

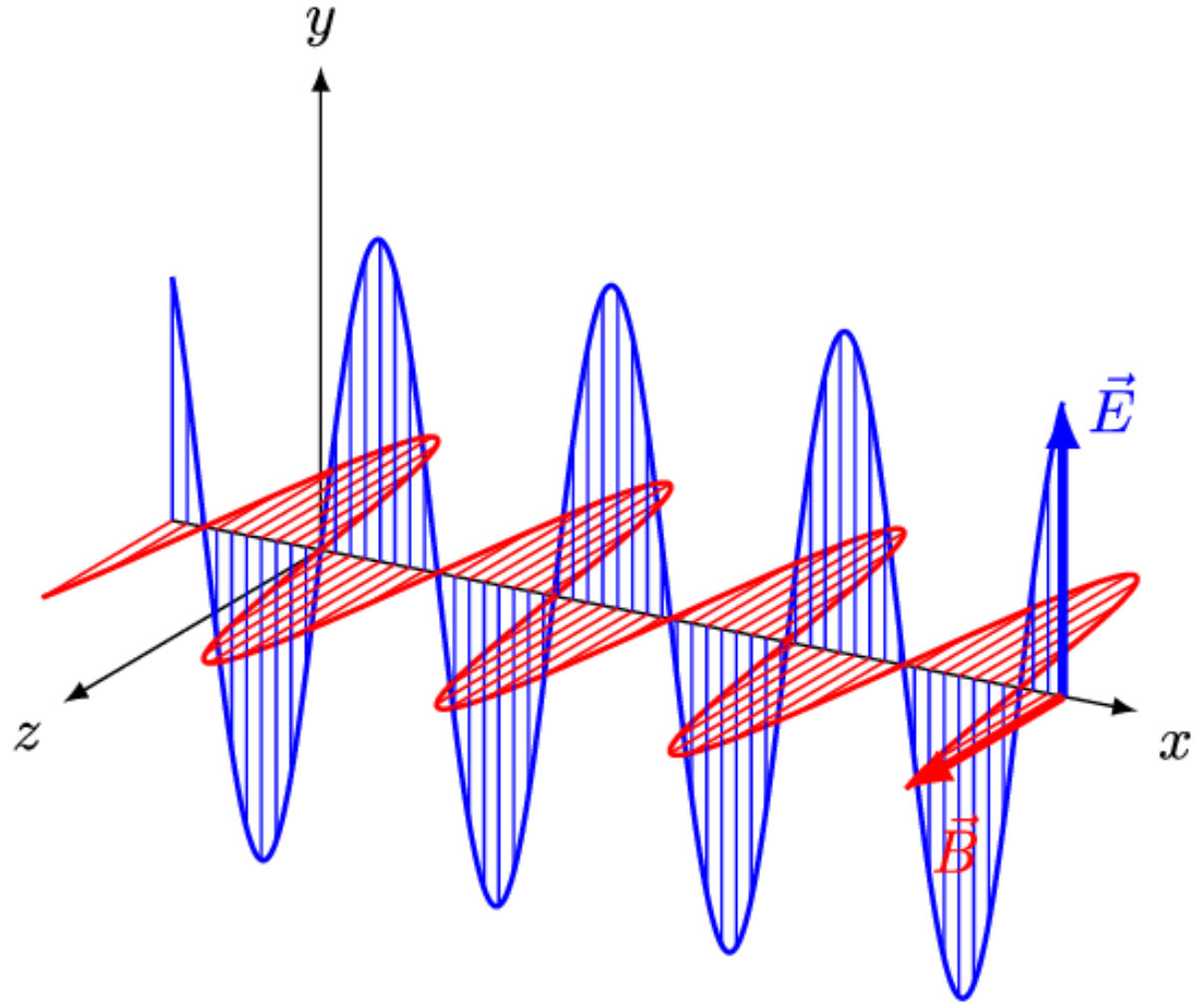
ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΣΜΟΥ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους (μπλε επίπεδο και κόκκινο επίπεδο) και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη απ' την ταχύτητα του φωτός.

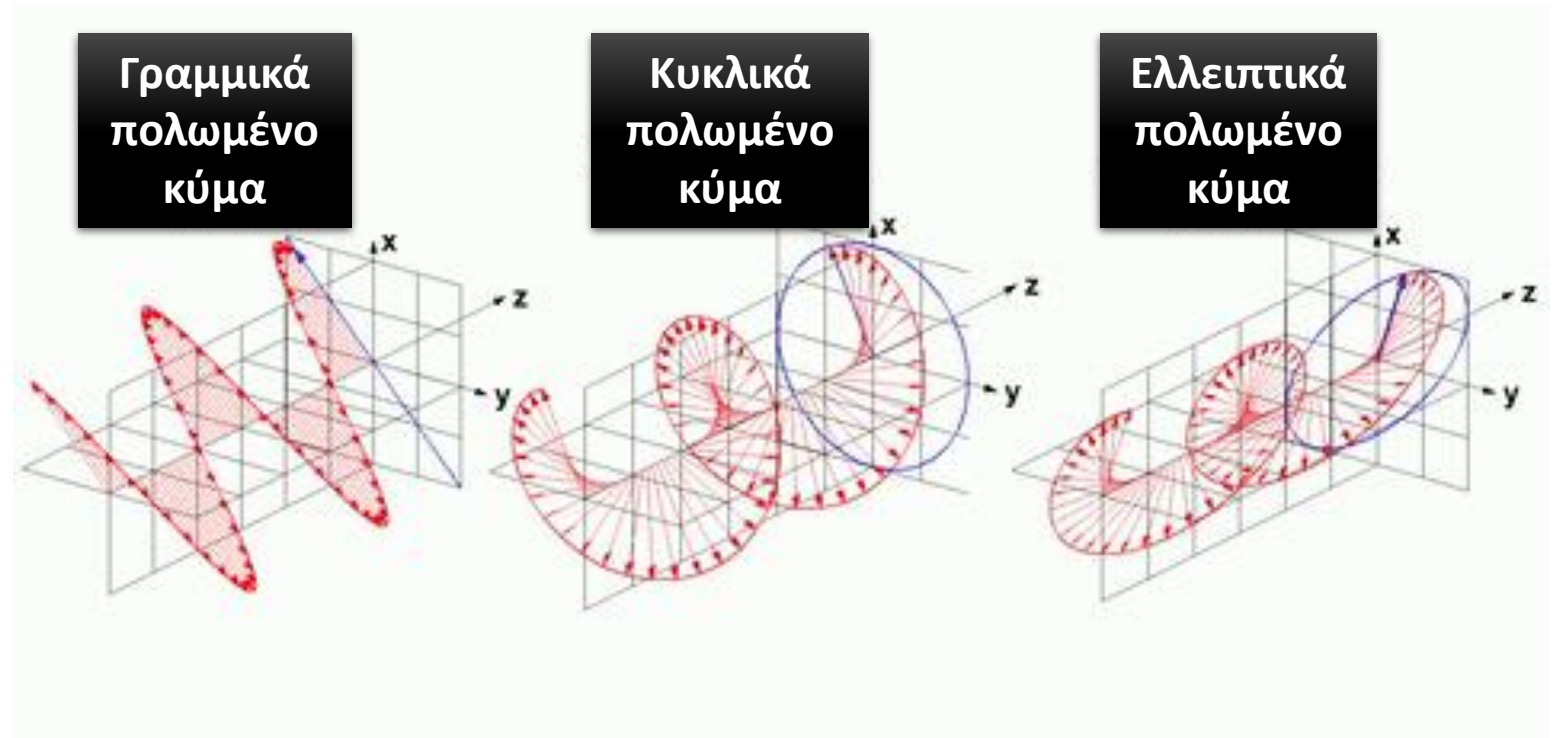


Πόλωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - 1

Γραμμικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία \mathbf{E} και \mathbf{B} ταλαντώνονται σε ένα σταθερό επίπεδο και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου παραμένει σταθερή με το χρόνο.

Κυκλικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία \mathbf{E} και \mathbf{B} **περιστρέφονται** σε επίπεδο κάθετο προς την κατεύθυνση διάδοσης, διαγράφοντας έναν κύκλο. Τα κυκλικά πολωμένα κύματα μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφα είτε αριστερόστροφα.

Ελλειπτικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία \mathbf{E} και \mathbf{B} ταλαντώνονται σε ελλειπτικό σχήμα. Το επίπεδο ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων έχει κλίση ως προς την κατεύθυνση διάδοσης.



Στο σχήμα φαίνεται μόνο η ταλάντωση του ηλεκτρικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο που δεν αποτυπώνεται είναι πάντα κάθετο στο ηλεκτρικό πεδίο και ταλαντώνεται συγχρονισμένα μαζί του (δηλαδή όποτε φτάνει το ένα στη μέγιστη τιμή, φτάνει και το άλλο).

Φασιθέτες (Phasors)

Έστω ότι το ηλεκτρικό πεδίο του κύματος μπορεί να αναπαρασταθεί ως:

$$E = E_o \cos(kx - \omega t)$$

Για να αναπαραστήσουμε αυτό το κύμα ως φάση, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μιγαδική εκθετική μορφή:

$$E = E_o e^{i(kx - \omega t)} = E_o e^{i\phi} \quad \text{όπου } i \text{ είναι η φανταστική μονάδα.}$$

Το E_o , αντιπροσωπεύει το πλάτος του κύματος και το ϕ αντιπροσωπεύει τη φάση του κύματος. Η συχνότητα του κύματος σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής της γωνίας φάσης με την πάροδο του χρόνου.

Η χρήση φασόρων για την αναπαράσταση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μας επιτρέπει να απλοποιήσουμε τους υπολογισμούς που αφορούν τα κύματα, όπως τον υπολογισμό της παρεμβολής μεταξύ δύο κυμάτων ή την απόκριση ενός κυκλώματος σε ένα σήμα εισόδου AC.

Ενέργεια, ορμή και στροφορμή κύματος

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια, ορμή και στροφορμή

- Τα ΗΜ κύματα όπως όλα τα κύματα μεταφέρουν **ενέργεια** με τη μορφή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας.

- Η **ορμή** p ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος δίνεται από την έκφραση: $p = \frac{E}{c}$

όπου E είναι η ενέργειά του και c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Η ορμή ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ανάλογη με την ενέργειά του και αντιστρόφως ανάλογη με την ταχύτητα του φωτός. Η ορμή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων παίζει καθοριστικό ρόλο σε ένα ευρύ φάσμα φαινομένων, συμπεριλαμβανομένης της πίεσης ακτινοβολίας που ασκείται από το φως στην ύλη, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton.

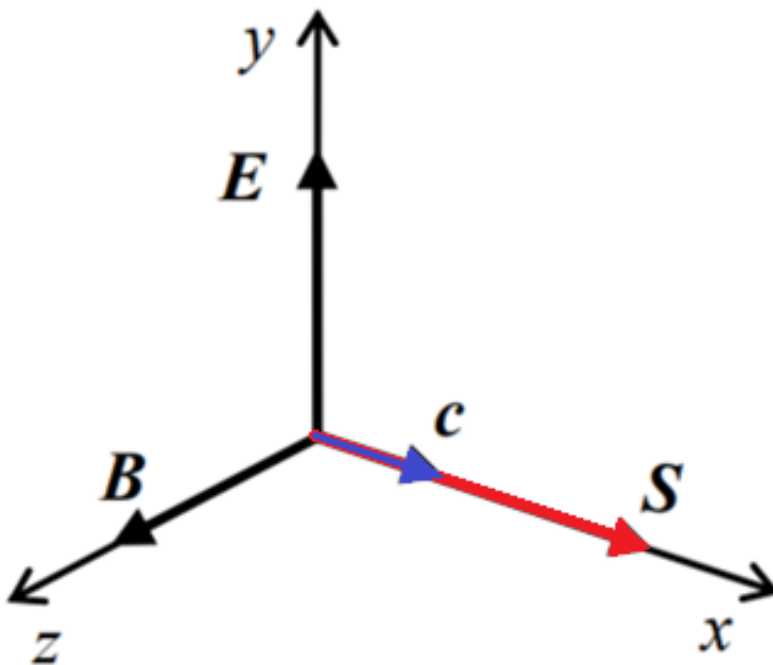
- Η **στροφορμή** (spin) ενός ΗΜ κύματος σχετίζεται με την πόλωσή του και παίζει σημαντικό ρόλο στην αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη.

Διάνυσμα Poynting

Το **διάνυσμα Poynting** εκφράζει την κατεύθυνση και το μέγεθος της ροής της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, γνωστή και ως πυκνότητα ηλεκτρομαγνητικής ισχύος. Σε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το διάνυσμα Poynting είναι γενικά κάθετο τόσο στο ηλεκτρικό όσο και στο μαγνητικό πεδίο και είναι παράλληλο προς την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος.

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

Οι μονάδες του S στο SI
είναι $\text{J}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$



Για ένα ΗΜ κύμα που διαδίδεται συνεχώς στο ίδιο μέσο το διάνυσμα Poynting έχει τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος

Διάνυσμα Poynting

Το **μέτρο** του διανύσματος Poynting S , εκφράζει τον ρυθμό με τον οποίο διαδίδεται η ενέργεια του κύματος, ή αλλιώς την ισχύ του, μέσω μιας μοναδιαίας επιφάνειας κάθετης στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος

$$S = \frac{EB}{\mu_0}$$
$$\frac{E}{B} = c$$
$$S = \frac{E^2}{\mu_0 c} = \frac{c}{\mu_0} B^2$$

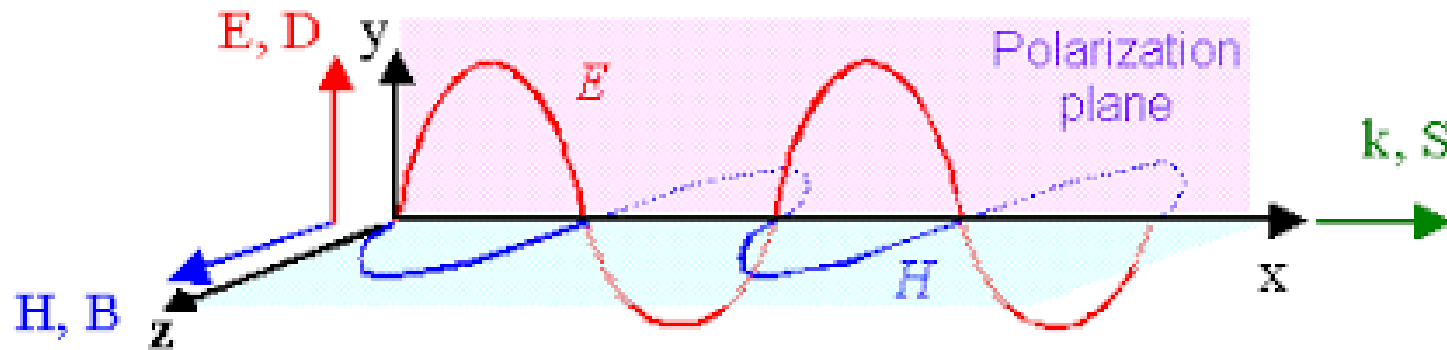
- Τα πεδία E και B ενός αρμονικού κύματος αλλάζουν συνεχώς με τον χρόνο, και είναι πάντα σε φάση.
- Συνεπώς, το διάνυσμα S εξαρτάται από τον χρόνο
- Όταν τα πεδία E και B παίρνουν τις μέγιστες τιμές τους, δηλ. E_0 και B_0 αντιστοίχως το διάνυσμα S γίνεται μέγιστο

$$S_{\max} = \frac{E_0^2}{\mu_0 c} = \frac{c}{\mu_0} B_0^2 \quad S_{\min} = 0$$

Διάνυσμα Poynting

Η μεταβολή της ενέργειας και επομένως του διανύσματος Poynting είναι συνεχής. Το διάνυσμα Poynting ταλαντώνεται όπως το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο αλλά με διεύθυνση αυτήν της διάδοσης του κύματος.

Αυτή η ταλάντωση βέβαια δεν είναι αντιληπτή διότι γίνεται με πολύ μεγάλη συχνότητα. Έτσι είναι πιο ορθό να μιλάμε για μέση μεταφορά ενέργειας του κύματος, η οποία αν μετρηθεί σε μια περίοδο ορίζει την ένταση I του κύματος.



Ένταση κύματος

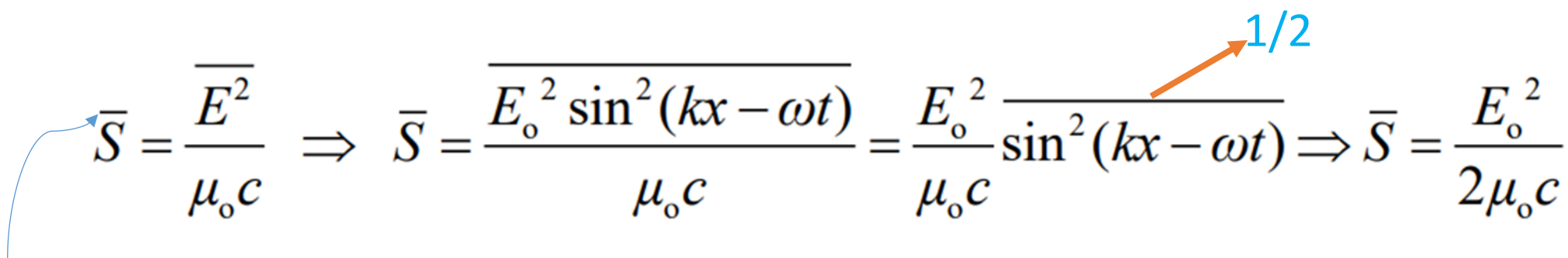
Η ένταση I του κύματος ορίζεται ως:

$$I = \frac{\bar{P}}{A} = \bar{S}$$

Όπου \bar{P} είναι η **μέση ισχύς**.

Η ένταση του κύματος εκφράζει την ενέργεια ανά δευτερόλεπτο του κύματος που διαρρέει επιφάνεια εμβαδού A .

Για επίπεδο κύμα με εξίσωση: $E = E_o \sin(kx - \omega t)$

$$\bar{S} = \frac{\overline{E^2}}{\mu_o c} \Rightarrow \bar{S} = \frac{\overline{E_o^2 \sin^2(kx - \omega t)}}{\mu_o c} = \frac{E_o^2}{\mu_o c} \overline{\sin^2(kx - \omega t)} \Rightarrow \bar{S} = \frac{E_o^2}{2\mu_o c}$$


Προσοχή αυτό το σύμβολο αντιστοιχεί
στη μέση τιμή και όχι σε διάνυσμα

Ένταση κύματος

Άρα η ένταση I του κύματος δίνεται από τις σχέσεις:

$$I = \bar{S} = \frac{c}{2\mu_0} B_0^2$$

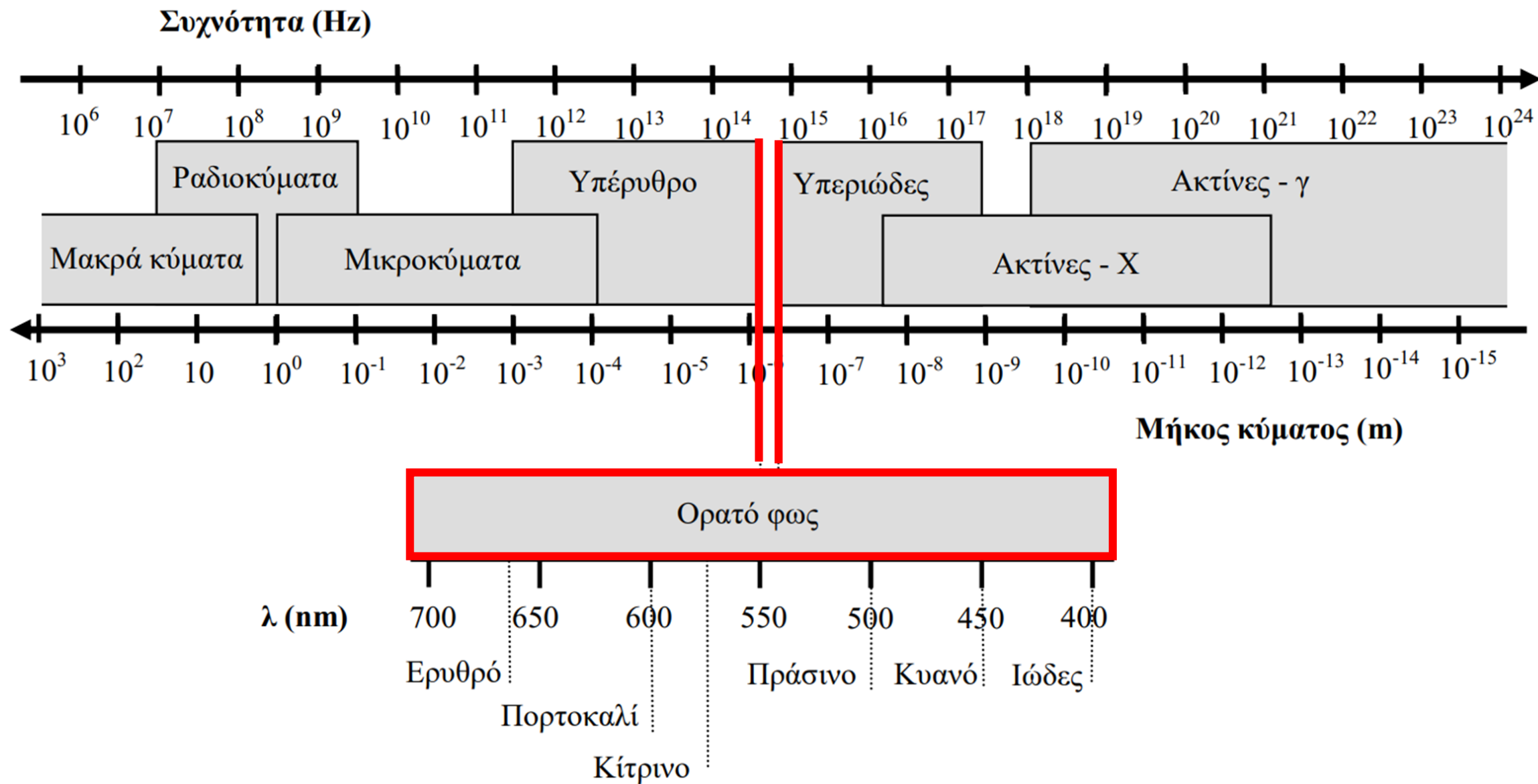
$$I = \bar{S} = \frac{1}{2\mu_0 c} E_0^2$$

Για μια πηγή κύματος σταθερής ισχύος, όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή, η ένταση του κύματος αναμένεται να **μειώνεται** με την απόσταση. Για παράδειγμα, εάν έχουμε σφαιρική κατανομή της ενέργειας στο χώρο, θεωρώντας σφαιρικά κύματα όπου το μέτωπο κύματος είναι σφαιρική επιφάνεια, η ένταση του κύματος σε κάθε σφαιρική επιφάνεια είναι:

$$I = \frac{\bar{P}}{A} = \bar{S} \quad \Rightarrow \quad I = \frac{\bar{P}}{4\pi r^2} \quad \Rightarrow \quad 4\pi r^2 \quad \text{Η επιφάνεια της σφαίρας}$$

Βασικές ιδιότητες όλων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων:

- 1) Τα πεδία \mathbf{E} και \mathbf{B} είναι κάθετα μεταξύ τους και είναι επίσης κάθετα στην ταχύτητα διάδοσης του κύματος, έτσι ώστε το διάνυσμα $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ να έχει την ίδια κατεύθυνση με την \mathbf{v} .
- 2) Κάθε ΗΜ κύμα διαδίδεται στο κενό με ταχύτητα $c = 1/\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$.
- 3) Σε κάθε σημείο του ΗΜ κύματος ισχύει $E = cB$.
- 4) Ο ρυθμός της ενέργειας που μεταφέρεται από το ΗΜ κύμα ανά μονάδα επιφανείας κάθετη στην διεύθυνση διάδοσης δίδεται από το διάνυσμα Poynting $\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

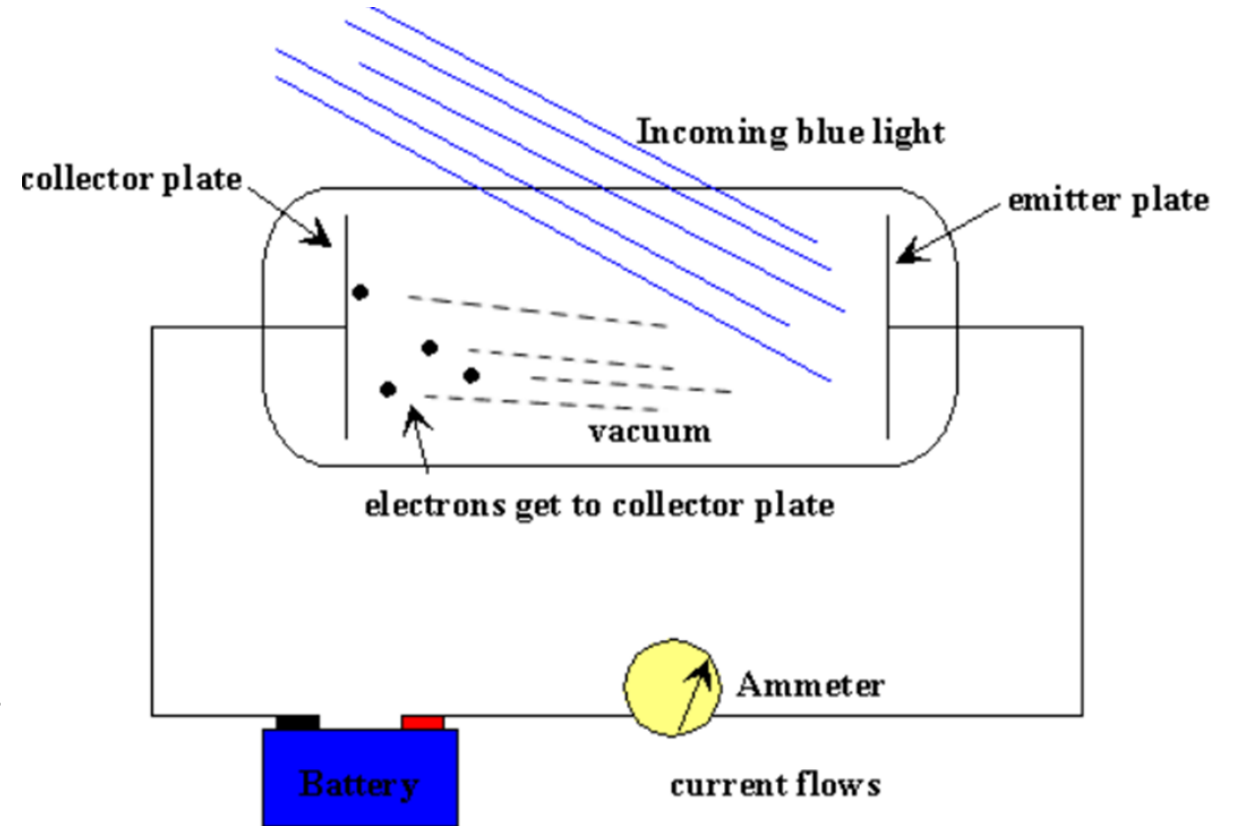


Το φως ως σωματίδια

Ο Einstein το 1905, για να εξηγήσει το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** που πρώτος παρατήρησε ο Hertz το 1887, θεώρησε ότι το φως δεν είναι κύμα, αλλά σωματίδιο.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την μεταλλική πλάκα πάνω στην οποία πέφτει το φως είναι ανάλογος των φωτονίων που πέφτουν πάνω στη μεταλλική πλάκα-συλλέκτη.
- Το ρεύμα στο κύκλωμα όμως **δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός αλλά από το μήκος κύματος του φωτός**. Η υπόθεση του Αϊνστάιν: Το φωτόνιο έχει ενέργεια $E=hf=hc/\lambda$ όπου h είναι η σταθερά του Planck
- Για να απελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο από μια μεταλλική πλάκα $E(\text{φωτόνιο}) > \text{ενέργεια κατωφλίου}$

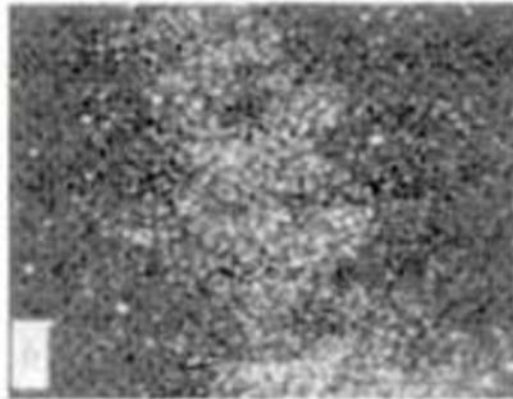


Το φως ως σωματίδια

Very very dim
(about 3000 photons)



Very dim



Dim



Getting brighter



Bright



Very bright
(over 30,000,000 photons)

Το φως ως σωματίδια

Η ενέργεια ενός μόνο φωτονίου είναι ίση με $E = hf = \hbar \omega$

Όπου h είναι η σταθερά Planck και είναι ίση με $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{Js}$.

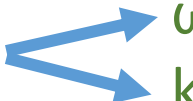
Πώς συνδέεται η ενέργεια κάθε φωτονίου με τη συνολική ενέργεια ενός σήματος;

Η συνολική ενέργεια ενός σήματος είναι ίση με την ενέργεια που έχουν το σύνολο των φωτονίων που την αποτελούν $E = Nhf$, όπου N ο συνολικός αριθμός των φωτονίων. Όταν για παράδειγμα χρησιμοποιούμε έναν ενισχυτή για να ενισχύσουμε το σήμα, εννοούμε ότι αυξάνουμε το N , το αριθμό των διαφορετικών κυμάτων.

Έχουν ορμή τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

k είναι ο κυματαριθμός

Ναι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν ορμή ίση με $p = h/\lambda = \hbar k$.

$$E = E_0 \sin(kx - \omega t)$$


ω : ενέργεια
 k : ορμή

Ερωτήσεις

- Μεταφέρουν τα ΗΜ κύματα ενέργεια;
- Εξαρτάται η ορμή ενός ΗΜ κύματος από την ενέργειά του;
- Έχουν τα ΗΜ κύματα στροφορμή;
- Με ποια ιδιότητα των κυμάτων συνδέεται η στροφορμή;
- Τι εκφράζει το διάνυσμα Poynting;
- Ποια είναι η ελάχιστη τιμή του διανύσματος Poynting;
- Ποια είναι η διεύθυνση ταλάντωσης του διανύσματος Poynting;
- Τι εκφράζει η ένταση του κύματος;
- Όσο απομακρυνόμαστε από την πηγή ενός κύματος, πώς μεταβάλλεται η ένταση του κύματος;
- Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, από ποια ιδιότητα του φωτός εξαρτάται το ρεύμα στο πειραματικό κύκλωμα;
- Πώς συνδέεται η ενέργεια κάθε φωτονίου με τη συνολική ενέργεια ενός σήματος;