

# ΜΕΡΟΣ II: Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

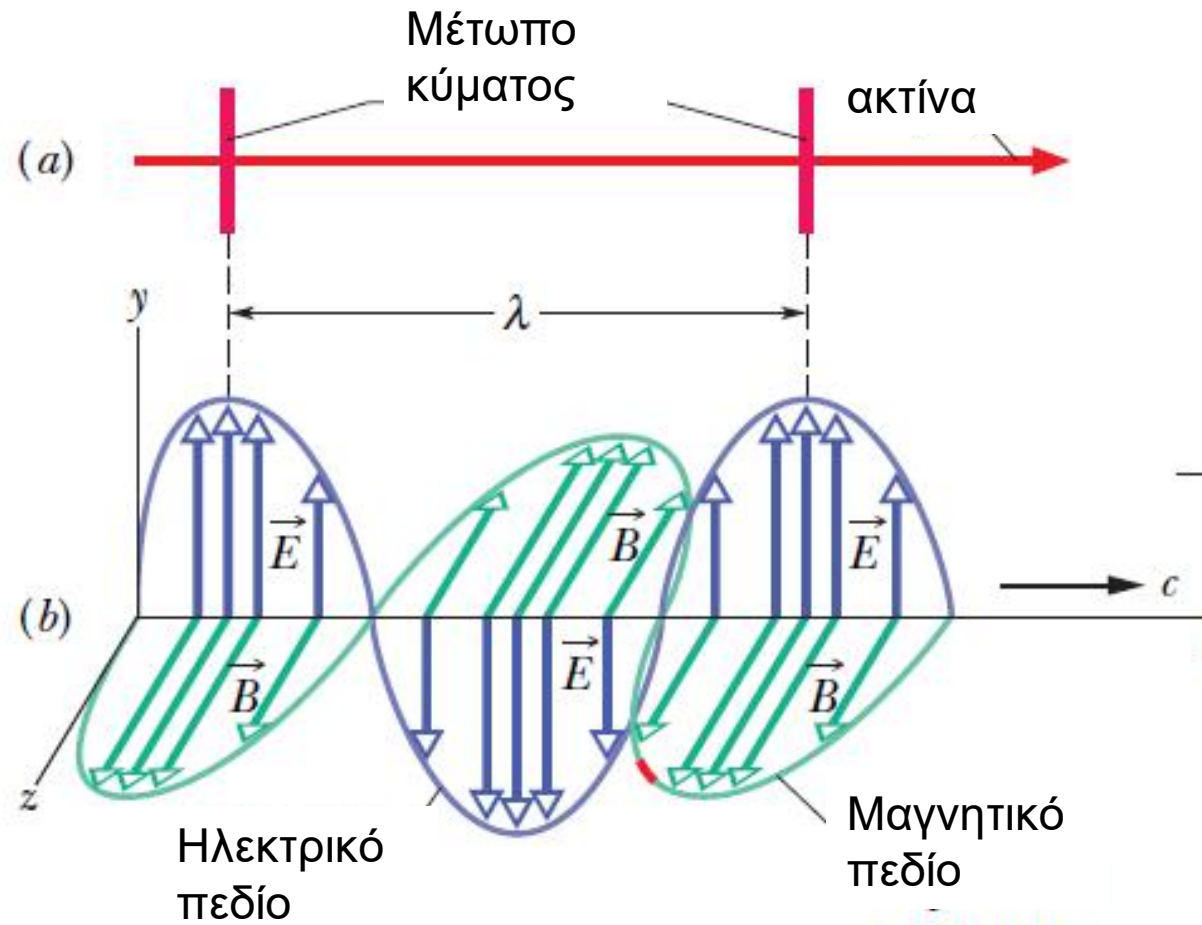
## Εισαγωγικά στοιχεία

# Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

- Στο πρώτο μέρος του μαθήματος μιλήσαμε για μηχανικά κύματα και είδαμε πως μεταφέρουν ενέργεια και ορμή. Μελετήσαμε επίσης διάφορα φαινόμενα που προκύπτουν από την υπέρθεση κυμάτων και από τη διάδοση κυμάτων διαφορετικών συχνοτήτων μέσα στην ύλη
- Στο δεύτερο μέρος θα ασχοληθούμε με τη δεύτερη μεγάλη κατηγορία κυμάτων που ευθύνονται για τη διάδοση ενέργειας στη φύση, τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα**.
- Τα ΗΜ κύματα προκύπτουν από το γεγονός ότι ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παράγει μαγνητικό πεδίο και αντιστρόφως. Μαθηματικά, προκύπτουν από τις λεγόμενες **εξισώσεις του Maxwell** που θα συναντήσετε του χρόνου στη Φ3.

