

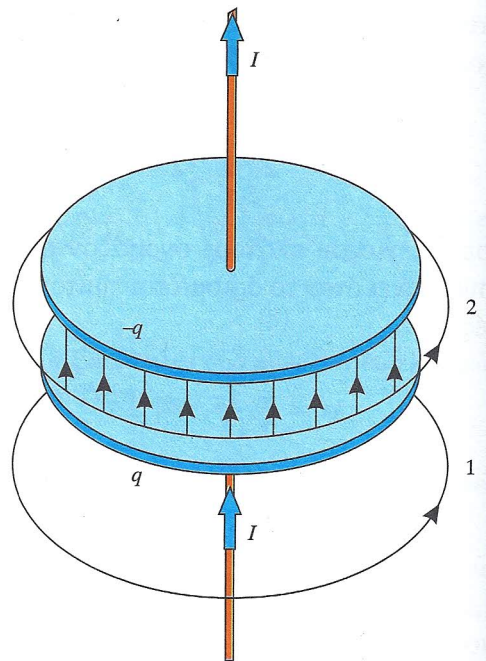
κενό με την ταχύτητα του φωτός,  $c = 3 \times 10^8$  m/s. Θα εξετάσουμε στη συνέχεια τις εξισώσεις του Maxwell, που περιγράφουν το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, για να δούμε πώς μπορούμε να εξηγήσουμε τη διάδοση αυτού του πεδίου με τη μορφή κυμάτων. Έτσι θα πρέπει να εξετάσουμε αν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ικανοποιούν την κυματική εξίσωση, (Εξ. (6.107)).

### 6.6.1 ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ

Η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προβλέπει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, που συνίσταται από χρονικώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.
2. Τα κύματα αυτά είναι εγκάρσια. Τα διανύσματα  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, αντιστοίχως, είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και επίσης μεταξύ τους κάθετα.
3. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται ακόμα και στο κενό με την ταχύτητα του φωτός:  $c = 3 \times 10^8$  m/s.
4. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και ορμή.

Θα προσπαθήσουμε να καταλάβουμε πώς το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο μπορούν να αναδυθούν ανεξαρτήτως φορτίου ή ρεύματος και να διαδοθούν από μόνα τους στο χώρο. Ας θέσουμε την ερώτηση: μπορεί ένα «τμήμα του κενού» να θεωρηθεί ως μέρος ενός κυκλώματος; Ειδικότερα, θέλουμε να ξέρουμε αν το διάκενο μεταξύ των παραλλήλων πλακών του πυκνωτή του Σχ. 6-21 μπορεί να θεωρηθεί ως συνδεδεμένο σε σειρά με τον μακρύ ευθύγραμμο αγωγό και τις πλάκες. Η απάντηση είναι θετική, μόνο εάν το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  γύρω από μια τέτοια διάταξη μπορεί να προβλεφθεί επακριβώς. Για να το καταλάβουμε αυτό, ας δημιουργήσουμε για περιορισμένη χρονική διάρκεια ένα σταθερό ρεύμα  $I$  στο σύρμα. Ως αποτέλεσμα αυτού, το φορτίο  $\pm q$  σε κάθε πλάκα θα αυξάνει σταθερά σε μέγεθος και ως εκ τούτου και το ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  μεταξύ των πλακών. Δεν θα υπάρχει, ασφαλώς, ηλεκτρικό ρεύμα στο διάκενο μεταξύ των πλακών. Σύμφωνα όμως με τον Maxwell ένα είδος υποκατάστατου ρεύματος  $I_d$  θα



**Σχήμα 6-21** Σύμφωνα με τον Maxwell ένας πυκνωτής στον οποίο μεταβάλλεται η ηλεκτρική ροή παράγει ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το διάκενό του (γραμμή 2), όπως ακριβώς και το ρεύμα στο σύρμα (γραμμή 1)

