

ΨΣ003 – Φυσική Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Γιάννης Λιαπέρδος

Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
Σχολή Οικονομίας και Τεχνολογίας
Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων



Περιεχόμενα

- 1 Τα πειράματα του Hertz
- 2 Εξισώσεις Maxwell
- 3 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

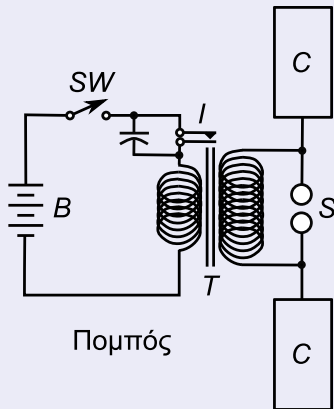


Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894)

Πείραμα Hertz

Πομπός

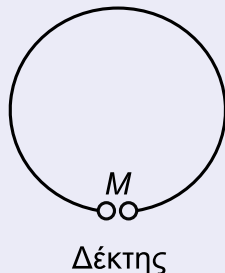
- Ο πομπός αποτελείται από δύο σφαιρικά **ηλεκτρόδια**, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένα μικρό διάκενο.
- Το πηνίο τροφοδοτεί τα ηλεκτρόδια με **στιγμαιαίες μεταβολές** της τάσης.
- Η εκκένωση μεταξύ των ηλεκτροδίων παράγει **ταλαντώσεις** πολύ υψηλής συχνότητας.



Πείραμα Hertz

Δέκτης

- Ο δέκτης δεν είναι τίποτε περισσότερο από έναν μεταλλικό **βρόχο**, με διάκενο.
- Όταν ο πομπός τίθεται σε λειτουργία, σε κοντινή απόσταση με τον δέκτη, τότε στον δέκτη εμφανίζονται **σπινθήρες**.
- Η εκκένωση μεταξύ των ηλεκτροδίων παράγει **ταλαντώσεις** πολύ υψηλής συχνότητας.



Πείραμα Hertz

- Με άλλα πειράματα ο Hertz απέδειξε ότι η **ακτινοβολία** που παράγεται στον πομπό, διαδίδεται έως τον δέκτη και προκαλεί σπινθήρες στο διάκενο του μεταλλικού βρόχου, διαθέτει ιδιότητες **κύματος** (ανάκλαση, διάθλαση, πόλωση, συμβολή, περίθλαση).
- Η μέτρηση της **ταχύτητας** διάδοσης της ακτινοβολίας έδειξε ταχύτητα πολύ κοντά στην τότε γνωστή τιμή της **ταχύτητας του φωτός**.



Περιεχόμενα

- 1 Τα πειράματα του Hertz
- 2 Εξισώσεις Maxwell**
- 3 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα



James Clerk Maxwell (1831 – 1879)



Εξισώσεις Maxwell (ολοκληρωτική μορφή)

$$\textcircled{1} \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$\textcircled{2} \oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\textcircled{3} \oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\textcircled{4} \oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$



Εξισώσεις Maxwell (διαφορική μορφή)

$$\textcircled{1} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\textcircled{3} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\textcircled{2} \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\textcircled{4} \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$



Συμπλήρωση του νόμου του Ampère

- Για τον προσδιορισμό των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από ηλεκτρικά ρεύματα χρησιμοποιούμε τον νόμο του Ampère:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I$$

- Ο νόμος του Ampère ισχύει μόνο αν τα ηλεκτρικά πεδία είναι σταθερά ως προς τον χρόνο.
- Ο Maxwell συμπλήρωσε τον νόμο του Ampère ώστε να ισχύει και στην περίπτωση χρονικά μεταβαλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Ρεύμα μετατόπισης

- Ο **συμπληρωμένος** νόμος του Ampère (γνωστός και ως νόμος Ampère – Maxwell) μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0(I + I_d)$$

- Ο παράγοντας I_d ονομάζεται **ρεύμα μετατόπισης**

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Δύναμη Lorentz

- Σωματίο φορτίου q και ταχύτητας \vec{v} κινούμενο εντός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δέχεται δύναμη (Lorentz) \vec{F} που προκύπτει από τη σχέση:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- Οι εξισώσεις του Maxwell, σε συνδυασμό με τον νόμο της δύναμης Lorentz, αρκούν ώστε να περιγραφούν πλήρως όλες οι κλασικές ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στο κενό.