# Βασικές ιδιότητες ΗΜ κυμάτων

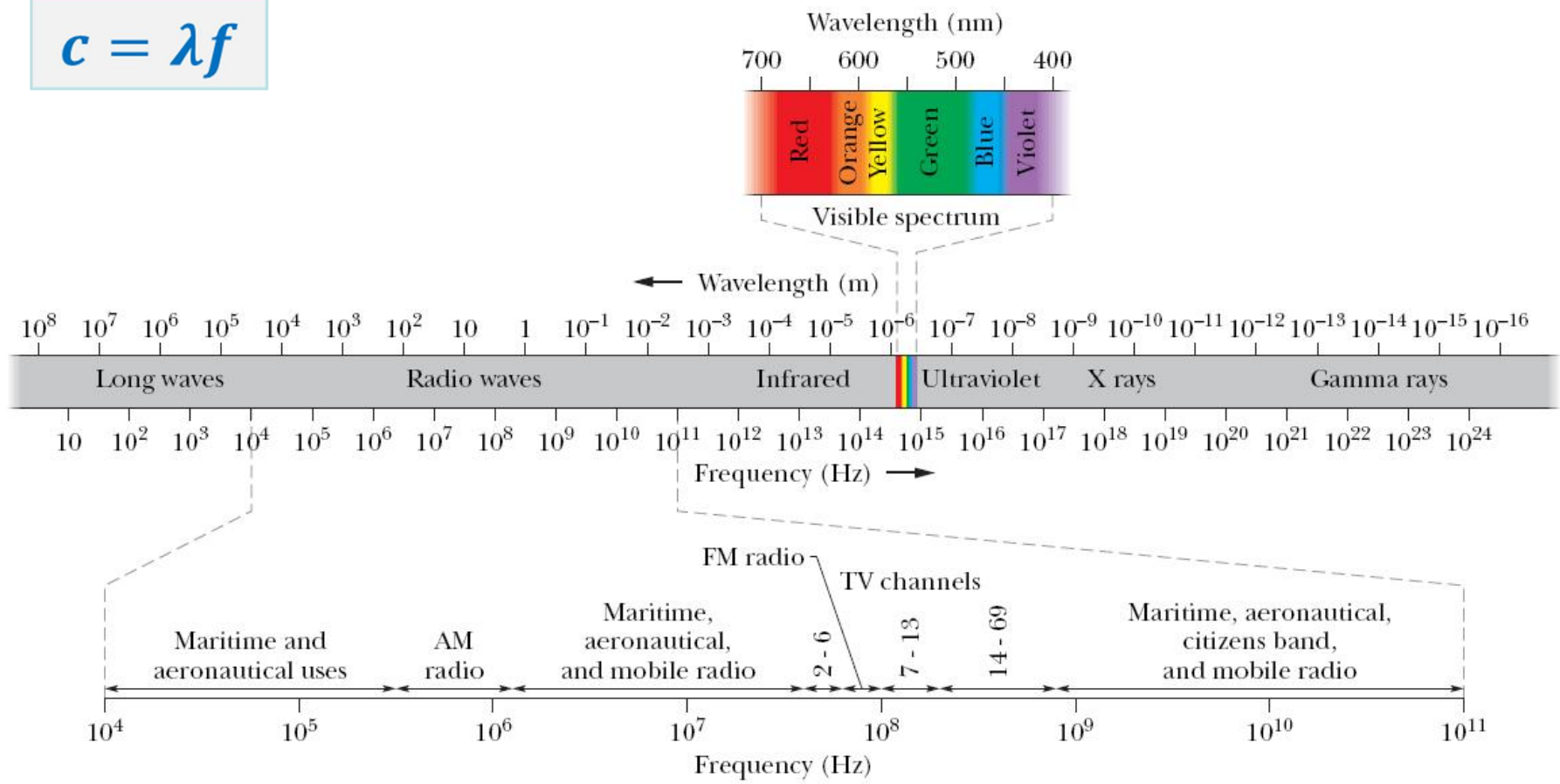
- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι **εγκάρσια κύματα**.
- Τα φυσικά μεγέθη που μεταβάλλονται είναι η **ένταση του ηλεκτρικού,  $\vec{E}$  και του μαγνητικού πεδίου,  $\vec{B}$** .
- Τα δύο πεδία είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.
- Ο λόγος των μέτρων των πεδίων  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  είναι σταθερός  $E/B = c$
- τα ΗΜ κύματα διαδίδονται (και) στο κενό με συγκεκριμένη και σταθερή ταχύτητα  $c = 3 \times \frac{10^8 m}{s}$
- Σε αντίθεση με τα μηχανικά κύματα, τα ΗΜ κύματα ΔΕΝ χρειάζονται τα σωματίδια ενός μέσου (όπως του αέρα ή της χορδής) για να μεταδώσουν το κύμα



