

Κεφάλαιο Η12

Σύγχρονη Φυσική: Ηλεκτρομαγνητικά κύματα



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

Στην παρούσα σειρά μαθημάτων Σύγχρονης Φυσικής προτάσσεται ένα κεφάλαιο «Κλασικής» Φυσικής που αφορά στα Ηλεκτρομαγνητικά κύματα και στην Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία. Οι λόγοι αυτής της πρόταξης συνδέονται με συγκεκριμένες ανάγκες του νέου 5ετούς προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής καθώς και με τη χρησιμότητα της υπενθύμισης της θεωρίας των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στη διδασκαλία θεμάτων Σχετικότητας και Κβαντικής Θεωρίας.

Ο Ηλεκτρομαγνητισμός, ως θεωρητική σύνθεση, αποτελεί ένα μεγαλειώδες επίτευγμα του ανθρώπινου πνεύματος. Μέσα από τη διαμόρφωση τεσσάρων εξισώσεων επιτυγχάνεται η ενοποίηση του Ηλεκτρισμού και του Μαγνητισμού και εδραιώνεται η αντίληψη της δημιουργίας και διάδοσης ηλεκτρικών και μαγνητικών κυμάτων στο κενό. Τα διανύσματα αυτών των δύο πεδίων είναι κάθετα μεταξύ τους και η ταχύτητα διάδοσης τους συνδέεται με τις σταθερές που εμφανίζονται στους νόμους του Coulomb και Biot-Savart

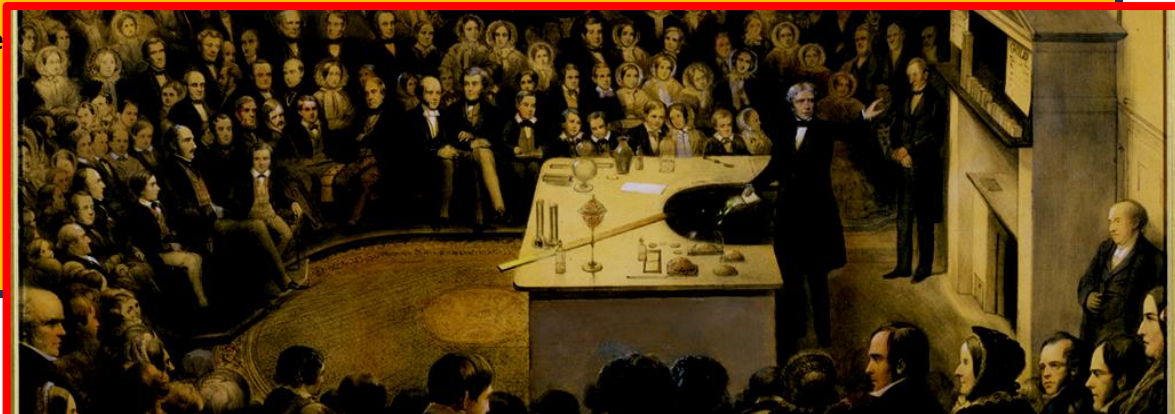
Οι άνθρωποι που εμπλέκονται ιστορικά στην ανάπτυξη της Ηλεκτρομαγνητικής Θεωρίας συγκαταλέγονται ανάμεσα στους μεγαλύτερους επιστήμονες όλων των εποχών.

Οι εφαρμογές των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελούν μόνιμο στοιχείο της καθημερινότητας στη σύγχρονη ζωή, αλλά και στρατηγικό παράγοντα διαμόρφωσης κοινωνικών, πολιτικών και οικονομικών καταστάσεων

Η Ηλεκτρομαγνητική θεωρία υπήρξε η πιο επαναστατική θεωρία του προπερασμένου αιώνα (19^{ου}). Προκάλεσε την ενοποίηση και την υπέρβαση των νόμων του Ηλεκτρισμού και του Μαγνητισμού. Ενσωμάτωσε σε έναν ενιαίο κλάδο φαινόμενα του Ηλεκτρισμού, του Μαγνητισμού, της Οπτικής και της Θερμότητας. Εισήγαγε έννοιες και πραγματικότητες ασυμβίβαστες με τη Μηχανιστική αντίληψη της Φυσικής, όπως η έννοια του πεδίου και της πεπερασμένης ταχύτητας των αλληλεπιδράσεων.*

Το Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποτελεί μια οντότητα ανεξάρτητη από την πηγή του. Αποτελεί φορέα ορμής και ενέργειας και διαδίδεται με (μεγάλη μεν, αλλά) πεπερασμένη ταχύτητα στο χώρο και στο χρόνο (σε αντίθεση με τη μηχανιστική αντίληψη που προβλέπει άπειρη ταχύτητα των αλληλεπιδράσεων). Ο φορμαλισμός της μηχανιστικής Φυσικής βασιζόμενος σε αυτή την αντίληψη διαμόρφωσε εξισώσεις αναλλοίωτες στους μετασχηματισμούς του Γαλιλαίου. Αυτό όμως δεν συνέβαινε με τις εξισώσεις του Maxwell. Από αυτό το σημείο ξεκίνησε και η άλλη μεγάλη επανάσταση, αυτή της Θεωρίας της Σχετικότητας.

*Ε. Μπιτσάκης, Ο Δαίμων του Αϊνστάιν, Gutenberg



Ο Ηλεκτρομαγνητισμός άλλαξε ριζικά τον τρόπο παραγωγής ενέργειας και είναι η πρώτη επιστήμη που δημιούργησε μια δική της βιομηχανία χωρίς καμία εξάρτηση από την παράδοση. *

Η λεγόμενη 2^η Βιομηχανική Επανάσταση είναι αποτέλεσμα της βιομηχανικής εφαρμογής του Ηλεκτρομαγνητισμού.

Ενώ στα μέσα του 19^{ου} αιώνα οι ερευνητές βρισκόντουσαν σε αδυναμία χρηματοδότησης της έρευνας τους (Faraday), σήμερα από την παραγωγή ενέργειας μέχρι τα δίκτυα και την 4^η Βιομηχανική Επανάσταση ο Ηλεκτρομαγνητισμός είναι πανταχού παρών

*J.D. Bernal, Η Επιστήμη στην Ιστορία, Εκδόσεις «Ζαχαρόπουλος»



Τι είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

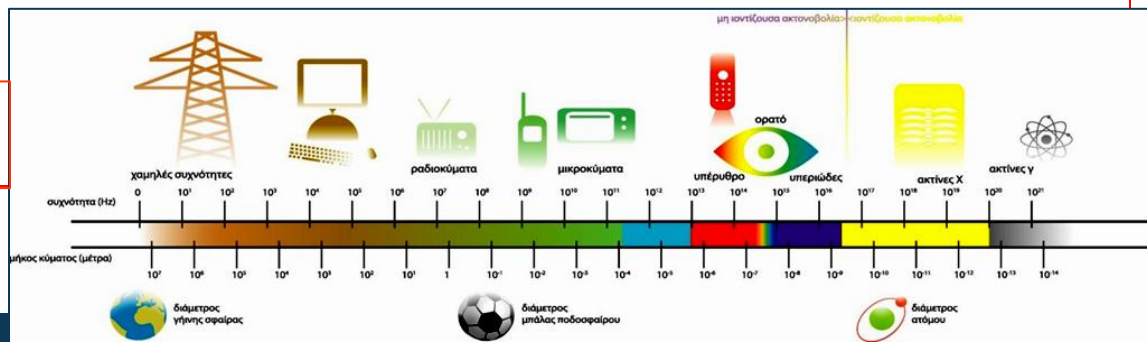
Η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια (ή **ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία**) αποτελείται από **κύματα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου**, τα οποία διαδίδονται (ακτινοβολούνται) στον ελεύθερο χώρο.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εμφανίζονται με πολλές διαφορετικές μορφές όπως, **τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, το ορατό φως**. Επίσης οι **ακτίνες Χ και οι ακτίνες γ**, αποτελούν μορφές ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την **ταχύτητα του φωτός**. Τα κύρια χαρακτηριστικά των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων είναι:

1. **το μήκος κύματος**, δηλαδή η απόσταση που καλύπτεται από ένα κύκλο του κύματος,
2. **η συχνότητα**, δηλαδή ο αριθμός των κύκλων του κύματος που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο κατά τη διάρκεια ενός δευτερολέπτου.

https://www.eett.gr/opencms/opencms/EETT/Electronic_Communications/Antennas_EMR/health/EMR Radiation/EMR Radiation/



Ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Η **διάδοση** των μηχανικών κυμάτων προϋποθέτει την ύπαρξη ενός **μέσου**.

Αντιθέτως, τα **ηλεκτρομαγνητικά κύματα** διαδίδονται και **στο κενό**.

Οι εξισώσεις του Maxwell (1850-1860) αποτελούν τη **θεωρητική βάση** για όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στο κενό με την ταχύτητα του φωτός.

Ο **Hertz** επιβεβαίωσε την πρόβλεψη του Maxwell, όταν το 1887 παρήγαγε και ανίχνευσε ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

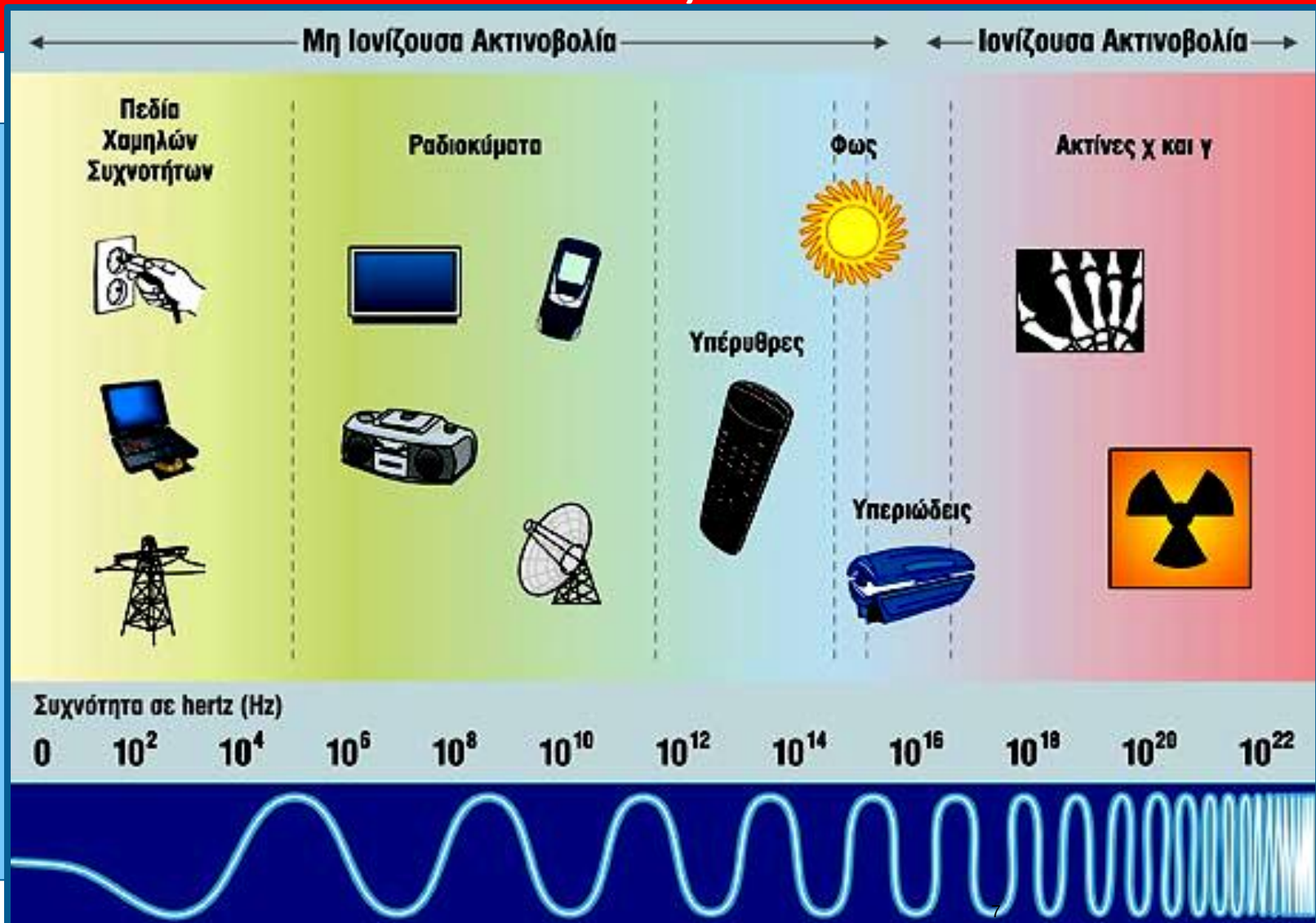
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από την ταλάντωση ηλεκτρικών φορτίων.

- Τα κύματα που εκπέμπονται από ταλαντούμενα ηλεκτρικά φορτία μπορούν να ανιχνευθούν σε μεγάλες αποστάσεις.

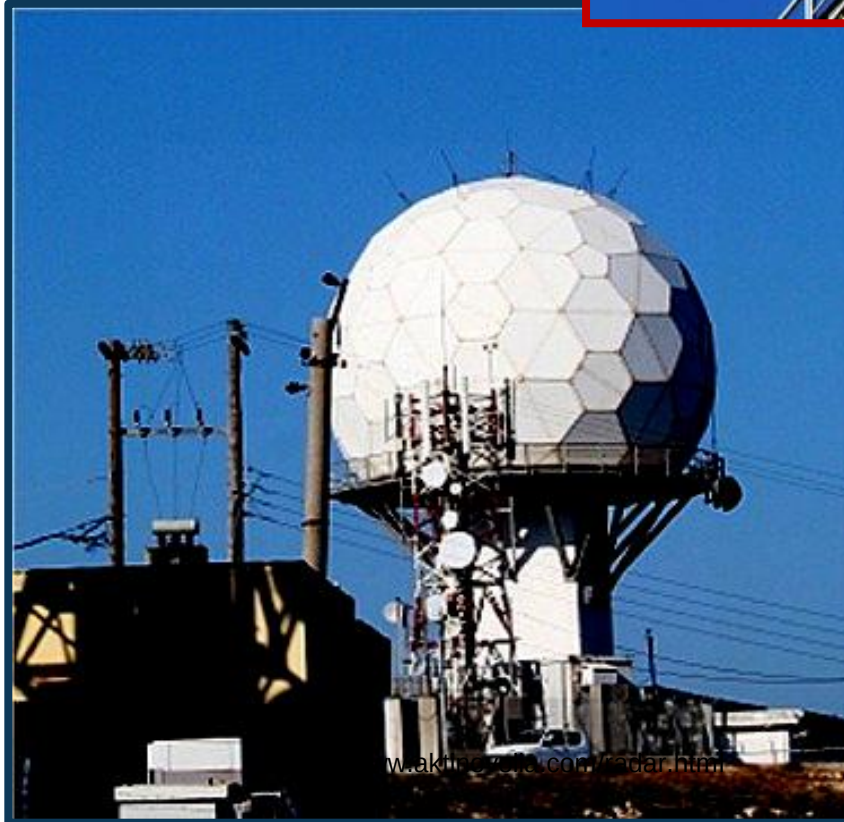
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα φέρουν **ενέργεια και ορμή**.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα καλύπτουν ένα **ευρύ φάσμα συχνοτήτων**.

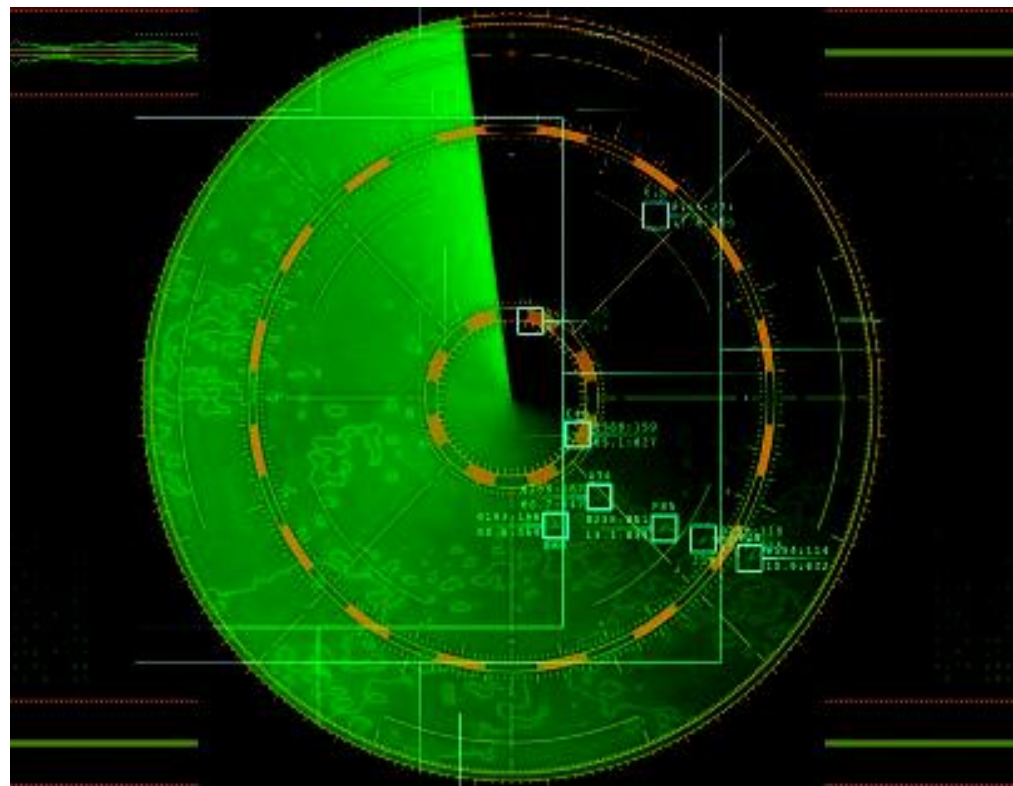
Διάκριση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ανάλογα με τη συχνότητά τους



GE



www.akm3000.com/radar.htm





Το Υπουργείο Παιδείας και Πολιτισμού της Κύπρου [αποφασίζει](#) όπως το ασύρματο δίκτυο WiFi απενεργοποιηθεί από τη σχολική χρονιά 2017-2018 σε όλα τα Δημόσια Νηπιαγωγεία της Κύπρου. Η Γαλλία απαγορεύει τη χρήση του Wi-Fi σε [νηπιαγωγεία](#). Η Κυπριακή Εθνική Επιτροπή “Περιβάλλον και Υγεία του Παιδιού” έχει εκδώσει οδηγία με την οποία προειδοποιεί για τους [κινδύνους του WiFi](#). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (ΠΟΥ) έχει κατατάξει το WiFi στην κατηγορία 2β ως πιθανώς [καρκινογόνο](#).

<http://scinews.eu/arthrografia/60-nikos-konstantinou/355-pos-epireazei-to-wifi-tin-ygeia-mas>



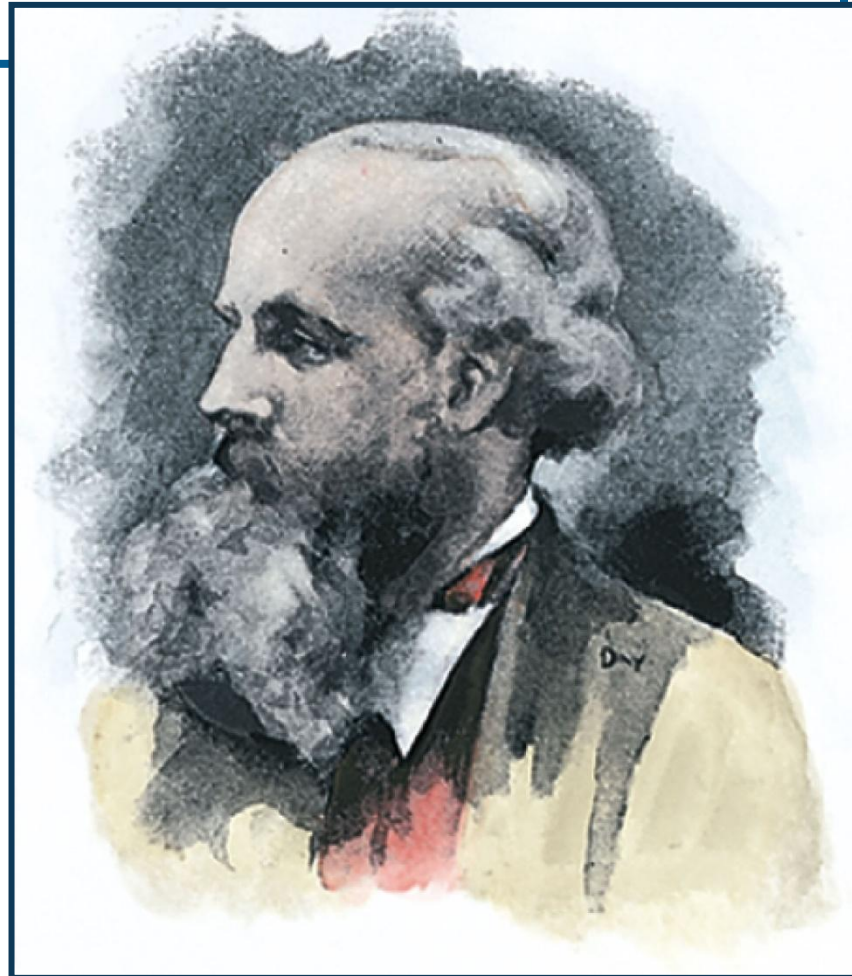
Το μεγαλύτερο ραδιοτηλεσκόπιο του κόσμου τέθηκε σε λειτουργία, σε μια ορεινή περιοχή της επαρχίας Γκουιτζόου της νοτιοδυτικής Κίνας. («FAST» (Σφαιρικό Τηλεσκόπιο Διαμέτρου 500 μέτρων), στόχος του οποίου είναι να εξερευνήσει το διάστημα και να αναζητήσει εξωγήινη ζωή. Οι εργασίες για την κατασκευή του «FAST», που στοίχισε 1,2 δισεκατομμύρια γουάν (περίπου 180 εκατομμύρια δολάρια) ξεκίνησαν το 2011, Η εγκατάσταση του κυρίου σώματος, ενός πιάτου με 4.450 πάνελ, μεγέθους όσο 30 ποδοσφαιρικά γήπεδα, ολοκληρώθηκε τον Ιούλη.

James Clerk Maxwell

1831–1879

Σκωτσέζος θεωρητικός φυσικός. Ανέπτυξε την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός. Η επιτυχημένη ερμηνεία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από τον Maxwell οδήγησε στις εξισώσεις πεδίου που φέρουν το όνομά του. Επίσης ανέπτυξε και εξήγησε:

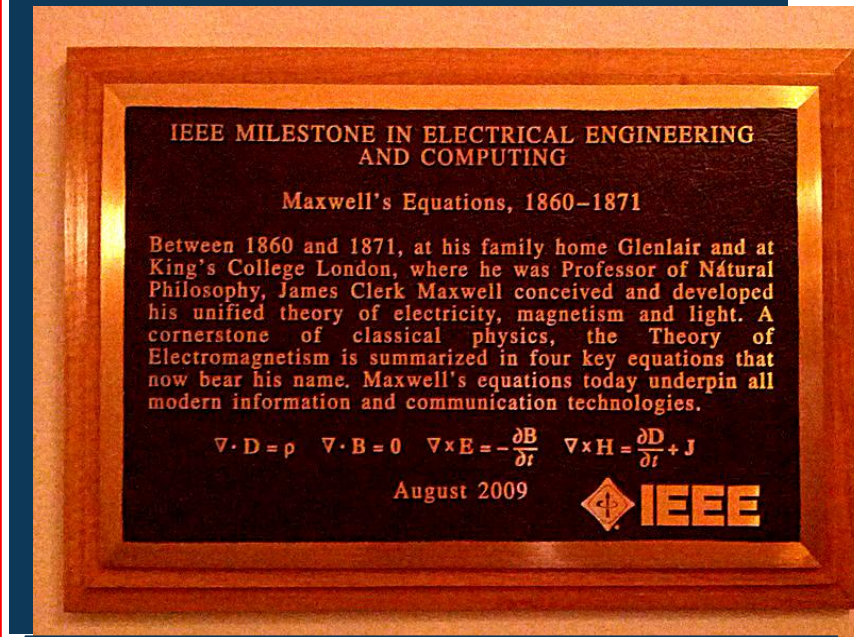
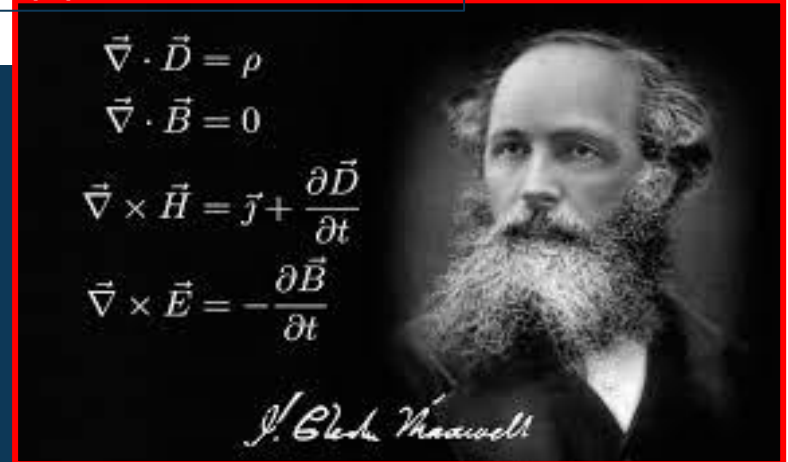
- την κινητική θεωρία των αερίων,
- τη φύση των δακτυλίων του Κρόνου,
- τον τρόπο διάκρισης των χρωμάτων από το μάτι.



James Clerk Maxwell

<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C114/425/2863,10889/>

Το έργο του Maxwell αντιπροσωπεύει και τις τρεις κυρίαρχες τάσεις στην επιστήμη του 19ου αιώνα: τη μαθηματικοποίηση των φυσικών θεωριών, την ενοποίηση διαφορετικών περιοχών της φυσικής και τη μηχανιστική ερμηνεία των φυσικών φαινομένων. Η μαθηματικοποίηση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας φτάνει στο απόγειο της, όταν οι θεωρητικές έρευνες του Maxwell καταλήγουν στη διατύπωση τεσσάρων εξισώσεων, που διέπουν τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις. Οι εξισώσεις αυτές ενοποιούν τα ηλεκτρικά, τα μαγνητικά και τα οπτικά φαινόμενα. Αντιπροσωπεύουν μια σύνθεση των γνώσεων που είχαν συσσωρευτεί έως τότε για όλες αυτές τις κατηγορίες φαινομένων, μια σύνθεση της οποίας η σημασία στην ιστορία της επιστήμης είναι αντίστοιχη με τη σημασία της νευτώνειας σύνθεσης στο τέλος του 17ου αιώνα



By Lourakis - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=40513486>

Τροποποίηση του νόμου του Ampère

Για την ανάλυση **μαγνητικών πεδίων** που δημιουργούνται από **ηλεκτρικά ρεύματα** χρησιμοποιούμε τον νόμο του Ampère:

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

Ωστόσο, ο νόμος του Ampère σε αυτή τη μορφή ισχύει μόνο αν τα ηλεκτρικά πεδία είναι **σταθερά ως προς τον χρόνο**.

Ο Maxwell τροποποίησε την εξίσωση ώστε **να καλύπτει και χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία**.

Ο Maxwell τροποποίησε την εξίσωση προσθέτοντας έναν όρο.

Τροποποίηση του νόμου του Ampère (συνέχεια)

Ο πρόσθετος όρος περιλαμβάνει έναν παράγοντα, ο οποίος ονομάζεται ρεύμα μετατόπισης, I_d :

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

Φ_E είναι η ηλεκτρική ροή (E.A). Ο όρος αυτός προστέθηκε στον νόμο του Ampère. Η θεωρητική αυτή διατύπωση έδειξε ότι:

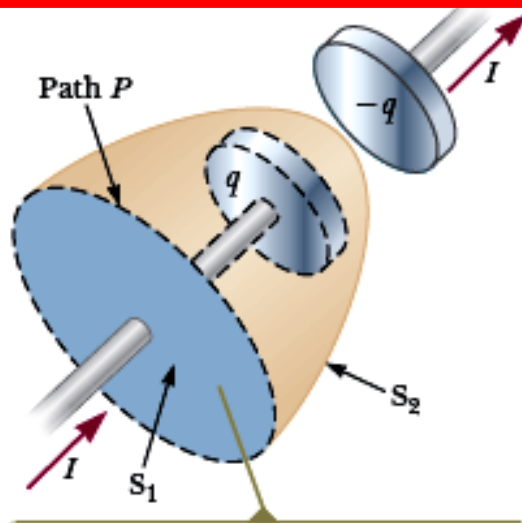
Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται τόσο από ρεύματα αγωγιμότητας όσο και από χρονικά μεταβαλλόμενα ηλεκτρικά πεδία.

Η γενική μορφή του νόμου του Ampère (που αναφέρεται και ως νόμος Ampère-Maxwell) είναι:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

When the path P is considered to be the boundary of S_1 , $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$ because the conduction current I passes through S_1 . When the path is considered to be the boundary of S_2 , however, $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$ because no conduction current passes through S_2 . Therefore, we have a contradictory situation that arises from the discontinuity of the current! Maxwell solved this problem by postulating an additional term on the right side of Ampère's law, which includes a factor called the **displacement current** I_d defined as¹

$$I_d \equiv \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.1)$$



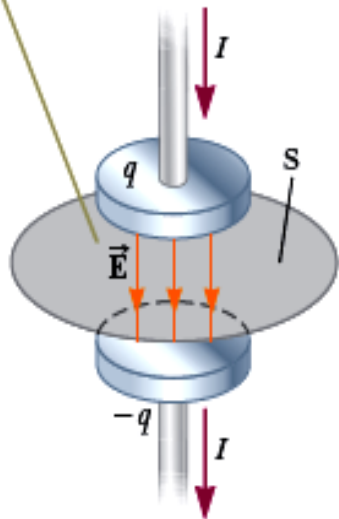
The conduction current I in the wire passes only through S_1 , which leads to a contradiction in Ampère's law that is resolved only if one postulates a displacement current through S_2 .

Figure 34.1 Two surfaces S_1 and S_2 near the plate of a capacitor are bounded by the same path P .

Ampère–Maxwell law ►

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0(I + I_d) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (34.2)$$

The electric field lines between the plates create an electric flux through surface S.



We can understand the meaning of this expression by referring to Figure 34.2. The electric flux through surface S is $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A} = EA$, where A is the area of the capacitor plates and E is the magnitude of the uniform electric field between the plates. If q is the charge on the plates at any instant, then $E = q/(\epsilon_0 A)$ (see Section 26.2). Therefore, the electric flux through S is

$$\Phi_E = EA = \frac{q}{\epsilon_0}$$

Hence, the displacement current through S is

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \frac{dq}{dt} \quad (34.3)$$

That is, the displacement current I_d through S is precisely equal to the conduction current I in the wires connected to the capacitor!

By considering surface S, we can identify the displacement current as the source of the magnetic field on the surface boundary. The displacement current has its physical origin in the time-varying electric field. The central point of this formalism is that magnetic fields are produced *both* by conduction currents *and* by time-varying electric fields. This result was a remarkable example of theoretical work by Maxwell, and it contributed to major advances in the understanding of electromagnetism.

Figure 34.2 When a conduction current exists in the wires, a changing electric field $\vec{E}$ exists between the plates of the capacitor.

Οι εξισώσεις του Maxwell

Στην ενοποιημένη θεωρία του για τον ηλεκτρομαγνητισμό, ο Maxwell έδειξε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα αποτελούν φυσική συνέπεια των θεμελιωδών νόμων που εκφράζονται με τις παρακάτω τέσσερις εξισώσεις:

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

(34.4) ◀ Gauss's law

$$\oint \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{A}} = 0$$

(34.5) ◀ Gauss's law in magnetism

$$\oint \vec{\mathbf{E}} \cdot d\vec{\mathbf{s}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

(34.6) ◀ Faraday's law

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

(34.7) ◀ Ampère–Maxwell law

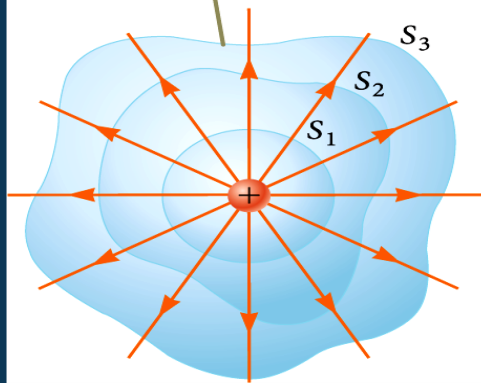
Η πρώτη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος του Gauss

Η συνολική ηλεκτρική ροή που διέρχεται από οποιαδήποτε κλειστή επιφάνεια ισούται με το συνολικό φορτίο που περικλείει η επιφάνεια διά του ϵ_0 .

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

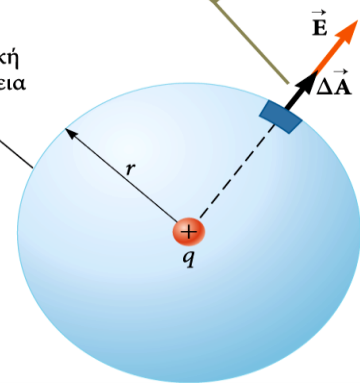
Ο νόμος αυτός συσχετίζει το ηλεκτρικό πεδίο με την κατανομή φορτίου που το δημιουργεί.

Από όλες τις επιφάνειες διέρχεται η ίδια συνολική ηλεκτρική ροή.



Όταν το φορτίο είναι στο κέντρο της σφαίρας, τότε το ηλεκτρικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια σε κάθε σημείο και έχει σταθερό μέτρο.

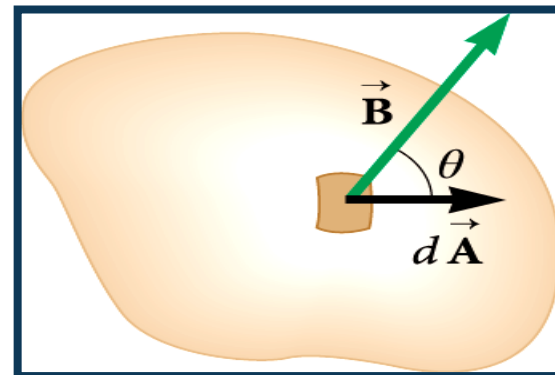
Σφαιρική επιφάνεια Gauss



Η δεύτερη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό

Η συνολική μαγνητική ροή που διέρχεται από μια κλειστή επιφάνεια είναι μηδενική.

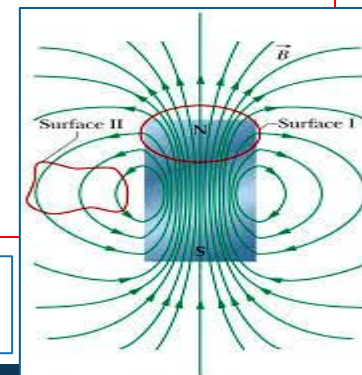
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$



Το πλήθος των γραμμών μαγνητικού πεδίου που εισέρχονται σ' έναν κλειστό όγκο πρέπει να είναι ίσο με το πλήθος των γραμμών που εξέρχονται απ' αυτόν.

Αν δεν ίσχυε αυτό, τότε θα υπήρχαν στη φύση μαγνητικά μονόπολα.

- Δεν έχουν ανακαλυφθεί μαγνητικά μονόπολα.



Γιόχαν Καρλ Φρίντριχ Γκάους



Ο Γιόχαν Καρλ Φρίντριχ Γκάους (*Johann Carl Friedrich Gauß*, 30 Απριλίου 1777- 23 Φεβρουαρίου 1855). Γερμανός μαθηματικός που συνεισέφερε σε πολλά ερευνητικά πεδία της επιστήμης του, όπως η Θεωρία Αριθμών, η Στατιστική, η Μαθηματική Ανάλυση, η Διαφορική Γεωμετρία, αλλά και συναφών επιστημών, όπως η Γεωδεσία, η Αστρονομία και η Φυσική (Ηλεκτροστατική, Οπτική, Γεωμαγνητισμός). Αποκλήθηκε «ο πρίγκηψ των μαθηματικών» και ο «μεγαλύτερος μαθηματικός μετά τον Αρχιμήδη και τον Ευκλείδη». Ο Γκάους υπήρξε ίσως ο σημαντικότερος Γερμανός μαθηματικός όλων των εποχών και ένας από τους δύο ή τρεις σπουδαιότερους των νεότερων χρόνων (μετά την αρχαιότητα) (Waldo Dunnington: "The Sesquicentennial of the Birth of Gauss", *Scientific Monthly*, τόμος 24, σ. 402-414).

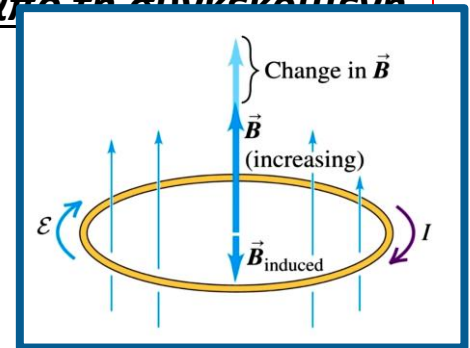
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B1%CF%81%CE%BB_%CE%A6%CF%81%CE%AF%CE%BD%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%87_%CE%93%CE%BA%CE%AC%CE%BF%CF%85%CF%82

Η τρίτη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος του Faraday για την επαγωγή

Περιγράφει τη **δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου από χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.**

Η ΗΕΔ, δηλαδή το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος οποιασδήποτε κλειστής διαδρομής, ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής που διέρχεται από οποιαδήποτε επιφάνεια οριοθετείται από τη συγκεκριμένη διαδρομή.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

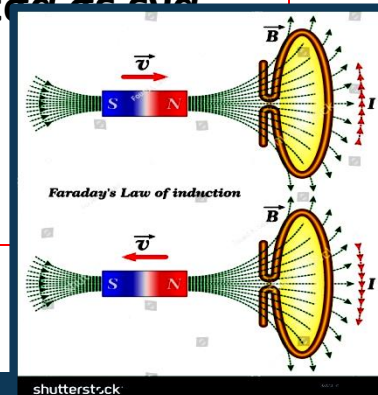


Φ_E : Μαγνητική ροή ($B \cdot A$). Απόρροια του νόμου του Faraday για την επαγωγή είναι το **ρεύμα** που επάγεται σε έναν **αγώγιμο βρόχο**, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ένα χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

<https://www.physicsforums.com/threads/understand-faradays-law-and-lenz-law.970984/>

Ενότητα Η12.2

<https://www.shutterstock.com/image-vector/faradays-law-induction-1058450669>

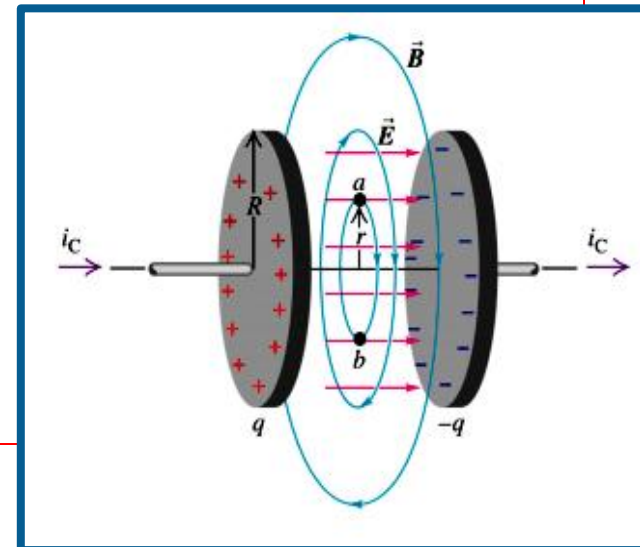


Η τέταρτη εξίσωση του Maxwell – Ο νόμος Ampère-Maxwell

Περιγράφει τη δημιουργία μαγνητικού πεδίου από μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και από ηλεκτρικό ρεύμα.

Το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος οποιασδήποτε κλειστής διαδρομής ισούται με το άθροισμα του γινομένου του μ_0 επί το συνολικό ρεύμα που διέρχεται από τη διαδρομή αυτή και του γινομένου της ποσότητας $\epsilon_0\mu_0$ επί τον ρυθμό μεταβολής της ηλεκτρικής ροής που διέρχεται από οποιαδήποτε επιφάνεια ορίζει η διαδρομή αυτή.

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



André Marie Ampère

Ο Αντρέ-Μαρί Αμπέρ (*André-Marie Ampère*, 20/01/1775 – 10/06/1836). Γάλλος φυσικός, κύριος θεμελιωτής του Ηλεκτρομαγνητισμού και της Ηλεκτροδυναμικής. Ασχολήθηκε με πλήθος επιστημονικών θεμάτων. Ο Μάξγουελ τον χαρακτήρισε «Νεύτωνα του Ηλεκτρισμού».

Γεννήθηκε στη Λυών. Διετέλεσε Καθηγητής της Φυσικής και της Χημείας στη Κεντρική Σχολή (1801), καθηγητής του Λυκείου της Λυών (1804) και επιμελητής της Πολυτεχνικής Σχολής (1804), μέλος του συμβουλευτικού γραφείου των τεχνών, γενικός επιθεωρητής του Πανεπιστημίου (1808), καθηγητής Ανάλυσης στο Πολυτεχνείο (1809) καθώς και μέλος πολλών ξένων Ακαδημιών. Είναι θεμελιωτής της άποψης ότι οι μαγνητικές δυνάμεις προκαλούνται από το κινούμενο και όχι από το ακίνητο ηλεκτρικό φορτίο. Εξήγησε το μαγνητισμό των υλικών



https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CF%84%CF%81%AD%AD%CE%9C%CE%B1%CF%81%CE%AF_%CE%91%CE%BC%8F%80%CE%AD%CF%81

Ο νόμος της δύναμης Lorentz

Όταν είναι γνωστές οι τιμές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου σε κάποιο σημείο του χώρου, η δύναμη που δέχεται ένα σωματίδιο με φορτίο q υπολογίζεται από τη σχέση:

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

Οι εξισώσεις του Maxwell, σε συνδυασμό με τον νόμο της δύναμης Lorentz, περιγράφουν πλήρως όλες τις κλασικές ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις που συμβαίνουν στο κενό.

Ταχύτητα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Στο κενό, $q = 0$ και $I = 0$

Η λύση των δύο τελευταίων εξισώσεων του Maxwell δείχνει ότι

η ταχύτητα διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ισούται με την ταχύτητα του φωτός.

Αυτό το αποτέλεσμα οδήγησε τον Maxwell στην πρόβλεψη ότι

τα κύματα φωτός είναι μια μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Heinrich Rudolf Hertz

1857–1894

Γερμανός φυσικός

Ήταν ο πρώτος που παρήγαγε και ανίχνευσε ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Το 1887 έκανε τη σημαντικότερη ανακάλυψή του, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Έδειξε επίσης και άλλες κυματικές ιδιότητες του φωτός.



Το πείραμα του Hertz

Ένα επαγωγικό πηνίο είναι συνδεδεμένο με έναν πομπό.

Ο πομπός αποτελείται από δύο σφαιρικά ηλεκτρόδια, μεταξύ των οποίων υπάρχει ένα μικρό διάκενο.

Το πηνίο τροφοδοτεί τα ηλεκτρόδια με σύντομες και απότομες μεταβολές της τάσης.

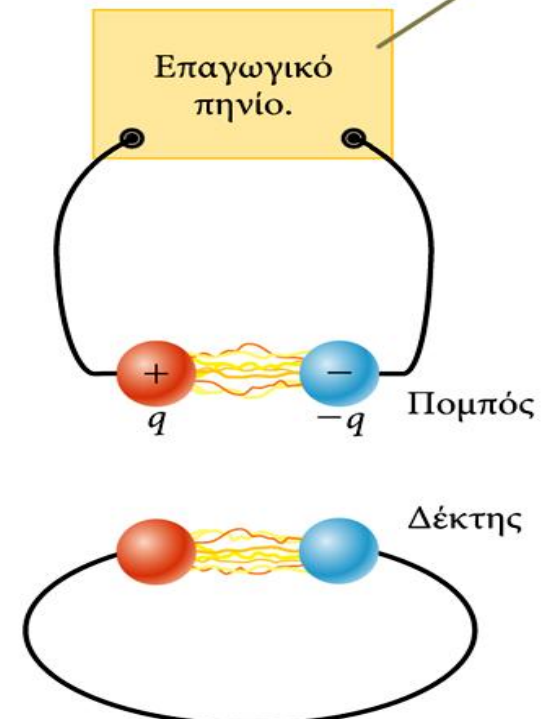
Καθώς ο αέρας στο διάκενο ιοντίζεται, γίνεται καλύτερος αγωγός του ηλεκτρισμού.

Η εκκένωση μεταξύ των ηλεκτροδίων παρουσιάζει ταλαντωτική συμπεριφορά πολύ υψηλής συχνότητας. Αυτή η πειραματική διάταξη ισοδυναμεί με ένα κύκλωμα

LC.

Ενότητα H12.2

Ο πομπός αποτελείται από δύο σφαιρικά ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα σε ένα επαγωγικό πηνίο, το οποίο δημιουργεί σύντομες, απότομες μεταβολές της τάσης στις σφαίρες και, κατά συνέπεια, ταλαντώσεις στην εκκένωση που γίνεται μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Ο δέκτης είναι ένας συρμάτινος βρόχος, ο οποίος βρίσκεται πολύ κοντά στον πομπό, και διαθέτει ένα δεύτερο κενό σπινθηρισμού.

Το πείραμα του Hertz (συνέχεια)

Όταν η συχνότητα του δέκτη ρυθμίστηκε σύμφωνα με εκείνη του πομπού, στο διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων του δέκτη προκλήθηκαν **σπινθήρες**.

Με μια σειρά άλλων πειραμάτων, ο Hertz έδειξε επίσης ότι η ακτινοβολία που παρήγαγε αυτή η διάταξη παρουσίαζε κυματικές ιδιότητες.

- Συμβολή, περίθλαση, ανάκλαση, διάθλαση, και πόλωση.

Επιπλέον μέτρησε την ταχύτητα διάδοσης αυτής της ακτινοβολίας.

- Η ταχύτητα αυτή ήταν πολύ κοντά στη γνωστή τιμή της ταχύτητας του φωτός.

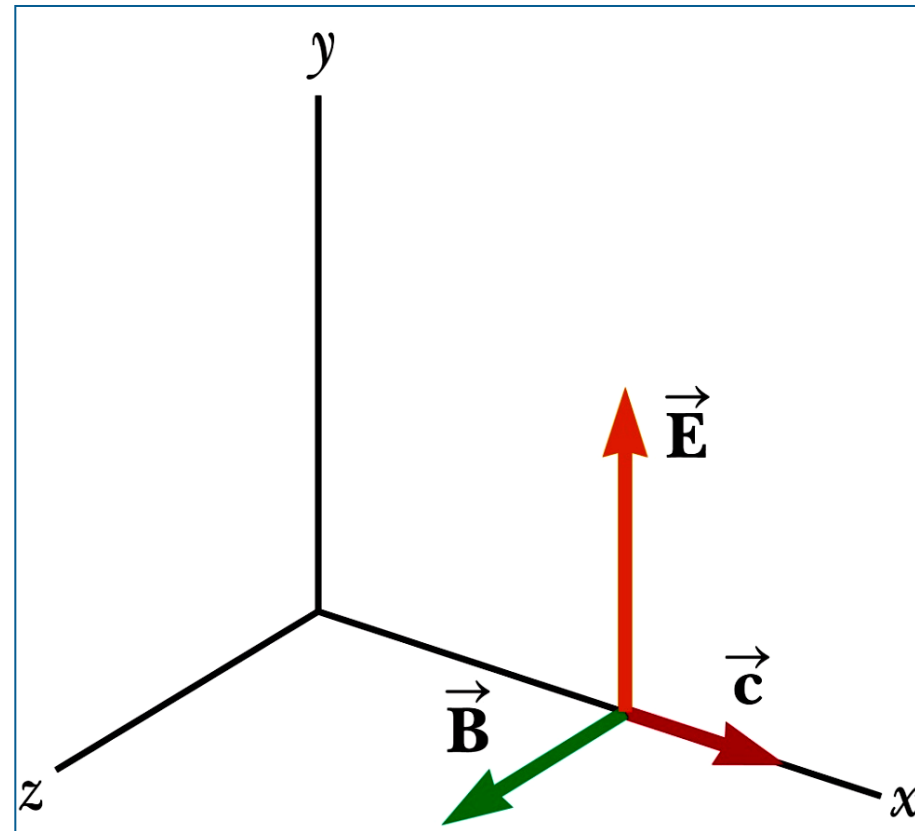
Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα

Υποθέτουμε ότι τα διανύσματα του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος έχουν συγκεκριμένη χωροχρονική συμπεριφορά, η οποία είναι σύμφωνη με τις εξισώσεις του Maxwell.

Έστω ότι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται προς τη θετική κατεύθυνση του άξονα x και ότι τα διανύσματα $\vec{E}$ και $\vec{B}$ έχουν την κατεύθυνση που παρουσιάζεται στην εικόνα.

Η **κατεύθυνση διάδοσης** του κύματος είναι η **θετική κατεύθυνση του άξονα x** .

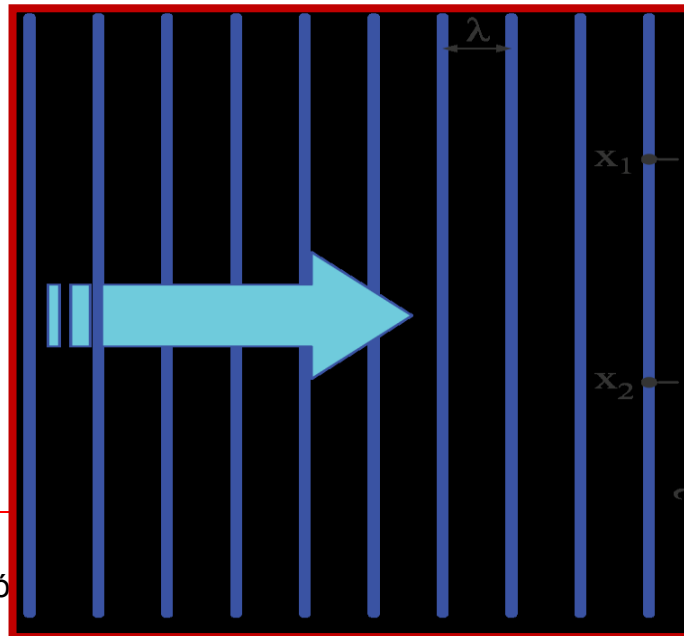
Θεωρούμε ότι το **ηλεκτρικό πεδίο** έχει τη **θετική κατεύθυνση του άξονα y** και ότι το **μαγνητικό πεδίο** έχει τη **θετική κατεύθυνση του άξονα z** .



Επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (συνέχεια)

Κύματα στα οποία το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι παράλληλα προς άξονες κάθετους μεταξύ τους λέγονται **γραμμικώς πολωμένα κύματα**.

Επίσης υποθέτουμε ότι, σε οποιοδήποτε σημείο του χώρου, **τα μέτρα** των διανυσμάτων E και B των πεδίων εξαρτώνται μόνο από τη συντεταγμένη x και τον χρόνο t .



Ακτίνες

Ακτίνα είναι η **ευθεία** κατά μήκος της οποίας **διαδίδεται** το κύμα.

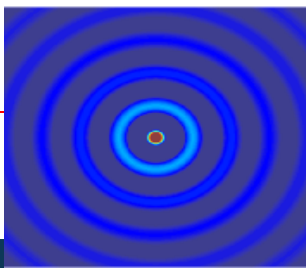
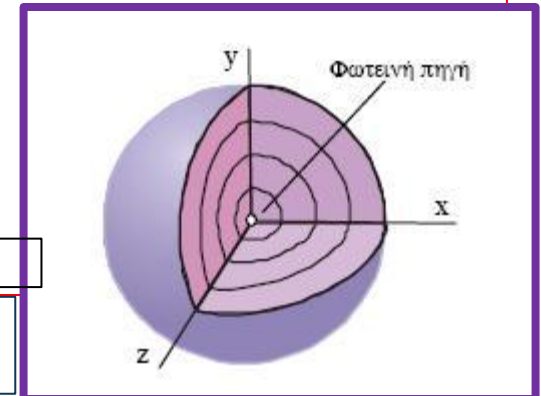
Όλες οι ακτίνες των **γραμμικά πολωμένων κυμάτων** που εξετάζουμε είναι **παράλληλες**.

Το σύνολο αυτών των κυμάτων ονομάζεται **επίπεδο κύμα**.

Η επιφάνεια που συνδέει τα σημεία ίσης φάσης όλων των κυμάτων είναι ένα γεωμετρικό επίπεδο, το οποίο ονομάζεται μέτωπο κύματος.

Μια **σημειακή πηγή ακτινοβολίας** εκπέμπει κύματα **ακτινικά** προς όλες τις κατευθύνσεις.

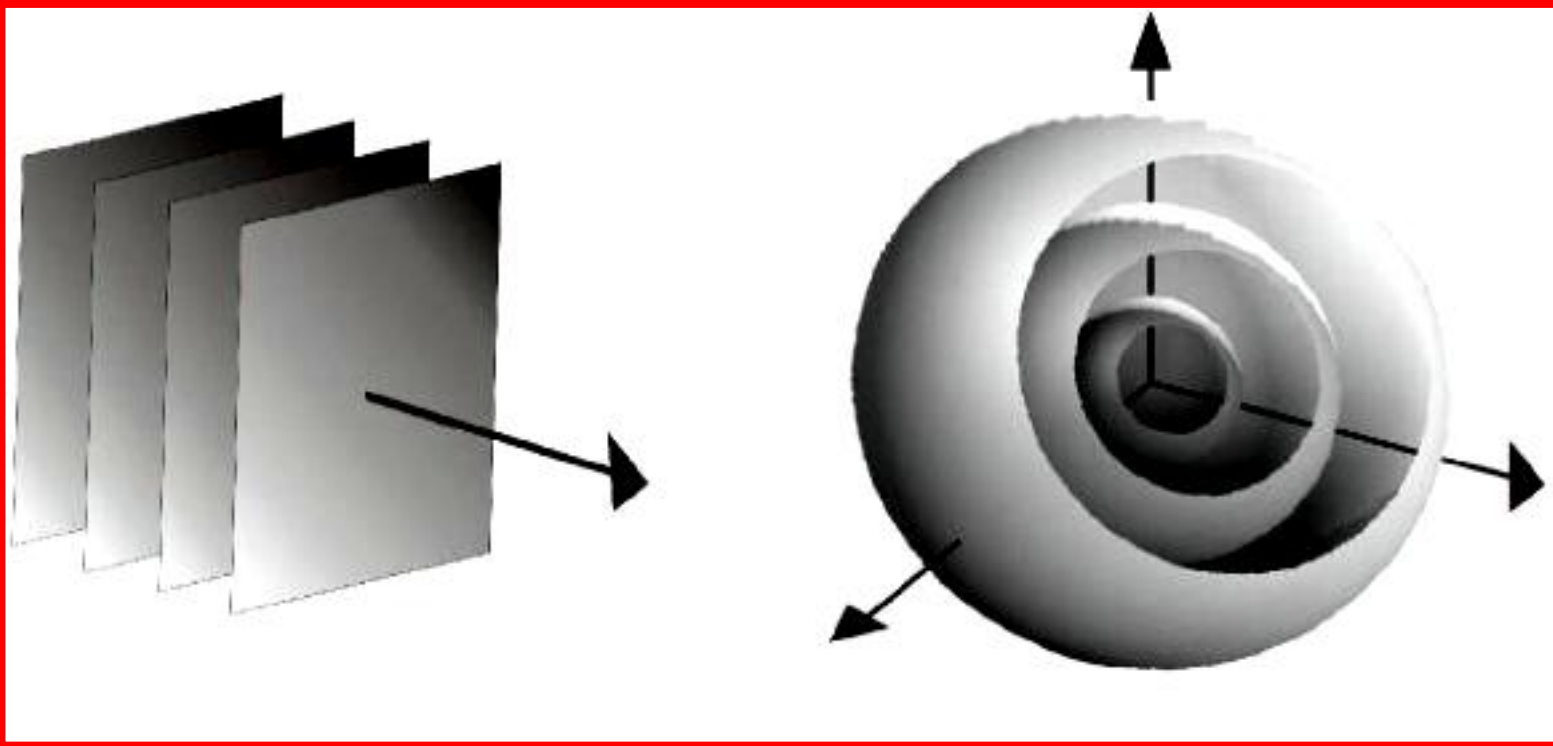
- Σε αυτή την περίπτωση, η επιφάνεια που συνδέει τα σημεία ίσης φάσης είναι **σφαιρική**.
- Αυτό το κύμα ονομάζεται **σφαιρικό κύμα**.



<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C107/144/1031,3719/>

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BE%CE%AF%CF%83%CF%89%CF%83%CE%B7
Ενότητα Η12.3

Διάδοση επίπεδων και σφαιρικών κυμάτων



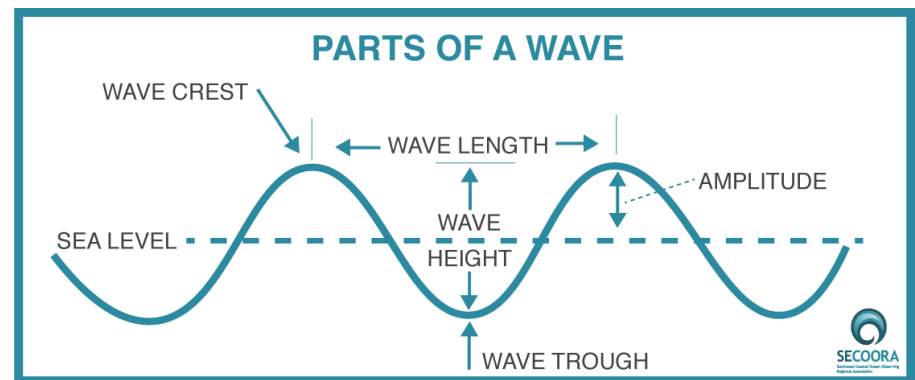
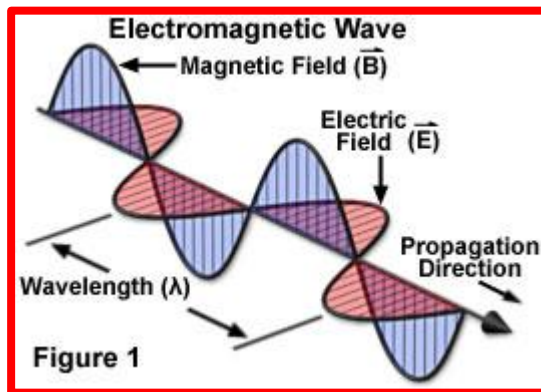
https://www.researchgate.net/publication/242641740_Model-based_curvefitting_for_in-situ_impedance_measurements/figures?lo=1

Κύματα – Σημειώσεις ορολογίας

Ο όρος κύμα αναφέρεται

- τόσο στην εκπομπή από ένα **μεμονωμένο σημείο**
- όσο και στο σύνολο των κυμάτων που εκπέμπουν **όλα τα σημεία της πηγής**.

Η σημασία του όρου γίνεται αντιληπτή από τα συμφραζόμενα.



According to Equation 34.11, this spatial variation in $\vec{E}$ gives rise to a time-varying magnetic field along the z direction.

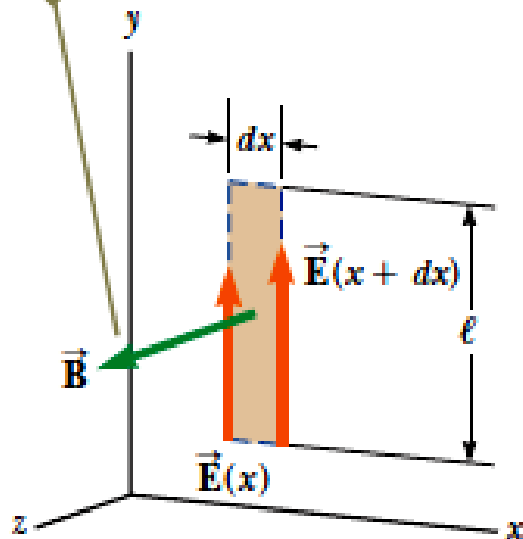


Figure 34.6 At an instant when a plane wave moving in the positive x direction passes through a rectangular path of width dx lying in the xy plane, the electric field in the y direction varies from $\vec{E}(x)$ to $\vec{E}(x+dx)$.

According to Equation 34.14, this spatial variation in $\vec{B}$ gives rise to a time-varying electric field along the y direction.

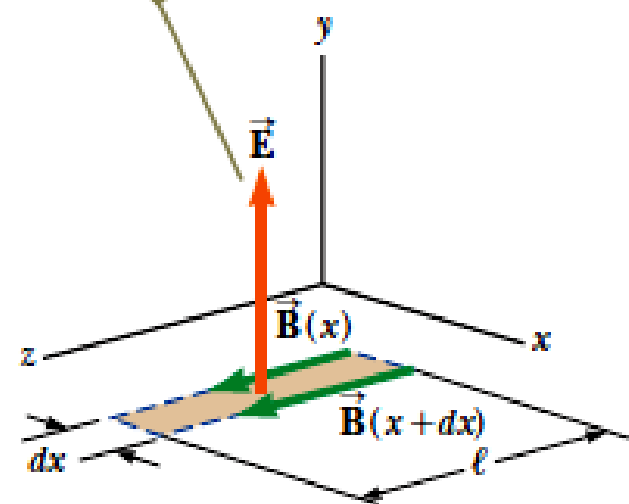
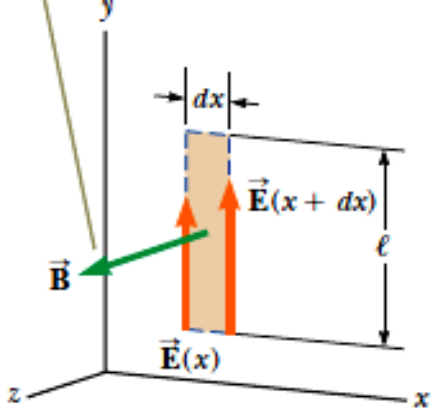


Figure 34.7 At an instant when a plane wave passes through a rectangular path of width dx lying in the xz plane, the magnetic field in the x direction varies from $\vec{B}(x)$ to $\vec{B}(x+dx)$.

$$E(x+dx) \approx E(x) + \left. \frac{dE}{dx} \right|_{t \text{ constant}} dx = E(x) + \frac{\partial E}{\partial x} dx$$



$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = [E(x + dx)]\ell - [E(x)]\ell \approx \ell \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) dx \quad (34.9)$$

Because the magnetic field is in the z direction, the magnetic flux through the rectangle of area ℓdx is approximately $\Phi_B = B\ell dx$ (assuming dx is very small compared with the wavelength of the wave). Taking the time derivative of the magnetic flux gives

$$\frac{d\Phi_B}{dt} = \ell dx \left. \frac{dB}{dt} \right|_{x \text{ constant}} = \ell dx \frac{\partial B}{\partial t} \quad (34.10)$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Substituting Equations 34.9 and 34.10 into Equation 34.6 gives

$$\ell \left(\frac{\partial E}{\partial x} \right) dx = -\ell dx \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (34.11)$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = [B(x)]\ell - [B(x + dx)]\ell \approx -\ell \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) dx$$

The electric flux through the rectangle is $\Phi_E = E\ell dx$, which, when differentiated with respect to time, gives

$$\frac{\partial \Phi_E}{\partial t} = \ell dx \frac{\partial E}{\partial t} \quad (34.13)$$

Substituting Equations 34.12 and 34.13 into Equation 34.7 gives

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

$$-\ell \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) dx = \mu_0 \epsilon_0 \ell dx \left(\frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (34.14)$$

Taking the derivative of Equation 34.11 with respect to x and combining the result with Equation 34.14 gives

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial B}{\partial x} \right) = -\frac{\partial}{\partial t} \left(-\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \right)$$

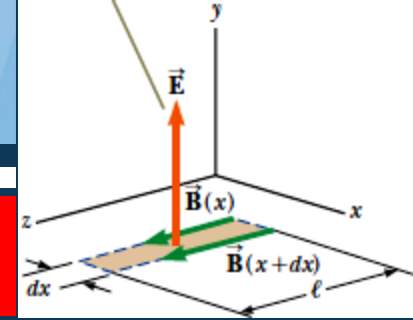
$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (34.15)$$

In the same manner, taking the derivative of Equation 34.14 with respect to x and combining it with Equation 34.11 gives

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \quad (34.16)$$

Equations 34.15 and 34.16 both have the form of the linear wave equation³ with the wave speed v replaced by c , where

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



Ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (1)

Οι λύσεις της τρίτης και της τέταρτης εξίσωσης του Maxwell έχουν **κυματική μορφή**, όπου τόσο το E όσο και το B ικανοποιούν μία κυματική εξίσωση το καθένα.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός:

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

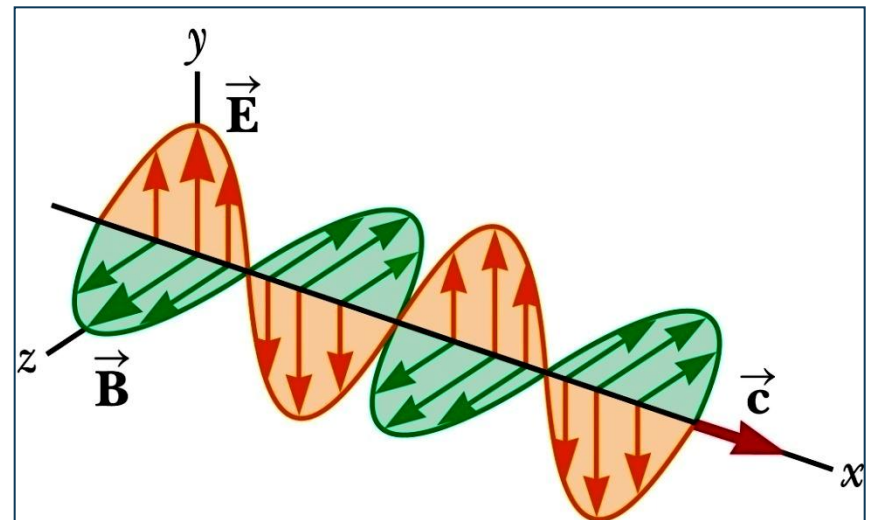
- Αυτό προκύπτει από τη λύση των εξισώσεων του Maxwell.

Ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (2)

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**.

■ Συνοπτικά, μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι εγκάρσια κύματα.

■ Στην εικόνα παρουσιάζεται ένα ημιτονοειδές ηλεκτρομαγνητικό κύμα, που διαδίδεται στη θετική κατεύθυνση του άξονα x με ταχύτητα c .



Ιδιότητες των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (τελική διαφάνεια)

Το μέτρο του ηλεκτρικού πεδίου και το μέτρο του μαγνητικού πεδίου στο κενό συνδέονται μεταξύ τους με τη σχέση:

$$c = E/B$$

■ Η σχέση αυτή προκύπτει από τη λύση των μερικών διαφορικών εξισώσεων που προκύπτουν από τις εξισώσεις του Maxwell.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υπόκεινται στην αρχή της υπέρθεσης.

Εύρεση της ταχύτητας διάδοσης – Ανάλυση

Εφαρμόζοντας τις εξισώσεις του Maxwell στο κενό, πήραμε τις παρακάτω μερικές διαφορικές εξισώσεις:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}$$

και

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

Αυτές έχουν τη μορφή μιας γενικής κυματικής εξίσωσης, με

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

Αντικαθιστώντας τις τιμές των μ_0 και ϵ_0 βρίσκουμε ότι $c = 2.99792 \times 10^8 \text{ m/s}$.

³The linear wave equation is of the form $(\partial^2 \gamma / \partial x^2) = (1/v^2)(\partial^2 \gamma / \partial t^2)$, where v is the speed of the wave and γ is the wave function. The linear wave equation was introduced as Equation 16.27, and we suggest you review Section 16.6.

Ο λόγος E/B – Ανάλυση

Η πιο απλή λύση που ικανοποιεί τις μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι το ημιτονοειδές κύμα:

- $E = E_{\max} \cos (kx - \omega t)$
- $B = B_{\max} \cos (kx - \omega t)$

Ο κυκλικός κυματαριθμός είναι $k = 2\pi/\lambda$.

- Όπου λ είναι το μήκος κύματος.

Η κυκλική συχνότητα είναι $\omega = 2\pi f$.

- Όπου f είναι η συχνότητα του κύματος.

Ζαν Λε Ροντ ντ' Αλαμπέρ

Ο Ζαν Μπατίστ Λε Ροντ ντ' Αλαμπέρ (Jean Baptiste le Rond d'Alembert, (Παρίσι 16.11.1717-29.10.1783) ήταν Γάλλος Μαθηματικός, Μηχανικός και Φυσικός, Φιλόσοφος και Θεωρητικός της Μουσικής. Θεωρείται ένας από τους σημαντικότερους μαθηματικούς και φυσικούς του 18^ο αιώνα. Επιπλέον βοήθησε τον Ντιντερό στην συγγραφή της περίφημης Εγκυκλοπαίδειας. Ο ντ' Αλαμπέρ σπούδασε Νομικά, αργότερα Ιατρική, και αργότερα αφοσιώθηκε με αυτοδιδασκαλία στα Μαθηματικά και στη Φυσική. Ο ντ' Αλαμπέρ μελέτησε τη μονοδιάστατη διαφορική κυματική εξίσωση, ήταν ο πρώτος που διατύπωσε το θεμελιώδες θεώρημα της άλγεβρας για το πλήθος των ριζών αλγεβρικής εξίσωσης, ενώ εισήγαγε τη χρήση διαφορικών εξισώσεων στη Φυσική.



https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B5%CE%BE%CE%AF%CF%83%CF%89%CF%83%CE%B7

Ο λόγος E/B – Ανάλυση (συνέχεια)

Η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι:

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{2\pi/\lambda} = \lambda f = c$$

Με μερική παραγωγή προκύπτει επίσης ότι:

$$\frac{E_{\max}}{B_{\max}} = \frac{E}{B} = c$$

Το διάνυσμα Poynting (1)

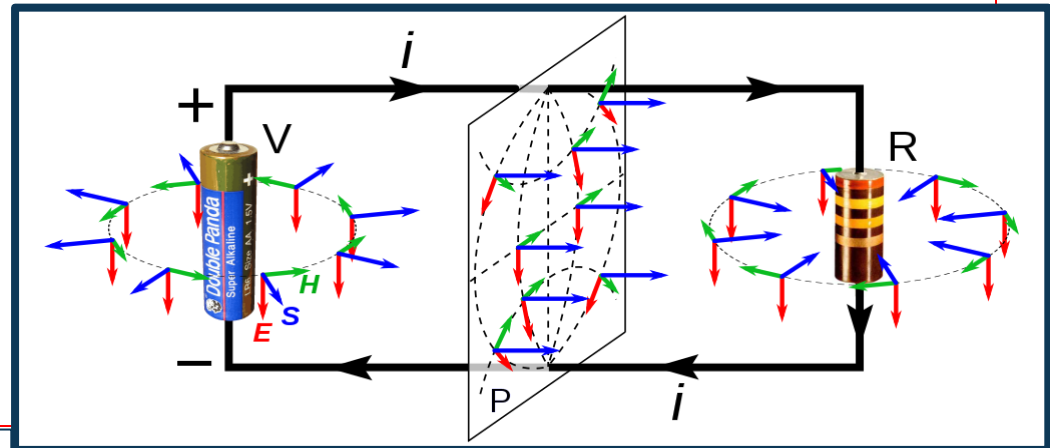
Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα **μεταφέρουν ενέργεια**.

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**.

Διάνυσμα Poynting (μπλε)

σε Κύκλωμα μιας μπαταρίας και ενός αντιστάτη



https://en.wikipedia.org/wiki/Poynting_vector#/media/File:Poynting_vectors_of_DC_circuit.svg

By Chetvorno, King of Hearts - Own work, CC0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=38265878>

Το διάνυσμα Poynting (2)

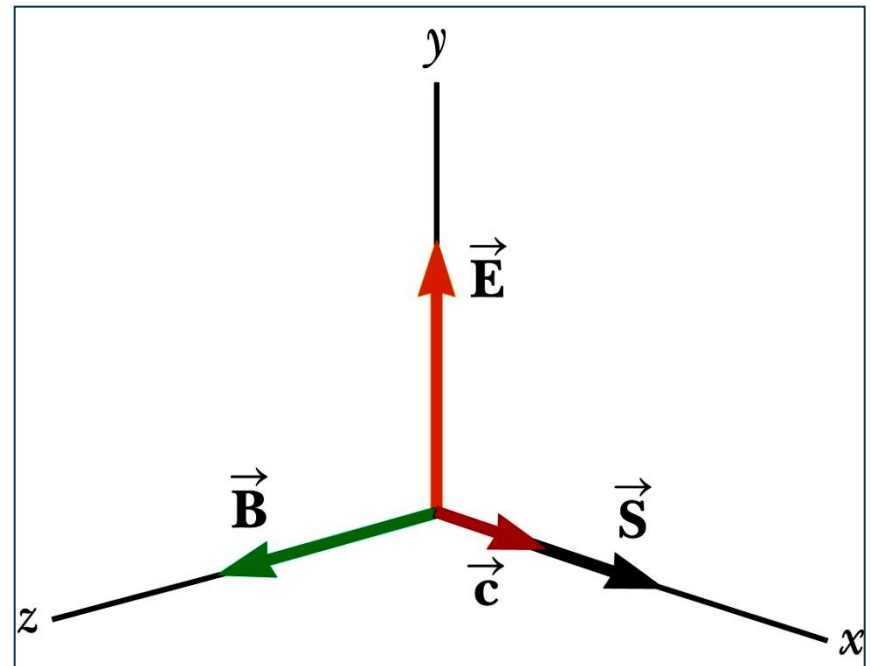
Το διάνυσμα Poynting ορίζεται από τη σχέση:

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

Η κατεύθυνσή του είναι ίδια με την *κατεύθυνση διάδοσης του κύματος*.

Εξαρτάται από τον χρόνο.

- Το μέτρο του *μεταβάλλεται με τον χρόνο*.
- Το μέτρο του παίρνει τη μέγιστη τιμή του τότε ακριβώς που φτάνουν στις δικές τους μέγιστες τιμές τα $\vec{E}$ και $\vec{B}$.



Το διάνυσμα Poynting (τελική διαφάνεια)

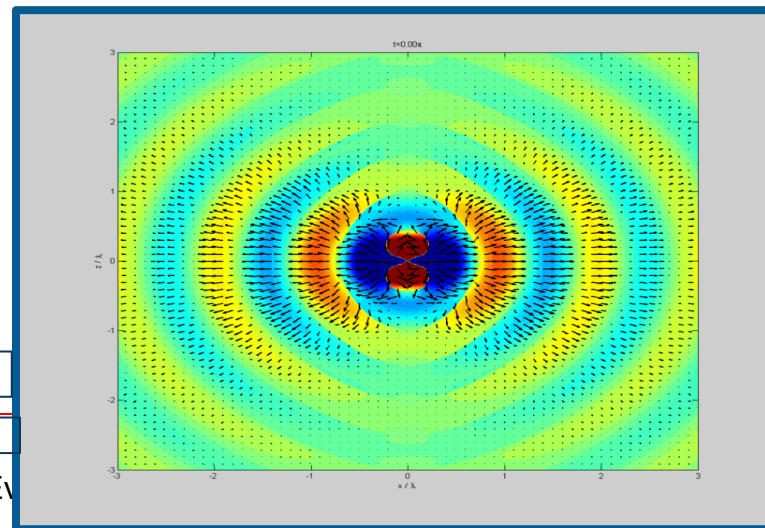
Το μέτρο του διανύσματος Poynting αντιπροσωπεύει:

τον ρυθμό με τον οποίο η ενέργεια διέρχεται από μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

Επομένως, το μέτρο του αντιπροσωπεύει

■ *ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας.*

Οι μονάδες του διανύσματος Poynting στο σύστημα SI είναι $\text{J/s.m}^2 = \text{W/m}^2$.



https://en.wikipedia.org/wiki/Poynting_vector#/media/File:DipoleRadiation.gif

By MyName (Geoemyda (talk)) - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5179902>

Ένταση κύματος

Η **ένταση**, I , του κύματος είναι η **μέση τιμή του διανύσματος Poynting**, S , για μία ή περισσότερες περιόδους (ή κύκλους)*.

- Η ένταση του κύματος ορίζεται εδώ όπως και στα προηγούμενα κεφάλαια.
- Στη βιομηχανία της οπτικής, η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας λέγεται **ακτινοβολήση (ή ακτινοβολισμός)**.
- Η **ένταση ακτινοβολίας** ή εκπεμπόμενη ένταση ορίζεται ως ισχύς (σε watt) ανά στερεά γωνία (σε ακτίνια στερεάς γωνίας).

Όταν υπολογίζουμε τον μέσο όρο, λαμβάνουμε υπόψη τη χρονική μέση τιμή του **$\cos^2(kx - \omega t) = 1/2$** .

$$I = S_{\text{avg}} = \frac{E_{\text{max}} B_{\text{max}}}{2\mu_0} = \frac{E_{\text{max}}^2}{2\mu_0 c} = \frac{c B_{\text{max}}^2}{2\mu_0}$$

*Ένταση: Ενέργεια ανά μονάδα επιφανείας και ανά μονάδα χρόνου

Recall that the energy per unit volume associated with an electric field, which is the instantaneous energy density u_E , is given by Equation 26.13:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Also recall that the instantaneous energy density u_B associated with a magnetic field is given by Equation 32.14:

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Because E and B vary with time for an electromagnetic wave, the energy densities also vary with time. Using the relationships $B = E/c$ and $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0}$, the expression for u_B becomes

$$u_B = \frac{(E/c)^2}{2\mu_0} = \frac{\mu_0\epsilon_0}{2\mu_0} E^2 = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$$

Comparing this result with the expression for u_E , we see that

$$u_B = u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Πυκνότητα ενέργειας

Η πυκνότητα ενέργειας, u , είναι η ενέργεια ανά μονάδα όγκου.

Για το ηλεκτρικό πεδίο, $u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$.

Για το μαγνητικό πεδίο, $u_B = \frac{1}{2} B^2 / \mu_0$

Επειδή $B = E/c$ και $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$

$$u_B = u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Η στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας του μαγνητικού πεδίου ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ισούται με τη στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου του κύματος.

- Σε οποιονδήποτε δεδομένο όγκο, η ενέργεια είναι μοιρασμένη εξίσου σε καθένα από τα δύο πεδία.

The **total instantaneous energy density** u is equal to the sum of the energy densities associated with the electric and magnetic fields:

$$u = u_E + u_B = \epsilon_0 E^2 = \frac{B^2}{\mu_0}$$

When this total instantaneous energy density is averaged over one or more cycles of an electromagnetic wave, we again obtain a factor of $\frac{1}{2}$. Hence, for any electromagnetic wave, the total average energy per unit volume is

$$u_{\text{avg}} = \epsilon_0 (E^2)_{\text{avg}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 = \frac{B_{\text{max}}^2}{2\mu_0} \quad (34.25)$$

Comparing this result with Equation 34.24 for the average value of S , we see that

$$I = S_{\text{avg}} = cu_{\text{avg}} \quad (34.26)$$

In other words, the intensity of an electromagnetic wave equals the average energy density multiplied by the speed of light.

Πυκνότητα ενέργειας (συνέχεια)

Η συνολική στιγμιαία πυκνότητα ενέργειας, u , ισούται με το άθροισμα των πυκνοτήτων ενέργειας του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου:

- $u = u_E + u_B = \epsilon_0 E^2 = B^2 / \mu_0$

Αν θεωρήσουμε τον μέσο όρο της συνολικής στιγμιαίας πυκνότητας ενέργειας για έναν ή περισσότερους κύκλους, τότε η συνολική μέση τιμή γίνεται:

- $u_{\text{μέση}} = \epsilon_0 (E^2)_{\text{μέση}} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{\text{max}}^2 = B_{\text{max}}^2 / 2\mu_0$

Συναρτήσει της έντασης, $I = S_{\text{μέση}} = cu_{\text{μέση}}$.

- Η ένταση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος ισούται με το γινόμενο της μέσης πυκνότητας ενέργειας επί την ταχύτητα του φωτός.

$$I = S_{\text{avg}} = cu_{\text{avg}}$$

Ορμή

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα δεν μεταφέρουν μόνο ενέργεια αλλά και ορμή.

Όταν κάποια **επιφάνεια απορροφά αυτή την ορμή υφίσταται πίεση.**

Αν υποθέσουμε ότι το κύμα μεταφέρει στην επιφάνεια συνολική ενέργεια T_{HA} σε χρονικό διάστημα Δt τότε, στην περίπτωση πλήρους απορρόφησης, η συνολική ορμή που μεταφέρεται στην επιφάνεια είναι $p = T_{\text{ER}}/c$.

Πίεση και ορμή

Η πίεση, P , ορίζεται ως δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας:

$$P = \frac{1}{A} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{A} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_{\text{ER}}}{c} \right) = \frac{1}{c} \frac{(dT_{\text{ER}}/dt)}{A}$$

Αλλά το μέτρο του διανύσματος Poynting είναι $(dT_{\text{ER}}/dt)/A$, οπότε $P = S/c$.

■ Για μια πλήρως απορροφητική επιφάνεια.

Για μια πλήρως ανακλαστική επιφάνεια, $p = 2T_{\text{ER}}/c$ και $P = 2S/c$.

Η πίεση που δέχεται μια επιφάνεια με ανακλαστική ικανότητα κάπου μεταξύ εκείνης ενός πλήρως απορροφητικού σώματος και εκείνης ενός πλήρως ανακλαστικού σώματος έχει τιμή μεταξύ S/c και $2S/c$.

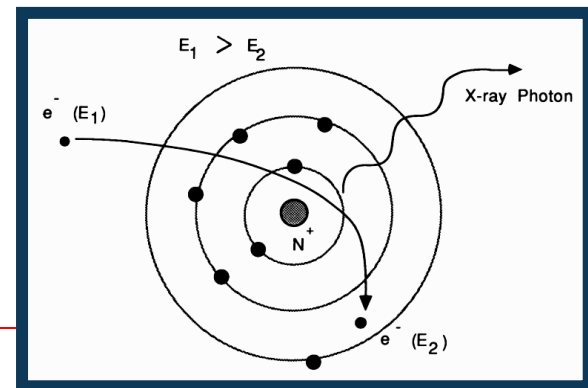
Στην περίπτωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, η πίεση ακτινοβολίας είναι περίπου $5 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$.

Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες (1)

Τα ακίνητα ηλεκτρικά φορτία και τα σταθερά ηλεκτρικά ρεύματα δεν παράγουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Ο θεμελιώδης μηχανισμός για την παραγωγή αυτής της ακτινοβολίας είναι η επιτάχυνση των φορτισμένων σωματιδίων.

Όποτε επιταχύνεται ένα φορτισμένο σωματίδιο, ακτινοβολεί ενέργεια.



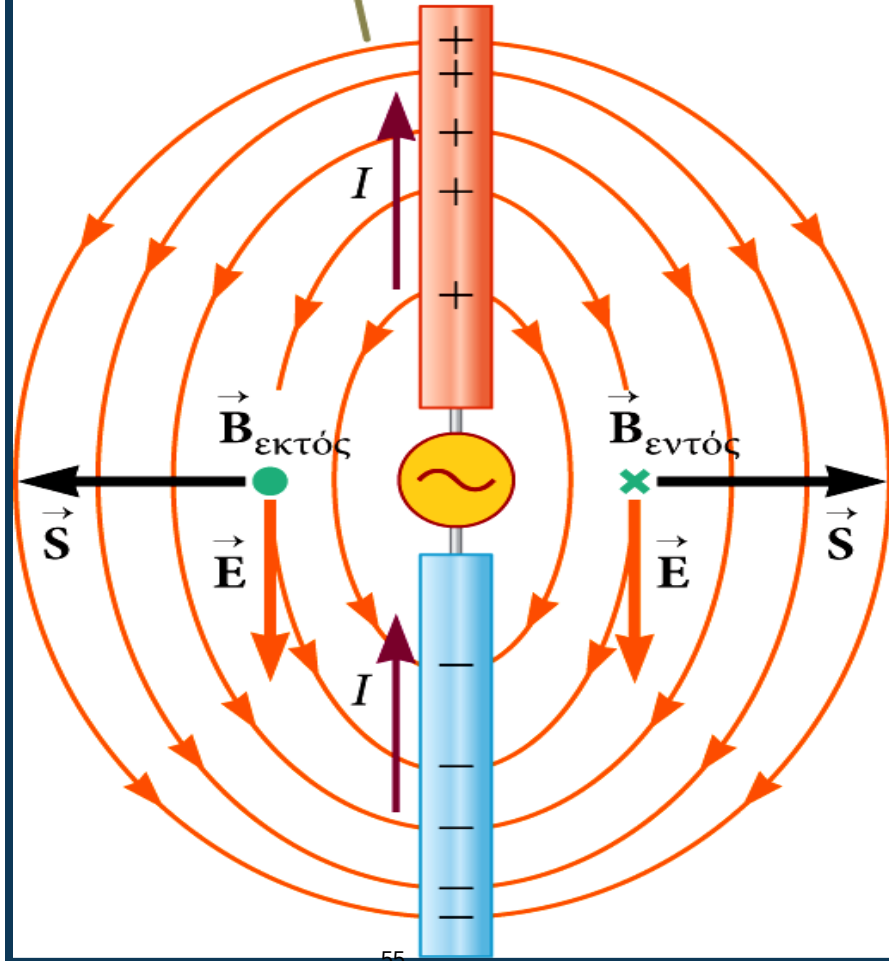
Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες (2)

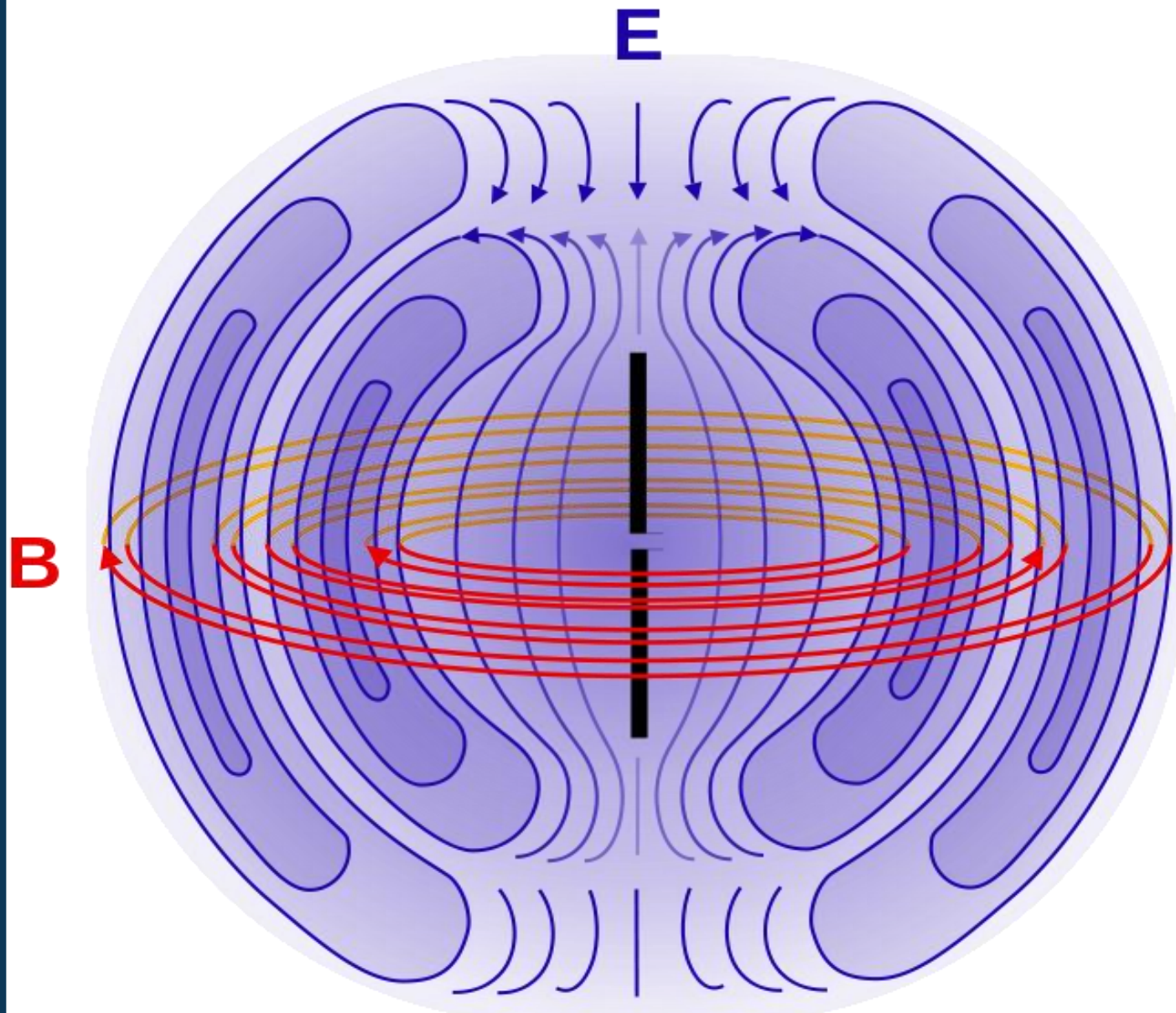
Η κεραία που παρουσιάζεται στην εικόνα είναι μια **κεραία μισού μήκους κύματος**.

Δύο αγωγίμες ράβδοι συνδέονται με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης.

Το μήκος κάθε ράβδου ισούται με το **ένα τέταρτο του μήκους κύματος** της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Οι γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μοιάζουν με εκείνες του ηλεκτρικού διπόλου (το οποίο φαίνεται στην Εικ. Η1.20).





Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων από κεραίες (τελική διαφάνεια)

Ο ταλαντωτής αναγκάζει τα φορτία να **επιταχύνονται** πότε προς τη μία και πότε προς την **άλλη** κατεύθυνση μεταξύ των δύο ράβδων.

Μπορούμε να θεωρήσουμε την κεραία ως ένα **ταλαντούμενο ηλεκτρικό δίπολο**.

Οι γραμμές του **μαγνητικού πεδίου** σχηματίζουν **ομόκεντρους κύκλους** γύρω από την κεραία, κάθετους στις γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο.

Το ηλεκτρικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο έχουν πάντα **διαφορά φάσης 90°** .

Η ενέργεια του διπόλου μειώνεται γρήγορα καθώς απομακρυνόμαστε από την κεραία.

Η πηγή της ακτινοβολίας σε ένα σημείο μακριά από την κεραία είναι η διαρκής επαγωγή ηλεκτρικού πεδίου από το χρονικά μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και η επαγωγή μαγνητικού πεδίου από το χρονικά μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Το ηλεκτρικό πεδίο και το μαγνητικό πεδίο που παράγονται με αυτό τον τρόπο **είναι σε φάση μεταξύ τους** και μεταβάλλονται σύμφωνα με τον παράγοντα **$1/r$** .

Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχει **πάντα ροή ενέργειας** από την κεραία προς τα έξω.

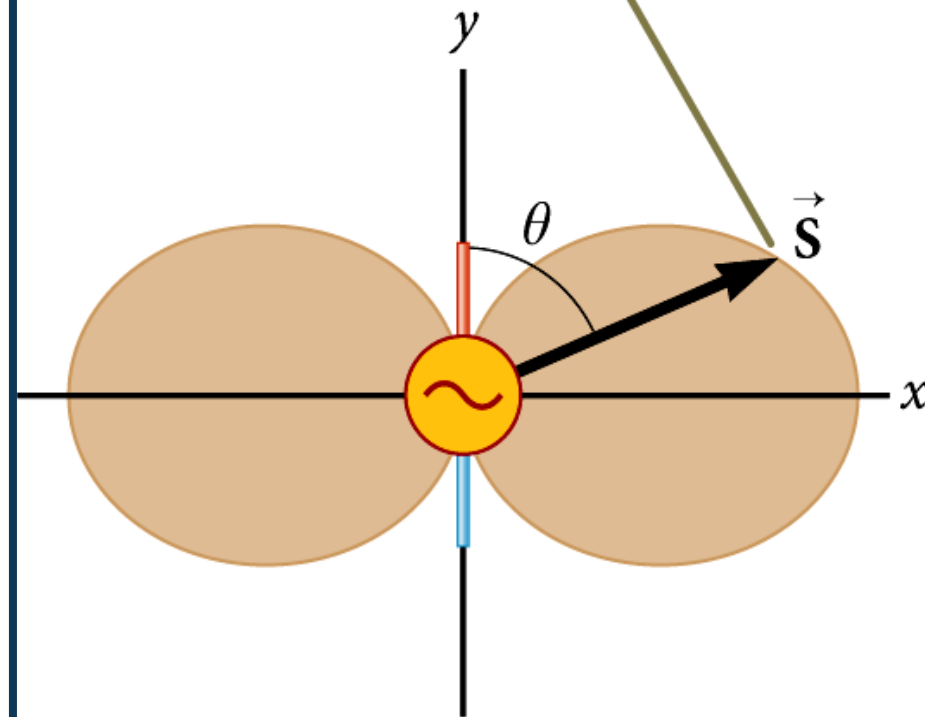
Εξάρτηση της έντασης από τη γωνία

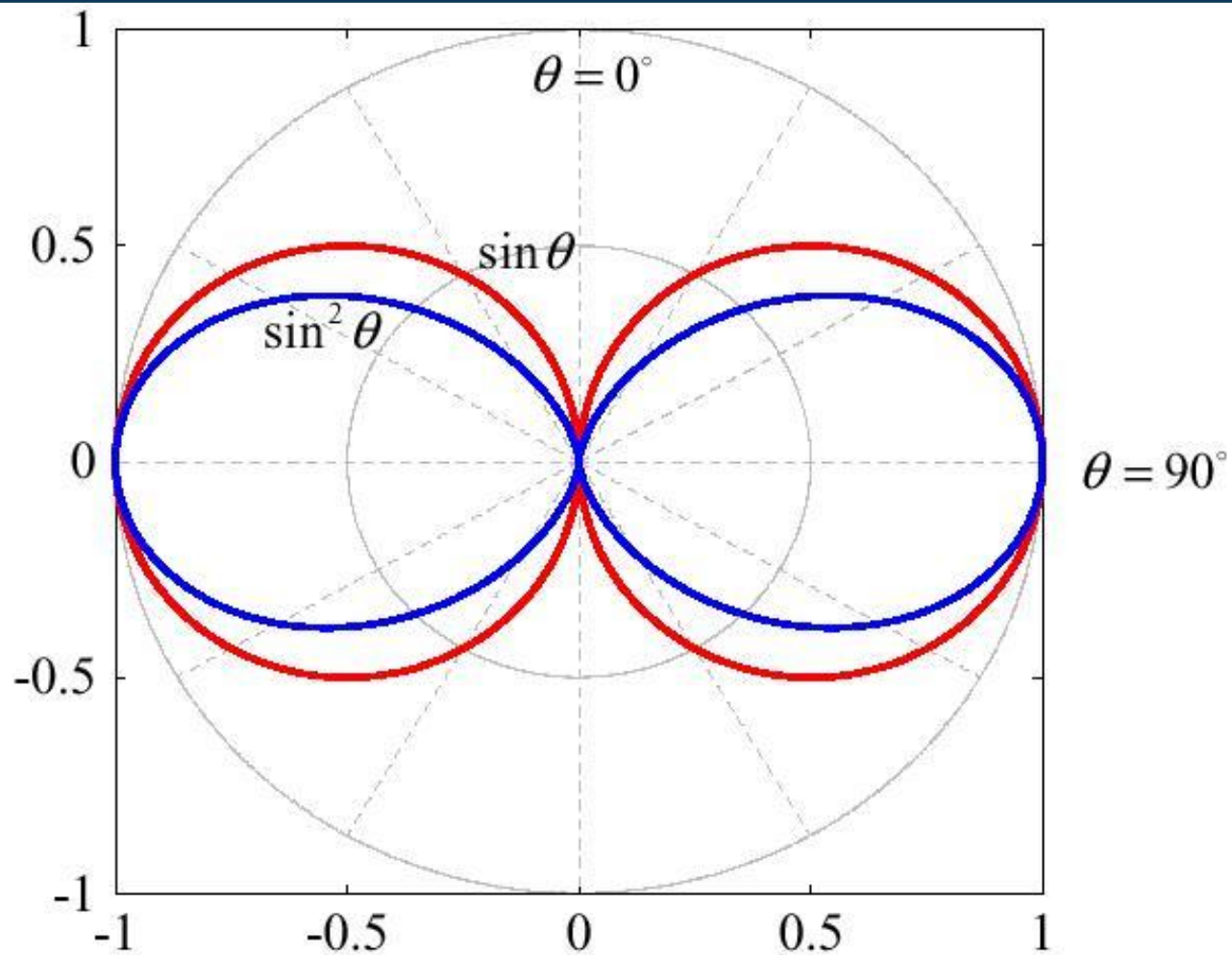
Σε αυτή την εικόνα φαίνεται η εξάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας που παράγει μια διπολική κεραία από τη γωνία.

Η ένταση και η ισχύς της ακτινοβολίας είναι μέγιστες στο επίπεδο που είναι κάθετο στην κεραία και διέρχεται από το μέσο της.

Η ένταση μεταβάλλεται σύμφωνα με τη σχέση $(\sin^2 \vartheta)/r^2$.

Η απόσταση από την αρχή των αξόνων σε ένα σημείο που βρίσκεται στο άκρο της σκιασμένης περιοχής είναι ανάλογη του μέτρου του διανύσματος Poynting και της έντασης της ακτινοβολίας σε αυτή την κατεύθυνση.





Υπενθύμιση: Ένταση σφαιρικού κύματος (ακτινοβολίας) που εκπέμπεται από σημειακή πηγή

Ένταση: ισχύς ανά μονάδα επιφανείας

Αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης

We define the **intensity** I of a wave, or the power per unit area, as the rate at which the energy transported by the wave transfers through a unit area A perpendicular to the direction of travel of the wave:

$$I \equiv \frac{(\text{Power})_{\text{avg}}}{A} \quad (17.11)$$

The average power emitted by the source must be distributed uniformly over each spherical wave front of area $4\pi r^2$. Hence, the wave intensity at a distance r from the source is

$$I = \frac{(\text{Power})_{\text{avg}}}{A} = \frac{(\text{Power})_{\text{avg}}}{4\pi r^2} \quad (17.13)$$

The intensity decreases as the square of the distance from the source. This inverse-square law is reminiscent of the behavior of gravity in Chapter 13.

The rays are radial lines pointing outward from the source, perpendicular to the wave fronts.

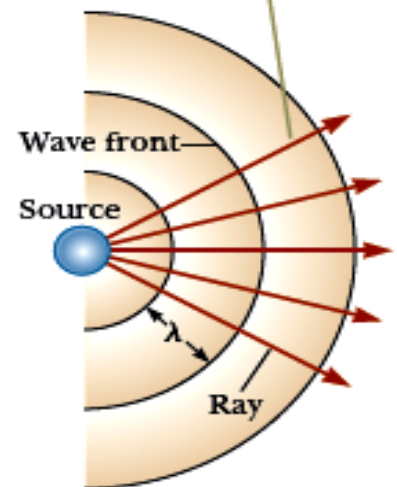


Figure 17.6 Spherical waves emitted by a point source. The circular arcs represent the spherical wave fronts that are concentric with the source.

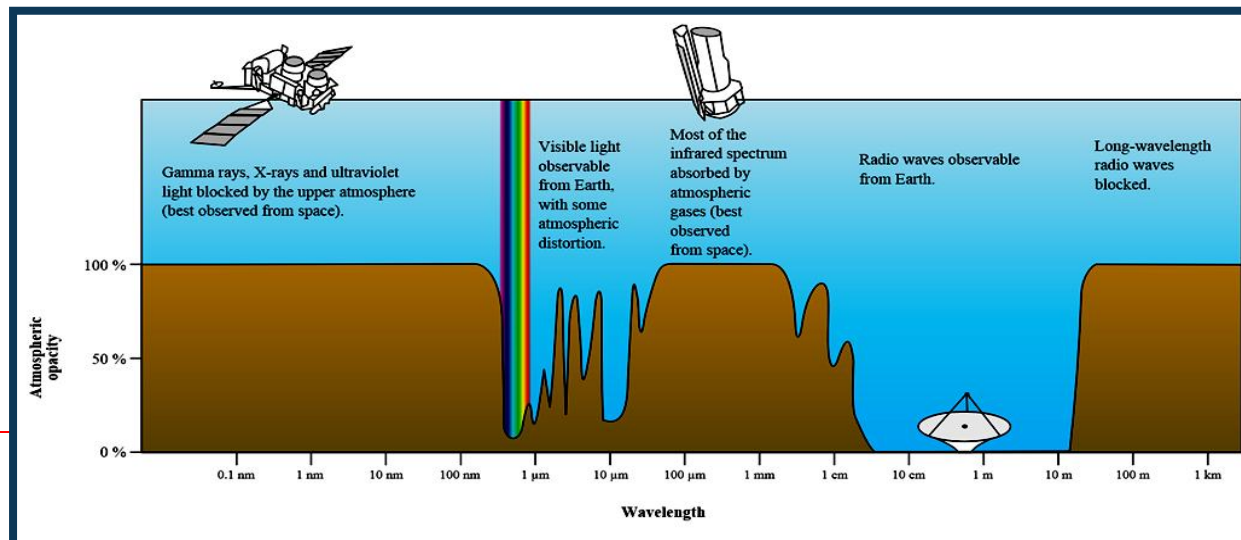
Το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (1)

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελείται από διάφορους τύπους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

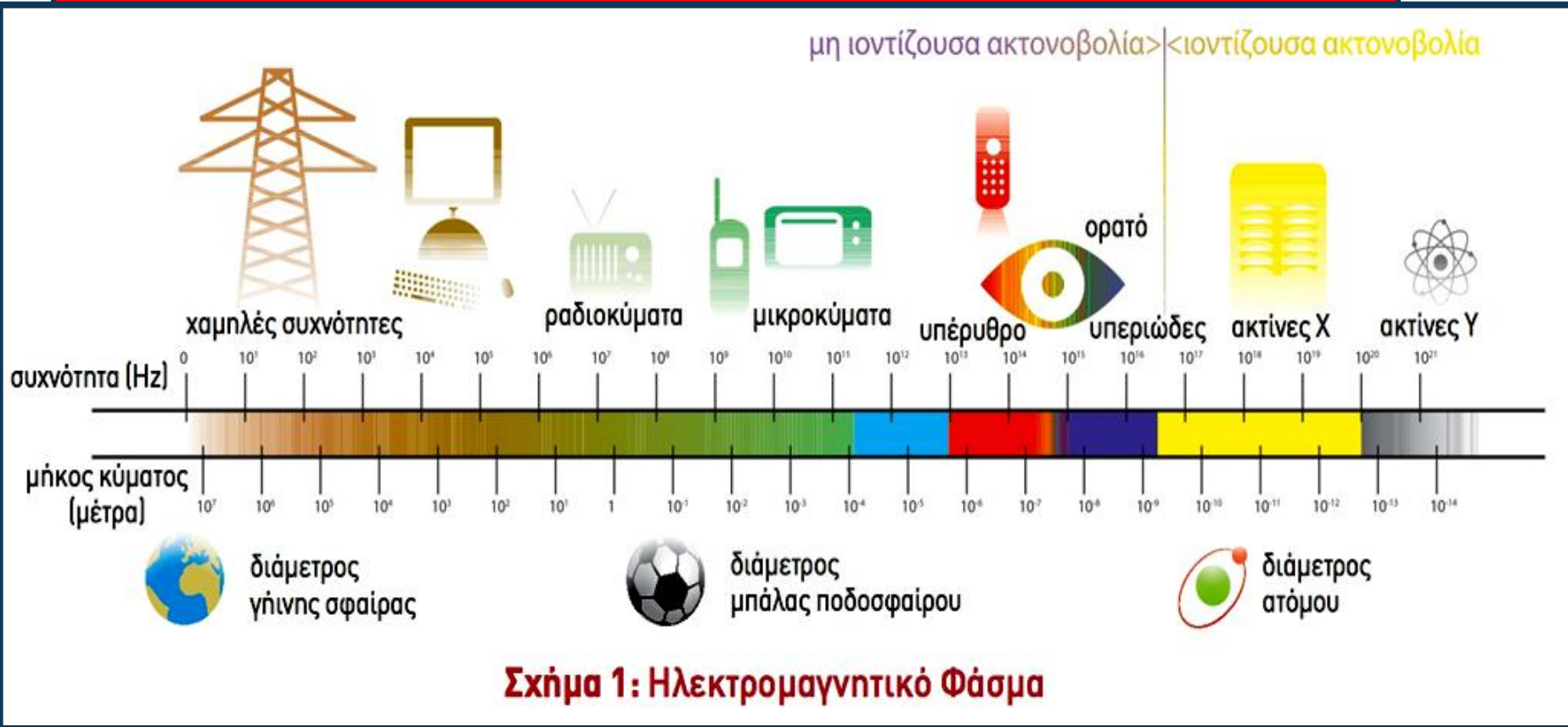
Δεν υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ των τύπων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Όλες οι μορφές των διαφόρων τύπων **ακτινοβολίας** παράγονται από το ίδιο φαινόμενο:

την επιτάχυνση ηλεκτρικών φορτίων.



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/34/Atmospheric_electromagnetic_opacity.svg



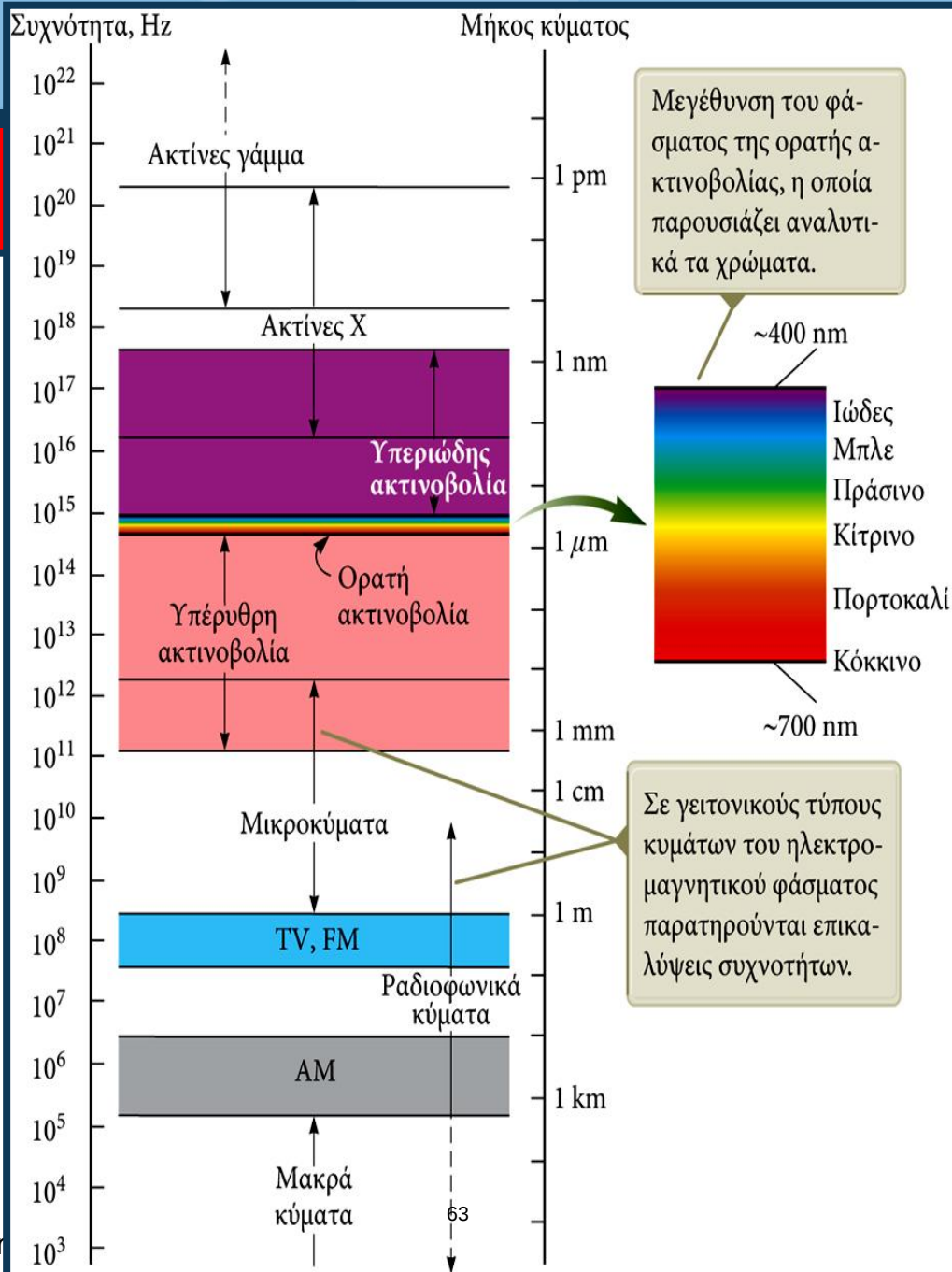
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (2)

Παρατηρούμε ότι υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των διαφόρων τύπων των κυμάτων.

Το ορατό φως αποτελεί ένα μικρό τμήμα του φάσματος.

Οι διάφοροι τύποι κυμάτων διακρίνονται βάσει της συχνότητας ή του μήκους κύματος.

Ενότη



Επισημάνσεις σχετικά με το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (3)

Ραδιοφωνικά κύματα ή ραδιοκύματα

- Έχουν μήκος κύματος από 10^4 m έως περίπου 0.1 m.
- Χρησιμοποιούνται σε ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά συστήματα επικοινωνίας.

Μικροκύματα

- Έχουν μήκος κύματος από περίπου 0.3 m έως 10^{-4} m.
- Είναι κατάλληλα για συστήματα ραδιοεντοπισμού (ραντάρ).
- Χρησιμοποιούνται, μεταξύ άλλων, στους φούρνους μικροκυμάτων.

Επισημάνσεις σχετικά με το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (4)

Υπέρυθρα κύματα

- Έχουν μήκος κύματος από περίπου 10^{-3} m έως 7×10^{-7} m.
- Παράγονται από θερμά σώματα και μόρια.
- Απορροφώνται άμεσα από τα περισσότερα υλικά.

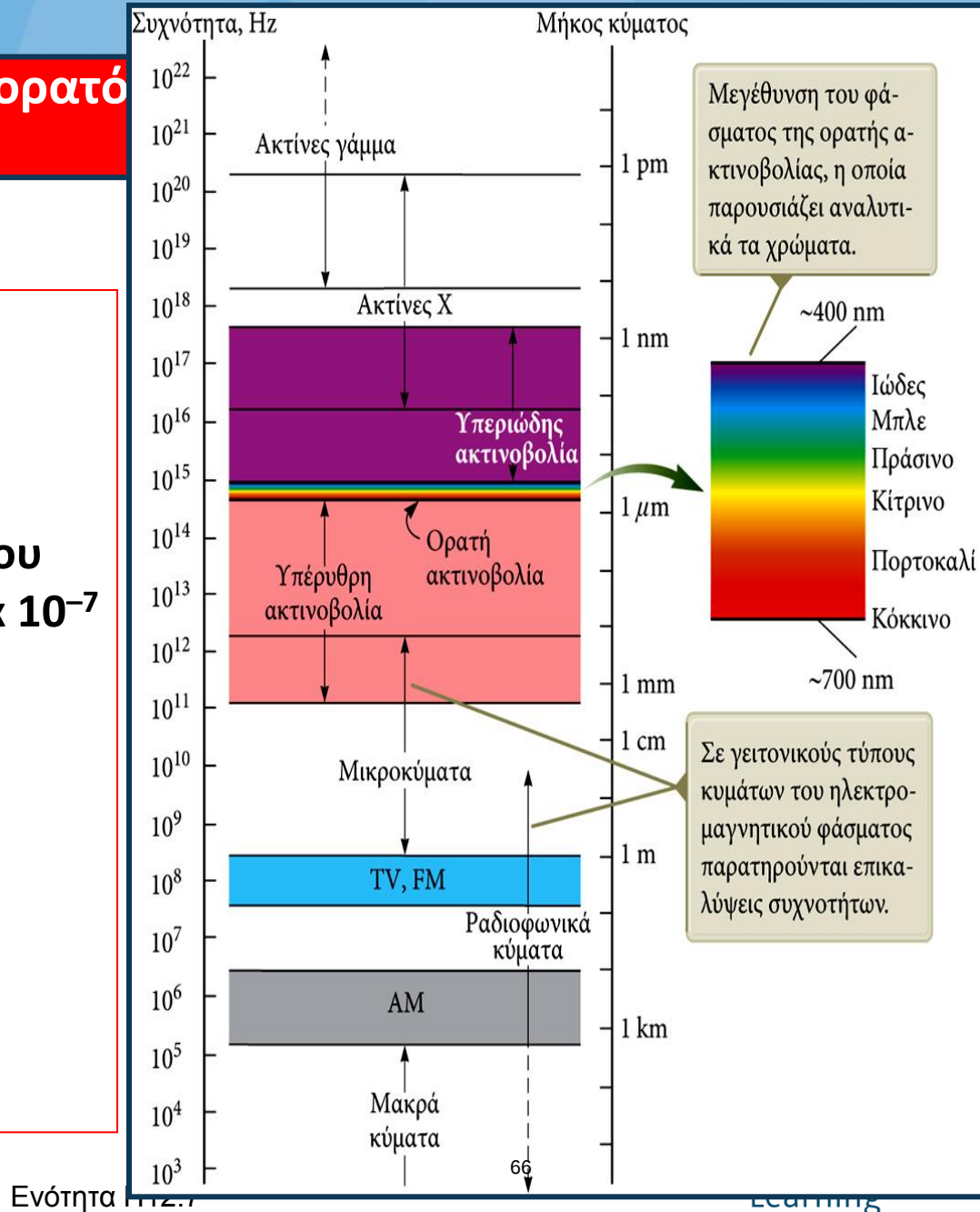
Ορατή ακτινοβολία (φως)

- Το τμήμα του φάσματος που γίνεται αισθητό από το ανθρώπινο μάτι.
- Η ευαισθησία του ανθρώπινου ματιού είναι μέγιστη σε μήκος κύματος περίπου 5.5×10^{-7} m (κιτρινοπράσινο χρώμα).

Περισσότερα σχετικά με το ορατό φως

Κάθε **χρώμα** αντιστοιχεί σε διαφορετικό **μήκος κύματος**.

Το εύρος των μηκών κύματος του ορατού φωτός είναι από $\lambda \sim 7 \times 10^{-7} \text{ m}$ (κόκκινο) έως $\lambda \sim 4 \times 10^{-7} \text{ m}$ (ιώδες).



Περισσότερα σχετικά με το ορατό φως (συνέχεια)

ΠΙΝΑΚΑΣ Η12.1

Προσεγγιστική αντιστοιχία μηκών κύματος του ορατού φάσματος και των χρωμάτων

Μήκος κύματος Εύρος (nm)	Χρώμα Περιγραφή
400–430	Ιώδες
430–485	Κυανό
485–560	Πράσινο
560–590	Κίτρινο
590–625	Πορτοκαλί
625–700	Κόκκινο

Σημείωση: Το εύρος μηκών κύματος που δίνεται για κάθε χρώμα είναι προσεγγιστικό. Κάθε άνθρωπος αντιλαμβάνεται τα χρώματα διαφορετικά.

Επισημάνσεις για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (5)

Υπεριώδες φως

- Έχει μήκος κύματος από περίπου $4 \times 10^{-7} \text{ m}$ έως $6 \times 10^{-10} \text{ m}$.
- Ο **Ήλιος** είναι μια σημαντική πηγή **υπεριώδους φωτός**.
- Το μεγαλύτερο μέρος του υπεριώδους φωτός **απορροφάται στη στρατόσφαιρα από το όζον**.

Ακτίνες X

- Έχουν μήκος κύματος από περίπου 10^{-8} m έως 10^{-12} m .
- Συνήθως παράγονται από **επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας**, τα οποία προσπίπτουν σε έναν μεταλλικό στόχο.
- Χρησιμοποιούνται ως ιατρικό διαγνωστικό και θεραπευτικό μέσο.

Επισημάνσεις για το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (τελική διαφάνεια)

Ακτίνες γ (γάμμα)

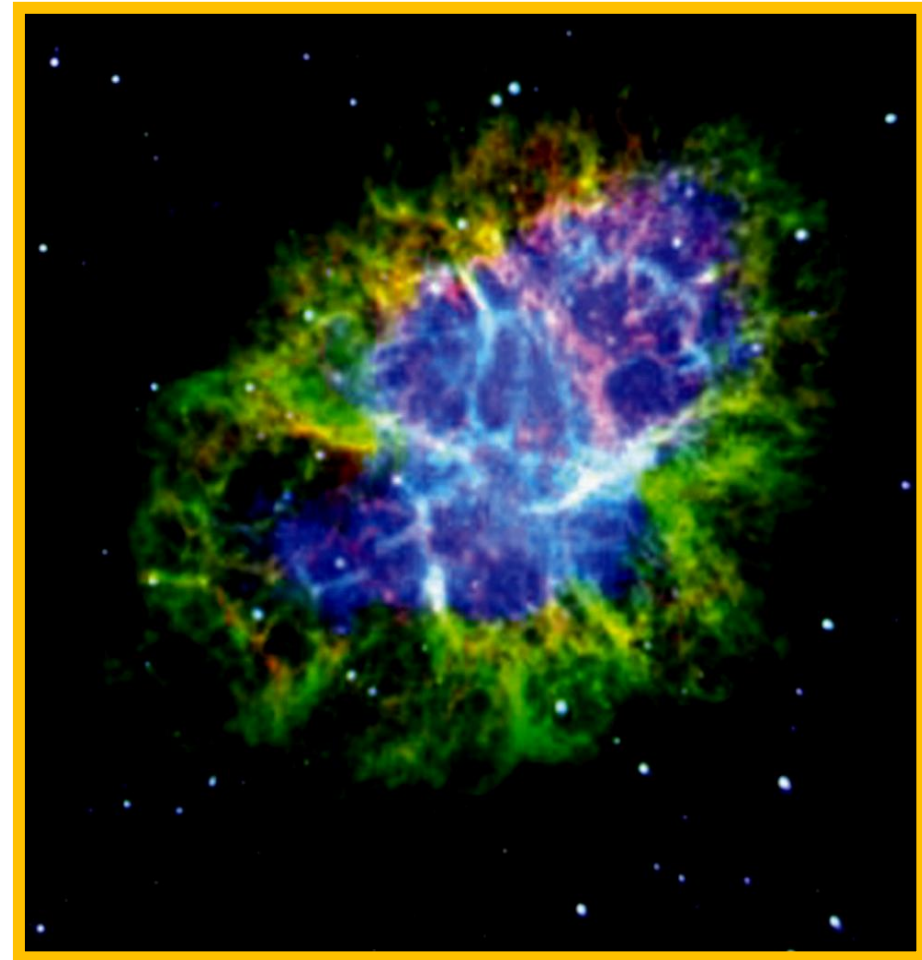
- Έχουν μήκος κύματος από περίπου 10^{-10} m έως 10^{-14} m.
- Εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες.
- Είναι εξαιρετικά διεισδυτικές και προκαλούν σοβαρές βλάβες όταν απορροφώνται από τους ιστούς έμβιων οργανισμών.
- Χρησιμοποιούνται σε ιατρικές διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές (Πυρηνική Ιατρική, Ακτινοθεραπεία)

■ -----

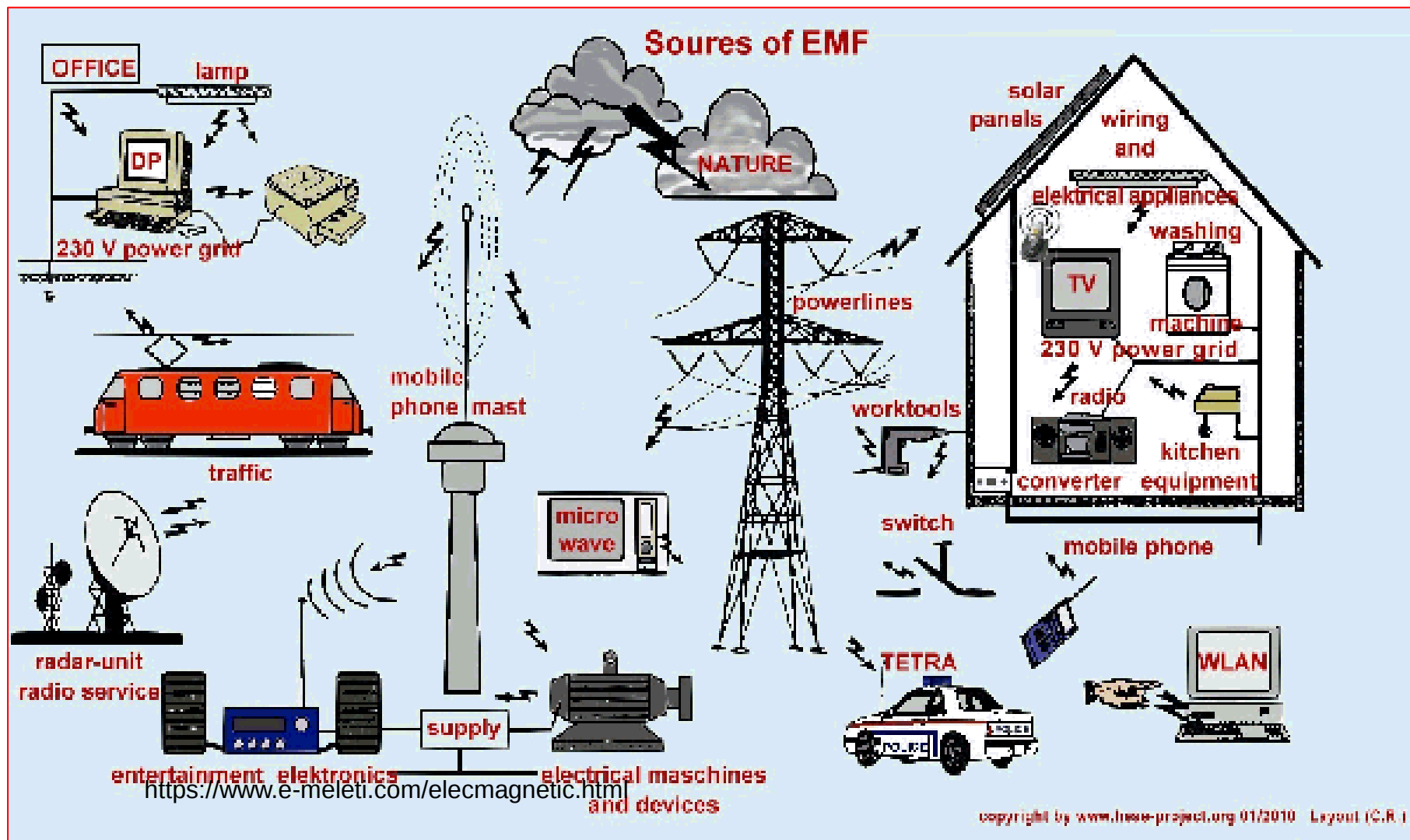
Η εξέταση του φωτός που αντιστοιχεί σε διαφορετικά τμήματα του φάσματος μπορεί να δώσει διαφορετικές πληροφορίες για ένα σώμα.

Χρώματα και μήκος κύματος του φωτός

Σε αυτή τη φωτογραφία του Νεφελώματος του Καρκίνου, η οποία έχει ληφθεί στο φάσμα του ορατού φωτός, φαίνεται μια πλειάδα χρωμάτων, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος του ορατού φάσματος.



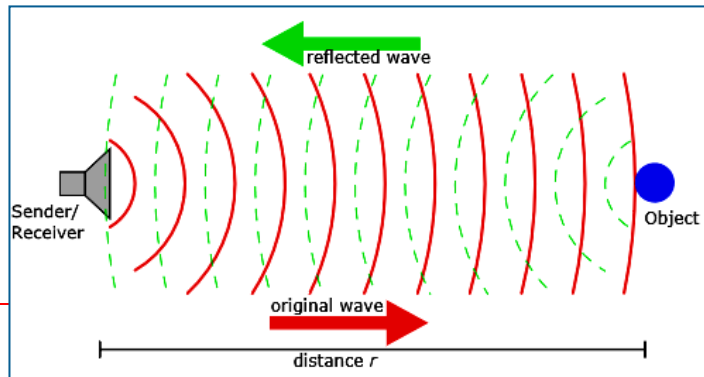
Εφαρμογές και παραδείγματα με χρήση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων



Ραντάρ (RADAR)

Ο ραδιοεντοπιστής ή γνωστότερο με το διεθνές όνομα ραντάρ προέρχεται από σύντμηση των αγγλικών λέξεων «RAdio Detection And Ranging» και σημαίνει «Ανίχνευση με ηλεκτρομαγνητικά κύματα και μέτρηση αποστάσεως». Αποτελεί βασικό ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού, παρακολούθησης ακίνητων και κινητών στόχων, σε αποστάσεις και συνθήκες φωτισμού απαγορευτικές για τον απευθείας οπτικό εντοπισμό, δηλαδή με το ανθρώπινο μάτι ή και οπτικά όργανα. Η μεγάλη αξία του ραντάρ οφείλεται στις σημαντικές δυνατότητες ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια.

Το πρώτο ραντάρ που τέθηκε σε λειτουργία με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ήταν κατασκευή του Εθνικού Εργαστηρίου Φυσικής (National Physical Laboratory, NPL) της Μ. Βρετανίας



Τα συστήματα ραντάρ, ανάλογα με την πλατφόρμα/φορέα και τον επιθυμητό χώρο ραδιοεντοπισμού διακρίνονται σε:

Ραντάρ Ανιχνεύσεως επιφάνειας.

Τα Ραντάρ Ανιχνεύσεως επιφάνειας ή αλλιώς ραντάρ ναυσιπλοΐας, εγκαθίστανται σε ακτές ή σε πλοία και ανιχνεύουν την επιφάνεια της θάλασσας. Ανιχνεύουν όμως και τον εναέριο χώρο, αλλά σε μικρό ύψος. Εντοπίζουν στερεά αντικείμενα από σχετικά αγωγίμο υλικό (στόχους), που βρίσκονται στην επιφάνεια της θάλασσας ή σε μικρό ύψος και παρέχουν ακριβείς πληροφορίες αποστάσεων και διοπτρεύσεων των στόχων που εντοπίζουν. Ο εντοπισμός των στόχων επιτυγχάνεται ανεξάρτητα από τις συνθήκες ορατότητας και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από αυτές του ορατού ορίζοντα. Χρησιμοποιούνται για να διασφαλίζουν την Ασφαλή ναυσιπλοΐα, τον Εντοπισμό εχθρικών ή μη πλοίων και την ύπαρξη ή μη αντικειμένων (στόχων) στην επιφάνεια της θάλασσας.

Ραντάρ ανιχνεύσεως αέρα.

Εγκαθίστανται στο έδαφος (σε βουνοκορφές ή κοντά σε αεροδρόμια) και σε πλοία. Ως σκοπό έχουν να ανιχνεύουν τον εναέριο χώρο σε μεγάλες αποστάσεις και σε μεγάλα ύψη. Με το Ραντάρ ανιχνεύσεως αέρα εξασφαλίζεται ο έλεγχος της εναέριας κυκλοφορίας για την εξασφάλιση της δυνατότητας προσανατολισμού των αεροσκαφών και ο εντοπισμός εχθρικών αεροσκαφών σε μεγάλες αποστάσεις.

Ραντάρ ελέγχου προσγειώσεως αεροσκαφών.

Εγκαθίστανται κοντά σε διαδρόμους αεροδρομίων ή σε αεροπλανοφόρα πλοία. Έχουν μικρή εμβέλεια, αλλά μεγάλη ακρίβεια και παρέχουν πληροφορίες αποστάσεως, ύψους, κατευθύνσεως διαδρόμου προσγειώσεως και ίχνους καθόδου.