υφίσταται στο χώρο αυτό, συμβάλλοντας στην αύξηση του ηλεκτρικού πεδίου  $\vec{E}$  μεταξύ των πλακών. Το ρεύμα αυτό, το οποίο δεν είναι πραγματικό ρεύμα, ονομάζεται **ρεύμα μετατόπισης**. Επειδή επέχει θέση υποκατάστατου του  $I$ , απαιτείται να έχει την ίδια τιμή μ' αυτό, δηλαδή  $I_d$  (στο διάκενο)  $= I$  (στο σύρμα), ενώ, όπως γνωρίζουμε,  $I$  (στο διάκενο)  $= 0$ . Υπάρχει, άραγε, στην πραγματικότητα το ρεύμα  $I_d$ ; Η απάντηση, σύμφωνα με την πρόβλεψη του Maxwell, είναι ότι: **το ρεύμα μετατόπισης  $I_d$  παράγει το ίδιο μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  γύρω από το διάκενο, όπως παράγει και το ρεύμα  $I$  γύρω από το σύρμα.** Μ' άλλα λόγια, η φυσική ύπαρξη του  $I_d$  καθίσταται φανερή από το μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$  που παράγει. Αυτό σχεδιάζεται με τη μαγνητική δυναμική γραμμή 2 στο Σχ. 6-21. Επομένως, σύμφωνα με τον Maxwell: **ένα χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο  $\vec{E}$  περιβάλλει τον εαυτό του με ένα μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}$ .**

Σύμφωνα με το νόμο του Ampère: **το ολοκλήρωμα του  $\vec{B}$  πάνω σε οποιαδήποτε κλειστή διαδρομή ισούται με το γινόμενο του  $\mu_0$  επί το ρεύμα, το οποίο διέρχεται από την επιφάνεια που οριοθετείται από τη διαδρομή.** Επομένως, γύρω από το διάκενο ο νόμος του Ampère παίρνει τη μορφή



πεδίου παραμορφώνονται (Σχ. 6-24β, γ). Όταν το φορτίο  $-q$  περάσει το  $+q$  (Σχ. 6-24δ), η κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών αντιστρέφεται.

Πολύ κοντά στο δίπολο η μορφή του πεδίου είναι σχεδόν η ίδια όπως στη στατική κατάσταση. Λίγο μακρύτερα από το δίπολο, οι εξισώσεις του Maxwell δείχνουν ότι το πεδίο είναι εξαιρετικά πολύπλοκο. Όμως, μακριά από το δίπολο οι εξισώσεις του Maxwell προβλέπουν ότι το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται ένα εγκάρσιο κύμα με σαφώς καθορισμένο μήκος κύματος  $\lambda$  (Σχ. 6-24ε). Εκτός από το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  υπάρχει μαζί μ' αυτό και το μαγνητικό πεδίο  $B$ , το οποίο είναι επίσης εγκάρσιο κύμα. Σε κάθε χρονική στιγμή και σε κάθε σημείο του χώρου και τα δυο πεδία  $E$  και  $B$  είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Εκτός των δυναμικών γραμμών του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  (Σχ. 6-24ε) υπάρχουν και οι δυναμικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου  $B$ , οι οποίες είναι κάθετες στο επίπεδο της σελίδας του σχήματος.

Ορίζουμε ένα σύστημα συντεταγμένων, του οποίου ο άξονας  $x$  να έχει την κατεύθυνση διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, που παράγεται από το δίπολο. Αν κοιτάξουμε σε μια μικρή περιοχή του χώρου αρκετά μακριά από την πηγή, οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου γίνονται σχεδόν ευθείες. Τόσο οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου, όσο και οι συνοδεύοντες αυτό κάθετες γραμμές του μαγνητικού πεδίου κείνται στο ίδιο επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή το κύμα μοιάζει με επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Στο Σχ. 6-25 παριστάνεται ένα στιγμιότυπο ημιτονοειδούς επιπέδου ηλεκτρομαγνητικού κύματος διαδιδόμενου κατά τη θετική διεύθυνση του άξονα  $x$ , στο οποίο φαίνεται η ορθογώνια σχέση των διανυσμάτων  $\vec{E}$