Ταχύτητα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Λαμβάνοντας υπόψη ότι στο κενό δεν υπάρχει φορτίο ($Q=0$) ούτε ρεύμα ($I=0$), η επίλυση των δύο τελευταίων εξισώσεων Maxwell (νόμος του Faraday και νόμος Ampère – Maxwell) οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η **ταχύτητα διάδοσης** των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι ίση με την **ταχύτητα του φωτός**.
- Το προηγούμενο αποτέλεσμα οδήγησε τον Maxwell στην πρόβλεψη ότι τα **κύματα φωτός** είναι μια μορφή **ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**.



Ταχύτητα διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Η επίλυση των εξισώσεων Maxwell οδηγεί στην ακόλουθη σχέση για την ταχύτητα διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Ερώτηση 10.1

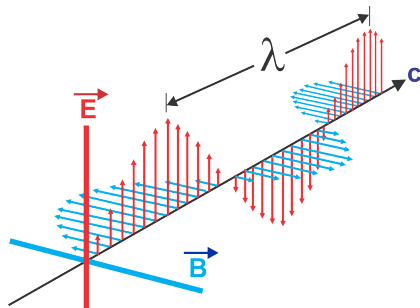
Μπορείτε, χρησιμοποιώντας την πιο πάνω σχέση, να επιβεβαιώσετε αριθμητικά πως ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός;



Περιεχόμενα

- 1 Τα πειράματα του Hertz
- 2 Εξισώσεις Maxwell
- 3 Ηλεκτρομαγνητικά κύματα**

Μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων



- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι **εγκάρσια** κύματα.
- Οι συνιστώσες που αντιστοιχούν στο **ηλεκτρικό** και στο **μαγνητικό** πεδίο των επίπεδων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι **κάθετες** μεταξύ τους και **κάθετες** στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

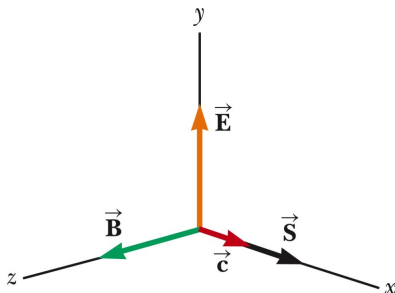
- Για ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στο **κενό** ισχύει η σχέση:

$$c = \frac{E}{B}$$

- Για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ισχύει η αρχή της **επαλληλίας**.



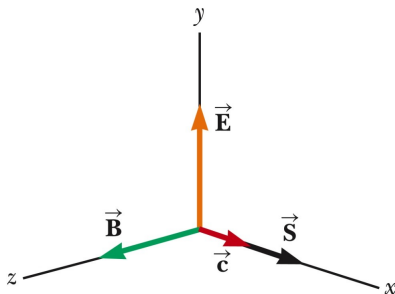
Μεταφορά ενέργειας – διάνυσμα Poynting



- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν **ενέργεια**.
- Κατά τη διάδοσή τους στον χώρο, μπορούν να μεταφέρουν αυτή την ενέργεια στα σώματα στα οποία προσπίπτουν.
- Ο ρυθμός μεταφοράς ενέργειας από ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα περιγράφεται με το διάνυσμα \vec{S} , το οποίο ονομάζεται **διάνυσμα Poynting**.



