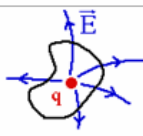

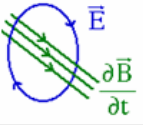
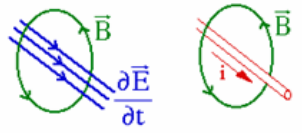


Τα ΗλεκτροΜαγνητικά Κύματα – Μια Εκπαιδευτική Προσέγγιση της Εφαρμογής των Εξισώσεων Maxwell και της Επιστημονικής / Ερευνητικής Μεθόδου *

Γεώργιος Θεοφ. Καλκάνης
Research Assistant, Harvard University

οι εξισώσεις του Maxwell		
$\oint_S \vec{E} ds \vec{u}_n = \frac{q}{\epsilon_0}$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	
$\oint_S \vec{B} ds \vec{u}_n = 0$	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	
$\oint_l \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} ds \vec{u}_n$	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	
$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} ds \vec{u}_n + \mu_0 I$	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{j}$	

Οι –μόλις– τέσσερις εξισώσεις Maxwell, όπως διαμορφώθηκαν από τα μέσα του 19ου αιώνα και απεδείχθησαν έως τώρα θεωρητικά επαρκείς και πειραματικά συνεπείς, αλλά και "αναλλοίωτες" μετά από το σχετικιστικό και κβαντικό έλεγχο, εκφράζουν μαθηματικά την πλέον πλήρη επιστημονική θεωρία η οποία έχει διατυπωθεί ποτέ, την **ηλεκτρομαγνητική θεωρία**. Αυτή περιγράφει, ερμηνεύει και ενοποιεί όλα τα ηλεκτρικά και μαγνητικά φαινόμενα, αλλά και προβλέπει την ύπαρξη και παραγωγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

η ποιητική του Maxwell

Αν η μαθηματική έκφραση μιας επιστημονικής θεωρίας, όπως και η ποιητική έκφραση, –πρέπει να– χαρακτηρίζονται από απλότητα, λιτότητα, πληρότητα, συμμετρία και ομορφιά, τότε οι εξισώσεις Maxwell συνθέτουν (και) το ωραιότερο ποίημα το οποίο έχει γραφεί ποτέ στη μαθηματική γλώσσα...

(απόσπασμα από την προσκεκλημένη ομιλία "Από τον μικρόΚοσμο, στον ΜακρόΚοσμο, στην ΠολυΠλοκότητα – Από το δημοκρίτειο "ά-τομον", στον αναξαγόρειο "νον", στον κβαντικό (;) "εγκέφαλο" (μια Εκπαιδευτική Προσέγγιση)", Γ.Θ. Καλκάνης, Α' Θερινό Σχολείο "Δυναμικές Στρατηγικές στην Εκπαίδευση", Δελφοί, 17-21 / 08 / 2005)

Η γνώση ή, ακόμη, η οποιαδήποτε υποψία του ανθρώπου για την ύπαρξη αυτού το οποίο σήμερα ονομάζουμε ηλεκτρομαγνητικό κύμα, δεν υπήρξε για αιώνες, αφού η αισθητηριακή αντίληψή του δεν είναι δυνατή παρά μόνο για ένα περιορισμένο τμήμα του.

Αυτό το οποίο ονομάσαμε από πολύ παλιά φως, αυτό το οποίο ύμνησαν οι ποιητές και τραγούδησαν οι μουσικοί, αυτό το οποίο μας δείχνει και μας ομορφαίνει τη ζωή...

Αλλά και η εμπειρική σχέση του ανθρώπου με το φως δεν αποκάλυπτε το εύρος του γενικότερου φυσικού φαινομένου, του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, το οποίο μετείχε και

* μετάφραση από τα φροντιστηριακά μαθήματα του Γεωργ. Θεοφ. Καλκάνη για την "ΗλεκτροΜαγνητική Θεωρία", στο πλαίσιο των παραδόσεων του καθηγητή Carlo Rubia (βραβείο Nobel Φυσικής, 1984) στο Harvard University, (1981-82)

μετέχει ισοδύναμα με τη μάζα, ως μια από τις δύο εκφάνσεις του κυματοσωματιδιακού μικροκόσμου.