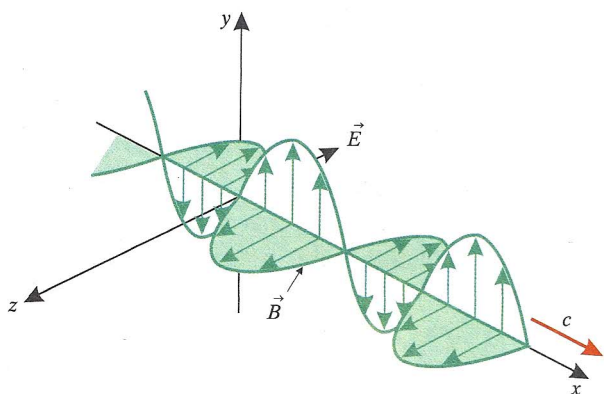
και  $\vec{B}$ . Το επίπεδο που περιέχει τη διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου (το επίπεδο  $xy$  του Σχ. 6-25) καλείται *επίπεδο πόλωσης* του ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Για την κατανόηση της ανίχνευσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων θα πρέπει οι προηγούμενες παραδοχές να αντιστραφούν. Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ληφθεί από την κεραία ενός δέκτη, το ηλεκτρικό του πεδίο επάγει ρεύματα στον αγωγό της κεραίας. Όταν ο αγωγός της κεραίας είναι παράλληλος προς τη διεύθυνση ταλαντώσεων του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τα ηλεκτρόνια κατά μήκος του αγωγού της κεραίας είναι ελεύθερα να κινηθούν δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που συνδέεται με την κεραία μπορεί να ενισχύσει το περιοδικό αυτό ρεύμα και να το μετατρέψει σε ένα χρήσιμο σήμα, όπως ο ήχος ενός ραδιοφωνικού δέκτη, ή η εικόνα ενός τηλεοπτικού δέκτη.

Θα δώσουμε έμφαση σε δυο σημαντικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, που απορρέουν από το πρότυπο του δίπολου. Το πρώτο είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας εκπέμπεται από το δίπολο κατά τη διεύθυνση που είναι σχεδόν κάθετη στον άξονα του δίπολου, ενώ δεν εκπέμπεται ενέργεια κατά τον άξονα του δίπολου. Το δεύτερο χαρακτηριστικό, στο οποίο πρέπει να δώσουμε έμφαση, είναι ότι για το τμήμα του κύματος που διαδίδεται κάθετα στον άξονα του δίπολου, το ηλεκτρικό πεδίο ταλαντώνεται κατά διεύθυνση παράλληλη προς τον άξονα του δίπολου. Αυτά τα δυο χαρακτηριστικά μας επιτρέπουν να υιοθετήσουμε ένα απλό πρότυπο της ακτινοβολίας του δίπολου: τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται κατά διεύθυνση κάθετη προς τον άξονα του δίπολου και το επίπεδο πόλωσης είναι παράλληλο προς τον άξονα του δίπολου. Το απλό αυτό πρότυπο είναι χρήσιμο για την κατανόηση μιας πλειάδας φαινομένων από τον προσανατολισμό των ραδιοφωνικών κεραιών μέχρι την πόλωση του φωτός του ουρανού.

### 6.6.6 ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΦΑΣΜΑ

Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι της ίδιας φύσης και διαφέρουν μόνο στο μήκος κύματος. Όμως, λόγω των διαφορετικών τρόπων παραγωγής και ανίχνευσής τους, τους δίνονται διαφορετικά ονόματα για κάθε περιοχή μηκών κύματος. Οι



Σχήμα 6-25 Στιγμιότυπο ενός ημιτονοειδούς ηλεκτρομαγνητικού κύματος.



περιοχές αυτές, που αλληλεπικαλύπτονται σε κάποιο βαθμό, εκτείνονται από μήκη κύματος μικρότερα από  $10^{-15}$  m μέχρι μεγαλύτερα από  $10^9$  m. Οι σημαντικότερες περιοχές μηκών κύματος σημειώνονται στο Σχ. 6-26. Το διάγραμμα αυτό παριστάνει ένα μέρος αυτού που καλείται **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**. Δεν υπάρχει ένα ανώτερο, ούτε κατώτερο όριο αυτού του φάσματος. Στο διάγραμμα δίνονται επίσης και οι συχνότητες, όπως υπολογίζονται από τη σχέση  $\lambda f = c$ .