Μεταφορά ενέργειας – διάνυσμα Poynting

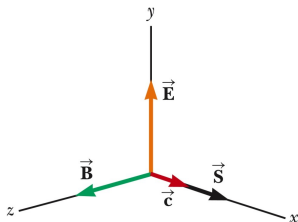


- Το διάνυσμα Poynting ορίζεται ως εξής:

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



Ιδιότητες διανύσματος Poynting



- Έχει τη διεύθυνση και τη φορά της ταχύτητας διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (\vec{c}).
- Το μέτρο του μεταβάλλεται με το χρόνο, παίρνοντας τη μέγιστη τιμή του όταν τα μέτρα των διανυσμάτων \vec{E} και \vec{B} γίνονται μέγιστα.
- Το μέτρο του \vec{S} αντιπροσωπεύει ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας.
- Η μονάδα μέτρησης του διανύσματος Poynting στο SI είναι

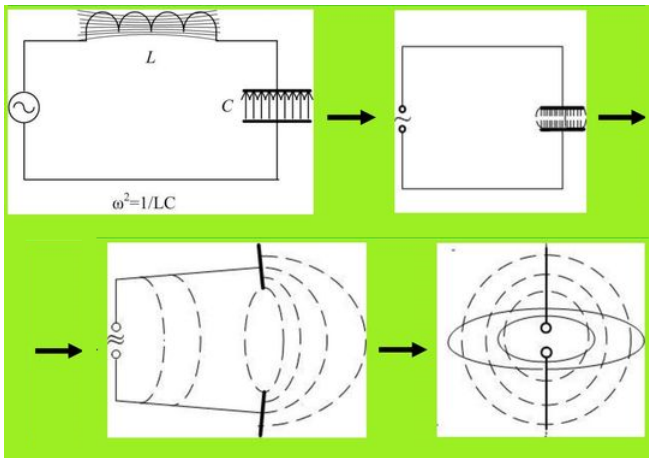
$$\frac{J}{s \cdot m^2} = \frac{W}{m^2}.$$

Μεταφορά ορμής – πίεση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

- Εκτός από ενέργεια, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν και **ορμή**.
- Όταν κάποια επιφάνεια απορροφά αυτή την ορμή υφίσταται **πίεση**.



Παραγωγή/εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων



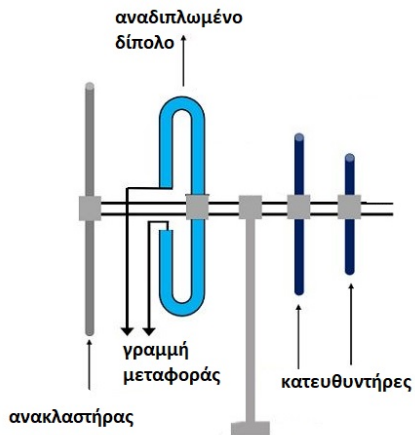
Λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Κεραία Yagi – Uda



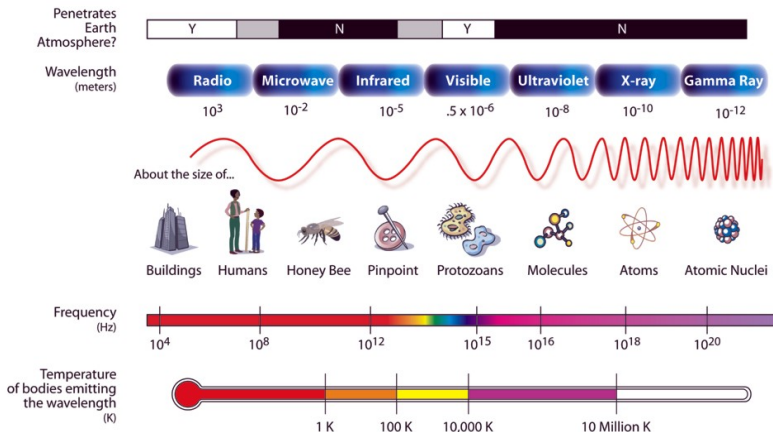
Λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

- Δομή κεραίας Yagi – Uda



Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

