda/2 \quad \text{όπου } k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

- Όλα τα υπόλοιπα σημεία κάνουν ταλάντωση με ενδιάμεσο πλάτος  $0 \leq A' \leq 2A$ .
- Ο γεωμετρικός τόπος των σημείων για τα οποία ισχύει  $|r_1 - r_2| = \text{σταθ.}$  είναι **τόξα υπερβολής**. Δηλαδή τόσο τα ακίνητα σημεία, όσο και τα σημεία ενίσχυσης, δεν κατανέμονται τυχαία στο χώρο, αλλά σχηματίζουν τόξα (κροσσούς) υπερβολής.



- Για να υπολογίσουμε τα σημεία ενισχυτικής συμβολής (ή απόσβεσης) που βρίσκονται μεταξύ των 2 πηγών, αν  $d$  η μεταξύ τους απόσταση, αρκεί να θεωρήσουμε ότι  $r_1 + r_2 = d$  (5) και να τη λύσουμε σαν σύστημα με τις (3) και (4).

- Συμβολή μπορώ να έχω και με μια μόνον πηγή, αν χρησιμοποιήσω έναν ανακλαστήρα (μια ανακλαστική επιφάνεια), οπότε μπορώ να έχω 2 όμοια κύματα με διαφορετικές διαδρομές. Η προβολή της πηγής ως προς την ανακλαστική επιφάνεια, λειτουργεί ως δευτερεύουσα πηγή κυμάτων.

## Στάσιμα κύματα

### Στάσιμο κύμα

ονομάζεται το αποτέλεσμα της συμβολής δύο κυμάτων της ίδιας συχνότητας και του ίδιου πλάτους, που διαδίδονται στο ίδιο μέσο με αντίθετες κατευθύνσεις.

Το στάσιμο δεν είναι κύμα, αλλά μια ιδιότυπη κατάσταση, όπου η ενέργεια που είχαν τα κύματα (πριν τη συμβολή) εγκλωβίζεται ανάμεσα στους δεσμούς.



- το στάσιμο δημιουργείται από τη συμβολή ενός κύματος διαδίδεται προς τα δεξιά

( $U > 0$ ), με εξίσωση: 
$$\psi = A \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

με το ανακλώμενο ( $U < 0$ ), που έχει εξίσωση: 
$$\psi = A \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

**Εξίσωση στάσιμου :**

$$\psi = 2A \sigma \upsilon \nu \frac{2\pi x}{\lambda} \eta \mu \frac{2\pi t}{T} \quad (3)$$

Αν θεωρήσουμε την ποσότητα  $A' = |2A\cos 2\pi x/\lambda|$  σαν πλάτος της ταλάντωσης, η εξίσωση της ταλάντωσης ενός σημείου του μέσου θα είναι:  $\psi = A'\eta\mu\omega t$

Προφανώς κάθε σημείο του μέσου θα εκτελεί α.α.τ. με διαφορετικό πλάτος  $A'$ , που εξαρτάται από τη θέση του ( $x$ ), όπου βέβαια  $0 \leq A' \leq 2A$

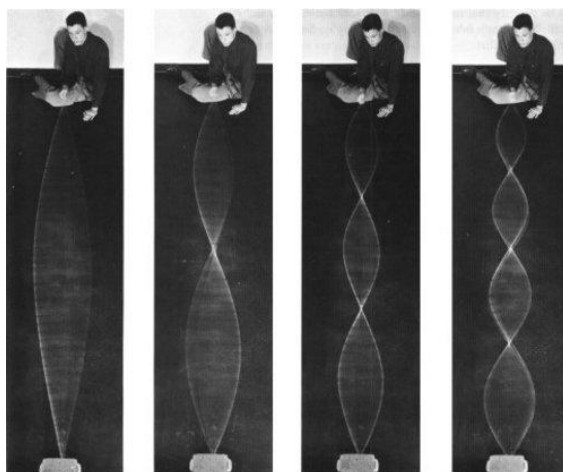
### Δεσμοί

(σημεία διαρκώς ακίνητα) :  $x = (2\kappa + 1)\frac{\lambda}{4}$  {  $\sin\phi = 0$  ,  $\phi = (2\kappa + 1)\pi/2$  }

### Κοιλίες

(σημεία μέγιστου πλάτους) :  $x = \kappa\frac{\lambda}{2}$  (  $\sin\phi = \pm 1$  ,  $\phi = \kappa\pi$  )

- Η **απόσταση** μεταξύ των διαδοχικών δεσμών, ή κοιλιών είναι ίση με  $(\frac{\lambda}{2})$  το μισό δηλαδή του μήκους κύματος  $\lambda$  των κυμάτων, από τη συμβολή των οποίων προήλθε το στάσιμο κύμα.
- Προσοχή: η εξίσωση (3) ισχύει μόνον αν στο σημείο  $x = 0$  (πηγή) έχουμε κοιλία.



Στάσιμα κύματα σε σχοινί (PSSC Physics.)

### Διαφορές κύματος και στάσιμου:

- Στο κύμα όλα τα σημεία εκτελούν την ίδια κίνηση, ενώ στο στάσιμο όχι.
- Κάθε σημείο του μέσου εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση, διαφορετικού πλάτους.
- Το πλάτος της ταλάντωσης δεν είναι ίδιο για όλα τα σημεία, αλλά εξαρτάται από τη θέση του.
- Τα σημεία μεταξύ δύο διαδοχικών δεσμών κινούνται συμφασικά.
- Τα σημεία εκατέρωθεν ενός δεσμού κινούνται με αντίθεση φάσης.

### Προσοχή

Σε χορδή με ακλόνητα και τα δύο άκρα, μπορεί να δημιουργηθεί στάσιμο, μόνον αν το μήκος  $L$  της χορδής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του  $\lambda/2$  του κύματος ( $L = N \cdot \lambda/2$ ).

### **Σχόλιο στα στάσιμα κύματα**

**Το αποτέλεσμα της συμβολής ενός προσπίπτοντος και ενός ανακλώμενου κύματος δεν είναι πάντα η δημιουργία ενός στάσιμου κύματος.** Για να συμβεί αυτό πχ σε τεντωμένο σκοινί, θα πρέπει ο χρόνος που χρειάζεται το εγκάρσιο κύμα για να διατρέξει το σκοινί, από το χέρι μας μέχρι το σταθερό άκρο και αντίστροφα, να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της περιόδου ταλάντωσης του σκοινοῦ.

Άρα θα πρέπει η συχνότητα ταλάντωσης του άκρου του σκοινοῦ να είναι ίση με μία από τις φυσικές ιδιοσυχνότητες του σκοινοῦ ή του σωλήνα Kundt ή οποιοδήποτε άλλου μέσου. Τότε το σκοινί θα βρίσκεται σε συντονισμό με το χέρι μας και το πλάτος ταλάντωσης στις κοιλίες του στάσιμου κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό του χεριού μας. Έτσι το χέρι μας θα βρίσκεται πολύ πιο κοντά σε δεσμό παρά σε κοιλία στάσιμου κύματος.

Ο σχηματισμός στάσιμου κύματος είναι ένα τυπικό παράδειγμα συντονισμού. Το σκοινί (συντονιστής) απορροφά ενέργεια από το χέρι μας (διεγέρτης). Σε κάθε περίοδο προσφέρεται επιπλέον ενέργεια στο στάσιμο με αποτέλεσμα να αυξάνεται το πλάτος στα διάφορα σημεία που δεν είναι δεσμοί με ταυτόχρονη αύξηση των απωλειών λόγω τριβής. Το πλάτος αυξάνεται συνεχώς μέχρι του σημείου που ο ρυθμός με τον οποίο προσφέρουμε ενέργεια γίνει ίσος με τον ρυθμό με τον οποίο χάνεται μηχανική ενέργεια λόγω τριβών.

Η κάθε διαφορετική ταλάντωση μιας χορδής λέγεται κανονικός τρόπος ταλάντωσης. Όταν όμως κτυπάμε μια χορδή ενός οργάνου διεγείρονται όλοι σχεδόν οι κανονικοί τρόποι ταλάντωσης με διαφορετικό πλάτος ο καθένας.

### Στιγμιότυπο (στάσιμου κύματος)

Τις χρονικές στιγμές  $t = kT/2$ , που η πηγή περνάει από τη  $\Theta.I.$  της, το ημωτ μηδενίζεται, οπότε έχω  $\psi = 0$  για κάθε  $x$ . Άρα τις στιγμές αυτές η χορδή είναι μια ευθεία γραμμή.

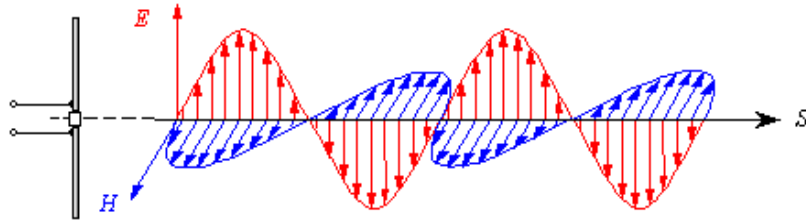


Μελέτη στάσιμων κυμάτων που δημιουργούνται στην ξύλινη επιφάνεια ενός βιολιού σε δύο διαφορετικές συχνότητες.

### Ηλεκτρομαγνητικό κύμα :

είναι η ταυτόχρονη διάδοση ενός ηλεκτρικού και ενός μαγνητικού πεδίου.

Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο κοντά στην κεραία έχουν διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Σε μεγάλες όμως αποστάσεις τα δύο πεδία είναι σε φάση.



- Τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι **κάθετα** μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- **Η αιτία** δημιουργίας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, είναι **η επιταχυνόμενη κίνηση** των ηλεκτρικών φορτίων.
- Ηλεκτρικά φορτία που κινούνται με σταθερή ταχύτητα (ηλεκτρικά ρεύματα σταθερής έντασης) ή ακίνητα, δημιουργούν ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία μη μεταβαλλόμενα χρονικά, δηλαδή δεν παράγουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

**Οι εξισώσεις** ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, που διαδίδεται στη διεύθυνση του άξονα x, είναι:

$$E = E_{\max} \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (4)$$

$$B = B_{\max} \eta \mu 2\pi \left( \frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (5)$$

όπου η πρώτη εκφράζει την ένταση του (χρονικά μεταβαλλόμενου) ηλεκτρικού πεδίου, ενώ η δεύτερη την ένταση του μαγνητικού πεδίου.

- Κάθε στιγμή το λόγος των μέτρων των εντάσεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, είναι ίσος με την ταχύτητα διάδοσης του κύματος.

$$C = E/B = E_{\max} / B_{\max}$$

- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι **εγκάρσια**.
- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα - όπως και τα μηχανικά - **υπακούουν στην αρχή της επαλληλίας**.
- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα **διαδίδονται στο κενό** με ταχύτητα :