➤ Η ταχύτητα διάδοσης στο κενό είναι η ίδια για όλα τα ΗΜ κύματα, και ίση με  $c=300.000\text{km/s}$

# Οι συχνότητες των ΗΜ κυμάτων καλύπτουν 24 τάξεις μεγέθους

$$c = \lambda f$$

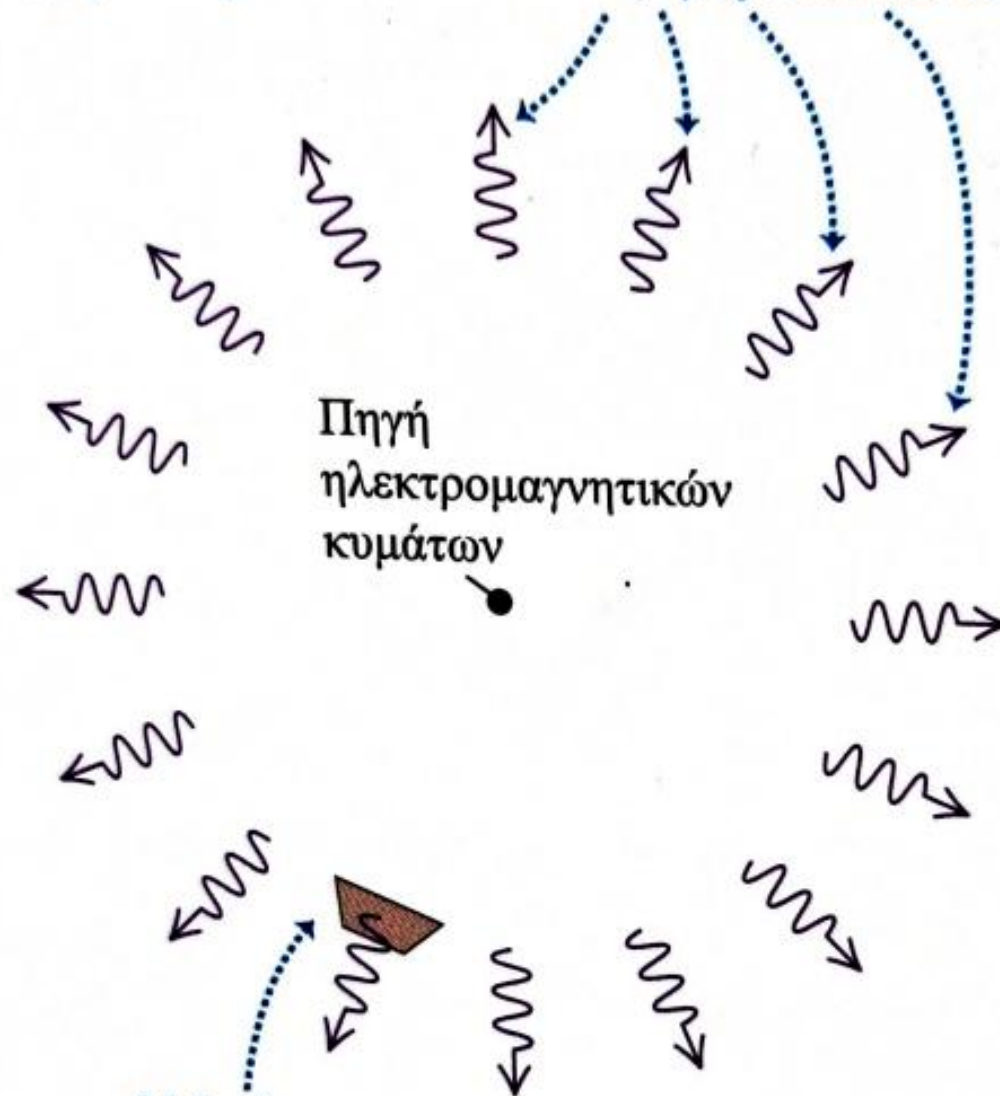




# Ημιτονοειδή ηλεκτρομαγνητικά κύματα

- Τα ημιτονοειδή ΗΜ κύματα είναι εντελώς ανάλογα των ημιτονοειδών εγκάρσιων μηχανικών κυμάτων. Τα πεδία  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  σε κάθε σημείο στο χώρο είναι ημιτονοειδείς συναρτήσεις του χρόνου, και σε κάθε χρονική στιγμή η χωρική μεταβολή είναι επίσης ημιτονοειδής.
- Επίπεδα ΗΜ κύματα έχουν την ιδιότητα ότι σε κάθε χρονική στιγμή τα πεδία είναι ομοιόμορφα σε κάθε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης (δηλ. τα κυματικά μέτωπα είναι επίπεδα).
- Γενικά οι πηγές ΗΜ κυμάτων δεν εκπέμπουν επίπεδα κύματα (συνήθως π.χ. σφαιρικά ή κυλινδρικά). Ωστόσο μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι επίπεδα, αν είμαστε αρκετά μακριά από τη πηγή και κοιτάμε μια μικρή περιοχή στο χώρο.