Οι πληροφορίες αυτές μεταδίδονται από το χειρίστη του ραντάρ με ραδιοτηλέφωνο στα αεροσκάφη και έτσι εξασφαλίζεται ασφαλείς προσγείωση, ακόμη και σε περίπτωση εντελώς ανύπαρκτης ορατότητας.

Υψομετρικά ραντάρ.

Εγκαθίστανται σε αεροσκάφη και εξασφαλίζουν ακριβή μέτρηση του ύψους πτήσεώς τους.

Μετεωρολογικά ραντάρ.

Με αυτά εξασφαλίζεται ο έγκαιρος εντοπισμός και η παρακολούθηση των επερχομένων καταιγίδων και κυκλώνων.

Ραντάρ ελέγχου πυρός.

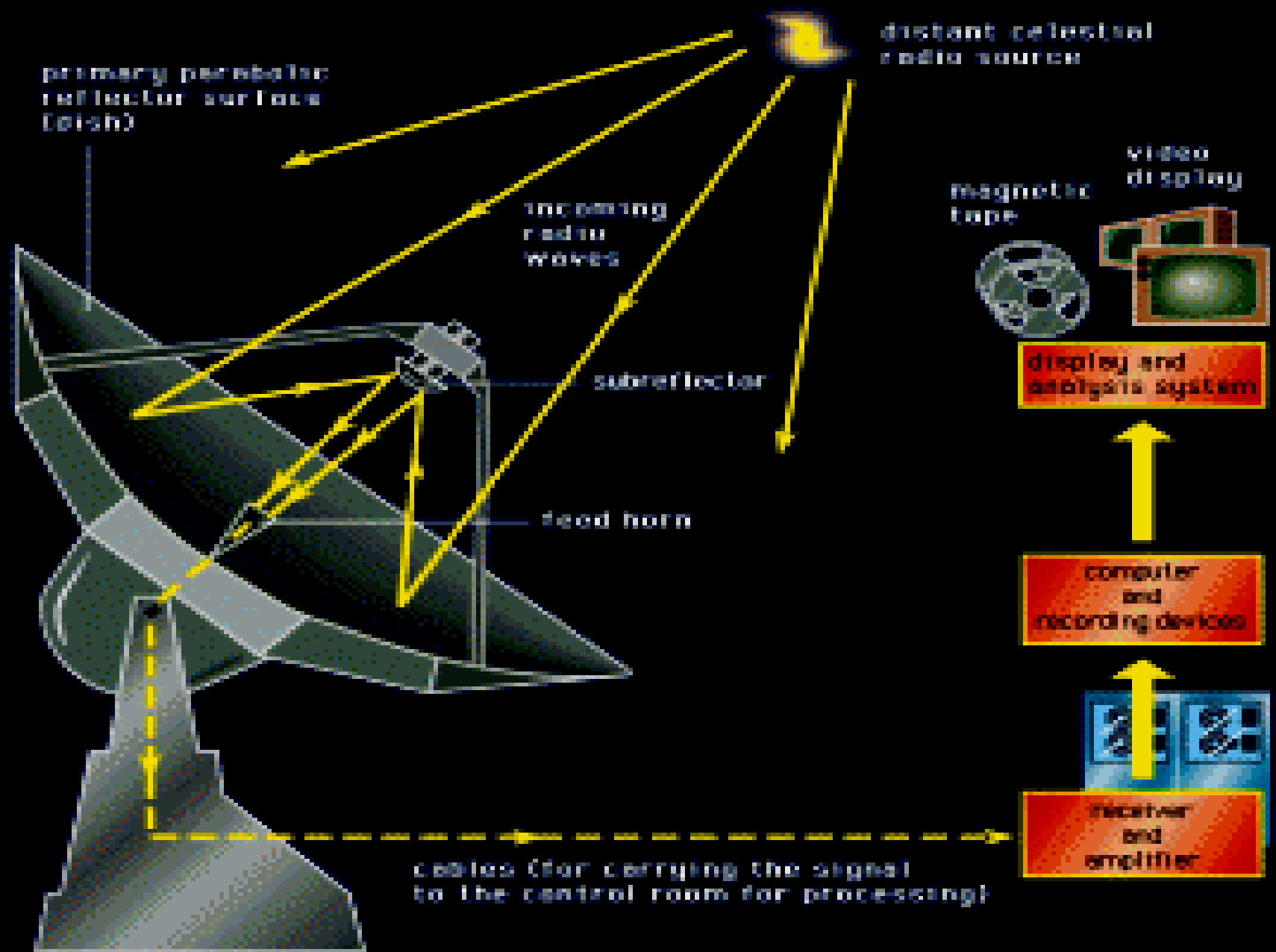
Αποτελούν μέρος των διαφόρων τύπων οπλικών συστημάτων, στα οποία παρέχουν τα απαραίτητα στοιχεία βολής ή και στοιχεία διορθώσεως της κατευθύνσεως κινήσεως ορισμένων τύπων τηλεκατευθυνόμενων βλημάτων.

Ραντάρ μετρήσεως ταχύτητας.

Με αυτά επιτυγχάνεται η ακριβής μέτρηση της ταχύτητας οχημάτων στους αυτοκινητόδρομους και διαπιστώνεται η τήρηση ή μη του ορίου ταχύτητας, καθώς και η μέτρηση της ταχύτητας πλοίων σε θαλάσσιες περιοχές που ισχύει όριο ταχύτητας.

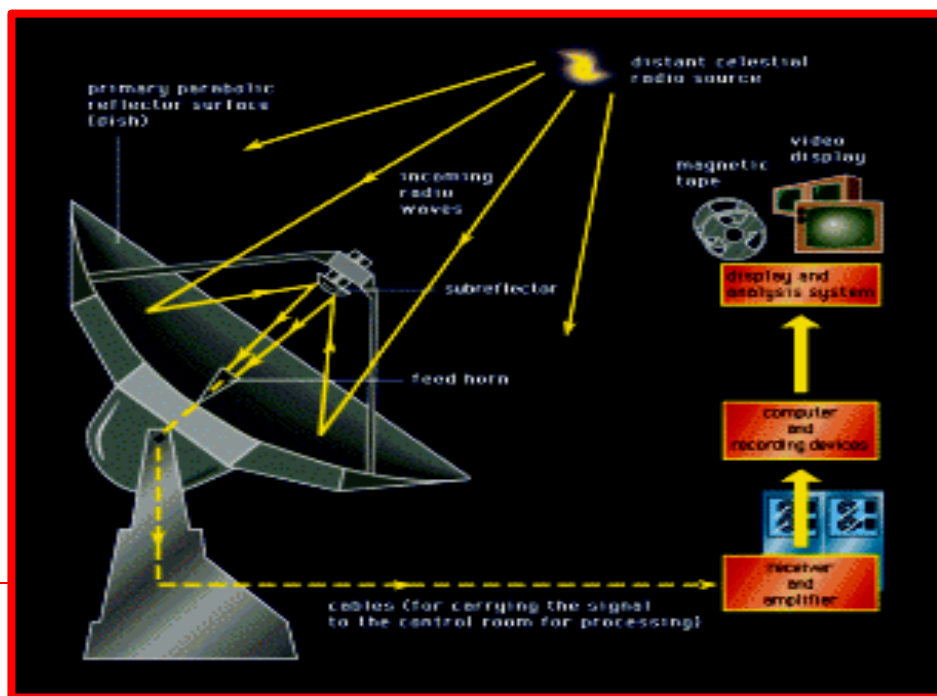
Ραντάρ ανίχνευσης κίνησης.

Ανιχνεύουν κινήσεις σε σταθερούς χώρους και ενεργοποιούν συναγερμούς, φώτα και διάφορους άλλους μηχανισμούς.



Ραδιοτηλεσκόπιο (Αστρονομία, Κοσμολογία)

Στη Ραδιοαστρονομία χρησιμοποιούνται τα ραδιοτηλεσκόπια για συλλογή ραδιοκυμάτων από το διάστημα. Τα ραδιοτηλεσκόπια αποτελούνται, βασικά, από μια μεταλλική επιφάνεια κοίλου παραβολοειδούς σχήματος, πού έχει τη δυνατότητα ν' ανακλά τα ραδιοκύματα και να τα συγκεντρώνει σε ένα σημείο, έξω απ' αυτή, στην εστία. Εκεί τοποθετείται μια συσκευή κατάλληλη να δέχεται αυτά τα κύματα, ενώ μια σειρά ολόκληρη από ηλεκτρονικές διατάξεις επεξεργάζεται τα ερεθίσματα και τα οδηγεί σε ένα καταγραφικό σύστημα το οποίο απεικονίζει σε χαρτί την ένταση τους.



<https://www.tsene.com/2009/05/%CF%81%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%BF%CF%84%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CF%83%CE%BA%CF%8C%CF%80%CE%B9%CE%B1>

Το σύνθετο ραδιοτηλεσκόπιο Very Large Array (Πολύ Μεγάλη Συστοιχία) αποτελείται από 28 κινητά «πιάτα» διαμέτρου 25 μέτρων το καθένα. Οι αναβαθμίσεις στα ηλεκτρονικά του συστήματα, που ολοκληρώθηκαν το 2012, αναμένεται να αυξήσουν κατά πολύ την ανάλυση, την ευαισθησία και την ικανότητα διαχείρισης των δεδομένων που παράγονται από τις αστρονομικές παρατηρήσεις με αυτό.

Οι χάλκινες γραμμές επικοινωνίας του υπερυπολογιστή - συντονιστή της συστοιχίας με τα «πιάτα» αναβαθμίστηκαν σε οπτικές ίνες, ενώ αντικαθίστανται και οι δέκτες στη «μύτη» κάθε ραδιοτηλεσκοπίου, με νέους ψηφιακούς, μεγάλης ευαισθησίας, που θα προσφέρουν συνεχή κάλυψη όλου του φάσματος από το 1 GHz ως τα 50 GHz. Όλες αυτές οι αναβαθμίσεις σε συνδυασμό θα επιτρέψουν στο EVLA (Expanded Very Large Array) να ανιχνεύει ένα σήμα τόσο ασθενές, όσο το σήμα ενός κινητού τηλεφώνου που εκπέμπει από το Δία!



<https://www.ozospastis.gr/story.do?id=4888570>

Εικόνα του μεγαλύτερου ραδιοτηλεσκοπίου στον κόσμο (Κίνα)





<http://www.physics4u.gr/news/2006/scnews2441.html>

Συγχωνευόμενες μαύρες τρύπες στο σμήνος γαλαξιών Abell 400: Οι επιστήμονες παρατηρούν δύο υπερμεγέθεις μαύρες τρύπες που κινούνται σπειροειδώς, κοντά στο κέντρο ενός σμήνους γαλαξιών, που ονομάζεται Abell 400. Η σύνθετη εικόνα τραβήχτηκε με ακτίνες Χ και ραδιοφωνικά κύματα, που προέρχονται από τις μαύρες τρύπες.

Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου

Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου είναι υπόλειμμα της ακτινοβολίας που **εξέπεμπε το σύμπαν** όταν βρισκόταν σε κατάσταση εξαιρετικά μεγάλων θερμοκρασιών και πιέσεων. Αντιστοιχεί σε ακτινοβολία μέλανος σώματος, θερμοκρασίας 2,73 K. Έρχεται από όλες τις κατευθύνσεις και παρουσιάζει μεγάλη ισοτροπία και ομοιογένεια.

Η ύπαρξη μιας τέτοιας ακτινοβολίας είχε προβλεφθεί θεωρητικά από τον G. Gamow και άλλους. Οι **Άρνο Πενζιάς** (Penzias) και **Ρόμπερτ Γουίλσον** (Wilson) ήδη από το 1940 ήταν αυτοί οι οποίοι επιβεβαίωσαν τις προβλέψεις. Το 1965 με τη βοήθεια μιας κεραίας κερατοειδούς σχήματος, την οποία οι ίδιοι κατασκεύασαν, ανακάλυψαν μια ακτινοβολία της οποίας αγνοούσαν την πηγή, καθώς τη λάμβαναν από κάθε κατεύθυνση. Υπολόγισαν πως η ακτινοβολία αυτή αντιστοιχούσε σε ακτινοβολία μελανού σώματος 3,5 K. Την **ονόμασαν Κοσμική Ακτινοβολία Μικροκυμάτων Υποβάθρου** γνωστή και ως Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου. Αργότερα, ο **δορυφόρος COBE** (Cosmic Background Explorer) έκανε πιο λεπτομερείς μετρήσεις και υπολόγισε την θερμοκρασία στα 2,7 K, όπως σήμερα είναι γνωστό.

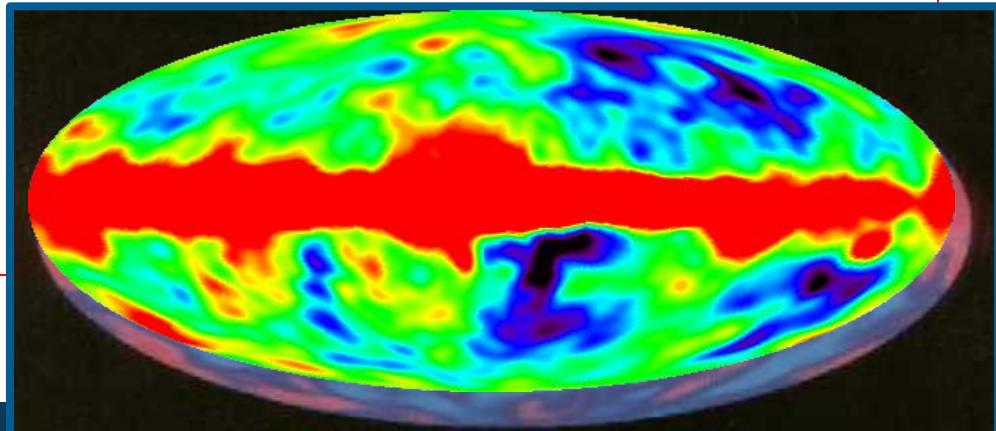


Μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου

Η χαρτογράφηση των ανισοτροπιών στην ακτινοβολία υποβάθρου του ουρανού των 2.74 Kelvin από τον δορυφόρο COBE. Αυτά τα κοσμικά σχήματα στον ουρανό πιθανόν να είναι κατάλοιπα από την εποχή των 10^{-32} sec μετά τη Μεγάλη Εκρηξη. Ο χάρτης δείχνει όλη την ουράνια σφαίρα. Ο Γαλαξίας μας είναι η κόκκινη λωρίδα που διέρχεται οριζόντια από το μέσο. Οι γαλάζιες και ροζ περιοχές είναι ελαφρά θερμότερες και ψυχρότερες από το μέσο όρο, περίπου 1 μέρος στα 90.000. Η εικόνα είναι το άθροισμα παρατηρήσεων του COBE στα 53 και 90 GHz και αντιστοιχεί σε χωρική διακριτική ικανότητα 100. Ακόμα και οι μικρότερες ανομοιογένειες, μικροδιακυμάνσεις, είναι πολύ μεγάλες για να έχουν παίξει οποιοδήποτε ρόλο στη διαμόρφωση του Σύμπαντος που βλέπουμε σήμερα. Οι μικροδιακυμάνσεις πιστεύεται πως αποτελούν τα "σπέρματα" του σχηματισμού των σημερινών δομών του σύμπαντος. Λίγες επιστημονικές ανακαλύψεις αυτού του αιώνα μπορούν να συγκριθούν σε σπουδαιότητα με την παρατήρηση της κοσμικής ακτινοβολίας υποβάθρου, μιας διάχυτης ακτινοβολίας μικροκυμάτων που κατακλύζει ολόκληρο το Σύμπαν και θεωρείται ότι είναι το σημερινό υπόλειμμα από την υπέρθερμη αρχέγονη Μεγάλη Εκρηξη που δημιούργησε την ύλη, το χώρο και το χρόνο, περίπου 12-15 δισεκατομμύρια χρόνια πριν.

<http://www.physics4u.gr/articles/cobe.html>

81 https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/ContentMedia/dmr_2.gif



Ακτίνες Χ (Ακτινολογία, Ακτινοθεραπεία, Ακτινοφυσική)

Οι ακτίνες Χ είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής ενέργειας (και συχνότητας) και πολύ μικρού μήκους κύματος.

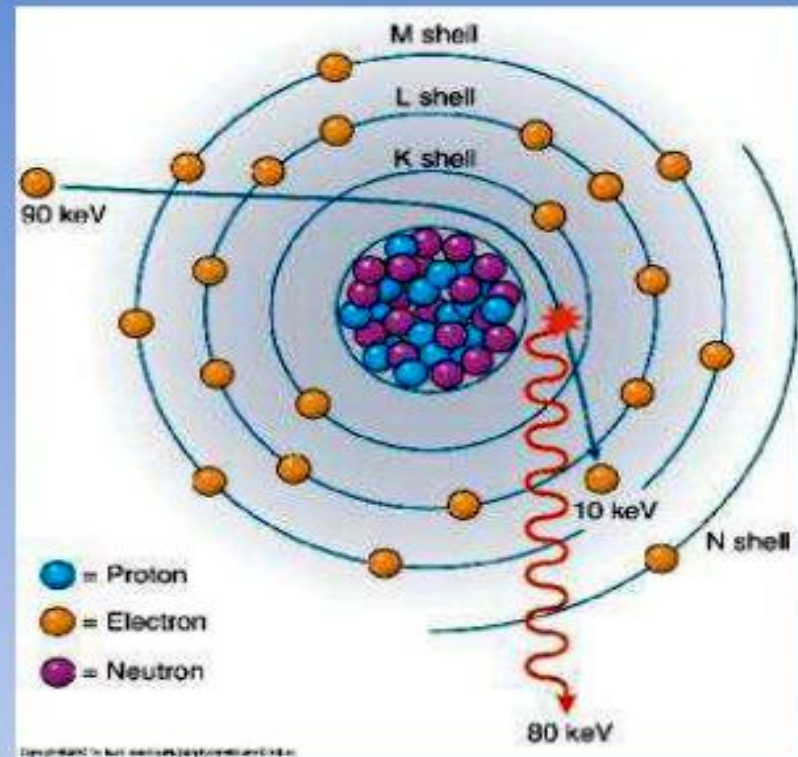
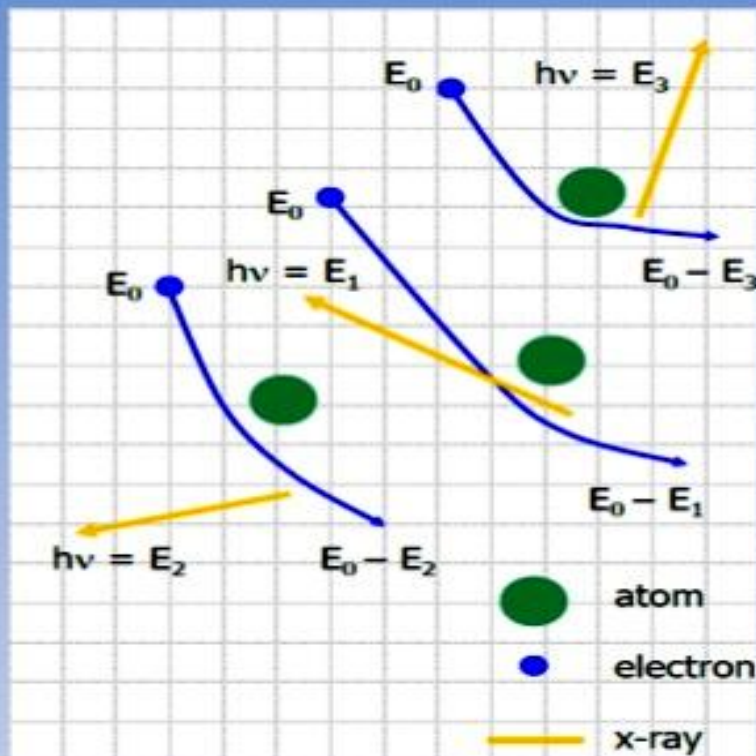
Παράγονται από ηλεκτρόνια (ή άλλα φορτισμένα σωμάτια) υψηλής ταχύτητας (και κινητικής ενέργειας) των οποίων μεταβάλλεται η ταχύτητα. Συνήθως αυτό συμβαίνει όταν τα ηλεκτρόνια διεισδύουν στη μάζα ενός μετάλλου μεγάλου ατομικού αριθμού και υψηλής πυκνότητας.

Επίσης παράγονται όταν ηλεκτρόνια συγκρούονται με δέσμια ηλεκτρόνια σε στάθμες υψηλής ενέργειας ατόμων μεγάλου ατομικού αριθμού. Τα δέσμια ηλεκτρόνια μεταβαίνουν σε διαφορετική ενεργειακή στάθμη και ως συνέπεια παράγονται ηλεκτρόνια.

Οι ακτίνες Χ χρησιμοποιούνται στη Διαγνωστική Ακτινολογία και στην Ακτινοθεραπεία. Χρησιμοποιούνται επίσης στην κρυσταλλογραφία (πρωτεϊνών και βιομορίων).

Για την παραγωγή τους χρησιμοποιούνται συσκευές και μηχανήματα όπως οι λυχνίες ακτίνων Χ και οι επιταχυντές σωματιδίων. .

Επιβράδυνση ηλεκτρονίου και παραγωγή ακτινοβολίας Χ

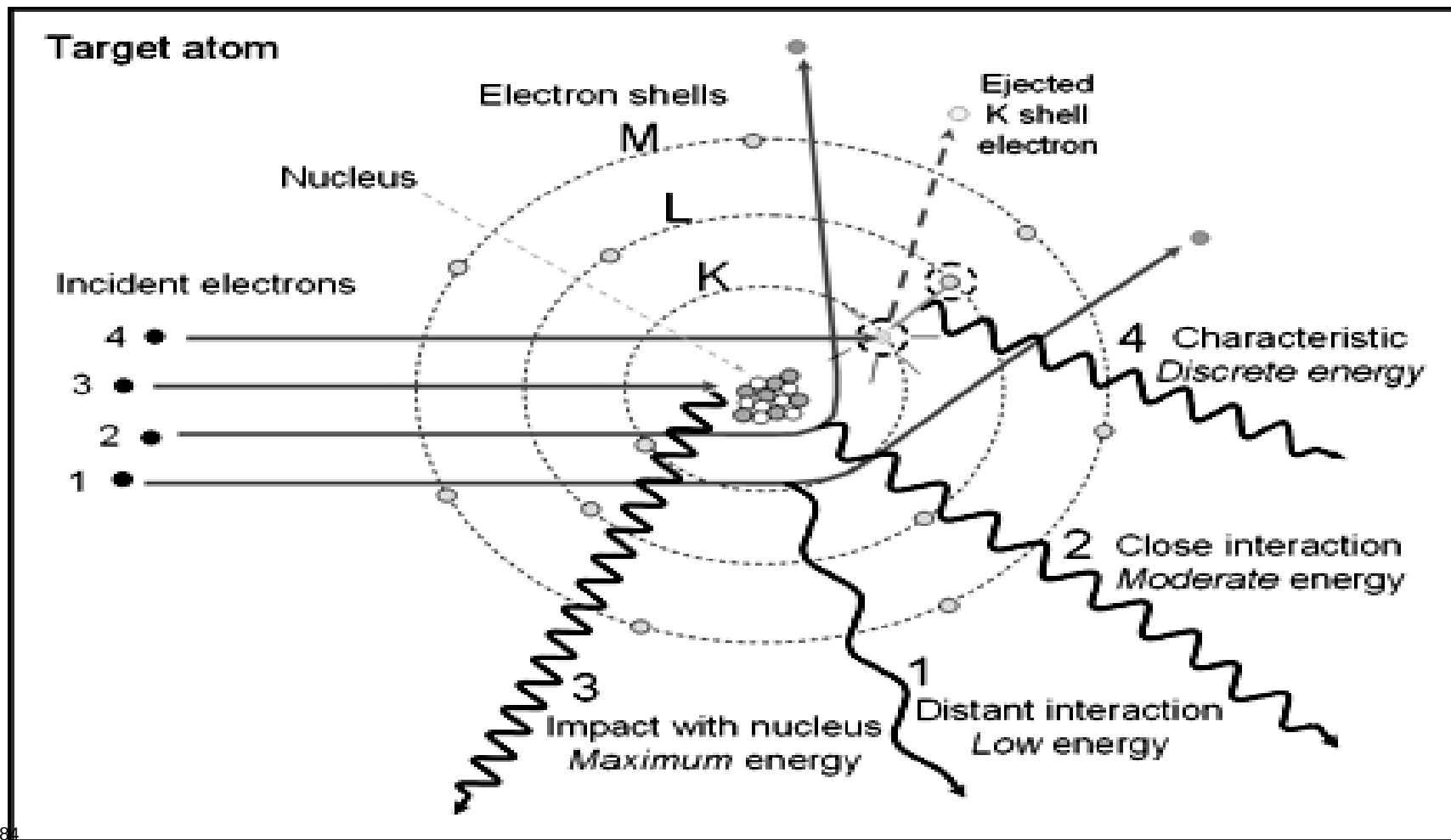


Energy of photon $E = 12.4 / \lambda$

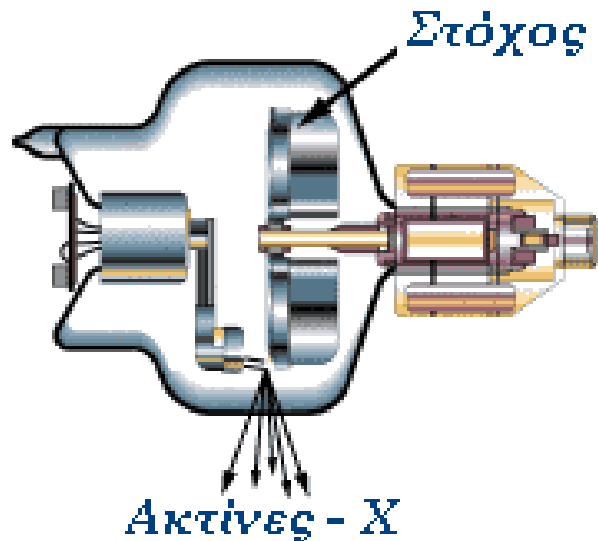
Energy is related to the potential difference across tube or

$$\lambda_{\min} = 12.4 / \text{kVp}$$

Ηλεκτρόνια (1,2,3,4) προσπίπτουν σε ατομικό πυρήνα. Τρία από αυτά (1,2,3) επιβραδύνονται και παράγουν ακτινοβολία Χ συνεχούς φάσματος. Ένα ηλεκτρόνιο (4) «συγκρούεται» με δέσμιο ηλεκτρόνιο με αποτέλεσμα την εκτόξευση του ηλεκτρονίου και την εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας γραμμικού φάσματος



Λυχνία ακτίνων Χ, ακτινολογικό μηχάνημα & αξονικός τομογράφος

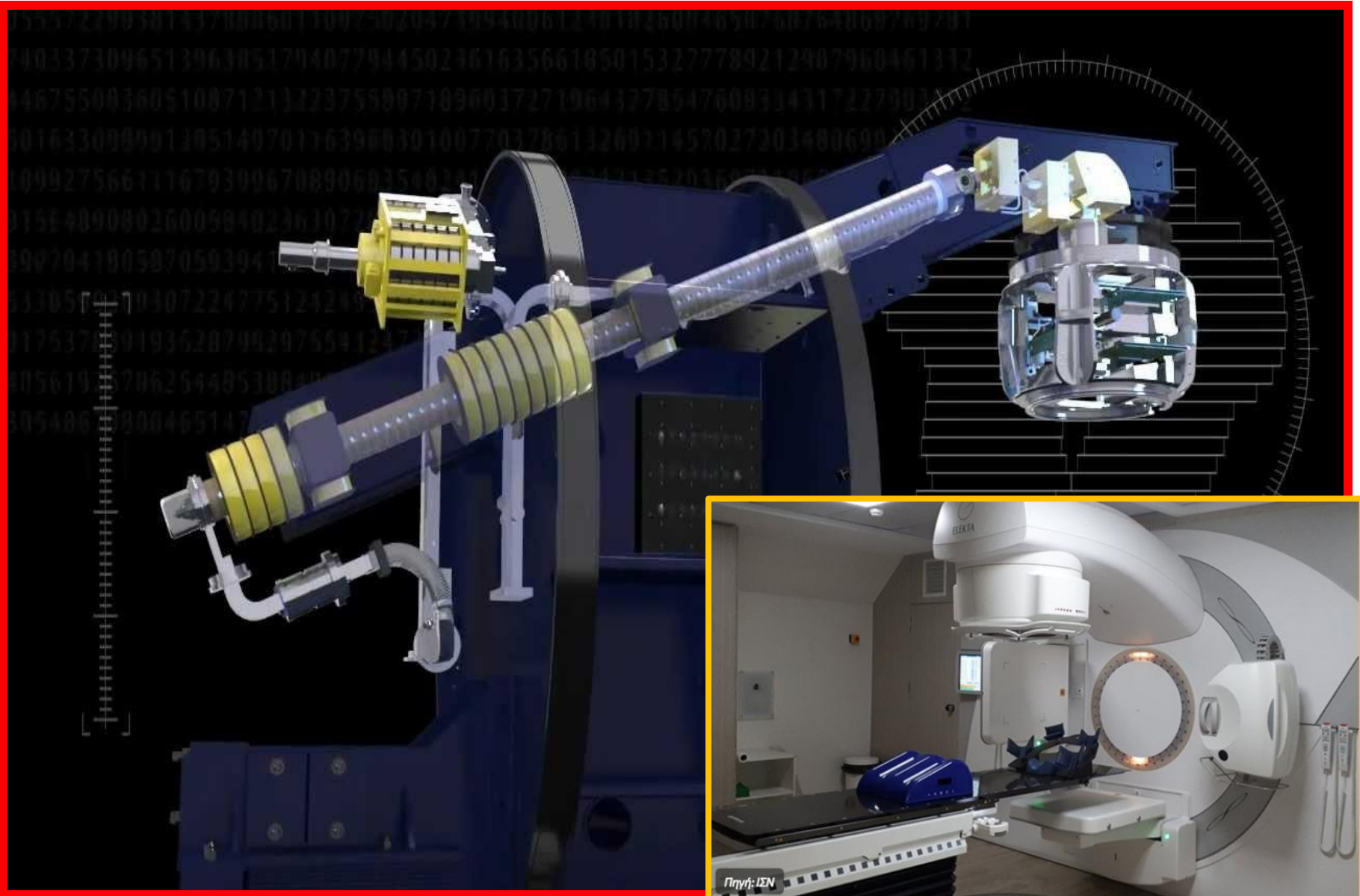


Γραμμικός επιταχυντής (Ακτινοθεραπεία, Ακτινοφυσική)

Ο γραμμικός επιταχυντής επιταχύνει ηλεκτρόνια χρησιμοποιώντας κατάλληλα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλής συχνότητας. Τα επιταχυνθέντα ηλεκτρόνια προσπίπτουν σε ειδικό στόχο (target), δηλαδή ένα πλακίδιο από βολφράμιο. Στη συνέχεια παράγονται ακτίνες X (δηλ. ηλεκτρομαγνητικά κύματα) που ακτινοβολούν τους καρκινικούς ιστούς. Συχνά για θεραπευτική ακτινοβολήση, επιφανειακών όγκων, χρησιμοποιούνται τα ίδια τα ηλεκτρόνια. Στην περίπτωση αυτή τα ηλεκτρόνια δεν διέρχονται μέσω του στόχου βολφραμίου, αλλά εξέρχονται κατευθείαν από τον επιταχυντή.

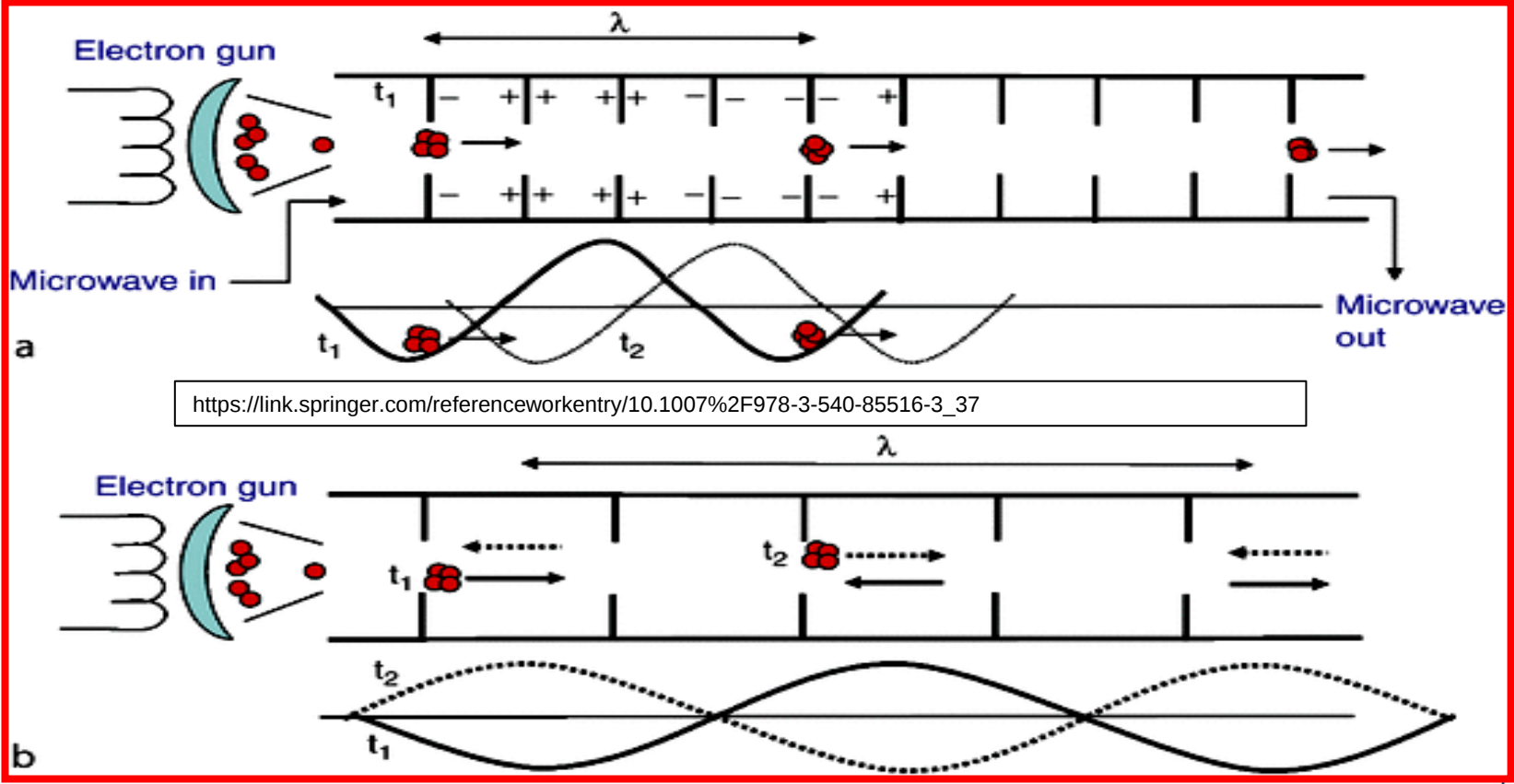
Στο σχήμα παρουσιάζεται συνοπτικά υπό μορφή διαγράμματος η δομή και η λειτουργία ενός γραμμικού επιταχυντή. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προκαλούν την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων, παράγονται από μια λυχνία μικροκυμάτων, τύπου μάγνητρον (magnetron) ή τύπου κλύστρον (klystron). Η τελευταία χρησιμοποιείται σε επιταχυντές σχετικά υψηλής ενέργειας (από λίγο μικρότερη των 20 MeV και άνω). Η ισχύς των παραγομένων παλμών μικροκυμάτων είναι της τάξης των πολλών MW. Η συχνότητα των κυμάτων αυτών βρίσκεται στην περιοχή S (S-band) και είναι της τάξης των 3 GHz. Συνήθως είναι 2998 MHz με μήκος κύματος στο κενό 10 cm ή 2856 MHz με μήκος κύματος 10,5 cm. Δηλαδή βρίσκονται στην περιοχή των μικροκυμάτων (microwaves).

Γραμμικός επιταχυντής



Γραμμικός επιταχυντής

Μετά την εισαγωγή τους στο σωλήνα επιτάχυνσης τα ηλεκτρόνια δέχονται την επίδραση της δύναμης, που προέρχεται από το ηλεκτρικό πεδίο του κύματος, και επιταχύνονται. Το ηλεκτρικό πεδίο έχει διεύθυνση κατά μήκος του κεντρικού άξονα του σωλήνα επιτάχυνσης. Δηλαδή κατά μήκος της διεύθυνσης διάδοσης των ηλεκτρονίων.



Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού σε Γραμμικό Επιταχυντή (MR-Linac)

Η Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού (MRI / Μαγνητική Τομογραφία), που βασίζεται στο φαινόμενο του Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού, που με τη σειρά του είναι ένα φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής (νόμος Faraday) σε επίπεδο πρωτονίων, χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με Γραμμικό Επιταχυντή για ενίσχυση της ακρίβειας της Ακτινοθεραπείας



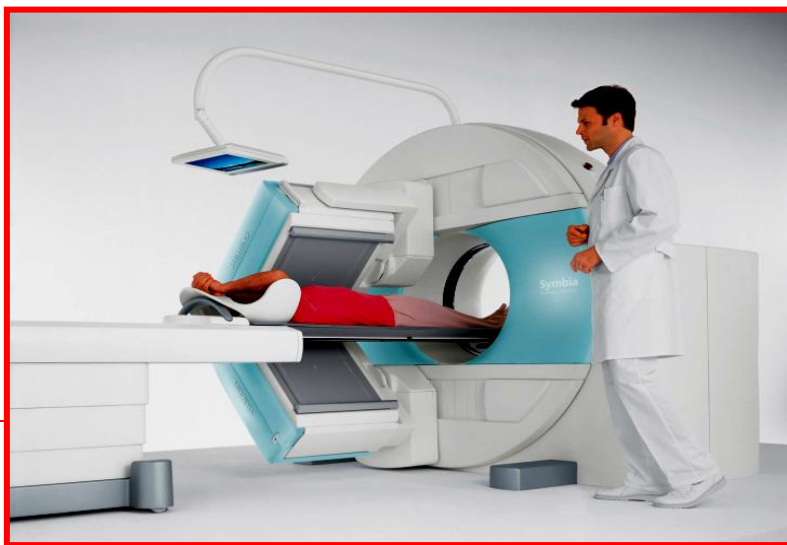
Ακτίνες-γ (Πυρηνική Ιατρική, Ακτινοφυσική)

Οι ακτίνες γ είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα πολύ υψηλής ενέργειας και συχνότητας που εκπέμπονται από το εσωτερικό των ατομικών πυρήνων.

Αποτελούν μια μορφή ραδιενέργειας (μαζί με τα σωματία α και β).

Χρησιμοποιούνται στην Πυρηνική Ιατρική για **διαγνωστικές και θεραπευτικές εφαρμογές**).

Στην Πυρηνική Ιατρική μια ραδιενεργός ουσία **εισάγεται στο ανθρώπινο σώμα** και στη συνέχεια κατανέμεται σε κάποια ανατομική περιοχή η οποία εκπέμπει ακτινοβολία. Η καταγραφή αυτής της ακτινοβολίας, από ειδικούς ανιχνευτές (βλ. σχήματα), παρέχει εικόνες ιατρικού διαγνωστικού ενδιαφέροντος.



Θερμική ακτινοβολία- Θερμογραφία

Κάθε επιφάνεια σώματος (και το ανθρώπινο δέρμα) εκπέμπει **θερμική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία** που εξαρτάται από τη θερμοκρασία και βρίσκεται κατά μεγάλο ποσοστό στην περιοχή του υπέρυθρου.

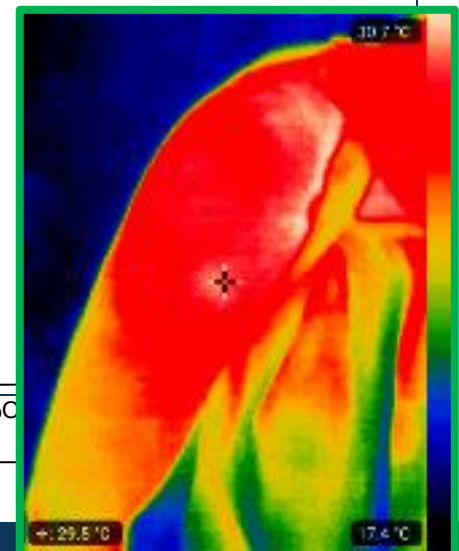
Η εκπομπή υπέρυθρης ακτινοβολίας από το δέρμα είναι δυνατόν να ανιχνευθεί με κατάλληλη **απεικονιστική διάταξη (θερμική κάμερα)** και έτσι να σχηματισθεί μια χαρτογράφηση (θερμικός χάρτης) της κατανομής της θερμοκρασίας .

Χρησιμοποιείται με σκοπό να απεικονίσει ή να ανιχνεύσει και να ποσοτικοποιήσει με ακρίβεια τις αλλαγές της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του σώματος μετά π.χ. από μια φλεγμονή.



<https://www.sigmahellas.gr/el/industrial/health-safety/medical-thermography/>

<http://www.orthopaideikos.org/index.php/%CE%B4%CE%B9%CE%AC%CE%B3%CE%BD%CF%89%CF%83%CE%B7/%CE%B8%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CF%81%CE%B1%CF%86%CE%AF%CE%B1>



Εκλάμψεις ακτίνων - γ και εκρήξεις ακτίνων-Χ

A. Οι εκρήξεις ή εκλάμψεις ακτίνων γ [GRB (Gamma-Ray Burst)], είναι συγκεντρώσεις συμπυκνωμένης ακτινοβολίας-γ που δημιουργούνται κατά τη γέννηση μαύρων οπών, από τη **σύγκρουση αστέρων νετρονίων, από εκρήξεις σουπερνόβα, από άστρα νετρονίων που τρώγονται από μαύρες τρύπες και από άστρα που καταρρέουν**

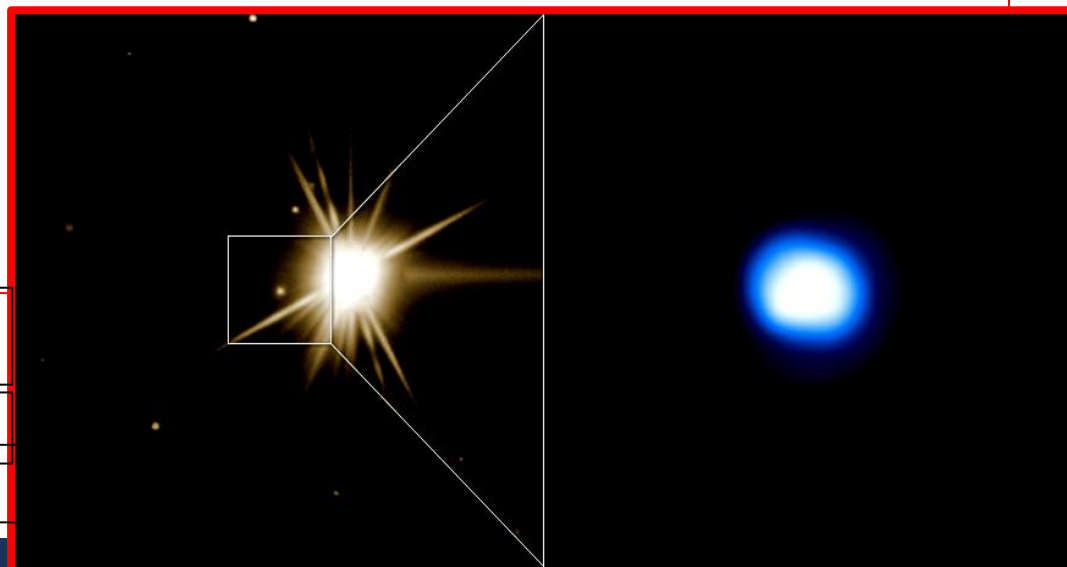
B. Επίσης πηγές «εκρήξεων», που στέλνουν πρόσκαιρα στο διάστημα ισχυρές ακτίνες-Χ ανακάλυψαν στο σύμπαν Αμερικάνοι αστρονόμοι.

Η ανακάλυψη έγινε με τα δύο διαστημικά τηλεσκόπια ακτίνων-Χ, το Chandra της NASA και το XMM-Newton της ESA. Οι ερευνητές, με επικεφαλής τον Τζίμι Ίργουιν του Πανεπιστημίου της Αλαμπάμα, εντόπισαν τέτοιες εκρήξεις **σε δύο γαλαξίες που απέχουν 47 και 14 εκατομμύρια έτη φωτός αντίστοιχα.**

https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CE%BA%CE%BB%CE%AC%CE%BC%CF%88%CE%B5%CE%B9%CF%82_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%AF%CE%BD%CF%89%CE%BD_%CE%B3

<https://www.ert.gr/eidiseis/epistimi/anakalyfthikan-ekriktikes-piges-aktinon-ch-sto-syban/>

<https://astronomynow.com/2016/07/16/chandra-x-ray-observatory-finds-evidence-for-violent-stellar-merger/>



Τηλεπικοινωνίες

Με τον γενικό όρο τηλεπικοινωνίες, (telecommunications), χαρακτηρίζεται η κάθε μορφής ενσύρματη ή ασύρματη **ηλεκτρομαγνητική**, ηλεκτρική, κλπ., ακουστική και οπτική **επικοινωνία** που πραγματοποιείται ανεξαρτήτως απόστασης.

Στους σύγχρονους καιρούς, αυτή η διαδικασία σχεδόν πάντα περιλαμβάνει την αποστολή **ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων** ή ηλεκτρικών σημάτων από κατάλληλες ηλεκτρονικές συσκευές (τηλέφωνο, ασύρματος κλπ).

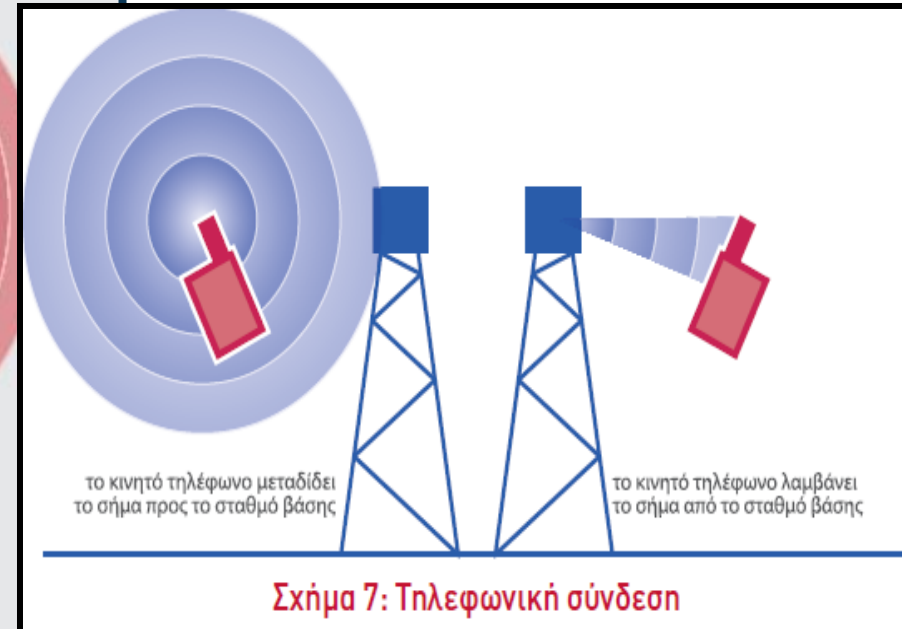
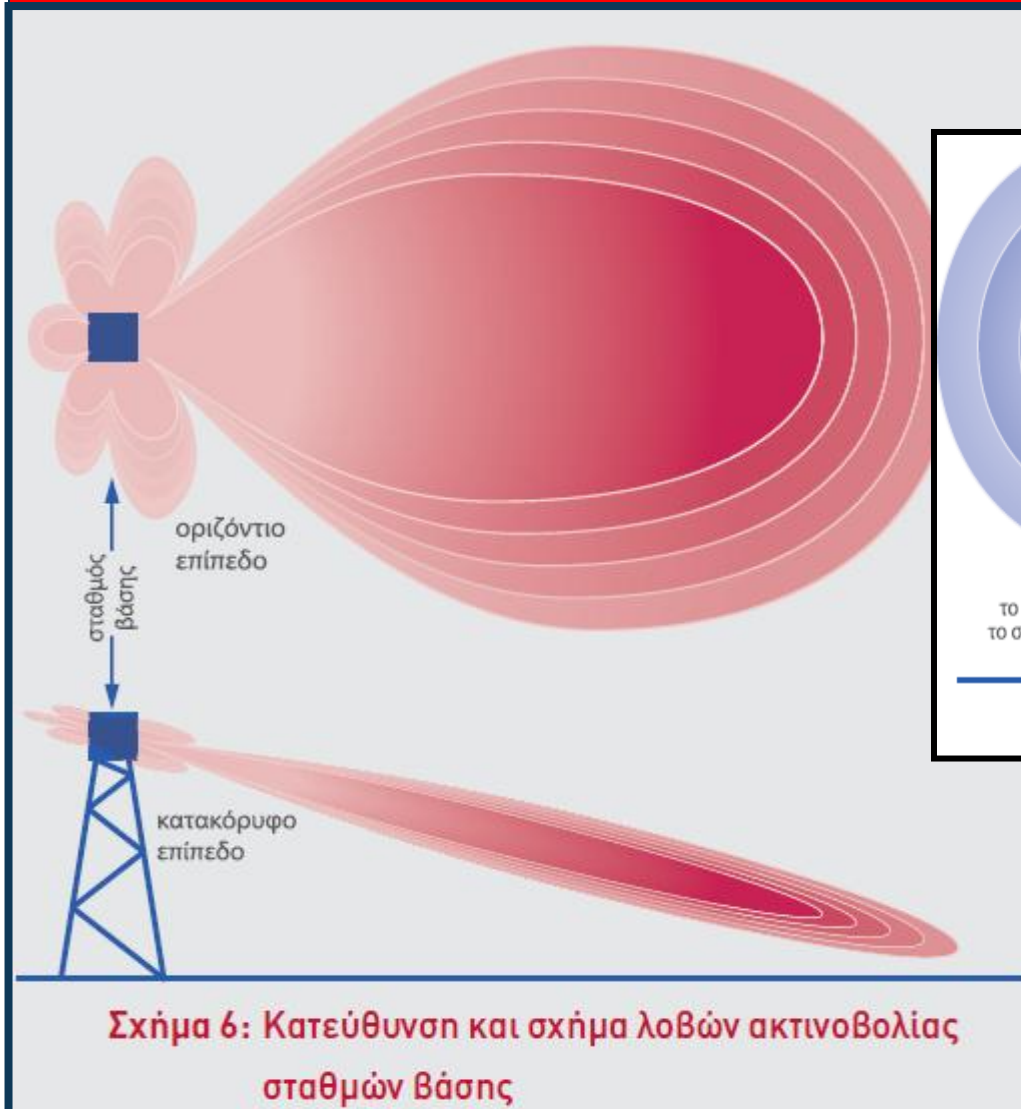
Σήμερα οι τηλεπικοινωνίες είναι εξαιρετικά διαδεδομένες και οι **συσκευές** που υποβοηθούν τη διαδικασία, όπως και το **τηλέφωνο**, το **ραδιοτηλέφωνο**, ο **ασύρματος**, το **τηλέτυπο**, το **τηλεομοιοτυπικό (φαξ)**, αλλά και το **ραδιόφωνο**, η **τηλεόραση** κλπ. και πιο σύγχρονα το **διαδίκτυο**, είναι πολύ κοινές στα περισσότερα μέρη του πλανήτη. Υπάρχει επίσης μια απέραντη σειρά δικτύων που διασυνδέουν αυτές τις συσκευές, όπως τα **δίκτυα υπολογιστών**, τα **δημόσια τηλεφωνικά δίκτυα**, τα **δίκτυα κινητής τηλεφωνίας**, καθώς και τα **ραδιοφωνικά και τηλεοπτικά δίκτυα**. Τα δίκτυα αυτά σχηματίζονται από τηλεπικοινωνιακά κανάλια, φυσικές διόδους οι οποίες επιτρέπουν σε σήματα **κωδικοποιημένα** μέσω μίας συγκεκριμένης φυσικής ποσότητας να μεταδοθούν κατά μήκος τους, και **κόμβους**, ή **σταθμούς**, στα άκρα αυτών των καναλιών, δηλαδή τηλεπικοινωνιακές συσκευές όπως αυτές που **προαναφέρθηκαν**.

Κινητή τηλεφωνία

Τα κινητά τηλέφωνα είναι χαμηλής ισχύος πομποδέκτες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (ραδιοκυμάτων), οι οποίοι με τη βοήθεια κατάλληλης ενσωματωμένης κεραίας και ηλεκτρονικού εξοπλισμού μετατρέπουν τη φωνή και τα ψηφιακά δεδομένα σε ραδιοκύματα και το αντίστροφο. Για την αποστολή αυτών των ραδιοκυμάτων από και προς το κινητό τηλέφωνο, χρησιμοποιούνται οι σταθμοί βάσης κινητών επικοινωνιών που αποτελούνται από κεραίες και ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Όταν κάποιος καλεί από το κινητό του τηλέφωνο, αυτό εκπέμπει ραδιοκύματα που διαδίδονται στον αέρα μέχρι να συναντήσουν κάποιο δέκτη στον πλησιέστερο σταθμό βάσης. Όταν ο σταθμός βάσης λάβει τα ραδιοκύματα που προέρχονται από το κινητό τηλέφωνο, λειτουργεί ως διακόπτης μεταγωγής και προωθεί την κλήση σε ένα άλλο σταθμό βάσης. Έτσι, η κλήση αποστέλλεται μέσω του δικτύου κινητής τηλεφωνίας στο σταθμό βάσης που βρίσκεται πλησιέστερα στον καλούμενο χρήστη. Στη συνέχεια, ο σταθμός βάσης εκπέμπει ραδιοκύματα που λαμβάνονται από το δέκτη (κινητό τηλέφωνο) του καλούμενου χρήστη, όπου τα ραδιοκύματα μετατρέπονται ξανά σε ήχο (φωνή).

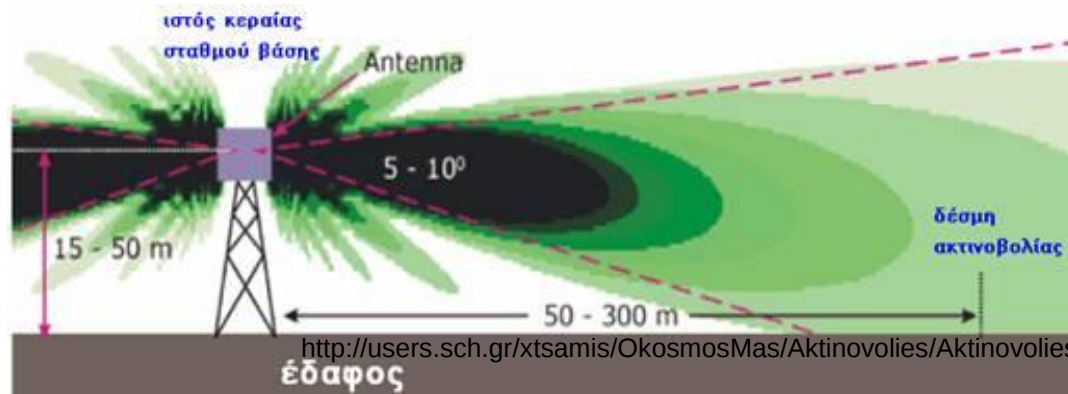


Κινητή τηλεφωνία και ημ κύματα

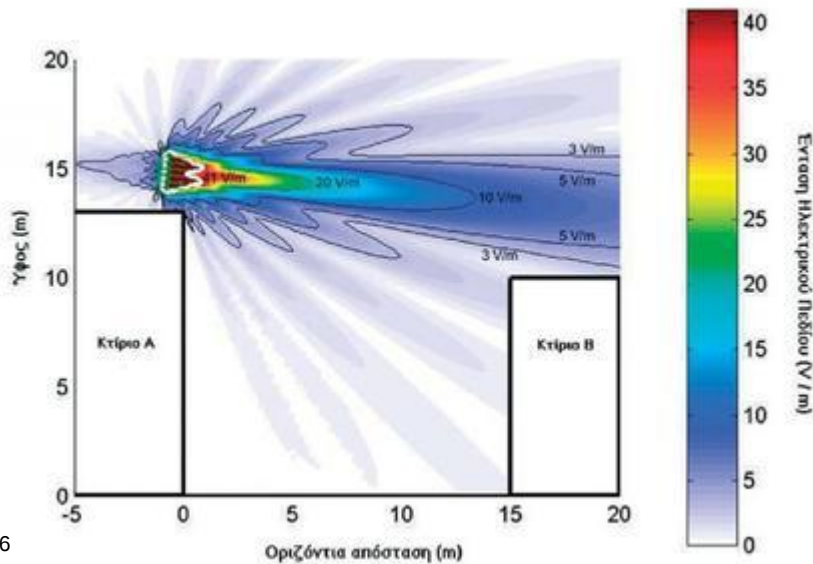


<https://www.e-nomothesia.gr/nomikes-plirofories/nomiko-plaisio-giati-nadeiodotese-ton-keraion.html>





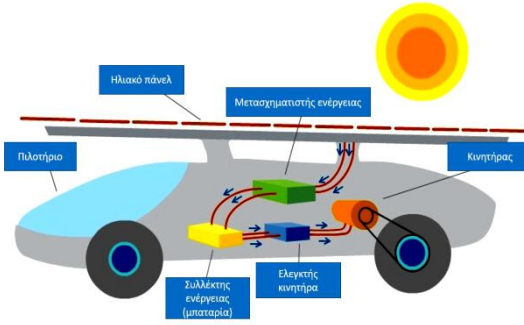
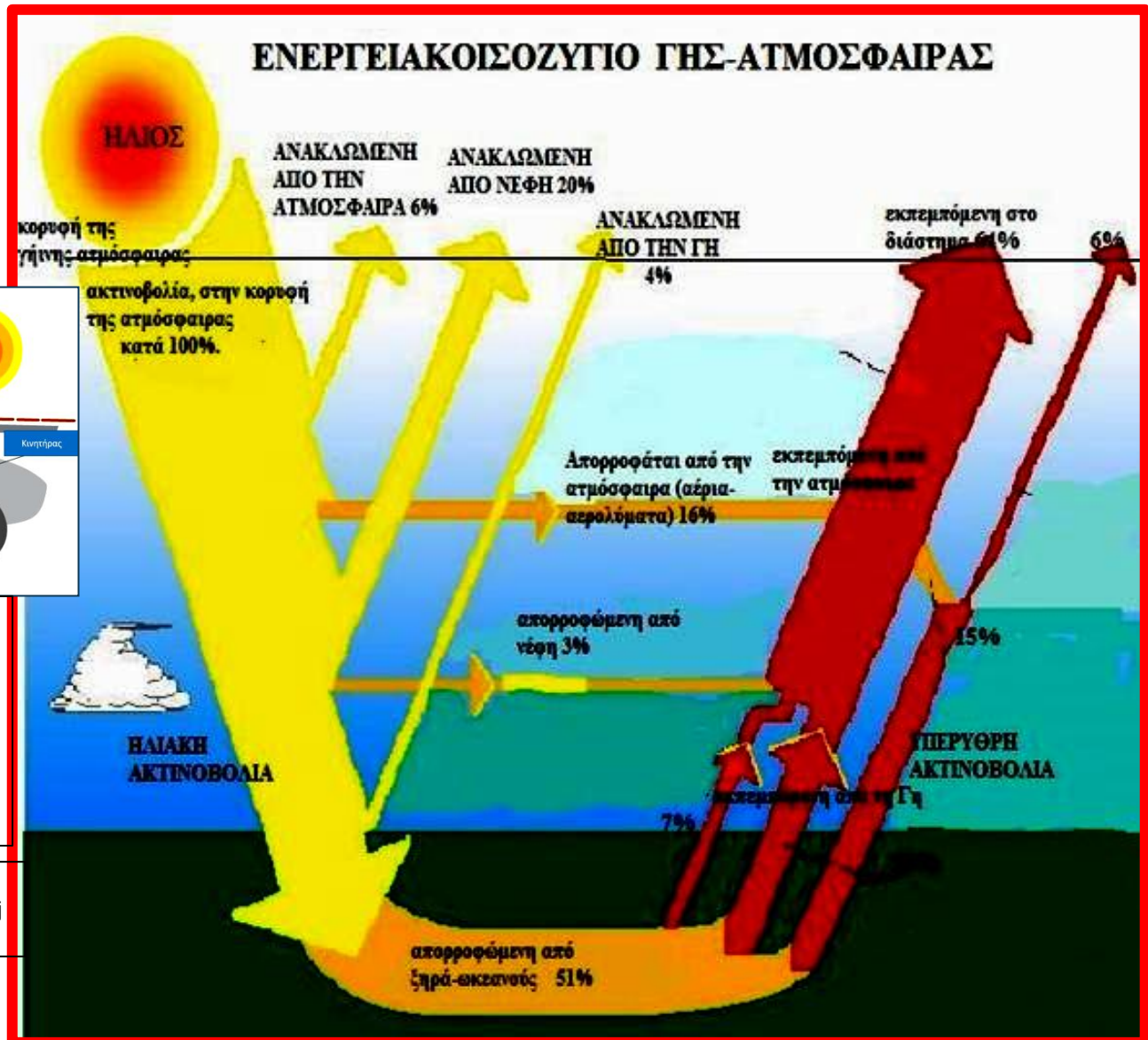
<http://users.sch.gr/xtsamis/OkosmosMas/Aktinovolies/Aktinovolies.htm>



https://eeae.gr/docs/president/_KINHTA-final.pdf

<http://angnikolou.mysch.gr/mobilephones/tauiota-epsilon943nualphaiota-omicroniota-sigmataualphathetamuomicron943-beta940sigmaetasigmaf-kappaiotanuetatau942sigmaf-tauetalambdaepsilonphiomeganu943alphasigmaf.html>

Ηλιακή ακτινοβολία



http://www.pspa.eu/images/files/ergasies_mathiton/technologia/agymn/2016-17/%CE%9A%CE%9F%CE%A5%CE%A4%CE%A3%CE%9F%CE%A5%CE%9C%CE%97%CE%A4%CE%9F%CE%A0%CE%9F%CE%A5%CE%9B%CE%9F%CE%A5_%CE%B7%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%BF%CF%8D_%CE%BF%CF%87%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%82.pdf

<http://physics4u.gr/blog/wp-content/uploads/2016/04/image020.jpg>

Φωτοβολταϊκά συστήματα

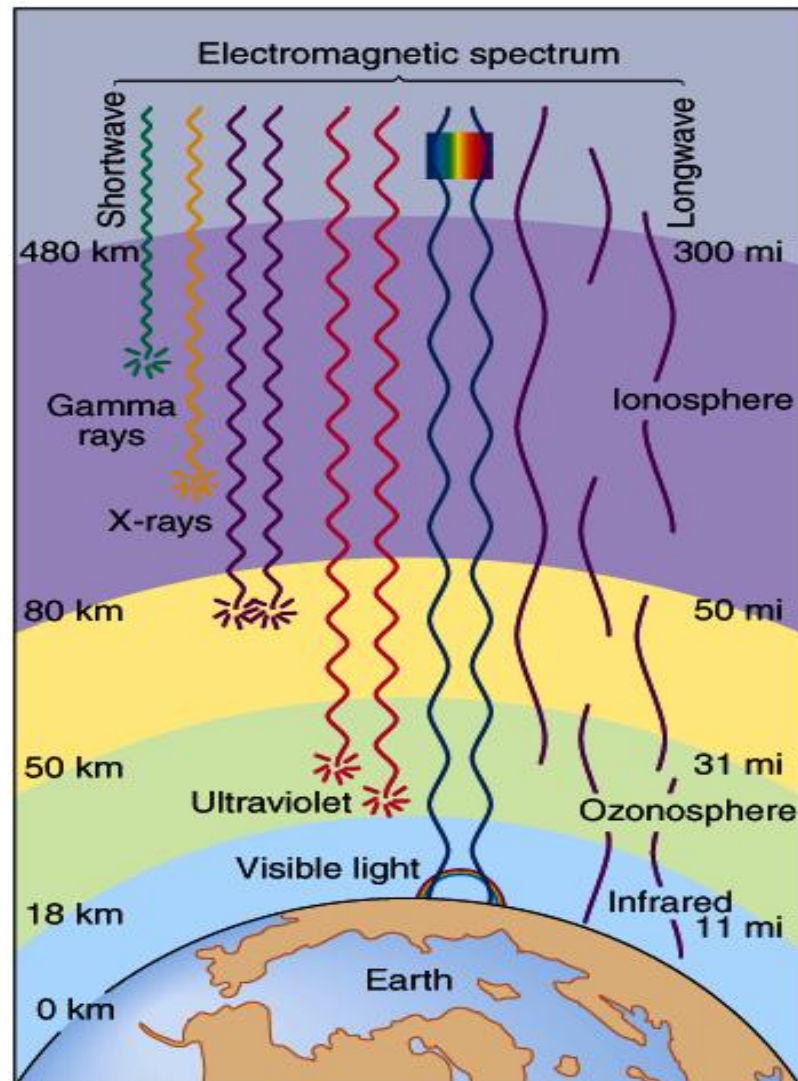
Τα φωτοβολταϊκά (ή Φ/Β) συστήματα αποτελούν μια από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, με τεράστιο ενδιαφέρον για την Ελλάδα. Εκμεταλλευόμενο το **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**, το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την **ηλιακή ενέργεια** (ηλεκτρομαγνητικά κύματα).

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή **πλαίσια**, ή όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο, «κρύσταλλα») **φωτοβολταϊκών στοιχείων** (ή «**κυψελών**», ή «**κυττάρων**»), μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160mm. Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το **άμορφο** και το **κρυσταλλικό πυρίτιο**, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε **μονοκρυσταλλικό** ή **πολυκρυσταλλικό**. Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα, και κατά τη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια της ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις κλπ.) ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία.



ΗΜ Φάσμα που φθάνει στη Γη από το διάστημα

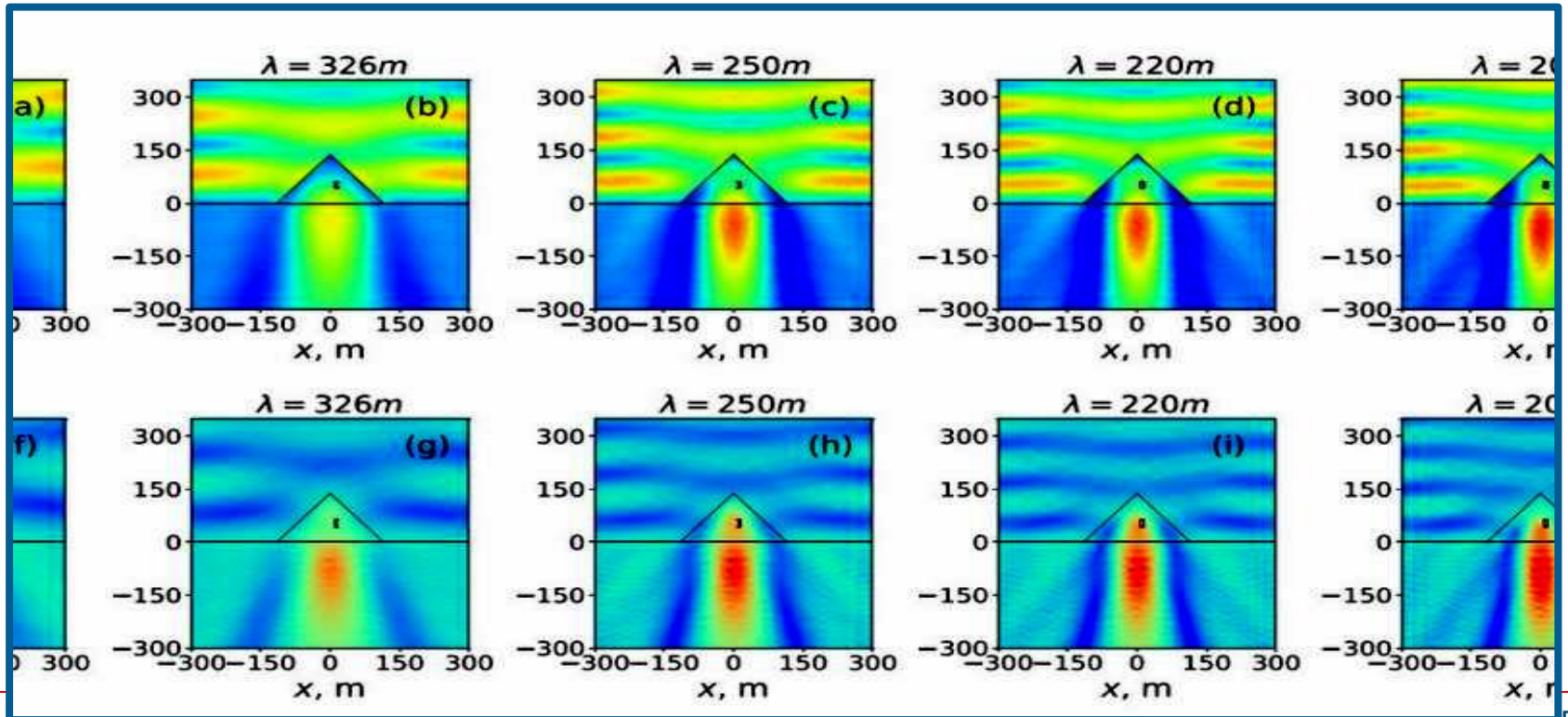


http://esperia.iesl.forth.gr/~kafesaki/Modern-Physics/various/electro_spectrum.jpg

Η μεγάλη πυραμίδα της Γκίζας εστιάζει ηλεκτρομαγνητικά κύματα (;)

Μέσω μελετών Θεωρητικής Φυσικής υπολογίσθηκε ότι η μεγάλη πυραμίδα της Γκίζας μπορεί να εστιάζει ηλεκτρομαγνητικά κύματα στο χώρο των εσωτερικών θαλάμων της καθώς και κάτω από τη βάση της [*Journal of Applied Physics* (2018).

[DOI: 10.1063/1.5026556](https://doi.org/10.1063/1.5026556)



Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και ανθρώπινη υγεία

Τα όρια ασφαλούς έκθεσης στα πεδία

Η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μελετάται συστηματικά από τη **Διεθνή Επιτροπή Προστασίας έναντι Μη Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας (ICNIRP)**, σε συνεργασία με το Περιβαλλοντικό Τμήμα της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας (WHO), με αποτέλεσμα έκδοση οδηγίας το 1998, η οποία υιοθετήθηκε από την Ε.Ε. και ενσωματώθηκε στην ελληνική νομοθεσία.

Η οδηγία καθορίζει τα όρια ασφαλούς συνεχούς έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία, ως εξής:

- **100 μ T (μικροτέσλα), για το μαγνητικό πεδίο**
- **5000 V/m (βόλτ ανά μέτρο), για το ηλεκτρικό πεδίο.**

Πρέπει να σημειώσουμε ότι οι παραπάνω τιμές **αποτελούν όρια πρόληψης** και **δεν είναι όρια επικινδυνότητας**, αλλά εμπεριέχουν πολύ μεγάλους συντελεστές ασφαλείας, ώστε να πληρούται η απαίτηση για πρόληψη τυχόν δυσμενών επιπτώσεων.

Πληροφορίες υπάρχουν επίσης στον διαδικτυακό τόπο της **Ελληνικής Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας**, www.eeae.gr, η οποία είναι μεταξύ των άλλων και υπεύθυνη για την ακτινοπροστασία του πληθυσμού στην Ελλάδα.



<https://www.dei.gr/el/eksupiretisi-pelatwn/themata-pelatwn/to-ilektriko-reuma-kai-emeis/ilektrika-magnitika-pedia-kai-anthrwpini-ugeia>

Παράρτημα: Συνοπτική παρουσίαση Ηλεκτρομαγνητισμού

(κείμενα από το ιστολόγιο: <https://physicsgg.me/>)

Μέχρι τον 19ο αιώνα οι επιστήμονες θεωρούσαν την ηλεκτρική και τη μαγνητική δύναμη ως δυο τελείως διαφορετικές δυνάμεις. Οι εξισώσεις Maxwell σηματοδότησαν και **την πρώτη ενοποίηση δυνάμεων**. Το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο – που ευθύνονται για την ηλεκτρική και τη μαγνητική δύναμη – απεδείχθη ότι αποτελούν τις δύο όψεις του ιδίου νομίσματος. (Ας σημειωθεί ότι η πρώτη ενοποίηση δυνάμεων επετεύχθη πριν από περίπου 160 χρόνια, το 1861 με την δημοσίευση του άρθρου «**On physical lines of force**» από τον σκωτσέζο φυσικό **James Clerk Maxwell**).

Στις εξισώσεις Maxwell συμπυκνώνονται όλοι οι νόμοι που συναντάμε στον ηλεκτρομαγνητισμό.....

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:

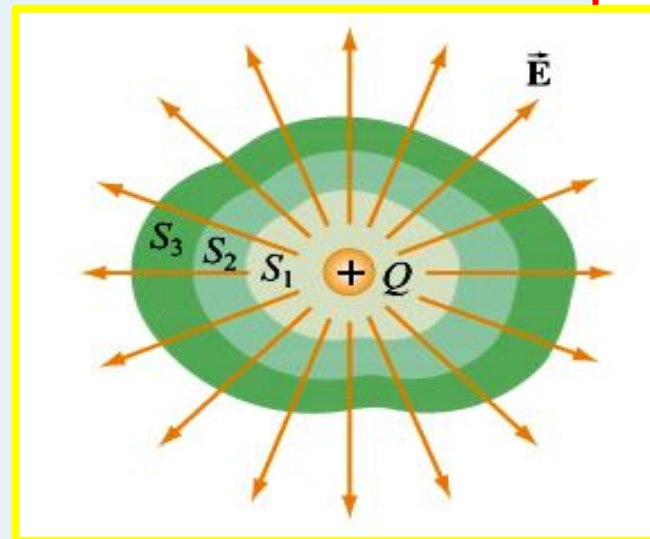
Εξίσωση 1η

Πρόκειται για το νόμο του Gauss για το ηλεκτρικό πεδίο, σύμφωνα με τον οποίο η ηλεκτρική ροή μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογη με το συνολικό φορτίο Q_{in} που περικλείει η επιφάνεια.

$$\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{Q_{in}}{\epsilon_0}$$

Η διαφορική μορφή του νόμου του Gauss είναι:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$$



και η φυσική σημασία της παραπάνω μορφής είναι ότι συνδέει το ηλεκτρικό πεδίο E σε κάποιο σημείο του χώρου με την κατανομή φορτίου, που εκφράζεται με την πυκνότητα ρ , στο ίδιο σημείο του χώρου. Εκφράζει δηλαδή, μια τοπική σχέση μεταξύ των δυο αυτών φυσικών ποσοτήτων. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι τα ηλεκτρικά φορτία είναι οι πηγές του ηλεκτρικού πεδίου και ότι η κατανομή και το μέγεθός τους ορίζουν το ηλεκτρικό πεδίο σε κάθε σημείο του χώρου.

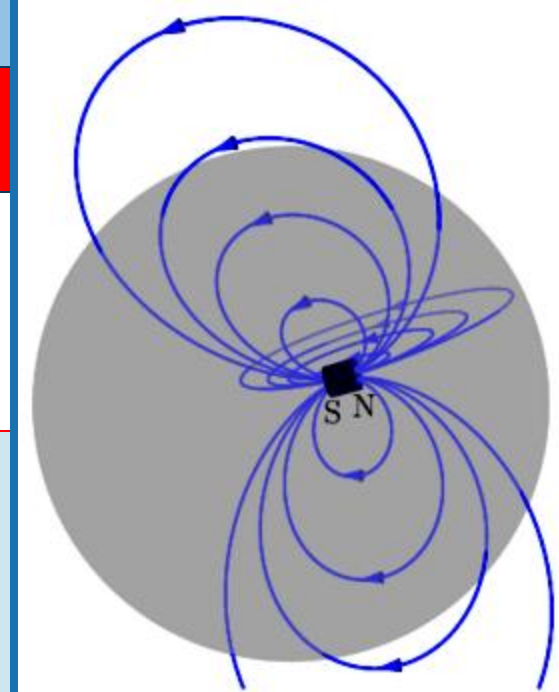
Εξίσωση 2η

Είναι ο νόμος του Gauss για το μαγνητικό πεδίο

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Η μαγνητική ροή που διέρχεται μέσα από μια κλειστή επιφάνεια είναι πάντοτε μηδέν. Και αυτό είναι συνέπεια του γεγονότος ότι οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές είναι κλειστές (αφού δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα). Η διαφορική μορφή θα είναι:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$



Εξίσωση 3η:

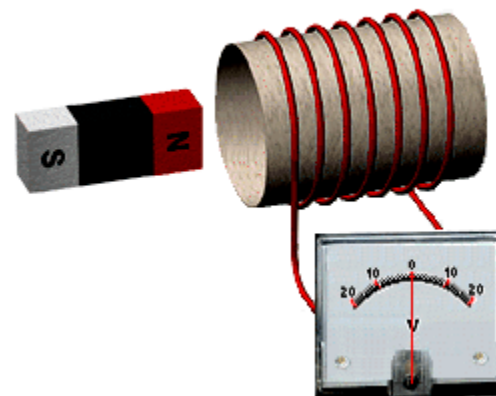
Είναι ο νόμος του Faraday-Henry ή νόμος της επαγωγής σύμφωνα με τον οποίο, ένα μαγνητικό πεδίο που μεταβάλλεται με τον χρόνο δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο, τέτοιου ώστε η κυκλοφορία του (αλλιώς, η ηλεκτρεγερτική δύναμη) κατά μήκος ενός αυθαίρετου κλειστού δρόμου, να ισούται με τον (αρνητικό) ρυθμό μεταβολής της μαγνητικής ροής μέσα από μια επιφάνεια που ορίζεται από τον δρόμο

$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d \left(\int_S \vec{B} d\vec{S} \right)}{dt} = \int_S \left(- \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) d\vec{S}$$

Σε διαφορική μορφή γράφεται

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

Faradays Law of Induction



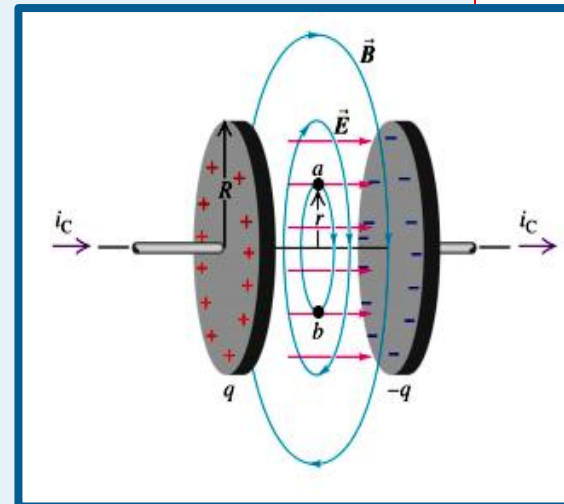
Kieran Mckenzie

Εξίσωση 4η:

Πρόκειται για το νόμο Ampere-Maxwell. Ο νόμος του Ampere συσχετίζει ένα ηλεκτρικό ρεύμα με το μαγνητικό πεδίο που παράγει. Ο νόμος Ampere-Maxwell πηγαίνει ένα βήμα μακρύτερα και υποδεικνύει ότι στο μαγνητικό πεδίο συνεισφέρει επίσης και ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_{in} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\left(\int_S \vec{E} d\vec{S}\right)}{dt}$$

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



Η διαφορική μορφή συσχετίζει το μαγνητικό πεδίο B , το ηλεκτρικό πεδίο E και την πυκνότητα ρεύματος j στο ίδιο σημείο του χώρου. Ο δεύτερος όρος στην 4η εξίσωση είναι συνεισφορά του Maxwell και αποτελεί το περίφημο ρεύμα μετατόπισης. Μας λέει ότι το μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο.

Το μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο με τη σειρά του (λόγω της εξίσωσης 3) δημιουργεί μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο κ.ο.κ.

Με λίγα λόγια το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μπορεί να «αυτοσυντηρηθεί» χωρίς να χρειάζεται την ύπαρξη της αρχικής πηγής του, του φορτίου και του ρεύματος.....

ΚΑΙ ΕΙΠΤΕΝ Ο ΘΕΟΣ

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho(\vec{r})}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

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

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

... ΚΑΙ ΕΓΕΝΕΤΟ ΦΩΣ !

Θεωρώντας ως δεδομένες τις εξισώσεις Maxwell:

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

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

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

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

θα απαλείψουμε από την εξίσωση (3) το μαγνητικό πεδίο και το ηλεκτρικό πεδίο από την εξίσωση (4).

Θεωρούμε τον στροβιλισμό και των δυο μελών της εξίσωσης (3):

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

Στην παραπάνω εξίσωση το $\vec{\nabla} \times \vec{B}$ μπορεί να αντικατασταθεί από το δεύτερο μέλος της εξίσωσης (4), και δεδομένου ότι ισχύει

$$\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{E}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}$$

θα έχουμε:

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$$

Χρησιμοποιώντας την πρώτη εξίσωση Maxwell και αναδιατάσσοντας τους όρους παίρνουμε:

$$\nabla^2 \vec{E} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \vec{\nabla} \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{j}}{\partial t} \quad (5)$$

Με παρόμοιο τρόπο προκύπτει εύκολα και η αντίστοιχη εξίσωση για το μαγνητικό πεδίο:

$$\nabla^2 \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{j} \quad (6)$$

Οι εξισώσεις (5) και (6) αποτελούν μορφές της μη ομογενούς κυματικής εξίσωσης :

$$\nabla^2 y - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f(\vec{r}, t)$$

Έτσι, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο ικανοποιούν τις κυματικές εξισώσεις, το δεύτερο μέλος των οποίων αντιπροσωπεύει τις πηγές του κάθε πεδίου (πυκνότητες φορτίων και ηλεκτρικών ρευμάτων), ενώ η αντίστοιχη ταχύτητα διάδοσης θα είναι:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \cong 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

που δεν είναι τίποτε άλλο παρά η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό..

Αν και δεν αρκεί μόνο αυτό το επιχείρημα – το γεγονός ότι η ταχύτητα του φωτός ταυτίζεται με την ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ήταν μια από τις ισχυρότερες ενδείξεις ότι το φως πράγματι είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Στην περίπτωση που στον κενό χώρο δεν υπάρχουν πηγές των πεδίων (φορτία και ρεύματα) τότε οι εξισώσεις (5) και (6) παίρνουν τις απλούστερες μορφές που περιέχονται στην παρακάτω εικόνα:

The Laplacian operator
 ∇^2
 The vector electric field
 $\vec{E}$
 The electric permittivity of free space
 ϵ_0
 The vector electric field
 $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$
 The magnetic permeability of free space
 μ_0
 The second derivative of the vector electric field over space
 The second derivative of the vector electric field with time

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

The Laplacian operator
 ∇^2
 The vector magnetic field
 $\vec{B}$
 The electric permittivity of free space
 ϵ_0
 The vector magnetic field
 $\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2}$
 The magnetic permeability of free space
 μ_0
 The second derivative of the vector magnetic field over space
 The second derivative of the vector magnetic field with time

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

Πίνακες ανακεφαλαίωσης

https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/presentations/02a_maxwell.pdf

Name	Differential form	Integral form
Gauss's law:	$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$	$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = \int_V \rho dV$
Gauss' law for magnetism (absence of magnetic monopoles):	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$
Faraday's law of induction:	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} - \oint_C \mathbf{B} \times \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$
Ampère's law (with Maxwell's extension):	$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$	$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$

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

Maxwell discovered that this quantity c is simply the speed of light in vacuum

https://www.ceid.upatras.gr/webpages/faculty/alexiou/ahts/presentations/02a_maxwell.pdf

Symbols Used		
$\mathbf{E}$ = Electric field	ρ = charge density	i = electric current
$\mathbf{B}$ = Magnetic field	ϵ_0 = permittivity	$\mathbf{J}$ = current density
$\mathbf{D}$ = Electric displacement	μ_0 = permeability	c = speed of light
$\mathbf{H}$ = Magnetic field strength	$\mathbf{M}$ = Magnetization	$\mathbf{P}$ = Polarization

Maxwell's Equations

Integral form in the absence of magnetic or polarizable media:

I. [Gauss' law for electricity](#) $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{q}{\epsilon_0}$

II. [Gauss' law for magnetism](#) $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$

III. [Faraday's law of induction](#) $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$

IV. [Ampere's law](#) $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i + \frac{1}{c^2} \frac{\partial}{\partial t} \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$

Maxwell's Equations

Differential form in the absence of magnetic or polarizable media:

I. [Gauss' law for electricity](#) $\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} = 4\pi k \rho$

II. [Gauss' law for magnetism](#) $\nabla \cdot B = 0$

III. [Faraday's law of induction](#) $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$

IV. [Ampere's law](#)

$$\nabla \times B = \frac{4\pi k}{c^2} J + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$= \frac{J}{\epsilon_0 c^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = \text{Coulomb's constant} \quad c^2 = \frac{1}{\mu_0\epsilon_0}$$

Note: $\nabla \cdot E$ and $\nabla \times E$ here represent the vector operations [divergence](#) and [curl](#), respectively.

Maxwell's Equations

Differential form with magnetic and/or polarizable media:

I. Gauss' law for electricity $\nabla \cdot D = \rho$

$$D = \epsilon_0 E + P$$

*General
case*

$$D = \epsilon_0 E$$

Free space

$$D = \epsilon E$$

*Isotropic linear
dielectric*

II. Gauss' law for magnetism $\nabla \cdot B = 0$

III. Faraday's law of induction $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$

IV. Ampere's law $\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$

$$B = \mu_0 (H + M)$$

*General
case*

$$B = \mu_0 H$$

Free space

$$B = \mu H$$

*Isotropic linear
magnetic medium*

Παράρτημα: Υπενθύμιση στοιχείων από Διανυσματική Ανάλυση

Ο διαφορικός διανυσματικός τελεστής ανάδελτα:

$$\vec{\nabla} = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z}$$

Κλίση ή βαθμίδα βαθμωτής συνάρτησης:

Όταν ο τελεστής ανάδελτα δρα σε βαθμωτή συνάρτηση ονομάζεται κλίση ή βαθμίδα:

$$\text{grad}V = \vec{\nabla}V = \hat{x} \frac{\partial V}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial V}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial V}{\partial z}$$

Απόκλιση διανυσματικής συνάρτησης:

Όταν ο τελεστής ανάδελτα δρα σε διανυσματική συνάρτηση ως εσωτερικό γινόμενο ονομάζεται απόκλιση:

$$\text{div}\vec{E} = \vec{\nabla}\vec{E} = \left(\hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \right) (\hat{x} E_x + \hat{y} E_y + \hat{z} E_z)$$

ή κάνοντας τις πράξεις

$$\text{div}\vec{E} = \vec{\nabla}\vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$$

Στροβιλισμός διανυσματικής συνάρτησης:

Όταν ο τελεστής ανάδελτα δρα σε διανυσματική συνάρτηση ως εξωτερικό γινόμενο ονομάζεται στροβιλισμός:

$$\text{curl} \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ E_x & E_y & E_z \end{vmatrix}$$

Αν υπολογίσουμε την ορίζουσα παίρνουμε

$$\text{curl} \vec{E} = \vec{\nabla} \times \vec{E} = \hat{x} \left(\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} \right) + \hat{y} \left(\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) + \hat{z} \left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right)$$

Θεώρημα Gauss:

Το ολοκλήρωμα της απόκλισης ενός διανυσματικού πεδίου πάνω σε έναν τυχόντα όγκο V ισούται με το επιφανειακό ολοκλήρωμα του πεδίου πάνω στην κλειστή επιφάνεια S που περικλείει αυτόν τον όγκο:

$$\int_V \vec{\nabla} \cdot \vec{A} dV = \oint_S \vec{A} \cdot d\vec{S}$$

Παρατηρούμε ότι το “ολοκλήρωμα” της “παραγώγου” της διανυσματικής συνάρτησης A ισούται με τις “τιμές” της “παραγωγιζόμενης” συνάρτησης A στο σύνορο S της περιοχής ολοκλήρωσης V (από ολοκλήρωμα σε τρεις διατάσεις πάμε σε ολοκλήρωμα δύο διαστάσεων).

Θεώρημα Stokes:

Το επιφανειακό ολοκλήρωμα του στροβιλισμού ενός διανυσματικού πεδίου πάνω σε μια τυχούσα επιφάνεια S ισούται με το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του πεδίου πάνω στην κλειστή γραμμή C στην οποία καταλήγει η επιφάνεια:

$$\int_S (\vec{\nabla} \times \vec{A}) \cdot d\vec{S} = \oint_C \vec{A} \cdot d\vec{l}$$

Παρατηρούμε ότι το “ολοκλήρωμα” της “παραγώγου” της συνάρτησης A ισούται με τις “τιμές” της “παραγωγιζόμενης” συνάρτησης A στο σύνορο C της περιοχής ολοκλήρωσης (από ολοκλήρωμα δύο διαστάσεων πάμε σε ολοκλήρωμα μιας διάστασης).

Τελεστής Laplace (ή λαπλασιανή):

Είναι το εσωτερικό γινόμενο του ανάδελτα με τον εαυτό του:

$$\vec{\nabla}^2 = \left(\hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \right) \left(\hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \right) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Παράρτημα: Υπενθύμιση στοιχείων Γεωμετρικής Οπτικής

Η προσέγγιση των ακτίνων στη γεωμετρική οπτική

Ο κλάδος της γεωμετρικής οπτικής μελετά τον τρόπο διάδοσης του φωτός.

Στη γεωμετρική οπτική ισχύει η παραδοχή ότι, όταν το φως διέρχεται μέσα από ένα ομογενές μέσο, **διαδίδεται ευθύγραμμα**, και αλλάζει κατεύθυνση όταν έρθει σε επαφή με την επιφάνεια ενός διαφορετικού μέσου ή όταν οι οπτικές ιδιότητες του μέσου μεταβάλλονται.

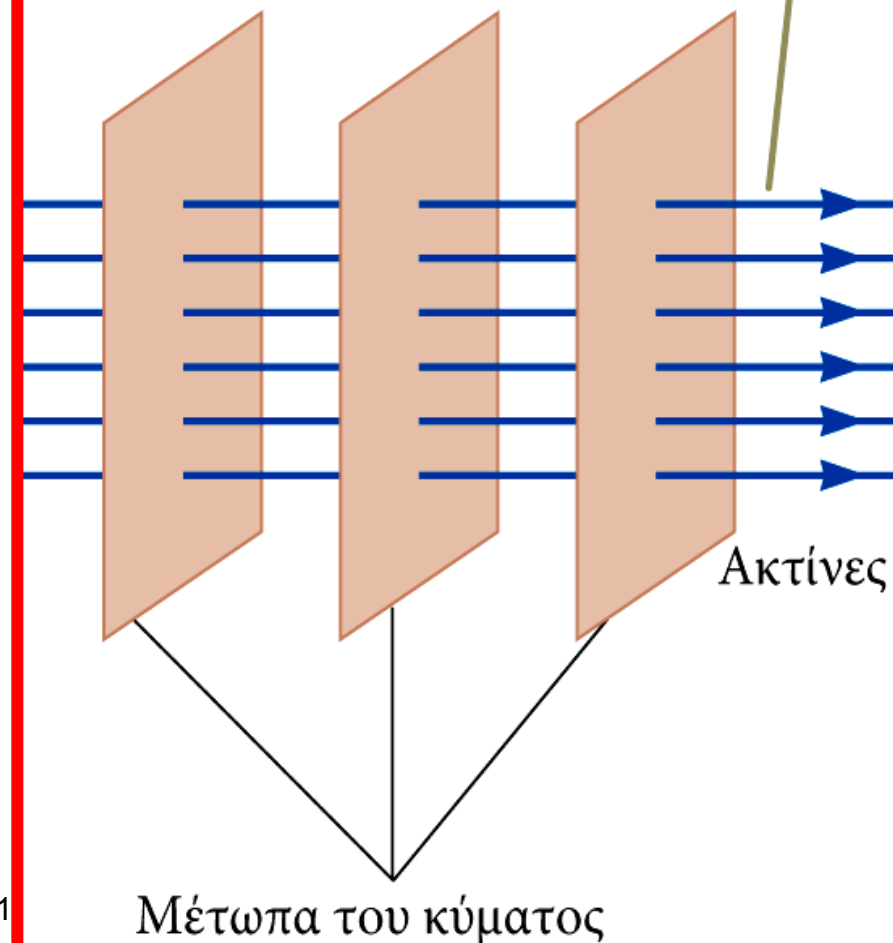
Χρησιμοποιούμε την προσέγγιση των ακτίνων για να παριστάνουμε τις ακτίνες φωτός.

Η προσέγγιση των ακτίνων

Οι ακτίνες είναι **ευθείες**, οι οποίες είναι κάθετες στα μέτωπα του κύματος.

Στην προσέγγιση των ακτίνων, υποθέτουμε ότι η κίνηση ενός κύματος το οποίο διαδίδεται σε κάποιο μέσο είναι ευθύγραμμη και έχει την κατεύθυνση των ακτίνων του.

Οι ακτίνες, οι οποίες δείχνουν πάντα προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος, είναι ευθείες κάθετες στα μέτωπα του κύματος.



Η προσέγγιση των ακτίνων (συνέχεια)

Αν ένα κύμα με μήκος λ συναντήσει ένα πέτασμα με οπή διαμέτρου d , και $\lambda \ll d$, τότε το κύμα που εξέρχεται από την οπή συνεχίζει να κινείται ευθύγραμμα.

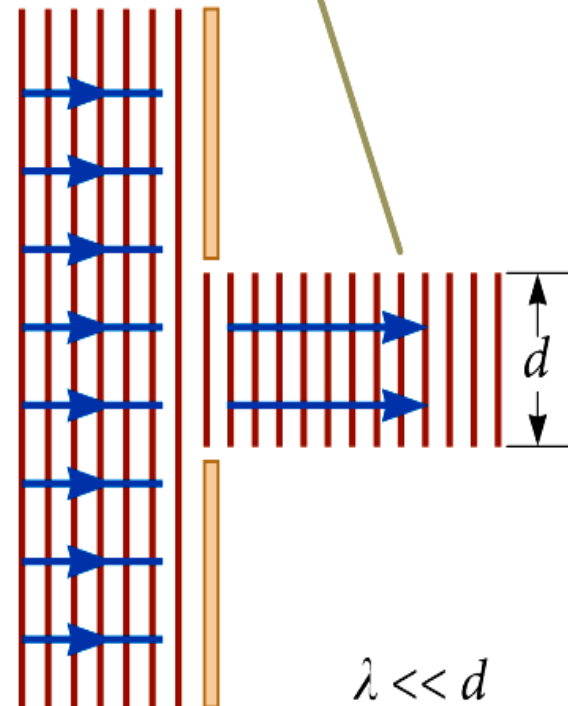
- d είναι η διάμετρος της οπής.
- Ενδέχεται να υπάρχουν κάποια ανεπαίσθητα φαινόμενα στα χείλη της οπής.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι χρήσιμη στη μελέτη κατόπτρων, φακών, πρισμάτων, κ.λπ.

Για οπές διαφορετικού μεγέθους είναι δυνατό να παρατηρηθούν άλλα φαινόμενα.

- Δείτε τις Εικόνες Ο1.4β και γ.

Όταν $\lambda \ll d$, οι ακτίνες συνεχίζουν να διαδίδονται ευθύγραμμα και η προσέγγιση των ακτίνων εξακολουθεί να ισχύει.



Ανάκλαση του φωτός

Μια ακτίνα φωτός, η *προσπίπτουσα ακτίνα*, διαδίδεται σε ένα μέσο.

Όταν φτάσει στο όριο με ένα δεύτερο μέσο, τότε *ένα μέρος της ανακλάται* και επιστρέφει στο πρώτο μέσο.

- Αυτό σημαίνει ότι διαδίδεται προς τα πίσω, με κατεύθυνση προς το πρώτο μέσο.

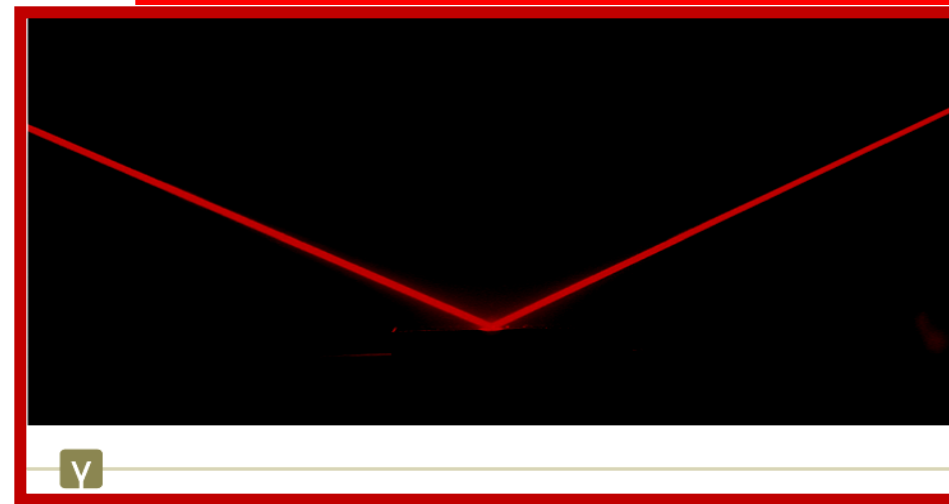
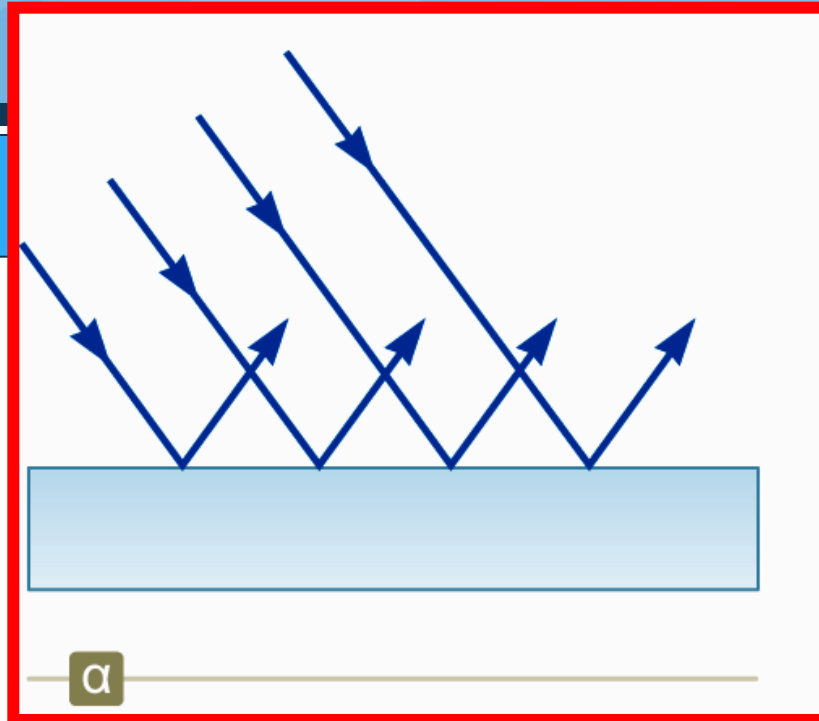
Στην περίπτωση κυμάτων φωτός που διαδίδονται στον τριδιάστατο χώρο, οι ανακλώμενες ακτίνες μπορεί να έχουν κατεύθυνση διαφορετική από αυτήν των προσπιπτουσών.

Κατοπτρική ανάκλαση

Η ανάκλαση του φωτός σε μια λεία επιφάνεια ονομάζεται **κατοπτρική ανάκλαση**.

Οι ανακλώμενες ακτίνες είναι παράλληλες μεταξύ τους.

Σε αυτό το βιβλίο, θα υποθέτουμε ότι όλες οι ανακλάσεις είναι κατοπτρικές.

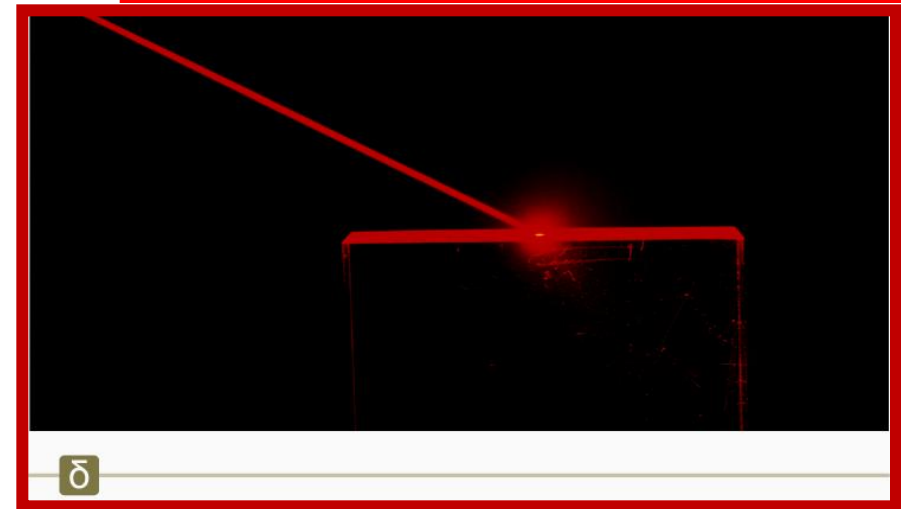
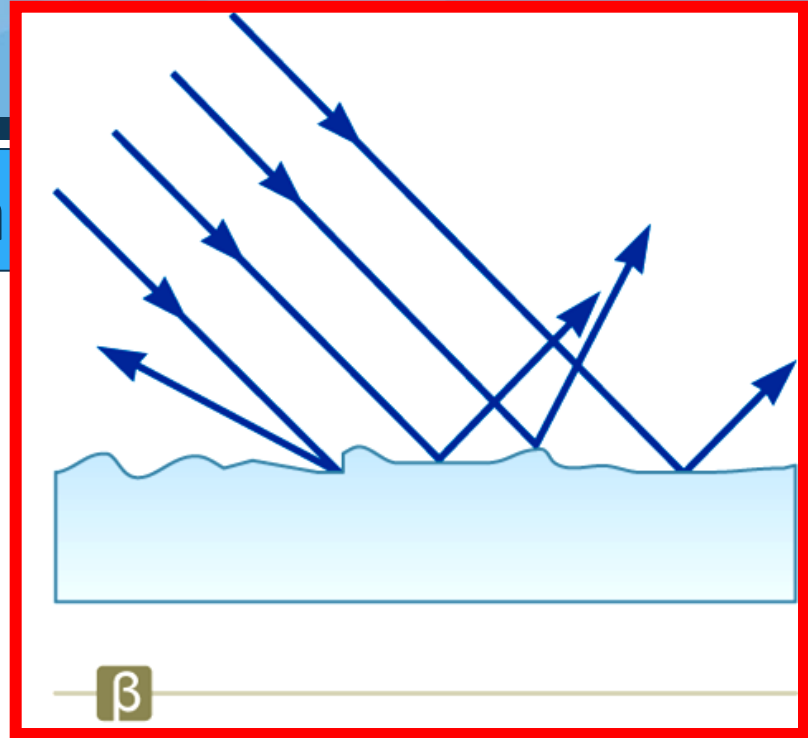


Διάχυτη ανάκλαση

Η ανάκλαση του φωτός σε μια τραχιά επιφάνεια ονομάζεται *διάχυτη ανάκλαση*.

Οι ανακλώμενες ακτίνες διαδίδονται προς διάφορες κατευθύνσεις.

Μια επιφάνεια συμπεριφέρεται ως λεία επιφάνεια όταν οι διακυμάνσεις των διαστάσεων των προεξοχών της είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος του φωτός.



Ο νόμος της ανάκλασης

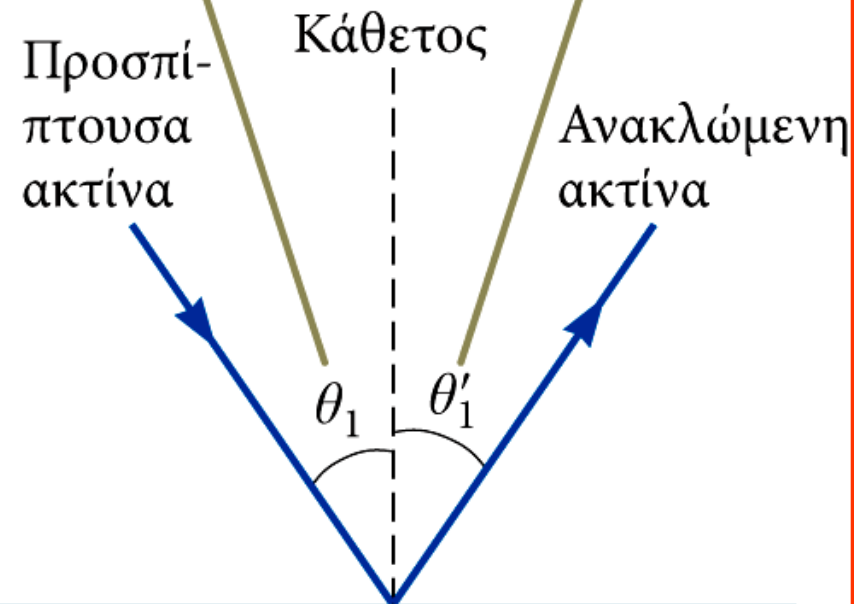
Ως **κάθετο** θεωρούμε μια ευθεία η οποία είναι κάθετη στην επιφάνεια.

- Θεωρούμε ότι είναι κάθετη στο σημείο όπου η προσπίπτουσα ακτίνα έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια.

Η προσπίπτουσα ακτίνα σχηματίζει γωνία θ_1 με την κάθετο.

Η ανακλώμενη ακτίνα σχηματίζει γωνία θ_1' με την κάθετο.

Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα, και η κάθετος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, και ισχύει $\theta_1 = \theta_1'$.



Νόμος της ανάκλασης (συνέχεια)

Η γωνία ανάκλασης είναι ίση με τη γωνία πρόσπτωσης:

$$\theta_1' = \theta_1$$

- Η παραπάνω σχέση ονομάζεται *νόμος της ανάκλασης*.

Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα, και η κάθετος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Σημείωση για τον συμβολισμό:

- Ο δείκτης 1 αναφέρεται σε παραμέτρους του φωτός στο αρχικό μέσο διάδοσής του.
- Αν το φως περάσει σε κάποιο άλλο μέσο, χρησιμοποιούμε τον δείκτη 2 για τις παραμέτρους στο νέο μέσο.

Επειδή η ανάκλαση των κυμάτων είναι συνηθισμένο φαινόμενο, ορίζουμε ένα μοντέλο ανάλυσης για την περίπτωση αυτή, το μοντέλο ανάλυσης του ανακλώμενου κύματος.

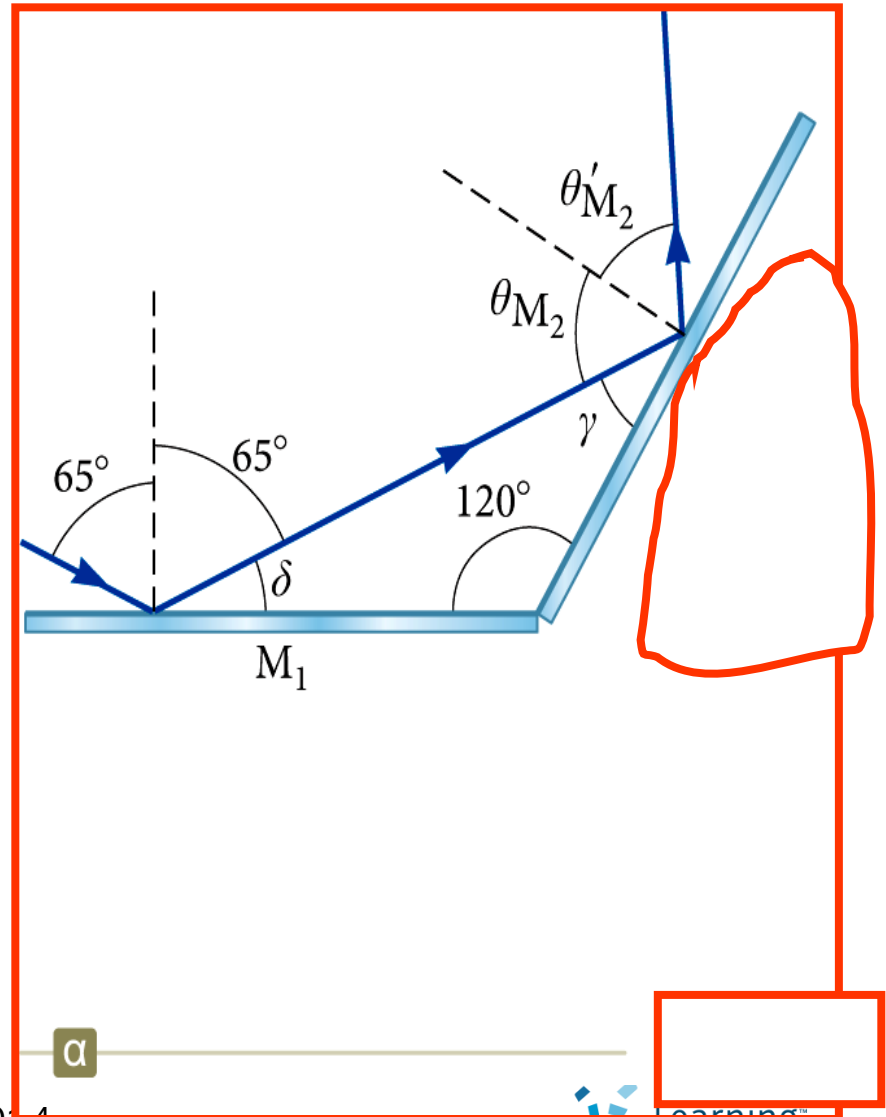
Πολλαπλή ανάκλαση

Η προσπίπτουσα ακτίνα προσπίπτει στο πρώτο κάτοπτρο.

Η ανακλώμενη ακτίνα κατευθύνεται προς το δεύτερο κάτοπτρο.

Στο δεύτερο κάτοπτρο συμβαίνει μια δεύτερη ανάκλαση.

Θα εφαρμόσουμε τον νόμο της ανάκλασης και ορισμένες γεωμετρικές σχέσεις για να βρούμε πληροφορίες σχετικά με τις ακτίνες.



Αντανάκλαση

Ας υποθέσουμε ότι η γωνία μεταξύ των δύο κατόπτρων ισούται με 90° .

Η ανακλώμενη δέσμη επιστρέφει στην πηγή παράλληλα στην αρχική της διαδρομή.

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αντανάκλαση** (ή **ανάστροφη ανάκλαση**).

Το φαινόμενο βρίσκει εφαρμογή:

- στη μέτρηση της απόστασης Γης-Σελήνης,
- στα πίσω φώτα των αυτοκινήτων,
- στις οδικές πινακίδες.

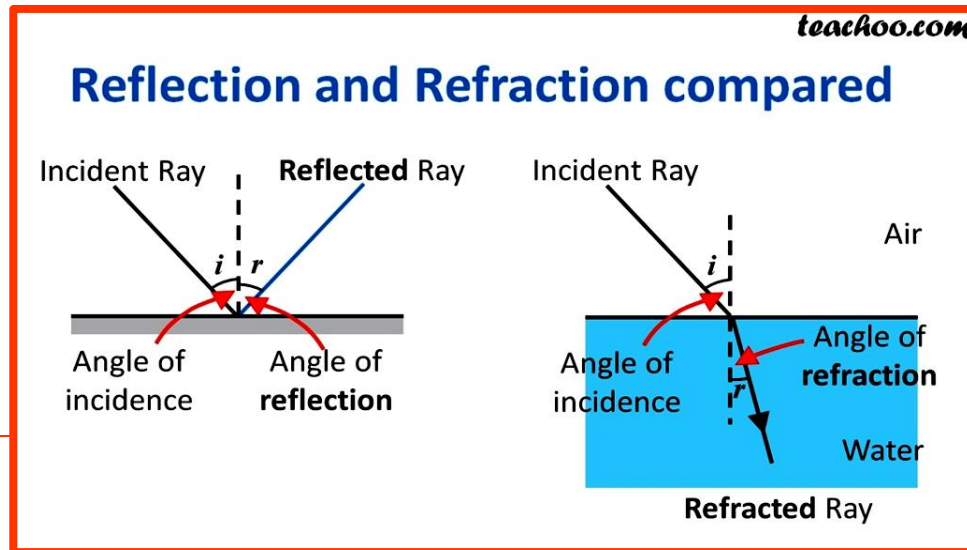
Διάθλαση του φωτός

Όταν μια ακτίνα φωτός που διαδίδεται σε ένα διαφανές μέσο φτάσει στο όριο κάποιου άλλου διαφανούς μέσου, τότε ένα μέρος της ενέργειάς της ανακλάται και το υπόλοιπο εισέρχεται στο δεύτερο μέσο.

Η ακτίνα που εισέρχεται στο δεύτερο μέσο αλλάζει κατεύθυνση στο όριο μεταξύ των δύο μέσων.

- Αυτή η εκτροπή της ακτίνας ονομάζεται **διάθλαση**.

■ -----



<https://www.teachoo.com/10831/3118/Refraction-of-Light/category/Concepts/>

Διάθλαση του φωτός (συνέχεια)

Η προσπίπτουσα ακτίνα, η ανακλώμενη ακτίνα, η διαθλώμενη ακτίνα, και η κάθετος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Η γωνία διάθλασης εξαρτάται από το υλικό, καθώς και από τη γωνία πρόσπτωσης.

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{v_2}{v_1}$$

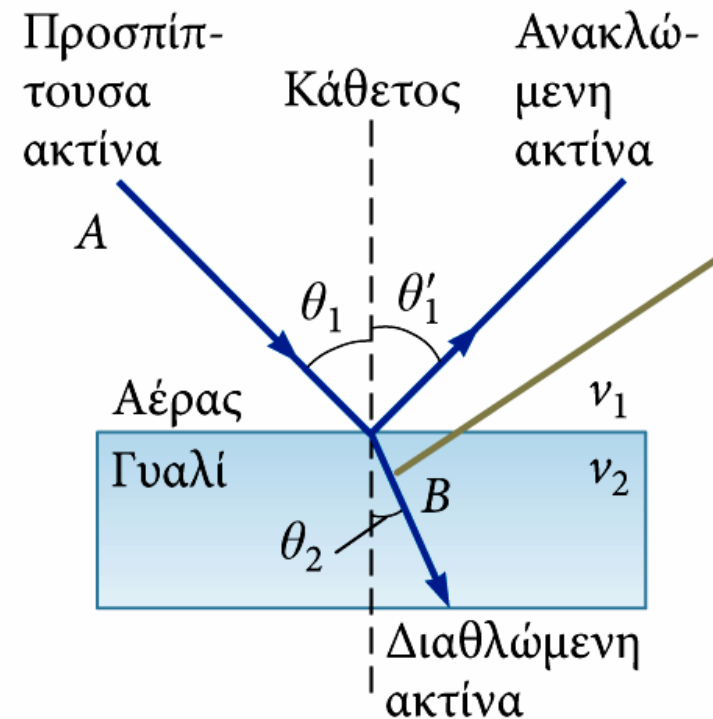
- Όπου v_1 και v_2 είναι η ταχύτητα του φωτός στο πρώτο και στο δεύτερο μέσο διάδοσης, αντίστοιχα.

Διάθλαση του φωτός (τελική διαφάνεια)

Η διαδρομή του φωτός το οποίο διέρχεται από τη διαθλαστική επιφάνεια είναι αντιστρέψιμη.

- Για παράδειγμα, μια ακτίνα ξεκινά από το μέσο 1 ακολουθώντας τη διαδρομή A , και διαθλάται στο μέσο 2 ακολουθώντας τη διαδρομή B .
- Αν η ακτίνα είχε ξεκινήσει από το μέσο 2 ακολουθώντας τη διαδρομή B , τότε θα έπρεπε να διαθλαστεί στο μέσο 2 ακολουθώντας τη διαδρομή A .

Όλες οι ακτίνες και η κάθετος βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η διαθλώμενη ακτίνα εκτρέπεται προς την κάθετο επειδή $v_2 < v_1$.



α

Οι ανακλώμενες και οι διαθλώμενες ακτίνες

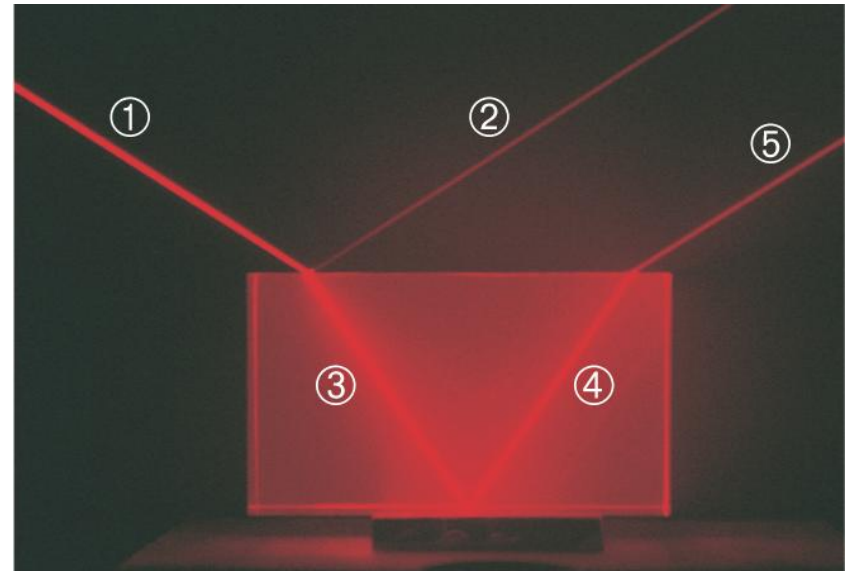
Η ακτίνα ① είναι η προσπίπτουσα ακτίνα.

Η ακτίνα ② είναι η ανακλώμενη ακτίνα.

Η ακτίνα ③ διαθλάται στο πλεξιγκλάς.

Η ακτίνα ④ ανακλάται εσωτερικά στο πλεξιγκλάς.

Η ακτίνα ⑤ διαθλάται καθώς εξέρχεται από το πλεξιγκλάς και εισέρχεται στον αέρα.



β

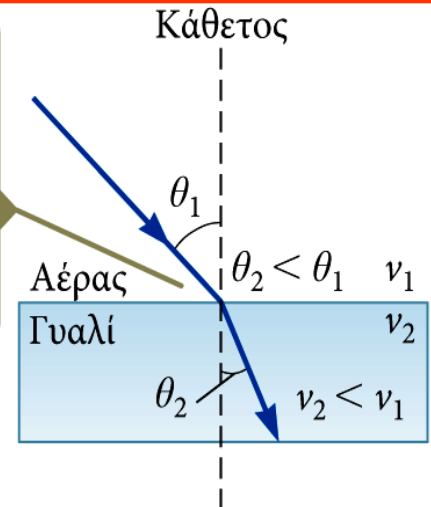
Οι λεπτομέρειες της διάθλασης (1)

Το φως διαθλάται όταν εισέρχεται σε ένα υλικό στο οποίο η ταχύτητά του είναι μικρότερη.

Η γωνία διάθλασης είναι μικρότερη από τη γωνία πρόσπτωσης.

- Η ακτίνα εκτρέπεται προς την κάθετο.

Όταν η φωτεινή δέσμη εισέλθει από τον αέρα στο γυαλί, το φως επιβραδύνει και εκτρέπεται προς την κάθετο.



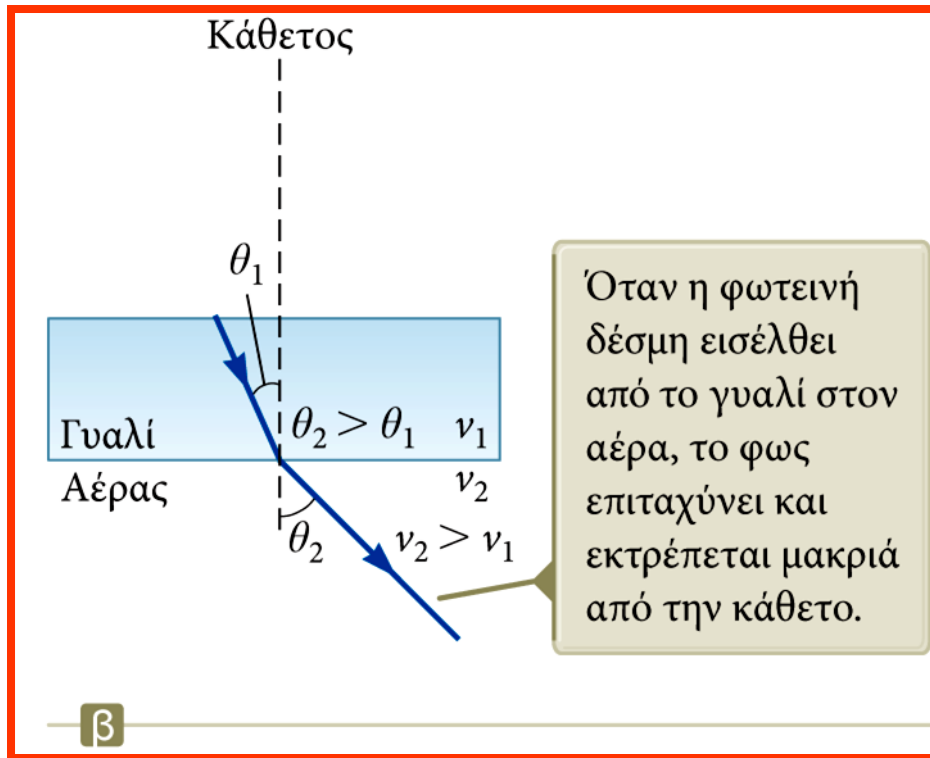
α

Οι λεπτομέρειες της διάθλασης (2)

Το φως διαθλάται όταν εισέρχεται σε ένα υλικό στο οποίο η ταχύτητά του είναι μεγαλύτερη.

Η γωνία διάθλασης είναι μεγαλύτερη από τη γωνία πρόσπτωσης.

- Η ακτίνα εκτρέπεται **μακριά** από την κάθετο.



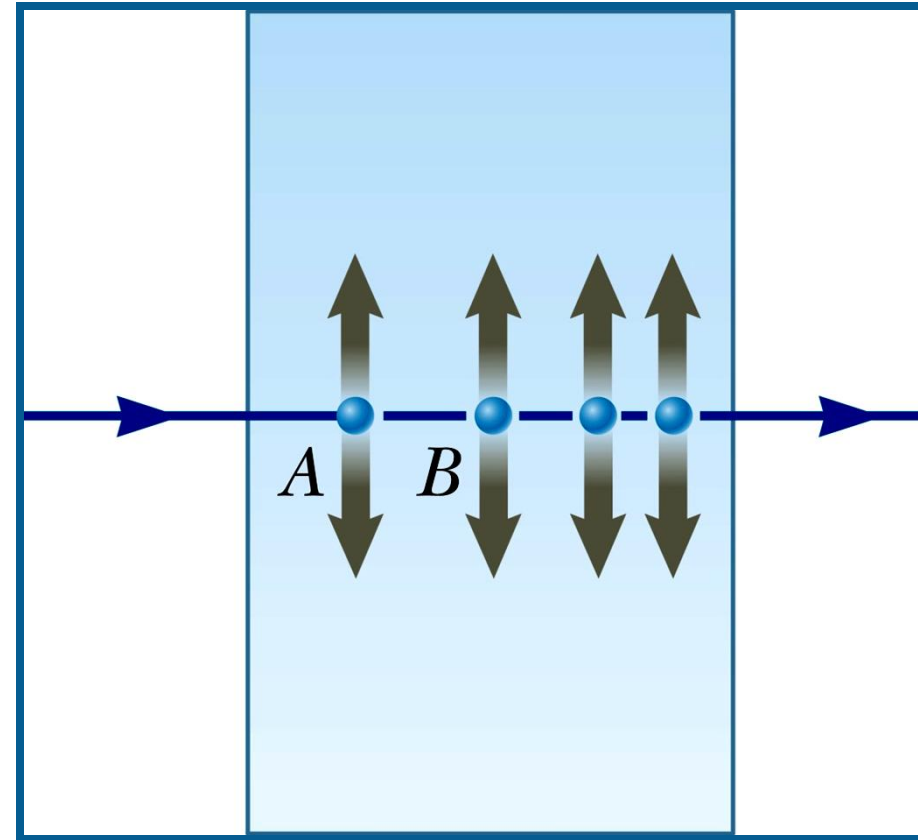
Διάδοση του φωτός στο εσωτερικό ενός μέσου

Το φως εισέρχεται στο γυαλί από τα αριστερά.

Το φως μπορεί να συναντήσει ένα ηλεκτρόνιο.

Το ηλεκτρόνιο ενδέχεται να απορροφήσει το φως, να ταλαντωθεί, και να το εκπέμψει ξανά.

Η απορρόφηση και η εκπομπή μειώνουν τη μέση ταχύτητα διάδοσης του φωτός μέσα στο υλικό.



Ο δείκτης διάθλασης

Η ταχύτητα διάδοσης του φωτός σε οποιοδήποτε υλικό είναι μικρότερη από την ταχύτητά του στο κενό.

Ο δείκτης διάθλασης n ενός μέσου μπορεί να οριστεί ως:

$$n \equiv \frac{\text{ταχύτητα του φωτός στο κενό}}{\text{ταχύτητα του φωτός σε ένα μέσο}} \equiv \frac{c}{v}$$

Ο δείκτης διάθλασης (συνέχεια)

Στο κενό, $n = 1$

- Υποθέτουμε επίσης ότι στον αέρα $n = 1$.

Για άλλα μέσα, $n > 1$.

Ο δείκτης διάθλασης n είναι ένας αδιάστατος αριθμός, μεγαλύτερος από τη μονάδα.

- Ο δείκτης διάθλασης n γενικά δεν είναι ακέραιος αριθμός.

Μερικοί δείκτες διάθλασης

ΠΙΝΑΚΑΣ Ο1.1

Δείκτες διάθλασης

Υλικό	Δείκτης διάθλασης	Υλικό	Δείκτης διάθλασης
Στερεά στους 20°C		Υγρά στους 20°C	
Κυβική ζirkονία	2.20	Βενζόλιο	1.501
Διαμάντι (C)	2.419	Διθειάνθρακας	1.628
Φθορίτης (CaF ₂)	1.434	Τετραχλωράνθρακας	1.461
Τηγμένος χαλαζίας (SiO ₂)	1.458	Αιθυλική αλκοόλη	1.361
Φωσφορούχο γάλλιο	3.50	Γλυκερίνη	1.473
Στεφανύαλος	1.52	Νερό	1.333
Πυριτύαλος	1.66		
Πάγος (H ₂ O)	1.309	Αέρια (0°C, 1 atm)	
Πολυστυρένιο	1.49	Αέρας	1.000 293
Χλωριούχο νάτριο (NaCl)	1.544	Διοξείδιο του άνθρακα	1.000 45

Σημείωση: Όλες οι τιμές αντιστοιχούν σε φως το οποίο έχει μήκος κύματος 589 nm στο κενό.

Συχνότητα σε διαφορετικά μέσα

Η συχνότητα του φωτός δεν μεταβάλλεται όταν περνά από ένα μέσο σε ένα άλλο.

- Όμως, τόσο η ταχύτητα του κύματος όσο και το μήκος του μεταβάλλονται.
- Εφόσον στο όριο τα μέτωπα του κύματος δεν συσσωρεύονται, δεν δημιουργούνται νέα, ούτε καταστρέφονται, η συχνότητα f πρέπει να παραμένει σταθερή.

Καθώς το κύμα περνά από το ένα μέσο στο άλλο, το μήκος του μεταβάλλεται, αλλά η συχνότητά του παραμένει σταθερή.