Η πιο σημαντική για τον άνθρωπο περιοχή μηκών κύματος εκτείνεται από τα 400 nm έως τα 750 nm περίπου. Η περιοχή αυτή είναι η ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, στην οποία είναι ευαίσθητα τα μάτια μας. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκη κύματος σ' αυτή την περιοχή καλούνται κύματα **ορατού φωτός**.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην **υπέρυθρη** περιοχή εκτείνονται από το άκρο της ορατής περιοχής μέχρι μήκη κύματος μερικών mm. Πολλά αντικείμενα, όπως τα σώματά μας, μπορούν να απορροφήσουν τα υπέρυθρα κύματα. Τα αισθητοποιούμε, καθώς το δέρμα μας ζεσταίνεται. Τα υπέρυθρα κύματα έχουν πολλές εφαρμογές, όπως στη φυσικοθεραπεία, σε πειράματα υπέρυθρης φασματοσκοπίας για τη μελέτη των ατομικών δεσμών στα μόρια κλπ.

Η περιοχή **μικροκυμάτων** του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος επικαλύπτεται μερικώς, όπως φαίνεται στο Σχ. 6-26, με την περιοχή υπέρυθρων. Η διαφορά μεταξύ των δυο ειδών κυμάτων συνίσταται στο μηχανισμό παραγωγής τους και στις εφαρμογές τους. Ο όρος **μικροκύματα** χρησιμοποιείται γενικώς για κύματα που παράγονται με ηλεκτρονικά μέσα, ενώ ο όρος **υπέρυθρα κύματα** χρησιμοποιείται για κύματα παραγόμενα από θερμικές πηγές ή από ταλαντώσεις και περιστροφές μορίων. Τα μικροκύματα έχουν μήκη κύματος από λίγα mm

έως λίγα cm. Πέρα από τα μικροκύματα είναι τα **ραδιοκύματα**, τα οποία χρησιμοποιούνται στη ραδιοφωνία και τηλεόραση.

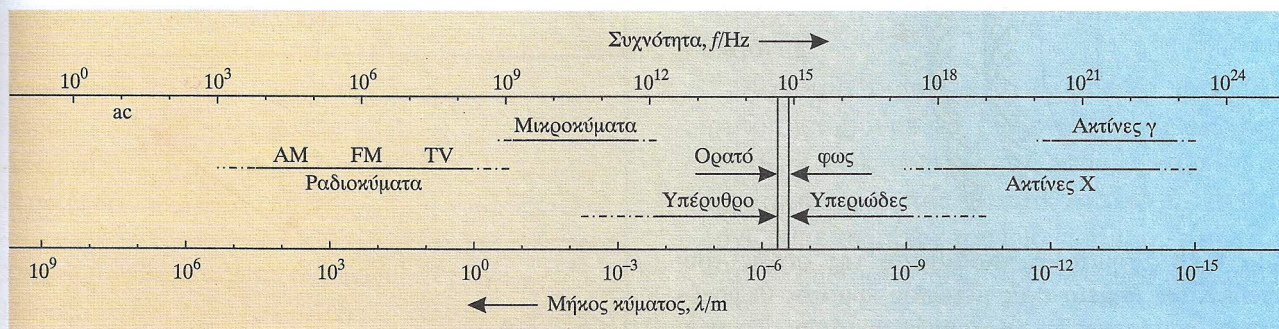
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με μήκος κύματος αμέσως μικρότερο από αυτό της ορατής περιοχής καλούνται **υπεριώδη**. Τα κύματα αυτά, ακόμα και τα μέσης εντάσεως, μεταφέρουν αρκετή ενέργεια για να προσβάλουν τα κύτταρα και ιδιαίτερα του κερατοειδούς και αμφιβληστροειδούς χιτώνα του ματιού, που απορροφούν περισσότερο την υπεριώδη ακτινοβολία. Εκτός από τα ορατά και υπέρυθρα κύματα, ο Ήλιος εκπέμπει και υπεριώδη κύματα. Το στρώμα του όζοντος στην ανώτερη ατμόσφαιρα απορροφά μεγάλο μέρος της επικίνδυνης αυτής ακτινοβολίας.

Οι **ακτίνες X** είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεγάλης ενέργειας με μήκη κύματος από  $10^{-7}$  m έως  $10^{-13}$  m. Ακτίνες X εκπέμπονται στιγμιαία, όταν τα ηλεκτρόνια επαναδιεγείρονται σε χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις των ατόμων. Στις εφαρμογές, όμως, οι ακτίνες X παράγονται, συνήθως, κατά την απότομη επιβράδυνση των ηλεκτρονίων με την πρόσπτωσή τους στην επιφάνεια μεταλλικών στόχων. Αυτές οι ακτίνες χρησιμοποιούνται για διαγνωστικούς σκοπούς στην Ιατρική, καθώς και στην έρευνα της κρυσταλλικής δομής των στερεών.