Κύματα που περνάνε διαμέσου μιας μεγάλης επιφάνειας διαδίδονται σε διάφορες κατευθύνσεις...



... αλλά κύματα που περνάνε διαμέσου μιας μικρής επιφάνειας διαδίδονται σχεδόν στην ίδια κατεύθυνση, οπότε μπορούμε να τα χειριστούμε ως επίπεδα.

# Τα πεδία ενός (συν)ημιτονοειδούς κύματος

Για τις στιγμιαίες τιμές της  $y$  συνιστώσας του ηλεκτρικού και της  $z$  συνιστώσας του μαγνητικού πεδίου έχουμε

$$E_y(x, t) = E_{max} \cos(kx - \omega t)$$

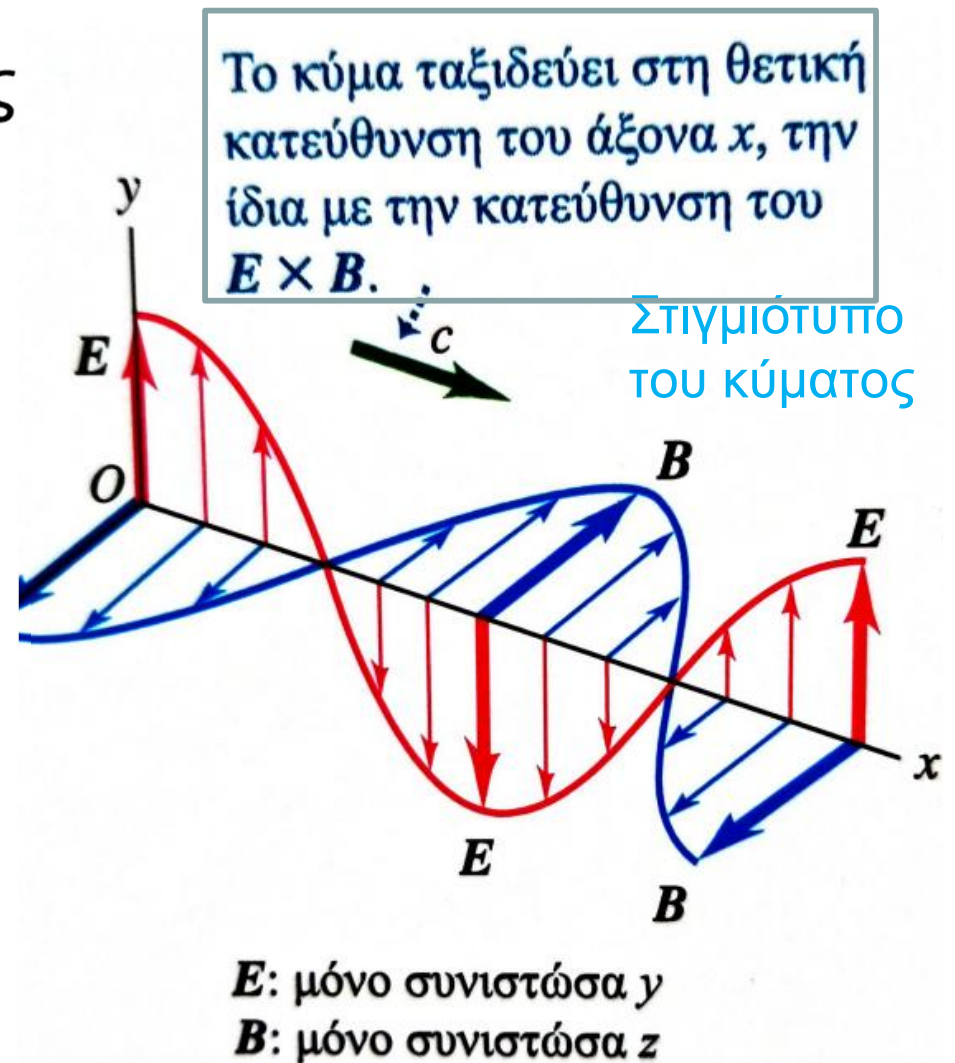
$$B_z(x, t) = B_{max} \cos(kx - \omega t)$$

$$\text{με } c = \omega/k$$

Σε διανυσματική μορφή:

$$\vec{E}(x, t) = \hat{y} E_{max} \cos(kx - \omega t)$$

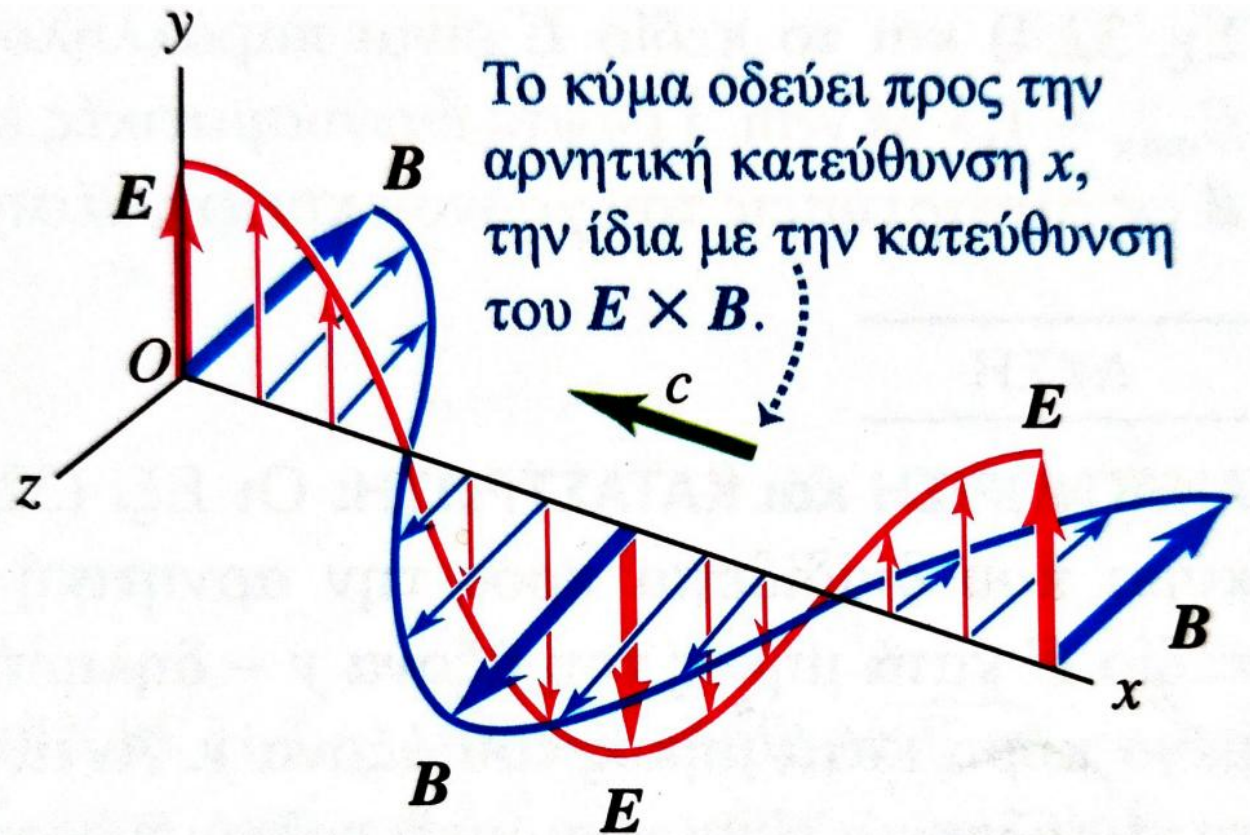
$$\vec{B}(x, t) = \hat{z} B_{max} \cos(kx - \omega t)$$



Προσοχή σε ένα επίπεδο κύμα  $E$  και  $B$  υπάρχουν παντού στο χώρο. Εδώ δείχνουμε τι γίνεται κατά μήκος του άξονα των  $x$ . Σε ένα επίπεδο κάθετο στον άξονα σε κάποιο σημείο  $x$  οι τιμές του  $E$  και  $B$  είναι οι ίδιες σε όλο το επίπεδο. Αλλάζουν από σημείο σε σημείο του άξονα  $x$ .



Αν το ΗΜ κύμα ταξιδεύει προς τα αρνητικά του άξονα των  $x$ , τότε έχουμε:



$E$ : μόνο συνιστώσα  $y$

$B$ : μόνο συνιστώσα  $z$

Και για τις δύο κατευθύνσεις διάδοσης που είδαμε, οι ταλαντώσεις των πεδίων  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  είναι **σε φάση** και το διανυσματικό γινόμενο  $\vec{E} \times \vec{B}$  δείχνει τη **κατεύθυνση διάδοσης** του κύματος.

Αν το  $\vec{E}$  είναι για οποιαδήποτε χρονική στιγμή παράλληλο με τον άξονα  $y$ , τότε λέμε ότι το ΗΜ κύμα είναι **γραμμικά πολωμένο** κατά τον άξονα αυτό. Το επίπεδο που ορίζεται από τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου και τη διεύθυνση διάδοσης ονομάζεται **επίπεδο πόλωσης**. Θα μιλήσουμε αναλυτικά για την πόλωση αργότερα.

# Παράδειγμα

Ένα λέιζερ CO<sub>2</sub> εκπέμπει ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα που οδεύει στο κενό στην αρνητική κατεύθυνση  $x$ . Το μήκος κύματος είναι 10.6μm (υπέρυθρο) και το ηλεκτρικό πεδίο είναι παράλληλο προς τον άξονα  $z$  με  $E_{max} = 1.5\text{MV/m}$ . Γράψτε τις διανυσματικές εξισώσεις για τα  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  ως συναρτήσεις του χρόνου και της θέσης.

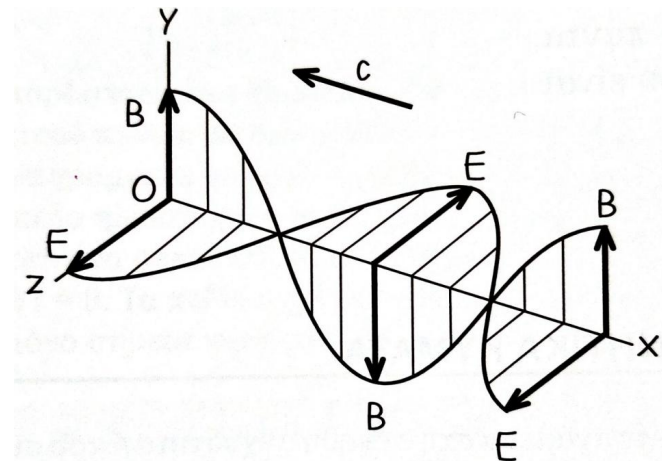
$\vec{E} \times \vec{B} \parallel -\hat{x}$ , με  $\vec{E} \parallel \hat{z}$  και  $\vec{B} \parallel \hat{y}$  (πράγματι  $\hat{z} \times \hat{y} = -\hat{x}$ ).

$$\vec{E}(x, t) = \hat{z}E_{max}\cos(kx + \omega t) \quad (1)$$

$$\vec{B}(x, t) = \hat{y}B_{max}\cos(kx + \omega t) \quad (2)$$

Το πρόσημο + στα ορίσματα των cos δείχνει ότι η διάδοση είναι προς την αρνητική διεύθυνση του  $x$ .

$$\text{Επειδή } E_{max}/B_{max} = c \Rightarrow B_{max} = \frac{1.5 \times 10^6 \text{V/m}}{3 \times 10^8 \text{m/s}} = 5 \times 10^{-3} \text{Tesla}$$



E: μόνο σινοτάσια  $z$   
B: μόνο σινοτάσια  $y$

# Παράδειγμα (συνέχεια)

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi \text{ rad}}{10.6 \times 10^{-6} \text{ m}} = 5.93 \times 10^5 \text{ rad/m} \text{ και } \omega = c k = 3 \times 10^8 \text{ m/s} \times 5.93 \times 10^5 \text{ rad/m} = 1.78 \times 10^{14} \text{ rad/s}$$

Αντικαθιστώντας στις σχέσεις (1) και (2) προκύπτουν οι:

$$\mathbf{E}(x, t) = \hat{\mathbf{z}} (1.5 \times 10^6 \text{ V/m}) \times \cos[(5.93 \times 10^5 \text{ rad/m})x + (1.78 \times 10^{14} \text{ rad/s})t]$$

$$\mathbf{B}(x, t) = \hat{\mathbf{y}} (5.0 \times 10^{-3} \text{ T}) \times \cos[(5.93 \times 10^5 \text{ rad/m})x + (1.78 \times 10^{14} \text{ rad/s})t]$$

(γενικά μπορώ να προσθέσω μία φάση  $\phi$  και στα δύο ορίσματα, που για να τη προσδιορίσω θα έπρεπε να έχω κάποια κατάλληλη αρχική συνθήκη)



# Ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην ύλη

- Μέχρι τώρα συζητήσαμε για ΗΜ κύματα που διαδίδονται στο κενό. Τα ΗΜ κύματα όμως διαδίδονται και μέσα στην ύλη (π.χ. στον αέρα, στο νερό, στο γυαλί κλπ).
- Όταν ΗΜ κύμα διαδίδεται σε ένα μη αγώγιμο υλικό (διηλεκτρικό – θα δείτε σχετικές έννοιες στη Φ3 και στον ΗΜ) αλλάζει η ταχύτητα διάδοσής του, και συμβολίζεται με  $v$
- Ο λόγος της ταχύτητας στο κενό προς την ταχύτητα στο μέσο λέγεται **δείκτης διάθλασης**  $n = c/v$
- Όταν ΗΜ συχνότητας  $f$  διαδίδεται σε διηλεκτρικό με δείκτη διάθλασης  $n$ , το μήκος κύματος μεταβάλλεται και δίνεται από τη σχέση  $\lambda = v f = \left(\frac{c}{n}\right) f = \left(\frac{1}{n}\right) \lambda_{\text{κενο}}$

(θα μάθουμε στον ΗΜ ότι ο δείκτης διάθλασης σχετίζεται με την σχετική επιτρεπτότητα και σχετική διαπερατότητα του υλικού)



## Μεταφορά ενέργειας και διάνυσμα Poynting

Η κατεύθυνση του διανύσματος Poynting  $\vec{S}$  ενός ΗΜ κύματος σε οποιοδήποτε σημείο στο χώρο δίνει την διεύθυνση διάδοσης του κύματος και τη διεύθυνση μεταφοράς ενέργειας στο σημείο αυτό.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (\text{Poynting vector}).$$

$$S = \left( \frac{\text{energy/time}}{\text{area}} \right)_{\text{inst}} = \left( \frac{\text{power}}{\text{area}} \right)_{\text{inst}}.$$

$$S = \frac{1}{\mu_0} EB, \quad \rightarrow \quad S = \frac{1}{c\mu_0} E^2$$

$$I = S_{\text{avg}} = \left( \frac{\text{energy/time}}{\text{area}} \right)_{\text{avg}} = \left( \frac{\text{power}}{\text{area}} \right)_{\text{avg}} = \frac{1}{c\mu_0} [E^2]_{\text{avg}} = \frac{1}{c\mu_0} [E_m^2 \sin^2(kx - \omega t)]_{\text{avg}}.$$

$$E_{\text{rms}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad \rightarrow \quad I = \frac{1}{c\mu_0} E_{\text{rms}}^2.$$

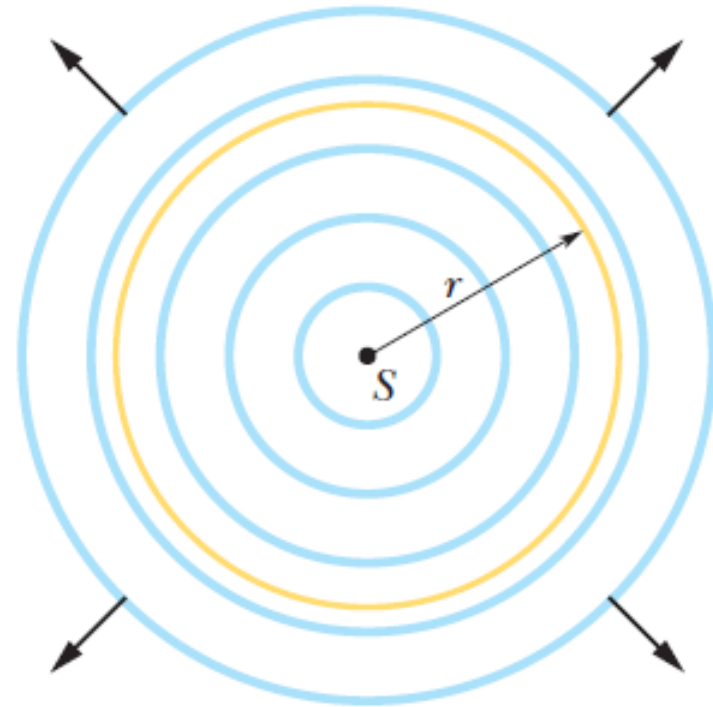
## ΗΜ κύματα από σημειακή πηγή

Μία σημειακή πηγή εκπέμπει ΗΜ κύματα ομοιόμορφα προς όλες τις Κατευθύνσεις.

Τα σφαιρικά κυματικά μέτωπα περνάνε από μία φανταστική σφαίρα ακτίνας  $r$  που έχει κέντρο στο  $S$ .

Η ένταση ακτινοβολίας θα είναι

$$I = \frac{\text{ισχυς}}{\text{επιφανεια}} = \frac{P_S}{4\pi r^2}$$



# Φύση του φωτός (κύμα ή σωματίο)

Για τη μελέτη της συμπεριφοράς του φωτός απαιτείται η εισαγωγή κριτηρίων ως προς τα μεγέθη που περιγράφουν την διάδοση και την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη.

**Κριτήρια** (τα μεγέθη που υπεισέρχονται στα κριτήρια) που καθορίζουν την συμπεριφορά του φωτός

## Μ Ε Γ Ε Θ Η

1. **Μήκος κύματος  $\lambda$**  (κυματικό μέγεθος)

Σύγκριση με διαστάσεις  $d$  της χρησιμοποιούμενης «συσκευής»

2. **Ενέργεια φωτονίου  $E (=h \nu)$**  (σωματιδιακό μέγεθος)

Σύγκριση με ενεργειακή ευαισθησία  $E_{\text{ευαισθησία}}$  της χρησιμοποιούμενης «συσκευής»

# ΟΠΤΙΚΗ: Τι είναι το φως;

- Σωματίδια

Εμπειροκλής  
(5ος π.Χ.  
αιώνας) –  
Newton (17ος  
μΧ) - αρχές  
του 19ου μ.Χ.  
αιώνα

Einstein(1905): **αποτελείται όμως από φωτόνια!**

**Το φως έχει διττή υπόσταση!**

Σήμερα γνωρίζουμε ότι τα φωτόνια είναι σωματίδια που ακολουθούν τη Στατιστική Bose-Einstein.

- Κύμα

Christian Huygens  
(1629-1695)

Thomas Young (1773-  
1829)-

J.C. Maxwell το φως  
**είναι υπέρυχνο  
Ηλεκτρομαγνητικό  
κύμα**



## Γενική περιγραφή της συμπεριφοράς του φωτός μέσω:

- Γεωμετρικής Οπτικής
- Κυματικής εικόνας του φωτός
- Σωματιδιακής εικόνας του φωτός

### 1. Κριτήρια Γεωμετρικής Οπτικής.

$$\lambda \ll d$$

$$E_{\text{φωτονίου}} < E_{\text{ευαισθησία}}$$

Η έννοια της ακτίνας του φωτός

Πλήρης περιγραφή  
των φαινομένων  
της **ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ**  
**ΚΑΙ ΤΗΣ**  
**ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ**



## 2. Κριτήρια Κυματικής Οπτικής

$$\lambda \approx d$$

$$E_{\text{φωτονίου}} \ll E_{\text{ευαισθησία}}$$

Πλήρης περιγραφή των φαινομένων **της**  
**ΣΥΜΒΟΛΗΣ & ΠΕΡΙΘΛΑΣΗΣ**  
καθώς και της **ΑΝΑΚΛΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ**  
**ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ**

Οι δύο αυτοί κλάδοι της Γεωμετρικής και Κυματικής Οπτικής περιγράφουν τα φαινόμενα με όρους της **Κλασσικής Φυσικής**

### 3. Κριτήρια Σωματιδιακής εικόνας του Φωτός

$$\lambda \lll d$$

$$E_{\text{φωτονίου}} \gg E_{\text{ευαισθησία}}$$

Πλήρης περιγραφή των  
φαινομένων:

**Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**  
**Φαινόμενο Compton κ.α.**

Ο τρίτος κλάδος αναφέρεται στην περιγραφή  
φαινομένων με όρους της **Κβαντικής Φυσικής**.

# Κυματική συμπεριφορά της ύλης

Ερώτημα: Η εικόνα της διττής φύσης του φωτός μπορεί να επεκταθεί και στη ύλη με την έννοια της διττής φύσης της ύλης:

Λόγω της συμμετρίας στη φύση αφού το φώς μπορεί να συμπεριφερθεί ως σωματίδιο γεννάται το ερώτημα εάν και το σωματίδιο μπορεί να συμπεριφέρεται ως κύμα, δηλαδή, μπορεί η ύλη να εκδηλώνει κυματική συμπεριφορά;

Το ερώτημα διατυπώθηκε πρώτα θεωρητικώς από τον de Broglie και προτάθηκε ότι ένα σωματίδιο ορμής  $p$  μπορεί να συμπεριφέρεται ως κύμα με μήκος κύματος  $\lambda = h/p$  ( $h$  η σταθερά του Planck). Αργότερα αποδείχθηκε και πειραματικά.

Με την εισαγωγή της έννοιας της **κυματοσυνάρτησης** γίνεται ενοποίηση της περιγραφής της διττής (κυματική/σωματιδιακή) φύσης του φωτός και της ύλης.