Η μυστηριακή αίσθηση του φωτός δεν ήταν δυνατό να συνδεθεί με τις μεταβολές οποιουδήποτε ηλεκτρικού (!) και μαγνητικού (!) πεδίου και την όποια μεταξύ τους σχέση.

μια εφαρμογή των εξισώσεων Maxwell και της επιστημονικής / ερευνητικής μεθόδου / η εκπαιδευτική προσέγγιση

Η "αποκάλυψη" του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ήρθε πράγματι από τις εξισώσεις Maxwell. Η διαδικασία συνιστά μια συνεπή εφαρμογή της επιστημονικής / ερευνητικής μεθόδου, αλλά και μια υποδειγματική εκπαιδευτική προσέγγισή της.

η επιστημονική / ερευνητική και εκπαιδευτική(;) μέθοδος

Μια αδρή σχηματοποίηση της ιστορικά καταξιωμένης επιστημονικής μεθόδου, της μεθόδου την οποία χρησιμοποίησε –και χρησιμοποιεί– ο άνθρωπος / επιστήμονας / ερευνητής για τη μελέτη του φυσικού κόσμου, οδηγεί στη διάκριση των εξής βημάτων της: έναυσμα ενδιαφέροντος, διατύπωση υποθέσεων, πειραματισμός, διατύπωση θεωρίας, διαρκής έλεγχος (επιβεβαίωση ή διάψευση).

Αυτή η επιστημονική μέθοδος χρησιμοποιείται –ή πρέπει να χρησιμοποιείται– και κατά την εκπαιδευτική διαδικασία των φυσικών επιστημών ως εκπαιδευτική μέθοδος, με τα ίδια ή προσαρμοσμένα ανάλογα βήματα: έναυσμα ενδιαφέροντος, διατύπωση υποθέσεων / προβληματισμός, πειραματισμός / δραστηριότητες, διατύπωση συμπερασμάτων, εφαρμογή / εμπέδωση / γενίκευση.

Κατά την εφαρμογή της όμως ο άκρατος εμπειρισμός έχει παρασύρει πολλούς ερευνητές και εκπαιδευτικούς στην αναζήτηση του εναύσματος κάθε ερευνητικής και εκπαιδευτικής διαδικασίας αποκλειστικά στην παρατήρηση.

Αλλά τόσο η ερευνητική εποποιία του ανθρώπου, όσο και η εκπαιδευτική του πρακτική, τις τελευταίες ιδίως δεκαετίες, βρίθουν παραδειγμάτων φαινομένων και θεματικών στα οποία το ερευνητικό ή και το εκπαιδευτικό ενδιαφέρον δεν είναι δυνατό να προκληθεί -από τον ερευνητή ή τον εκπαιδευόμενο, αντίστοιχα- από κάποια πρωτογενή παρατήρηση στη φύση.

Πολλά φυσικά φαινόμενα τα οποία μελετήθηκαν, ιδίως κατά τις τελευταίες δεκαετίες, αποκαλύφθηκαν με έναυσμα κάποιες μαθηματικές διατυπώσεις / εκφράσεις ή και προβλέψεις, πριν παρατηρηθούν στη φύση ή αναδειχθούν και πραγματοποιηθούν στο επιστημονικό εργαστήριο.

Αντίστοιχα, κατά την εκπαιδευτική διαδικασία μελέτης τέτοιων φαινομένων, η χρήση της μαθηματικής αποκάλυψής τους, πρώτα, για να ακολουθήσει η εργαστηριακή επιβεβαίωσή τους, σύμφωνα με την επιστημονική μέθοδο, ίσως βελτιστοποιήσει την εκπαιδευτική διαδικασία.

Αυτή η τακτική και πρακτική, αφενός επιτρέπει την ανάδειξη του μαθηματικού εργαλείου και σε μια ακόμη (πέραν των άλλων) βήμα ή φάση της επιστημονικής έρευνας, αυτής του εναύσματος / ενδιαφέροντος, αφετέρου μεταφέρει στην εκπαιδευτική διαδικασία την πορεία που ακολούθησε η επιστημονική έρευνα και αφαιρεί τη συχνά δικαιολογημένη απορία για το πώς ο άνθρωπος έφθασε στη γνώση.

Αυτό δε σημαίνει ότι ο ρόλος των μαθηματικών στην έρευνα των φυσικών επιστημών και στην εκπαιδευτική διαδικασία τους, είναι κυριαρχικός, είναι όμως καθοριστικός.

Επαναλαμβάνουμε ότι τον κυριαρχικό ρόλο τόσο στην έρευνα όσο και στην εκπαίδευση στις φυσικές επιστήμες έχει ο πειραματισμός.

Η επιστημονική / ερευνητική περίπτωση

το έναυσμα

Ο James Maxwell το 1864 συγκέντρωσε και συμπλήρωσε τις τέσσερις –ομώνυμες πλέον– εξισώσεις:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1^{\text{η}})$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2^{\text{η}})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3^{\text{η}})$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4^{\text{η}})$$

(όπου \vec{E} η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, \vec{B} η ένταση του μαγνητικού πεδίου, ϵ_0 διηλεκτρική σταθερά του κενού, μ_0 μαγνητική σταθερά του κενού, ρ πυκνότητα φορτίων).

Αυτές οι εξισώσεις απετέλεσαν –και αποτελούν έως σήμερα– μια εκπληκτικά πλήρη και ακριβή –αλλά και λιτή και κομψή– περιγραφή της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

Έως τότε, τα –γνωστά μας σήμερα και τόσο άρρηκτα συνδεδεμένα με το σύγχρονο τεχνολογικό μας πολιτισμό– ηλεκτρομαγνητικά κύματα ήταν άγνωστα.

Ήταν άγνωστα παρότι το –αρχέγονο– φως είναι, επίσης, ηλεκτρο–μαγνητικό κύμα. Ποιος όμως θα μπορούσε, παρατηρώντας το απλώς, να καταλήξει στο –καταπληκτικό– συμπέρασμα ότι είναι –όπως κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα– μια διαταραχή του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου; Η σύνδεση ήταν αδύνατη και δεν ήταν δυνατό να αποτελέσει έναυσμα για οποιονδήποτε συσχετισμό.

Η αυξανόμενη όμως εκτίμηση των πειραματικών φυσικών στην αξιοπιστία των εξισώσεων Maxwell και η βεβαιότητα για την πληρότητά τους συνιστούσαν –αφεαυτές– το έναυσμα για μια περαιτέρω, συνδυαστική αξιοποίησή τους, έστω και χωρίς συγκεκριμένους στόχους.

Ίσως η προσπάθεια να περιλάβουν και όρους οι οποίοι εκφράζουν ενέργεια να ήταν μια πρώτη σκέψη / έναυσμα.

Απεδείχθη ότι αρκούσαν απλώς μερικές μαθηματικές πράξεις και μερικοί μετασχηματισμοί επί των εξισώσεων (στο κενό, όπου $\rho = 0$ και $\vec{j} = 0$), καθώς καταγράφηκαν μαζί για πρώτη φορά και συνδυάστηκαν, για να φθάσει κανείς σε δύο σημαδιακές εξισώσεις.

$$\nabla^2 \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

οι υποθέσεις

Οι εξισώσεις από τις οποίες προέκυψαν θύμισαν στον πρώτο ερευνητή που τις κατέγραψε τη γνωστή –και τότε– εξίσωση των μηχανικών κυμάτων:

$$\nabla^2 \vec{\xi} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \vec{\xi}}{\partial t^2} = 0$$

όπου v η ταχύτητα του μηχανικού κύματος. Στη θέση της απομάκρυνσης $\vec{\xi}$ βρίσκονται οι εντάσεις του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} και του μαγνητικού πεδίου \vec{B} .

Αυτό σημαίνει ότι εκτός των μηχανικών κυμάτων στη φύση υπάρχουν και ηλεκτρομαγνητικά κύματα (!!).

Αυτά μάλιστα, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις, διαδίδονται στο κενό (!), με μια (μέγιστη για το σύμπαν μας) ταχύτητα

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 300.000 \text{ km/sec } (!).$$

Μήπως αυτή η ταχύτητα κύματος πρέπει να ταυτιστεί με την ταχύτητα του φωτός (!!).

ο πειραματισμός

Εντατικές πειραματικές προσπάθειες ξεκίνησαν αμέσως σε πειραματικές διατάξεις οι οποίες κατασκευάστηκαν ειδικά. Η επιβεβαίωση ήρθε από το εργαστήριο του Hertz αρκετά αργότερα (1884). Εκτός του φωτός, το οποίο είναι ηλεκτρο-μαγνητικό κύμα, δημιουργήθηκαν τεχνητά ηλεκτρο-μαγνητικά κύματα (ραδιοφωνικά, τηλεφωνικά, τηλεοπτικά κλπ.). Η ταχύτητά τους βρέθηκε ίση με την προβλεφθείσα τιμή και ίση με την ταχύτητα του φωτός.

το πρότυπο / η θεωρία

Το επιστημονικό πρότυπο περιγραφής, δημιουργίας, συμπεριφοράς, ερμηνείας και πρόβλεψης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας διατυπώθηκε.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα:

- περιγράφονται ως χρονικές μεταβολές / διαταραχές του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου (χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο)

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad \text{και} \quad \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

τα οποία είναι κάθετα μεταξύ τους

$$(\vec{E} \perp \vec{B}),$$

- δημιουργούνται από επιταχυνόμενα / επιβραδυνόμενα (συνήθως ταλαντούμενα) ηλεκτρικά φορτία και πρέπει να ικανοποιούν τις εξισώσεις Maxwell,
- συμπεριφέρονται όπως και τα μηχανικά κύματα (σκεδάζονται, ανακλώνται, διαθλώνται, περιθλώνται, απορροφώνται στην / από την ύλη), κινούμενα με ταχύτητα $c \approx 300.000 \text{ km/sec}$,
- ερμηνεύονται ως ένας τρόπος διάδοσης της ενέργειας (και) στο κενό,
- προβλέπονται πλήρως, όσον αφορά στη δημιουργία και τη συμπεριφορά τους, από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία.

ο έλεγχος / επιβεβαίωση ή διάψευση

Οι συνεχείς πειραματικοί έλεγχοι –τόσο στα επιστημονικά και τεχνολογικά εργαστήρια όσο και κατά τη συνεπή λειτουργία πάμπολλων και ποικίλων τεχνολογικών εφαρμογών– επιβεβαιώνουν το παραπάνω πρότυπο.

η εκπαιδευτική εκδοχή / αξιοποίηση

Κατά τη συμβατική, συνήθη εκπαιδευτική διαδικασία αυτού του φυσικού φαινομένου, η ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εισάγεται περίπου μαγικά, ως κάτι που ήταν πάντα γνωστό.

Αντί της επιστημονικής πορείας που ακολουθήθηκε (δηλαδή από τις μαθηματικές εκφράσεις στο φυσικό φαινόμενο και στη συνέχεια στην τεχνολογική εφαρμογή), υπονοείται μια αντίστροφη πορεία: από την τεχνολογία (που δεν υπήρχε πάντοτε...) στην επιστημονική θεωρία, στη μαθηματική περιγραφή.

Όμως τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έγιναν γνωστά από μια συγκεκριμένη μαθηματική διαδικασία –με έναυσμα όχι εμπειρικό–, ακολούθησε η διατύπωση του προτύπου του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (στο πλαίσιο της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας) και αξιοποιήθηκαν από συγκεκριμένες τεχνολογικές εφαρμογές (οι οποίες σήμερα είναι δυνατό να προκαλέσουν και το έναυσμα της σχετικής εκπαιδευτική διαδικασίας).

Η ανακολουθία είναι προφανής.

ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΚΥΜΑΤΟΣ

Οι εξισώσεις κύματος, όπως προέκυψαν από τις εξισώσεις Maxwell και κατεγράφησαν πιο πάνω, περιγράφουν επαρκώς και με ακρίβεια το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, ώστε να συνθέτουν το μαθηματικό / φυσικό πρότυπο περιγραφής, δημιουργίας, συμπεριφοράς και πρόβλεψής του.

Το πρότυπο αυτό θεωρείται ως ένα από τα χαρακτηριστικότερα και αντιπροσωπευτικότερα πρότυπα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας.

Επιχειρώντας κάποιους μαθηματικούς μετασχηματισμούς / μαθηματικές πράξεις / δράσεις με τελεστές στις εξισώσεις κύματος, ερμηνεύοντας τις εξαγόμενες σχέσεις, εξετάζοντας τη φυσική σημασία τους αλλά και τη φυσική σημασία των φυσικών μεγεθών τα οποία εμπλέκουν, και εφαρμόζοντάς τις, παίρνουμε τα βασικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΚΥΜΑΤΟΣ

Οι εξισώσεις κύματος ή κυματικές εξισώσεις του ηλεκτρο-μαγνητικού κύματος γράφονται:

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad \text{και} \quad \nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$$

για το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο (ή τις συνιστώσες του), όπου ∇^2 είναι ένας ακόμη μαθηματικός τελεστής (βλ. παράρτημα)

Θεωρούμε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ως συνιστάμενο από δύο συνιστώντα κύματα: το ηλεκτρικό και το μαγνητικό κύμα, και δημιουργούμενο από δύο χρονικά μεταβαλλόμενα πεδία: το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο.

ΟΙ ΣΧΕΣΕΙΣ

Τα δύο συνιστώντα κύματα / πεδία έχουν εντάσεις \vec{E} το ηλεκτρικό και \vec{B} το μαγνητικό, οι οποίες κατά μέτρο μεταβάλλονται με το χρόνο.

$$E(t) = f(\omega t) \quad \text{και} \quad B(t) = f(\omega t)$$

με την ίδια φάση και διανυσματικά κάθετες μεταξύ τους σε κάθε χρονική στιγμή

$$\vec{E}(t) \perp \vec{B}(t).$$

Αποδεικνύεται ότι σε κάθε χρονική στιγμή η σχέση μεταξύ των \vec{E} και \vec{B} είναι:

$$\vec{E} = c\vec{B} \quad \text{ή} \quad \vec{B} = \frac{1}{c}\vec{E}.$$

Το γεγονός ότι τα δύο πεδία, ηλεκτρικό και μαγνητικό, είναι σε φάση σημαίνει ότι και τα δύο πεδία φθάνουν στις μέγιστες τιμές τους E_0 και B_0 , αλλά και στις μηδενικές τους τιμές, ταυτόχρονα.

Αποδεικνύεται εύκολα ότι η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων c συνδέεται με τις σταθερές ϵ_0 και μ_0 , οι οποίες εμφανίζονται στις εξισώσεις Maxwell:

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

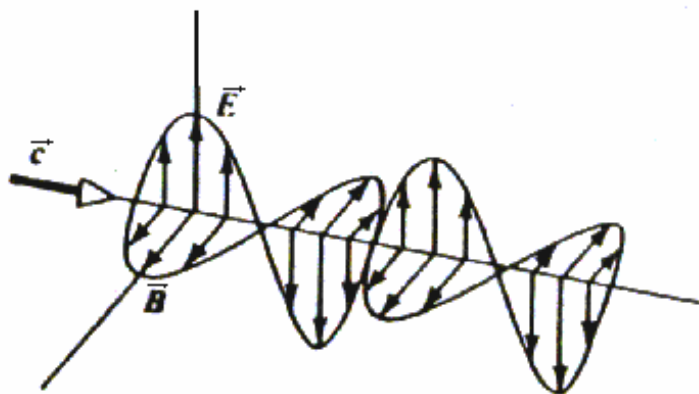
όπου ϵ_0 = ηλεκτρική σταθερά του κενού και μ_0 = μαγνητική σταθερά του κενού οι οποίες αφορούν στις μονάδες μέτρησης του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα.

Αποδεικνύεται έτσι ότι στις εξισώσεις Maxwell ενυπάρχει η ταχύτητα του φωτός (!).

Στην περίπτωση αρμονικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος οι σχέσεις γράφονται

$$E = E_0 \eta \mu(\omega t) \quad \text{και} \quad B = B_0 \eta \mu(\omega t)$$

και η γραφική τους παράσταση μας αποκαλύπτει ένα "τρέχον" ηλεκτρομαγνητικό κύμα με ταχύτητα \vec{c} , η οποία έχει διεύθυνση κάθετη προς τα δύο διανύσματα \vec{E} και \vec{B} .



Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εμφανίζεται έτσι ως εγκάρσιο κύμα.

Αποδεικνύεται όμως ότι όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται μέσα από υλικά σώματα / ύλη, τότε έχει και διαμήκη συνιστώσα.

Όσον αφορά στη φυσική σημασία των κυματικών εξισώσεων σημειώνουμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεταφέρει ενέργεια (και όχι, ηλεκτρικά φορτία, όπως παρανοείται συχνά).

Αντίστοιχα, τα μηχανικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια (και όχι μάζα, όπως παρανοείται επίσης).

η δημιουργία - η μετάδοση

Η χρονική μεταβολή / εξάρτηση του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, το οποίο συνιστούν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, παραπέμπει σε κίνηση των φορτίων / πηγών τους.

Ακόμη, η μεταφορά ενέργειας από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο παραπέμπει σε μεταβαλλόμενη (επιταχυνόμενη ή επιβραδυνόμενη) κίνηση των φορτίων πηγών του.

(Και) ακόμη η κυματική / περιοδική φύση του, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις κύματος οι οποίες το περιγράφουν, παραπέμπει σε περιοδικά επιταχυνόμενη – επιβραδυνόμενη κίνηση των φορτίων / πηγών του.

Αναφορές στις περιπτώσεις κίνησης των φορτίων πηγών και των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων τους έχουν γίνει στα προηγούμενα.

Η απαίτηση για τη δημιουργία, λοιπόν, ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι η περιοδικά επιταχυνόμενη – επιβραδυνόμενη κίνηση των φορτίων / πηγών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η συχνότητα βέβαια του κύματος θα είναι αυτή της περιοδικής κίνησης του φορτίου / πηγής.

Μια ειδική αλλά και συνήθης και χαρακτηριστική περίπτωση δημιουργίας ηλεκτρομαγνητικού κύματος από την περιοδική, αρμονική κίνηση ηλεκτρικών φορτίων, είναι η δημιουργία των ραδιοφωνικών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από την αρμονική "ταλάντωση" ελευθέρων ηλεκτρονίων σε έναν αγωγό, ο οποίος τότε λειτουργεί ως κεραία.

ο κυματοσωματιδιακός χαρακτήρας του

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, λοιπόν, μεταφέρει ενέργεια. Αυτή η μεταφερόμενη, με την ταχύτητα του φωτός ενέργεια είναι δυνατό να συσχετιστεί με την ενέργεια την οποία έχουν τα φωτόνια, επίσης μετακινούμενα με την ταχύτητα του φωτός.

Σύμφωνα με τις μετακλασικές θεωρίες (και) το φως έχει κυματο-σωματιδιακό χαρακτήρα, με ισοδύναμες τις δύο εκφάνσεις του. Αυτό σημαίνει ότι είναι δυνατό να αντιμετωπίζεται, ισοδύναμα, είτε ως κύμα είτε ως σωματίδια.

Εξάλλου έτσι ερμηνεύεται και η διαδικασία "μεταφοράς" του ηλεκτρο-μαγνητικού πεδίου στο χώρο. Η ύπαρξη πεδίου σημαίνει άσκηση δύναμης, άρα δυναμική ενέργεια, αλλά και ανταλλαγή ενδιάμεσων σωματιδίων πεδίου, των φωτονίων.

Και οι δύο "εικόνες" είναι ισοδύναμες και η κάθε μια προσφέρεται κατά περίπτωση για την κατανόηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Έχοντας τη δυνατότητα της ισοδύναμης επιλογής εξετάζουμε / μελετάμε τα φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με το ηλεκτρομαγνητικό κύμα θεωρώντας το άλλοτε κύμα και άλλοτε σωματίδια / φωτόνια.

Η επιλογή εξαρτάται από την ευκολία εποπτείας / κατανόησης που προσφέρει η κάθε θεώρηση σε κάθε συγκεκριμένη περίπτωση.

Συχνά το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αναφέρεται και ως *ακτινοβολία*. Ο όρος ενέχει και τον κυματικό χαρακτήρα (ακτίνα) και το σωματιδιακό του χαρακτήρα (βολή).

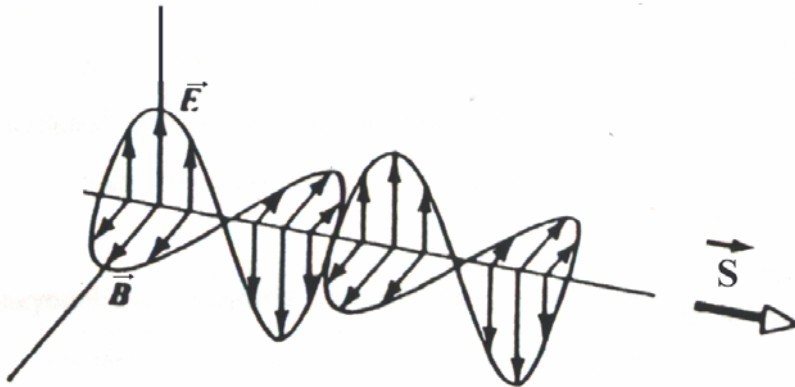
η ενέργεια - το διάνυσμα Poynting

Η μεταφερόμενη από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ενέργεια ποσοτικοποιείται, από τις εντάσεις του ηλεκτρικού και μαγνητικού του πεδίου, ως *διάνυσμα Poynting*.

$$\vec{S} = c^2 \epsilon_0 \vec{E} \times \vec{B}$$

όπου \vec{S} είναι διάνυσμα κάθετο και στο \vec{E} και στο \vec{B} .

Υπενθυμίζεται ότι $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$.



Όσον αφορά στη φυσική του σημασία, εκφράζει την πυκνότητα της ροής της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Η πρακτική του σημασία είναι μεγάλη αφού δίνει τη δυνατότητα του υπολογισμού της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού κύματος από κάθε επιφάνεια.

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, εκτός από ενέργεια, μεταφέρει και ορμή και στροφορμή.

Αυτό δεν πρέπει να μας εκπλήσσει αφού μια ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ηλεκτρικών φορτίων η οποία μας "μεταφέρεται" από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα / σωματίδιο πεδίου (φωτόνιο), σημαίνει ανταλλαγή ενέργειας, ορμής και στροφορμής μεταξύ των φορτίων.

η αλληλεπίδραση με την ύλη

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, προσπίπτοντας σε υλικά σώματα (στερεά, υγρά, αέρια), αλληλεπιδρά με αυτά (τα σωματίδιά τους) και εμφανίζει ένα πλήθος φαινομένων. Μερικά από αυτά τα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον.

πίεση ακτινοβολίας

Όταν ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει σε υλικό σώμα διαπιστώνεται ότι υπάρχει μια πίεση στην επιφάνειά του. Αυτό εξηγείται από το γεγονός της μεταφοράς ενέργειας και ορμής από το ηλεκτρομαγνητικό κύμα (αφού ορίζουμε την πίεση σε επιφάνεια ως το ρυθμό μεταβολής τα ορμής προς την επιφάνεια).

Σημειώνεται ότι η ορμή αυτή είναι ιδιότητα του κύματος και δε σχετίζεται με τη μάζα κάποιου κινούμενου φορτίου, αφού δεν υπάρχει κινούμενο φορτίο.

Είναι δυνατός ο υπολογισμός αυτής της πίεσης σε κάθε περίπτωση, είτε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα ανακλάται είτε απορροφάται από το σώμα.

Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις της εμφάνισης πίεσης από την ηλιακή, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στους δορυφόρους και στις ουρές των κομητών (στη δεύτερη μάλιστα περίπτωση αυτή εκτρέπεται τις ουρές των κομητών σε αντίθετη κατεύθυνση αυτής του ηλίου).

ανάκλαση – απορρόφηση – διάθλαση – περίθλαση

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα εμφανίζει όλα τα –γνωστά από το αντίστοιχο κεφάλαιο της μηχανικής– φαινόμενα των μηχανικών κυμάτων.

Αξιοσημείωτα είναι τα φαινόμενα της ανάκλασης, της απορρόφησης, της διάθλασης και της περίθλασης. Αυτά ερμηνεύονται εύκολα αν θεωρήσουμε ότι τα σωματίδια του μικροκόσμου, στα οποία προσπίπτει η ακτινοβολία, καθίστανται εκπομποί δευτερογενούς ακτινοβολίας προς όλες τις διευθύνσεις, λαμβάνοντας υπόψη και το φαινόμενο της συμβολής.

Χαρακτηριστικές και ερμηνευτικές είναι οι εικόνες των σχημάτων 5.3.22 και 5.3.23 (ανάκλαση), 5.3.24 (απορρόφηση), 5.3.25 (απορρόφηση / διάθλαση), 5.3.26 (περίθλαση) και 5.3.27 (πολλαπλή περίθλαση – κροσσοί συμβολής από φράγμα).

Μερικές από τις εφαρμογές των παραπάνω ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων στην τεχνολογία είναι εξαιρετικά χρήσιμες.

Αναφέρουμε ενδεικτικά την κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών φακών (συγκλινόντων ή αποκλινόντων), με εφαρμογή των φαινομένων της απορρόφησης και διάθλασης, και την κατασκευή ηλεκτρομαγνητικών κυματοδηγών (όπως των οπτικών ινών), με εφαρμογή του φαινομένου της ανάκλασης.

μαθηματικό παράρτημα

Εξαγωγή από τις εξισώσεις Maxwell των κυματικών εξισώσεων του ηλεκτρομαγνητικού κύματος:

Από την 4^η εξίσωση του Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ έχουμε:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \vec{\nabla} \times \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (1)$$

και επειδή σύμφωνα με το νόμο του Ohm η πυκνότητα \vec{j} του ρεύματος είναι ανάλογη της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου \vec{E} , δηλαδή $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, όπου σ η ειδική αγωγιμότητα του υλικού, η σχέση (1) γίνεται:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = \sigma \mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{E} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{E}) \quad (2)$$

Η σχέση αυτή σε συνδυασμό με την 3^η εξίσωση του Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, γράφεται:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\sigma \mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (3)$$

Αλλά για τυχαίο διάνυσμα \vec{A} ισχύει η ταυτότητα:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$$

που εφαρμόζοντάς την στη σχέση (3) θα έχουμε:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{B} - \nabla^2 \vec{B} = -\sigma \mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} \quad (4)$$

Επειδή όμως $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$ (από τη 2^η εξίσωση του Maxwell) θα είναι και $\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$, οπότε από την (4) προκύπτει η εξίσωση:

$$\nabla^2 \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} - \sigma \mu_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

για το μαγνητικό πεδίο. Αν μάλιστα υποθέσουμε ότι η περιοχή είναι ελεύθερη κινούμενων φορτίων δηλαδή $\vec{j} = 0$, τότε η εξίσωση (5) γίνεται:

$$\nabla^2 \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Ομοίως από την 3^η εξίσωση του Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ έχουμε:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\vec{\nabla} \times \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) \quad (1')$$

και εφαρμόζοντας στην (1') την 4^η εξίσωση του Maxwell $\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ καθώς και την ταυτότητα $\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{A} = \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$ προκύπτει:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} - \nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} (\vec{\nabla} \times \vec{B})$$

και για τις περιοχές ελεύθερες ηλεκτρικών φορτίων, όπου $\rho = 0$ ισχύει $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 0$ και από την 4^η εξίσωση του Maxwell έχουμε:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

και σύμφωνα με το νόμο του Ohm επειδή το $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \sigma \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (2')$$

για το ηλεκτρικό πεδίο.

Για περιοχή όπου $\vec{j} = 0$ η σχέση (2') γίνεται:

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$