Οι **ακτίνες γ** είναι εξαιρετικά ενεργειακά ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από διεγερμένους φυσικούς και τεχνητούς ραδιενεργούς πυρήνες.

## 6.7 ΚΥΜΑΤΑ ΦΩΤΟΣ

Είδαμε προηγουμένως, ότι οι εξισώσεις του Maxwell οδηγούν σε μια κυματική εξίσωση και ότι αυτή οδηγεί σε επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα



**Σχήμα 6-26** Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Η κλίμακα των μηκών κύματος και των συχνοτήτων είναι λογαριθμική. Τα όρια μεταξύ των περιοχών δεν είναι σαφώς καθορισμένα.



η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης, εκφραζόμενη σε rad/s και  $\varphi$  είναι η σταθερά φάσης, η οποία χρησιμοποιείται για να δηλώσει τη θέση όπου το σωματίο αρχίζει την κίνησή του κατά τη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης συνδέεται με την περίοδο  $T$  και τη συχνότητα  $f$  της ταλάντωσης με τη σχέση:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$$

Η εξίσωση της θέσης αποτελεί λύση της ακόλουθης εξίσωσης της κίνησης:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

Η εξίσωση της ταχύτητας ενός σωματίου που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση είναι:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega \sin(\omega t + \varphi)$$

Η εξίσωση της επιτάχυνσης ενός σωματίου που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση είναι:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \varphi) = -\omega^2 x$$

**6-2** Τι εκφράζει ο παράγοντας ποιότητας ενός ταλαντωτή;

Ο παράγοντας ποιότητας ενός ταλαντωτή εκφράζει τις ενεργειακές απώλειες αυτού και ορίζεται με την έκφραση

$$Q = 2\pi \left| \frac{E}{\Delta E} \right|$$

όπου  $E$  είναι η ενέργεια του ταλαντωτή και  $\Delta E$  η μέση απώλεια ενέργειας ανά περίοδο.

Ο παράγοντας ποιότητας ενός ταλαντωτή με απόσβεση εκφράζεται ως:

$$Q = \frac{\omega}{\gamma}$$

όπου  $\gamma$  είναι η σταθερά απόσβεσης του ταλαντωτή.

**6-3** Ποια συνάρτηση περιγράφει ένα μονοδιάστατο αρμονικό οδεύον κύμα; Ποιας εξίσωσης αποτελεί λύση;

Η συνάρτηση που περιγράφει τη μετατόπιση κάθε σημείου του μέσου, στο οποίο διαδίδεται ένα μονοδιάστατο αρμονικό οδεύον κύμα, ονομάζεται κυματοσυνάρτηση, και δίνεται από την έκφραση:

$$y(x,t) = A \sin(\omega t - kx)$$

όπου:  $A$  είναι το πλάτος του κύματος,  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα του κύματος και  $k (= 2\pi/\lambda)$  είναι ο κυματικός αριθμός.

Η κυματοσυνάρτηση αποτελεί λύση της κυματικής εξίσωσης:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

όπου  $v$  είναι η ταχύτητα διάδοσης του κύματος, που εκφράζεται ως:  $v = \lambda f = \omega/k$ .

**6-4** Ποια χαρακτηριστικά προβλέπει η ηλεκτρομαγνητική θεωρία για τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα;

Η θεωρία των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προβλέπει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Κάθε ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή, που συνίσταται από χρονικώς μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο.

2. Τα κύματα αυτά είναι εγκάρσια. Τα διανύσματα  $\vec{E}$  και  $\vec{B}$  του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, αντιστοίχως, είναι κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος και επίσης μεταξύ τους κάθετα.

3. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται ακόμα και στο κενό με την ταχύτητα του φωτός:  $c = 3 \times 10^8$  m/s.

4. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και ορμή.

**6-5** Διατυπώστε το νόμο του Ampère όπως γενικεύθηκε από τον Maxwell.

Το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από ένα ηλεκτρικό ρεύμα, ή από μια χρονική μεταβολή ενός ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό περιγράφεται από τη γενικευμένη εξίσωση των Ampère - Maxwell: