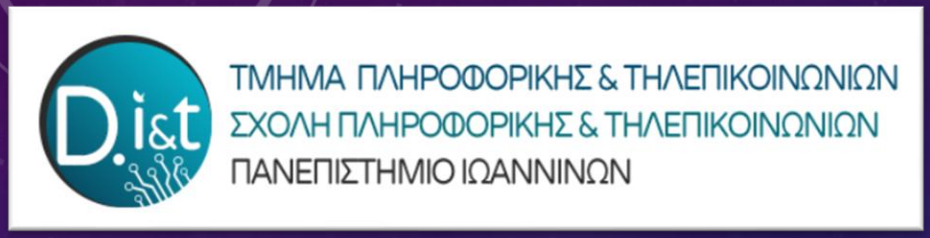


ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ

(β' μέρος)

Διδάσκων: Τσορμπατζόγλου Ανδρέας

Κύματα

Κύμα: μια επαναλαμβανόμενη διαταραχή που διαδίδεται στον χώρο με ή χωρίς της χρήση ενός φυσικού μέσου. Είναι ένας τρόπος μεταφοράς ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Παραδείγματα κυμάτων:

- φως
- κύματα σε υγρά
- ήχος
- ραδιοκύματα

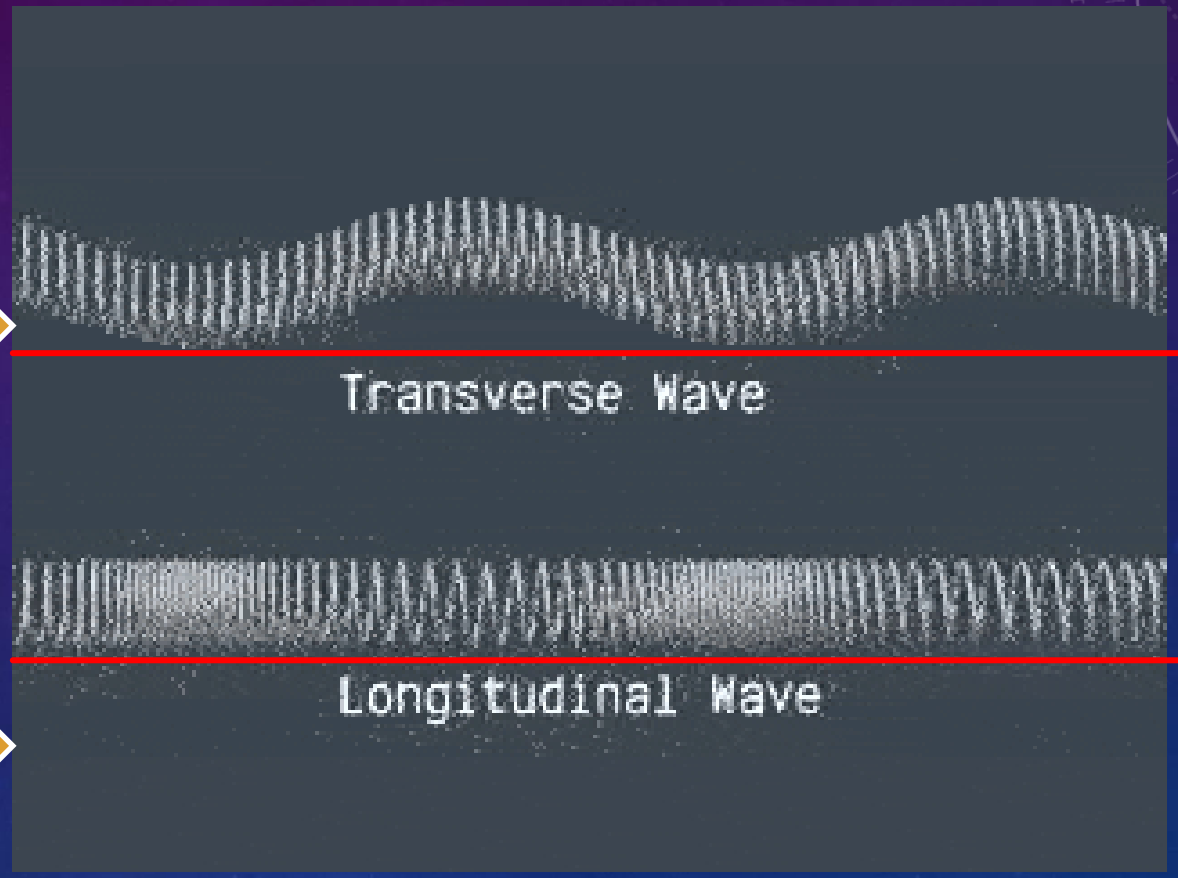
Ελεύθερος χώρος: χώρος χωρίς μαγνητικά πεδία, πεδία βαρύτητας, συμπαγή σώματα και ιονισμένα σωματίδια

Μέσο: Οποιοδήποτε υλικό (στερεό, υγρό, αέριο) εντός του οποίου διαδίδεται ένα κύμα.

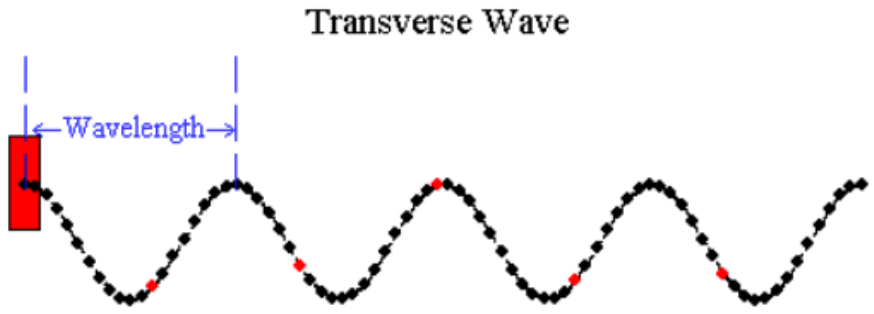
Κύματα

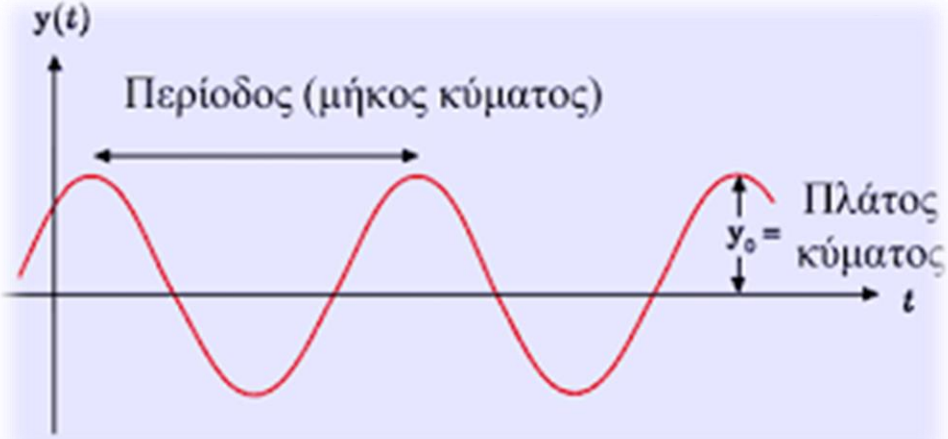
Εγκάρσια – Διαμήκη Κύματα

- **Εγκάρσια** όταν η διεύθυνση ταλάντωσης είναι κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης
- **Διαμήκη** όταν η διεύθυνση ταλάντωσης είναι παράλληλη στη διεύθυνση διάδοσης



Κύματα





Βασική Κυματική Εξίσωση

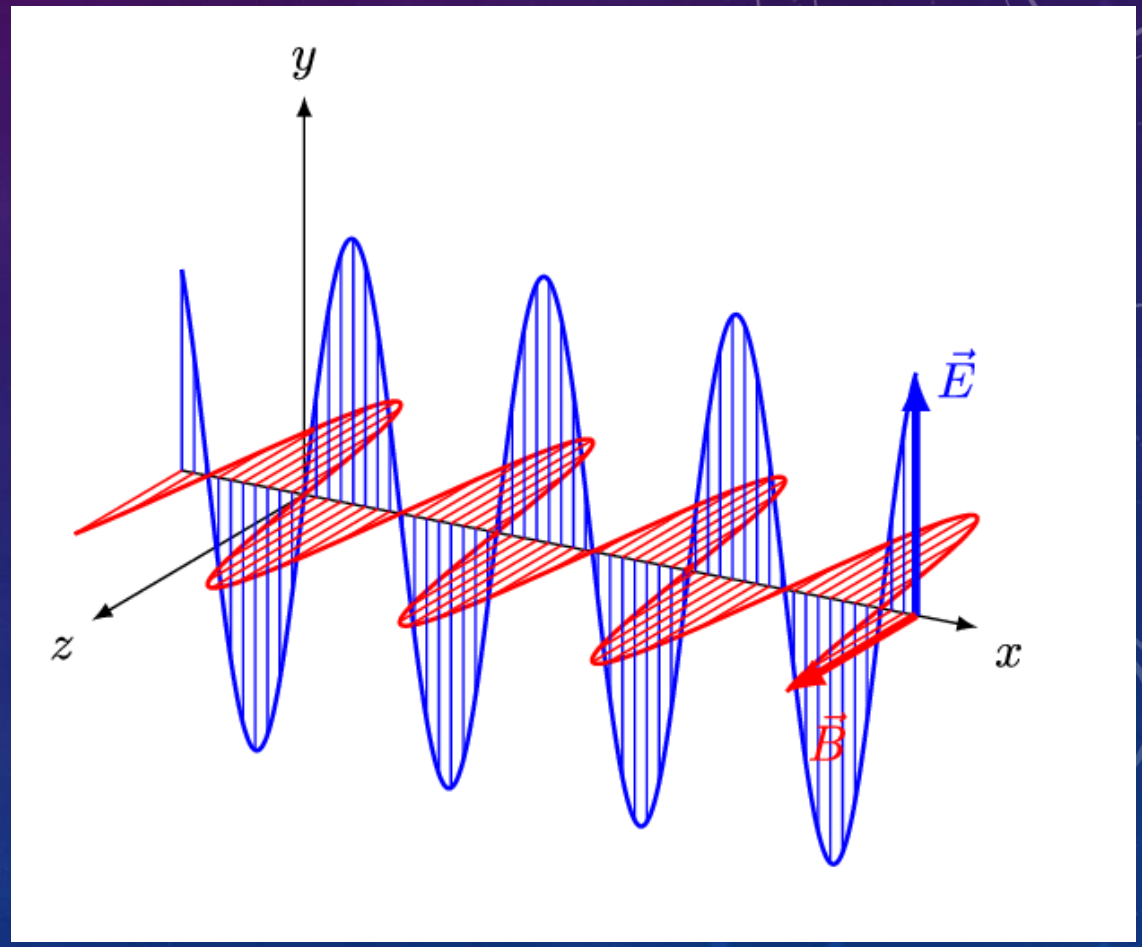
$$v = \lambda f$$

- Συχνότητα *f*:
  - γνώρισμα της πηγής
  - ανεξάρτητη από το μέσο μετάδοσης (Hz)
- Μήκος Κύματος *λ*:
  - απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών (ή κοιλάδων) του κύματος (m)
- Ταχύτητα Διάδοσης *v* (m/sec)
- Περίοδος Κύματος:
  - χρόνος για την εκτέλεση ενός κύκλου, μετά τη λήξη του οποίου το κύμα επαναλαμβάνεται (sec)

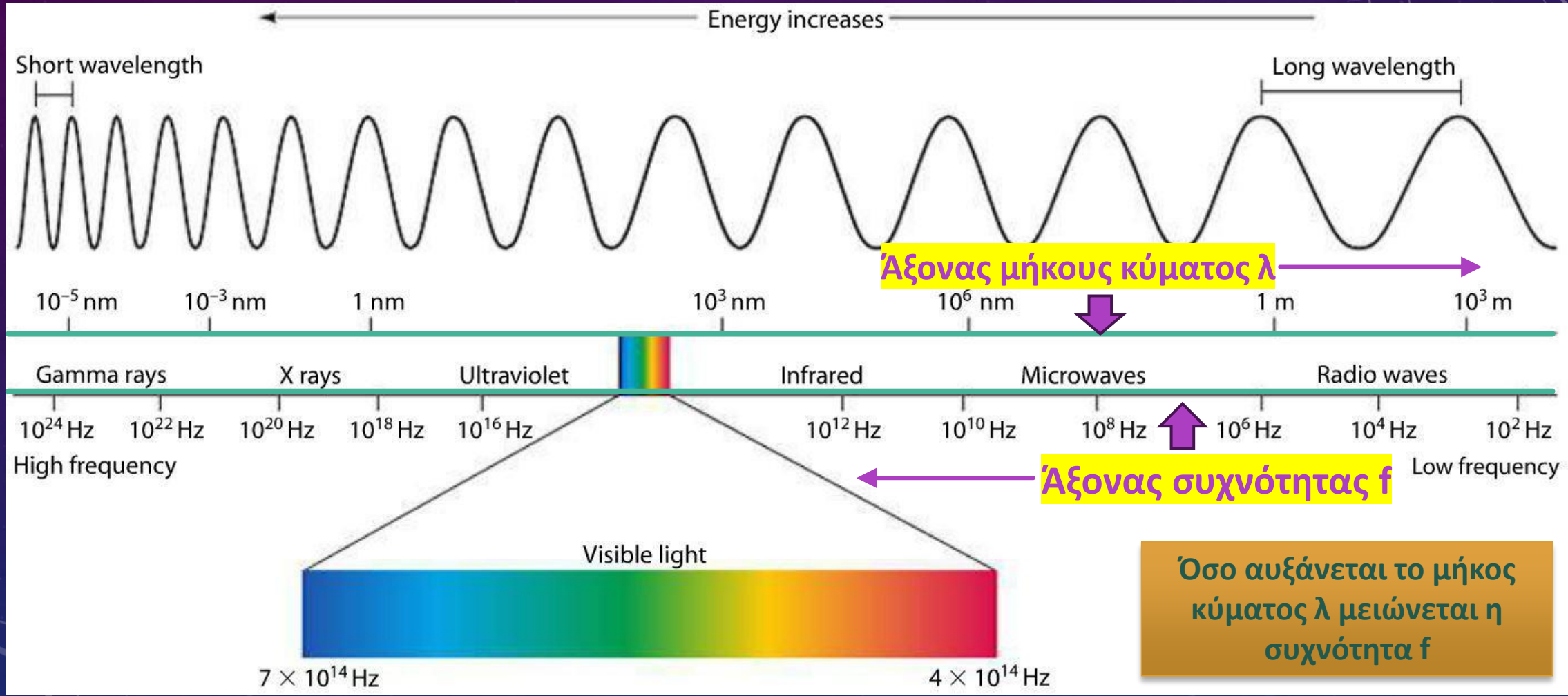
$$T = 1/f$$

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

- Τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα** είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης.
- 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.



Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Όσο αυξάνεται το μήκος κύματος λ μειώνεται η συχνότητα f

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Θεμελιώδη ΗΜ Κύματα

Τηλεπικοινωνίες

- Ισοτροπική Πηγή:
  - σημειακή πηγή που εκπέμπει ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις
  - είναι ιδανική
  - χρήσιμη ως αναφορά

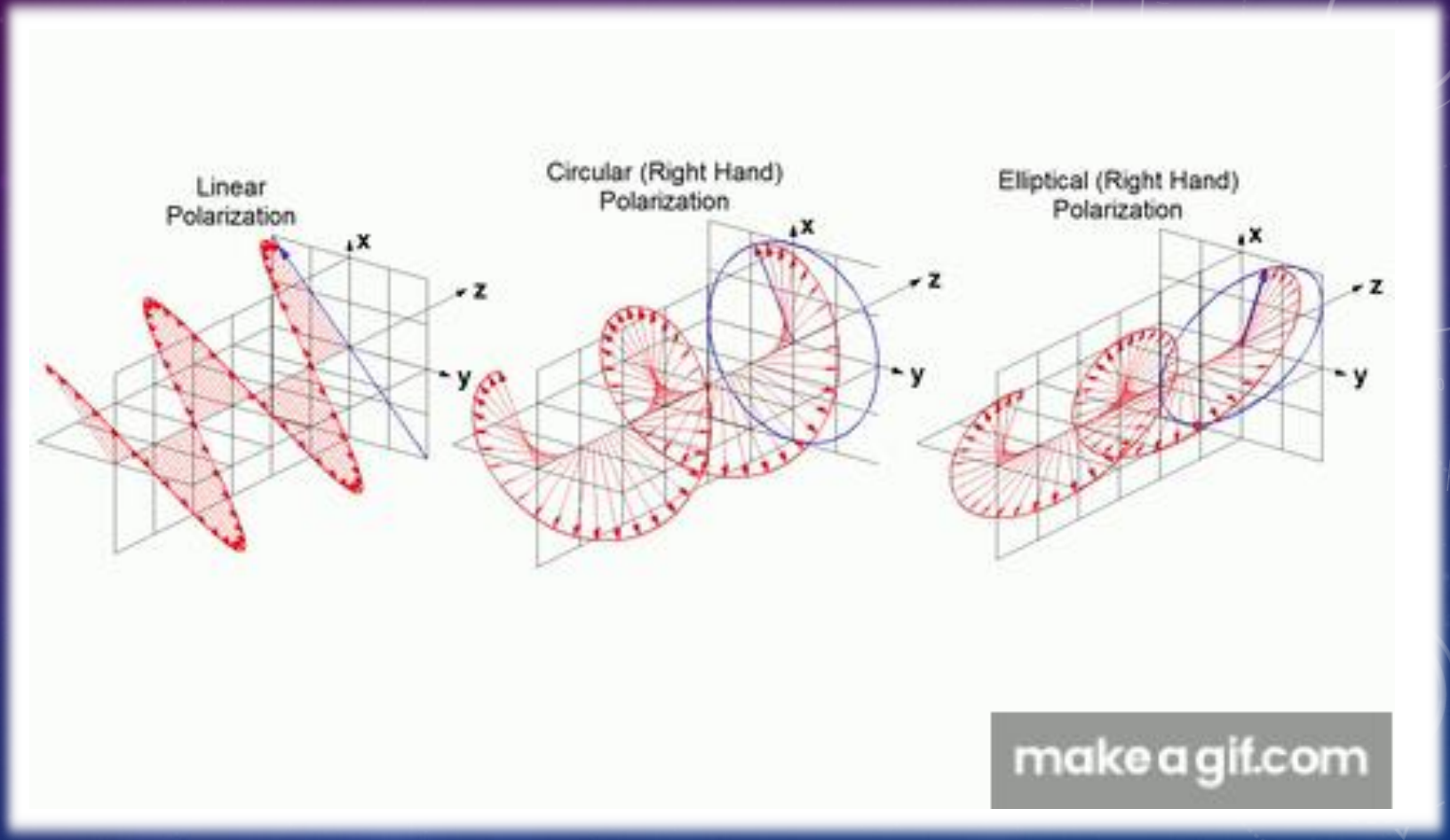
- Ισοτροπικός Χώρος:
  - σταθερή ταχύτητα διάδοσης σε όλα τα σημεία του χώρου
- Μέτωπο Κύματος:
  - όλα τα σημεία που έχουν την ίδια φάση

Πόλωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - 1

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

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

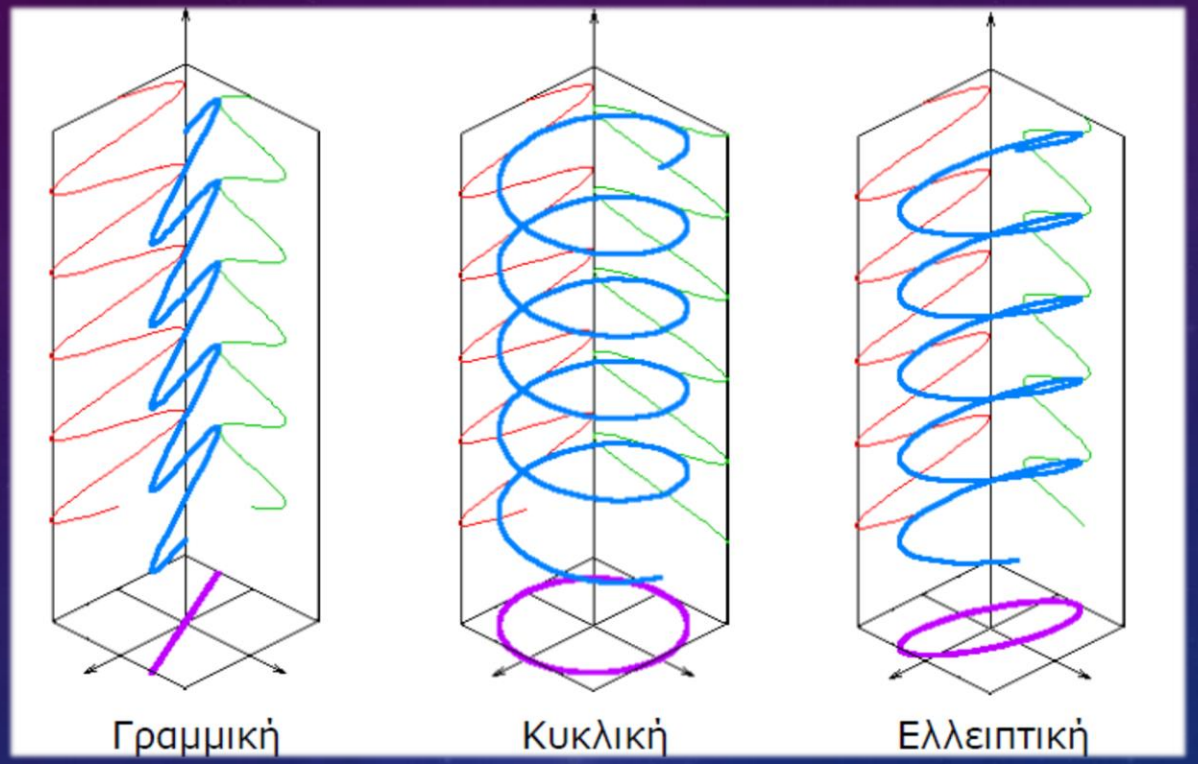
Ελλειπτικά πολωμένο κύμα: Τα πεδία **E** και **B** ταλαντώνονται σε ελλειπτικό σχήμα. Το επίπεδο ταλάντωσης των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων έχει κλίση ως προς την κατεύθυνση διάδοσης.



Στο σχήμα φαίνεται μόνο η ταλάντωση του ηλεκτρικού πεδίου. Το μαγνητικό πεδίο που εδώ δεν φαίνεται είναι πάντα κάθετο στο ηλεκτρικό πεδίο

Πόλωση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων - 2

Πόλωση ΗΜ κυμάτων



Ελλειπτική πόλωση - Κυκλική πόλωση (Kraus, 1993), (Alonso & Finn, 1992):
Ελλειπτική πόλωση: Το διάνυσμα ***E*** (αλλά και το αντίστοιχο ***B***) περιστρέφεται γύρω από την διεύθυνση διάδοσης διαγράφοντας μια ελλειψοειδή έλικα καθώς το κύμα διαδίδεται στο χώρο,
Κυκλική πόλωση: Το διάνυσμα ***E*** (αλλά και το αντίστοιχο ***B***) διαγράφει αντίστοιχη κυκλική έλικα.

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ:

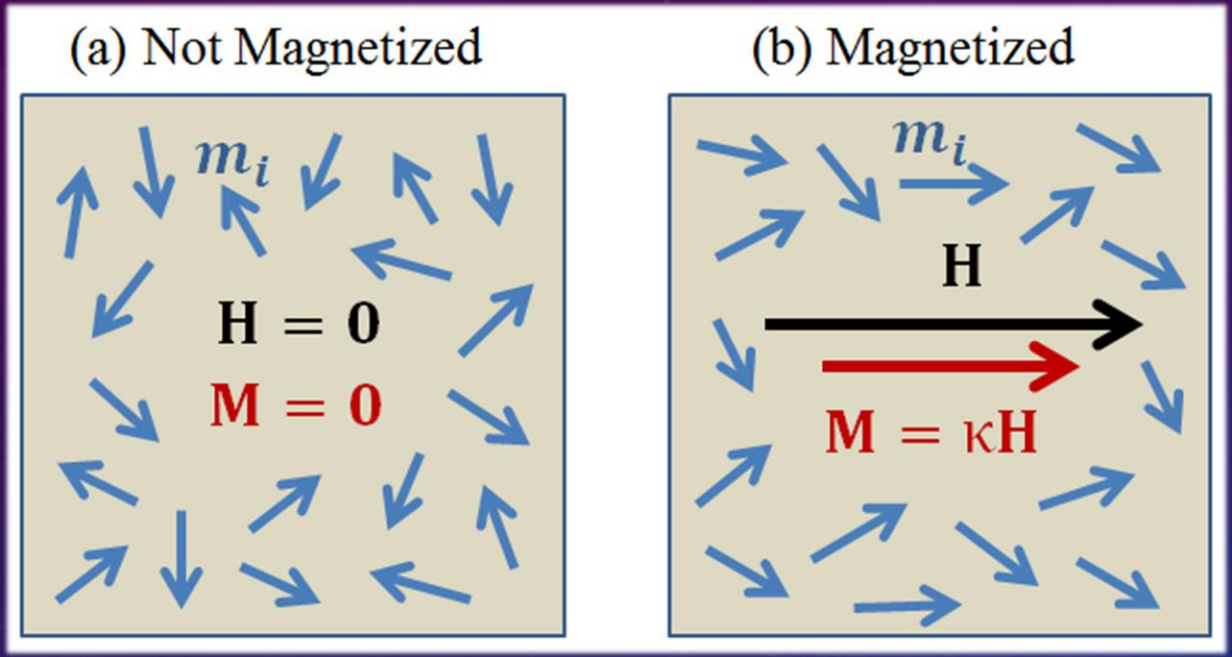
Πυκνότητες:

- Πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου (ρ)
- Πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (J) (Πηγές του πεδίου)

Πεδιακά Μεγέθη:

- Ένταση ηλεκτρικού πεδίου (E)
- Πυκνότητα ηλεκτρικής ροής ή διηλεκτρική μετατόπιση (D) $\vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_o \vec{\mathbf{E}} + \vec{\mathbf{P}}$
- Ένταση μαγνητικού πεδίου (H)
- Μαγνητική επαγωγή ή πυκνότητα μαγνητικής ροής (B) $\vec{\mathbf{H}} = \mu_o^{-1} \vec{\mathbf{B}} - \vec{\mathbf{M}}$

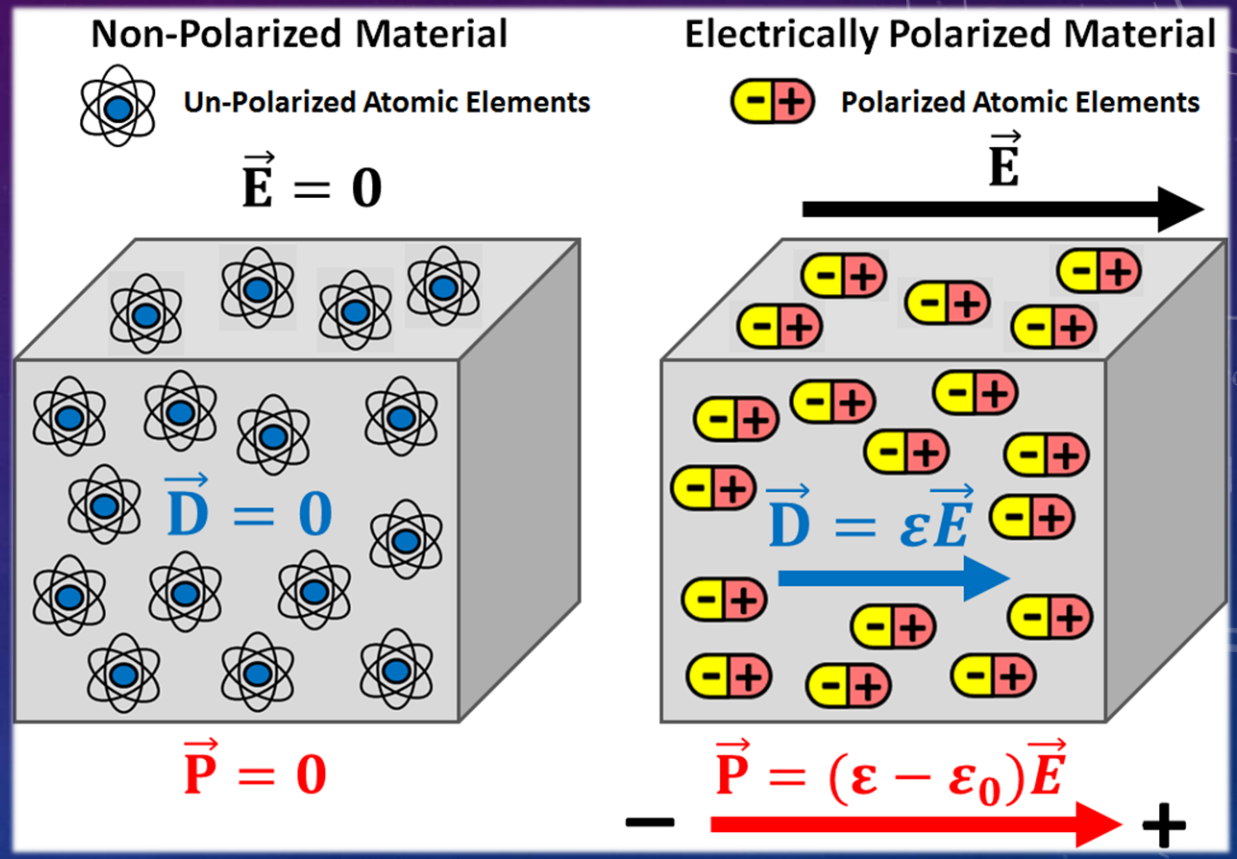
Μαγνήτιση υλικού



Η μαγνήτιση, που ονομάζεται επίσης μαγνητική πόλωση, είναι ένα διανυσματικό μέγεθος που μετρά την πυκνότητα της μόνιμης ή επαγόμενης διπολικής ροπής σε ένα δεδομένο μαγνητικό υλικό. Όπως γνωρίζουμε, η μαγνήτιση προκύπτει από τη μαγνητική ροπή, η οποία προκύπτει από την κίνηση των ηλεκτρονίων στα άτομα ή το σπιν των ηλεκτρονίων ή των πυρήνων. Όταν ένα μαγνητικό υλικό τοποθετηθεί μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο τα άτομά του ευθυγραμμίζουν τις μαγνητικές ροές τους με βάση το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο.

Πόλωση υλικού

Η **πόλωση** $\vec{P}$ είναι το διανυσματικό πεδίο που εκφράζει την πυκνότητα μόνιμων ή επαγόμενων ηλεκτρικών διπολικών ροπών σε ένα διηλεκτρικό υλικό. Όταν ένα διηλεκτρικό τοποθετείται σε ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, τα μόριά του αποκτούν ηλεκτρική διπολική ροπή και το διηλεκτρικό λέγεται ότι είναι πολωμένο. Η ηλεκτρική διπολική ροπή που προκαλείται ανά μονάδα όγκου του διηλεκτρικού υλικού ονομάζεται ηλεκτρική πόλωση του διηλεκτρικού



Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

ΕΞΙΣΏΣΕΙΣ MAXWELL ΣΤΟ ΚΕΝΌ (FREE SPACE)

Name	Integral equations	Differential equations
Gauss's law	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\iiint_{\Omega}\rho\,\mathrm{d}V$	$\nabla\cdot\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
Gauss's law for magnetism	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{B}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S} = 0$	$\nabla\cdot\mathbf{B} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{\ell} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_{\Sigma}\mathbf{B}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S}$	$\nabla\times\mathbf{E} = -\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial t}$
Ampère's circuital law (with Maxwell's addition)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{B}\cdot\mathrm{d}\boldsymbol{\ell} = \mu_0\left(\iint_{\Sigma}\mathbf{J}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S} + \varepsilon_0\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_{\Sigma}\mathbf{E}\cdot\mathrm{d}\mathbf{S}\right)$	$\nabla\times\mathbf{B} = \mu_0\left(\mathbf{J} + \varepsilon_0\frac{\partial\mathbf{E}}{\partial t}\right)$

Lorentz Force Law

$$\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v}\times\mu_o\vec{H}\right)$$

Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ MAXWELL ΣΤΗΝ ΥΛΗ

Name	Integral equations (SI convention)	Differential equations (SI convention)
Gauss's law	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = \iiint_{\Omega} \rho_\mathrm{f} \, \mathrm{d}V$	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_\mathrm{f}$
Ampère's circuital law (with Maxwell's addition)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{H} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{\ell} = \iint_{\Sigma} \mathbf{J}_\mathrm{f} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{D} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_\mathrm{f} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$
Gauss's law for magnetism	$\oiint_{\partial\Omega} \mathbf{B} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S} = 0$	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$
Maxwell–Faraday equation (Faraday's law of induction)	$\oint_{\partial\Sigma} \mathbf{E} \cdot \mathrm{d}\boldsymbol{\ell} = -\frac{d}{dt} \iint_{\Sigma} \mathbf{B} \cdot \mathrm{d}\mathbf{S}$	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 1

Κυματική εξίσωση που προκύπτει από τις εξισώσεις Maxwell.

$$\nabla^2\vec{\mathrm{E}} - \mu\varepsilon\frac{\partial^2\vec{\mathrm{E}}}{\partial \mathrm{t}^2} = \mu\frac{\partial\vec{\mathrm{J}}}{\partial \mathrm{t}}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\nabla^2\tilde{E} + n(\omega)k_0^2\tilde{E} = 0$$

$$\tilde{\mathrm{E}}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty}\mathrm{E}(t)e^{-i\omega t}dt$$

$\tilde{E}$ ο μετασχηματισμός Fourier της έντασης Ε του ηλεκτρικού πεδίου

k_0 ο κυματαριθμός και $n = \begin{cases} n_1 & \rho < a \\ n_2 & \rho < a \end{cases}$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 2

- Τρόπος μετάδοσης ή οπτικός τρόπος μετάδοσης είναι μια συγκεκριμένη λύση της κυματικής εξίσωσης που ικανοποιεί τις οριακές συνθήκες της οπτικής ίνας.

Τρεις βασικοί τρόποι μετάδοσης:

1) Κυματοδηγούμενοι
2) Διαρρέοντες
3) Ακτινοβολίας

Λύση της κυματικής εξίσωσης:

$$\mathrm{E}_z = \begin{cases} AJ_m(p\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} & \rho \le a \\ CK_m(q\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} & \rho > \alpha \end{cases}$$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 2

J_m και K_m ειδικές συναρτήσεις Bessel και p, q παράμετροι που εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του φωτός και της οπτικής ίνας. β είναι η σταθερά διάδοσης που υπό προϋποθέσεις μπορεί να ληφθεί ίση με τον κυματαριθμό

$$J_\alpha(x) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m!\,\Gamma(m+\alpha+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{2m+\alpha}$$

$$AJ_m(p\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} = AJ_m(p\rho)e^{im\varphi+i\beta z} = AJ_m(p\rho)e^{i(m\varphi+\beta z)}$$

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i\sin(\theta) \qquad (\text{Κανόνας } Euler)$$

$$AJ_m(p\rho)e^{im\varphi+i\beta z} = AJ_m(p\rho)\left(\cos(m\varphi+\beta z) + i\sin(m\varphi+\beta z)\right)$$

$$\mathrm{Re}\left(AJ_m(p\rho)\left(\cos(m\varphi+\beta z) + i\sin(m\varphi+\beta z)\right)\right) = AJ_m(p\rho)\cos(m\varphi+\beta z)$$

Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 3

$$E_z = AJ_m(p\rho)\cos(\beta z + m\varphi)$$

$$E_z = Eo\cos(kz - \omega t)$$

$$\mathrm{E}_z = \begin{cases} AJ_m(p\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} & \rho \le a \\ CK_m(q\rho)e^{im\varphi}e^{i\beta z} & \rho > \alpha \end{cases} \quad \text{όπου} \quad p = k_0\sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}$$

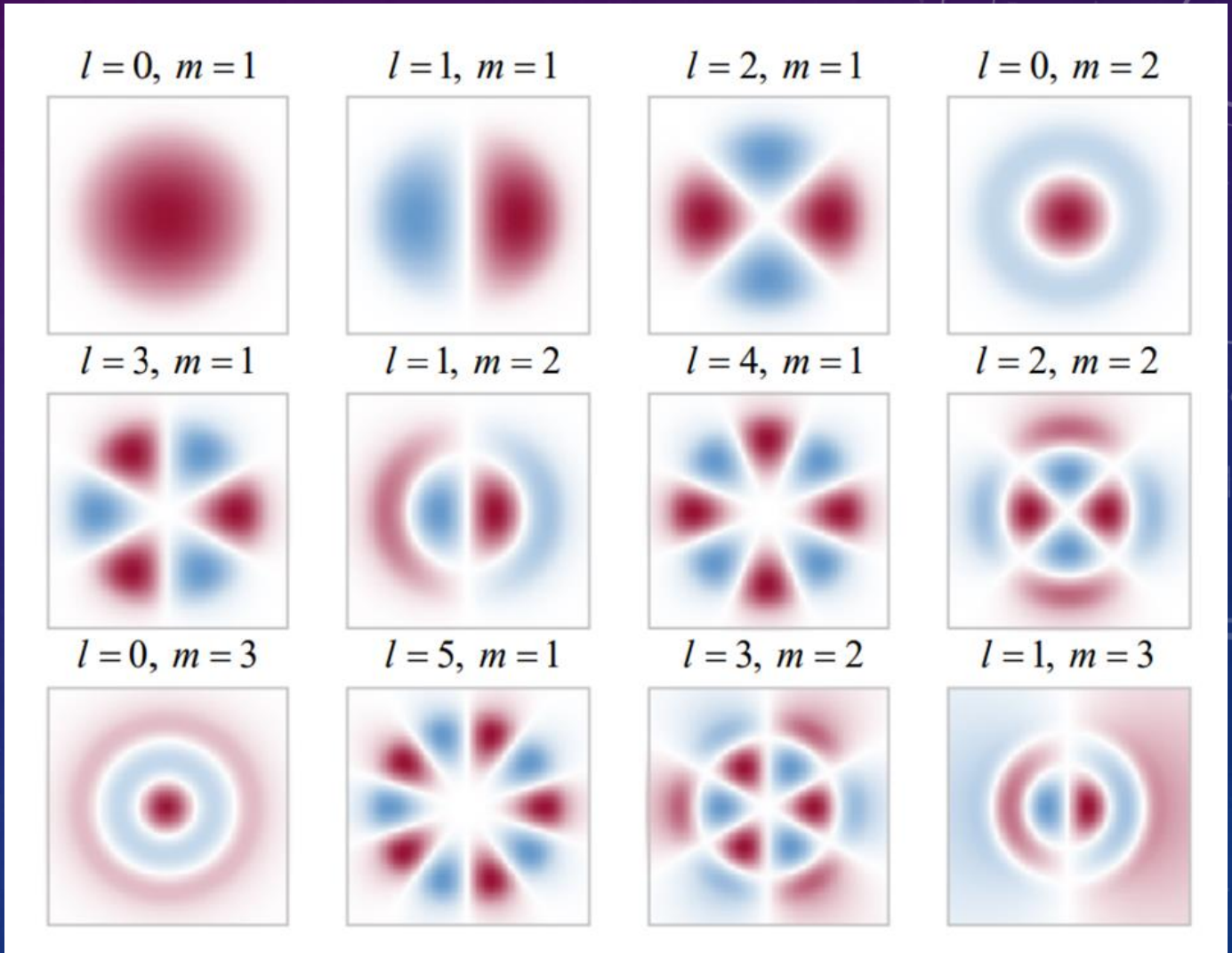
Μια σημαντική παράμετρος λαμβάνεται αν πολλαπλασιάσω το p με την ακτίνα του πυρήνα

$$V = ap = \frac{2\pi a\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{\lambda}$$

Ο αριθμός V παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της συνθήκης αποκοπής, δηλαδή πότε η ακτινοβολία διαφεύγει από την οπτική ίνα.

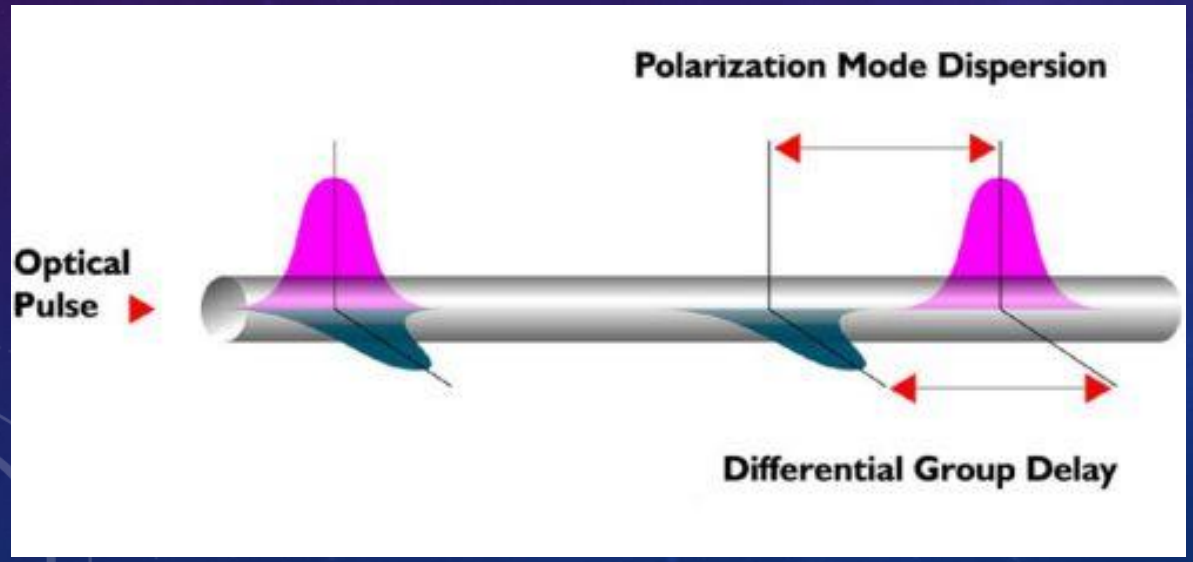
Τρόποι μετάδοσης στην οπτική ίνα - 4

- Κατανομή πεδίου για μερικά από τα γραμμικώς πολωμένα κύματα LP χαμηλότερης τάξης
- l=0 κυκλική συμμετρία
- Τα διαφορετικά χρώματα έχουν μεταξύ τους διαφορετικές φάσεις



Διπλοθλαστικότητα

- Σε μια μονότροπη οπτική ίνα υπάρχουν δύο ορθογώνια πολωμένοι τρόποι διάδοσης που όμως είναι εκφυλισμένοι (διαφέρουν μόνο στην πόλωση). Αυτοί οι τρόποι πόλωσης είναι κάθετοι μεταξύ τους στους άξονες x και y.
- Οι λύσεις της διαφορικής εξίσωσης προκύπτουν για τέλειους κυλινδρικούς πυρήνες με ομοιόμορφους δείκτες διάθλασης.
- Οι πραγματικές ίνες όμως έχουν ανομοιομορφίες και ο εκφυλισμός εξαφανίζεται.
- Τελικά το φως αλλάζει συνεχώς πόλωση μεταξύ των 2 ακραίων καταστάσεων



Για να αποφύγω αυτό το φαινόμενο φτιάχνω διπλοθλαστικούς πυρήνες. Δηλαδή πυρήνες που έχουν μεγάλη διαφορά στο δείκτη διάθλασης στον x και y άξονα ώστε να διατηρώ σταθερή την πόλωση σε έναν άξονα.