



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Φυσική II

Ενότητα 12: Το φως

Κουζούδης Δημήτρης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Σκοποί ενότητας

- Εισαγωγή στο φως και στη δυική φύση του (κυματική, σωματιδιακή)
- Ορισμός ηλεκτρομαγνητισμού, ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
- Εξαγωγή μαθηματικού τύπου υπολογισμού ολικής ενέργειας ηλεκτρομαγνητικού κύματος
- Χωρική πυκνότητα ενέργειας και ένταση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
- Αλληλεπίδραση ύλης φωτός – δείκτης διάθλασης φωτός μέσα από υλικά



Περιεχόμενα ενότητας

- Δυική φύση του φωτός
- Ηλεκτρομαγνητισμός
- Ηλεκτρομαγνητικά κύματα
- Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
- Ενέργεια ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων
- Ολική ενέργεια
- Ροή ενέργειας
- Ένταση Η/Μ ακτινοβολίας
 - Παραδείγματα
- Ταχύτητα του φωτός μέσα σε υλικά – Δείκτης Διάθλασης



Το φως

Ηλεκτρομαγνητισμός

Δυική Φύση του φωτός

- Ευθύγραμμη διάδοση – κυματική φύση
 - Φαινόμενα συμβολής από σχισμή
 - Μικρό μήκος κύματος $\sim 1\mu\text{m}$
- Μεταφορά ορμής – σωματιδιακή φύση
 - Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
 - Διακριτά ποσά – κβάντα φωτός
- Φωτόνια



Ηλεκτρομαγνητισμός

- Μικροκύματα, ραδιοκύματα, ακτίνες Χ, υπεριώδης και υπέρυθρη ακτινοβολία, φως
- Εξισώσεις ηλεκτρισμού – μαγνητισμού (1-d, κενό)

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial z^2} = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

- Λύση γενικής διαφορικής: $\frac{\partial^2 f(z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f(z, t)}{\partial t^2} \rightarrow f(z, t) = f(z \pm vt)$
- Διαφορικές εξισώσεις κύματος με κοινή ταχύτητα διάδοσης στο κενό

$$v = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$$

- Ταχύτητα φωτός : $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$



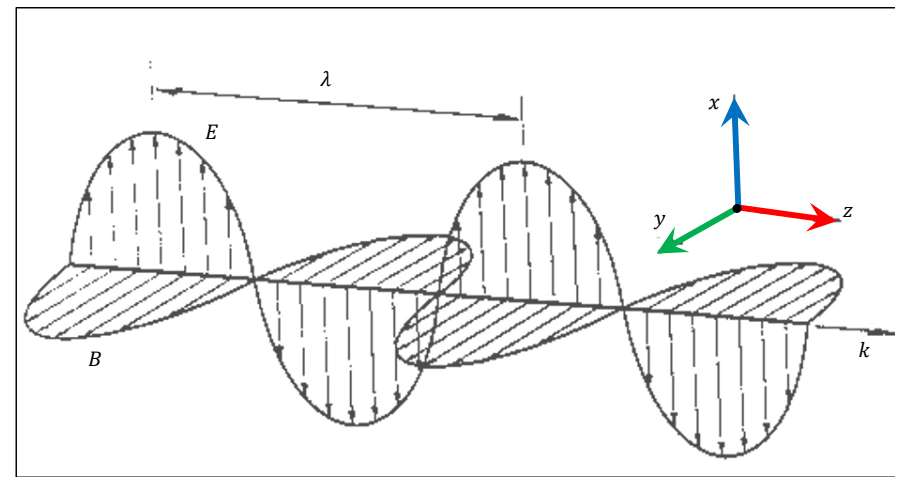
Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

- Κυματική σχέση: $c = \lambda f = \omega/k$
 - $k = 2\pi/\lambda$: κυματάριθμος
 - $\omega = 2\pi f$: κυκλική συχνότητα
- Ένταση μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου στα Η/Μ κύματα (αρμονικά)

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(kz - \omega t)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kz - \omega t)$$

- Συμφασικά
- Εγκάρσια
- B : πολωμένο κατά y
- E : πολωμένο κατά x

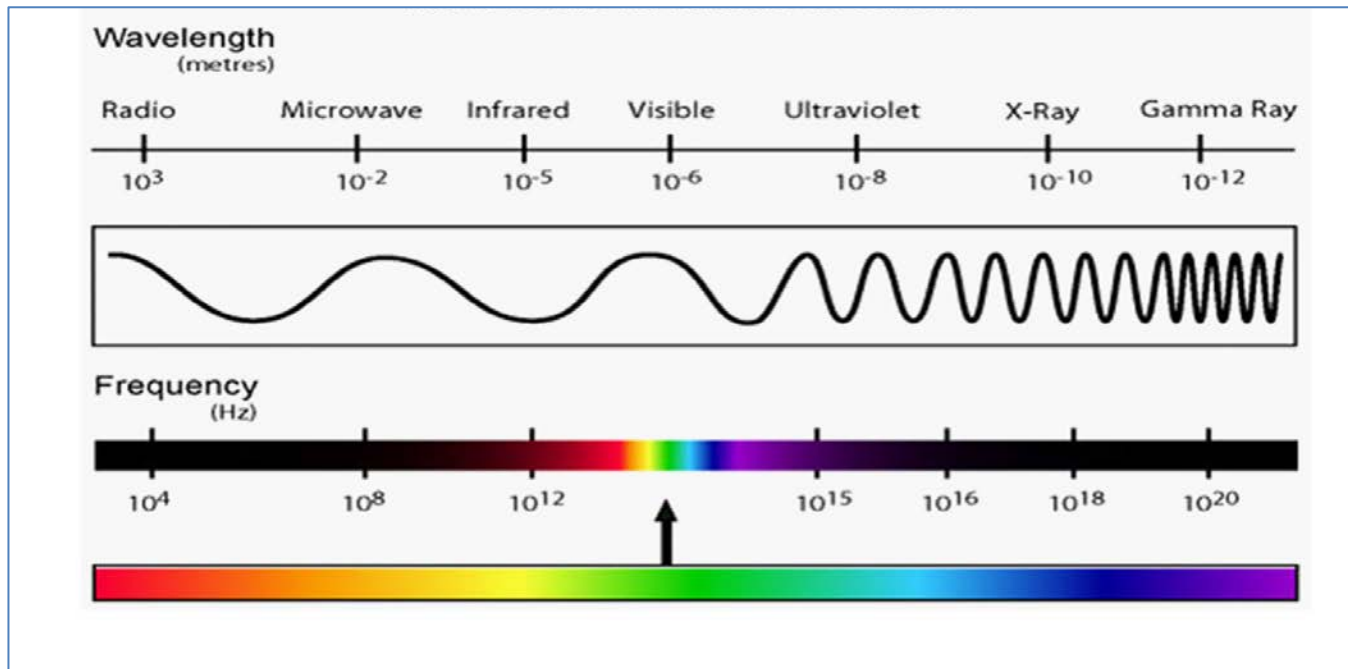


• Σχέση πλατών: $B_0 = \frac{E_0}{c}$



Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Κατηγοριοποίηση Η/Μ κυμάτων ως προς το μήκος κύματος ή την συχνότητα τους



Ενέργεια Ηλεκτρομαγνητικών Κυμάτων

- Επίπεδος πυκνωτής, εμβαδόν οπλισμών A σε απόσταση d , φορτίο θετικού οπλισμού Q και επιφανειακή πυκνότητα φορτίου σ

$$U = \frac{1}{2C} Q^2 \text{ με } C = \frac{\epsilon_0 A}{d}, \text{ άρα } U = \frac{dQ^2}{2\epsilon_0 A} = \frac{AdQ^2}{2\epsilon_0 A^2} = \frac{Ad\sigma^2}{2\epsilon_0}$$

- Χωρική πυκνότητα ηλεκτρικής ενέργειας ($u_E = U/Ad$)

$$u_E = \frac{\epsilon_0}{2} E^2$$

- Πηνίο με N κυκλικές σπείρες, εμβαδού A , συνολικό μήκος l και αυτεπαγωγή L , με ρεύμα I
- Χωρική πυκνότητα μαγνητικής ενέργειας

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2$$



Ολική ενέργεια

- Χωρική πυκνότητα ενέργειας Η/Μ κύματος

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2$$

- Αναλύοντας τις εντάσεις των πεδίων

$$u = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kz - \omega t) + \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 \sin^2(kz - \omega t)$$

$$\text{Όπου } \frac{1}{2\mu_0 c^2} E_0^2 \sin^2(kz - \omega t) = \frac{\varepsilon_0}{2} E_0^2 \sin^2(kz - \omega t)$$

- Τελικά

$$u = \varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kz - \omega t)$$



Ροή ενέργειας

- Ορθογώνια επιφάνεια εμβαδού A , κάθετη στον άξονα διάδοσης z , διέρχεται κύμα με ταχύτητα c
 - Στιγμιαία ροή ενέργειας

$$S = \frac{uAcdt}{Adt} = uc = c\varepsilon_0 E_0^2 \sin^2(kz - \omega t)$$

- Μέση τιμή του τετραγώνου του ημιτόνου = $\frac{1}{2}$
 - Για ένα πλήρη κύκλο
 - Μέση ροή ενέργειας

$$I = \frac{1}{2} c\varepsilon_0 E_0^2$$



Ένταση Η/Μ ακτινοβολίας

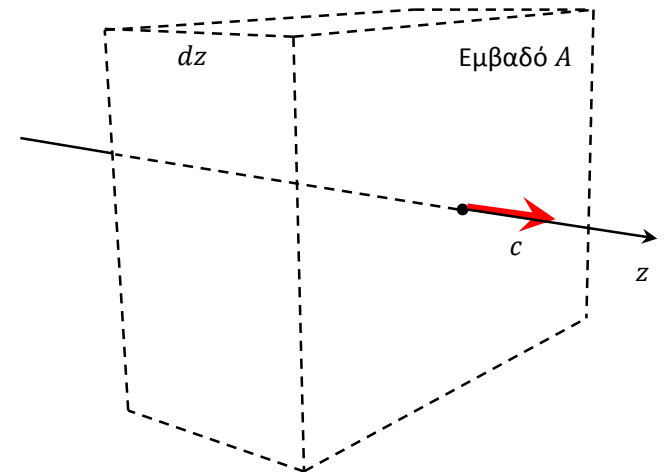
- Χρήση εντάσεων μαγνητικού – ηλεκτρικού πεδίου στη μέση ροή ενέργειας

$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 = \frac{1}{2} c^2 \epsilon_0 E_0 B_0 = \frac{1}{2 \epsilon_0 \mu_0} \epsilon_0 E_0 B_0$$

$$I = \frac{1}{2 \mu_0} E_0 B_0$$

- Διάνυσμα Poynting

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



Παράδειγμα 1

Ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας 200 MHz διαδίδεται με πλάτος ηλεκτρικού πεδίου ίσο με 0.15 N/C. Εάν τη χρονική στιγμή $t=0$, το μαγνητικό πεδίο είναι μηδέν επάνω στην αρχή των συντεταγμένων, να βρεθεί η τιμή του σε θέση που απέχει 2 m από την αρχή κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος και σε χρόνο $t=5$ ns.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kz - \omega t)$$

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{0.15}{3 \times 10^8} = 0.05 \times 10^{-8} = 5 \times 10^{-10} \text{ T}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{200 \times 10^6} = 1.5 \text{ m}$$

$$B = B_0 \sin(kz - \omega t) = B_0 \sin\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - 2\pi f t\right)$$

$$B = 5 \times 10^{-10} \sin\left[2\pi\left(\frac{2}{1.5} - 200 \times 10^6 \times 5 \times 10^{-9}\right)\right] = 4.33 \times 10^{-10} \text{ T}$$



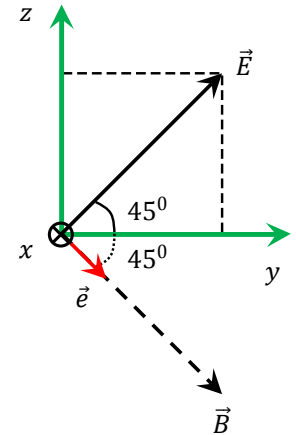
Παράδειγμα 2

Ραδιοφωνικός σταθμός εκπέμπει στα 110 FM και η ένταση ακτινοβολίας σε κάποιο δωμάτιο είναι 0.015 W/m^2 . Εάν η διεύθυνση διάδοσης του κύματος είναι ο θετικός άξονας x , και το ηλεκτρικό πεδίο είναι πολωμένο κατά μήκος της διαγωνίου των θετικών αξόνων y - z , να βρεθεί η Μαθηματική έκφραση του μαγνητικού πεδίου για κάθε χρόνο και για κάθε x .

$$f = 110 \times 10^6 \text{ Hz}$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t)$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{110 \times 10^6} = 2.73 \text{ m}$$



$$I = \frac{1}{2} c \epsilon_0 E_0^2 \Rightarrow E_0 = \sqrt{\frac{2I}{c \epsilon_0}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.015}{3 \times 10^8 \times 8.85 \times 10^{-12}}} = 3.36 \text{ N/C}$$

$$\vec{e} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\vec{e}_y - \vec{e}_z)$$

$$B_0 = \frac{E_0}{c} = \frac{3.36}{3 \times 10^8} = 1.12 \times 10^{-8} \text{ T}$$

$$\vec{e} \cdot \vec{e} = \frac{1}{2} (\vec{e}_y \cdot \vec{e}_y - 2\vec{e}_y \cdot \vec{e}_z + \vec{e}_z \cdot \vec{e}_z) = \frac{1}{2} (1 - 0 + 1) = 1$$

$$\vec{B}_0 = B_0 \vec{e} = \frac{B_0}{\sqrt{2}} (\vec{e}_y - \vec{e}_z)$$

$$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t) = \frac{B_0}{\sqrt{2}} (\vec{e}_y - \vec{e}_z) \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - ft \right) \right]$$

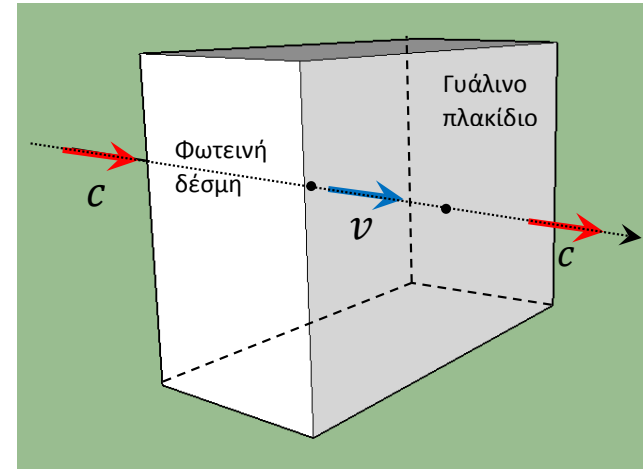
$$B = 1.12 \times 10^{-8} \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{2.73} - 110 \times 10^6 t \right) \right] \text{ Tesla}$$



Ταχύτητα του φωτός μέσα σε υλικά – Δείκτης Διάθλασης

- Εκτός κενού: $v < c$
- Αλληλεπίδραση του φωτός με τα άτομα της ύλης
- Δείκτης διάθλασης του φωτός (αδιάστατη σταθερά του υλικού)

$$n = \frac{c}{v}$$



Υλικό / Ουσία	n	Υλικό / Ουσία	n
Κενό - Αέρας	1.00	Σιλικόνη	1.44
Περισσότερα Αέρια	1.00	Διάλυμα Ζάχαρης (80%)	1.49
Πάγος	1.31	Γυαλί	1.50
Νερό	1.33	Plexiglas	1.50
Αιθυλική Αλκοόλη	1.36	Διαμάντι	2.40



Βιβλιογραφία

- Serway R. A., Jewett J. W., 2013, *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς : ηλεκτρισμός και μαγνητισμός, φώς και οπτική, σύγχρονη φυσική*, Κλειδάριθμος , Αθήνα
- Halliday D., Resnick R, 2009, *Φυσική: μέρος Β*, 4^η εκδ., Γ. & Α. Πνευματικός, Αθήνα
- Young H.D., Freedman R.A., 2010, *Πανεπιστημιακή φυσική με σύγχρονη φυσική, τ. 2: Ηλεκτρομαγνητισμός-Οπτική* , 2^η έκδ., Παπαζήσης , Αθήνα
- Pollack G.L., Stump D. R., 2002, *Electromagnetism*, Addison Wesley, San Francisco
- Hecht E.P., 1975, *Schaum's outline of theory and problems of optics*, McGraw-Hill Book Company, New York



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών

Δημήτριος Κουζούδης. «Φυσική II»

Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/courses/CMNG2165/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού-Μη Εμπορική Χρήση-Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.