$$C_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

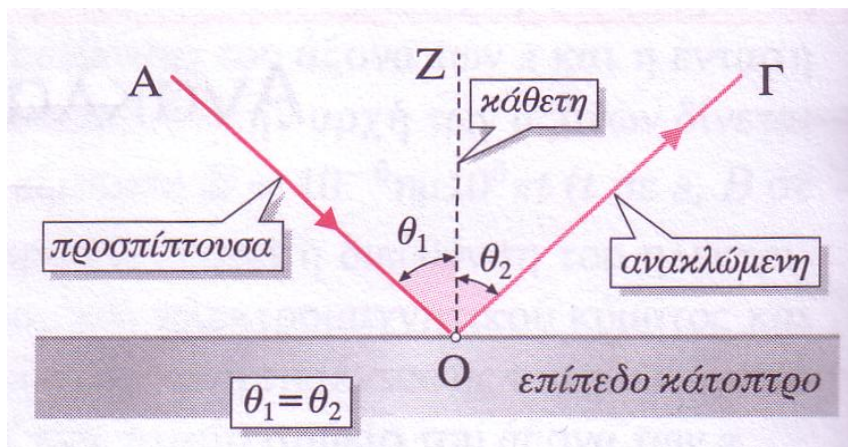
- Σε όλα τα άλλα υλικά διαδίδονται με μικρότερη ταχύτητα ( $C < C_0$ ).

το 'μαγικό' φαινόμενο  
της  
**ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ**



**Οι νόμοι της ανάκλασης:**

1. Η γωνία ανάκλασης  $\theta_r$  είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta_a$ .
2. Ανακλώμενη και προσπίπτουσα ακτίνα βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.



**Ανάκλαση:**

Δέσμη κύματος που φτάνει σε **επίπεδη** διαχωριστική επιφάνεια δύο υλικών διαφορετικού δείκτη διάθλασης (πχ έναν καθρέφτη), επιστρέφει και συνεχίζει να διαδίδεται στο 1<sup>ο</sup> υλικό.

**Διάχυση:**

Είναι η ανάκλαση σε **ανώμαλη** επιφάνεια (πχ τοίχο), όπου αν η προσπίπτουσα δέσμη αποτελείται από παράλληλες ακτίνες, οι ανακλώμενες ακτίνες έχουν τυχαίες διευθύνσεις.

## Διάθλαση

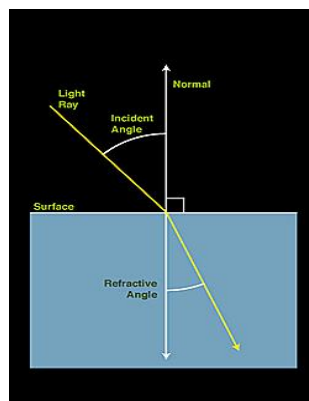
Είναι το φαινόμενο της **μεταβολής κατεύθυνσης ενός μετώπου κύματος**, όταν από υλικό με δείκτη διάθλασης  $n_1$  εισέρχεται σε υλικό με δείκτη  $n_2$



Ο λόγος της ταχύτητας του φωτός στο κενό ( $c$ ), προς την ταχύτητά του ( $c$ ) στο υλικό ονομάζεται **δείκτης διάθλασης** ( $n$ ) του οπτικού υλικού.

$$n = c_0 / c = \lambda_0 / \lambda$$

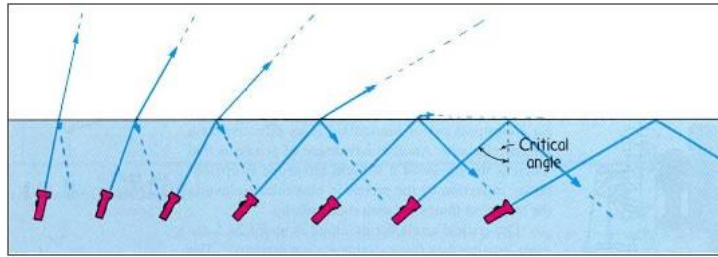
$$(n > 1, \text{ πχ } n = 1,3)$$



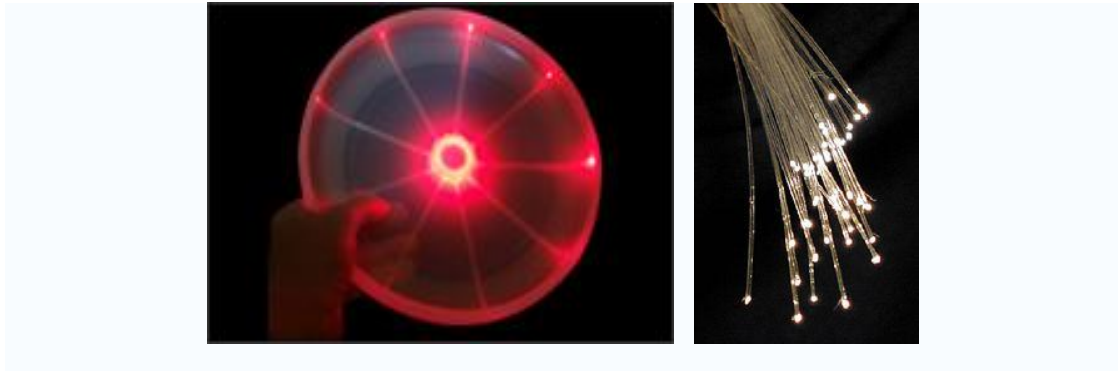
- Η προσπίπτουσα ακτίνα, η διαθλώμενη και η κάθετη στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μέσων, στο σημείο πρόσπτωσης της ακτίνας, βρίσκονται στο **ίδιο επίπεδο**.
- Στη διάθλαση ισχύει:  $n_1 \mu / n_2 \delta = n_2 / n_1$  (**νόμος του Snell**).
- Αν θέσω  $\delta = 90^\circ$ , δηλαδή  $n_2 \delta = 1$  και λύσω ως προς  $\pi$ , υπολογίζω τη  $\theta_{\text{crit}}$

$$n_1 \theta_{\text{crit}} = n_2$$

- Για γωνία πρόσπτωσης ( $\pi$ )  $> \theta_{\text{crit}}$  έχουμε **ολική ανάκλαση**.
- Ολική ανάκλαση παρατηρείται μόνον για κίνηση **από το πυκνό προς το αραιό**.



Το φαινόμενο της ολικής ανάκλασης και η εφαρμογή του στις οπτικές ίνες.



Οπτικές ίνες

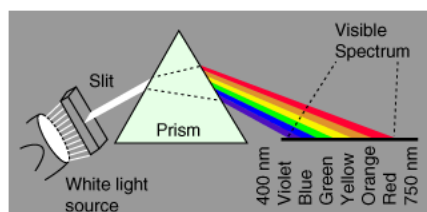
- **Διασκεδασμός**

ονομάζεται η εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.

Υλικό	Μπλε (486,1nm)	Κίτρινο (589.3nm)	Κόκκινο (656.3 nm)
Γυαλί	1,524	1,517	1,515
Νερό	1,337	1,333	1,331
Λάδι	1,530	1,520	1,516
Άνθρακας	1,652	1,628	1,618

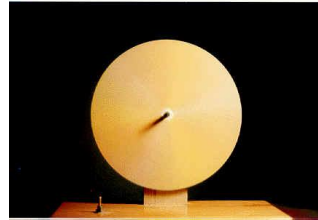
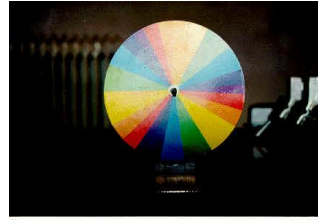
- **Ανάλυση**

Αποτέλεσμα του διασκεδασμού είναι η ανάλυση του λευκού φωτός, που είναι σύνθετο, άρα το κάθε του χρώμα (μήκος κύματος) έχει άλλη **γωνία εκτροπής**.



- **Σύνθεση**

Ο Νεύτωνας απέδειξε με τον γνωστό του δίσκο ότι η σύνθεση των χρωμάτων από τα οποία αποτελείται το λευκό φως, δίνει και πάλι λευκό φως.



Ο τροχός του Νεύτωνα

**Παράλληλη μετατόπιση**  
φωτεινής δέσμης  
λόγω **διπλής διάθλασης** σε παραλληλεπίπεδο πρίσμα

